太陽光電系統耐風設計及結構分析手冊之研擬

內政部建築研究所協同研究報告

113 年度

太陽光電系統
耐風設計及結構分析手冊之研擬

內政部建築研究所協同研究報告

中華民國 113 年 12 月

（本報告內容及建議純屬研究小組意見，不代表本機關意見）

太陽光電系統

耐風設計及結構分析手冊之研擬

研究主持人 ： 欒中丕

協同主持人 ： 陳瑞華

研　究　員 ： 傅仲麟、蔡宜中、賴宜暉、劉青峰

研 究 助 理 ： 周育安、邵詩涵

研 究 期 程 ： 中華民國 113 年 3 月至 113 年 12 月

研 究 經 費 ： 新臺幣 89 萬 2 仟元整

內政部建築研究所協同研究報告

中華民國 113 年 12 月

（本報告內容及建議純屬研究小組意見，不代表本機關意見）

目次

目次 I
表次 VII
圖次 IX
摘要 XV
Abstract XIX
第一章 緒論 1
第一節 研究主旨 1
第二節 研究方法及過程 2
第三節 本報告章節架構 3
第二章 太陽光電系統相關文獻之回顧 5
第一節 太陽光電系統之種類 5
第二節 太陽光電系統之可能破壞類型 7
第三節 「太陽光電系統之耐風設計規範研擬」成果報告 9
第四節 CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」 10
第三章 斜屋頂平貼型系統之耐風設計（示範例 1） 11
第一節 設計依據 12
壹、參考依據 12
貳、適用範圍 12
第二節 結構物資料與工址風環境 13
第三節 橫梁及各扣件之設計風壓(力) 18
壹、橫梁及各扣件之有效受風面積及相關參數 18
貳、橫梁及各扣件之設計風壓(力) 24
第四節 橫梁之耐風分析及檢核 27
壹、橫梁 28
第五節 扣件之耐風分析及檢核 30
壹、螺栓檢核公式 30
貳、面板接橫梁之扣件 30

參、橫梁接 L 型角鋁之扣件.....32
肆、L 型角鋁接支撐鋁件之扣件.....33
伍、支撐鋁件接屋頂浪板下結構梁之扣件.....34
第四章 地面踞置型系統之耐風設計（示範例 2）.....37
第一節 設計依據.....38
壹、參考依據.....38
貳、適用範圍.....38
第二節 結構物資料與工址風環境.....39
第三節 各構件及扣件之設計風壓(力).....44
壹、各構件有效受風面積及相對應之總淨風壓係數.....44
貳、構件與扣件之設計風壓（力）.....51
第四節 構件之耐風分析及檢核.....55
壹、橫梁.....57
貳、縱梁.....58
參、柱.....59
第五節 扣件之耐風分析及檢核.....62
壹、螺栓檢核公式.....62
貳、面板接橫梁之扣件.....62
參、橫梁接縱梁之扣件.....65
肆、縱梁接柱之扣件.....67
伍、柱接基座之扣件.....69
第五章 平屋頂踞置型系統之耐風設計(示範例 3).....71
第一節 設計依據.....72
壹、參考依據.....72
貳、適用範圍.....72
第二節 結構物資料與工址風環境.....74
第三節 各構件及扣件之設計風壓(力).....79
壹、各構件有效受風面積及相對應之總淨風壓係數.....79

貳、構件與扣件之設計風壓（力）.....89
第四節 構件之耐風分析及檢核.....92
壹、橫梁.....94
貳、縱梁.....95
參、柱.....96
第五節 扣件之耐風分析及檢核.....99
壹、螺栓檢核公式.....99
貳、面板接橫梁之扣件.....99
參、橫梁接縱梁之扣件.....102
肆、縱梁接柱之扣件.....104
伍、柱接基座之扣件.....106
第六章 地面單斜式棚架型系統之耐風設計（示範例 4）.....109
第一節 設計依據.....110
壹、參考依據.....110
貳、適用範圍.....110
第二節 結構物資料與工址風環境.....111
第三節 各構件及扣件之設計風壓（力）.....115
壹、各構件及扣件之有效受風面積及淨風壓係數.....116
貳、構件及扣件之設計風壓（力）.....123
參、支撐柱本身之設計風力.....127
肆、面板傳遞至支撐柱風壓(力)不同估算方式之比較.....129
第四節 構件之耐風分析及檢核.....135
壹、橫梁.....136
貳、縱梁.....137
參、支撐柱.....139
第五節 扣件之耐風分析及檢核.....145
壹、面板接橫梁之扣件.....146
貳、橫梁接縱梁之扣件.....147

參、縱梁接柱之扣件 148
肆、柱接基座之扣件 149
第七章 平屋頂單斜式棚架型系統之耐風設計（示範例 5） 151
第一節 設計依據 152
壹、參考依據 152
貳、適用範圍 152
第二節 結構物資料與工址風環境料 153
第三節 各構件及扣件之設計風壓（力） 157
壹、各構件及扣件之有效受風面積及淨風壓係數 158
貳、構件及扣件之設計風壓（力） 165
參、支撐柱本身側向之設計風力 169
肆、面板傳遞至支撐柱風壓(力)不同估算方式之比較 171
第四節 構件之耐風分析及檢核 177
壹、橫梁 178
貳、縱梁 179
參、支撐柱 181
第五節 扣件之耐風分析及檢核 188
壹、面板接橫梁之扣件 189
貳、橫梁接縱梁之扣件 190
參、縱梁接柱之扣件 191
肆、柱接基座之扣件 193
第八章 結論與建議 195
第一節 結論 195
第二節 建議 195
附錄一 「太陽光電系統耐風設計及結構分析手冊」之草案 197
附錄二 期初審查意見及回應一覽表 401
附錄三 期中審查意見及回應一覽表 405
附錄四 期末審查意見及回應一覽表 411

附錄五 第一次專家座談會議紀錄 417
附錄六 第二次專家座談會議紀錄 423
附錄七 第三次專家座談會議紀錄 427
附錄八 第一次專家訪談紀錄 431
附錄九 第二次專家訪談紀錄 435
附錄十 第三次專家訪談紀錄 437
附錄十一 第四次專家訪談紀錄 439
參考文獻.....441

表次

表 3-1 斜屋頂平貼型系統之結構物資料與工址風環境 17
表 3-2 示範例 1 構件及扣件之屋頂外風壓係數(G_{cp}) 22
表 3-3 示範例 1 構件及扣件設計風壓及風力 26
表 3-4 示範例 1 構件之斷面性質與斷面形狀 27
表 4-1 地面踞置型系統之結構物與工址風環境資料 43
表 4-2 當 0°≤ ω ≤ 5° 時，$(GC_{rn})_a$之計算公式 48
表 4-3 當 15°≤ ω ≤ 35° 時，$(GC_{rn})_a$之計算公式 48
表 4-4 示範例 2 構件及扣件之相關參數 54
表 4-5 示範例 2 構件之斷面性質與斷面形狀 56
表 5-1 平屋頂踞置型系統之結構物與工址風環境資料 78
表 5-2 當 0°≤ ω ≤ 5°時，$(GC_{rn})_{nom}$之計算公式 85
表 5-3 當 15°≤ ω ≤ 35° 時，$(GC_{rn})_{nom}$之計算公式 85
表 5-4 示範例 3 構件及扣件之相關參數 91
表 5-5 示範例 3 之斷面性質與斷面形狀 93
表 6-1 地面單斜式棚架系統之結構物資料與工址風環境 114
表 6-2 地面單斜式棚架型之淨風壓係數表 121
表 6-3 示範例 4 構件及扣件之淨風壓係數C_{pn} 122
表 6-4 示範例 4 不同區域之設計風壓 125
表 6-5 示範例 4 構件及扣件之設計風壓及風力 126
表 6-6 示範例 4 支撐柱本身之設計風力 128
表 6-7 開放式建築物之單斜式屋頂的風力係數 129
表 6-8 示範例 4 面板傳遞至支撐柱之設計風力（耐風規範 2014） 130
表 6-9 開放式建築物之單斜式屋頂的淨風壓係數C_N 132
表 6-10 風向平行於屋脊時開放式建築物之屋頂的淨風壓係數C_N 133
表 6-11 示範例 4 面板傳遞至支撐柱的設計風壓（新版耐風規範） (kgf/m^2) 134
表 6-12 示範例 4 構件之斷面性質 135
表 6-13 示範例 4 所有載重組合下對 g 點下方柱產生的最大受力 143
表 6-14 示範例 4 所有載重組合下對 k 點下方柱產生的最大受力 143
表 7-1 平屋頂單斜式棚架系統之結構物資料與工址風環境 156
表 7-2 平屋頂單斜式棚架型之淨風壓係數表 163
表 7-3 示範例 5 構件及扣件之平屋頂單斜式棚架淨風壓係數$(C_{pn})_r$ 164

表 7-4 示範例 5 不同區域之設計風壓 167
表 7-5 示範例 5 構件及扣件之設計風壓及風力 168
表 7-6 示範例 5 支撐柱本身之設計風力 170
表 7-7 開放式建築物之單斜式屋頂的風力係數 172
表 7-8 示範例 5 面板傳遞至支撐柱的設計風力（耐風規範 2014） 173
表 7-9 開放式建築物之單斜式屋頂的淨風壓係數C_N.....174
表 7-10 風向平行於屋脊時開放式建築物之屋頂的淨風壓係數C_N.....176
表 7-11 示範例 5 面板傳遞至支撐柱的設計風壓（新版耐風規範）(kgf/m^2) 176
表 7-12 示範例 5 構件之斷面性質 177
表 7-13 示範例 5 所有載重組合下對 g 點下方柱產生的最大受力.....186
表 7-14 示範例 5 所有載重組合下對 k 點下方柱產生的最大受力.....186

圖次

圖 2-1 斜屋頂平貼型之示意圖 5
圖 2-2 地面距置型之示意圖 6
圖 2-3 平屋頂距置型之示意圖 6
圖 2-4 地面單斜式棚架型之示意圖 6
圖 2-5 平屋頂單斜式棚架型之示意圖 7
圖 2-6 支撐架與屋頂面接合處之破壞照片 8
圖 2-7 面板框架處之破壞照片 8
圖 2-8 面板框架與支撐架接合處之破壞照片 8
圖 2-9 蘇迪勒颱風對彰化太陽光電系統造成之破壞照片 9
圖 3-1 斜屋頂平貼型系統之耐風設計流程圖 11
圖 3-2 斜屋頂平貼型系統之符號示意圖 12
圖 3-3 斜屋頂平貼型系統之整體場域立體配置圖 13
圖 3-4 斜屋頂平貼型系統之側視示意圖 14
圖 3-5 斜屋頂平貼型系統之整體場域平面配置圖 14
圖 3-6 斜屋頂平貼型系統之立體配置圖 14
圖 3-7 斜屋頂平貼型系統之平行面板平面圖 15
圖 3-8 斜屋頂平貼型系統 x 向之側視圖 15
圖 3-9 斜屋頂平貼型系統 y 向之側視圖 15
圖 3-10 斜屋頂平貼型系統之設計位置圖 16
圖 3-11 示範例 1 之橫梁 a-b-c-d-e-f-g-h 有效受風面積示意圖 19
圖 3-12 示範例 1 之面板接橫梁扣件 j 點有效受風面積示意圖 19
圖 3-13 示範例 1 之橫梁接 L 型角鋁扣件 c 點有效受風面積示意圖 20
圖 3-14 示範例 1 之橫梁接支撐架扣件 p 點有效受風面積示意圖 20
圖 3-15 示範例 1 之支撐架接浪板扣件 v 點有效受風面積示意圖 21
圖 3-16 θ ≦ 7°之屋頂外風壓係數之區域劃分示意圖（h≦18 m 建築物） 21
圖 3-17 θ ≦ 7°之屋頂外風壓係數（h≦18 m 建築物） 22
圖 3-18 構件所在結構系統與鄰近結構系統之距離>1.2 m 時可能產生$\gamma_{E_1} =$ 1.5 之示意圖 23
圖 3-19 構件所在面板與鄰近面板之距離$> 1.2\ m$時可能產生$\gamma_{E_1} = 1.5$之示意圖 24
圖 3-20 斜屋頂平貼型系統之橫梁受力作用圖 28

圖 3-21 斜屋頂平貼型系統之面板接橫梁示意圖 1 31
圖 3-22 斜屋頂平貼型系統之面板接橫梁示意圖 2 31
圖 3-23 斜屋頂平貼型系統之橫梁接 L 型角鋁示意圖 32
圖 3-24 斜屋頂平貼型系統之 L 型角鋁接支撐鋁件示意圖 33
圖 3-25 斜屋頂平貼型系統之支撐架接屋頂浪板示意圖 34
圖 4-1 地面踞置型結構系統之耐風設計流程圖 37
圖 4-2 地面踞置型結構系統示意圖 38
圖 4-3 整體場域地面踞置型系統之立體配置圖 39
圖 4-4 整體場域地面踞置型系統之平面配置圖(單位: mm) 40
圖 4-5 單一地面踞置型系統之立體配置圖 40
圖 4-6 單一地面踞置型系統之側視圖 41
圖 4-7 單一地面踞置型系統之側視示意圖(單位:mm) 41
圖 4-8 單一地面踞置型系統平行面板之平面圖(單位:mm) 42
圖 4-9 單一地面踞置型系統之設計位置圖(單位:mm) 42
圖 4-10 示範例 2 之橫梁 a-b-c-d-e 有效受風面積示意圖(單位:mm).....45
圖 4-11 示範例 2 之縱梁 f-g-h-i 有效受風面積示意圖(單位:mm) 46
圖 4-12 示範例 2 之 g 點及 h 點有效受風面積示意圖(單位:mm).....46
圖 4-13 示範例 2 之 k 點有效受風面積示意圖.....47
圖 4-14 示範例 2 之 c 點有效受風面積示意圖(單位:mm).....47
圖 4-15 構件所在結構系統與鄰近結構系統之距離大於max $(4h_2, 1.2m)$時可能產生$\gamma_{E_3} = 1.5$之示意圖.....50
圖 4-16 構件所在面板與鄰近面板之距離大於max $(4h_2, 1.2m)$時可能產$\gamma_{E_3} = 1.5$之示意圖.....50
圖 4-17 示範例 2 之橫梁 a-b-c-d-e 受力作用圖 57
圖 4-18 示範例 2 之縱梁 f-g-h-i 受力作用圖 59
圖 4-19 示範例 2 之柱受力作用圖 1 60
圖 4-20 示範例 2 之柱受力作用圖 2 60
圖 4-21 地面踞置型系統之面板接橫梁示意圖 1 63
圖 4-22 地面踞置型系統之面板接橫梁示意圖 2 63
圖 4-23 地面踞置型系統之面板接橫梁示意圖 3 64
圖 4-24 地面踞置型系統之面板接橫梁示意圖 4 64
圖 4-25 地面踞置型系統之橫梁接縱梁示意圖 1 65
圖 4-26 地面踞置型系統之橫梁接縱梁示意圖 2 66

圖 4-27 地面踞置型系統之橫梁接縱梁示意圖 3 66
圖 4-28 地面踞置型系統之 A 處螺栓與縱梁連接示意圖 67
圖 4-29 地面踞置型系統之 B 處螺栓與柱連接示意圖 68
圖 4-30 地面踞置型系統之柱與基座連接示意圖 69
圖 5-1 平屋頂踞置型結構系統之耐風設計流程圖 71
圖 5-2 平屋頂踞置型結構系統示意圖 73
圖 5-3 整體場域平屋頂踞置型系統之平面配置圖 74
圖 5-4 整體場域平屋頂踞置型系統之平面配置圖(單位:mm) 75
圖 5-5 單一平屋頂踞置型系統之立體配置圖 75
圖 5-6 單一平屋頂踞置型系統之側視圖 76
圖 5-7 單一平屋頂踞置型系統之側視示意圖(單位:mm) 76
圖 5-8 單一平屋頂踞置型系統平行面板之平面圖(單位:mm) 77
圖 5-9 單一平屋頂踞置型系統之設計位置圖(單位: mm) 77
圖 5-10 示範例 3 之橫梁 a-b-c-d-e 有效受風面積示意圖(單位:mm) 80
圖 5-11 示範例 3 之縱梁 f-g-h-i 有效受風面積示意圖(單位:mm) 81
圖 5-12 示範例 3 之 g 點及 h 點有效受風面積示意圖(單位:mm) 81
圖 5-13 示範例 3 之 k 點有效受風面積示意圖 82
圖 5-14 示範例 3 之 c 點有效受風面積示意圖(單位:mm) 82
圖 5-15 平屋頂踞置型之屋頂分區圖 83
圖 5-16 構件所在結構系統與鄰近結構系統之距離大於max $(4h_2, 1.2m)$時可能產生$\gamma_{E_2} = 1.5$之示意圖 87
圖 5-17 構件所在面板與鄰近面板之距離大於max $(4h_2, 1.2m)$時可能產生$\gamma_{E_2} = 1.5$之示意圖 87
圖 5-18 示範例 3 之橫梁 a-b-c-d-e 受力作用圖 94
圖 5-19 示範例 3 之縱梁 f-g-h-i 受力作用圖 96
圖 5-20 示範例 3 之柱受力作用圖 1 97
圖 5-21 示範例 3 之柱受力作用圖 2 97
圖 5-22 平屋頂踞置型系統之面板接橫梁示意圖 1 100
圖 5-23 平屋頂踞置型系統之面板接橫梁示意圖 2 100
圖 5-24 平屋頂踞置型系統之面板接橫梁示意圖 3 101
圖 5-25 平屋頂踞置型系統之面板接橫梁示意圖 4 101
圖 5-26 平屋頂踞置型系統之橫梁接縱梁示意圖 1 102
圖 5-27 平屋頂踞置型系統之橫梁接縱梁示意圖 2 103

圖 5-28 平屋頂踞置型系統之橫梁接縱梁示意圖 3 103
圖 5-29 平屋頂踞置型系統之 A 處螺栓與縱梁連接示意圖 104
圖 5-30 平屋頂踞置型系統之 B 處螺栓與柱連接示意圖 105
圖 5-31 平屋頂踞置型系統之柱與基座連接示意圖 106
圖 6-1 地面單斜式棚架型系統之耐風設計流程圖 109
圖 6-2 地面單斜式棚架型系統之立體配置圖 111
圖 6-3 地面單斜式棚架型系統之平行面板平面圖 112
圖 6-4 地面單斜式棚架型系統 y 向之側視圖 112
圖 6-5 地面單斜式棚架型系統 x 向之側視圖 112
圖 6-6 地面單斜式棚架型系統 y 向之示意圖 113
圖 6-7 地面單斜式棚架型系統之設計位置圖 113
圖 6-8 示範例 4 之橫梁 a-b-c-d-e 有效受風面積示意圖 116
圖 6-9 示範例 4 之縱梁 f-g-h-i 有效受風面積示意圖 117
圖 6-10 示範例 4 之 g 點下方柱有效受風面積示意圖 118
圖 6-11 示範例 4 之 k 點下方柱有效受風面積示意圖 118
圖 6-12 示範例 4 之面板接橫梁扣件 j 點有效受風面積示意圖 119
圖 6-13 示範例 4 之橫梁接縱梁扣件 c 點有效受風面積示意圖 119
圖 6-14 示範例 4 之縱梁接柱扣件 g 點有效受風面積示意圖 120
圖 6-15 單斜屋頂區域劃分示意圖 122
圖 6-16 示範例 4 支撐柱本身之設計風力（x 向） 127
圖 6-17 示範例 4 支撐柱本身之設計風力（y 向） 128
圖 6-18 開放式建築物之單斜式屋頂的淨風壓係數C_N 131
圖 6-19 風向平行於屋脊時開放式建築物之屋頂的淨風壓係數C_N 133
圖 6-20 示範例 4 之橫梁 a-b-c-d-e 受力作用圖 136
圖 6-21 示範例 4 之縱梁 f-g-h-i 受力作用圖 138
圖 6-22 示範例 4 現行耐風規範之主要風力作用圖（$+x$向） 139
圖 6-23 示範例 4 現行耐風規範之主要風力作用圖（$-x$向） 140
圖 6-24 示範例 4 現行耐風規範之主要風力作用圖（$+y$向） 140
圖 6-25 示範例 4 擬議新版耐風規範之主要風力作用圖（風向角$180°$） 141
圖 6-26 示範例 4 擬議新版耐風規範之主要風力作用圖（風向角$0°$） 141
圖 6-27 示範例 4 擬議新版耐風規範之主要風力作用圖（風向角 $90°$） 142
圖 6-28 示範例 4 耐風規範之局部風壓作用圖（$+x$向） 142
圖 6-29 地面單斜式棚架型系統之面板接橫梁扣件接合圖 146

圖 6-30 地面單斜式棚架型系統之橫梁接縱梁扣件接合圖 147
圖 6-31 地面單斜式棚架型系統之縱梁接柱扣件接合圖 149
圖 6-32 地面單斜式棚架型系統之柱接基座扣件接合圖 150
圖 7-1 平屋頂單斜式棚架型系統之耐風設計流程圖 151
圖 7-2 平屋頂單斜式棚架型系統之立體配置圖 153
圖 7-3 平屋頂單斜式棚架型系統之平行面板之平面圖 154
圖 7-4 平屋頂單斜式棚架型系統 y 向之側視圖 154
圖 7-5 平屋頂單斜式棚架型系統 x 向之側視圖 154
圖 7-6 平屋頂單斜式棚架型系統 y 向之示意圖 155
圖 7-7 平屋頂單斜式棚架型系統之設計位置圖 155
圖 7-8 示範例 5 之橫梁 a-b-c-d-e 有效受風面積示意圖 158
圖 7-9 示範例 5 之縱梁 f-g-h-i 有效受風面積示意圖 159
圖 7-10 示範例 5 之 g 點下方柱有效受風面積示意圖 160
圖 7-11 示範例 5 之 k 點下方柱有效受風面積示意圖 160
圖 7-12 示範例 5 之面板接橫梁扣件 j 點有效受風面積示意圖 161
圖 7-13 示範例 5 之橫梁接縱梁扣件 c 點有效受風面積示意圖 161
圖 7-14 示範例 5 之縱梁接柱扣件 g 點有效受風面積示意圖 162
圖 7-15 單斜屋頂區域劃分示意圖 164
圖 7-16 示範例 5 支撐柱本身之設計風力（x 向） 169
圖 7-17 示範例 5 支撐柱本身之設計風力（y 向） 170
圖 7-18 開放式建築物之單斜式屋頂的淨風壓係數C_N 174
圖 7-19 風向平行於屋脊時開放式建築物之屋頂的淨風壓係數C_N 175
圖 7-20 示範例 5 之橫梁 a-b-c-d-e 受力作用圖 178
圖 7-21 示範例 5 之縱梁 f-g-h-i 受力作用圖 180
圖 7-22 示範例 5 規範研擬之平屋頂單斜式棚架風壓作用圖（$+x$向） 182
圖 7-23 示範例 5 現行耐風規範之主要風力作用圖（$+x$向） 182
圖 7-24 示範例 5 現行耐風規範之主要風力作用圖（$-x$向） 183
圖 7-25 示範例 5 現行耐風規範之主要風力作用圖（$+y$向） 183
圖 7-26 示範例 5 擬議新版耐風規範之主要風力作用圖（風向角$180°$） 184
圖 7-27 示範例 5 擬議新版耐風規範之主要風力作用圖（風向角$0°$） 184
圖 7-28 示範例 5 擬議新版耐風規範之主要風力作用圖（風向角$90°$） 185
圖 7-29 平屋頂單斜式棚架型系統之面板接橫梁扣件接合圖 189
圖 7-30 平屋頂單斜式棚架型系統之橫梁接縱梁扣件接合圖 190

圖 7-31 平屋頂單斜式棚架型系統之縱梁接柱扣件接合圖 192
圖 7-32 平屋頂單斜式棚架型系統之柱接基座扣件接合圖 193

摘要

關鍵詞：太陽光電系統、耐風設計、設計手冊

壹、研究緣起

民國 108 年建築研究所委託研究計劃曾經研擬「太陽光電系統之耐風設計規範研擬」，相關研究成果經審查修訂後成為 CNS 16189「太陽光電系統之設計風載估算指引」，也預計將納入下一版之「建築物耐風設計規範及解說」，適用於估算四種太陽光電系統（斜屋頂平貼型、地面踞置型、平屋頂踞置型及地面單斜式棚架型）支撐結構所承受之設計風載重。

本計畫擬建立「太陽光電系統耐風設計及結構分析手冊」，提供五個設計示範例，供設計者參考，以確保結構安全性。其中以 CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022)估算斜屋頂平貼型、地面踞置型、平屋頂踞置型及地面單斜式棚架型太陽光電系統支撐結構所承受之設計風壓，以建研所委託研究計畫「太陽光電系統之耐風設計規範研擬」(2019)之成果報告估算平屋頂單斜式棚架型支撐結構所承受之設計風壓。

貳、研究方法與過程

本計畫針對國內各種太陽光電系統，透過專家座談及專家訪談，分別調查其常見之下部支撐架型式（含配置方式）及目前業界設計方式。選定其常見之下部支撐架型式後，參考調查結果及 CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022)與「太陽光電系統之耐風設計規範研擬」(2019)之成果報告，設定五個耐風設計示範例，分別合理假設其設計場景與設計參數，並針對設定之示範例，分別建立其耐風設計流程圖，再詳述各示範例下部支撐架整體設計風力(含底座拉拔力)與局部構件(含扣件)設計風力之耐風設計程序與計算細節，並於各示範例說明結構耐風設計注意事項，最後綜整擬定「太陽光電系統耐風設計及結構分析手冊」草案。另外邀集太陽能發電相關公會或協會，舉辦專家座談會議，討論建立簡易結構評估系統之可行性。

參、重要發現

本計畫案的具體成果如下：

1. 完成「太陽光電系統耐風設計及結構分析手冊」草案。
2. 提供斜屋頂平貼型、地面踞置型、平屋頂踞置型、地面單斜式棚架型及平屋頂單斜式棚架型太陽光電系統之耐風設計示範例。

肆、主要建議事項

根據重要發現，本研究提出之建議事項：

【建議一】

可針對「太陽光電系統結構耐風設計手冊」之草案內容，經由適當審查程序，出版成冊供業界參考：立即可行建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：社團法人中華民國風工程學會

目前政府積極推動太陽能發電，各地設置於建築物屋頂或地面的太陽光電系統日漸增多，為確保國內地面或建築物屋頂上太陽光電系統之耐風安全性，建議針對「太陽光電系統結構耐風設計手冊」之草案內容，經由適當審查程序，出版成冊供業界參考。

【建議二】

可辦理說明會，向太陽光電系統相關業者推廣出版後之「太陽光電系統結構耐風設計手冊」：立即可行建議

主辦機關：社團法人中華民國風工程學會

協辦機關：內政部建築研究所

目前我國在太陽光電系統之結構設計並無相關手冊可以參考，導致部份使用者執行太陽光電系統耐風設計時，為節省經費不進行風洞試驗，卻又以節省材料原則，選擇性引用規範，或是不瞭解規範條文精神及參數定義下錯誤應用。此類缺乏相關試驗數據佐證之耐風設計，恐因強度不足而釀災。故建議可以辦

理辦理說明會，向太陽光電系統相關業者推廣出版後之「太陽光電系統結構耐風設計手冊」。

【建議三】

未來可針對平屋頂單斜式棚架型下有阻擋之情況執行風洞試驗，以使相關耐風規定更為完整，甚至研擬其他類型之太陽能板耐風設計規定，以供業界參考使用：中長期建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：社團法人中華民國風工程學會

在建研所委託研究計畫「太陽光電系統之耐風設計規範研擬」(2019)中，考慮國內現存設計情況，回顧美國及日本相關規範之規定，並針對現有規範未規定者，執行一系列風洞試驗，作為設計者執行耐風設計之依據。其中屋頂平貼型、平屋頂踞置型、地面踞置型、地面單斜式棚架型的耐風規範草案納入了CNS 16819「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022)，而平屋頂單斜式棚架型因棚架底下有阻擋的實驗數據不夠充足，故未納入 CNS 16819「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022)。但平屋頂單斜式棚架型為台灣常見類型，故建議未來可針對平屋頂單斜式棚架型下有阻擋之情況執行風洞試驗，以使相關耐風規定更為完整。未來甚至可研擬其他常見類型之耐風設計規定，例如水面型或 BIPV，以供業界參考使用。

Abstract

Keywords: solar photovoltaic systems, wind resistance design, design handbook

In 2019, a commissioned research project by the Architecture Research Institute formulated the "Wind Resistance Design Standards for Solar Photovoltaic Systems." After review and revision, the research results became CNS 16189 "Guidelines for Estimating Design Wind Loads for Solar Photovoltaic Systems." These guidelines are expected to be incorporated into the next edition of the "Wind Resistance Design Standards and Commentary for Buildings." They apply to the estimation of design wind loads on the supporting structures of four types of solar photovoltaic systems: flat-mounted on pitched roofs, ground-mounted, flat-roof mounted, and single-sloped canopy type ground-mounted.

To facilitate the convenient and accurate use of CNS 16189 "Guidelines for Estimating Design Wind Loads for Solar Photovoltaic Systems" in wind resistance design, this project aims to establish a "Handbook for Wind Resistance Design and Structural Analysis of Solar Photovoltaic Systems." This handbook will provide calculation processes for various design examples for reference by designers, ensuring structural safety.

第一章 緒論

第一節 研究主旨

壹、 研究主題與緣起

太陽能發電是政府積極推動之綠色能源之一，各地設置於建築物屋頂或地面的太陽光電系統日漸增多，依其下部支撐架之配置形式及安裝位置可概分為斜屋頂平貼型、地面踞置型、平屋頂踞置型、地面單斜式棚架型及平屋頂單斜式棚架型等。過去幾年國內太陽光電系統常見受風破壞情況，其破壞位置可能在支撐結構與支承面之接合處、面板框架結構或面板框架與支撐結構之接合處而飄散之被破壞構件甚至可能對周邊之人或建築造成傷害。依據「設置再生能源設施免請領雜項執照標準」第 5 條及第 6 條之規定，視太陽光電發電設備設置高度與範圍設置前需檢附設計者簽證之結構安全證明書或結構計算說明書，送所在地主管建築機關備查。而在結構安全證明書或結構計算說明書中，需妥慎對太陽能光電板、下部支撐架構件及接合扣件作結構耐風設計與分析，以確保在強風吹襲下之安全性，避免產生系統整體破壞、系統局部破壞或對周邊之人或建築造成傷害。

國內一般建築物之主要風力抵抗系統及局部構材或外部被覆物之耐風設計係根據內政部頒布之「建築物耐風設計規範及解說」(2014)，但其中並未提供上述各太陽光電系統完整之耐風設計規定。民國 108 年建築研究所委託研究計劃「太陽光電系統之耐風設計規範研擬」曾釐清「建築物耐風設計規範及解說」(2014)未能涵蓋之部分，回顧美國及日本相關規範之規定，確認與國內耐風規範之相容性；並考慮國內現存設計情況，執行一系列風洞試驗，採用極值分析求取極值風壓係數再統合並簡化分析結果，以研擬相關耐風設計規範條文及圖表，作為設計者執行耐風設計之依據。相關研究成果經審查修訂後成為 CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」，也預計將納入下一版之「建築物耐風設計規範及解說」，適用於估算四種太陽光電系統(斜屋頂平貼型、地面踞置型、平屋頂踞置型及地面單斜式棚架型)支撐結構所承受之設計風載重。

過去為使設計者能方便且正確使用「建築物耐風設計規範及解說」作一般建築物之耐風設計，建研所曾於 2016 年出版「建築物耐風設計技術手冊」，於 2020 年出版「帷幕牆系統結構耐風設計手冊」，提供不同設計範例之計算流程，頗受業界肯定。基於相同的精神，本計畫建立「太陽光電系統耐風設計及結構

分析手冊」，提供五個設計示範例，供設計者參考，以確保結構安全性。其中斜屋頂平貼型、地面踞置型、平屋頂踞置型及地面單斜式棚架型太陽光電系統支撐結構所承受之設計風壓以 CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022)估算，平屋頂單斜式棚架型支撐結構所承受之設計風壓以建研所委託研究計畫「太陽光電系統之耐風設計規範研擬」(2019) 之成果報告估算。

貳、 預期目標

本計畫之預期目標為

1. 完成「太陽光電系統耐風設計及結構分析手冊」草案。
2. 提供不同型式太陽光電系統之耐風設計示範例。
3. 舉辦專家座談會議，廣納各界意見；並邀集太陽能發電相關公會或協會，以最新光電設備重量、結構與安全性做評估，協助建立一定重量或裝置容量以下之小家戶屋頂建立簡易結構評估系統。

第二節 研究方法及過程

壹、 研究採用之方法

本計畫針對國內不同種類之太陽光電系統，分別選定其常見之下部支撐架型式。斜屋頂平貼型、地面踞置型、平屋頂踞置型及地面單斜式棚架型等四種系統之設計是根據 CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022)之規定，而平屋頂單斜式棚架型之設計是根據建研所委託研究計劃「太陽光電系統之耐風設計規範研擬」(2019)成果報告之規定，詳述相關之耐風設計程序與計算細節，最後綜整擬定「太陽光電系統耐風設計及結構分析手冊」草案。

根據編纂「建築物耐風設計技術手冊」(2016)草案和「帷幕牆系統結構耐風設計手冊」（2020）草案之經驗，本計畫先對業界目前下部支撐架之構造型式及設計方式進行調查，以專家座談及專家訪談方式瞭解現況，並擬定五個耐風設計示範例，分別合理假設其設計場景與設計參數。

貳、 研究步驟

1. 針對國內各種太陽光電系統，透過專家座談及專家訪談，分別調查其常見之下部支撐架型式（含配置方式）及目前業界設計方式，同時邀集太陽能發電相關公會或協會，討論建立簡易結構評估系統之可行性。
2. 參考 1.之調查結果，針對五種太陽光電系統，分別設定其耐風設計示範例。

3. 針對 2. 設定之示範例，分別建立其耐風設計流程圖。
4. 建立各示範例下部支撐架局部構件（含扣件）及整體設計風力之逐步計算細節。
5. 透過專家座談及專家訪談，確認示範例計算細節。
6. 綜整擬定「太陽光電系統耐風設計及結構分析手冊」草案。
7. 舉辦第三次專家座談會議，確認草案細節

第三節 本報告章節架構

本報告之第二章為太陽光電系統相關文獻之回顧；第三章至第七章為五種型式之支撐架耐風設計示範例，分別為第三章斜屋頂平貼型系統(示範例 1)，第四章地面踞置型系統(示範例 2)，第五章平屋頂踞置型系統(示範例 3)，第六章地面單斜式棚架型系統(示範例4)，第七章平屋頂單斜式棚架型系統(示範例5)，最後第八章則為結論與建議。附錄一為「太陽光電系統耐風設計及結構分析手冊」之草案，附錄二為期初審查意見及回應一覽表，附錄三為期中審查意見及回應一覽表，附錄四為期末審查意見及回應一覽表，附錄五為第一次專家座談會議紀錄，附錄六為第二次專家座談會議紀錄，附錄七為第三次專家座談會議紀錄，附錄八為第一次專家訪談紀錄，附錄九為第二次專家訪談紀錄，附錄十為第三次專家訪談紀錄，附錄十一為第四次專家訪談紀錄。

第二章 太陽光電系統相關文獻之回顧

本章首先介紹太陽光電系統之種類，包含斜屋頂平貼型、平屋頂距置型、地面距置型、地面單斜式棚架型及平屋頂單斜式棚架型五種類型，並回顧可能破壞類型，接著簡介「太陽光電系統之耐風設計規範研擬」(2019)成果報告內容及 CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022)內容。

第一節 太陽光電系統之種類

太陽光電系統可能包括一個或數個太陽光電系統；太陽光電系統是由面板（panel）與支撐結構組合形成，其中面板為多片模組（module）之組合，以支撐架固定於支承面（屋頂面或地面）上；而模組是經預先組合、有完整環境保護之太陽光電電池的組合。本計畫將太陽光電系統分為五種類型，分別為斜屋頂平貼型、地面踞置型、平屋頂踞置型、地面單斜式棚架型及平屋頂單斜式棚架型。

斜屋頂平貼型系統安裝於封閉式建築物或部分封閉式建築物（根據「建築物耐風設計規範及解說」(2014)）之斜屋頂上，由面板與支撐架組合而成，如圖 2-1 所示。地面踞置型安裝於地面，各系統採陣列型式排列，如圖 2-2 所示。平屋頂踞置型安裝於封閉式建築或部分封閉式建築之屋頂上，各系統採陣列型式排列，如圖 2-3 所示。地面單斜式棚架型安裝於地面，含支撐柱且棚架至少有兩個側面各有 80%以上面積為開口，如圖 2-4 所示。平屋頂單斜式棚架型安裝於封閉式建築或部分封閉式建築之平屋頂，含支撐柱且棚架至少有兩個側面各有 80%以上面積為開口，如圖 2-5 所示。



圖 2-1 斜屋頂平貼型之示意圖

資料來源: https://www.energytrend.com.tw/news/20180316-14309029.html



圖 2-2 地面距置型之示意圖

資料來源:https://www.initialsolar.com/solar-energy-system-ground



圖 2-3 平屋頂距置型之示意圖

資料來源: http://www.green-source.com.tw/tw/satrackers



圖 2-4 地面單斜式棚架型之示意圖

資料來源:https://www.pinterest.com/pin/715016878312630714/



圖 2-5 平屋頂單斜式棚架型之示意圖

資料來源:https://www.share-en.com/385252080937096338532668 4/5459874

第二節 太陽光電系統之可能破壞類型

依據「設置再生能源設施免請領雜項執照標準」第 5 條及第 6 條之規定，視太陽光電發電設備設置高度與範圍，設置前需檢附設計者簽證之結構安全證明書或結構計算說明書，送所在地主管建築機關備查。而在結構安全證明書或結構計算說明書中，需妥慎對太陽能光電板、下部支撐架構件及接合扣件作結構耐風設計與分析，以確保在強風吹襲下之安全性。

但在過去幾年國內太陽光電系統常見受風破壞之情況，且飄散之被破壞構件甚至可能對周邊之人或建築造成傷害。太陽光電系統常見之破壞位置可能在支撐架與支承之接合處、或面板框架處、或面板框架與支撐架之結合處。例如，圖 2-6 支撐架與屋頂面接合處之破壞；圖 2-7 面板框架處之破壞，圖 2-8 面板框架與支撐架接合處之破壞，圖 2-9 蘇迪勒颱風對彰化太陽光電系統造成之破壞。

根據本計畫專家座談及專家訪談所得資訊，目前業界所生產的太陽能面板在出廠前都有做過相關機械測試以及經過 IEC 標準測試認證，面板本身強度及面板框架較無太大問題，故本計劃之示範例不考慮面板本身與面板框架強度。



圖 2-6 支撐架與屋頂面接合處之破壞照片

資料來源:http://solar543.blogspot.com/2015/10/12.html



圖 2-7 面板框架處之破壞照片

資料來源:技師報「太陽光電發電設備鋁合金框架及支撐架設計的建議」,何象鏞 技師,2014



圖 2-8 面板框架與支撐架接合處之破壞照片

資料來源:技師報「太陽光電發電設備鋁合金框架及支撐架設計的建議」,何象鏞 技師,2014



圖 2-9 蘇迪勒颱風對彰化太陽光電系統造成之破壞照片
資料來源:蘋果即時新聞網「太陽能板種電才啟用 蘇迪勒刮走 3 千萬」

第三節 「太陽光電系統之耐風設計規範研擬」成果報告

在建研所委託研究計劃「太陽光電系統之耐風設計規範研擬」(2019)成果報告中，釐清「建築物耐風設計規範及解說」(2014)未能涵蓋之部分，並回顧美國及日本相關規範之規定，確認與國內耐風規範之相容性；考慮國內現存設計情況，針對現有規範未規定者，執行一系列風洞試驗，以研擬相關耐風設計規範條文及圖表，作為設計者執行耐風設計之依據。其中斜屋頂平貼型、平屋頂踞置型、地面踞置型、地面單斜式棚架型的耐風規範草案納入了 CNS 16819「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022)。

平屋頂單斜式棚架型為台灣常見，但未見於國外規範或文獻。考慮國內常見設計情況，斟酌擬定試驗參數組合（面板傾角、長寬比、面板有無突出、面板下有無阻擋、有無女兒牆等），於建研所及淡江大學風洞實驗室分別執行一系列風洞試驗，以極值分析求取不同情況下之最大正（負）淨風壓係數。統整各分析結果後，參考地面單斜式棚架型之耐風規定，擬議平屋頂單斜式棚架型耐風規範草案。因實驗數據未涵蓋平屋頂單斜式棚架底下有阻擋的情況，故未納入 CNS 16819「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022)。

第四節 CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」

CNS 16189 是由經濟部標檢局制訂的太陽光電系統之設計風載重估算指引，本標準適用於太陽光電系統支撐結構所承受之設計風載重估算，設置型式包括斜屋頂平貼型、地面踞置型、平屋頂踞置型及地面單斜式棚架型等四種系統，水面型系統不適用本標準。若太陽光電系統之設計風載重，依本標準無法提供所需之估算資料時，得依據「建築物耐風設計規範及解說」估算設計風載重。

CNS 1618 的目錄如下

1. 適用範圍
2. 引用標準
3. 用語及定義
4. 符號說明
5. 斜屋頂平貼型結構系統之設計風壓
5.1 一般
5.2 設計風壓之決定
5.3 風壓平衡因子γ_a之決定
6. 地面踞置型結構系統之設計風壓
6.1 一般
6.2 設計風壓之決定
6.3 對應於 A 之淨風壓係數$(GC_{rn})_a$之決定
7. 平屋頂踞置型結構系統之設計風壓
7.1 一般
7.2 設計風壓之決定
7.3 對應於A_n之淨風壓係數$(GC_{rn})_{nom}$之決定
7.4 女兒牆修正因子γ_p之決定
7.5 面板弦長修正因子γ_c之決定
7.6 平屋頂踞置型結構系統之結構系統邊緣修正因子 之決定
8. 地面單斜式棚架型結構系統之設計風壓
8.1 一般
8.2 設計風壓之決定
參考資料

第三章 斜屋頂平貼型系統之耐風設計（示範例 1）

本案例所稱斜屋頂平貼型系統安裝於封閉式建築物或部分封閉式建築物之斜屋頂上（如圖 2-1 所示）。耐風設計的主要目的是確保支撐架在強風環境下能夠維持結構完整性和安全性，而實務上在進行支撐架設計時，尚需考慮不同的載重組合情況，例如靜載重、風載重及地震力之效應，但本示範例只考慮靜載重及風載重之效應。

本示範例首先規劃一斜屋頂平貼型系統，依據 CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022) 之 5.斜屋頂平貼型結構系統之設計風壓，決定其構件及扣件之設計風壓，再考慮風載重及靜載重之效應，作相關之結構設計。本示範例之設計流程圖如圖 3-1 所示。

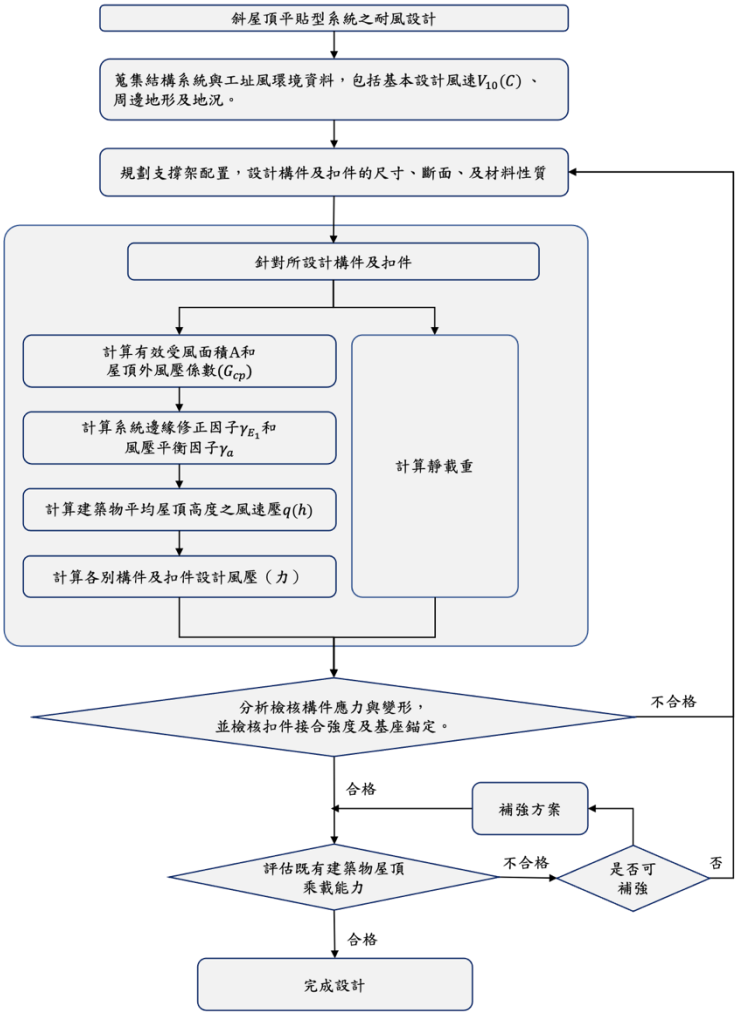


圖 3-1 斜屋頂平貼型系統之耐風設計流程圖

資料來源：本研究整理

第一節　設計依據

壹、參考依據

1. 內政部，「鋼結構容許應力設計法規範及解說」，2010。
2. 內政部，「建築物耐風設計規範與解說」，2014。
3. 內政部，「冷軋型鋼構造建築物結構設計規範及解說」，2016。
4. 經濟部，CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」之 5.斜屋頂平貼型結構系統之設計風壓，2022。
5. The Aluminum Association，「Aluminum Design Manual」，2005。

貳、適用範圍

CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022) 之 5.斜屋頂平貼型結構系統之設計風壓計算公式適用於同時滿足下列條件之結構系統：

1. 建築物為「建築物耐風設計規範及解說」(2014)所定義之封閉式或部分封閉式建築物，且建築物橫風向或扭轉向風力不顯著。
2. 面板與屋頂面之夾角 ω（如圖 3-2 所示）小於或等於 2°。
3. 面板與屋頂面之最大距離 h_2（如圖 3-2 所示）小於或等於 0.25 m，若屋頂面為波浪板時，h_2 應為面板與平均屋頂面之最大距離。
4. 模組間隙大於或等於 6.4 mm，模組長（或寬）小於或等於 2 m。
5. 本標準提供之風壓計算公式不適用面板設置在屋頂邊緣 2 h_2 內及屋脊任一側 2 h_2 內，其中 h_2 為面板與屋頂面之最大距離。

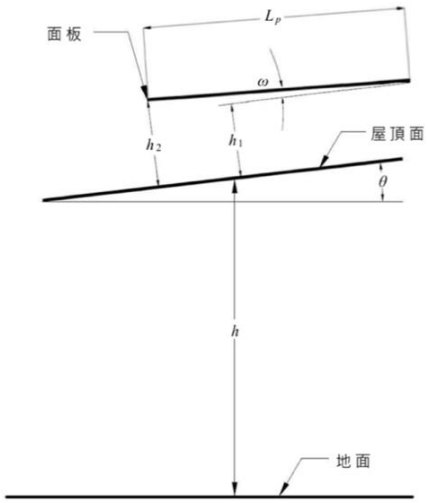


圖 3-2 斜屋頂平貼型系統之符號示意圖

資料來源：CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022)

第二節 結構物資料與工址風環境

本章擬於彰化縣和美鎮一建築屋頂上，新建一斜屋頂平貼型太陽光電系統。整體場域立體配置圖如圖 3-3 所示；整體場域側視示意圖如圖 3-4 所示；整體場域平面配置圖如圖 3-5 所示，上色區塊為一座支撐架結構系統，整體場域共配置 20 座支撐架結構系統。

單一結構系統之立體配置圖、平行面板之平面圖、x 向側視圖、y 向側視圖分別如圖 3-6、圖 3-7、圖 3-8 及圖 3-9 所示。單一系統的面板由 5 塊模組組成，以 12 個扣件分別固定於 2 根橫梁上，每根橫梁下方以 6 個扣件分別固定於 6 個 L 型角鋁上，每個 L 型角鋁分別以扣件固定於支撐鋁件上，最後支撐鋁件再固定於屋頂浪板下之結構梁，面板與平均屋頂面之最大距離 h_2 為 0.25 m。

理論上應根據各支撐架結構系統所承受的風壓情況，分別進行其設計，但由於設計程序類似，本範例僅分析設計圖 3-5 左上角上色之支撐架結構系統。針對圖 3-10 所示之單一結構系統，分別設計橫梁 a-b-c-d-e-f-g-h、面板接橫梁扣件（其形心為 j 點）、橫梁接 L 型角鋁扣件（其形心為 c 點）、L 型角鋁接支撐鋁件扣件（其形心位於 p 點）及支撐鋁件接屋頂浪板下結構梁扣件（其形心為 v 點）。

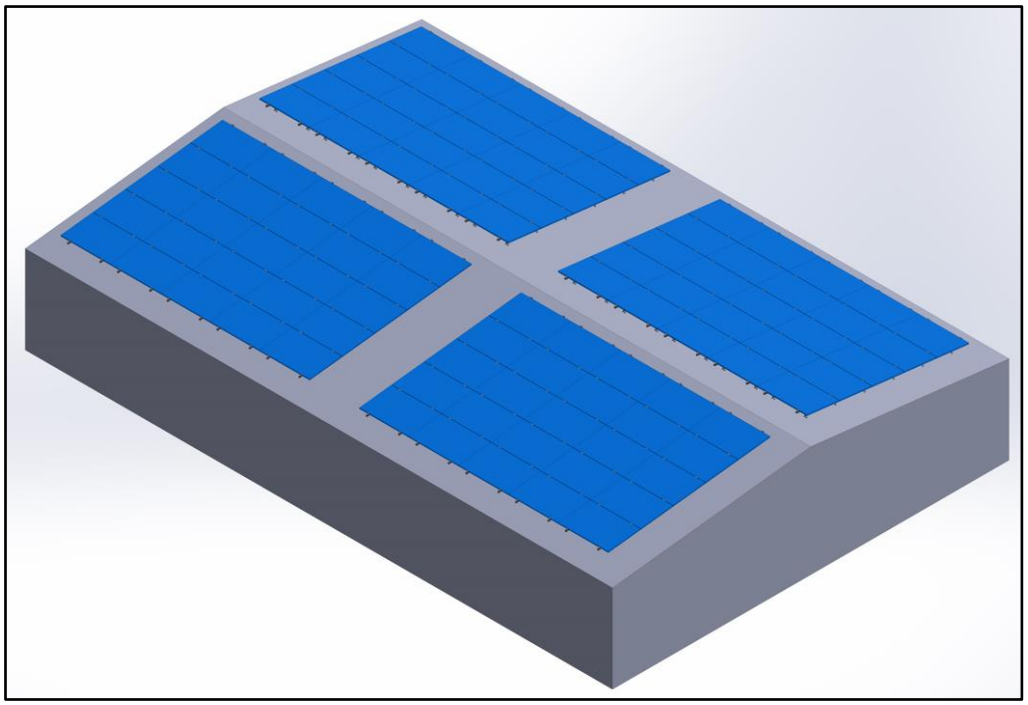


圖 3-3 斜屋頂平貼型系統之整體場域立體配置圖

資料來源：[15]

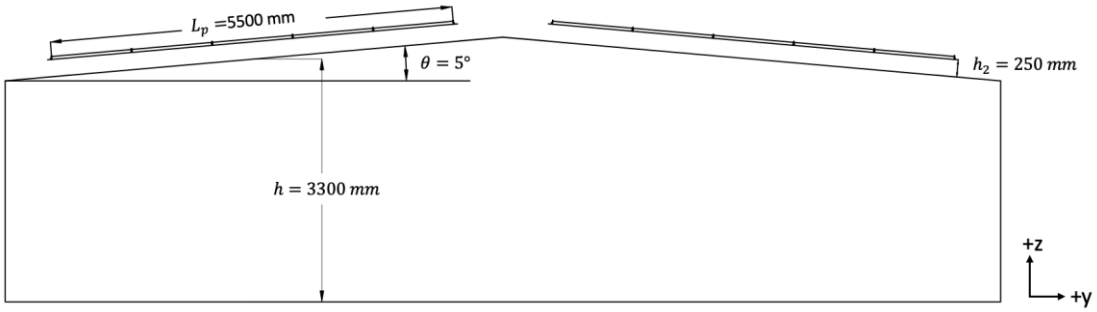


圖 3-4 斜屋頂平貼型系統之側視示意圖

資料來源：本研究整理

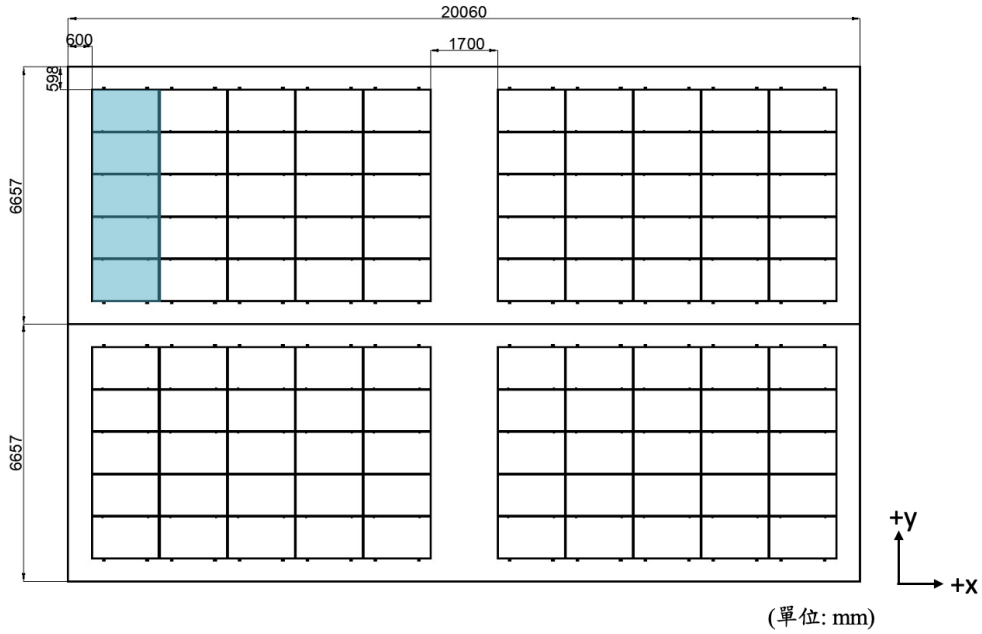


圖 3-5 斜屋頂平貼型系統之整體場域平面配置圖

資料來源：修改自[15]

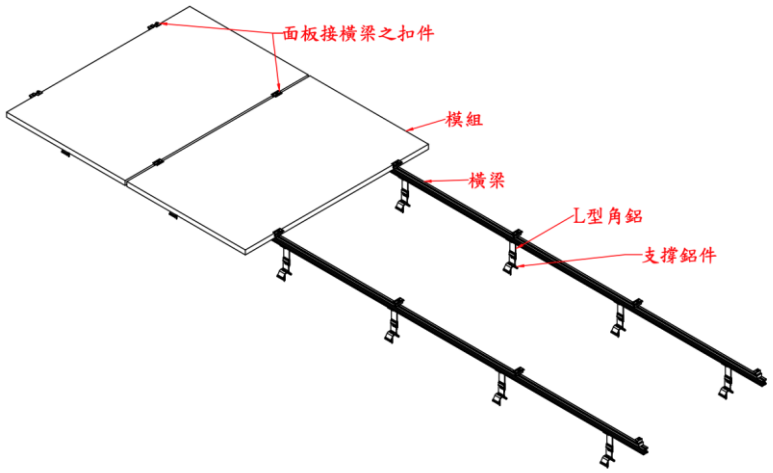


圖 3-6 斜屋頂平貼型系統之立體配置圖

資料來源：修改自[15]

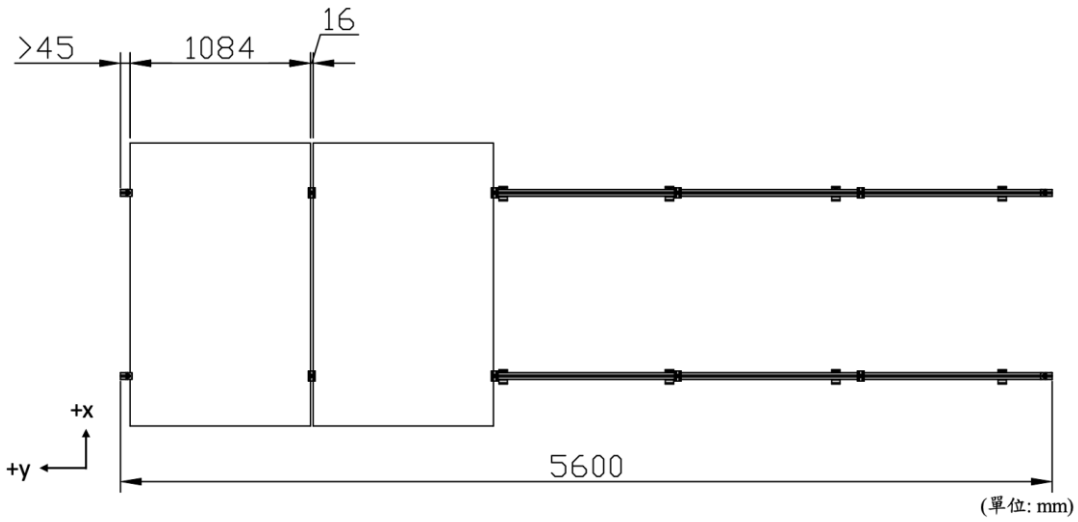


圖 3-7 斜屋頂平貼型系統之平行面板平面圖

資料來源：修改自 [15]

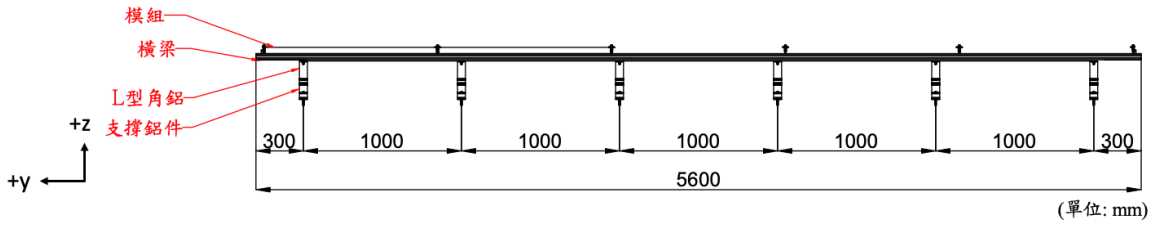


圖 3-8 斜屋頂平貼型系統 x 向之側視圖

資料來源：修改自 [15]

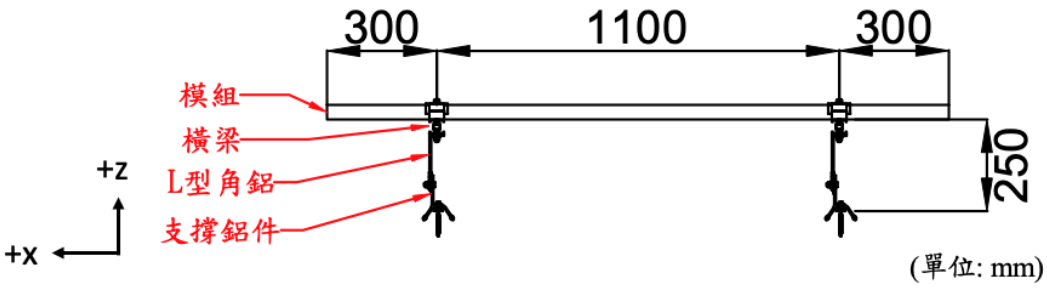


圖 3-9 斜屋頂平貼型系統 y 向之側視圖

資料來源：修改自 [15]

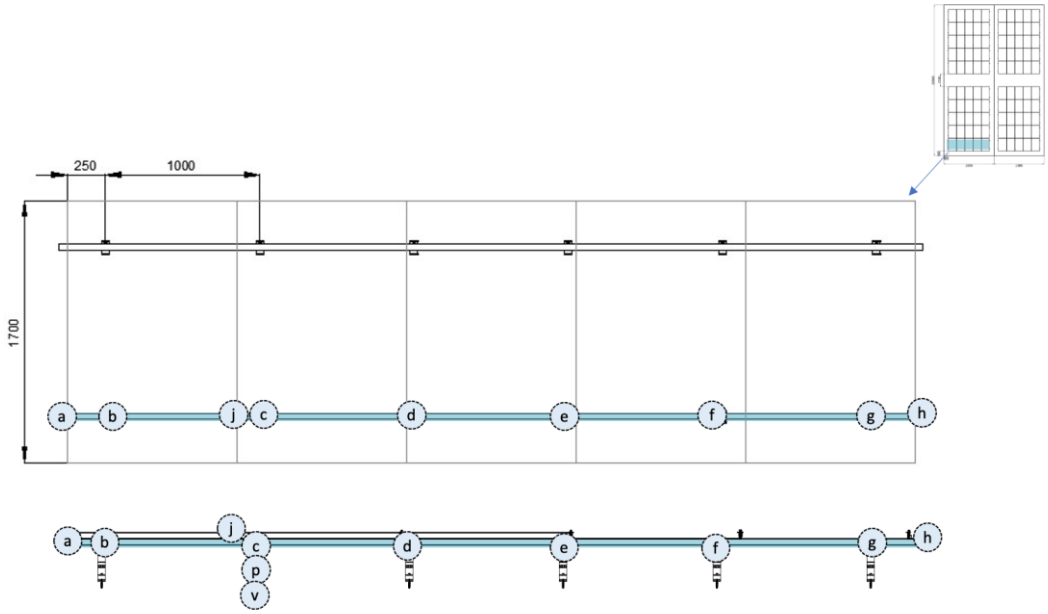


圖 3-10 斜屋頂平貼型系統之設計位置圖

資料來源：本研究整理

結構物資料包含太陽光電系統尺寸、面板配置、用途係數 I；工址風環境包含基本設計風速$V_{10}(C)$、結構物周邊地形以及地況。本節擬定結構物資料與工址風環境如下表 3-1 所示。

表 3-1 斜屋頂平貼型系統之結構物資料與工址風環境

結構物資料	太陽光電結構系統	面板由 5 塊模組組成，以 12 個扣件分別固定於 2 根橫梁上，每根橫梁下方以 6 個扣件分別固定於 6 個 L 型角鋁上，每個 L 型角鋁分別以扣件固定於支撐鋁件上，最後支撐鋁件再固定於屋頂浪板下之結構梁。
	建築物尺寸	建築物平均屋頂高度 $h = 3.3\,m$；屋頂角度 $\theta = 5°$。
	面板配置	1. 面板弦長 $L_p = 5.5\,m$。 2. 面板與屋頂面之夾角 $\omega = 0°$。 3. 面板與平均屋頂面最大距離 $h_2 = 0.250\,m$。 4. 模組長為$1.7\,m$、寬為$1.084\,m$。 5. 模組間隙為 16 mm
	用途係數	根據「建築物耐風設計規範與解說」規範 2.5 節，依照重要程度可將 I 值分為1.1、1.0或 0.9，本範例取 I = 1.0。
工址風環境	基本設計風速 $V_{10}(C)$	根據「建築物耐風設計規範與解說」規範 2.4 節，彰化和美鎮的$V_{10}(C) = 32.5\,m/s$。
	地況種類	依結構物各方向上風處之地表粗糙度決定皆為地況 B。
	地形係數	無特殊地形。

資料來源：本研究整理

第三節　橫梁及各扣件之設計風壓(力)

橫梁及各扣件之設計風壓(力)之計算步驟包括決定有效受風面積、屋頂外風壓係數、系統邊緣修正因子、風壓平衡因子及計算構件與扣件之設計風壓(力)，其細節如下：

壹、橫梁及各扣件之有效受風面積及相關參數

根據「建築物耐風設計規範及解說」(2014) 1.3 節對有效受風面積 A 之定義可知，結構構件之有效受風面積 A 為跨距長度與有效寬度之乘積，有效寬度不必小於其跨距長度的 1/3。對扣件而言，有效受風面積 A 不得大於單一扣件之受風面積。決定有效受風面積及計算屋頂外風壓係數方式如下：

[步驟 1] 有效受風面積

(a) 橫梁 a-b-c-d-e-f-g-h：

如圖 3-11 所示，將面板所承受風力傳遞至橫梁 a-b-c-d-e-f-g-h 上，且橫梁架設在間距為 1 m 的支撐架上並被分為 a-b 段、b-c 段、c-d 段、d-e 段、e-f 段、f-g 段及 g-h 段。

針對 a-b 段橫梁，跨距長度為懸臂段長度 0.25 m，承受風壓面積之寬度為$1.7\,m/2 = 0.85\,m$，故承受風壓面積為$0.25\,m \times 0.85\,m = 0.213\,m^2$。a-b 段橫梁之有效寬度為$\max(0.85, 0.25/3) = 0.85\,m$，故其有效受風面積為$A = 0.25\,m \times 0.85\,m = 0.213\,m^2$。同理，g-h 段橫梁之承受風壓面積為$0.213\,m^2$，有效受風面積亦為$0.213\,m^2$。

針對 b-c 段橫梁，跨距長度為支撐架間距 1.00 m，承受風壓面積之寬度為 0.85 m，故承受風壓面積為$1.00\,m \times 0.85\,m = 0.85\,m^2$。b-c 段橫梁之有效寬度為$\max(0.85, 1.00/3) = 0.85\,m$，故其有效受風面積為$A = 1.0\,m \times 0.85\,m = 0.85\,m^2$。同理，c-d 段、d-e 段、e-f 段、f-g 段橫梁之承受風壓面積為$0.85\,m^2$，有效受風面積亦為$0.85\,m^2$。

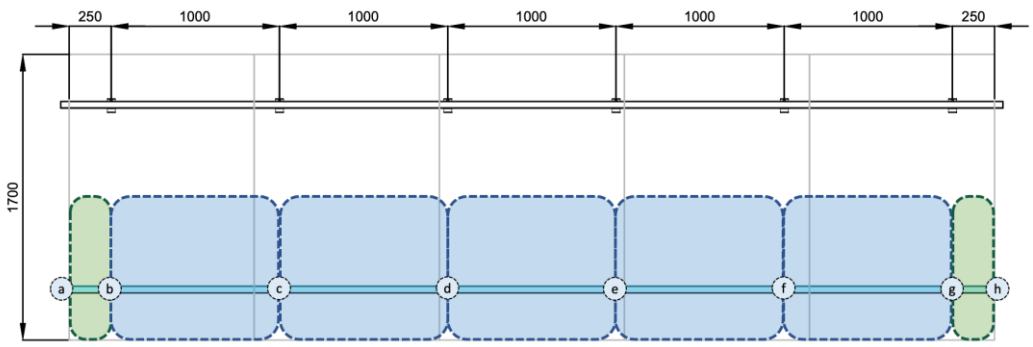


圖 3-11 示範例 1 之橫梁 a-b-c-d-e-f-g-h 有效受風面積示意圖

資料來源：本研究整理

(b) 面板接橫梁扣件（其形心為 j 點）：

如圖 3-12 所示，單一模組的尺寸為$1.7\,m \times 1.084\,m$。為方便計算，將模組間距計入有效受風面積，調整後的尺寸為$1.7\,m \times 1.1\,m$，並由四個扣件固定。針對 j 點面板接橫梁扣件分析，因扣件之有效受風面積不得大於其承受風壓面積，故其有效受風面積為承受風壓面積$= 0.85\,m \times 1.10m =$ $0.935\ m^2$。

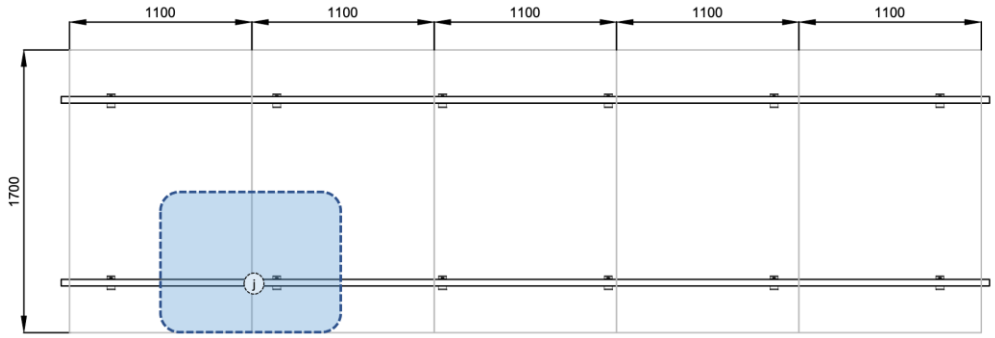


圖 3-12 示範例 1 之面板接橫梁扣件 j 點有效受風面積示意圖

資料來源：本研究整理

(c) 橫梁接 L 型角鋁扣件（其形心為 c 點）：

如圖 3-13 所示，將風力傳遞至兩根橫梁上，橫梁架設在 b 點、c 點、d 點、e 點、f 點及 g 點的橫梁接 L 型角鋁扣件上。針對橫梁接 L 型角鋁扣件 c 點分析，因扣件之有效受風面積不得大於其承受風壓面積，故其有效受風面積為承受風壓面積$A = 1.00\,m \times 0.85\,m = 0.85\,m^2$。

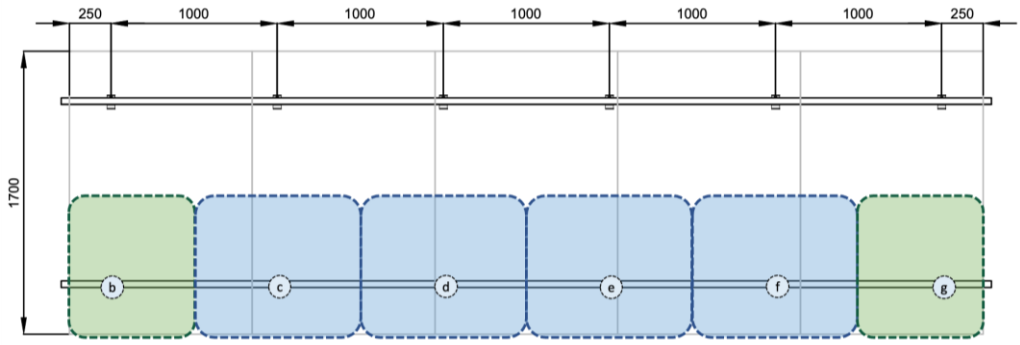


圖 3-13 示範例 1 之橫梁接 L 型角鋁扣件 c 點有效受風面積示意圖

資料來源：本研究整理

(d) L 型角鋁接支撐鋁件扣件（其形心為 p 點）：

如圖 3-14 所示，將風力傳遞至十二個 L 型角鋁上，L 型角鋁分別架設在 o 點、p 點、q 點、r 點、s 點及 t 點的支 L 型角鋁接支撐鋁件扣件上。針對 p 點之 L 型角鋁接支撐之鋁件扣件分析，因扣件之有效受風面積不得大於其承受風壓面積，故其有效受風面積為承受風壓面積 $A = 1.00\,m \times 0.85\,m = 0.85\,m^2$。

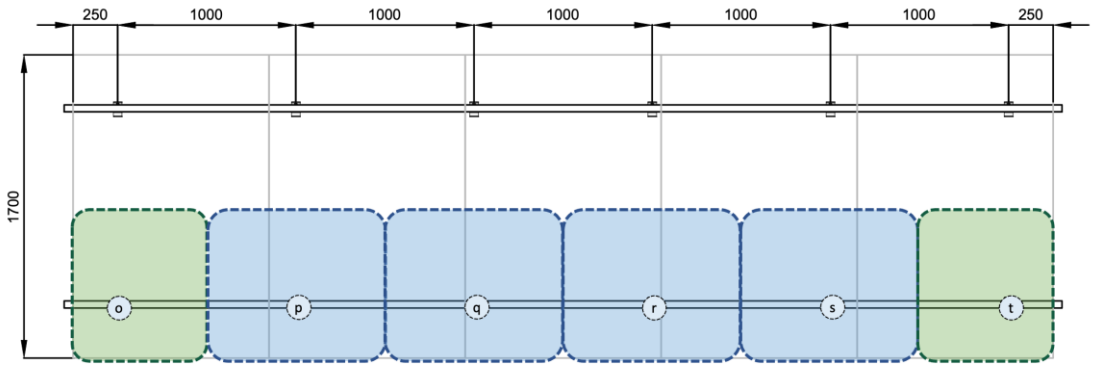


圖 3-14 示範例 1 之橫梁接支撐架扣件 p 點有效受風面積示意圖

資料來源：本研究整理

(e) 支撐鋁件接屋頂浪板下結構梁扣件（其形心為 v 點）：

如圖 3-15 所示，將風力傳遞至十二個支撐鋁件上，支撐鋁件分別架設在 u 點、v 點、w 點、x 點、y 點及 z 點的支撐鋁件接屋頂浪板下結構梁扣件上。取支撐鋁件接屋頂浪板下結構梁扣件 v 點分析，因扣件之有效受風面積不得大於其承受風壓面積，故其有效受風面積為承受風壓面積 $A = 0.85\,m \times 1.00\,m = 0.85\,m^2$。

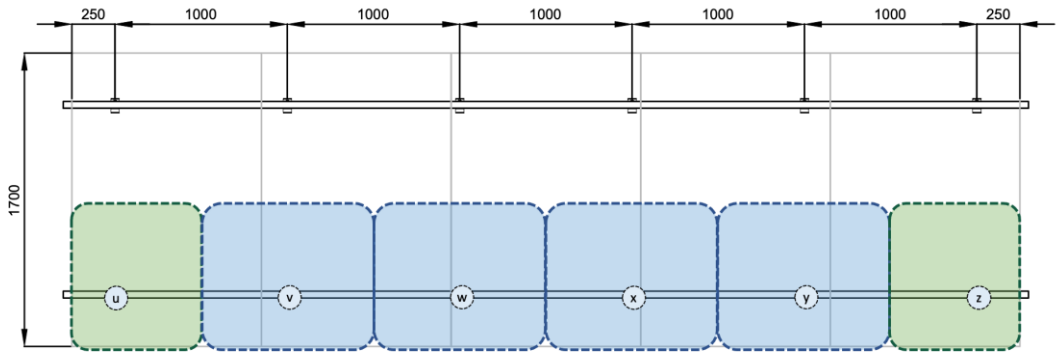


圖 3-15 示範例 1 之支撐架接浪板扣件 v 點有效受風面積示意圖

資料來源：本研究整理

[步驟 2] 屋頂外風壓係數

根據「建築物耐風設計規範及解說」(2014)第 3.3 節之規定決定屋頂外風壓係數(GC_p)，如圖 3-16 所示將雙斜式屋頂分為①區、②區、③區，區域內屋頂外風壓係數(GC_p)可根據圖 3-17，對照有效受風面積決定。其中$a = \min(0.4h,$ 最小寬度的 10% $) = \min(1.32\ m, 1.33\ m) = 1.32\ m$，並確認 a 不能小於 0.9 m 或最小寬度的 4%。

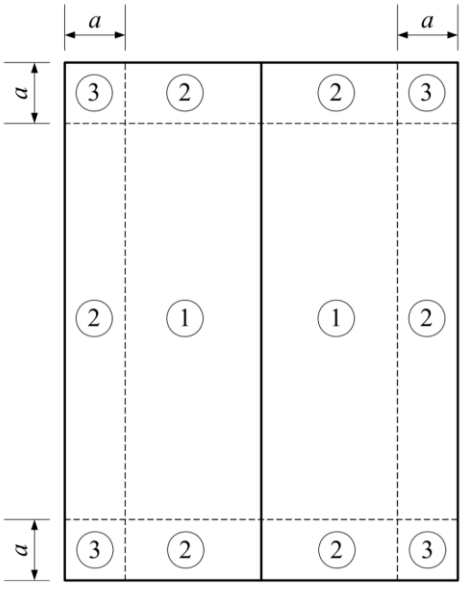


圖 3-16 θ ≦ 7°之屋頂外風壓係數之區域劃分示意圖（h≦18 m 建築物）

資料來源：「建築物耐風設計規範及解說」(2014) 圖 3.1(b)

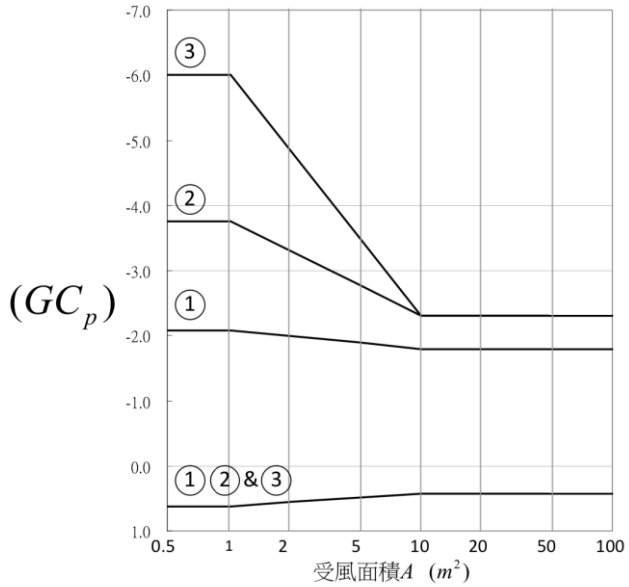


圖 3-17 θ ≦ 7°之屋頂外風壓係數（h≦18 m 建築物）

資料來源：「建築物耐風設計規範及解說」(2014) 圖 3.1(b)

面板接橫梁扣件 j 點的有效受風面積$A = 0.85\ m^2$，根據圖 3-17 可得③區的(GC_p)為 0.6 和-6.0，②區的(GC_p)為 0.6 和-3.8，①區的(GC_p)為 0.6 和-2.1。仿照上述面板接橫梁扣件 j 點外風壓係數的查詢方法，可得其餘構件與扣件的外風壓係數，彙整前述不同 A 的外風壓係數，將其列於表 3-2。

表 3-2 示範例 1 構件及扣件之屋頂外風壓係數(G_{cp})

名稱		有效受風面積(m^2)	③區		②區		①區	
橫梁	a-b 段或 g-h 段	0.213	0.6	-6.0	0.6	-3.8	0.6	-2.1
	b-c 段或 c-d 段或 d-e 段或 e-f 段或 f-g 段	0.850	0.6	-6.0	0.6	-3.8	0.6	-2.1
面板接橫梁扣件	j 點	0.850	0.6	-6.0	0.6	-3.8	0.6	-2.1
橫梁接 L 型角鋁扣件	c 點	0.468	0.6	-6.0	0.6	-3.8	0.6	-2.1
L 型角鋁接支撐鋁件	p 點	0.850	0.6	-6.0	0.6	-3.8	0.6	-2.1
支撐鋁件接屋頂浪板下結構梁扣件	v 點	0.850	0.6	-6.0	0.6	-3.8	0.6	-2.1

資料來源：本研究整理

[步驟 3] 系統邊緣修正因子γ_{E_1}

根據 CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022) 系統邊緣修正因子γ_{E_1}之決定，若構件同時滿足下述條件，則結構系統之系統邊緣修正因子$\gamma_{E_1} = 1.5$；在其他情況下，結構系統之系統邊緣修正因子$\gamma_{E_1} = 1.0$。

(a) 構件所在結構系統之邊緣與鄰近屋頂邊緣之距離大於 0.5h。

(b) 構件所在結構系統與鄰近結構系統之距離大於 1.2 m（如圖 3-18 所示），或構件所在面板與鄰近面板之距離大於 1.2 m（如圖 3-19 所示）。

(c) 構件位於結構系統邊緣 1.5L_p 範圍內，其中 L_p 為面板弦長。

(d) 構件承受負風壓時。

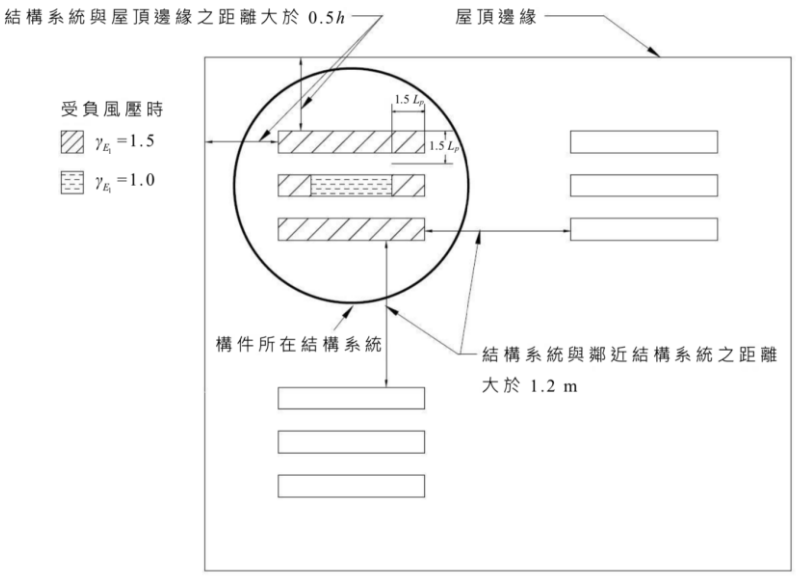


圖 3-18 構件所在結構系統與鄰近結構系統之距離>1.2 m 時可能產生$\gamma_{E_1} = 1.5$之示意圖

資料來源：CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022) 圖 2

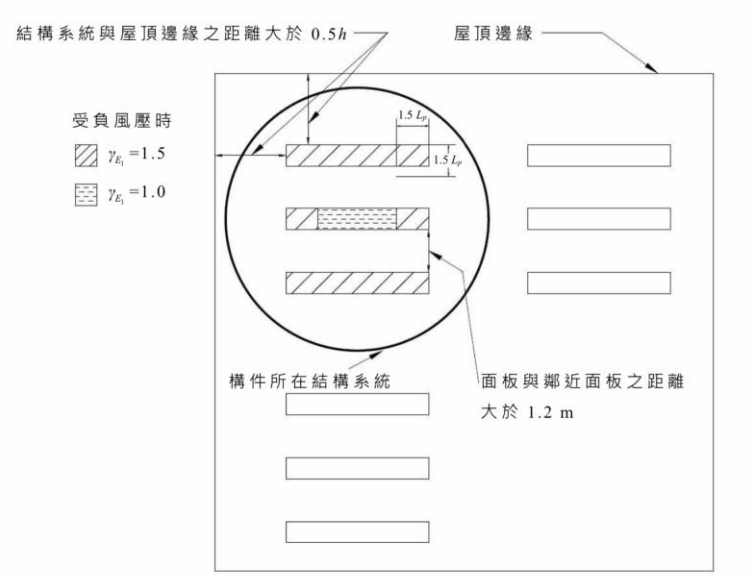


圖 3-19 構件所在面板與鄰近面板之距離> $1.2\,m$時可能產生$\gamma_{E_1} = 1.5$之示意圖
資料來源：CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022) 圖 3

由於構件所在結構系統之邊緣與鄰近屋頂邊緣之距離為$0.6\,m < 0.5h = 1.65\,m$，不滿足上述條件(a)，故系統邊緣修正因子$\gamma_{E_1} = 1.0$。

[步驟 4] 風壓平衡因子γ_a

根據 CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022) ，風壓平衡因子γ_a與有效受風面積 A 有關，依下式決定：

$$\gamma_a = \begin{cases} 0.8 & A \le 1\,m^2 \\ -4\log(A) + 0.8 & 1\,m^2 < A \le 10\,m^2 \\ 0.4 & A > 10\,m^2 \end{cases} \quad \text{.....(3.1)}$$

本範例所針對設計的所有構件及扣件其有效受風面積皆小於$1\,m^2$，故風壓平衡因子$\gamma_a = 0.8$。

貳、橫梁及各扣件之設計風壓(力)

[步驟 1] 相關之設計參數

根據「建築物耐風設計規範及解說」(2014)表 2.2，地況 B 之相關參數$\alpha = 0.25$；$z_g = 400\,m$，用途係數$I = 1.0$，基本設計風速$V_{10}(C) = 32.5\,m/s$。

[步驟 2] 風速壓地況係數$K(z)$與地形係數K_{zt}

根據「建築物耐風設計規範及解說」(2014)規範式(2.7)，計算$K(z)$。因建

築物平均屋頂高度$h = 3.3\,m$，取規範 $h \le 5\,m$的公式計算：

$K(h) = 2.774\left(\frac{5}{z_g}\right)^{2\alpha} = 2.774\left(\frac{5}{400}\right)^{2\times 0.25} = 0.31$。

根據「建築物耐風設計規範及解說」(2014)規範式(2.8)，計算K_{zt}。因工址附近無特殊地形，$K_{zt} = 1.0$。

[步驟 3] 平均屋頂高度之風速壓$q(h)$

根據「建築物耐風設計規範及解說」(2014)規範式(2.6)，離地面 h 公尺高處之風速壓 $q(h) = 0.06 \times K(h) \times K_{zt} \times [IV_{10}(C)]^2 = 0.06 \times 0.31 \times 1.0 \times [1.0 \times 32.5]^2 = 19.66\,kgf/m^2$。

[步驟 4] 橫梁及各扣件之設計正負風壓

根據 CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022) 之斜屋頂平貼型結構系統之設計風壓計算公式為$P = q(h) \times (G_{cp}) \times \gamma_{E_1} \times \gamma_a$。

由於所考慮構件及扣件之有效受風面積皆小於$1\,m^2$，若其全位於③區內，(GC_p)分別為 0.6 和-6.0，則設計正風壓為 $P = 19.66 \times 0.6 \times 1.0 \times 0.8 = 9.43\,kgf/m^2$，負風壓為$P = 19.66 \times -6.0 \times 1.0 \times 0.8 = -94.34\,kgf/m^2$。若其全位於②區內，$(GC_p)$分別為 0.6 和-3.8，設計正風壓為$P = 19.66 \times 0.6 \times 1.0 \times 0.8 = 9.43\,kgf/m^2$，負風壓為$P = 19.66 \times -3.8 \times 1.0 \times 0.8 = -59.75\,kgf/m^2$。若其全位於①區內，$(GC_p)$分別為 0.6 和-2.1，設計正風壓為$P = 19.66 \times 0.6 \times 1.0 \times 0.8 = 9.43\ kgf/m^2$，負風壓為 $P = 19.66 \times -2.1 \times 1.0 \times 0.8 = -33.02\,kgf/m^2$。

若構件或扣件的承受風壓面積橫跨不同區域，其設計風壓可依不同區域的面積比例加權平均計算得之。以橫梁 b-c 段為例，其橫跨①區、②區、③區，③區的設計正風壓及負風壓為$9.43\,kgf/m^2$和$-94.34\,kgf/m^2$，橫跨面積$0.348\,m^2$，②區的設計正風壓及負風壓為$9.43\,kgf/m^2$和$-59.75\,kgf/m^2$，橫跨面積為$0.435\,m^2$，①區的設計正風壓及負風壓為$9.43\,kgf/m^2$和$-33.02\,kgf/m^2$，橫跨面積為$0.067\,m^2$，對面積加權平均後所得風壓為$9.43\,kgf/m^2$和$-71.79\,kgf/m^2$。仿照上述的計算流程，分別計算其他不同構件及扣件的設計正風壓及設計負設計風壓，其數值分析結果列於表 3-3。

[步驟 5] 各扣件之設計正負風力

設計正負風力為設計風壓與承受風壓面積A_{actual}的乘積。

針對面板接橫梁扣件 j 點，設計正負風壓P為$9.43\ kgf/m^2$及$-61.22\ kgf/m^2$，承受風壓面積為$0.935\ m^2$，則設計正風力$F = 9.43\ kgf/m^2 \times 0.935\ m^2 = 8.82\ kgf$；設計負風力$F = -61.22\ kgf/m^2 \times 0.935\ m^2 = -57.24\ kgf$。

針對橫梁接 L 型角鋁扣件 c 點，設計正負風壓P為$9.43\ kgf/m^2$及$-55.66\ kgf/m^2$，承受風壓面積為$0.850\ m^2$，則設計正風力$F = 9.43\ kgf/m^2 \times 0.850\ m^2 = 8.02\ kgf$；設計負風力$F = -55.66\ kgf/m^2 \times 0.850\ m^2 = -47.31\ kgf$。同理，L 型角鋁接支撐鋁件 p 點及支撐鋁件接屋頂浪板下結構梁之扣件 v 點的設計正風力$F = 8.02\ kgf$及設計負風力$F = -47.31\ kgf$。

彙整所有扣件的設計正負風力 F，將其列於表 3-3。

表 3-3 示範例 1 構件及扣件設計風壓及風力

名稱		承受風壓面積 (m^2)	設計風壓 (kgf/m^2)		設計風力 (kgf)	
			正風壓	負風壓	正風力	負風力
橫梁	a-b 段	0.213	9.43	-89.05		
	b-c 段	0.850	9.43	-71.79		
	c-d 段或 d-e 段或 e-f 段或 f-g 段	0.850	9.43	-55.66		
	g-h 段	0.213	9.43	-55.66		
面板接橫梁之扣件	j 點	0.935	9.43	-61.22	8.82	-57.24
	螺栓 1 個（軸力）				8.82	-57.24
橫梁接 L 型角鋁之扣件	c 點	0.850	9.43	-55.66	8.02	-47.31
	螺栓 1 個（軸力）				8.02	-47.31
L 型角鋁接支撐鋁件之扣件	p 點	0.850	9.43	-55.66	8.02	-47.31
	螺栓 1 個（剪力）				8.02	-47.31
支撐鋁件接屋頂浪板下結構梁之扣件	v 點	0.850	9.43	-55.66	8.02	-47.31
	螺絲 1 個（軸力）				8.02	-47.31

資料來源：本研究整理

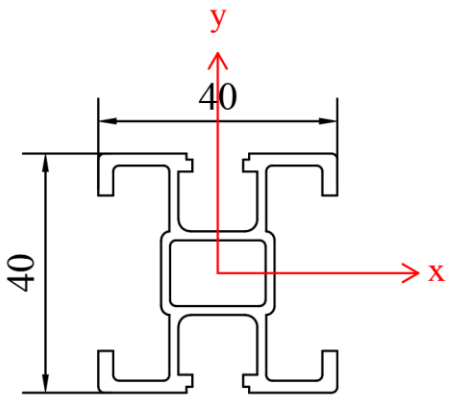
第四節 橫梁之耐風分析及檢核

橫梁使用特製之鋁擠型構件，其材質為 6063-T5 鋁合金，設計時所用之彈性模數E為7100 kgf/mm^2，剪力彈性模數為G為2700 kgf/mm^2，波森比μ為0.3，降伏強度F_y為110 MPa，極限強度F_u為150 MPa。假設採用橫梁之斷面形狀與斷面性質如表 3-4 所示。

因國內目前尚無鋁結構之相關規範，根據臺中市結構工程技師公會在 108 年編寫「太陽光電系統支撐架結構設計參考手冊草案(修訂版)」之 4.2 構件接合設計內容所述，構件檢核可參考美國鋁結構規範 Aluminum Design Manual，載重組合則參考「鋼結構容許應力設計法規範及解說」之規定。

依「鋼結構容許應力設計法規範及解說」之規定，載重組合有 $D+L$ 、$D+0.75(L\pm1.25W)$、$D+0.75(L\pm0.8E)$ 、$0.7D\pm1.25W$及$0.7D\pm0.8E$。其中，D為靜載重，包括構件自重及永久附加物重量；L為活載重，包含人員重量；E為設計地震力；W為設計風力。本示範例設計時僅考慮風載重及靜載重造成之影響，故載重組合有$D\pm0.9375\,W$、$0.7D\pm1.25W$這四種。

表 3-4 示範例 1 構件之斷面性質與斷面形狀

橫梁	
斷面性質	斷面形狀(單位:mm)
斷面模數 $S_x = 3645.25\ mm^3$ 斷面模數 $S_y = 2337.71\ mm^3$ 慣性矩 $I_x = 72905.09\ mm^4$ 慣性矩 $I_y = 46754.18\ mm^4$ 斷面積 $A = 340.83\ mm^2$	 y 軸垂直面板

資料來源：修改自 [15]

壹、橫梁

在作橫梁 a-b-c-d-e-f-g-h 結構分析時如圖 3-20 所示，將橫梁與下方縱梁連接處 b 點、c 點、d 點、e 點、f 點及 g 點的扣件視為鉸支承（Hinge）進行分析。

風載重採用表 3-3 中橫梁 a-b-c-d-e-f-g-h 的最大設計風壓，其承受風壓面積的寬度為 0.85 m。設計正風壓 a-b 段、b-c 段、c-d 段、d-e 段、e-f 段、f-g 段及 g-h 段皆為9.43 kgf/m^2，乘上寬度 0.85 m 可得線載重$q_w = 8.02\ kgf/m$；設計負風壓 a-b 段為$-89.05\ kgf/m^2$，b-c 段為$-71.79\ kgf/m^2$，c-d 段、d-e 段、e-f 段、f-g 段及 g-h 段均為$-55.66\ kgf/m^2$，乘上寬度 0.85 m 後可得線載重$q_{w1} = -75.70\ kgf/m$、$q_{w2} = -61.02\ kgf/m$、$q_{w3} = -47.31\ kgf/m$。

靜載重包含橫梁自重與模組自重，因鋁擠型自重相對較小，故只考慮模組自重。模組自重為每塊 20 kgf，橫梁 a-b-c-d-e-f-g-h 需承受之模組重為 5/2 塊，故橫梁 a-b-c-d-e-f-g-h 所承受之線載重 $q_D = (20\ kgf \times 5/2\ 塊)/5.5\ m = 9.09\ kgf/m$。

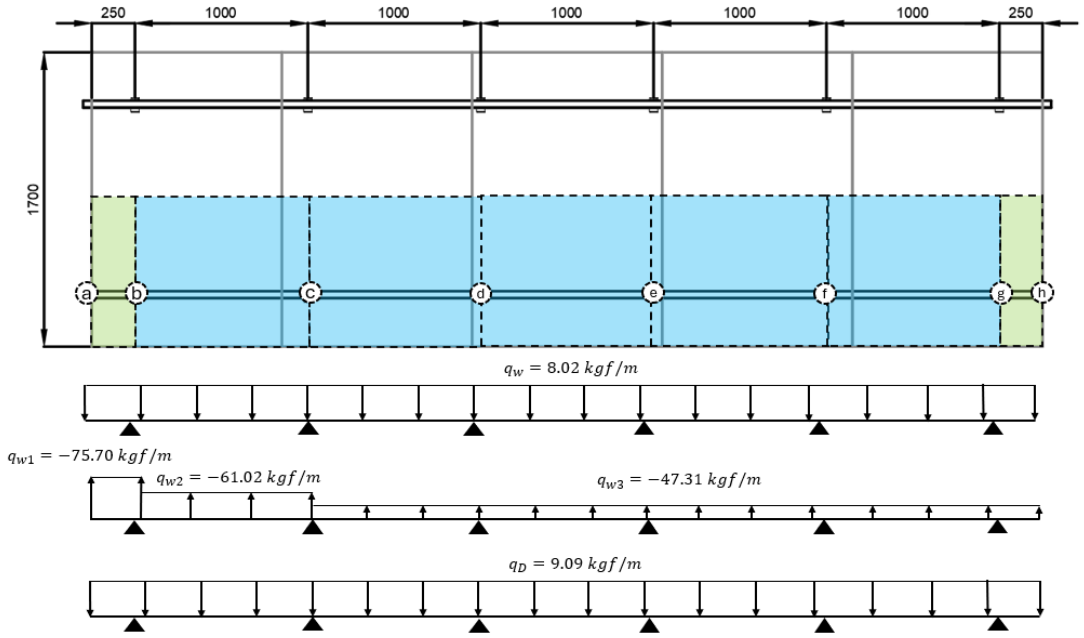


圖 3-20 斜屋頂平貼型系統之橫梁受力作用圖

資料來源：本研究整理

分析時利用 SAP 2000 軟體建模，將橫梁的斷面與材料性質輸入並且施加風載重及靜載重，即可分析出橫梁 a-b-c-d-e-f-g-h 的剪力、彎矩及變形量，當載重

組合為$0.7D + 1.25W$時可得出橫梁 a-b-c-d-e-f-g-h 中最大剪力及最大彎矩分別為$V_{max} = 85.3\ kgf$及$M_{max} = 35.6\ kgf - m$；當載重組合為$1.0D + 1.0W$時最大變形量$\delta_{max} = 0.86\ mm$。

應力檢核

利用 SAP 2000 分析軟體，選 AA-ASD(2000)進行檢核，得橫梁 a-b-c-d-e-f-g-h 應力比為$0.16 \leq 1$，確認構件符合規範。

變形檢核

為避免在強風持續作用下產生振動破壞，設計時應盡量減少構件在風力作用下之變位，同時檢核確認構件變位量不超過容許值，以容許變形量δ_a = 跨距/175 (業界常用公式)，進行檢核。

$$\delta_{max} = 0.86\ mm \leq \delta_a = \frac{1000}{175} = 5.71\ mm$$，檢核通過。

第五節　扣件之耐風分析及檢核

扣件接合設計時，螺栓可能的破壞模式有拉力破壞、剪力破壞及承壓破壞，接合母材可能的破壞模式有總斷面積破壞、淨斷面積破壞及塊狀剪力撕裂，實務上需針對上述破壞模式作檢核，以確保安全性。本手冊僅示範螺栓拉力破壞及剪力破壞之檢核。

所檢核扣件包括面板接橫梁之扣件、橫梁接 L 型角鋁之扣件、L 型角鋁接支撐鋁件之扣件及支撐鋁件接屋頂浪板下結構梁之扣件。各扣件均採用 M8 螺栓鎖固，其螺距為 1.25mm。螺栓採用 SUS 304 (A2-50)不鏽鋼，其極限抗拉強度為$F_{tu} = 500\ MPa = 72.5\ ksi$、極限抗剪強度為 $F_{su} = 200\ MPa = 29\ ksi$，接合母材為 6061-T6 鋁合金。載重組合參考「鋼結構容許應力設計法規範及解說」(2010) 之規定，考慮 $D \pm 0.9375\ W$、$0.7D \pm 1.25W$這四種載重組合。根據臺中市結構工程技師公會在 108 年編寫「太陽光電系統支撐架結構設計參考手冊草案(修訂版)」之 4.3 螺栓接合內容所述，螺栓檢核可參考美國鋁結構規範 Aluminum Design Manual 之 5.2 Bolted Connections。

壹、螺栓檢核公式

螺栓容許拉力為$F_t = A_s \times f_t$。其中，F_t為螺栓容許拉力；A_s為螺栓有效斷面積，其公式為$A_s = \frac{\pi}{4}\left(D - \frac{1.191}{n}\right)^2$，其中 D 為螺栓之標稱直徑(英吋)，n 為每英吋之螺紋數；f_t為螺栓容許拉應力，其公式為$f_t = \frac{F_{tu}}{1.2n_u}$，其中$n_u$為安全係數，取 1.95。

螺栓容許剪力為$F_s = A_S^* \times f_s$。其中，F_s為螺栓容許剪力；A_S^*為螺栓剪力有效斷面積，當剪力作用在螺紋上時，$A_S^* = A_s$，當剪力未作用在螺紋上時，$A_S^* = \frac{\pi}{4}(D)^2$；$f_s$為螺栓容許剪應力，其公式為$f_s = \frac{F_{su}}{1.2n_u}$。

貳、面板接橫梁之扣件

面板連接橫梁時需分為兩步驟完成，首先將中壓塊及側壓塊固定於橫梁上如圖 3-21 所示，待壓塊放置定位後，將模板插入再將其螺栓鎖緊如圖 3-22 所示。

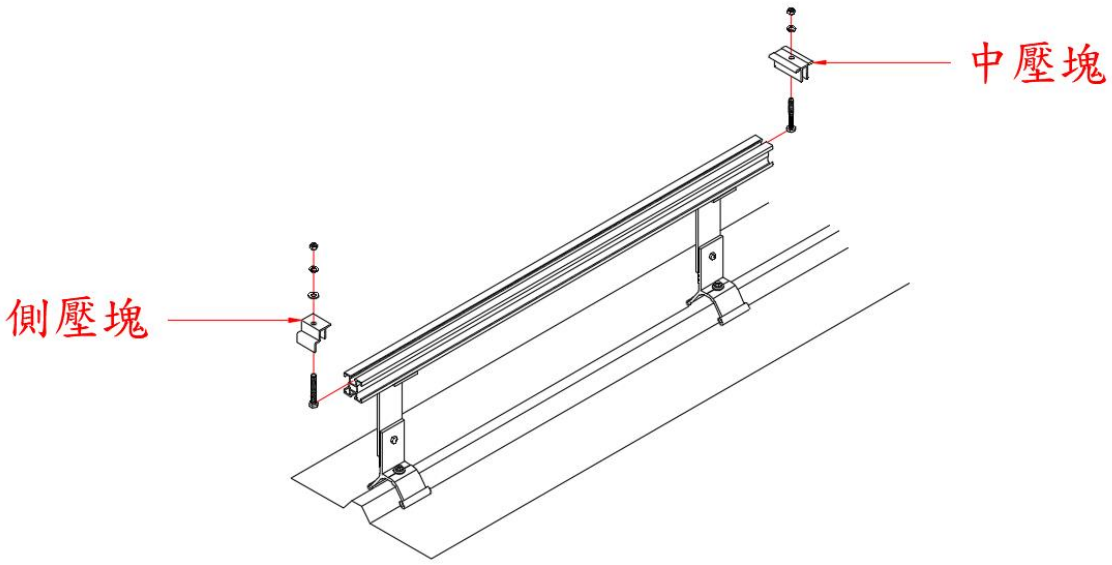


圖 3-21 斜屋頂平貼型系統之面板接橫梁示意圖 1

資料來源：修改自[15]

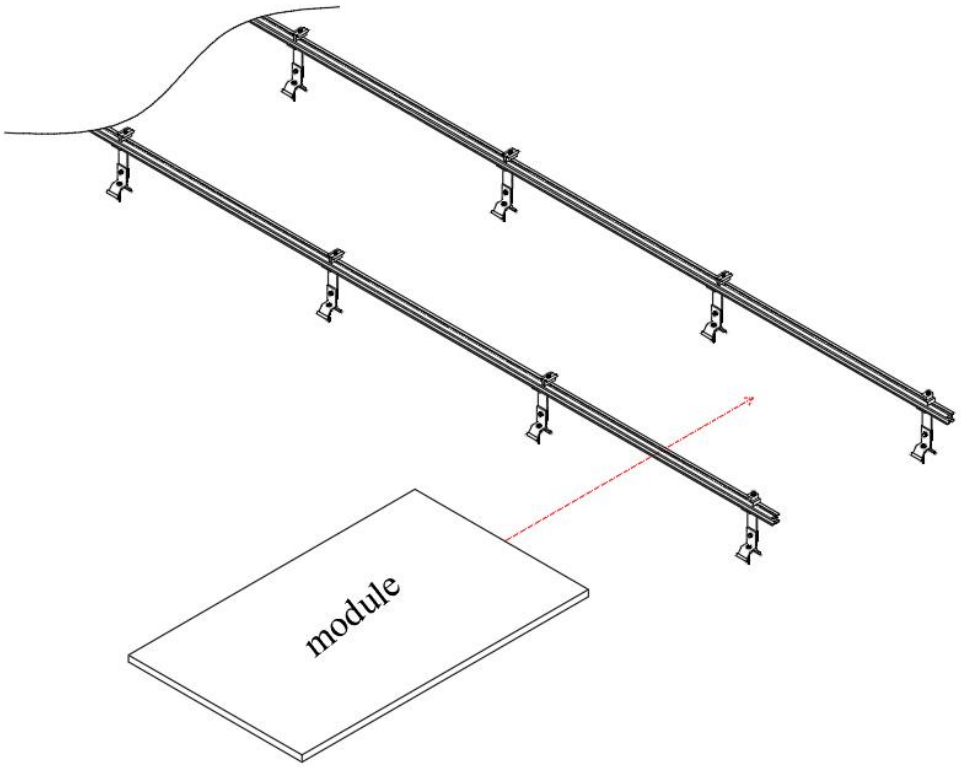


圖 3-22 斜屋頂平貼型系統之面板接橫梁示意圖 2

資料來源：修改自[15]

螺栓拉力分析

風載採用表 3-3 中面板接橫梁扣件 j 點之設計正風力8.82 kgf及設計負風力 $-57.24\ kgf$，正號表示力量指向面板上表面，對此扣件而言為壓力；負號表示力量遠離面板上表面，對此扣件而言為拉力。

面板連接橫梁扣件螺栓數為 1 個，單一螺栓承擔設計風拉力為$-57.24\ kgf$，對螺栓造成之最大拉力為$F_{ten} = 1.25W = 1.25 \times (-57.24) = -71.55\ kgf$。

螺栓拉力檢核

螺栓直徑$D = 8\ mm = 0.315\ in$、每英吋之螺紋數$n = 25.4/1.25 = 20.32$，故螺栓有效斷面積$A_s = \frac{\pi}{4}\left(D - \frac{1.191}{n}\right)^2 = \frac{\pi}{4}\left(0.315 - \frac{1.191}{20.32}\right)^2 = 0.0516\ in^2$；允許拉應力$f_t = F_{tu}/1.2n_u = 72.5/2.34 = 30.98\ ksi$。螺栓容許拉力$F_t = A_s \times f_t = 0.0516\ in^2 \times 30.98\ ksi = 1.599\ kip = 725.3\ kgf$。

螺栓拉力$|F_{ten}| = 71.55\ kgf <$ 螺栓容許拉力$F_t = 725.3\ kgf$，檢核通過。

參、橫梁接 L 型角鋁之扣件

橫梁接 L 型角鋁扣件如圖 3-23 所示，將鋁擠型橫梁固定於下方 L 型角鋁上。

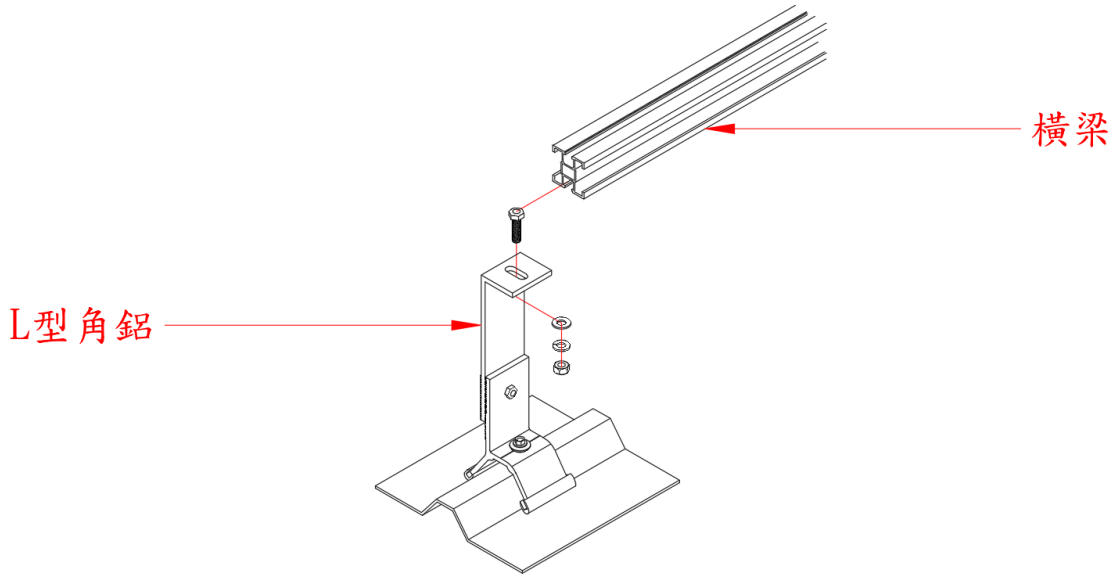


圖 3-23 斜屋頂平貼型系統之橫梁接 L 型角鋁示意圖

資料來源：修改自[15]

螺栓拉力分析

風載採用表 3-3 中橫梁接 L 型角鋁扣件 C 點之設計正風力$8.02\ kgf$及設計負風力$-47.31\ kgf$，正號表示力量指向面板上表面，對此扣件而言為壓力；負號表示力量遠離面板上表面，對此扣件而言為拉力。靜載重包含橫梁自重與面板自重，因鋁擠型自重相對較小，故只考慮面板自重，橫梁接縱梁扣件承受面板面積為$0.85\ m^2$按比例分配橫梁所需承擔面板自重為$9.01\ kgf$。

橫梁連接 L 型角鋁扣件螺栓數為 1 個，單一螺栓承擔設計風拉力為$-47.31\ kgf$；單一螺栓承擔靜載重為$9.01\ kgf$。對螺栓造成之最大組合拉力為$F_{ten} = 0.7D + 1.25W = 0.7 \times 9.01 + 1.25 \times (-47.31) = -52.83\ kgf$。

螺栓拉力檢核

螺栓直徑$D = 8\ mm = 0.315\ in$、每英吋之螺紋數$n = 25.4/1.25 = 20.32$，故螺栓有效斷面積$A_s = \frac{\pi}{4}\left(D - \frac{1.191}{n}\right)^2 = \frac{\pi}{4}\left(0.315 - \frac{1.191}{20.32}\right)^2 = 0.0516\ in^2$；允許拉應力$f_t = F_{tu}/1.2n_u = 72.5/2.34 = 30.98\ ksi$。螺栓容許拉力$F_t = A_s \times f_t = 0.0516\ in^2 \times 30.98\ ksi = 1.599\ kip = 725.3\ kgf$。

螺栓拉力$|F_{ten}| = 52.83\ kgf <$ 螺栓容許拉力$F_t = 725.3\ kgf$，檢核通過。

肆、L 型角鋁接支撐鋁件之扣件

L 型角鋁接支撐鋁件扣件如圖 3-24 所示，將 L 型角鋁固定於下方支撐鋁件上。

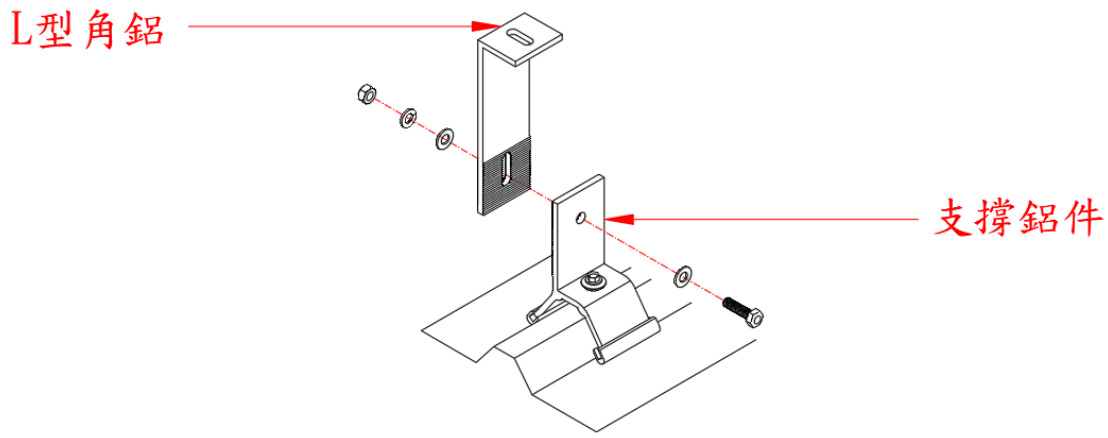


圖 3-24 斜屋頂平貼型系統之 L 型角鋁接支撐鋁件示意圖

資料來源：修改自[15]

螺栓剪力分析

風載採用表 3-3 中 L 型角鋁接支撐鋁件 p 點之設計正風力 8.02 kgf 及設計負風力 $-47.31\ kgf$，正號表示力量指向面板上表面，負號表示力量遠離面板上表面，對此扣件而言均為剪力。靜載重包含橫梁自重與面板自重，因鋁擠型自重相對較小，故只考慮面板自重，橫梁接縱梁扣件承受面板面積為 $0.85\ m^2$ 按比例分配橫梁所需承擔面板自重為 $9.01\ kgf$。

L 型角鋁連接支撐鋁件扣件螺栓數為 1 個，假設剪力有作用在螺紋上，單一螺栓承擔設計風剪力為 $-47.31\ kgf$；單一螺栓承擔靜載重為 $9.01\ kgf$。對螺栓造成之最大組合剪力為 $F_{shear} = 0.7D + 1.25W = 0.7 \times 9.01 + 1.25 \times (-47.31) = -52.83\ kgf$。

螺栓剪力檢核

螺栓直徑 $D = 8\ mm = 0.315\ in$、每英吋之螺紋數 $n = 25.4/1.25 = 20.32$，故螺栓有效斷面積 $A_s = \frac{\pi}{4}\left(D - \frac{1.191}{n}\right)^2 = \frac{\pi}{4}\left(0.315 - \frac{1.191}{20.32}\right)^2 = 0.0516\ in^2$；允許剪應力 $f_s = F_{su}/1.2n_u = 29/2.34 = 12.39\ ksi$。螺栓容許剪力 $F_s = A_s \times f_s = 0.0516\ in^2 \times 12.39\ ksi = 0.639\ kip = 289.9\ kgf$。

螺栓剪力 $|F_{shear}| = 52.83\ kgf <$ 螺栓容許剪力 $F_s = 289.9\ kgf$，檢核通過。

伍、支撐鋁件接屋頂浪板下結構梁之扣件

支撐鋁件接屋頂浪板下結構梁扣件如圖 3-25 所示，將支撐鋁件以自攻螺絲固定屋頂浪板，而自攻螺絲穿透屋頂浪板鎖固於下方結構梁上。

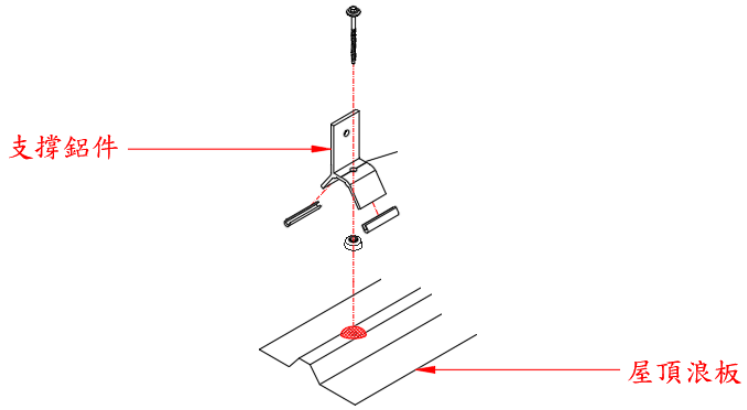


圖 3-25 斜屋頂平貼型系統之支撐架接屋頂浪板示意圖

資料來源：修改自 [15]

螺絲拉力分析

風載採用表 3-3 中支撐鋁件接屋頂浪板下結構梁扣件 v 點之設計正風力 8.02 kgf 及設計負風力 $-47.31\ kgf$，正號表示力量指向面板上表面，對此扣件而言為壓力；負號表示力量遠離面板上表面，對此扣件而言為拉力。靜載重包含橫梁自重與面板自重，因鋁擠型自重相對較小，故只考慮面板自重，橫梁接縱梁扣件承受面板面積為 $0.85\ m^2$ 按比例分配橫梁所需承擔面板自重為 $9.01\ kgf$。

橫梁連接 L 型角鋁扣件螺栓數為 1 個，單一螺栓承擔設計風拉力為 $-47.31\ kgf$；單一螺栓承擔靜載重為 $9.01\ kgf$。對螺栓造成之最大組合拉力為 $F_{ten} = 0.7D + 1.25W = 0.7 \times 9.01 + 1.25 \times (-47.31) = -52.83\ kgf$。

螺絲拉力檢核

1. 自攻螺絲檢核

   屋頂浪板下之結構梁與自攻螺絲接合可依「冷軋型鋼構造建築物結構設計規範及解說」(2016) 進行檢核，確認其強度是否足夠。

2. 屋頂結構檢核

   需檢核屋頂結構之承載力是否足夠，同時確保防水層不會破壞。

第四章 地面踞置型系統之耐風設計（示範例 2）

本章所稱地面踞置型系統為安裝於地面，採陣列型式排列（如圖 2-2 所示）。耐風設計的主要目的是確保支撐架在強風環境下能夠維持結構完整性和安全性，而實務上在進行支撐架設計時，尚需考慮不同的載重組合情況，例如靜載重、風載重及地震力之效應，但本示範例只考慮靜載重及風載重之效應。

本示範例首先規劃一地面踞置型系統，依據 CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022) 之 6.地面踞置型結構系統決定其構件及扣件之設計風壓，再考慮風載重及靜載重之效應，做相關之結構設計。本示範例之設計流程圖如圖 4-1 所示。

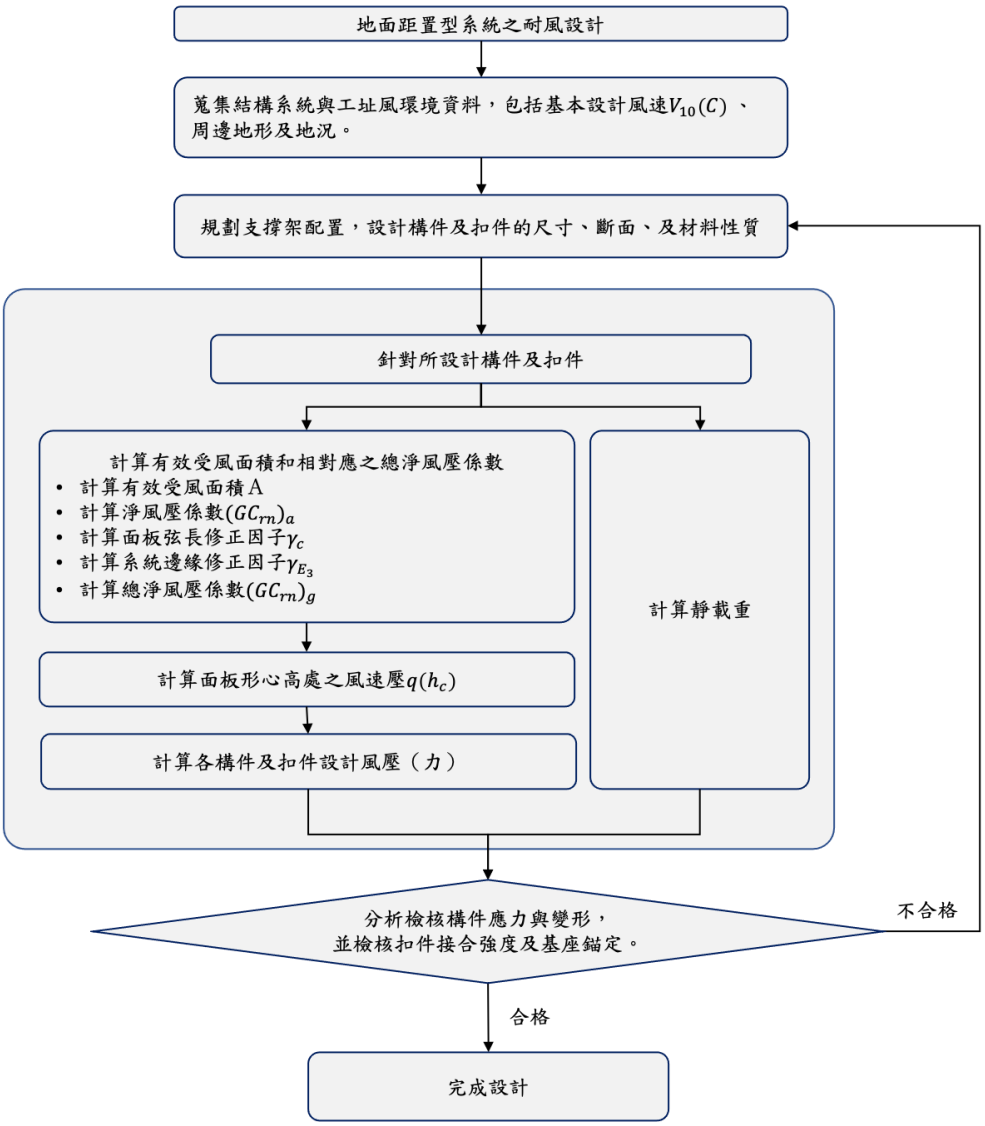


圖 4- 1 地面踞置型結構系統之耐風設計流程圖

資料來源：本研究整理

第一節　設計依據

壹、參考依據

1. 內政部，「鋼結構容許應力設計法規範及解說」，2010。
2. 內政部，「建築物耐風設計規範與解說」，2014。
3. 經濟部，CNS 16189「 太陽光電系統之設計風載重估算指引」之 6.地面踞置型結構系統之設計風壓，2022。
4. The Aluminum Association，「Aluminum Design Manual」，2005。

貳、適用範圍

CNS 16189「 太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022) 之 6.地面踞置型結構系統之設計風壓提供之風壓計算公式適用於同時滿足下列條件之地面踞置型結構系統：

1. 面板弦長L_p(如圖 4-2 所示)小於或等於 2m。
2. 面板傾角 ω(如圖 4-2 所示)小於或等於 35 度。
3. 面板與地面最小距離h_1(如圖 4-2 所示)小於或等於 0.6m，面板與地面最大距離h_2(如圖 4-2 所示)小於或等於 1.2m。
4. 模組間隙大於或等於 6.4mm，模組長(或寬)小於或等於 2m。

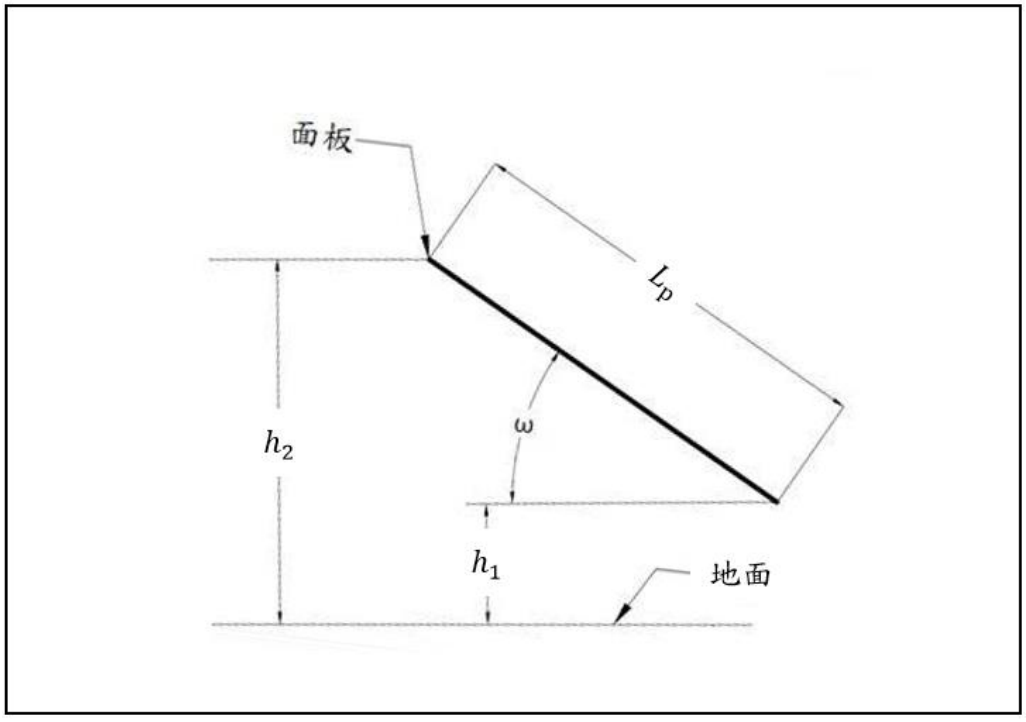


圖 4- 2 地面踞置型結構系統示意圖

資料來源：CNS 16189「 太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022)

第二節 結構物資料與工址風環境

本章擬於嘉義縣太保市新建一地面踞置型太陽光電系統，整體場域之立體配置圖如圖 4-3 所示，共有 9 座支撐架結構系統；整體場域之平面配置圖如圖 4-4 所示，各結構系統與鄰近結構系統距離為 1.5m。

單一結構系統之立體配置圖、側視圖、側視示意圖、平行面板之平面圖及設計位置圖分別如圖 4-5、圖 4-6、圖 4-7、圖 4-8 及圖 4-9 所示。單一系統之面板由 6 片模組以 18 個扣件分別固定於 3 根橫梁上，每根橫梁以 3 個扣件固定於下方縱梁上，每根縱梁以 2 個扣件固定於下方 2 根柱子上，每根柱子固定於基座上。

理論上應根據各支撐架結構系統所承受的風壓情況，分別進行其設計，但由於設計程序類似，本範例僅分析設計圖 4-4 左上角的支撐架結構系統。針對圖 4-9 所示之單一結構系統，分別設計其橫梁 a-b-c-d-e、縱梁 f-g-h-i、g 點下方柱、h 點下方柱、面板接橫梁扣件(其形心為 k 點)、橫梁接縱梁扣件(其形心之面板投影為 c 點)、縱梁接柱扣件(位於 g 點下方柱頂)及柱接基座扣件(位於 g 點下方柱底)。

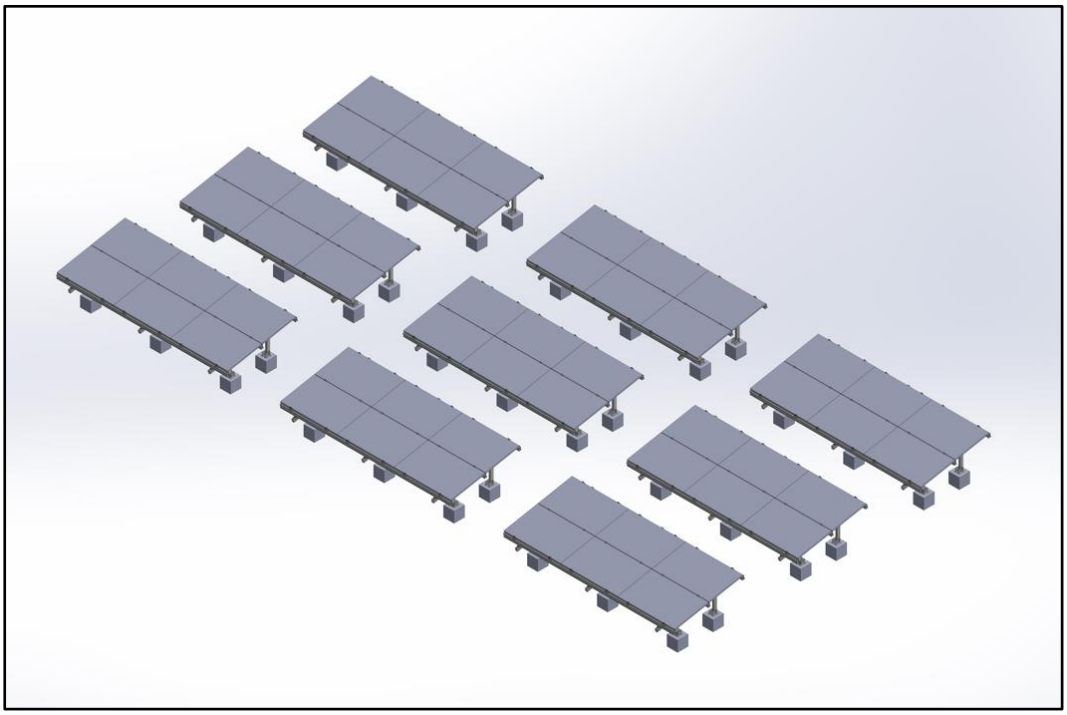


圖 4- 3 整體場域地面踞置型系統之立體配置圖

資料來源：[15]

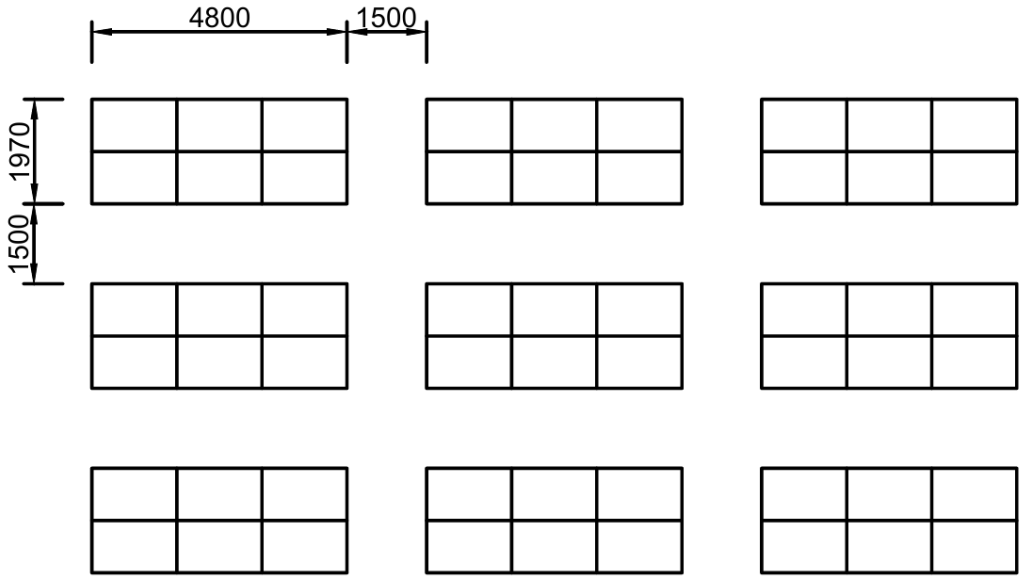


圖 4- 4 整體場域地面踞置型系統之平面配置圖(單位: mm)

資料來源：本研究整理

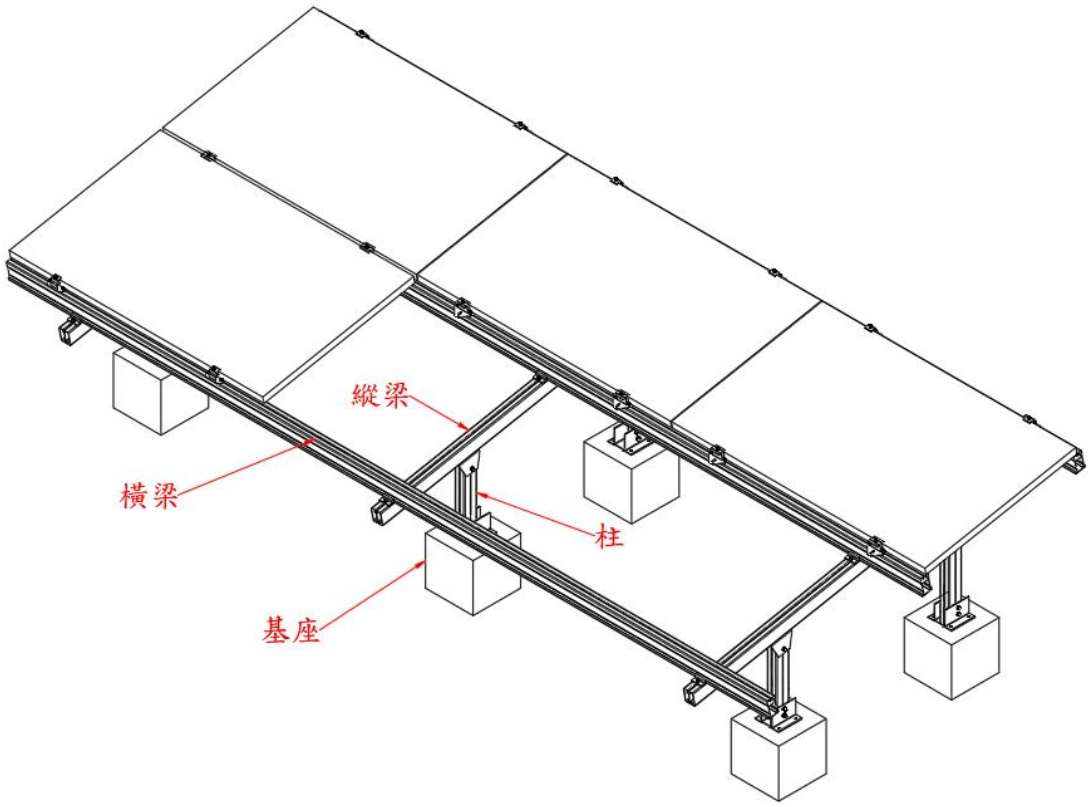


圖 4- 5 單一地面踞置型系統之立體配置圖

資料來源：修改自[15]

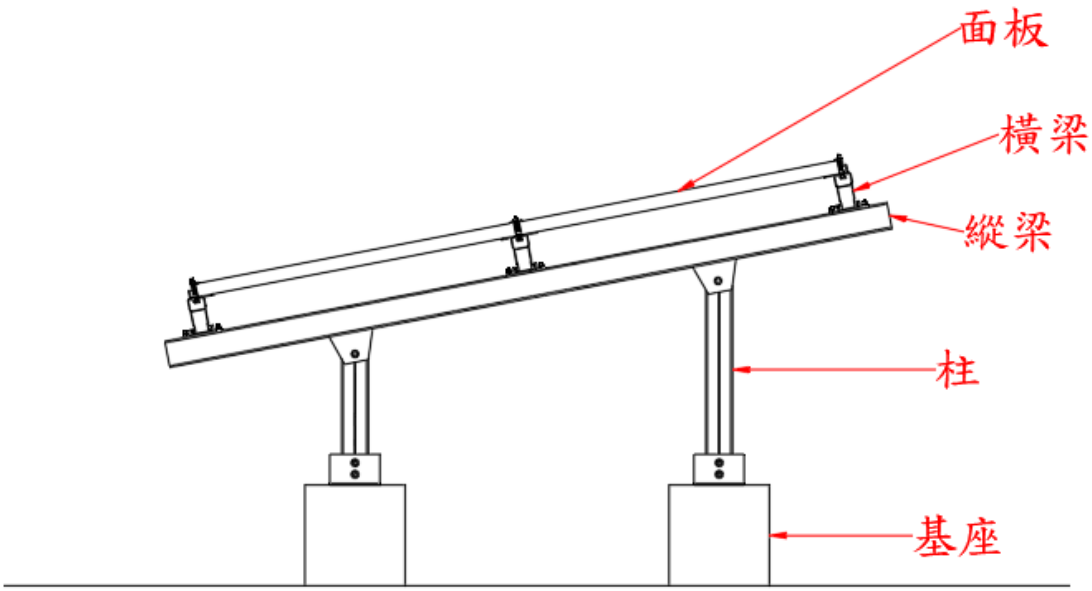


圖 4- 6 單一地面踞置型系統之側視圖

資料來源：修改自 [15]

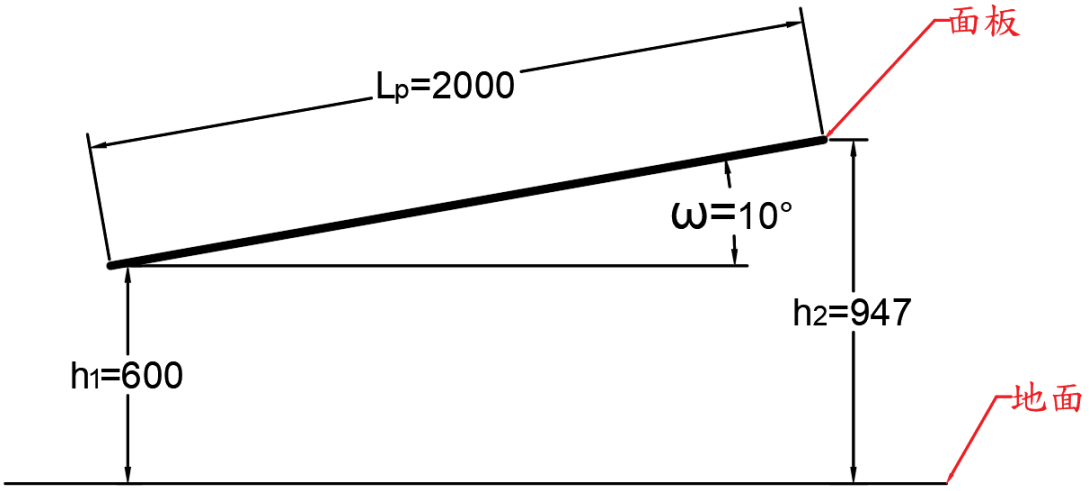


圖 4- 7 單一地面踞置型系統之側視示意圖(單位:mm)

資料來源：本研究整理

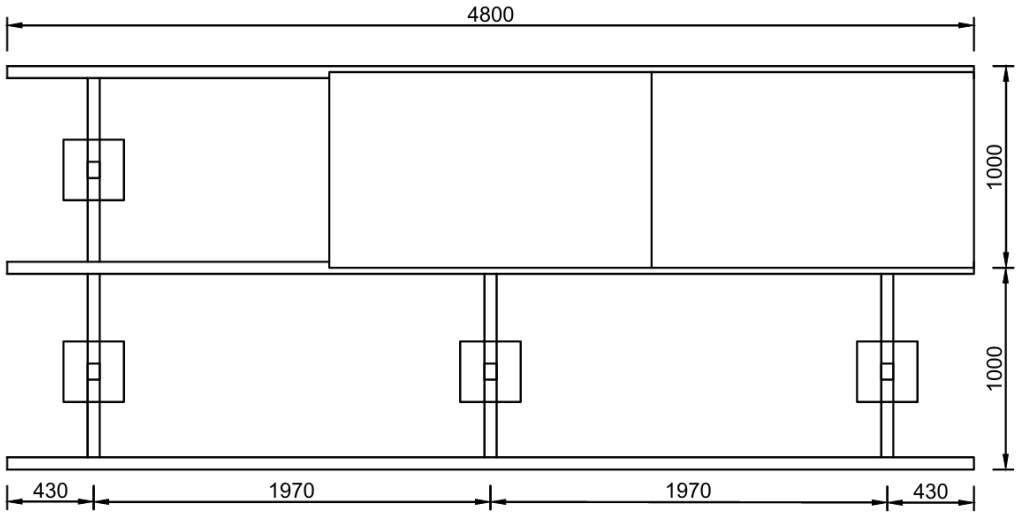


圖 4- 8 單一地面踞置型系統平行面板之平面圖(單位:mm)

資料來源：本研究整理

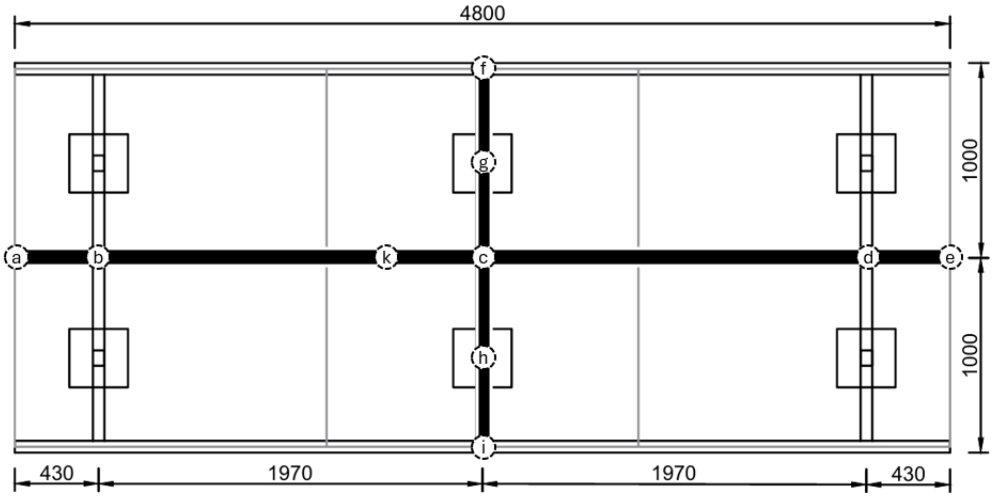


圖 4- 9 單一地面踞置型系統之設計位置圖(單位:mm)

資料來源：本研究整理

結構物資料包含太陽光電系統尺寸、面板配置、用途係數 I；工址風環境包含基本設計風速$V_{10}(C)$、結構物周邊地形以及地況。本節擬定結構物資料與工址風環境如下表 4-1 所示。

表 4- 1 地面踞置型系統之結構物與工址風環境資料

結構物資料	太陽光電結構系統	面板由 6 片模組以 18 個扣件分別固定於 3 根橫梁上，每根橫梁以 3 個扣件固定於下方縱梁上，每根縱梁以 2 個扣件固定於下方 2 根柱子上，每根柱子固定於基座上。
	面板配置	1. 面板弦長 $L_p = 2\,m$。 2. 面板傾角 $\omega = 10°$。 3. 面板與地面最小距離 $h_1 = 0.6\,m$。 4. 面板與地面最大距離 $h_2 = 0.947\,m$。 5. 模組長為$1.56\,m$、寬為$0.98\,m$。 6. 模組間隙為$20\,mm$。
	用途係數	根據「建築物耐風設計規範與解說」(2014) 規範 2.5 節，依照重要程度可將 I 值分為1.1、1.0或 0.9，本範例取 $I = 1.0$。
工址風環境	基本設計風速 $V_{10}(C)$	根據「建築物耐風設計規範與解說」(2014) 規範 2.4 節，嘉義縣太保市的$V_{10}(C) = 32.5\ (m/s)$。
	地況種類	依結構物各方向上風處之地表粗糙度決定皆為地況 C。
	地形係數	無特殊地形。

資料來源：本研究整理

第三節 各構件及扣件之設計風壓(力)

各構件及扣件之設計風壓(力)之計算步驟包括決定有效受風面積、計算總淨風壓係數及計算構件與扣件之設計風壓(力)，其細節如下：

壹、各構件有效受風面積及相對應之總淨風壓係數

根據「建築物耐風設計規範與解說」(2014) 1.3 節對有效受風面積 A 之定義可知，結構構件之有效受風面積 A 為跨距長度與有效寬度之乘積，有效寬度不必小於其跨距長度的 1/3。對扣件而言，有效受風面積 A 不得大於單一扣件之受風面積。決定有效受風面積及計算總淨風壓係數方式如下：

[步驟 1]有效受風面積 A

(a) 橫梁 a-b-c-d-e：

如圖 4-10 所示，將風力傳遞至橫梁 a-b-c-d-e 上，且橫梁架設在間距為 1.97 m 的縱梁上，分別以 a-b 段、b-c 段、c-d 段及 d-e 段表示。

針對橫梁 a-b 段，其跨距長度為 0.43 m，其寬度為橫梁間距 1.00 m，故承受風壓面積為$0.43\,m \times 1.00\,m = 0.43\,m^2$。橫梁 a-b 段之有效寬度為$\max(0.43/3, 1.00) = 1.00\,m$，故其有效受風面積為$A = 0.43\,m \times 1.00\,m = 0.43\,m^2$。同理，橫梁 d-e 段之承受風壓面積為$0.43\,m^2$，有效受風面積亦為$0.43\,m^2$。

針對橫梁 b-c 段，其跨距長度為 1.97 m，其寬度為橫梁間距 1.00 m，故承受風壓面積為$1.97\,m \times 1.00\,m = 1.97\,m^2$。橫梁 b-c 段之有效寬度為$\max(1.97/3, 1.00) = 1.00\,m$，故其有效受風面積為$A = 1.97\,m \times 1.00\,m = 1.97\,m^2$。同理，橫梁 c-d 段之承受風壓面積為$1.97\,m^2$，有效受風面積亦為$1.97\,m^2$。

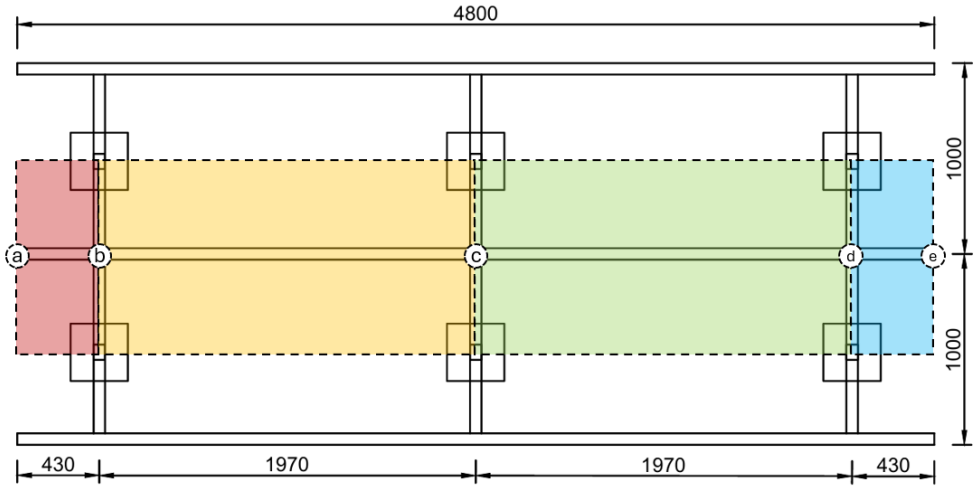


圖 4- 10 示範例 2 之橫梁 a-b-c-d-e 有效受風面積示意圖(單位:mm)

資料來源：本研究整理

(b) 縱梁 f-g-h-i：

如圖 4-11 所示，將風力傳遞至縱梁 f-g-h-i 上，且縱梁架設在間距為 1.00 m 的柱上並被分為 f-g 段、g-h 段及 h-i 段。

針對縱梁 f-g 段，其跨距長度為 0.50 m，其寬度為縱梁間距 1.97 m，故承受風壓面積為$0.50\ m \times 1.97\ m = 0.985\ m^2$。縱梁 f-g 段之有效寬度為$\max(0.50/3, 1.97) = 1.97\ m$，故其有效受風面積為$A = 0.50\ m \times 1.97\ m = 0.985\ m^2$。同理，縱梁 h-i 段之承受風壓面積為$0.985\ m^2$，有效受風面積為$0.985\ m^2$。

針對縱梁 g-h 段，其跨距長度為 1.00 m，其寬度為縱梁間距 1.97 m，故承受風壓面積為$1.00\ m \times 1.97\ m = 1.97\ m^2$。縱梁 g-h 段之有效寬度為$\max(1.00/3, 1.97) = 1.97\ m$，故其有效受風面積為$A = 1.00\ m \times 1.97\ m = 1.97\ m^2$。

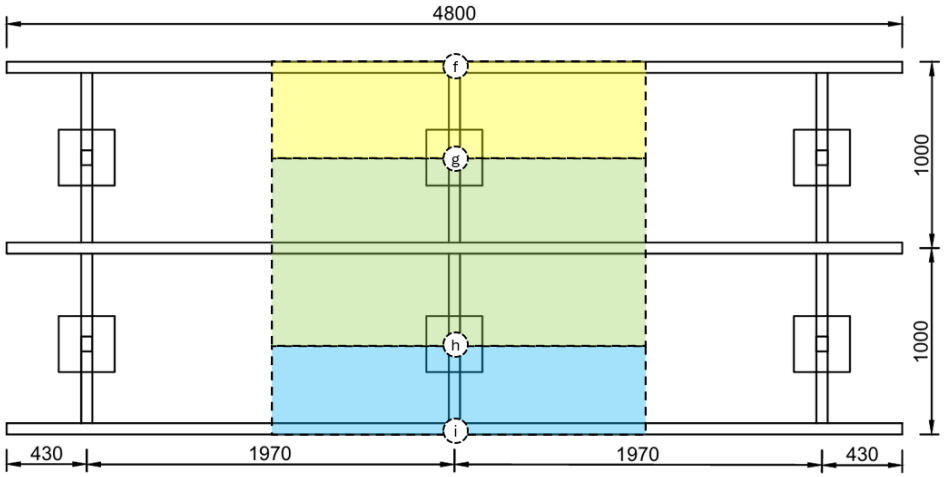


圖 4- 11 示範例 2 之縱梁 f-g-h-i 有效受風面積示意圖(單位:mm)

資料來源：本研究整理

(c) g 點下方柱：

如圖 4-12 所示，將風力傳遞至 g 點下方柱上，且柱架設在間距為 1.00m 的基座上。

針對 g 點下方柱，其跨距長度為 1.00 m，其寬度為柱間距 1.97 m，故承受風壓面積為 $1.00\,m \times 1.97\,m = 1.97\,m^2$。g 點下方柱之有效寬度為 $\max(1.00/3, 1.97) = 1.97\,m$，故其有效受風面積為 $A = 1.00\,m \times 1.97\,m = 1.97\,m^2$。同理，h 點下方柱之承受風壓面積為 $1.97\,m^2$，有效受風面積為 $1.97\,m^2$。

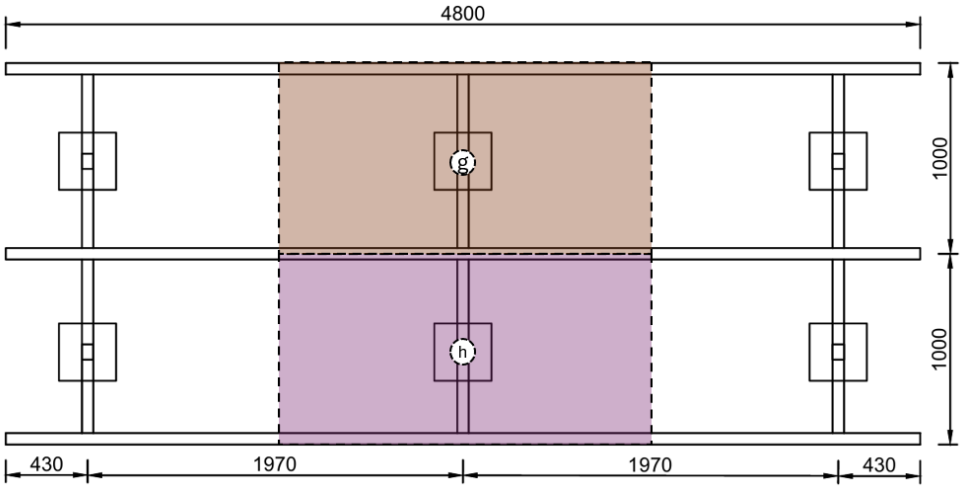


圖 4- 12 示範例 2 之 g 點及 h 點有效受風面積示意圖(單位:mm)

資料來源：本研究整理

(d) 面板接橫梁扣件(其形心為 k 點)：

如圖 4-13 所示，單一模組的尺寸為$1.56\,m \times 0.98\,m$。為方便計算，將模組間距計入有效受風面積，調整後的尺寸為$1.6\,m \times 1\,m$，並由四個扣件固定。因扣件之有效受風面積不得大於其承受風壓面積，故對 k 點之扣件取其有效受風面積為承受風壓面積$A = 0.8\,m \times 1\,m = 0.8\,m^2$。

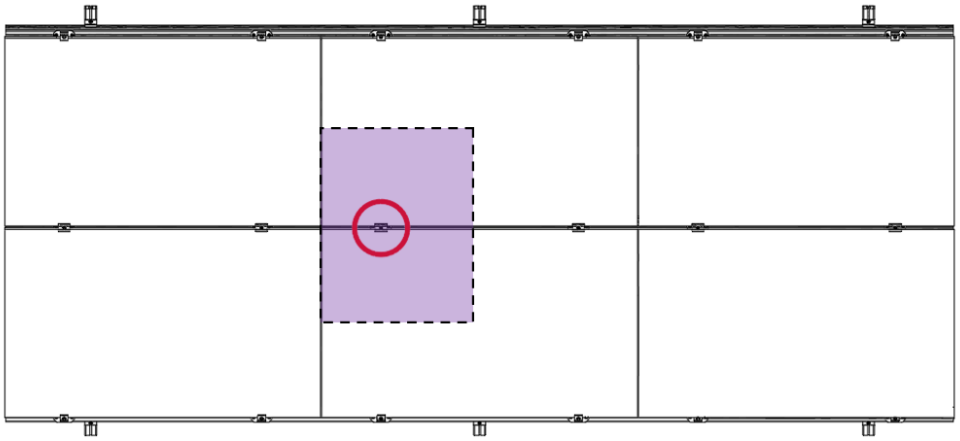


圖 4- 13 示範例 2 之 k 點有效受風面積示意圖

資料來源：修改自[15]

(e) 橫梁接縱梁扣件(其形心之面板投影為 c 點)：

如圖 4-14 所示，將風力傳遞至橫梁上，且橫梁架設在縱梁 b、c、d 點的橫梁接縱梁扣件上。針對橫梁接縱梁扣件(其形心之面板投影為 c 點)，因扣件之有效受風面積不得大於其承受風壓面積，故其有效受風面積為承受風壓面積$A = 1.97\,m \times 1.00\,m = 1.97\,m^2$。

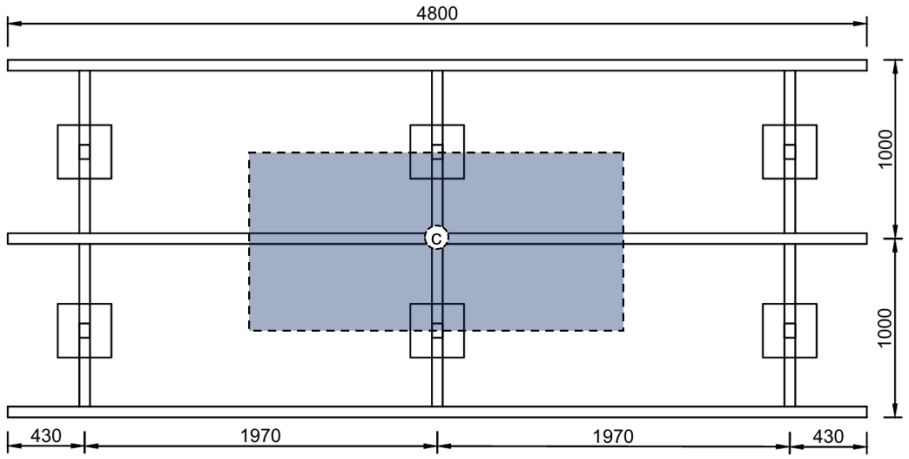


圖 4- 14 示範例 2 之 c 點有效受風面積示意圖(單位:mm)

資料來源：本研究整理

(f) 縱梁接柱扣件(位於 g 點下方柱頂)：

如圖 4-12 所示，縱梁架設在 g 點下方柱及 h 點下方柱。針對縱梁接柱扣件(位於 g 點下方柱頂)，因扣件之有效受風面積不得大於其承受風壓面積，故其有效受風面積為承受風壓面積$A = 1.00\,m \times 1.97\,m = 1.97\,m^2$。

(g) 柱接基座扣件(位於 g 點下方柱底)：

如圖 4-12 所示，柱架設在 g 點下方柱底基座。針對柱接基座扣件(位於 g 點下方柱底)，因扣件之有效受風面積不得大於其承受風壓面積，故其有效受風面積為承受風壓面積$A = 1.00\,m \times 1.97\,m = 1.97\,m^2$。

[步驟 2]對應於有效受風面積 A 之淨風壓係數$(GC_{rn})_a$

根據 CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022) 淨風壓係數$(GC_{rn})_a$之計算，當$0^\circ \le \omega \le 5^\circ$時，利用表 4-2 計算得到$(GC_{rn})_a$；當$15^\circ \le \omega \le 35^\circ$時，利用表 4-3 計算得到$(GC_{rn})_a$；當$5^\circ < \omega < 15^\circ$時，可以使用內插計算得到$(GC_{rn})_a$。

表 4- 2 當 $0°\le \omega \le 5°$ 時，$(GC_{rn})_a$之計算公式

$A(\mathrm{m}^2)$	$(GC_{rn})_a$之計算公式
$A\le 46.45$	$-0.59\log(10.76A)+2.08$
$A> 46.45$	$-0.35\log(10.76A)+1.43$

資料來源：CNS 16189「 太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022)

表 4- 3 當 $15°\le \omega \le 35°$ 時，$(GC_{rn})_a$之計算公式

$A(\mathrm{m}^2)$	$(GC_{rn})_a$之計算公式
$A\le 46.45$	$-0.74\log(10.76A)+2.78$
$A> 46.45$	$-0.36\log(10.76A)+1.75$

資料來源：CNS 16189「 太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022)

針對橫梁 a-b 段，其有效受風面積$A = 0.43\,m^2$。以$\omega = 5^\circ$計算淨風壓係數$(GC_{rn})_a = -0.59\log(10.76A) + 2.08 = 1.69$；以$\omega = 15^\circ$計算淨風壓係數$(GC_{rn})_a = -0.74\log(10.76A) + 2.78 = 2.29$；由線性內差方式求$\omega = 10^\circ$的淨風壓係數$(GC_{rn})_a = (1.69 + 2.29)/2 = 2.0$。同理，橫梁 d-e 段，其有效受風面積$A = 0.43\,m^2$，淨風壓係數$(GC_{rn})_a = 2.0$。

針對橫梁 b-c 段，其有效受風面積$A = 1.97\,m^2$。以$\omega = 5^\circ$計算淨風壓係數$(GC_{rn})_a = -0.59\log(10.76A) + 2.08 = 1.30$；以$\omega = 15^\circ$計算淨風壓係數$(GC_{rn})_a = -0.74\log(10.76A) + 2.78 = 1.80$；由線性內差方式求$\omega = 10^\circ$的淨風壓係數$(GC_{rn})_a = (1.30 + 1.80)/2 = 1.55$。同理，橫梁 c-d 段、縱梁 g-h 段、g 點下方柱、h 點下方柱、橫梁接縱梁扣件(其形心之面板投影為 c 點)、縱梁接柱扣件(位於 g 點下方柱頂)、柱接基座扣件(位於 g 點下方柱底)，其有效受風面積$A = 1.97\,m^2$，淨風壓係數$(GC_{rn})_a = 1.55$。

針對縱梁 f-g 段，其有效受風面積$A = 0.985\,m^2$。以$\omega = 5^\circ$計算淨風壓係數$(GC_{rn})_a = -0.59\log(10.76A) + 2.08 = 1.48$；以$\omega = 15^\circ$計算淨風壓係數$(GC_{rn})_a = -0.74\log(10.76A) + 2.78 = 2.02$；由線性內差方式求$\omega = 10^\circ$的淨風壓係數$(GC_{rn})_a = (1.48 + 2.02)/2 = 1.75$。同理，縱梁 h-i 段，其有效受風面積$A = 0.985\,m^2$，淨風壓係數$(GC_{rn})_a = 1.75$。

針對面板接橫梁扣件(其形心為 k 點)，其有效受風面積$A = 0.8\,m^2$。以$\omega = 5^\circ$計算淨風壓係數$(GC_{rn})_a = -0.59\log(10.76A) + 2.08 = 1.53$；以$\omega = 15^\circ$計算淨風壓係數$(GC_{rn})_a = -0.74\log(10.76A) + 2.78 = 2.09$；由線性內差方式求$\omega = 10^\circ$的淨風壓係數$(GC_{rn})_a = (1.53 + 2.09)/2 = 1.81$。

彙整所有構件及扣件的淨風壓係數$(GC_{rn})_a$，將其列於表 4-4。

[步驟 3]面板弦長修正因子γ_c

根據 CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022) 面板弦長修正因子γ_c之計算，面板弦長修正因子$\gamma_c = max\big(0.6 + 0.2L_p, 0.8\big) = max(0.6 + 0.2 \times 2\,, 0.8) = 1.0$。

[步驟 4]系統邊緣修正因子γ_{E_3}

根據 CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022) 系統邊緣修正因子γ_{E_3}之決定，若構件同時滿足下述條件，則結構系統邊緣修正因子γ_{E_3}=1.5；在其他情況下，結構系統邊緣修正因子γ_{E_3}=1.0。

(a) 構件所在結構系統與鄰近結構系統之距離大於$4h_2$或 1.2m，擇其大者(如圖 4-15 所示)，或構件所在面板與鄰近面板之距離大於$4h_2$或 1.2m，擇其大者(如圖 4-16 所示)。

(b) 構件位於結構系統邊緣 $1.5L_p$ 範圍內，其中 L_p 為面板弦長。

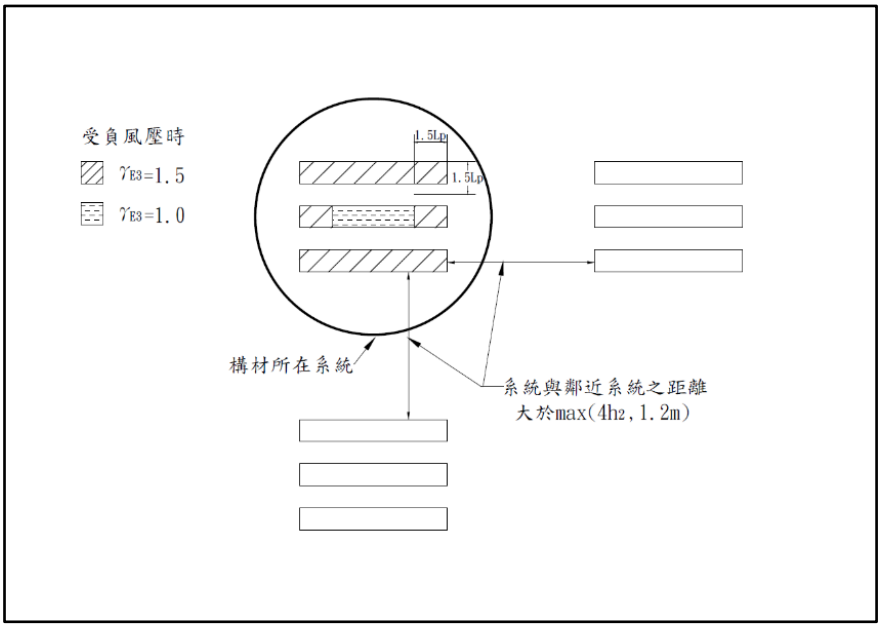


圖 4- 15 構件所在結構系統與鄰近結構系統之距離大於max $(4h_2, 1.2m)$時可能產生γ_{E3}=1.5 之示意圖

資料來源：CNS 16189「 太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022)

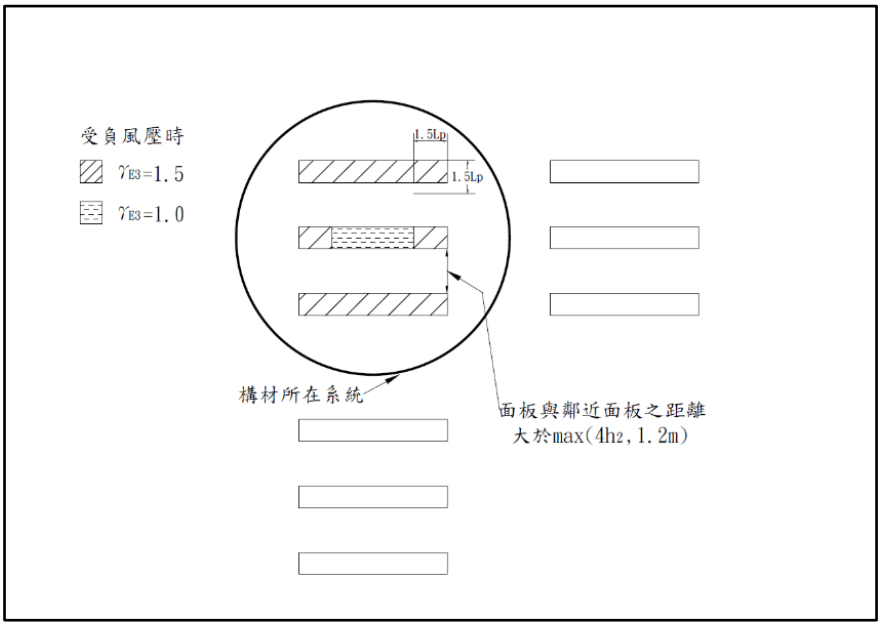


圖 4- 16 構件所在面板與鄰近面板之距離大於max $(4h_2, 1.2m)$時可能產γ_{E3}=1.5 之示意圖

資料來源：CNS 16189「 太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022)

根據圖 4-4，本範例假設構件所在結構系統與鄰近結構系統之距離為 1.5 m，小於$\max(4h_2, 1.2m) = 3.8\,m$，不滿足上述條件之(a)，故其系統邊緣修正因子$\gamma_{E_2} = 1.0$。

[步驟 5]總淨風壓係數$(GC_{rn})_g$

根據 CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022) 總淨風壓係數$(GC_{rn})_g$之計算，總淨風壓係數$(GC_{rn})_g = (\mathrm{GC_{rn}})_a \times \gamma_c \times \gamma_{E_3}$。

針對橫梁 a-b 段，其淨風壓係數$(\mathrm{GC_{rn}})_a = 2.0$、面板弦長修正因子$\gamma_c = 1.0$及系統邊緣修正因子$\gamma_{E_3} = 1.0$，總淨風壓係數$(GC_{rn})_g = 2.0 \times 1.0 \times 1.0 = 2.0$。同理，橫梁 d-e 段，其淨風壓係數$(\mathrm{GC_{rn}})_a = 2.0$，總淨風壓係數$(GC_{rn})_g = 2.0$。

針對橫梁 b-c 段，其淨風壓係數$(\mathrm{GC_{rn}})_a = 1.55$、面板弦長修正因子$\gamma_c = 1.0$及系統邊緣修正因子$\gamma_{E_3} = 1.0$，總淨風壓係數$(GC_{rn})_g = 1.55 \times 1.0 \times 1.0 = 1.55$。同理，橫梁 c-d 段、縱梁 g-h 段、g 點下方柱、h 點下方柱、橫梁接縱梁扣件(其形心之面板投影為 c 點)、縱梁接柱扣件(位於 g 點下方柱頂)、柱接基座扣件(位於 g 點下方柱底)，其淨風壓係數$(\mathrm{GC_{rn}})_a = 1.55$，總淨風壓係數$(GC_{rn})_g$為 1.55。

針對縱梁 f-g 段，其淨風壓係數$(\mathrm{GC_{rn}})_a = 1.75$、面板弦長修正因子$\gamma_c = 1.0$及系統邊緣修正因子$\gamma_{E_3} = 1.0$，總淨風壓係數$(GC_{rn})_g = 1.75 \times 1.0 \times 1.0 = 1.75$。同理，縱梁 h-i 段，其淨風壓係數$(\mathrm{GC_{rn}})_a = 1.75$，總淨風壓係數$(GC_{rn})_g = 1.75$。

針對面板接橫梁扣件(其形心為 k 點)，其淨風壓係數$(\mathrm{GC_{rn}})_a = 1.81$、面板弦長修正因子$\gamma_c = 1.0$及系統邊緣修正因子$\gamma_{E_3} = 1.0$，總淨風壓係數$(GC_{rn})_g = 1.81 \times 1.0 \times 1.0 = 1.81$。

彙整所有構件及扣件的總淨風壓係數$(GC_{rn})_g$，將其列於表 4-4。

貳、構件與扣件之設計風壓（力）

[步驟 1]相關之設計參數

根據「建築物耐風設計規範與解說」(2014) 表 2.2，地況 C 之相關參數$\alpha =$

0.15；$z_g = 300\,m$，用途係數$I = 1.0$，基本設計風速$V_{10}(C) = 32.5\,m/s$。

[步驟 2]風速壓地況係數 $K(z)$ 及地形係數 K_{zt}

根據「建築物耐風設計規範與解說」(2014) 規範式(2.7)，計算$K(z)$。因面板形心離地高度$h_c = 0.774\,m$，取規範 $z \le 5\,m$的公式計算：

$K(h_c) = 2.774\left(\frac{5}{z_g}\right)^{2\alpha} = 2.774\left(\frac{5}{300}\right)^{2\times 0.15} = 0.812$。

根據「建築物耐風設計規範與解說」(2014) 規範式(2.8)，計算K_{zt}。因工址附近無特殊地形，$K_{zt} = 1.0$。

[步驟 3]面板形心離地 h_c公尺高處之風速壓

根據「建築物耐風設計規範與解說」(2014) 規範式(2.6)，面板形心離地 h_c 公尺高處之風速壓 $q(h_c) = 0.06 \times K(z) \times K_{zt} \times [IV_{10}(C)]^2 = 0.06 \times 0.812 \times 1.0 \times [1.0 \times 32.5]^2 = 51.46\,kgf/m^2$。

[步驟 4]各構件及扣件之設計風壓

根據 CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022) 地面踞置型系統之設計正負風壓P之計算，設計正負風壓$P = \pm\, q(h_c) \times (GC_{rn})_g$，正號表示淨風壓指向面板上表面；負號表示淨風壓遠離面板上表面。

針對橫梁 a-b 段，其面板形心高處之風速壓$q(h_c) = 51.46\,kgf/m^2$，總淨風壓係數$(GC_{rn})_g = 2.0$，設計正負風壓$P = \pm\, q(h_c) \times (GC_{rn})_g = \pm 51.46 \times 2.0 = \pm 102.9\,kgf/m^2$。同理，橫梁 d-e 段，其設計正負風壓$P = \pm 102.9\,kgf/m^2$。

針對橫梁 b-c 段，其面板形心高處之風速壓$q(h_c) = 51.46\,kgf/m^2$，總淨風壓係數$(GC_{rn})_g = 1.55$，設計正負風壓$P = \pm\, q(h_c) \times (GC_{rn})_g = \pm 51.46 \times 1.55 = \pm 79.8\,kgf/m^2$。同理，橫梁 c-d 段、縱梁 g-h 段、g 點下方柱、h 點下方柱、橫梁接縱梁扣件(其形心之面板投影為 c 點)、縱梁接柱扣件(位於 g 點下方柱頂)、柱接基座扣件(位於 g 點下方柱底)，其設計正負風壓$P = \pm 79.8\,kgf/m^2$。

針對縱梁 f-g 段，其面板形心高處之風速壓$q(h_c) = 51.46\,kgf/m^2$，總淨風壓係數$(GC_{rn})_g = 1.75$，設計正負風壓$P = \pm\, q(h_c) \times (GC_{rn})_g = \pm 51.46 \times 1.75 = \pm 90.1\,kgf/m^2$。同理，縱梁 h-i 段，其設計正負風壓$P = \pm 90.1\,kgf/m^2$。

針對面板接橫梁扣件(其形心為 k 點)，其面板形心高處之風速壓$q(h_c) = 51.46\ kgf/m^2$，總淨風壓係數$(GC_{rn})_g = 1.81$，設計正負風壓$P = \pm q(h_c) \times (GC_{rn})_g = \pm 51.46 \times 1.81 = \pm 93.1\ kgf/m^2$。

彙整所有構件及扣件的設計正負風壓 P，將其列於表 4-4。

[步驟 5]各扣件之設計風力

設計正負風力為設計正負風壓與承受風壓面積A_{actual}之乘積。

針對橫梁接縱梁扣件(其形心之面板投影為 c 點)，設計正負風壓 P為$\pm 79.8\ kgf/m^2$，承受風壓面積 A_{actual} 為 $1.97\ m^2$，設計正負風力 $F = \pm 79.8\ kgf/m^2 \times 1.97\ m^2 = 157.2\ kgf$。同理，縱梁接柱扣件(位於 g 點下方柱頂)、柱接基座扣件(位於 g 點下方柱底)，其設計正負風壓 P為$\pm 79.8\ kgf/m^2$，承受風壓面積A_{actual}為$1.97\ m^2$，設計正負風力F為$157.2\ kgf$。

針對面板接橫梁扣件(其形心為 k 點)，設計正負風壓 P為$\pm 93.1\ kgf/m^2$，承受風壓面積A_{actual}為$0.8\ m^2$，設計正負風力$F = \pm 93.1\ kgf/m^2 \times 0.8\ m^2 = 74.5\ kgf$。

彙整所有扣件的設計正負風力 F，將其列於表 4-4。

表 4- 4 示範例 2 構件及扣件之相關參數

名稱		實際受風面積 (m^2)	有效受風面積 $A(m^2)$	淨風壓係數 $(GC_{rn})_a$	總淨風壓係數 $(GC_{rn})_g$	設計正負風壓 (kgf/m^2)	設計正負風力 (kgf)
橫梁	a-b 段或 d-e 段	0.43	0.43	2.0	2.0	±102.9	
	b-c 段或 c-d 段	1.97	1.97	1.55	1.55	±79.8	
縱梁	f-g 段或 h-i 段	0.985	0.985	1.75	1.75	±90.1	
	g-h 段	1.97	1.97	1.55	1.55	±79.8	
柱	g 點下方柱或 h 點下方柱	1.97	1.97	1.55	1.55	±79.8	
面板接橫梁之扣件	k 點	0.8	0.8	1.81	1.81	±93.1	±74.5
	螺栓 1 個(軸力)						±74.5
橫梁接縱梁之扣件	c 點	1.97	1.97	1.55	1.55	±79.8	±157.2
	螺栓 2 個(軸力)						±78.6
縱梁接柱之扣件	g 點下方柱頂	1.97	1.97	1.55	1.55	±79.8	±157.2
	A 處螺栓 2 個(軸力)						±78.6
	B 處螺栓 1 個(剪力)						±154.8
柱接基座之扣件	g 點下方柱底	1.97	1.97	1.55	1.55	±79.8	±157.2
	螺栓 2 個(剪力)						±77.4

資料來源：本研究整理

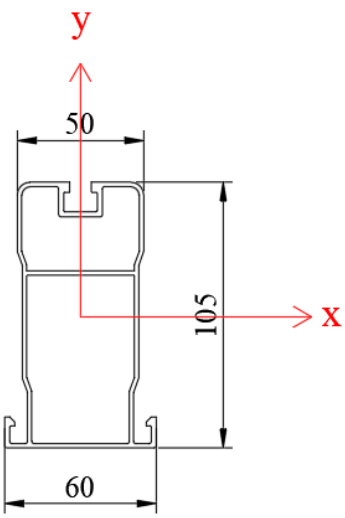
第四節 構件之耐風分析及檢核

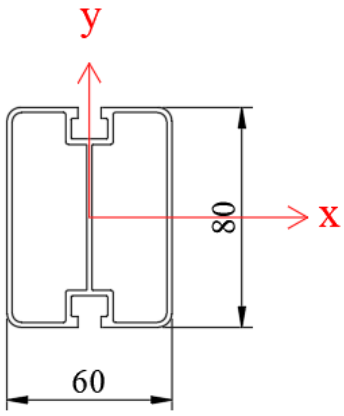
橫梁、縱梁及柱使用特製之鋁擠型構件，其材質為 6063-T5 鋁合金，設計時所用之彈性模數E為$7100\ \mathrm{kgf}/mm^2$，剪力彈性模數為G為$2700\ \mathrm{kgf}/mm^2$，波森比μ為0.3，降伏強度F_y為$110\ MPa$，極限強度F_u為$150\ MPa$。假設採用之橫梁、縱梁及柱的形狀與斷面性質如表 4-5 所示。

因國內目前尚無鋁結構之相關規範，根據臺中市結構工程技師公會在 108 年編寫「太陽光電系統支撐架結構設計參考手冊草案(修訂版)」之 4.2 構件接合設計內容所述，構件檢核可參考美國鋁結構規範 Aluminum Design Manual，載重組合則參考「鋼結構容許應力設計法規範及解說」之規定。

依「鋼結構容許應力設計法規範及解說」之規定，載重組合有$D+L$、$D+0.75(L\pm1.25W)$、$D+0.75(L\pm0.8E)$、$0.7D\pm1.25W$及$0.7D\pm0.8E$。其中，D為靜載重，包括構件自重及永久附加物重量；L為活載重，包含人員重量；E為設計地震力；W為設計風力。本示範例設計時僅考慮風載重及靜載重造成之影響，故載重組合有$D\pm0.9375\,W$、$0.7D\pm1.25W$這四種。

表 4- 5 示範例 2 構件之斷面性質與斷面形狀

<table>
<tr><td colspan="2">橫梁</td></tr>
<tr><td>斷面性質</td><td>斷面形狀(單位:mm)</td></tr>
<tr><td>斷面模數 $S_x = 19919.81\ mm^3$
斷面模數 $S_y = 9215.94\ mm^3$
慣性矩 $I_x = 1045789.95\ mm^4$
慣性矩 $I_y = 276478.21\ mm^4$
斷面積 $A = 729.02\ mm^2$</td><td> 

y 軸垂直面板</td></tr>
<tr><td colspan="2">縱梁及柱</td></tr>
<tr><td>斷面性質</td><td>斷面形狀(單位:mm)</td></tr>
<tr><td>斷面模數 $S_x = 14741.15\ mm^3$
斷面模數 $S_y = 9679.11\ mm^3$
慣性矩 $I_x = 589646.16\ mm^4$
慣性矩 $I_y = 290373.29\ mm^4$
斷面積 $A = 710.52\ mm^2$</td><td> 

縱梁 y 軸垂直面板
柱 z 軸垂直地面</td></tr>
</table>

資料來源：修改自[15]

壹、橫梁

針對橫梁 a-b-c-d-e 進行結構分析如圖 4-17 所示，將橫梁與下方縱梁連接處 b 點、c 點及 d 點的扣件視為鉸支承（Hinge）分析。

風載重採用表 4-4 中橫梁 a-b-c-d-e 的設計正負風壓。橫梁 a-b 段及 d-e 段設計風壓為$\pm 102.9\ kgf/m^2$，橫梁 b-c 段及 c-d 段設計風壓為$\pm 79.8\ kgf/m^2$，分別乘上縱梁跨距 1m 後可得橫梁 a-b 段及 d-e 段的線載重為$q_w = \pm 102.9\ kgf/m$，橫梁 b-c 段及 c-d 段的線載重為$q_w = \pm 79.8\ kgf/m$。

靜載重包含橫梁自重與模組自重，因鋁擠型自重相對較小，故只考慮模組自重。模組自重為每塊 $20\ kgf$，橫梁 a-b-c-d-e 需承受之模組重為 3 塊，故橫梁 a-b-c-d-e 所承受之線載重 $q_D = (20\ kgf \times 3\ 塊)/4.8\ m = 12.5\ kgf/m$。

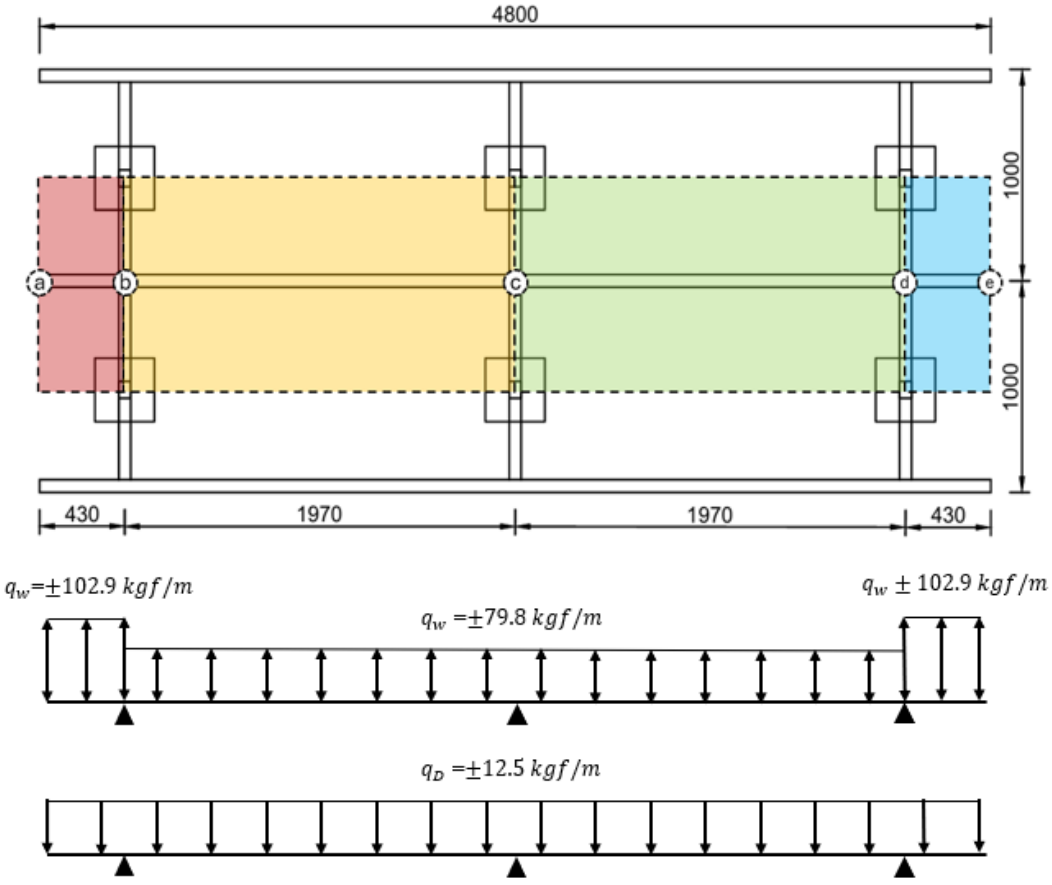


圖 4- 17 示範例 2 之橫梁 a-b-c-d-e 受力作用圖

資料來源：本研究整理

分析時利用 SAP 2000 軟體建模，將橫梁的斷面與材料性質輸入並且施加風載重及靜載重，即可分析出橫梁 a-b-c-d-e 的剪力、彎矩及變形量，當載重組合為$0.7D + 1.25W$時可得出橫梁 a-b-c-d-e 中最大剪力及最大彎矩，分別為$V_{max} = 125.3\ kgf$及$M_{max} = 46.5\ kgf - m$；當載重組合為$1.0D + 1.0W$時可得出最大變形量$\delta_{max} = 1.81\ mm$。

<u>應力檢核</u>

利用 SAP 2000 分析軟體，選 AA-ASD(2000)進行檢核，得橫梁 a-b-c-d-e 應力比為$0.26 \leq 1$，確認構件符合規範。

<u>變形檢核</u>

為避免在強風持續作用下產生振動破壞，設計時應盡量減少構件在風力作用下之變位，同時檢核確認構件變位量不超過容許值，以容許變形量δ_a = 跨距/175 (業界常用公式)，進行檢核。

$$\delta_{max} = 1.81\ mm \leq \delta_a = \frac{1970}{175} = 11.26\ mm$$，檢核通過。

貳、縱梁

針對縱梁 f-g-h-i 進行結構分析如圖 4-18 所示，將縱梁與下方柱連接處 g 點及 h 點的扣件視為鉸支承（Hinge）分析。

風載重採用表 4-4 中縱梁 f-g-h-i 的設計正負風壓。縱梁 f-g 段及 h-i 段設計風壓為$\pm 90.1\ kgf/m^2$；縱梁 g-h 段設計風壓為$\pm 79.8\ kgf/m^2$，分別乘上跨距 1.97 m 可得縱梁 f-g 段及 h-i 段的線載重為$q_w = \pm 177.5\ kgf/m$；縱梁 g-h 段的線載重為$q_w = \pm 157.2\ kgf/m$。

靜載重由上方橫梁接縱梁扣件 f 點、c 點及 i 點傳入縱梁，靜載重包含橫梁、縱梁自重與模組自重，因鋁擠型自重相對較小，故只考慮模組自重。模組自重為每塊 20 kgf，縱梁 f-g-h-i 所承受之模組重為 2 塊，故縱梁 f-g-h-i 所承受之點載重 $Q_D = (20\ kgf \times 2\ 塊)/3 = 13.3\ kgf$。

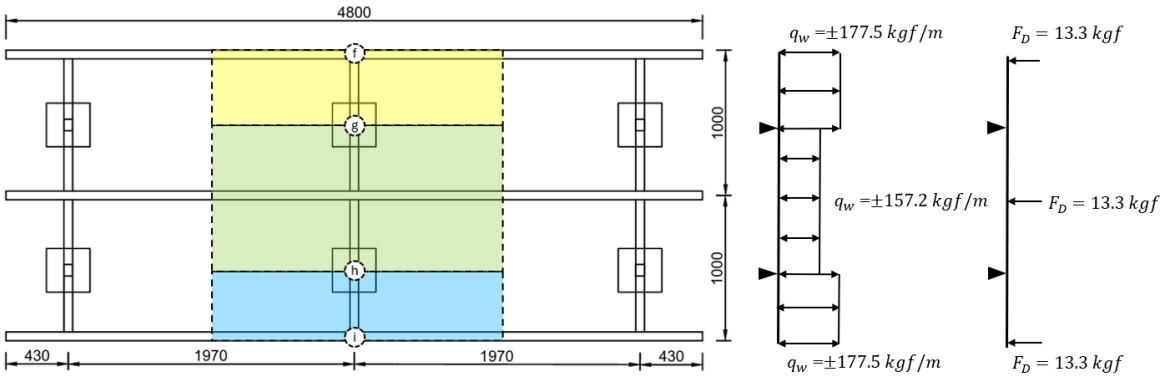


圖 4- 18 示範例 2 之縱梁 f-g-h-i 受力作用圖

資料來源：本研究整理

分析時利用 SAP 2000 軟體建模，將縱梁的斷面與材料性質輸入並且施加風載重及靜載重，即可分析出縱梁 f-g-h-i 的剪力、彎矩及變形量，當載重組合為$0.7D + 1.25W$時可得出縱梁 f-g-h-i 中最大剪力及最大彎矩，分別為$V_{max} = 38.1\ kgf$及$M_{max} = 13.5\ kgf - m$；當載重組合為$1.0D + 1.0W$時可得出最大變形量$\delta_{max} = 0.92\ mm$。

<u>應力檢核</u>

利用 SAP 2000 分析軟體，選 AA-ASD(2000)進行檢核，得縱梁 f-g-h-i 應力比為$0.12 \leq 1$，確認構件符合規範。

<u>變形檢核</u>

為避免在強風持續作用下產生振動破壞，設計時應盡量減少構件在風力作用下之變位，同時檢核確認構件變位量不超過容許值，以容許變形量δ_a = 跨距/175 (業界常用公式)，進行檢核。

$$\delta_{max} = 0.92\ mm \leq \delta_a = \frac{1000}{175} = 5.7\ mm$$，檢核通過。

參、柱

針對 g 點下方柱及 h 點下方柱進行結構分析如圖 4-19 及圖 4-20 所示，將柱與下方基座連接處 g 點下方柱底及 h 點下方柱底的扣件視為鉸支承（Hinge）分析。

風載重採用表 4-4 中 g 點下方柱的設計正負風壓。g 點下方柱及 h 點下方柱的設計風壓為$\pm 79.8\ kgf/m^2$，分別乘上寬度 1.97 m，可得 g 點下方柱及 h 點下

方柱的線載重為$q_w = \pm 157.2\ kgf/m$。

靜載重由上方縱梁接柱扣件 g 點下方柱頂及 h 點下方柱頂扣件傳入柱，靜載重包含橫梁、縱梁、柱自重及模組自重，因鋁擠型自重相對較小，故只考慮模組自重。模組自重為每塊 $20\ kgf$，g點下方柱所承受之模組重為1塊，故g點下方柱所承受之點載重 $F_D = 20\ kgf$。同理，h 點下方柱所承受之模組重為 1 塊，h點下方柱所承受之點載重 $F_D = 20\ kgf$。

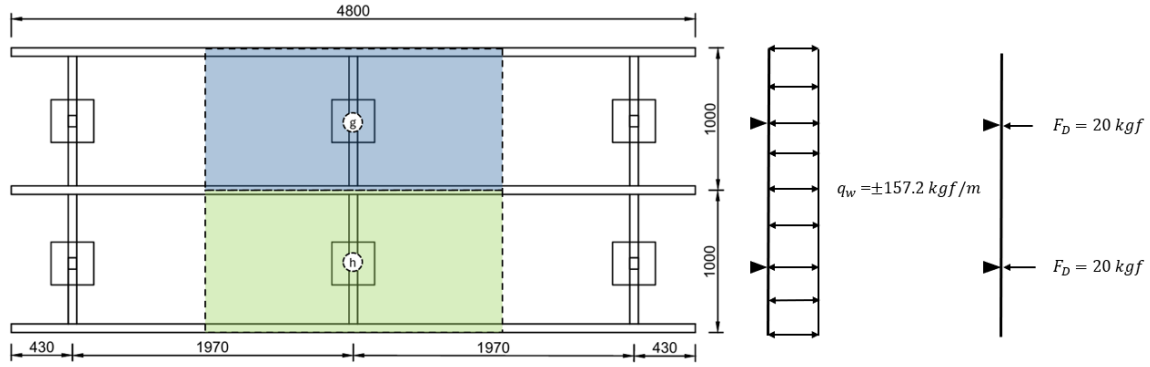


圖 4- 19 示範例 2 之柱受力作用圖 1

資料來源：本研究整理

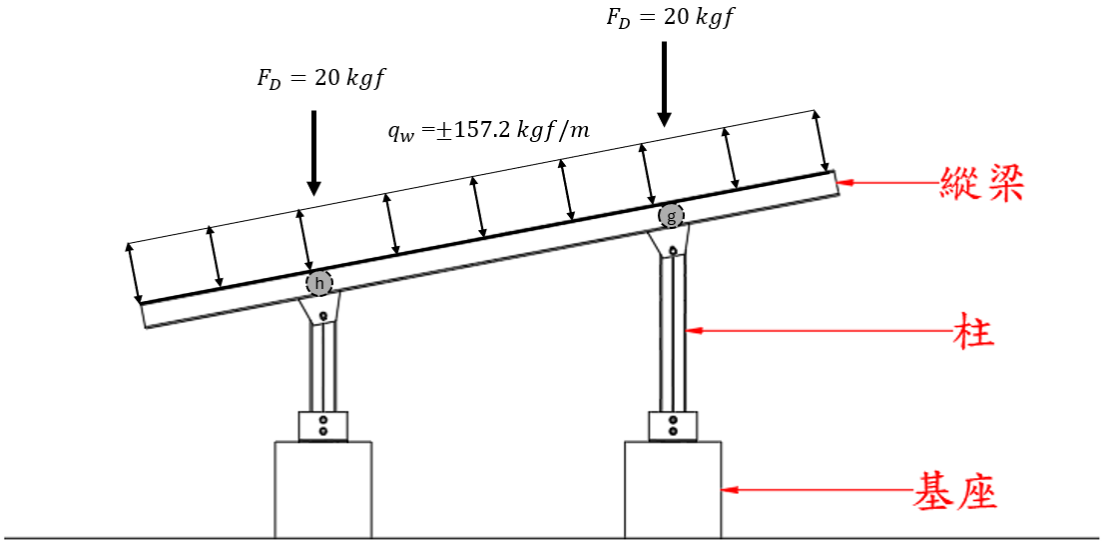


圖 4- 20 示範例 2 之柱受力作用圖 2

資料來源：修改自[15]

分析時利用 SAP 2000 軟體建模，將柱的斷面與材料性質輸入並且施加風載重及靜載重，即可分析出 g 點下方柱的剪力及彎矩，當載重組合為$0.7D + 1.25W$時，可得出 g 點下方柱中最大剪力及最大彎矩，分別為$V_{max} = 26.9\ kgf$及$M_{max} = 23.4\ kgf - m$。同理，當載重組合為$0.7D + 1.25W$時，得出 h 點下方柱中最大剪力及最大彎矩，分別為$V_{max} = 41.4\ kgf$、$M_{max} = 28.1\ kgf - m$。

應力檢核

利用 SAP 2000 分析軟體，選 AA-ASD(2000)進行檢核，得 g 點下方柱應力比為 0.22 ；h 點下方柱應力比為 0.23，應力比皆小於 1，確認構件符合規範。

變形檢核

為避免在強風持續作用下產生振動破壞，設計時應盡量減少構件在風力作用下之變位，同時檢核確認構件變位量不超過容許值。

第五節 扣件之耐風分析及檢核

扣件接合設計時，螺栓可能的破壞模式有拉力破壞、剪力破壞及承壓破壞，接合母材可能的破壞模式有總斷面積破壞、淨斷面積破壞及塊狀剪力撕裂，實務上需針對上述破壞模式作檢核，以確保安全性。本手冊僅示範螺栓拉力破壞及剪力破壞之檢核。

所檢核扣件包括面板接橫梁之扣件、橫梁接縱梁之扣件、縱梁接柱之扣件與柱接基座之扣件。各扣件均採用 M8 螺栓鎖固，其螺距為 1.25mm。螺栓採用 SUS 304 (A2-50)不鏽鋼，其極限抗拉強度為$F_{tu} = 500\ MPa = 72.5\ ksi$、極限抗剪強度為 $F_{su} = 200\ MPa = 29\ ksi$，接合母材為 6061-T6 鋁合金。載重組合參考「鋼結構容許應力設計法規範及解說」(2010) 之規定，考慮 $D \pm 0.9375\,W$、$0.7D \pm 1.25W$這四種載重組合。根據臺中市結構工程技師公會在 108 年編寫「太陽光電系統支撐架結構設計參考手冊草案(修訂版)」之 4.3 螺栓接合內容所述，螺栓檢核可參考美國鋁結構規範 Aluminum Design Manual 之 5.2 Bolted Connections。柱與基座之接合錨栓以「建築物混凝土結構設計規範」(2023) 作檢核。

壹、螺栓檢核公式

螺栓容許拉力為$F_t = A_s \times f_t$。其中，F_t為螺栓容許拉力；A_s為螺栓有效斷面積，其公式為$A_s = \frac{\pi}{4}\left(D - \frac{1.191}{n}\right)^2$，其中 D 為螺栓之標稱直徑(英吋)，n 為每英吋之螺紋數；f_t為螺栓容許拉應力，其公式為$f_t = \frac{F_{tu}}{1.2n_u}$，其中$n_u$為安全係數，取 1.95。

螺栓容許剪力為$F_s = A_S^* \times f_s$。其中，F_s為螺栓容許剪力；A_S^*為螺栓剪力有效斷面積，當剪力作用在螺紋上時，$A_S^* = A_s$，當剪力未作用在螺紋上時，$A_S^* = \frac{\pi}{4}(D)^2$；$f_s$為螺栓容許剪應力，其公式為$f_s = \frac{F_{su}}{1.2n_u}$。

貳、面板接橫梁之扣件

面板連接橫梁時需分為四步驟完成，首先將特製菱形片先固定於橫梁上如圖 4-21 所示，藉由特製菱形片將中壓塊固定於橫梁上如圖 4-22 所示，待特製菱形片與中壓塊放置定位後，將模板插入再將其螺栓鎖緊如圖 4-23 所示，最後由

下鎖孔將模板鎖固於橫梁上如圖 4-24 所示。分析時取橫梁與中壓塊連接之螺栓如圖 4-22，進行分析及檢核。

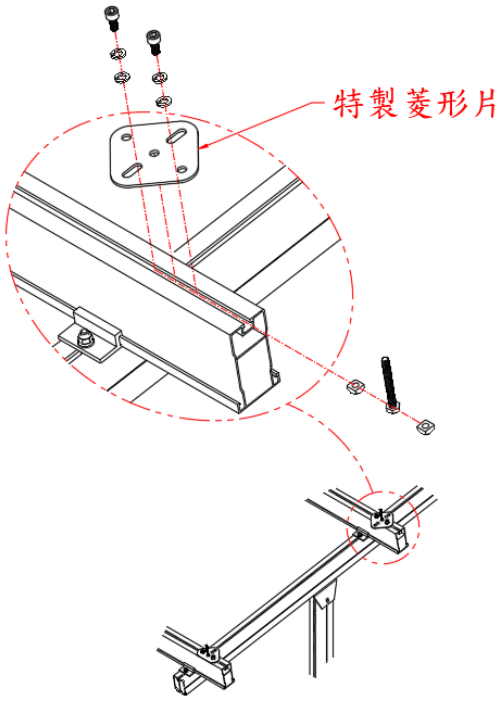


圖 4- 21 地面踞置型系統之面板接橫梁示意圖 1

資料來源：修改自 [15]

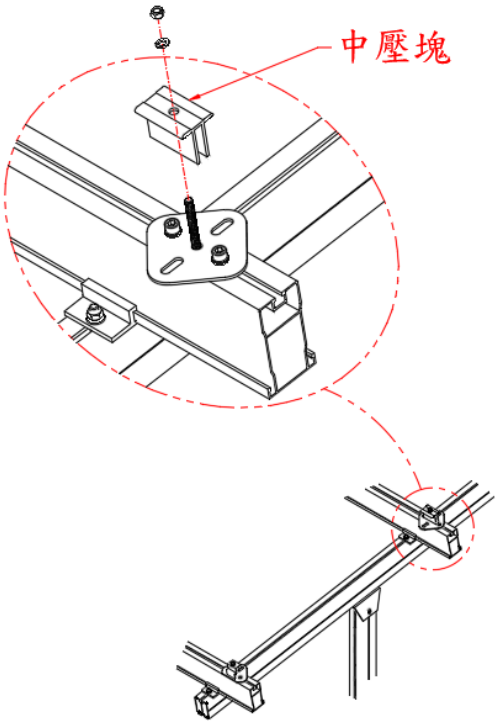


圖 4- 22 地面踞置型系統之面板接橫梁示意圖 2

資料來源：修改自 [15]

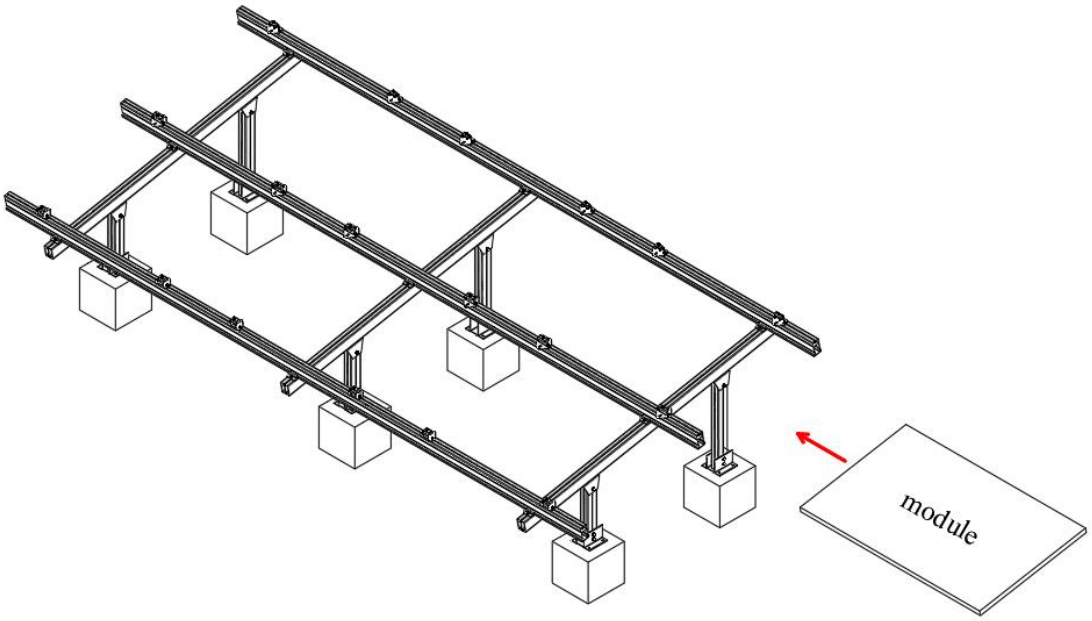


圖 4- 23 地面踞置型系統之面板接橫梁示意圖 3

資料來源：修改自[15]

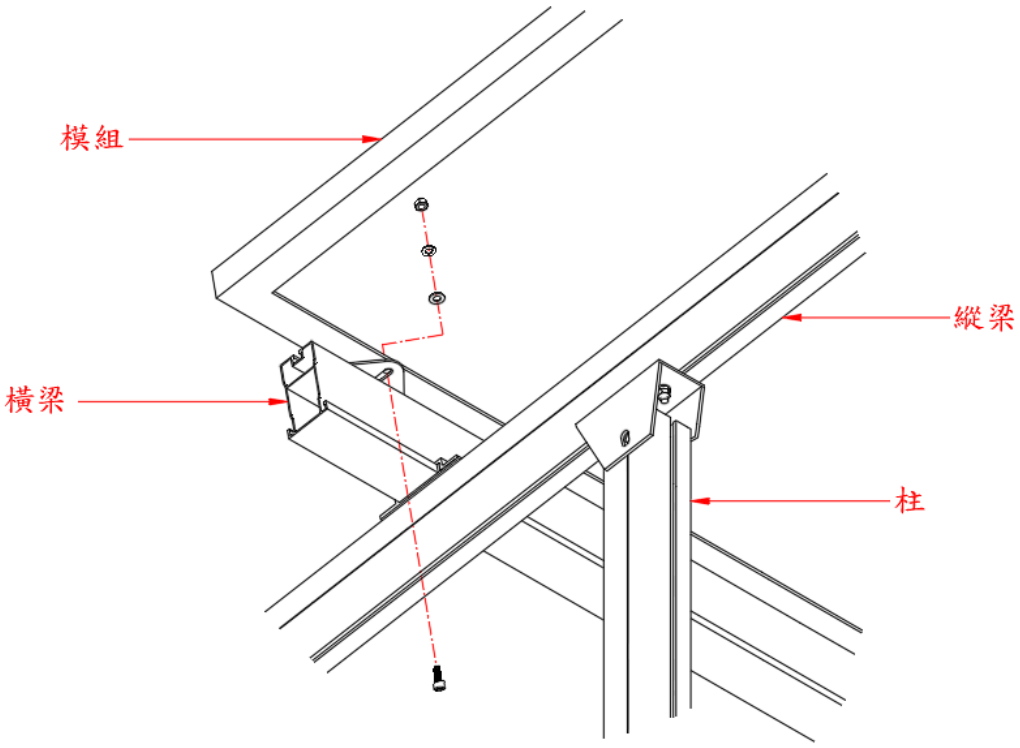


圖 4- 24 地面踞置型系統之面板接橫梁示意圖 4

資料來源：修改自[15]

螺栓拉力分析

風載重採用表 4-4 中面板接橫梁扣件 k 點之設計正負風力$\pm 74.5\ kgf$，正號表示力量指向面板上表面，對此扣件而言為壓力；負號表示力量遠離面板上表面，對此扣件而言為拉力。

面板連接橫梁扣件螺栓數為 1 個，單一螺栓承擔設計風拉力為$-74.5\ kgf$，對螺栓造成之最大拉力為$F_{ten} = 1.25W = 1.25 \times (-74.5) = -93.1\ kgf$。

螺栓拉力檢核

螺栓直徑$D = 8\ mm = 0.315\ in$、每英吋之螺紋數$n = 25.4/1.25 = 20.32$，故螺栓有效斷面積$A_s = \frac{\pi}{4}\left(D - \frac{1.191}{n}\right)^2 = \frac{\pi}{4}\left(0.315 - \frac{1.191}{20.32}\right)^2 = 0.0516\ in^2$；允許拉應力$f_t = F_{tu}/1.2n_u = 72.5/2.34 = 30.98\ ksi$。螺栓容許拉力$F_t = A_s \times f_t = 0.0516\ in^2 \times 30.98\ ksi = 1.599\ kip = 725.3\ kgf$。

螺栓拉力$|F_{ten}| = 93.1\ kgf <$ 螺栓容許拉力$F_t = 725.3\ kgf$，檢核通過。

參、橫梁接縱梁之扣件

橫梁連接縱梁時需分為三步驟完成，首先將特製鋁件固定於下方鋁擠型縱梁上如圖 4-25 所示，再將鋁擠型橫梁固定於特製鋁件上如圖 4-26 所示，最後根據圖 4-25 及圖 4-26，將鋁擠型橫梁固定於下方鋁擠型縱梁上如圖 4-27 所示。

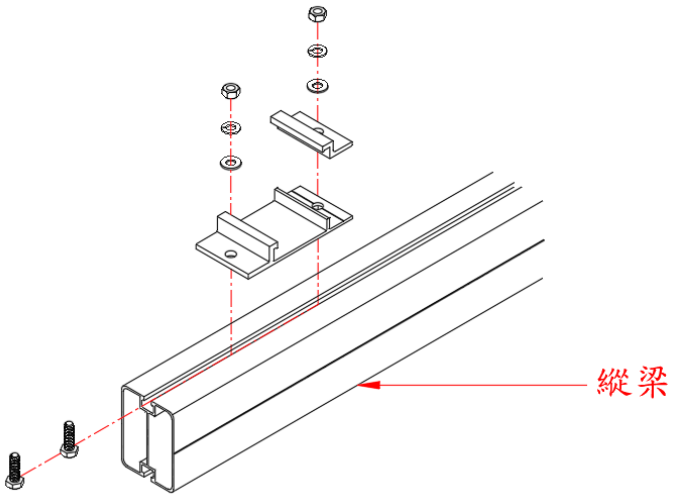


圖 4- 25 地面踞置型系統之橫梁接縱梁示意圖 1

資料來源：修改自[15]

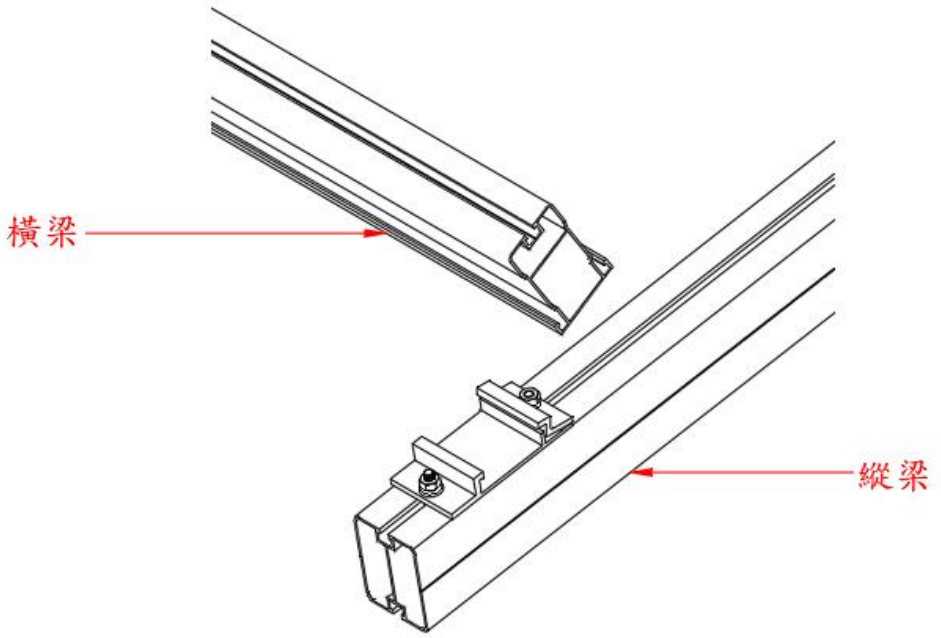


圖 4- 26 地面踞置型系統之橫梁接縱梁示意圖 2

資料來源：修改自[15]

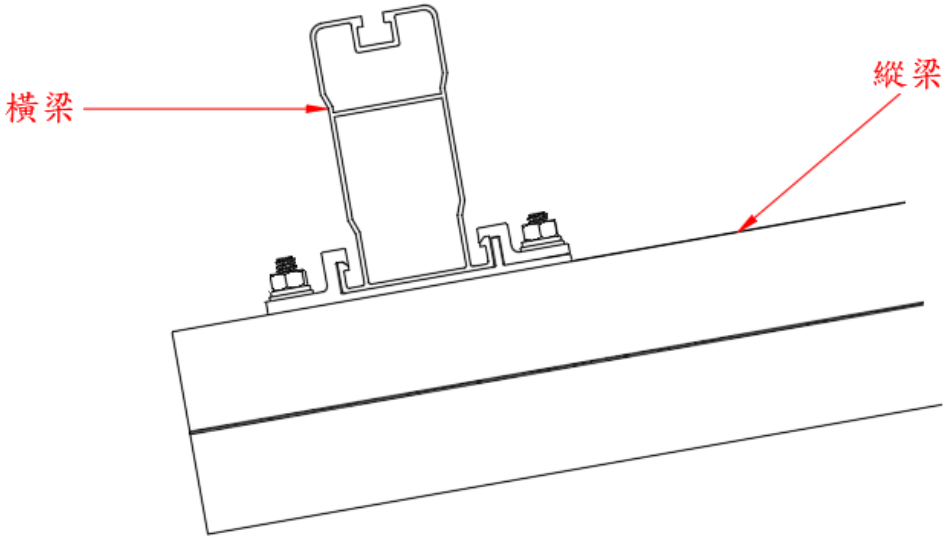


圖 4- 27 地面踞置型系統之橫梁接縱梁示意圖 3

資料來源：修改自[15]

螺栓拉力分析

風載重採用表 4-4 中橫梁接縱梁扣件 c 點之設計正負風力$\pm 157.2\ kgf$，正號表示力量指向面板上表面，對此扣件而言為壓力；負號表示力量遠離面板上表面，對此扣件而言為拉力。靜載重包含橫梁自重與面板自重，因鋁擠型自重相對較小，故只考慮面板自重，橫梁接縱梁扣件承受面板面積為$1.97\ m^2$按比例分配橫梁所需承擔面板自重為$24.6kgf$。

橫梁扣件螺栓數為 2 個，單一螺栓承擔設計風拉力為$-157.2/2 = -78.6\ kgf$；單一螺栓承擔靜載重為$24.6/2 = 12.3\ kgf$。對螺栓造成最大組合拉力為$F_{ten} = 0.7D + 1.25W = 0.7 \times 12.3 + 1.25 \times (-78.6) = -89.6\ kgf$。

螺栓拉力檢核

螺栓直徑$D = 8\ mm = 0.315\ in$、每英吋之螺紋數$n = 25.4/1.25 = 20.32$，故螺栓有效斷面積$A_s = \frac{\pi}{4}\left(D - \frac{1.191}{n}\right)^2 = \frac{\pi}{4}\left(0.315 - \frac{1.191}{20.32}\right)^2 = 0.0516\ in^2$；允許拉應力$f_t = F_{tu}/1.2n_u = 72.5/2.34 = 30.98\ ksi$。螺栓容許拉力$F_t = A_s \times f_t = 0.0516\ in^2 \times 30.98\ ksi = 1.599\ kip = 725.3\ kgf$。

螺栓拉力$|F_{ten}| = 89.6\ kgf <$ 螺栓容許拉力$F_t = 725.3\ kgf$，檢核通過。

肆、縱梁接柱之扣件

縱梁連接柱時需分為兩步驟完成，先將特製鋁件固定於上方鋁擠型縱梁上如圖 4-28 所示，再將特製鋁件固定於鋁擠型柱上如圖 4-29 所示。

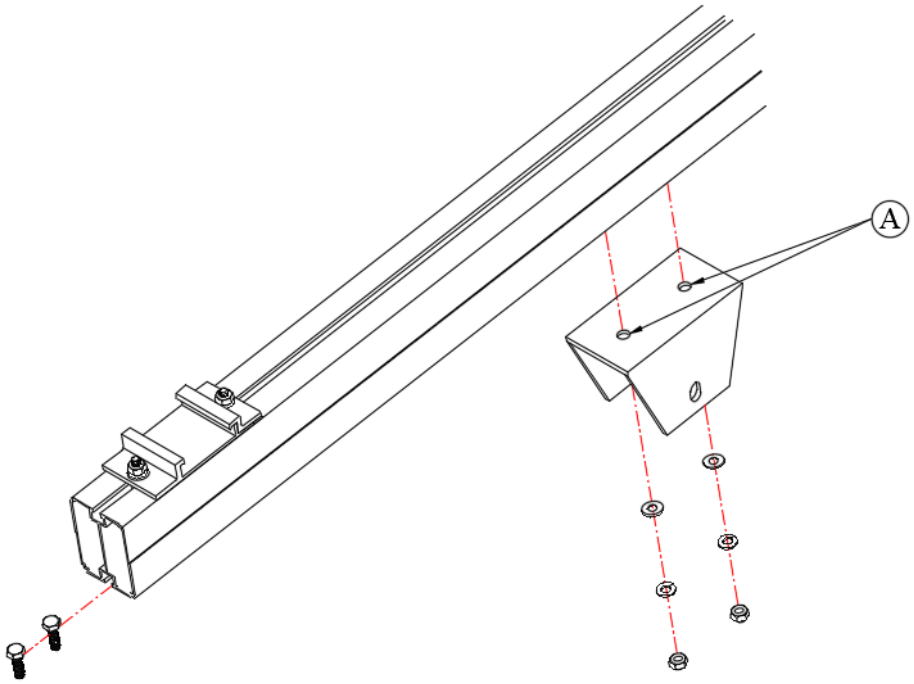


圖 4- 28 地面踞置型系統之 A 處螺栓與縱梁連接示意圖

資料來源：修改自[15]

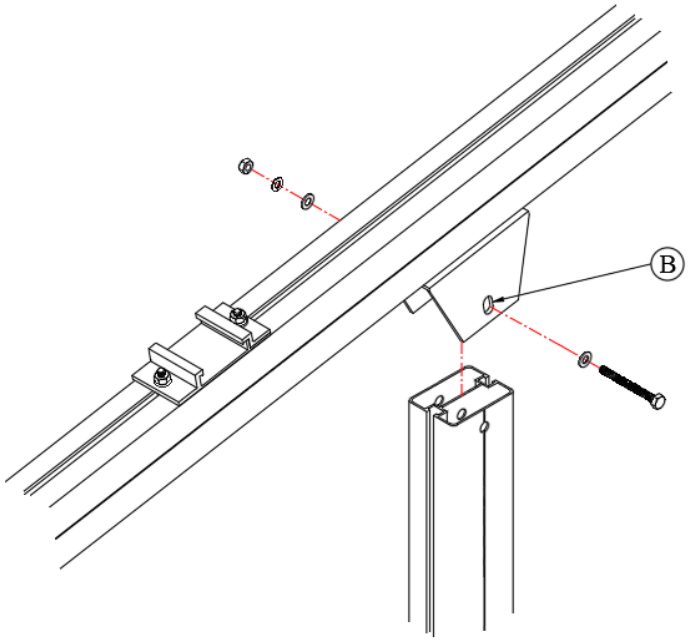


圖 4- 29 地面踞置型系統之 B 處螺栓與柱連接示意圖

資料來源：修改自[15]

A 處螺栓拉力分析

風載重採用表 4-4 中縱梁接柱扣件 g 點下方柱頂之設計正負風力 $\pm 157.2\ kgf$，正號表示力量指向面板上表面，對此處扣件而言為壓力；負號表示力量遠離面板上表面，對此處扣件而言為拉力。靜載重包含橫梁、縱梁自重與面板自重，因鋁擠型自重相對較小，故只考慮面板自重，縱梁連接柱扣件承受面板面積為$1.97\ m^2$按比例分配橫梁所需承擔面板自重為$24.6kgf$。

A 處螺栓數為 2 個，單一螺栓承擔設計風拉力為$-157.2/2 = -78.6\ kgf$；單一螺栓承擔靜載重為$24.6/2 = 12.3\ kgf$，對 A 處螺栓造成之最大組合拉力為 $F_{ten} = 0.7D + 1.25W = 0.7 \times 12.3 + 1.25 \times (-78.6) = -89.6\ kgf$。

A 處螺栓拉力檢核

螺栓直徑$D = 8\ mm = 0.315\ in$、每英吋之螺紋數$n = 25.4/1.25 = 20.32$，故螺栓有效斷面積$A_s = \frac{\pi}{4}\left(D - \frac{1.191}{n}\right)^2 = \frac{\pi}{4}\left(0.315 - \frac{1.191}{20.32}\right)^2 = 0.0516\ in^2$；允許拉應力$f_t = F_{tu}/1.2n_u = 72.5/2.34 = 30.98\ ksi$。螺栓容許拉力$F_t = A_s \times f_t = 0.0516\ in^2 \times 30.98\ ksi = 1.599\ kip = 725.3\ kgf$。

A 處螺栓拉力$|F_{ten}| = 89.6\ kgf$ < 螺栓容許拉力$F_t = 725.3\ kgf$，檢核通過。

B 處螺栓剪力分析

風載重採用表 4-4 中縱梁接柱扣件 g 點下方柱頂之設計正負風力$\pm 157.2\ kgf$，正號表示力量指向面板上表面，負號表示力量遠離面板上表面，對此處扣件而言均為剪力。B 處螺栓所承受靜載重與 A 處螺栓相同為$24.6kgf$。

B 處螺栓數為 1 個，假設剪力有作用在螺紋上，單一螺栓承擔設計風剪力為$\pm 157.2\cos 10° = \pm 154.8\ kgf$；單一螺栓承擔靜載重為$24.6\ kgf$，對 B 處螺栓造成的最大組合剪力為$F_{shear} = 0.7D + 1.25W = 0.7 \times 24.6 + 1.25 \times 154.8 = 210.7\ kgf$。

B 處螺栓剪力檢核

螺栓直徑$D = 8\ mm = 0.315\ in$、每英吋之螺紋數$n = 25.4/1.25 = 20.32$，故螺栓有效斷面積$A_s = \frac{\pi}{4}\left(D - \frac{1.191}{n}\right)^2 = \frac{\pi}{4}\left(0.315 - \frac{1.191}{20.32}\right)^2 = 0.0516\ in^2$；允許剪應力$f_s = F_{su}/1.2n_u = 29/2.34 = 12.39\ ksi$。螺栓容許剪力$F_s = A_s \times f_s = 0.0516\ in^2 \times 12.39\ ksi = 0.639\ kip = 289.9\ kgf$。

B 處螺栓剪力$F_{shear} = 210.7\ kgf$ < 螺栓容許剪力$F_s = 289.9\ kgf$，檢核通過。

伍、柱接基座之扣件

將特製鋁件固定於柱及基座上如圖 4-30 所示。

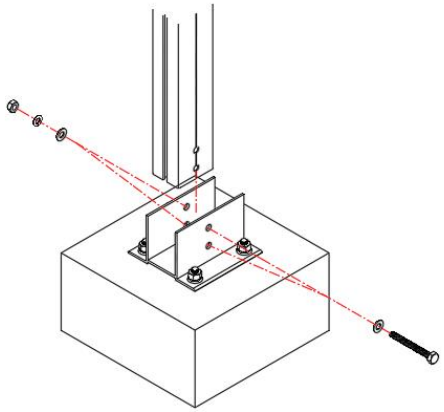


圖 4- 30 地面踞置型系統之柱與基座連接示意圖

資料來源：修改自[15]

螺栓剪力分析

風載重採用表 4-4 中柱接基座扣件 g 點下方柱底之設計正負風力 $\pm 157.2\ kgf$，設計正負風力對此處螺栓而言均為剪力；靜載重包含橫梁、縱梁、柱自重與面板自重，因鋁擠型自重相對較小，故只考慮面板自重，橫梁受風面積為$1.97\ m^2$按比例分配橫梁所需承擔面板自重為$24.6kgf$。

柱接基座螺栓數為 2 個，假設剪力有作用在螺紋上，單一螺栓承擔設計風剪力為 $\pm 157.2\cos 10°/2 = \pm 77.4\ kgf$；單一螺栓承擔靜載重為 $24.6/2 = 12.3\ kgf$，對螺栓造成的最大組合剪力為$F_{shear} = 0.7D + 1.25W = 0.7 \times 12.3 + 1.25 \times 77.4 = 105.4\ kgf$。

螺栓剪力檢核

螺栓直徑$D = 8\ mm = 0.315\ in$、每英吋之螺紋數$n = 25.4/1.25 = 20.32$，故螺栓有效斷面積$A_s = \frac{\pi}{4}\left(D - \frac{1.191}{n}\right)^2 = \frac{\pi}{4}\left(0.315 - \frac{1.191}{20.32}\right)^2 = 0.0516\ in^2$；允許剪應力 $f_s = F_{su}/1.2n_u = 29/2.34 = 12.39\ ksi$。螺栓容許剪力 $F_s = A_s \times f_s = 0.0516\ in^2 \times 12.39\ ksi = 0.639\ kip = 289.9\ kgf$。

螺栓剪力$F_{shear} = 105.4\ kgf <$ 螺栓容許剪力$F_s = 289.9\ kgf$，檢核通過。

基座拉拔力分析

風載重採用表 4-4 中柱接基座扣件 g 點下方柱底之設計正負風力為 $\pm 157.2\ kgf$，正號表示力量指向面板上表面，對基座而言為壓力；負號表示力量遠離面板上表面，對基坐而言為拉力，基座承擔風拉力為$-157.2\cos 10° = -154.8\ kgf$，靜載重為面板自重為 $24.6\ kgf$。基座造成之最大拉拔力為$F_{ten} = 0.7D + 1.25W = 0.7 \times 24.6 + 1.25 \times (-154.8) = -176.3\ kgf$。

基座拉拔力檢核

1. 錨栓檢核

   混凝土基座之錨栓可依「建築物混凝土結構設計規範」(2023)進行檢核，確認錨栓及混凝土的強度是否足夠。

2. 原地面檢核

   檢核其力量傳遞至下方原有地面時承載力是否足夠，以及確保在拉拔力下不會造成原有地面的破壞。

第五章　平屋頂踞置型系統之耐風設計(示範例 3)

本章所稱平屋頂踞置型系統為安裝於屋頂，採陣列型式排列（如圖 2-3 所示）。耐風設計的主要目的是確保支撐架在強風環境下能夠維持結構完整性和安全性，而實務上在進行支撐架設計時，尚需考慮不同的載重組合情況，例如靜載重、風載重及地震力之效應，但本示範例只考慮靜載重及風載重之效應。

本示範例首先規劃一平屋頂踞置型系統，依據 CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022) 之 7.平屋頂踞置型結構系統決定其構件及扣件之設計風壓，再考慮風載重及靜載重之效應，做相關之結構設計。本示範例之設計流程圖如圖 5-1 所示。

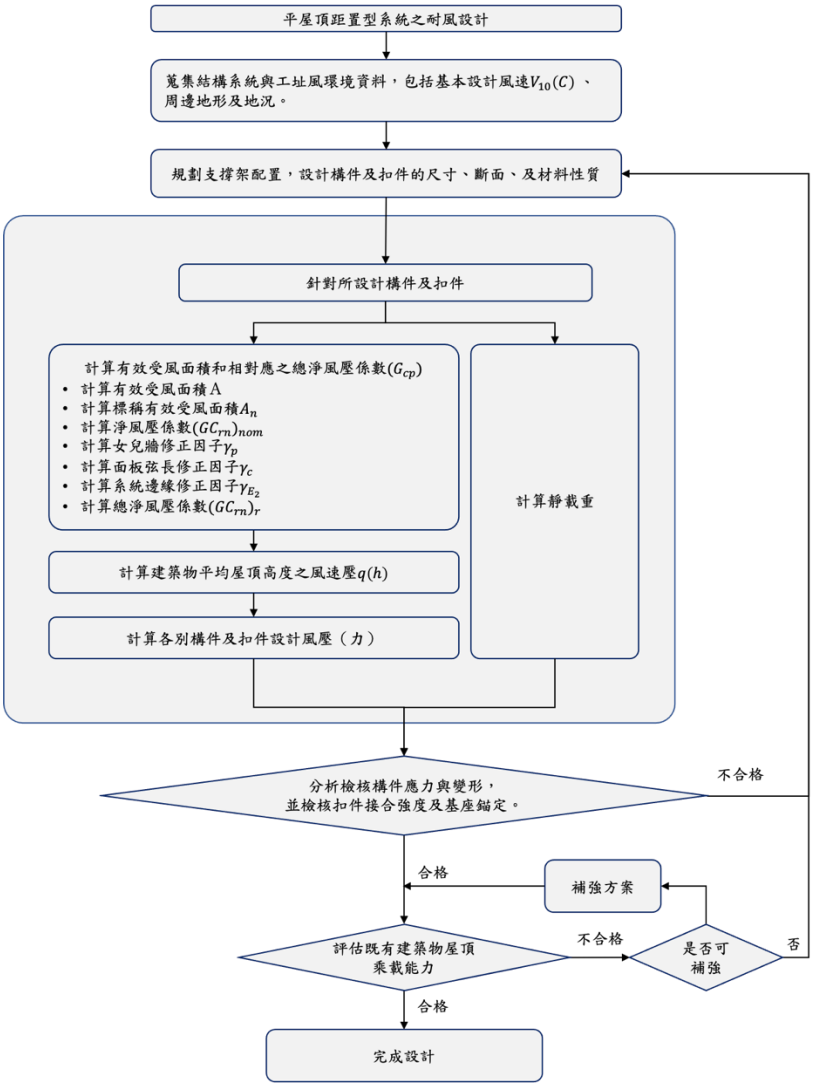


圖 5-1 平屋頂踞置型結構系統之耐風設計流程圖

資料來源：本研究整理

第一節 設計依據

壹、參考依據

1. 內政部，「鋼結構容許應力設計法規範及解說」，2010。
2. 內政部，「建築物耐風設計規範與解說」，2014。
3. 經濟部，CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」之 7.平屋頂踞置型結構系統之設計風壓，2022。
4. The Aluminum Association，「Aluminum Design Manual」，2005。

貳、適用範圍

CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022) 之 7.平屋頂踞置型結構系統提供之風壓計算公式適用於同時滿足下列條件之平屋頂踞置型結構系統：

1. 建築物為「建築物耐風設計規範與解說」(2014) 所定義之封閉式或部分封閉式建築物，且建築物橫風向或扭轉向風力不顯著。
2. 面板弦長L_p(如圖 5-2 所示)小於或等於 2m。
3. 面板傾角 ω(如圖 5-2 所示)小於或等於 35 度，屋頂傾角 θ(如圖 5-2 所示)小於或等於 7 度。
4. 面板與屋頂面最小距離h_1(如圖 5-2 所示)小於或等於 0.6m，面板與屋頂面最大距離h_2(如圖 5-2 所示)小於或等於 1.2m。
5. 模組間隙大於或等於 6.4mm，模組長(或寬)小於或等於 2m。
6. 本標準提供之風壓計算公式不適用於面板設置在距離屋頂邊緣 1.2m 或$2(h_2 - h_{pt})$以內(擇其大者)，其中h_{pt}為女兒牆高度。

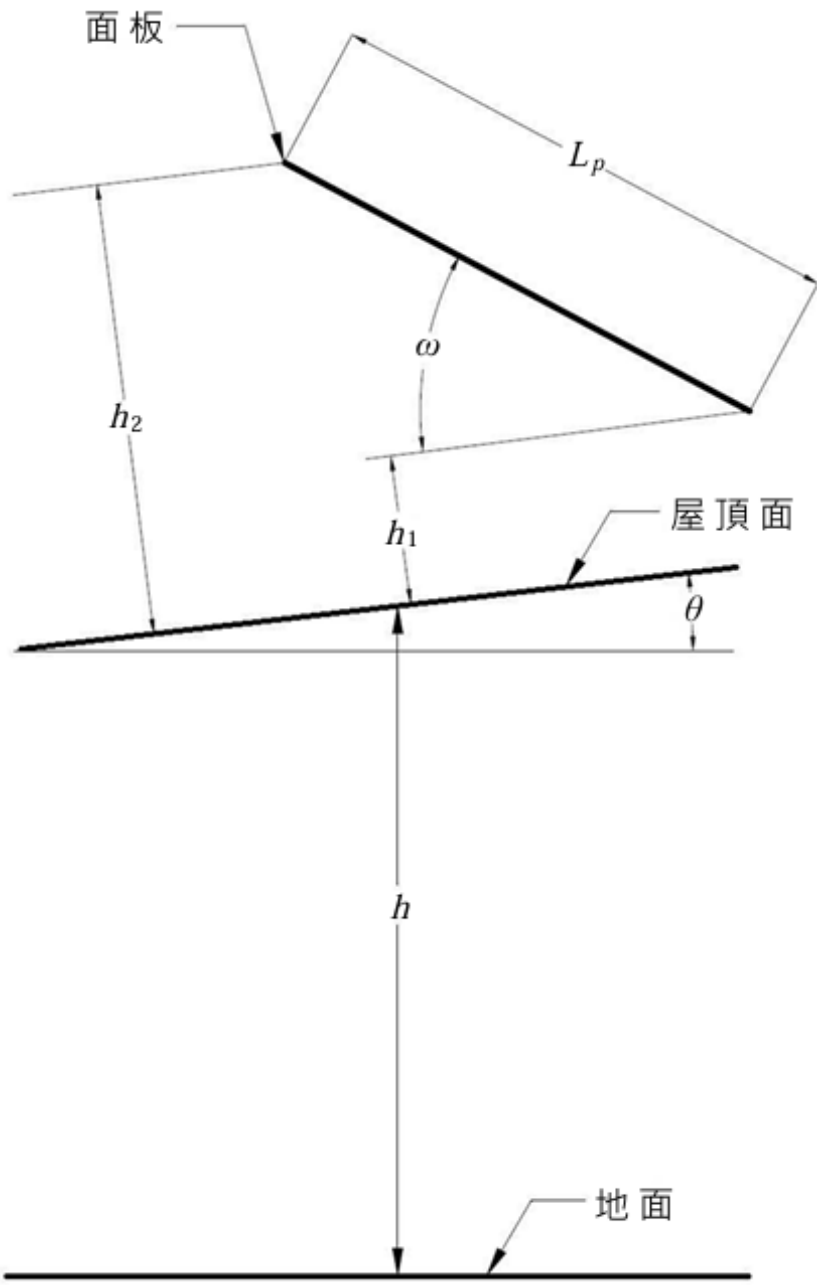


圖 5- 2 平屋頂踞置型結構系統示意圖

資料來源：CNS 16189「 太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022)

第二節 結構物資料與工址風環境

本章擬於嘉義縣太保市新建一平屋頂踞置型太陽光電系統，整體場域之立體配置圖如圖 5-3 所示，共有 9 座支撐架結構系統；整體場域之平面配置圖如圖 5-4 所示，各結構系統與鄰近結構系統距離為 1.5m。

單一結構系統之立體配置圖、側視圖、側視示意圖、平行面板之平面圖及設計位置圖分別如圖 5-5、圖 5-6、圖 5-7、圖 5-8 及圖 5-9 所示。單一系統之面板由 6 片模組以 18 個扣件分別固定於 3 根橫梁上，每根橫梁以 3 個扣件固定於下方縱梁上，每根縱梁以 2 個扣件固定於下方 2 根柱子上，每根柱子固定於基座上。

理論上應根據各支撐架結構系統所承受的風壓情況，分別進行其設計，但由於設計程序類似，本範例僅分析設計圖 5-4 左上角的支撐架結構系統。針對圖 5-9所示之單一結構系統，分別設計其橫梁 a-b-c-d-e、縱梁 f-g-h-i、g 點下方柱、h 點下方柱、面板接橫梁扣件(其形心為 k 點)、橫梁接縱梁扣件(其形心之面板投影為 c 點)、縱梁接柱扣件(位於 g 點下方柱頂)及柱接基座扣件(位於 g 點下方柱底)。

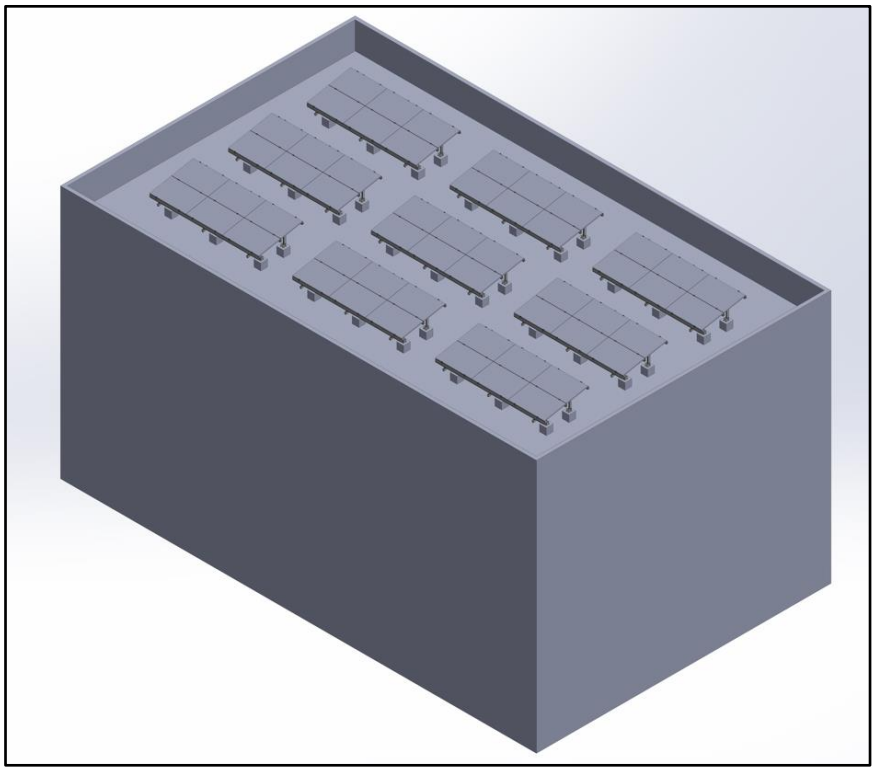


圖 5- 3 整體場域平屋頂踞置型系統之平面配置圖

資料來源：[15]

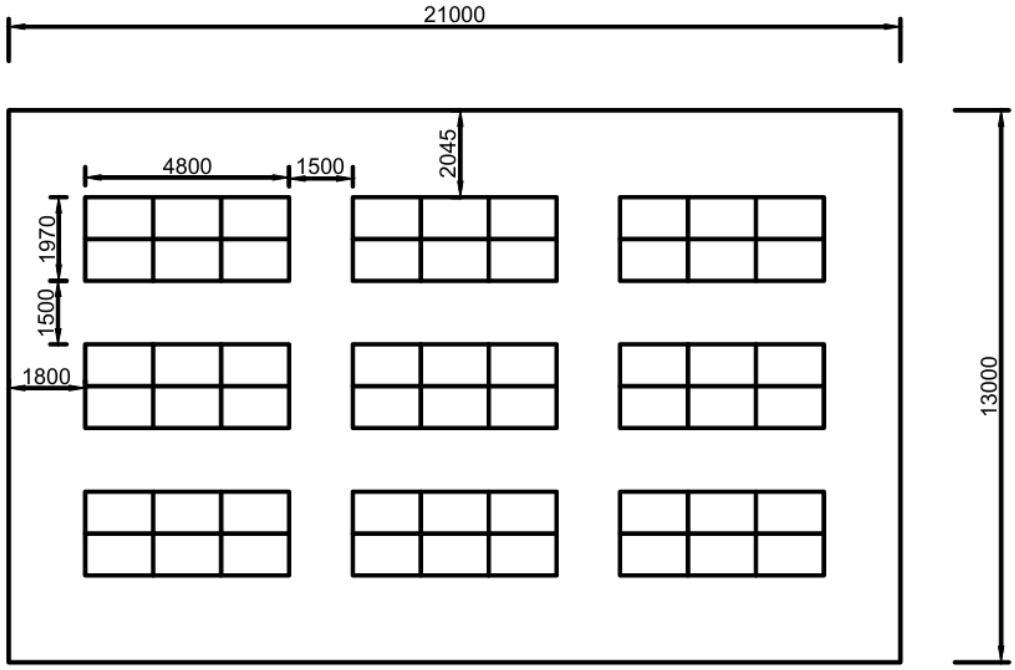


圖 5- 4 整體場域平屋頂踞置型系統之平面配置圖(單位:mm)

資料來源：本研究整理

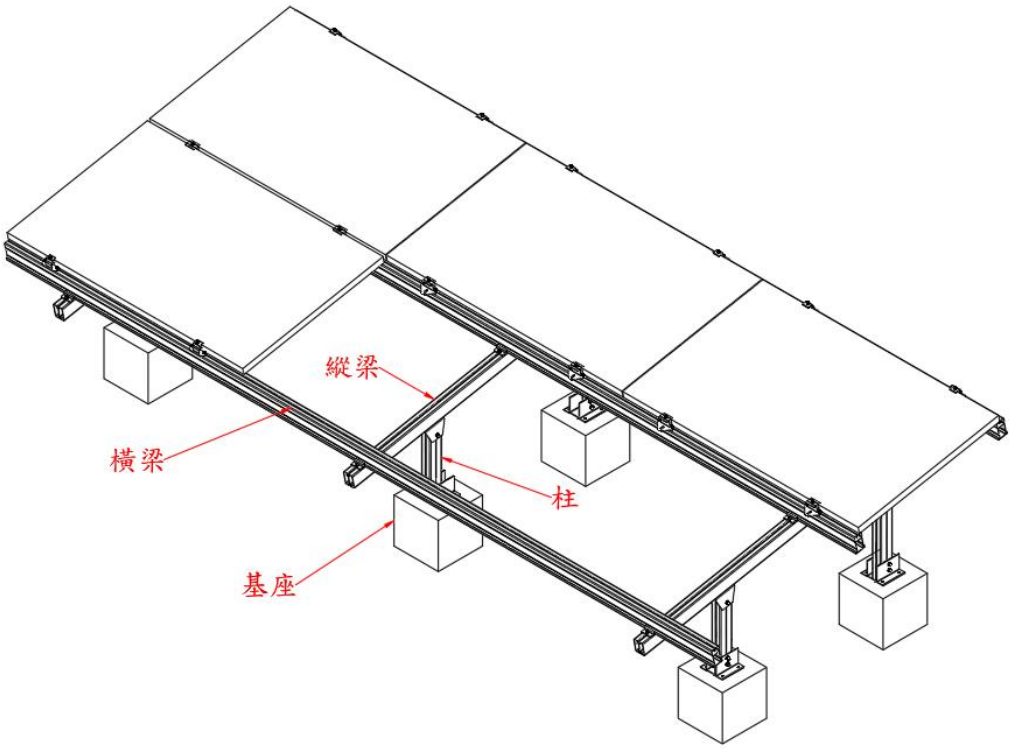


圖 5- 5 單一平屋頂踞置型系統之立體配置圖

資料來源：修改自[15]

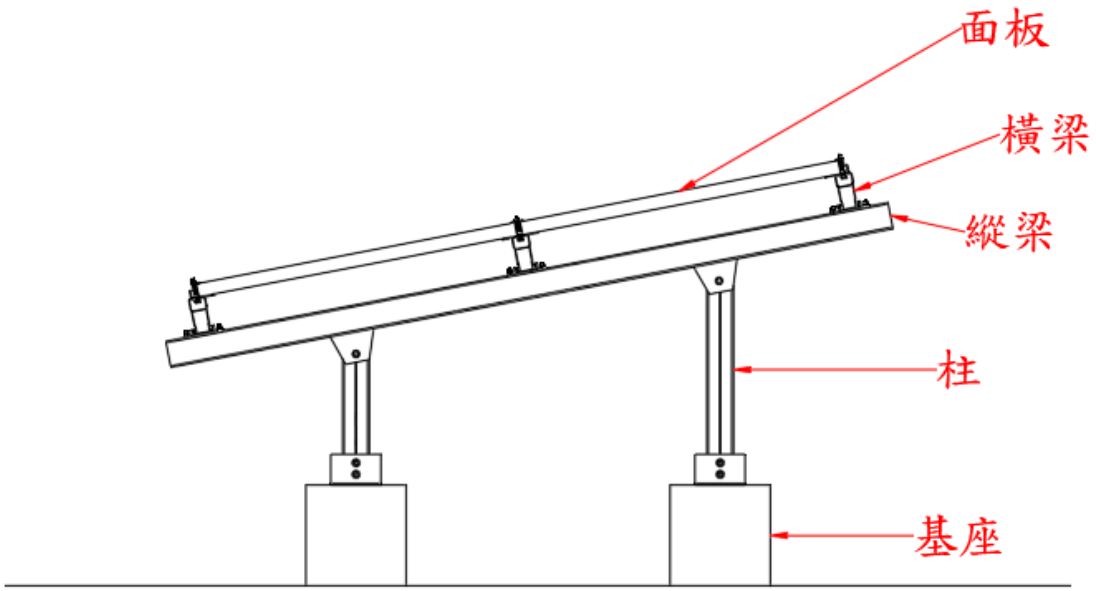


圖 5- 6 單一平屋頂踞置型系統之側視圖

資料來源：修改自[15]

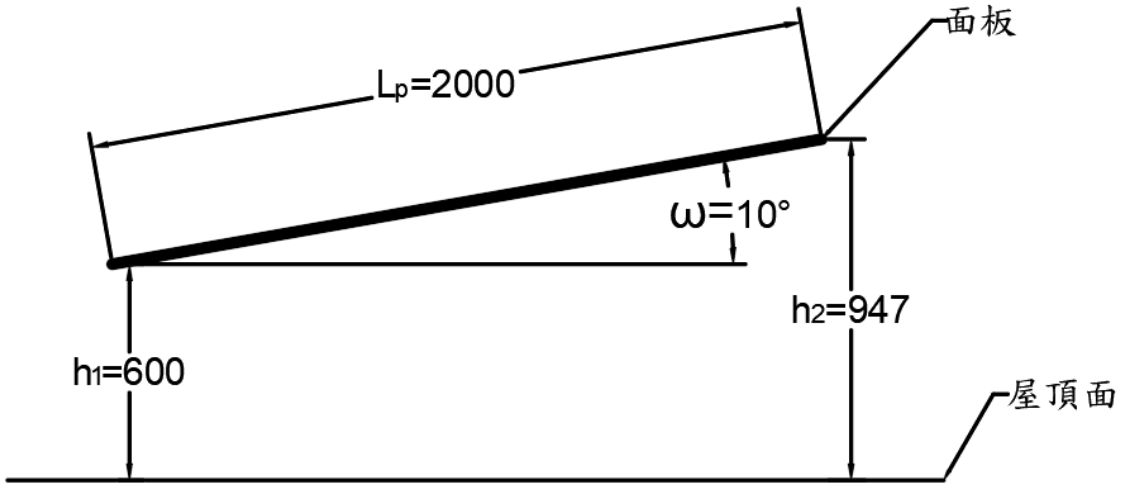


圖 5- 7 單一平屋頂踞置型系統之側視示意圖(單位:mm)

資料來源：本研究整理

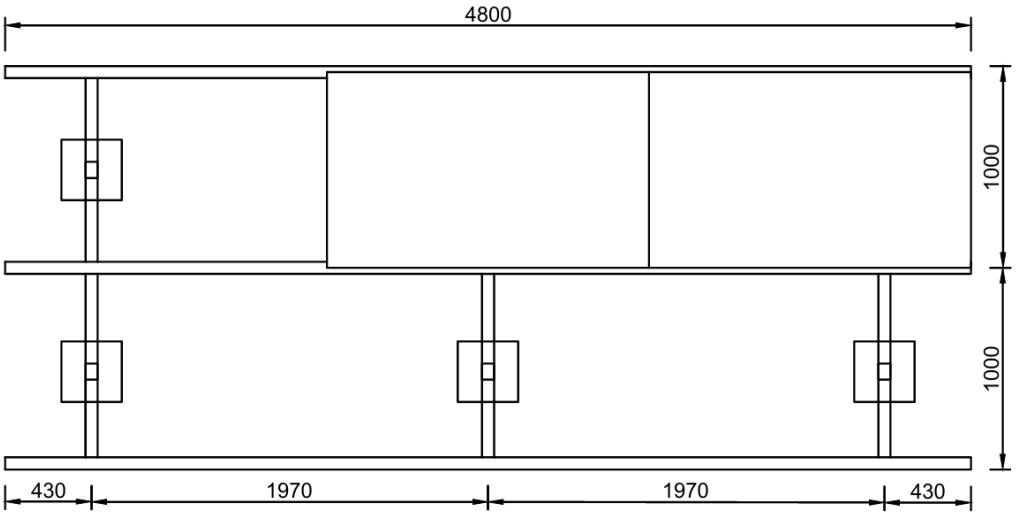


圖 5- 8 單一平屋頂踞置型系統平行面板之平面圖(單位:mm)

資料來源：本研究整理

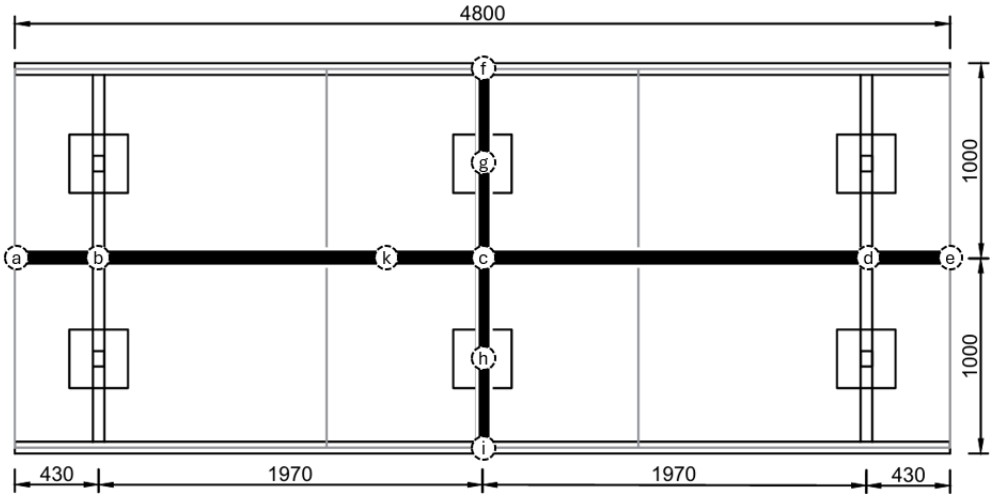


圖 5- 9 單一平屋頂踞置型系統之設計位置圖(單位: mm)

資料來源：本研究整理

結構物資料包含太陽光電系統尺寸、面板配置、用途係數 I；工址風環境包含基本設計風速$V_{10}(C)$、結構物周邊地形以及地況。本節擬定結構物資料與工址風環境如下表 5-1 所示。

表 5-1 平屋頂踞置型系統之結構物與工址風環境資料

結構物資料	太陽光電結構系統	面板由 6 片模組以 18 個扣件分別固定於 3 根橫梁上，每根橫梁以 3 個扣件固定於下方縱梁上，每根縱梁以 2 個扣件固定於下方 2 根柱子上，每根柱子固定於基座上。
	建築物尺寸	平面尺寸$21m \times 13m$；建築物平均屋頂高度$h = 8\,m$；女兒牆高度$h_{pt} = 1.2\,m$。
	面板設置	7. 面板弦長 $L_p = 2\,m$。 8. 面板傾角 $\omega = 10°$。 9. 屋頂傾角 $\theta = 0°$。 10. 面板與屋頂面最小距離 $h_1 = 0.6\,m$。 11. 面板與屋頂面最大距離 $h_2 = 0.947\,m$。 12. 模組長為$1.56\,m$、寬為$0.98\,m$。 13. 模組間隙為$20\,mm$。
	用途係數	根據「建築物耐風設計規範與解說」(2014) 規範 2.5 節，依照重要程度可將 I 值分為1.1、1.0或 0.9，本範例取 I = 1.0。
工址風環境	基本設計風速$V_{10}(C)$	根據「建築物耐風設計規範與解說」(2014) 規範 2.4 節，嘉義縣太保市的$V_{10}(C) = 32.5\ (m/s)$。
	地況種類	依結構物各方向上風處之地表粗糙度決定皆為地況 C。
	地形係數	無特殊地形。

資料來源：本研究整理

第三節 各構件及扣件之設計風壓(力)

各構件及扣件之設計風壓(力)之計算步驟包括決定有效受風面積、計算總淨風壓係數及計算構件與扣件之設計風壓(力)，其細節如下：

壹、各構件有效受風面積及相對應之總淨風壓係數

根據「建築物耐風設計規範與解說」1.3 節對有效受風面積 A 之定義可知，結構構件之有效受風面積 A 為跨距長度與有效寬度之乘積，有效寬度不必小於其跨距長度的 1/3。對扣件而言，有效受風面積 A 不得大於單一扣件之受風面積。決定有效受風面積及計算總淨風壓係數方式如下：

[步驟 1]有效受風面積 A

(a) 橫梁 a-b-c-d-e：

如圖 5-10 所示，將風力傳遞至橫梁 a-b-c-d-e 上，且橫梁架設在間距為 1.97 m 的縱梁上，分別以 a-b 段、b-c 段、c-d 段及 d-e 段表示。

針對橫梁 a-b 段，其跨距長度為 0.43 m，其寬度為橫梁間距 1.00 m，故承受風壓面積為$0.43\,m \times 1.00\,m = 0.43\,m^2$。橫梁 a-b 段之有效寬度為$\max(0.43/3, 1.00) = 1.00\,m$，故其有效受風面積為$A = 0.43\,m \times 1.00\,m = 0.43\,m^2$。同理，橫梁 d-e 段之承受風壓面積為$0.43\,m^2$，有效受風面積亦為$0.43\,m^2$。

針對橫梁 b-c 段，其跨距長度為 1.97 m，其寬度為橫梁間距 1.00 m，故承受風壓面積為$1.97\,m \times 1.00\,m = 1.97\,m^2$。橫梁 b-c 段之有效寬度為$\max(1.97/3, 1.00) = 1.00\,m$，故其有效受風面積為$A = 1.97\,m \times 1.00\,m = 1.97\,m^2$。同理，橫梁 c-d 段之承受風壓面積為$1.97\,m^2$，有效受風面積亦為$1.97\,m^2$。

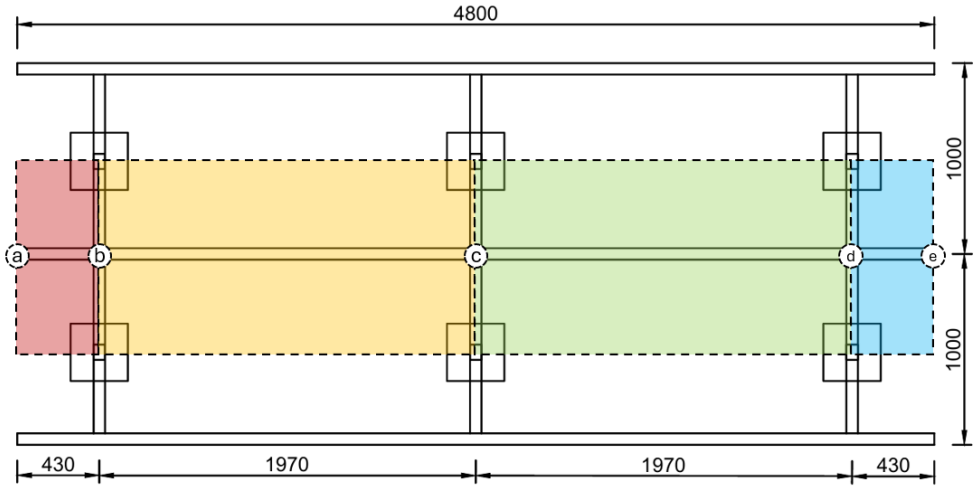


圖 5- 10 示範例 3 之橫梁 a-b-c-d-e 有效受風面積示意圖(單位:mm)
資料來源：本研究整理

(b) 縱梁 f-g-h-i：

如圖 5-11 所示，將風力傳遞至縱梁 f-g-h-i 上，且縱梁架設在間距為 1.00 m 的柱上，分別以 f-g 段、g-h 段及 h-i 段表示。

針對縱梁 f-g 段，其跨距長度為 0.50 m，其寬度為縱梁間距 1.97 m，故承受風壓面積為$0.50\ m \times 1.97\ m = 0.985\ m^2$。縱梁 f-g 段之有效寬度為$\max(0.50/3, 1.97) = 1.97\ m$，故其有效受風面積為$A = 0.50\ m \times 1.97\ m = 0.985\ m^2$。同理，縱梁 h-i 段之承受風壓面積為$0.985\ m^2$，有效受風面積亦為$0.985\ m^2$。

針對縱梁 g-h 段，其跨距長度為 1.00 m，其寬度為縱梁間距 1.97 m，故承受風壓面積為$1.00\ m \times 1.97\ m = 1.97\ m^2$。縱梁 g-h 段之有效寬度為$\max(1.00/3, 1.97) = 1.97\ m$，故其有效受風面積為$A = 1.00\ m \times 1.97\ m = 1.97\ m^2$。

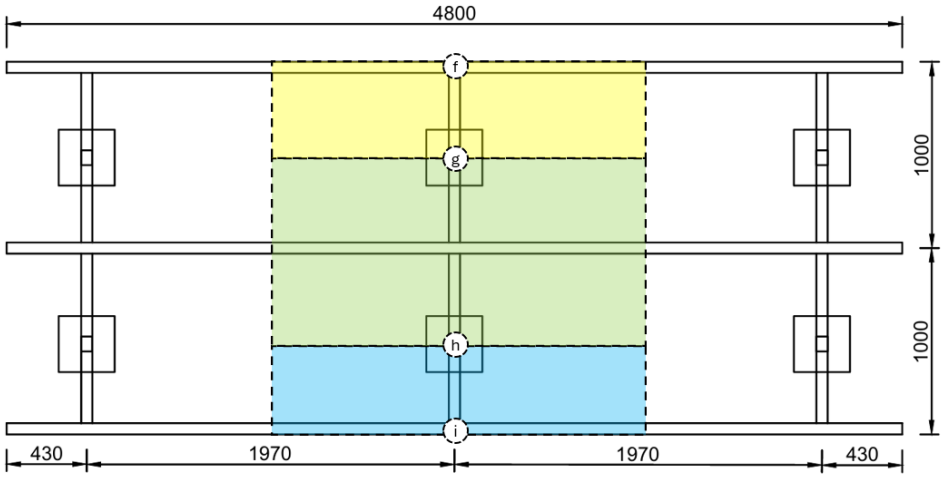


圖 5- 11 示範例 3 之縱梁 f-g-h-i 有效受風面積示意圖(單位:mm)
資料來源：本研究整理

(c) g 點下方柱：

如圖 5-12 所示，將風力傳遞至 g 點下方柱上，且柱架設在間距為 1.00 m 的基座上。

針對 g 點下方柱，其跨距長度為 1.00 m，其寬度為柱間距 1.97 m，故承受風壓面積為$1.00\,m \times 1.97\,m = 1.97\,m^2$。g 點下方柱之有效寬度為$\max(1.00/3, 1.97) = 1.97\,m$，故其有效受風面積為$A = 1.00\,m \times 1.97\,m = 1.97\,m^2$。同理，h 點下方柱之承受風壓面積為$1.97\,m^2$，有效受風面積亦為$1.97\,m^2$。

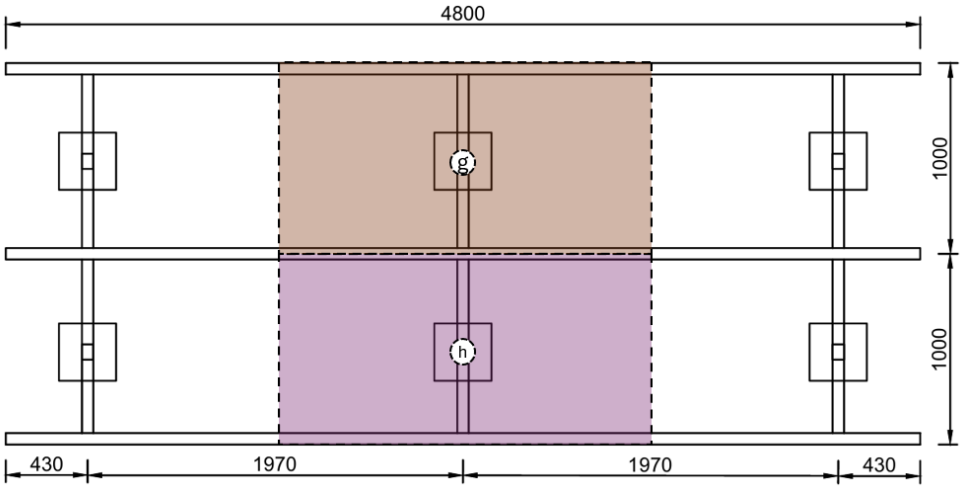


圖 5- 12 示範例 3 之 g 點及 h 點有效受風面積示意圖(單位:mm)
資料來源：本研究整理

(d) 面板接橫梁扣件(其形心為 k 點)：

如圖 5-13 所示，單一模組的尺寸為$1.56\,m \times 0.98\,m$。為方便計算，將模組間距計入有效受風面積，調整後的尺寸為$1.6\,m \times 1\,m$，並由四個扣件固定。因扣件之有效受風面積不得大於其承受風壓面積，故對 k 點之扣件取其有效受風面積為承受風壓面積$A = 0.8\,m \times 1\,m = 0.8\,m^2$。

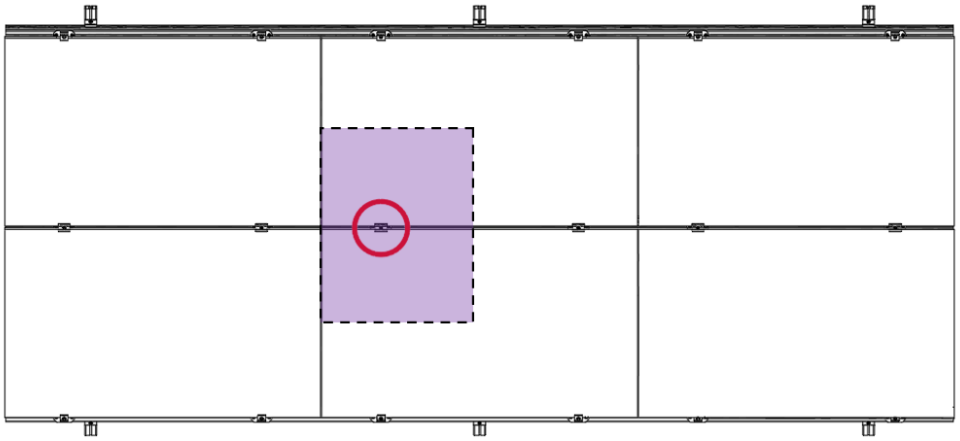


圖 5- 13 示範例 3 之 k 點有效受風面積示意圖

資料來源：修改自[15]

(e) 橫梁接縱梁扣件(其形心之面板投影為 c 點)：

如圖 5-14 所示，將風力傳遞至橫梁上，且橫梁架設在縱梁 b、c、d 點的橫梁接縱梁扣件上。針對橫梁接縱梁扣件(其形心之面板投影為 c 點)，因扣件之有效受風面積不得大於其承受風壓面積，故其有效受風面積為承受風壓面積$A = 1.97\,m \times 1.00\,m = 1.97\,m^2$。

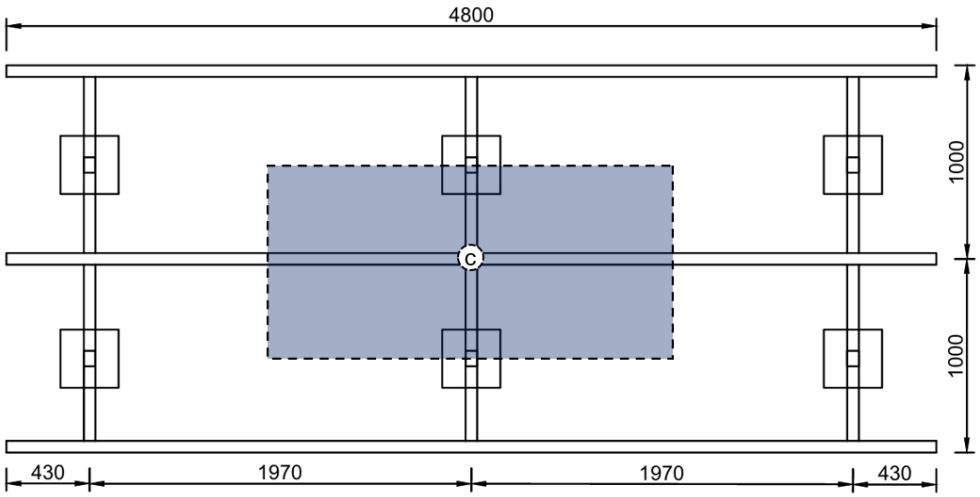


圖 5- 14 示範例 3 之 c 點有效受風面積示意圖(單位:mm)

資料來源：本研究整理

(f) 縱梁接柱扣件(位於 g 點下方柱頂)：

如圖 5-12 所示，縱梁架設在 g 點下方柱及 h 點下方柱。針對縱梁接柱扣件(位於 g 點下方柱頂)，因扣件之有效受風面積不得大於其承受風壓面積，故其有效受風面積為承受風壓面積$A = 1.00\,m \times 1.97\,m = 1.97\,m^2$。

(g) 柱接基座扣件(位於 g 點下方柱底)：

如圖 5-12 所示，柱架設在 g 點下方柱底基座。針對柱接基座扣件(位於 g 點下方柱底)，因扣件之有效受風面積不得大於其承受風壓面積，故其有效受風面積為承受風壓面積$A = 1.00\,m \times 1.97\,m = 1.97\,m^2$。

[步驟 2]標稱有效受風面積A_n

根據 CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022) 標稱有效受風面積A_n之計算，需先根據圖 5-15 判斷構件所在區域，其中W_L為建築物長邊尺寸；W_S為建築物短邊尺寸；h為建築物平均屋頂高度。接著由各構件及扣件之有效受風面積A算出其標稱有效受風面積A_n，其公式為$A_n = \frac{1000}{[max(4.6\,,L_b)]^2}A$，其中$L_b$為標準化建築物長度，其公式為$L_b = \min\left(0.4\sqrt{hW_L}, h, W_s\right)\ (m)$。

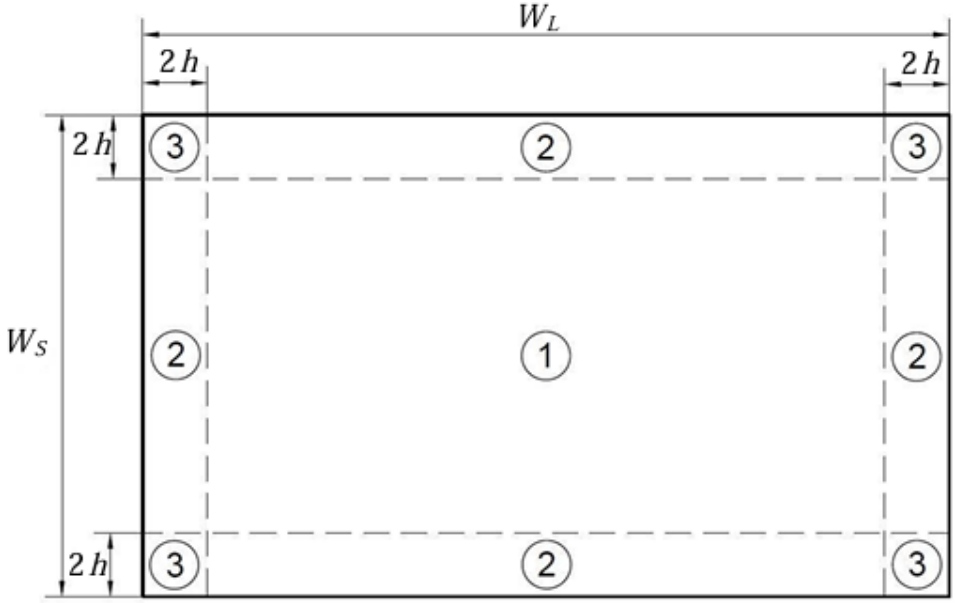


圖 5- 15 平屋頂踞置型之屋頂分區圖

資料來源：CNS 16189「 太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022)

由於本示範例之建築物長邊尺寸W_L為$21\,m$，建築物短邊尺寸W_s為$13\,m$，建築物平均屋頂高度h為$8\,m$，故$L_b = \min\left(0.4\sqrt{\mathrm{h}W_L}, h, W_s\right) = \min(5.18\,m, 8\,m, 13\,m) = 5.18\,m$，且根據圖 5-15，本場域內所有支撐架構件均位於區域③。

針對橫梁 a-b 段及 d-e 段，其有效受風面積A為$0.43\,m^2$，故標稱有效受風面積$A_n = \frac{1000}{[max(4.6\,,5.18)]^2} \times 0.43 = 16.03$。

針對橫梁 b-c 段及 c-d 段，其有效受風面積A為$1.97\,m^2$，故標稱有效受風面積$A_n = \frac{1000}{[max(4.6\,,5.18)]^2} \times 1.97 = 73.43$。同理，縱梁 g-h 段、g 點下方柱、h 點下方柱、橫梁接縱梁扣件(其形心之面板投影為 c 點)、縱梁接柱扣件(位於 g 點下方柱頂)及柱接基座扣件(位於 g 點下方柱底)，其有效受風面積A均為$1.97\,m^2$，標稱有效受風面積A_n均為73.43。

針對縱梁 f-g 段及 h-i 段，其有效受風面積A為$0.985\,m^2$，標稱有效受風面積$A_n = \frac{1000}{[max(4.6\,,5.18)]^2} \times 0.985 = 36.71$。

針對面板接橫梁扣件(其形心為 k 點)，其有效受風面積A為$0.8\,m^2$，標稱有效受風面積$A_n = \frac{1000}{[max(4.6\,,5.18)]^2} \times 0.8 = 29.82$。

彙整所有構件及扣件的標稱有效受風面積A_n，將其列於表 5-4。

[步驟 3]對應於標稱有效受風面積A_n之淨風壓係數$(GC_{rn})_{nom}$

根據 CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022) 淨風壓係數$(GC_{rn})_{nom}$之計算，當$0^\circ \le \omega \le 5^\circ$時，利用表 5-2 計算得到$(GC_{rn})_{nom}$；當$15^\circ \le \omega \le 35^\circ$時，利用表 5-3 計算得到$(GC_{rn})_{nom}$；當$5^\circ < \omega < 15^\circ$時，可以使用內插計算得到$(GC_{rn})_{nom}$。

表 5- 2 當 0°≤ ω ≤5°時，$(GC_{rn})_{nom}$之計算公式

屋頂分區	A_n	$(GC_{rn})_{nom}$之計算公式
①	$A_n \leq 46.45$	$-0.89\ logA_n + 3.12$
	$A_n > 46.45$	$-0.52\ logA_n + 2.14$
②	$A_n \leq 46.45$	$-1.20\ logA_n + 4.17$
	$A_n > 46.45$	$-0.62\ logA_n + 2.61$
③	$A_n \leq 46.45$	$-1.39\ logA_n + 4.79$
	$A_n > 46.45$	$-0.73\ logA_n + 3.01$

資料來源：CNS 16189「 太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022)

表 5- 3 當 15°≤ ω ≤35° 時，$(GC_{rn})_{nom}$之計算公式

屋頂分區	A_n	$(GC_{rn})_{nom}$之計算公式
①	$A_n \leq 46.45$	$-1.11\ logA_n + 4.17$
	$A_n > 46.45$	$-0.54\ logA_n + 2.62$
②	$A_n \leq 46.45$	$-1.74\ logA_n + 6.04$
	$A_n > 46.45$	$-0.52\ logA_n + 2.75$
③	$A_n \leq 46.45$	$-2.08\ logA_n + 7.29$
	$A_n > 46.45$	$-0.62\ logA_n + 3.33$

資料來源：CNS 16189「 太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022)

針對橫梁 a-b 段，其標稱有效受風面積A_n為16.03。以$\omega = 5^\circ$計算淨風壓係數 $(GC_{rn})_{nom} = -1.39 \log A_n + 4.79 = 3.12$ ； 以 $\omega = 15^\circ$ 計 算 淨 風 壓 係 數 $(GC_{rn})_{nom} = -2.08 \log A_n + 7.29 = 4.78$；由線性內差方式求$\omega = 10^\circ$的淨風壓係數$(GC_{rn})_{nom} = (3.12 + 4.78)/2 = 3.95$。同理，橫梁 d-e 段，其標稱有效受風面積$A_n$為16.03，淨風壓係數$(GC_{rn})_{nom} = 3.95$。

針對橫梁 b-c 段，其標稱有效受風面積A_n為73.43。以$\omega = 5^\circ$計算淨風壓係數 $(GC_{rn})_{nom} = -0.73 \log A_n + 3.01 = 1.65$ ； 以 $\omega = 15^\circ$ 計 算 淨 風 壓 係 數 $(GC_{rn})_{nom} = -0.62 \log A_n + 3.33 = 2.17$；由線性內差方式求$\omega = 10^\circ$的淨風壓係數$(GC_{rn})_{nom} = (1.65 + 2.17)/2 = 1.91$。同理，橫梁 c-d 段、縱梁 g-h 段、g 點

下方柱、h 點下方柱、橫梁接縱梁扣件(其形心之面板投影為 c 點)、縱梁接柱扣件(位於 g 點下方柱頂)、柱接基座扣件(位於 g 點下方柱底)，其標稱有效受風面積A_n為73.43，淨風壓係數$(GC_{rn})_{nom} = 1.91$。

針對縱梁 f-g 段， 其標稱有效受風面積A_n為36.71。以$\omega = 5^{\circ}$計算淨風壓係數 $(GC_{rn})_{nom} = -1.39\log A_n + 4.79 = 2.61$ ； 以 $\omega = 15^{\circ}$ 計 算 淨 風 壓 係 數 $(GC_{rn})_{nom} = -2.08\log A_n + 7.29 = 4.04$；由線性內差方式求$\omega = 10^{\circ}$的淨風壓係數$(GC_{rn})_{nom} = (2.61 + 4.04)/2 = 3.33$。同理，縱梁 h-i 段，其標稱有效受風面積$A_n$為36.71，淨風壓係數$(GC_{rn})_{nom} = 3.33$。

針對面板接橫梁扣件(其形心為 k 點)， 其標稱有效受風面積A_n為29.82。以$\omega = 5^{\circ}$計算淨風壓係數$(GC_{rn})_{nom} = -1.39\log A_n + 4.79 = 2.74$；以$\omega = 15^{\circ}$計算淨風壓係數$(GC_{rn})_{nom} = -2.08\log A_n + 7.29 = 4.22$；由線性內差方式求$\omega = 10^{\circ}$的淨風壓係數$(GC_{rn})_{nom} = (2.74 + 4.22)/2 = 3.48$。

彙整所有構件及扣件的淨風壓係數$(GC_{rn})_{nom}$，將其列於表 5-4。

[步驟 4] 女兒牆修正因子γ_p

根據 CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022) 女兒牆修正因子γ_p之計算，女兒牆修正因子$\gamma_p = min\left(1.2\,,0.9 + \frac{h_{pt}}{h}\right) = \min\left(1.2,0.9 + \frac{1.2}{8}\right) = 1.05$。

[步驟 5]面板弦長修正因子γ_c

根據 CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022) 面板弦長修正因子γ_c之計算，面板弦長修正因子$\gamma_c = max\left(0.6 + 0.2L_p, 0.8\right) = max(0.6 + 0.2 \times 2\,, 0.8) = 1.0$。

[步驟 6]系統邊緣修正因子γ_{E_2}

根據 CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022) 系統邊緣修正因子γ_{E_2}之決定，若構件同時滿足下述條件，則結構系統之系統邊緣修正因子γ_{E_2}=1.5；在其他情況下，結構系統之系統邊緣修正因子γ_{E_2}=1.0。

(a) 構件所在結構系統之邊緣與鄰近屋頂邊緣之距離大於$0.5h$。

(b) 構件所在結構系統與鄰近結構系統之距離大於$4h_2$或 1.2m，擇其大者 (如圖 5-16 所示)，或構件所在面板與鄰近面板之距離大於$4h_2$或 1.2m，擇其大者 (如圖 5-17 所示)。

(c) 構件位於結構系統邊緣 $1.5L_p$範圍內，其中L_p為面板弦長。

(d) 構件承受負風壓時。

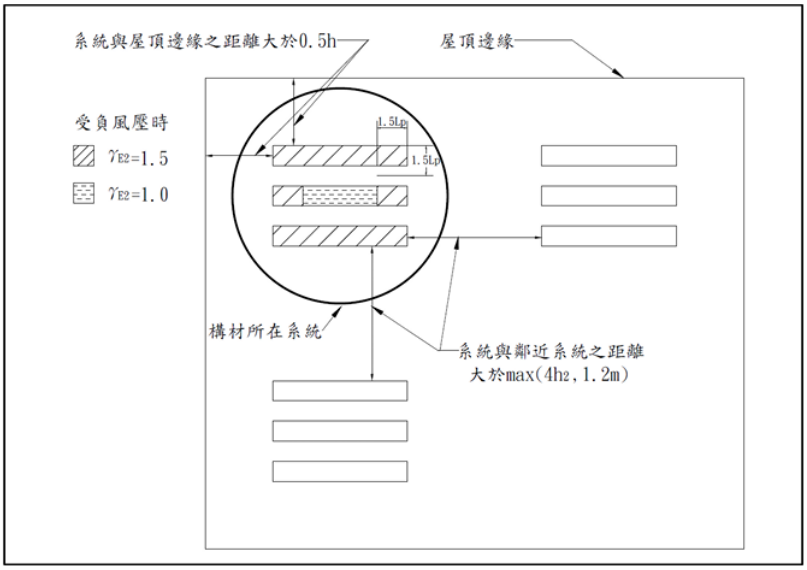


圖 5- 16 構件所在結構系統與鄰近結構系統之距離大於max $(4h_2, 1.2m)$時可能產生γ_{E2}=1.5 之示意圖

資料來源：CNS 16189「 太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022)

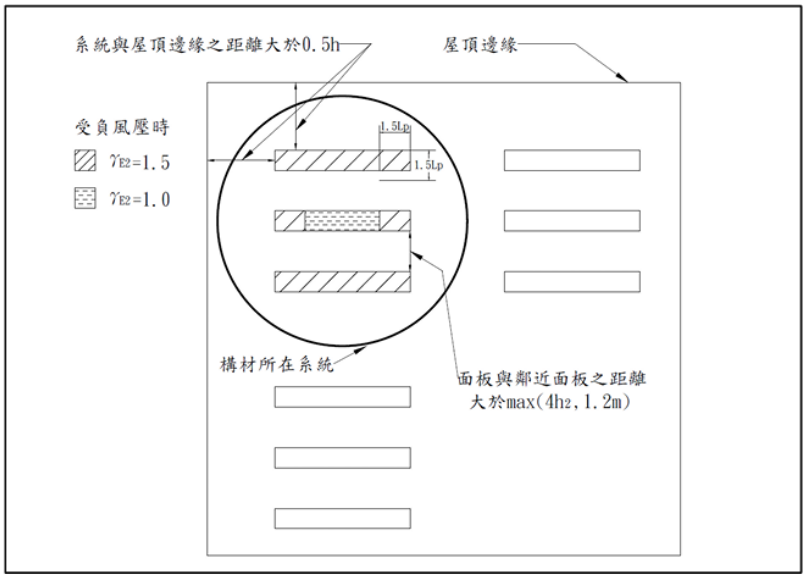


圖 5- 17 構件所在面板與鄰近面板之距離大於max $(4h_2, 1.2m)$時可能產生 γ_{E2}=1.5 之示意圖

資料來源：CNS 16189「 太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022)

根據圖 5-4，本範例假設構件所在結構系統與鄰近結構系統之距離為 1.5 m，小於$\max(4h_2, 1.2m) = 3.8\,m$，不滿足上述條件之(b)，故其系統邊緣修正因子$\gamma_{E_2} = 1.0$。

[步驟 7]總淨風壓係數$(GC_{rn})_r$

根據 CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022) 總淨風壓係數$(GC_{rn})_r$之計算，總淨風壓係數$(GC_{rn})_r = (\mathrm{GC_{rn}})_{\mathrm{nom}} \times \gamma_{\mathrm{p}} \times \gamma_{\mathrm{c}} \times \gamma_{\mathrm{E_2}}$。

針對橫梁 a-b 段，其淨風壓係數$(\mathrm{GC_{rn}})_{\mathrm{nom}}$為3.95、女兒牆修正因子$\gamma_p$為1.05、面板弦長修正因子$\gamma_c$為1.0 及系統邊緣修正因子$\gamma_{E_2}$為1.0，故總淨風壓係數$(GC_{rn})_r = 3.95 \times 1.05 \times 1.0 \times 1.0 = 4.15$。同理，橫梁 d-e 段，其淨風壓係數$(\mathrm{GC_{rn}})_{\mathrm{nom}}$為3.95，總淨風壓係數$(GC_{rn})_r$為2.0。

針對橫梁 b-c 段，其淨風壓係數$(\mathrm{GC_{rn}})_{\mathrm{nom}}$為1.91、女兒牆修正因子$\gamma_p$為1.05、面板弦長修正因子$\gamma_c$為1.0 及系統邊緣修正因子$\gamma_{E_2}$為1.0，故總淨風壓係數$(GC_{rn})_r = 1.91 \times 1.05 \times 1.0 \times 1.0 = 2.01$。同理，橫梁 c-d 段、縱梁 g-h 段、g 點下方柱、h 點下方柱、橫梁接縱梁扣件(其形心之面板投影為 c 點)、縱梁接柱扣件(位於 g 點下方柱頂)、柱接基座扣件(位於 g 點下方柱底)，其淨風壓係數$(\mathrm{GC_{rn}})_{\mathrm{nom}}$為1.91，總淨風壓係數$(GC_{rn})_r$為2.01。

針對縱梁 f-g 段，其淨風壓係數$(\mathrm{GC_{rn}})_{\mathrm{nom}}$為3.33、女兒牆修正因子$\gamma_p$為1.05、面板弦長修正因子$\gamma_c$為1.0 及系統邊緣修正因子$\gamma_{E_2}$為1.0，故總淨風壓係數$(GC_{rn})_r = 3.33 \times 1.05 \times 1.0 \times 1.0 = 3.5$。 同理，縱梁 h-i 段，其淨風壓係數$(\mathrm{GC_{rn}})_{\mathrm{nom}}$為3.33，總淨風壓係數$(GC_{rn})_r$為3.5。

針對面板接橫梁扣件(其形心為 k 點)，其淨風壓係數$(\mathrm{GC_{rn}})_{\mathrm{nom}}$為3.48、女兒牆修正因子$\gamma_p$為1.05、面板弦長修正因子$\gamma_c$為1.0 及系統邊緣修正因子$\gamma_{E_2}$為1.0，故總淨風壓係數$(GC_{rn})_r = 3.48 \times 1.05 \times 1.0 \times 1.0 = 3.65$。

彙整所有構件及扣件的總淨風壓係數$(GC_{rn})_r$，將其列於表 5-4。

貳、構件與扣件之設計風壓（力）

[步驟 1]相關之設計參數

根據「建築物耐風設計規範與解說」(2014) 表 2.2，地況 C 之相關參數$\alpha = 0.15$；$z_g = 300\,m$，用途係數$I = 1.0$，基本設計風速$V_{10}(C) = 32.5\,m/s$。

[步驟 2]風速壓地況係數 $K(h)$ 及地形係數 K_{zt}

根據「建築物耐風設計規範與解說」(2014) 規範式(2.7)，計算$K(z)$。因建築物平均屋頂高度$h = 8\,m$，取規範$z > 5\,m$的公式計算：

$K(h) = 2.774\left(\frac{h}{z_g}\right)^{2\alpha} = 2.774\left(\frac{8}{300}\right)^{2\times 0.15} = 0.935$。

根據「建築物耐風設計規範與解說」(2014) 規範式(2.8)，計算K_{zt}。因工址附近無特殊地形，$K_{zt} = 1.0$。

[步驟 3]離地面 h 公尺高處之風速壓

根據「建築物耐風設計規範與解說」(2014) 規範式(2.6)，離地面 h 公尺高處之風速壓$q(h) = 0.06 \times K(h) \times K_{zt} \times [IV_{10}(C)]^2 = 0.06 \times 0.935 \times 1.0 \times [1.0 \times 32.5]^2 = 59.26\,kgf/m^2$。

[步驟 4]各構件及扣件之設計風壓

根據 CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022) 平屋頂踞置型系統之設計正負風壓P之計算，設計正負風壓$P = \pm q(h) \times (GC_{rn})_r$，正號表示淨風壓指向面板上表面；負號表示淨風壓遠離面板上表面。

針對橫梁 a-b 段，其建築物平均高處之風速壓$q(h) = 59.26\,kgf/m^2$，總淨風壓係數$(GC_{rn})_r = 4.15$，設計正負風壓$P = \pm q(h) \times (GC_{rn})_r = \pm 59.26 \times 4.15 = \pm 245.9\,kgf/m^2$。同理，橫梁 d-e 段，其設計正負風壓$P = \pm 245.9\,kgf/m^2$。

針對橫梁 b-c 段，其建築物平均高處之風速壓$q(h) = 59.26\,kgf/m^2$，總淨風壓係數$(GC_{rn})_r = 2.01$，設計正負風壓$P = \pm q(h) \times (GC_{rn})_r = \pm 59.26 \times 2.01 = \pm 119.1\,kgf/m^2$。同理，橫梁 c-d 段、縱梁 g-h 段、g 點下方柱、h 點下方柱、橫梁接縱梁扣件(其形心之面板投影為 c 點)、縱梁接柱扣件(位於 g 點下方柱頂)、柱接基座扣件(位於 g 點下方柱底)，設計正負風壓$P = \pm 119.1\,kgf/m^2$。

針對縱梁 f-g 段，其建築物平均高處之風速壓$q(h) = 59.26\ kgf/m^2$，總淨風壓係數$(GC_{rn})_r = 3.5$，設計正負風壓$P = \pm\ q(h) \times (GC_{rn})_r = \pm 59.26 \times 3.5 = \pm 207.4\ kgf/m^2$。同理，縱梁 h-i 段，其設計正負風壓$P = \pm 207.4\ kgf/m^2$。

針對面板接橫梁扣件(其形心為 k 點)，其建築物平均高處之風速壓$q(h) = 59.26\ kgf/m^2$，總淨風壓係數$(GC_{rn})_r = 3.65$，設計正負風壓$P = \pm\ q(h) \times (GC_{rn})_r = \pm 59.26 \times 3.65 = \pm 216.3\ kgf/m^2$。

彙整所有構件及扣件的設計正負風壓 P，將其列於表 5-4。

[步驟 5]各扣件之設計風力

設計正負風力為設計正負風壓與承受風壓面積A_{actual}之乘積。

針對橫梁接縱梁扣件(其形心之面板投影為 c 點)，設計正負風壓 P為$\pm 119.1\ kgf/m^2$，承受風壓面積A_{actual}為$1.97\ m^2$，設計正負風力$F = \pm 119.1\ kgf/m^2 \times 1.97\ m^2 = 234.6\ kgf$。同理，縱梁接柱扣件(位於 g 點下方柱頂)、柱接基座扣件(位於 g 點下方柱底)，其設計正負風壓 P為$\pm 119.1\ kgf/m^2$，承受風壓面積A_{actual}為$1.97\ m^2$，設計正負風力F為$234.6\ kgf$。

針對面板接橫梁扣件(其形心為 k 點)，設計正負風壓 P為$\pm 216.3\ kgf/m^2$，承受風壓面積A_{actual}為$0.8\ m^2$，設計正負風力$F = \pm 216.3\ kgf/m^2 \times 0.8\ m^2 = 173\ kgf$。

彙整所有扣件的設計正負風力 F，將其列於表 5-4。

表 5- 4 示範例 3 構件及扣件之相關參數

名稱		實際受風面積 (m^2)	有效受風面積 $A(m^2)$	標稱有效受風面積 A_n	淨風壓係數 $(GC_{rn})_{nom}$	總淨風壓係數 $(GC_{rn})_r$	設計正負風壓 (kgf/m^2)	設計正負風力 (kgf)
橫梁	a-b 段或 d-e 段	0.43	0.43	16.03	3.95	±4.15	±245.9	
	b-c 段或 c-d 段	1.97	1.97	73.43	1.91	±2.01	±119.1	
縱梁	f-g 段或 h-i 段	0.985	0.985	36.71	3.33	±3.50	±207.4	
	g-h 段	1.97	1.97	73.43	1.91	±2.01	±119.1	
柱	g 點下方柱或 h 點下方柱	1.97	1.97	73.43	1.91	±2.01	±119.1	
面板接橫梁之扣件	k 點	0.8	0.8	29.82	3.48	±3.65	±216.3	±173.0
	螺栓 1 個(軸力)							±173.0
橫梁接縱梁之扣件	c 點	1.97	1.97	73.43	1.91	±2.01	±119.1	±234.6
	螺栓 2 個(軸力)							±117.3
縱梁接柱之扣件	g 點下方柱頂	1.97	1.97	73.43	1.91	±2.01	±119.1	±234.6
	A 處螺栓 2 個(軸力)							±117.3
	B 處螺栓 1 個(剪力)							±231.0
柱接基座之扣件	g 點下方柱底	1.97	1.97	73.43	1.91	±2.01	±119.1	±234.6
	螺栓 2 個(剪力)							±115.5

資料來源：本研究整理

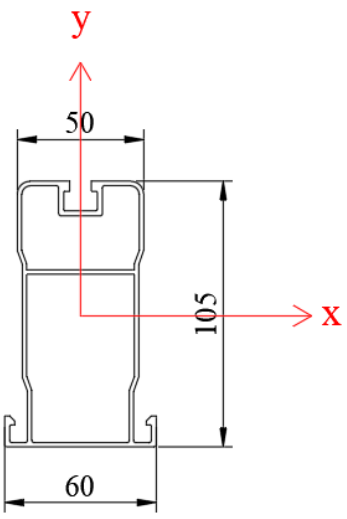
第四節 構件之耐風分析及檢核

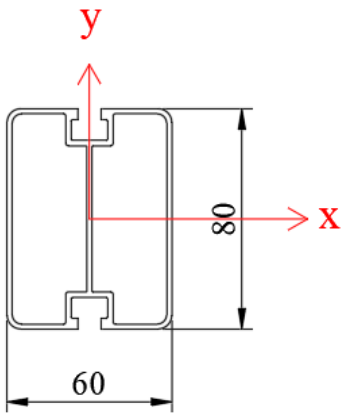
橫梁、縱梁及柱使用特製之鋁擠型構件，其材質為 6063-T5 鋁合金，設計時所用之彈性模數E為$7100\ \mathrm{kgf}/mm^2$，剪力彈性模數為G為$2700\ \mathrm{kgf}/mm^2$，波森比μ為0.3，降伏強度F_y為$110\ MPa$，極限強度F_u為$150\ MPa$。假設採用之橫梁、縱梁及柱的形狀與斷面性質如表 5-5 所示。

因國內目前尚無鋁結構之相關規範，根據臺中市結構工程技師公會在 108 年編寫「太陽光電系統支撐架結構設計參考手冊草案(修訂版)」之 4.2 構件接合設計內容所述，構件檢核可參考美國鋁結構規範 Aluminum Design Manual，載重組合則參考「鋼結構容許應力設計法規範及解說」之規定。

依「鋼結構容許應力設計法規範及解說」之規定，載重組合有$D+L$、$D+0.75(L\pm1.25W)$、$D+0.75(L\pm0.8E)$、$0.7D\pm1.25W$及$0.7D\pm0.8E$。其中，D為靜載重，包括構件自重及永久附加物重量；L為活載重，包含人員重量；E為設計地震力；W為設計風力。本示範例設計時僅考慮風載重及靜載重造成之影響，故載重組合有$D\pm0.9375\,W$、$0.7D\pm1.25W$這四種。

表 5-5 示範例 3 之斷面性質與斷面形狀

<table>
<tr><td colspan="2">橫梁</td></tr>
<tr><td>斷面性質</td><td>斷面形狀(單位:mm)</td></tr>
<tr><td>斷面模數 $S_x = 19919.81\ mm^3$
斷面模數 $S_y = 9215.94\ mm^3$
慣性矩 $I_x = 1045789.95\ mm^4$
慣性矩 $I_y = 276478.21\ mm^4$
斷面積 $A = 729.02\ mm^2$</td><td> 

y 軸垂直面板</td></tr>
<tr><td colspan="2">縱梁及柱</td></tr>
<tr><td>斷面性質</td><td>斷面形狀(單位:mm)</td></tr>
<tr><td>斷面模數 $S_x = 14741.15\ mm^3$
斷面模數 $S_y = 9679.11\ mm^3$
慣性矩 $I_x = 589646.16\ mm^4$
慣性矩 $I_y = 290373.29\ mm^4$
斷面積 $A = 710.52\ mm^2$</td><td> 

縱梁 y 軸垂直面板
柱 z 軸垂直地面</td></tr>
</table>

資料來源：修改自 [15]

壹、橫梁

針對橫梁 a-b-c-d-e 進行結構分析如圖 5-18 所示，將橫梁與下方縱梁連接處 b 點、c 點及 d 點的扣件視為鉸支承（Hinge）分析。

風載重採用表 5-4 中橫梁 a-b-c-d-e 的設計正負風壓。橫梁 a-b 段及 d-e 段設計風壓為$\pm 245.9\ kgf/m^2$，橫梁 b-c 段及 c-d 段設計風壓為$\pm 119.1\ kgf/m^2$，分別乘上縱梁跨距 1m 後可得橫梁 a-b 段及 d-e 段的線載重為$q_w = \pm 245.9\ kgf/m$，橫梁 b-c 段及 c-d 段的線載重為$q_w = \pm 119.1\ kgf/m$。

靜載重包含橫梁自重與模組自重，因鋁擠型自重相對較小，故只考慮模組自重。模組自重為每塊 $20\ kgf$，橫梁 a-b-c-d-e 需承受之模組重為 3 塊，故橫梁 a-b-c-d-e 所承受之線載重 $q_D = (20\ kgf \times 3\ 塊)/4.8\ m = 12.5\ kgf/m$。

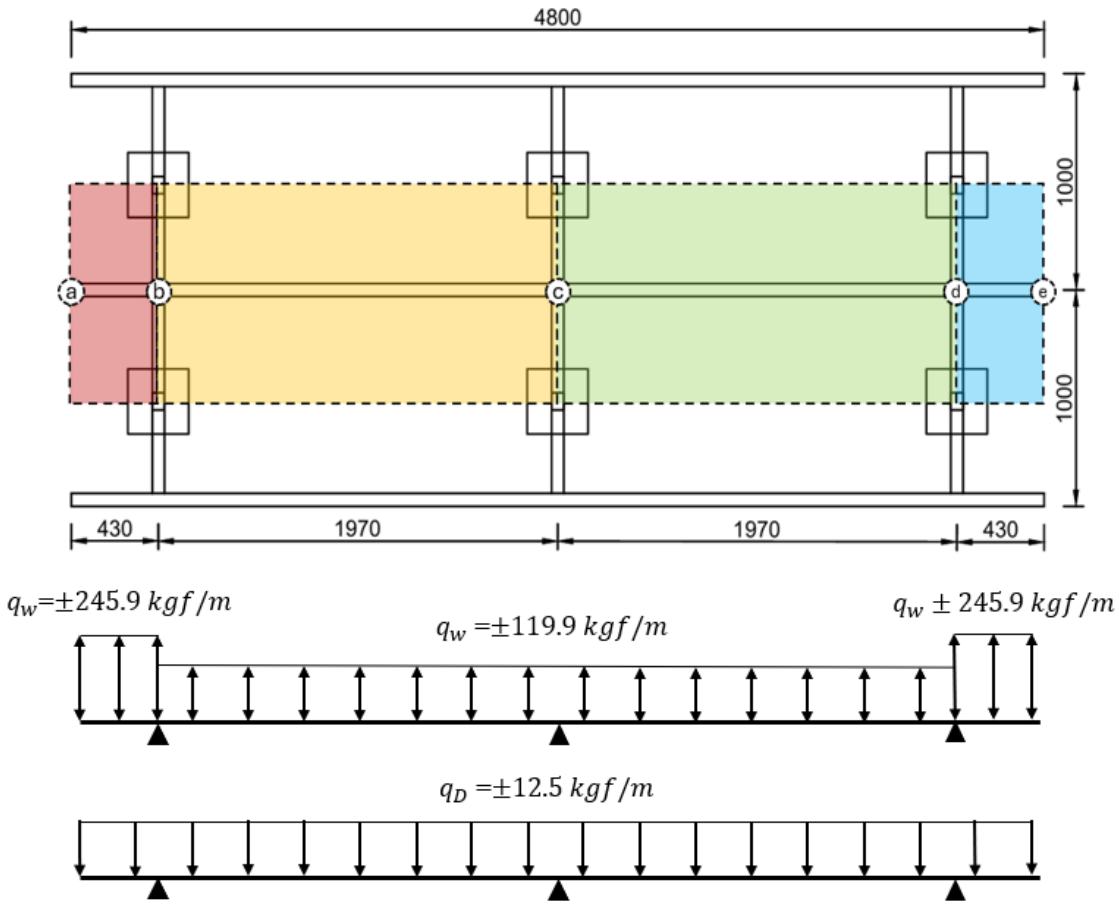


圖 5- 18 示範例 3 之橫梁 a-b-c-d-e 受力作用圖

資料來源：本研究整理

分析時利用 SAP 2000 軟體建模，將橫梁的斷面與材料性質輸入並且施加風載重及靜載重，即可分析出橫梁 a-b-c-d-e 的剪力、彎矩及變形量 ，當載重組合為$0.7D + 1.25W$時可得出橫梁 a-b-c-d-e 中最大剪力及最大彎矩，分別為$V_{max} = 210.5\ kgf$及$M_{max} = 101.3\ kgf - m$；當載重組合為$1.0D + 1.0W$時可得出最大變形量$\delta_{max} = 3.05\ mm$。

應力檢核

利用 SAP 2000 分析軟體，選 AA-ASD(2000)進行檢核，得橫梁 a-b-c-d-e 應力比為$0.41 \leq 1$，確認構件符合規範。

變形檢核

為避免在強風持續作用下產生振動破壞，設計時應盡量減少構件在風力作用下之變位，同時檢核確認構件變位量不超過容許值，以容許變形量δ_a = 跨距/175 (業界常用公式)，進行檢核。

$$\delta_{max} = 3.05\ mm \leq \delta_a = \frac{1970}{175} = 11.26\ mm$$，檢核通過。

貳、縱梁

針對縱梁 f-g-h-i 進行結構分析如圖 5-19 所示，將縱梁與下方柱連接處 g 點及 h 點的扣件視為鉸支承（Hinge）分析。

風載重採用表 5-4 中縱梁 f-g-h-i 的設計正負風壓。縱梁 f-g 段及 h-i 段設計風壓為$\pm 207.4\ kgf/m^2$；縱梁 g-h 段設計風壓為$\pm 119.1\ kgf/m^2$，分別乘上跨距 1.97 m 可得縱梁 f-g 段及 h-i 段的線載重為$q_w = \pm 408.6\ kgf/m$；縱梁 g-h 段的線載重為$q_w = \pm 234.6\ kgf/m$。

靜載重由上方橫梁接縱梁扣件 f 點、c 點及 i 點傳入縱梁，靜載重包含橫梁、縱梁自重與模組自重，因鋁擠型自重相對較小，故只考慮模組自重。模組自重為每塊 20 kgf，縱梁 f-g-h-i 所承受之模組重為 2 塊，故縱梁 f-g-h-i 所承受之點載重 $Q_D = (20\ kgf \times 2\ 塊)/3 = 13.3\ kgf$。

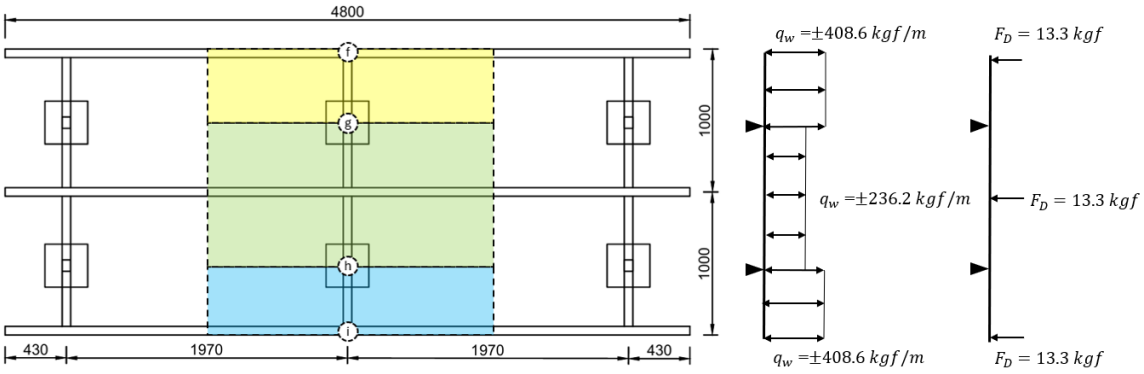


圖 5- 19 示範例 3 之縱梁 f-g-h-i 受力作用圖

資料來源：本研究整理

分析時利用 SAP 2000 軟體建模，將縱梁的斷面與材料性質輸入並且施加風載重及靜載重，即可分析出縱梁 f-g-h-i 的剪力、彎矩及變形量，當載重組合為$0.7D + 1.25W$時可得出縱梁 f-g-h-i 中最大剪力及最大彎矩，分別為$V_{max} = 70.8\ kgf$及$M_{max} = 23.4\ kgf - m$；當載重組合為$1.0D + 1.0W$時可得出最大變形量$\delta_{max} = 2.1\ mm$。

應力檢核

利用 SAP 2000 分析軟體，選 AA-ASD(2000)進行檢核，得縱梁 f-g-h-i 應力比為$0.34 \leq 1$，確認構件符合規範。

變形檢核

為避免在強風持續作用下產生振動破壞，設計時應盡量減少構件在風力作用下之變位，同時檢核確認構件變位量不超過容許值，以容許變形量δ_a = 跨距/175 (業界常用公式)，進行檢核。

$$\delta_{max} = 2.1\ mm \leq \delta_a = \frac{1000}{175} = 5.7\ mm$$，檢核通過。

參、柱

針對 g 點下方柱及 h 點下方柱進行結構分析如圖 5-20 及圖 5-21 所示，將柱與下方基座連接處 g 點下方柱底及 h 點下方柱底的扣件視為鉸支承（Hinge）分析。

風載重採用表 5-4 中 g 點下方柱的設計正負風壓。g 點下方柱及 h 點下方柱的設計風壓為$\pm 119.1\ kgf/m^2$，分別乘上寬度 1.97 m，可得 g 點下方柱及 h 點下

方柱的線載重為$q_w = \pm 234.6\ kgf/m$。

靜載重由上方縱梁接柱扣件 g 點下方柱頂及 h 點下方柱頂扣件傳入柱，靜載重包含橫梁、縱梁、柱自重及模組自重，因鋁擠型自重相對較小，故只考慮模組自重。模組自重為每塊 20 kgf，g點下方柱所承受之模組重為1塊，故g點下方柱所承受之點載重 $F_D = 20\ kgf$。同理，h 點下方柱所承受之模組重為 1 塊，h點下方柱所承受之點載重 $F_D = 20\ kgf$。

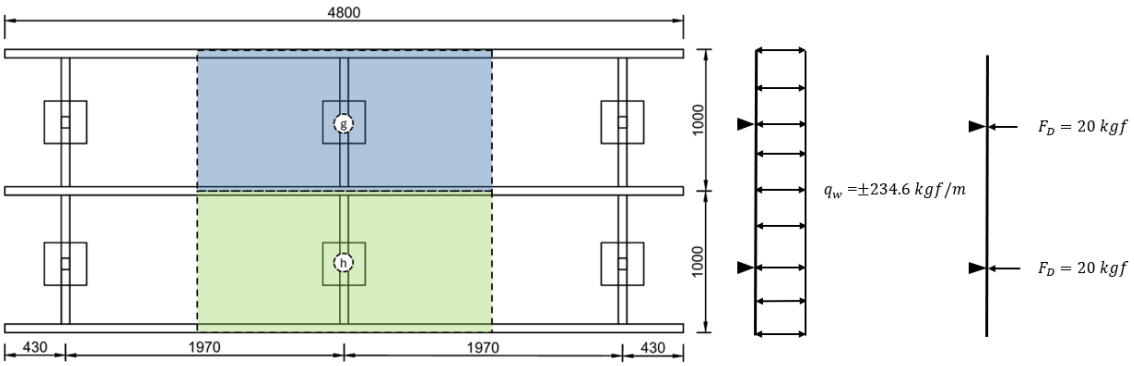


圖 5- 20 示範例 3 之柱受力作用圖 1

資料來源：本研究整理

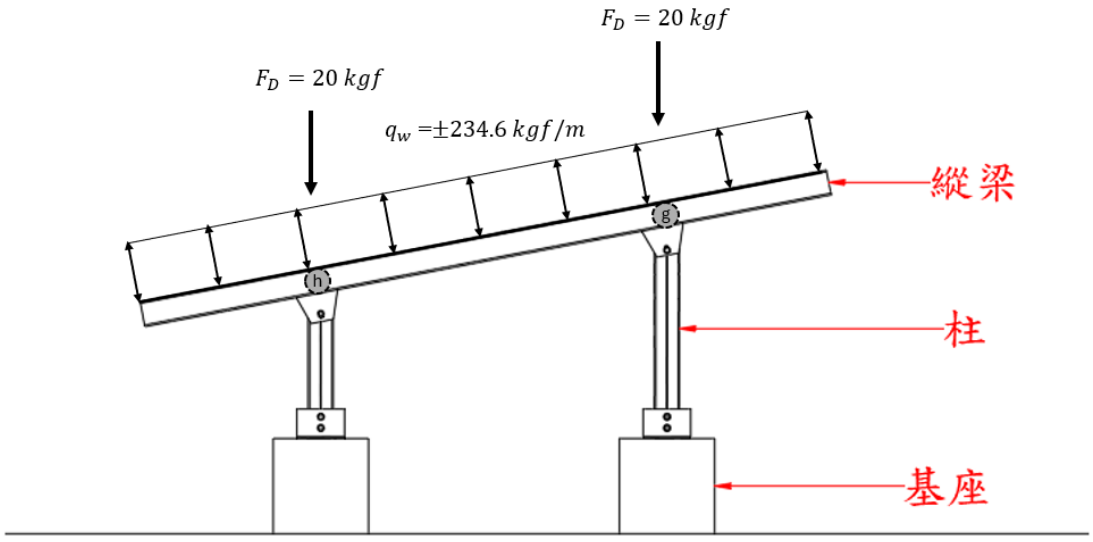


圖 5- 21 示範例 3 之柱受力作用圖 2

資料來源：修改自[15]

分析時利用 SAP 2000 軟體建模，將柱的斷面與材料性質輸入並且施加風載重及靜載重，即可分析出 g 點下方柱的剪力及彎矩，當載重組合為$0.7D + 1.25W$時，可得出 g 點下方柱中最大剪力及最大彎矩，分別為$V_{max} = 48.7\ kgf$及$M_{max} = 46.2\ kgf - m$。同理，當載重組合為$0.7D + 1.25W$時，得出 h 點下方柱中最大剪力及最大彎矩，分別為$V_{max} = 78.5\ kgf$、$M_{max} = 51.3\ kgf - m$。

應力檢核

利用 SAP 2000 分析軟體，選 AA-ASD 2000 進行檢核，得 g 點下方柱應力比為 0.34 ；h 點下方柱應力比為 0.35，應力比皆小於 1，確認構件符合規範。

變形檢核

為避免在強風持續作用下產生振動破壞，設計時應盡量減少構件在風力作用下之變位，同時檢核確認構件變位量不超過容許值。

第五節 扣件之耐風分析及檢核

扣件接合設計時，螺栓可能的破壞模式有拉力破壞、剪力破壞及承壓破壞，接合母材可能的破壞模式有總斷面積破壞、淨斷面積破壞及塊狀剪力撕裂，實務上需針對上述破壞模式作檢核，以確保安全性。本手冊僅示範螺栓拉力破壞及剪力破壞之檢核。

所檢核扣件包括面板接橫梁之扣件、橫梁接縱梁之扣件、縱梁接柱之扣件與柱接基座之扣件。各扣件均採用 M10 螺栓鎖固，其螺距為 1.25mm。螺栓採用 SUS 304 (A2-50)不鏽鋼，其極限抗拉強度為$F_{tu} = 500\ MPa = 72.5\ ksi$、極限抗剪強度為 $F_{su} = 200\ MPa = 29\ ksi$，接合母材為 6061-T6 鋁合金。載重組合參考「鋼結構容許應力設計法規範及解說」(2010) 之規定，考慮 $D \pm 0.9375\ W$、$0.7D \pm 1.25W$這四種載重組合。根據臺中市結構工程技師公會在 108 年編寫「太陽光電系統支撐架結構設計參考手冊草案(修訂版)」之 4.3 螺栓接合內容所述，螺栓檢核可參考美國鋁結構規範 Aluminum Design Manual 之 5.2 Bolted Connections。柱與基座之接合錨栓以「建築物混凝土結構設計規範」(2023) 作檢核。

壹、螺栓檢核公式

螺栓容許拉力為$F_t = A_s \times f_t$。其中，F_t為螺栓容許拉力；A_s為螺栓有效斷面積，其公式為$A_s = \frac{\pi}{4}\left(D - \frac{1.191}{n}\right)^2$，其中 D 為螺栓之標稱直徑(英吋)，n 為每英吋之螺紋數；f_t為螺栓容許拉應力，其公式為$f_t = \frac{F_{tu}}{1.2n_u}$，其中$n_u$為安全係數，取 1.95。

螺栓容許剪力為$F_s = A_S^* \times f_s$。其中，F_s為螺栓容許剪力；A_S^*為螺栓剪力有效斷面積，當剪力作用在螺紋上時，$A_S^* = A_s$，當剪力未作用在螺紋上時，$A_S^* = \frac{\pi}{4}(D)^2$；$f_s$為螺栓容許剪應力，其公式為$f_s = \frac{F_{su}}{1.2n_u}$。

貳、面板接橫梁之扣件

面板連接橫梁時需分為四步驟完成，首先將特製菱形片先固定於橫梁上如圖 5-22 所示，藉由特製菱形片將中壓塊固定於橫梁上如圖 5-23 所示，待特製菱

形片與中壓塊放置定位後，將模板插入再將其螺栓鎖緊如圖 5-24 所示，最後由下鎖孔將模板鎖固於橫梁上如圖 5-25 所示。分析時取橫梁與中壓塊連接之螺栓如圖 5-23，進行分析及檢核。

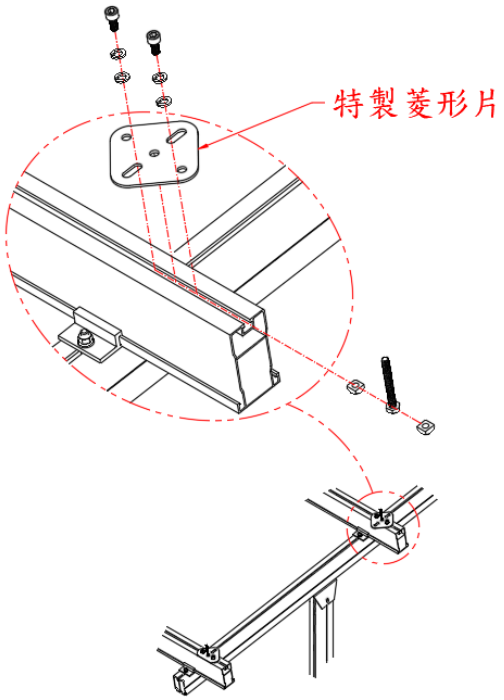


圖 5- 22 平屋頂踞置型系統之面板接橫梁示意圖 1

資料來源：修改自[15]

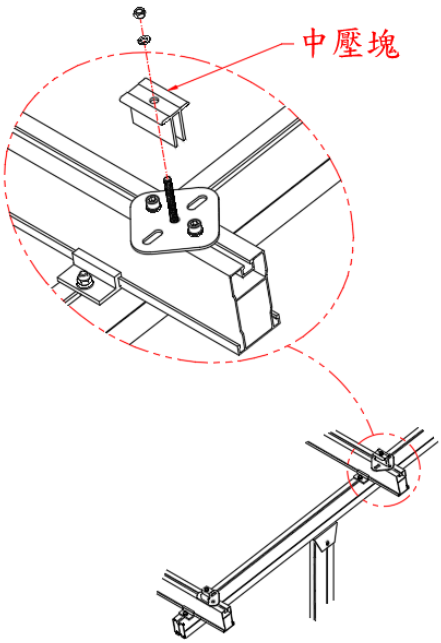


圖 5- 23 平屋頂踞置型系統之面板接橫梁示意圖 2

資料來源：修改自[15]

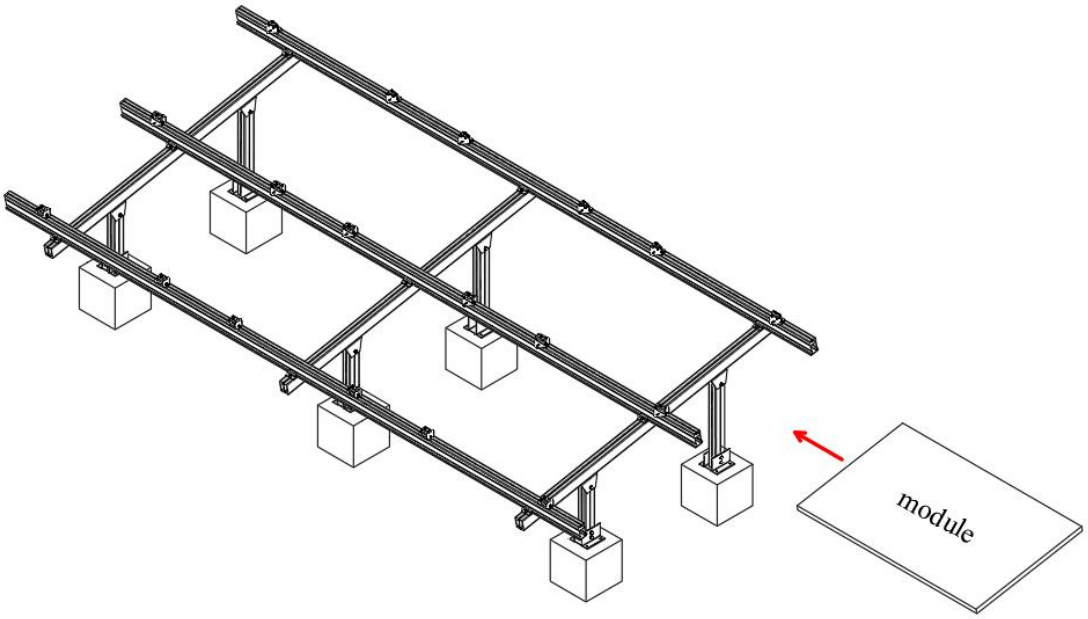


圖 5- 24 平屋頂踞置型系統之面板接橫梁示意圖 3

資料來源：修改自[15]

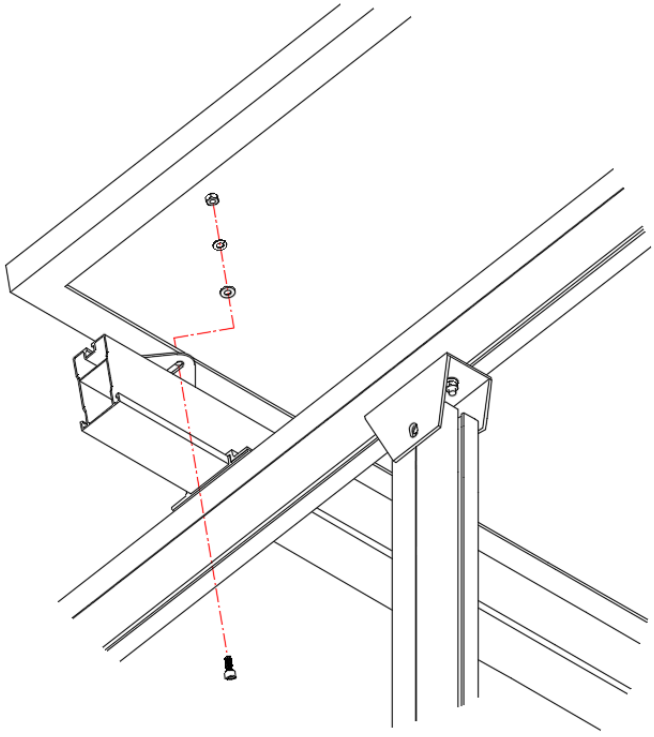


圖 5- 25 平屋頂踞置型系統之面板接橫梁示意圖 4

資料來源：修改自[15]

螺栓拉力分析

風載重採用表 5-4 中面板接橫梁扣件 k 點之設計正負風力$\pm 173\ kgf$，正號表示力量指向面板上表面，對此扣件而言為壓力；負號表示力量遠離面板上表面，對此扣件而言為拉力。

面板連接橫梁扣件螺栓數為 1 個，單一螺栓承擔設計風拉力為$-173\ kgf$，對螺栓造成之最大拉力為$F_{ten} = 1.25W = 1.25 \times (-173) = -216.3\ kgf$。

螺栓拉力檢核

螺栓直徑$D = 10\ mm = 0.394\ in$、每英吋之螺紋數$n = 25.4/1.5 = 16.9$，故螺栓有效斷面積$A_s = \frac{\pi}{4}\left(D - \frac{1.191}{n}\right)^2 = \frac{\pi}{4}\left(0.394 - \frac{1.191}{16.9}\right)^2 = 0.0822\ in^2$；允許拉應力$f_t = F_{tu}/1.2n_u = 72.5/2.34 = 30.98\ ksi$。螺栓容許拉力$F_t = A_s \times f_t = 0.0822\ in^2 \times 30.98\ ksi = 2.547\ kip = 1155.3\ kgf$。

螺栓拉力$|F_{ten}| = 216.3\ kgf <$ 螺栓容許拉力$F_t = 1155.3\ kgf$，檢核通過。

參、橫梁接縱梁之扣件

橫梁連接縱梁時需分為三步驟完成，首先將特製鋁件固定於下方鋁擠型縱梁上如圖 5-26 所示，再將鋁擠型橫梁固定於特製鋁件上如圖 5-27 所示，最後根據圖 5-26 及圖 5-27，將鋁擠型橫梁固定於下方鋁擠型縱梁上如圖 5-28 所示。

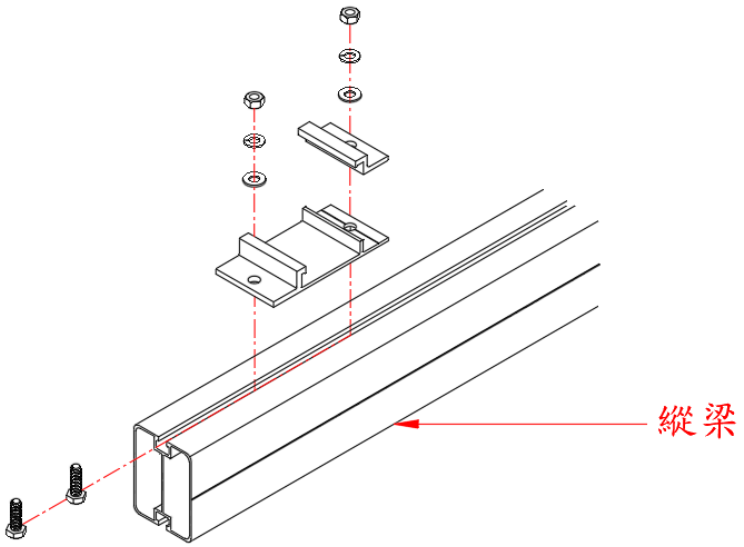


圖 5- 26 平屋頂踞置型系統之橫梁接縱梁示意圖 1

資料來源：修改自[15]

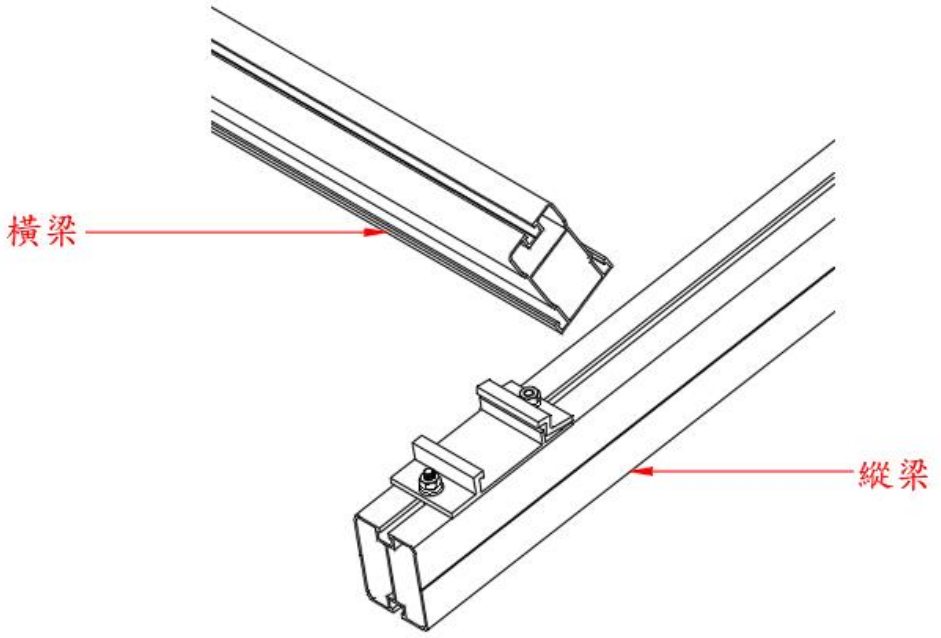


圖 5- 27 平屋頂踞置型系統之橫梁接縱梁示意圖 2

資料來源：修改自[15]

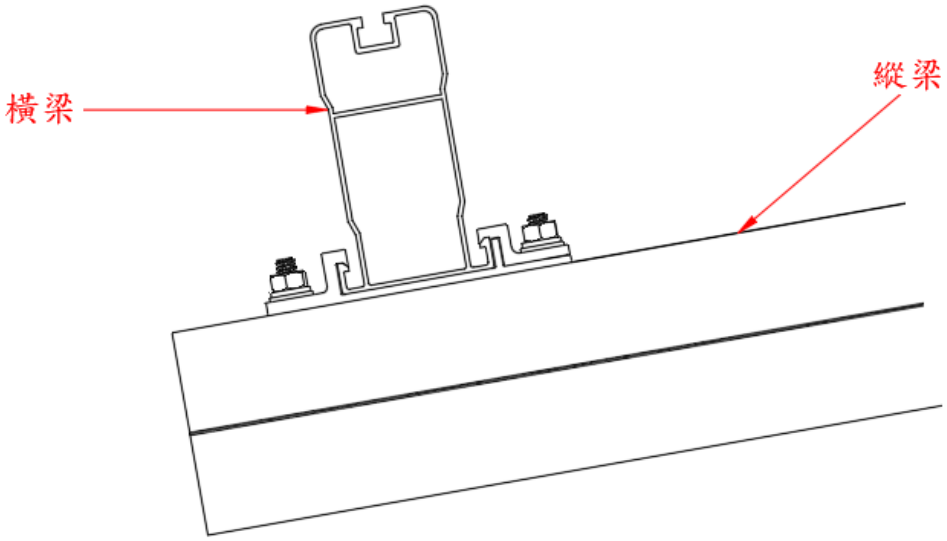


圖 5- 28 平屋頂踞置型系統之橫梁接縱梁示意圖 3

資料來源：修改自[15]

螺栓拉力分析

風載重採用表 5-4 中橫梁接縱梁扣件 c 點之設計正負風力$\pm 234.6\ kgf$，正號表示力量指向面板上表面，對此扣件而言為壓力；負號表示力量遠離面板上表面，對此扣件而言為拉力。靜載重包含橫梁自重與面板自重，因鋁擠型自重相

對較小，故只考慮面板自重，橫梁接縱梁扣件承受面板面積為$1.97\ m^2$按比例分配橫梁所需承擔面板自重為$24.6kgf$。

橫梁扣件螺栓數為 2 個，單一螺栓承擔設計風拉力為$-234.6/2 = -117.3\ kgf$；單一螺栓承擔靜載重為$24.6/2 = 12.3\ kgf$。對螺栓造成最大組合拉力為$F_{ten} = 0.7D + 1.25W = 0.7 \times 12.3 + 1.25 \times (-117.3) = -138\ kgf$。

螺栓拉力檢核

螺栓直徑$D = 10\ mm = 0.394\ in$、每英吋之螺紋數$n = 25.4/1.5 = 16.9$，故螺栓有效斷面積$A_s = \frac{\pi}{4}\left(D - \frac{1.191}{n}\right)^2 = \frac{\pi}{4}\left(0.394 - \frac{1.191}{16.9}\right)^2 = 0.0822\ in^2$；允許拉應力$f_t = F_{tu}/1.2n_u = 72.5/2.34 = 30.98\ ksi$。螺栓容許拉力$F_t = A_s \times f_t = 0.0822\ in^2 \times 30.98\ ksi = 2.547\ kip = 1155.3\ kgf$。

螺栓拉力$|F_{ten}| = 138\ kgf <$ 螺栓容許拉力$F_t = 1155.3\ kgf$，檢核通過。

肆、縱梁接柱之扣件

縱梁連接柱時需分為兩步驟完成，先將特製鋁件固定於上方鋁擠型縱梁上如圖 5-29 所示，再將特製鋁件固定於鋁擠型柱上如圖 5-30 所示。

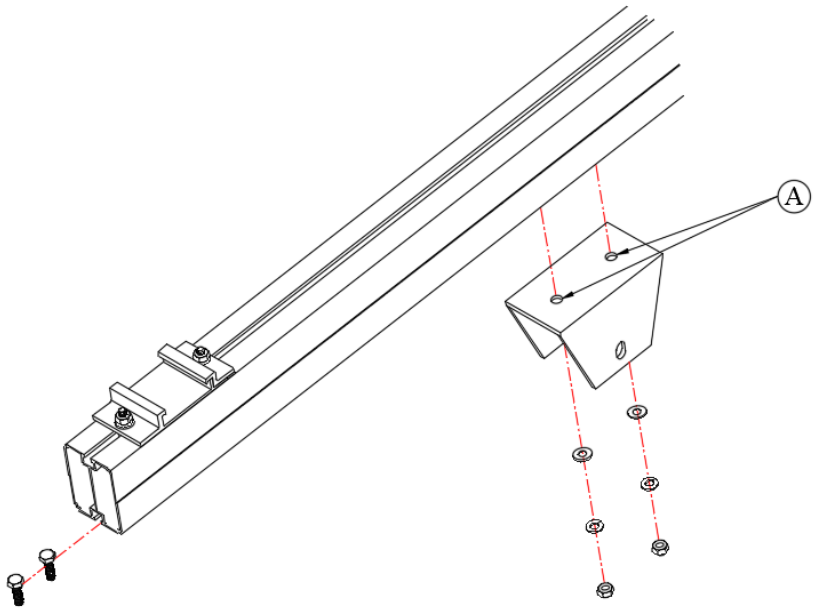


圖 5- 29 平屋頂踞置型系統之 A 處螺栓與縱梁連接示意圖

資料來源：修改自[15]

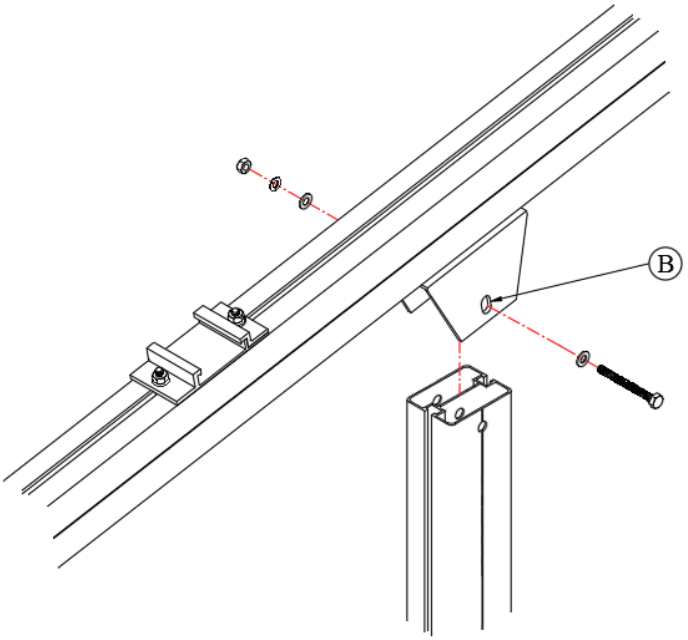


圖 5- 30 平屋頂踞置型系統之 B 處螺栓與柱連接示意圖

資料來源：修改自[15]

A 處螺栓拉力分析

風載重採用表 5-4 中縱梁接柱扣件 g 點下方柱頂之設計正負風力 $\pm 234.6\ kgf$，正號表示力量指向面板上表面，對此處扣件而言為壓力；負號表示力量遠離面板上表面，對此處扣件而言為拉力。靜載重包含橫梁、縱梁自重與面板自重，因鋁擠型自重相對較小，故只考慮面板自重，縱梁連接柱扣件承受面板面積為$1.97\ m^2$按比例分配橫梁所需承擔面板自重為$24.6kgf$。

A 處螺栓數為 2 個，單一螺栓承擔設計風拉力為$-234.6/2 = -117.3\ kgf$；單一螺栓承擔靜載重為$24.6/2 = 12.3\ kgf$，對 A 處螺栓造成之最大組合拉力為 $F_{ten} = 0.7D + 1.25W = 0.7 \times 12.3 + 1.25 \times (-117.3) = -138\ kgf$。

A 處螺栓拉力檢核

螺栓直徑$D = 10\ mm = 0.394\ in$、每英吋之螺紋數$n = 25.4/1.5 = 16.9$，故螺栓有效斷面積$A_s = \frac{\pi}{4}\left(D - \frac{1.191}{n}\right)^2 = \frac{\pi}{4}\left(0.394 - \frac{1.191}{16.9}\right)^2 = 0.0822\ in^2$；允許拉應力 $f_t = F_{tu}/1.2n_u = 72.5/2.34 = 30.98\ ksi$。螺栓容許拉力 $F_t = A_s \times f_t = 0.0822\ in^2 \times 30.98\ ksi = 2.547\ kip = 1155.3\ kgf$。

A 處螺栓拉力$|F_{ten}| = 138\ kgf$ < 螺栓容許拉力$F_t = 1155.3\ kgf$，檢核通過。

B 處螺栓剪力分析

風載重採用表 5-4 中縱梁接柱扣件 g 點下方柱頂之設計正負風力$\pm 234.6\ kgf$，正號表示力量指向面板上表面，負號表示力量遠離面板上表面，對此處扣件而言均為剪力。B 處螺栓所承受靜載重與 A 處螺栓相同為$24.6kgf$。

B 處螺栓數為 1 個，假設剪力有作用在螺紋上，單一螺栓承擔設計風剪力為$\pm 234.6\cos 10° = \pm 231\ kgf$；單一螺栓承擔靜載重為$24.6\ kgf$，對 B 處螺栓造成的最大組合剪力為$F_{shear} = 0.7D + 1.25W = 0.7 \times 24.6 + 1.25 \times 231 = 306\ kgf$。

B 處螺栓剪力檢核

螺栓直徑$D = 10\ mm = 0.394\ in$、每英吋之螺紋數$n = 25.4/1.5 = 16.9$，故螺栓有效斷面積$A_s = \frac{\pi}{4}\left(D - \frac{1.191}{n}\right)^2 = \frac{\pi}{4}\left(0.394 - \frac{1.191}{16.9}\right)^2 = 0.0822\ in^2$；允許剪應力$f_s = F_{su}/1.2n_u = 29/2.34 = 12.39\ ksi$。螺栓容許剪力$F_s = A_s \times f_s = 0.0822\ in^2 \times 12.39\ ksi = 1.018\ kip = 461.8\ kgf$。

B 處螺栓剪力$F_{shear} = 306\ kgf$ < 螺栓容許剪力$F_s = 461.8\ kgf$，檢核通過。

伍、柱接基座之扣件

將特製鋁件固定於柱及基座上如圖 5-31 所示。

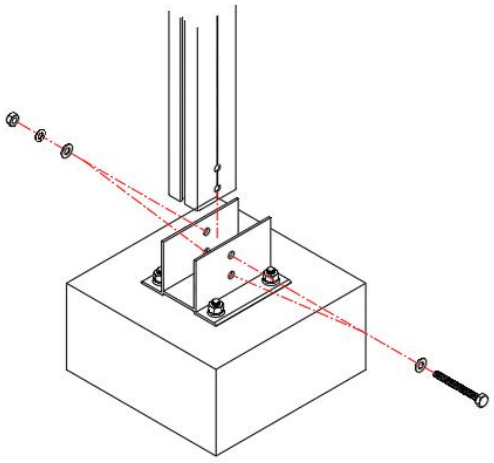


圖 5- 31 平屋頂踞置型系統之柱與基座連接示意圖

資料來源：修改自[15]

螺栓剪力分析

風載重採用表 5-4 中柱接基座扣件 g 點下方柱底之設計正負風力 $\pm 234.6\ kgf$，設計正負風力對此處螺栓而言均為剪力；靜載重包含橫梁、縱梁、柱自重與面板自重，因鋁擠型自重相對較小，故只考慮面板自重，橫梁受風面積為$1.97\ m^2$按比例分配橫梁所需承擔面板自重為$24.6kgf$。

柱接基座螺栓數為 2 個，假設剪力有作用在螺紋上，單一螺栓承擔設計風剪力為$\pm 234.6\cos 10°/2 = \pm 115.5\ kgf$；單一螺栓承擔靜載重為$24.6/2 = 12.3\ kgf$，對螺栓造成的最大組合剪力為$F_{shear} = 0.7D + 1.25W = 0.7 \times 12.3 + 1.25 \times 115.5 = 153\ kgf$。

螺栓剪力檢核

螺栓直徑$D = 10\ mm = 0.394\ in$、每英吋之螺紋數$n = 25.4/1.5 = 16.9$，故螺栓有效斷面積$A_s = \frac{\pi}{4}\left(D - \frac{1.191}{n}\right)^2 = \frac{\pi}{4}\left(0.394 - \frac{1.191}{16.9}\right)^2 = 0.0822\ in^2$；允許剪應力$f_s = F_{su}/1.2n_u = 29/2.34 = 12.39\ ksi$。螺栓容許剪力$F_s = A_s \times f_s = 0.0822\ in^2 \times 12.39\ ksi = 1.018\ kip = 461.8\ kgf$。

螺栓剪力$F_{shear} = 153\ kgf <$ 螺栓容許剪力$F_s = 461.8\ kgf$，檢核通過。

基座拉拔力分析

風載重採用表 5-4 中柱接基座扣件 g 點下方柱底之設計正負風力為$\pm 234.6\ kgf$，正號表示力量指向面板上表面，對基座而言為壓力；負號表示力量遠離面板上表面，對基坐而言為拉力，基座承擔風拉力為$-234.6\cos 10° = -231\ kgf$，靜載重為面板自重為 $24.6\ kgf$。基座造成之最大拉拔力為$F_{ten} = 0.7D + 1.25W = 0.7 \times 24.6 + 1.25 \times (-231) = -271.5\ kgf$。

基座拉拔力檢核

1. 錨栓檢核

   混凝土基座之錨栓可依「建築物混凝土結構設計規範」(2023)進行檢核，確認錨栓及混凝土的強度是否足夠。

2. 屋頂面檢核

   檢核其力量傳遞至下方屋頂面時承載力是否足夠，以及確保在拉拔力下不會造成原有屋頂面的破壞。

第六章 地面單斜式棚架型系統之耐風設計（示範例 4）

本章所稱地面單斜式棚架型系統安裝於地面，含支撐柱且棚架至少有兩個側面各有 80%以上面積為開口（如圖 2-4 所示）。耐風設計的主要目的是確保支撐架在強風環境下能夠維持結構完整性和安全性，而實務上在進行支撐架設計時，尚需考慮不同的載重組合情況，例如靜載重、風載重及地震力之效應，但本示範例只考慮靜載重及風載重之效應。

本示範例先規劃一單斜式棚架型系統，依據 CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」之 8.地面單斜式棚架型結構系統之設計風壓(2022) 擬定風載重計算方式，考慮風載重及靜載重作相關之結構設計。本示範例之設計流程圖如圖 6-1 所示。

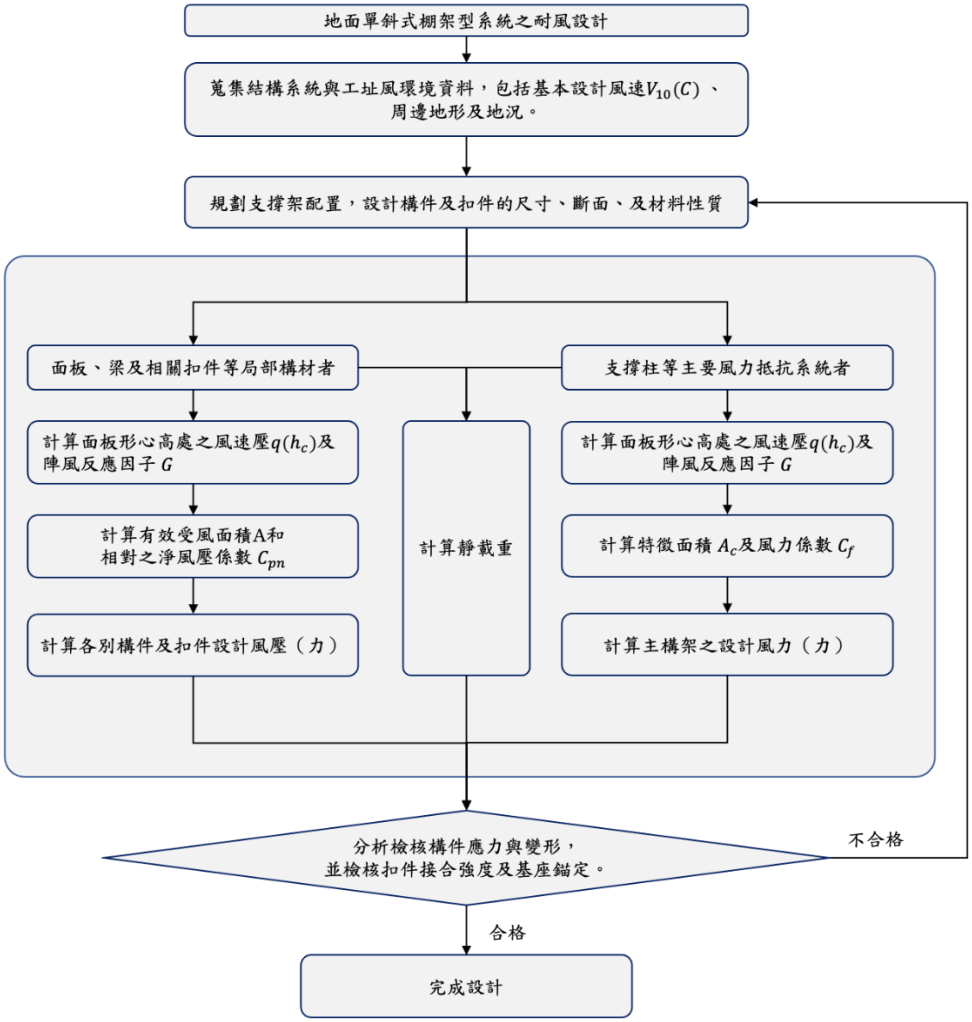


圖 6-1 地面單斜式棚架型系統之耐風設計流程圖

資料來源：本研究整理

第一節　設計依據

壹、參考依據

1. 內政部，「建築技術規則建築設計施工編」，2004。
2. 內政部，「鋼結構容許應力設計法規範及解說」，2010。
3. 內政部，「建築物耐風設計規範與解說」，2014。
4. 內政部，「冷軋型鋼構造建築物結構設計規範及解說」，2016。
5. 內政部，「建築物混凝土結構設計規範」，2023。
6. 內政部建研所，「太陽光電系統之耐風設計規範研擬」，委託研究計劃成果報告，2019。
7. 經濟部，CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」之 8.地面單斜式棚架型結構系統之設計風壓，2022。
8. 經濟部，CNS 4234-1「不鏽鋼結件之機械性質－第 1 部：螺栓、螺釘及螺椿」，2012。

貳、適用範圍

CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022)中地面單斜式棚架型系統提供之風壓計算公式適用於同時滿足下列條件之地面單斜式棚架型系統：

1. 支撐結構具支撐柱，獨立設置於地面。
2. 棚架至少有兩個側面各有 80%以上面積為開口。

第二節 結構物資料與工址風環境

本章擬於台中市大甲區新建一地面單斜式棚架型太陽光電系統。整體場域之結構系統立體配置圖如圖 6-2 所示。

結構系統平行面板之平面圖如圖 6-3 所示；y向之側視圖如圖 6-4 所示；x向之側視圖如圖 6-5 所示；y向之示意圖如圖 6-6 所示。結構系統之面板由 27 片模組組成，以 60 個扣件分別固定於 6 根橫梁上，每根橫梁分別以 3 個扣件固定於下方縱梁上，每根縱梁分別 2 個扣件固定於下方 2 根柱子上，每根柱子固定於混凝土基座上。

根據「設置再生能源設施免請領雜項執照標準」(2021)，設置於地面之太陽光電發電設備合，其高度自地面起算四點五公尺以下（但經目的事業主管機關核准者，包含支撐架並得結合新設頂蓋，其高度自地面起算九公尺以下）者得免依建築法規定申請雜項執照。本示範立假設之面板與地面最大距離 $h_2 = 3.561\,m$。

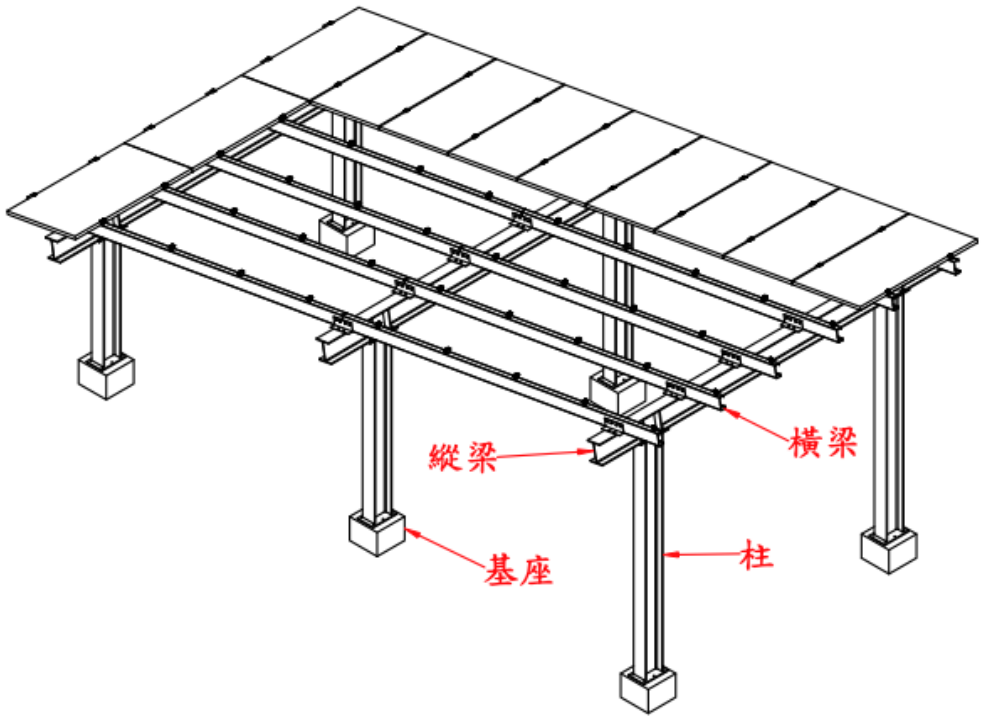


圖 6-2 地面單斜式棚架型系統之立體配置圖

資料來源：修改自[15]

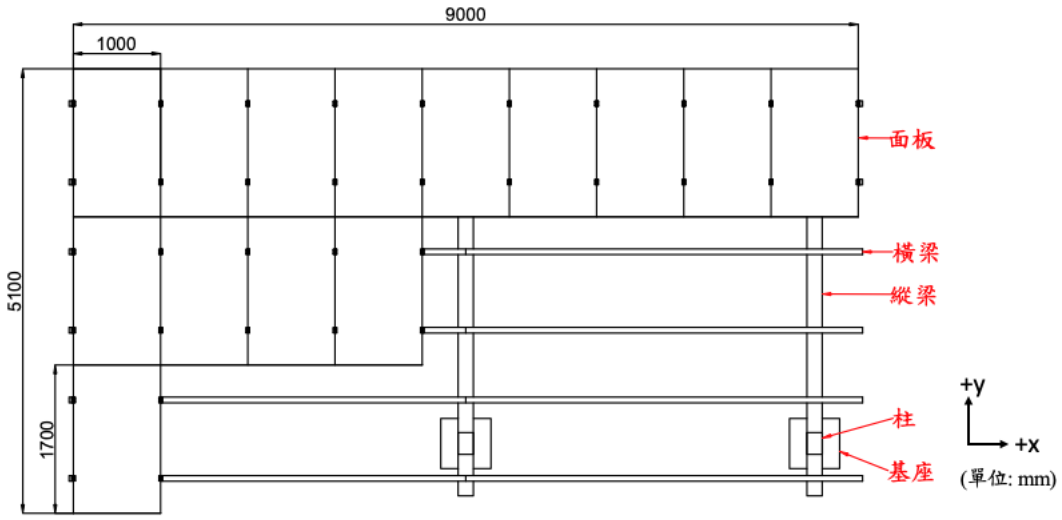


圖 6-3 地面單斜式棚架型系統之平行面板平面圖

資料來源：本研究整理

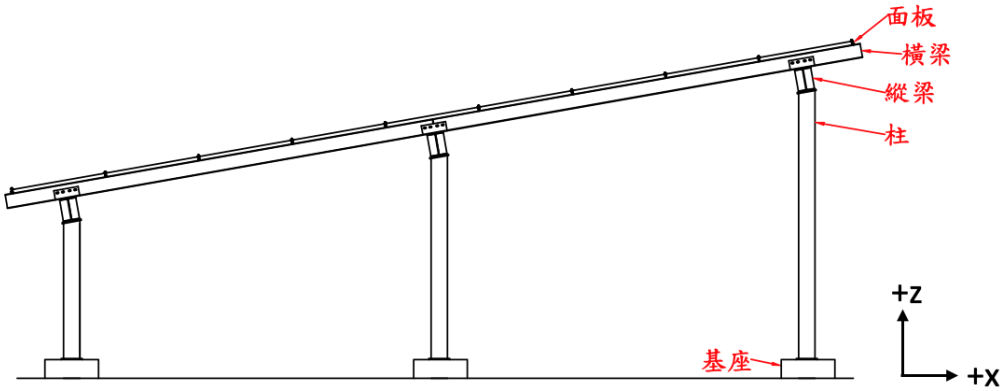


圖 6-4 地面單斜式棚架型系統 y 向之側視圖

資料來源：修改自 [15]

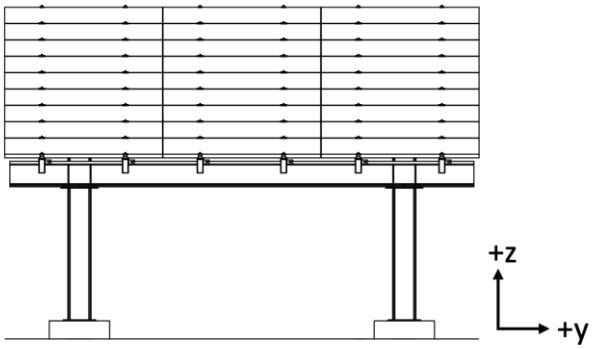


圖 6-5 地面單斜式棚架型系統 x 向之側視圖

資料來源：修改自 [15]

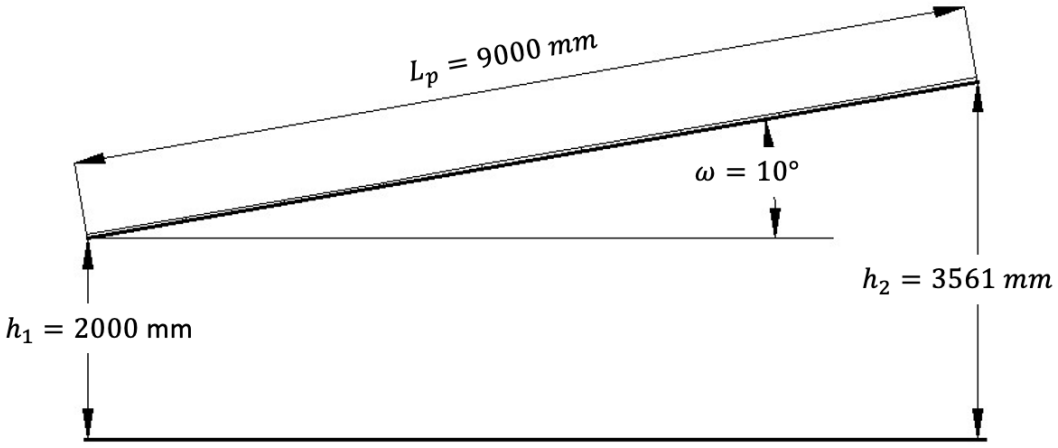


圖 6-6 地面單斜式棚架型系統 y 向之示意圖

資料來源：本研究整理

理論上應根據各構件及扣件所承受的風壓情況，分別進行其設計，但由於設計程序類似，本範例僅分析設計圖 6-7 之橫梁 a-b-c-d-e、縱梁 f-g-h-i、g 點下方柱、k 點下方柱、面板接橫梁扣件（其形心為 j 點）、橫梁接縱梁扣件（其形心為 c 點）、縱梁接柱扣件（其形心為 g 點）、縱梁接柱扣件（其形心為 k 點）。

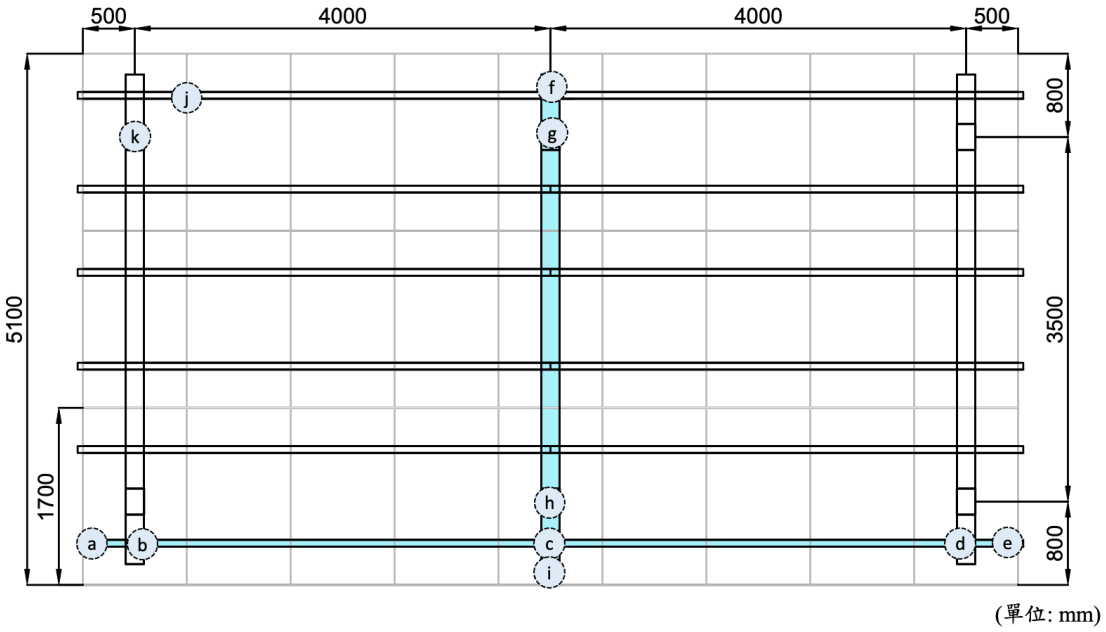


圖 6-7 地面單斜式棚架型系統之設計位置圖

資料來源：本研究整理

結構物資料包含太陽光電系統尺寸、面板配置、用途係數 I；工址風環境包含基本設計風速$V_{10}(C)$、結構物周邊地形以及地況。本節擬定結構物資料與工址風環境如下表 6-1 所示。

表 6-1 地面單斜式棚架系統之結構物資料與工址風環境

結構物資料	太陽光電系統	面板由 27 片模組組成，以 60 個扣件分別固定於 6 根橫梁上，每根橫梁分別以 3 個扣件固定於下方縱梁上，每根縱梁分別 2 個扣件固定於下方 2 根柱子上，每根柱子固定於混凝土基座上。
	基本尺寸設置	1. 面板弦長 $L_p = 9\ m$ 2. 面板傾角 $\omega = 10°$。 3. 面板與地面最小距離 $h_1 = 2.000\ m$。 4. 面板與地面最大距離 $h_2 = 3.561\ m$。 5. 模組尺寸：1700 mm × 1000 mm × 40 mm 模組重$20kgf = 196N$，共 27 片
	下方阻擋	單斜式棚架下方阻塞比低於 50%，視為無阻擋。
	用途係數	根據「建築物耐風設計規範與解說」規範 2.5 節，依照重要程度可將 I 值分為1.1、1.0或 0.9，本範例取 I＝1.0。
工址風環境	基本設計風速$V_{10}(C)$	根據「建築物耐風設計規範與解說」規範 2.4 節，台中市大甲區的$V_{10}(C) = 32.5\ m/s$。
	地況種類	依結構物各方向上風處之地表粗糙度決定皆為地況 B。
	地形係數	無特殊地形。

資料來源：本研究整理

第三節 各構件及扣件之設計風壓（力）

本示範例中橫梁、縱梁、柱與相關扣件之設計風壓，皆以 CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022) 中 8.地面單斜式棚架型結構系統之設計風壓計算。

面板本身可被視為外部被覆物，其設計風壓應依據「建築物耐風設計規範及解說」(2014)第 3.4 節決定；支撐結構構件中可被視為局部構件（含扣件），其設計風壓應依據「建築物耐風設計規範及解說」(2014)第 3.2 節決定。但實際上「建築物耐風設計規範及解說」(2014)第 3.2 節為封閉式或部分封閉式建築物局部構材及外部被覆物之設計風壓計算式，並不適用於棚架型，故本手冊參考「太陽光電系統之耐風設計規範研擬」成果報告(2019)的內容，改依規範第 3.4 節決定局部構件之設計風壓。本示範例將縱梁、橫梁及相關扣件視為局部構件，以「建築物耐風設計規範及解說」(2014)第 3.4 節計算設計風壓，其計算細節列於本節第壹與第貳小節。

支撐柱本身側向之設計風力應依據「建築物耐風設計規範及解說」(2014) 2.2 節中開放式建築物之公式決定，其計算細節列於本節第參小節。

本示範例將支撐柱視為主要風力抵抗結構系統，故由面板傳遞至支撐柱之設計風力應依據「建築物耐風設計規範及解說」(2014)第 2.2 節中開放式建築物之公式決定，但其表 2.9「開放式建築物之單斜式屋頂的風力係數」為早期 ASCE 7 的規定，在使用上有所疑慮，故另依據新版擬議「建築物耐風設計規範及解說」計算由面板傳遞至支撐柱之設計風壓，其計算計算細節列於本節第肆小節。

實際上也可將支撐柱視為局部構件，雖所得之值可能會過於保守，但本示範例為了參考比較，也以其公式估算從面板傳至支撐柱的設計風壓，其計算細節列於本節第壹與第貳小節；最後於第四節之第參小節作綜合比較。

壹、各構件及扣件之有效受風面積及淨風壓係數

根據「建築物耐風設計規範及解說」(2014) 1.3 節有效受風面積 A 之定義可知，結構構件之有效受風面積 A 為跨距長度與有效寬度之乘積，有效寬度不必小於其跨距長度的 1/3。對扣件而言，有效受風面積 A 不得大於單一扣件之受風面積。決定有效受風面積及計算淨風壓係數方式如下：

[步驟 1] 有效受風面積

(a) 橫梁 a-b-c-d-e：

如圖 6-8 所示，將面板所承受風力傳遞至橫梁 a-b-c-d-e 上，且橫梁架設在間距為 4 m 的縱梁上，分別以 a-b 段、b-c 段、c-d 段及 d-e 段表示。

針對 a-b 段橫梁，其跨距長度為懸臂段長度 0.5 m，承受風壓面積之寬度為 0.85 m，故承受風壓面積為$0.50\ \text{m} \times 0.85\ \text{m} = 0.425\ \text{m}^2$。a-b 段橫梁之有效寬度為 $\max(0.85, 0.50/3) = 0.85\ \text{m}$，故其有效受風面積為 $A = 0.50\ \text{m} \times 0.85\ \text{m} = 0.425\ \text{m}^2$。同理，d-e 段橫梁之承受風壓面積為$0.425\ \text{m}^2$，有效受風面積亦為$0.425\ \text{m}^2$。

針對 b-c 段橫梁，跨距長度為縱梁間距 4.0 m，承受風壓面積之寬度為 0.85 m，故承受風壓面積為$4.0\ \text{m} \times 0.85\ \text{m} = 3.4\ \text{m}^2$。b-c 段橫梁之有效寬度為 $\max(0.85, 4.00/3) = 1.33\ \text{m}$，故其有效受風面積為 $A = 1.33\ \text{m} \times 0.85\ \text{m} = 5.333\ \text{m}^2$。同理，c-d 段橫梁之承受風壓面積為$3.4\ \text{m}^2$，有效受風面積為$5.333\ \text{m}^2$。

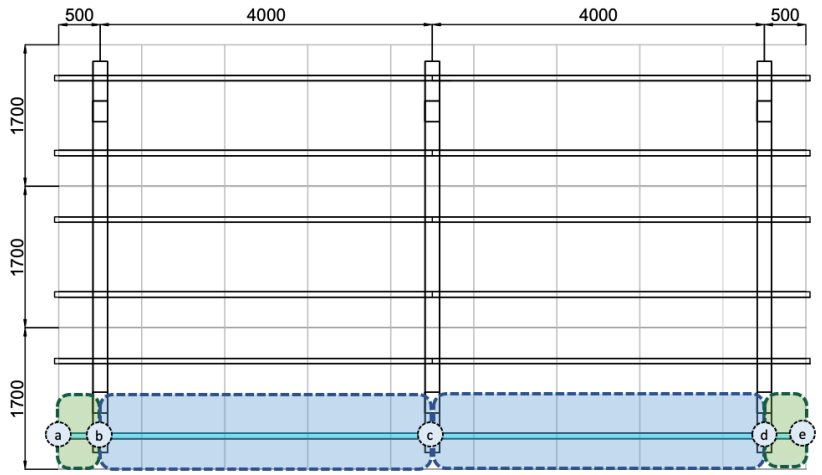


圖 6-8 示範例 4 之橫梁 a-b-c-d-e 有效受風面積示意圖

資料來源：本研究整理

(b) 縱梁 f-g-h-i：

如圖 6-9 所示，將橫梁所承受風力傳遞至縱梁 f-g-h-i 上，且縱梁架設在間距為 3.5 m 的柱上，分別以 f-g 段、g-h 段及 h-i 段表示。

針對 f-g 段縱梁，其跨距長度為懸臂段長度 0.8 m，承受風壓面積之寬度為 4.0 m，故承受風壓面積為$0.8\ \text{m} \times 4.0\ \text{m} = 3.20\ \text{m}^2$。f-g 段橫梁之有效寬度為$\max(4.0, 0.8/3) = 4.0\ \text{m}$，故其有效受風面積為$0.8\ \text{m} \times 4.0\ \text{m} = 3.20\ \text{m}^2$。同理，h-i 段縱梁之承受風壓面積為$3.20\ \text{m}^2$，有效受風面積亦為$3.20\ \text{m}^2$。

針對 g-h 段縱梁，其跨距長度為縱梁間距 3.5 m，承受風壓面積之寬度為 4.0 m，故承受風壓面積為$3.5\ \text{m} \times 4.0\ \text{m} = 14.00\ \text{m}^2$。b-c 段橫梁之有效寬度為 $\max(4.0, 3.5/3) = 4.0\ \text{m}$，故其有效受風面積為$3.5\ \text{m} \times 4.0\ \text{m} = 14.00\ \text{m}^2$。

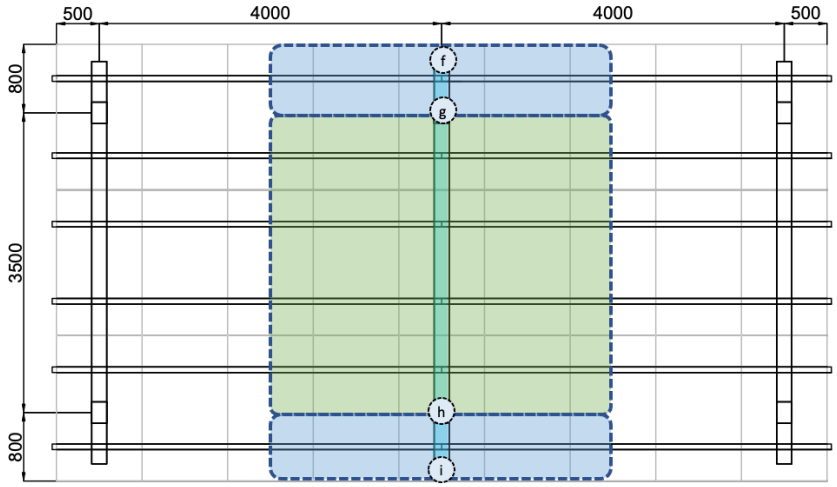


圖 6-9 示範例 4 之縱梁 f-g-h-i 有效受風面積示意圖

資料來源：本研究整理

(c) g 點下方柱：

如圖 6-10 所示，中間縱梁架設在 g 點及 h 點的縱梁接柱扣件上。

針對 g 點下方柱，其跨距長度為 2.55 m，寬度為 4 m，其承受風壓面積為$2.55\ \text{m} \times 4\ \text{m} = 10.2\ \text{m}^2$。g 點下方柱之有效寬度為$\max(4.0, 2.55/3) = 4.0\ \text{m}$，故其有效受風面積為$2.55\ \text{m} \times 4\ \text{m} = 10.2\ \text{m}^2$。同理，h 點下方柱之

承受風壓面積為10.2 m^2，有效受風面積亦為10.2 m^2。

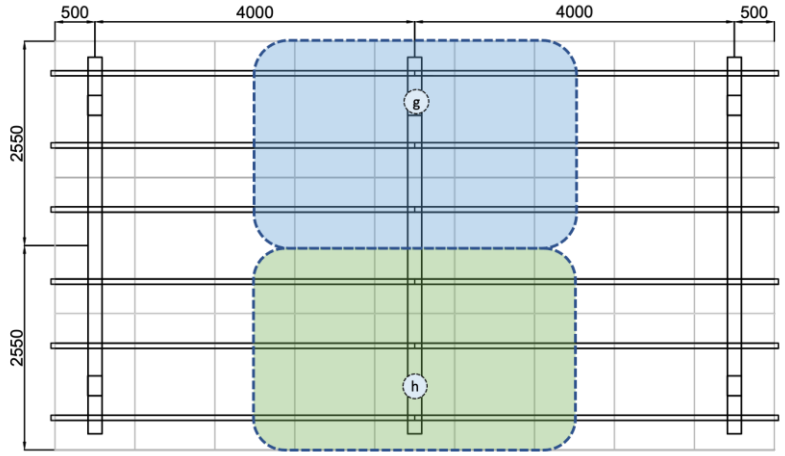


圖 6-10 示範例 4 之 g 點下方柱有效受風面積示意圖

資料來源：本研究整理

(d) k 點下方柱：

如圖 6-11 所示，兩旁縱梁架設在柱 k 點、l 點、m 點及 n 點的縱梁接柱扣件上。

針對 k 點下方柱，其跨距長度為 2.55 m，寬度為 2.50 m，其承受風壓面積為 2.55 m × 2.5 m = 6.375 m^2。k 點下方柱之有效寬度為 max(2.50 , 2.55/3) = 2.5 m，故其有效受風面積為 2.55 m × 2.5 m = 6.375 m^2。同理，l 點下方柱、m 點下方柱及 n 點下方柱之承受風壓面積為 6.375 m^2，有效受風面積亦為6.375 m^2。

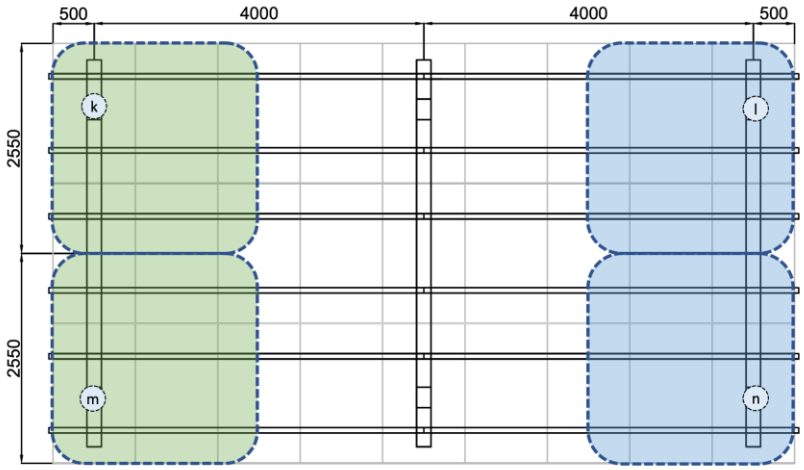


圖 6-11 示範例 4 之 k 點下方柱有效受風面積示意圖

資料來源：本研究整理

(e) 面板接橫梁扣件 j 點：

如圖 6-12 所示，單一模組尺寸為1.0 m × 1.7 m，並由四個扣件固定，取 j 點面板接橫梁扣件分析，因扣件之有效受風面積不得大於其承受風壓面積，故其有效受風面積為承受風壓面積$A = 1.0\ m \times 0.85\ m = 0.85\ m^2$。

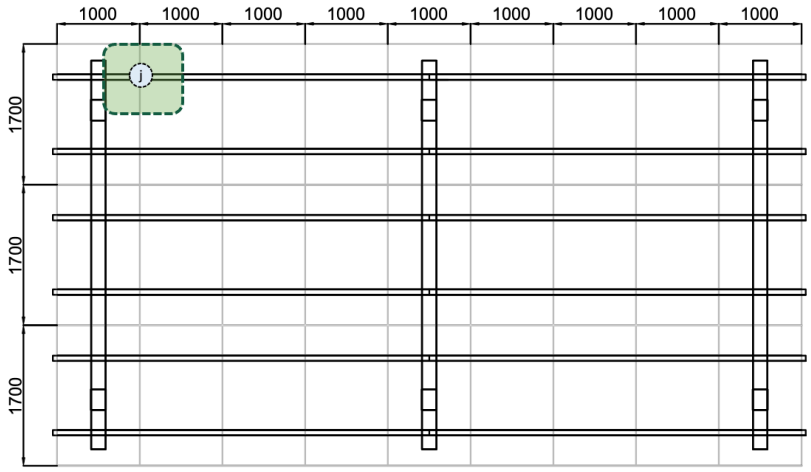


圖 6-12 示範例 4 之面板接橫梁扣件 j 點有效受風面積示意圖

資料來源：本研究整理

(f) 橫梁接縱梁扣件 c 點：

如圖 6-13 所示，橫梁架設在縱梁 b、c、d 點的橫梁扣件上。取 c 點橫梁接縱梁扣件分析，因扣件之有效受風面積不得大於其承受風壓面積，故其有效受風面積為承受風壓面積$A = 4\ m \times 0.85\ m = 3.4\ m^2$。

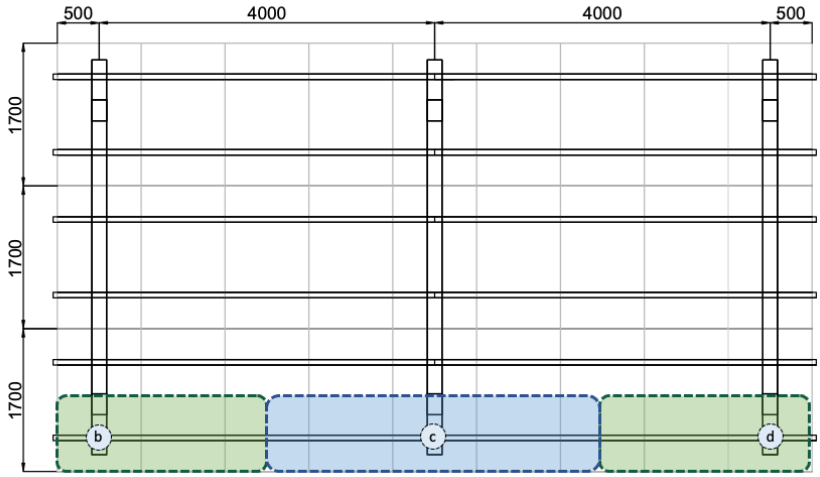


圖 6-13 示範例 4 之橫梁接縱梁扣件 c 點有效受風面積示意圖

資料來源：本研究整理

(g) 縱梁接柱扣件 g 點：

如圖 6-14 所示，縱梁架設在柱 g 點及 h 點的縱梁接柱扣件上。針對 g 點縱梁接柱扣件分析。因扣件之有效受風面積不得大於其承受風壓面積，故其有效受風面積為承受風壓面積$A = 2.55\ \mathrm{m} \times 4\ \mathrm{m} = 10.2\ \mathrm{m}^2$。

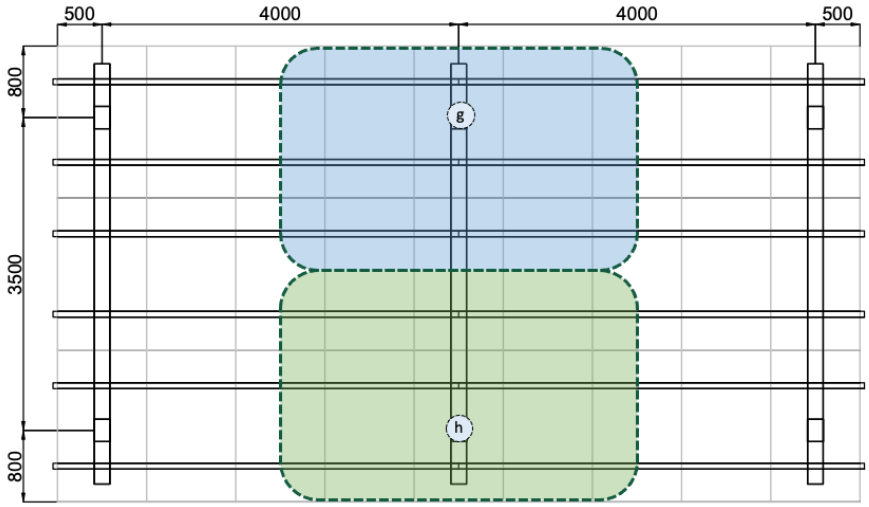


圖 6-14 示範例 4 之縱梁接柱扣件 g 點有效受風面積示意圖

資料來源：本研究整理

[步驟 2] 淨風壓係數

根據「建築物耐風設計規範及解說」(2014) 決定淨壓係數C_{pn}，如圖 6-15 所示將面板分為區域 3、區域 2、區域 1，區域內淨風壓係數C_{pn}可根據表 6-2 對照有效受風面積決定。其中 L 為順風向之建築物水平深度為 $9.0 \times \cos 10^{\circ} = 8.863\ \mathrm{m}$。a 為最小寬度的 10%，但不得小於 0.9 m，故 $\mathrm{a} = \max\{0.1 \times 5.1\ \mathrm{m}, 0.9\mathrm{m}\} = 0.9\ \mathrm{m}$。

本示範例之$\theta = \omega = 10^{\circ}$，可由$\theta = 7.5^{\circ}$和$\theta = 15^{\circ}$的$C_{pn}$線性內插得到$\theta = 10^{\circ}$下的$C_{pn}$之值。面板接橫梁扣件 j 的有效受風面積$A$為$0.850\ m^2$，$\mathrm{a}^2 < A \leq 4\mathrm{a}^2$，內插可得其區域 3 的$C_{pn}$為 2.5 和-2.37，區域 2 的$C_{pn}$為 2.5 和-2.37，區域 1 的$C_{pn}$為 1.67 和-1.57。仿照上述面板接橫梁扣件 j 點淨風壓係數的求法，可得其餘構件與扣件的淨風壓係數，彙整後將其列於表 6-2。

表 6-2 地面單斜式棚架型之淨風壓係數表

	有效受風面積	C_{pn}											
		屋頂下無阻擋						屋頂下有阻擋					
		區域 3		區域 2		區域 1		區域 3		區域 2		區域 1	
0°	$<a^2$	0.4	-3.3	1.8	-1.7	1.2	-1.1	1	-3.6	0.8	-1.8	0.5	-1.2
	$>a^2, \leqq 4.0a^2$	1.8	-1.7	1.8	-1.7	1.2	-1.1	0.8	-1.8	0.8	-1.8	0.5	-1.2
	$>4.0a^2$	1.2	-1.1	1.2	-1.1	1.2	-1.1	0.5	-1.2	0.5	-1.2	0.5	-1.2
7.5°	$<a^2$	3.2	-4.2	2.4	-2.1	1.6	-1.4	1.6	-5.1	1.2	-2.6	0.8	-1.7
	$>a^2, \leqq 4.0a^2$	2.4	-2.1	2.4	-2.1	1.6	-1.4	1.2	-2.6	1.2	-2.6	0.8	-1.7
	$>4.0a^2$	1.6	-1.4	1.6	-1.4	1.6	-1.4	0.8	-1.7	0.8	-1.7	0.8	-1.7
15°	$<a^2$	3.6	-3.8	2.7	-2.9	1.8	-1.9	2.4	-4.2	1.8	-3.2	1.2	-2.1
	$>a^2, \leqq 4.0a^2$	2.7	-2.9	2.7	-2.9	1.8	-1.9	1.8	-3.2	1.8	-3.2	1.2	-2.1
	$>4.0a^2$	1.8	-1.9	1.8	-1.9	1.8	-1.9	1.2	-2.1	1.2	-2.1	1.2	-2.1
30°	$<a^2$	5.2	-5	3.9	-3.8	2.6	-2.5	3.2	-4.6	2.4	-3.5	1.6	-2.3
	$>a^2, \leqq 4.0a^2$	3.9	-3.8	3.9	-3.8	2.6	-2.5	2.4	-3.5	2.4	-3.5	1.6	-2.3
	$>4.0a^2$	2.6	-2.5	2.6	-2.5	2.6	-2.5	1.6	-2.3	1.6	-2.3	1.6	-2.3
45°	$<a^2$	5.2	-4.6	3.9	-3.5	2.6	-2.3	4.2	-3.8	3.2	-2.9	2.1	-1.9
	$>a^2, \leqq 4.0a^2$	3.9	-3.5	3.9	-3.5	2.6	-2.3	3.2	-2.9	3.2	-2.9	2.1	-1.9
	$>4.0a^2$	2.6	-2.3	2.6	-2.3	2.6	-2.3	2.1	-1.9	2.1	-1.9	2.1	-1.9

資料來源：「建築物耐風設計規範與解說」(2014) 圖 3.3(a)

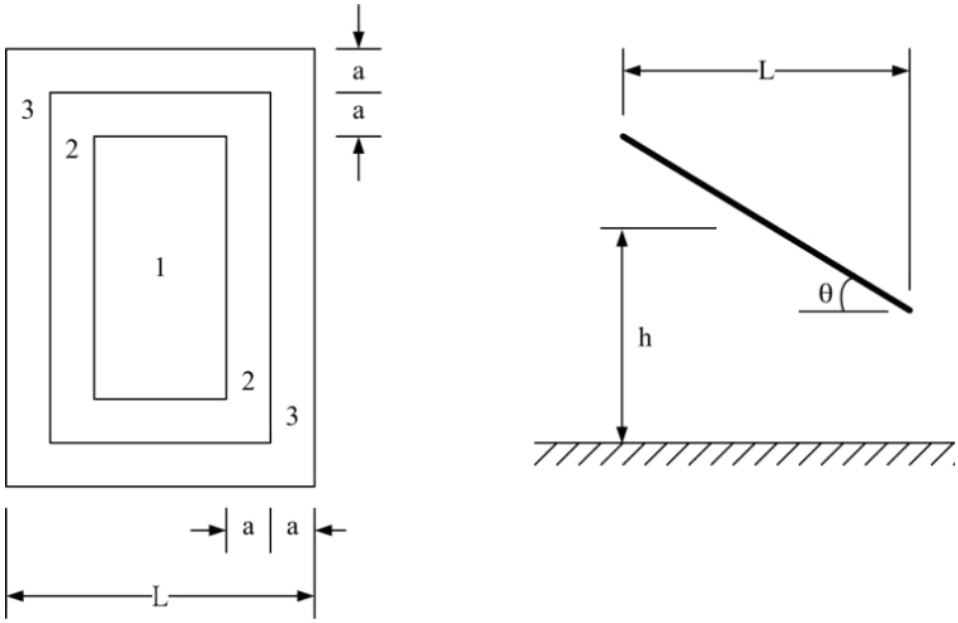


圖 6-15 單斜屋頂區域劃分示意圖

資料來源：「建築物耐風設計規範與解說」(2014) 圖 3.3(a)

表 6-3 示範例 4 構件及扣件之淨風壓係數C_{pn}

名稱		有效受風面積 A (m^2)	區域 3		區域 2		區域 1	
橫梁	a-b 段或 d-e 段	0.425	3.33	-4.07	2.50	-2.37	1.67	-1.57
	b-c 段或 c-d 段	5.333	1.67	-1.57	1.67	-1.57	1.67	-1.57
縱梁	f-g 段或 h-i 段	3.200	2.50	-2.37	2.50	-2.37	1.67	-1.57
	g-h 段	14.000	1.67	-1.57	1.67	-1.57	1.67	-1.57
柱	g 點下方	10.200	1.67	-1.57	1.67	-1.57	1.67	-1.57
	k 點下方	6.375	1.67	-1.57	1.67	-1.57	1.67	-1.57
面板接橫梁扣件	j 點	0.850	2.50	-2.37	2.50	-2.37	1.67	-1.57
橫梁接縱梁扣件	c 點	3.400	1.67	-1.57	1.67	-1.57	1.67	-1.57
縱梁接柱扣件	g 點	10.200	1.67	-1.57	1.67	-1.57	1.67	-1.57

資料來源：本研究整理

貳、構件及扣件之設計風壓（力）

本示範例將縱梁、橫梁及相關扣件視為局部構件，以「建築物耐風設計規範及解說」(2014)第 3.4 節計算設計風壓。

[步驟 1] 相關之設計參數

根據「建築物耐風設計規範及解說」(2014)，地況 B 之相關參數$\alpha = 0.25$；$z_g = 400\,m$，用途係數$I = 1.0$，基本設計風速$V_{10}(C) = 32.5\,m/s$。面板形心離地面高 $h_c = 2.781\,m$ 。

[步驟 2] 風速壓地況係數$K(z)$與地形係數K_{zt}

根據「建築物耐風設計規範及解說」(2014)式(2.7)：

$K(h_c) = 2.774\left(\frac{5}{z_g}\right)^{2\alpha} = 2.774\left(\frac{5}{400}\right)^{2\times 0.25} = 0.31$ 。

根據「建築物耐風設計規範及解說」(2014)式(2.8)計算K_{zt}：因工址附近無特殊地形，$K_{zt} = 1.0$。

[步驟 3] 面板形心高度之風速壓$q(h_c)$

根據「建築物耐風設計規範及解說」(2014)式(2.6)，離地面高h_c之風速壓：

$q(h_c) = 0.06 \times K(h_c) \times K_{zt} \times [I\,V_{10}(c)]^2 = 0.06 \times 0.31 \times 1 \times (1.0 \times 32.5)^2 = 19.66\ kgf/m^2$

[步驟 4] 陣風反應因子

假設棚架之 $f_n > 1Hz$ ，為非柔性結構，故計算普通建築物之陣風反應因子 G。

根據「建築物耐風設計規範及解說」(2014)式（2.12），紊流積分尺度$L_{\bar{z}}$：

$L_{\bar{z}} = \lambda(\bar{z}/10)^{\bar{\varepsilon}} = 98(9/10)^{0.33} = 94.651$

其中，等效結構高度 $\bar{z} = \max(0.6h, z_{min}) = \max(0.6 \times 2.781, 9) = 9\,m$。

根據「建築物耐風設計規範及解說」(2014)式（2.10），紊流強度$I_{\bar{z}}$：

$I_{\bar{z}} = c(10/\bar{z})^{1/6} = 0.3(10/9)^{1/6} = 0.305$

根據「建築物耐風設計規範及解說」(2014)式（2.11），背景反應Q：

$$Q_x = \sqrt{\frac{1}{1+0.63\left(\frac{B+h_c}{L_{\bar{z}}}\right)^{0.63}}} = \sqrt{\frac{1}{1+0.63\left(\frac{5.1+2.781}{94.651}\right)^{0.63}}} = 0.940$$

$$Q_y = \sqrt{\frac{1}{1+0.63\left(\frac{B+h_c}{L_{\bar{z}}}\right)^{0.63}}} = \sqrt{\frac{1}{1+0.63\left(\frac{8.863+2.781}{94.651}\right)^{0.63}}} = 0.925$$

其中，若來風平行 x 向，垂直於風向之面板水平尺寸B = 5.1 m，若來風平行 y 向，垂直於風向之面板水平尺寸B = 8.863 m。

根據「建築物耐風設計規範及解說」(2014)式（2.9），普通建築物支陣風反應因子 G：

$$G_x = 1.927\left(\frac{1+1.7q_Q I_{\bar{z}} Q_x}{1+1.7q_V I_{\bar{z}}}\right) = 1.927\left(\frac{1+1.7\times 3.4\times 0.305\times 0.940}{1+1.7\times 3.4\times 0.305}\right) = 1.853$$

$$G_y = 1.927\left(\frac{1+1.7q_Q I_{\bar{z}} Q_y}{1+1.7q_V I_{\bar{z}}}\right) = 1.927\left(\frac{1+1.7\times 3.4\times 0.305\times 0.925}{1+1.7\times 3.4\times 0.305}\right) = 1.835$$

其中，背景反應尖峰因子和背景反應尖峰因子均可取 3.4，以此算出風向為x向時 $G_x = 1.853$，風向為 y 向時$G_y = 1.835$。或者也可依據規範直接取$G = 1.88$，計算過程會較簡單，但因包絡各種情況，所得風力值較會保守。以下取 $G = G_x = 1.853$來計算。

[步驟 5] 設計正負風壓與風力

地面單斜式棚架型系統中被視為局部構件者，其設計風壓依「建築物耐風設計規範及解說」(2014) 3.4 節中開放式建築物之公式決定：

$$P = q(h_c) \times \mathrm{G} \times C_{pn} \quad \text{.....(6.1)}$$

其中$q(h_c)$為平均面板高度h_c處之風速壓；G 為普通建築之陣風反應因子，；C_{pn}為淨風壓係數。

舉例而言，面板接橫梁扣件的有效受風面積$A = 0.85m^2$，$\mathrm{a}^2 < A \leq 4\mathrm{a}^2$，若其全位於區域 3 內，其 C_{pn} 為 2.5和 -2.37，則該扣件設計正風壓為 $19.66 \times 1.853 \times 2.5 = 91.05\, kgf/m^2$ ， 負 風 壓 為 $19.66 \times 1.853 \times -2.37 = 51.640 = -86.20\, kgf/m^2$。仿照上述區域 3 的面板扣件計算流程，可分別計算得到其他扣件及構件在不同區域的設計正（負）風壓，彙整後將其數值分析結

果列於表 6-4。

表 6-4 示範例 4 不同區域之設計風壓

名稱		有效受風面積 A (m^2)	設計風壓（單位 kgf/m^2）					
			區域 3		區域 2		區域 1	
橫梁	a-b 段或 d-e 段	0.425	121.40	-148.11	91.05	-86.20	60.70	-57.06
	b-c 段或 c-d 段	5.333	60.70	-57.06	60.70	-57.06	60.70	-57.06
縱梁	f-g 段或 h-i 段	3.200	91.05	-86.20	91.05	-86.20	60.70	-57.06
	g-h 段	14.000	60.70	-57.06	60.70	-57.06	60.70	-57.06
柱	g 點下方	10.200	60.70	-57.06	60.70	-57.06	60.70	-57.06
	k 點下方	6.375	60.70	-57.06	60.70	-57.06	60.70	-57.06
面板接橫梁扣件	j 點	0.850	91.05	-86.20	91.05	-86.20	60.70	-57.06
橫梁接縱梁扣件	c 點	3.400	60.70	-57.06	60.70	-57.06	60.70	-57.06
縱梁接柱扣件	g 點	10.200	60.70	-57.06	60.70	-57.06	60.70	-57.06

資料來源：本研究整理

針對面板接橫梁扣件 j，因承受風壓面積完全位於區域 3 內，故該扣件設計正（負）風壓為$91.05\ kgf/m^2$和$-86.20\ kgf/m^2$。

若構件或扣件的承受風壓面積橫跨不同區域，其設計正（負）風壓可依不同區域的面積比例加權平均計算得之。以縱梁 g-h 段為例，其橫跨區域 1、區域 2 與區域 3 區，區域 3 的設計正（負）風壓為$60.70\ kgf/m^2$和$-57.06\ kgf/m^2$，橫跨面積$0.8\ m^2$，區域 2 的設計正（負）風壓為 $60.70\ kgf/m^2$和$-57.06\ kgf/m^2$，橫跨面積$7.2\ m^2$，區域 1 的設計正（負）風壓為$60.70kgf/m^2$和$-57.06\ kgf/m^2$，橫跨面積為 $6.0\ m^2$，對面積加權平均後所得風壓為$60.70kgf/m^2$和$-57.06\ kgf/m^2$。仿照上述的計算流程，分別計算其他不同構件及扣件的設計正（負）風壓，彙整所有結果並將其列於表 6-5

設計風力為設計風壓與承受風壓面積A_{actual}的乘積。針對面板接橫梁扣件 j，其設計正（負）風壓為$91.05\ kgf/m^2$和$-86.20\ kgf/m^2$，承受風壓面積為$0.85\ m^2$，則該扣件的設計正風力$F = 91.05 \times 0.85 = 77.40\ kgf$，設計負風力$F = -86.20 \times 0.85 = -73.27\ kgf$。仿照上述的計算流程，分別計算其他不同扣

件的設計正風力及設計負風力，彙整所有結果並將其列於表 6-5

表 6-5 示範例 4 構件及扣件之設計風壓及風力

名稱		承受風壓面積 (m^2)	設計風壓 (kgf/m^2)		設計風力 (kgf)	
			正風壓	負風壓	正風力	負風力
橫梁	a-b 段或 d-e 段	0.425	121.40	-148.11		
	b-c 段或 c-d 段	3.400	60.70	-57.06		
縱梁	f-g 段或 h-i 段	3.200	91.05	-86.20		
	g-h 段	14.000	60.70	-57.06		
柱	g 點下方	10.200	60.70	-57.06		
	k 點下方	6.375	60.70	-57.06		
面板接橫梁扣件	j 點	0.850	91.05	-86.20	77.40	-73.27
	螺栓 1 個（軸力）				77.40	-73.27
橫梁接縱梁扣件	c 點	3.400	60.70	-57.06	206.39	-194.00
	螺栓 4 個（剪力）				51.60	-48.50
	螺栓 2 個（軸力）				103.19	-97.00
縱梁接柱扣件	g 點	10.200	60.70	-57.06	619.16	-582.01
	螺栓 6 個（軸力）				103.19	-97.00

資料來源：本研究整理

參、支撐柱本身之設計風力

支撐柱本身之設計風力，依據「建築物耐風設計規範及解說」(2014)第 2.2 節中開放式建築物之公式決定：

$$F = q(z_{Ac}) \times G \times C_f \times A_c \quad \text{.....(6.2)}$$

其中$q(z_{Ac})$為面積 A_c形心高度 z_{Ac}處之風速壓，z_{Ac}為面板形心離地面高 $h_c = 12.781\,m$；G 為普通建築之陣風反應因子；C_f為風力係數。

若將支撐柱視為角柱體形狀之結構物，可參照「建築物耐風設計規範及解說」(2014)中表「角柱體形狀之結構物的風力係數C_f及其修正係數 R」求得風力，但表中沒有本例支撐柱之 H 型斷面，故使用造型較接近之長方形斷面進行估算C_f，風向垂直於長方柱長邊時 $C_f = 2.2$，風向垂直於長方柱長邊時 $C_f = 1.4$。修正係數 R 與柱的高寬比$2h/D$相關，其中柱的最小水平尺寸$D = 175\text{mm}$，因為柱的 $2h/D$ 都在8~20 之間，對照可得修正係數$R = 0.8$。

如圖 6-16 所示，若來風平行 x 向，風向垂直於長方柱長邊時 $C_f = 2.2$，乘上修正係 R 可得 $C_f = 1.76$。設計風力 $F = q(h_c)GC_f\,A_c$，其中 $q(h_c) = 19.66\ kgf/m^2$、$G = 1.853$、受風作用特徵面積A_c為柱子實體構材迎風面面積，代入後可得各根柱子的設計風壓，將其結果列於表 6-6。

如圖 6-17 所示，若來風平行 y 向，風向垂直於長方柱長邊時 $C_f = 1.4$，乘上修正係 R 可得 $C_f = 1.12$。設計風力 $F = q(h_c)GC_f\,A_c$，其中 $q(h_c) = 19.66\ kgf/m^2$、$G = 1.835$、受風作用特徵面積A_c為柱子實體構材迎風面面積，代入後可得各根柱子的設計風壓，並將其列於表 6-6。

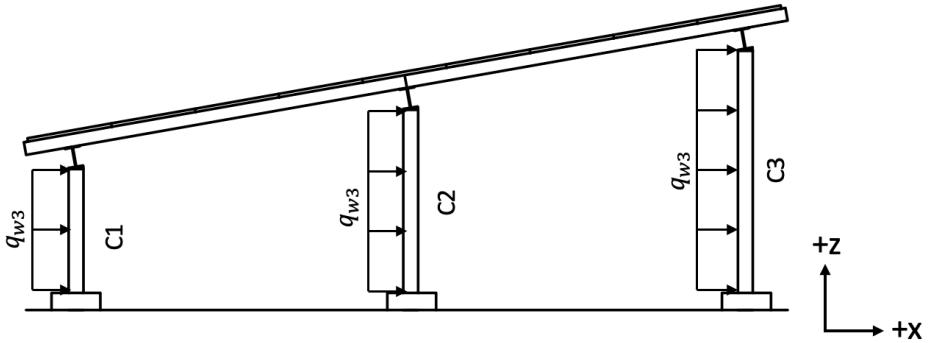


圖 6-16 示範例 4 支撐柱本身之設計風力（x 向）

資料來源：本研究整理

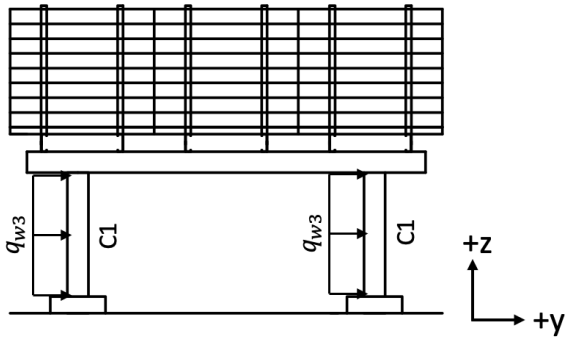


圖 6-17 示範例 4 支撐柱本身之設計風力（y 向）

資料來源：本研究整理

為了方便分析，也可以把設計風力F除以柱高換為線載重。因為柱子的$q(h_c)$、G及C_f與柱斷面皆相同，來風平行 x 向時每根柱子的單位長度風載重皆為16.03 kgf/m，來風平行 y 向時每根柱子的單位長度風載重皆為7.07 kgf/m。

表 6-6 示範例 4 支撐柱本身之設計風力

風向	來風平行 x 向		來風平行 y 向	
設計目標	受風作用特徵面積A_c（m^2）	設計風力F（kgf）	受風作用特徵面積A_c（m^2）	設計風力F（kgf）
柱 C1	0.4	23.37	0.3	10.31
柱 C2	0.5	34.51	0.4	15.22
柱 C3	0.7	45.63	0.5	20.13

資料來源：本研究整理

肆、面板傳遞至支撐柱風壓(力)不同估算方式之比較

若將棚架之支撐柱視為局部構材，以於前面第壹及第貳小節計算面板傳遞至支撐柱之風壓，若將棚架之支撐柱視為主要風力抵抗結構系統，應依據「建築物耐風設計規範與解說」(2014) 第 2.2 節決定設計風力，將在本小節述明。

由面板傳遞至支撐柱之風力依據「建築物耐風設計規範與解說」(2014) 中表 2.9「開放式建築物之單斜式屋頂的風力係數」計算，其細節列於本節的(1)；但因此規範為早期 ASCE 7 的規定，在使用上有所疑慮，且之後新版「建築物耐風設計規範與解說」也預計依新版 ASCE 7 修訂這部分，故另依據擬議新版「建築物耐風設計規範與解說」中表 3.8 (a) 「開放式建築物之單斜屋頂的淨風壓係數」計算作為參考，此細節列於本節的(2)。

(1) 面板傳遞至支撐柱的設計風力（耐風規範 2014 第 2.2 節）

由面板傳遞至支撐柱之設計風力，依據「建築物耐風設計規範及解說」(2014)第 2.2 節中開放式建築物之公式決定：

$$F = q(h_c) \times G \times C_f \times A_c \quad \text{.....(6.3)}$$

其中$q(h_c)$為面板形心高度 h_c處之風速壓；G為普通建築之陣風反應因子；C_f為風力係數，可查表 6-7 而得； A_c為開放式建築物受風作用特徵面積，也就是面板總面積$5.1 \times 9.0 = 45.9\, m^2$。

表 6-7 開放式建築物之單斜式屋頂的風力係數

θ	各種 L/B 值之 *Cf*						
	5	3	2	1	1/2	1/3	1/5
10	0.2	0.25	0.3	0.45	0.55	0.7	0.75
15	0.35	0.45	0.5	0.7	0.85	0.9	0.85
20	0.5	0.6	0.75	0.9	1	0.95	0.9
25	0.7	0.8	0.95	1.15	1.1	1.05	0.95
30	0.9	1	1.2	1.3	1.2	1.1	1

θ	各種 *L/B* 值所對應的壓力中心位置，*X/L*		
	2~5	1	1/5~1/2
10~20	0.35	0.3	0.3
25	0.35	0.35	0.4
30	0.35	0.4	0.45

資料來源：建築物耐風設計規範與解說(2014) 表 2.9

來風平行 x 向

[步驟 1] 風力係數 C_f

若來風平行 x 向，垂直於風向之面板水平尺寸$B = 5.1\,m$，與風向平行的屋頂尺寸$L = 8.863\,m$，相除得 $L/B = 1.738$。根據表 6-7，$\theta = 10°$ 下 $L/B = 1$的風力係數 C_f 值為0.45，$L/B = 2$的風力係數 C_f 值為0.3，線性內插可得 $L/B = 1.738$下 C_f 值為0.339。

[步驟 2] 設計風力F

根據「建築物耐風設計規範及解說」(2014)式(2.4)，開放式建築承受之設計風力為$F = q(h_c)G_x\,C_f\,A_c = 19.66 \times 1.853 \times 0.339 \times 45.9 = 567.30\ (kgf)$。

根據表 6-7，$\theta = 10°$ 下 $L/B = 1$ 的壓力中心位置 X/L為 0.3，$L/B = 2$的壓力中心位置 X/L為0.35，線性內差可得$L/B = 1.738$ 的壓力中心位置$X/L = 0.337$，X為從屋頂之迎風面屋簷到壓力中心的距離。

來風平行 y 向

[步驟 1] 風力係數 C_f

若來風平行 y 向，垂直於風向之面板水平尺寸$B = 8.863\,m$，與風向平行的屋頂尺寸$L = 5.1\,m$，相除得$L/B = 0.575$。根據表 6-7，$\theta = 10°$ 下 $L/B = 0.5$的風力係數 C_f 值為0.55，$L/B = 1.0$的風力係數 C_f 值為0.45，線性內插可得 $L/B = 0.575$ 下 C_f 值為0.535。

[步驟 2] 設計風力F

根據「建築物耐風設計規範及解說」(2014)式(2.4)，開放式建築承受之設計風力為$F = q(h_c)G_y C_f\,A_c = 19.66 \times 1.835 \times 0.535 \times 45.9 = 885.54\ (kgf)$。

根據表 6-7，$\theta = 10°$ 下 $L/B = 0.5$ 的壓力中心位置 X/L為0.3，$L/B = 1$的壓力中心位置 X/L為0.3，線性內差可得 $L/B = 0.575$ 的壓力中心位置 $X/L = 0.3$，X為從屋頂之迎風面屋簷到壓力中心的距離。

表 6-8 示範例 4 面板傳遞至支撐柱之設計風力（耐風規範 2014）

風向	設計風力（kgf）	從迎風面到壓力中心位置之距離
$\pm x$	$\pm$567.30	$X/L = 0.337$
$\pm y$	$\pm$885.54	$X/L = 0.3$

資料來源：本研究整理

(2) 面板傳遞至支撐柱的設計風力（擬議新版「建築物耐風設計規範與解說」）

因「建築物耐風設計規範與解說」(2014)第 2.2 節為早期 ASCE 7 的規定，由面板傳遞至支撐柱之計風力在使用上有所疑慮，且之後第三版耐風規範也預計依據新版 ASCE 7 修定這一部分，故另外依據第三版耐風設計規範草案計算由面板傳遞至支撐柱之設計風力作為參考，其設計風壓為：

$$p = q(h_c) \times G \times C_N \quad \text{.....(6.4)}$$

其中$q(h_c)$為面板形心高度 h_c處之風速壓；G 為普通建築之陣風反應因子；C_N為風壓係數。

<u>來風平行 x 向</u>

[步驟 1]風力係數C_N

若來風平行 x 向，可參考表 6-9 和圖 6-18 得到開放式建築物之單斜式屋頂的淨風壓係數，其中屋頂下通風面積阻塞比小於 50%視為氣流無受阻，C_{NW} 及 C_{NL} 分別代表屋頂面上風區及下風區之淨風壓係數，正值代表風壓作用指向受風作用面，負值代表風壓作用遠離受風作用面。

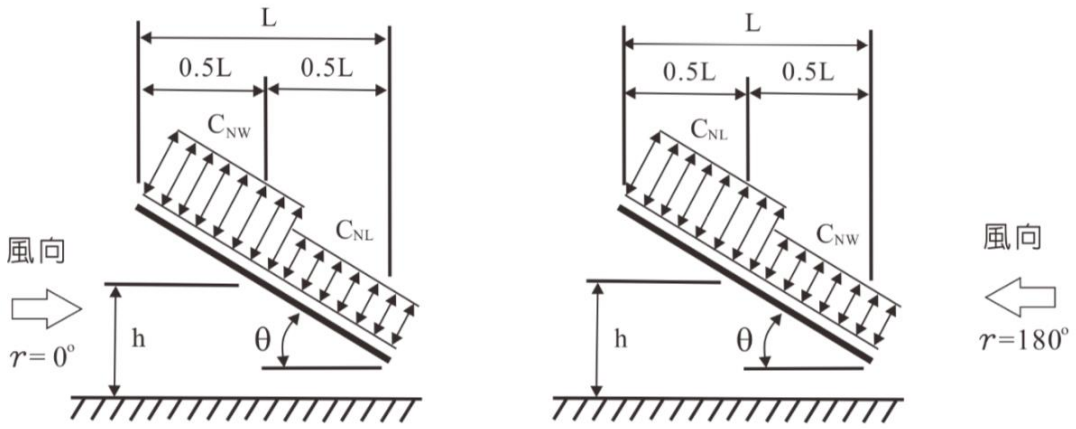


圖 6-18 開放式建築物之單斜式屋頂的淨風壓係數C_N

資料來源：擬議新版「建築物耐風設計規範與解說」

表 6-9 開放式建築物之單斜式屋頂的淨風壓係數C_N

淨風壓係數 , C_N									
屋頂仰角 θ	載重類別	風向角 , 0°				風向角 , 180°			
		氣流無受阻		氣流有受阻		氣流無受阻		氣流有受阻	
		C_{NW}	C_{N}L	C_{NW}	C_{N}L	C_{NW}	C_{N}L	C_{NW}	C_{N}L
< 7.5°	A	1.2	0.3	-0.5	-1.2	1.2	0.3	-0.5	-1.2
	B	-1.1	-0.1	-1.1	-0.6	-1.1	-0.1	-1.1	-0.6
7.5°	A	-0.6	-1.0	-1.0	-1.5	0.9	1.5	-0.2	-1.2
	B	-1.4	0.0	-1.7	-0.8	1.6	0.3	0.8	-0.3
15°	A	-0.9	-1.3	-1.1	-1.5	1.3	1.6	0.4	-1.1
	B	-1.9	0.0	-2.1	-0.6	1.8	0.6	1.2	-0.3
22.5°	A	-1.5	-1.6	-1.5	-1.7	1.7	1.8	0.5	-1.0
	B	-2.4	-0.3	-2.3	-0.9	2.2	0.7	1.3	0.0
30°	A	-1.8	-1.8	-1.5	-1.8	2.1	2.1	0.6	-1.0
	B	-2.5	-0.5	-2.3	-1.1	2.6	1.0	1.6	0.1
37.5°	A	-1.8	-1.8	-1.5	-1.8	2.1	2.2	0.7	-0.9
	B	-2.4	-0.6	-2.2	-1.1	2.7	1.1	1.9	0.3
45°	A	-1.6	-1.8	-1.3	-1.8	2.2	2.5	0.8	-0.9
	B	-2.3	-0.7	-1.9	-1.2	2.6	1.4	2.1	0.4

資料來源：擬議新版「建築物耐風設計規範與解說」

此表適用於$0.25 \leq h/L \leq 1.0$之情形，故先確認$h/L = 0.314$在此範圍內。靠線性內差求得風向角為 0°的載重類別 A 為$C_{NW} = 0.7$、$C_{NL} = -1.1$；載重類別 B 為$C_{NW} = -1.57$、$C_{NL} = 0$，風向角為 180°時的載重類別 A 為$C_{NW} = 1.03$、$C_{NL} = 1.53$；載重類別 B 為$C_{NW} = 1.67$、$C_{NL} = 0.4$。

設計風壓為$P = q(h_c)G_xC_N$，此時$q(h_c) = 19.66\,kgf/m^2$、$G_x = 1.853$，代入不同C_N後可得各方向及載種組合之設計風壓，並將其列於表 6-11。

<u>來風平行 y 向</u>

若來風平行 y 向，可參考表 6-10 和圖 6-19 得到風向平行於屋脊時開放式建築物之屋頂的淨風壓係數，其中屋頂下通風面積阻塞比小於 50%視為氣流無受阻，C_N代表屋頂面之淨風壓係數，依照離迎風面的距離被分為 3 段，正值代表風壓作用指向受風作用面，負值代表風壓作用遠離受風作用面。

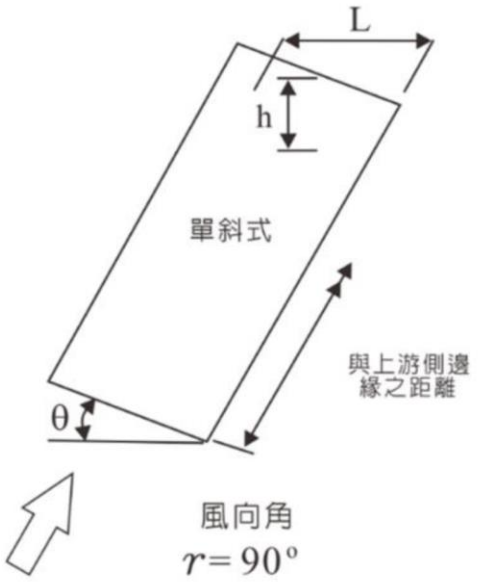


圖 6-19 風向平行於屋脊時開放式建築物之屋頂的淨風壓係數C_N

資料來源：擬議新版「建築物耐風設計規範與解說」

表 6-10 風向平行於屋脊時開放式建築物之屋頂的淨風壓係數C_N

與上游側邊緣之距離	屋頂仰角 θ	載重類別	氣流無受阻	氣流有受阻
			C_N	C_N
≤h	All shapes	A	-0.8	-1.2
	$\theta \leq 45°$	B	0.8	0.5
> h, ≤ 2h	All shapes	A	-0.6	-09
	$\theta \leq 45°$	B	0.5	0.5
> 2h	All shapes	A	-0.3	-0.6
	$\theta \leq 45°$	B	0.3	0.3

資料來源：擬議新版「建築物耐風設計規範與解說」

可得載重類別 A 中$< h$的$C_N = -0.8$、h~$2h$的$C_N = -0.6$、$> 2h$的$C_N = -0.3$；載重類別 B 中$< h$的$C_N = -0.8$、h~$2h$的$C_N = 0.5$、$> 2h$的$C_N = 0.3$。

設計風壓為：$P = q(h_c)G_y C_N$，此時 $q(h_c) = 19.66\ kgf/m^2$、$G_y = 1.835$，代入不同C_N後可得各方向及載種組合之設計風壓，並將其列於表 6-11。

表 6-11 示範例 4 面板傳遞至支撐柱的設計風壓（新版耐風規範）(kgf/m²)

載重類別	A			B		
	CNW		CNL	CNW		CNL
風向角 , 0°	-25.50		-40.07	-57.07		0.00
風向角 , 180°	37.64		55.85	60.71		14.57
載重類別	A			B		
	≤h	h~2h	> 2h	≤h	h~2h	> 2h
風向角 , 90°	-28.85	-21.64	-10.82	28.85	18.03	10.82

資料來源：本研究整理

第四節 構件之耐風分析及檢核

橫梁採用 SSC 400（一般結構用輕型鋼）為冷軋型鋼材；縱梁採用 SN400B（建築結構用軋鋼料）為熱軋型鋼材，兩者之降伏強度 $f_y = 2500\ kgf/cm^2$ ，極限強度 $f_u = 4000\ kgf/cm^2$。假設採用之橫梁、縱梁形狀與斷面性質如表 6-12 所示。

冷軋型鋼構材設計時所用鋼材之彈性模數E為 20,700 kgf/mm^2，剪力模數G為 7,950 kg/mm^2，波森比μ為 0.3，溫度伸縮係數為 0.000012/°C。鋼結構所用結構鋼之彈性模數E為 20,400 kgf/mm^2，剪力彈性模數G為 8100 kgf/mm^2，波森比μ為 0.3，溫度伸縮係數為 0.000012/°C。

表 6-12 示範例 4 構件之斷面性質

縱梁、柱	橫梁
H 型鋼-H250x175x7x11	C 型鋼- C150x65x20x3.2
斷面模數 $S_x = 502\ cm^3$ 斷面模數 $S_y = 112\ cm^3$ 慣性矩 $I_x = 6121\ cm^4$ 慣性矩 $I_y = 984\ cm^4$ 斷面積 $A = 56.24\ cm^2$ 單位長重量 $q = 44.1\ kgf/m$	斷面模數 $S_x = 44\ cm^3$ 斷面模數 $S_y = 12\ cm^3$ 慣性矩 $I_x = 332\ cm^4$ 慣性矩 $I_y = 53\ cm^4$ 斷面積 $A = 9.56\ cm^2$ 重量 $q = 7.5\ kgf/m$
SN400B 材料性質：$f_y = 2500\ kgf/cm^2$ ；$f_u = 4000\ kgf/cm^2$ SSC 400 材料性質：$f_y = 2500\ kgf/cm^2$ ；$f_u = 4000\ kgf/cm^2$	

資料來源：本研究整理

當使用容許應力設計法設計時，熱軋型鋼構應依「鋼結構容許應力設計法規範及解說」(2010)之規定，考慮載重組合 $D + L$ 、$D + 0.75(L \pm 1.25W)$、$D + 0.75(L \pm 0.8E)$ 、$0.7D \pm 1.25W$ 及 $0.7D \pm 0.8E$；冷軋型鋼構應依「冷軋型鋼構造建築物結構設計規範及解說」(2016)之規定，考慮載重組合$D + L$ 、$D \pm W$、$D \pm 0.7E$、$D + 0.75L \pm 0.75W$ 、$D + 0.75L \pm 0.7E$、$0.6D \pm W$及 $0.6D \pm 0.7E$。其中，D 為靜載重，包括構材自重及永久附加物重量；L 為活載重，包含人員重量；E 為設計地震力； W 為設計風力。

本耐風設計示範例所考慮之太陽光電系統不用考慮活載重、且忽略地震力，同時由於「冷軋型鋼構造建築物結構設計規範及解說」(2016) ASD 所用風力係數並不正確，故本例皆採用「鋼結構容許應力設計法規範及解說」(2010)之載

重組合$D \pm 0.9375\,W$(或$D \pm 0.75(1.25W)$)及$0.7D \pm 1.25W$進行檢核。

壹、橫梁

在作橫梁 a-b-c-d-e 結構分析時如圖 6-20 所示，將橫梁與下方縱梁連接處 b 點、c 點及 d 點的扣件視為鉸支承（Hinge）進行分析。

風載重採用表 6-5 中橫梁 a-b-c-d-e 的設計風壓，其承受風壓面積的寬度為 0.85 m。設計正風壓 a-b 段和 d-e 段為 $121.40\,kgf/m^2$、b-c 段和 c-d 為 $60.70\,kgf/m^2$，乘上寬度 0.85 m 可得線載重 $q_{w1} = 103.19\,kgf/m$、$q_{w2} = 51.60\,kgf/m$，設計負風壓 a-b 段和 d-e 段為 $148.11\,kgf/m^2$、b-c 段和 c-d 段負風壓為 $57.06\,kgf/m^2$，乘上寬度 0.85 m 後可得線載重 $q_{w1} = 125.90\,kgf/m$、$q_{w2} = 48.50\,kgf/m$。

靜載重包含橫梁自重與模組自重，模組自重每塊 $20kgf$，由 4 個面板接橫梁扣件傳給 2 根橫梁，故每個扣件傳到橫梁的力量 $F_D = 20kg/4 = 5\,kgf/m$，橫梁本身單位長自重為 $7.5\,kgf/m$。

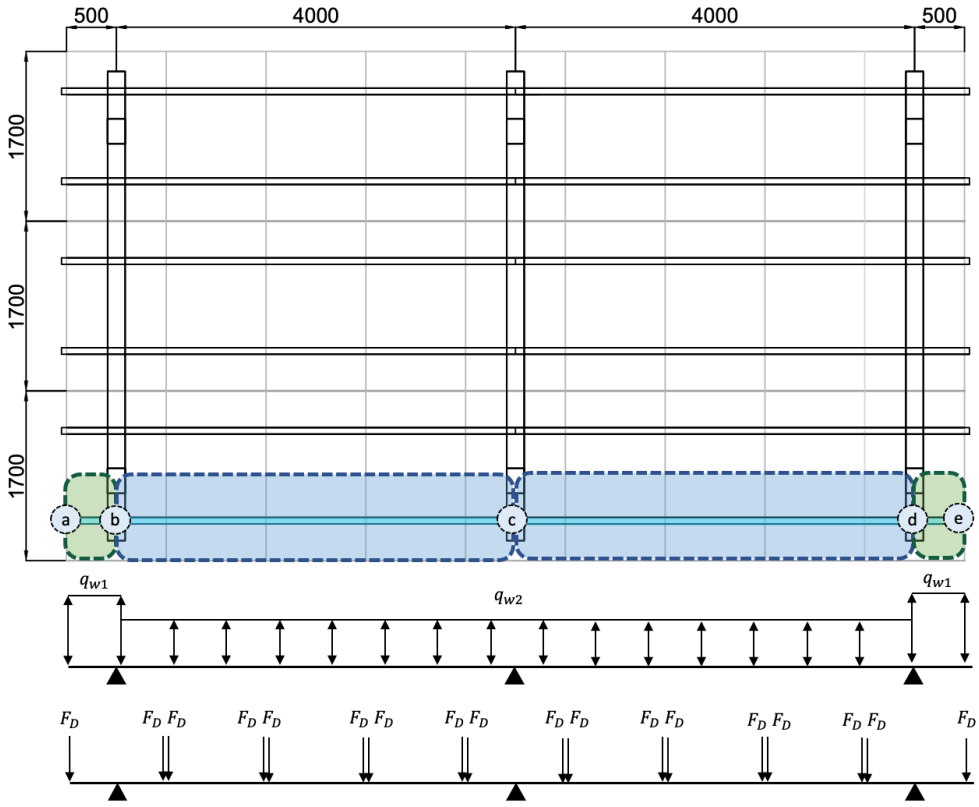


圖 6-20 示範例 4 之橫梁 a-b-c-d-e 受力作用圖

資料來源：本研究整理

本例利用 SAP 2000 分析，將構件的斷面、材料特性輸入，並施加風載重、靜載重及可求得橫梁變形量及構件的應力，載重組合有$D \pm 0.9375\,W$、$0.7D \pm 1.25W$。

<u>應力檢核</u>

在載重組合$0.7D + 1.25W$下有最大剪力 182.75 kgf 及最大彎矩 134.47 kgf-m，用 AISC-ASD96 進行檢核，得橫梁應力比為 $0.21 \leq 1$，確認符合規範。

<u>變形檢核</u>

為避免長時間較大振動造成扣件處產生破壞，建議檢核梁變位量，例如參考「鋼結構容許應力設計法規範及解說」(2010) 11.5.3 節，將風力視為活載重，確認風力所產生的撓度不得大於跨度之 1/360。在載重組合為$1.0D + 1.0W$下有最大變形量$\delta_{max} = 2.6\,mm$。

$\frac{\text{最大變形量}\delta_a}{\text{跨度}} = \frac{0.0026\text{ m}}{4\text{ m}} = 0.00065 \leq \frac{1}{360}$，檢核通過。

貳、縱梁

在作縱梁結構分析時如圖 6-21 所示，將與下方柱連接處 g 點、h 點視為鉸支承（Hinge），以下風載重以線載重模擬進行設計，靜載重以點載重模擬進行設計。

風載重採用表 6-5 中縱梁 f-g-h-i 的設計風壓，其承受風壓面積的寬度為 4m。設計正風壓 f-g 段和 h-i 段為$91.05\,kgf/m^2$、g-h 段為$60.70\,kgf/m^2$，乘上寬度 4 m 可得線載重$q_{w1} = 364.21\,kgf/m$、$q_{w2} = 242.81\,kgf/m$。設計負風壓 f-g 段和 h-i 段為$86.20\,kgf/m^2$、g-h 段為$57.06\,kgf/m^2$，乘上寬度 4 m 可得線載重$q_{w1} = 344.79\,kgf/m$、$q_{w2} = 228.24\,kgf/m$。

靜載重包含梁自重與模組自重，而縱梁 f-g-h-i 所負擔面積中有 12 塊模組，模組自重為$20kgf$/塊，橫梁自重為 $7.51\,kg/m$，面板、橫梁自重經橫梁接縱梁扣件傳入縱梁，故每根橫梁傳到縱梁 f-g-h-i 的重量$F_D = (20kg) \times (2\text{ 塊}) + (7.51\,kg/m) \times (4m) = 70.04\,kg$，縱梁本身單位長自重為 $44.1\,kgf/m$。

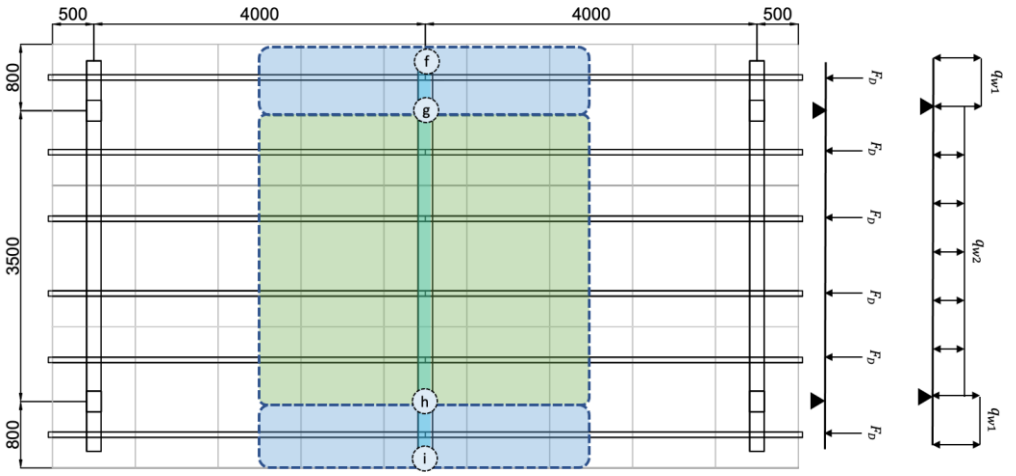


圖 6-21 示範例 4 之縱梁 f-g-h-i 受力作用圖

資料來源：本研究整理

本例利用 SAP2000 分析，將構件的斷面、材料特性輸入，並施加風載重、靜載重及可求得縱梁變形量及構件的應力，載重組合有$D \pm 0.9375\,W$、$0.7D \pm 1.25W$。

<u>應力檢核</u>

在載重組合$0.7D + 1.25W$下有最大剪力 737.17 kgf 和最大彎矩 461.87 kgf-m，用 AISC-ASD96 進行檢核，得縱梁應力比為 $0.07 \leq 1$，確認符合規範。

<u>變形檢核</u>

為避免長時間較大振動造成扣件處產生破壞，建議檢核梁變位量，例如參考「鋼結構容許應力設計法規範及解說」(2010)11.5.3 節，將風力視為活載重，確認風力所產生的撓度不得大於跨度之 1/360。在載重組合為$1.0D + 1.0W$下有最大變形量$\delta_{max} = 0.5\,mm$。

$\frac{\text{最大變形量}\delta_a}{\text{跨度}} = \frac{0.0005\text{ m}}{3.5\text{ m}} = 0.00014 \leq \frac{1}{360}$，檢核通過。

參、支撐柱

支撐柱本身側向之設計風力可依照「建築物耐風設計規範與解說」(2014)第 2.2 節主要構件風力公式決定，而面板傳遞至支撐柱的設計風壓（力）依照不同之估算依據會有不同算法：(1)為依照現行「建築物耐風設計規範與解說」(2014)第 2.2 節主要構件風力公式決定，但此公式為早期 ASCE 7 的規定，在使用上有所疑慮，故在(2)中依照擬議新版「建築物耐風設計規範與解說」中主要構件風壓公式決定，此公式依新版 ASCE 7 修定，所得風壓會較為合理。最後(3)為依照現行「建築物耐風設計規範與解說」(2014)第 3.4 節局部構件風壓公式決定柱的設計風壓，但所得之值可能會過於保守。

(1) 根據現行「建築物耐風設計規範及解說」之主要構件風力公式估算風力

風載重考慮由面板傳遞至支撐柱之設計風力及支撐柱本身之設計風力兩項。由面板傳遞至支撐柱之設計風力依據「建築物耐風設計規範及解說」(2014)第 2.2 節計算，其結果參考表 6-8，支撐柱本身之側向設計風力參考表 6-6。

參考圖 6-22，若風朝 $+x$向吹，由面板傳遞至支撐柱之設計風力為$F = 567.30\ kgf$，且從迎風面到風力作用位置的比例 $X/L = 0.337$，方向垂直面板並考慮往下和往上兩種情況。支撐柱本身之側向設計風力 $q_w = 16.03\ kgf/m$。參考圖 6-23，若風朝 $-x$向吹其設計風力與$+x$向相同，只是方向相反。

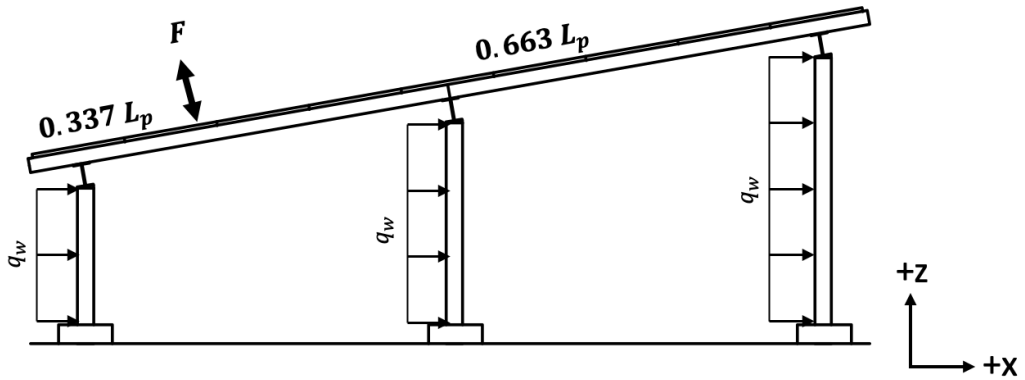


圖 6-22 示範例 4 現行耐風規範之主要風力作用圖（$+x$向）

資料來源：本研究整理

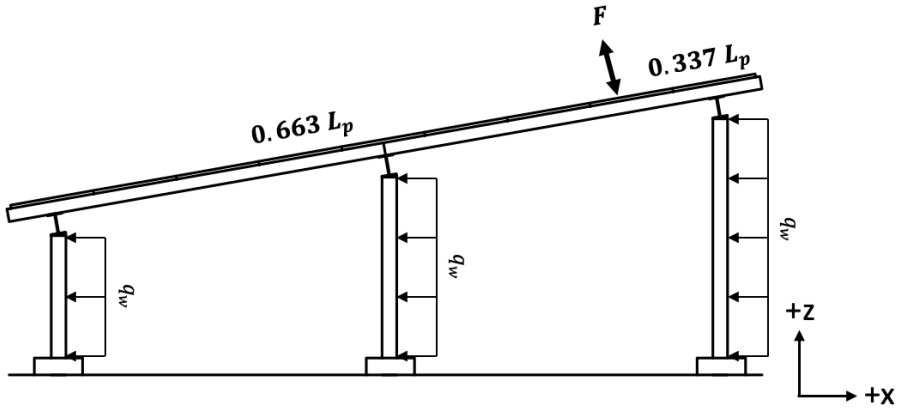


圖 6-23 示範例 4 現行耐風規範之主要風力作用圖（$-x$向）

資料來源：本研究整理

根據圖 6-24，若風朝 $+y$向吹，由面板傳遞至支撐柱之設計風力為$F = 885.54\ kgf$，且從迎風面到風力作用位置的比例 $X/L = 0.3$，方向垂直面板並考慮往下和往上兩種情況，支撐柱本身之側向設計風力 $q_w = 7.07\ kgf/m$。若風朝 $-y$向吹其設計風力與$+y$向相同，只是方向相反。

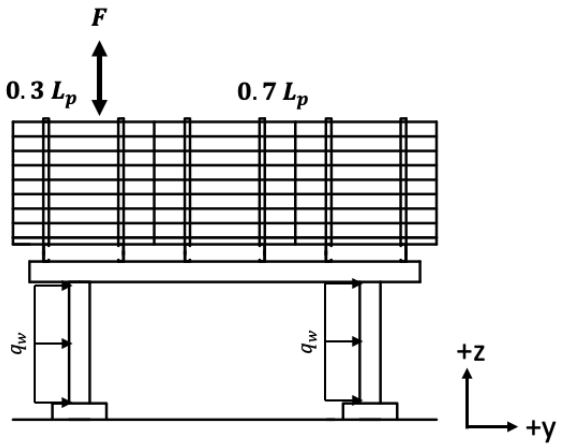


圖 6-24 示範例 4 現行耐風規範之主要風力作用圖（$+y$向）

資料來源：本研究整理

(2) 根據擬議新版「建築物耐風設計規範與解說」之主要構件風壓公式估算

風載重考慮由面板傳遞至支撐柱之設計風力及支撐柱本身之設計風力兩項。由面板傳遞至支撐柱之設計風力依據擬議新版「建築物耐風設計規範與解說」計算，其結果參考表 6-11，支撐柱本身之側向設計風力參考表 6-6。

參考圖 6-25，若風朝 $+x$向吹，也就是風向角$180°$ 時，在載重類別 A 下由面板傳遞至支撐柱之設計風壓p_{ww}為$37.64\ kgf/m^2$、p_{wL}為$55.85\ kgf/m^2$，載重類別 B 下由面板傳遞至支撐柱之設計風壓p_{ww}為$60.71 kgf/m^2$、p_{wL}為$14.57\ kgf/m^2$。支撐柱本身之側向設計風力 $q_{w3} = 16.03\ kgf/m$。

參考圖 6-26，若風朝 $-x$向吹，也就是風向角$0°$ 時，在載重類別 A 下由面板傳遞至支撐柱之設計風壓p_{ww}為$-25.50\ kgf/m^2$、p_{wL}為$-40.07\ kgf/m^2$，載重類別 B 下由面板傳遞至支撐柱之設計風壓p_{ww}為$-57.07\ kgf/m^2$、p_{wL}為$0.00\ kgf/m^2$。支撐柱本身之側向設計風力 $q_{w3} = 16.03\ kgf/m$。

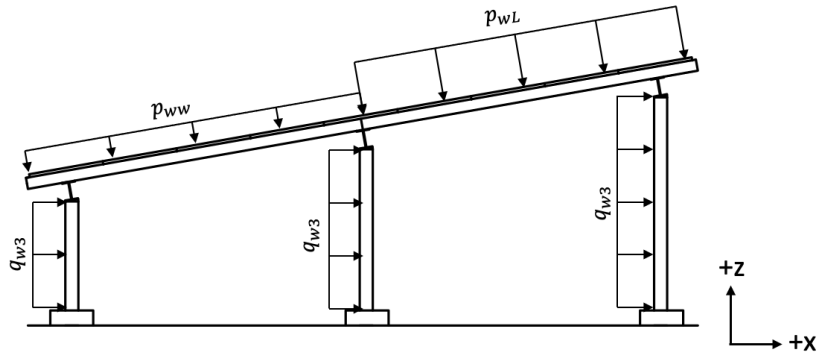


圖 6-25 示範例 4 擬議新版耐風規範之主要風力作用圖（風向角$180°$）

資料來源：本研究整理

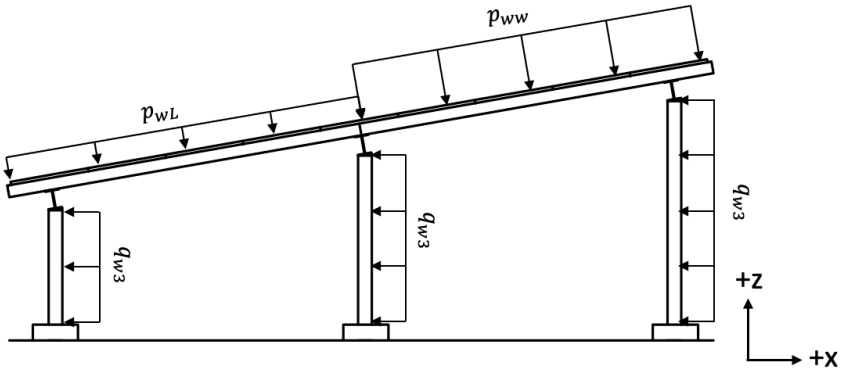


圖 6-26 示範例 4 擬議新版耐風規範之主要風力作用圖（風向角$0°$）

資料來源：本研究整理

根據圖 6-27，若風朝 $+y$向吹，也就是風向角$90°$ 時，在載重類別 A 下由面板傳遞至支撐柱之設計風壓p_{w1}為$-28.85\ kgf/m^2$、p_{w2}為$-21.64\ kgf/m^2$，載重類別 B 下由面板傳遞至支撐柱之設計風壓p_{w1}為$28.85\ kgf/m^2$、p_{w2}為

$18.03\ kgf/m^2$。支撐柱本身之側向設計風力 $q_{w3} = 7.07\ kgf/m$。若風朝 $-y$向吹其設計風力與$+y$向相同，只是方向相反。

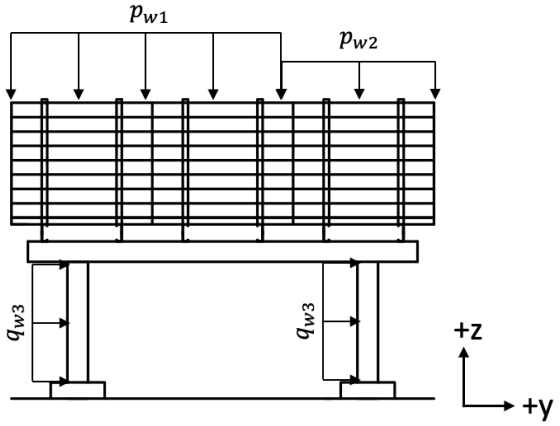


圖 6-27 示範例 4 擬議新版耐風規範之主要風力作用圖（風向角90°）

資料來源：本研究整理

(3) 根據現行「建築物耐風設計規範與解說」之局部構件風壓公式估算風壓

風載重考慮由面板傳遞至支撐柱之設計風力及支撐柱本身之設計風力兩項。面板傳遞至支撐柱之設計風壓根據「建築物耐風設計規範與解說」(2014)第 3.4 節進行計算，其設計風壓列於表 6-5，而支撐柱本身之側向設計風力列於表 6-6。

如圖 6-28，中間柱子承受風壓面積的設計正風壓為$60.70\ kgf/m^2$，設計負風壓為$57.06\ kgf/m^2$。兩側柱子承受風壓面積的設計正風壓為$60.70\ kgf/m^2$，設計負風壓為$57.06\ kgf/m^2$。其中正風壓表示力量指向面板，負風壓表示力量遠離面板上表面。若風朝 $+x$向吹，支撐柱本身之側向設計風力 $q_{w3} = 16.03\ kgf/m$。

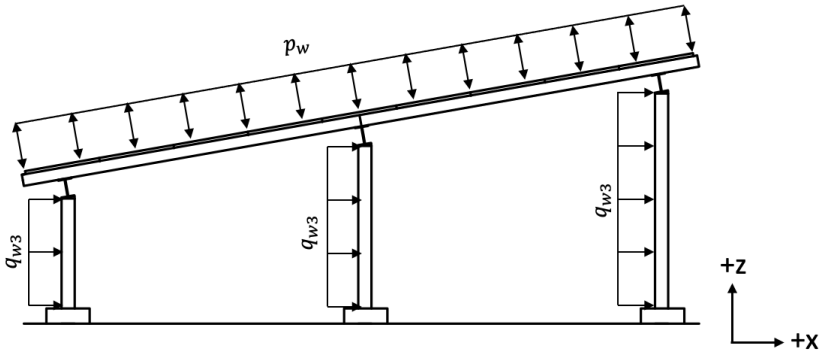


圖 6-28 示範例 4 耐風規範之局部風壓作用圖（$+x$向）

資料來源：本研究整理

綜合以上三種風載重算法，由於(1)之結果不合理，(3)之結果可能會過於保守，故本示範例選擇(2)所得風壓作為柱及基座之檢核。

靜載重包含梁柱自重與模組自重，模組自重為$20kgf/$塊，故橫梁所受之模組單位長自重 $q_D = 10\ kg/m$，橫梁單位長自重為 $7.51\ kg/m$、縱梁及柱單位長自重為 $44.1\ kgf/m$。

本例利用 SAP 2000 分析，將構件的斷面、材料特性輸入，並施加風載重、靜載重及可求得柱變形量及構件的應力，為保守底部基座設為鉸接。載重組合有$D \pm 0.9375\ W$、$0.7D \pm 1.25W$。

表 6-13 示範例 4 所有載重組合下對 g 點下方柱產生的最大受力

由面板傳遞至支撐柱之設計風壓(力)之估算依據	柱軸拉力（kgf）	柱軸壓力（kgf）	柱頂側位移(mm)	應力比
(1)現行耐風設計規範之主要構件風力公式	44.94	454.932	6.35	0.14
(2)擬議新版耐風設計規範之主要構件風壓公式	337.67	925.56	15.41	0.21
(3)現行耐風設計規範之局部構件風壓公式	680.09	1105.34	15.03	0.276

資料來源：本研究整理

表 6-14 示範例 4 所有載重組合下對 k 點下方柱產生的最大受力

由面板傳遞至支撐柱之設計風壓(力)之估算依據	柱軸拉力（kgf）	柱軸壓力（kgf）	柱頂側位移(mm)	應力比
(1)現行耐風設計規範之主要構件風力公式	44.66	355.26	6.34	0.10
(2)擬議新版耐風設計規範之主要構件風壓公式	383.20	662.23	15.41	0.19
(3)現行耐風設計規範之局部構件風壓公式	379.53	685.68	15.03	0.231

資料來源：本研究整理

應力檢核

在載重組合 $0.7D + 1.25W$（風向角0°、載重類別 B）下有最大軸拉力 $383.20\ kgf$，在載重組合$0.7D + 1.25W$（風相角180°、載重類別 A）下有最大軸壓力$925.07\ kgf$，用 AISC-ASD96 進行檢核，得柱應力比小於1，確認符合規範。

變形檢核

因太陽光電版模組鎖固可能因為振動產生鬆弛，故建議增加撓度限制以約束螺栓鬆弛，例如可參考「建築技術規則建築設計施工編」第 245 條，確認容許層間變位二百分之一。在載重組合為$1.0D + 1.0W$下有最大變形量$15.4\ mm$。

$$\text{容許變位} = \frac{\text{柱高}}{200} = 17.38\ mm \geq 15.4\ \text{mm}$$，最大變形 15.4 mm 檢核通過。

第五節 扣件之耐風分析及檢核

扣件接合設計時，在實務上構件有接合的地方都需要檢核，除了考量螺栓本身可能發生的拉力破壞、剪力破壞、拉剪聯合破壞及承壓破壞等破壞模式，接合處的扣具及構件的破壞模式也須考慮，包括總斷面破壞、淨斷面破壞及塊狀剪力撕裂等。另外，若有進行銲接接合，銲材所承受之應力值也應符合容許應力範圍，使接合處強度滿足要求。本手冊僅示範螺栓拉力破壞及剪力破壞之檢核。

本例扣件之設計同樣使用容許應力法，參考「鋼結構容許應力設計法規範及解說」(2010)之規定，考慮載重組合$D \pm 0.9375\,W$、$0.7D \pm 1.25W$，此外對於接合點之偏心問題亦應適當考量。根據臺中市結構工程技師公會在 108 年編寫「太陽光電系統支撐架結構設計參考手冊草案(修訂版)」之 4.3 螺栓接合內容所述，使用熱軋型鋼構材並採容許應力設計法分析設計者，可參考「鋼結構容許應力設計法規範及解說」(2010)第 10.3 節進行檢核；使用冷軋型鋼構材者，可參考「冷軋型鋼構造建築物結構設計規範及解說」(2016)第 11.3 節及第 11.5 節進行檢核。

本範例針對螺栓拉力破壞、剪力破壞及拉剪聯合破壞以「鋼結構容許應力設計法規範及解說」 (2010)之規定進行螺栓：螺栓容許剪應力F_v及螺栓容許張應力 F_T可參考鋼結構容許應力設計 10.3 節得知，若螺栓承受拉力及剪力同時作用時，其標稱斷面 A_b上之應力需再按規定折減。

壹、面板接橫梁之扣件

面板接橫梁扣件 j 如圖 6-29 所示，兩片模組以中壓塊連接於下方橫梁上，中壓塊使用 A2-70 M8 螺栓鎖在橫梁上。

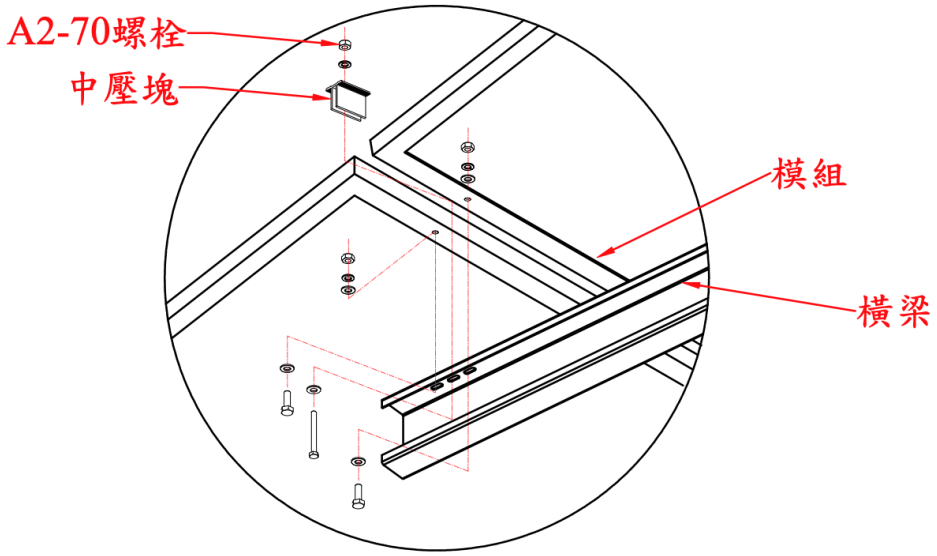


圖 6-29 地面單斜式棚架型系統之面板接橫梁扣件接合圖

資料來源：修改自[15]

螺栓拉力分析

風載重採用表 6-5 中面板接橫梁扣件 j 之設計正風力77.40 kgf，方向垂直指向面板上表面，對此螺栓而言為壓力；設計負風力73.27 kgf，方向垂直遠離面板上表面，對此螺栓而言為拉力；靜載重為所承受風壓面積中的模組自重，每塊 20kgf，故單一螺栓所承擔之靜載重為 20kgf/4 × 2 = 10 kgf，方向垂直指向地面。

在載重組合0.7D − 1.25W下可對螺栓造成最大軸拉力84.69 kgf，此時造成的剪力為1.22 kgf。

螺栓應力檢核

因為在「鋼結構容許應力設計法規範及解說」(2010)和「冷軋型鋼構造建築物結構設計規範及解說」(2016)中都沒有不鏽鋼螺栓的標稱拉力及剪力強度，故參考 CNS 4234-1「不鏽鋼結件之機械性質－第 1 部：螺栓、螺釘及螺樁」得 A2-70 的抗拉強度為$F_u = 700MPa$、降伏強度$F_y = 450\ MPa$，以及 M8 螺栓標稱

應力面積 $A = 39.2\ mm^2$，並配合「鋼結構容許應力設計法規範及解說」(2010)的表 10.3-2「螺栓及螺牙桿件之容許應力」求得其容許張應力 $F_t = 0.33F_u = 231\ MPa$，容許剪應力 $F_v = 0.17F_u = 119Mpa$。

螺栓容許拉力 $F_T = 231\ MPa \times 39.2\ mm^2 = 923\ kgf > 84.69$ kgf，檢核通過。螺栓容許剪力 $F_S = 231\ MPa \times 39.2\ mm^2 = 4665\ N > 1.22$ kgf，檢核通過。

其它檢核

另外因接合之中壓塊厚度較薄，容易產生破壞，建議中壓塊之檢核全斷面降伏、淨斷面撕裂、塊狀剪裂等。

貳、橫梁接縱梁之扣件

橫梁接縱梁扣件如圖 6-30 所示，假設橫梁以扣件連接於下方縱梁上。所謂扣件包括角鋼及螺栓，橫梁以螺栓 A、B、C、D 固定於角鋼上，角鋼再以螺栓 E、F 固定於縱梁上，其中螺栓為 F10T-M10，角鋼為 L*100mm*75mm*7mm。

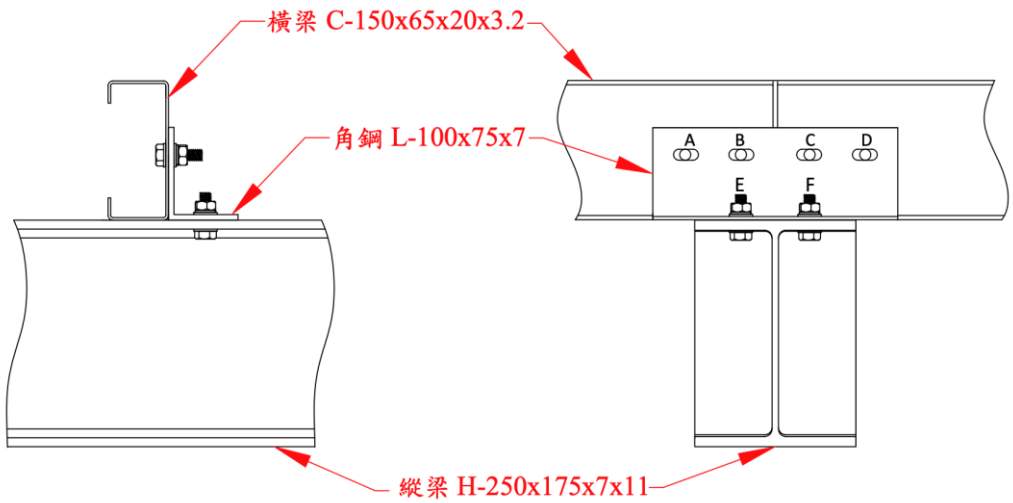


圖 6-30 地面單斜式棚架型系統之橫梁接縱梁扣件接合圖

資料來源：修改自[15]

螺栓分析

風載重採用表 6-5 中橫梁接縱梁扣件 c 之設計正風力 $206.39\ kgf$，方向垂直指向面板上表面，對螺栓 A 而言為剪力，對螺栓 E 而言為壓力；設計負風力 $194.00\ kgf$，方向垂直遠離面板上表面，對螺栓 A 而言為拉力，對螺栓 E 而言為壓力；靜載重為所承受風壓面積中的模組及橫梁自重，故單一扣件所承擔之

淨載重為 70 kgf，方向垂直指向地面。

在載重組合$0.7D + 1.25W$下會造成傳進此扣件的最大軸壓力306.27 kgf，此時剪力為 8.51 kgf。力量由螺栓 A、B、C、D 傳入，對螺栓 A 造成的拉力為 2.13 kgf、剪力為 76.57 kgf；之後載重傳至螺栓 E、F，對螺栓 E 造成的壓力為 153.14 kgf、剪力為 4.26 kgf。

在載重組合$0.7D - 1.25W$下會造成傳進此扣件的最大軸拉力194.22 kgf，此時剪力為 8.51 kgf。力量由螺栓 A、B、C、D 傳入，對螺栓 A 造成的拉力為 2.13 kgf、剪力為 48.56 kgf；之後載重傳至螺栓 E、F，對螺栓 E 造成的拉力為 98.11 kgf、剪力為 4.26 kgf。

螺栓 A 剪力檢核

根據「鋼結構容許應力設計法規範及解說」(2010)的表 10.3-2「螺栓及螺牙桿件之容許應力」，F10T 之容許剪應力 $F_v = 1.87\ tf/cm^2$。M10 螺栓標稱應力面積 $A = 61.2\ mm^2$。螺栓容許剪力 $F_S = 1.87\ tf/cm^2 \times 61.2\ mm^2 = 1144\ kgf > 76.57$ kgf，檢核通過。

螺栓 E 拉力檢核

根據「鋼結構容許應力設計法規範及解說」(2010)的表 10.3-2「螺栓及螺牙桿件之容許應力」，F10T 之容許張應力$F_t = 3.62\ tf/cm^2$。M10 螺栓標稱應力面積 $A = 61.2\ mm^2$。螺栓容許拉力 $F_T = 3.62\ tf/cm^2 \times 61.2\ mm^2 = 2215 kgf > 98.11$ kgf，檢核通過。

參、縱梁接柱之扣件

縱梁接柱扣件如圖 6-31 所示，假設縱梁以扣件連接於下方柱上。所謂扣件包括螺栓及柱頂板，縱梁以六個螺栓固定於柱頂板上，柱頂板與柱銲接固定，其中螺栓為 F10T-M10，柱頂板尺寸為 280mm*125mm*10 mm。

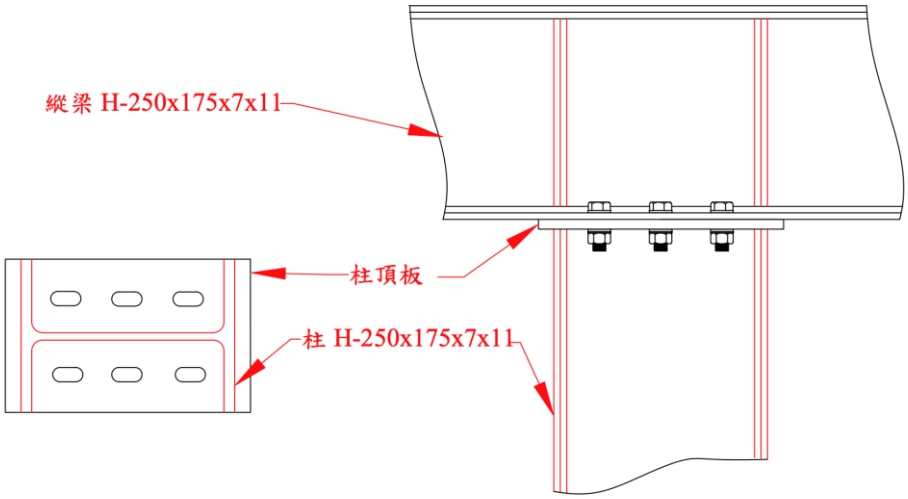


圖 6-31 地面單斜式棚架型系統之縱梁接柱扣件接合圖

資料來源：修改自[15]

螺栓分析

風載重採用表 6-5 中面縱梁接柱扣件的設計正風力619.16 kgf ，方向垂直指向面板上表面，對螺栓而言為壓力；設計負風力582.01 kgf，方向垂直遠離面板上表面，對螺栓而言為拉力；靜載重為所承受風壓面積中模組及橫梁、縱梁的自重，故單一螺栓所承擔之靜載重為 273.76 kgf，方向垂直指向地面。

在載重組合0.7D − 1.25W下會造成傳進此扣件的最大軸拉力538.80 kgf，此時造成的剪力為33.28 kgf。對單一螺栓造成的拉力為89.80 kgf，剪力為5.54 kgf。

螺栓應力檢核

根據「鋼結構容許應力設計法規範及解說」(2010)的表 10.3-2「螺栓及螺牙桿件之容許應力」，F10T 之容許張應力$F_t = 3.62\ tf/cm^2$。M10 螺栓標稱應力面積 $A = 61.2\ mm^2$ 。螺栓容許拉力 $F_T = 3.62\ tf/cm^2 \times 61.2\ mm^2 = 2215 kgf > 89.80\ kgf$，檢核通過。

肆、柱接基座之扣件

柱接基座扣件如圖 6-32 所示，柱接基座扣件假設柱以扣件連接於下方基座。所謂扣件包括化學錨栓及柱底板，將柱與柱底板銲接固定，並將其用化學錨栓將柱底板與基座混凝土相接。

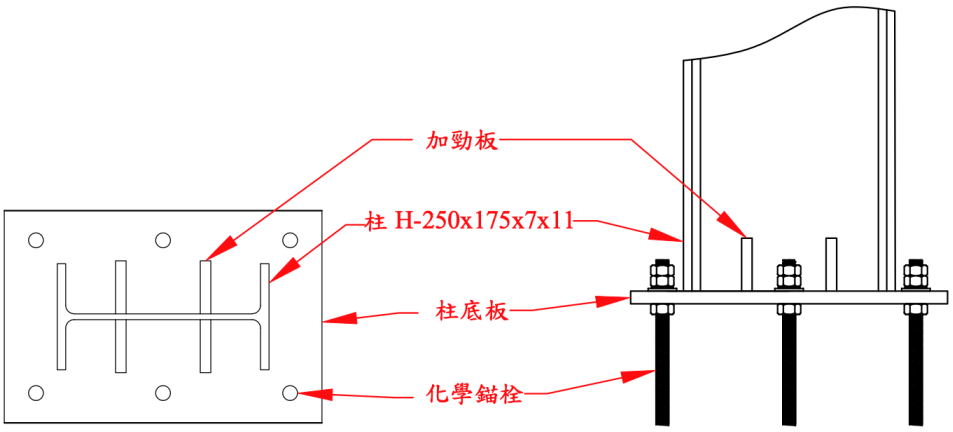


圖 6-32 地面單斜式棚架型系統之柱接基座扣件接合圖

資料來源：修改自[15]

基座分析

基座承受支撐柱所受風力及自重。其中面板傳遞至支撐柱之設計風壓，一樣建議取用擬議新版「建築物耐風設計規範與解說」之主要構件風壓公式計算結果進行檢核。可得載重組合 $0.7D + 1.25W$（風相角0°、載重類別 B）下會對一基座造成最大軸拉力 319.03 kgf，此時剪力為98.32 kgf；$0.7D + 1.25W$（風相角 180°、載重類別 A）下會對一基座造成最大軸壓力925.57 kgf，此時剪力為145.63 kgf。

錨栓檢核

混凝土基座之錨栓可依「建築物混凝土結構設計規範」(2023)進行檢核，確認錨栓及混凝土的強度皆足夠。

原地面檢核

另外需檢核最後力量傳遞到下方基礎時承載力是否足夠，確保在拉拔力下不會造成原有地面的破壞。

第七章　平屋頂單斜式棚架型系統之耐風設計（示範例 5）

本章所稱平屋頂單斜式棚架型系統安裝於封閉式建築或部分封閉式建築之平屋頂，含支撐柱且棚架至少有兩個側面各有 80%以上面積為開口（如圖 2-5 所示）。耐風設計的主要目的是確保支撐架在強風環境下能夠維持結構完整性和安全性，而實務上在進行支撐架設計時，尚需考慮不同的載重組合情況，例如靜載重、風載重及地震力之效應，但本示範例只考慮靜載重及風載重之效應。

本示範例先規劃一平屋頂單斜式棚架型系統，由於 CNS 16819「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022)中未提供平屋頂單斜式棚架型系統的風載重計算方式，故依據建研所委託研究計劃「太陽光電系統之耐風設計規範研擬」成果報告(2019)擬定風載重計算方式，考慮風載重及靜載重作相關之結構設計。本示範例設計流程圖如圖 7-1 所示。

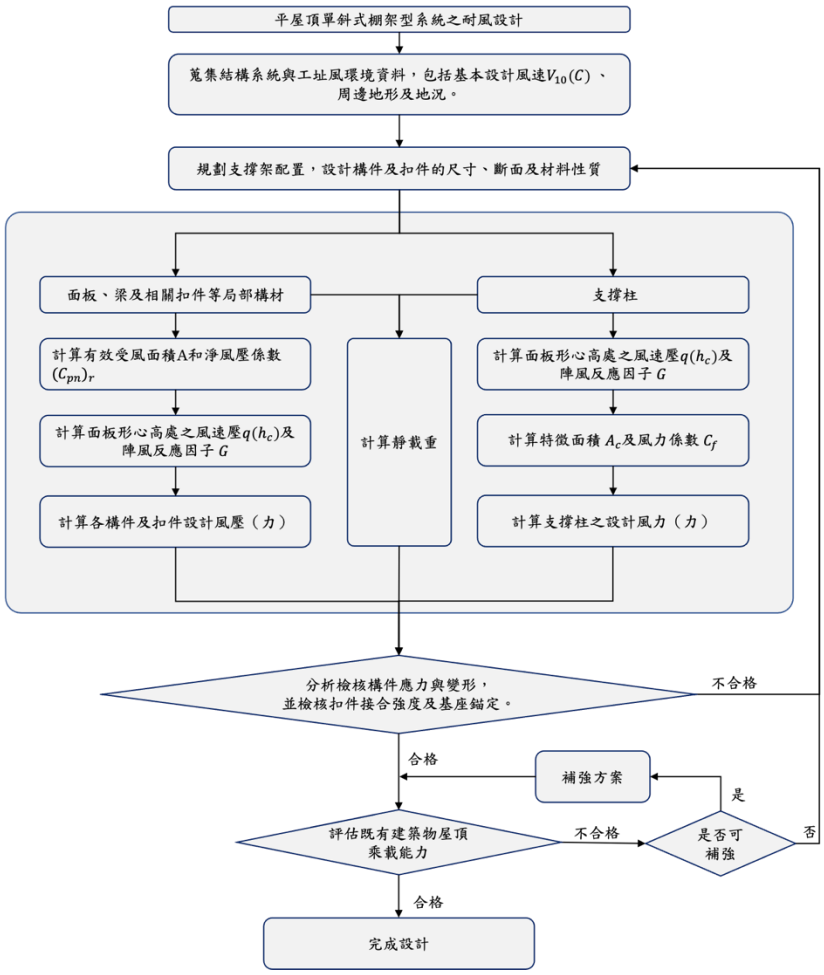


圖 7-1 平屋頂單斜式棚架型系統之耐風設計流程圖

資料來源：本研究整理

第一節　設計依據

壹、參考依據

1. 內政部，「建築技術規則建築設計施工編」，2004。
2. 內政部，「鋼結構容許應力設計法規範及解說」，2010。
3. 內政部，「建築物耐風設計規範與解說」，2014。
4. 內政部，「冷軋型鋼構造建築物結構設計規範及解說」，2016。
5. 內政部，「建築物混凝土結構設計規範」，2023。
6. 內政部建研所，「太陽光電系統之耐風設計規範研擬」，委託研究計劃成果報告，2019。
7. 經濟部，CNS 4234-1「不鏽鋼結件之機械性質－第 1 部：螺栓、螺釘及螺樁」，2012。

貳、適用範圍

「太陽光電系統之耐風設計規範研擬」成果報告(2019)提供之風壓計算公式適用於同時滿足下列條件之平屋頂單斜式棚架系統：

1. 平屋頂單斜式棚架型系統其需滿足「建築物耐風設計規範與解說」(2014)所定義之封閉式或部分封閉式建築物。
2. 構造物橫風向或扭轉向風力不顯著。
3. 棚架至少有兩個側面各有 80%以上面積為開口。
4. 棚架面之水平投影未超出屋頂面邊緣。

第二節　結構物資料與工址風環境料

本章擬於台中市大甲區一建築物的屋頂上，新建一平屋頂單斜式棚架型太陽光電系統。整體場域之結構系統立體配置圖如圖 7-2 所示。

結構系統平行面板之平面圖如圖 7-3 所示；y向之側視圖如圖 7-4 所示；x向之側視圖如圖 7-5 所示；y向之示意圖如圖 7-6 所示。結構系統之面板由 27 片模組組成，以 60 個扣件分別固定於 6 根橫梁上，每根橫梁分別以 3 個扣件固定於下方縱梁上，每根縱梁分別 2 個扣件固定於下方 2 根柱子上，每根柱子固定於混凝土基座上。

根據「設置再生能源設施免請領雜項執照標準」(2021)，設置於建築物屋頂或露臺，包含支撐架並得結合新設頂蓋，其高度自屋頂面或露臺面起算四點五公尺以下之太陽光電發電設備，得免依建築法規定申請雜項執照。本示範立假設之面板與屋頂面最大距離 $h_2 = 3.561\ m$。

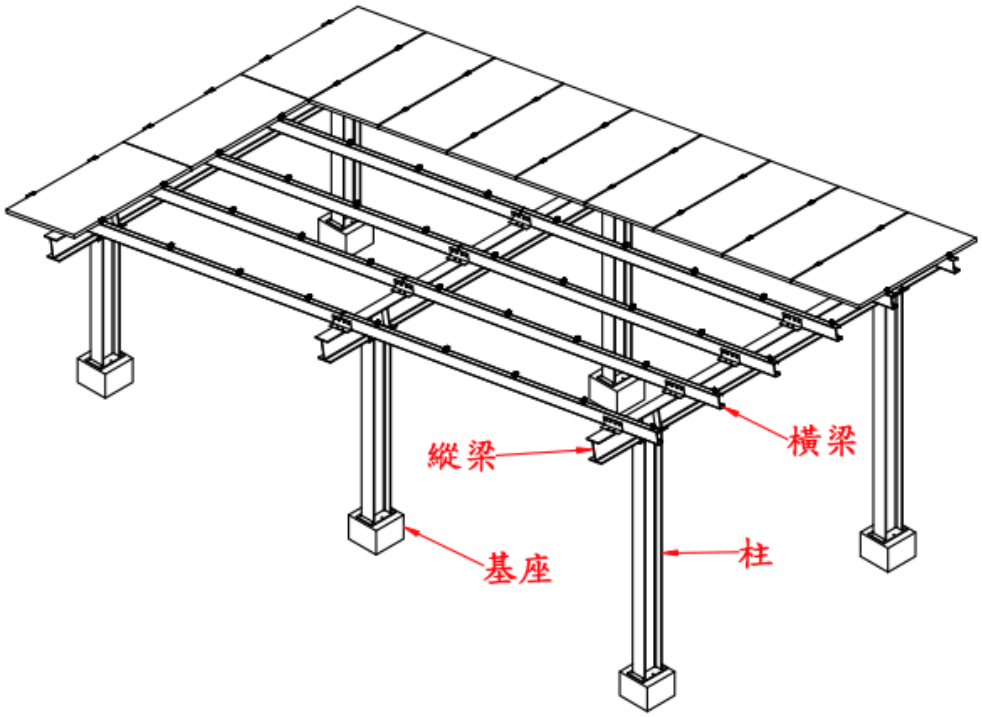


圖 7-2 平屋頂單斜式棚架型系統之立體配置圖

資料來源：修改自 [15]

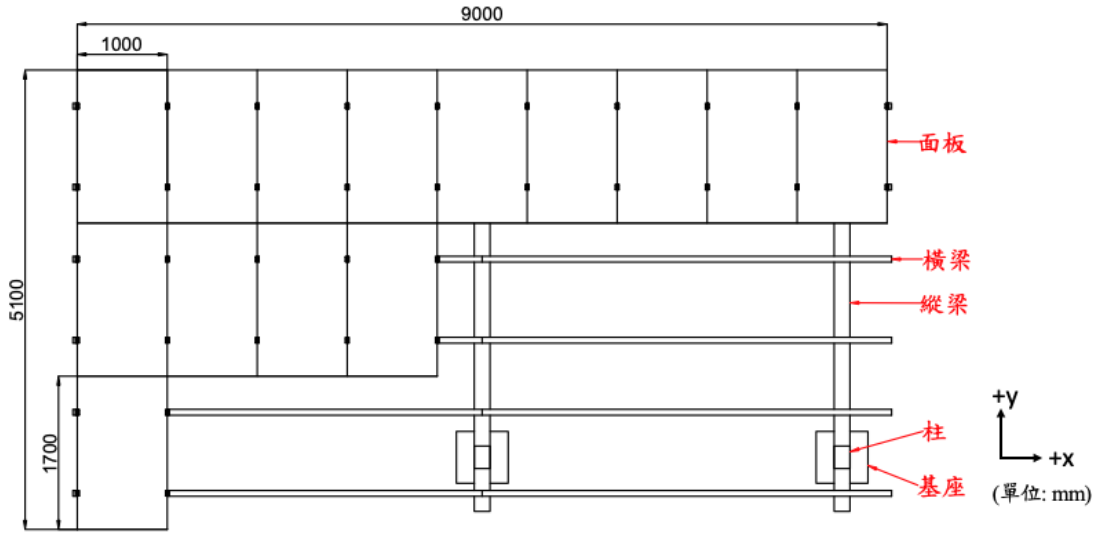


圖 7-3 平屋頂單斜式棚架型系統之平行面板之平面圖

資料來源：本研究整理

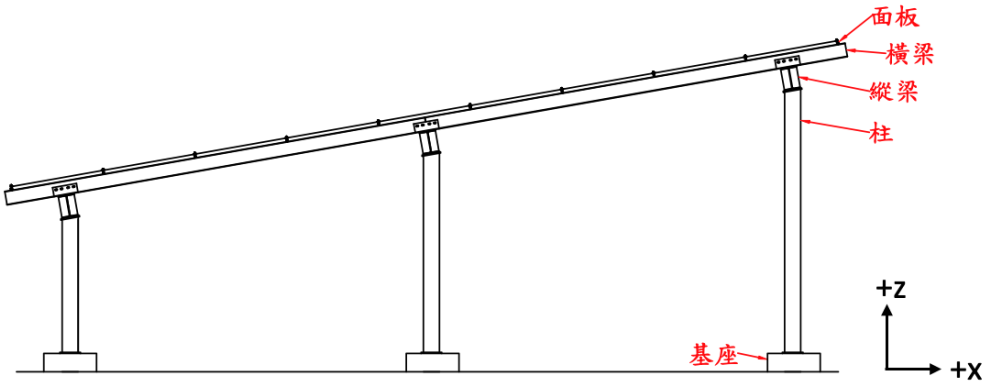


圖 7-4 平屋頂單斜式棚架型系統 y 向之側視圖

資料來源：修改自 [15]

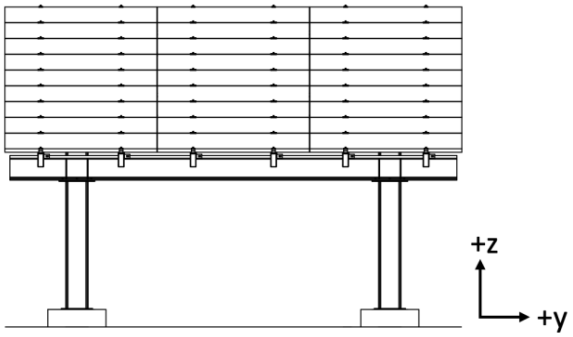


圖 7-5 平屋頂單斜式棚架型系統 x 向之側視圖

資料來源：修改自 [15]

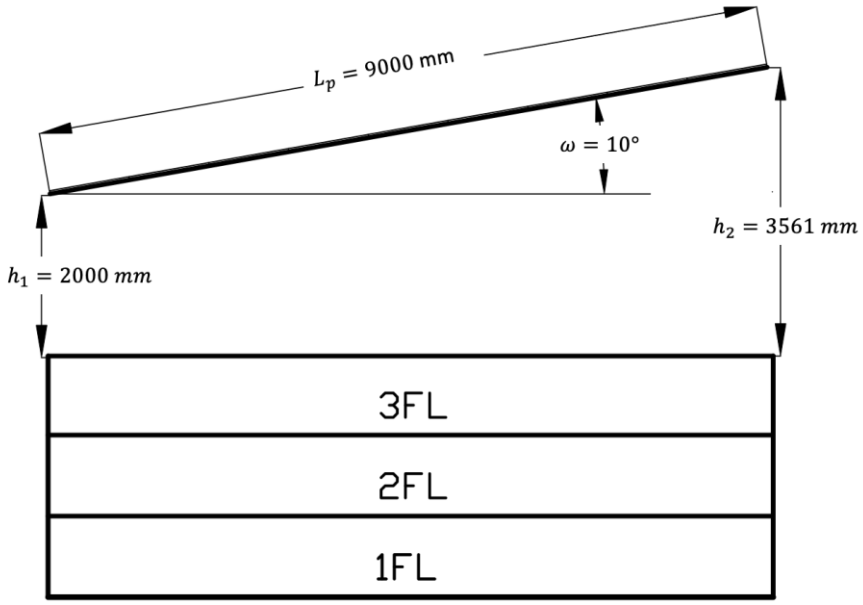
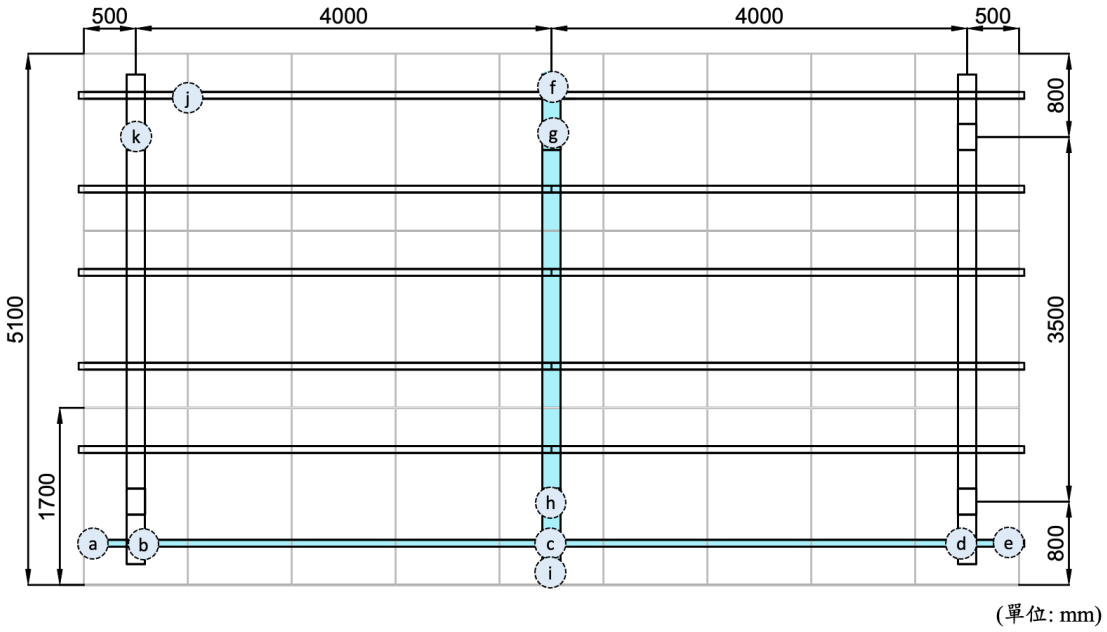


圖 7-6 平屋頂單斜式棚架型系統 y 向之示意圖

資料來源：本研究整理

理論上應根據各構件及扣件所承受的風壓情況，分別進行其設計，但由於設計程序類似，本範例僅分析設計圖 7-7 之橫梁 a-b-c-d-e、縱梁 f-g-h-i、g 點下方柱、k 點下方柱、面板接橫梁扣件（其形心為 j 點）、橫梁接縱梁扣件（其形心為 c 點）、縱梁接柱扣件（其形心為 g 點）、縱梁接柱扣件（其形心為 k 點）。



(單位: mm)

圖 7-7 平屋頂單斜式棚架型系統之設計位置圖

資料來源：本研究整理

結構物資料包含太陽光電系統尺寸、面板配置、用途係數 I；工址風環境包含基本設計風速$V_{10}(C)$、結構物周邊地形以及地況。本節擬定結構物資料與工址風環境如下表 7-1 所示。

表 7-1 平屋頂單斜式棚架系統之結構物資料與工址風環境

結構物資料	所在建築物	建築物屋頂高度（不含屋頂凸出物）10 m，有女兒牆。
	太陽光電系統	面板由 27 片模組組成，以 60 個扣件分別固定於 6 根橫梁上，每根橫梁分別以 3 個扣件固定於下方縱梁上，每根縱梁分別 2 個扣件固定於下方 2 根柱子上，每根柱子固定於混凝土基座上。
	基本尺寸設置	1. 面板弦長 $L_p = 9\ m$ 2. 模組角度 $\omega = 10°$。 3. 面板與屋頂面最小距離 $h_1 = 2.0\ m$。 4. 面板與屋頂面最大距離 $h_2 = 3.561\ m$。 5. 模組尺寸：1700 mm × 1000 mm × 40 mm 模組重$20kgf = 196N$，共 27 片 。
	下方阻擋	單斜式棚架下方阻塞比低於 50%，視為無阻擋。
	用途係數	根據「建築物耐風設計規範與解說」規範 2.5 節，依照重要程度可將 I 值分為1.1、1.0或 0.9，本範例取 I = 1.0。
工址風環境	基本設計風速$V_{10}(C)$	根據「建築物耐風設計規範與解說」規範 2.4 節，台中市大甲區的$V_{10}(C) = 32.5\ m/s$。
	地況種類	依結構物各方向上風處之地表粗糙度決定皆為地況 B。
	地形係數	無特殊地形。

資料來源：本研究整理

第三節 各構件及扣件之設計風壓（力）

本示範例中橫梁、縱梁與相關扣件之設計風壓，以及從面板傳至支撐柱的設計風壓，皆以「太陽光電系統之耐風設計規範研擬」成果報告(2019)中平屋頂單斜式棚架型之設計風壓公式計算。

平屋頂單斜式棚架型系統之設計風壓可依 $P = q(h_c) \times G \times (C_{pn})_r \times (\gamma_p)_c$ 計算，其中$q(h_c)$為面板形心高h_c處之風速壓；G 為陣風反應因子；$(C_{pn})_r$為平屋頂單斜式棚架淨風壓係數，可查成果報告的附表 7-6 而得；$(\gamma_p)_c$為女兒牆修正因子，當決定正設計風壓時，$(\gamma_p)_c$取 0.9；當決定負設計風壓時，$(\gamma_p)_c$取 1。其計算細節列於本節第壹與第貳小節。

支撐柱本身側向之設計風力應依據「建築物耐風設計規範及解說」(2014) 2.2 節中開放式建築物之公式決定，其計算細節列於本節第參小節。

實際上可將平屋頂單斜式棚架之支撐柱視為主要風力抵抗系統，但目前仍欠缺相關之風壓(力)之計算方式。「建築物耐風設計規範及解說」(2014)中表 2.9「開放式建築物之單斜式屋頂的風力係數」及擬議新版「建築物耐風設計規範與解說」中表 3.8 (a)「開放式建築物之單斜屋頂的淨風壓係數」雖是針對地面單斜式棚架支撐柱之規定，但本示範例為了參考比較，也以其公式估算從面板傳至平屋頂單斜式棚架支撐柱的設計風壓，其計算細節列於本節第肆小節。

壹、各構件及扣件之有效受風面積及淨風壓係數

根據「建築物耐風設計規範及解說」(2014) 1.3 節有效受風面積 A 之定義可知，結構構件之有效受風面積 A 為跨距長度與有效寬度之乘積，有效寬度不必小於其跨距長度的 1/3。對扣件而言，有效受風面積 A 不得大於單一扣件之受風面積。決定有效受風面積及計算平屋頂單斜式棚架淨風壓係數方式如下：

[步驟 1] 有效受風面積

(a) 橫梁 a-b-c-d-e：

如圖 7-8 所示，將面板所承受風力傳遞至橫梁 a-b-c-d-e 上，且橫梁架設在間距為 4 m 的縱梁上，分別以 a-b 段、b-c 段、c-d 段及 d-e 段表示。

針對 a-b 段橫梁，其跨距長度為懸臂段長度 0.5 m，承受風壓面積之寬度為 0.85 m，故承受風壓面積為$0.50\ \text{m} \times 0.85\ \text{m} = 0.425\ \text{m}^2$。a-b 段橫梁之有效寬度為 $\max(0.85, 0.50/3) = 0.85\ \text{m}$，故其有效受風面積為 $A = 0.50\ \text{m} \times 0.85\ \text{m} = 0.425\ \text{m}^2$。同理，d-e 段橫梁之承受風壓面積為$0.425\ \text{m}^2$，有效受風面積亦為$0.425\ \text{m}^2$。

針對 b-c 段橫梁，跨距長度為縱梁間距 4.0 m，承受風壓面積之寬度為 0.85 m，故承受風壓面積為$4.0\ \text{m} \times 0.85\ \text{m} = 3.4\ \text{m}^2$。b-c 段橫梁之有效寬度為 $\max(0.85, 4.00/3) = 1.33\ \text{m}$，故其有效受風面積為 $A = 1.33\ \text{m} \times 0.85\ \text{m} = 5.333\ \text{m}^2$。同理，c-d 段橫梁之承受風壓面積為$3.4\ \text{m}^2$，有效受風面積為$5.333\ \text{m}^2$。

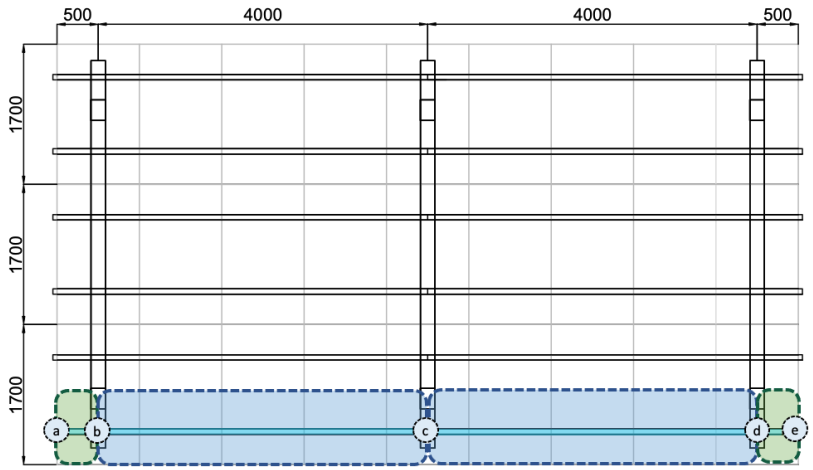


圖 7-8 示範例 5 之橫梁 a-b-c-d-e 有效受風面積示意圖

資料來源：本研究整理

(b)　縱梁 f-g-h-i：

如圖 7-9 所示，將橫梁所承受風力傳遞至縱梁 f-g-h-i 上，且縱梁架設在間距為 3.5 m 的柱上，分別以 f-g 段、g-h 段及 h-i 段表示。

針對 f-g 段縱梁，其跨距長度為懸臂段長度 0.8 m，承受風壓面積之寬度為 4.0 m，故承受風壓面積為$0.8\ \text{m} \times 4.0\ \text{m} = 3.20\ \text{m}^2$。f-g 段橫梁之有效寬度為$\max(4.0, 0.8/3) = 4.0\ \text{m}$，故其有效受風面積為$0.8\ \text{m} \times 4.0\ \text{m} = 3.20\ \text{m}^2$。同理，h-i 段縱梁之承受風壓面積為$3.20\ \text{m}^2$，有效受風面積亦為$3.20\ \text{m}^2$。

針對 g-h 段縱梁，其跨距長度為縱梁間距 3.5 m，承受風壓面積之寬度為 4.0 m，故承受風壓面積為$3.5\ \text{m} \times 4.0\ \text{m} = 14.00\ \text{m}^2$。b-c 段橫梁之有效寬度為 $\max(4.0, 3.5/3) = 4.0\ \text{m}$，故其有效受風面積為$3.5\ \text{m} \times 4.0\ \text{m} = 14.00\ \text{m}^2$。

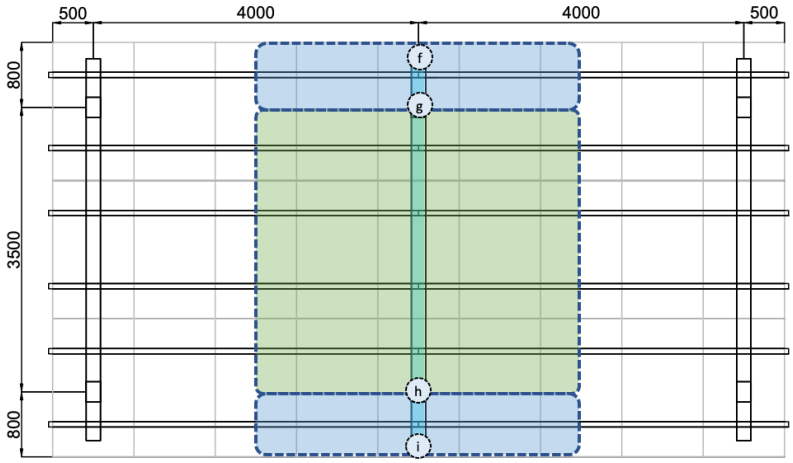


圖 7-9 示範例 5 之縱梁 f-g-h-i 有效受風面積示意圖

資料來源：本研究整理

(c)　g 點下方柱：

如圖 7-10 所示，中間縱梁架設在 g 點及 h 點的縱梁接柱扣件上。

針對 g 點下方柱，其跨距長度為 2.55 m，寬度為 4 m，其承受風壓面積為$2.55\ \text{m} \times 4\ \text{m} = 10.2\ \text{m}^2$。g 點下方柱之有效寬度為$\max(4.0, 2.55/3) = 4.0\ \text{m}$，故其有效受風面積為$2.55\ \text{m} \times 4\ \text{m} = 10.2\ \text{m}^2$。同理，h 點下方柱之承受風壓面積為$10.2\ \text{m}^2$，有效受風面積亦為$10.2\ \text{m}^2$。

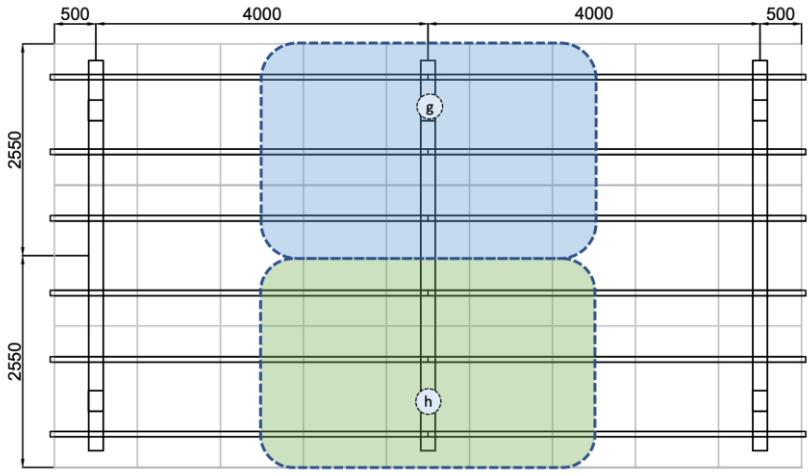


圖 7-10 示範例 5 之 g 點下方柱有效受風面積示意圖

資料來源：本研究整理

(d) k 點下方柱：

如圖 7-11 所示，兩旁縱梁架設在柱 k 點、l 點、m 點及 n 點的縱梁接柱扣件上。

針對 k 點下方柱，其跨距長度為 2.55 m，寬度為 2.50 m，其承受風壓面積為 $2.55\,\text{m} \times 2.5\,\text{m} = 6.375\,\text{m}^2$。k 點下方柱之有效寬度為 $\max(2.50, 2.55/3) = 2.5\,\text{m}$，故其有效受風面積為 $2.55\,\text{m} \times 2.5\,\text{m} = 6.375\,\text{m}^2$。同理，l 點下方柱、m 點下方柱及 n 點下方柱之承受風壓面積為 $6.375\,\text{m}^2$，有效受風面積亦為 $6.375\,\text{m}^2$。

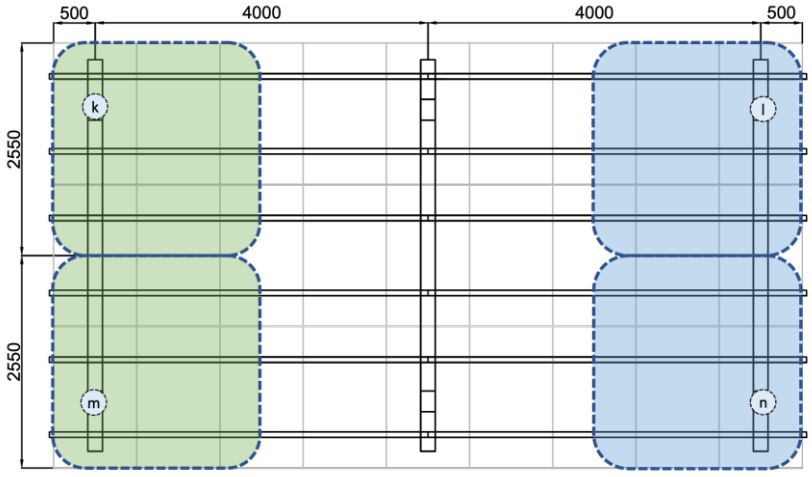


圖 7-11 示範例 5 之 k 點下方柱有效受風面積示意圖

資料來源：本研究整理

(e)　面板接橫梁扣件 j 點：

如圖 7-12 所示，單一模組尺寸為1.0 m × 1.7 m，並由四個扣件固定，取 j 點面板接橫梁扣件分析，因扣件之有效受風面積不得大於其承受風壓面積，故其有效受風面積為承受風壓面積$A = 1.0\ m \times 0.85\ m = 0.85\ m^2$。

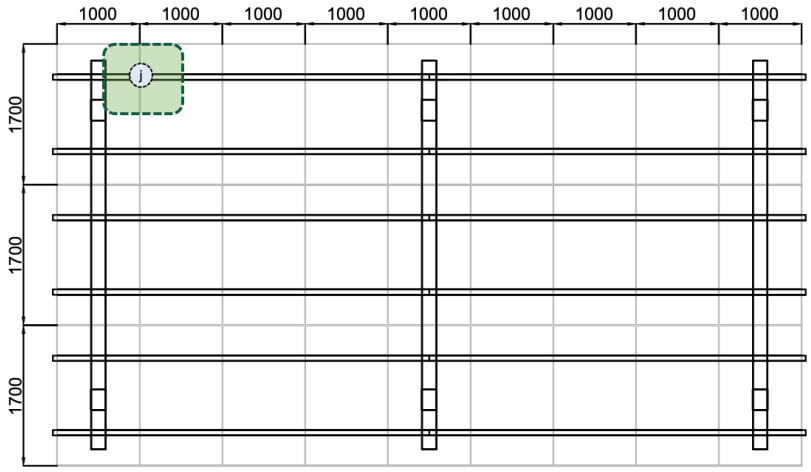


圖 7-12 示範例 5 之面板接橫梁扣件 j 點有效受風面積示意圖

資料來源：本研究整理

(f)　橫梁接縱梁扣件 c 點：

如圖 7-13 所示，橫梁架設在縱梁 b、c、d 點的橫梁扣件上。取 c 點橫梁接縱梁扣件分析，因扣件之有效受風面積不得大於其承受風壓面積，故其有效受風面積為承受風壓面積$A = 4\ m \times 0.85\ m = 3.4\ m^2$。

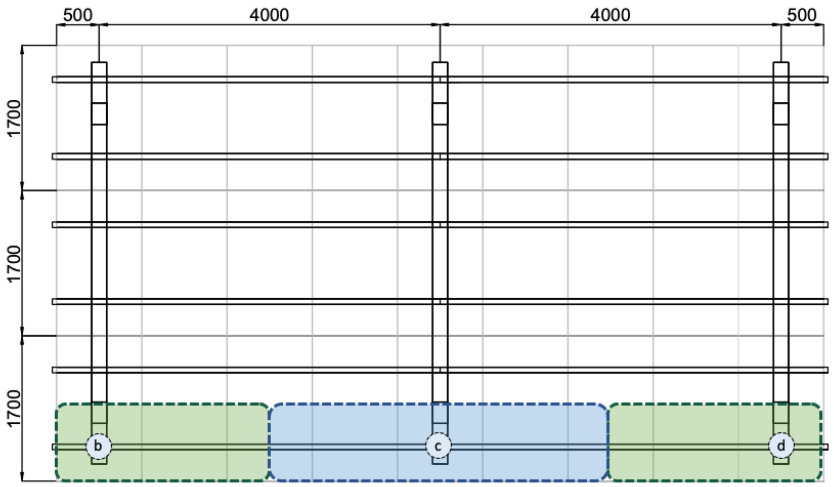


圖 7-13 示範例 5 之橫梁接縱梁扣件 c 點有效受風面積示意圖

資料來源：本研究整理

(g) 縱梁接柱扣件 g 點：

如圖 7-14 所示，縱梁架設在柱 g 點及 h 點的縱梁接柱扣件上。針對 g 點縱梁接柱扣件分析。因扣件之有效受風面積不得大於其承受風壓面積，故其有效受風面積為承受風壓面積$\mathrm{A} = 2.55\ \mathrm{m} \times 4\ \mathrm{m} = 10.2\ \mathrm{m}^2$。

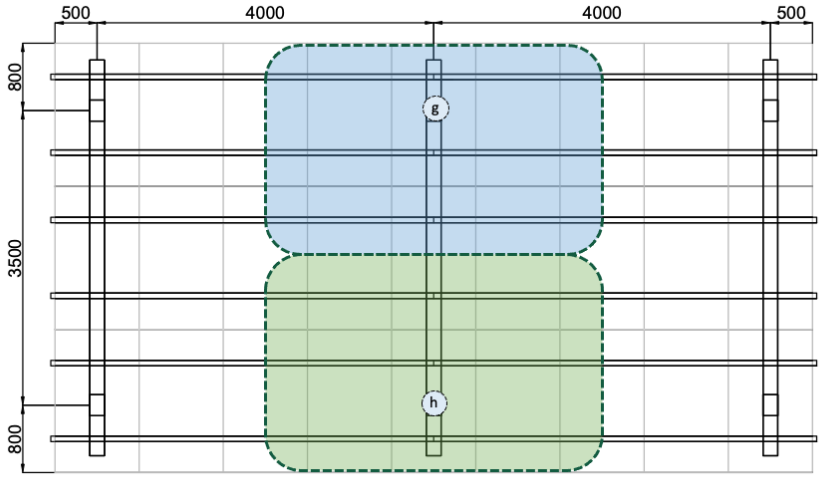


圖 7-14 示範例 5 之縱梁接柱扣件 g 點有效受風面積示意圖

資料來源：本研究整理

[步驟 2] 平屋頂單斜式棚架淨風壓係數

根據「太陽光電系統之耐風設計規範研擬」成果報告(2019)，如圖 7-15 所示將面板分為區域 3、區域 2、區域 1，區域內平屋頂單斜式棚架淨風壓係數$(C_{pn})_r$可根據表 7-2 對照有效受風面積決定。其中 L 為順風向之建築物水平深度為$9.0 \times \cos 10^{\circ} = 8.863\ m$。a 為最小寬度的 10%，但不得小於 0.9 m，$a = \max\{0.1 \times 5.1\ m, 0.9m\} = 0.9\ m$。

本示範例之$\omega = 10^{\circ}$，對照有效受風面積 A 可得各構件及扣件位在區域 3、區域2、區域1內的$(C_{pn})_r$之值。面板接橫梁扣件j的有效受風面積為$0.850m^2$，$\mathrm{a}^2 < A \leq 4\mathrm{a}^2$，對照表 7-2 可得區域 3 的$(C_{pn})_r$ 為 0.67 和 -2.44，區域 2 的$(C_{pn})_r$為 0.66 和 -1.73，區域 1 的$(C_{pn})_r$ 為 0.72 和 -1.18。仿照上述面板接橫梁扣件 j 點淨風壓係數的求法，可得其餘構件與扣件的平屋頂單斜式棚架淨風壓係數，彙整後將其列於表 7-3。

表 7-2 平屋頂單斜式棚架型之淨風壓係數表

	有效受風面積(m^2)	$(C_{pn})_r$											
		屋頂下無阻擋						屋頂下有阻擋					
		區域 3		區域 2		區域 1		區域 3		區域 2		區域 1	
10°	$<a^2$	1.01	-3.86	0.74	-1.91	0.73	-1.28	0.74	-4.33	0.58	-2.14	0.75	-1.50
	$>a^2, \leqq 4.0a^2$	0.67	-2.44	0.66	-1.73	0.72	-1.18	0.48	-2.75	0.54	-1.94	0.76	-1.41
	$>4.0a^2$	0.56	-2.00	0.55	-1.45	0.67	-1.06	0.42	-2.24	0.44	-1.62	0.67	-1.22
15°	$<a^2$	1.86	-4.51	1.20	-2.24	0.84	-1.57	--	--	--	--	--	--
	$>a^2, \leqq 4.0a^2$	1.23	-2.74	1.07	-1.96	0.83	-1.45	--	--	--	--	--	--
	$>4.0a^2$	0.99	-2.34	0.87	-1.70	0.72	-1.29	--	--	--	--	--	--
20°	$<a^2$	2.39	-4.86	1.54	-2.47	1.08	-1.78	--	--	--	--	--	--
	$>a^2, \leqq 4.0a^2$	1.58	-2.95	1.37	-2.16	1.06	-1.61	--	--	--	--	--	--
	$>4.0a^2$	1.21	-2.41	1.07	-1.86	0.82	-1.46	--	--	--	--	--	--
25°	$<a^2$	2.75	-5.22	1.78	-2.75	1.22	-2.04	--	--	--	--	--	--
	$>a^2, \leqq 4.0a^2$	1.82	-3.02	1.59	-2.31	1.20	-1.77	--	--	--	--	--	--
	$>4.0a^2$	1.31	-2.59	1.18	-2.07	0.87	-1.67	--	--	--	--	--	--

資料來源：「太陽光電系統之耐風設計規範研擬」成果報告(2019) 表 7-6

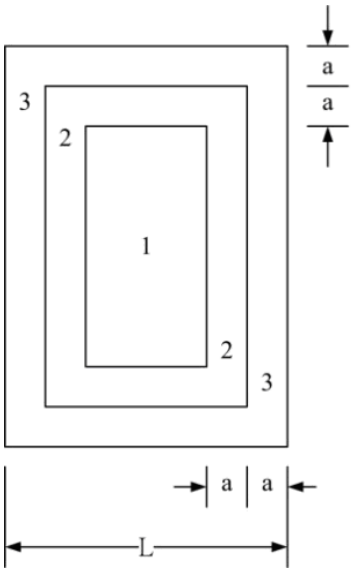


圖 7-15 單斜屋頂區域劃分示意圖

資料來源：「建築物耐風設計規範與解說」(2014) 圖 3.3(a)

表 7-3 示範例 5 構件及扣件之平屋頂單斜式棚架淨風壓係數$(C_{pn})_r$

名稱		有效受風面積 A (m^2)	區域 3		區域 2		區域 1	
橫梁	a-b 段或 d-e 段	0.425	1.01	-3.86	0.74	-1.91	0.73	-1.28
	b-c 段或 c-d 段	5.333	0.56	-2.00	0.55	-1.45	0.67	-1.06
縱梁	f-g 段或 h-i 段	3.200	0.67	-2.44	0.66	-1.73	0.72	-1.18
	g-h 段	14.000	0.56	-2.00	0.55	-1.45	0.67	-1.06
柱	g 點下方	10.200	0.56	-2.00	0.55	-1.45	0.67	-1.06
	k 點下方	6.375	0.56	-2.00	0.55	-1.45	0.67	-1.06
面板接橫梁扣件	i 點	0.850	0.67	-2.44	0.66	-1.73	0.72	-1.18
橫梁接縱梁扣件	c 點	3.400	0.56	-2.00	0.55	-1.45	0.67	-1.06
縱梁接柱扣件	g 點	10.200	0.56	-2.00	0.55	-1.45	0.67	-1.06

資料來源：本研究整理

貳、構件及扣件之設計風壓（力）

本示範例中橫梁、縱梁與相關扣件之設計風壓，以及從面板傳至支撐柱的設計風壓，皆以「太陽光電系統之耐風設計規範研擬」成果報告(2019)中平屋頂單斜式棚架型之設計風壓公式計算。

[步驟 1] 相關之設計參數

根據「建築物耐風設計規範及解說」(2014)，地況 B 之相關參數$\alpha = 0.25$；$z_g = 400\,m$，用途係數$I = 1.0$，基本設計風速$V_{10}(C) = 32.5\,m/s$。

面板形心離屋頂面高$2.781\,m$。面板形心離地面高 h_c = 建築高 10 m + 面板形心離屋頂面高 $2.781\,m = 12.781\,m$ 。

[步驟 2] 風速壓地況係數$K(z)$與地形係數

根據「建築物耐風設計規範及解說」(2014)式(2.7)：

$$K(h_c) = 2.774\left(\frac{h_c}{z_g}\right)^{2\alpha} = 2.774\left(\frac{12.781}{400}\right)^{2\times 0.25} = 0.50$$ 。

根據「建築物耐風設計規範與解說」規範式(2.8) 計算K_{zt}：因工址附近無特殊地形，$K_{zt} = 1.0$。

[步驟 3]面板形心高度之風速壓$q(h_c)$

根據「建築物耐風設計規範及解說」(2014)式(2.6)，離地面高h_c之風速壓：

$$q(h_c) = 0.06 \times K(h_c) \times K_{zt} \times [I\,V_{10}(c)]^2 = 0.06 \times 0.50 \times 1 \times (1.0 \times 32.5)^2 = 31.42\ kgf/m^2$$

[步驟 4]陣風反應因子

假設棚架之 $f_n > 1Hz$ ，為非柔性結構，故計算普通建築物之陣風反應因子 G。

根據「建築物耐風設計規範及解說」(2014)式（2.12），紊流積分尺度$L_{\bar{z}}$：

$$L_{\bar{z}} = \lambda(\bar{z}/10)^{\bar{\varepsilon}} = 98(9/10)^{0.33} = 94.651$$

其中，等效結構高度 $\bar{z} = \max(0.6h_c, z_{min}) = \max(0.6 \times 12.781, 9) = 9\,m$。

根據「建築物耐風設計規範及解說」(2014)式（2.10），紊流強度$I_{\bar{z}}$：

$I_{\bar{z}} = c(10/\bar{z})^{1/6} = 0.3(10/9)^{1/6} = 0.305$。

根據「建築物耐風設計規範及解說」(2014)式（2.11），背景反應Q：

$$Q_x = \sqrt{\frac{1}{1+0.63\left(\frac{B+h_c}{L_{\bar{z}}}\right)^{0.63}}} = \sqrt{\frac{1}{1+0.63\left(\frac{5.1+12.781}{94.651}\right)^{0.63}}} = 0.905$$

$$Q_y = \sqrt{\frac{1}{1+0.63\left(\frac{B+h_c}{L_{\bar{z}}}\right)^{0.63}}} = \sqrt{\frac{1}{1+0.63\left(\frac{8.863+12.781}{94.651}\right)^{0.63}}} = 0.895$$

其中，若來風平行 x 向，垂直於風向之面板水平尺寸 B=5.1 m，若來風平行 y 向，垂直於風向之面板水平尺寸 B=8.863m。

根據「建築物耐風設計規範及解說」(2014)式（2.9），普通建築物支陣風反應因子 G 為：

$$G_x = 1.927\left(\frac{1+1.7q_Q I_{\bar{z}} Q_x}{1+1.7q_V I_{\bar{z}}}\right) = 1.927\left(\frac{1+1.7\times 3.4\times 0.305\times 0.905}{1+1.7\times 3.4\times 0.305}\right) = 1.810$$

$$G_y = 1.927\left(\frac{1+1.7q_Q I_{\bar{z}} Q_y}{1+1.7q_V I_{\bar{z}}}\right) = 1.927\left(\frac{1+1.7\times 3.4\times 0.305\times 0.895}{1+1.7\times 3.4\times 0.305}\right) = 1.798$$

其中，背景反應尖峰因子和背景反應尖峰因子均可取 3.4，以此算出風向為 x 向時$G_x = 1.810$，風向為 y 向時$G_y = 1.798$。或者也可依據規範直接取 $G = 1.88$，計算過程會較簡單，但因包絡各種情況，所得風力值較保守。以下取 $G = G_x = 1.810$來計算。

[步驟 5]設計正負風壓與風力

根據「太陽光電系統之耐風設計規範研擬」成果報告 (2019)，平屋頂單斜式棚架型設系統中風壓依下式計算：

$$P = q(h_c) \times G \times (C_{pn})_r \times (\gamma_p)_c \quad \text{.....(7.1)}$$

其中$q(h_c)$為面板形心高h_c處之風速壓；G 為陣風反應因子；$(C_{pn})_r$為平屋頂單斜式棚架淨風壓係數；$(\gamma_p)_c$為女兒牆修正因子，由於本例有女兒牆，故計算正設計風壓時$(\gamma_p)_c$ =0.9，計算負設計風壓時女兒牆修正因子$(\gamma_p)_c$ =1.0。

舉例而言，面板接橫梁扣件的有效受風面積$A = 0.85m^2$，$a^2 < A \leq 4a^2$，

若其全位於區域 3 內，其$(C_{pn})_r$為 0.67和 -2.44，則該扣件設計正風壓為 $31.42 \times 1.810 \times 0.67 \times 0.9 = 34.29\ kgf/m^2$ ， 負 風 壓 為 $31.42 \times 1.810 \times -2.44 \times 1.0 = -138.76\ kgf/m^2$。仿照上述區域 3 的面板扣件計算流程，可分別計算得到其他扣件及構件在不同區域的設計正（負）風壓，彙整後將其數值分析結果列於表 7-4。

表 7-4 示範例 5 不同區域之設計風壓

名稱		有效受風面積 A (m^2)	設計風壓（單位 kgf/m^2）					
			區域 3		區域 2		區域 1	
橫梁	a-b 段或 d-e 段	0.425	51.70	-219.52	37.88	-108.62	37.36	-72.79
	b-c 段或 c-d 段	5.333	28.66	-113.74	28.15	-82.46	34.29	-60.28
縱梁	f-g 段或 h-i 段	3.200	34.29	-138.76	33.78	-98.39	36.85	-67.11
	g-h 段	14.000	28.66	-113.74	28.15	-82.46	34.29	-60.28
柱	g 點下方	10.200	28.66	-113.74	28.15	-82.46	34.29	-60.28
	k 點下方	6.375	28.66	-113.74	28.15	-82.46	34.29	-60.28
面板接橫梁扣件	j 點	0.850	34.29	-138.76	33.78	-98.39	36.85	-67.11
橫梁接縱梁扣件	c 點	3.400	28.66	-113.74	28.15	-82.46	34.29	-60.28
縱梁接柱扣件	g 點	10.200	28.66	-113.74	28.15	-82.46	34.29	-60.28

資料來源：本研究整理

針對面板接橫梁扣件 j，因承受風壓面積完全位於區域 3 內，故該扣件設計正（負）風壓為$34.29\ kgf/m^2$和$-138.76\ kgf/m^2$。

若扣件或構件的承受風壓面積橫跨不同區域，其設計風壓可依不同區域的面積比例加權平均計算得之。以縱梁 g-h 段為例，其橫跨區域 1、區域 2 與區域 3 區，區域 3 的設計正（負）風壓為$28.66\ kgf/m^2$和$-113.74\ kgf/m^2$，橫跨面積為$0.8\ m^2$，區域 2 的設計正（負）風壓為$28.15\ kgf/m^2$和$-82.46\ kgf/m^2$，橫跨面積為$7.2\ m^2$，區域 1 的設計正（負）風壓為$34.29\ kgf/m^2$和$-60.28\ kgf/m^2$，橫跨面積為 $6.0\ m^2$，對面積加權平均後所得風壓為 $30.81\ kgf/m^2$和-74.74 kgf/m^2。仿照上述的計算流程，分別計算其他不同構件及扣件的設計正（負）風壓，彙整所有結果並將其列於表 7-5。

設計風力為設計風壓與承受風壓面積A_{actual}的乘積。面板接橫梁扣件 j 的設設計正（負）風壓為$34.29\ kgf/m^2$和$-138.7\ kgf/m^2$，承受風壓面積為$0.85\ m^2$，故該扣件的設計正風力 $F = 34.29 \times 0.85 = 29.15\ kgf$，設計負風力為 $F = -138.7 \times 0.85 = -117.95\ kgf$。仿照上述的計算流程，分別計算其他不同扣件的設計正風力及設計負風力，彙整所有結果並將其列於表 7-5。

表 7-5 示範例 5 構件及扣件之設計風壓及風力

名稱		承受風壓面積 (m^2)	設計風壓 (kgf/m^2)		設計風力(kgf)	
			正風壓	負風壓	正風力	負風力
橫梁	a-b 段或 d-e 段	0.425	51.70	-219.52		
	b-c 段或 c-d 段	3.400	28.66	-113.74		
縱梁	f-g 段或 h-i 段	3.200	34.29	-138.76		
	g-h 段	14.000	30.81	-74.74		
柱	g 點下方	10.200	30.14	-86.98		
	k 點下方	6.375	28.94	-99.15		
面板接橫梁扣件	j 點	0.850	34.29	-138.76	29.15	-117.95
	螺栓 1 個（軸力）				29.15	-117.95
橫梁接縱梁扣件	c 點	3.400	28.66	-113.74	97.45	-386.72
	螺栓 4 個（剪力）				24.36	-96.68
	螺栓 2 個（軸力）				48.73	-193.36
縱梁接柱扣件	g 點	10.200	30.14	-86.98	307.41	-887.18
	螺栓 6 個（軸力）				51.23	-147.86

資料來源：本研究整理

參、支撐柱本身側向之設計風力

支撐柱本身之設計風力，依據「建築物耐風設計規範及解說」(2014)第 2.2 節中開放式建築物之公式決定：

$$F = q(z_{Ac}) \times G \times C_f \times A_c \quad \text{.....(7.2)}$$

其中，$q(z_{Ac})$為面積 A_c形心高度 z_{Ac}處之風速壓，z_{Ac}為面板形心離地面高 $h_c = 12.781\,m$；G 為普通建築之陣風反應因子；C_f為風力係數。

若將支撐柱視為角柱體形狀之結構物，可參照「建築物耐風設計規範及解說」(2014)中表「角柱體形狀之結構物的風力係數C_f及其修正係數 R」求得風力，但表中沒有本例支撐柱之 H 型斷面，故使用造型較接近之長方形斷面進行估算C_f，風向垂直於長方柱長邊時 $C_f = 2.2$，風向垂直於長方柱長邊時 $C_f = 1.4$。修正係數 R 與柱的高寬比$2h/D$相關，其中柱的最小水平尺寸$D = 175\text{mm}$，因為柱的 $2h/D$ 都在8~20 之間，對照可得修正係數$R = 0.8$。

如圖 7-16 所示，若來風平行 x 向，風向垂直於長方柱長邊時 $C_f = 2.2$，乘上修正係 R 可得 $C_f = 1.76$。設計風力 $F = q(h_c)GC_f\,A_c$，其中 $q(h_c) = 31.42\ kgf/m^2$，$G = 1.810$、受風作用特徵面積A_c為柱子實體構材迎風面面積，代入後可得各根柱子的設計風壓，將其結果列於表 7-6。

如圖 7-17 所示，若來風平行 y 向，風向垂直於長方柱長邊時 $C_f = 1.4$，乘上修正係 R 可得 $C_f = 1.12$。設計風力 $F = q(h_c)GC_f\,A_c$，其中 $q(h_c) = 31.42\ kgf/m^2$，$G = 1.798$、受風作用特徵面積A_c為柱子實體構材迎風面面積，代入後可得各根柱子的設計風壓，並將其列於表 7-6。

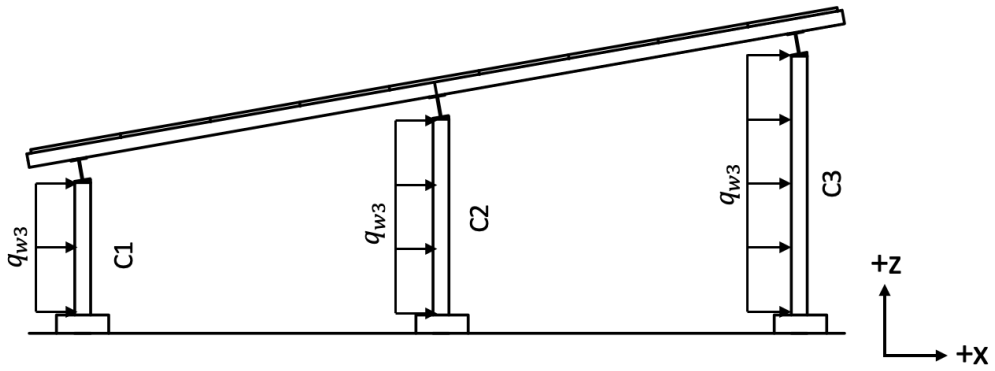


圖 7-16 示範例 5 支撐柱本身之設計風力（x 向）

資料來源：本研究整理

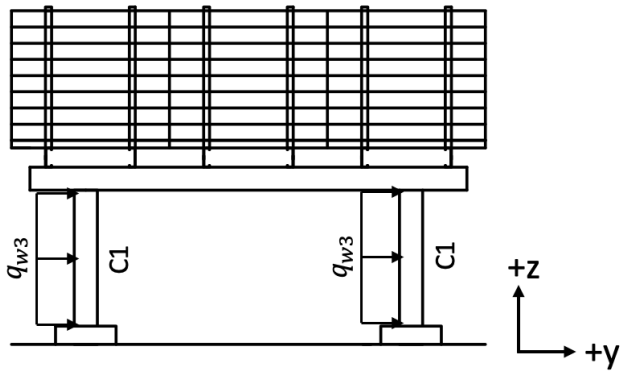


圖 7-17 示範例 5 支撐柱本身之設計風力（y 向）

資料來源：本研究整理

為了方便分析，也可以把設計風力F除以柱高換為線載重。因為柱子的$q(h_c)$、G及C_f與柱斷面皆相同，來風平行 x 向時每根柱子的單位長度風載重皆為 25.03 kgf/m，來風平行 y 向時每根柱子的單位長度風載重皆為 11.07 kgf/m。

表 7-6 示範例 5 支撐柱本身之設計風力

風向	來風平行 x 向		來風平行 y 向	
設計目標	受風作用特徵面積A_c（m^2）	設計風力F（kgf）	受風作用特徵面積A_c（m^2）	設計風力F（kgf）
柱 C1	0.4	36.50	0.3	16.14
柱 C2	0.5	53.89	0.4	23.84
柱 C3	0.7	71.26	0.5	31.52

資料來源：本研究整理

肆、面板傳遞至支撐柱風壓(力)不同估算方式之比較

前面第壹及第貳小節已根據「太陽光電系統之耐風設計規範研擬」成果報告(2019)計算面板傳遞至支撐柱之風壓，實際上，另也可將平屋頂單斜式棚架之支撐柱視為主要風力抵抗系統，但目前仍欠缺相關之風壓（力）之計算方式。「建築物耐風設計規範及解說」(2014)中表 2.9「開放式建築物之單斜式屋頂的風力係數」及擬議新版「建築物耐風設計規範與解說」中表 3.8 (a) 「開放式建築物之單斜屋頂的淨風壓係數」可估計地面單斜式棚架支撐柱之主要風力抵抗系統風壓（力），雖不適用於平屋頂單斜式棚架之支撐柱，但本示範例為了參考比較，也以其公式估算之。

由面板傳遞至支撐柱之風力依據「建築物耐風設計規範與解說」(2014) 中表 2.9「開放式建築物之單斜式屋頂的風力係數」計算，其細節列於本節的(1)；但因此規範為早期 ASCE 7 的規定，在使用上有所疑慮，且之後新版「建築物耐風設計規範與解說」也預計依新版 ASCE 7 修訂這部分，故另依據擬議新版「建築物耐風設計規範與解說」中表 3.8 (a) 「開放式建築物之單斜屋頂的淨風壓係數」計算作為參考，此細節列於本節的(2)。

(1) 面板傳遞至支撐柱的設計風力（耐風設計規範 2014 第 2.2 節）

由面板傳遞至支撐柱之設計風力，依據「建築物耐風設計規範及解說」(2014)第 2.2 節中開放式建築物之公式決定：

$$F = q(h_c) \times G \times C_f \times A_c \quad \text{.....(7.3)}$$

其中$q(h_c)$為面板形心高度h_c處之風速壓；G為普通建築之陣風反應因子；C_f為風力係數，可查表 7-7 而得；A_c為開放式建築物受風作用特徵面積，也就是面板總面積$5.1 \times 9.0 = 45.9\, m^2$。

表 7-7 開放式建築物之單斜式屋頂的風力係數

θ	各種 L/B 值之 *Cf*						
	5	3	2	1	1/2	1/3	1/5
10	0.2	0.25	0.3	0.45	0.55	0.7	0.75
15	0.35	0.45	0.5	0.7	0.85	0.9	0.85
20	0.5	0.6	0.75	0.9	1	0.95	0.9
25	0.7	0.8	0.95	1.15	1.1	1.05	0.95
30	0.9	1	1.2	1.3	1.2	1.1	1

θ	各種 *L/B* 值所對應的壓力中心位置，*X/L*		
	2~5	1	1/5~1/2
10~20	0.35	0.3	0.3
25	0.35	0.35	0.4
30	0.35	0.4	0.45

資料來源：建築物耐風設計規範與解說(2014) 表 2.9

來風平行 x 向

[步驟 1] 風力係數 C_f

若來風平行 x 向，垂直於風向之面板水平尺寸$B = 5.1\,m$，與風向平行的屋頂尺寸$L = 8.863\,m$，相除得 $L/B = 1.738$。根據表 7-7，$\theta = 10°$ 下 $L/B = 1$的風力係數 C_f 值為0.45，$L/B = 2$的風力係數 C_f 值為0.3，線性內插可得 $L/B = 1.738$下 C_f 值為0.339。

[步驟 2] 設計風力F

根據「建築物耐風設計規範及解說」(2014)式(2.4)，開放式建築承受之設計風力為$F = q(h_c)G_x C_f\, A_c = 31.42 \times 1.810 \times 0.339 \times 45.9 = 886.00\,kgf$。

根據表 7-7，$\theta = 10°$ 下 $L/B = 1$ 的壓力中心位置 X/L為 0.3，$L/B = 2$的壓力中心位置 X/L為0.35，線性內差可得$L/B = 1.738$ 的壓力中心位置$X/L = 0.337$，X為從屋頂之迎風面屋簷到壓力中心的距離。

來風平行 y 向

[步驟 1] 風力係數 C_f

若來風平行 y 向，垂直於風向之面板水平尺寸$B = 8.863\,m$，與風向平行的屋頂尺寸$L = 5.1\,m$，相除得$L/B = 0.575$。根據表 7-7，$\theta = 10°$ 下 $L/B = 0.5$的

風力係數 C_f 值為0.55，$L/B = 1.0$的風力係數 C_f 值為0.45，線性內插可得 $L/B = 0.575$ 下 C_f 值為0.535。

[步驟 2]設計風力F

根據「建築物耐風設計規範及解說」(2014) 式(2.4)，開放式建築承受之設計風力為 $F = q(h_c)G_y C_f\, A_c = 31.42 \times 1.798 \times 0.535 \times 45.9 = 1387.05\, kgf$。

根據表 7-7，$\theta = 10°$ 下 $L/B = 0.5$ 的壓力中心位置 X/L為0.3，$L/B = 1$的壓力中心位置 X/L為0.3，線性內差可得 $L/B = 0.575$ 的壓力中心位置 $X/L = 0.3$，X為從屋頂之迎風面屋簷到壓力中心的距離。

表 7-8 示範例 5 面板傳遞至支撐柱的設計風力（耐風規範 2014）

風向	設計風力（kgf）	從迎風面到壓力中心位置之距離
$\pm x$	$\pm$5886.00	$X/L = 0.337$
$\pm y$	$\pm$1387.05	$X/L = 0.3$

資料來源：本研究整理

(2) 面板傳遞至支撐柱的設計風力（擬議新版「建築物耐風設計規範與解說」）

因「建築物耐風設計規範與解說」(2014)第 2.2 節為早期 ASCE 7 的規定，由面板傳遞至支撐柱之設計風力在使用上有所疑慮，且之後新版「建築物耐風設計規範與解說」也預計依新版 ASCE 7 修訂這部分，故另依據擬議新版「建築物耐風設計規範與解說」估算由面板傳遞至支撐柱之設計風力作為參考，其設計風壓為：

$$p = q(h_c) \times G \times C_N \quad \text{.....(7.4)}$$

其中$q(h_c)$為面板形心高度 h_c處之風速壓；G 為普通建築之陣風反應因子；C_N為風壓係數。

<u>來風平行 x 向</u>

[步驟 1]風力係數C_N

若來風平行 x 向，可參考表 7-9 和圖 7-18 得到開放式建築物之單斜式屋頂的淨風壓係數，其中屋頂下通風面積阻塞比小於 50%視為氣流無受阻，C_{NW} 及 C_{NL} 分別代表屋頂面上風區及下風區之淨風壓係數，正值代表風壓作用指向受風作用面，負值代表風壓作用遠離受風作用面。

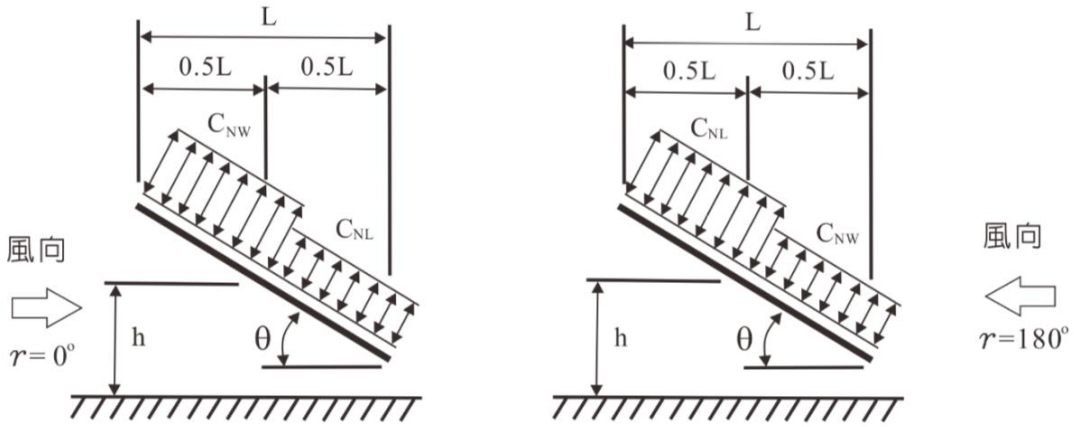


圖 7-18 開放式建築物之單斜式屋頂的淨風壓係數C_N

資料來源：擬議新版「建築物耐風設計規範與解說」

表 7-9 開放式建築物之單斜式屋頂的淨風壓係數C_N

淨風壓係數 , C_N									
屋頂仰角 θ	載重類別	風向角 , 0°				風向角 , 180°			
		氣流無受阻		氣流有受阻		氣流無受阻		氣流有受阻	
		C_{NW}	C_{NL}	C_{NW}	C_{NL}	C_{NW}	C_{NL}	C_{NW}	C_{NL}
< 7.5°	A	1.2	0.3	-0.5	-1.2	1.2	0.3	-0.5	-1.2
	B	-1.1	-0.1	-1.1	-0.6	-1.1	-0.1	-1.1	-0.6
7.5°	A	-0.6	-1.0	-1.0	-1.5	0.9	1.5	-0.2	-1.2
	B	-1.4	0.0	-1.7	-0.8	1.6	0.3	0.8	-0.3
15°	A	-0.9	-1.3	-1.1	-1.5	1.3	1.6	0.4	-1.1
	B	-1.9	0.0	-2.1	-0.6	1.8	0.6	1.2	-0.3
22.5°	A	-1.5	-1.6	-1.5	-1.7	1.7	1.8	0.5	-1.0
	B	-2.4	-0.3	-2.3	-0.9	2.2	0.7	1.3	0.0
30°	A	-1.8	-1.8	-1.5	-1.8	2.1	2.1	0.6	-1.0
	B	-2.5	-0.5	-2.3	-1.1	2.6	1.0	1.6	0.1
37.5°	A	-1.8	-1.8	-1.5	-1.8	2.1	2.2	0.7	-0.9
	B	-2.4	-0.6	-2.2	-1.1	2.7	1.1	1.9	0.3
45°	A	-1.6	-1.8	-1.3	-1.8	2.2	2.5	0.8	-0.9
	B	-2.3	-0.7	-1.9	-1.2	2.6	1.4	2.1	0.4

資料來源：擬議新版「建築物耐風設計規範與解說」

此表適用於$0.25 \leq h/L \leq 1.0$之情形，可本示範例之參數範圍 $h/L = 12.781/8.863 = 1.442$ 並不合，故只是試算作為比較參考之依據。

靠線性內差求得風向角為 0°的載重類別 A 為$C_{NW} = 0.7$、$C_{NL} = -1.1$；載重

類別 B 為$C_{NW}=-1.57$、$C_{NL}=0$，風向角為 180°時的載重類別 A 為$C_{NW}=1.03$、$C_{NL}=1.53$；載重類別 B 為$C_{NW}=1.67$、$C_{NL}=0.4$。

設計風壓為$P=q(h_c)G_xC_N$，此時$q(h_c)=31.42\ kgf/m^2$、$G_x=1.810$，代入不同C_N後可得各方向及載種組合之設計風壓，並將其列於表 7-11。

<u>來風平行 y 向</u>

若來風平行 y 向，可參考表 7-10 和圖 7-19 得到風向平行於屋脊時開放式建築物之屋頂的淨風壓係數，其中屋頂下通風面積阻塞比小於 50%視為氣流無受阻，C_N代表屋頂面之淨風壓係數，依照離迎風面的距離被分為 3 段，正值代表風壓作用指向受風作用面，負值代表風壓作用遠離受風作用面。

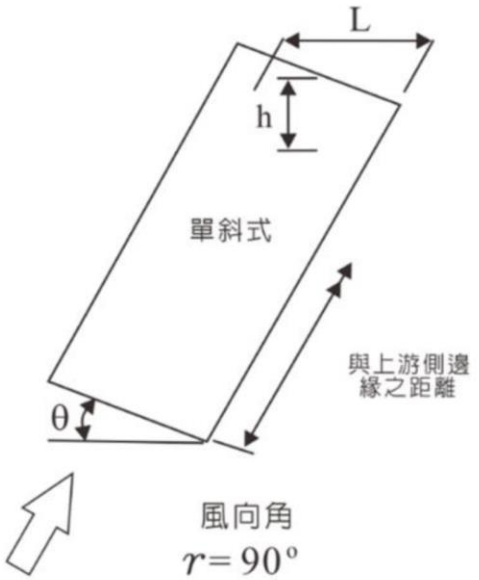


圖 7-19 風向平行於屋脊時開放式建築物之屋頂的淨風壓係數C_N

資料來源：擬議新版「建築物耐風設計規範與解說」

表 7-10 風向平行於屋脊時開放式建築物之屋頂的淨風壓係數C_N

與上游側邊緣之距離	屋頂仰角 θ	載重類別	氣流無受阻	氣流有受阻
			C_N	C_N
≤h	All shapes	A	-0.8	-1.2
	$\theta \leq 45°$	B	0.8	0.5
> h, ≤ 2h	All shapes	A	-0.6	-09
	$\theta \leq 45°$	B	0.5	0.5
> 2h	All shapes	A	-0.3	-0.6
	$\theta \leq 45°$	B	0.3	0.3

資料來源：擬議新版「建築物耐風設計規範與解說」

可得載重類別 A 中$< h$的$C_N = -0.8$、h~$2h$的$C_N = -0.6$、$> 2h$的$C_N = -0.3$；載重類別 B 中 $< h$的$C_N = -0.8$、h~$2h$的$C_N = 0.5$、$> 2h$的$C_N = 0.3$。

設計風壓為：$P = q(h_c)G_y C_N$，此時 $q(h_c) = 31.42\ kgf/m^2$、$G_y = 1.798$，代入不同C_N後可得各方向及載種組合之設計風壓，並將其列於表 7-11。

表 7-11 示範例 5 面板傳遞至支撐柱的設計風壓（新版耐風規範）(kgf/m²)

載重類別	A			B		
	CNW		CNL	CNW		CNL
風向角 , 0°	-39.82		-62.58	-89.13		0.00
風向角 , 180°	58.79		87.23	94.82		22.76
載重類別	A			B		
	≤h	h~2h	> 2h	≤h	h~2h	> 2h
風向角 , 90°	-45.19	-33.90	-16.95	45.19	28.25	16.95

資料來源：本研究整理

第四節 構件之耐風分析及檢核

橫梁採用 SSC 400（一般結構用輕型鋼）為冷軋型鋼材；縱梁採用 SN400B（建築結構用軋鋼料）為熱軋型鋼材，兩者之降伏強度 $f_y = 2500\ kgf/cm^2$ ，極限強度 $f_u = 4000\ kgf/cm^2$。假設採用之橫梁、縱梁形狀與斷面性質如表 7-12 所示。

冷軋型鋼構材設計時所用鋼材之彈性模數E為 20,700 kgf/mm^2，剪力模數G為 7,950 kg/mm^2，波森比μ為 0.3，溫度伸縮係數為 0.000012/°C。鋼結構所用結構鋼之彈性模數E為 20,400 kgf/mm^2，剪力彈性模數G為 8100 kgf/mm^2，波森比μ為 0.3，溫度伸縮係數為 0.000012/°C。

表 7-12 示範例 5 構件之斷面性質

縱梁、柱	橫梁
H 型鋼-H250x175x7x11	C 型鋼- C150x65x20x3.2
斷面模數 $S_x = 502\ cm^3$ 斷面模數 $S_y = 112\ cm^3$ 慣性矩 $I_x = 6121\ cm^4$ 慣性矩 $I_y = 984\ cm^4$ 斷面積 $A = 56.24\ cm^2$ 單位長重量 $q = 44.1\ kgf/m$	斷面模數 $S_x = 44\ cm^3$ 斷面模數 $S_y = 12\ cm^3$ 慣性矩 $I_x = 332\ cm^4$ 慣性矩 $I_y = 53\ cm^4$ 斷面積 $A = 9.56\ cm^2$ 重量 $q = 7.5\ kgf/m$
SN400B 材料性質：$f_y = 2500\ kgf/cm^2$ ；$f_u = 4000\ kgf/cm^2$ SSC 400 材料性質：$f_y = 2500\ kgf/cm^2$ ；$f_u = 4000\ kgf/cm^2$	

資料來源：本研究整理

當使用容許應力設計法設計時，熱軋型鋼構應依「鋼結構容許應力設計法規範及解說」(2010)之規定，考慮載重組合 $D + L$ 、$D + 0.75(L \pm 1.25W)$、$D + 0.75(L \pm 0.8E)$ 、$0.7D \pm 1.25W$ 及 $0.7D \pm 0.8E$；冷軋型鋼構應依「冷軋型鋼構造建築物結構設計規範及解說」(2016)之規定，考慮載重組合$D + L$ 、$D \pm W$、$D \pm 0.7E$、$D + 0.75L \pm 0.75W$ 、$D + 0.75L \pm 0.7E$、$0.6D \pm W$及 $0.6D \pm 0.7E$。其中，D 為靜載重，包括構材自重及永久附加物重量；L 為活載重，包含人員重量；E 為設計地震力； W 為設計風力。

本耐風設計示範例所考慮之太陽光電系統不用考慮活載重、且忽略地震力，

同時由於「冷軋型鋼構造建築物結構設計規範及解說」(2016) ASD 所用風力係數並不正確，故本例皆採用「鋼結構容許應力設計法規範及解說」(2010)之載重組合$D \pm 0.9375\,W$(或$D \pm 0.75(1.25W)$)及$0.7D \pm 1.25W$進行檢核。

壹、橫梁

在作橫梁 a-b-c-d-e 結構分析時如圖 7-20 所示，將橫梁與下方縱梁連接處 b 點、c 點及 d 點的扣件視為鉸支承（Hinge）進行分析。

風載重採用表 7-5 中橫梁 a-b-c-d-e 的設計風壓，其承受風壓面積的寬度為 0.85 m。設計正風壓 a-b 段和 d-e 段為$51.70\,kgf/m^2$、b-c 段和 c-d 為$28.66\,kgf/m^2$，乘上寬度 0.85 m 可得線載重$q_{w1} = 43.94\,kgf/m$、$q_{w2} = 24.36\,kgf/m$，設計負風壓 a-b 段和 d-e 段為$219.52\,kgf/m^2$、b-c 段和 c-d 段負風壓為$113.74\,kgf/m^2$，乘上寬度 0.85 m 後可得線載重$q_{w1} = 186.59\,kgf/m$、$q_{w2} = 96.68\,kgf/m$。

靜載重包含橫梁自重與模組自重，模組自重每塊$20kgf$，由 4 個面板接橫梁扣件傳給2根橫梁，故每個扣件傳到橫梁的力量$F_D = 20kg/4 = 5\,kgf/m$，橫梁本身單位長自重為$7.5\,kgf/m$。

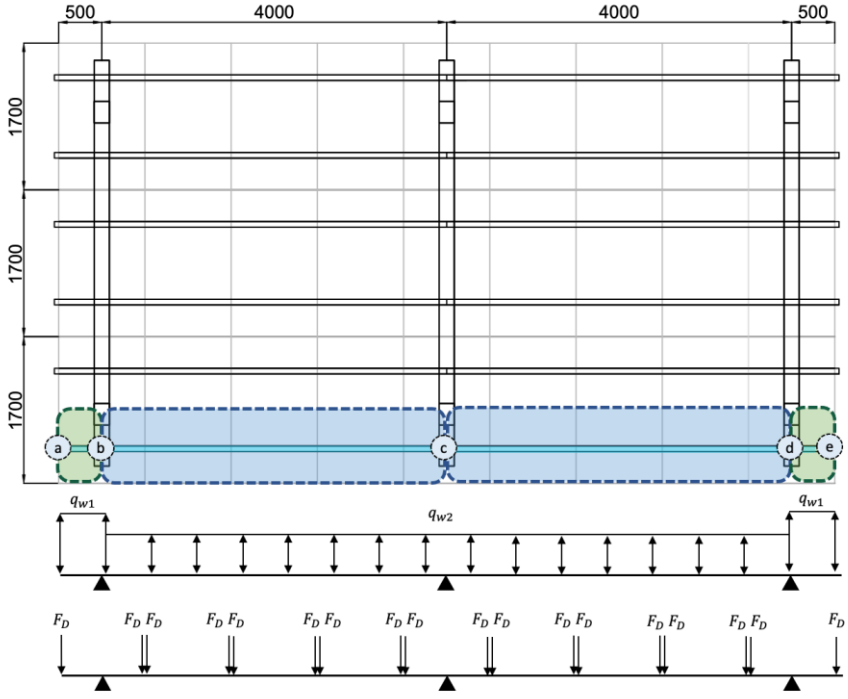


圖 7-20 示範例 5 之橫梁 a-b-c-d-e 受力作用圖

資料來源：本研究整理

本例利用 SAP 2000 分析，將構件的斷面、材料特性輸入，並施加風載重、靜載重及可求得橫梁變形量及構件的應力，載重組合有$D \pm 0.9375\,W$、$0.7D \pm 1.25W$。

<u>應力檢核</u>

在載重組合$0.7D - 1.25W$下有最大剪力 257.45 kgf，最大彎矩 188.97 kgf-m，用 AISC-ASD96 進行檢核，得橫梁應力比為 0.21≤ 1，確認符合規範。

<u>變形檢核</u>

為避免長時間較大振動造成扣件處產生破壞，建議檢核梁變位量，例如參考「鋼結構容許應力設計法規範及解說」(2010) 11.5.3 節，將風力視為活載重，確認風力所產生的撓度不得大於跨度之 1/360。在載重組合為$1.0D + 1.0W$下有最大變形量$\delta_{max} = 3.7\,mm$。

$\frac{\text{最大變形量}\delta_a}{\text{跨度}} = \frac{0.0037\text{ m}}{4\text{ m}} = 0.00065 \leq \frac{1}{360}$，檢核通過。

貳、縱梁

在作縱梁結構分析時如圖 7-21 所示，將與下方柱連接處 g 點、h 點視為鉸支承（Hinge），以下風載重以線載重模擬進行設計，靜載重以點載重模擬進行設計。

風載重採用表 7-5 中縱梁 f-g-h-i 的設計風壓，其承受風壓面積的寬度為 4m。設計正風壓 f-g 段和 h-i 段為$34.29\,kgf/m^2$、g-h 段為$30.81kgf/m^2$，乘上寬度 4 m可得線載重$q_{w1} = 137.17\,kgf/m$、$q_{w2} = 123.25\,kgf/m$。設計負風壓 f-g段和 h-i 段為$138.76\,kgf/m^2$、g-h 段為$74.74\,kgf/m^2$，乘上寬度 4 m 可得線載重$q_{w1} = 555.05\,kgf/m$、$q_{w2} = 298.97\,kgf/m$。

靜載重包含梁自重與模組自重，而縱梁 f-g-h-i 所負擔面積中有 12 塊模組，模組自重為$20kgf/$塊，橫梁自重為 $7.51\,kg/m$，面板、橫梁自重經橫梁接縱梁扣件傳入縱梁，故每根橫梁傳到縱梁 f-g-h-i 的重量$F_D = (20kg) \times (2\text{ 塊}) + (7.51\,kg/m) \times (4m) = 70.04\,kg$，縱梁本身單位長自重為 $44.1\,kgf/m$。

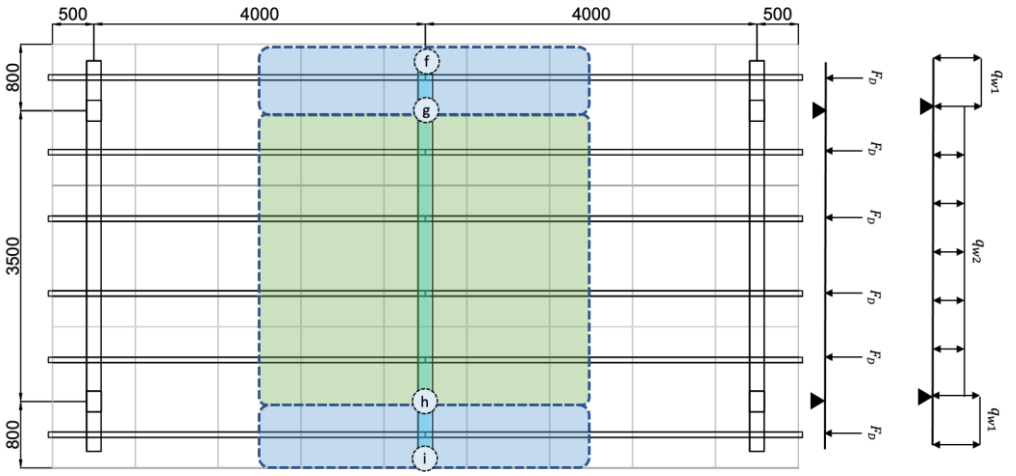


圖 7-21 示範例 5 之縱梁 f-g-h-i 受力作用圖

資料來源：本研究整理

本例利用 SAP 2000 分析，將構件的斷面、材料特性輸入，並施加風載重、靜載重及可求得縱梁變形量及構件的應力，載重組合有$D \pm 0.9375\,W$、$0.7D \pm 1.25W$。

<u>應力檢核</u>

在載重組合$D + 0.9375W$下有最大剪力 498.16 kgf和最大彎矩 340.62 kgf-m，用 AISC-ASD96 進行檢核，得縱梁應力比為 0.08 ≤ 1，確認桿件符合規範。

<u>變形檢核</u>

為避免長時間較大振動造成扣件處產生破壞，建議檢核梁變位量，例如參考「鋼結構容許應力設計法規範及解說」(2010)11.5.3 節，將風力視為活載重，確認風力所產生的撓度不得大於跨度之 1/360。在載重組合為$1.0D + 1.0W$下有最大變形量$\delta_{max} = 0.3\,mm$。

$\frac{\text{最大變形量}\delta_a}{\text{跨度}} = \frac{0.0003\text{ m}}{3.5\text{ m}} = 0.00014 \leq \frac{1}{360}$，檢核通過。

參、支撐柱

支撐柱本身側向之設計風力依據「建築物耐風設計規範與解說」(2014)第2.2節主要構件風力公式決定，而面板傳遞至支撐柱的設計風壓（力）依據「太陽光電系統之耐風設計規範研擬」成果報告(2019) 中平屋頂單斜式棚架型之設計風壓公式計算，將其計算列於本節的(1)。

實際上，另也可將平屋頂單斜式棚架之支撐柱視為主要風力抵抗系統，但由面板傳遞至支撐柱之風力目前仍欠缺相關之風壓（力）之計算方式。例如依照「建築物耐風設計規範及解說」(2014)中表 2.9「開放式建築物之單斜式屋頂的風力係數」估算設計風力，其計算列於本節的 (2)，但因此規範為早期 ASCE 7的規定，在使用上有所疑慮，且之後新版「建築物耐風設計規範與解說」也預計依新版 ASCE 7 修訂這部分，故另依據擬議新版「建築物耐風設計規範與解說」中表 3.8 (a) 「開放式建築物之單斜屋頂的淨風壓係數」估算設計風壓，但將此計算細節列於本節的(3)作為參考。此兩種估算方式可估計地面單斜式棚架支撐柱之主要風力抵抗系統風壓（力），雖不適用於平屋頂單斜式棚架之支撐柱，但本示範例為了參考比較，也以其公式估算之。

(1) 根據「太陽光電系統之耐風設計規範研擬」成果報告風壓公式計算風壓

風載重考慮由面板傳遞至支撐柱之設計風壓及支撐柱本身之設計風力兩項。面板傳遞至支撐柱之設計風壓根據「太陽光電系統之耐風設計規範研擬」成果報告(2019) 進行估算，其設計風壓列於表 7-5，而支撐柱本身之側向設計風力列於表 7-6。

如圖 7-22，中間柱子承受風壓面積的設計正風壓為$30.14\ kgf/m^2$，設計負風壓為$86.98\ kgf/m^2$。兩側柱子承受風壓面積的設計正風壓為$28.94\ kgf/m^2$，設計負風壓為$99.15\ kgf/m^2$。其中正風壓表示力量指向面板，負風壓表示力量遠離面板上表面。若風朝 $+x$向吹，支撐柱本身之側向設計風力 $q_{w3} = 25.03\ kgf/m$。

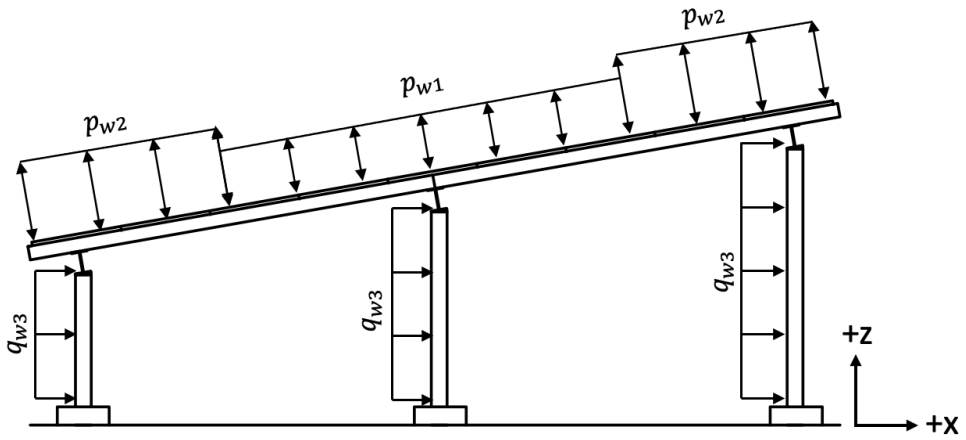


圖 7-22 示範例 5 規範研擬之平屋頂單斜式棚架風壓作用圖（$+x$向）

資料來源：本研究整理

(2) 根據現行「建築物耐風設計規範及解說」之主要構件風力公式估算風力

風載重考慮由面板傳遞至支撐柱之設計風力及支撐柱本身之設計風力兩項。由面板傳遞至支撐柱之設計風力依據「建築物耐風設計規範及解說」(2014)第2.2節估算，其結果參考表 7-8，支撐柱本身之側向設計風力參考表 7-6。

參考圖 7-23，若風朝 $+x$向吹，由面板傳遞至支撐柱之設計風力為$F = 886.00\ kgf$，且從迎風面到風力作用位置的比例 $X/L = 0.337$，方向垂直面板並考慮往下和往上兩種情況。支撐柱本身之側向設計風力 $q_w = 25.03\ kgf/m$。參考圖 7-24，若風朝 $-x$向吹其設計風力與$+x$向相同，只是方向相反。

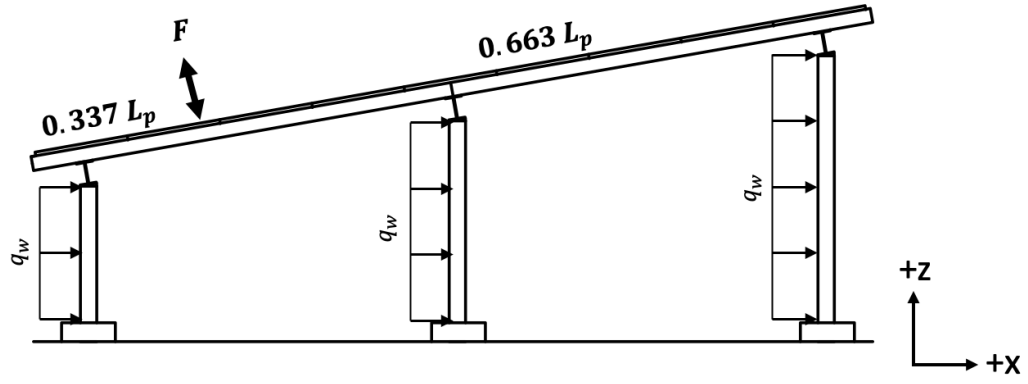


圖 7-23 示範例 5 現行耐風規範之主要風力作用圖（$+x$向）

資料來源：本研究整理

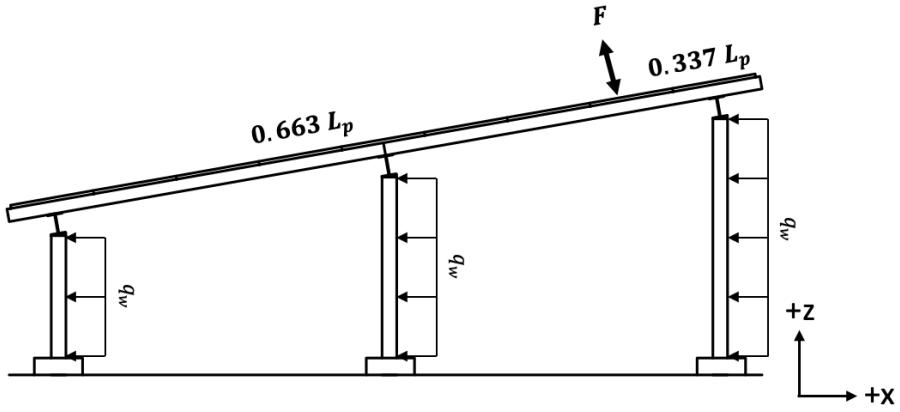


圖 7-24 示範例 5 現行耐風規範之主要風力作用圖（$-x$向）

資料來源：本研究整理

根據圖 7-25，若風朝 $+y$向吹，由面板傳遞至支撐柱之設計風力為$F = 1387.05\ kgf$，且從迎風面到風力作用位置的比例 $X/L = 0.3$，方向垂直面板並考慮往下和往上兩種情況，支撐柱本身之側向設計風力 $q_w = 11.07\ kgf/m$。若風朝 $-y$向吹其設計風力與$+y$向相同，只是方向相反。

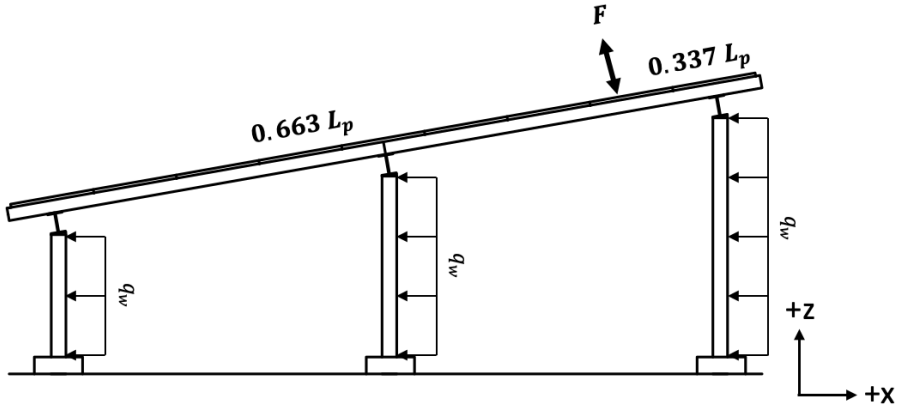


圖 7-25 示範例 5 現行耐風規範之主要風力作用圖（$+y$向）

資料來源：本研究整理

(3) 根據擬議新版「建築物耐風設計規範及解說」之主要構件風壓公式估算風壓

風載重考慮由面板傳遞至支撐柱之設計風力及支撐柱本身之設計風力兩項。由面板傳遞至支撐柱之設計風力依據擬議新版「建築物耐風設計規範與解說」估算，其結果參考表 7-11，支撐柱本身之側向設計風力參考表 7-6。

參考圖 7-26，若風朝＋x向吹，也就是風向角180° 時，在載重類別 A 下由面板傳遞至支撐柱之設計風壓p_{ww}為58.79 kgf/m^2、p_{wL}為87.23 kgf/m^2，載重類別 B 下由面板傳遞至支撐柱之設計風壓p_{ww}為94.82 kgf/m^2、p_{wL}為22.76 kgf/m^2。支撐柱本身之側向設計風力 $q_{w3} = 25.03\ kgf/m$。

參考圖 7-27，若風朝－x向吹，也就是風向角0° 時，在載重類別 A 下由面板傳遞至支撐柱之設計風壓p_{ww}為−39.82 kgf/m^2、p_{wL}為−62.58 kgf/m^2，載重類別 B 下由面板傳遞至支撐柱之設計風壓p_{ww}為−89.13 kgf/m^2、p_{wL}為0.00 kgf/m^2。支撐柱本身之側向設計風力 $q_{w3} = 25.03\ kgf/m$。

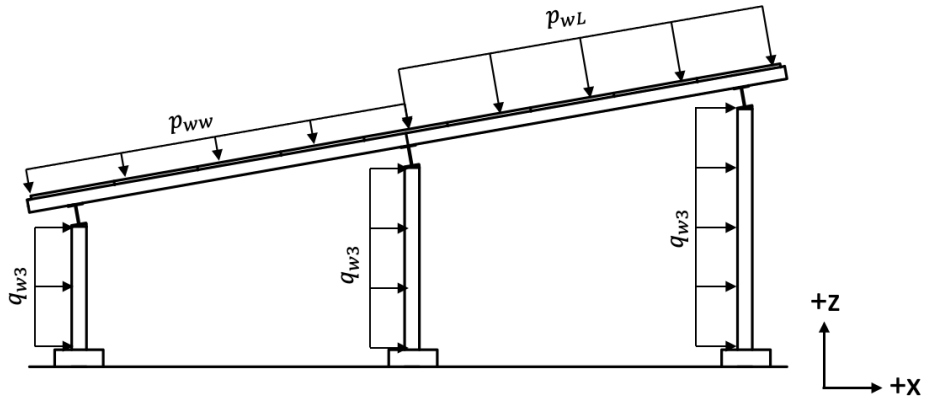


圖 7-26 示範例 5 擬議新版耐風規範之主要風力作用圖（風向角180°）

資料來源：本研究整理

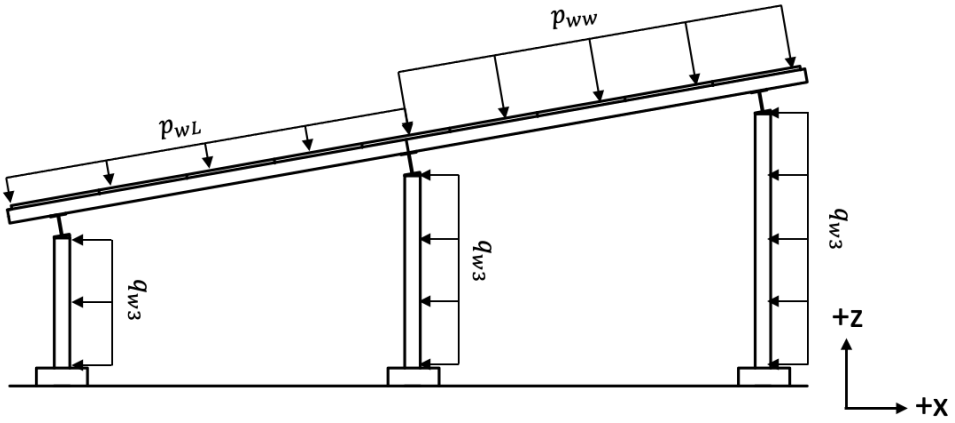


圖 7-27 示範例 5 擬議新版耐風規範之主要風力作用圖（風向角0°）

資料來源：本研究整理

根據圖 7-28，若風朝＋y向吹，也就是風向角90° 時，在載重類別 A 下由面

板傳遞至支撐柱之設計風壓p_{w1}為$-45.19\ kgf/m^2$，載重類別 B 下由面板傳遞至支撐柱之設計風壓p_{w1}為$45.19\ kgf/m^2$。支撐柱本身之側向設計風力 $q_{w3} = 11.07\ kgf/m$。若風朝 $-y$向吹其設計風力與$+y$向相同，只是方向相反。

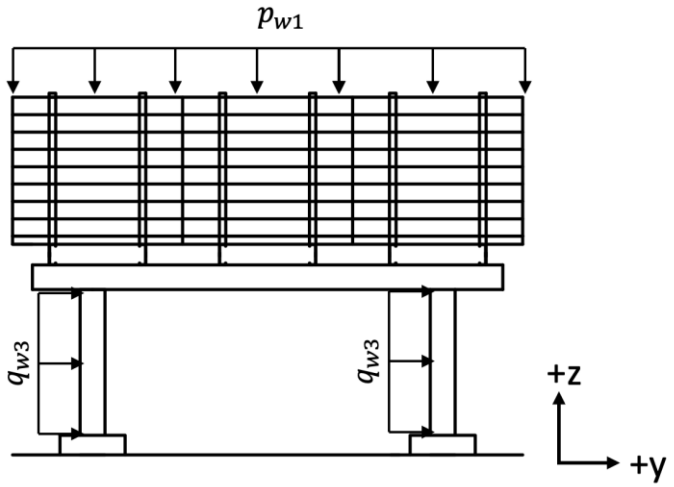


圖 7-28 示範例 5 擬議新版耐風規範之主要風力作用圖（風向角90°）
資料來源：本研究整理

綜合以上三種風載重算法，由於 (2)、(3)之結果不適用於平屋頂單斜式棚架，本示範例選擇(1)所得風壓作柱及基座之檢核。

靜載重包含梁柱自重與模組自重，模組自重為$20kgf/$塊，故橫梁所受之模組單位長自重 $q_D = 10\ kg/m$，橫梁單位長自重為 $7.51\ kg/m$、縱梁及柱單位長自重為 $44.1\ kgf/m$。

本例利用 SAP2000 分析，將構件的斷面、材料特性輸入，並施加風載重、靜載重及可求得柱變形量及構件的應力，為保守底部基座設為鉸接。載重組合有$D \pm 0.9375\ W$、$0.7D \pm 1.25W$。

表 7-13 示範例 5 所有載重組合下對 g 點下方柱產生的最大受力

由面板傳遞至支撐柱之設計風壓(力)之估算依據	柱軸拉力（kgf）	柱軸壓力（kgf）	柱頂側位移(mm)	應力比
(1)「太陽光電系統之耐風設計規範研擬」成果報告之風壓公式	1198.18	-683.30	29.21	0.494
(2)現行耐風設計規範之主要構件風力公式	303.31	-551.95	9.16	0.174
(3)擬議新版耐風設計規範之主要構件風壓公式	620.11	-1328.16	24.00	0.401

資料來源：本研究整理

表 7-14 示範例 5 所有載重組合下對 k 點下方柱產生的最大受力

由面板傳遞至支撐柱之設計風壓(力)之估算依據	柱軸拉力（kgf）	柱軸壓力（kgf）	柱頂側位移(mm)	應力比
(1)「太陽光電系統之耐風設計規範研擬」成果報告之風壓公式	370.62	-299.78	29.18	0.292
(2)現行耐風設計規範之主要構件風力公式	341.43	-526.43	9.15	0.087
(3)擬議新版耐風設計規範之主要構件風壓公式	271.35	-677.27	23.96	0.231

資料來源：本研究整理

應力檢核

在載重組合 $0.7D - 1.25W$（風朝 $-x$向吹）下有最大軸拉力$1198.18\ kgf$，在載重組合$0.7D + 1.25W$（風朝 $+x$向吹）下有最大軸壓力$683.30\ kgf$，用 AISC-ASD96 進行檢核，得柱應力比小於1，確認符合規範。

變形檢核

因太陽光電版模組鎖固可能因為振動產生鬆弛，故建議增加撓度限制以約束螺栓鬆弛，例如可參考「建築技術規則建築設計施工編」第 245 條，確認容許層間變位二百分之一。在載重組合為$1.0D + 1.0W$下有最大變形量＝$29.21\ mm$。

容許變位＝$\frac{\text{柱高}}{200}$ = 17.38 mm < 29.21 mm，最大變形 29.21 mm 未通過 ，但因基座假設鉸接，所得位移應該非常保守，故此處與容許變位相差不大先暫且忽略。

第五節 扣件之耐風分析及檢核

扣件接合設計時，在實務上構件有接合的地方都需要檢核，除了螺栓、銲道以外，還有扣具、構件本身的強度。扣件接合設計時，除了考量螺栓本身可能發生的拉力破壞、剪力破壞、拉剪聯合破壞及承壓破壞等破壞模式，接合處的扣具及構件的破壞模式也須考慮，包括總斷面破壞、淨斷面破壞及塊狀剪力撕裂等。另外，若有進行銲接接合，銲材所承受之應力值也應符合容許應力範圍，使接合處強度滿足要求。本手冊僅示範螺栓拉力破壞及剪力破壞之檢核。

本例扣件之設計同樣使用容許應力法，參考「鋼結構容許應力設計法規範及解說」(2010)之規定，考慮載重組合$D \pm 0.9375\,W$、$0.7D \pm 1.25W$，此外對於接合點之偏心問題亦應適當考量。根據臺中市結構工程技師公會在 108 年編寫「太陽光電系統支撐架結構設計參考手冊草案(修訂版)」之 4.3 螺栓接合內容所述，使用熱軋型鋼構材並採容許應力設計法分析設計者，可參考「鋼結構容許應力設計法規範及解說」(2010)第 10.3 節進行檢核；使用冷軋型鋼構材者，可參考「冷軋型鋼構造建築物結構設計規範及解說」(2016)第 11.3 節及第 11.5 節進行檢核。

本範例針對螺栓拉力破壞、剪力破壞及拉剪聯合破壞以「鋼結構容許應力設計法規範及解說」 (2010)之規定進行螺栓：螺栓容許剪應力F_v及螺栓容許張應力 F_T可參考鋼結構容許應力設計 10.3 節得知，若螺栓承受拉力及剪力同時作用時，其標稱斷面 A_b上之應力需再按規定折減。

壹、面板接橫梁之扣件

面板接橫梁扣件 j 如圖 7-29 所示，兩片模組以中壓塊連接於下方橫梁上，中壓塊使用 A2-70 M8 螺栓鎖在橫梁上。

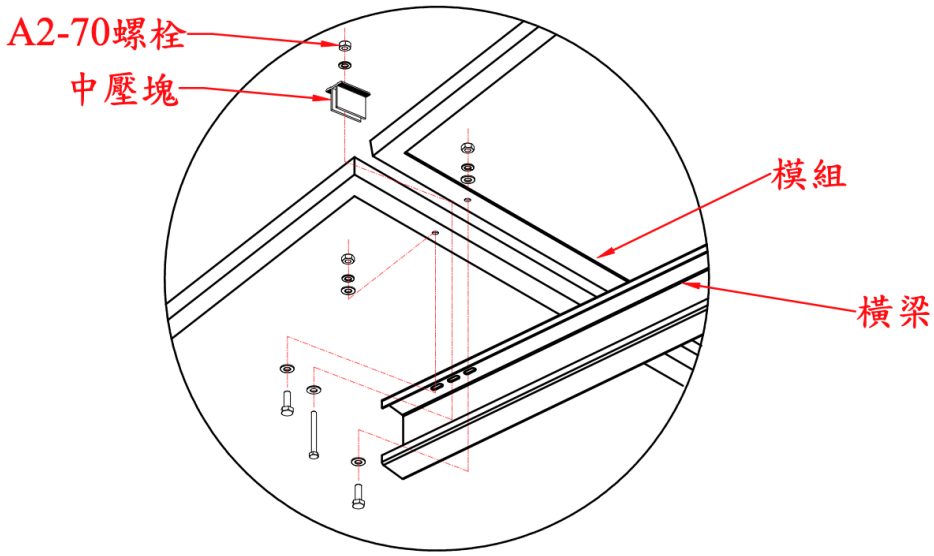


圖 7-29 平屋頂單斜式棚架型系統之面板接橫梁扣件接合圖

資料來源：修改自[15]

螺栓拉力分析

風載重採用表 7-5 中面板接橫梁扣件 j 之設計正風力29.15 kgf，方向垂直指向面板上表面，對此螺栓而言為壓力；設計負風力117.95 kgf，方向垂直遠離面板上表面，對此螺栓而言為拉力；靜載重為所承受風壓面積中的模組自重，每塊 20kgf，故單一螺栓所承擔之靜載重為 20kgf/4 × 2 = 10 kgf，方向垂直指向地面。

在載重組合0.7D − 1.25W下可對螺栓造成最大軸拉力140.54 kgf，此時造成的剪力為1.22 kgf。

螺栓應力檢核

因為在「鋼結構容許應力設計法規範及解說」(2010)和「冷軋型鋼構造建築物結構設計規範及解說」(2016)中都沒有不鏽鋼螺栓的標稱拉力及剪力強度，故參考 CNS 4234-1「不鏽鋼結件之機械性質－第 1 部：螺栓、螺釘及螺樁」得 A2-70 的抗拉強度為$F_u = 700MPa$、降伏強度$F_y = 450\ MPa$，以及 M8 螺栓標稱

應力面積 $A = 39.2\,mm^2$，並配合「鋼結構容許應力設計法規範及解說」(2010)的表 10.3-2「螺栓及螺牙桿件之容許應力」求得其容許張應力 $F_t = 0.33F_u = 231\,MPa$，容許剪應力 $F_v = 0.17F_u = 119Mpa$。

螺栓容許拉力 $F_T = 231\,MPa \times 39.2\,mm^2 = 923\,kgf > 140.54$ kgf，檢核通過。

螺栓容許剪力 $F_S = 231\,MPa \times 39.2\,mm^2 = 4665\,N > 1.22$ kgf，檢核通過。

其它檢核

另外因接合之中壓塊厚度較薄，容易產生破壞，建議中壓塊之檢核全斷面降伏、淨斷面撕裂、塊狀剪裂等。

貳、橫梁接縱梁之扣件

橫梁接縱梁扣件如圖 6-30 所示，假設橫梁以扣件連接於下方縱梁上。所謂扣件包括角鋼及螺栓，橫梁以螺栓 A、B、C、D 固定於角鋼上，角鋼再以螺栓 E、F 固定於縱梁上，其中螺栓為 F10T-M10，角鋼為 L*100mm*75mm*7mm。

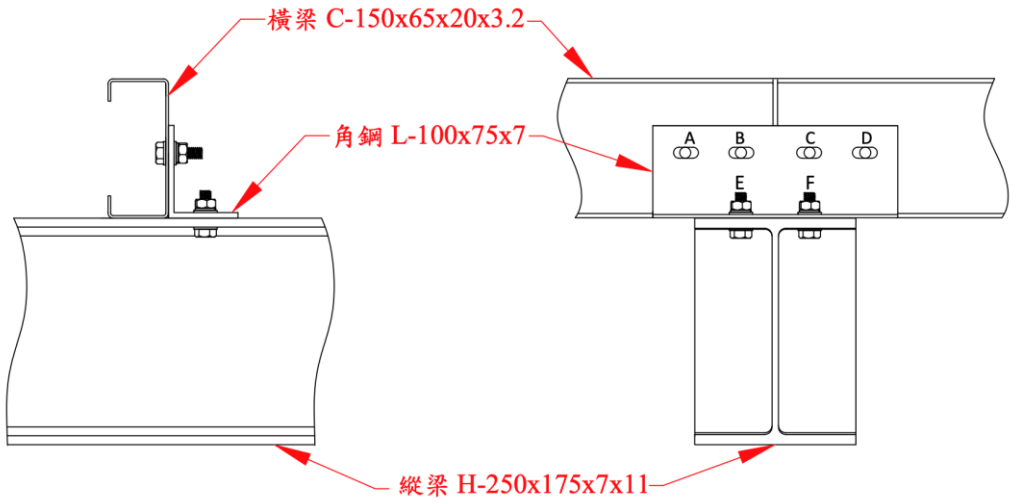


圖 7-30 平屋頂單斜式棚架型系統之橫梁接縱梁扣件接合圖

資料來源：修改自[15]

螺栓分析

風載重採用表 7-5 中橫梁接縱梁扣件 c 之設計正風力97.45 kgf ，方向垂直

指向面板上表面，對螺栓 A 而言為剪力，對螺栓 E 而言為壓力；設計負風力 386.72 kgf，方向垂直遠離面板上表面，對螺栓 A 而言為拉力，對螺栓 E 而言為壓力；靜載重為所承受風壓面積中的模組及橫梁自重，故單一扣件所承擔之淨載重為 70 kgf，方向垂直指向地面。

在載重組合$0.7D + 1.25W$下會造成傳進此扣件的最大軸壓力171.10 kgf，此時剪力為 8.51 kgf。力量由螺栓 A、B、C、D 傳入，對螺栓 A 造成的拉力為 2.13 kgf、剪力為 42.78 kgf；之後載重傳至螺栓 E、F，對螺栓 E 造成的壓力為 85.55 kgf、剪力為 4.26 kgf。

在載重組合$0.7D - 1.25W$下會造成傳進此扣件的最大軸拉力435.11 kgf，此時剪力為 8.51 kgf。力量由螺栓 A、B、C、D 傳入，對螺栓 A 造成的拉力為 2.13 kgf、剪力為 108.78 kgf；之後載重傳至螺栓 E、F，對螺栓 E 造成的拉力為 217.56 kgf、剪力為 4.26 kgf。

螺栓 A 剪力檢核

根據「鋼結構容許應力設計法規範及解說」(2010)的表 10.3-2「螺栓及螺牙桿件之容許應力」，F10T 之容許剪應力 $F_v = 1.87\ tf/cm^2$。M10 螺栓標稱應力面積 $A = 61.2\ mm^2$。螺栓容許剪力 $F_S = 1.87\ tf/cm^2 \times 61.2\ mm^2 = 1144\ kgf > 108.78$ kgf，檢核通過。

螺栓 E 拉力檢核

根據「鋼結構容許應力設計法規範及解說」(2010)的表 10.3-2「螺栓及螺牙桿件之容許應力」，F10T 之容許張應力$F_t = 3.62\ tf/cm^2$。M10 螺栓標稱應力面積 $A = 61.2\ mm^2$。螺栓容許拉力 $F_T = 3.62\ tf/cm^2 \times 61.2\ mm^2 = 2215 kgf > 217.56$ kgf，檢核通過。

參、縱梁接柱之扣件

縱梁接柱扣件如圖 7-31 所示，假設縱梁以扣件連接於下方柱上。所謂扣件包括螺栓及柱頂板，縱梁以六個 F10T-M10 螺栓固定於柱頂板上，柱頂板與柱銲接固定，柱頂板尺寸為 280mm*125mm*10 mm。

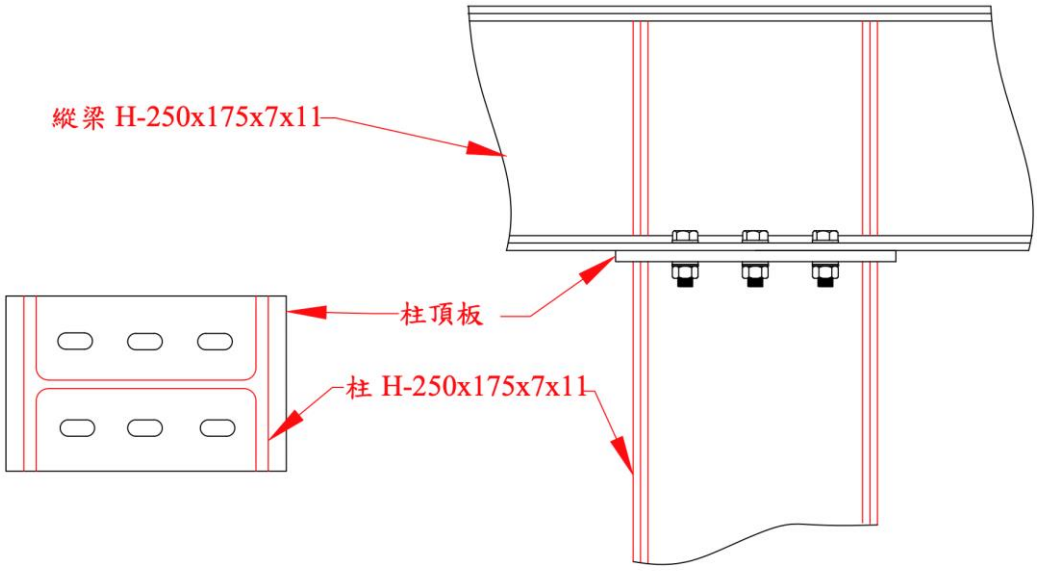


圖 7-31 平屋頂單斜式棚架型系統之縱梁接柱扣件接合圖

資料來源：修改自[15]

螺栓分析

風載重採用表 7-5 中面縱梁接柱扣件的設計正風力307.41 kgf ，方向垂直指向面板上表面，對螺栓而言為壓力；設計負風力887.18 kgf，方向垂直遠離面板上表面，對螺栓而言為拉力；靜載重為所承受風壓面積中模組及橫梁、縱梁的自重，故單一螺栓所承擔之靜載重為 273.76 kgf，方向垂直指向地面。

在載重組合0.7D − 1.25W下會造成傳進此扣件的最大軸拉力920.25 kgf，此時造成的剪力為33.28 kgf。對單一螺栓造成的拉力為153.38 kgf，剪力為5.54 kgf。

螺栓應力檢核

根據「鋼結構容許應力設計法規範及解說」(2010)的表 10.3-2「螺栓及螺牙桿件之容許應力」，F10T 之容許張應力$F_t = 3.62\ tf/cm^2$。M10 螺栓標稱應力面積 $A = 61.2\ mm^2$ 。螺栓容許拉力 $F_T = 3.62\ tf/cm^2 \times 61.2\ mm^2 = 2215 kgf > 153.38\ kgf$，檢核通過。

肆、柱接基座之扣件

柱接基座扣件如圖 7-32 所示，柱接基座扣件假設柱以扣件連接於下方基座。所謂扣件包括化學錨栓及柱底板，將柱與柱底板銲接固定，並將其用化學錨栓將柱底板與基座混凝土相接。

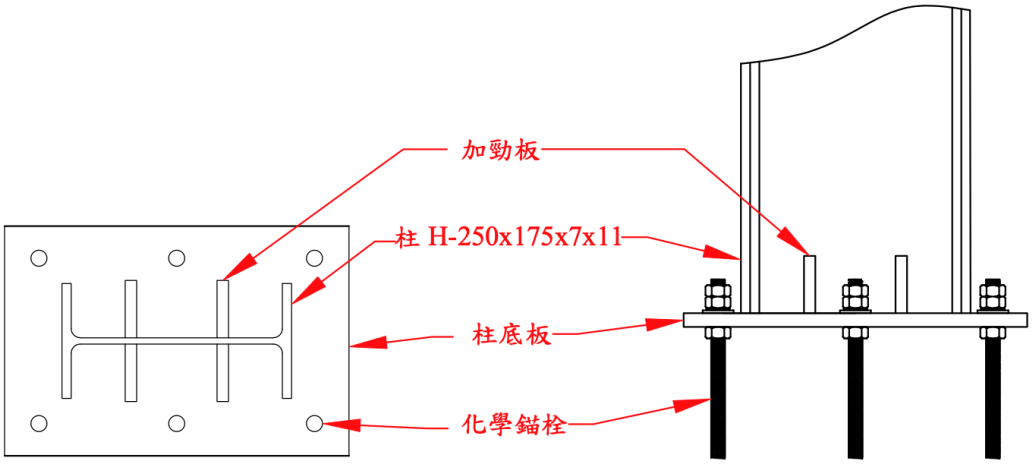


圖 7-32 平屋頂單斜式棚架型系統之柱接基座扣件接合圖

資料來源：修改自[15]

基座分析

基座承受支撐柱所受風力及自重。其中面板傳遞至支撐柱之設計風壓，一樣建議取用「太陽光電系統之耐風設計規範研擬」成果報告(2019)之局部構件風壓公式計算結果進行檢核。可得載重組合 $0.7D-1.25W$（風朝 $-x$向吹）下會對一基座造成最大軸拉力 1146.84 kgf，此時剪力為296.04 kgf； $0.7D+1.25W$（風朝 $+x$向吹）下會對一基座造成最大軸壓力683.30 kgf，此時剪力為159.30 kgf。

錨栓檢核

混凝土基座之錨栓可依「建築物混凝土結構設計規範」(2023)進行檢核，確認錨栓及混凝土的強度皆足夠。

原屋頂檢核

根據「太陽光電系統之耐風設計規範研擬」成果報告(2019)，另需檢核建築物屋頂本身之強度能同時承受(1)太陽光電系統支撐架傳遞至屋頂之風載重及(2)非太陽光電板覆蓋之屋頂區域所受風載重；其中(1)之風載重依本節之規定決

定，而(2)之風載重第三章之規定決定。

需考慮最後力量傳遞到基座時的植筋（栓）深度或是屋頂承載力是否足夠，不會造成既有屋頂面承載以及在拉拔力下是否會造成原有屋頂面及屋頂防水層的破壞，甚至棚架之總重對於屋頂承載是否容許、樓板有無貫穿破壞或是梁額外負載等也需考慮，以確保建築物屋頂本身之強度能同時承受太陽光電系統支撐架傳遞至屋頂之風載重及非太陽光電板覆蓋之屋頂區域所受風載重。

第八章 結論與建議

第一節 結論

1. 本計畫是依據建築物耐風設計規範(2014)、CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022)及建研所委託研究計畫「太陽光電系統之耐風設計規範研擬」之成果報告(2019)，擬定「太陽光電系統耐風設計及結構分析手冊」之草案，以供未來技師在使用時參考。

2. 本計畫曾於專家座談會議討論 113 年立委預算審查主決議中所提及「建立簡易結構評估系統」之可行性及作法。與會專家學者一致認為綠能推廣是一重要課題，但支撐結構輕量化的結果，不僅未使風壓降低，且耐風性能會下降，更需仔細做耐風設計；同時技師之專業能力不宜以簡化系統代替，且會牽涉風災損害歸責問題；另外，結構設計費用僅佔總成本非常小的一部分。綜合上述考慮，現階段建立簡易結構評估系統似不可行。

第二節 建議

【建議一】

可針對「太陽光電系統結構耐風設計手冊」之草案內容，經由適當審查程序，出版成冊供業界參考：立即可行建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：社團法人中華民國風工程學會

目前政府積極推動太陽能發電，各地設置於建築物屋頂或地面的太陽光電系統日漸增多，為確保國內地面或建築物屋頂上太陽光電系統之耐風安全性，建議針對「太陽光電系統結構耐風設計手冊」之草案內容，經由適當審查程序，出版成冊供業界參考。

【建議二】

可辦理說明會，向太陽光電系統相關業者推廣出版後之「太陽光電系統結構耐風設計手冊」：立即可行建議

主辦機關：社團法人中華民國風工程學會

協辦機關：內政部建築研究所

目前我國在太陽光電系統之結構設計並無相關手冊可以參考，導致部份使用者執行太陽光電系統耐風設計時，為節省經費不進行風洞試驗，卻又以節省材料原則，選擇性引用規範，或是不瞭解規範條文精神及參數定義下錯誤應用。此類缺乏相關試驗數據佐證之耐風設計，恐因強度不足而釀災。故建議可以辦理辦理說明會，向太陽光電系統相關業者推廣出版後之「太陽光電系統結構耐風設計手冊」。

【建議三】

未來可針對平屋頂單斜式棚架型下有阻擋之情況執行風洞試驗，以使相關耐風規定更為完整，甚至研擬其他類型之太陽能板耐風設計規定，以供業界參考使用：中長期建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：社團法人中華民國風工程學會

在建研所委託研究計畫「太陽光電系統之耐風設計規範研擬」(2019)中，考慮國內現存設計情況，回顧美國及日本相關規範之規定，並針對現有規範未規定者，執行一系列風洞試驗，作為設計者執行耐風設計之依據。其中屋頂平貼型、平屋頂踞置型、地面踞置型、地面單斜式棚架型的耐風規範草案納入了CNS 16819「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022)，而平屋頂單斜式棚架型因棚架底下有阻擋的實驗數據不夠充足，故未納入 CNS 16819「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022)。但平屋頂單斜式棚架型為台灣常見類型，故建議未來可針對平屋頂單斜式棚架型下有阻擋之情況執行風洞試驗，以使相關耐風規定更為完整。未來甚至可研擬其他常見類型之耐風設計規定，例如水面型或 BIPV，以供業界參考使用。

附錄一「太陽光電系統耐風設計及結構分析手冊」之草案

太陽光電系統耐風設計及結構分析手冊
（草案）

目次

目次.....199
表次.....203
圖次.....205
第一章 手冊導覽.....211
第一節 編撰目的.....211
第二節 內容架構.....212
第二章 太陽光電系統之簡介.....213
第一節 太陽光電系統之種類.....213
第二節 太陽光電系統之可能破壞類型.....215
第三章 斜屋頂平貼型系統之耐風設計（示範例 1）.....219
第一節 設計依據.....220
壹、參考依據.....220
貳、適用範圍.....220
第二節 結構物資料與工址風環境.....221
第三節 橫梁及各扣件之設計風壓(力).....226
壹、橫梁及各扣件之有效受風面積及相關參數.....226
貳、橫梁及各扣件之設計風壓(力).....233
第四節 橫梁之耐風分析及檢核.....236
壹、橫梁.....237
第五節 扣件之耐風分析及檢核.....239
壹、螺栓檢核公式.....239
貳、面板接橫梁之扣件.....239
參、橫梁接 L 型角鋁之扣件.....241
肆、L 型角鋁接支撐鋁件之扣件.....242
伍、支撐鋁件接屋頂浪板下結構梁之扣件.....243
第四章 地面踞置型系統之耐風設計（示範例 2）.....245
第一節 設計依據.....246

壹、參考依據 246
貳、適用範圍 246
第二節 結構物資料與工址風環境 247
第三節 各構件及扣件之設計風壓(力) 252
壹、各構件有效受風面積及相對應之總淨風壓係數 252
貳、構件與扣件之設計風壓（力） 259
第四節 構件之耐風分析及檢核 263
壹、橫梁 264
貳、縱梁 266
參、柱 267
第五節 扣件之耐風分析及檢核 269
壹、螺栓檢核公式 269
貳、面板接橫梁之扣件 269
參、橫梁接縱梁之扣件 272
肆、縱梁接柱之扣件 274
伍、柱接基座之扣件 276
第五章 平屋頂踞置型系統之耐風設計（示範例 3） 279
第一節 設計依據 280
壹、參考依據 280
貳、適用範圍 280
第二節 結構物資料與工址風環境 282
第三節 各構件及扣件之設計風壓(力) 287
壹、各構件有效受風面積及相對應之總淨風壓係數 287
貳、構件與扣件之設計風壓（力） 297
第四節 構件之耐風分析及檢核 300
壹、橫梁 301
貳、縱梁 303
參、柱 304

第五節 扣件之耐風分析及檢核.....306
壹、螺栓檢核公式.....306
貳、面板接橫梁之扣件.....306
參、橫梁接縱梁之扣件.....309
肆、縱梁接柱之扣件.....311
伍、柱接基座之扣件.....313
第六章 地面單斜式棚架型系統之耐風設計（示範例 4）.....315
第一節 設計依據.....316
壹、參考依據.....316
貳、適用範圍.....316
第二節 結構物資料與工址風環境.....317
第三節 各構件及扣件之設計風壓（力）.....321
壹、各構件及扣件之有效受風面積及淨風壓係數.....322
貳、構件及扣件之設計風壓（力）.....329
參、支撐柱本身之設計風力.....333
肆、面板傳遞至支撐柱風壓(力)不同估算方式之比較.....334
第四節 構件之耐風分析及檢核.....340
壹、橫梁.....341
貳、縱梁.....342
參、支撐柱.....344
第五節 扣件之耐風分析及檢核.....350
壹、面板接橫梁之扣件.....351
貳、橫梁接縱梁之扣件.....352
參、縱梁接柱之扣件.....353
肆、柱接基座之扣件.....354
第七章 平屋頂單斜式棚架型系統之耐風設計（示範例 5）.....357
第一節 設計依據.....358
壹、參考依據.....358

貳、適用範圍 358
第二節 結構物資料與工址風環境料 359
第三節 各構件及扣件之設計風壓（力） 363
壹、各構件及扣件之有效受風面積及淨風壓係數 364
貳、構件及扣件之設計風壓（力） 371
參、支撐柱本身側向之設計風力 375
肆、面板傳遞至支撐柱風壓(力)不同估算方式之比較 377
第四節 構件之耐風分析及檢核 383
壹、橫梁 384
貳、縱梁 385
參、支撐柱 387
第五節 扣件之耐風分析及檢核 393
壹、面板接橫梁之扣件 394
貳、橫梁接縱梁之扣件 395
參、縱梁接柱之扣件 396
肆、柱接基座之扣件 397
參考文獻 399

表次

表 3-1 斜屋頂平貼型系統之結構物資料與工址風環境 225
表 3-2 示範例 1 構件及扣件之屋頂外風壓係數(G_{cp}) 230
表 3-3 示範例 1 構件及扣件之設計風壓及風力 235
表 3-4 示範例 1 構件之斷面性質與斷面形狀 236
表 4-1 地面踞置型系統之結構物與工址風環境資料 251
表 4-2 當 0°≤ ω ≤ 5° 時，$(GC_{rn})_a$之計算公式 256
表 4-3 當 15°≤ ω ≤ 35° 時，$(GC_{rn})_a$之計算公式 256
表 4-4 示範例 2 構件及扣件之相關參數 262
表 4-5 示範例 2 之斷面性質與斷面形狀 264
表 5-1 平屋頂踞置型系統之結構物與工址風環境資料 286
表 5-2 當 0°≤ ω ≤ 5°時，$(GC_{rn})_{nom}$之計算公式 293
表 5-3 當 15°≤ ω ≤ 35° 時，$(GC_{rn})_{nom}$之計算公式 293
表 5-4 示範例 3 之構件及扣件之相關參數 299
表 5-5 示範例 3 構件之斷面性質與斷面形狀 301
表 6-1 地面單斜式棚架之結構物資料與工址風環境 320
表 6-2 地面單斜式棚架型之淨風壓係數表 327
表 6-3 示範例 4 構件及扣件之淨風壓係數C_{pn} 328
表 6-4 示範例 4 不同區域之設計風壓 331
表 6-5 示範例 4 構件及扣件之設計風壓及風力 332
表 6-6 示範例 4 支撐柱本身之設計風力 334
表 6-7 開放式建築物之單斜式屋頂的風力係數 335
表 6-8 示範例 4 面板傳遞至支撐柱之設計風力（耐風規範 2014） 336
表 6-9 開放式建築物之單斜式屋頂的淨風壓係數C_N 337
表 6-10 風向平行於屋脊時開放式建築物之屋頂的淨風壓係數C_N 339
表 6-11 示範例 4 面板傳遞至支撐柱的設計風壓（新版耐風規範） (kgf/m^2) 339
表 6-12 示範例 4 構件之斷面性質 340
表 6-13 示範例 4 所有載重組合下對 g 點下方柱產生的最大受力 348
表 6-14 示範例 4 所有載重組合下對 k 點下方柱產生的最大受力 348
表 7-1 平屋頂單斜式棚架系統之結構物資料與工址風環境 362
表 7-2 平屋頂單斜式棚架型之淨風壓係數表 369
表 7-3 示範例 5 構件及扣件之平屋頂單斜式棚架淨風壓係數$(C_{pn})_r$ 370

表 7-4 示範例 5 不同區域之設計風壓 373
表 7-5 示範例 5 構件及扣件之設計風壓及風力 374
表 7-6 示範例 5 支撐柱本身之設計風力 376
表 7-7 開放式建築物之單斜式屋頂的風力係數 378
表 7-8 示範例 5 面板傳遞至支撐柱的設計風力（耐風規範 2014） 379
表 7-9 開放式建築物之單斜式屋頂的淨風壓係數C_N.....380
表 7-10 風向平行於屋脊時開放式建築物之屋頂的淨風壓係數C_N.....382
表 7-11 示範例 5 面板傳遞至支撐柱的設計風壓（新版耐風規範）(kgf/m^2) 382
表 7-12 示範例 5 構件之斷面性質 383
表 7-13 示範例 5 所有載重組合下對 g 點下方柱產生的最大受力.....391
表 7-14 示範例 5 所有載重組合下對 k 點下方柱產生的最大受力.....392

圖次

圖 2-1 斜屋頂平貼型之示意圖 213
圖 2-2 地面距置型之示意圖 214
圖 2-3 平屋頂距置型之示意圖 214
圖 2-4 地面單斜式棚架型之示意圖 214
圖 2-5 平屋頂單斜式棚架型之示意圖 215
圖 2-6 支撐架與屋頂面接合處之破壞照片 216
圖 2-7 面板框架處之破壞照片 216
圖 2-8 面板框架與支撐架接合處之破壞照片 216
圖 2-9 蘇迪勒颱風對彰化太陽光電系統造成之破壞照片 217
圖 3-1 斜屋頂平貼型系統之耐風設計流程圖 219
圖 3-2 斜屋頂平貼型系統之符號示意圖 220
圖 3-3 斜屋頂平貼型系統之整體場域立體配置圖 221
圖 3-4 斜屋頂平貼型系統之側視示意圖 222
圖 3-5 斜屋頂平貼型系統之整體場域平面配置圖 222
圖 3-6 斜屋頂平貼型系統之立體配置圖 222
圖 3-7 斜屋頂平貼型系統之平行面板平面圖 223
圖 3-8 斜屋頂平貼型系統 x 向之側視圖 223
圖 3-9 斜屋頂平貼型系統 y 向之側視圖 223
圖 3-10 斜屋頂平貼型系統之設計位置圖 224
圖 3-11 示範例 1 之橫梁 a-b-c-d-e-f-g-h 有效受風面積示意圖 227
圖 3-12 示範例 1 之面板接橫梁扣件 j 點有效受風面積示意圖 227
圖 3-13 示範例 1 之橫梁接 L 型角鋁扣件 c 點有效受風面積示意圖 228
圖 3-14 示範例 1 之橫梁接支撐架扣件 p 點有效受風面積示意圖 228
圖 3-15 示範例 1 之支撐架接浪板扣件 v 點有效受風面積示意圖 229
圖 3-16 θ ≦ 7°之屋頂外風壓係數之區域劃分示意圖（h≦18 m 建築物） 229
圖 3-17 θ ≦ 7°之屋頂外風壓係數（h≦18 m 建築物） 230
圖 3-18 構件所在結構系統與鄰近結構系統之距離>1.2 m 時可能產生$\gamma_{E_1} = 1.5$ 之示意圖 231
圖 3-19 構件所在面板與鄰近面板之距離$> 1.2\ m$時可能產生$\gamma_{E_1} = 1.5$之示意圖 232
圖 3-20 斜屋頂平貼型系統之橫梁受力作用圖 237

圖 3-21 斜屋頂平貼型系統之面板接橫梁示意圖 1 240
圖 3-22 斜屋頂平貼型系統之面板接橫梁示意圖 2 240
圖 3-23 斜屋頂平貼型系統之橫梁接 L 型角鋁示意圖 241
圖 3-24 斜屋頂平貼型系統之 L 型角鋁接支撐鋁件示意圖 242
圖 3-25 斜屋頂平貼型系統之支撐鋁件接屋頂浪板示意圖 243
圖 4-1 地面踞置型結構系統之耐風設計流程圖 245
圖 4-2 地面踞置型結構系統示意圖 246
圖 4-3 整體場域地面踞置型系統之立體配置圖 247
圖 4-4 整體場域地面踞置型系統之平面配置圖(單位: mm) 248
圖 4-5 單一地面踞置型系統之立體配置圖 248
圖 4-6 單一地面踞置型系統之側視圖 249
圖 4-7 單一地面踞置型系統之側視示意圖(單位:mm) 249
圖 4-8 單一地面踞置型系統平行面板之平面圖(單位:mm) 250
圖 4-9 單一地面踞置型系統之設計位置圖(單位:mm) 250
圖 4-10 示範例 2 之橫梁 a-b-c-d-e 有效受風面積示意圖(單位:mm).....253
圖 4-11 示範例 2 之縱梁 f-g-h-i 有效受風面積示意圖(單位:mm) 254
圖 4-12 示範例 2 之 g 點及 h 點有效受風面積示意圖(單位:mm).....254
圖 4-13 示範例 2 之 k 點有效受風面積示意圖.....255
圖 4-14 示範例 2 之 c 點有效受風面積示意圖(單位:mm).....255
圖 4-15 構件所在結構系統與鄰近結構系統之距離大於max $(4h_2, 1.2m)$時可能產生$\gamma_{E_3} = 1.5$之示意圖.....258
圖 4-16 構件所在面板與鄰近面板之距離大於max $(4h_2, 1.2m)$時可能產$\gamma_{E_3} = 1.5$之示意圖.....258
圖 4-17 示範例 2 之橫梁 a-b-c-d-e 受力作用圖 265
圖 4-18 示範例 2 之縱梁 f-g-h-i 受力作用圖 266
圖 4-19 示範例 2 之柱受力作用圖 1 268
圖 4-20 示範例 2 之柱受力作用圖 2 268
圖 4-21 地面踞置型系統之面板接橫梁示意圖 1 270
圖 4-22 地面踞置型系統之面板接橫梁示意圖 2 270
圖 4-23 地面踞置型系統之面板接橫梁示意圖 3 271
圖 4-24 地面踞置型系統之面板接橫梁示意圖 4 271
圖 4-25 地面踞置型系統之橫梁接縱梁示意圖 1 272
圖 4-26 地面踞置型系統之橫梁接縱梁示意圖 2 273

圖 4-27 地面踞置型系統之橫梁接縱梁示意圖 3 273
圖 4-28 地面踞置型系統之 A 處螺栓與縱梁連接示意圖.....274
圖 4-29 地面踞置型系統之 B 處螺栓與柱連接示意圖.....275
圖 4-30 地面踞置型系統之柱與基座連接示意圖 276
圖 5-1 平屋頂踞置型結構系統之耐風設計流程圖 279
圖 5-2 平屋頂踞置型結構系統示意圖 281
圖 5-3 整體場域平屋頂踞置型系統之平面配置圖 282
圖 5-4 整體場域平屋頂踞置型系統之平面配置圖(單位:mm) 283
圖 5-5 單一平屋頂踞置型系統之立體配置圖 283
圖 5-6 單一平屋頂踞置型系統之側視圖 284
圖 5-7 單一平屋頂踞置型系統之側視示意圖(單位:mm) 284
圖 5-8 單一平屋頂踞置型系統平行面板之平面圖(單位:mm) 285
圖 5-9 單一平屋頂踞置型系統之設計位置圖(單位: mm) 285
圖 5-10 示範例 3 之橫梁 a-b-c-d-e 有效受風面積示意圖(單位:mm).....288
圖 5-11 示範例 3 之縱梁 f-g-h-i 有效受風面積示意圖(單位:mm) 289
圖 5-12 示範例 3 之 g 點及 h 點有效受風面積示意圖(單位:mm).....289
圖 5-13 示範例 3 之 k 點有效受風面積示意圖.....290
圖 5-14 示範例 3 之 c 點有效受風面積示意圖(單位:mm).....290
圖 5-15 平屋頂踞置型之屋頂分區圖 291
圖 5-16 構件所在結構系統與鄰近結構系統之距離大於max $(4h_2, 1.2m)$時可能產生$\gamma_{E_2} = 1.5$之示意圖.....295
圖 5-17 構件所在面板與鄰近面板之距離大於max $(4h_2, 1.2m)$時可能產生$\gamma_{E_2} = 1.55$之示意圖.....295
圖 5-18 示範例 3 之橫梁 a-b-c-d-e 受力作用圖 302
圖 5-19 示範例 3 之縱梁 f-g-h-i 受力作用圖 303
圖 5-20 示範例 3 之柱受力作用圖 1 305
圖 5-21 示範例 3 之柱受力作用圖 2 305
圖 5-22 平屋頂踞置型系統之面板接橫梁示意圖 1 307
圖 5-23 平屋頂踞置型系統之面板接橫梁示意圖 2 307
圖 5-24 平屋頂踞置型系統之面板接橫梁示意圖 3 308
圖 5-25 平屋頂踞置型系統之面板接橫梁示意圖 4 308
圖 5-26 平屋頂踞置型系統之橫梁接縱梁示意圖 1 309
圖 5-27 平屋頂踞置型系統之橫梁接縱梁示意圖 2 310

圖 5-28 平屋頂踞置型系統之橫梁接縱梁示意圖 3 310
圖 5-29 平屋頂踞置型系統之 A 處螺栓與縱梁連接示意圖.....311
圖 5-30 平屋頂踞置型系統之 B 處螺栓與柱連接示意圖.....312
圖 5-31 平屋頂踞置型系統之柱與基座連接示意圖 313
圖 6-1 地面單斜式棚架型系統之耐風設計流程圖 315
圖 6-2 地面單斜式棚架型系統之立體配置圖 317
圖 6-3 地面單斜式棚架型系統之平行面板平面圖 318
圖 6-4 地面單斜式棚架型系統 y 向之側視圖 318
圖 6-5 地面單斜式棚架型系統 x 向之側視圖 318
圖 6-6 地面單斜式棚架型系統 y 向之示意圖 319
圖 6-7 地面單斜式棚架型系統之設計位置圖 319
圖 6-8 示範例 4 之橫梁 a-b-c-d-e 有效受風面積示意圖 322
圖 6-9 示範例 4 之縱梁 f-g-h-i 有效受風面積示意圖 323
圖 6-10 示範例 4 之 g 點下方柱有效受風面積示意圖.....324
圖 6-11 示範例 4 之 k 點下方柱有效受風面積示意圖.....324
圖 6-12 示範例 4 之面板接橫梁扣件 j 點有效受風面積示意圖 325
圖 6-13 示範例 4 之橫梁接縱梁扣件 c 點有效受風面積示意圖.....325
圖 6-14 示範例 4 之縱梁接柱扣件 g 點有效受風面積示意圖.....326
圖 6-15 單斜屋頂區域劃分示意圖 328
圖 6-16 示範例 4 支撐柱本身之設計風力（x 向）.....333
圖 6-17 示範例 4 支撐柱本身之設計風力（y 向）.....334
圖 6-18 開放式建築物之單斜式屋頂的淨風壓係數C_N.....337
圖 6-19 風向平行於屋脊時開放式建築物之屋頂的淨風壓係數C_N.....338
圖 6-20 示範例 4 之橫梁 a-b-c-d-e 受力作用圖 341
圖 6-21 示範例 4 之縱梁 f-g-h-i 受力作用圖 343
圖 6-22 示範例 4 現行耐風規範之主要風力作用圖（$+x$向）.....344
圖 6-23 示範例 4 現行耐風規範之主要風力作用圖（$-x$向）.....345
圖 6-24 示範例 4 現行耐風規範之主要風力作用圖（$+y$向）.....345
圖 6-25 示範例 4 擬議新版耐風規範之主要風力作用圖（風向角180°）.....346
圖 6-26 示範例 4 擬議新版耐風規範之主要風力作用圖（風向角0°）.....346
圖 6-27 示範例 4 擬議新版耐風規範之主要風力作用圖（風向角90°）.....347
圖 6-28 示範例 4 耐風規範之局部風壓作用圖（$+x$向）.....347
圖 6-29 地面單斜式棚架型系統之面板接橫梁扣件接合圖 351

圖 6-30 地面單斜式棚架型系統之橫梁接縱梁扣件接合圖 352
圖 6-31 地面單斜式棚架型系統之縱梁接柱扣件接合圖 354
圖 6-32 地面單斜式棚架型系統之柱接基座扣件接合圖 355
圖 7-1 平屋頂單斜式棚架型系統之耐風設計流程圖 357
圖 7-2 平屋頂單斜式棚架型系統之立體配置圖 359
圖 7-3 平屋頂單斜式棚架型系統之平行面板之平面圖 360
圖 7-4 平屋頂單斜式棚架型系統 y 向之側視圖 360
圖 7-5 平屋頂單斜式棚架型系統 x 向之側視圖 360
圖 7-6 平屋頂單斜式棚架型系統 y 向之示意圖 361
圖 7-7 平屋頂單斜式棚架型系統之設計位置圖 361
圖 7-8 示範例 5 之橫梁 a-b-c-d-e 有效受風面積示意圖 364
圖 7-9 示範例 5 之縱梁 f-g-h-i 有效受風面積示意圖 365
圖 7-10 示範例 5 之 g 點下方柱有效受風面積示意圖.....366
圖 7-11 示範例 5 之 k 點下方柱有效受風面積示意圖.....366
圖 7-12 示範例 5 之面板接橫梁扣件 j 點有效受風面積示意圖 367
圖 7-13 示範例 5 之橫梁接縱梁扣件 c 點有效受風面積示意圖.....367
圖 7-14 示範例 5 之縱梁接柱扣件 g 點有效受風面積示意圖.....368
圖 7-15 單斜屋頂區域劃分示意圖 370
圖 7-16 示範例 5 支撐柱本身之設計風力（x 向）.....375
圖 7-17 示範例 5 支撐柱本身之設計風力（y 向）.....376
圖 7-18 開放式建築物之單斜式屋頂的淨風壓係數C_N.....380
圖 7-19 風向平行於屋脊時開放式建築物之屋頂的淨風壓係數C_N.....381
圖 7-20 示範例 5 之橫梁 a-b-c-d-e 受力作用圖 384
圖 7-21 示範例 5 之縱梁 f-g-h-i 受力作用圖 386
圖 7-22 示範例 5 規範研擬之平屋頂單斜式棚架風壓作用圖（$+x$向）.....388
圖 7-23 示範例 5 現行耐風規範之主要風力作用圖（$+x$向）.....388
圖 7-24 示範例 5 現行耐風規範之主要風力作用圖（$-x$向）.....389
圖 7-25 示範例 5 現行耐風規範之主要風力作用圖（$+y$向）.....389
圖 7-26 示範例 5 擬議新版耐風規範之主要風力作用圖（風向角$180°$）.....390
圖 7-27 示範例 5 擬議新版耐風規範之主要風力作用圖（風向角$0°$）.....390
圖 7-28 示範例 5 擬議新版耐風規範之主要風力作用圖（風向角$90°$）.....391
圖 7-29 屋頂單斜式棚架型系統之面板接橫梁扣件接合圖 394
圖 7-30 屋頂單斜式棚架型系統之橫梁接縱梁扣件接合圖 395

圖 7-31 屋頂單斜式棚架型系統之縱梁接柱扣件接合圖 397
圖 7-32 屋頂單斜式棚架型系統之柱接基座扣件接合圖 398

第一章 手冊導覽

第一節 編撰目的

太陽能發電是政府積極推動之綠色能源之一，各地設置於建築物屋頂或地面的太陽光電系統日漸增多，依其下部支撐架之配置形式及安裝位置可概分為斜屋頂平貼型、地面踞置型、平屋頂踞置型、地面單斜式棚架型及平屋頂單斜式棚架型等。過去幾年國內太陽光電系統常見受風破壞情況，其破壞位置可能在支撐結構與支承面之接合處、面板框架結構或面板框架與支撐結構之接合處而飄散之被破壞構件甚至可能對周邊之人或建築造成傷害。依據「設置再生能源設施免請領雜項執照標準」第 5 條及第 6 條之規定，視太陽光電發電設備設置高度與範圍設置前需檢附設計者簽證之結構安全證明書或結構計算說明書，送所在地主管建築機關備查。而在結構安全證明書或結構計算說明書中，需妥慎對太陽能光電板、下部支撐架構件及接合扣件作結構耐風設計與分析，以確保在強風吹襲下之安全性，避免產生系統整體破壞、系統局部破壞或對周邊之人或建築造成傷害。除了正確的結構分析與設計外，妥慎的施工與定期維護管理（例如螺栓之定期扭力檢核、構件之鏽蝕檢查等）也非常重要，但本手冊將著重於太陽光電系統之耐風設計。

國內一般建築物之主要風力抵抗系統及局部構材或外部被覆物之耐風設計係根據內政部頒布之「建築物耐風設計規範及解說」(2014)，但其中並未提供上述各太陽光電系統完整之耐風設計規定。民國 108 年建築研究所委託研究計劃「太陽光電系統之耐風設計規範研擬」曾釐清「建築物耐風設計規範及解說」(2014)未能涵蓋之部分，回顧美國及日本相關規範之規定，確認與國內耐風規範之相容性；並考慮國內現存設計情況，執行一系列風洞試驗，採用極值分析求取極值風壓係數再統合並簡化分析結果，以研擬相關耐風設計規範條文及圖表，作為設計者執行耐風設計之依據。相關研究成果經審查修訂後成為 CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」，也預計將納入下一版之「建築物耐風設計規範及解說」，適用於估算四種太陽光電系統(斜屋頂平貼型、地面踞置型、平屋頂踞置型及地面單斜式棚架型)支撐結構所承受之設計風載重。

過去為使設計者能方便且正確使用「建築物耐風設計規範及解說」作一般建築物之耐風設計，建研所曾於 2016 年出版「建築物耐風設計技術手冊」，於 2020 年出版「帷幕牆系統結構耐風設計手冊」，提供不同設計範例之計算流程，

頗受業界肯定。基於相同的精神，本手冊根據「太陽光電系統耐風設計及結構分析手冊之研擬」之成果報告(2024)，提供五個設計示範例，供設計者參考，以確保結構安全性。其中斜屋頂平貼型、地面踞置型、平屋頂踞置型及地面單斜式棚架型太陽光電系統支撐結構所承受之設計風壓以 CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022)估算，平屋頂單斜式棚架型支撐結構所承受之設計風壓以建研所委託研究計畫「太陽光電系統之耐風設計規範研擬」(2019) 之成果報告估算。

第二節　內容架構

本手冊針對國內不同種類之太陽光電系統，分別選定其常見之下部支撐架型式。斜屋頂平貼型、地面踞置型、平屋頂踞置型及地面單斜式棚架型等四種系統之設計是根據 CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022)之規定，而平屋頂單斜式棚架型之設計是根據建研所委託研究計劃「太陽光電系統之耐風設計規範研擬」(2019)成果報告之規定，詳述相關之耐風設計程序與計算細節。

一般而言，太陽光電系統下部支撐架之設計需有設計圖和結構計算書，其中設計圖中包含平面圖（含佈設配置）、立面圖（含正面、背面、側面）、剖面圖、構架圖（含構件及接合物尺寸標示）、接合設計詳圖、基座或基礎設計詳圖、構件與接合物材料規格註明及套繪既有建築物屋頂結構平面圖。結構計算書包含規範依據說明、材料規格強度及斷面性質說明、設計靜載重計算、設計活載重計算、設計風力計算、設計地震力計算、主構架結構模型建立及受力分析、構件應力及強度檢核、接合強度檢核計算、面板扣件與桁梁受力檢核計算及基座接合設計或基礎設計檢核。

本報告之第二章為太陽光電之簡介，介紹太陽光電系統之種類及可能破壞類型；第三章至第七章為五種型式之支撐架耐風設計示範例，分別為第三章斜屋頂平貼型系統(示範例 1)，第四章地面踞置型系統(示範例 2)，第五章平屋頂踞置型系統(示範例 3)，第六章地面單斜式棚架型系統(示範例 4)，第七章平屋頂單斜式棚架型系統(示範例 5)。

第二章　太陽光電系統之簡介

本章首先介紹太陽光電系統之種類，包含斜屋頂平貼型、平屋頂距置型、地面距置型、地面單斜式棚架型及平屋頂單斜式棚架型五種類型，並回顧可能破壞類型。

第一節　太陽光電系統之種類

太陽光電系統可能包括一個或數個太陽光電系統；太陽光電系統是由面板（panel）與支撐結構組合形成，其中面板為多片模組（module）之組合，以支撐架固定於支承面（屋頂面或地面）上；而模組是經預先組合、有完整環境保護之太陽光電電池的組合。本計畫將太陽光電系統分為五種類型，分別為斜屋頂平貼型、地面踞置型、平屋頂踞置型、地面單斜式棚架型及平屋頂單斜式棚架型。

斜屋頂平貼型系統安裝於封閉式建築物或部分封閉式建築物（根據「建築物耐風設計規範及解說」(2014)）之斜屋頂上，由面板與支撐架組合而成，如圖 2-1 所示。地面踞置型安裝於地面，各系統採陣列型式排列，如圖 2-2 所示。平屋頂踞置型安裝於封閉式建築或部分封閉式建築之屋頂上，各系統採陣列型式排列，如圖 2-3 所示。地面單斜式棚架型安裝於地面，含支撐柱且棚架至少有兩個側面各有 80%以上面積為開口，如圖 2-4 所示。平屋頂單斜式棚架型安裝於封閉式建築或部分封閉式建築之平屋頂，含支撐柱且棚架至少有兩個側面各有 80%以上面積為開口，如圖 2-5 所示。



圖 2-1 斜屋頂平貼型之示意圖

資料來源: https://www.energytrend.com.tw/news/20180316-14309029.html



圖 2-2 地面踞置型之示意圖

資料來源:https://www.initialsolar.com/solar-energy-system-ground



圖 2-3 平屋頂踞置型之示意圖

資料來源: http://www.green-source.com.tw/tw/satrackers



圖 2-4 地面單斜式棚架型之示意圖

資料來源:https://www.pinterest.com/pin/715016878312630714/



圖 2-5 平屋頂單斜式棚架型之示意圖

資料來源:https://www.share-en.com/385252080937096338532668 4/5459874

第二節　太陽光電系統之可能破壞類型

依據「設置再生能源設施免請領雜項執照標準」第 5 條及第 6 條之規定，視太陽光電發電設備設置高度與範圍，設置前需檢附設計者簽證之結構安全證明書或結構計算說明書，送所在地主管建築機關備查。而在結構安全證明書或結構計算說明書中，需妥慎對太陽能光電板、下部支撐架構件及接合扣件作結構耐風設計與分析，以確保在強風吹襲下之安全性。

但在過去幾年國內太陽光電系統常見受風破壞之情況，且飄散之被破壞構件甚至可能對周邊之人或建築造成傷害。太陽光電系統常見之破壞位置可能在支撐架與支承之接合處、或面板框架處、或面板框架與支撐架之結合處。例如，圖 2-6 支撐架與屋頂面接合處之破壞；圖 2-7 面板框架處之破壞，圖 2-8 面板框架與支撐架接合處之破壞，圖 2-9 蘇迪勒颱風對彰化太陽光電系統造成之破壞。

目前業界所生產的太陽能面板在出廠前都有做過相關機械測試以及經過 IEC 標準測試認證，面板本身強度及面板框架較無太大問題，故本計劃所做之示範例不考慮面板本身強度與面板框架問題。



圖 2-6 支撐架與屋頂面接合處之破壞照片

資料來源:http://solar543.blogspot.com/2015/10/12.html



圖 2-7 面板框架處之破壞照片

資料來源:技師報「太陽光電發電設備鋁合金框架及支撐架設計的建議」,何象鏞 技師,2014



圖 2-8 面板框架與支撐架接合處之破壞照片

資料來源:技師報「太陽光電發電設備鋁合金框架及支撐架設計的建議」,何象鏞 技師,2014



圖 2-9 蘇迪勒颱風對彰化太陽光電系統造成之破壞照片

資料來源:蘋果即時新聞網「太陽能板種電才啟用 蘇迪勒刮走 3 千萬」

第三章　斜屋頂平貼型系統之耐風設計（示範例 1）

本案例所稱斜屋頂平貼型系統安裝於封閉式建築物或部分封閉式建築物之斜屋頂上（如圖 2-1 所示）。耐風設計的主要目的是確保支撐架在強風環境下能夠維持結構完整性和安全性，而實務上在進行支撐架設計時，尚需考慮不同的載重組合情況，例如靜載重、風載重及地震力之效應，但本示範例只考慮靜載重及風載重之效應。

本示範例首先規劃一斜屋頂平貼型系統，依據 CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022) 之 5.斜屋頂平貼型結構系統之設計風壓，決定其構件及扣件之設計風壓，再考慮風載重及靜載重之效應，作相關之結構設計。本示範例之設計流程圖如圖 3-1 所示。

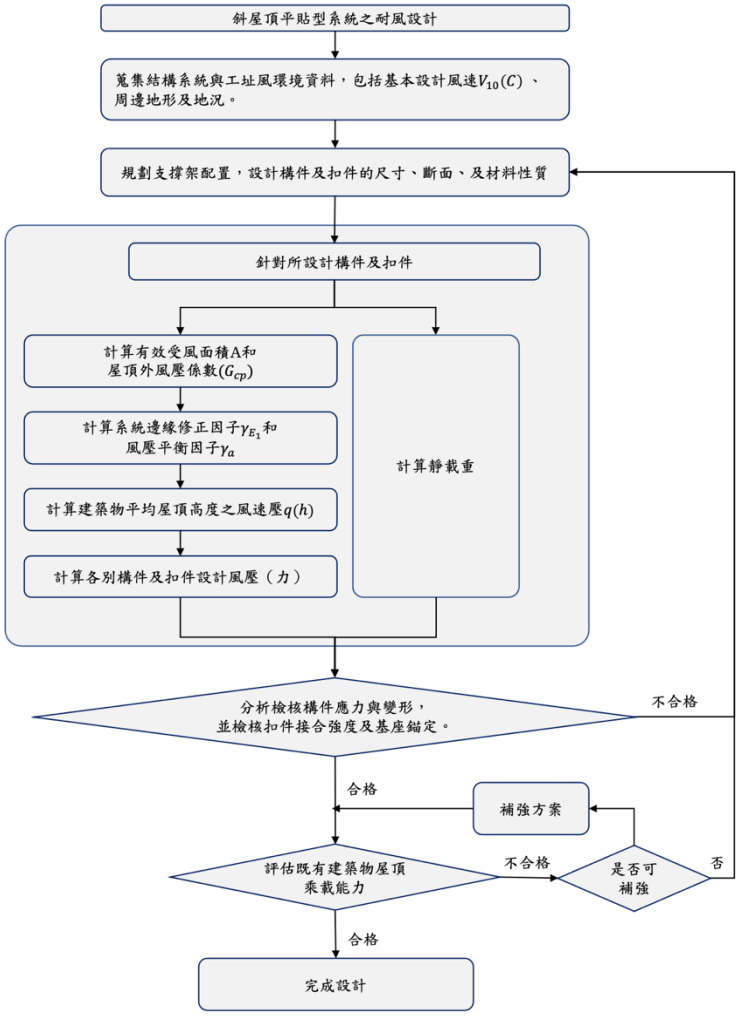


圖 3-1 斜屋頂平貼型系統之耐風設計流程圖

第一節　設計依據

壹、參考依據

1. 內政部，「鋼結構容許應力設計法規範及解說」，2010。
2. 內政部，「建築物耐風設計規範與解說」，2014。
3. 內政部，「冷軋型鋼構造建築物結構設計規範及解說」，2016。
4. 經濟部，CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」之 5.斜屋頂平貼型結構系統之設計風壓，2022。
5. The Aluminum Association，「Aluminum Design Manual」，2005。

貳、適用範圍

CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022) 之 5.斜屋頂平貼型結構系統之設計風壓計算公式適用於同時滿足下列條件之結構系統：

1. 建築物為「建築物耐風設計規範及解說」(2014)所定義之封閉式或部分封閉式建築物，且建築物橫風向或扭轉向風力不顯著。
2. 面板與屋頂面之夾角 ω（如圖 3-2 所示）小於或等於 2°。
3. 面板與屋頂面之最大距離 h_2（如圖 3-2 所示）小於或等於 0.25 m，若屋頂面為波浪板時，h_2 應為面板與平均屋頂面之最大距離。
4. 模組間隙大於或等於 6.4 mm，模組長（或寬）小於或等於 2 m。
5. 本標準提供之風壓計算公式不適用面板設置在屋頂邊緣 2 h_2 內及屋脊任一側 2 h_2 內，其中 h_2 為面板與屋頂面之最大距離。

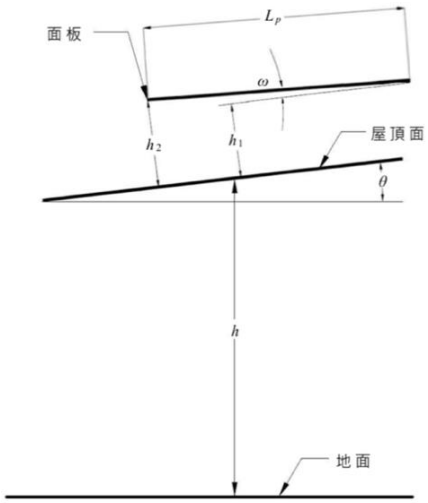


圖 3-2 斜屋頂平貼型系統之符號示意圖

資料來源：CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022) 圖 1

第二節　結構物資料與工址風環境

本章擬於彰化縣和美鎮一建築屋頂上，新建一斜屋頂平貼型太陽光電系統。整體場域立體配置圖如圖 3-3 所示；整體場域側視示意圖如圖 3-4 所示；整體場域平面配置圖如圖 3-5 所示，上色區塊為一座支撐架結構系統，整體場域共配置 20 座支撐架結構系統。

單一結構系統之立體配置圖、平行面板之平面圖、x 向側視圖、y 向側視圖分別如圖 3-6、圖 3-7、圖 3-8 及圖 3-9 所示。單一系統的面板由 5 塊模組組成，以 12 個扣件分別固定於 2 根橫梁上，每根橫梁下方以 6 個扣件分別固定於 6 個 L 型角鋁上，每個 L 型角鋁分別以扣件固定於支撐鋁件上，最後支撐鋁件再固定於屋頂浪板下之結構梁，面板與平均屋頂面之最大距離 h_2 為 0.25 m。

理論上應根據各支撐架結構系統所承受的風壓情況，分別進行其設計，但由於設計程序類似，本範例僅分析設計圖 3-5 左上角上色之支撐架結構系統。針對圖 3-10 所示之單一結構系統，分別設計橫梁 a-b-c-d-e-f-g-h、面板接橫梁扣件（其形心為 j 點）、橫梁接 L 型角鋁扣件（其形心為 c 點）、L 型角鋁接支撐鋁件扣件（其形心位於 p 點）及支撐鋁件接屋頂浪板下結構梁扣件（其形心為 v 點）。

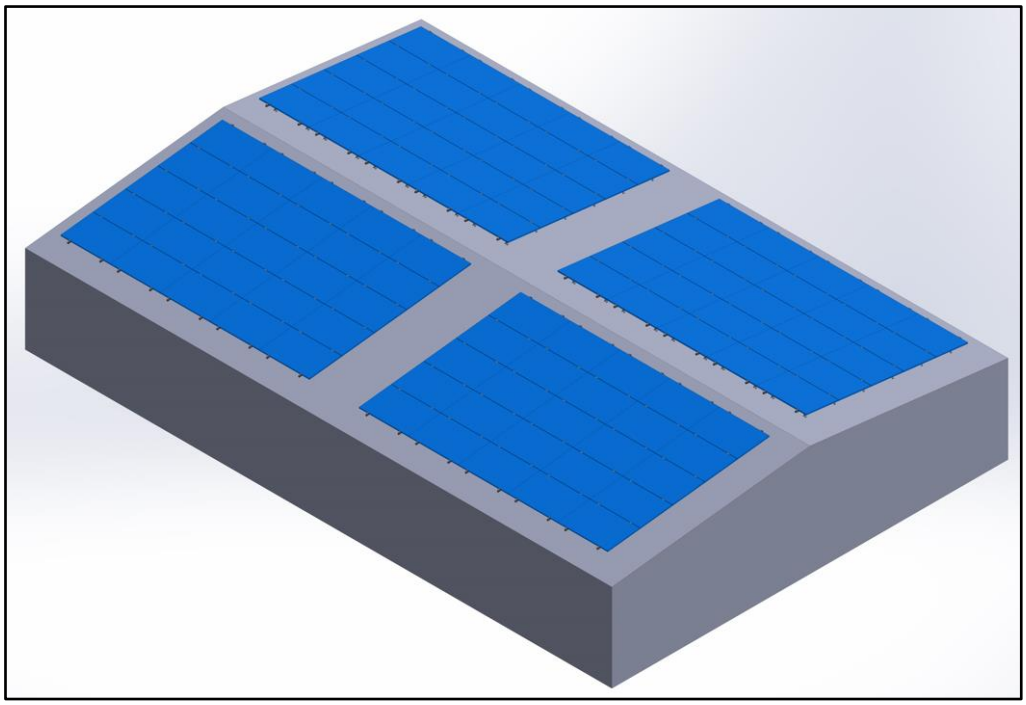


圖 3-3 斜屋頂平貼型系統之整體場域立體配置圖

資料來源：[16]

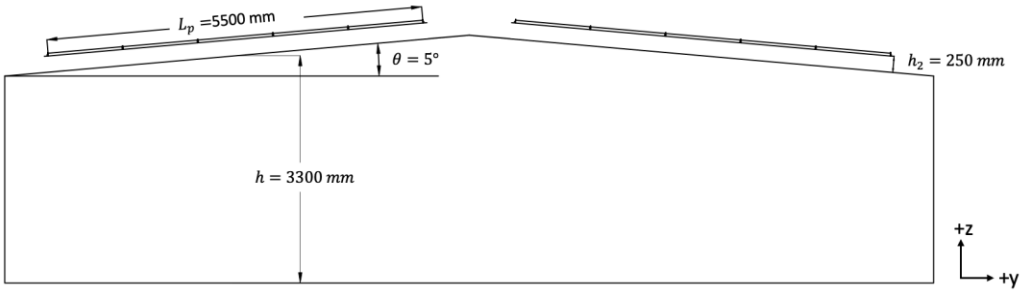


圖 3-4 斜屋頂平貼型系統之側視示意圖

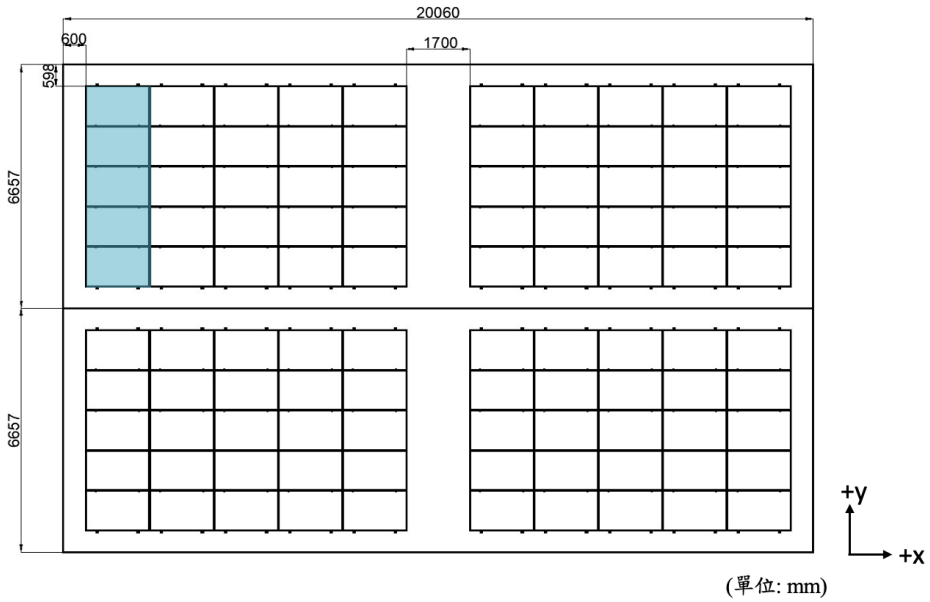


圖 3-5 斜屋頂平貼型系統之整體場域平面配置圖

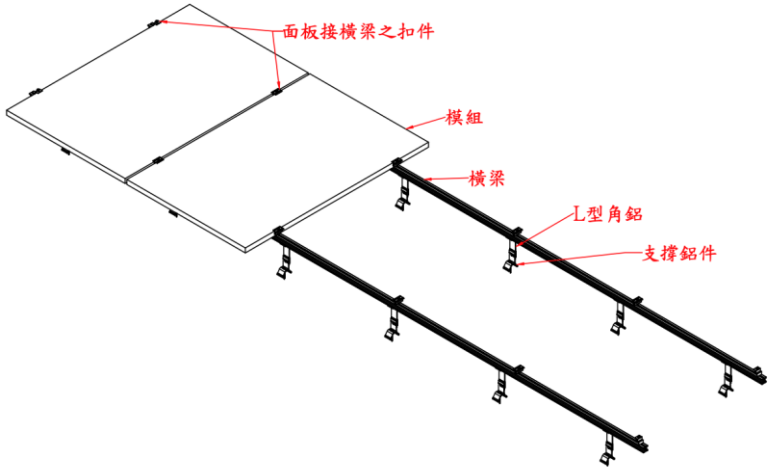


圖 3-6 斜屋頂平貼型系統之立體配置圖

資料來源：修改自[16]

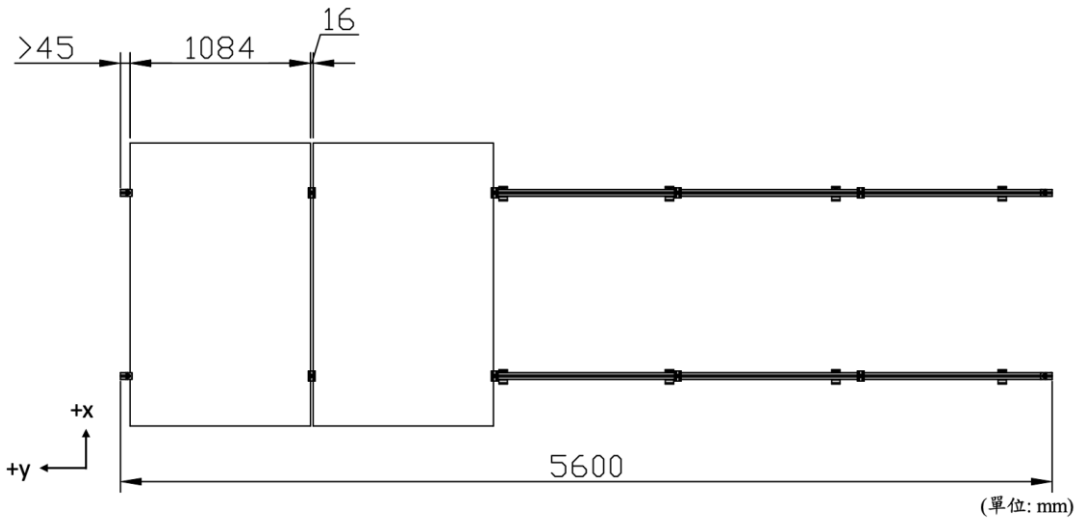


圖 3-7 斜屋頂平貼型系統之平行面板平面圖

資料來源：修改自[16]

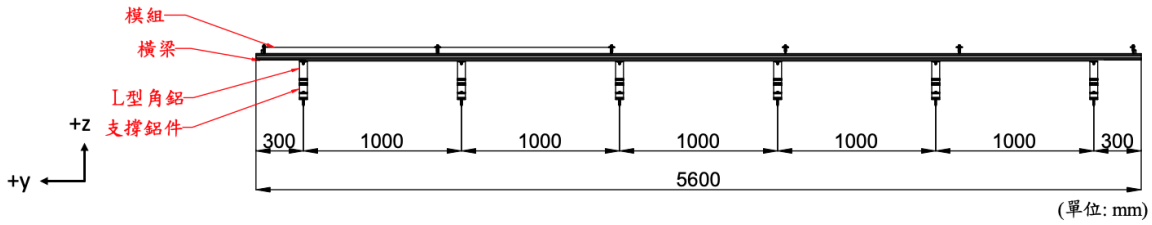


圖 3-8 斜屋頂平貼型系統 x 向之側視圖

資料來源：修改自[16]

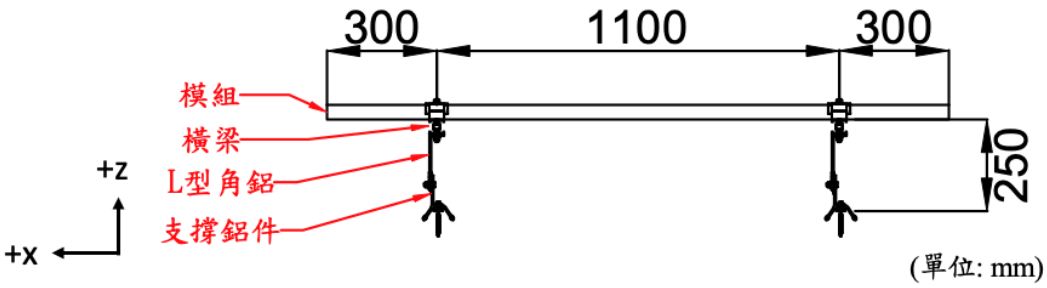


圖 3-9 斜屋頂平貼型系統 y 向之側視圖

資料來源：修改自[16]

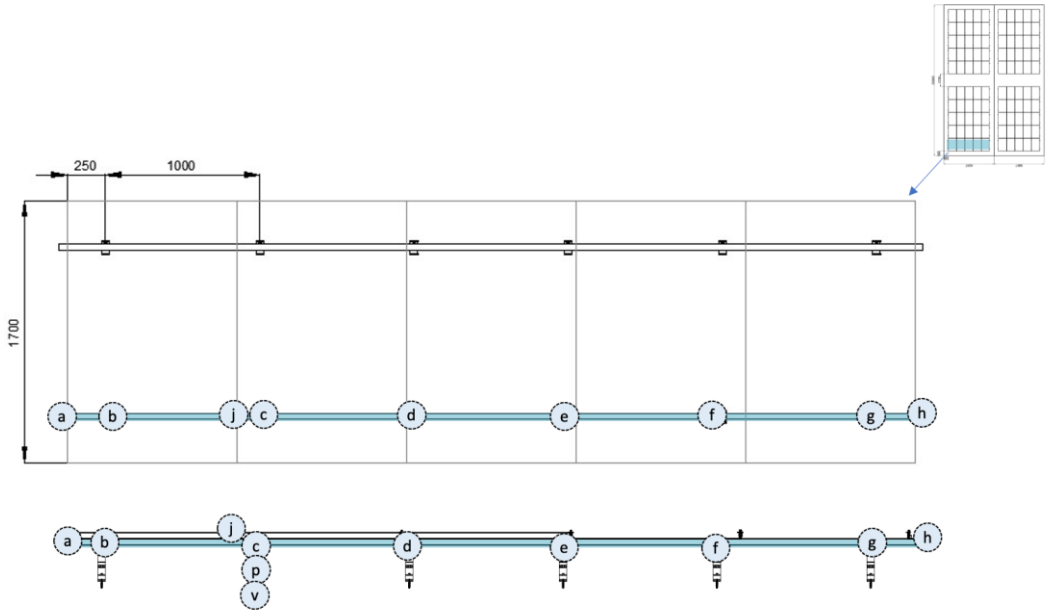


圖 3-10 斜屋頂平貼型系統之設計位置圖

結構物資料包含太陽光電系統尺寸、面板配置、用途係數 I；工址風環境包含基本設計風速$V_{10}(C)$、結構物周邊地形以及地況。本節擬定結構物資料與工址風環境如下表 3-1 所示。

表 3-1 斜屋頂平貼型系統之結構物資料與工址風環境

結構物資料	太陽光電結構系統	面板由 5 塊模組組成，以 12 個扣件分別固定於 2 根橫梁上，每根橫梁下方以 6 個扣件分別固定於 6 個 L 型角鋁上，每個 L 型角鋁分別以扣件固定於支撐鋁件上，最後支撐鋁件再固定於屋頂浪板下之結構梁。
	建築物尺寸	建築物平均屋頂高度 $h = 3.3\,m$；屋頂角度 $\theta = 5°$。
	面板配置	1. 面板弦長 $L_p = 5.5\,m$。 2. 面板與屋頂面之夾角 $\omega = 0°$。 3. 面板與平均屋頂面最大距離 $h_2 = 0.250\,m$。 4. 模組長為$1.7\,m$、寬為$1.084\,m$。 5. 模組間隙為 16 mm
	用途係數	根據「建築物耐風設計規範與解說」規範 2.5 節，依照重要程度可將 I 值分為1.1、1.0或 0.9，本範例取 I = 1.0。
工址風環境	基本設計風速$V_{10}(C)$	根據「建築物耐風設計規範與解說」規範 2.4 節，彰化和美鎮的$V_{10}(C) = 32.5\,m/s$。
	地況種類	依結構物各方向上風處之地表粗糙度決定皆為地況 B。
	地形係數	無特殊地形。

第三節　橫梁及各扣件之設計風壓(力)

橫梁及各扣件之設計風壓(力)之計算步驟包括決定有效受風面積、屋頂外風壓係數、系統邊緣修正因子、風壓平衡因子及計算構件與扣件之設計風壓(力)，其細節如下：

壹、橫梁及各扣件之有效受風面積及相關參數

根據「建築物耐風設計規範及解說」(2014) 1.3 節對有效受風面積 A 之定義可知，結構構件之有效受風面積 A 為跨距長度與有效寬度之乘積，有效寬度不必小於其跨距長度的 1/3。對扣件而言，有效受風面積 A 不得大於單一扣件之受風面積。決定有效受風面積及計算屋頂外風壓係數方式如下：

[步驟 1] 有效受風面積

(a) 橫梁 a-b-c-d-e-f-g-h：

如圖 3-11 所示，將面板所承受風力傳遞至橫梁 a-b-c-d-e-f-g-h 上，且橫梁架設在間距為 1 m 的支撐架上並被分為 a-b 段、b-c 段、c-d 段、d-e 段、e-f 段、f-g 段及 g-h 段。

針對 a-b 段橫梁，跨距長度為懸臂段長度 0.25 m，承受風壓面積之寬度為$1.7\,m/2 = 0.85\,m$，故承受風壓面積為$0.25\,m \times 0.85\,m = 0.213\,m^2$。a-b 段橫梁之有效寬度為$\max(0.85, 0.25/3) = 0.85\,m$，故其有效受風面積為$A = 0.25\,m \times 0.85\,m = 0.213\,m^2$。同理，g-h 段橫梁之承受風壓面積為$0.213\,m^2$，有效受風面積亦為$0.213\,m^2$。

針對 b-c 段橫梁，跨距長度為支撐架間距 1.00 m，承受風壓面積之寬度為 0.85 m，故承受風壓面積為$1.00\,m \times 0.85\,m = 0.85\,m^2$。b-c 段橫梁之有效寬度為$\max(0.85, 1.00/3) = 0.85\,m$，故其有效受風面積為$A = 1.0\,m \times 0.85\,m = 0.85\,m^2$。同理，c-d 段、d-e 段、e-f 段、f-g 段橫梁之承受風壓面積為$0.85\,m^2$，有效受風面積亦為$0.85\,m^2$。

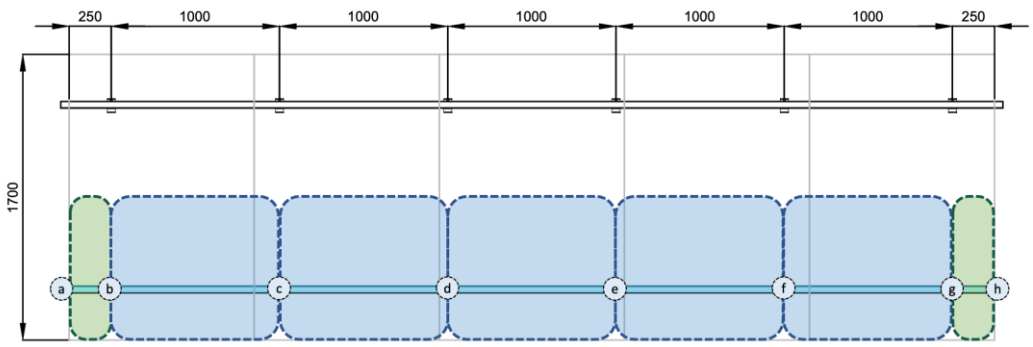


圖 3-11 示範例 1 之橫梁 a-b-c-d-e-f-g-h 有效受風面積示意圖

(b) 面板接橫梁扣件（其形心為 j 點）：

如圖 3-12 所示，單一模組的尺寸為$1.7\ m \times 1.084\ m$。為方便計算，將模組間距計入有效受風面積，調整後的尺寸為$1.7\ m \times 1.1\ m$，並由四個扣件固定。針對 j 點面板接橫梁扣件分析，因扣件之有效受風面積不得大於其承受風壓面積，故其有效受風面積為承受風壓面積$= 0.85\ m \times 1.10m =$ $0.935\ m^2$。

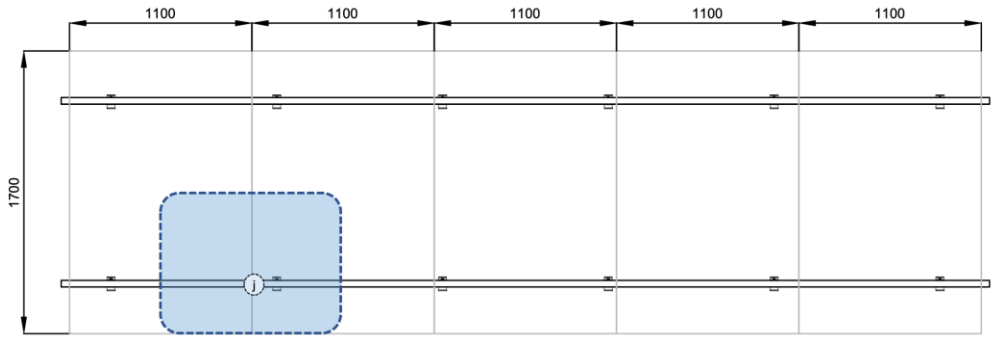


圖 3-12 示範例 1 之面板接橫梁扣件 j 點有效受風面積示意圖

(c) 橫梁接 L 型角鋁扣件（其形心為 c 點）：

如圖 3-13 所示，將風力傳遞至兩根橫梁上，橫梁架設在 b 點、c 點、d 點、e 點、f 點及 g 點的橫梁接 L 型角鋁扣件上。針對橫梁接 L 型角鋁扣件 c 點分析，因扣件之有效受風面積不得大於其承受風壓面積，故其有效受風面積為承受風壓面積$\mathrm{A} = 1.00\ m \times 0.85\ m = 0.85\ m^2$。

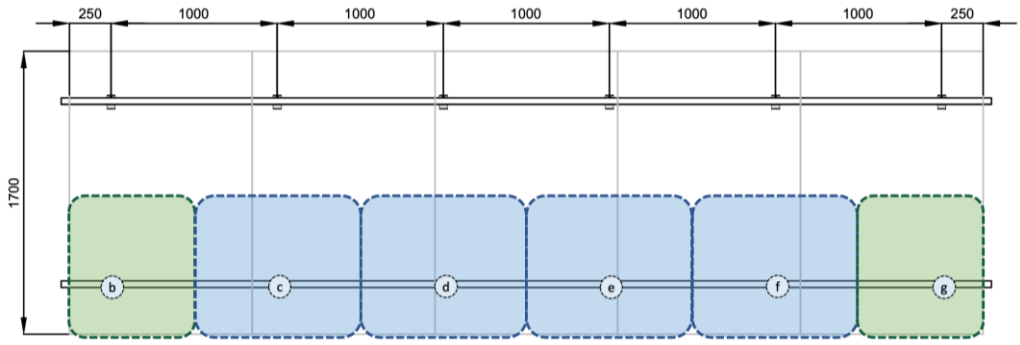


圖 3-13 示範例 1 之橫梁接 L 型角鋁扣件 c 點有效受風面積示意圖

(d) L 型角鋁接支撐鋁件扣件（其形心為 p 點）：

如圖 3-14 所示，將風力傳遞至十二個 L 型角鋁上，L 型角鋁分別架設在 o 點、p 點、q 點、r 點、s 點及 t 點的支 L 型角鋁接支撐鋁件扣件上。針對 p 點之 L 型角鋁接支撐之鋁件扣件分析，因扣件之有效受風面積不得大於其承受風壓面積，故其有效受風面積為承受風壓面積 $\mathrm{A} = 1.00\,m \times 0.85\,m = 0.85\,m^2$。

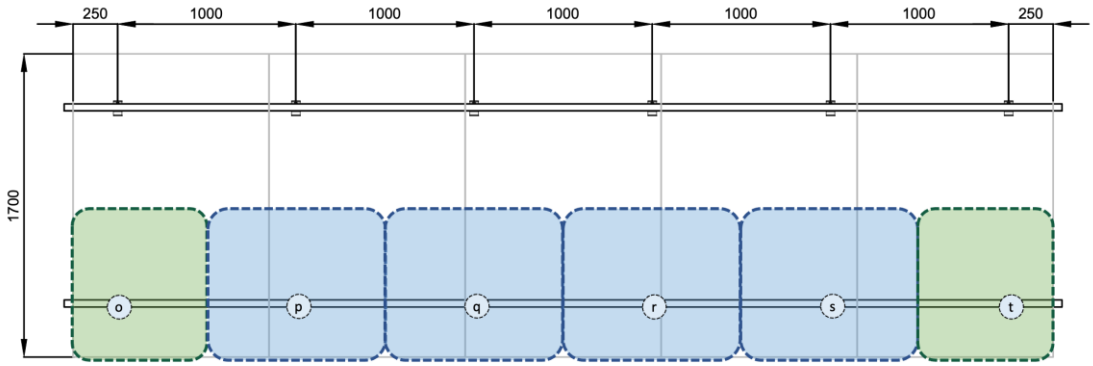


圖 3-14 示範例 1 之橫梁接支撐架扣件 p 點有效受風面積示意圖

(e) 支撐鋁件接屋頂浪板下結構梁扣件（其形心為 v 點）：

如圖 3-15 所示，將風力傳遞至十二個支撐鋁件上，支撐鋁件分別架設在 u 點、v 點、w 點、x 點、y 點及 z 點的支撐鋁件接屋頂浪板下結構梁扣件上。取支撐鋁件接屋頂浪板下結構梁扣件 v 點分析，因扣件之有效受風面積不得大於其承受風壓面積，故其有效受風面積為承受風壓面積 $A = 0.85\,m \times 1.00\,m = 0.85\,m^2$。

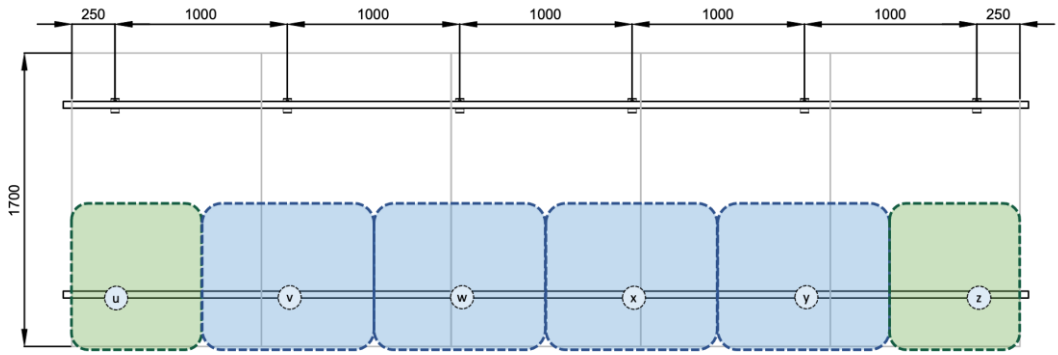


圖 3-15 示範例 1 之支撐架接浪板扣件 v 點有效受風面積示意圖

資料來源：本研究整理

[步驟 2] 屋頂外風壓係數

根據「建築物耐風設計規範及解說」(2014)第 3.3 節之規定決定屋頂外風壓係數(GC_p)，如圖 3-16 所示將雙斜式屋頂分為①區、②區、③區，區域內屋頂外風壓係數(GC_p)可根據圖 3-17，對照有效受風面積決定。其中$a = \min(0.4h,$ 最小寬度的 10% $) = \min(1.32\ m, 1.33\ m) = 1.32\ m$，並確認 a 不能小於 0.9 m 或最小寬度的 4%。

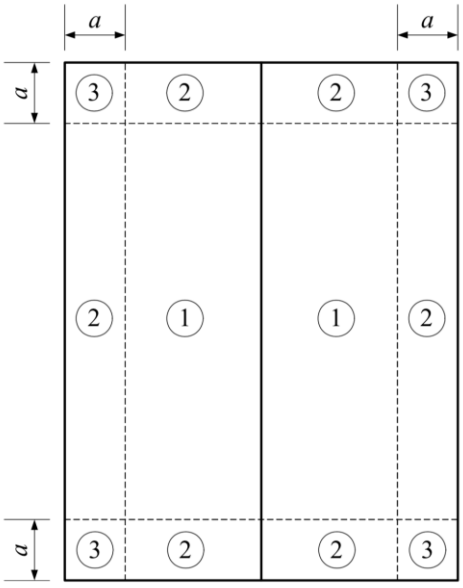


圖 3-16 θ ≦ 7°之屋頂外風壓係數之區域劃分示意圖（h≦18 m 建築物）

資料來源：「建築物耐風設計規範及解說」(2014) 圖 3.1(b)

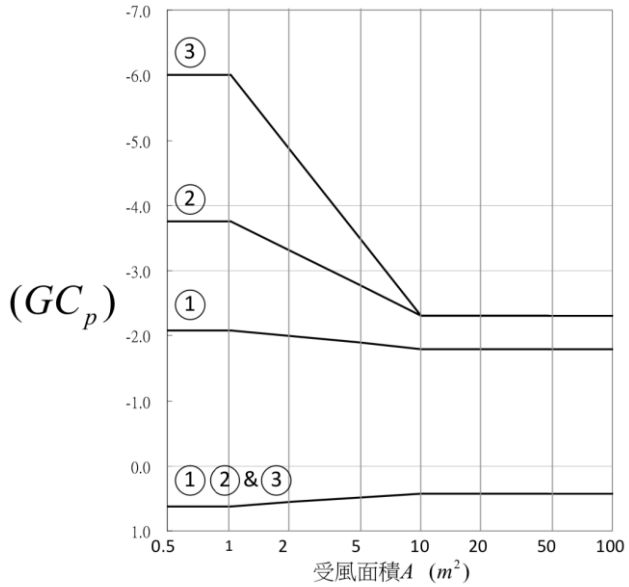


圖 3-17 θ ≦ 7°之屋頂外風壓係數（h≦18 m 建築物）

資料來源：「建築物耐風設計規範及解說」(2014) 圖 3.1(b)

面板接橫梁扣件 j 點的有效受風面積$A = 0.85\ m^2$，根據圖 3-17 可得③區的(GC_p)為 0.6 和-6.0，②區的(GC_p)為 0.6 和-3.8，①區的(GC_p)為 0.6 和-2.1。仿照上述面板接橫梁扣件 j 點外風壓係數的查詢方法，可得其餘構件與扣件的外風壓係數，彙整前述不同 A 的外風壓係數，將其列於表 3-2。

表 3-2 示範例 1 構件及扣件之屋頂外風壓係數(G_{cp})

名稱		有效受風面積(m^2)	③區		②區		①區	
橫梁	a-b 段或 g-h 段	0.213	0.6	-6.0	0.6	-3.8	0.6	-2.1
	b-c 段或 c-d 段或 d-e 段或 e-f 段或 f-g 段	0.850	0.6	-6.0	0.6	-3.8	0.6	-2.1
面板接橫梁扣件	j 點	0.850	0.6	-6.0	0.6	-3.8	0.6	-2.1
橫梁接 L 型角鋁扣件	c 點	0.468	0.6	-6.0	0.6	-3.8	0.6	-2.1
L 型角鋁接支撐鋁件	p 點	0.850	0.6	-6.0	0.6	-3.8	0.6	-2.1
支撐鋁件接屋頂浪板下結構梁扣件	v 點	0.850	0.6	-6.0	0.6	-3.8	0.6	-2.1

[步驟 3] 系統邊緣修正因子γ_{E_1}

根據 CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022) 系統邊緣修正因子γ_{E_1}之決定，若構件同時滿足下述條件，則結構系統之系統邊緣修正因子$\gamma_{E_1} = 1.5$；在其他情況下，結構系統之系統邊緣修正因子$\gamma_{E_1} = 1.0$。

(a) 構件所在結構系統之邊緣與鄰近屋頂邊緣之距離大於 0.5h。

(b) 構件所在結構系統與鄰近結構系統之距離大於 1.2 m（如圖 3-18 所示），或構件所在面板與鄰近面板之距離大於 1.2 m（如圖 3-19 所示）。

(c) 構件位於結構系統邊緣 1.5L_p 範圍內，其中 L_p 為面板弦長。

(d) 構件承受負風壓時。

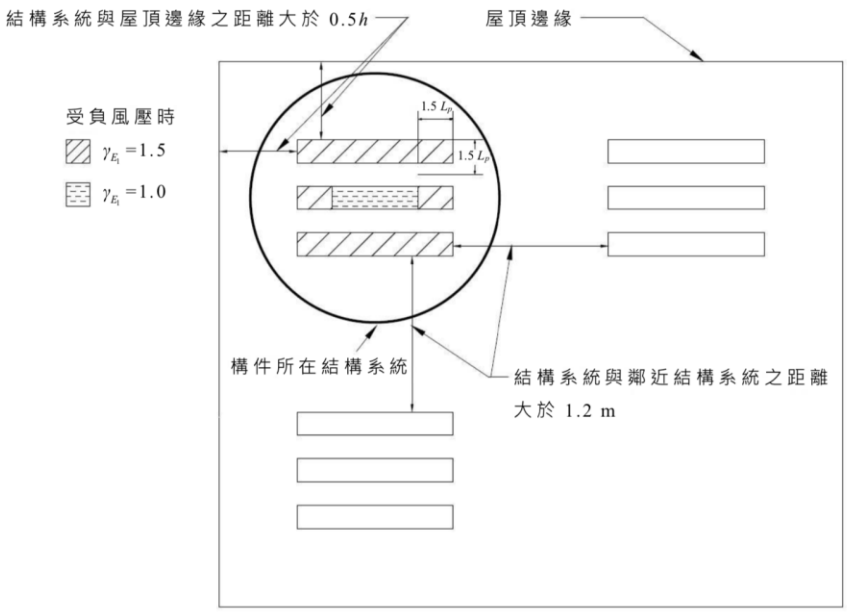


圖 3-18 構件所在結構系統與鄰近結構系統之距離>1.2 m 時可能產生$\gamma_{E_1} = 1.5$之示意圖

資料來源：CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022) 圖 2

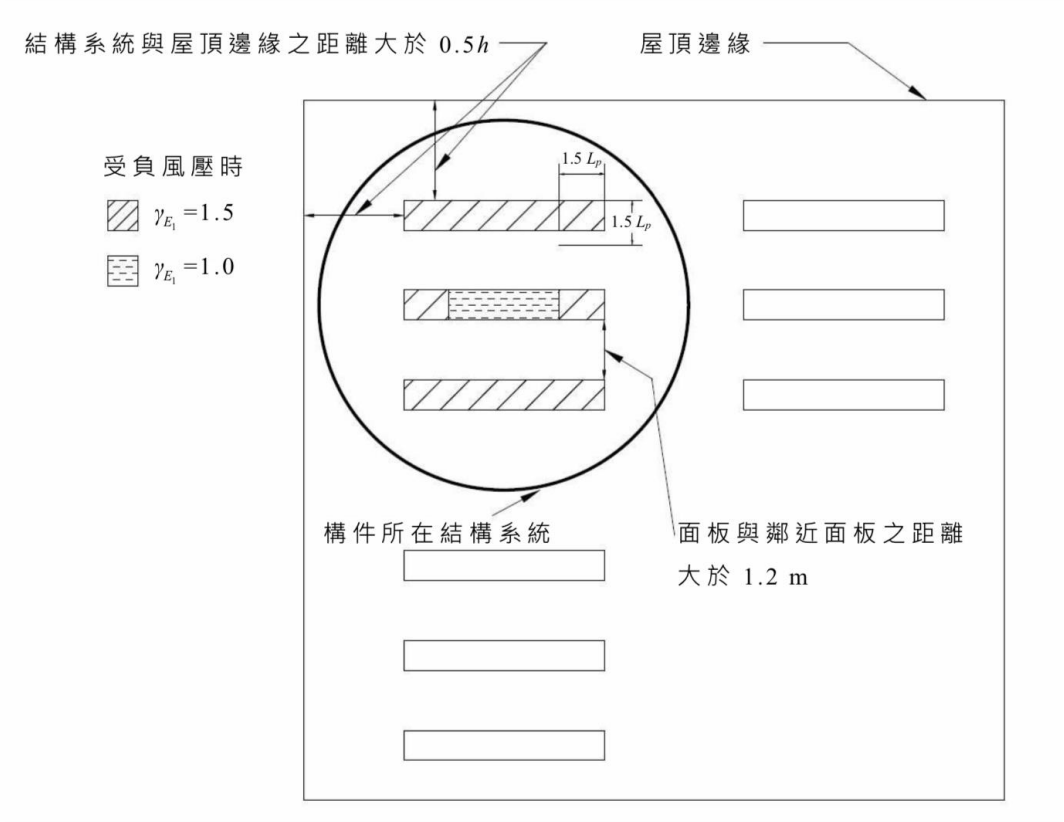


圖 3-19 構件所在面板與鄰近面板之距離> $1.2\,m$時可能產生$\gamma_{E_1} = 1.5$之示意圖
資料來源：CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022) 圖 3

由於構件所在結構系統之邊緣與鄰近屋頂邊緣之距離為$0.6\,m < 0.5h = 1.65\,m$，不滿足上述條件(a)，故系統邊緣修正因子 $\gamma_{E_1} = 1.0$。

[步驟 4] 風壓平衡因子γ_a

根據 CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022) ，風壓平衡因子γ_a與有效受風面積 A 有關，依下式決定：

$$\gamma_a = \begin{cases} 0.8 & A \le 1\,m^2 \\ -4\log(A) + 0.8 & 1\,m^2 < A \le 10\,m^2 \\ 0.4 & A > 10\,m^2 \end{cases} \quad \text{.....(3.1)}$$

本範例所針對設計的所有構件及扣件其有效受風面積皆小於$1\,m^2$，故風壓平衡因子 $\gamma_a = 0.8$。

貳、橫梁及各扣件之設計風壓(力)

[步驟 1] 相關之設計參數

根據「建築物耐風設計規範及解說」(2014)表 2.2，地況 B 之相關參數$\alpha = 0.25$；$z_g = 400\,m$，用途係數$I = 1.0$，基本設計風速$V_{10}(C) = 32.5\,m/s$。

[步驟 2] 風速壓地況係數$K(z)$與地形係數K_{zt}

根據「建築物耐風設計規範及解說」(2014)規範式(2.7)，計算$K(z)$。因建築物平均屋頂高度$h = 3.3\,m$，取規範$h \le 5\,m$的公式計算：

$K(h) = 2.774\left(\frac{5}{z_g}\right)^{2\alpha} = 2.774\left(\frac{5}{400}\right)^{2\times 0.25} = 0.31$。

根據「建築物耐風設計規範及解說」(2014)規範式(2.8)，計算K_{zt}。因工址附近無特殊地形，$K_{zt} = 1.0$。

[步驟 3] 平均屋頂高度之風速壓$q(h)$

根據「建築物耐風設計規範及解說」(2014)規範式(2.6)，離地面 h 公尺高處之風速壓$q(h) = 0.06 \times K(h) \times K_{zt} \times [IV_{10}(C)]^2 = 0.06 \times 0.31 \times 1.0 \times [1.0 \times 32.5]^2 = 19.66\,kgf/m^2$。

[步驟 4] 橫梁及各扣件之設計正負風壓

根據 CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022) 之斜屋頂平貼型結構系統之設計風壓計算公式為$P = q(h) \times (G_{cp}) \times \gamma_{E_1} \times \gamma_a$。

由於所考慮構件及扣件之有效受風面積皆小於$1\,m^2$，若其全位於③區內，(GC_p)分別為 0.6 和-6.0，則設計正風壓為$P = 19.66 \times 0.6 \times 1.0 \times 0.8 = 9.43\,kgf/m^2$，負風壓為$P = 19.66 \times -6.0 \times 1.0 \times 0.8 = -94.34\,kgf/m^2$。若其全位於②區內，$(GC_p)$分別為 0.6 和-3.8，設計正風壓為$P = 19.66 \times 0.6 \times 1.0 \times 0.8 = 9.43\,kgf/m^2$，負風壓為$P = 19.66 \times -3.8 \times 1.0 \times 0.8 = -59.75\,kgf/m^2$。若其全位於①區內，$(GC_p)$分別為 0.6 和-2.1，設計正風壓為$P = 19.66 \times 0.6 \times 1.0 \times 0.8 = 9.43\ kgf/m^2$，負風壓為$P = 19.66 \times -2.1 \times 1.0 \times 0.8 = -33.02\,kgf/m^2$。

若構件或扣件的承受風壓面積橫跨不同區域，其設計風壓可依不同區域的面積比例加權平均計算得之。以橫梁 b-c 段為例，其橫跨①區、②區、③區，

③區的設計正風壓及負風壓為$9.43\ kgf/m^2$和$-94.34\ kgf/m^2$，橫跨面積$0.348\ m^2$，②區的設計正風壓及負風壓為$9.43\ kgf/m^2$和$-59.75\ kgf/m^2$，橫跨面積為$0.435\ m^2$，①區的設計正風壓及負風壓為$9.43\ kgf/m^2$和$-33.02\ kgf/m^2$，橫跨面積為$0.067\ m^2$，對面積加權平均後所得風壓為$9.43\ kgf/m^2$和$-71.79\ kgf/m^2$。仿照上述的計算流程，分別計算其他不同構件及扣件的設計正風壓及設計負設計風壓，其數值分析結果列於表 3-3。

[步驟 5] 各扣件之設計正負風力

設計正負風力為設計風壓與承受風壓面積A_{actual}的乘積。

針對面板接橫梁扣件 j 點，設計正負風壓P為$9.43\ kgf/m^2$及$-61.22\ kgf/m^2$，承受風壓面積為$0.935\ m^2$，則設計正風力$F = 9.43\ kgf/m^2 \times 0.935\ m^2 = 8.82\ kgf$；設計負風力$F = -61.22\ kgf/m^2 \times 0.935\ m^2 = -57.24\ kgf$。

針對橫梁接 L 型角鋁扣件 c 點，設計正負風壓P為$9.43\ kgf/m^2$及$-55.66\ kgf/m^2$，承受風壓面積為$0.850\ m^2$，則設計正風力$F = 9.43\ kgf/m^2 \times 0.850\ m^2 = 8.02\ kgf$；設計負風力$F = -55.66\ kgf/m^2 \times 0.850\ m^2 = -47.31\ kgf$。同理，L 型角鋁接支撐鋁件 p 點及支撐鋁件接屋頂浪板下結構梁之扣件 v 點的設計正風力$F = 8.02\ kgf$及設計負風力$F = -47.31\ kgf$。

彙整所有扣件的設計正負風力 F，將其列於表 3-3。

表 3-3 示範例 1 構件及扣件之設計風壓及風力

名稱		承受風壓面積 (m^2)	設計風壓 (kgf/m^2)		設計風力 (kgf)	
			正風壓	負風壓	正風力	負風力
橫梁	a-b 段	0.213	9.43	-89.05		
	b-c 段	0.850	9.43	-71.79		
	c-d 段或 d-e 段或 e-f 段或 f-g 段	0.850	9.43	-55.66		
	g-h 段	0.213	9.43	-55.66		
面板接橫梁之扣件	j 點	0.935	9.43	-61.22	8.82	-57.24
	螺栓 1 個（軸力）				8.82	-57.24
橫梁接 L 型角鋁之扣件	c 點	0.850	9.43	-55.66	8.02	-47.31
	螺栓 1 個（軸力）				8.02	-47.31
L 型角鋁接支撐鋁件之扣件	p 點	0.850	9.43	-55.66	8.02	-47.31
	螺栓 1 個（剪力）				8.02	-47.31
支撐鋁件接屋頂浪板下結構梁之扣件	v 點	0.850	9.43	-55.66	8.02	-47.31
	螺絲 1 個（軸力）				8.02	-47.31

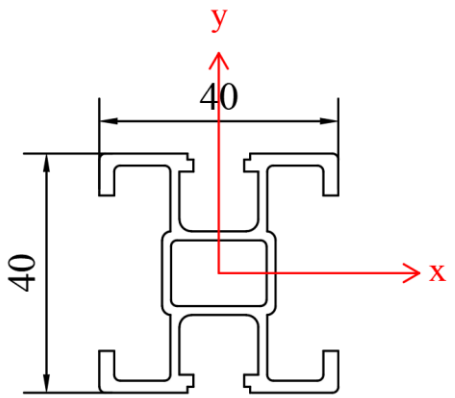
第四節　橫梁之耐風分析及檢核

橫梁使用特製之鋁擠型構件，其材質為 6063-T5 鋁合金，設計時所用之彈性模數E為7100 kgf/mm^2，剪力彈性模數為G為2700 kgf/mm^2，波森比μ為0.3，降伏強度F_y為110 MPa，極限強度F_u為150 MPa。假設採用橫梁之斷面形狀與斷面性質如表 3-4 所示。

因國內目前尚無鋁結構之相關規範，根據臺中市結構工程技師公會在 108 年編寫「太陽光電系統支撐架結構設計參考手冊草案(修訂版)」之 4.2 構件接合設計內容所述，構件檢核可參考美國鋁結構規範 Aluminum Design Manual，載重組合則參考「鋼結構容許應力設計法規範及解說」之規定。

依「鋼結構容許應力設計法規範及解說」之規定，載重組合有 $D+L$ 、$D+0.75(L\pm1.25W)$、$D+0.75(L\pm0.8E)$ 、$0.7D\pm1.25W$及$0.7D\pm0.8E$。其中，D為靜載重，包括構件自重及永久附加物重量；L為活載重，包含人員重量；E為設計地震力；W為設計風力。本示範例設計時僅考慮風載重及靜載重造成之影響，故載重組合有$D\pm0.9375\,W$、$0.7D\pm1.25W$這四種。

表 3-5 示範例 1 構件之斷面性質與斷面形狀

橫梁	
斷面性質	斷面形狀(單位:mm)
斷面模數 $S_x = 3645.25\ mm^3$ 斷面模數 $S_y = 2337.71\ mm^3$ 慣性矩 $I_x = 72905.09\ mm^4$ 慣性矩 $I_y = 46754.18\ mm^4$ 斷面積 $A = 340.83\ mm^2$	 y 軸垂直面板

資料來源：修改自[16]

壹、橫梁

在作橫梁 a-b-c-d-e-f-g-h 結構分析時如圖 3-20 所示，將橫梁與下方縱梁連接處 b 點、c 點、d 點、e 點、f 點及 g 點的扣件視為鉸支承（Hinge）進行分析。

風載重採用表 3-3 中橫梁 a-b-c-d-e-f-g-h 的最大設計風壓，其承受風壓面積的寬度為 0.85 m。設計正風壓 a-b 段、b-c 段、c-d 段、d-e 段、e-f 段、f-g 段及 g-h 段皆為9.43 kgf/m^2，乘上寬度 0.85 m 可得線載重$q_w = 8.02\ kgf/m$；設計負風壓 a-b 段為$-89.05\ kgf/m^2$，b-c 段為$-71.79\ kgf/m^2$，c-d 段、d-e 段、e-f 段、f-g 段及 g-h 段均為$-55.66\ kgf/m^2$，乘上寬度 0.85 m 後可得線載重$q_{w1} = -75.70\ kgf/m$、$q_{w2} = -61.02\ kgf/m$、$q_{w3} = -47.31\ kgf/m$。

靜載重包含橫梁自重與模組自重，因鋁擠型自重相對較小，故只考慮模組自重。模組自重為每塊 20 kgf，橫梁 a-b-c-d-e-f-g-h 需承受之模組重為 5/2 塊，故橫梁 a-b-c-d-e-f-g-h 所承受之線載重 $q_D = (20\ kgf \times 5/2\ 塊)/5.5\ m = 9.09\ kgf/m$。

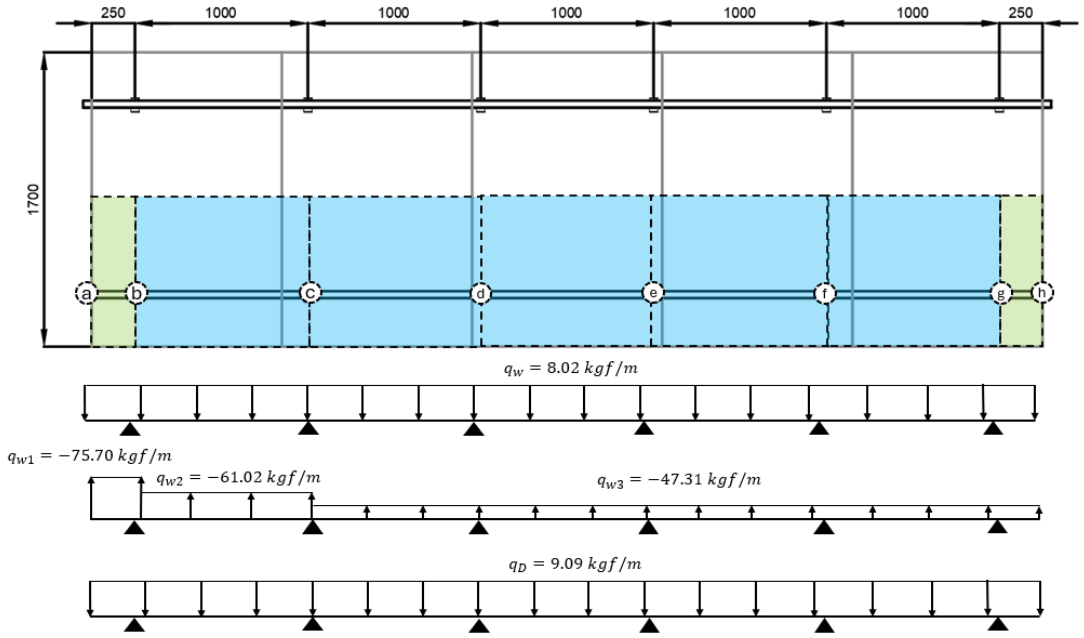


圖 3-20 斜屋頂平貼型系統之橫梁受力作用圖

分析時利用 SAP 2000 軟體建模，將橫梁的斷面與材料性質輸入並且施加風載重及靜載重，即可分析出橫梁 a-b-c-d-e-f-g-h 的剪力、彎矩及變形量，當載重組合為$0.7D + 1.25W$時可得出橫梁 a-b-c-d-e-f-g-h 中最大剪力及最大彎矩分別為

$V_{max} = 85.3\ kgf$及$M_{max} = 35.6\ kgf - m$；當載重組合為$1.0D + 1.0W$時最大變形量$\delta_{max} = 0.86\ mm$。

<u>應力檢核</u>

利用 SAP 2000 分析軟體，選 AA-ASD(2000)進行檢核，得橫梁 a-b-c-d-e-f-g-h 應力比為$0.16 \leq 1$，確認構件符合規範。

<u>變形檢核</u>

為避免在強風持續作用下產生振動破壞，設計時應盡量減少構件在風力作用下之變位，同時檢核確認構件變位量不超過容許值，以容許變形量δ_a = 跨距/175 (業界常用公式)，進行檢核。

$$\delta_{max} = 0.86\ mm \leq \delta_a = \frac{1000}{175} = 5.71\ mm$$，檢核通過。

第五節　扣件之耐風分析及檢核

扣件接合設計時，螺栓可能的破壞模式有拉力破壞、剪力破壞及承壓破壞，接合母材可能的破壞模式有總斷面積破壞、淨斷面積破壞及塊狀剪力撕裂，實務上需針對上述破壞模式作檢核，以確保安全性。本手冊僅示範螺栓拉力破壞及剪力破壞之檢核。

所檢核扣件包括面板接橫梁之扣件、橫梁接 L 型角鋁之扣件、L 型角鋁接支撐鋁件之扣件及支撐鋁件接屋頂浪板下結構梁之扣件。各扣件均採用 M8 螺栓鎖固，其螺距為 1.25mm。螺栓採用 SUS 304 (A2-50)不鏽鋼，其極限抗拉強度為$F_{tu} = 500\ MPa = 72.5\ ksi$、極限抗剪強度為 $F_{su} = 200\ MPa = 29\ ksi$，接合母材為 6061-T6 鋁合金。載重組合參考「鋼結構容許應力設計法規範及解說」(2010) 之規定，考慮 $D \pm 0.9375\ W$、$0.7D \pm 1.25W$這四種載重組合。根據臺中市結構工程技師公會在 108 年編寫「太陽光電系統支撐架結構設計參考手冊草案(修訂版)」之 4.3 螺栓接合內容所述，螺栓檢核可參考美國鋁結構規範 Aluminum Design Manual 之 5.2 Bolted Connections。

壹、螺栓檢核公式

螺栓容許拉力為$F_t = A_s \times f_t$。其中，F_t為螺栓容許拉力；A_s為螺栓有效斷面積，其公式為$A_s = \frac{\pi}{4}\left(D - \frac{1.191}{n}\right)^2$，其中 D 為螺栓之標稱直徑(英吋)，n 為每英吋之螺紋數；f_t為螺栓容許拉應力，其公式為$f_t = \frac{F_{tu}}{1.2n_u}$，其中$n_u$為安全係數，取 1.95。

螺栓容許剪力為$F_s = A_S^* \times f_s$。其中，F_s為螺栓容許剪力；A_S^*為螺栓剪力有效斷面積，當剪力作用在螺紋上時，$A_S^* = A_s$，當剪力未作用在螺紋上時，$A_S^* = \frac{\pi}{4}(D)^2$；$f_s$為螺栓容許剪應力，其公式為$f_s = \frac{F_{su}}{1.2n_u}$。

貳、面板接橫梁之扣件

面板連接橫梁時需分為兩步驟完成，首先將中壓塊及側壓塊固定於橫梁上如圖 3-21 所示，待壓塊放置定位後，將模板插入再將其螺栓鎖緊如圖 3-22 所示。

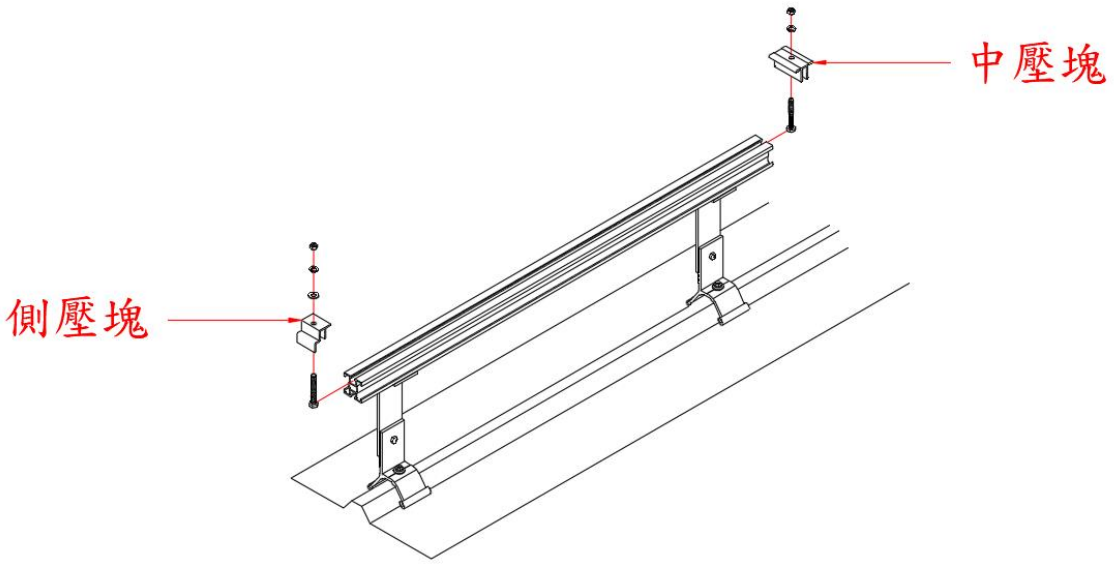


圖 3-21 斜屋頂平貼型系統之面板接橫梁示意圖 1

資料來源：修改自[16]

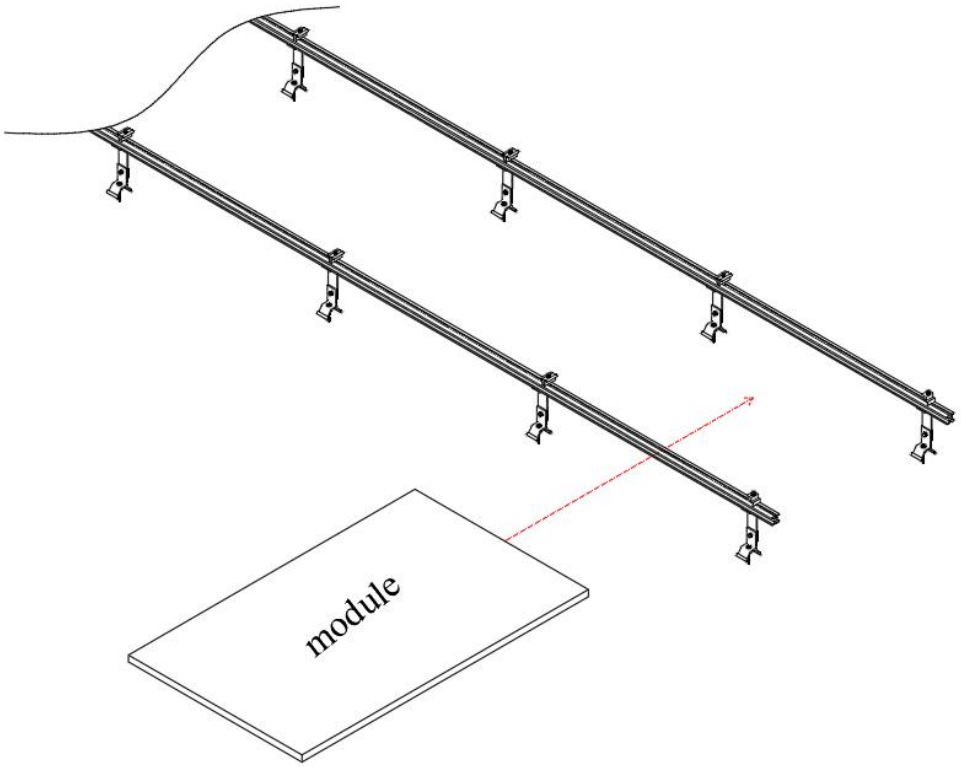


圖 3-22 斜屋頂平貼型系統之面板接橫梁示意圖 2

資料來源：修改自[16]

螺栓拉力分析

風載採用表 3-3 中面板接橫梁扣件 j 點之設計正風力$8.82\ kgf$及設計負風力$-57.24\ kgf$，正號表示力量指向面板上表面，對此扣件而言為壓力；負號表示力量遠離面板上表面，對此扣件而言為拉力。

面板連接橫梁扣件螺栓數為 1 個，單一螺栓承擔設計風拉力為$-57.24\ kgf$，對螺栓造成之最大拉力為$F_{ten} = 1.25W = 1.25 \times (-57.24) = -71.55\ kgf$。

螺栓拉力檢核

螺栓直徑$D = 8\ mm = 0.315\ in$、每英吋之螺紋數$n = 25.4/1.25 = 20.32$，故螺栓有效斷面積$A_s = \frac{\pi}{4}\left(D - \frac{1.191}{n}\right)^2 = \frac{\pi}{4}\left(0.315 - \frac{1.191}{20.32}\right)^2 = 0.0516\ in^2$；允許拉應力$f_t = F_{tu}/1.2n_u = 72.5/2.34 = 30.98\ ksi$。螺栓容許拉力$F_t = A_s \times f_t = 0.0516\ in^2 \times 30.98\ ksi = 1.599\ kip = 725.3\ kgf$。

螺栓拉力$|F_{ten}| = 71.55\ kgf <$ 螺栓容許拉力$F_t = 725.3\ kgf$，檢核通過。

參、橫梁接 L 型角鋁之扣件

橫梁接 L 型角鋁扣件如圖 3-23 所示，將鋁擠型橫梁固定於下方 L 型角鋁上。

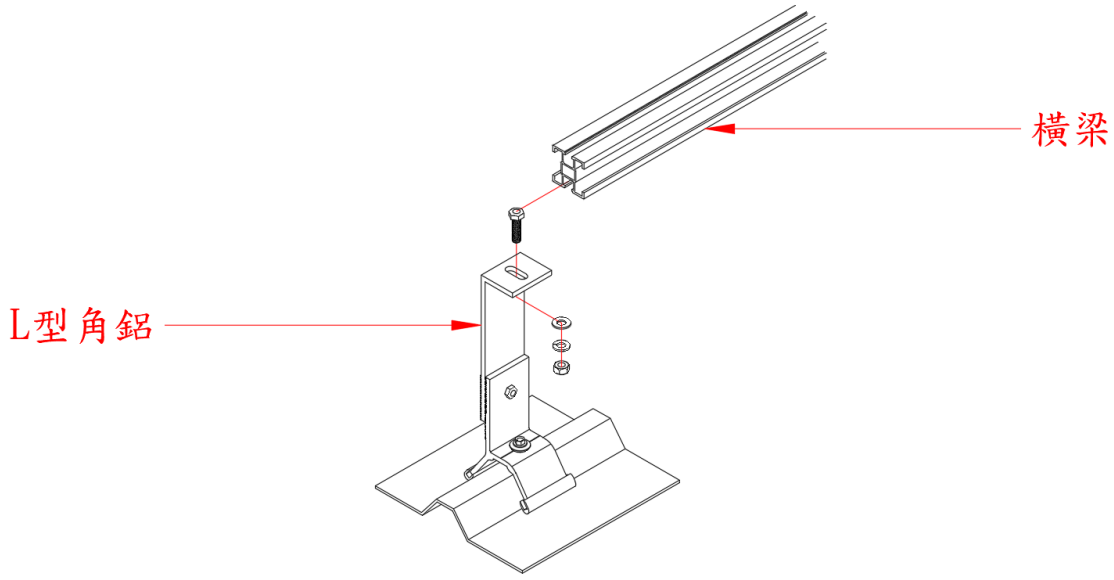


圖 3-23 斜屋頂平貼型系統之橫梁接 L 型角鋁示意圖

資料來源：修改自[16]

螺栓拉力分析

風載採用表 3-3 中橫梁接 L 型角鋁扣件 C 點之設計正風力8.02 kgf及設計負風力$-47.31\ kgf$，正號表示力量指向面板上表面，對此扣件而言為壓力；負號表示力量遠離面板上表面，對此扣件而言為拉力。靜載重包含橫梁自重與面板自重，因鋁擠型自重相對較小，故只考慮面板自重，橫梁接縱梁扣件承受面板面積為$0.85\ m^2$按比例分配橫梁所需承擔面板自重為$9.01\ kgf$。

橫梁連接 L 型角鋁扣件螺栓數為 1 個，單一螺栓承擔設計風拉力為$-47.31\ kgf$；單一螺栓承擔靜載重為$9.01\ kgf$。對螺栓造成之最大組合拉力為$F_{ten} = 0.7D + 1.25W = 0.7 \times 9.01 + 1.25 \times (-47.31) = -52.83\ kgf$。

螺栓拉力檢核

螺栓直徑$D = 8\ mm = 0.315\ in$、每英吋之螺紋數$n = 25.4/1.25 = 20.32$，故螺栓有效斷面積$A_s = \frac{\pi}{4}\left(D - \frac{1.191}{n}\right)^2 = \frac{\pi}{4}\left(0.315 - \frac{1.191}{20.32}\right)^2 = 0.0516\ in^2$；允許拉應力$f_t = F_{tu}/1.2n_u = 72.5/2.34 = 30.98\ ksi$。螺栓容許拉力$F_t = A_s \times f_t = 0.0516\ in^2 \times 30.98\ ksi = 1.599\ kip = 725.3\ kgf$。

螺栓拉力$|F_{ten}| = 52.83\ kgf <$ 螺栓容許拉力$F_t = 725.3\ kgf$，檢核通過。

肆、L 型角鋁接支撐鋁件之扣件

L 型角鋁接支撐鋁件扣件如圖 3-24 所示，將 L 型角鋁固定於下方支撐鋁件上。

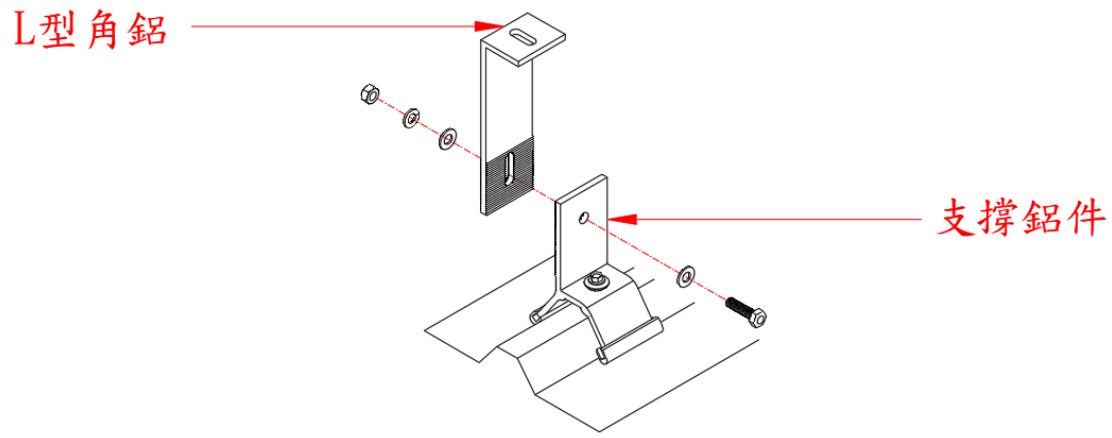


圖 3-24 斜屋頂平貼型系統之 L 型角鋁接支撐鋁件示意圖

資料來源：修改自[16]

螺栓剪力分析

風載採用表 3-3 中 L 型角鋁接支撐鋁件 p 點之設計正風力 8.02 kgf 及設計負風力 $-47.31\ kgf$，正號表示力量指向面板上表面，負號表示力量遠離面板上表面，對此扣件而言均為剪力。靜載重包含橫梁自重與面板自重，因鋁擠型自重相對較小，故只考慮面板自重，橫梁接縱梁扣件承受面板面積為 $0.85\ m^2$ 按比例分配橫梁所需承擔面板自重為 $9.01\ kgf$。

L 型角鋁連接支撐鋁件扣件螺栓數為 1 個，假設剪力有作用在螺紋上，單一螺栓承擔設計風剪力為 $-47.31\ kgf$；單一螺栓承擔靜載重為 $9.01\ kgf$。對螺栓造成之最大組合剪力為 $F_{shear} = 0.7D + 1.25W = 0.7 \times 9.01 + 1.25 \times (-47.31) = -52.83\ kgf$。

螺栓剪力檢核

螺栓直徑 $D = 8\ mm = 0.315\ in$、每英吋之螺紋數 $n = 25.4/1.25 = 20.32$，故螺栓有效斷面積 $A_s = \frac{\pi}{4}\left(D - \frac{1.191}{n}\right)^2 = \frac{\pi}{4}\left(0.315 - \frac{1.191}{20.32}\right)^2 = 0.0516\ in^2$；允許剪應力 $f_s = F_{su}/1.2n_u = 29/2.34 = 12.39\ ksi$。螺栓容許剪力 $F_s = A_s \times f_s = 0.0516\ in^2 \times 12.39\ ksi = 0.639\ kip = 289.9\ kgf$。

螺栓剪力 $|F_{shear}| = 52.83\ kgf <$ 螺栓容許剪力 $F_s = 289.9\ kgf$，檢核通過。

伍、支撐鋁件接屋頂浪板下結構梁之扣件

支撐鋁件接屋頂浪板下結構梁扣件如圖 3-25 所示，將支撐鋁件以自攻螺絲固定屋頂浪板，而自攻螺絲穿透屋頂浪板鎖固於下方結構梁上。

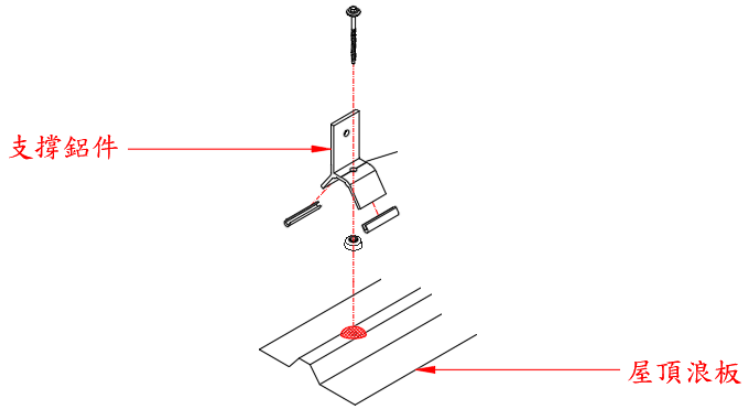


圖 3-25 斜屋頂平貼型系統之支撐鋁件接屋頂浪板示意圖

資料來源：修改自[16]

螺絲拉力分析

風載採用表 3-3 中支撐鋁件接屋頂浪板下結構梁扣件 v 點之設計正風力 $8.02\ kgf$ 及設計負風力 $-47.31\ kgf$，正號表示力量指向面板上表面，對此扣件而言為壓力；負號表示力量遠離面板上表面，對此扣件而言為拉力。靜載重包含橫梁自重與面板自重，因鋁擠型自重相對較小，故只考慮面板自重，橫梁接縱梁扣件承受面板面積為 $0.85\ m^2$ 按比例分配橫梁所需承擔面板自重為 $9.01\ kgf$。

橫梁連接 L 型角鋁扣件螺栓數為 1 個，單一螺栓承擔設計風拉力為 $-47.31\ kgf$；單一螺栓承擔靜載重為 $9.01\ kgf$。對螺栓造成之最大組合拉力為 $F_{ten} = 0.7D + 1.25W = 0.7 \times 9.01 + 1.25 \times (-47.31) = -52.83\ kgf$。

螺絲拉力檢核

1. 自攻螺絲檢核

   屋頂浪板下之結構梁與自攻螺絲接合可依「冷軋型鋼構造建築物結構設計規範及解說」(2016)進行檢核，確認其強度是否足夠。

2. 屋頂結構檢核

   需檢核屋頂結構之承載力是否足夠，同時確保防水層不會破壞。

第四章　地面踞置型系統之耐風設計（示範例 2）

本章所稱地面踞置型系統為安裝於地面，採陣列型式排列（如圖 2-2 所示）。耐風設計的主要目的是確保支撐架在強風環境下能夠維持結構完整性和安全性，而實務上在進行支撐架設計時，尚需考慮不同的載重組合情況，例如靜載重、風載重及地震力之效應，但本示範例只考慮靜載重及風載重之效應。

本示範例首先規劃一地面踞置型系統，依據 CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022) 之 6.地面踞置型結構系統決定其構件及扣件之設計風壓，再考慮風載重及靜載重之效應，做相關之結構設計。本示範例之設計流程圖如圖 4-1 所示。

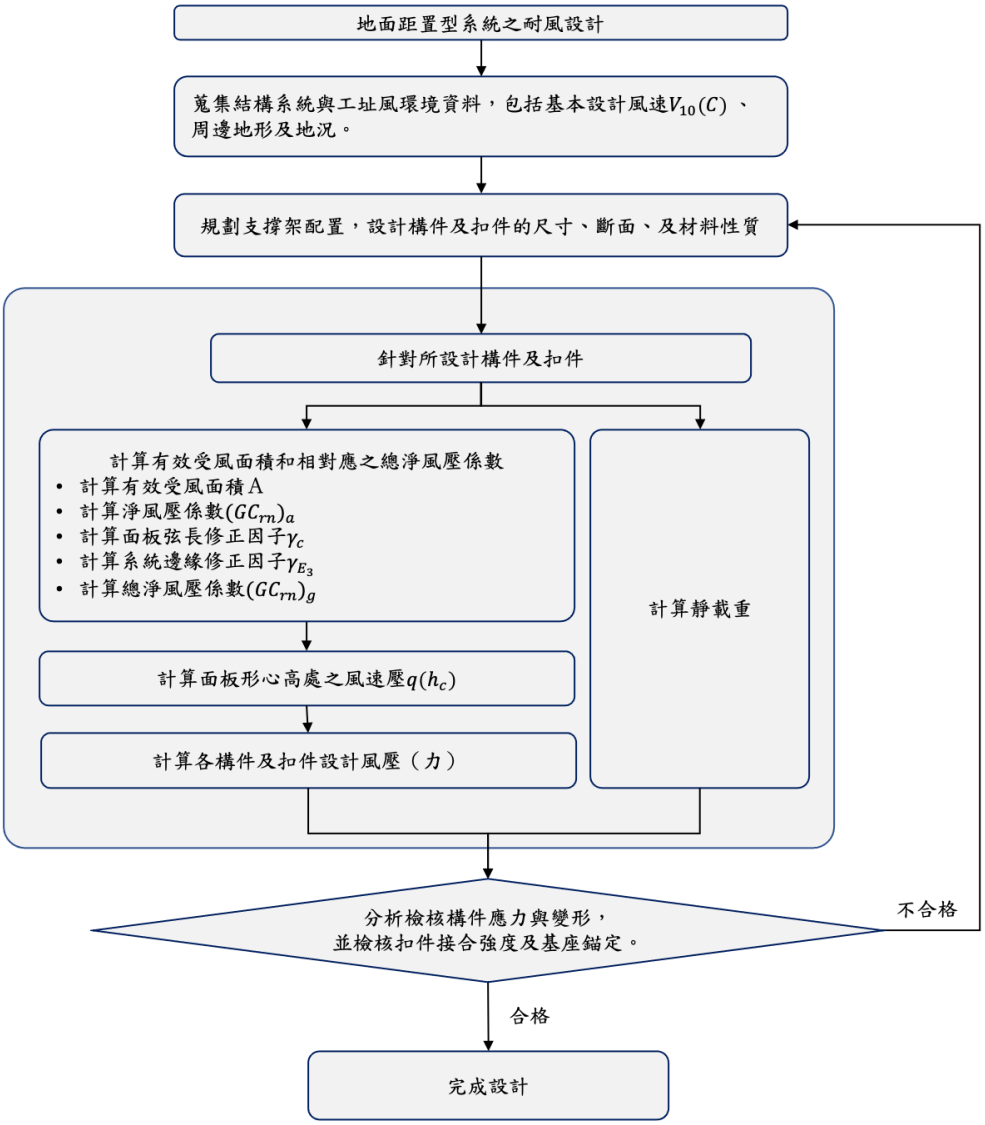


圖 4-1 地面踞置型結構系統之耐風設計流程圖

第一節　設計依據

壹、參考依據

1. 內政部，「鋼結構容許應力設計法規範及解說」，2010。
2. 內政部，「建築物耐風設計規範與解說」，2014。
3. 經濟部，CNS 16189「 太陽光電系統之設計風載重估算指引」之 6.地面踞置型結構系統之設計風壓，2022。
4. The Aluminum Association，「Aluminum Design Manual」，2005。

貳、適用範圍

CNS 16189「 太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022) 之 6.地面踞置型結構系統之設計風壓提供之風壓計算公式適用於同時滿足下列條件之地面踞置型結構系統：

1. 面板弦長L_p(如圖 4-2 所示)小於或等於 2m。
2. 面板傾角 ω(如圖 4-2 所示)小於或等於 35 度。
3. 面板與地面最小距離h_1(如圖 4-2 所示)小於或等於 0.6m，面板與地面最大距離h_2(如圖 4-2 所示)小於或等於 1.2m。
4. 模組間隙大於或等於 6.4mm，模組長(或寬)小於或等於 2m。

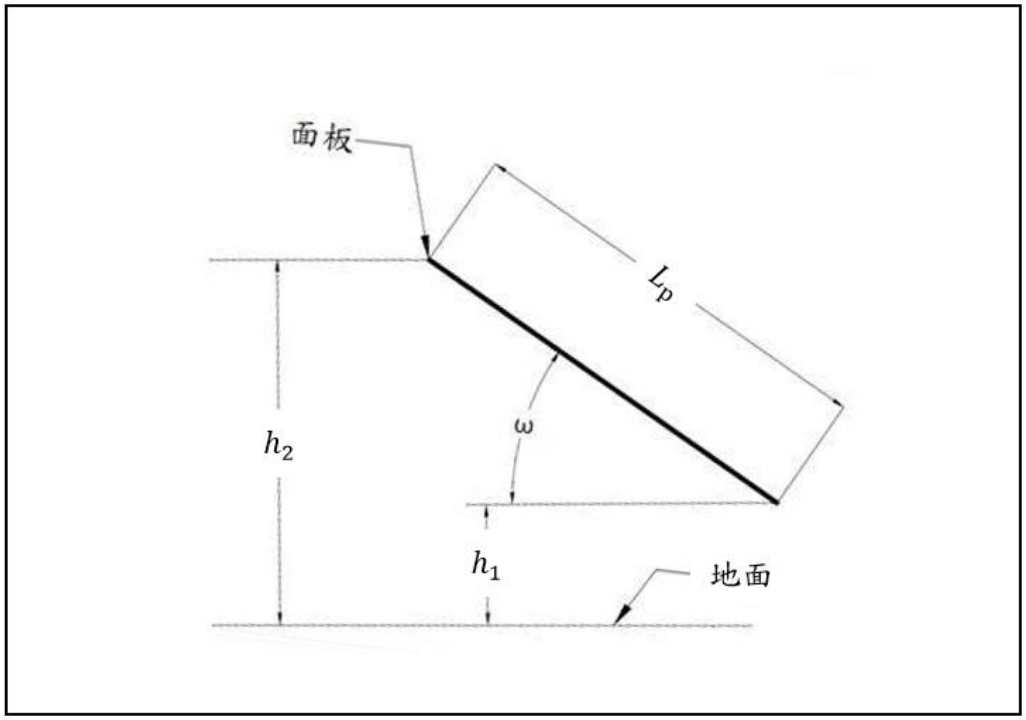


圖 4-2 地面踞置型結構系統示意圖

資料來源：CNS 16189「 太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022)

第二節 結構物資料與工址風環境

本章擬於嘉義縣太保市新建一地面踞置型太陽光電系統，整體場域之立體配置圖如圖 4-3 所示，共有 9 座支撐架結構系統；整體場域之平面配置圖如圖 4-4 所示，各結構系統與鄰近結構系統距離為 1.5m。

單一結構系統之立體配置圖、側視圖、側視示意圖、平行面板之平面圖及設計位置圖分別如圖 4-5、圖 4-6、圖 4-7、圖 4-8 及圖 4-9 所示。單一系統之面板由 6 片模組以 18 個扣件分別固定於 3 根橫梁上，每根橫梁以 3 個扣件固定於下方縱梁上，每根縱梁以 2 個扣件固定於下方 2 根柱子上，每根柱子固定於基座上。

理論上應根據各支撐架結構系統所承受的風壓情況，分別進行其設計，但由於設計程序類似，本範例僅分析設計圖 4-4 左上角的支撐架結構系統。針對圖 4-9 所示之單一結構系統，分別設計其橫梁 a-b-c-d-e、縱梁 f-g-h-i、g 點下方柱、h 點下方柱、面板接橫梁扣件(其形心為 k 點)、橫梁接縱梁扣件(其形心之面板投影為 c 點)、縱梁接柱扣件(位於 g 點下方柱頂)及柱接基座扣件(位於 g 點下方柱底)。

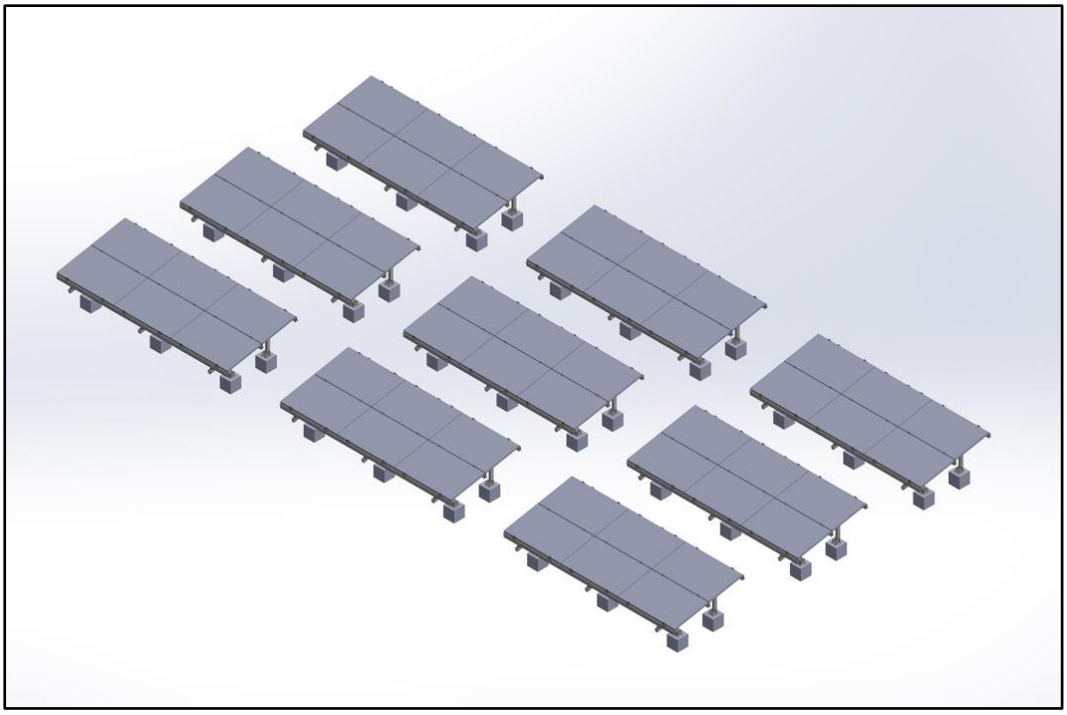


圖 4- 3 整體場域地面踞置型系統之立體配置圖

資料來源：[16]

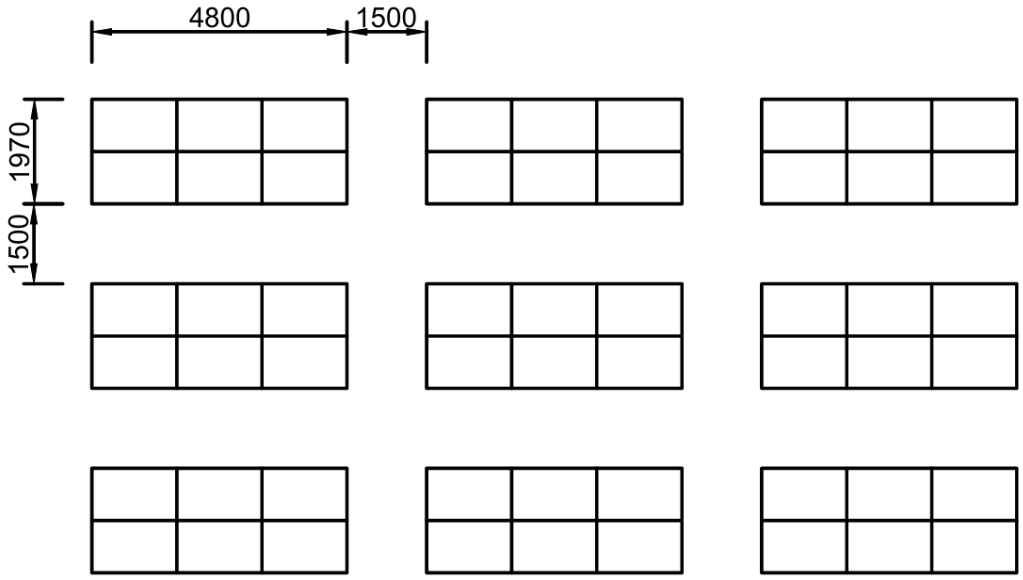


圖 4- 4 整體場域地面踞置型系統之平面配置圖(單位: mm)

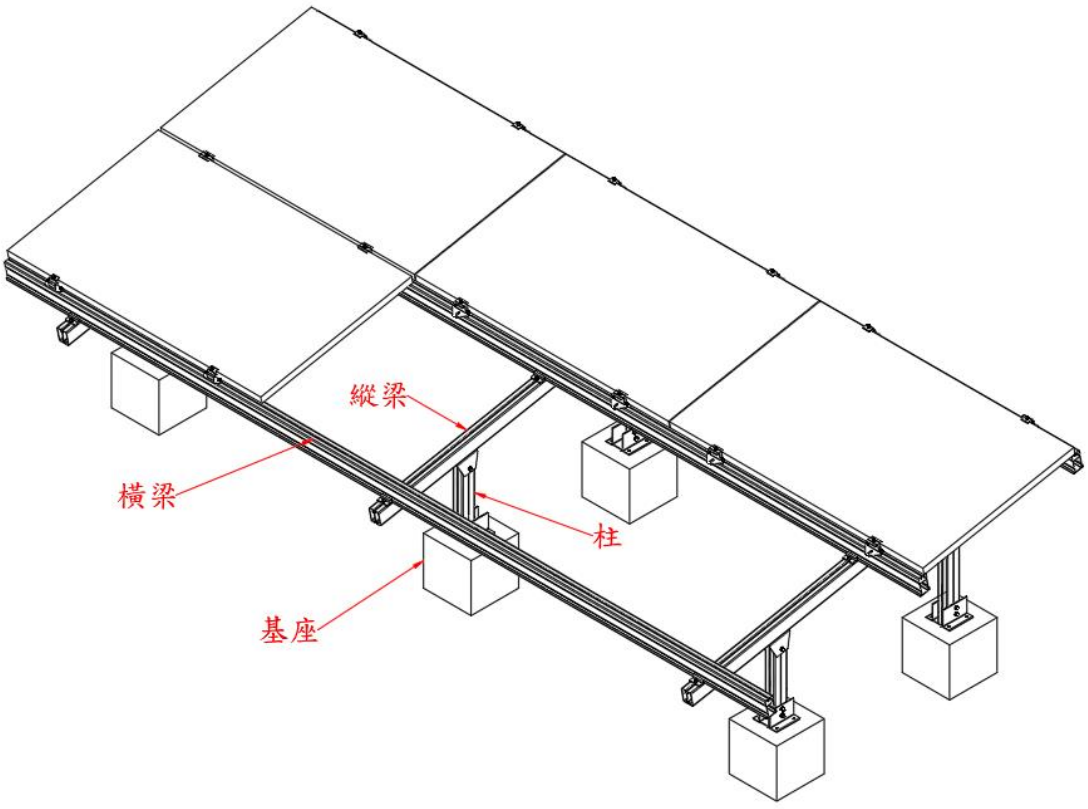


圖 4- 5 單一地面踞置型系統之立體配置圖

資料來源：修改自[16]

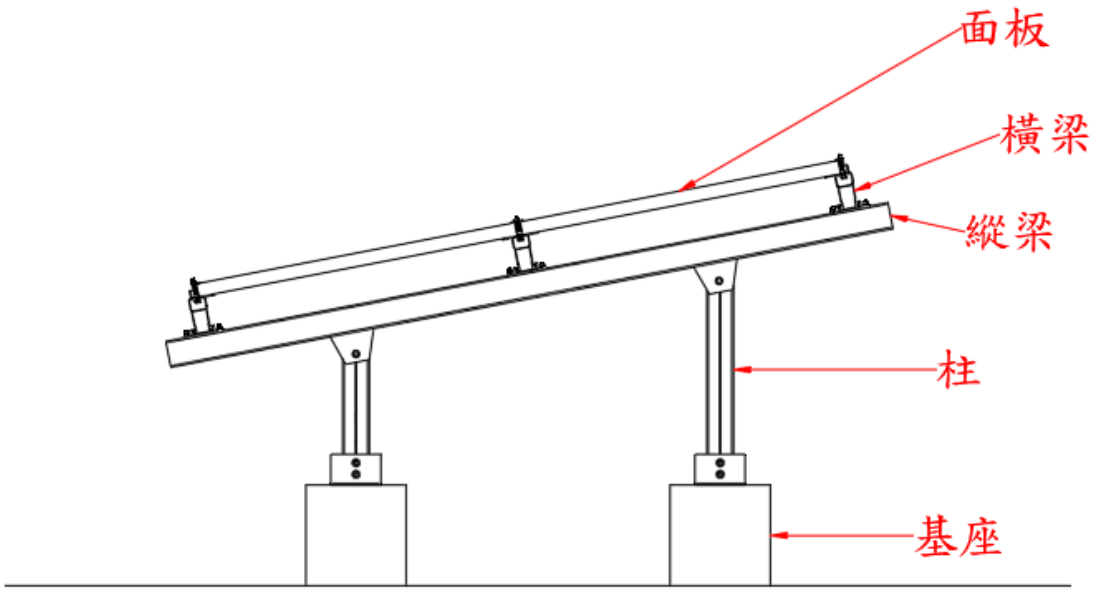


圖 4- 6 單一地面踞置型系統之側視圖

資料來源：修改自[16]

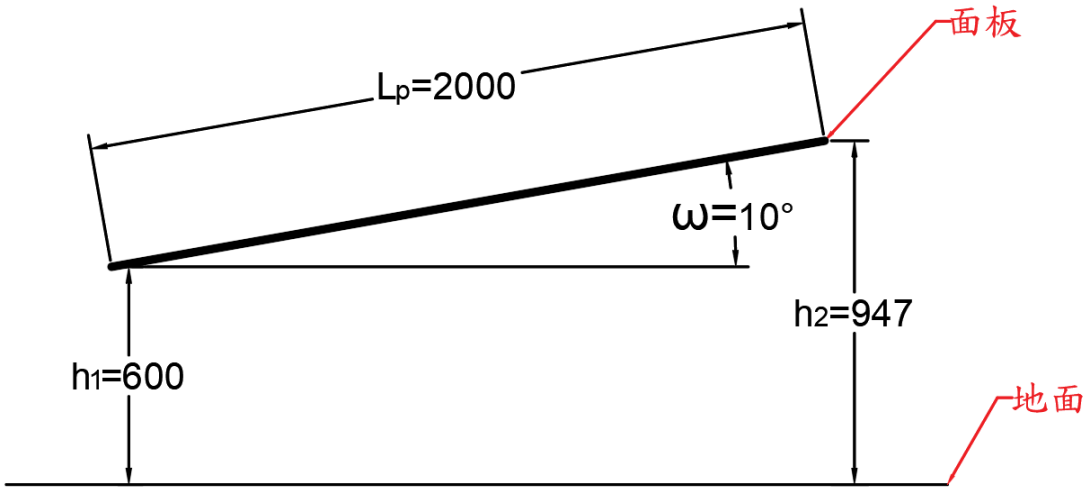


圖 4- 7 單一地面踞置型系統之側視示意圖(單位:mm)

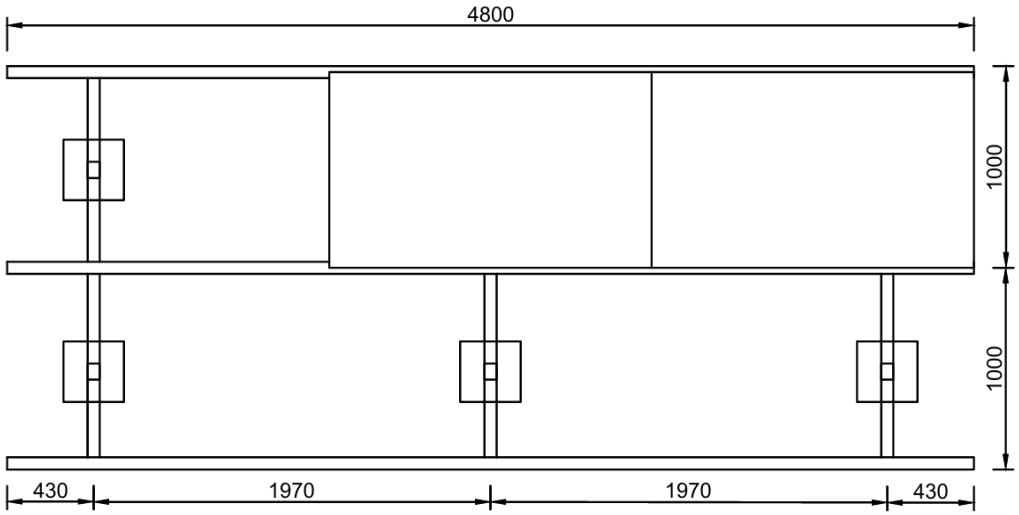


圖 4- 8 單一地面踞置型系統平行面板之平面圖(單位:mm)

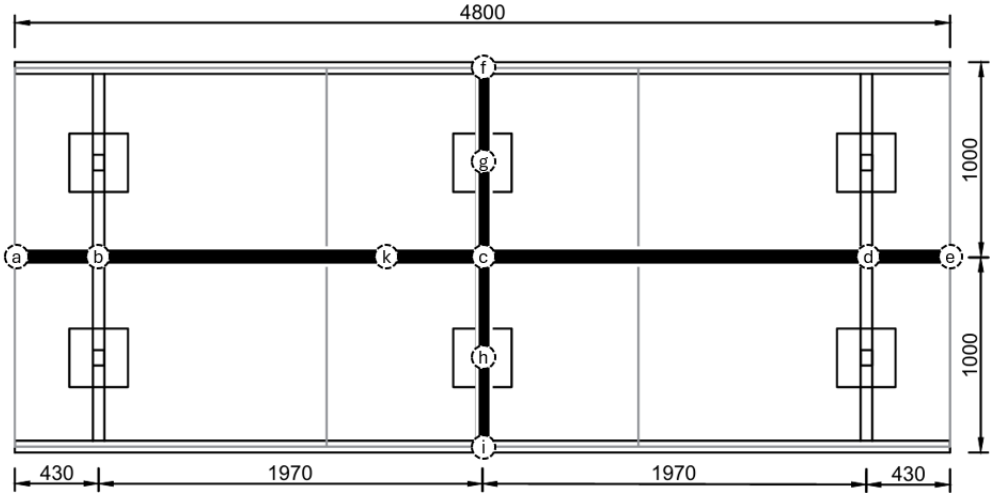


圖 4- 31 單一地面踞置型系統之設計位置圖(單位:mm)

結構物資料包含太陽光電系統尺寸、面板配置、用途係數 I；工址風環境包含基本設計風速$V_{10}(C)$、結構物周邊地形以及地況。本節擬定結構物資料與工址風環境如下表 4-1 所示。

表 4-1 地面踞置型系統之結構物與工址風環境資料

結構物資料	太陽光電結構系統	面板由 6 片模組以 18 個扣件分別固定於 3 根橫梁上，每根橫梁以 3 個扣件固定於下方縱梁上，每根縱梁以 2 個扣件固定於下方 2 根柱子上，每根柱子固定於基座上。
	面板配置	1. 面板弦長 $L_p = 2\,m$。 2. 面板傾角 $\omega = 10°$。 3. 面板與地面最小距離 $h_1 = 0.6\,m$。 4. 面板與地面最大距離 $h_2 = 0.947\,m$。 5. 模組長為$1.56\,m$、寬為$0.98\,m$。 6. 模組間隙為$20\,mm$。
	用途係數	根據「建築物耐風設計規範與解說」(2014) 規範 2.5 節，依照重要程度可將 I 值分為1.1、1.0或 0.9，本範例取 $I = 1.0$。
工址風環境	基本設計風速 $V_{10}(C)$	根據「建築物耐風設計規範與解說」(2014) 規範 2.4 節，嘉義縣太保市的$V_{10}(C) = 32.5\ (m/s)$。
	地況種類	依結構物各方向上風處之地表粗糙度決定皆為地況 C。
	地形係數	無特殊地形。

第三節 各構件及扣件之設計風壓(力)

各構件及扣件之設計風壓(力)之計算步驟包括決定有效受風面積、計算總淨風壓係數及計算構件與扣件之設計風壓(力)，其細節如下：

壹、各構件有效受風面積及相對應之總淨風壓係數

根據「建築物耐風設計規範與解說」(2014) 1.3 節對有效受風面積 A 之定義可知，結構構件之有效受風面積 A 為跨距長度與有效寬度之乘積，有效寬度不必小於其跨距長度的 1/3。對扣件而言，有效受風面積 A 不得大於單一扣件之受風面積。決定有效受風面積及計算總淨風壓係數方式如下：

[步驟 1]有效受風面積 A

(a) 橫梁 a-b-c-d-e：

如圖 4-10 所示，將風力傳遞至橫梁 a-b-c-d-e 上，且橫梁架設在間距為 1.97 m 的縱梁上，分別以 a-b 段、b-c 段、c-d 段及 d-e 段表示。

針對橫梁 a-b 段，其跨距長度為 0.43 m，其寬度為橫梁間距 1.00 m，故承受風壓面積為$0.43\,m \times 1.00\,m = 0.43\,m^2$。橫梁 a-b 段之有效寬度為$\max(0.43/3, 1.00) = 1.00\,m$，故其有效受風面積為$A = 0.43\,m \times 1.00\,m = 0.43\,m^2$。同理，橫梁 d-e 段之承受風壓面積為$0.43\,m^2$，有效受風面積亦為$0.43\,m^2$。

針對橫梁 b-c 段，其跨距長度為 1.97 m，其寬度為橫梁間距 1.00 m，故承受風壓面積為$1.97\,m \times 1.00\,m = 1.97\,m^2$。橫梁 b-c 段之有效寬度為$\max(1.97/3, 1.00) = 1.00\,m$，故其有效受風面積為$A = 1.97\,m \times 1.00\,m = 1.97\,m^2$。同理，橫梁 c-d 段之承受風壓面積為$1.97\,m^2$，有效受風面積亦為$1.97\,m^2$。

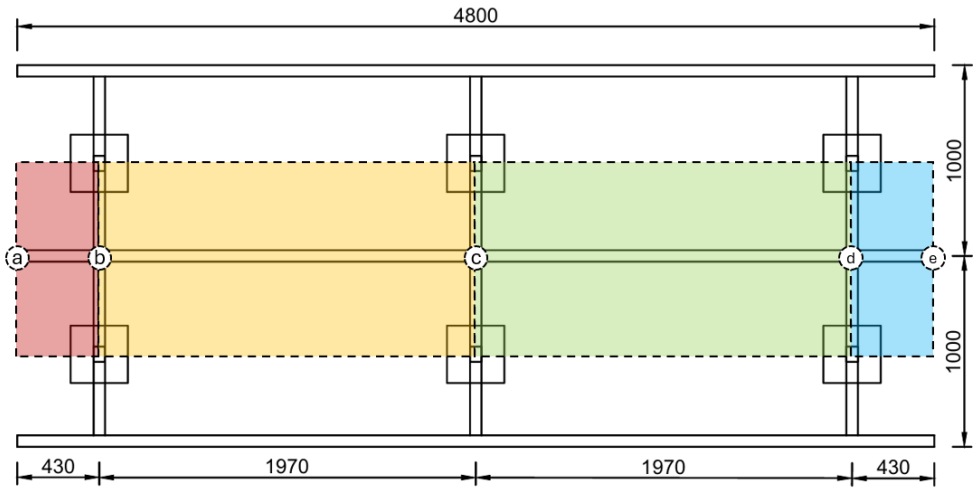


圖 4- 10 示範例 2 之橫梁 a-b-c-d-e 有效受風面積示意圖(單位:mm)

(b) 縱梁 f-g-h-i：

如圖 4-11 所示，將風力傳遞至縱梁 f-g-h-i 上，且縱梁架設在間距為 1.00 m 的柱上並被分為 f-g 段、g-h 段及 h-i 段。

針對縱梁 f-g 段，其跨距長度為 0.50 m，其寬度為縱梁間距 1.97 m，故承受風壓面積為$0.50\,m \times 1.97\,m = 0.985\,m^2$。縱梁 f-g 段之有效寬度為$\max(0.50/3, 1.97) = 1.97\,m$，故其有效受風面積為$A = 0.50\,m \times 1.97\,m = 0.985\,m^2$。同理，縱梁 h-i 段之承受風壓面積為$0.985\,m^2$，有效受風面積為$0.985\,m^2$。

針對縱梁 g-h 段，其跨距長度為 1.00 m，其寬度為縱梁間距 1.97 m，故承受風壓面積為$1.00\,m \times 1.97\,m = 1.97\,m^2$。縱梁 g-h 段之有效寬度為$\max(1.00/3, 1.97) = 1.97\,m$，故其有效受風面積為$A = 1.00\,m \times 1.97\,m = 1.97\,m^2$。

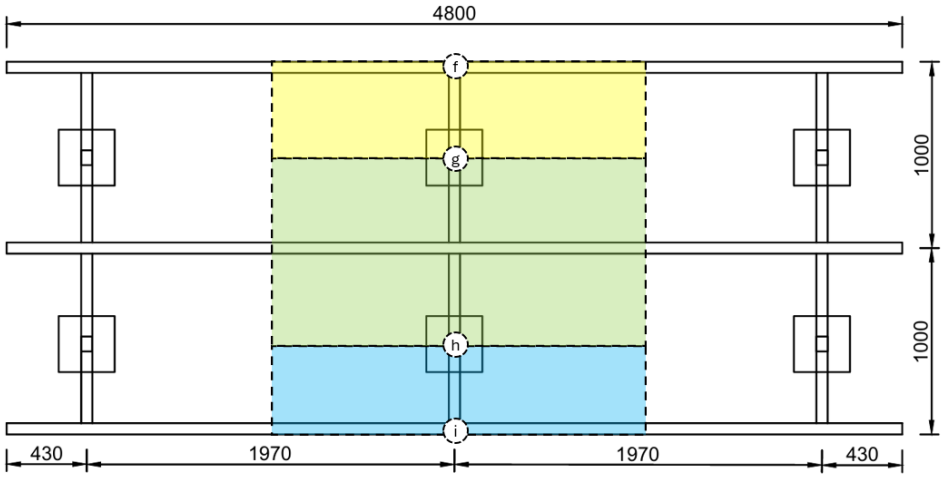


圖 4- 11 示範例 2 之縱梁 f-g-h-i 有效受風面積示意圖(單位:mm)

(c) g 點下方柱：

如圖 4-12 所示，將風力傳遞至 g 點下方柱上，且柱架設在間距為 1.00m 的基座上。

針對 g 點下方柱，其跨距長度為 1.00 m，其寬度為柱間距 1.97 m，故承受風壓面積為 $1.00\,m \times 1.97\,m = 1.97\,m^2$。g 點下方柱之有效寬度為 $\max(1.00/3, 1.97) = 1.97\,m$，故其有效受風面積為 $A = 1.00\,m \times 1.97\,m = 1.97\,m^2$。同理，h 點下方柱之承受風壓面積為 $1.97\,m^2$，有效受風面積為 $1.97\,m^2$。

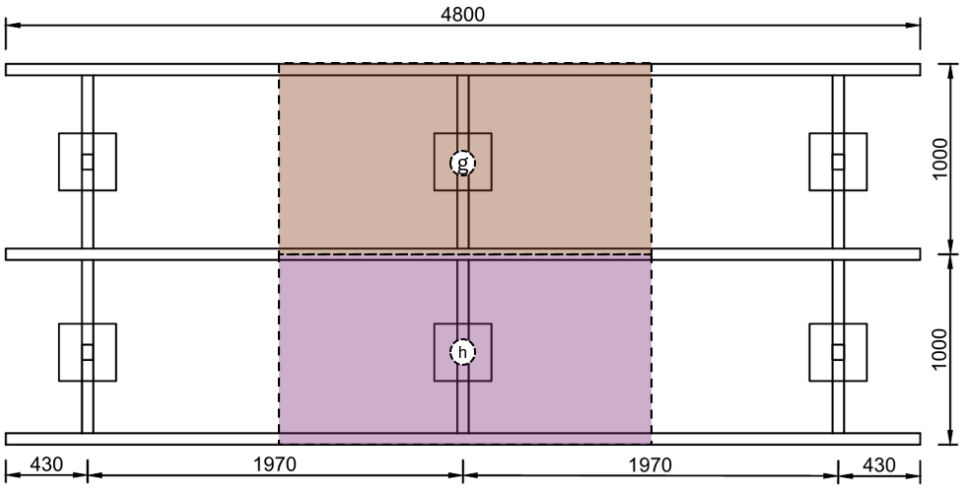


圖 4- 12 示範例 2 之 g 點及 h 點有效受風面積示意圖(單位:mm)

(d) 面板接橫梁扣件(其形心為 k 點)：

如圖 4-13 所示，單一模組的尺寸為$1.56\,m \times 0.98\,m$。為方便計算，將模組間距計入有效受風面積，調整後的尺寸為$1.6\,m \times 1\,m$，並由四個扣件固定。因扣件之有效受風面積不得大於其承受風壓面積，故對 k 點之扣件取其有效受風面積為承受風壓面積$A = 0.8\,m \times 1\,m = 0.8\,m^2$。

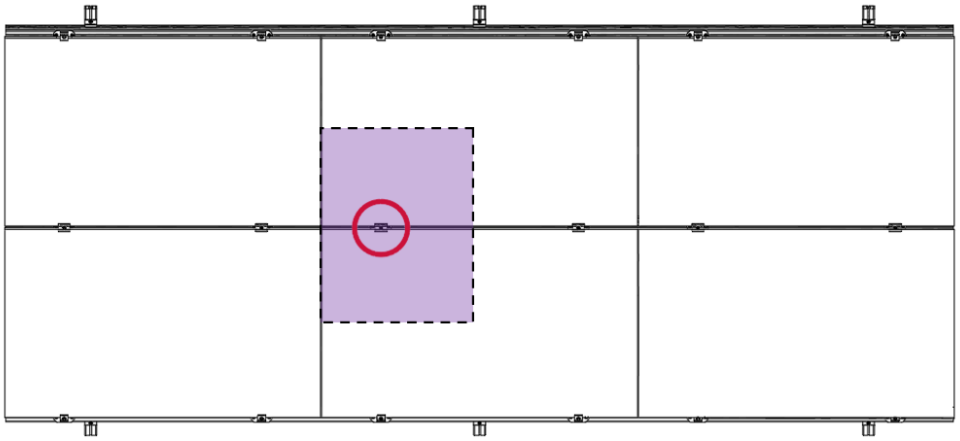


圖 4- 13 示範例 2 之 k 點有效受風面積示意圖
資料來源：修改自[16]

(e) 橫梁接縱梁扣件(其形心之面板投影為 c 點)：

如圖 4-14 所示，將風力傳遞至橫梁上，且橫梁架設在縱梁 b、c、d 點的橫梁接縱梁扣件上。針對橫梁接縱梁扣件(其形心之面板投影為 c 點)，因扣件之有效受風面積不得大於其承受風壓面積，故其有效受風面積為承受風壓面積$A = 1.97\,m \times 1.00\,m = 1.97\,m^2$。

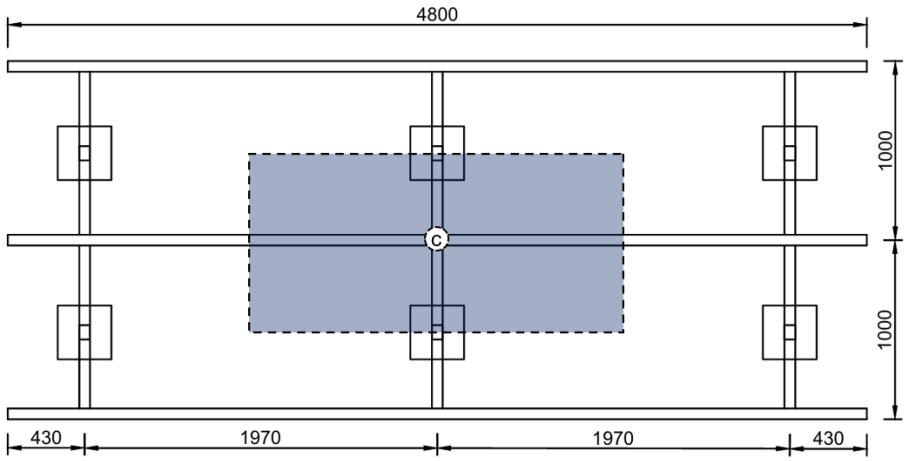


圖 4- 14 示範例 2 之 c 點有效受風面積示意圖(單位:mm)

(f) 縱梁接柱扣件(位於 g 點下方柱頂)：

如圖 4-12 所示，縱梁架設在 g 點下方柱及 h 點下方柱。針對縱梁接柱扣件(位於 g 點下方柱頂)，因扣件之有效受風面積不得大於其承受風壓面積，故其有效受風面積為承受風壓面積$A = 1.00\,m \times 1.97\,m = 1.97\,m^2$。

(g) 柱接基座扣件(位於 g 點下方柱底)：

如圖 4-12 所示，柱架設在 g 點下方柱底基座。針對柱接基座扣件(位於 g 點下方柱底)，因扣件之有效受風面積不得大於其承受風壓面積，故其有效受風面積為承受風壓面積$A = 1.00\,m \times 1.97\,m = 1.97\,m^2$。

[步驟 2]對應於有效受風面積 A 之淨風壓係數$(GC_{rn})_a$

根據 CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022) 淨風壓係數$(GC_{rn})_a$之計算，當$0^\circ \le \omega \le 5^\circ$時，利用表 4-2 計算得到$(GC_{rn})_a$；當$15^\circ \le \omega \le 35^\circ$時，利用表 4-3 計算得到$(GC_{rn})_a$；當$5^\circ < \omega < 15^\circ$時，可以使用內插計算得到$(GC_{rn})_a$。

表 4-2 當 0°≤ ω≤5° 時，$(GC_{rn})_a$之計算公式

A(m^2)	$(GC_{rn})_a$之計算公式
A≤ 46.45	−0.59 log(10.76A)+2.08
A> 46.45	−0.35 log(10.76A)+1.43

資料來源：CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022)

表 4-3 當 15°≤ ω≤35° 時，$(GC_{rn})_a$之計算公式

A(m^2)	$(GC_{rn})_a$之計算公式
A≤ 46.45	−0.74 log(10.76A)+2.78
A> 46.45	−0.36 log(10.76A)+1.75

資料來源：CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022)

針對橫梁 a-b 段，其有效受風面積$A = 0.43\,m^2$。以$\omega = 5^\circ$計算淨風壓係數$(GC_{rn})_a = -0.59\log(10.76A) + 2.08 = 1.69$；以$\omega = 15^\circ$計算淨風壓係數$(GC_{rn})_a = -0.74\log(10.76A) + 2.78 = 2.29$；由線性內差方式求$\omega = 10^\circ$的淨風

壓係數$(GC_{rn})_a = (1.69 + 2.29)/2 = 2.0$。同理，橫梁 d-e 段，其有效受風面積$A = 0.43\,m^2$，淨風壓係數$(GC_{rn})_a = 2.0$。

針對橫梁 b-c 段，其有效受風面積$A = 1.97\,m^2$。以$\omega = 5^\circ$計算淨風壓係數$(GC_{rn})_a = -0.59\log(10.76A) + 2.08 = 1.30$；以$\omega = 15^\circ$計算淨風壓係數$(GC_{rn})_a = -0.74\log(10.76A) + 2.78 = 1.80$；由線性內差方式求$\omega = 10^\circ$的淨風壓係數$(GC_{rn})_a = (1.30 + 1.80)/2 = 1.55$。同理，橫梁 c-d 段、縱梁 g-h 段、g 點下方柱、h 點下方柱、橫梁接縱梁扣件(其形心之面板投影為 c 點)、縱梁接柱扣件(位於 g 點下方柱頂)、柱接基座扣件(位於 g 點下方柱底)，其有效受風面積$A = 1.97\,m^2$，淨風壓係數$(GC_{rn})_a = 1.55$。

針對縱梁 f-g 段，其有效受風面積$A = 0.985\,m^2$。以$\omega = 5^\circ$計算淨風壓係數$(GC_{rn})_a = -0.59\log(10.76A) + 2.08 = 1.48$；以$\omega = 15^\circ$計算淨風壓係數$(GC_{rn})_a = -0.74\log(10.76A) + 2.78 = 2.02$；由線性內差方式求$\omega = 10^\circ$的淨風壓係數$(GC_{rn})_a = (1.48 + 2.02)/2 = 1.75$。同理，縱梁 h-i 段，其有效受風面積$A = 0.985\,m^2$，淨風壓係數$(GC_{rn})_a = 1.75$。

針對面板接橫梁扣件(其形心為 k 點)，其有效受風面積$A = 0.8\,m^2$。以$\omega = 5^\circ$計算淨風壓係數$(GC_{rn})_a = -0.59\log(10.76A) + 2.08 = 1.53$；以$\omega = 15^\circ$計算淨風壓係數$(GC_{rn})_a = -0.74\log(10.76A) + 2.78 = 2.09$；由線性內差方式求$\omega = 10^\circ$的淨風壓係數$(GC_{rn})_a = (1.53 + 2.09)/2 = 1.81$。

彙整所有構件及扣件的淨風壓係數$(GC_{rn})_a$，將其列於表 4-4。

[步驟 3]面板弦長修正因子γ_c

根據 CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022) 面板弦長修正因子γ_c之計算，面板弦長修正因子$\gamma_c = max\big(0.6 + 0.2L_p, 0.8\big) = max(0.6 + 0.2 \times 2\,, 0.8) = 1.0$。

[步驟 4]系統邊緣修正因子γ_{E_3}

根據 CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022) 系統邊緣修正因子γ_{E_3}之決定，若構件同時滿足下述條件，則結構系統邊緣修正因子γ_{E_3}=1.5；在其他情況下，結構系統邊緣修正因子γ_{E_3}=1.0。

(a) 構件所在結構系統與鄰近結構系統之距離大於 $4h_2$ 或 1.2m，擇其大者(如圖 4-15 所示)，或構件所在面板與鄰近面板之距離大於 $4h_2$ 或 1.2m ，擇其大者(如圖 4-16 所示)。

(b) 構件位於結構系統邊緣 $1.5L_p$ 範圍內，其中 L_p 為面板弦長。

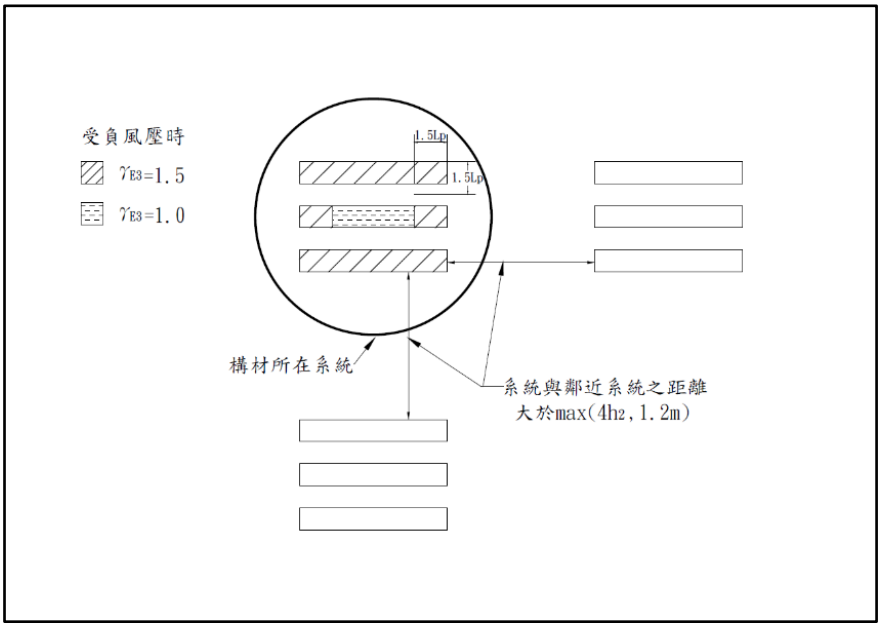


圖 4-15 構件所在結構系統與鄰近結構系統之距離大於max $(4h_2, 1.2m)$時可能產生γ_{E3}=1.5 之示意圖

資料來源：CNS 16189「 太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022)

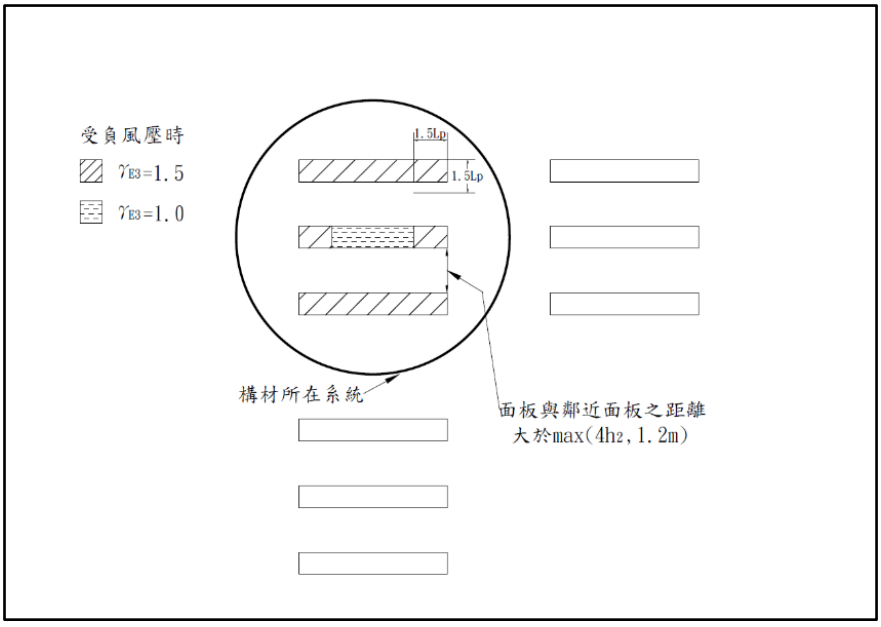


圖 4-16 構件所在面板與鄰近面板之距離大於max $(4h_2, 1.2m)$時可能產γ_{E3}=1.5 之示意圖

資料來源：CNS 16189「 太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022)

根據圖 4-4，本範例假設構件所在結構系統與鄰近結構系統之距離為 1.5 m，小於$\max(4h_2, 1.2m) = 3.8\,m$，不滿足上述條件之(a)，故其系統邊緣修正因子$\gamma_{E_2} = 1.0$。

[步驟 5]總淨風壓係數$(GC_{rn})_g$

根據 CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022) 總淨風壓係數$(GC_{rn})_g$之計算，總淨風壓係數$(GC_{rn})_g = (\mathrm{GC_{rn}})_a \times \gamma_c \times \gamma_{E_3}$。

針對橫梁 a-b 段，其淨風壓係數$(\mathrm{GC_{rn}})_a = 2.0$、面板弦長修正因子$\gamma_c = 1.0$及系統邊緣修正因子$\gamma_{E_3} = 1.0$，總淨風壓係數$(GC_{rn})_g = 2.0 \times 1.0 \times 1.0 = 2.0$。同理，橫梁 d-e 段，其淨風壓係數$(\mathrm{GC_{rn}})_a = 2.0$，總淨風壓係數$(GC_{rn})_g = 2.0$。

針對橫梁 b-c 段，其淨風壓係數$(\mathrm{GC_{rn}})_a = 1.55$、面板弦長修正因子$\gamma_c = 1.0$及系統邊緣修正因子$\gamma_{E_3} = 1.0$，總淨風壓係數$(GC_{rn})_g = 1.55 \times 1.0 \times 1.0 = 1.55$。同理，橫梁 c-d 段、縱梁 g-h 段、g 點下方柱、h 點下方柱、橫梁接縱梁扣件(其形心之面板投影為 c 點)、縱梁接柱扣件(位於 g 點下方柱頂)、柱接基座扣件(位於 g 點下方柱底)，其淨風壓係數$(\mathrm{GC_{rn}})_a = 1.55$，總淨風壓係數$(GC_{rn})_g$為 1.55。

針對縱梁 f-g 段，其淨風壓係數$(\mathrm{GC_{rn}})_a = 1.75$、面板弦長修正因子$\gamma_c = 1.0$及系統邊緣修正因子$\gamma_{E_3} = 1.0$，總淨風壓係數$(GC_{rn})_g = 1.75 \times 1.0 \times 1.0 = 1.75$。同理，縱梁 h-i 段，其淨風壓係數$(\mathrm{GC_{rn}})_a = 1.75$，總淨風壓係數$(GC_{rn})_g = 1.75$。

針對面板接橫梁扣件(其形心為 k 點)，其淨風壓係數$(\mathrm{GC_{rn}})_a = 1.81$、面板弦長修正因子$\gamma_c = 1.0$及系統邊緣修正因子$\gamma_{E_3} = 1.0$，總淨風壓係數$(GC_{rn})_g = 1.81 \times 1.0 \times 1.0 = 1.81$。

彙整所有構件及扣件的總淨風壓係數$(GC_{rn})_g$，將其列於表 4-4。

貳、構件與扣件之設計風壓（力）

[步驟 1]相關之設計參數

根據「建築物耐風設計規範與解說」(2014) 表 2.2，地況 C 之相關參數$\alpha =$

0.15；$z_g = 300\,m$，用途係數$I = 1.0$，基本設計風速$V_{10}(C) = 32.5\,m/s$。

[步驟 2]風速壓地況係數 $K(z)$ 及地形係數 K_{zt}

根據「建築物耐風設計規範與解說」(2014) 規範式(2.7)，計算$K(z)$。因面板形心離地高度$h_c = 0.774\,m$，取規範 $z \le 5\,m$的公式計算：

$K(h_c) = 2.774\left(\frac{5}{z_g}\right)^{2\alpha} = 2.774\left(\frac{5}{300}\right)^{2\times 0.15} = 0.812$。

根據「建築物耐風設計規範與解說」(2014) 規範式(2.8)，計算K_{zt}。因工址附近無特殊地形，$K_{zt} = 1.0$。

[步驟 3]面板形心離地 h_c公尺高處之風速壓

根據「建築物耐風設計規範與解說」(2014) 規範式(2.6)，面板形心離地 h_c 公尺高處之風速壓 $q(h_c) = 0.06 \times K(z) \times K_{zt} \times [IV_{10}(C)]^2 = 0.06 \times 0.812 \times 1.0 \times [1.0 \times 32.5]^2 = 51.46\,kgf/m^2$。

[步驟 4]各構件及扣件之設計風壓

根據 CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022) 地面踞置型系統之設計正負風壓P之計算，設計正負風壓$P = \pm\, q(h_c) \times (GC_{rn})_g$，正號表示淨風壓指向面板上表面；負號表示淨風壓遠離面板上表面。

針對橫梁 a-b 段，其面板形心高處之風速壓$q(h_c) = 51.46\,kgf/m^2$，總淨風壓係數$(GC_{rn})_g = 2.0$，設計正負風壓$P = \pm\, q(h_c) \times (GC_{rn})_g = \pm 51.46 \times 2.0 = \pm 102.9\,kgf/m^2$。同理，橫梁 d-e 段，其設計正負風壓$P = \pm 102.9\,kgf/m^2$。

針對橫梁 b-c 段，其面板形心高處之風速壓$q(h_c) = 51.46\,kgf/m^2$，總淨風壓係數$(GC_{rn})_g = 1.55$，設計正負風壓$P = \pm\, q(h_c) \times (GC_{rn})_g = \pm 51.46 \times 1.55 = \pm 79.8\,kgf/m^2$。同理，橫梁 c-d 段、縱梁 g-h 段、g 點下方柱、h 點下方柱、橫梁接縱梁扣件(其形心之面板投影為 c 點)、縱梁接柱扣件(位於 g 點下方柱頂)、柱接基座扣件(位於 g 點下方柱底)，其設計正負風壓$P = \pm 79.8\,kgf/m^2$。

針對縱梁 f-g 段，其面板形心高處之風速壓$q(h_c) = 51.46\,kgf/m^2$，總淨風壓係數$(GC_{rn})_g = 1.75$，設計正負風壓$P = \pm\, q(h_c) \times (GC_{rn})_g = \pm 51.46 \times$

$1.75 = \pm 90.1\ kgf/m^2$。同理，縱梁 h-i 段，其設計正負風壓$P = \pm 90.1\ kgf/m^2$。

針對面板接橫梁扣件(其形心為 k 點)，其面板形心高處之風速壓$q(h_c) = 51.46\ kgf/m^2$，總淨風壓係數$(GC_{rn})_g = 1.81$，設計正負風壓$P = \pm q(h_c) \times (GC_{rn})_g = \pm 51.46 \times 1.81 = \pm 93.1\ kgf/m^2$。

彙整所有構件及扣件的設計正負風壓 P，將其列於表 4-4。

[步驟 5]各扣件之設計風力

設計正負風力為設計正負風壓與承受風壓面積A_{actual}之乘積。

針對橫梁接縱梁扣件(其形心之面板投影為 c 點)，設計正負風壓 P 為$\pm 79.8\ kgf/m^2$，承受風壓面積 A_{actual} 為 $1.97\ m^2$，設計正負風力 $F = \pm 79.8\ kgf/m^2 \times 1.97\ m^2 = 157.2\ kgf$。同理，縱梁接柱扣件(位於 g 點下方柱頂)、柱接基座扣件(位於 g 點下方柱底)，其設計正負風壓 P為$\pm 79.8\ kgf/m^2$，承受風壓面積A_{actual}為$1.97\ m^2$，設計正負風力F為$157.2\ kgf$。

針對面板接橫梁扣件(其形心為 k 點)，設計正負風壓 P為$\pm 93.1\ kgf/m^2$，承受風壓面積A_{actual}為$0.8\ m^2$，設計正負風力$F = \pm 93.1\ kgf/m^2 \times 0.8\ m^2 = 74.5\ kgf$。

彙整所有扣件的設計正負風力 F，將其列於表 4-4。

表 4-4 示範例 2 構件及扣件之相關參數

名稱		實際受風面積 (m^2)	有效受風面積 $A(m^2)$	淨風壓係數 $(GC_{rn})_a$	總淨風壓係數 $(GC_{rn})_g$	設計正負風壓 (kgf/m^2)	設計正負風力 (kgf)
橫梁	a-b 段或 d-e 段	0.43	0.43	2.0	2.0	±102.9	
	b-c 段或 c-d 段	1.97	1.97	1.55	1.55	±79.8	
縱梁	f-g 段或 h-i 段	0.985	0.985	1.75	1.75	±90.1	
	g-h 段	1.97	1.97	1.55	1.55	±79.8	
柱	g 點下方柱或 h 點下方柱	1.97	1.97	1.55	1.55	±79.8	
面板接橫梁之扣件	k 點	0.8	0.8	1.81	1.81	±93.1	±74.5
	螺栓 1 個(軸力)						±74.5
橫梁接縱梁之扣件	c 點	1.97	1.97	1.55	1.55	±79.8	±157.2
	螺栓 2 個(軸力)						±78.6
縱梁接柱之扣件	g 點下方柱頂	1.97	1.97	1.55	1.55	±79.8	±157.2
	A 處螺栓 2 個(軸力)						±78.6
	B 處螺栓 1 個(剪力)						±154.8
柱接基座之扣件	g 點下方柱底	1.97	1.97	1.55	1.55	±79.8	±157.2
	螺栓 2 個(剪力)						±77.4

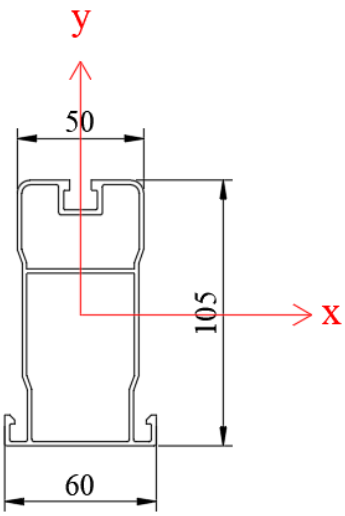
第四節 構件之耐風分析及檢核

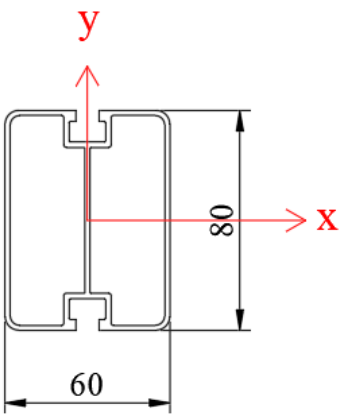
橫梁、縱梁及柱使用特製之鋁擠型構件，其材質為 6063-T5 鋁合金，設計時所用之彈性模數E為$7100\ \mathrm{kgf}/mm^2$，剪力彈性模數為G為$2700\ \mathrm{kgf}/mm^2$，波森比μ為0.3，降伏強度F_y為$110\ MPa$，極限強度F_u為$150\ MPa$。假設採用之橫梁、縱梁及柱的形狀與斷面性質如表 4-5 所示。

因國內目前尚無鋁結構之相關規範，根據臺中市結構工程技師公會在 108 年編寫「太陽光電系統支撐架結構設計參考手冊草案(修訂版)」之 4.2 構件接合設計內容所述，構件檢核可參考美國鋁結構規範 Aluminum Design Manual，載重組合則參考「鋼結構容許應力設計法規範及解說」之規定。

依「鋼結構容許應力設計法規範及解說」之規定，載重組合有$D+L$、$D+0.75(L\pm1.25W)$、$D+0.75(L\pm0.8E)$、$0.7D\pm1.25W$及$0.7D\pm0.8E$。其中，D為靜載重，包括構件自重及永久附加物重量；L為活載重，包含人員重量；E為設計地震力；W為設計風力。本示範例設計時僅考慮風載重及靜載重造成之影響，故載重組合有$D\pm0.9375\,W$、$0.7D\pm1.25W$這四種。

表 4-5 示範例 2 之斷面性質與斷面形狀

<table>
<tr><td colspan="2">橫梁</td></tr>
<tr><td>斷面性質</td><td>斷面形狀(單位:mm)</td></tr>
<tr><td>斷面模數 $S_x = 19919.81\ mm^3$
斷面模數 $S_y = 9215.94\ mm^3$
慣性矩 $I_x = 1045789.95\ mm^4$
慣性矩 $I_y = 276478.21\ mm^4$
斷面積 $A = 729.02\ mm^2$</td><td> 

y 軸垂直面板</td></tr>
<tr><td colspan="2">縱梁及柱</td></tr>
<tr><td>斷面性質</td><td>斷面形狀(單位:mm)</td></tr>
<tr><td>斷面模數 $S_x = 14741.15\ mm^3$
斷面模數 $S_y = 9679.11\ mm^3$
慣性矩 $I_x = 589646.16\ mm^4$
慣性矩 $I_y = 290373.29\ mm^4$
斷面積 $A = 710.52\ mm^2$</td><td> 

縱梁 y 軸垂直面板
柱 z 軸垂直地面</td></tr>
</table>

資料來源：修改自[16]

壹、橫梁

針對橫梁 a-b-c-d-e 進行結構分析如圖 4-17 所示，將橫梁與下方縱梁連接處 b 點、c 點及 d 點的扣件視為鉸支承（Hinge）分析。

風載重採用表 4-4 中橫梁 a-b-c-d-e 的設計正負風壓。橫梁 a-b 段及 d-e 段設計風壓為$\pm 102.9\ kgf/m^2$，橫梁 b-c 段及 c-d 段設計風壓為$\pm 79.8\ kgf/m^2$，分別

乘上縱梁跨距 1m 後可得橫梁 a-b 段及 d-e 段的線載重為$q_w = \pm 102.9\ kgf/m$，橫梁 b-c 段及 c-d 段的線載重為$q_w = \pm 79.8\ kgf/m$。

靜載重包含橫梁自重與模組自重，因鋁擠型自重相對較小，故只考慮模組自重。模組自重為每塊 20 kgf，橫梁 a-b-c-d-e 需承受之模組重為 3 塊，故橫梁 a-b-c-d-e 所承受之線載重 $q_D = (20\ kgf \times 3\ 塊)/4.8\ m = 12.5\ kgf/m$。

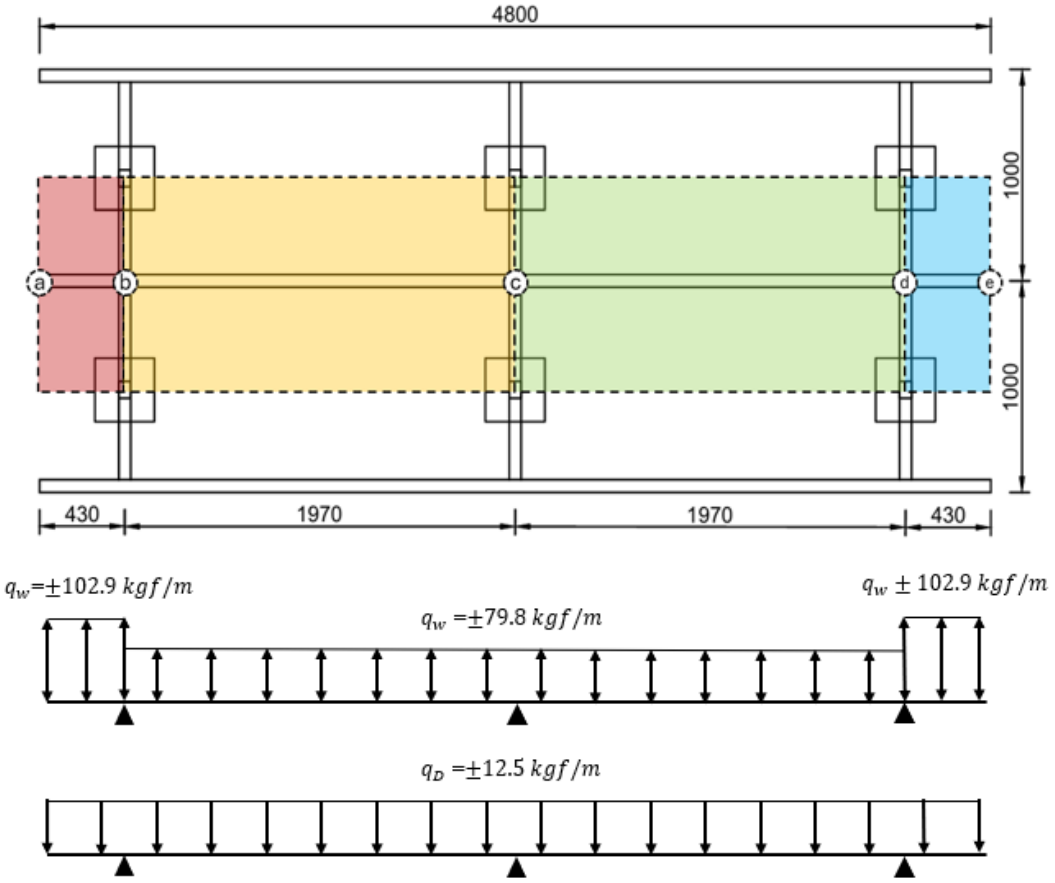


圖 4- 17 示範例 2 之橫梁 a-b-c-d-e 受力作用圖

分析時利用 SAP 2000 軟體建模，將橫梁的斷面與材料性質輸入並且施加風載重及靜載重，即可分析出橫梁 a-b-c-d-e 的剪力、彎矩及變形量，當載重組合為$0.7D + 1.25W$時可得出橫梁 a-b-c-d-e 中最大剪力及最大彎矩，分別為$V_{max} = 125.3\ kgf$及$M_{max} = 46.5\ kgf - m$；當載重組合為$1.0D + 1.0W$時可得出最大變形量$\delta_{max} = 1.81\ mm$。

應力檢核

利用 SAP 2000 分析軟體，選 AA-ASD(2000)進行檢核，得橫梁 a-b-c-d-e 應力比為$0.26 \leq 1$，確認構件符合規範。

變形檢核

為避免在強風持續作用下產生振動破壞，設計時應盡量減少構件在風力作用下之變位，同時檢核確認構件變位量不超過容許值，以容許變形量δ_a = 跨距/175 (業界常用公式)，進行檢核。

$$\delta_{max} = 1.81\,mm \leq \delta_a = \frac{1970}{175} = 11.26\,mm$$，檢核通過。

貳、縱梁

針對縱梁 f-g-h-i 進行結構分析如圖 4-18 所示，將縱梁與下方柱連接處 g 點及 h 點的扣件視為鉸支承（Hinge）分析。

風載重採用表 4-4 中縱梁 f-g-h-i 的設計正負風壓。縱梁 f-g 段及 h-i 段設計風壓為$\pm 90.1\ kgf/m^2$；縱梁 g-h 段設計風壓為$\pm 79.8\ kgf/m^2$，分別乘上跨距 1.97 m 可得縱梁 f-g 段及 h-i 段的線載重為$q_w = \pm 177.5\ kgf/m$；縱梁 g-h 段的線載重為$q_w = \pm 157.2\ kgf/m$。

靜載重由上方橫梁接縱梁扣件 f 點、c 點及 i 點傳入縱梁，靜載重包含橫梁、縱梁自重與模組自重，因鋁擠型自重相對較小，故只考慮模組自重。模組自重為每塊 20 kgf，縱梁 f-g-h-i 所承受之模組重為 2 塊，故縱梁 f-g-h-i 所承受之點載重 $Q_D = (20\ kgf \times 2\ 塊)/3 = 13.3\ kgf$。

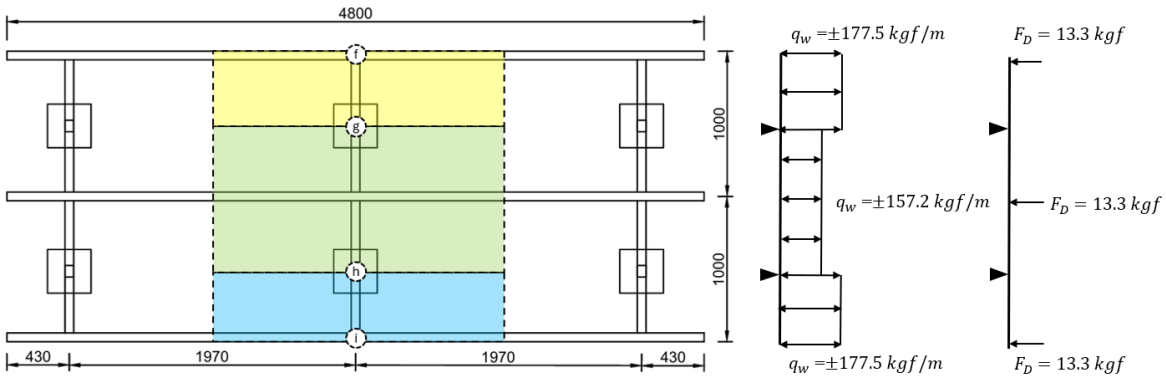


圖 4-18 示範例 2 之縱梁 f-g-h-i 受力作用圖

分析時利用 SAP 2000 軟體建模，將縱梁的斷面與材料性質輸入並且施加風載重及靜載重，即可分析出縱梁 f-g-h-i 的剪力、彎矩及變形量，當載重組合為$0.7D + 1.25W$時可得出縱梁 f-g-h-i 中最大剪力及最大彎矩，分別為$V_{max} = 38.1\ kgf$及$M_{max} = 13.5\ kgf - m$；當載重組合為$1.0D + 1.0W$時可得出最大變形量$\delta_{max} = 0.92\ mm$。

<u>應力檢核</u>

利用 SAP 2000 分析軟體，選 AA-ASD(2000)進行檢核，得縱梁 f-g-h-i 應力比為$0.12 \leq 1$，確認構件符合規範。

<u>變形檢核</u>

為避免在強風持續作用下產生振動破壞，設計時應盡量減少構件在風力作用下之變位，同時檢核確認構件變位量不超過容許值，以容許變形量δ_a = 跨距/175 (業界常用公式)，進行檢核。

$$\delta_{max} = 0.92\ mm \leq \delta_a = \frac{1000}{175} = 5.7\ mm$$，檢核通過。

參、柱

針對 g 點下方柱及 h 點下方柱進行結構分析如圖 4-19 及圖 4-20 所示，將柱與下方基座連接處 g 點下方柱底及 h 點下方柱底的扣件視為鉸支承（Hinge）分析。

風載重採用表 4-4 中 g 點下方柱的設計正負風壓。g 點下方柱及 h 點下方柱的設計風壓為$\pm 79.8\ kgf/m^2$，分別乘上寬度 1.97 m，可得 g 點下方柱及 h 點下方柱的線載重為$q_w = \pm 157.2\ kgf/m$。

靜載重由上方縱梁接柱扣件 g 點下方柱頂及 h 點下方柱頂扣件傳入柱，靜載重包含橫梁、縱梁、柱自重及模組自重，因鋁擠型自重相對較小，故只考慮模組自重。模組自重為每塊 20 kgf，g 點下方柱所承受之模組重為 1 塊，故 g 點下方柱所承受之點載重 $F_D = 20\ kgf$。同理，h 點下方柱所承受之模組重為 1 塊，h 點下方柱所承受之點載重 $F_D = 20\ kgf$。

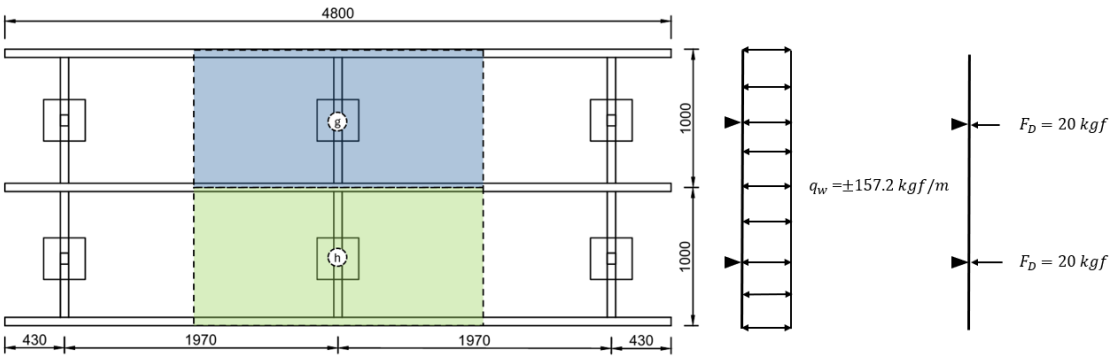


圖 4-19 示範例 2 之柱受力作用圖 1

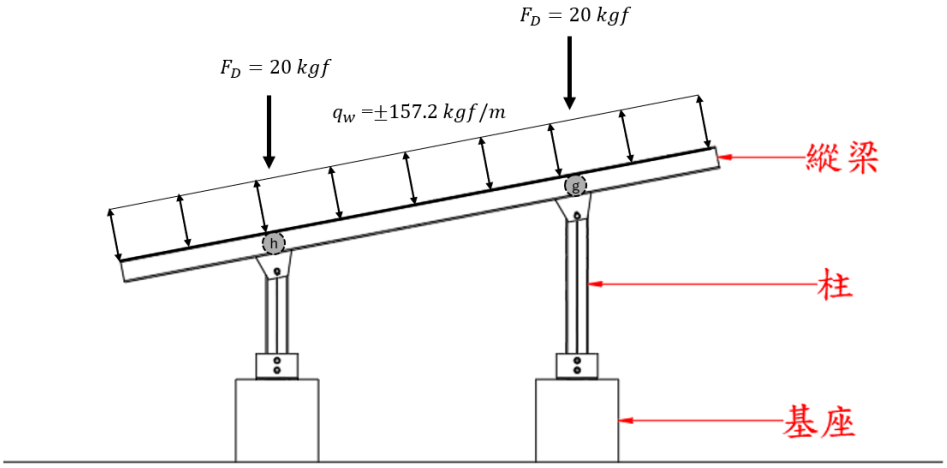


圖 4-20 示範例 2 之柱受力作用圖 2

資料來源：修改自[16]

分析時利用 SAP 2000 軟體建模，將柱的斷面與材料性質輸入並且施加風載重及靜載重，即可分析出 g 點下方柱的剪力及彎矩，當載重組合為$0.7D + 1.25W$時，可得出 g 點下方柱中最大剪力及最大彎矩，分別為$V_{max} = 26.9\ kgf$及$M_{max} = 23.4\ kgf - m$。同理，當載重組合為$0.7D + 1.25W$時，得出 h 點下方柱中最大剪力及最大彎矩，分別為$V_{max} = 41.4\ kgf$、$M_{max} = 28.1\ kgf - m$。

應力檢核

利用 SAP 2000 分析軟體，選 AA-ASD(2000)進行檢核，得 g 點下方柱應力比為 0.22 ；h 點下方柱應力比為 0.23，應力比皆小於 1，確認構件符合規範。

變形檢核

為避免在強風持續作用下產生振動破壞，設計時應盡量減少構件在風力作用下之變位，同時檢核確認構件變位量不超過容許值。

第五節 扣件之耐風分析及檢核

扣件接合設計時，螺栓可能的破壞模式有拉力破壞、剪力破壞及承壓破壞，接合母材可能的破壞模式有總斷面積破壞、淨斷面積破壞及塊狀剪力撕裂，實務上需針對上述破壞模式作檢核，以確保安全性。本手冊僅示範螺栓拉力破壞及剪力破壞之檢核。

所檢核扣件包括面板接橫梁之扣件、橫梁接縱梁之扣件、縱梁接柱之扣件與柱接基座之扣件。各扣件均採用 M8 螺栓鎖固，其螺距為 1.25mm。螺栓採用 SUS 304 (A2-50)不鏽鋼，其極限抗拉強度為$F_{tu} = 500\ MPa = 72.5\ ksi$、極限抗剪強度為 $F_{su} = 200\ MPa = 29\ ksi$，接合母材為 6061-T6 鋁合金。載重組合參考「鋼結構容許應力設計法規範及解說」(2010) 之規定，考慮 $D \pm 0.9375\,W$、$0.7D \pm 1.25W$這四種載重組合。根據臺中市結構工程技師公會在 108 年編寫「太陽光電系統支撐架結構設計參考手冊草案(修訂版)」之 4.3 螺栓接合內容所述，螺栓檢核可參考美國鋁結構規範 Aluminum Design Manual 之 5.2 Bolted Connections。柱與基座之接合錨栓以「建築物混凝土結構設計規範」(2023) 作檢核。

壹、螺栓檢核公式

螺栓容許拉力為$F_t = A_s \times f_t$。其中，F_t為螺栓容許拉力；A_s為螺栓有效斷面積，其公式為$A_s = \frac{\pi}{4}\left(D - \frac{1.191}{n}\right)^2$，其中 D 為螺栓之標稱直徑(英吋)，n 為每英吋之螺紋數；f_t為螺栓容許拉應力，其公式為$f_t = \frac{F_{tu}}{1.2n_u}$，其中$n_u$為安全係數，取 1.95。

螺栓容許剪力為$F_s = A_S^* \times f_s$。其中，F_s為螺栓容許剪力；A_S^*為螺栓剪力有效斷面積，當剪力作用在螺紋上時，$A_S^* = A_s$，當剪力未作用在螺紋上時，$A_S^* = \frac{\pi}{4}(D)^2$；$f_s$為螺栓容許剪應力，其公式為$f_s = \frac{F_{su}}{1.2n_u}$。

貳、面板接橫梁之扣件

面板連接橫梁時需分為四步驟完成，首先將特製菱形片先固定於橫梁上如圖 4-21 所示，藉由特製菱形片將中壓塊固定於橫梁上如圖 4-22 所示，待特製菱形片與中壓塊放置定位後，將模板插入再將其螺栓鎖緊如圖 4-23 所示，最後由

下鎖孔將模板鎖固於橫梁上如圖 4-24 所示。分析時取橫梁與中壓塊連接之螺栓如圖 4-22，進行分析及檢核。

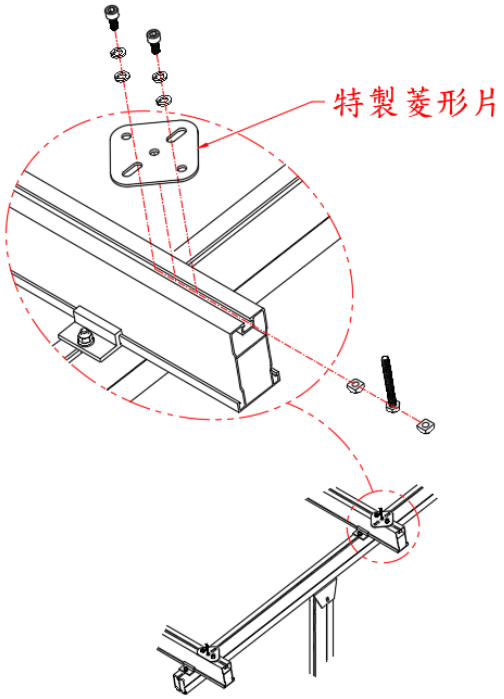


圖 4-21 地面踞置型系統之面板接橫梁示意圖 1

資料來源：修改自[16]

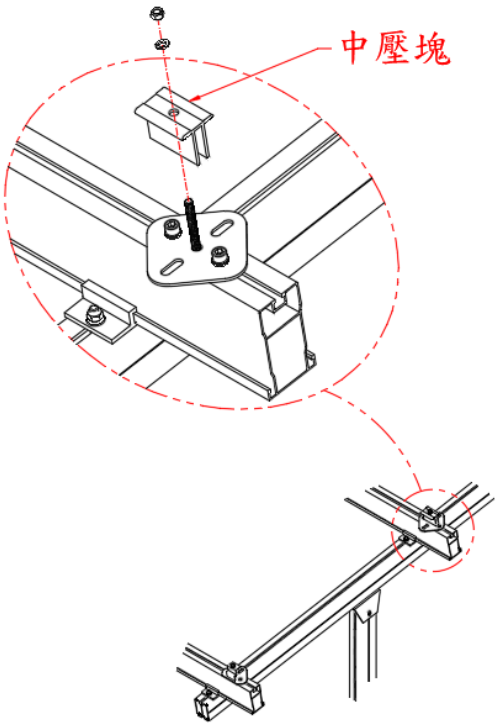


圖 4-22 地面踞置型系統之面板接橫梁示意圖 2

資料來源：修改自[16]

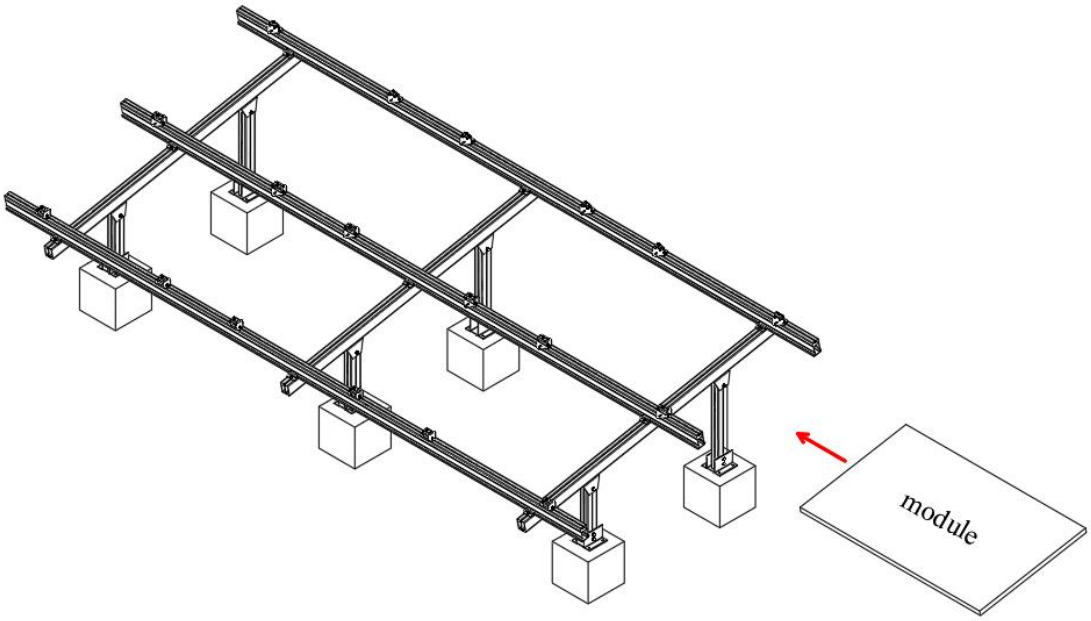


圖 4-23 地面踞置型系統之面板接橫梁示意圖 3

資料來源：修改自[16]

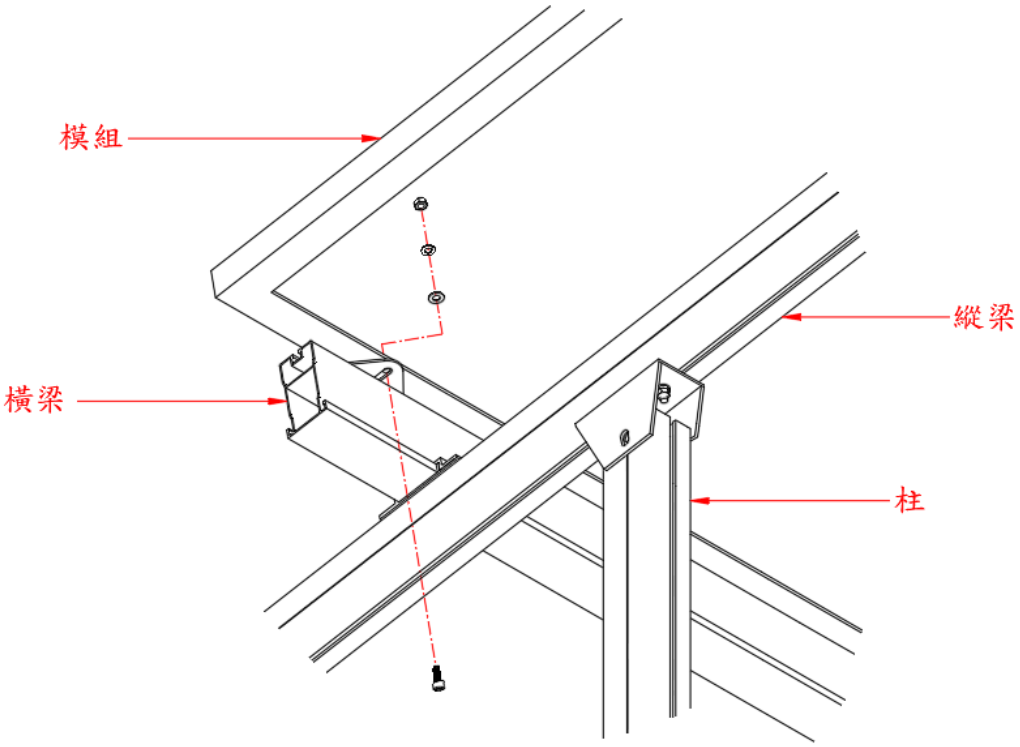


圖 4-24 地面踞置型系統之面板接橫梁示意圖 4

資料來源：修改自[16]

螺栓拉力分析

風載重採用表 4-4 中面板接橫梁扣件 k 點之設計正負風力$\pm 74.5\ kgf$，正號表示力量指向面板上表面，對此扣件而言為壓力；負號表示力量遠離面板上表面，對此扣件而言為拉力。

面板連接橫梁扣件螺栓數為 1 個，單一螺栓承擔設計風拉力為$-74.5\ kgf$，對螺栓造成之最大拉力為$F_{ten} = 1.25W = 1.25 \times (-74.5) = -93.1\ kgf$。

螺栓拉力檢核

螺栓直徑$D = 8\ mm = 0.315\ in$、每英吋之螺紋數$n = 25.4/1.25 = 20.32$，故螺栓有效斷面積$A_s = \frac{\pi}{4}\left(D - \frac{1.191}{n}\right)^2 = \frac{\pi}{4}\left(0.315 - \frac{1.191}{20.32}\right)^2 = 0.0516\ in^2$；允許拉應力$f_t = F_{tu}/1.2n_u = 72.5/2.34 = 30.98\ ksi$。螺栓容許拉力$F_t = A_s \times f_t = 0.0516\ in^2 \times 30.98\ ksi = 1.599\ kip = 725.3\ kgf$。

螺栓拉力$|F_{ten}| = 93.1\ kgf <$ 螺栓容許拉力$F_t = 725.3\ kgf$，檢核通過。

參、橫梁接縱梁之扣件

橫梁連接縱梁時需分為三步驟完成，首先將特製鋁件固定於下方鋁擠型縱梁上如圖 4-25 所示，再將鋁擠型橫梁固定於特製鋁件上如圖 4-26 所示，最後根據圖 4-25 及圖 4-26，將鋁擠型橫梁固定於下方鋁擠型縱梁上如圖 4-27 所示。

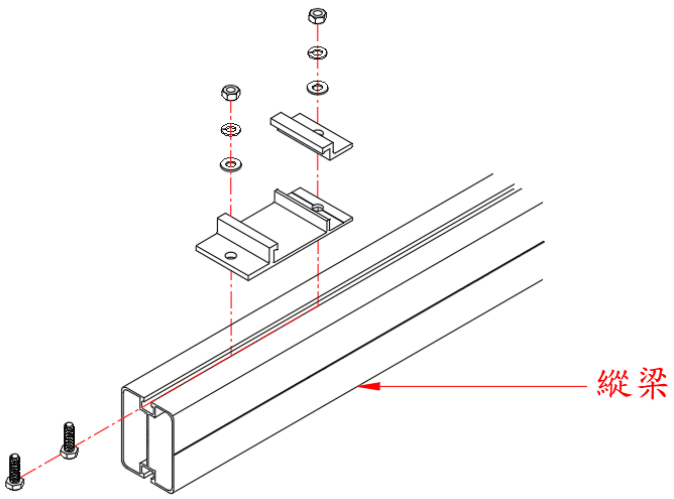


圖 4-25 地面踞置型系統之橫梁接縱梁示意圖 1

資料來源：修改自[16]

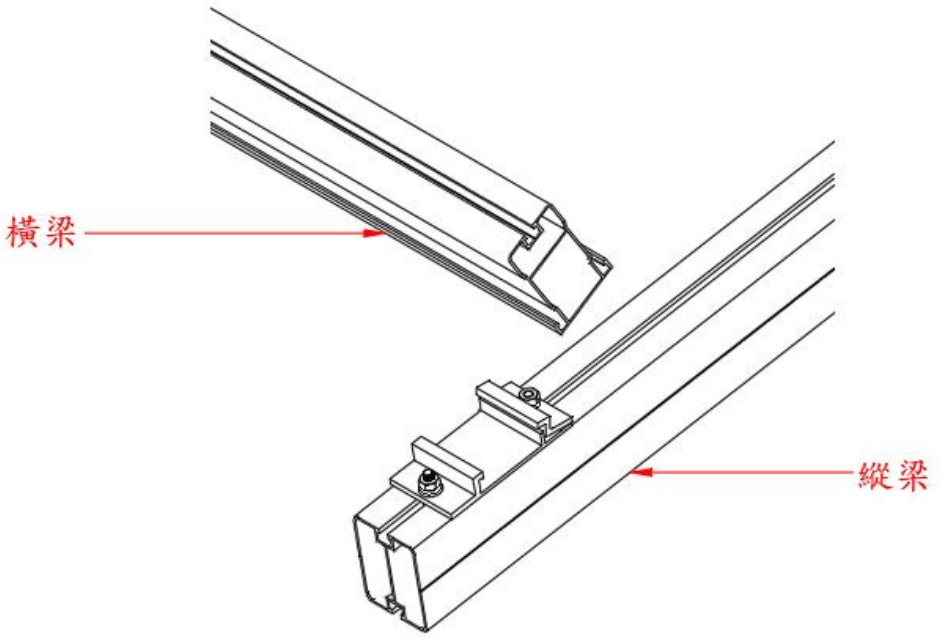


圖 4-26 地面踞置型系統之橫梁接縱梁示意圖 2

資料來源：修改自[16]

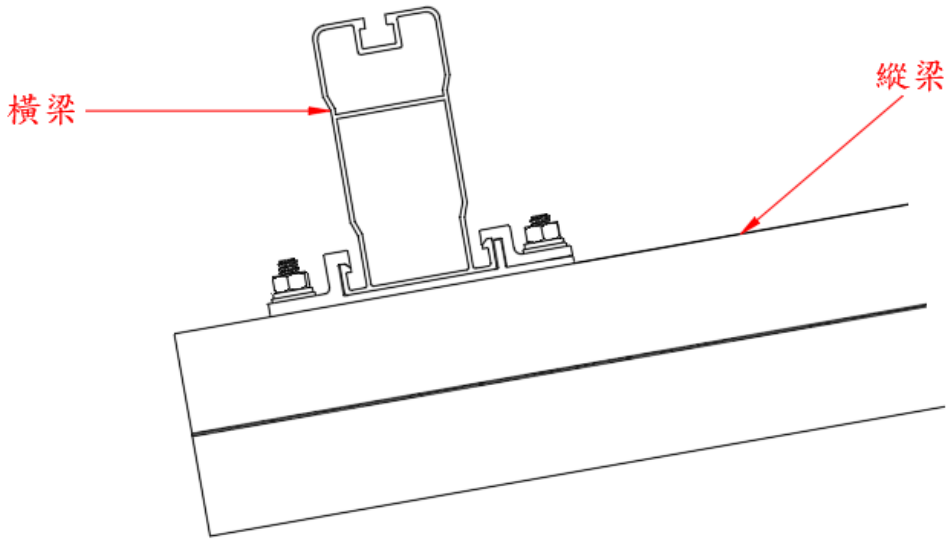


圖 4-27 地面踞置型系統之橫梁接縱梁示意圖 3

資料來源：修改自[16]

螺栓拉力分析

風載重採用表 4-4 中橫梁接縱梁扣件 c 點之設計正負風力$\pm 157.2\ kgf$，正號表示力量指向面板上表面，對此扣件而言為壓力；負號表示力量遠離面板上表面，對此扣件而言為拉力。靜載重包含橫梁自重與面板自重，因鋁擠型自重相對較小，故只考慮面板自重，橫梁接縱梁扣件承受面板面積為$1.97\ m^2$按比例分配橫梁所需承擔面板自重為$24.6kgf$。

橫梁扣件螺栓數為 2 個，單一螺栓承擔設計風拉力為$-157.2/2 = -78.6\ kgf$；單一螺栓承擔靜載重為$24.6/2 = 12.3\ kgf$。對螺栓造成最大組合拉力為$F_{ten} = 0.7D + 1.25W = 0.7 \times 12.3 + 1.25 \times (-78.6) = -89.6\ kgf$。

螺栓拉力檢核

螺栓直徑$D = 8\ mm = 0.315\ in$、每英吋之螺紋數$n = 25.4/1.25 = 20.32$，故螺栓有效斷面積$A_s = \frac{\pi}{4}\left(D - \frac{1.191}{n}\right)^2 = \frac{\pi}{4}\left(0.315 - \frac{1.191}{20.32}\right)^2 = 0.0516\ in^2$；允許拉應力$f_t = F_{tu}/1.2n_u = 72.5/2.34 = 30.98\ ksi$。螺栓容許拉力$F_t = A_s \times f_t = 0.0516\ in^2 \times 30.98\ ksi = 1.599\ kip = 725.3\ kgf$。

螺栓拉力$|F_{ten}| = 89.6\ kgf <$ 螺栓容許拉力$F_t = 725.3\ kgf$，檢核通過。

肆、縱梁接柱之扣件

縱梁連接柱時需分為兩步驟完成，先將特製鋁件固定於上方鋁擠型縱梁上如圖 4-28 所示，再將特製鋁件固定於鋁擠型柱上如圖 4-29 所示。

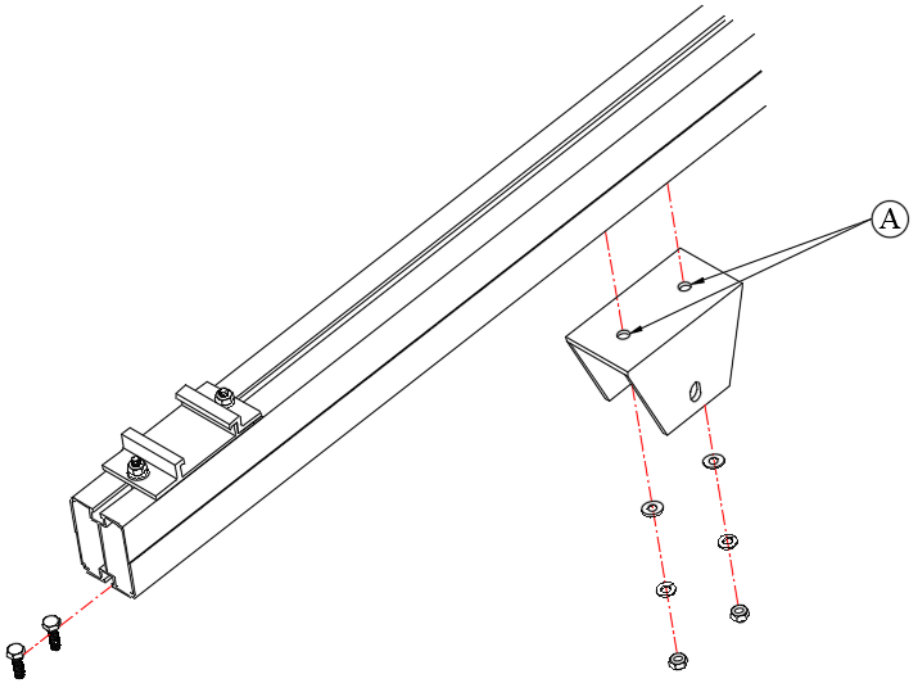


圖 4-28 地面踞置型系統之 A 處螺栓與縱梁連接示意圖

資料來源：修改自[16]

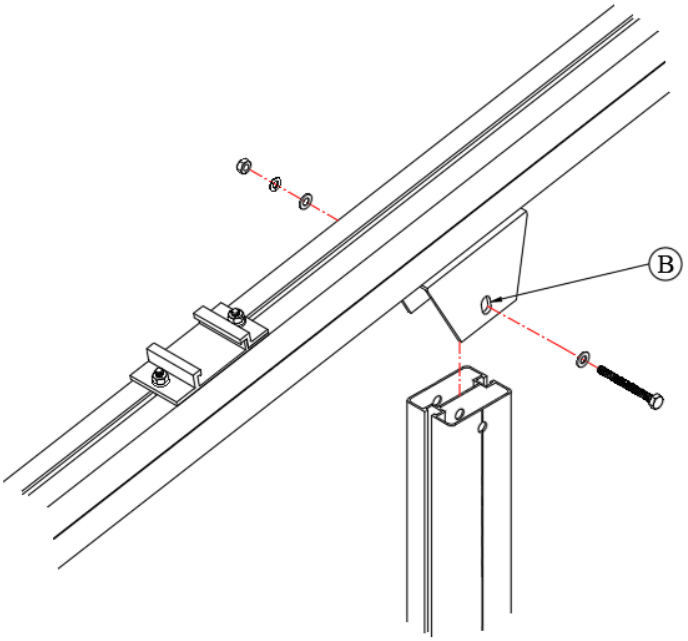


圖 4-29 地面踞置型系統之 B 處螺栓與柱連接示意圖
資料來源：修改自[16]

A 處螺栓拉力分析

風載重採用表 4-4 中縱梁接柱扣件 g 點下方柱頂之設計正負風力 $\pm 157.2\ kgf$，正號表示力量指向面板上表面，對此處扣件而言為壓力；負號表示力量遠離面板上表面，對此處扣件而言為拉力。靜載重包含橫梁、縱梁自重與面板自重，因鋁擠型自重相對較小，故只考慮面板自重，縱梁連接柱扣件承受面板面積為$1.97\ m^2$按比例分配橫梁所需承擔面板自重為$24.6kgf$。

A 處螺栓數為 2 個，單一螺栓承擔設計風拉力為$-157.2/2 = -78.6\ kgf$；單一螺栓承擔靜載重為$24.6/2 = 12.3\ kgf$，對 A 處螺栓造成之最大組合拉力為 $F_{ten} = 0.7D + 1.25W = 0.7 \times 12.3 + 1.25 \times (-78.6) = -89.6\ kgf$。

A 處螺栓拉力檢核

螺栓直徑$D = 8\ mm = 0.315\ in$、每英吋之螺紋數$n = 25.4/1.25 = 20.32$，故螺栓有效斷面積$A_s = \frac{\pi}{4}\left(D - \frac{1.191}{n}\right)^2 = \frac{\pi}{4}\left(0.315 - \frac{1.191}{20.32}\right)^2 = 0.0516\ in^2$；允許拉應力 $f_t = F_{tu}/1.2n_u = 72.5/2.34 = 30.98\ ksi$。螺栓容許拉力 $F_t = A_s \times f_t = 0.0516\ in^2 \times 30.98\ ksi = 1.599\ kip = 725.3\ kgf$。

A 處螺栓拉力$|F_{ten}| = 89.6\ kgf$ < 螺栓容許拉力$F_t = 725.3\ kgf$，檢核通過。

B 處螺栓剪力分析

風載重採用表 4-4 中縱梁接柱扣件 g 點下方柱頂之設計正負風力$\pm 157.2\ kgf$，正號表示力量指向面板上表面，負號表示力量遠離面板上表面，對此處扣件而言均為剪力。B 處螺栓所承受靜載重與 A 處螺栓相同為$24.6kgf$。

B 處螺栓數為 1 個，假設剪力有作用在螺紋上，單一螺栓承擔設計風剪力為$\pm 157.2\cos 10° = \pm 154.8\ kgf$；單一螺栓承擔靜載重為$24.6\ kgf$，對 B 處螺栓造成的最大組合剪力為$F_{shear} = 0.7D + 1.25W = 0.7 \times 24.6 + 1.25 \times 154.8 = 210.7\ kgf$。

B 處螺栓剪力檢核

螺栓直徑$D = 8\ mm = 0.315\ in$、每英吋之螺紋數$n = 25.4/1.25 = 20.32$，故螺栓有效斷面積$A_s = \frac{\pi}{4}\left(D - \frac{1.191}{n}\right)^2 = \frac{\pi}{4}\left(0.315 - \frac{1.191}{20.32}\right)^2 = 0.0516\ in^2$；允許剪應力$f_s = F_{su}/1.2n_u = 29/2.34 = 12.39\ ksi$。螺栓容許剪力$F_s = A_s \times f_s = 0.0516\ in^2 \times 12.39\ ksi = 0.639\ kip = 289.9\ kgf$。

B 處螺栓剪力$F_{shear} = 210.7\ kgf$ < 螺栓容許剪力$F_s = 289.9\ kgf$，檢核通過。

伍、柱接基座之扣件

將特製鋁件固定於柱及基座上如圖 4-30 所示。

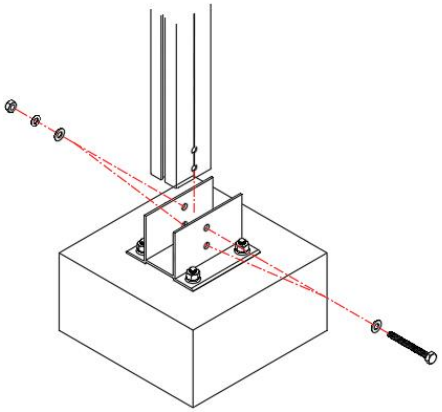


圖 4-30 地面踞置型系統之柱與基座連接示意圖

資料來源：修改自[16]

螺栓剪力分析

風載重採用表 4-4 中柱接基座扣件 g 點下方柱底之設計正負風力 $\pm 157.2\ kgf$，設計正負風力對此處螺栓而言均為剪力；靜載重包含橫梁、縱梁、柱自重與面板自重，因鋁擠型自重相對較小，故只考慮面板自重，橫梁受風面積為$1.97\ m^2$按比例分配橫梁所需承擔面板自重為$24.6kgf$。

柱接基座螺栓數為 2 個，假設剪力有作用在螺紋上，單一螺栓承擔設計風剪力為 $\pm 157.2\cos 10°/2 = \pm 77.4\ kgf$；單一螺栓承擔靜載重為 $24.6/2 = 12.3\ kgf$，對螺栓造成的最大組合剪力為$F_{shear} = 0.7D + 1.25W = 0.7 \times 12.3 + 1.25 \times 77.4 = 105.4\ kgf$。

螺栓剪力檢核

螺栓直徑$D = 8\ mm = 0.315\ in$、每英吋之螺紋數$n = 25.4/1.25 = 20.32$，故螺栓有效斷面積$A_s = \frac{\pi}{4}\left(D - \frac{1.191}{n}\right)^2 = \frac{\pi}{4}\left(0.315 - \frac{1.191}{20.32}\right)^2 = 0.0516\ in^2$；允許剪應力 $f_s = F_{su}/1.2n_u = 29/2.34 = 12.39\ ksi$。螺栓容許剪力 $F_s = A_s \times f_s = 0.0516\ in^2 \times 12.39\ ksi = 0.639\ kip = 289.9\ kgf$。

螺栓剪力$F_{shear} = 105.4\ kgf <$ 螺栓容許剪力$F_s = 289.9\ kgf$，檢核通過。

基座拉拔力分析

風載重採用表 4-4 中柱接基座扣件 g 點下方柱底之設計正負風力為 $\pm 157.2\ kgf$，正號表示力量指向面板上表面，對基座而言為壓力；負號表示力量遠離面板上表面，對基坐而言為拉力，基座承擔風拉力為$-157.2\cos 10° = -154.8\ kgf$，靜載重為面板自重為 $24.6\ kgf$。基座造成之最大拉拔力為$F_{ten} = 0.7D + 1.25W = 0.7 \times 24.6 + 1.25 \times (-154.8) = -176.3\ kgf$。

基座拉拔力檢核

1. 錨栓檢核

   混凝土基座之錨栓可依「建築物混凝土結構設計規範」(2023)進行檢核，確認錨栓及混凝土的強度是否足夠。

2. 原地面檢核

   檢核其力量傳遞至下方原有地面時承載力是否足夠，以及確保在拉拔力下不會造成原有地面的破壞。

第五章　平屋頂踞置型系統之耐風設計（示範例 3）

本章所稱平屋頂踞置型系統為安裝於屋頂，採陣列型式排列（如圖 2-3 所示）。耐風設計的主要目的是確保支撐架在強風環境下能夠維持結構完整性和安全性，而實務上在進行支撐架設計時，尚需考慮不同的載重組合情況，例如靜載重、風載重及地震力之效應，但本示範例只考慮靜載重及風載重之效應。

本示範例首先規劃一平屋頂踞置型系統，依據 CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022) 之 7.平屋頂踞置型結構系統決定其構件及扣件之設計風壓，再考慮風載重及靜載重之效應，做相關之結構設計。本示範例之設計流程圖如圖 5-1 所示。

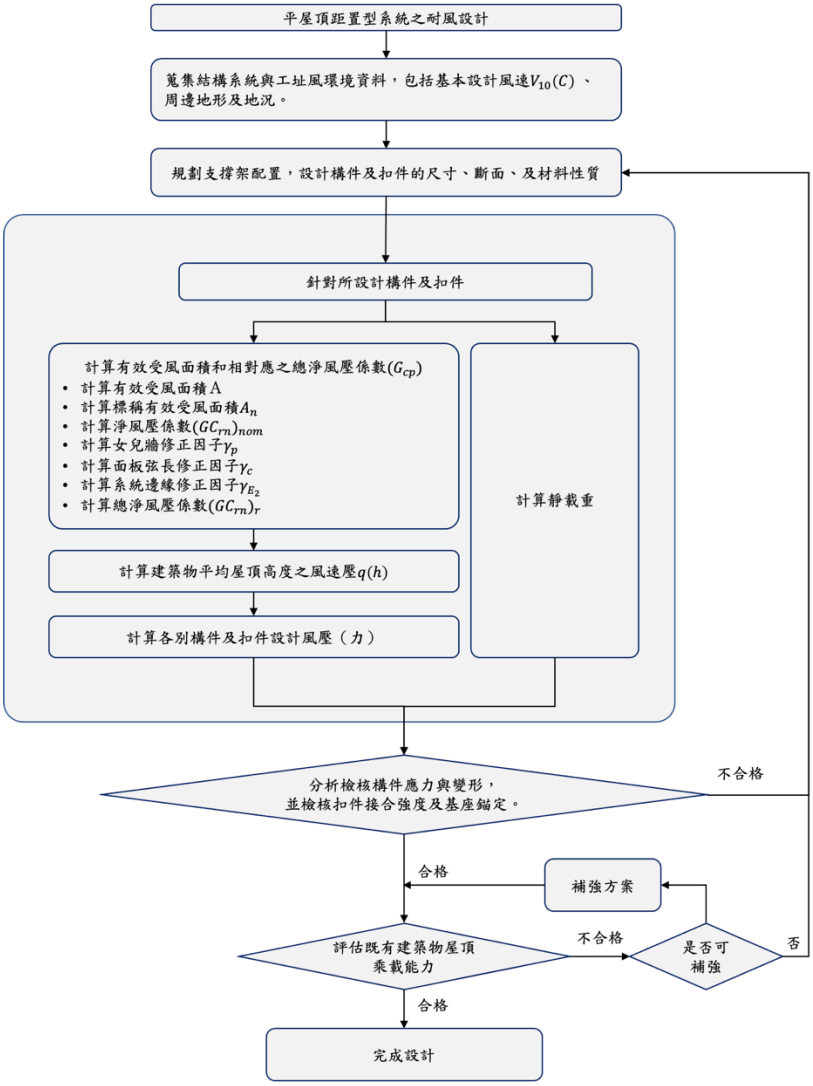


圖 5-1 平屋頂踞置型結構系統之耐風設計流程圖

第一節 設計依據

壹、參考依據

1. 內政部，「鋼結構容許應力設計法規範及解說」，2010。
2. 內政部，「建築物耐風設計規範與解說」，2014。
3. 經濟部，CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」之 7.平屋頂踞置型結構系統之設計風壓，2022。
4. The Aluminum Association，「Aluminum Design Manual」，2005。

貳、適用範圍

CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022) 之 7.平屋頂踞置型結構系統提供之風壓計算公式適用於同時滿足下列條件之平屋頂踞置型結構系統：

1. 建築物為「建築物耐風設計規範與解說」(2014) 所定義之封閉式或部分封閉式建築物，且建築物橫風向或扭轉向風力不顯著。
2. 面板弦長L_p(如圖 5-2 所示)小於或等於 2m。
3. 面板傾角 ω(如圖 5-2 所示)小於或等於 35 度，屋頂傾角 θ(如圖 5-2 所示)小於或等於 7 度。
4. 面板與屋頂面最小距離h_1(如圖 5-2 所示)小於或等於 0.6m，面板與屋頂面最大距離h_2(如圖 5-2 所示)小於或等於 1.2m。
5. 模組間隙大於或等於 6.4mm，模組長(或寬)小於或等於 2m。
6. 本標準提供之風壓計算公式不適用於面板設置在距離屋頂邊緣 1.2m 或$2(h_2 - h_{pt})$以內(擇其大者)，其中h_{pt}為女兒牆高度。

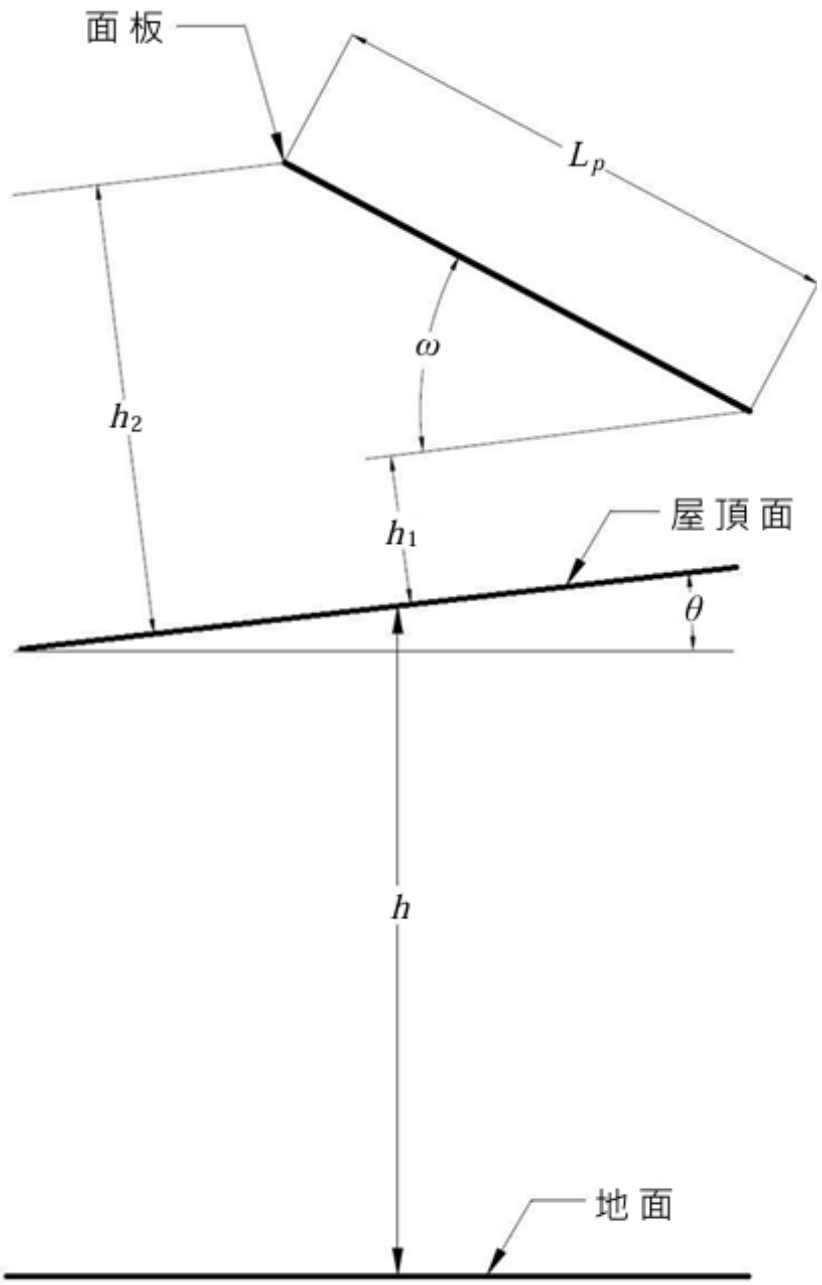


圖 5-2 平屋頂踞置型結構系統示意圖

資料來源：CNS 16189「 太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022)

第二節 結構物資料與工址風環境

本章擬於嘉義縣太保市新建一平屋頂踞置型太陽光電系統，整體場域之立體配置圖如圖 5-3 所示，共有 9 座支撐架結構系統；整體場域之平面配置圖如圖 5-4 所示，各結構系統與鄰近結構系統距離為 1.5m。

單一結構系統之立體配置圖、側視圖、側視示意圖、平行面板之平面圖及設計位置圖分別如圖 5-5、圖 5-6、圖 5-7、圖 5-8 及圖 5-9 所示。單一系統之面板由 6 片模組以 18 個扣件分別固定於 3 根橫梁上，每根橫梁以 3 個扣件固定於下方縱梁上，每根縱梁以 2 個扣件固定於下方 2 根柱子上，每根柱子固定於基座上。

理論上應根據各支撐架結構系統所承受的風壓情況，分別進行其設計，但由於設計程序類似，本範例僅分析設計圖 5-4 左上角的支撐架結構系統。針對圖 5-9所示之單一結構系統，分別設計其橫梁 a-b-c-d-e、縱梁 f-g-h-i、g點下方柱、h 點下方柱、面板接橫梁扣件(其形心為 k 點)、橫梁接縱梁扣件(其形心之面板投影為 c 點)、縱梁接柱扣件(位於 g 點下方柱頂)及柱接基座扣件(位於 g 點下方柱底)。

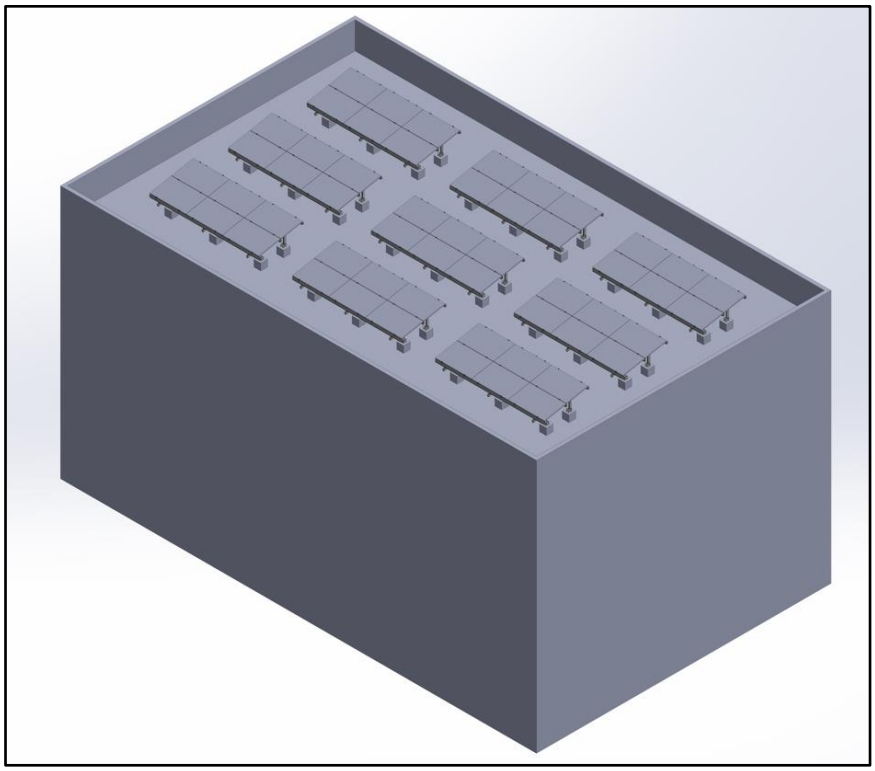


圖 5-3 整體場域平屋頂踞置型系統之平面配置圖

資料來源：[16]

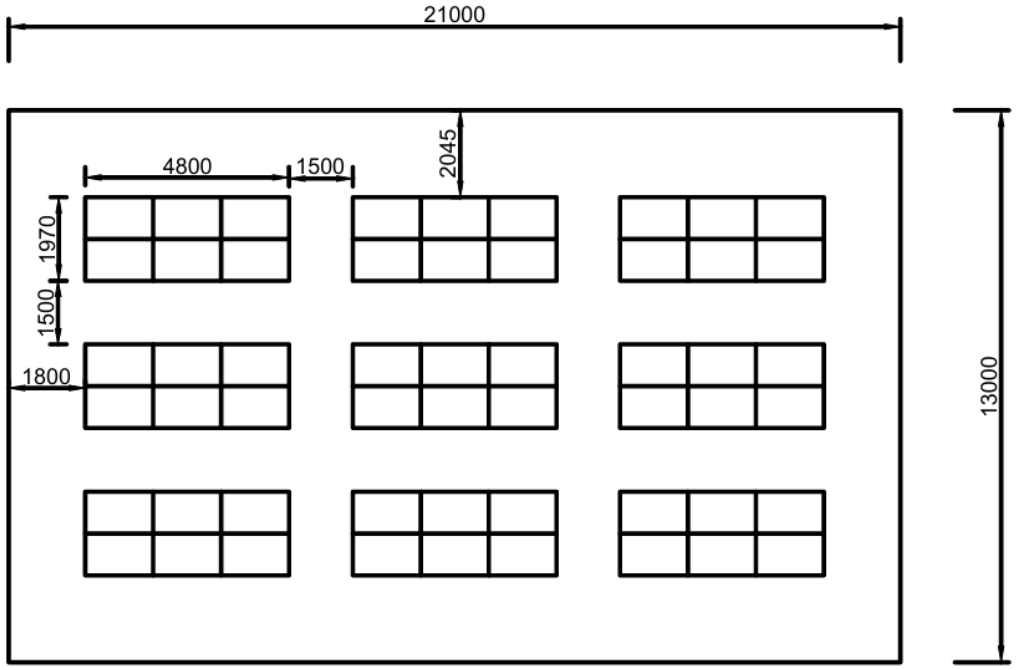


圖 5-4 整體場域平屋頂踞置型系統之平面配置圖(單位:mm)

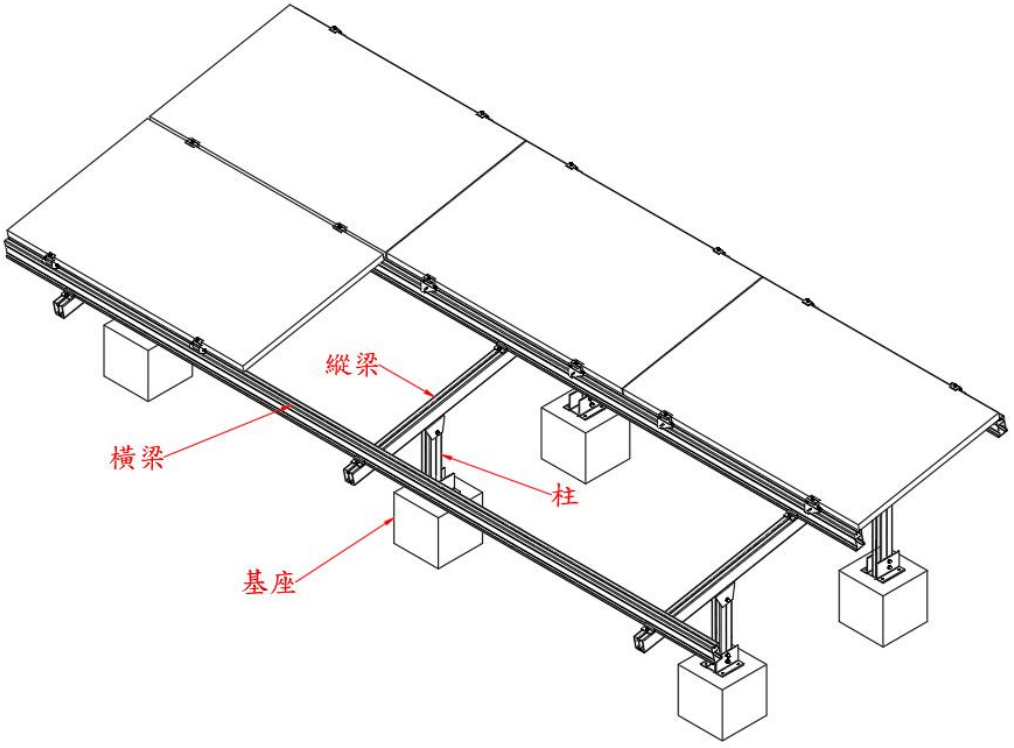


圖 5-5 單一平屋頂踞置型系統之立體配置圖

資料來源：修改自[16]

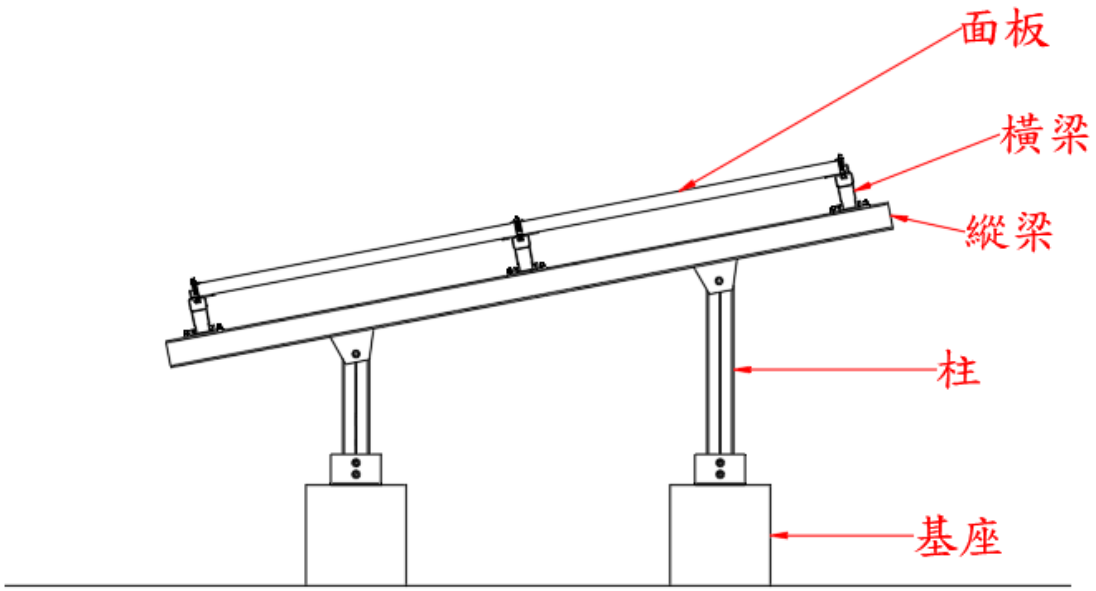


圖 5-6 單一平屋頂踞置型系統之側視圖

資料來源：修改自[16]

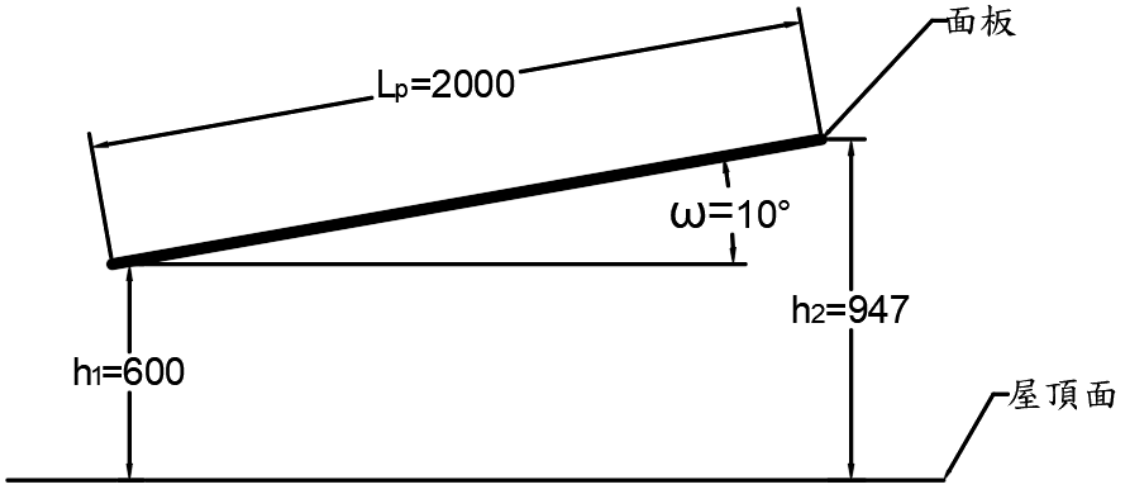


圖 5-7 單一平屋頂踞置型系統之側視示意圖(單位:mm)

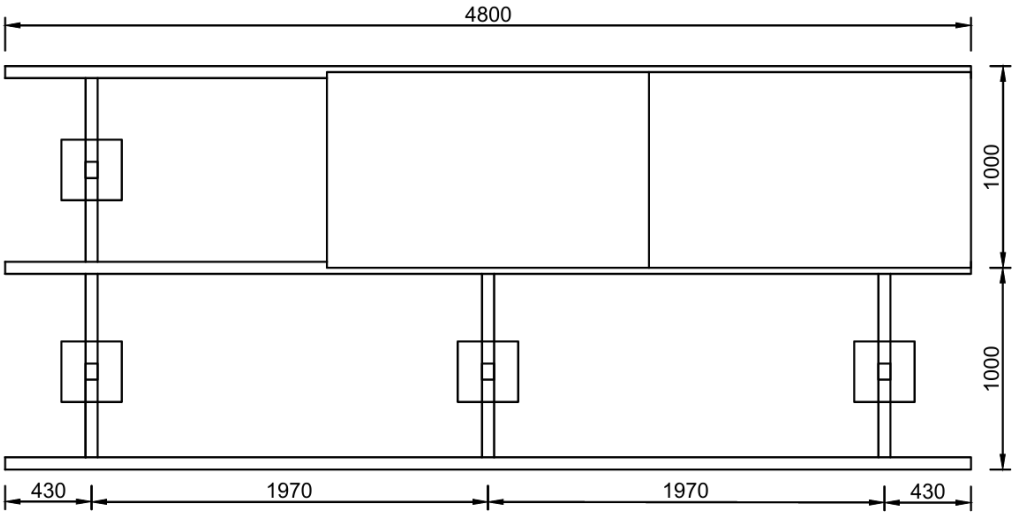


圖 5-8 單一平屋頂踞置型系統平行面板之平面圖(單位:mm)

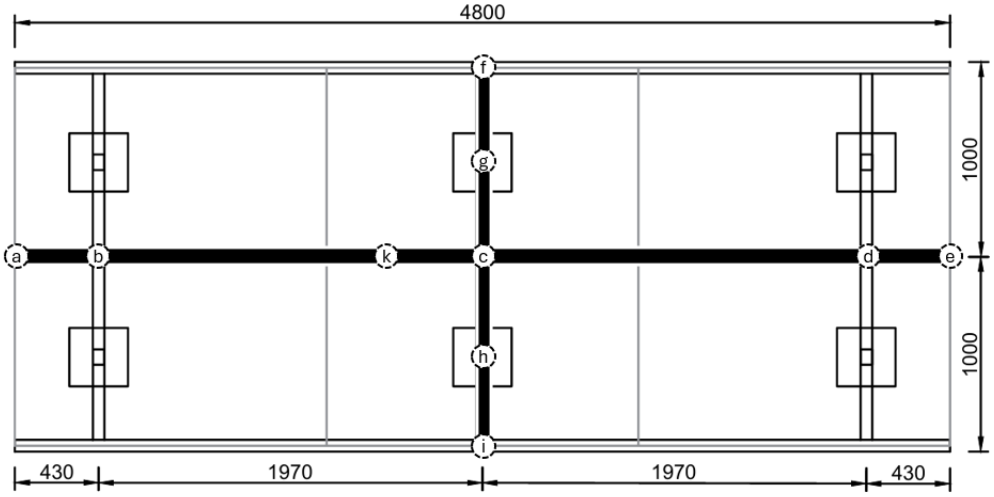


圖 5-9 單一平屋頂踞置型系統之設計位置圖(單位: mm)

結構物資料包含太陽光電系統尺寸、面板配置、用途係數 I；工址風環境包含基本設計風速$V_{10}(C)$、結構物周邊地形以及地況。本節擬定結構物資料與工址風環境如下表 5-1 所示。

表 5-1 平屋頂踞置型系統之結構物與工址風環境資料

結構物資料	太陽光電結構系統	面板由 6 片模組以 18 個扣件分別固定於 3 根橫梁上，每根橫梁以 3 個扣件固定於下方縱梁上，每根縱梁以 2 個扣件固定於下方 2 根柱子上，每根柱子固定於基座上。
	建築物尺寸	平面尺寸$21m \times 13m$；建築物平均屋頂高度$h = 8\,m$；女兒牆高度$h_{pt} = 1.2\,m$。
	面板設置	1. 面板弦長 $L_p = 2\,m$。 2. 面板傾角 $\omega = 10°$。 3. 屋頂傾角 $\theta = 0°$。 4. 面板與屋頂面最小距離 $h_1 = 0.6\,m$。 5. 面板與屋頂面最大距離 $h_2 = 0.947\,m$。 6. 模組長為$1.56\,m$、寬為$0.98\,m$。 7. 模組間隙為$20\,mm$。
	用途係數	根據「建築物耐風設計規範與解說」(2014) 規範 2.5 節，依照重要程度可將 I 值分為1.1、1.0或 0.9，本範例取 I = 1.0。
工址風環境	基本設計風速$V_{10}(C)$	根據「建築物耐風設計規範與解說」(2014) 規範 2.4 節，嘉義縣太保市的$V_{10}(C) = 32.5\ (m/s)$。
	地況種類	依結構物各方向上風處之地表粗糙度決定皆為地況 C。
	地形係數	無特殊地形。

第三節 各構件及扣件之設計風壓(力)

各構件及扣件之設計風壓(力)之計算步驟包括決定有效受風面積、計算總淨風壓係數及計算構件與扣件之設計風壓(力)，其細節如下：

壹、各構件有效受風面積及相對應之總淨風壓係數

根據「建築物耐風設計規範與解說」1.3 節對有效受風面積 A 之定義可知，結構構件之有效受風面積 A 為跨距長度與有效寬度之乘積，有效寬度不必小於其跨距長度的 1/3。對扣件而言，有效受風面積 A 不得大於單一扣件之受風面積。決定有效受風面積及計算總淨風壓係數方式如下：

[步驟 1]有效受風面積 A

(a) 橫梁 a-b-c-d-e：

如圖 5-10 所示，將風力傳遞至橫梁 a-b-c-d-e 上，且橫梁架設在間距為 1.97 m 的縱梁上，分別以 a-b 段、b-c 段、c-d 段及 d-e 段表示。

針對橫梁 a-b 段，其跨距長度為 0.43 m，其寬度為橫梁間距 1.00 m，故承受風壓面積為$0.43\,m \times 1.00\,m = 0.43\,m^2$。橫梁 a-b 段之有效寬度為$\max(0.43/3, 1.00) = 1.00\,m$，故其有效受風面積為$A = 0.43\,m \times 1.00\,m = 0.43\,m^2$。同理，橫梁 d-e 段之承受風壓面積為$0.43\,m^2$，有效受風面積亦為$0.43\,m^2$。

針對橫梁 b-c 段，其跨距長度為 1.97 m，其寬度為橫梁間距 1.00 m，故承受風壓面積為$1.97\,m \times 1.00\,m = 1.97\,m^2$。橫梁 b-c 段之有效寬度為$\max(1.97/3, 1.00) = 1.00\,m$，故其有效受風面積為$A = 1.97\,m \times 1.00\,m = 1.97\,m^2$。同理，橫梁 c-d 段之承受風壓面積為$1.97\,m^2$，有效受風面積亦為$1.97\,m^2$。

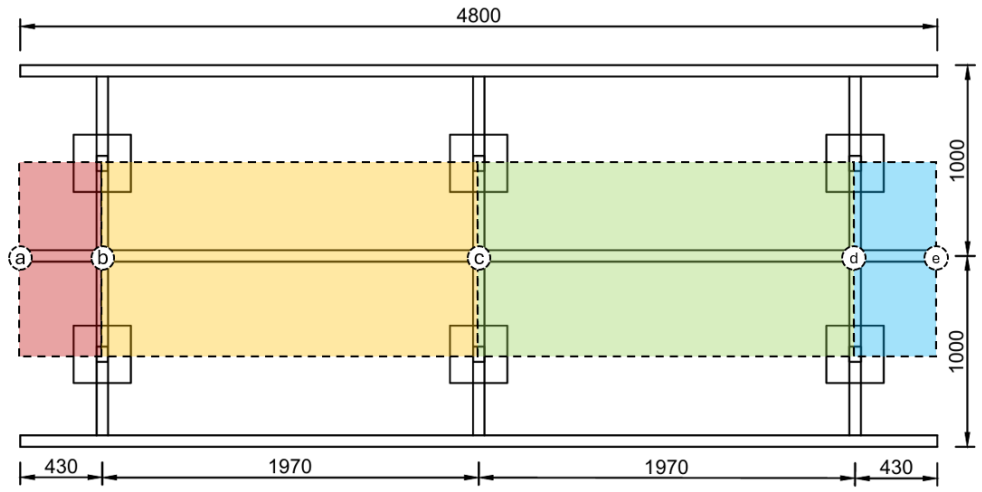


圖 5-10 示範例 3 之橫梁 a-b-c-d-e 有效受風面積示意圖(單位:mm)

(b) 縱梁 f-g-h-i：

如圖 5-11 所示，將風力傳遞至縱梁 f-g-h-i 上，且縱梁架設在間距為 1.00 m 的柱上，分別以 f-g 段、g-h 段及 h-i 段表示。

針對縱梁 f-g 段，其跨距長度為 0.50 m，其寬度為縱梁間距 1.97 m，故承受風壓面積為$0.50\,m \times 1.97\,m = 0.985\,m^2$。縱梁 f-g 段之有效寬度為$\max(0.50/3, 1.97) = 1.97\,m$，故其有效受風面積為$A = 0.50\,m \times 1.97\,m = 0.985\,m^2$。同理，縱梁 h-i 段之承受風壓面積為$0.985\,m^2$，有效受風面積亦為$0.985\,m^2$。

針對縱梁 g-h 段，其跨距長度為 1.00 m，其寬度為縱梁間距 1.97 m，故承受風壓面積為$1.00\,m \times 1.97\,m = 1.97\,m^2$。縱梁 g-h 段之有效寬度為$\max(1.00/3, 1.97) = 1.97\,m$，故其有效受風面積為$A = 1.00\,m \times 1.97\,m = 1.97\,m^2$。

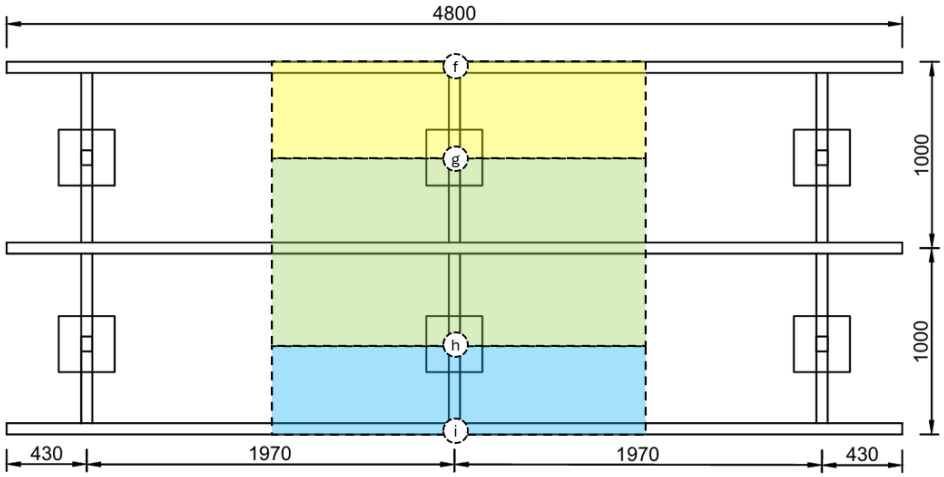


圖 5-11 示範例 3 之縱梁 f-g-h-i 有效受風面積示意圖(單位:mm)

(c) g 點下方柱：

如圖 5-12 所示，將風力傳遞至 g 點下方柱上，且柱架設在間距為 1.00 m 的基座上。

針對 g 點下方柱，其跨距長度為 1.00 m，其寬度為柱間距 1.97 m，故承受風壓面積為$1.00\,m \times 1.97\,m = 1.97\,m^2$。g 點下方柱之有效寬度為$\max(1.00/3, 1.97) = 1.97\,m$，故其有效受風面積為$A = 1.00\,m \times 1.97\,m = 1.97\,m^2$。同理，h 點下方柱之承受風壓面積為$1.97\,m^2$，有效受風面積亦為$1.97\,m^2$。

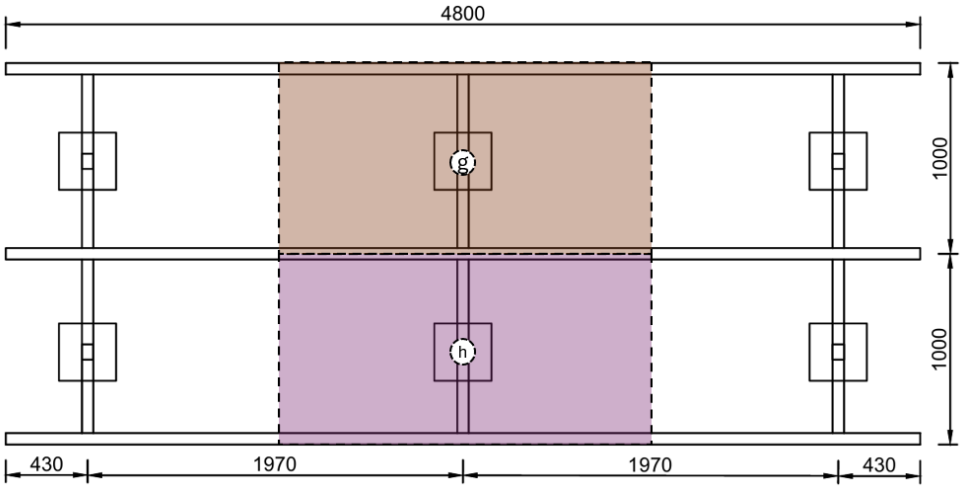


圖 5-12 示範例 3 之 g 點及 h 點有效受風面積示意圖(單位:mm)

(d) 面板接橫梁扣件(其形心為 k 點)：

如圖 5-13 所示，單一模組的尺寸為$1.56\,m \times 0.98\,m$。為方便計算，將模組間距計入有效受風面積，調整後的尺寸為$1.6\,m \times 1\,m$，並由四個扣件固定。因扣件之有效受風面積不得大於其承受風壓面積，故對 k 點之扣件取其有效受風面積為承受風壓面積$A = 0.8\,m \times 1\,m = 0.8\,m^2$。

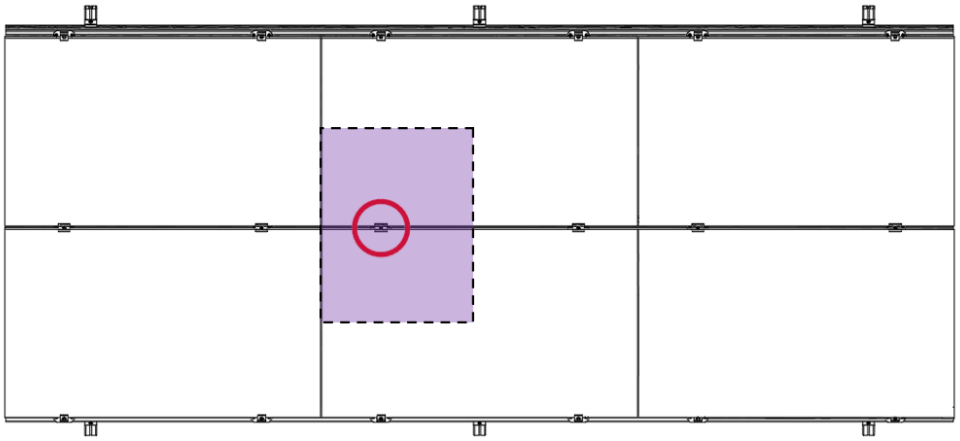


圖 5-13 示範例 3 之 k 點有效受風面積示意圖

資料來源：修改自[16]

(e) 橫梁接縱梁扣件(其形心之面板投影為 c 點)：

如圖 5-14 所示，將風力傳遞至橫梁上，且橫梁架設在縱梁 b、c、d 點的橫梁接縱梁扣件上。針對橫梁接縱梁扣件(其形心之面板投影為 c 點)，因扣件之有效受風面積不得大於其承受風壓面積，故其有效受風面積為承受風壓面積$A = 1.97\,m \times 1.00\,m = 1.97\,m^2$。

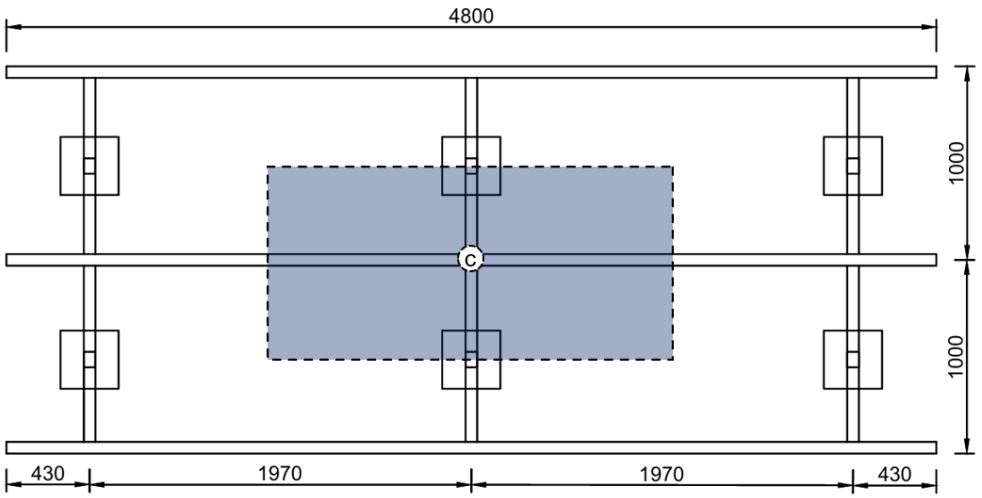


圖 5-14 示範例 3 之 c 點有效受風面積示意圖(單位:mm)

(f) 縱梁接柱扣件(位於 g 點下方柱頂)：

如圖 5-12 所示，縱梁架設在 g 點下方柱及 h 點下方柱。針對縱梁接柱扣件(位於 g 點下方柱頂)，因扣件之有效受風面積不得大於其承受風壓面積，故其有效受風面積為承受風壓面積$A = 1.00\,m \times 1.97\,m = 1.97\,m^2$。

(g) 柱接基座扣件(位於 g 點下方柱底)：

如圖 5-12 所示，柱架設在 g 點下方柱底基座。針對柱接基座扣件(位於 g 點下方柱底)，因扣件之有效受風面積不得大於其承受風壓面積，故其有效受風面積為承受風壓面積$A = 1.00\,m \times 1.97\,m = 1.97\,m^2$。

[步驟 2]標稱有效受風面積A_n

根據 CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022) 標稱有效受風面積A_n之計算，需先根據圖 5-15 判斷構件所在區域，其中W_L為建築物長邊尺寸；W_S為建築物短邊尺寸；h為建築物平均屋頂高度。接著由各構件及扣件之有效受風面積A算出其標稱有效受風面積A_n，其公式為$A_n = \frac{1000}{[max(4.6\,,L_b)]^2}A$，其中$L_b$為標準化建築物長度，其公式為$L_b = \min\left(0.4\sqrt{hW_L}, h, W_s\right)\ (m)$。

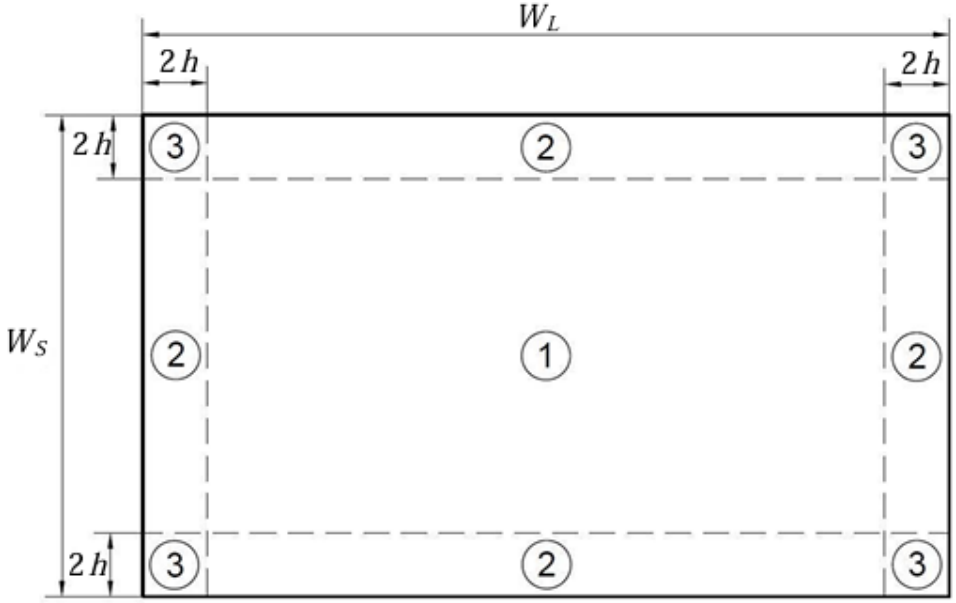


圖 5-15 平屋頂踞置型之屋頂分區圖

資料來源：CNS 16189「 太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022)

由於本示範例之建築物長邊尺寸W_L為$21\,m$，建築物短邊尺寸W_s為$13\,m$，建築物平均屋頂高度h為$8\,m$，故$L_b = \min\left(0.4\sqrt{\mathrm{h}W_L}, h, W_s\right) = \min(5.18\,m, 8\,m, 13\,m) = 5.18\,m$，且根據圖 5-15，本場域內所有支撐架構件均位於區域③。

針對橫梁 a-b 段及 d-e 段，其有效受風面積A為$0.43\,m^2$，故標稱有效受風面積$A_n = \frac{1000}{[max(4.6\,,5.18)]^2} \times 0.43 = 16.03$。

針對橫梁 b-c 段及 c-d 段，其有效受風面積A為$1.97\,m^2$，故標稱有效受風面積$A_n = \frac{1000}{[max(4.6\,,5.18)]^2} \times 1.97 = 73.43$。同理，縱梁 g-h 段、g 點下方柱、h 點下方柱、橫梁接縱梁扣件(其形心之面板投影為 c 點)、縱梁接柱扣件(位於 g 點下方柱頂)及柱接基座扣件(位於 g 點下方柱底)，其有效受風面積A均為$1.97\,m^2$，標稱有效受風面積A_n均為73.43。

針對縱梁 f-g 段及 h-i 段，其有效受風面積A為$0.985\,m^2$，標稱有效受風面積$A_n = \frac{1000}{[max(4.6\,,5.18)]^2} \times 0.985 = 36.71$。

針對面板接橫梁扣件(其形心為 k 點)，其有效受風面積A為$0.8\,m^2$，標稱有效受風面積$A_n = \frac{1000}{[max(4.6\,,5.18)]^2} \times 0.8 = 29.82$。

彙整所有構件及扣件的標稱有效受風面積A_n，將其列於表 5-4。

[步驟 3]對應於標稱有效受風面積A_n之淨風壓係數$(GC_{rn})_{nom}$

根據 CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022) 淨風壓係數$(GC_{rn})_{nom}$之計算，當$0^\circ \le \omega \le 5^\circ$時，利用表 5-2 計算得到$(GC_{rn})_{nom}$；當$15^\circ \le \omega \le 35^\circ$時，利用表 5-3 計算得到$(GC_{rn})_{nom}$；當$5^\circ < \omega < 15^\circ$時，可以使用內插計算得到$(GC_{rn})_{nom}$。

表 5-2 當 0°≤ ω ≤5°時，$(GC_{rn})_{nom}$之計算公式

屋頂分區	A_n	$(GC_{rn})_{nom}$之計算公式
①	$A_n \leq 46.45$	$-0.89\ logA_n + 3.12$
	$A_n > 46.45$	$-0.52\ logA_n + 2.14$
②	$A_n \leq 46.45$	$-1.20\ logA_n + 4.17$
	$A_n > 46.45$	$-0.62\ logA_n + 2.61$
③	$A_n \leq 46.45$	$-1.39\ logA_n + 4.79$
	$A_n > 46.45$	$-0.73\ logA_n + 3.01$

資料來源：CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022)

表 5-3 當 15°≤ ω ≤35° 時，$(GC_{rn})_{nom}$之計算公式

屋頂分區	A_n	$(GC_{rn})_{nom}$之計算公式
①	$A_n \leq 46.45$	$-1.11\ logA_n + 4.17$
	$A_n > 46.45$	$-0.54\ logA_n + 2.62$
②	$A_n \leq 46.45$	$-1.74\ logA_n + 6.04$
	$A_n > 46.45$	$-0.52\ logA_n + 2.75$
③	$A_n \leq 46.45$	$-2.08\ logA_n + 7.29$
	$A_n > 46.45$	$-0.62\ logA_n + 3.33$

資料來源：CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022)

針對橫梁 a-b 段，其標稱有效受風面積A_n為16.03。以$\omega = 5^\circ$計算淨風壓係數$(GC_{rn})_{nom} = -1.39\log A_n + 4.79 = 3.12$；以$\omega = 15^\circ$計算淨風壓係數$(GC_{rn})_{nom} = -2.08\log A_n + 7.29 = 4.78$；由線性內差方式求$\omega = 10^\circ$的淨風壓係數$(GC_{rn})_{nom} = (3.12 + 4.78)/2 = 3.95$。同理，橫梁 d-e 段，其標稱有效受風面積$A_n$為16.03，淨風壓係數$(GC_{rn})_{nom} = 3.95$。

針對橫梁 b-c 段，其標稱有效受風面積A_n為73.43。以$\omega = 5^\circ$計算淨風壓係數$(GC_{rn})_{nom} = -0.73\ \log A_n + 3.01 = 1.65$；以$\omega = 15^\circ$計算淨風壓係數$(GC_{rn})_{nom} = -0.62\log A_n + 3.33 = 2.17$；由線性內差方式求$\omega = 10^\circ$的淨風壓係數$(GC_{rn})_{nom} = (1.65 + 2.17)/2 = 1.91$。同理，橫梁 c-d 段、縱梁 g-h 段、g 點

下方柱、h 點下方柱、橫梁接縱梁扣件(其形心之面板投影為 c 點)、縱梁接柱扣件(位於 g 點下方柱頂)、柱接基座扣件(位於 g 點下方柱底)，其標稱有效受風面積A_n為73.43，淨風壓係數$(GC_{rn})_{nom} = 1.91$。

針對縱梁 f-g 段， 其標稱有效受風面積A_n為36.71。以$\omega = 5^\circ$計算淨風壓係數 $(GC_{rn})_{nom} = -1.39\log A_n + 4.79 = 2.61$ ； 以 $\omega = 15^\circ$ 計 算 淨 風 壓 係 數 $(GC_{rn})_{nom} = -2.08\log A_n + 7.29 = 4.04$；由線性內差方式求$\omega = 10^\circ$的淨風壓係數$(GC_{rn})_{nom} = (2.61 + 4.04)/2 = 3.33$。同理，縱梁 h-i 段，其標稱有效受風面積$A_n$為36.71，淨風壓係數$(GC_{rn})_{nom} = 3.33$。

針對面板接橫梁扣件(其形心為 k 點)， 其標稱有效受風面積A_n為29.82。以$\omega = 5^\circ$計算淨風壓係數$(GC_{rn})_{nom} = -1.39\log A_n + 4.79 = 2.74$；以$\omega = 15^\circ$計算淨風壓係數$(GC_{rn})_{nom} = -2.08\log A_n + 7.29 = 4.22$；由線性內差方式求$\omega = 10^\circ$的淨風壓係數$(GC_{rn})_{nom} = (2.74 + 4.22)/2 = 3.48$。

彙整所有構件及扣件的淨風壓係數$(GC_{rn})_{nom}$，將其列於表 5-4。

[步驟 4] 女兒牆修正因子γ_p

根據 CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022) 女兒牆修正因子γ_p之計算，女兒牆修正因子$\gamma_p = min\left(1.2\,,0.9 + \frac{h_{pt}}{h}\right) = \min\left(1.2,0.9 + \frac{1.2}{8}\right) = 1.05$。

[步驟 5]面板弦長修正因子γ_c

根據 CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022) 面板弦長修正因子γ_c之計算，面板弦長修正因子$\gamma_c = max\left(0.6 + 0.2L_p, 0.8\right) = max(0.6 + 0.2 \times 2\,, 0.8) = 1.0$。

[步驟 6]系統邊緣修正因子γ_{E_2}

根據 CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022) 系統邊緣修正因子γ_{E_2}之決定，若構件同時滿足下述條件，則結構系統之系統邊緣修正因子γ_{E_2}=1.5；在其他情況下，結構系統之系統邊緣修正因子γ_{E_2}=1.0。

(a) 構件所在結構系統之邊緣與鄰近屋頂邊緣之距離大於$0.5h$。

(b) 構件所在結構系統與鄰近結構系統之距離大於$4h_2$或 1.2m，擇其大者 (如圖 5-16 所示)，或構件所在面板與鄰近面板之距離大於$4h_2$或 1.2m，擇其大者 (如圖 5-17 所示)。

(c) 構件位於結構系統邊緣 $1.5L_p$範圍內，其中L_p為面板弦長。

(d) 構件承受負風壓時。

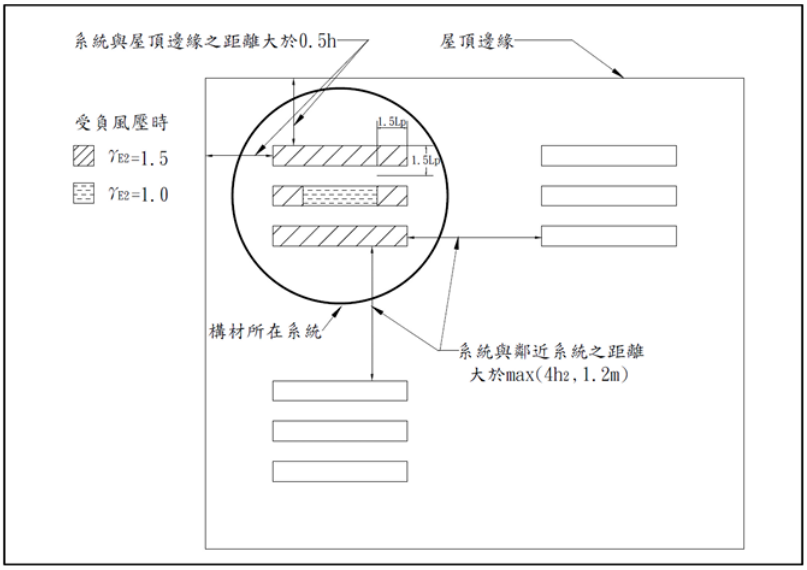


圖 5-16 構件所在結構系統與鄰近結構系統之距離大於max $(4h_2, 1.2m)$時可能產生γ_{E2}=1.5 之示意圖

資料來源：CNS 16189「 太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022)

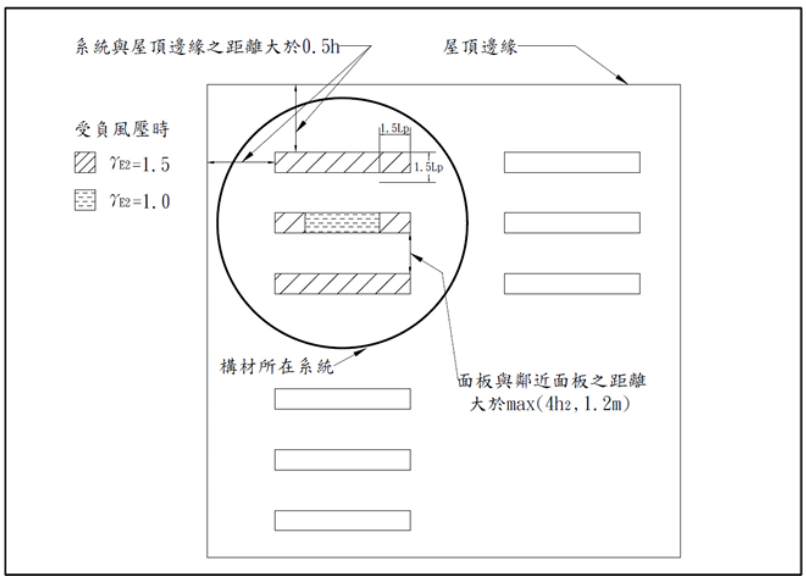


圖 5-17 構件所在面板與鄰近面板之距離大於max $(4h_2, 1.2m)$時可能產生 γ_{E2}=1.5 之示意圖

資料來源：CNS 16189「 太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022)

根據圖 5-4，本範例假設構件所在結構系統與鄰近結構系統之距離為 1.5 m，小於$\max(4h_2, 1.2m) = 3.8\,m$，不滿足上述條件之(b)，故其系統邊緣修正因子$\gamma_{E_2} = 1.0$。

[步驟 7]總淨風壓係數$(GC_{rn})_r$

根據 CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022) 總淨風壓係數$(GC_{rn})_r$之計算，總淨風壓係數$(GC_{rn})_r = (\mathrm{GC_{rn}})_{\mathrm{nom}} \times \gamma_{\mathrm{p}} \times \gamma_{\mathrm{c}} \times \gamma_{\mathrm{E_2}}$。

針對橫梁 a-b 段，其淨風壓係數$(\mathrm{GC_{rn}})_{\mathrm{nom}}$為3.95、女兒牆修正因子$\gamma_p$為1.05、面板弦長修正因子$\gamma_c$為1.0 及系統邊緣修正因子$\gamma_{E_2}$為1.0，故總淨風壓係數$(GC_{rn})_r = 3.95 \times 1.05 \times 1.0 \times 1.0 = 4.15$。同理，橫梁 d-e 段，其淨風壓係數$(\mathrm{GC_{rn}})_{\mathrm{nom}}$為3.95，總淨風壓係數$(GC_{rn})_r$為2.0。

針對橫梁 b-c 段，其淨風壓係數$(\mathrm{GC_{rn}})_{\mathrm{nom}}$為1.91、女兒牆修正因子$\gamma_p$為1.05、面板弦長修正因子$\gamma_c$為1.0 及系統邊緣修正因子$\gamma_{E_2}$為1.0，故總淨風壓係數$(GC_{rn})_r = 1.91 \times 1.05 \times 1.0 \times 1.0 = 2.01$。同理，橫梁 c-d 段、縱梁 g-h 段、g 點下方柱、h 點下方柱、橫梁接縱梁扣件(其形心之面板投影為 c 點)、縱梁接柱扣件(位於 g 點下方柱頂)、柱接基座扣件(位於 g 點下方柱底)，其淨風壓係數$(\mathrm{GC_{rn}})_{\mathrm{nom}}$為1.91，總淨風壓係數$(GC_{rn})_r$為2.01。

針對縱梁 f-g 段，其淨風壓係數$(\mathrm{GC_{rn}})_{\mathrm{nom}}$為3.33、女兒牆修正因子$\gamma_p$為1.05、面板弦長修正因子$\gamma_c$為1.0 及系統邊緣修正因子$\gamma_{E_2}$為1.0，故總淨風壓係數$(GC_{rn})_r = 3.33 \times 1.05 \times 1.0 \times 1.0 = 3.5$。 同理，縱梁 h-i 段，其淨風壓係數$(\mathrm{GC_{rn}})_{\mathrm{nom}}$為3.33，總淨風壓係數$(GC_{rn})_r$為3.5。

針對面板接橫梁扣件(其形心為 k 點)，其淨風壓係數$(\mathrm{GC_{rn}})_{\mathrm{nom}}$為3.48、女兒牆修正因子$\gamma_p$為1.05、面板弦長修正因子$\gamma_c$為1.0 及系統邊緣修正因子$\gamma_{E_2}$為1.0，故總淨風壓係數$(GC_{rn})_r = 3.48 \times 1.05 \times 1.0 \times 1.0 = 3.65$。

彙整所有構件及扣件的總淨風壓係數$(GC_{rn})_r$，將其列於表 5-4。

貳、構件與扣件之設計風壓（力）

[步驟 1]相關之設計參數

根據「建築物耐風設計規範與解說」(2014) 表 2.2，地況 C 之相關參數$\alpha = 0.15$；$z_g = 300\,m$，用途係數$I = 1.0$，基本設計風速$V_{10}(C) = 32.5\,m/s$。

[步驟 2]風速壓地況係數 $K(h)$ 及地形係數 K_{zt}

根據「建築物耐風設計規範與解說」(2014) 規範式(2.7)，計算$K(z)$。因建築物平均屋頂高度$h = 8\,m$，取規範$z > 5\,m$的公式計算：

$K(h) = 2.774\left(\frac{h}{z_g}\right)^{2\alpha} = 2.774\left(\frac{8}{300}\right)^{2\times 0.15} = 0.935$。

根據「建築物耐風設計規範與解說」(2014) 規範式(2.8)，計算K_{zt}。因工址附近無特殊地形，$K_{zt} = 1.0$。

[步驟 3]離地面 h 公尺高處之風速壓

根據「建築物耐風設計規範與解說」(2014) 規範式(2.6)，離地面 h 公尺高處之風速壓$q(h) = 0.06 \times K(h) \times K_{zt} \times [IV_{10}(C)]^2 = 0.06 \times 0.935 \times 1.0 \times [1.0 \times 32.5]^2 = 59.26\,kgf/m^2$。

[步驟 4]各構件及扣件之設計風壓

根據 CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022) 平屋頂踞置型系統之設計正負風壓P之計算，設計正負風壓$P = \pm q(h) \times (GC_{rn})_r$，正號表示淨風壓指向面板上表面；負號表示淨風壓遠離面板上表面。

針對橫梁 a-b 段，其建築物平均高處之風速壓$q(h) = 59.26\,kgf/m^2$，總淨風壓係數$(GC_{rn})_r = 4.15$，設計正負風壓$P = \pm q(h) \times (GC_{rn})_r = \pm 59.26 \times 4.15 = \pm 245.9\,kgf/m^2$。同理，橫梁 d-e 段，其設計正負風壓$P = \pm 245.9\,kgf/m^2$。

針對橫梁 b-c 段，其建築物平均高處之風速壓$q(h) = 59.26\,kgf/m^2$，總淨風壓係數$(GC_{rn})_r = 2.01$，設計正負風壓$P = \pm q(h) \times (GC_{rn})_r = \pm 59.26 \times 2.01 = \pm 119.1\,kgf/m^2$。同理，橫梁 c-d 段、縱梁 g-h 段、g 點下方柱、h 點下方柱、橫梁接縱梁扣件(其形心之面板投影為 c 點)、縱梁接柱扣件(位於 g 點下方柱頂)、柱接基座扣件(位於 g 點下方柱底)，設計正負風壓$P = \pm 119.1\,kgf/m^2$。

針對縱梁 f-g 段，其建築物平均高處之風速壓$q(h) = 59.26\ kgf/m^2$，總淨風壓係數$(GC_{rn})_r = 3.5$，設計正負風壓$P = \pm\ q(h) \times (GC_{rn})_r = \pm 59.26 \times 3.5 = \pm 207.4\ kgf/m^2$。同理，縱梁 h-i 段，其設計正負風壓$P = \pm 207.4\ kgf/m^2$。

針對面板接橫梁扣件(其形心為 k 點)，其建築物平均高處之風速壓$q(h) = 59.26\ kgf/m^2$，總淨風壓係數$(GC_{rn})_r = 3.65$，設計正負風壓$P = \pm\ q(h) \times (GC_{rn})_r = \pm 59.26 \times 3.65 = \pm 216.3\ kgf/m^2$。

彙整所有構件及扣件的設計正負風壓 P，將其列於表 5-4。

[步驟 5]各扣件之設計風力

設計正負風力為設計正負風壓與承受風壓面積A_{actual}之乘積。

針對橫梁接縱梁扣件(其形心之面板投影為 c 點)，設計正負風壓 P 為$\pm 119.1\ kgf/m^2$，承受風壓面積 A_{actual} 為 $1.97\ m^2$，設計正負風力 $F = \pm 119.1\ kgf/m^2 \times 1.97\ m^2 = 234.6\ kgf$。同理，縱梁接柱扣件(位於 g 點下方柱頂)、柱接基座扣件(位於 g 點下方柱底)，其設計正負風壓 P 為$\pm 119.1\ kgf/m^2$，承受風壓面積A_{actual}為$1.97\ m^2$，設計正負風力F為$234.6\ kgf$。

針對面板接橫梁扣件(其形心為 k 點)，設計正負風壓 P 為$\pm 216.3\ kgf/m^2$，承受風壓面積A_{actual}為$0.8\ m^2$，設計正負風力$F = \pm 216.3\ kgf/m^2 \times 0.8\ m^2 = 173\ kgf$。

彙整所有扣件的設計正負風力 F，將其列於表 5-4。

表 5-4 示範例 3 之構件及扣件之相關參數

名稱		實際受風面積 (m^2)	有效受風面積 $A(m^2)$	標稱有效受風面積 A_n	淨風壓係數 $(GC_{rn})_{nom}$	總淨風壓係數 $(GC_{rn})_r$	設計正負風壓 (kgf/m^2)	設計正負風力 (kgf)
橫梁	a-b 段或 d-e 段	0.43	0.43	16.03	3.95	±4.15	±245.9	
	b-c 段或 c-d 段	1.97	1.97	73.43	1.91	±2.01	±119.1	
縱梁	f-g 段或 h-i 段	0.985	0.985	36.71	3.33	±3.50	±207.4	
	g-h 段	1.97	1.97	73.43	1.91	±2.01	±119.1	
柱	g 點下方柱或 h 點下方柱	1.97	1.97	73.43	1.91	±2.01	±119.1	
面板接橫梁之扣件	k 點	0.8	0.8	29.82	3.48	±3.65	±216.3	±173.0
	螺栓 1 個(軸力)							±173.0
橫梁接縱梁之扣件	c 點	1.97	1.97	73.43	1.91	±2.01	±119.1	±234.6
	螺栓 2 個(軸力)							±117.3
縱梁接柱之扣件	g 點下方柱頂	1.97	1.97	73.43	1.91	±2.01	±119.1	±234.6
	A 處螺栓 2 個(軸力)							±117.3
	B 處螺栓 1 個(剪力)							±231.0
柱接基座之扣件	g 點下方柱底	1.97	1.97	73.43	1.91	±2.01	±119.1	±234.6
	螺栓 2 個(剪力)							±115.5

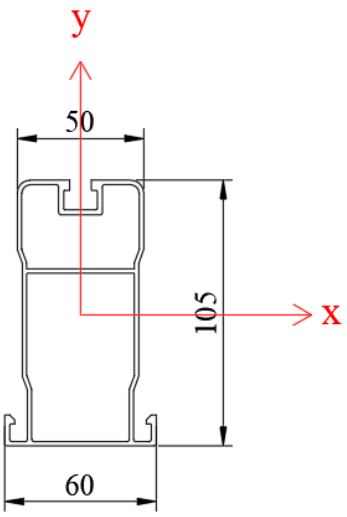
第四節 構件之耐風分析及檢核

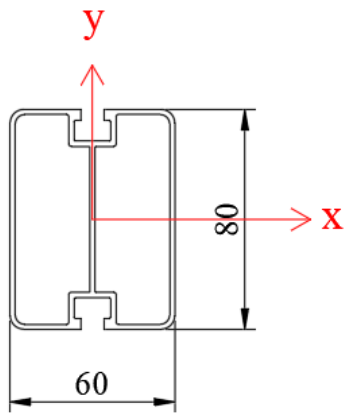
橫梁、縱梁及柱使用特製之鋁擠型構件，其材質為 6063-T5 鋁合金，設計時所用之彈性模數E為$7100\ \mathrm{kgf}/mm^2$，剪力彈性模數為G為$2700\ \mathrm{kgf}/mm^2$，波森比μ為0.3，降伏強度F_y為$110\ MPa$，極限強度F_u為$150\ MPa$。假設採用之橫梁、縱梁及柱的形狀與斷面性質如表 5-5 所示。

因國內目前尚無鋁結構之相關規範，根據臺中市結構工程技師公會在 108 年編寫「太陽光電系統支撐架結構設計參考手冊草案(修訂版)」之 4.2 構件接合設計內容所述，構件檢核可參考美國鋁結構規範 Aluminum Design Manual，載重組合則參考「鋼結構容許應力設計法規範及解說」之規定。

依「鋼結構容許應力設計法規範及解說」之規定，載重組合有$D+L$、$D+0.75(L\pm1.25W)$、$D+0.75(L\pm0.8E)$、$0.7D\pm1.25W$及$0.7D\pm0.8E$。其中，D為靜載重，包括構件自重及永久附加物重量；L為活載重，包含人員重量；E為設計地震力；W為設計風力。本示範例設計時僅考慮風載重及靜載重造成之影響，故載重組合有$D\pm0.9375\,W$、$0.7D\pm1.25W$這四種。

表 5-5 示範例 3 構件之斷面性質與斷面形狀

<table>
<tr><td colspan="2">橫梁</td></tr>
<tr><td>斷面性質</td><td>斷面形狀(單位:mm)</td></tr>
<tr><td>斷面模數 $S_x = 19919.81\ mm^3$
斷面模數 $S_y = 9215.94\ mm^3$
慣性矩 $I_x = 1045789.95\ mm^4$
慣性矩 $I_y = 276478.21\ mm^4$
斷面積 $A = 729.02\ mm^2$</td><td> 

y 軸垂直面板</td></tr>
<tr><td colspan="2">縱梁及柱</td></tr>
<tr><td>斷面性質</td><td>斷面形狀(單位:mm)</td></tr>
<tr><td>斷面模數 $S_x = 14741.15\ mm^3$
斷面模數 $S_y = 9679.11\ mm^3$
慣性矩 $I_x = 589646.16\ mm^4$
慣性矩 $I_y = 290373.29\ mm^4$
斷面積 $A = 710.52\ mm^2$</td><td> 

縱梁 y 軸垂直面板
柱 z 軸垂直地面</td></tr>
</table>

資料來源：修改自[16]

壹、橫梁

針對橫梁 a-b-c-d-e 進行結構分析如圖 5-18 所示，將橫梁與下方縱梁連接處 b 點、c 點及 d 點的扣件視為鉸支承（Hinge）分析。

風載重採用表 5-4 中橫梁 a-b-c-d-e 的設計正負風壓。橫梁 a-b 段及 d-e 段設計風壓為$\pm 245.9\ kgf/m^2$，橫梁 b-c 段及 c-d 段設計風壓為$\pm 119.1\ kgf/m^2$，分別乘上縱梁跨距 1m 後可得橫梁 a-b 段及 d-e 段的線載重為$q_w = \pm 245.9\ kgf/m$，橫梁 b-c 段及 c-d 段的線載重為$q_w = \pm 119.1\ kgf/m$。

靜載重包含橫梁自重與模組自重，因鋁擠型自重相對較小，故只考慮模組自重。模組自重為每塊 20 kgf，橫梁 a-b-c-d-e 需承受之模組重為 3 塊，故橫梁 a-b-c-d-e 所承受之線載重 $q_D = (20\ kgf \times 3\ 塊)/4.8\ m = 12.5\ kgf/m$。

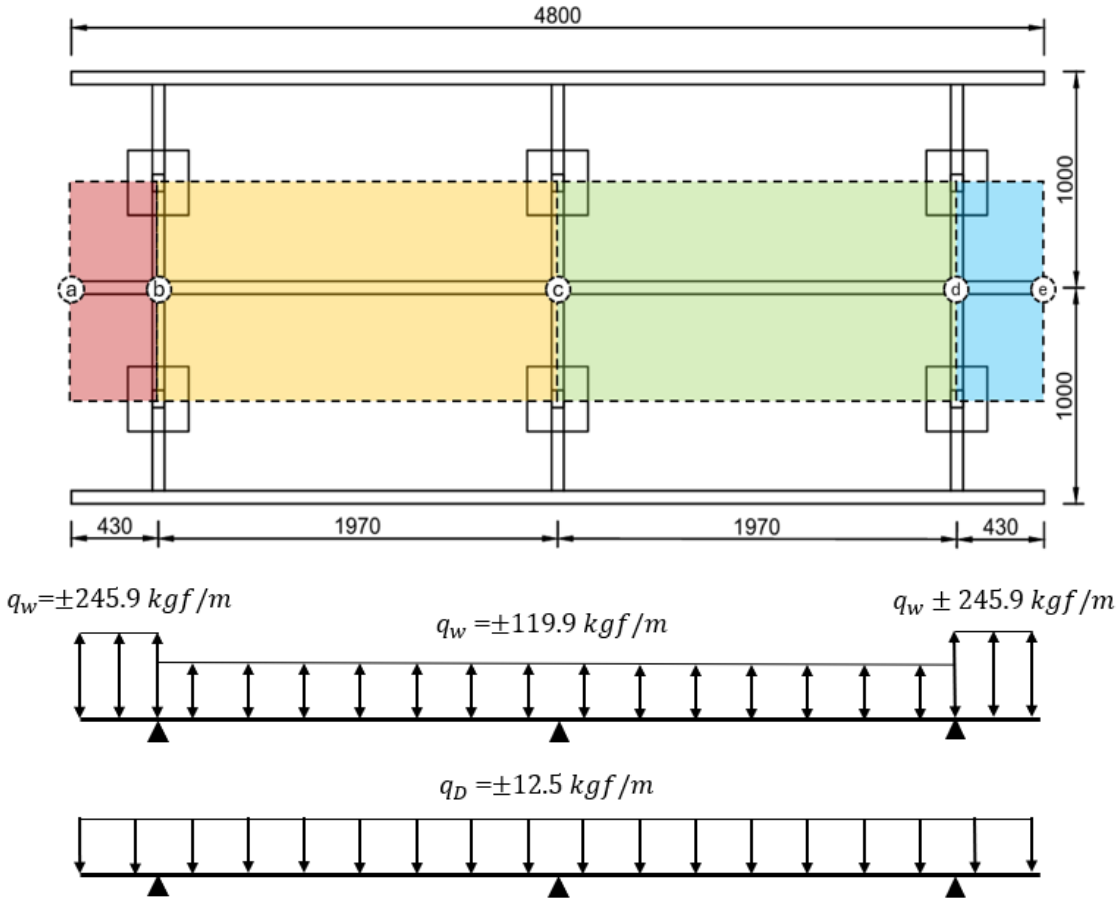


圖 5-18 示範例 3 之橫梁 a-b-c-d-e 受力作用圖

分析時利用 SAP 2000 軟體建模，將橫梁的斷面與材料性質輸入並且施加風載重及靜載重，即可分析出橫梁 a-b-c-d-e 的剪力、彎矩及變形量 ，當載重組合為$0.7D + 1.25W$時可得出橫梁 a-b-c-d-e 中最大剪力及最大彎矩，分別為$V_{max} = 210.5\ kgf$及$M_{max} = 101.3\ kgf - m$；當載重組合為$1.0D + 1.0W$時可得出最大變形量$\delta_{max} = 3.05\ mm$。

應力檢核

利用 SAP 2000 分析軟體，選 AA-ASD(2000)進行檢核，得橫梁 a-b-c-d-e 應力比為$0.41 \leq 1$，確認構件符合規範。

變形檢核

為避免在強風持續作用下產生振動破壞，設計時應盡量減少構件在風力作用下之變位，同時檢核確認構件變位量不超過容許值，以容許變形量δ_a = 跨距/175 (業界常用公式)，進行檢核。

$$\delta_{max} = 3.05\,mm \leq \delta_a = \frac{1970}{175} = 11.26\,mm$$，檢核通過。

貳、縱梁

針對縱梁 f-g-h-i 進行結構分析如圖 5-19 所示，將縱梁與下方柱連接處 g 點及 h 點的扣件視為鉸支承（Hinge）分析。

風載重採用表 5-4 中縱梁 f-g-h-i 的設計正負風壓。縱梁 f-g 段及 h-i 段設計風壓為$\pm 207.4\,kgf/m^2$；縱梁 g-h 段設計風壓為$\pm 119.1\,kgf/m^2$，分別乘上跨距 1.97 m 可得縱梁 f-g 段及 h-i 段的線載重為$q_w = \pm 408.6\,kgf/m$；縱梁 g-h 段的線載重為$q_w = \pm 234.6\,kgf/m$。

靜載重由上方橫梁接縱梁扣件 f 點、c 點及 i 點傳入縱梁，靜載重包含橫梁、縱梁自重與模組自重，因鋁擠型自重相對較小，故只考慮模組自重。模組自重為每塊 20 kgf，縱梁 f-g-h-i 所承受之模組重為 2 塊，故縱梁 f-g-h-i 所承受之點載重 $Q_D = (20\,kgf \times 2\ 塊)/3 = 13.3\,kgf$。

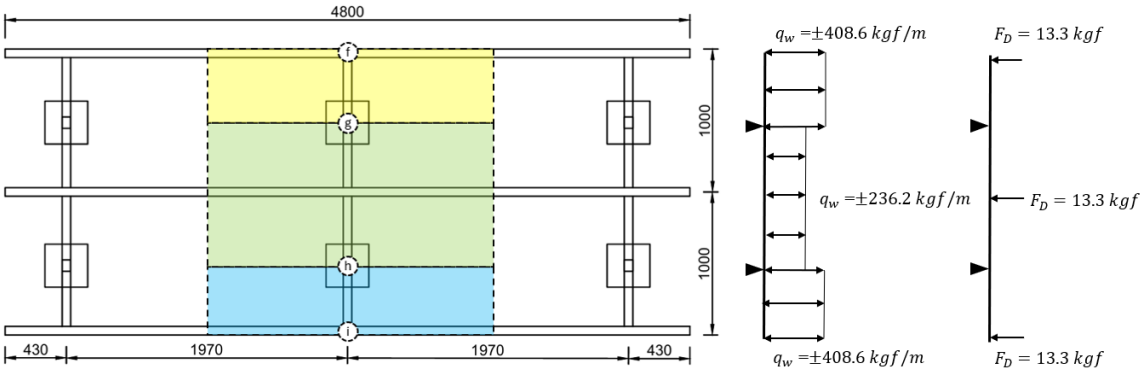


圖 5- 19 示範例 3 之縱梁 f-g-h-i 受力作用圖

分析時利用 SAP 2000 軟體建模，將縱梁的斷面與材料性質輸入並且施加風載重及靜載重，即可分析出縱梁 f-g-h-i 的剪力、彎矩及變形量，當載重組合為$0.7D + 1.25W$時可得出縱梁 f-g-h-i 中最大剪力及最大彎矩，分別為$V_{max} = 70.8\ kgf$及$M_{max} = 23.4\ kgf - m$；當載重組合為$1.0D + 1.0W$時可得出最大變形量$\delta_{max} = 2.1\ mm$。

<u>應力檢核</u>

利用 SAP 2000 分析軟體，選 AA-ASD(2000)進行檢核，得縱梁 f-g-h-i 應力比為$0.34 \leq 1$，確認構件符合規範。

<u>變形檢核</u>

為避免在強風持續作用下產生振動破壞，設計時應盡量減少構件在風力作用下之變位，同時檢核確認構件變位量不超過容許值，以容許變形量$\delta_a =$跨距/175 (業界常用公式)，進行檢核。

$$\delta_{max} = 2.1\ mm \leq \delta_a = \frac{1000}{175} = 5.7\ mm$$，檢核通過。

參、柱

針對 g 點下方柱及 h 點下方柱進行結構分析如圖 5-20 及圖 5-21 所示，將柱與下方基座連接處 g 點下方柱底及 h 點下方柱底的扣件視為鉸支承（Hinge）分析。

風載重採用表 5-4 中 g 點下方柱的設計正負風壓。g 點下方柱及 h 點下方柱的設計風壓為$\pm 119.1\ kgf/m^2$，分別乘上寬度 1.97 m，可得 g 點下方柱及 h 點下方柱的線載重為$q_w = \pm 234.6\ kgf/m$。

靜載重由上方縱梁接柱扣件 g 點下方柱頂及 h 點下方柱頂扣件傳入柱，靜載重包含橫梁、縱梁、柱自重及模組自重，因鋁擠型自重相對較小，故只考慮模組自重。模組自重為每塊$20\ kgf$，g 點下方柱所承受之模組重為 1 塊，故 g 點下方柱所承受之點載重$F_D = 20\ kgf$。同理，h 點下方柱所承受之模組重為 1 塊，h 點下方柱所承受之點載重$F_D = 20\ kgf$。

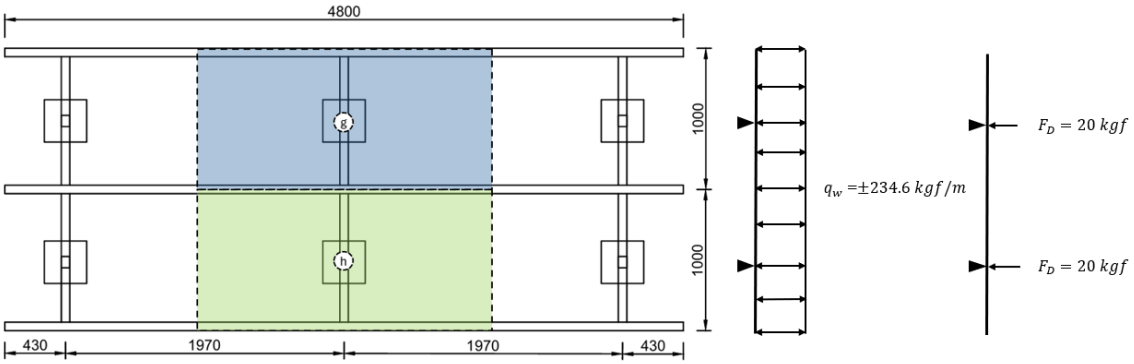


圖 5-20 示範例 3 之柱受力作用圖 1

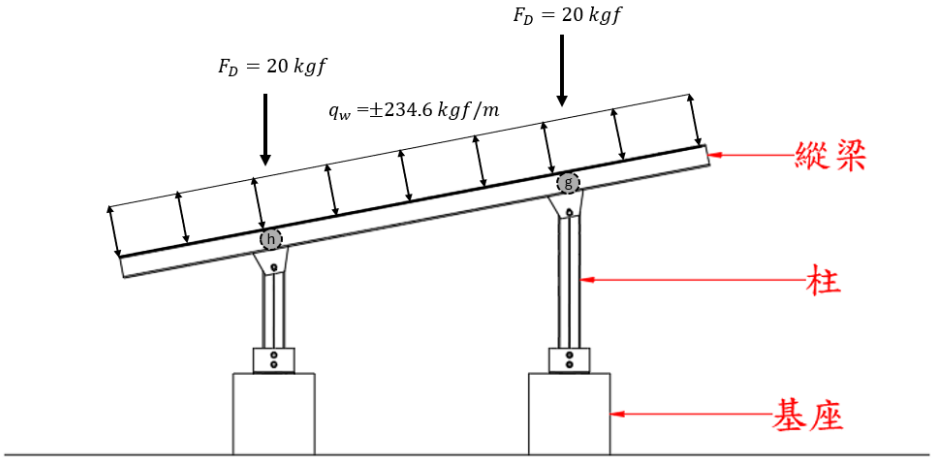


圖 5-21 示範例 3 之柱受力作用圖 2

資料來源：修改自[16]

分析時利用 SAP 2000 軟體建模，將柱的斷面與材料性質輸入並且施加風載重及靜載重，即可分析出 g 點下方柱的剪力及彎矩，當載重組合為$0.7D + 1.25W$時，可得出 g 點下方柱中最大剪力及最大彎矩，分別為$V_{max} = 48.7\ kgf$及$M_{max} = 46.2\ kgf - m$。同理，當載重組合為$0.7D + 1.25W$時，得出 h 點下方柱中最大剪力及最大彎矩，分別為$V_{max} = 78.5\ kgf$、$M_{max} = 51.3\ kgf - m$。

應力檢核

利用 SAP 2000 分析軟體，選 AA-ASD 2000 進行檢核，得 g 點下方柱應力比為 0.34 ；h 點下方柱應力比為 0.35，應力比皆小於 1，確認構件符合規範。

變形檢核

為避免在強風持續作用下產生振動破壞，設計時應盡量減少構件在風力作用下之變位，同時檢核確認構件變位量不超過容許值。

第五節 扣件之耐風分析及檢核

扣件接合設計時，螺栓可能的破壞模式有拉力破壞、剪力破壞及承壓破壞，接合母材可能的破壞模式有總斷面積破壞、淨斷面積破壞及塊狀剪力撕裂，實務上需針對上述破壞模式作檢核，以確保安全性。本手冊僅示範螺栓拉力破壞及剪力破壞之檢核。

所檢核扣件包括面板接橫梁之扣件、橫梁接縱梁之扣件、縱梁接柱之扣件與柱接基座之扣件。各扣件均採用 M10 螺栓鎖固，其螺距為 1.25mm。螺栓採用 SUS 304 (A2-50)不鏽鋼，其極限抗拉強度為$F_{tu} = 500\ MPa = 72.5\ ksi$、極限抗剪強度為 $F_{su} = 200\ MPa = 29\ ksi$，接合母材為 6061-T6 鋁合金。載重組合參考「鋼結構容許應力設計法規範及解說」(2010) 之規定，考慮 $D \pm 0.9375\ W$、$0.7D \pm 1.25W$這四種載重組合。根據臺中市結構工程技師公會在 108 年編寫「太陽光電系統支撐架結構設計參考手冊草案(修訂版)」之 4.3 螺栓接合內容所述，螺栓檢核可參考美國鋁結構規範 Aluminum Design Manual 之 5.2 Bolted Connections。柱與基座之接合錨栓以「建築物混凝土結構設計規範」(2023) 作檢核。

壹、螺栓檢核公式

螺栓容許拉力為$F_t = A_s \times f_t$。其中，F_t為螺栓容許拉力；A_s為螺栓有效斷面積，其公式為$A_s = \frac{\pi}{4}\left(D - \frac{1.191}{n}\right)^2$，其中 D 為螺栓之標稱直徑(英吋)，n 為每英吋之螺紋數；f_t為螺栓容許拉應力，其公式為$f_t = \frac{F_{tu}}{1.2n_u}$，其中$n_u$為安全係數，取 1.95。

螺栓容許剪力為$F_s = A_S^* \times f_s$。其中，F_s為螺栓容許剪力；A_S^*為螺栓剪力有效斷面積，當剪力作用在螺紋上時，$A_S^* = A_s$，當剪力未作用在螺紋上時，$A_S^* = \frac{\pi}{4}(D)^2$；$f_s$為螺栓容許剪應力，其公式為$f_s = \frac{F_{su}}{1.2n_u}$。

貳、面板接橫梁之扣件

面板連接橫梁時需分為四步驟完成，首先將特製菱形片先固定於橫梁上如圖 5-22 所示，藉由特製菱形片將中壓塊固定於橫梁上如圖 5-23 所示，待特製菱形片與中壓塊放置定位後，將模板插入再將其螺栓鎖緊如圖 5-24 所示，最後由

下鎖孔將模板鎖固於橫梁上如圖 5-25 所示。分析時取橫梁與中壓塊連接之螺栓如圖 5-23，進行分析及檢核。

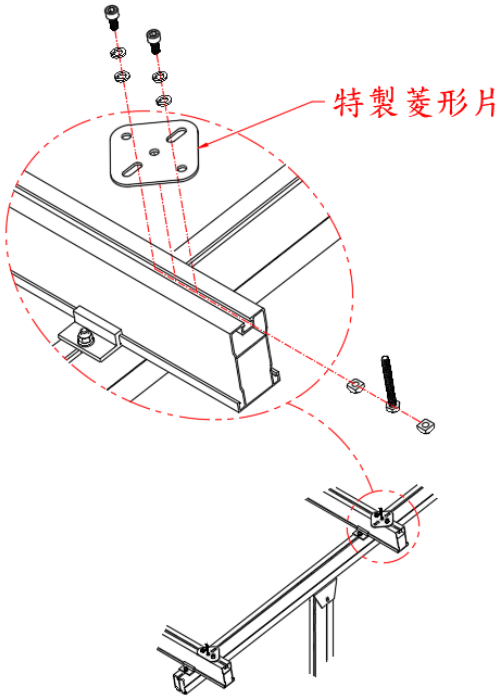


圖 5-22 平屋頂踞置型系統之面板接橫梁示意圖 1

資料來源：修改自[16]

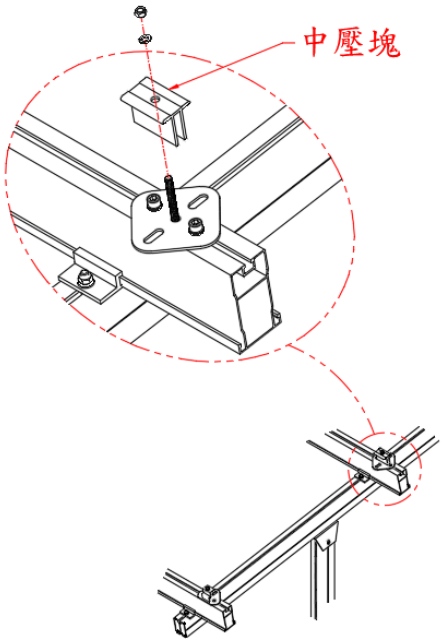


圖 5-23 平屋頂踞置型系統之面板接橫梁示意圖 2

資料來源：修改自[16]

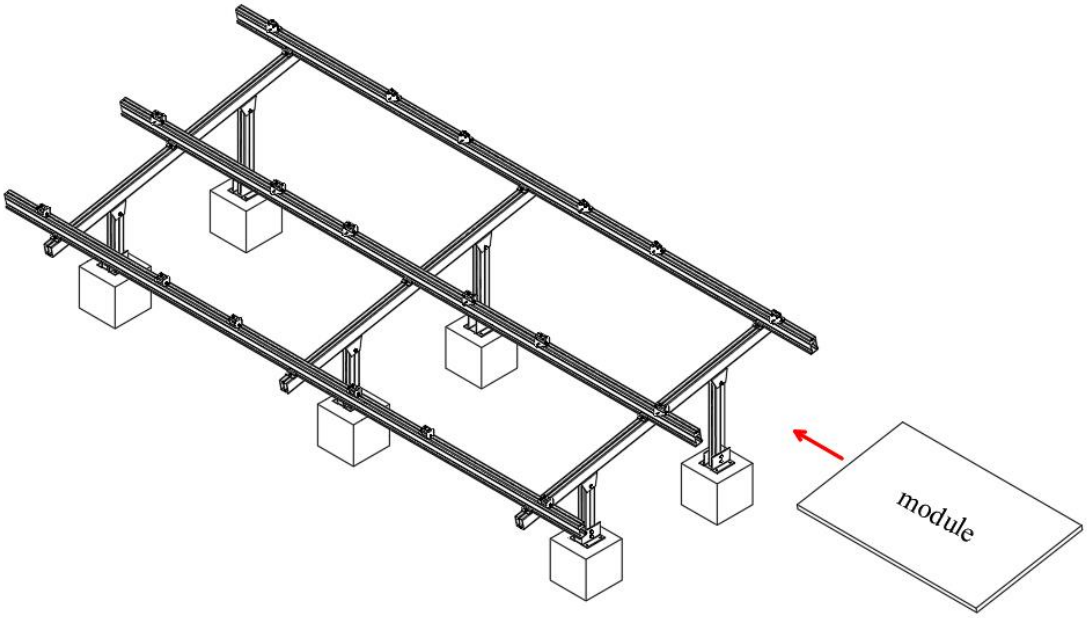


圖 5-24 平屋頂踞置型系統之面板接橫梁示意圖 3

資料來源：修改自[16]

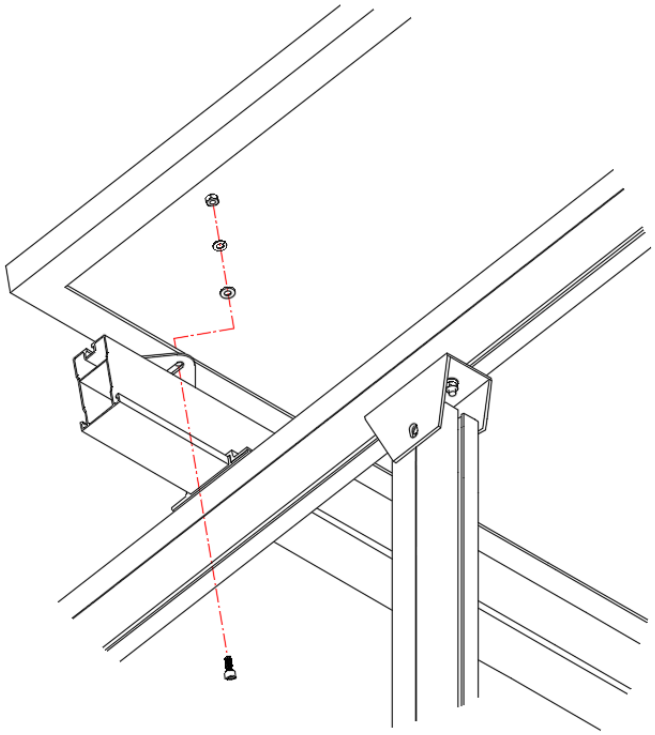


圖 5-25 平屋頂踞置型系統之面板接橫梁示意圖 4

資料來源：修改自[16]

螺栓拉力分析

風載重採用表 5-4 中面板接橫梁扣件 k 點之設計正負風力$\pm 173\ kgf$，正號表示力量指向面板上表面，對此扣件而言為壓力；負號表示力量遠離面板上表面，對此扣件而言為拉力。

面板連接橫梁扣件螺栓數為 1 個，單一螺栓承擔設計風拉力為$-173\ kgf$，對螺栓造成之最大拉力為$F_{ten} = 1.25W = 1.25 \times (-173) = -216.3\ kgf$。

螺栓拉力檢核

螺栓直徑$D = 10\ mm = 0.394\ in$、每英吋之螺紋數$n = 25.4/1.5 = 16.9$，故螺栓有效斷面積$A_s = \frac{\pi}{4}\left(D - \frac{1.191}{n}\right)^2 = \frac{\pi}{4}\left(0.394 - \frac{1.191}{16.9}\right)^2 = 0.0822\ in^2$；允許拉應力$f_t = F_{tu}/1.2n_u = 72.5/2.34 = 30.98\ ksi$。螺栓容許拉力$F_t = A_s \times f_t = 0.0822\ in^2 \times 30.98\ ksi = 2.547\ kip = 1155.3\ kgf$。

螺栓拉力$|F_{ten}| = 216.3\ kgf <$ 螺栓容許拉力$F_t = 1155.3\ kgf$，檢核通過。

參、橫梁接縱梁之扣件

橫梁連接縱梁時需分為三步驟完成，首先將特製鋁件固定於下方鋁擠型縱梁上如圖 5-26 所示，再將鋁擠型橫梁固定於特製鋁件上如圖 5-27 所示，最後根據圖 5-26 及圖 5-27，將鋁擠型橫梁固定於下方鋁擠型縱梁上如圖 5-28 所示。

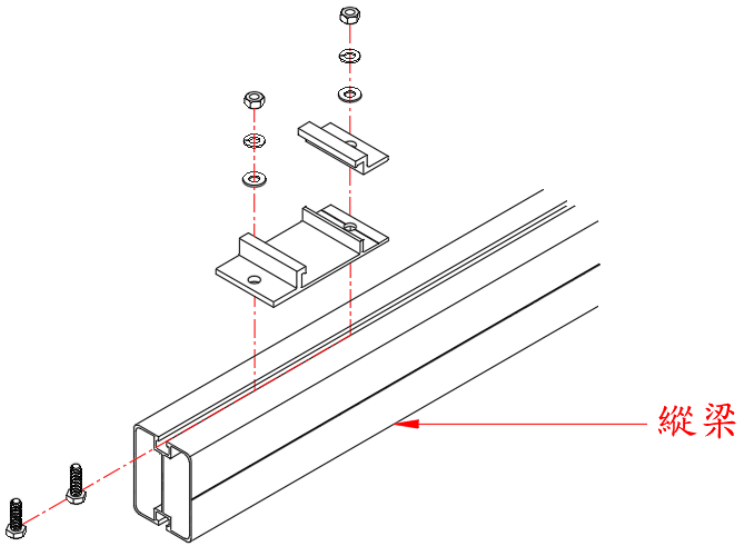


圖 5-26 平屋頂踞置型系統之橫梁接縱梁示意圖 1

資料來源：修改自[16]

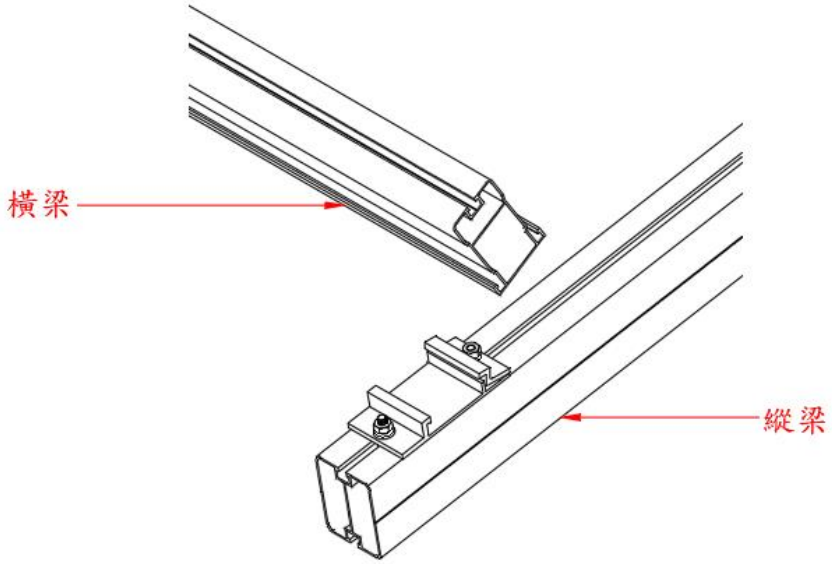


圖 5-27 平屋頂踞置型系統之橫梁接縱梁示意圖 2

資料來源：修改自[16]

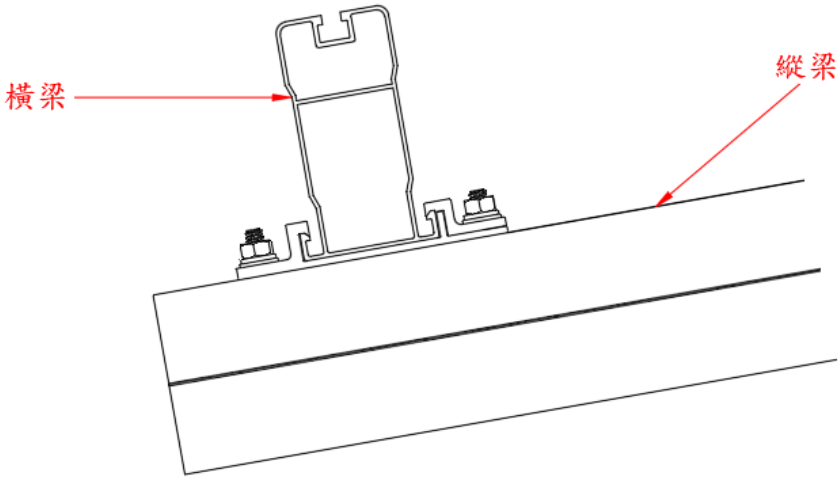


圖 5-28 平屋頂踞置型系統之橫梁接縱梁示意圖 3

資料來源：修改自[16]

螺栓拉力分析

風載重採用表 5-4 中橫梁接縱梁扣件 c 點之設計正負風力$\pm 234.6\ kgf$，正號表示力量指向面板上表面，對此扣件而言為壓力；負號表示力量遠離面板上表面，對此扣件而言為拉力。靜載重包含橫梁自重與面板自重，因鋁擠型自重相對較小，故只考慮面板自重，橫梁接縱梁扣件承受面板面積為$1.97\ m^2$按比例分配橫梁所需承擔面板自重為$24.6kgf$。

橫梁扣件螺栓數為 2 個，單一螺栓承擔設計風拉力為$-234.6/2 = -117.3\ kgf$；單一螺栓承擔靜載重為$24.6/2 = 12.3\ kgf$。對螺栓造成最大組合拉力為$F_{ten} = 0.7D + 1.25W = 0.7 \times 12.3 + 1.25 \times (-117.3) = -138\ kgf$。

螺栓拉力檢核

螺栓直徑$D = 10\ mm = 0.394\ in$、每英吋之螺紋數$n = 25.4/1.5 = 16.9$，故螺栓有效斷面積$A_s = \frac{\pi}{4}\left(D - \frac{1.191}{n}\right)^2 = \frac{\pi}{4}\left(0.394 - \frac{1.191}{16.9}\right)^2 = 0.0822\ in^2$；允許拉應力$f_t = F_{tu}/1.2n_u = 72.5/2.34 = 30.98\ ksi$。螺栓容許拉力$F_t = A_s \times f_t = 0.0822\ in^2 \times 30.98\ ksi = 2.547\ kip = 1155.3\ kgf$。

螺栓拉力$|F_{ten}| = 138\ kgf <$ 螺栓容許拉力$F_t = 1155.3\ kgf$，檢核通過。

肆、縱梁接柱之扣件

縱梁連接柱時需分為兩步驟完成，先將特製鋁件固定於上方鋁擠型縱梁上如圖 5-29 所示，再將特製鋁件固定於鋁擠型柱上如圖 5-30 所示。

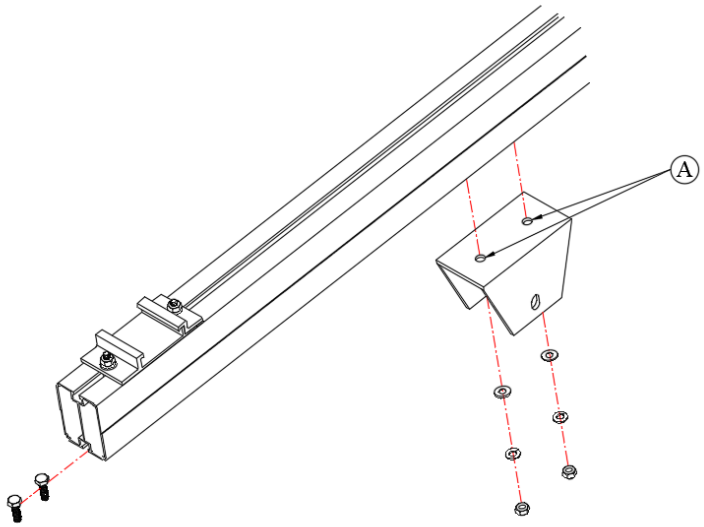


圖 5-29 平屋頂踞置型系統之 A 處螺栓與縱梁連接示意圖

資料來源：修改自[16]

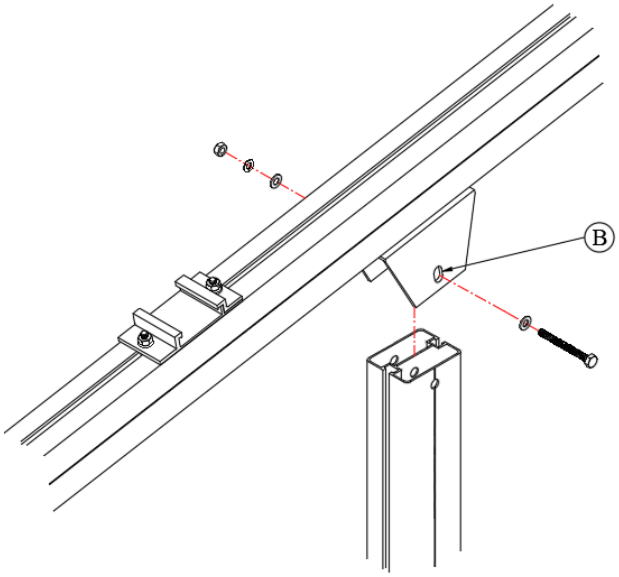


圖 5-30 平屋頂踞置型系統之 B 處螺栓與柱連接示意圖

資料來源：修改自[16]

A 處螺栓拉力分析

風載重採用表 5-4 中縱梁接柱扣件 g 點下方柱頂之設計正負風力 $\pm 234.6\ kgf$，正號表示力量指向面板上表面，對此處扣件而言為壓力；負號表示力量遠離面板上表面，對此處扣件而言為拉力。靜載重包含橫梁、縱梁自重與面板自重，因鋁擠型自重相對較小，故只考慮面板自重，縱梁連接柱扣件承受面板面積為$1.97\ m^2$按比例分配橫梁所需承擔面板自重為$24.6kgf$。

A 處螺栓數為 2 個，單一螺栓承擔設計風拉力為$-234.6/2 = -117.3\ kgf$；單一螺栓承擔靜載重為$24.6/2 = 12.3\ kgf$，對 A 處螺栓造成之最大組合拉力為 $F_{ten} = 0.7D + 1.25W = 0.7 \times 12.3 + 1.25 \times (-117.3) = -138\ kgf$。

A 處螺栓拉力檢核

螺栓直徑$D = 10\ mm = 0.394\ in$、每英吋之螺紋數$n = 25.4/1.5 = 16.9$，故螺栓有效斷面積$A_s = \frac{\pi}{4}\left(D - \frac{1.191}{n}\right)^2 = \frac{\pi}{4}\left(0.394 - \frac{1.191}{16.9}\right)^2 = 0.0822\ in^2$；允許拉應力$f_t = F_{tu}/1.2n_u = 72.5/2.34 = 30.98\ ksi$。螺栓容許拉力$F_t = A_s \times f_t = 0.0822\ in^2 \times 30.98\ ksi = 2.547\ kip = 1155.3\ kgf$。

A 處螺栓拉力$|F_{ten}| = 138\ kgf <$ 螺栓容許拉力$F_t = 1155.3\ kgf$，檢核通過。

B 處螺栓剪力分析

風載重採用表 5-4 中縱梁接柱扣件 g 點下方柱頂之設計正負風力 $\pm 234.6\,kgf$，正號表示力量指向面板上表面，負號表示力量遠離面板上表面，對此處扣件而言均為剪力。B 處螺栓所承受靜載重與 A 處螺栓相同為$24.6kgf$。

B 處螺栓數為 1 個，假設剪力有作用在螺紋上，單一螺栓承擔設計風剪力為 $\pm 234.6\cos 10° = \pm 231\,kgf$；單一螺栓承擔靜載重為$24.6\,kgf$，對 B 處螺栓造成的最大組合剪力為 $F_{shear} = 0.7D + 1.25W = 0.7 \times 24.6 + 1.25 \times 231 = 306\,kgf$。

B 處螺栓剪力檢核

螺栓直徑$D = 10\,mm = 0.394\,in$、每英吋之螺紋數$n = 25.4/1.5 = 16.9$，故螺栓有效斷面積$A_s = \frac{\pi}{4}\left(D - \frac{1.191}{n}\right)^2 = \frac{\pi}{4}\left(0.394 - \frac{1.191}{16.9}\right)^2 = 0.0822\,in^2$；允許剪應力 $f_s = F_{su}/1.2n_u = 29/2.34 = 12.39\,ksi$。螺栓容許剪力 $F_s = A_s \times f_s = 0.0822\,in^2 \times 12.39\,ksi = 1.018\,kip = 461.8\,kgf$。

B 處螺栓剪力$F_{shear} = 306\,kgf <$ 螺栓容許剪力$F_s = 461.8\,kgf$，檢核通過。

伍、柱接基座之扣件

將特製鋁件固定於柱及基座上如圖 5-31 所示。

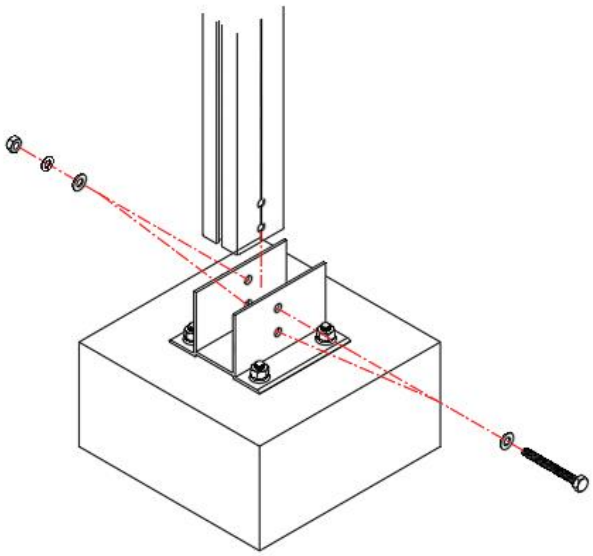


圖 5-31 平屋頂踞置型系統之柱與基座連接示意圖

資料來源：修改自[16]

螺栓剪力分析

風載重採用表 5-4 中柱接基座扣件 g 點下方柱底之設計正負風力 $\pm 234.6\ kgf$，設計正負風力對此處螺栓而言均為剪力；靜載重包含橫梁、縱梁、柱自重與面板自重，因鋁擠型自重相對較小，故只考慮面板自重，橫梁受風面積為$1.97\ m^2$按比例分配橫梁所需承擔面板自重為$24.6kgf$。

柱接基座螺栓數為 2 個，假設剪力有作用在螺紋上，單一螺栓承擔設計風剪力為$\pm 234.6\cos 10°/2 = \pm 115.5\ kgf$；單一螺栓承擔靜載重為$24.6/2 = 12.3\ kgf$，對螺栓造成的最大組合剪力為$F_{shear} = 0.7D + 1.25W = 0.7 \times 12.3 + 1.25 \times 115.5 = 153\ kgf$。

螺栓剪力檢核

螺栓直徑$D = 10\ mm = 0.394\ in$、每英吋之螺紋數$n = 25.4/1.5 = 16.9$，故螺栓有效斷面積$A_s = \frac{\pi}{4}\left(D - \frac{1.191}{n}\right)^2 = \frac{\pi}{4}\left(0.394 - \frac{1.191}{16.9}\right)^2 = 0.0822\ in^2$；允許剪應力$f_s = F_{su}/1.2n_u = 29/2.34 = 12.39\ ksi$。螺栓容許剪力$F_s = A_s \times f_s = 0.0822\ in^2 \times 12.39\ ksi = 1.018\ kip = 461.8\ kgf$。

螺栓剪力$F_{shear} = 153\ kgf <$ 螺栓容許剪力$F_s = 461.8\ kgf$，檢核通過。

基座拉拔力分析

風載重採用表 5-4 中柱接基座扣件 g 點下方柱底之設計正負風力為$\pm 234.6\ kgf$，正號表示力量指向面板上表面，對基座而言為壓力；負號表示力量遠離面板上表面，對基坐而言為拉力，基座承擔風拉力為$-234.6\cos 10° = -231\ kgf$，靜載重為面板自重為 $24.6\ kgf$。基座造成之最大拉拔力為$F_{ten} = 0.7D + 1.25W = 0.7 \times 24.6 + 1.25 \times (-231) = -271.5\ kgf$。

基座拉拔力檢核

1. 錨栓檢核

   混凝土基座之錨栓可依「建築物混凝土結構設計規範」(2023)進行檢核，確認錨栓及混凝土的強度是否足夠。

2. 屋頂面檢核

   檢核其力量傳遞至下方屋頂面時承載力是否足夠，以及確保在拉拔力下不會造成原有屋頂面的破壞。

第六章　地面單斜式棚架型系統之耐風設計（示範例 4）

本章所稱地面單斜式棚架型系統安裝於地面，含支撐柱且棚架至少有兩個側面各有 80%以上面積為開口（如圖 2-4 所示）。耐風設計的主要目的是確保支撐架在強風環境下能夠維持結構完整性和安全性，而實務上在進行支撐架設計時，尚需考慮不同的載重組合情況，例如靜載重、風載重及地震力之效應，但本示範例只考慮靜載重及風載重之效應。

本示範例先規劃一單斜式棚架型系統，依據 CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」之 8.地面單斜式棚架型結構系統之設計風壓(2022) 擬定風載重計算方式，考慮風載重及靜載重作相關之結構設計。本示範例之設計流程圖如圖 6-1 所示。

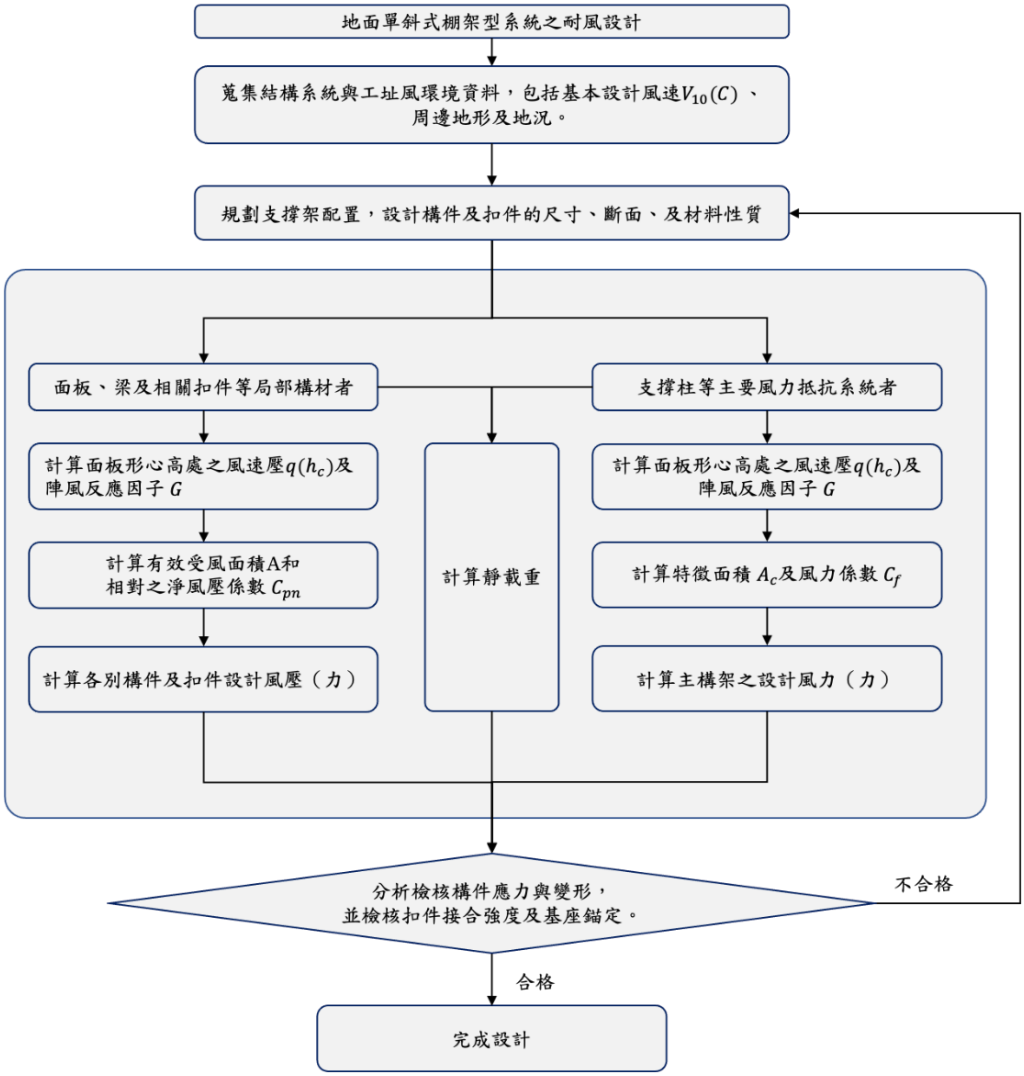


圖 6-1 地面單斜式棚架型系統之耐風設計流程圖

第一節　設計依據

壹、參考依據

1. 內政部，「建築技術規則建築設計施工編」，2004。
2. 內政部，「鋼結構容許應力設計法規範及解說」，2010。
3. 內政部，「建築物耐風設計規範與解說」，2014。
4. 內政部，「冷軋型鋼構造建築物結構設計規範及解說」，2016。
5. 內政部，「建築物混凝土結構設計規範」，2023。
6. 內政部建研所，「太陽光電系統之耐風設計規範研擬」，委託研究計劃成果報告，2019。
7. 經濟部，CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」之 8.地面單斜式棚架型結構系統之設計風壓，2022。
8. 經濟部，CNS 4234-1「不鏽鋼結件之機械性質－第 1 部：螺栓、螺釘及螺椿」，2012。

貳、適用範圍

CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022)中地面單斜式棚架型系統提供之風壓計算公式適用於同時滿足下列條件之地面單斜式棚架型系統：

1. 支撐結構具支撐柱，獨立設置於地面。
2. 棚架至少有兩個側面各有 80%以上面積為開口。

第二節　結構物資料與工址風環境

本章擬於台中市大甲區新建一地面單斜式棚架型太陽光電系統。整體場域之結構系統立體配置圖如圖 6-2 所示。

結構系統平行面板之平面圖如圖 6-3 所示；y向之側視圖如圖 6-4 所示；x向之側視圖如圖 6-5 所示；y向之示意圖如圖 6-6 所示。結構系統之面板由 27 片模組組成，以 60 個扣件分別固定於 6 根橫梁上，每根橫梁分別以 3 個扣件固定於下方縱梁上，每根縱梁分別 2 個扣件固定於下方 2 根柱子上，每根柱子固定於混凝土基座上。

根據「設置再生能源設施免請領雜項執照標準」(2021)，設置於地面之太陽光電發電設備合，其高度自地面起算四點五公尺以下（但經目的事業主管機關核准者，包含支撐架並得結合新設頂蓋，其高度自地面起算九公尺以下）者得免依建築法規定申請雜項執照。本示範立假設之面板與地面最大距離 $h_2 = 3.561\,m$。

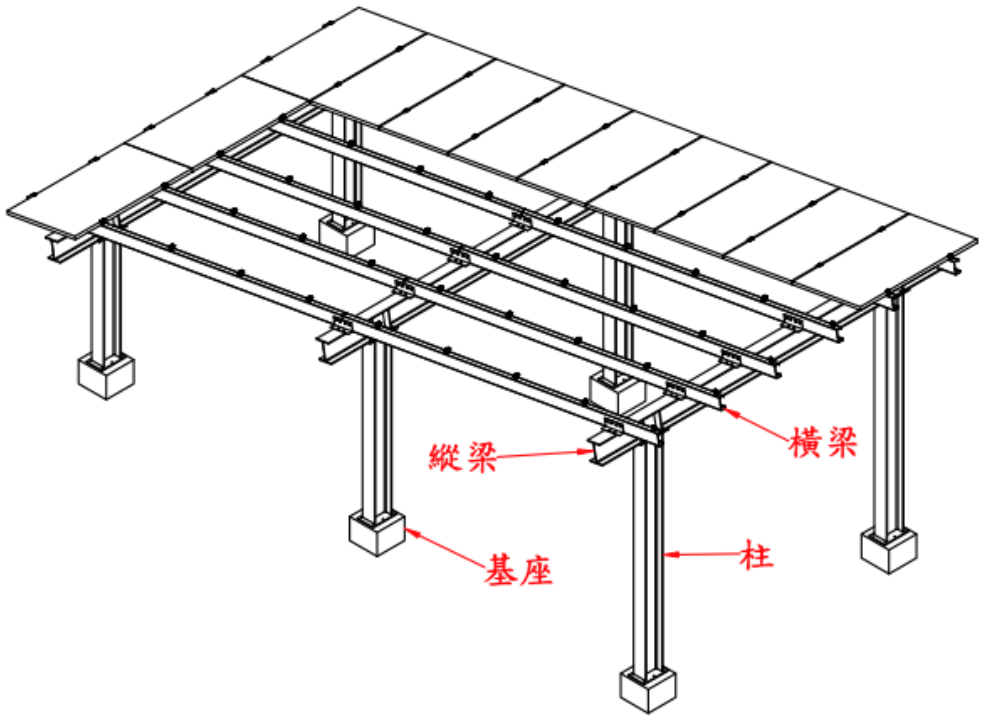


圖 6-2 地面單斜式棚架型系統之立體配置圖

資料來源：[16]

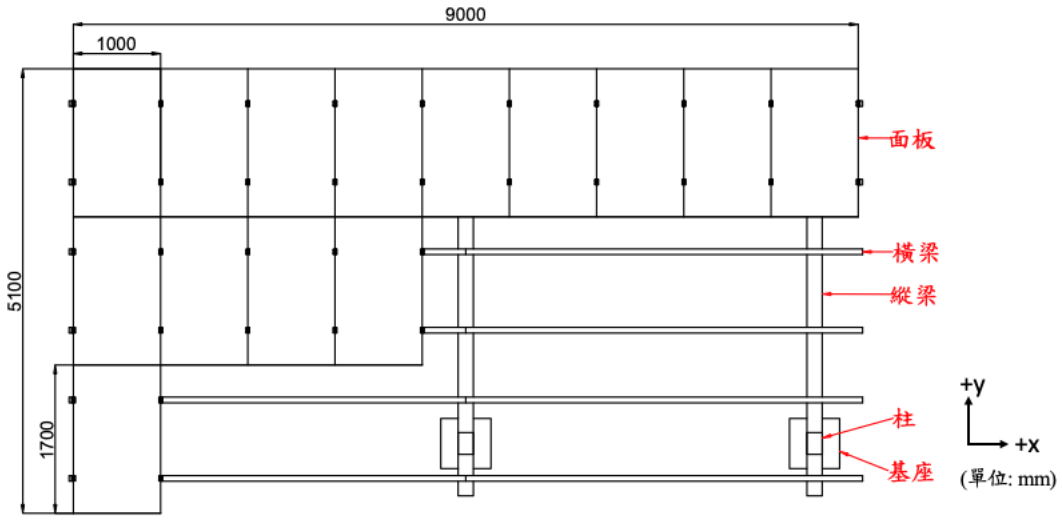


圖 6-3 地面單斜式棚架型系統之平行面板平面圖

資料來源：修改自[16]

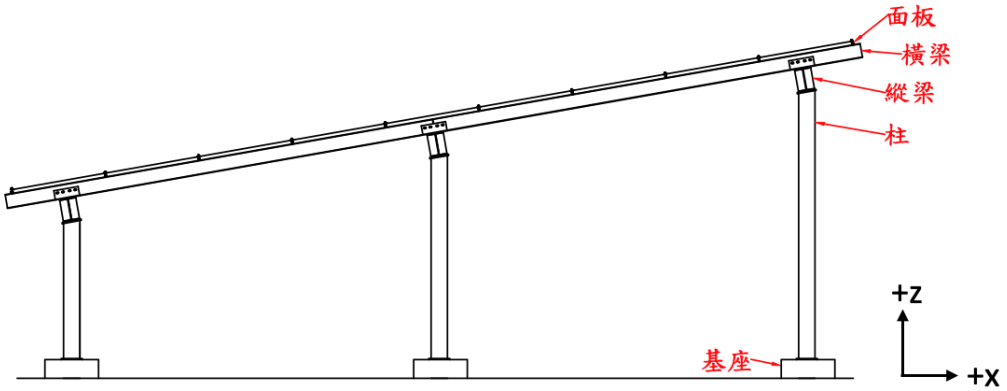


圖 6-4 地面單斜式棚架型系統 y 向之側視圖

資料來源：修改自[16]

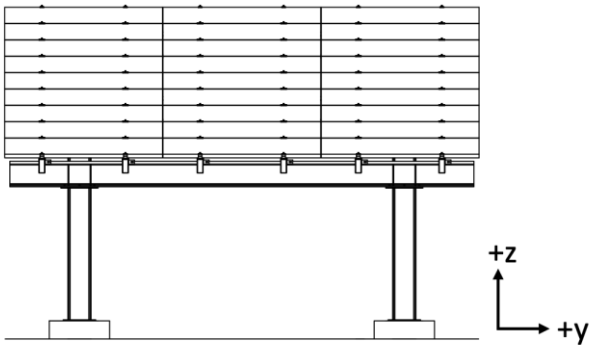


圖 6-5 地面單斜式棚架型系統 x 向之側視圖

資料來源：修改自[16]

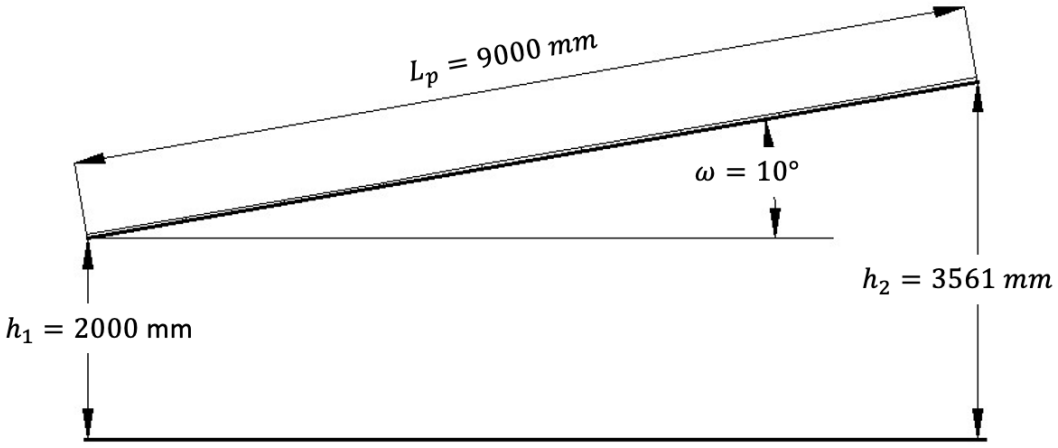


圖 6-6 地面單斜式棚架型系統 y 向之示意圖

理論上應根據各構件及扣件所承受的風壓情況，分別進行其設計，但由於設計程序類似，本範例僅分析設計圖 6-7 之橫梁 a-b-c-d-e、縱梁 f-g-h-i、g 點下方柱、k 點下方柱、面板接橫梁扣件（其形心為 j 點）、橫梁接縱梁扣件（其形心為 c 點）、縱梁接柱扣件（其形心為 g 點）、縱梁接柱扣件（其形心為 k 點）。

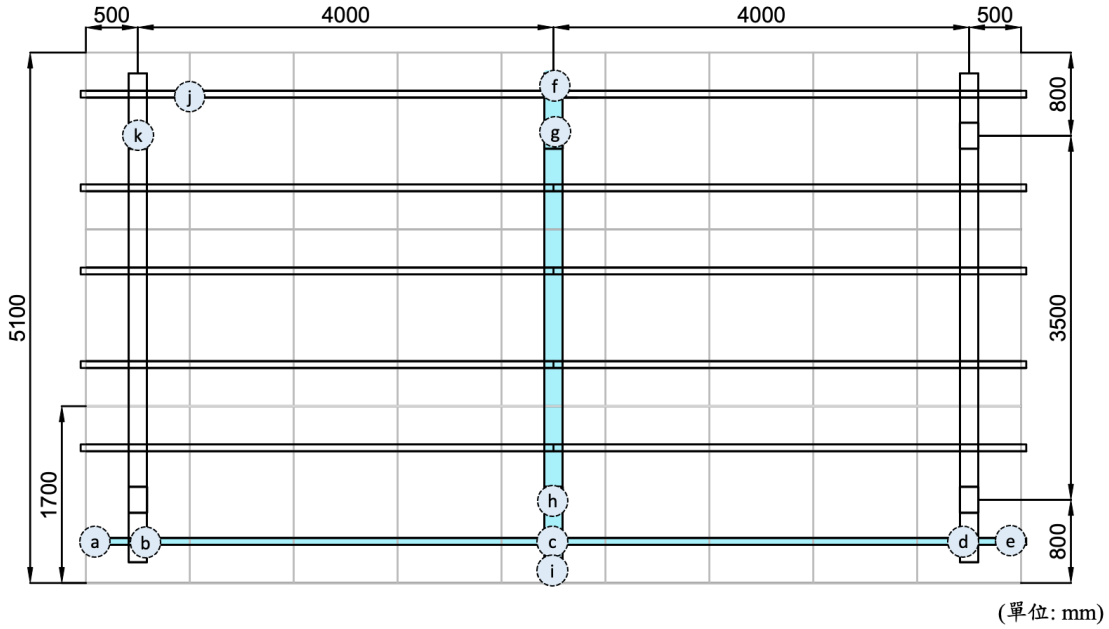


圖 6-7 地面單斜式棚架型系統之設計位置圖

結構物資料包含太陽光電系統尺寸、面板配置、用途係數 I；工址風環境包含基本設計風速$V_{10}(C)$、結構物周邊地形以及地況。本節擬定結構物資料與工址風環境如下表 6-1 所示。

表 6-1 地面單斜式棚架系統之結構物資料與工址風環境

結構物資料	太陽光電系統	面板由 27 片模組組成，以 60 個扣件分別固定於 6 根橫梁上，每根橫梁分別以 3 個扣件固定於下方縱梁上，每根縱梁分別 2 個扣件固定於下方 2 根柱子上，每根柱子固定於混凝土基座上。
	基本尺寸設置	1. 面板弦長 $L_p = 9\,m$ 2. 面板傾角 $\omega = 10°$。 3. 面板與地面最小距離 $h_1 = 2.000\,m$。 4. 面板與地面最大距離 $h_2 = 3.561\,m$。 5. 模組尺寸：1700 mm × 1000 mm × 40 mm 模組重$20kgf = 196N$，共 27 片
	下方阻擋	單斜式棚架下方阻塞比低於 50%，視為無阻擋。
	用途係數	根據「建築物耐風設計規範與解說」規範 2.5 節，依照重要程度可將 I 值分為1.1、1.0或 0.9，本範例取 I＝1.0。
工址風環境	基本設計風速$V_{10}(C)$	根據「建築物耐風設計規範與解說」規範 2.4 節，台中市大甲區的$V_{10}(C) = 32.5\,m/s$。
	地況種類	依結構物各方向上風處之地表粗糙度決定皆為地況 B。
	地形係數	無特殊地形。

第三節 各構件及扣件之設計風壓（力）

本示範例中橫梁、縱梁、柱與相關扣件之設計風壓，皆以 CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022) 中 8.地面單斜式棚架型結構系統之設計風壓計算。

面板本身可被視為外部被覆物，其設計風壓應依據「建築物耐風設計規範及解說」(2014)第 3.4 節決定；支撐結構構件中可被視為局部構件（含扣件），其設計風壓應依據「建築物耐風設計規範及解說」(2014)第 3.2 節決定。但實際上「建築物耐風設計規範及解說」(2014)第 3.2 節為封閉式或部分封閉式建築物局部構材及外部被覆物之設計風壓計算式，並不適用於棚架型，故本手冊參考「太陽光電系統之耐風設計規範研擬」成果報告(2019)的內容，改依規範第 3.4 節決定局部構件之設計風壓。本示範例將縱梁、橫梁及相關扣件視為局部構件，以「建築物耐風設計規範及解說」(2014)第 3.4 節計算設計風壓，其計算細節列於本節第壹與第貳小節。

支撐柱本身側向之設計風力應依據「建築物耐風設計規範及解說」(2014) 2.2 節中開放式建築物之公式決定，其計算細節列於本節第參小節。

本示範例將支撐柱視為主要風力抵抗結構系統，故由面板傳遞至支撐柱之設計風力應依據「建築物耐風設計規範及解說」(2014)第 2.2 節中開放式建築物之公式決定，但其表 2.9「開放式建築物之單斜式屋頂的風力係數」為早期 ASCE 7 的規定，在使用上有所疑慮，故另依據新版擬議「建築物耐風設計規範及解說」計算由面板傳遞至支撐柱之設計風壓，其計算計算細節列於本節第肆小節。

實際上也可將支撐柱視為局部構件，雖所得之值可能會過於保守，但本示範例為了參考比較，也以其公式估算從面板傳至支撐柱的設計風壓，其計算細節列於本節第壹與第貳小節；最後於第四節之第參小節作綜合比較。

壹、各構件及扣件之有效受風面積及淨風壓係數

根據「建築物耐風設計規範及解說」(2014) 1.3 節有效受風面積 A 之定義可知，結構構件之有效受風面積 A 為跨距長度與有效寬度之乘積，有效寬度不必小於其跨距長度的 1/3。對扣件而言，有效受風面積 A 不得大於單一扣件之受風面積。決定有效受風面積及計算淨風壓係數方式如下：

[步驟 1] 有效受風面積

(a) 橫梁 a-b-c-d-e：

如圖 6-8 所示，將面板所承受風力傳遞至橫梁 a-b-c-d-e 上，且橫梁架設在間距為 4 m 的縱梁上，分別以 a-b 段、b-c 段、c-d 段及 d-e 段表示。

針對 a-b 段橫梁，其跨距長度為懸臂段長度 0.5 m，承受風壓面積之寬度為 0.85 m，故承受風壓面積為$0.50\ \text{m} \times 0.85\ \text{m} = 0.425\ \text{m}^2$。a-b 段橫梁之有效寬度為 $\max(0.85, 0.50/3) = 0.85\ \text{m}$，故其有效受風面積為 $A = 0.50\ \text{m} \times 0.85\ \text{m} = 0.425\ \text{m}^2$。同理，d-e 段橫梁之承受風壓面積為$0.425\ \text{m}^2$，有效受風面積亦為$0.425\ \text{m}^2$。

針對 b-c 段橫梁，跨距長度為縱梁間距 4.0 m，承受風壓面積之寬度為 0.85 m，故承受風壓面積為$4.0\ \text{m} \times 0.85\ \text{m} = 3.4\ \text{m}^2$。b-c 段橫梁之有效寬度為 $\max(0.85, 4.00/3) = 1.33\ \text{m}$，故其有效受風面積為 $A = 1.33\ \text{m} \times 0.85\ \text{m} = 5.333\ \text{m}^2$。同理，c-d 段橫梁之承受風壓面積為$3.4\ \text{m}^2$，有效受風面積為$5.333\ \text{m}^2$。

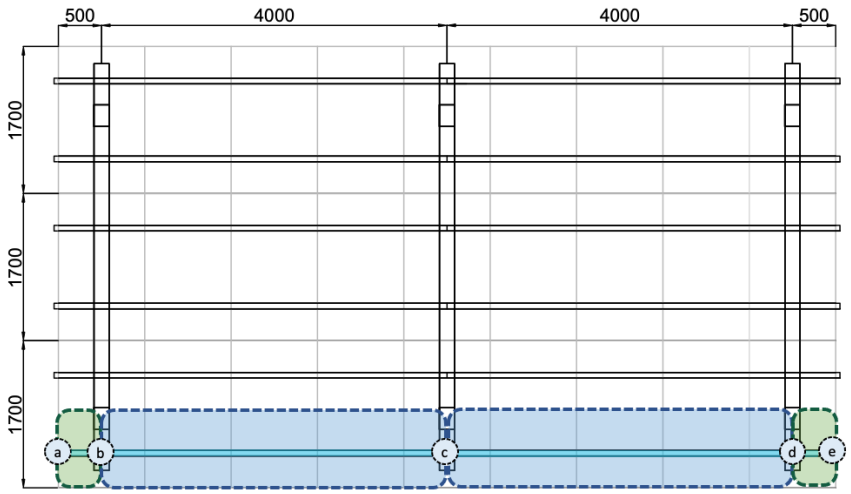


圖 6-8 示範例 4 之橫梁 a-b-c-d-e 有效受風面積示意圖

(b) 縱梁 f-g-h-i：

如圖 6-9 所示，將橫梁所承受風力傳遞至縱梁 f-g-h-i 上，且縱梁架設在間距為 3.5 m 的柱上，分別以 f-g 段、g-h 段及 h-i 段表示。

針對 f-g 段縱梁，其跨距長度為懸臂段長度 0.8 m，承受風壓面積之寬度為 4.0 m，故承受風壓面積為$0.8\ \text{m} \times 4.0\ \text{m} = 3.20\ \text{m}^2$。f-g 段橫梁之有效寬度為$\max(4.0, 0.8/3) = 4.0\ \text{m}$，故其有效受風面積為$0.8\ \text{m} \times 4.0\ \text{m} = 3.20\ \text{m}^2$。同理，h-i 段縱梁之承受風壓面積為$3.20\ \text{m}^2$，有效受風面積亦為$3.20\ \text{m}^2$。

針對 g-h 段縱梁，其跨距長度為縱梁間距 3.5 m，承受風壓面積之寬度為 4.0 m，故承受風壓面積為$3.5\ \text{m} \times 4.0\ \text{m} = 14.00\ \text{m}^2$。b-c 段橫梁之有效寬度為 $\max(4.0, 3.5/3) = 4.0\ \text{m}$，故其有效受風面積為$3.5\ \text{m} \times 4.0\ \text{m} = 14.00\ \text{m}^2$。

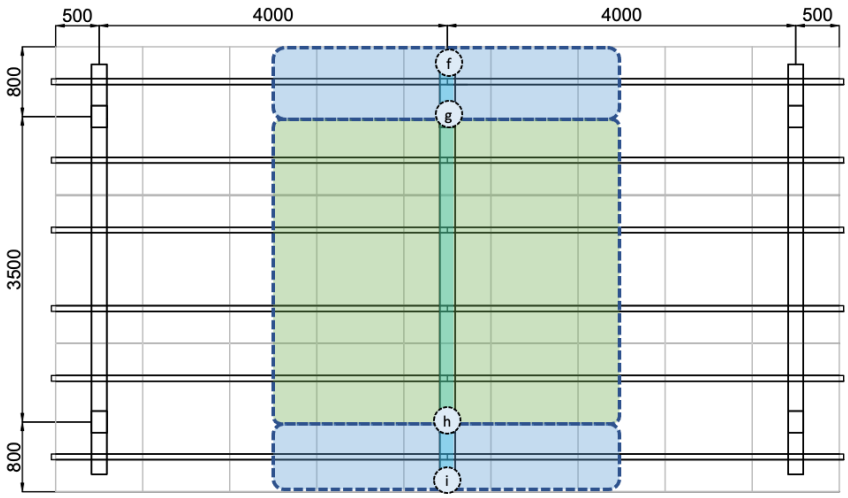


圖 6-9 示範例 4 之縱梁 f-g-h-i 有效受風面積示意圖

(c) g 點下方柱：

如圖 6-10 所示，中間縱梁架設在 g 點及 h 點的縱梁接柱扣件上。

針對 g 點下方柱，其跨距長度為 2.55 m，寬度為 4 m，其承受風壓面積為$2.55\ \text{m} \times 4\ \text{m} = 10.2\ \text{m}^2$。g 點下方柱之有效寬度為$\max(4.0, 2.55/3) = 4.0\ \text{m}$，故其有效受風面積為$2.55\ \text{m} \times 4\ \text{m} = 10.2\ \text{m}^2$。同理，h 點下方柱之承受風壓面積為$10.2\ \text{m}^2$，有效受風面積亦為$10.2\ \text{m}^2$。

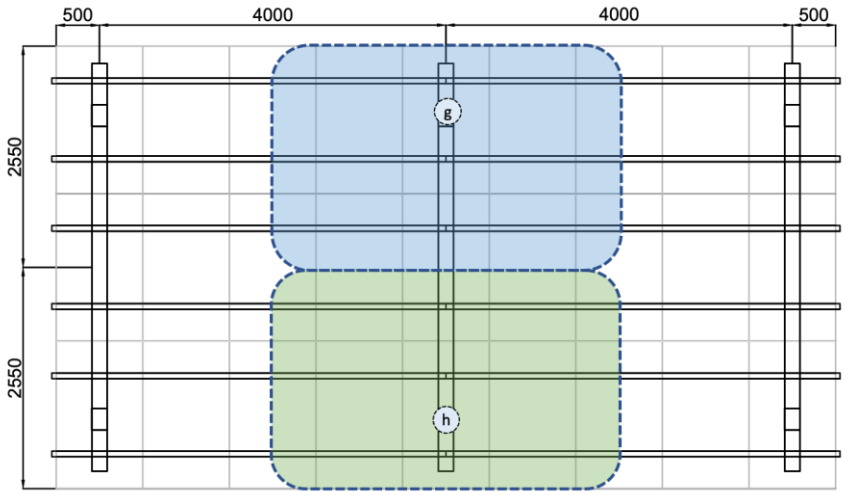


圖 6-10 示範例 4 之 g 點下方柱有效受風面積示意圖

(d) k 點下方柱：

如圖 6-11 所示，兩旁縱梁架設在柱 k 點、l 點、m 點及 n 點的縱梁接柱扣件上。

針對 k 點下方柱，其跨距長度為 2.55 m，寬度為 2.50 m，其承受風壓面積為 $2.55\ \text{m} \times 2.5\ \text{m} = 6.375\ \text{m}^2$。k 點下方柱之有效寬度為 $\max(2.50, 2.55/3) = 2.5\ \text{m}$，故其有效受風面積為 $2.55\ \text{m} \times 2.5\ \text{m} = 6.375\ \text{m}^2$。同理，l 點下方柱、m 點下方柱及 n 點下方柱之承受風壓面積為 $6.375\ \text{m}^2$，有效受風面積亦為$6.375\ \text{m}^2$。

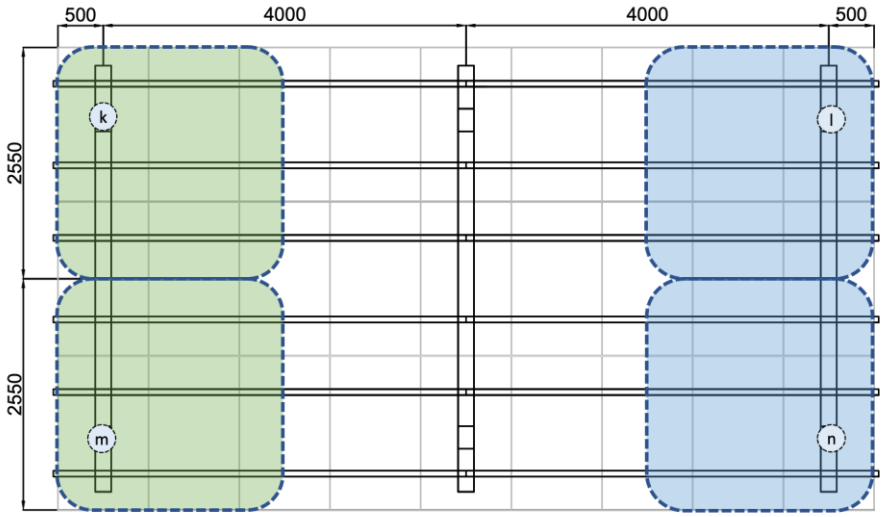


圖 6-11 示範例 4 之 k 點下方柱有效受風面積示意圖

(e) 面板接橫梁扣件 j 點：

如圖 6-12 所示，單一模組尺寸為1.0 m × 1.7 m，並由四個扣件固定，取 j 點面板接橫梁扣件分析，因扣件之有效受風面積不得大於其承受風壓面積，故其有效受風面積為承受風壓面積$A = 1.0\ m \times 0.85\ m = 0.85\ m^2$。

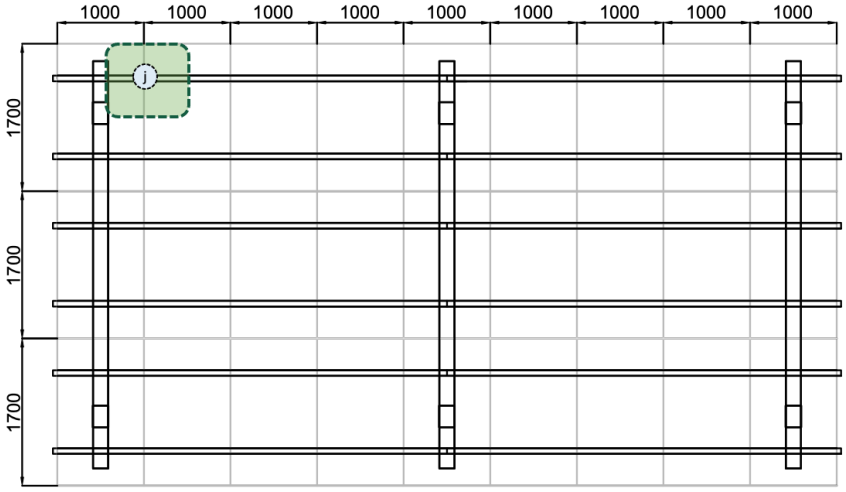


圖 6-12 示範例 4 之面板接橫梁扣件 j 點有效受風面積示意圖

(f) 橫梁接縱梁扣件 c 點：

如圖 6-13 所示，橫梁架設在縱梁 b、c、d 點的橫梁扣件上。取 c 點橫梁接縱梁扣件分析，因扣件之有效受風面積不得大於其承受風壓面積，故其有效受風面積為承受風壓面積$A = 4\ m \times 0.85\ m = 3.4\ m^2$。

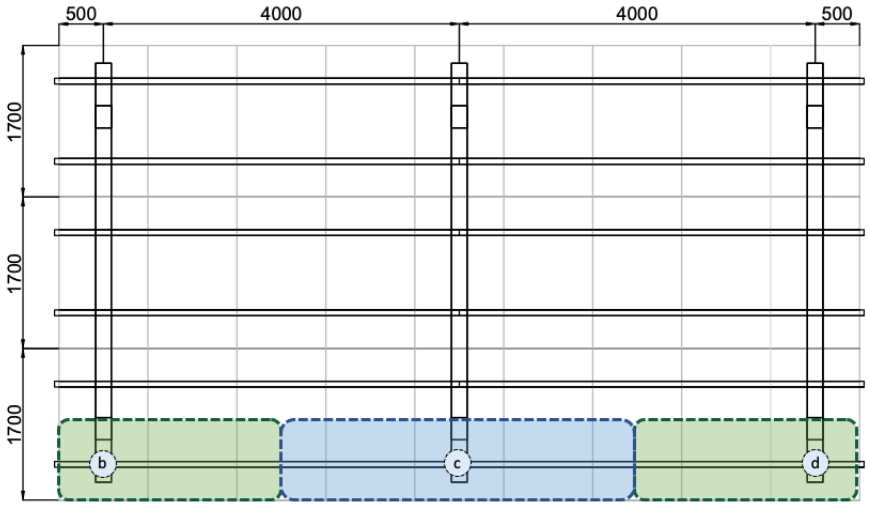


圖 6-13 示範例 4 之橫梁接縱梁扣件 c 點有效受風面積示意圖

(g) 縱梁接柱扣件 g 點：

如圖 6-14 所示，縱梁架設在柱 g 點及 h 點的縱梁接柱扣件上。針對 g 點縱梁接柱扣件分析。因扣件之有效受風面積不得大於其承受風壓面積，故其有效受風面積為承受風壓面積$\mathrm{A} = 2.55\ \mathrm{m} \times 4\ \mathrm{m} = 10.2\ \mathrm{m}^2$。

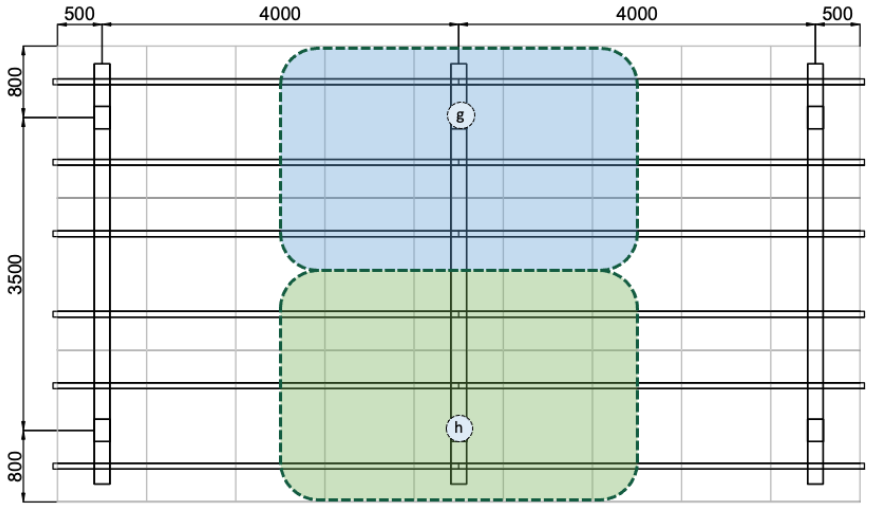


圖 6-14 示範例 4 之縱梁接柱扣件 g 點有效受風面積示意圖

[步驟 2] 淨風壓係數

根據「建築物耐風設計規範及解說」(2014) 決定淨壓係數C_{pn}，如圖 6-15 所示將面板分為區域 3、區域 2、區域 1，區域內淨風壓係數C_{pn}可根據表 6-2 對照有效受風面積決定。其中 L 為順風向之建築物水平深度為 $9.0 \times \cos 10^{\circ} = 8.863\ \mathrm{m}$。a 為最小寬度的 10%，但不得小於 0.9 m，故 $\mathrm{a} = \max\{0.1 \times 5.1\ \mathrm{m}, 0.9\mathrm{m}\} = 0.9\ \mathrm{m}$。

本示範例之$\theta = \omega = 10^{\circ}$，可由$\theta = 7.5^{\circ}$和$\theta = 15^{\circ}$的$C_{pn}$線性內插得到$\theta = 10^{\circ}$下的$C_{pn}$之值。面板接橫梁扣件 j 的有效受風面積$A$為$0.850\ m^2$，$\mathrm{a}^2 < A \leq 4\mathrm{a}^2$，內插可得其區域 3 的$C_{pn}$為 2.5 和-2.37，區域 2 的$C_{pn}$為 2.5 和-2.37，區域 1 的$C_{pn}$為 1.67 和-1.57。仿照上述面板接橫梁扣件 j 點淨風壓係數的求法，可得其餘構件與扣件的淨風壓係數，彙整後將其列於表 6-2。

表 6-2 地面單斜式棚架型之淨風壓係數表

	有效受風面積	C_{pn}											
		屋頂下無阻擋						屋頂下有阻擋					
		區域 3		區域 2		區域 1		區域 3		區域 2		區域 1	
0°	$<a^2$	0.4	-3.3	1.8	-1.7	1.2	-1.1	1	-3.6	0.8	-1.8	0.5	-1.2
	$>a^2, \leqq 4.0a^2$	1.8	-1.7	1.8	-1.7	1.2	-1.1	0.8	-1.8	0.8	-1.8	0.5	-1.2
	$>4.0a^2$	1.2	-1.1	1.2	-1.1	1.2	-1.1	0.5	-1.2	0.5	-1.2	0.5	-1.2
7.5°	$<a^2$	3.2	-4.2	2.4	-2.1	1.6	-1.4	1.6	-5.1	1.2	-2.6	0.8	-1.7
	$>a^2, \leqq 4.0a^2$	2.4	-2.1	2.4	-2.1	1.6	-1.4	1.2	-2.6	1.2	-2.6	0.8	-1.7
	$>4.0a^2$	1.6	-1.4	1.6	-1.4	1.6	-1.4	0.8	-1.7	0.8	-1.7	0.8	-1.7
15°	$<a^2$	3.6	-3.8	2.7	-2.9	1.8	-1.9	2.4	-4.2	1.8	-3.2	1.2	-2.1
	$>a^2, \leqq 4.0a^2$	2.7	-2.9	2.7	-2.9	1.8	-1.9	1.8	-3.2	1.8	-3.2	1.2	-2.1
	$>4.0a^2$	1.8	-1.9	1.8	-1.9	1.8	-1.9	1.2	-2.1	1.2	-2.1	1.2	-2.1
30°	$<a^2$	5.2	-5	3.9	-3.8	2.6	-2.5	3.2	-4.6	2.4	-3.5	1.6	-2.3
	$>a^2, \leqq 4.0a^2$	3.9	-3.8	3.9	-3.8	2.6	-2.5	2.4	-3.5	2.4	-3.5	1.6	-2.3
	$>4.0a^2$	2.6	-2.5	2.6	-2.5	2.6	-2.5	1.6	-2.3	1.6	-2.3	1.6	-2.3
45°	$<a^2$	5.2	-4.6	3.9	-3.5	2.6	-2.3	4.2	-3.8	3.2	-2.9	2.1	-1.9
	$>a^2, \leqq 4.0a^2$	3.9	-3.5	3.9	-3.5	2.6	-2.3	3.2	-2.9	3.2	-2.9	2.1	-1.9
	$>4.0a^2$	2.6	-2.3	2.6	-2.3	2.6	-2.3	2.1	-1.9	2.1	-1.9	2.1	-1.9

資料來源：「建築物耐風設計規範與解說」(2014) 圖 3.3(a)

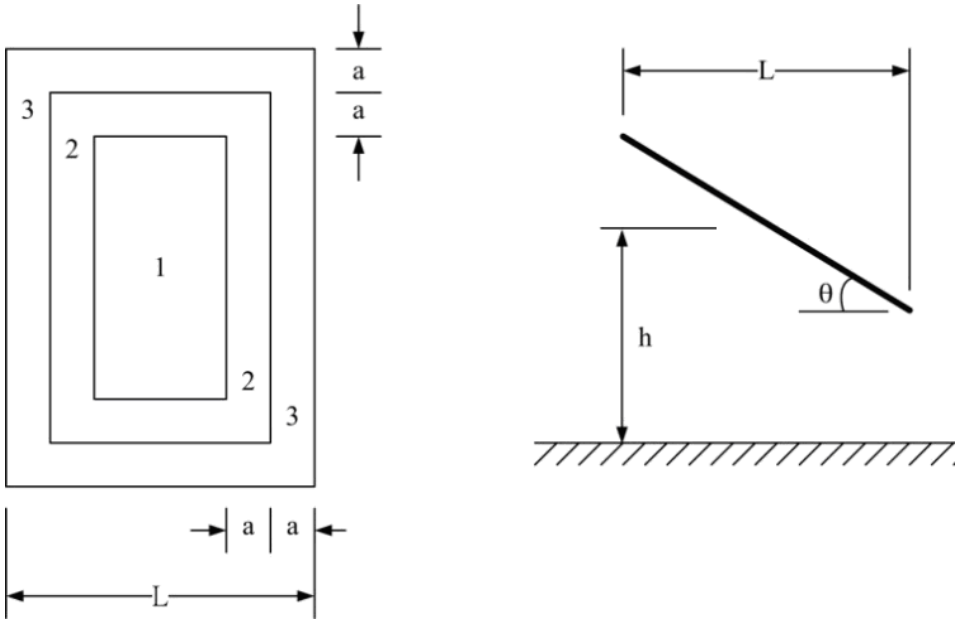


圖 6-15 單斜屋頂區域劃分示意圖

資料來源：「建築物耐風設計規範與解說」(2014) 圖 3.3(a)

表 6-3 示範例 4 構件及扣件之淨風壓係數C_{pn}

名稱		有效受風面積 A (m^2)	區域 3		區域 2		區域 1	
橫梁	a-b 段或 d-e 段	0.425	3.33	-4.07	2.50	-2.37	1.67	-1.57
	b-c 段或 c-d 段	5.333	1.67	-1.57	1.67	-1.57	1.67	-1.57
縱梁	f-g 段或 h-i 段	3.200	2.50	-2.37	2.50	-2.37	1.67	-1.57
	g-h 段	14.000	1.67	-1.57	1.67	-1.57	1.67	-1.57
柱	g 點下方	10.200	1.67	-1.57	1.67	-1.57	1.67	-1.57
	k 點下方	6.375	1.67	-1.57	1.67	-1.57	1.67	-1.57
面板接橫梁扣件	j 點	0.850	2.50	-2.37	2.50	-2.37	1.67	-1.57
橫梁接縱梁扣件	c 點	3.400	1.67	-1.57	1.67	-1.57	1.67	-1.57
縱梁接柱扣件	g 點	10.200	1.67	-1.57	1.67	-1.57	1.67	-1.57

貳、構件及扣件之設計風壓（力）

本示範例將縱梁、橫梁及相關扣件視為局部構件，以「建築物耐風設計規範及解說」(2014)第 3.4 節計算設計風壓。

[步驟 1] 相關之設計參數

根據「建築物耐風設計規範及解說」(2014)，地況 B 之相關參數$\alpha = 0.25$；$z_g = 400\,m$，用途係數$I = 1.0$，基本設計風速$V_{10}(C) = 32.5\,m/s$。面板形心離地面高 $h_c = 2.781\,m$ 。

[步驟 2] 風速壓地況係數$K(z)$與地形係數K_{zt}

根據「建築物耐風設計規範及解說」(2014)式(2.7)：

$K(h_c) = 2.774\left(\frac{5}{z_g}\right)^{2\alpha} = 2.774\left(\frac{5}{400}\right)^{2\times 0.25} = 0.31$ 。

根據「建築物耐風設計規範及解說」(2014)式(2.8)計算K_{zt}：因工址附近無特殊地形，$K_{zt} = 1.0$。

[步驟 3] 面板形心高度之風速壓$q(h_c)$

根據「建築物耐風設計規範及解說」(2014)式(2.6)，離地面高h_c之風速壓：

$q(h_c) = 0.06 \times K(h_c) \times K_{zt} \times [I\,V_{10}(c)]^2 = 0.06 \times 0.31 \times 1 \times (1.0 \times 32.5)^2 = 19.66\ kgf/m^2$

[步驟 4] 陣風反應因子

假設棚架之 $f_n > 1Hz$ ，為非柔性結構，故計算普通建築物之陣風反應因子 G。

根據「建築物耐風設計規範及解說」(2014)式（2.12），紊流積分尺度$L_{\bar{z}}$：

$L_{\bar{z}} = \lambda(\bar{z}/10)^{\bar{\varepsilon}} = 98(9/10)^{0.33} = 94.651$

其中，等效結構高度 $\bar{z} = \max(0.6h, z_{min}) = \max(0.6 \times 2.781, 9) = 9\,m$。

根據「建築物耐風設計規範及解說」(2014)式（2.10），紊流強度$I_{\bar{z}}$：

$I_{\bar{z}} = c(10/\bar{z})^{1/6} = 0.3(10/9)^{1/6} = 0.305$

根據「建築物耐風設計規範及解說」(2014)式（2.11），背景反應Q：

$$Q_x = \sqrt{\frac{1}{1+0.63\left(\frac{B+h_c}{L_{\bar{z}}}\right)^{0.63}}} = \sqrt{\frac{1}{1+0.63\left(\frac{5.1+2.781}{94.651}\right)^{0.63}}} = 0.940$$

$$Q_y = \sqrt{\frac{1}{1+0.63\left(\frac{B+h_c}{L_{\bar{z}}}\right)^{0.63}}} = \sqrt{\frac{1}{1+0.63\left(\frac{8.863+2.781}{94.651}\right)^{0.63}}} = 0.925$$

其中，若來風平行 x 向，垂直於風向之面板水平尺寸B = 5.1 m，若來風平行 y 向，垂直於風向之面板水平尺寸B = 8.863 m。

根據「建築物耐風設計規範及解說」(2014)式（2.9），普通建築物支陣風反應因子 G：

$$G_x = 1.927\left(\frac{1+1.7q_Q I_{\bar{z}} Q_x}{1+1.7q_V I_{\bar{z}}}\right) = 1.927\left(\frac{1+1.7\times 3.4\times 0.305\times 0.940}{1+1.7\times 3.4\times 0.305}\right) = 1.853$$

$$G_y = 1.927\left(\frac{1+1.7q_Q I_{\bar{z}} Q_y}{1+1.7q_V I_{\bar{z}}}\right) = 1.927\left(\frac{1+1.7\times 3.4\times 0.305\times 0.925}{1+1.7\times 3.4\times 0.305}\right) = 1.835$$

其中，背景反應尖峰因子和背景反應尖峰因子均可取 3.4，以此算出風向為x向時 $G_x = 1.853$，風向為 y 向時$G_y = 1.835$。或者也可依據規範直接取$G = 1.88$，計算過程會較簡單，但因包絡各種情況，所得風力值較會保守。以下取 $G = G_x = 1.853$來計算。

[步驟 5] 設計正負風壓與風力

地面單斜式棚架型系統中被視為局部構件者，其設計風壓依「建築物耐風設計規範及解說」(2014) 3.4 節中開放式建築物之公式決定：

$$P = q(h_c) \times \mathrm{G} \times C_{pn} \quad \text{.....(6.1)}$$

其中$q(h_c)$為平均面板高度h_c處之風速壓；G 為普通建築之陣風反應因子，；C_{pn}為淨風壓係數。

舉例而言，面板接橫梁扣件的有效受風面積$A = 0.85m^2$，$\mathrm{a}^2 < A \leq 4\mathrm{a}^2$，若其全位於區域 3 內，其 C_{pn} 為 2.5和 -2.37，則該扣件設計正風壓為 $19.66 \times 1.853 \times 2.5 = 91.05\, kgf/m^2$ ， 負 風 壓 為 $19.66 \times 1.853 \times -2.37 = 51.640 = -86.20\, kgf/m^2$。仿照上述區域 3 的面板扣件計算流程，可分別計算得到其他扣件及構件在不同區域的設計正（負）風壓，彙整後將其數值分析結

果列於表 6-4。

表 6-4 示範例 4 不同區域之設計風壓

名稱		有效受風面積 A (m^2)	設計風壓（單位 kgf/m^2）					
			區域 3		區域 2		區域 1	
橫梁	a-b 段或 d-e 段	0.425	121.40	-148.11	91.05	-86.20	60.70	-57.06
	b-c 段或 c-d 段	5.333	60.70	-57.06	60.70	-57.06	60.70	-57.06
縱梁	f-g 段或 h-i 段	3.200	91.05	-86.20	91.05	-86.20	60.70	-57.06
	g-h 段	14.000	60.70	-57.06	60.70	-57.06	60.70	-57.06
柱	g 點下方	10.200	60.70	-57.06	60.70	-57.06	60.70	-57.06
	k 點下方	6.375	60.70	-57.06	60.70	-57.06	60.70	-57.06
面板接橫梁扣件	j 點	0.850	91.05	-86.20	91.05	-86.20	60.70	-57.06
橫梁接縱梁扣件	c 點	3.400	60.70	-57.06	60.70	-57.06	60.70	-57.06
縱梁接柱扣件	g 點	10.200	60.70	-57.06	60.70	-57.06	60.70	-57.06

針對面板接橫梁扣件 j，因承受風壓面積完全位於區域 3 內，故該扣件設計正（負）風壓為$91.05\ kgf/m^2$和$-86.20\ kgf/m^2$。

若構件或扣件的承受風壓面積橫跨不同區域，其設計正（負）風壓可依不同區域的面積比例加權平均計算得之。以縱梁 g-h 段為例，其橫跨區域 1、區域 2 與區域 3 區，區域 3 的設計正（負）風壓為$60.70\ kgf/m^2$和$-57.06\ kgf/m^2$，橫跨面積$0.8\ m^2$，區域 2 的設計正（負）風壓為 $60.70\ kgf/m^2$和$-57.06\ kgf/m^2$，橫跨面積$7.2\ m^2$，區域 1 的設計正（負）風壓為$60.70 kgf/m^2$和$-57.06\ kgf/m^2$，橫跨面積為 $6.0\ m^2$，對面積加權平均後所得風壓為$60.70 kgf/m^2$和$-57.06\ kgf/m^2$。仿照上述的計算流程，分別計算其他不同構件及扣件的設計正（負）風壓，彙整所有結果並將其列於表 6-5

設計風力為設計風壓與承受風壓面積A_{actual}的乘積。針對面板接橫梁扣件 j，其設計正（負）風壓為$91.05\ kgf/m^2$和$-86.20\ kgf/m^2$，承受風壓面積為$0.85\ m^2$，則該扣件的設計正風力$\mathrm{F} = 91.05 \times 0.85 = 77.40\ kgf$，設計負風力$\mathrm{F} = -86.20 \times 0.85 = -73.27\ kgf$。仿照上述的計算流程，分別計算其他不同扣件的設計正風力及設計負風力，彙整所有結果並將其列於表 6-5

表 6-5 示範例 4 構件及扣件之設計風壓及風力

名稱		承受風壓面積 (m^2)	設計風壓 (kgf/m^2)		設計風力 (kgf)	
			正風壓	負風壓	正風力	負風力
橫梁	a-b 段或 d-e 段	0.425	121.40	-148.11		
	b-c 段或 c-d 段	3.400	60.70	-57.06		
縱梁	f-g 段或 h-i 段	3.200	91.05	-86.20		
	g-h 段	14.000	60.70	-57.06		
柱	g 點下方	10.200	60.70	-57.06		
	k 點下方	6.375	60.70	-57.06		
面板接橫梁扣件	j 點	0.850	91.05	-86.20	77.40	-73.27
	螺栓 1 個（軸力）				77.40	-73.27
橫梁接縱梁扣件	c 點	3.400	60.70	-57.06	206.39	-194.00
	螺栓 4 個（剪力）				51.60	-48.50
	螺栓 2 個（軸力）				103.19	-97.00
縱梁接柱扣件	g 點	10.200	60.70	-57.06	619.16	-582.01
	螺栓 6 個（軸力）				103.19	-97.00

參、支撐柱本身之設計風力

支撐柱本身之設計風力，依據「建築物耐風設計規範及解說」(2014)第 2.2 節中開放式建築物之公式決定：

$$F = q(z_{Ac}) \times G \times C_f \times A_c \quad \text{.....(6.2)}$$

其中$q(z_{Ac})$為面積A_c形心高度z_{Ac}處之風速壓，z_{Ac}為面板形心離地面高$h_c = 12.781\,m$；G 為普通建築之陣風反應因子；C_f為風力係數。

若將支撐柱視為角柱體形狀之結構物，可參照「建築物耐風設計規範及解說」(2014)中表「角柱體形狀之結構物的風力係數C_f及其修正係數 R」求得風力，但表中沒有本例支撐柱之 H 型斷面，故使用造型較接近之長方形斷面進行估算C_f，風向垂直於長方柱長邊時$C_f = 2.2$，風向垂直於長方柱長邊時$C_f = 1.4$。修正係數 R 與柱的高寬比$2h/D$相關，其中柱的最小水平尺寸$D = 175\text{mm}$，因為柱的$2h/D$都在8~20 之間，對照可得修正係數$R = 0.8$。

如圖 6-16 所示，若來風平行 x 向，風向垂直於長方柱長邊時$C_f = 2.2$，乘上修正係 R 可得$C_f = 1.76$。設計風力$F = q(h_c)GC_f A_c$，其中$q(h_c) = 19.66\ kgf/m^2$、$G = 1.853$、受風作用特徵面積A_c為柱子實體構材迎風面面積，代入後可得各根柱子的設計風壓，將其結果列於表 6-6。

如圖 6-17 所示，若來風平行 y 向，風向垂直於長方柱長邊時$C_f = 1.4$，乘上修正係 R 可得$C_f = 1.12$。設計風力$F = q(h_c)GC_f A_c$，其中$q(h_c) = 19.66\ kgf/m^2$、$G = 1.835$、受風作用特徵面積A_c為柱子實體構材迎風面面積，代入後可得各根柱子的設計風壓，並將其列於表 6-6。

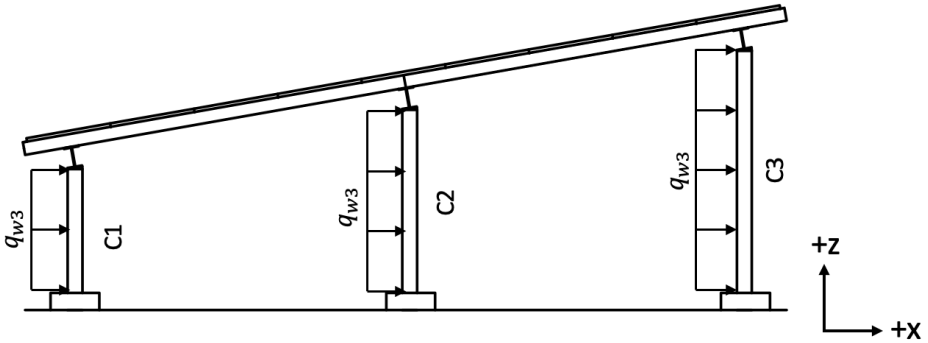


圖 6-16 示範例 4 支撐柱本身之設計風力（x 向）

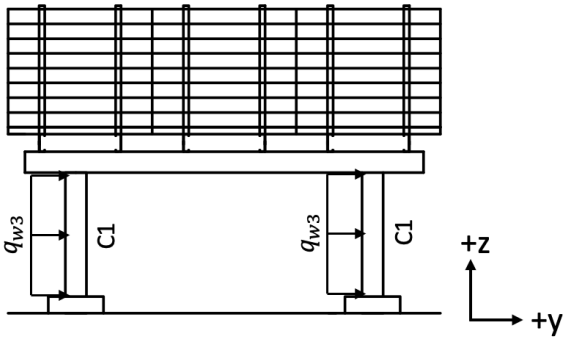


圖 6-17 示範例 4 支撐柱本身之設計風力（y 向）

為了方便分析，也可以把設計風力F除以柱高換為線載重。因為柱子的$q(h_c)$、G及C_f與柱斷面皆相同，來風平行 x 向時每根柱子的單位長度風載重皆為16.03 kgf/m，來風平行 y 向時每根柱子的單位長度風載重皆為7.07 kgf/m。

表 6-6 示範例 4 支撐柱本身之設計風力

風向	來風平行 x 向		來風平行 y 向	
設計目標	受風作用特徵面積A_c（m^2）	設計風力F（kgf）	受風作用特徵面積A_c（m^2）	設計風力F（kgf）
柱 C1	0.4	23.37	0.3	10.31
柱 C2	0.5	34.51	0.4	15.22
柱 C3	0.7	45.63	0.5	20.13

肆、面板傳遞至支撐柱風壓(力)不同估算方式之比較

若將棚架之支撐柱視為局部構材，以於前面第壹及第貳小節計算面板傳遞至支撐柱之風壓，若將棚架之支撐柱視為主要風力抵抗結構系統，應依據「建築物耐風設計規範與解說」(2014) 第 2.2 節決定設計風力，將在本小節述明。

由面板傳遞至支撐柱之風力依據「建築物耐風設計規範與解說」(2014) 中表 2.9「開放式建築物之單斜式屋頂的風力係數」計算，其細節列於本節的(1)；但因此規範為早期 ASCE 7 的規定，在使用上有所疑慮，且之後新版「建築物耐風設計規範與解說」也預計依新版 ASCE 7 修訂這部分，故另依據擬議新版「建築物耐風設計規範與解說」中表 3.8 (a)「開放式建築物之單斜屋頂的淨風壓係數」計算作為參考，此細節列於本節的(2)。

(1) 面板傳遞至支撐柱的設計風力（耐風規範 2014 第 2.2 節）

由面板傳遞至支撐柱之設計風力，依據「建築物耐風設計規範及解說」(2014)第 2.2 節中開放式建築物之公式決定：

$$F = q(h_c) \times G \times C_f \times A_c \quad \text{.....(7.3)}$$

其中$q(h_c)$為面板形心高度h_c處之風速壓；G為普通建築之陣風反應因子；C_f為風力係數，可查表 6-7 而得；A_c為開放式建築物受風作用特徵面積，也就是面板總面積$5.1 \times 9.0 = 45.9\ m^2$。

表 6-7 開放式建築物之單斜式屋頂的風力係數

θ	各種 L/B 值之 *Cf*						
	5	3	2	1	1/2	1/3	1/5
10	0.2	0.25	0.3	0.45	0.55	0.7	0.75
15	0.35	0.45	0.5	0.7	0.85	0.9	0.85
20	0.5	0.6	0.75	0.9	1	0.95	0.9
25	0.7	0.8	0.95	1.15	1.1	1.05	0.95
30	0.9	1	1.2	1.3	1.2	1.1	1

θ	各種 *L/B* 值所對應的壓力中心位置，*X/L*		
	2~5	1	1/5~1/2
10~20	0.35	0.3	0.3
25	0.35	0.35	0.4
30	0.35	0.4	0.45

資料來源：建築物耐風設計規範與解說(2014) 表 2.9

<u>來風平行 x 向</u>

[步驟 1] 風力係數C_f

若來風平行 x 向，垂直於風向之面板水平尺寸$B = 5.1\ m$，與風向平行的屋頂尺寸$L = 8.863\ m$，相除得 $L/B = 1.738$。根據表 6-7，$\theta = 10°$ 下 $L/B = 1$的風力係數 C_f 值為0.45，$L/B = 2$的風力係數 C_f 值為0.3，線性內插可得 $L/B = 1.738$下 C_f 值為0.339。

[步驟 2] 設計風力F

根據「建築物耐風設計規範及解說」(2014)式(2.4)，開放式建築承受之設計風力為$F = q(h_c)G_x\ C_f\ A_c = 19.66 \times 1.853 \times 0.339 \times 45.9 = 567.30\ (kgf)$。

根據表 6-7，$\theta = 10°$ 下 $L/B = 1$ 的壓力中心位置 X/L為 0.3，$L/B = 2$的壓力中心位置 X/L為0.35，線性內差可得$L/B = 1.738$ 的壓力中心位置$X/L = 0.337$，X為從屋頂之迎風面屋簷到壓力中心的距離。

來風平行 y 向

[步驟 1] 風力係數 C_f

若來風平行 y 向，垂直於風向之面板水平尺寸$B = 8.863\,m$，與風向平行的屋頂尺寸$L = 5.1\,m$，相除得$L/B = 0.575$。根據表 6-7，$\theta = 10°$ 下 $L/B = 0.5$的風力係數 C_f 值為0.55，$L/B = 1.0$的風力係數 C_f 值為0.45，線性內插可得 $L/B = 0.575$ 下 C_f 值為0.535。

[步驟 2] 設計風力F

根據「建築物耐風設計規範及解說」(2014)式(2.4)，開放式建築承受之設計風力為$F = q(h_c)G_y C_f\, A_c = 19.66 \times 1.835 \times 0.535 \times 45.9 = 885.54\ (kgf)$。

根據表 6-7，$\theta = 10°$ 下 $L/B = 0.5$ 的壓力中心位置 X/L為0.3，$L/B = 1$的壓力中心位置 X/L為0.3，線性內差可得 $L/B = 0.575$ 的壓力中心位置 $X/L = 0.3$，X為從屋頂之迎風面屋簷到壓力中心的距離。

表 6-8 示範例 4 面板傳遞至支撐柱之設計風力（耐風規範 2014）

風向	設計風力（kgf）	從迎風面到壓力中心位置之距離
$\pm x$	$\pm$567.30	$X/L = 0.337$
$\pm y$	$\pm$885.54	$X/L = 0.3$

(2) 面板傳遞至支撐柱的設計風力（擬議新版「建築物耐風設計規範與解說」）

因「建築物耐風設計規範與解說」(2014)第 2.2 節為早期 ASCE 7 的規定，由面板傳遞至支撐柱之設計風力在使用上有所疑慮，且之後第三版耐風規範也預計依據新版 ASCE 7 修定這一部分，故另外依據第三版耐風設計規範草案計算由面板傳遞至支撐柱之設計風力作為參考，其設計風壓為：

$$p = q(h_c) \times G \times C_N \quad \text{.....(6.4)}$$

其中$q(h_c)$為面板形心高度 h_c處之風速壓；G 為普通建築之陣風反應因子；C_N為風壓係數。

來風平行 x 向

[步驟 1]風力係數C_N

若來風平行 x 向，可參考表 6-9 和圖 6-18 得到開放式建築物之單斜式屋頂的淨風壓係數，其中屋頂下通風面積阻塞比小於 50%視為氣流無受阻，C_{NW} 及 C_{NL} 分別代表屋頂面上風區及下風區之淨風壓係數，正值代表風壓作用指向受風作用面，負值代表風壓作用遠離受風作用面。

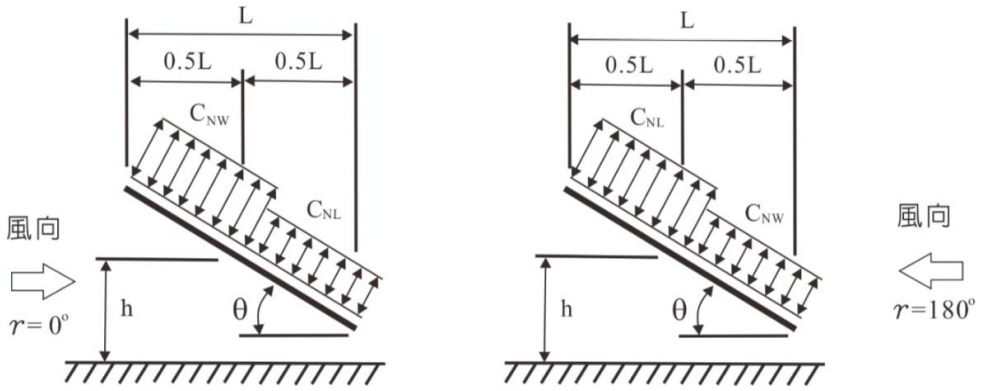


圖 6-33 開放式建築物之單斜式屋頂的淨風壓係數C_N

資料來源：擬議新版「建築物耐風設計規範與解說」

表 6-9 開放式建築物之單斜式屋頂的淨風壓係數C_N

淨風壓係數 , C_N									
屋頂仰角 θ	載重類別	風向角 , 0°				風向角 , 180°			
		氣流無受阻		氣流有受阻		氣流無受阻		氣流有受阻	
		C_{NW}	C_{NL}	C_{NW}	C_{NL}	C_{NW}	C_{NL}	C_{NW}	C_{NL}
< 7.5°	A	1.2	0.3	-0.5	-1.2	1.2	0.3	-0.5	-1.2
	B	-1.1	-0.1	-1.1	-0.6	-1.1	-0.1	-1.1	-0.6
7.5°	A	-0.6	-1.0	-1.0	-1.5	0.9	1.5	-0.2	-1.2
	B	-1.4	0.0	-1.7	-0.8	1.6	0.3	0.8	-0.3
15°	A	-0.9	-1.3	-1.1	-1.5	1.3	1.6	0.4	-1.1
	B	-1.9	0.0	-2.1	-0.6	1.8	0.6	1.2	-0.3
22.5°	A	-1.5	-1.6	-1.5	-1.7	1.7	1.8	0.5	-1.0
	B	-2.4	-0.3	-2.3	-0.9	2.2	0.7	1.3	0.0
30°	A	-1.8	-1.8	-1.5	-1.8	2.1	2.1	0.6	-1.0
	B	-2.5	-0.5	-2.3	-1.1	2.6	1.0	1.6	0.1
37.5°	A	-1.8	-1.8	-1.5	-1.8	2.1	2.2	0.7	-0.9
	B	-2.4	-0.6	-2.2	-1.1	2.7	1.1	1.9	0.3
45°	A	-1.6	-1.8	-1.3	-1.8	2.2	2.5	0.8	-0.9
	B	-2.3	-0.7	-1.9	-1.2	2.6	1.4	2.1	0.4

資料來源：擬議新版「建築物耐風設計規範與解說」

此表適用於$0.25 \leq h/L \leq 1.0$之情形，故先確認$h/L = 0.314$在此範圍內。靠線性內差求得風向角為 0°的載重類別 A 為$C_{NW} = 0.7$、$C_{NL} = -1.1$；載重類別 B 為$C_{NW} = -1.57$、$C_{NL} = 0$，風向角為 180°時的載重類別 A 為$C_{NW} = 1.03$、$C_{NL} = 1.53$；載重類別 B 為$C_{NW} = 1.67$、$C_{NL} = 0.4$。

設計風壓為$P = q(h_c)G_xC_N$，此時$q(h_c) = 19.66\,kgf/m^2$、$G_x = 1.853$，代入不同C_N後可得各方向及載種組合之設計風壓，並將其列於表 6-11。

<u>來風平行 y 向</u>

若來風平行 y 向，可參考表 6-10 和圖 6-19 得到風向平行於屋脊時開放式建築物之屋頂的淨風壓係數，其中屋頂下通風面積阻塞比小於 50%視為氣流無受阻，C_N代表屋頂面之淨風壓係數，依照離迎風面的距離被分為 3 段，正值代表風壓作用指向受風作用面，負值代表風壓作用遠離受風作用面。

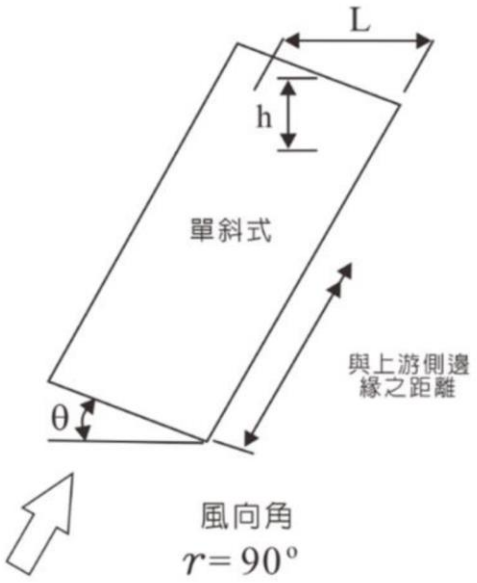


圖 6-19 風向平行於屋脊時開放式建築物之屋頂的淨風壓係數C_N

資料來源：擬議新版「建築物耐風設計規範與解說」

表 6-10 風向平行於屋脊時開放式建築物之屋頂的淨風壓係數C_N

與上游側邊緣之距離	屋頂仰角 θ	載重類別	氣流無受阻	氣流有受阻
			C_N	C_N
≤h	All shapes	A	-0.8	-1.2
	$\theta \leq 45°$	B	0.8	0.5
> h, ≤ 2h	All shapes	A	-0.6	-09
	$\theta \leq 45°$	B	0.5	0.5
> 2h	All shapes	A	-0.3	-0.6
	$\theta \leq 45°$	B	0.3	0.3

資料來源：擬議新版「建築物耐風設計規範與解說」

可得載重類別 A 中$< h$的$C_N = -0.8$、h~$2h$的$C_N = -0.6$、$> 2h$的$C_N = -0.3$；載重類別 B 中 $< h$的$C_N = -0.8$、h~$2h$的$C_N = 0.5$、$> 2h$的$C_N = 0.3$。

設計風壓為：$P = q(h_c)G_y C_N$，此時 $q(h_c) = 19.66\ kgf/m^2$、$G_y = 1.835$，代入不同C_N後可得各方向及載種組合之設計風壓，並將其列於表 6-11。

表 6-11 示範例 4 面板傳遞至支撐柱的設計風壓（新版耐風規範）(kgf/m²)

載重類別	A			B		
	CNW		CNL	CNW		CNL
風向角 , 0°	-25.50		-40.07	-57.07		0.00
風向角 , 180°	37.64		55.85	60.71		14.57
載重類別	A			B		
	≤h	h~2h	> 2h	≤h	h~2h	> 2h
風向角 , 90°	-28.85	-21.64	-10.82	28.85	18.03	10.82

第四節　構件之耐風分析及檢核

橫梁採用 SSC 400（一般結構用輕型鋼）為冷軋型鋼材；縱梁採用 SN400B（建築結構用軋鋼料）為熱軋型鋼材，兩者之降伏強度 $f_y = 2500\ kgf/cm^2$ ，極限強度 $f_u = 4000\ kgf/cm^2$。假設採用之橫梁、縱梁形狀與斷面性質如表 6-12 所示。

冷軋型鋼構材設計時所用鋼材之彈性模數E為 20,700 kgf/mm^2，剪力模數G為 7,950 kg/mm^2，波森比μ為 0.3，溫度伸縮係數為 0.000012/°C。鋼結構所用結構鋼之彈性模數E為 20,400 kgf/mm^2，剪力彈性模數G為 8100 kgf/mm^2，波森比μ為 0.3，溫度伸縮係數為 0.000012/°C。

表 6-12 示範例 4 構件之斷面性質

縱梁及柱	橫梁
H 型鋼-H250x175x7x11	C 型鋼- C150x65x20x3.2
斷面模數 $S_x = 502\ cm^3$ 斷面模數 $S_y = 112\ cm^3$ 慣性矩　$I_x = 6121\ cm^4$ 慣性矩　$I_y = 984\ cm^4$ 斷面積　$A = 56.24\ cm^2$ 單位長重量　$q = 44.1\ kgf/m$	斷面模數 $S_x = 44\ cm^3$ 斷面模數 $S_y = 12\ cm^3$ 慣性矩　$I_x = 332\ cm^4$ 慣性矩　$I_y = 53\ cm^4$ 斷面積　$A = 9.56\ cm^2$ 重量　$q = 7.5\ kgf/m$
SN400B 材料性質：$f_y = 2500\ kgf/cm^2$ ；$f_u = 4000\ kgf/cm^2$ SSC 400 材料性質：$f_y = 2500\ kgf/cm^2$ ；$f_u = 4000\ kgf/cm^2$	

當使用容許應力設計法設計時，熱軋型鋼構應依「鋼結構容許應力設計法規範及解說」(2010)之規定，考慮載重組合$D + L$ 、$D + 0.75(L \pm 1.25W)$、$D + 0.75(L \pm 0.8E)$ 、$0.7D \pm 1.25W$及$0.7D \pm 0.8E$；冷軋型鋼構應依「冷軋型鋼構造建築物結構設計規範及解說」(2016)之規定，考慮載重組合$D + L$ 、$D \pm W$、$D \pm 0.7E$、$D + 0.75L \pm 0.75W$ 、$D + 0.75L \pm 0.7E$、$0.6D \pm W$及 $0.6D \pm 0.7E$。其中，D 為靜載重，包括構材自重及永久附加物重量；L 為活載重，包含人員重量；E 為設計地震力； W 為設計風力。

本耐風設計示範例所考慮之太陽光電系統不用考慮活載重、且忽略地震力，同時由於「冷軋型鋼構造建築物結構設計規範及解說」(2016) ASD 所用風力係

數並不正確，故本例皆採用「鋼結構容許應力設計法規範及解說」(2010)之載重組合$D \pm 0.9375\,W$(或$D \pm 0.75(1.25W)$)及$0.7D \pm 1.25W$進行檢核。

壹、橫梁

在作橫梁 a-b-c-d-e 結構分析時如圖 6-20 所示，將橫梁與下方縱梁連接處 b 點、c 點及 d 點的扣件視為鉸支承（Hinge）進行分析。

風載重採用表 6-5 中橫梁 a-b-c-d-e 的設計風壓，其承受風壓面積的寬度為 0.85 m。設計正風壓 a-b 段和 d-e 段為$121.40\,kgf/m^2$、b-c 段和 c-d 為$60.70\,kgf/m^2$，乘上寬度 0.85 m 可得線載重$q_{w1} = 103.19\,kgf/m$、$q_{w2} = 51.60\,kgf/m$，設計負風壓 a-b 段和 d-e 段為$148.11\,kgf/m^2$、b-c 段和 c-d 段負風壓為$57.06\,kgf/m^2$，乘上寬度 0.85 m 後可得線載重$q_{w1} = 125.90\,kgf/m$、$q_{w2} = 48.50\,kgf/m$。

靜載重包含橫梁自重與模組自重，模組自重每塊$20kgf$，由 4 個面板接橫梁扣件傳給2根橫梁，故每個扣件傳到橫梁的力量$F_D = 20kg/4 = 5\,kgf/m$，橫梁本身單位長自重為$7.5\,kgf/m$。

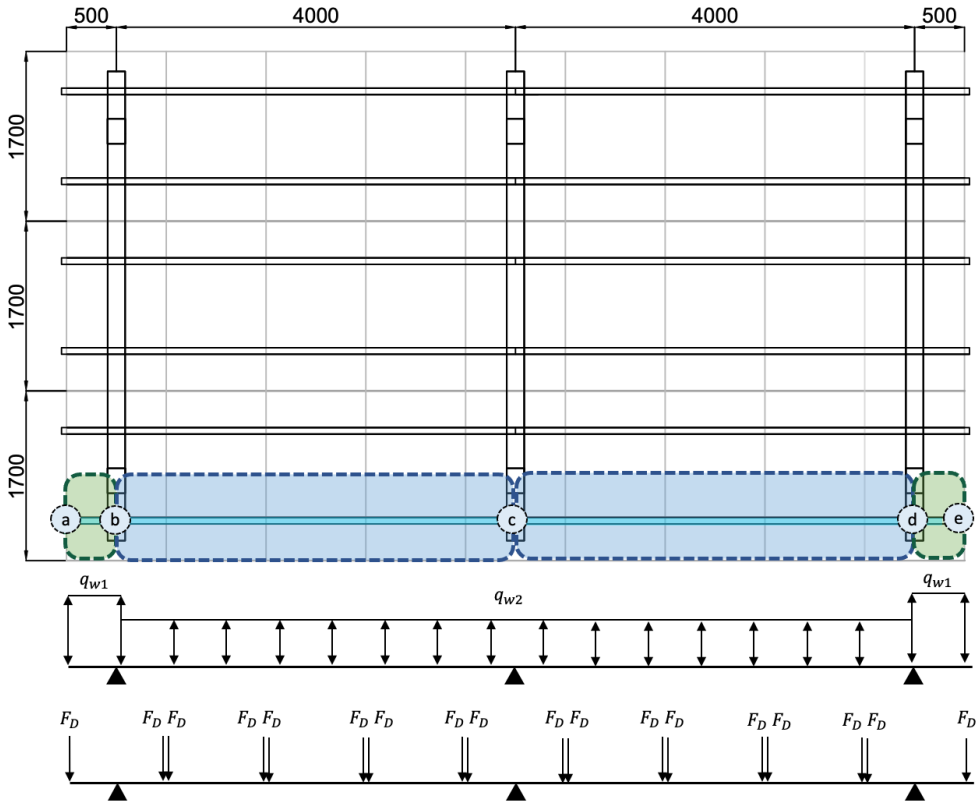


圖 6-20 示範例 4 之橫梁 a-b-c-d-e 受力作用圖

本例利用 SAP2000 分析，將構件的斷面、材料特性輸入，並施加風載重、靜載重及可求得橫梁變形量及構件的應力，載重組合有$D \pm 0.9375\,W$、$0.7D \pm 1.25W$。

<u>應力檢核</u>

在載重組合$0.7D + 1.25W$下有最大剪力 182.75 kgf 及最大彎矩 134.47 kgf-m，用 AISC-ASD96 進行檢核，得橫梁應力比為 $0.21 \leq 1$，確認符合規範。

<u>變形檢核</u>

為避免長時間較大振動造成扣件處產生破壞，建議檢核梁變位量，例如參考「鋼結構容許應力設計法規範及解說」(2010) 11.5.3 節，將風力視為活載重，確認風力所產生的撓度不得大於跨度之 1/360。在載重組合為$1.0D + 1.0W$下有最大變形量$\delta_{max} = 2.6\,mm$。

$\frac{\text{最大變形量}\delta_a}{\text{跨度}} = \frac{0.0026\text{ m}}{4\text{ m}} = 0.00065 \leq \frac{1}{360}$，檢核通過。

貳、縱梁

在作縱梁結構分析時如圖 6-21 所示，將與下方柱連接處 g 點、h 點視為鉸支承（Hinge），以下風載重以線載重模擬進行設計，靜載重以點載重模擬進行設計。

風載重採用表 6-5 中縱梁 f-g-h-i 的設計風壓，其承受風壓面積的寬度為 4m。設計正風壓 f-g 段和 h-i 段為$91.05\,kgf/m^2$、g-h 段為$60.70\,kgf/m^2$，乘上寬度 4 m 可得線載重$q_{w1} = 364.21\,kgf/m$、$q_{w2} = 242.81\,kgf/m$。設計負風壓 f-g 段和 h-i 段為$86.20\,kgf/m^2$、g-h 段為$57.06\,kgf/m^2$，乘上寬度 4 m 可得線載重$q_{w1} = 344.79\,kgf/m$、$q_{w2} = 228.24\,kgf/m$。

靜載重包含梁自重與模組自重，而縱梁 f-g-h-i 所負擔面積中有 12 塊模組，模組自重為$20kgf/$塊，橫梁自重為 $7.51\,kg/m$，面板、橫梁自重經橫梁接縱梁扣件傳入縱梁，故每根橫梁傳到縱梁 f-g-h-i 的重量$F_D = (20kg) \times (2\text{ 塊}) + (7.51\,kg/m) \times (4m) = 70.04\,kg$，縱梁本身單位長自重為 $44.1\,kgf/m$。

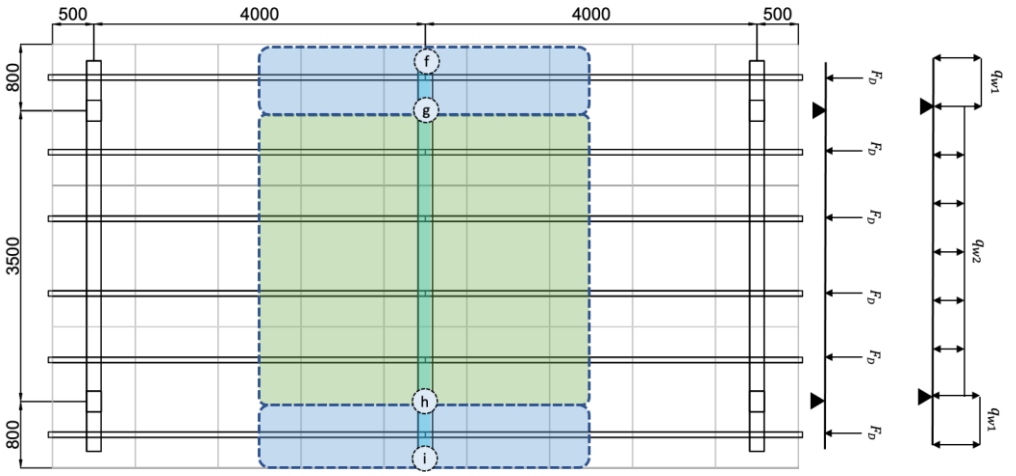


圖 6-21 示範例 4 之縱梁 f-g-h-i 受力作用圖

本例利用 SAP2000 分析，將構件的斷面、材料特性輸入，並施加風載重、靜載重及可求得縱梁變形量及構件的應力，載重組合有$D \pm 0.9375\,W$、$0.7D \pm 1.25W$。

<u>應力檢核</u>

在載重組合$0.7D + 1.25W$下有最大剪力 737.17 kgf和最大彎矩 461.87 kgf-m，用 AISC-ASD96 進行檢核，得縱梁應力比為 $0.07 \leq 1$，確認符合規範。

<u>變形檢核</u>

為避免長時間較大振動造成扣件處產生破壞，建議檢核梁變位量，例如參考「鋼結構容許應力設計法規範及解說」(2010)11.5.3 節，將風力視為活載重，確認風力所產生的撓度不得大於跨度之 1/360。在載重組合為$1.0D + 1.0W$下有最大變形量$\delta_{max} = 0.5\,mm$。

$\frac{\text{最大變形量}\delta_a}{\text{跨度}} = \frac{0.0005\text{ m}}{3.5\text{ m}} = 0.00014 \leq \frac{1}{360}$，檢核通過。

參、支撐柱

支撐柱本身側向之設計風力可依照「建築物耐風設計規範與解說」(2014)第 2.2 節主要構件風力公式決定，而面板傳遞至支撐柱的設計風壓（力）依照不同之估算依據會有不同算法：(1)為依照現行「建築物耐風設計規範與解說」(2014)第 2.2 節主要構件風力公式決定，但此公式為早期 ASCE 7 的規定，在使用上有所疑慮，故在(2)中依照擬議新版「建築物耐風設計規範與解說」中主要構件風壓公式決定，此公式依新版 ASCE 7 修定，所得風壓會較為合理。最後(3)為依照現行「建築物耐風設計規範與解說」(2014)第 3.4 節局部構件風壓公式決定柱的設計風壓，但所得之值可能會過於保守。

(1) 根據現行「建築物耐風設計規範及解說」之主要構件風力公式估算風力

風載重考慮由面板傳遞至支撐柱之設計風力及支撐柱本身之設計風力兩項。由面板傳遞至支撐柱之設計風力依據「建築物耐風設計規範及解說」(2014)第 2.2 節計算，其結果參考表 6-8，支撐柱本身之側向設計風力參考表 6-6。

參考圖 6-22，若風朝 $+x$向吹，由面板傳遞至支撐柱之設計風力為$F = 567.30\ kgf$，且從迎風面到風力作用位置的比例 $X/L = 0.337$，方向垂直面板並考慮往下和往上兩種情況。支撐柱本身之側向設計風力 $q_w = 16.03\ kgf/m$。參考圖 6-23，若風朝 $-x$向吹其設計風力與$+x$向相同，只是方向相反。

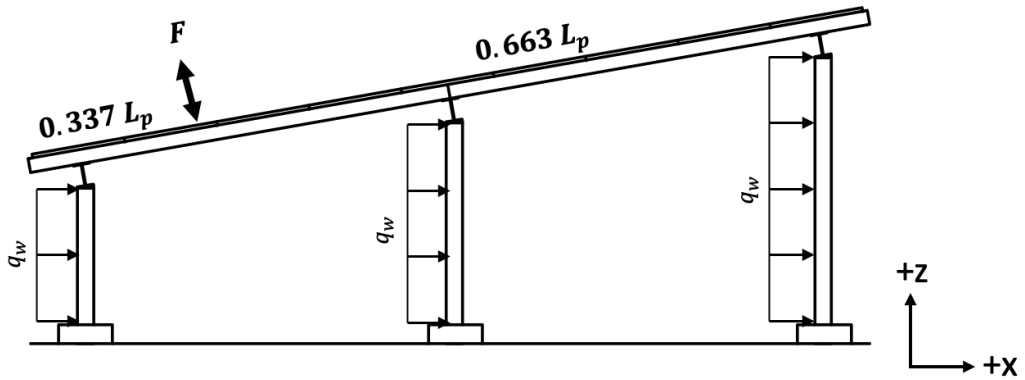


圖 6-22 示範例 4 現行耐風規範之主要風力作用圖（$+x$向）

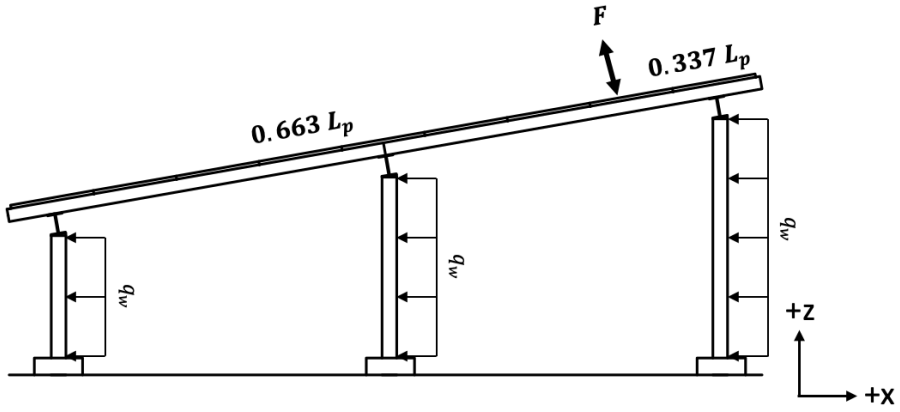


圖 6-23 示範例 4 現行耐風規範之主要風力作用圖（$-x$向）

根據圖 6-24，若風朝 $+y$向吹，由面板傳遞至支撐柱之設計風力為$F = 885.54\ kgf$，且從迎風面到風力作用位置的比例 $X/L = 0.3$，方向垂直面板並考慮往下和往上兩種情況，支撐柱本身之側向設計風力 $q_w = 7.07\ kgf/m$。若風朝 $-y$向吹其設計風力與$+y$向相同，只是方向相反。

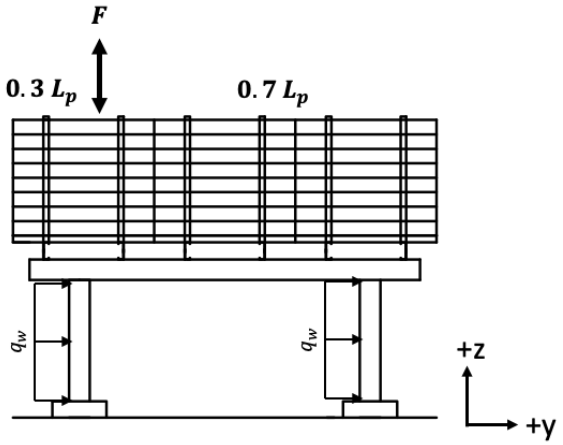


圖 6-24 示範例 4 現行耐風規範之主要風力作用圖（$+y$向）

(2) 根據擬議新版「建築物耐風設計規範與解說」之主要構件風壓公式估算

風載重考慮由面板傳遞至支撐柱之設計風力及支撐柱本身之設計風力兩項。由面板傳遞至支撐柱之設計風力依據擬議新版「建築物耐風設計規範與解說」計算，其結果參考表 6-11，支撐柱本身之側向設計風力參考表 6-6。

參考圖 6-25，若風朝 $+x$向吹，也就是風向角$180°$時，在載重類別 A 下由面板傳遞至支撐柱之設計風壓p_{ww}為$37.64\ kgf/m^2$、p_{wL}為$55.85\ kgf/m^2$，載重類別 B 下由面板傳遞至支撐柱之設計風壓p_{ww}為$60.71 kgf/m^2$、p_{wL}為$14.57\ kgf/m^2$。支撐柱本身之側向設計風力 $q_{w3} = 16.03\ kgf/m$。

參考圖 6-26，若風朝 $-x$向吹，也就是風向角$0°$時，在載重類別 A 下由面板傳遞至支撐柱之設計風壓p_{ww}為$-25.50\ kgf/m^2$、p_{wL}為$-40.07\ kgf/m^2$，載重類別 B 下由面板傳遞至支撐柱之設計風壓p_{ww}為$-57.07\ kgf/m^2$、p_{wL}為$0.00\ kgf/m^2$。支撐柱本身之側向設計風力 $q_{w3} = 16.03\ kgf/m$。

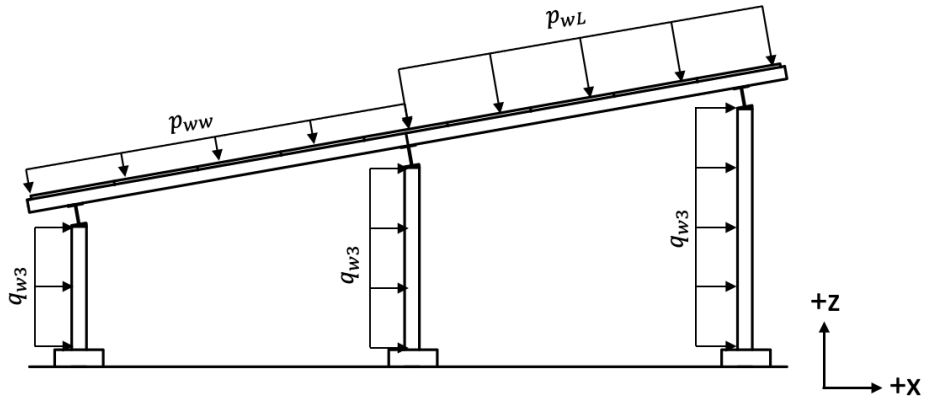


圖 6-25 示範例 4 擬議新版耐風規範之主要風力作用圖（風向角$180°$）

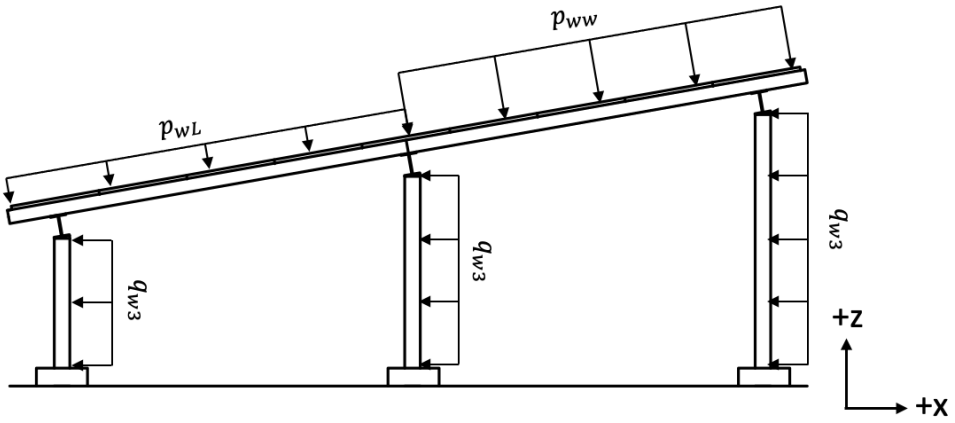


圖 6-26 示範例 4 擬議新版耐風規範之主要風力作用圖（風向角$0°$）

根據圖 6-27，若風朝 $+y$向吹，也就是風向角$90°$時，在載重類別 A 下由面板傳遞至支撐柱之設計風壓p_{w1}為$-28.85\ kgf/m^2$、p_{w2}為$-21.64\ kgf/m^2$，載重類別 B 下由面板傳遞至支撐柱之設計風壓p_{w1}為$28.85\ kgf/m^2$、p_{w2}為

18.03 kgf/m^2。支撐柱本身之側向設計風力 $q_{w3} = 7.07\ kgf/m$。若風朝 $-y$向吹其設計風力與$+y$向相同，只是方向相反。

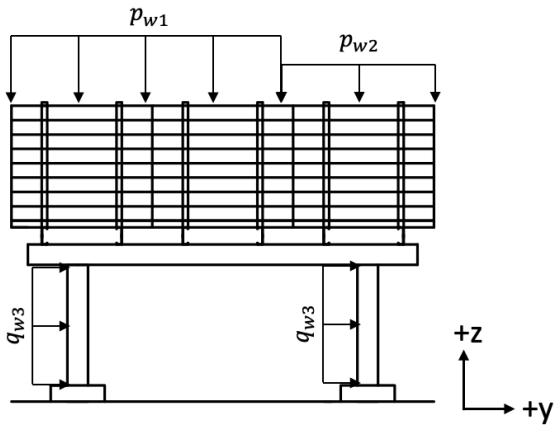


圖 6-27 示範例 4 擬議新版耐風規範之主要風力作用圖（風向角90°）

(3) 根據現行「建築物耐風設計規範與解說」之局部構件風壓公式估算風壓

風載重考慮由面板傳遞至支撐柱之設計風力及支撐柱本身之設計風力兩項。面板傳遞至支撐柱之設計風壓根據「建築物耐風設計規範與解說」(2014)第 3.4 節進行計算，其設計風壓列於表 6-5，而支撐柱本身之側向設計風力列於表 6-6。

如圖 6-28，中間柱子承受風壓面積的設計正風壓為60.70 kgf/m^2，設計負風壓為57.06 kgf/m^2。兩側柱子承受風壓面積的設計正風壓為60.70 kgf/m^2，設計負風壓為57.06 kgf/m^2。其中正風壓表示力量指向面板，負風壓表示力量遠離面板上表面。若風朝 $+x$向吹，支撐柱本身之側向設計風力 $q_{w3} = 16.03\ kgf/m$。

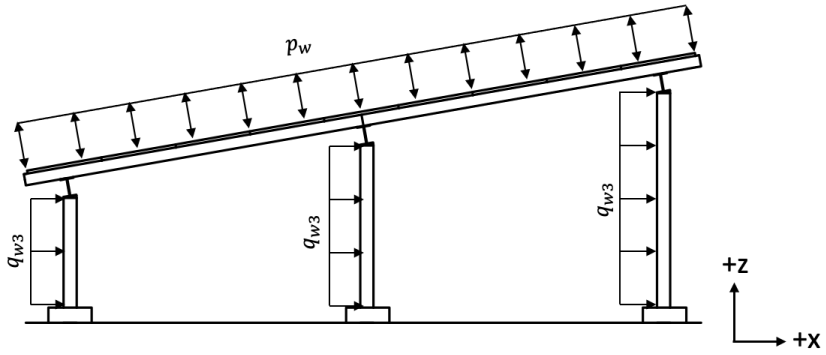


圖 6-28 示範例 4 耐風規範之局部風壓作用圖（$+x$向）

綜合以上三種風載重算法，由於(1)之結果不合理，(3)之結果可能會過於保守，故本示範例選擇(2)所得風壓作為柱及基座之檢核。

靜載重包含梁柱自重與模組自重，模組自重為$20kgf/$塊，故橫梁所受之模組單位長自重 $q_D = 10\ kg/m$，橫梁單位長自重為 $7.51\ kg/m$、縱梁及柱單位長自重為 $44.1\ kgf/m$。

本例利用 SAP 2000 分析，將構件的斷面、材料特性輸入，並施加風載重、靜載重及可求得柱變形量及構件的應力，為保守底部基座設為鉸接。載重組合有$D \pm 0.9375\ W$、$0.7D \pm 1.25W$。

表 6-13 示範例 4 所有載重組合下對 g 點下方柱產生的最大受力

由面板傳遞至支撐柱之設計風壓(力)之估算依據	柱軸拉力（kgf）	柱軸壓力（kgf）	柱頂側位移(mm)	應力比
(1)現行耐風設計規範之主要構件風力公式	44.94	454.932	6.35	0.14
(2)擬議新版耐風設計規範之主要構件風壓公式	337.67	925.56	15.41	0.21
(3)現行耐風設計規範之局部構件風壓公式	680.09	1105.34	15.03	0.276

表 6-14 示範例 4 所有載重組合下對 k 點下方柱產生的最大受力

由面板傳遞至支撐柱之設計風壓(力)之估算依據	柱軸拉力（kgf）	柱軸壓力（kgf）	柱頂側位移(mm)	應力比
(1)現行耐風設計規範之主要構件風力公式	44.66	355.26	6.34	0.10
(2)擬議新版耐風設計規範之主要構件風壓公式	383.20	662.23	15.41	0.19
(3)現行耐風設計規範之局部構件風壓公式	379.53	685.68	15.03	0.231

應力檢核

在載重組合 $0.7D + 1.25W$（風向角0°、載重類別 B）下有最大軸拉力 $383.20\ kgf$，在載重組合$0.7D + 1.25W$（風相角180°、載重類別 A）下有最大軸壓力$925.07\ kgf$，用 AISC-ASD96 進行檢核，得柱應力比小於1，確認符合規範。

變形檢核

因太陽光電版模組鎖固可能因為振動產生鬆弛，故建議增加撓度限制以約束螺栓鬆弛，例如可參考「建築技術規則建築設計施工編」第 245 條，確認容許層間變位二百分之一。在載重組合為$1.0D + 1.0W$下有最大變形量$15.4\ mm$。

$$\text{容許變位} = \frac{\text{柱高}}{200} = 17.38\ mm \geq 15.4\ \text{mm}$$，最大變形 15.4 mm 檢核通過。

第五節 扣件之耐風分析及檢核

扣件接合設計時，在實務上構件有接合的地方都需要檢核，除了考量螺栓本身可能發生的拉力破壞、剪力破壞、拉剪聯合破壞及承壓破壞等破壞模式，接合處的扣具及構件的破壞模式也須考慮，包括總斷面破壞、淨斷面破壞及塊狀剪力撕裂等。另外，若有進行銲接接合，銲材所承受之應力值也應符合容許應力範圍，使接合處強度滿足要求。本手冊僅示範螺栓拉力破壞及剪力破壞之檢核。

本例扣件之設計同樣使用容許應力法，參考「鋼結構容許應力設計法規範及解說」(2010)之規定，考慮載重組合$D \pm 0.9375\,W$、$0.7D \pm 1.25W$，此外對於接合點之偏心問題亦應適當考量。根據臺中市結構工程技師公會在 108 年編寫「太陽光電系統支撐架結構設計參考手冊草案(修訂版)」之 4.3 螺栓接合內容所述，使用熱軋型鋼構材並採容許應力設計法分析設計者，可參考「鋼結構容許應力設計法規範及解說」(2010)第 10.3 節進行檢核；使用冷軋型鋼構材者，可參考「冷軋型鋼構造建築物結構設計規範及解說」(2016)第 11.3 節及第 11.5 節進行檢核。

本範例針對螺栓拉力破壞、剪力破壞及拉剪聯合破壞以「鋼結構容許應力設計法規範及解說」 (2010)之規定進行螺栓：螺栓容許剪應力F_v及螺栓容許張應力 F_T可參考鋼結構容許應力設計 10.3 節得知，若螺栓承受拉力及剪力同時作用時，其標稱斷面 A_b上之應力需再按規定折減。

壹、面板接橫梁之扣件

面板接橫梁扣件 j 如圖 6-29 所示，兩片模組以中壓塊連接於下方橫梁上，中壓塊使用 A2-70 M8 螺栓鎖在橫梁上。

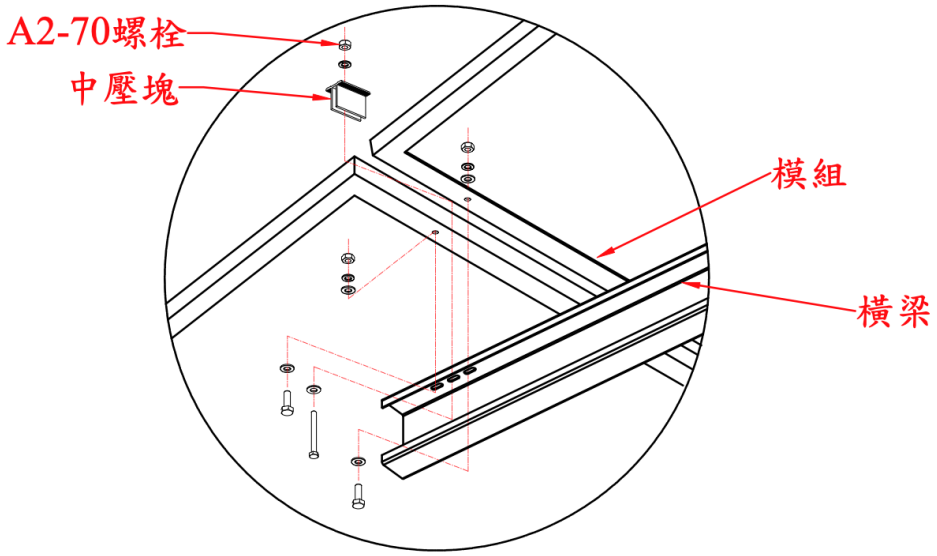


圖 6-29 地面單斜式棚架型系統之面板接橫梁扣件接合圖

資料來源：修改自[16]

螺栓拉力分析

風載重採用表 6-5 中面板接橫梁扣件 j 之設計正風力77.40 kgf，方向垂直指向面板上表面，對此螺栓而言為壓力；設計負風力73.27 kgf，方向垂直遠離面板上表面，對此螺栓而言為拉力；靜載重為所承受風壓面積中的模組自重，每塊 20kgf，故單一螺栓所承擔之靜載重為 20kgf/4 × 2 = 10 kgf，方向垂直指向地面。在載重組合0.7D − 1.25W下可對螺栓造成最大軸拉力84.69 kgf，此時造成的剪力為1.22 kgf。

螺栓應力檢核

因為在「鋼結構容許應力設計法規範及解說」(2010)和「冷軋型鋼構造建築物結構設計規範及解說」(2016)中都沒有不鏽鋼螺栓的標稱拉力及剪力強度，故參考 CNS 4234-1「不鏽鋼結件之機械性質－第 1 部：螺栓、螺釘及螺樁」得 A2-70 的抗拉強度為$F_u = 700MPa$、降伏強度$F_y = 450\ MPa$，以及 M8 螺栓標稱應力面積 $A = 39.2\ mm^2$，並配合「鋼結構容許應力設計法規範及解說」(2010)

的表 10.3-2「螺栓及螺牙桿件之容許應力」求得其容許張應力$F_t = 0.33F_u = 231\,MPa$，容許剪應力 $F_v = 0.17F_u = 119Mpa$。

螺栓容許拉力$F_T = 231\,MPa \times 39.2\,mm^2 = 923\,kgf > 84.69$ kgf，檢核通過。

螺栓容許剪力$F_S = 231\,MPa \times 39.2\,mm^2 = 4665\,N > 1.22$ kgf，檢核通過。

其它檢核

另外因接合之中壓塊厚度較薄，容易產生破壞，建議中壓塊之檢核全斷面降伏、淨斷面撕裂、塊狀剪裂等。

貳、橫梁接縱梁之扣件

橫梁接縱梁扣件如圖 6-30 所示，假設橫梁以扣件連接於下方縱梁上。所謂扣件包括角鋼及螺栓，橫梁以螺栓 A、B、C、D 固定於角鋼上，角鋼再以螺栓 E、F 固定於縱梁上，其中螺栓為 F10T-M10，角鋼為 L*100mm*75mm*7mm。

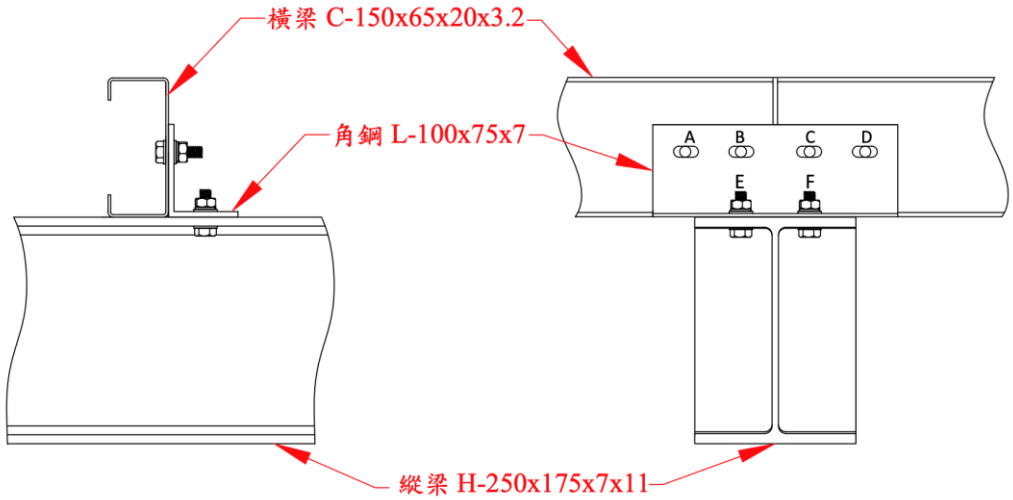


圖 6-30 地面單斜式棚架型系統之橫梁接縱梁扣件接合圖

資料來源：修改自[16]

螺栓分析

風載重採用表 6-5 中橫梁接縱梁扣件 c 之設計正風力206.39 kgf ，方向垂直指向面板上表面，對螺栓 A 而言為剪力，對螺栓 E 而言為壓力；設計負風力

194.00 kgf，方向垂直遠離面板上表面，對螺栓 A 而言為拉力，對螺栓 E 而言為壓力；靜載重為所承受風壓面積中的模組及橫梁自重，故單一扣件所承擔之淨載重為 70 kgf，方向垂直指向地面。

在載重組合$0.7D + 1.25W$下會造成傳進此扣件的最大軸壓力306.27 kgf，此時剪力為 8.51 kgf。力量由螺栓 A、B、C、D 傳入，對螺栓 A 造成的拉力為 2.13 kgf、剪力為 76.57 kgf；之後載重傳至螺栓 E、F，對螺栓 E 造成的壓力為 153.14 kgf、剪力為 4.26 kgf。

在載重組合$0.7D - 1.25W$下會造成傳進此扣件的最大軸拉力194.22 kgf，此時剪力為 8.51 kgf。力量由螺栓 A、B、C、D 傳入，對螺栓 A 造成的拉力為 2.13 kgf、剪力為 48.56 kgf；之後載重傳至螺栓 E、F，對螺栓 E 造成的拉力為 98.11 kgf、剪力為 4.26 kgf。

螺栓 A 剪力檢核

根據「鋼結構容許應力設計法規範及解說」(2010)的表 10.3-2「螺栓及螺牙桿件之容許應力」，F10T 之容許剪應力 $F_v = 1.87\ tf/cm^2$。M10 螺栓標稱應力面積 $A = 61.2\ mm^2$。螺栓容許剪力 $F_S = 1.87\ tf/cm^2 \times 61.2\ mm^2 = 1144\ kgf > 76.57$ kgf，檢核通過。

螺栓 E 拉力檢核

根據「鋼結構容許應力設計法規範及解說」(2010)的表 10.3-2「螺栓及螺牙桿件之容許應力」，F10T 之容許張應力$F_t = 3.62\ tf/cm^2$。M10 螺栓標稱應力面積 $A = 61.2\ mm^2$。螺栓容許拉力 $F_T = 3.62\ tf/cm^2 \times 61.2\ mm^2 = 2215 kgf > 98.11$ kgf，檢核通過。

參、縱梁接柱之扣件

縱梁接柱扣件如圖 6-31 所示，假設縱梁以扣件連接於下方柱上。所謂扣件包括螺栓及柱頂板，縱梁以六個螺栓固定於柱頂板上，柱頂板與柱銲接固定，其中螺栓為 F10T-M10，柱頂板尺寸為 280mm*125mm*10 mm。

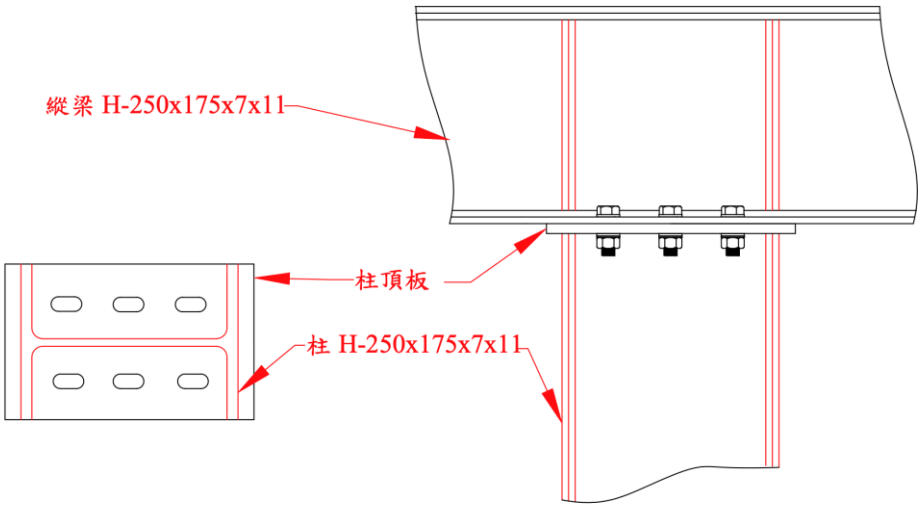


圖 6-31 地面單斜式棚架型系統之縱梁接柱扣件接合圖

資料來源：修改自[16]

螺栓分析

風載重採用表 6-5 中面縱梁接柱扣件的設計正風力619.16 kgf ，方向垂直指向面板上表面，對螺栓而言為壓力；設計負風力582.01 kgf，方向垂直遠離面板上表面，對螺栓而言為拉力；靜載重為所承受風壓面積中模組及橫梁、縱梁的自重，故單一螺栓所承擔之靜載重為 273.76 kgf，方向垂直指向地面。

在載重組合0.7D − 1.25W下會造成傳進此扣件的最大軸拉力538.80 kgf，此時造成的剪力為33.28 kgf。對單一螺栓造成的拉力為89.80 kgf，剪力為5.54 kgf。

螺栓應力檢核

根據「鋼結構容許應力設計法規範及解說」(2010)的表 10.3-2「螺栓及螺牙桿件之容許應力」，F10T 之容許張應力$F_t = 3.62\ tf/cm^2$。M10 螺栓標稱應力面積 $A = 61.2\ mm^2$。螺栓容許拉力 $F_T = 3.62\ tf/cm^2 \times 61.2\ mm^2 = 2215 kgf > 89.80\ kgf$，檢核通過。

肆、柱接基座之扣件

柱接基座扣件如圖 6-32 所示，柱接基座扣件假設柱以扣件連接於下方基座。所謂扣件包括化學錨栓及柱底板，將柱與柱底板銲接固定，並將其用化學錨栓將柱底板與基座混凝土相接。

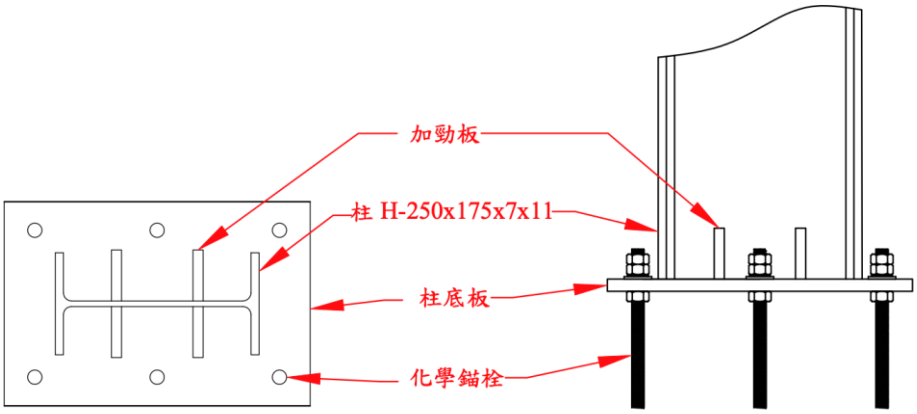


圖 6-32 地面單斜式棚架型系統之柱接基座扣件接合圖

資料來源：修改自[16]

基座分析

基座承受支撐柱所受風力及自重。其中面板傳遞至支撐柱之設計風壓，一樣建議取用擬議新版「建築物耐風設計規範與解說」之主要構件風壓公式計算結果進行檢核。可得載重組合 $0.7D + 1.25W$（風相角0°、載重類別 B）下會對一基座造成最大軸拉力 319.03 kgf，此時剪力為98.32 kgf；$0.7D + 1.25W$（風相角 180°、載重類別 A）下會對一基座造成最大軸壓力925.57 kgf，此時剪力為145.63 kgf。

錨栓檢核

混凝土基座之錨栓可依「建築物混凝土結構設計規範」(2023)進行檢核，確認錨栓及混凝土的強度皆足夠。

原地面檢核

另外需檢核最後力量傳遞到下方基礎時承載力是否足夠，確保在拉拔力下不會造成原有地面的破壞。

第七章　平屋頂單斜式棚架型系統之耐風設計（示範例 5）

本章所稱平屋頂單斜式棚架型系統安裝於封閉式建築或部分封閉式建築之平屋頂，含支撐柱且棚架至少有兩個側面各有 80%以上面積為開口（如圖 2-5 所示）。耐風設計的主要目的是確保支撐架在強風環境下能夠維持結構完整性和安全性，而實務上在進行支撐架設計時，尚需考慮不同的載重組合情況，例如靜載重、風載重及地震力之效應，但本示範例只考慮靜載重及風載重之效應。

本示範例先規劃一平屋頂單斜式棚架型系統，由於 CNS 16819「太陽光電系統之設計風載重估算指引」(2022)中未提供平屋頂單斜式棚架型系統的風載重計算方式，故依據建研所委託研究計劃「太陽光電系統之耐風設計規範研擬」成果報告(2019)擬定風載重計算方式，考慮風載重及靜載重作相關之結構設計。本示範例設計流程圖如圖 7-1 所示。

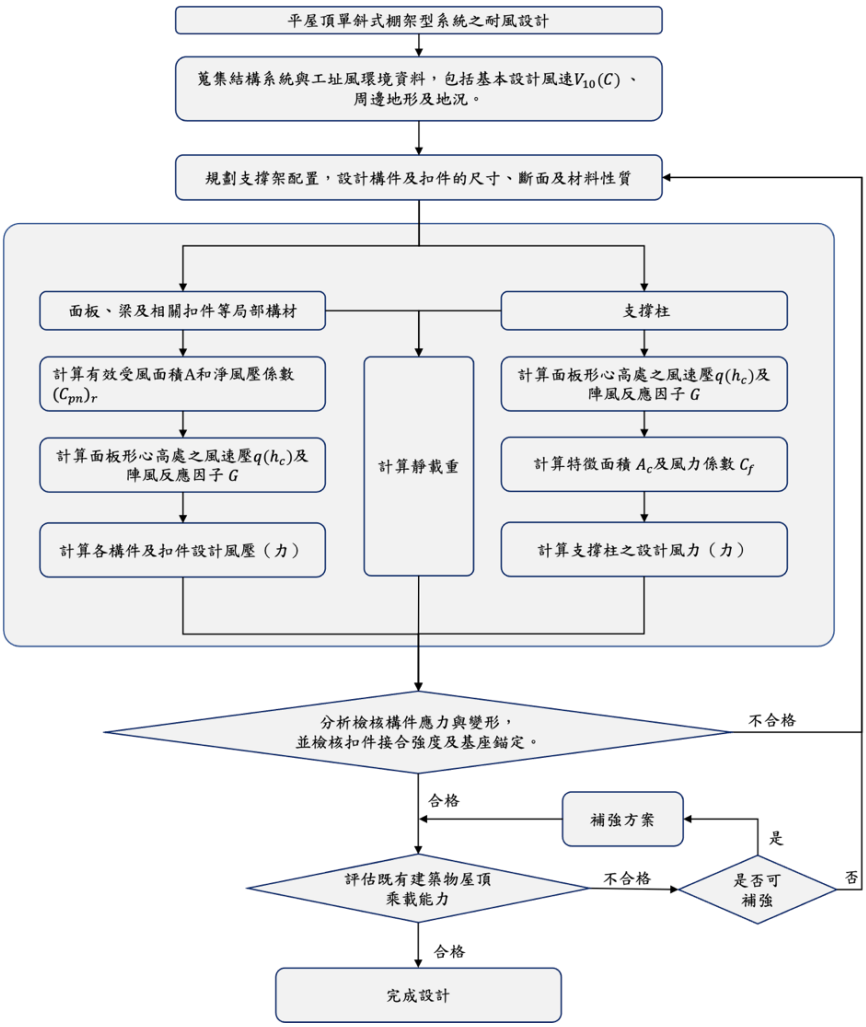


圖 7-1 平屋頂單斜式棚架型系統之耐風設計流程圖

第一節　設計依據

壹、參考依據

1. 內政部，「建築技術規則建築設計施工編」，2004。
2. 內政部，「鋼結構容許應力設計法規範及解說」，2010。
3. 內政部，「建築物耐風設計規範與解說」，2014。
4. 內政部，「冷軋型鋼構造建築物結構設計規範及解說」，2016。
5. 內政部，「建築物混凝土結構設計規範」，2023。
6. 內政部建研所，「太陽光電系統之耐風設計規範研擬」，委託研究計劃成果報告，2019。
7. 經濟部，CNS 4234-1「不鏽鋼結件之機械性質－第 1 部：螺栓、螺釘及螺椿」，2012。

貳、適用範圍

「太陽光電系統之耐風設計規範研擬」成果報告(2019)提供之風壓計算公式適用於同時滿足下列條件之平屋頂單斜式棚架系統：

1. 平屋頂單斜式棚架型系統其需滿足「建築物耐風設計規範與解說」(2014)所定義之封閉式或部分封閉式建築物。
2. 構造物橫風向或扭轉向風力不顯著。
3. 棚架至少有兩個側面各有 80%以上面積為開口。
4. 棚架面之水平投影未超出屋頂面邊緣。

第二節　結構物資料與工址風環境料

本章擬於台中市大甲區一建築物的屋頂上，新建一平屋頂單斜式棚架型太陽光電系統。整體場域之結構系統立體配置圖如圖 7-2 所示。

結構系統平行面板之平面圖如圖 7-3 所示；y向之側視圖如圖 7-4 所示；x向之側視圖如圖 7-5 所示；y向之示意圖如圖 7-6 所示。結構系統之面板由 27 片模組組成，以 60 個扣件分別固定於 6 根橫梁上，每根橫梁分別以 3 個扣件固定於下方縱梁上，每根縱梁分別 2 個扣件固定於下方 2 根柱子上，每根柱子固定於混凝土基座上。

根據「設置再生能源設施免請領雜項執照標準」(2021)，設置於建築物屋頂或露臺，包含支撐架並得結合新設頂蓋，其高度自屋頂面或露臺面起算四點五公尺以下之太陽光電發電設備，得免依建築法規定申請雜項執照。本示範立假設之面板與屋頂面最大距離 $h_2 = 3.561\ m$。

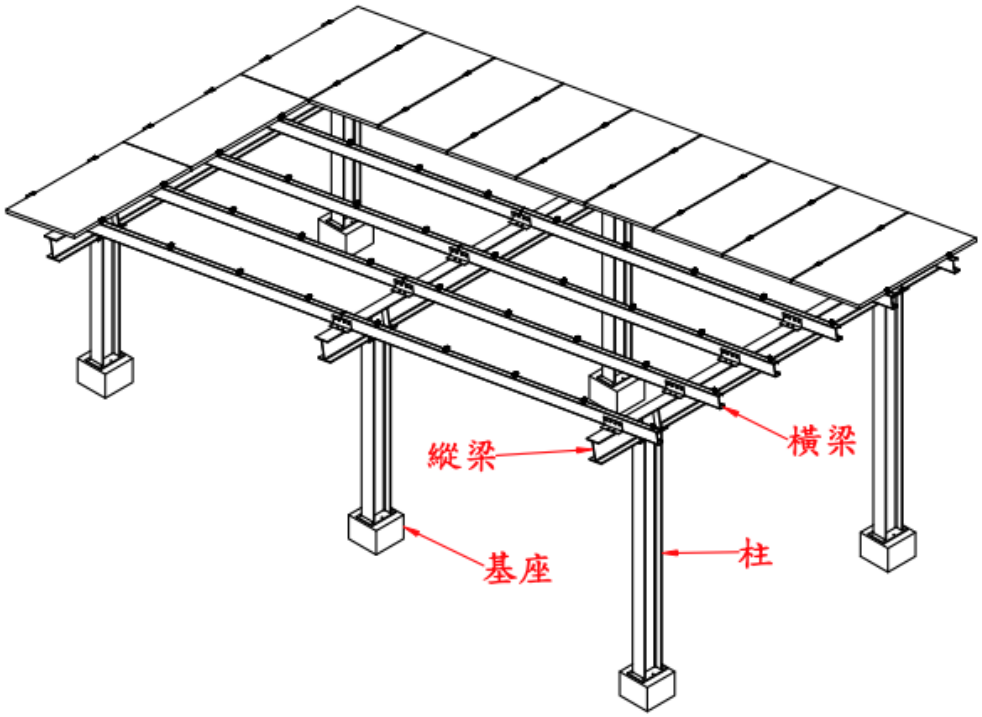


圖 7-2 平屋頂單斜式棚架型系統之立體配置圖

資料來源：[16]

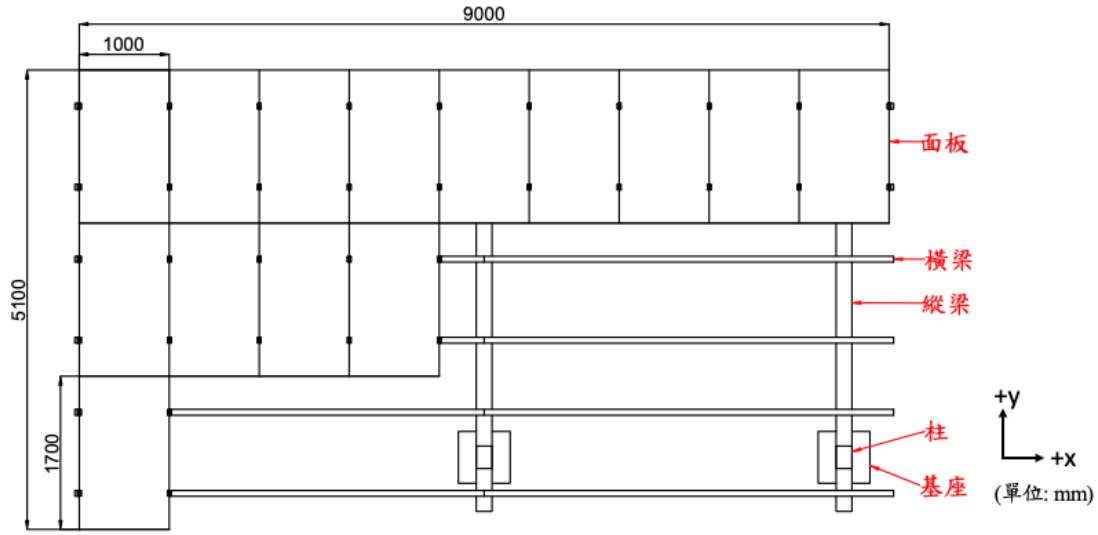


圖 7-3 平屋頂單斜式棚架型系統之平行面板之平面圖

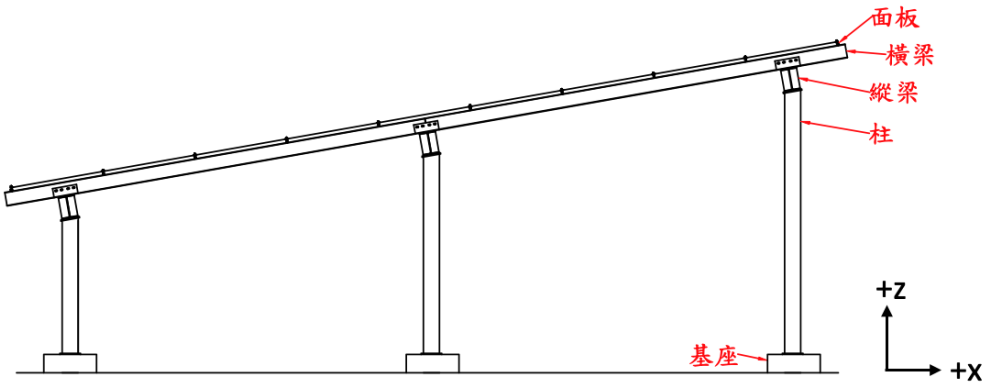


圖 7-4 平屋頂單斜式棚架型系統 y 向之側視圖

資料來源：修改自[16]

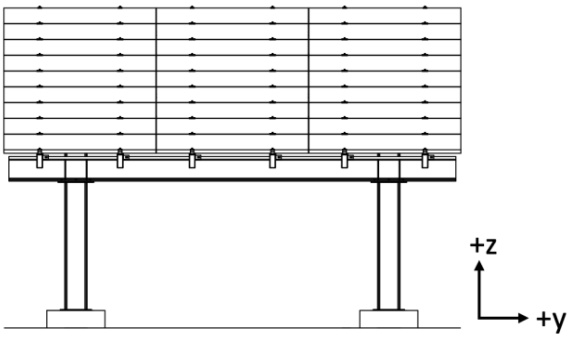


圖 7-5 平屋頂單斜式棚架型系統 x 向之側視圖

資料來源：修改自[16]

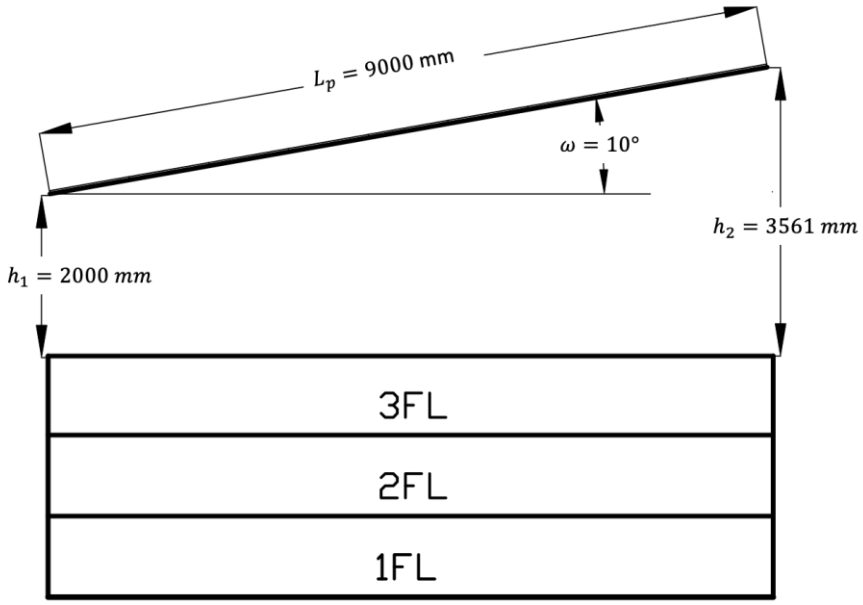
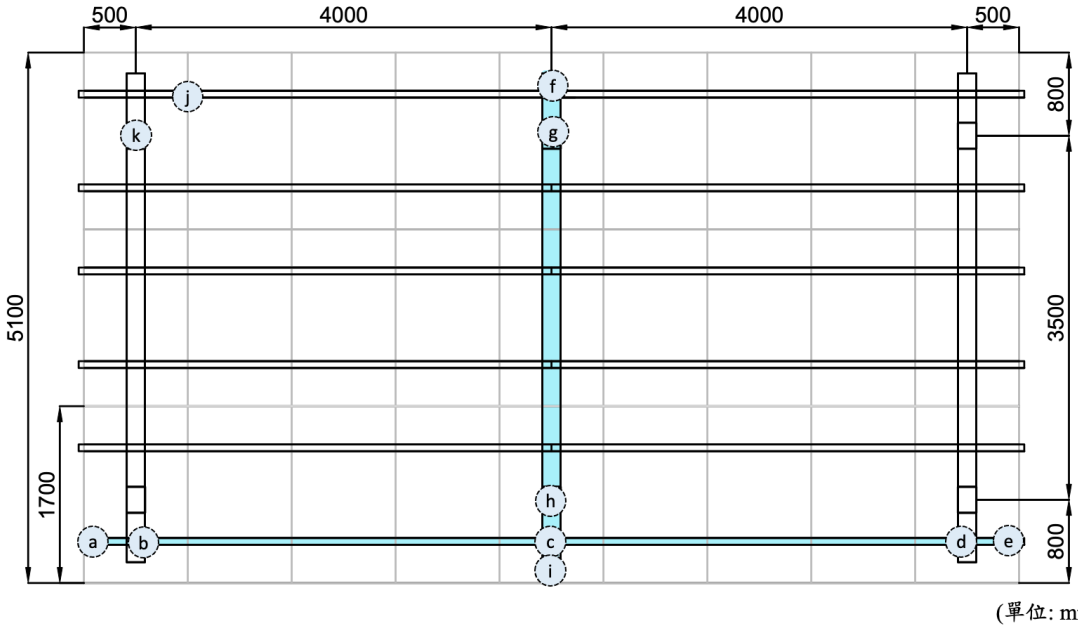


圖 7-6 平屋頂單斜式棚架型系統 y 向之示意圖

理論上應根據各構件及扣件所承受的風壓情況，分別進行其設計，但由於設計程序類似，本範例僅分析設計圖 7-7 之橫梁 a-b-c-d-e、縱梁 f-g-h-i、g 點下方柱、k 點下方柱、面板接橫梁扣件（其形心為 j 點）、橫梁接縱梁扣件（其形心為 c 點）、縱梁接柱扣件（其形心為 g 點）、縱梁接柱扣件（其形心為 k 點）。



(單位: mm)

圖 7-7 平屋頂單斜式棚架型系統之設計位置圖

結構物資料包含太陽光電系統尺寸、面板配置、用途係數 I；工址風環境包含基本設計風速$V_{10}(C)$、結構物周邊地形以及地況。本節擬定結構物資料與工址風環境如下表 7-1 所示。

表 7-1 平屋頂單斜式棚架系統之結構物資料與工址風環境

結構物資料	所在建築物	建築物屋頂高度（不含屋頂凸出物）10 m，有女兒牆。
	太陽光電系統	面板由 27 片模組組成，以 60 個扣件分別固定於 6 根橫梁上，每根橫梁分別以 3 個扣件固定於下方縱梁上，每根縱梁分別 2 個扣件固定於下方 2 根柱子上，每根柱子固定於混凝土基座上。
	基本尺寸設置	1. 面板弦長 $L_p = 9\ m$ 2. 模組角度 $\omega = 10°$。 3. 面板與屋頂面最小距離 $h_1 = 2.0\ m$。 4. 面板與屋頂面最大距離 $h_2 = 3.561\ m$。 5. 模組尺寸：1700 mm × 1000 mm × 40 mm 模組重$20kgf = 196N$，共 27 片 。
	下方阻擋	單斜式棚架下方阻塞比低於 50%，視為無阻擋。
	用途係數	根據「建築物耐風設計規範與解說」規範 2.5 節，依照重要程度可將 I 值分為1.1、1.0或 0.9，本範例取 I = 1.0。
工址風環境	基本設計風速$V_{10}(C)$	根據「建築物耐風設計規範與解說」規範 2.4 節，台中市大甲區的$V_{10}(C) = 32.5\ m/s$。
	地況種類	依結構物各方向上風處之地表粗糙度決定皆為地況 B。
	地形係數	無特殊地形。

第三節　各構件及扣件之設計風壓（力）

本示範例中橫梁、縱梁與相關扣件之設計風壓，以及從面板傳至支撐柱的設計風壓，皆以「太陽光電系統之耐風設計規範研擬」成果報告(2019)中平屋頂單斜式棚架型之設計風壓公式計算。

平屋頂單斜式棚架型系統之設計風壓可依 $P = q(h_c) \times G \times (C_{pn})_r \times (\gamma_p)_c$ 計算，其中$q(h_c)$為面板形心高h_c處之風速壓；G 為陣風反應因子；$(C_{pn})_r$為平屋頂單斜式棚架淨風壓係數，可查成果報告的附表 7-6 而得；$(\gamma_p)_c$為女兒牆修正因子，當決定正設計風壓時，$(\gamma_p)_c$取 0.9；當決定負設計風壓時，$(\gamma_p)_c$取 1。其計算細節列於本節第壹與第貳小節。

支撐柱本身側向之設計風力應依據「建築物耐風設計規範及解說」(2014) 2.2 節中開放式建築物之公式決定，其計算細節列於本節第參小節。

實際上可將平屋頂單斜式棚架之支撐柱視為主要風力抵抗系統，但目前仍欠缺相關之風壓(力)之計算方式。「建築物耐風設計規範及解說」(2014)中表 2.9「開放式建築物之單斜式屋頂的風力係數」及擬議新版「建築物耐風設計規範與解說」中表 3.8 (a)「開放式建築物之單斜屋頂的淨風壓係數」雖是針對地面單斜式棚架支撐柱之規定，但本示範例為了參考比較，也以其公式估算從面板傳至平屋頂單斜式棚架支撐柱的設計風壓，其計算細節列於本節第肆小節。

壹、各構件及扣件之有效受風面積及淨風壓係數

根據「建築物耐風設計規範及解說」(2014) 1.3 節有效受風面積 A 之定義可知，結構構件之有效受風面積 A 為跨距長度與有效寬度之乘積，有效寬度不必小於其跨距長度的 1/3。對扣件而言，有效受風面積 A 不得大於單一扣件之受風面積。決定有效受風面積及計算平屋頂單斜式棚架淨風壓係數方式如下：

[步驟 1] 有效受風面積

(a) 橫梁 a-b-c-d-e：

如圖 7-8 所示，將面板所承受風力傳遞至橫梁 a-b-c-d-e 上，且橫梁架設在間距為 4 m 的縱梁上，分別以 a-b 段、b-c 段、c-d 段及 d-e 段表示。

針對 a-b 段橫梁，其跨距長度為懸臂段長度 0.5 m，承受風壓面積之寬度為 0.85 m，故承受風壓面積為$0.50\ \text{m} \times 0.85\ \text{m} = 0.425\ \text{m}^2$。a-b 段橫梁之有效寬度為 $\max(0.85, 0.50/3) = 0.85\ \text{m}$，故其有效受風面積為 $A = 0.50\ \text{m} \times 0.85\ \text{m} = 0.425\ \text{m}^2$。同理，d-e 段橫梁之承受風壓面積為$0.425\ \text{m}^2$，有效受風面積亦為$0.425\ \text{m}^2$。

針對 b-c 段橫梁，跨距長度為縱梁間距 4.0 m，承受風壓面積之寬度為 0.85 m，故承受風壓面積為$4.0\ \text{m} \times 0.85\ \text{m} = 3.4\ \text{m}^2$。b-c 段橫梁之有效寬度為 $\max(0.85, 4.00/3) = 1.33\ \text{m}$，故其有效受風面積為 $A = 1.33\ \text{m} \times 0.85\ \text{m} = 5.333\ \text{m}^2$。同理，c-d 段橫梁之承受風壓面積為$3.4\ \text{m}^2$，有效受風面積為$5.333\ \text{m}^2$。

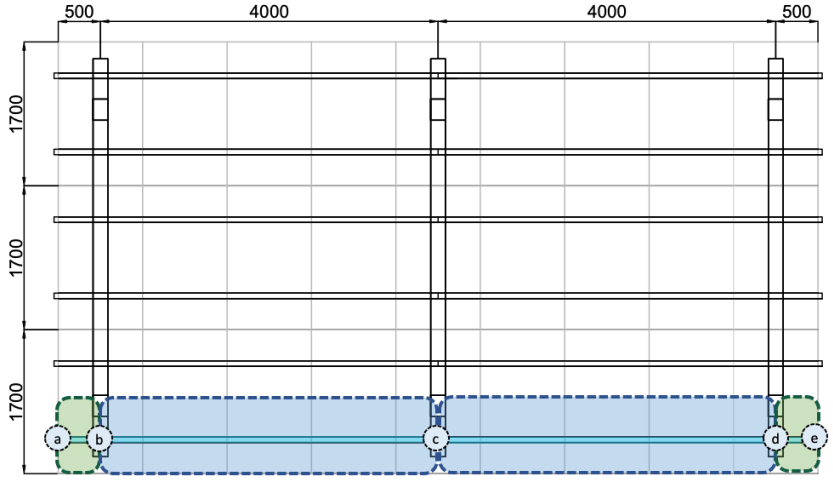


圖 7-8 示範例 5 之橫梁 a-b-c-d-e 有效受風面積示意圖

(b) 縱梁 f-g-h-i：

如圖 7-9 所示，將橫梁所承受風力傳遞至縱梁 f-g-h-i 上，且縱梁架設在間距為 3.5 m 的柱上，分別以 f-g 段、g-h 段及 h-i 段表示。

針對 f-g 段縱梁，其跨距長度為懸臂段長度 0.8 m，承受風壓面積之寬度為 4.0 m，故承受風壓面積為$0.8\ \text{m} \times 4.0\ \text{m} = 3.20\ \text{m}^2$。f-g 段橫梁之有效寬度為$\max(4.0, 0.8/3) = 4.0\ \text{m}$，故其有效受風面積為$0.8\ \text{m} \times 4.0\ \text{m} = 3.20\ \text{m}^2$。同理，h-i 段縱梁之承受風壓面積為$3.20\ \text{m}^2$，有效受風面積亦為$3.20\ \text{m}^2$。

針對 g-h 段縱梁，其跨距長度為縱梁間距 3.5 m，承受風壓面積之寬度為 4.0 m，故承受風壓面積為$3.5\ \text{m} \times 4.0\ \text{m} = 14.00\ \text{m}^2$。b-c 段橫梁之有效寬度為 $\max(4.0, 3.5/3) = 4.0\ \text{m}$，故其有效受風面積為$3.5\ \text{m} \times 4.0\ \text{m} = 14.00\ \text{m}^2$。

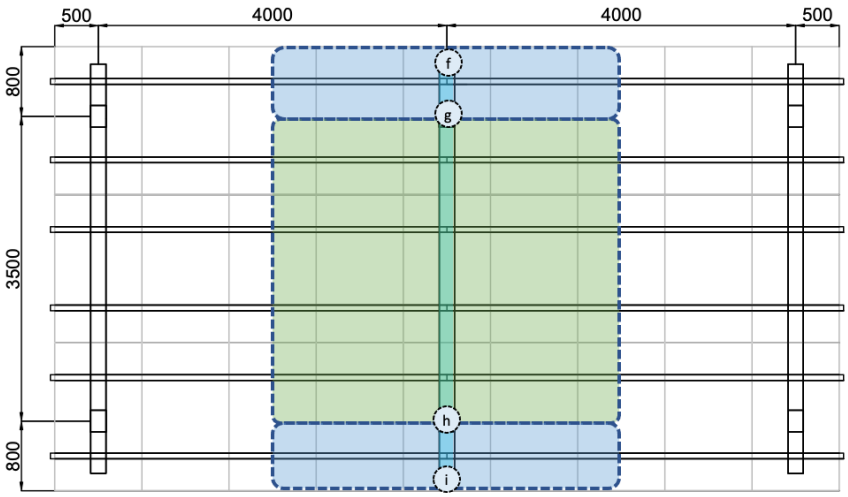


圖 7-9 示範例 5 之縱梁 f-g-h-i 有效受風面積示意圖

(c) g 點下方柱：

如圖 7-10 所示，中間縱梁架設在 g 點及 h 點的縱梁接柱扣件上。

針對 g 點下方柱，其跨距長度為 2.55 m，寬度為 4 m，其承受風壓面積為$2.55\ \text{m} \times 4\ \text{m} = 10.2\ \text{m}^2$。g 點下方柱之有效寬度為$\max(4.0, 2.55/3) = 4.0\ \text{m}$，故其有效受風面積為$2.55\ \text{m} \times 4\ \text{m} = 10.2\ \text{m}^2$。同理，h 點下方柱之承受風壓面積為$10.2\ \text{m}^2$，有效受風面積亦為$10.2\ \text{m}^2$。

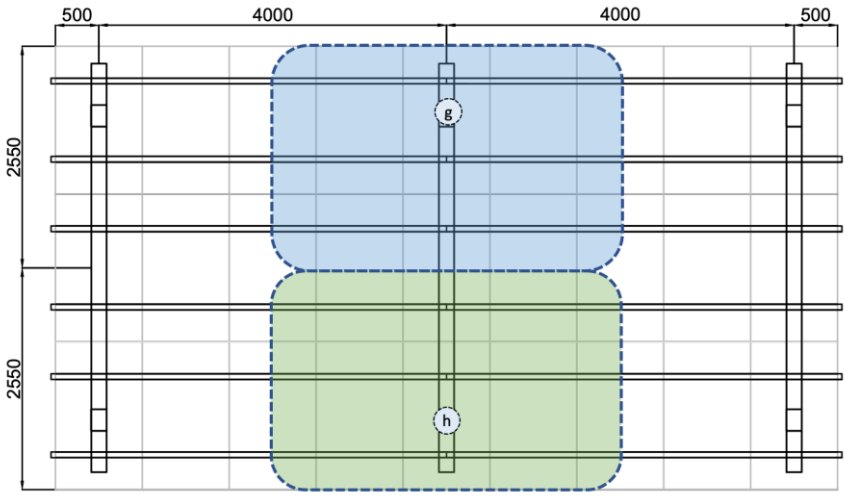


圖 7-10 示範例 5 之 g 點下方柱有效受風面積示意圖

(d) k 點下方柱：

如圖 7-11 所示，兩旁縱梁架設在柱 k 點、l 點、m 點及 n 點的縱梁接柱扣件上。

針對 k 點下方柱，其跨距長度為 2.55 m，寬度為 2.50 m，其承受風壓面積為 $2.55\,\text{m} \times 2.5\,\text{m} = 6.375\,\text{m}^2$。k 點下方柱之有效寬度為 $\max(2.50, 2.55/3) = 2.5\,\text{m}$，故其有效受風面積為 $2.55\,\text{m} \times 2.5\,\text{m} = 6.375\,\text{m}^2$。同理，l 點下方柱、m 點下方柱及 n 點下方柱之承受風壓面積為 $6.375\,\text{m}^2$，有效受風面積亦為$6.375\,\text{m}^2$。

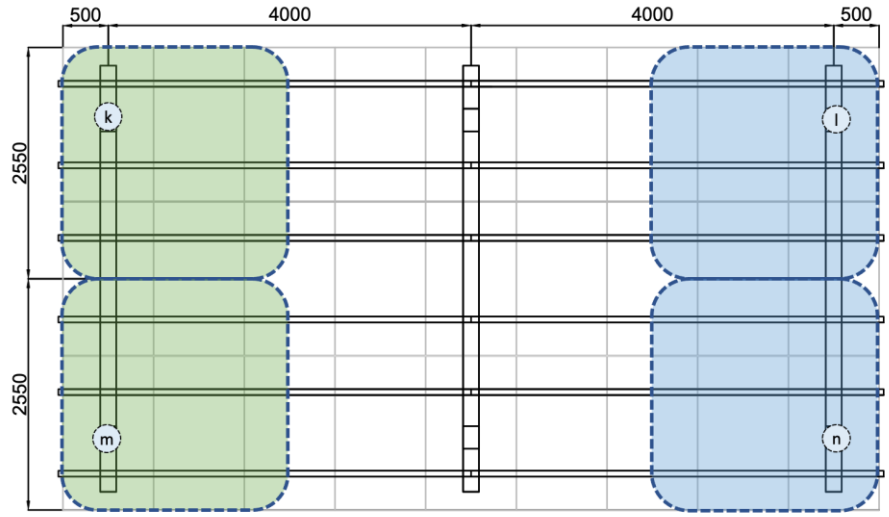


圖 7-11 示範例 5 之 k 點下方柱有效受風面積示意圖

(e) 面板接橫梁扣件 j 點：

如圖 7-12 所示，單一模組尺寸為1.0 m × 1.7 m，並由四個扣件固定，取 j 點面板接橫梁扣件分析，因扣件之有效受風面積不得大於其承受風壓面積，故其有效受風面積為承受風壓面積$A = 1.0\ m \times 0.85\ m = 0.85\ m^2$。

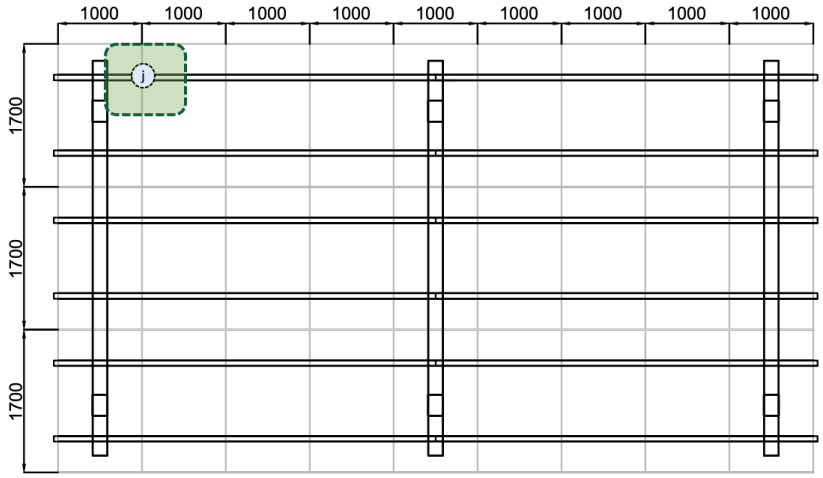


圖 7-12 示範例 5 之面板接橫梁扣件 j 點有效受風面積示意圖

(f) 橫梁接縱梁扣件 c 點：

如圖 7-13 所示，橫梁架設在縱梁 b、c、d 點的橫梁扣件上。取 c 點橫梁接縱梁扣件分析，因扣件之有效受風面積不得大於其承受風壓面積，故其有效受風面積為承受風壓面積$A = 4\ m \times 0.85\ m = 3.4\ m^2$。

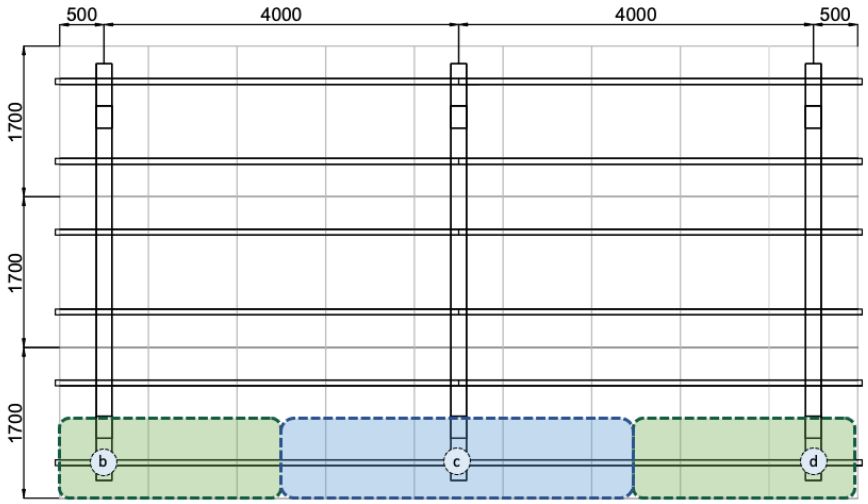


圖 7-13 示範例 5 之橫梁接縱梁扣件 c 點有效受風面積示意圖

(g) 縱梁接柱扣件 g 點：

如圖 7-14 所示，縱梁架設在柱 g 點及 h 點的縱梁接柱扣件上。針對 g 點縱梁接柱扣件分析。因扣件之有效受風面積不得大於其承受風壓面積，故其有效受風面積為承受風壓面積$\mathrm{A} = 2.55\ \mathrm{m} \times 4\ \mathrm{m} = 10.2\ \mathrm{m}^2$。

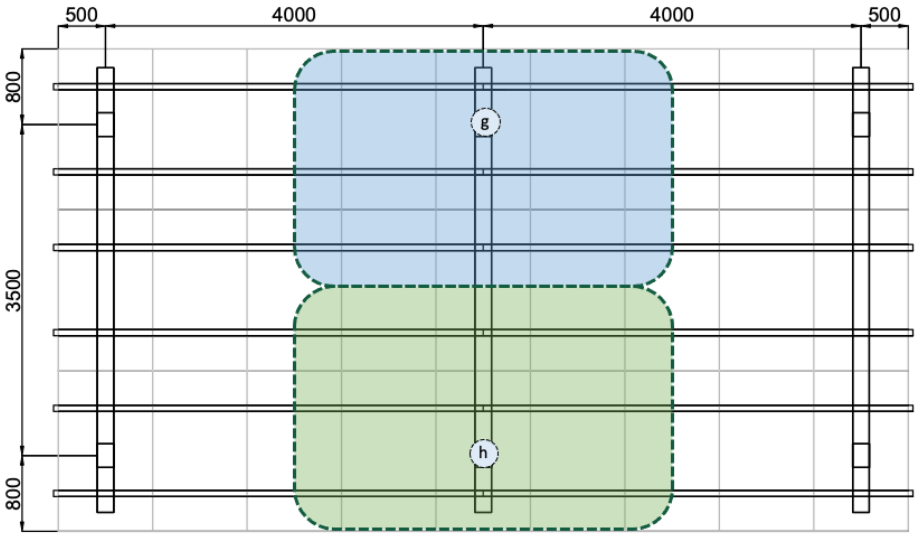


圖 7-14 示範例 5 之縱梁接柱扣件 g 點有效受風面積示意圖

[步驟 2] 平屋頂單斜式棚架淨風壓係數

根據「太陽光電系統之耐風設計規範研擬」成果報告(2019)，如圖 7-15 所示將面板分為區域 3、區域 2、區域 1，區域內平屋頂單斜式棚架淨風壓係數$(C_{pn})_r$可根據表 7-2 對照有效受風面積決定。其中 L 為順風向之建築物水平深度為$9.0 \times \cos 10^{\circ} = 8.863\ m$。a 為最小寬度的 10%，但不得小於 0.9 m，$a = \max\{0.1 \times 5.1\ m, 0.9m\} = 0.9\ m$。

本示範例之$\omega = 10^{\circ}$，對照有效受風面積 A 可得各構件及扣件位在區域 3、區域 2、區域 1 內的$(C_{pn})_r$之值。面板接橫梁扣件 j 的有效受風面積為$0.850m^2$，$\mathrm{a}^2 < A \leq 4\mathrm{a}^2$，對照表 7-2 可得區域 3 的$(C_{pn})_r$為 0.67 和 -2.44，區域 2 的$(C_{pn})_r$為 0.66 和 -1.73，區域 1 的$(C_{pn})_r$為 0.72 和 -1.18。仿照上述面板接橫梁扣件 j 點淨風壓係數的求法，可得其餘構件與扣件的平屋頂單斜式棚架淨風壓係數，彙整後將其列於表 7-3。

表 7-2 平屋頂單斜式棚架型之淨風壓係數表

	有效受風面積(m^2)	$(C_{pn})_r$											
		屋頂下無阻擋						屋頂下有阻擋					
		區域 3		區域 2		區域 1		區域 3		區域 2		區域 1	
10°	$<a^2$	1.01	-3.86	0.74	-1.91	0.73	-1.28	0.74	-4.33	0.58	-2.14	0.75	-1.50
	$>a^2, \leqq 4.0a^2$	0.67	-2.44	0.66	-1.73	0.72	-1.18	0.48	-2.75	0.54	-1.94	0.76	-1.41
	$>4.0a^2$	0.56	-2.00	0.55	-1.45	0.67	-1.06	0.42	-2.24	0.44	-1.62	0.67	-1.22
15°	$<a^2$	1.86	-4.51	1.20	-2.24	0.84	-1.57	--	--	--	--	--	--
	$>a^2, \leqq 4.0a^2$	1.23	-2.74	1.07	-1.96	0.83	-1.45	--	--	--	--	--	--
	$>4.0a^2$	0.99	-2.34	0.87	-1.70	0.72	-1.29	--	--	--	--	--	--
20°	$<a^2$	2.39	-4.86	1.54	-2.47	1.08	-1.78	--	--	--	--	--	--
	$>a^2, \leqq 4.0a^2$	1.58	-2.95	1.37	-2.16	1.06	-1.61	--	--	--	--	--	--
	$>4.0a^2$	1.21	-2.41	1.07	-1.86	0.82	-1.46	--	--	--	--	--	--
25°	$<a^2$	2.75	-5.22	1.78	-2.75	1.22	-2.04	--	--	--	--	--	--
	$>a^2, \leqq 4.0a^2$	1.82	-3.02	1.59	-2.31	1.20	-1.77	--	--	--	--	--	--
	$>4.0a^2$	1.31	-2.59	1.18	-2.07	0.87	-1.67	--	--	--	--	--	--

資料來源：「太陽光電系統之耐風設計規範研擬」成果報告(2019) 表 7-6

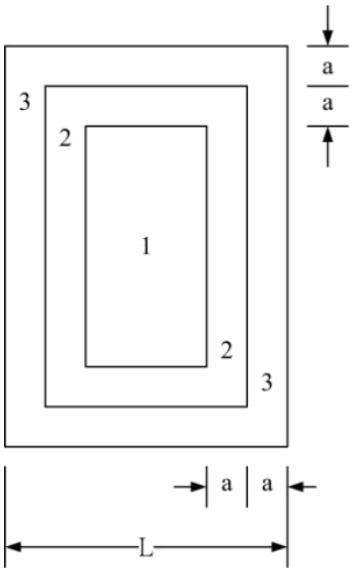


圖 7-15 單斜屋頂區域劃分示意圖

資料來源：「建築物耐風設計規範與解說」(2014) 圖 3.3(a)

表 7-3 示範例 5 構件及扣件之平屋頂單斜式棚架淨風壓係數$(C_{pn})_r$

名稱		有效受風面積 A (m^2)	區域 3		區域 2		區域 1	
橫梁	a-b 段或 d-e 段	0.425	1.01	-3.86	0.74	-1.91	0.73	-1.28
	b-c 段或 c-d 段	5.333	0.56	-2.00	0.55	-1.45	0.67	-1.06
縱梁	f-g 段或 h-i 段	3.200	0.67	-2.44	0.66	-1.73	0.72	-1.18
	g-h 段	14.000	0.56	-2.00	0.55	-1.45	0.67	-1.06
柱	g 點下方	10.200	0.56	-2.00	0.55	-1.45	0.67	-1.06
	k 點下方	6.375	0.56	-2.00	0.55	-1.45	0.67	-1.06
面板接橫梁扣件	i 點	0.850	0.67	-2.44	0.66	-1.73	0.72	-1.18
橫梁接縱梁扣件	c 點	3.400	0.56	-2.00	0.55	-1.45	0.67	-1.06
縱梁接柱扣件	g 點	10.200	0.56	-2.00	0.55	-1.45	0.67	-1.06

貳、構件及扣件之設計風壓（力）

本示範例中橫梁、縱梁與相關扣件之設計風壓，以及從面板傳至支撐柱的設計風壓，皆以「太陽光電系統之耐風設計規範研擬」成果報告(2019)中平屋頂單斜式棚架型之設計風壓公式計算。

[步驟 1] 相關之設計參數

根據「建築物耐風設計規範及解說」(2014)，地況 B 之相關參數$\alpha = 0.25$；$z_g = 400\,m$，用途係數$I = 1.0$，基本設計風速$V_{10}(C) = 32.5\,m/s$。

面板形心離屋頂面高$2.781\,m$。面板形心離地面高 h_c = 建築高 10 m + 面板形心離屋頂面高 $2.781\,m = 12.781\,m$ 。

[步驟 2] 風速壓地況係數$K(z)$與地形係數

根據「建築物耐風設計規範及解說」(2014)式(2.7)：

$$K(h_c) = 2.774\left(\frac{h_c}{z_g}\right)^{2\alpha} = 2.774\left(\frac{12.781}{400}\right)^{2\times 0.25} = 0.50$$ 。

根據「建築物耐風設計規範與解說」規範式(2.8) 計算K_{zt}：因工址附近無特殊地形，$K_{zt} = 1.0$。

[步驟 3]面板形心高度之風速壓$q(h_c)$

根據「建築物耐風設計規範及解說」(2014)式(2.6)，離地面高h_c之風速壓：

$q(h_c) = 0.06 \times K(h_c) \times K_{zt} \times [I\,V_{10}(c)]^2 = 0.06 \times 0.50 \times 1 \times (1.0 \times 32.5)^2 = 31.42\ kgf/m^2$

[步驟 4]陣風反應因子

假設棚架之 $f_n > 1Hz$ ，為非柔性結構，故計算普通建築物之陣風反應因子 G。

根據「建築物耐風設計規範及解說」(2014)式（2.12），紊流積分尺度$L_{\bar{z}}$：

$L_{\bar{z}} = \lambda(\bar{z}/10)^{\bar{\varepsilon}} = 98(9/10)^{0.33} = 94.651$

其中，等效結構高度 $\bar{z} = \max(0.6h_c, z_{min}) = \max(0.6 \times 12.781, 9) = 9\,m$。

根據「建築物耐風設計規範及解說」(2014)式（2.10），紊流強度$I_{\bar{z}}$：

$I_{\bar{z}} = c(10/\bar{z})^{1/6} = 0.3(10/9)^{1/6} = 0.305$

根據「建築物耐風設計規範及解說」(2014)式（2.11），背景反應Q：

$$Q_x = \sqrt{\frac{1}{1+0.63\left(\frac{B+h_c}{L_{\bar{z}}}\right)^{0.63}}} = \sqrt{\frac{1}{1+0.63\left(\frac{5.1+12.781}{94.651}\right)^{0.63}}} = 0.905$$

$$Q_y = \sqrt{\frac{1}{1+0.63\left(\frac{B+h_c}{L_{\bar{z}}}\right)^{0.63}}} = \sqrt{\frac{1}{1+0.63\left(\frac{8.863+12.781}{94.651}\right)^{0.63}}} = 0.895$$

其中，若來風平行 x 向，垂直於風向之面板水平尺寸 B=5.1 m，若來風平行 y 向，垂直於風向之面板水平尺寸 B=8.863m。

根據「建築物耐風設計規範及解說」(2014)式（2.9），普通建築物支陣風反應因子 G 為：

$$G_x = 1.927\left(\frac{1+1.7q_Q I_{\bar{z}} Q_x}{1+1.7q_V I_{\bar{z}}}\right) = 1.927\left(\frac{1+1.7\times 3.4\times 0.305\times 0.905}{1+1.7\times 3.4\times 0.305}\right) = 1.810$$

$$G_y = 1.927\left(\frac{1+1.7q_Q I_{\bar{z}} Q_y}{1+1.7q_V I_{\bar{z}}}\right) = 1.927\left(\frac{1+1.7\times 3.4\times 0.305\times 0.895}{1+1.7\times 3.4\times 0.305}\right) = 1.798$$

其中，背景反應尖峰因子和背景反應尖峰因子均可取 3.4，以此算出風向為 x 向時$G_x = 1.810$，風向為 y 向時$G_y = 1.798$。或者也可依據規範直接取 $G = 1.88$，計算過程會較簡單，但因包絡各種情況，所得風力值較保守。以下取 $G = G_x = 1.810$來計算。

[步驟 5]設計正負風壓與風力

根據「太陽光電系統之耐風設計規範研擬」成果報告 (2019)，平屋頂單斜式棚架型設系統中風壓依下式計算：

$$P = q(h_c) \times G \times (C_{pn})_r \times (\gamma_p)_c \quad \text{.....(7.1)}$$

其中$q(h_c)$為面板形心高h_c處之風速壓；G 為陣風反應因子；$(C_{pn})_r$為平屋頂單斜式棚架淨風壓係數；$(\gamma_p)_c$為女兒牆修正因子，由於本例有女兒牆，故計算正設計風壓時$(\gamma_p)_c$ =0.9，計算負設計風壓時女兒牆修正因子$(\gamma_p)_c$ =1.0。

舉例而言，面板接橫梁扣件的有效受風面積$A = 0.85m^2$，$a^2 < A \leq 4a^2$，若其全位於區域 3 內，其$(C_{pn})_r$為 0.67和 -2.44，則該扣件設計正風壓為

$31.42 \times 1.810 \times 0.67 \times 0.9 = 34.29\ kgf/m^2$ ，負風壓為 $31.42 \times 1.810 \times -2.44 \times 1.0 = -138.76\ kgf/m^2$。仿照上述區域 3 的面板扣件計算流程，可分別計算得到其他扣件及構件在不同區域的設計正（負）風壓，彙整後將其數值分析結果列於表 7-4。

表 7-4 示範例 5 不同區域之設計風壓

名稱		有效受風面積 A (m^2)	設計風壓（單位 kgf/m^2）					
			區域 3		區域 2		區域 1	
橫梁	a-b 段或 d-e 段	0.425	51.70	-219.52	37.88	-108.62	37.36	-72.79
	b-c 段或 c-d 段	5.333	28.66	-113.74	28.15	-82.46	34.29	-60.28
縱梁	f-g 段或 h-i 段	3.200	34.29	-138.76	33.78	-98.39	36.85	-67.11
	g-h 段	14.000	28.66	-113.74	28.15	-82.46	34.29	-60.28
柱	g 點下方	10.200	28.66	-113.74	28.15	-82.46	34.29	-60.28
	k 點下方	6.375	28.66	-113.74	28.15	-82.46	34.29	-60.28
面板接橫梁扣件	j 點	0.850	34.29	-138.76	33.78	-98.39	36.85	-67.11
橫梁接縱梁扣件	c 點	3.400	28.66	-113.74	28.15	-82.46	34.29	-60.28
縱梁接柱扣件	g 點	10.200	28.66	-113.74	28.15	-82.46	34.29	-60.28

針對面板接橫梁扣件 j，因承受風壓面積完全位於區域 3 內，故該扣件設計正（負）風壓為$34.29\ kgf/m^2$和$-138.76\ kgf/m^2$。

若扣件或構件的承受風壓面積橫跨不同區域，其設計風壓可依不同區域的面積比例加權平均計算得之。以縱梁 g-h 段為例，其橫跨區域 1、區域 2 與區域 3 區，區域 3 的設計正（負）風壓為$28.66\ kgf/m^2$和$-113.74\ kgf/m^2$，橫跨面積為$0.8\ m^2$，區域 2 的設計正（負）風壓為$28.15\ kgf/m^2$和$-82.46\ kgf/m^2$，橫跨面積為$7.2\ m^2$，區域 1 的設計正（負）風壓為$34.29\ kgf/m^2$和$-60.28\ kgf/m^2$，橫跨面積為 $6.0\ m^2$，對面積加權平均後所得風壓為 $30.81\ kgf/m^2$和-74.74 kgf/m^2。仿照上述的計算流程，分別計算其他不同構件及扣件的設計正（負）風壓，彙整所有結果並將其列於表 7-5。

設計風力為設計風壓與承受風壓面積A_{actual}的乘積。面板接橫梁扣件 j 的設設計正（負）風壓為$34.29\ kgf/m^2$和$-138.7\ kgf/m^2$，承受風壓面積為$0.85\ m^2$，故該扣件的設計正風力 $F = 34.29 \times 0.85 = 29.15\ kgf$，設計負風力為 $F = -138.7 \times 0.85 = -117.95\ kgf$。仿照上述的計算流程，分別計算其他不同扣件的設計正風力及設計負風力，彙整所有結果並將其列於表 7-5。

表 7-5 示範例 5 構件及扣件之設計風壓及風力

名稱		承受風壓面積 (m^2)	設計風壓 (kgf/m^2)		設計風力(kgf)	
			正風壓	負風壓	正風力	負風力
橫梁	a-b 段或 d-e 段	0.425	51.70	-219.52		
	b-c 段或 c-d 段	3.400	28.66	-113.74		
縱梁	f-g 段或 h-i 段	3.200	34.29	-138.76		
	g-h 段	14.000	30.81	-74.74		
柱	g 點下方	10.200	30.14	-86.98		
	k 點下方	6.375	28.94	-99.15		
面板接橫梁扣件	j 點	0.850	34.29	-138.76	29.15	-117.95
	螺栓 1 個（軸力）				29.15	-117.95
橫梁接縱梁扣件	c 點	3.400	28.66	-113.74	97.45	-386.72
	螺栓 4 個（剪力）				24.36	-96.68
	螺栓 2 個（軸力）				48.73	-193.36
縱梁接柱扣件	g 點	10.200	30.14	-86.98	307.41	-887.18
	螺栓 6 個（軸力）				51.23	-147.86

參、支撐柱本身側向之設計風力

支撐柱本身之設計風力，依據「建築物耐風設計規範及解說」(2014)第 2.2 節中開放式建築物之公式決定：

$$F = q(z_{Ac}) \times G \times C_f \times A_c \quad \text{.....(7.2)}$$

其中，$q(z_{Ac})$為面積 A_c形心高度 z_{Ac}處之風速壓，z_{Ac}為面板形心離地面高 $h_c = 12.781\,m$；G 為普通建築之陣風反應因子；C_f為風力係數。

若將支撐柱視為角柱體形狀之結構物，可參照「建築物耐風設計規範及解說」(2014)中表「角柱體形狀之結構物的風力係數C_f及其修正係數 R」求得風力，但表中沒有本例支撐柱之 H 型斷面，故使用造型較接近之長方形斷面進行估算C_f，風向垂直於長方柱長邊時 $C_f = 2.2$，風向垂直於長方柱長邊時 $C_f = 1.4$。修正係數 R 與柱的高寬比$2h/D$相關，其中柱的最小水平尺寸$D = 175\text{mm}$，因為柱的 $2h/D$ 都在8~20 之間，對照可得修正係數$R = 0.8$。

如圖 7-16 所示，若來風平行 x 向，風向垂直於長方柱長邊時 $C_f = 2.2$，乘上修正係 R 可得 $C_f = 1.76$。設計風力 $F = q(h_c)GC_f\,A_c$，其中 $q(h_c) = 31.42\ kgf/m^2$，$G = 1.810$、受風作用特徵面積A_c為柱子實體構材迎風面面積，代入後可得各根柱子的設計風壓，將其結果列於表 7-6。

如圖 7-17 所示，若來風平行 y 向，風向垂直於長方柱長邊時 $C_f = 1.4$，乘上修正係 R 可得 $C_f = 1.12$。設計風力 $F = q(h_c)GC_f\,A_c$，其中 $q(h_c) = 31.42\ kgf/m^2$，$G = 1.798$、受風作用特徵面積A_c為柱子實體構材迎風面面積，代入後可得各根柱子的設計風壓，並將其列於表 7-6。

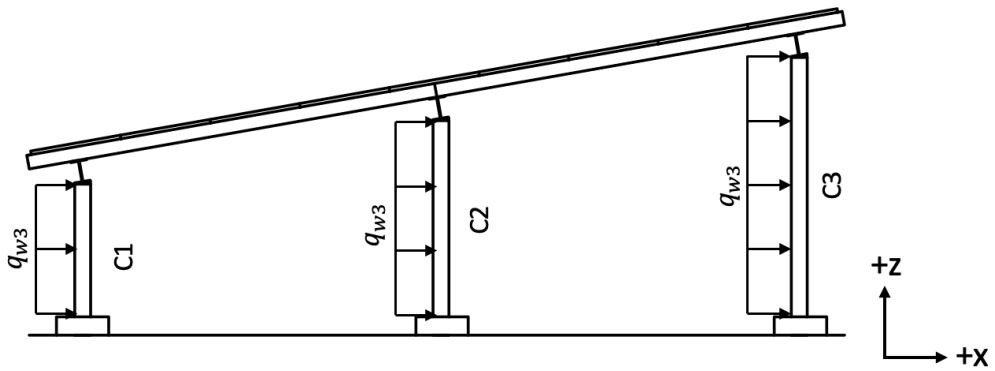


圖 7-16 示範例 5 支撐柱本身之設計風力（x 向）

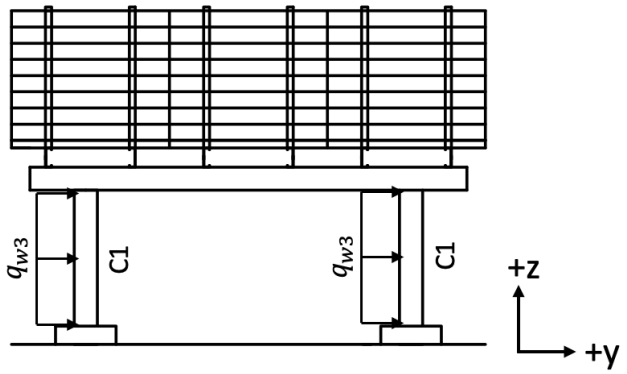


圖 7-17 示範例 5 支撐柱本身之設計風力（y 向）

為了方便分析，也可以把設計風力F除以柱高換為線載重。因為柱子的$q(h_c)$、G及C_f與柱斷面皆相同，來風平行 x 向時每根柱子的單位長度風載重皆為 25.03 kgf/m，來風平行 y 向時每根柱子的單位長度風載重皆為 11.07 kgf/m。

表 7-6 示範例 5 支撐柱本身之設計風力

風向	來風平行 x 向		來風平行 y 向	
設計目標	受風作用特徵面積A_c（m^2）	設計風力F（kgf）	受風作用特徵面積A_c（m^2）	設計風力F（kgf）
柱 C1	0.4	36.50	0.3	16.14
柱 C2	0.5	53.89	0.4	23.84
柱 C3	0.7	71.26	0.5	31.52

肆、面板傳遞至支撐柱風壓(力)不同估算方式之比較

前面第壹及第貳小節已根據「太陽光電系統之耐風設計規範研擬」成果報告(2019)計算面板傳遞至支撐柱之風壓，實際上，另也可將平屋頂單斜式棚架之支撐柱視為主要風力抵抗系統，但目前仍欠缺相關之風壓（力）之計算方式。「建築物耐風設計規範及解說」(2014)中表 2.9「開放式建築物之單斜式屋頂的風力係數」及擬議新版「建築物耐風設計規範與解說」中表 3.8 (a)「開放式建築物之單斜屋頂的淨風壓係數」可估計地面單斜式棚架支撐柱之主要風力抵抗系統風壓（力），雖不適用於平屋頂單斜式棚架之支撐柱，但本示範例為了參考比較，也以其公式估算之。

由面板傳遞至支撐柱之風力依據「建築物耐風設計規範與解說」(2014) 中表 2.9「開放式建築物之單斜式屋頂的風力係數」計算，其細節列於本節的(1)；但因此規範為早期 ASCE 7 的規定，在使用上有所疑慮，且之後新版「建築物耐風設計規範與解說」也預計依新版 ASCE 7 修訂這部分，故另依據擬議新版「建築物耐風設計規範與解說」中表 3.8 (a)「開放式建築物之單斜屋頂的淨風壓係數」計算作為參考，此細節列於本節的(2)。

(1) 面板傳遞至支撐柱的設計風力（耐風設計規範 2014 第 2.2 節）

由面板傳遞至支撐柱之設計風力，依據「建築物耐風設計規範及解說」(2014)第 2.2 節中開放式建築物之公式決定：

$$F = q(h_c) \times G \times C_f \times A_c \quad \text{.....(7.3)}$$

其中$q(h_c)$為面板形心高度h_c處之風速壓；G為普通建築之陣風反應因子；C_f為風力係數，可查表 7-7 而得；A_c為開放式建築物受風作用特徵面積，也就是面板總面積$5.1 \times 9.0 = 45.9\, m^2$。

表 7-7 開放式建築物之單斜式屋頂的風力係數

θ	各種 L/B 值之 *Cf*						
	5	3	2	1	1/2	1/3	1/5
10	0.2	0.25	0.3	0.45	0.55	0.7	0.75
15	0.35	0.45	0.5	0.7	0.85	0.9	0.85
20	0.5	0.6	0.75	0.9	1	0.95	0.9
25	0.7	0.8	0.95	1.15	1.1	1.05	0.95
30	0.9	1	1.2	1.3	1.2	1.1	1

θ	各種 *L/B* 值所對應的壓力中心位置，*X/L*		
	2~5	1	1/5~1/2
10~20	0.35	0.3	0.3
25	0.35	0.35	0.4
30	0.35	0.4	0.45

資料來源：建築物耐風設計規範與解說(2014) 表 2.9

<u>來風平行 x 向</u>

[步驟 1] 風力係數 C_f

若來風平行 x 向，垂直於風向之面板水平尺寸$B = 5.1\,m$，與風向平行的屋頂尺寸$L = 8.863\,m$，相除得 $L/B = 1.738$。根據表 7-7，$\theta = 10°$ 下 $L/B = 1$的風力係數 C_f 值為0.45，$L/B = 2$的風力係數 C_f 值為0.3，線性內插可得 $L/B = 1.738$下 C_f 值為0.339。

[步驟 2] 設計風力F

根據「建築物耐風設計規範及解說」(2014)式(2.4)，開放式建築承受之設計風力為$F = q(h_c)G_x C_f\, A_c = 31.42 \times 1.810 \times 0.339 \times 45.9 = 886.00\,kgf$。

根據表 7-7，$\theta = 10°$ 下 $L/B = 1$ 的壓力中心位置 X/L為 0.3，$L/B = 2$的壓力中心位置 X/L為0.35，線性內差可得$L/B = 1.738$ 的壓力中心位置$X/L = 0.337$，X為從屋頂之迎風面屋簷到壓力中心的距離。

<u>來風平行 y 向</u>

[步驟 1] 風力係數 C_f

若來風平行 y 向，垂直於風向之面板水平尺寸$B = 8.863\,m$，與風向平行的屋頂尺寸$L = 5.1\,m$，相除得$L/B = 0.575$。根據表 7-7，$\theta = 10°$ 下 $L/B = 0.5$的

風力係數 C_f 值為0.55，$L/B = 1.0$的風力係數 C_f 值為0.45，線性內插可得 $L/B = 0.575$ 下 C_f 值為0.535。

[步驟 2]設計風力F

根據「建築物耐風設計規範及解說」(2014) 式(2.4)，開放式建築承受之設計風力為 $F = q(h_c)G_y C_f\ A_c = 31.42 \times 1.798 \times 0.535 \times 45.9 = 1387.05\ kgf$。

根據表 7-7，$\theta = 10°$ 下 $L/B = 0.5$ 的壓力中心位置 X/L為0.3，$L/B = 1$的壓力中心位置 X/L為0.3，線性內差可得 $L/B = 0.575$ 的壓力中心位置 $X/L = 0.3$，X為從屋頂之迎風面屋簷到壓力中心的距離。

表 7-8 示範例 5 面板傳遞至支撐柱的設計風力（耐風規範 2014）

風向	設計風力（kgf）	從迎風面到壓力中心位置之距離
$\pm x$	$\pm$5886.00	$X/L = 0.337$
$\pm y$	$\pm$1387.05	$X/L = 0.3$

(2) 面板傳遞至支撐柱的設計風力（擬議新版「建築物耐風設計規範與解說」）

因「建築物耐風設計規範與解說」(2014)第 2.2 節為早期 ASCE 7 的規定，由面板傳遞至支撐柱之設計風力在使用上有所疑慮，且之後新版「建築物耐風設計規範與解說」也預計依新版 ASCE 7 修訂這部分，故另依據擬議新版「建築物耐風設計規範與解說」估算由面板傳遞至支撐柱之設計風力作為參考，其設計風壓為：

$$p = q(h_c) \times G \times C_N \quad \text{.....(7.4)}$$

其中$q(h_c)$為面板形心高度 h_c處之風速壓；G 為普通建築之陣風反應因子；C_N為風壓係數。

<u>來風平行 x 向</u>

[步驟 1]風力係數C_N

若來風平行 x 向，可參考表 7-9 和圖 7-18 得到開放式建築物之單斜式屋頂的淨風壓係數，其中屋頂下通風面積阻塞比小於 50%視為氣流無受阻，C_{NW} 及 C_{NL} 分別代表屋頂面上風區及下風區之淨風壓係數，正值代表風壓作用指向受風作用面，負值代表風壓作用遠離受風作用面。

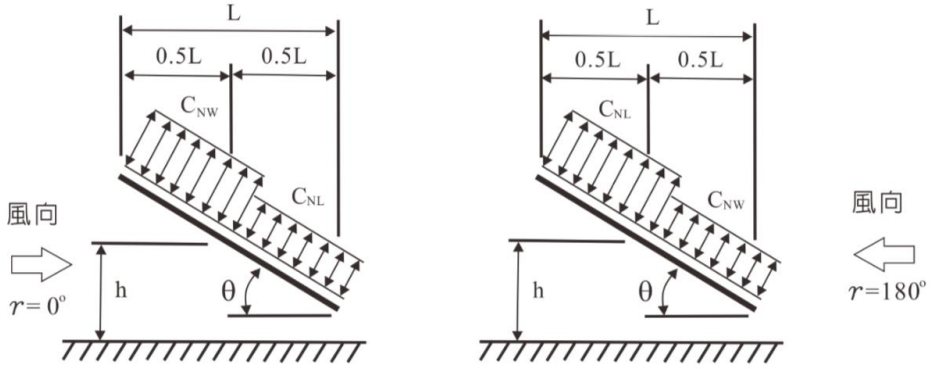


圖 7-18 開放式建築物之單斜式屋頂的淨風壓係數C_N

資料來源：擬議新版「建築物耐風設計規範與解說」

表 7-9 開放式建築物之單斜式屋頂的淨風壓係數C_N

淨風壓係數 , C_N									
屋頂仰角 θ	載重類別	風向角 , 0°				風向角 , 180°			
		氣流無受阻		氣流有受阻		氣流無受阻		氣流有受阻	
		C_{NW}	C_{NL}	C_{NW}	C_{NL}	C_{NW}	C_{NL}	C_{NW}	C_{NL}
< 7.5°	A	1.2	0.3	-0.5	-1.2	1.2	0.3	-0.5	-1.2
	B	-1.1	-0.1	-1.1	-0.6	-1.1	-0.1	-1.1	-0.6
7.5°	A	-0.6	-1.0	-1.0	-1.5	0.9	1.5	-0.2	-1.2
	B	-1.4	0.0	-1.7	-0.8	1.6	0.3	0.8	-0.3
15°	A	-0.9	-1.3	-1.1	-1.5	1.3	1.6	0.4	-1.1
	B	-1.9	0.0	-2.1	-0.6	1.8	0.6	1.2	-0.3
22.5°	A	-1.5	-1.6	-1.5	-1.7	1.7	1.8	0.5	-1.0
	B	-2.4	-0.3	-2.3	-0.9	2.2	0.7	1.3	0.0
30°	A	-1.8	-1.8	-1.5	-1.8	2.1	2.1	0.6	-1.0
	B	-2.5	-0.5	-2.3	-1.1	2.6	1.0	1.6	0.1
37.5°	A	-1.8	-1.8	-1.5	-1.8	2.1	2.2	0.7	-0.9
	B	-2.4	-0.6	-2.2	-1.1	2.7	1.1	1.9	0.3
45°	A	-1.6	-1.8	-1.3	-1.8	2.2	2.5	0.8	-0.9
	B	-2.3	-0.7	-1.9	-1.2	2.6	1.4	2.1	0.4

資料來源：擬議新版「建築物耐風設計規範與解說」

此表適用於$0.25 \leq h/L \leq 1.0$之情形，可本示範例之參數範圍 $h/L = 12.781/8.863 = 1.442$ 並不合，故只是試算作為比較參考之依據。

靠線性內差求得風向角為 0°的載重類別 A 為$C_{NW} = 0.7$、$C_{NL} = -1.1$；載重類別 B 為$C_{NW} = -1.57$、$C_{NL} = 0$，風向角為 180°時的載重類別 A 為$C_{NW} = 1.03$、

$C_{NL} = 1.53$；載重類別 B 為$C_{NW} = 1.67$、$C_{NL} = 0.4$。

設計風壓為$P = q(h_c)G_xC_N$，此時 $q(h_c) = 31.42\ kgf/m^2$、$G_x = 1.810$，代入不同C_N後可得各方向及載種組合之設計風壓，並將其列於表 7-11。

<u>來風平行 y 向</u>

若來風平行 y 向，可參考表 7-10 和圖 7-19 得到風向平行於屋脊時開放式建築物之屋頂的淨風壓係數，其中屋頂下通風面積阻塞比小於 50%視為氣流無受阻，C_N代表屋頂面之淨風壓係數，依照離迎風面的距離被分為 3 段，正值代表風壓作用指向受風作用面，負值代表風壓作用遠離受風作用面。

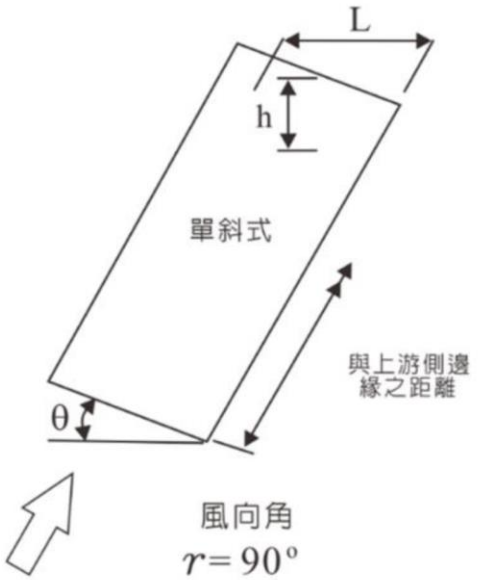


圖 7-19 風向平行於屋脊時開放式建築物之屋頂的淨風壓係數C_N

資料來源：擬議新版「建築物耐風設計規範與解說」

表 7-10 風向平行於屋脊時開放式建築物之屋頂的淨風壓係數C_N

與上游側邊緣之距離	屋頂仰角 θ	載重類別	氣流無受阻	氣流有受阻
			C_N	C_N
≤h	All shapes	A	-0.8	-1.2
	$\theta \leq 45°$	B	0.8	0.5
> h, ≤ 2h	All shapes	A	-0.6	-09
	$\theta \leq 45°$	B	0.5	0.5
> 2h	All shapes	A	-0.3	-0.6
	$\theta \leq 45°$	B	0.3	0.3

資料來源：擬議新版「建築物耐風設計規範與解說」

可得載重類別 A 中$< h$的$C_N = -0.8$、h~$2h$的$C_N = -0.6$、$> 2h$的$C_N = -0.3$；載重類別 B 中 $< h$的$C_N = -0.8$、h~$2h$的$C_N = 0.5$、$> 2h$的$C_N = 0.3$。

設計風壓為：$P = q(h_c)G_y C_N$，此時 $q(h_c) = 31.42\ kgf/m^2$、$G_y = 1.798$，代入不同C_N後可得各方向及載種組合之設計風壓，並將其列於表 7-11。

表 7-11 示範例 5 面板傳遞至支撐柱的設計風壓（新版耐風規範）(kgf/m²)

載重類別	A			B		
	CNW		CNL	CNW		CNL
風向角 , 0°	-39.82		-62.58	-89.13		0.00
風向角 , 180°	58.79		87.23	94.82		22.76
載重類別	A			B		
	≤h	h~2h	> 2h	≤h	h~2h	> 2h
風向角 , 90°	-45.19	-33.90	-16.95	45.19	28.25	16.95

第四節　構件之耐風分析及檢核

橫梁採用 SSC 400（一般結構用輕型鋼）為冷軋型鋼材；縱梁採用 SN400B（建築結構用軋鋼料）為熱軋型鋼材，兩者之降伏強度 $f_y = 2500\ kgf/cm^2$ ，極限強度 $f_u = 4000\ kgf/cm^2$。假設採用之橫梁、縱梁形狀與斷面性質如表 7-12 所示。

冷軋型鋼構材設計時所用鋼材之彈性模數E為 20,700 kgf/mm^2，剪力模數G為 7,950 kg/mm^2，波森比μ為 0.3，溫度伸縮係數為 0.000012/°C。鋼結構所用結構鋼之彈性模數E為 20,400 kgf/mm^2，剪力彈性模數G為 8100 kgf/mm^2，波森比μ為 0.3，溫度伸縮係數為 0.000012/°C。

表 7-12 示範例 5 構件之斷面性質

縱梁、柱	橫梁
H 型鋼-H250x175x7x11	C 型鋼- C150x65x20x3.2
斷面模數 $S_x = 502\ cm^3$ 斷面模數 $S_y = 112\ cm^3$ 慣性矩　$I_x = 6121\ cm^4$ 慣性矩　$I_y = 984\ cm^4$ 斷面積　$A = 56.24\ cm^2$ 單位長重量　$q = 44.1\ kgf/m$	斷面模數 $S_x = 44\ cm^3$ 斷面模數 $S_y = 12\ cm^3$ 慣性矩　$I_x = 332\ cm^4$ 慣性矩　$I_y = 53\ cm^4$ 斷面積　$A = 9.56\ cm^2$ 重量　$q = 7.5\ kgf/m$
SN400B 材料性質：$f_y = 2500\ kgf/cm^2$ ；$f_u = 4000\ kgf/cm^2$ SSC 400 材料性質：$f_y = 2500\ kgf/cm^2$ ；$f_u = 4000\ kgf/cm^2$	

當使用容許應力設計法設計時，熱軋型鋼構應依「鋼結構容許應力設計法規範及解說」(2010)之規定，考慮載重組合$D + L$ 、$D + 0.75(L \pm 1.25W)$、$D + 0.75(L \pm 0.8E)$ 、$0.7D \pm 1.25W$及$0.7D \pm 0.8E$；冷軋型鋼構應依「冷軋型鋼構造建築物結構設計規範及解說」(2016)之規定，考慮載重組合$D + L$ 、$D \pm W$、$D \pm 0.7E$、$D + 0.75L \pm 0.75W$ 、$D + 0.75L \pm 0.7E$、$0.6D \pm W$及 $0.6D \pm 0.7E$。其中，D 為靜載重，包括構材自重及永久附加物重量；L 為活載重，包含人員重量；E 為設計地震力； W 為設計風力。

本耐風設計示範例所考慮之太陽光電系統不用考慮活載重、且忽略地震力，同時由於「冷軋型鋼構造建築物結構設計規範及解說」(2016) ASD 所用風力係

數並不正確，故本例皆採用「鋼結構容許應力設計法規範及解說」(2010)之載重組合$D \pm 0.9375\,W$(或$D \pm 0.75(1.25W)$)及$0.7D \pm 1.25W$進行檢核。

壹、橫梁

在作橫梁 a-b-c-d-e 結構分析時如圖 7-20 所示，將橫梁與下方縱梁連接處 b 點、c 點及 d 點的扣件視為鉸支承（Hinge）進行分析。

風載重採用表 7-5 中橫梁 a-b-c-d-e 的設計風壓，其承受風壓面積的寬度為 0.85 m。設計正風壓 a-b 段和 d-e 段為 $51.70\,kgf/m^2$、b-c 段和 c-d 為 $28.66\,kgf/m^2$，乘上寬度 0.85 m 可得線載重 $q_{w1} = 43.94\,kgf/m$、$q_{w2} = 24.36\,kgf/m$，設計負風壓 a-b 段和 d-e 段為$219.52\,kgf/m^2$、b-c 段和 c-d 段負風壓為$113.74\,kgf/m^2$，乘上寬度 0.85 m 後可得線載重$q_{w1} = 186.59\,kgf/m$、$q_{w2} = 96.68\,kgf/m$。

靜載重包含橫梁自重與模組自重，模組自重每塊 $20kgf$，由 4 個面板接橫梁扣件傳給2根橫梁，故每個扣件傳到橫梁的力量$F_D = 20kg/4 = 5\,kgf/m$，橫梁本身單位長自重為 $7.5\,kgf/m$。

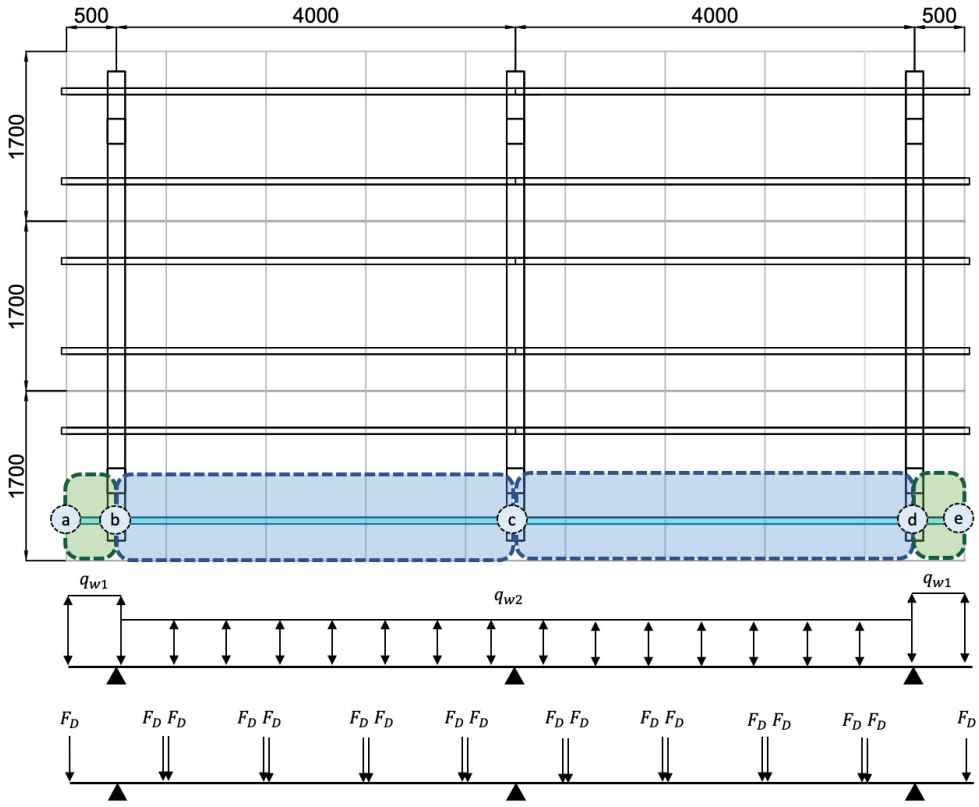


圖 7-20 示範例 5 之橫梁 a-b-c-d-e 受力作用圖

本例利用 SAP2000 分析，將構件的斷面、材料特性輸入，並施加風載重、靜載重及可求得橫梁變形量及構件的應力，載重組合有$D \pm 0.9375\,W$、$0.7D \pm 1.25W$。

<u>應力檢核</u>

在載重組合$0.7D - 1.25W$下有最大剪力 257.45 kgf，最大彎矩 188.97 kgf-m，用 AISC-ASD96 進行檢核，得橫梁應力比為 $0.21 \leq 1$，確認符合規範。

<u>變形檢核</u>

為避免長時間較大振動造成扣件處產生破壞，建議檢核梁變位量，例如參考「鋼結構容許應力設計法規範及解說」(2010) 11.5.3 節，將風力視為活載重，確認風力所產生的撓度不得大於跨度之 1/360。在載重組合為$1.0D + 1.0W$下有最大變形量$\delta_{max} = 3.7\,mm$。

$\frac{\text{最大變形量}\delta_a}{\text{跨度}} = \frac{0.0037\text{ m}}{4\text{ m}} = 0.00065 \leq \frac{1}{360}$，檢核通過。

貳、縱梁

在作縱梁結構分析時如圖 7-21 所示，將與下方柱連接處 g 點、h 點視為鉸支承（Hinge），以下風載重以線載重模擬進行設計，靜載重以點載重模擬進行設計。

風載重採用表 7-5 中縱梁 f-g-h-i 的設計風壓，其承受風壓面積的寬度為 4m。設計正風壓 f-g 段和 h-i 段為$34.29\,kgf/m^2$、g-h 段為$30.81kgf/m^2$，乘上寬度 4 m可得線載重$q_{w1} = 137.17\,kgf/m$、$q_{w2} = 123.25\,kgf/m$。設計負風壓 f-g段和 h-i 段為$138.76\,kgf/m^2$、g-h 段為$74.74\,kgf/m^2$，乘上寬度 4 m 可得線載重$q_{w1} = 555.05\,kgf/m$、$q_{w2} = 298.97\,kgf/m$。

靜載重包含梁自重與模組自重，而縱梁 f-g-h-i 所負擔面積中有 12 塊模組，模組自重為$20kgf/$塊，橫梁自重為 $7.51\,kg/m$，面板、橫梁自重經橫梁接縱梁扣件傳入縱梁，故每根橫梁傳到縱梁 f-g-h-i 的重量$F_D = (20kg) \times (2\text{ 塊}) + (7.51\,kg/m) \times (4m) = 70.04\,kg$，縱梁本身單位長自重為 $44.1\,kgf/m$。

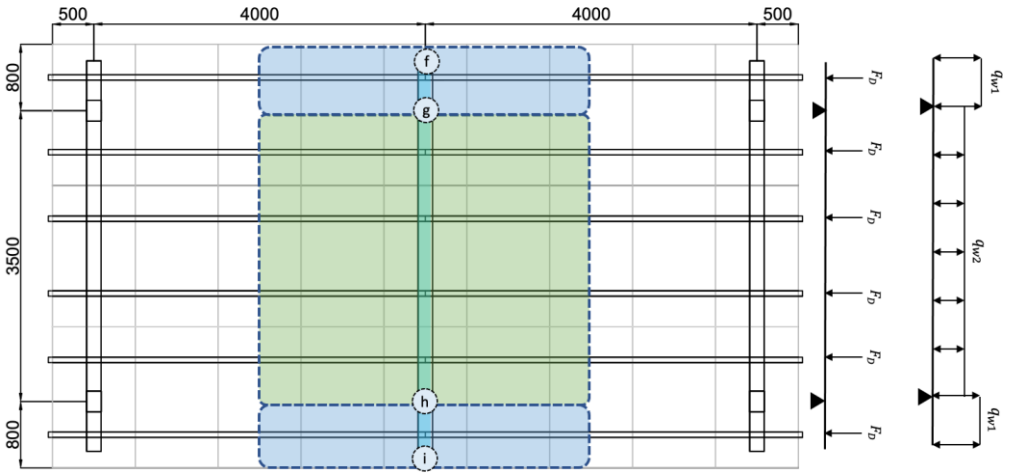


圖 7-21 示範例 5 之縱梁 f-g-h-i 受力作用圖

本例利用 SAP2000 分析，將構件的斷面、材料特性輸入，並施加風載重、靜載重及可求得縱梁變形量及構件的應力，載重組合有$D \pm 0.9375\,W$、$0.7D \pm 1.25W$。

<u>應力檢核</u>

在載重組合$D + 0.9375W$下有最大剪力 498.16 kgf和最大彎矩 340.62 kgf-m，用 AISC-ASD96 進行檢核，得縱梁應力比為 $0.08 \leq 1$，確認桿件符合規範。

<u>變形檢核</u>

為避免長時間較大振動造成扣件處產生破壞，建議檢核梁變位量，例如參考「鋼結構容許應力設計法規範及解說」(2010)11.5.3 節，將風力視為活載重，確認風力所產生的撓度不得大於跨度之 1/360。在載重組合為$1.0D + 1.0W$下有最大變形量$\delta_{max} = 0.3\,mm$。

$\frac{\text{最大變形量}\delta_a}{\text{跨度}} = \frac{0.0003\text{ m}}{3.5\text{ m}} = 0.00014 \leq \frac{1}{360}$，檢核通過。

參、支撐柱

支撐柱本身側向之設計風力依據「建築物耐風設計規範與解說」(2014)第2.2節主要構件風力公式決定，而面板傳遞至支撐柱的設計風壓（力）依據「太陽光電系統之耐風設計規範研擬」成果報告(2019) 中平屋頂單斜式棚架型之設計風壓公式計算，將其計算列於本節的(1)。

實際上，另也可將平屋頂單斜式棚架之支撐柱視為主要風力抵抗系統，但由面板傳遞至支撐柱之風力目前仍欠缺相關之風壓（力）之計算方式。例如依照「建築物耐風設計規範及解說」(2014)中表 2.9「開放式建築物之單斜式屋頂的風力係數」估算設計風力，其計算列於本節的 (2)，但因此規範為早期 ASCE 7的規定，在使用上有所疑慮，且之後新版「建築物耐風設計規範與解說」也預計依新版 ASCE 7 修訂這部分，故另依據擬議新版「建築物耐風設計規範與解說」中表 3.8 (a) 「開放式建築物之單斜屋頂的淨風壓係數」估算設計風壓，但將此計算細節列於本節的(3)作為參考。此兩種估算方式可估計地面單斜式棚架支撐柱之主要風力抵抗系統風壓（力），雖不適用於平屋頂單斜式棚架之支撐柱，但本示範例為了參考比較，也以其公式估算之。

(1) 根據「太陽光電系統之耐風設計規範研擬」成果報告風壓公式計算風壓

風載重考慮由面板傳遞至支撐柱之設計風壓及支撐柱本身之設計風力兩項。面板傳遞至支撐柱之設計風壓根據「太陽光電系統之耐風設計規範研擬」成果報告(2019) 進行估算，其設計風壓列於表 7-5，而支撐柱本身之側向設計風力列於表 7-6。

如圖 7-22，中間柱子承受風壓面積的設計正風壓為$30.14\ kgf/m^2$，設計負風壓為$86.98\ kgf/m^2$。兩側柱子承受風壓面積的設計正風壓為$28.94\ kgf/m^2$，設計負風壓為$99.15\ kgf/m^2$。其中正風壓表示力量指向面板，負風壓表示力量遠離面板上表面。若風朝$+x$向吹，支撐柱本身之側向設計風力 $q_{w3} = 25.03\ kgf/m$。

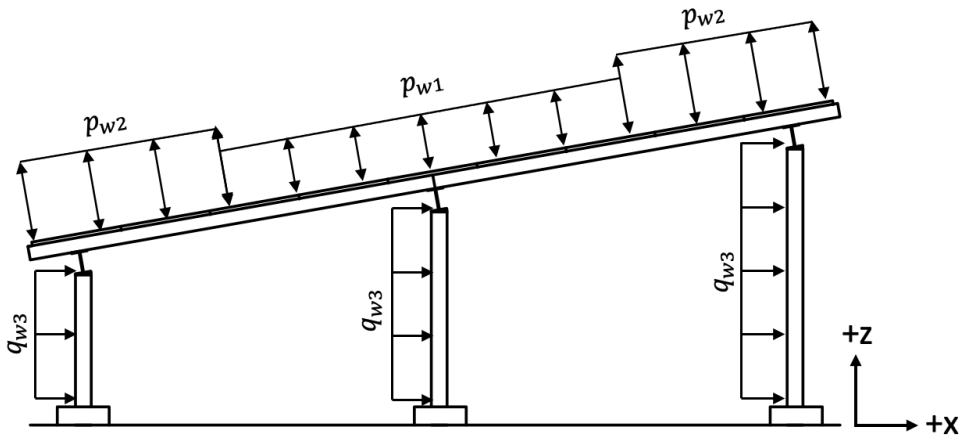


圖 7-22 示範例 5 規範研擬之平屋頂單斜式棚架風壓作用圖（$+x$向）

(2) 根據現行「建築物耐風設計規範及解說」之主要構件風力公式估算風力

風載重考慮由面板傳遞至支撐柱之設計風力及支撐柱本身之設計風力兩項。由面板傳遞至支撐柱之設計風力依據「建築物耐風設計規範及解說」(2014)第2.2節估算，其結果參考表 7-8，支撐柱本身之側向設計風力參考表 7-6。

參考圖 7-23，若風朝 $+x$向吹，由面板傳遞至支撐柱之設計風力為$F = 886.00\ kgf$，且從迎風面到風力作用位置的比例 $X/L = 0.337$，方向垂直面板並考慮往下和往上兩種情況。支撐柱本身之側向設計風力 $q_w = 25.03\ kgf/m$。參考圖 7-24，若風朝 $-x$向吹其設計風力與$+x$向相同，只是方向相反。

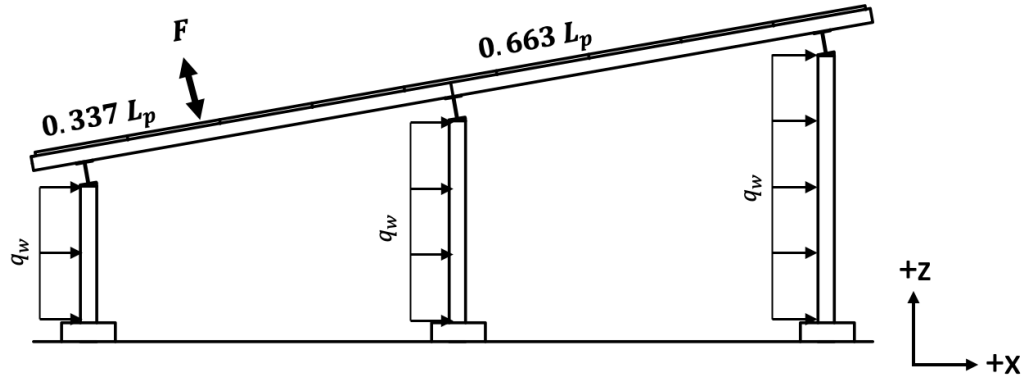


圖 7-23 示範例 5 現行耐風規範之主要風力作用圖（$+x$向）

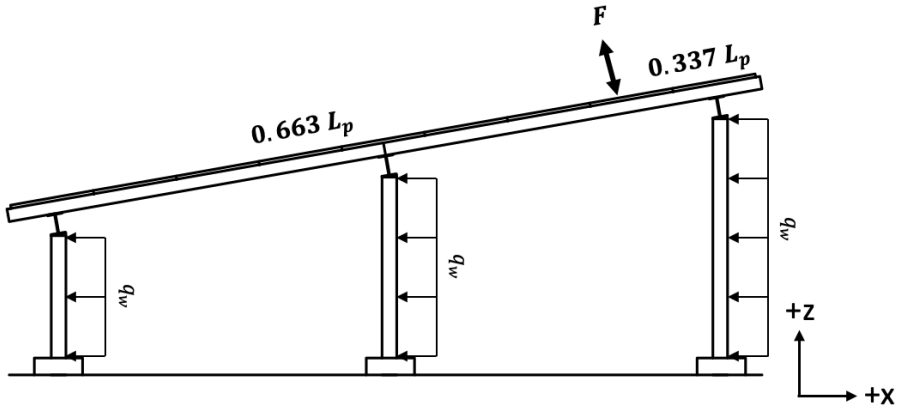


圖 7-24 示範例 5 現行耐風規範之主要風力作用圖（$-x$向）

根據圖 7-25，若風朝 $+y$向吹，由面板傳遞至支撐柱之設計風力為$F = 1387.05\ kgf$，且從迎風面到風力作用位置的比例 $X/L = 0.3$，方向垂直面板並考慮往下和往上兩種情況，支撐柱本身之側向設計風力 $q_w = 11.07\ kgf/m$。若風朝 $-y$向吹其設計風力與$+y$向相同，只是方向相反。

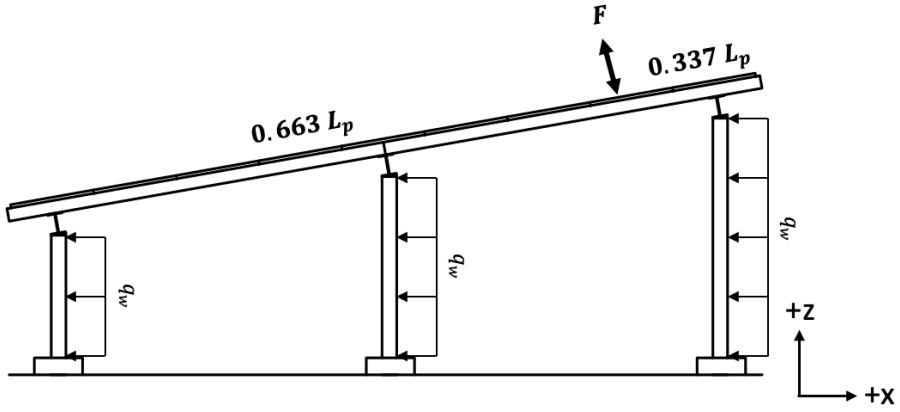


圖 7-25 示範例 5 現行耐風規範之主要風力作用圖（$+y$向）

(3) 根據擬議新版「建築物耐風設計規範及解說」之主要構件風壓公式估算風壓

風載重考慮由面板傳遞至支撐柱之設計風力及支撐柱本身之設計風力兩項。由面板傳遞至支撐柱之設計風力依據擬議新版「建築物耐風設計規範與解說」估算，其結果參考表 7-11，支撐柱本身之側向設計風力參考表 7-6。

參考圖 7-26，若風朝 $+x$向吹，也就是風向角$180°$時，在載重類別 A 下由面板傳遞至支撐柱之設計風壓p_{ww}為$58.79\ kgf/m^2$、p_{wL}為$87.23\ kgf/m^2$，載重類別 B 下由面板傳遞至支撐柱之設計風壓p_{ww}為$94.82\ kgf/m^2$、p_{wL}為$22.76\ kgf/m^2$。支撐柱本身之側向設計風力 $q_{w3} = 25.03\ kgf/m$。

參考圖 7-27，若風朝 $-x$向吹，也就是風向角$0°$時，在載重類別 A 下由面板傳遞至支撐柱之設計風壓p_{ww}為$-39.82\ kgf/m^2$、p_{wL}為$-62.58\ kgf/m^2$，載重類別 B 下由面板傳遞至支撐柱之設計風壓p_{ww}為$-89.13\ kgf/m^2$、p_{wL}為$0.00\ kgf/m^2$。支撐柱本身之側向設計風力 $q_{w3} = 25.03\ kgf/m$。

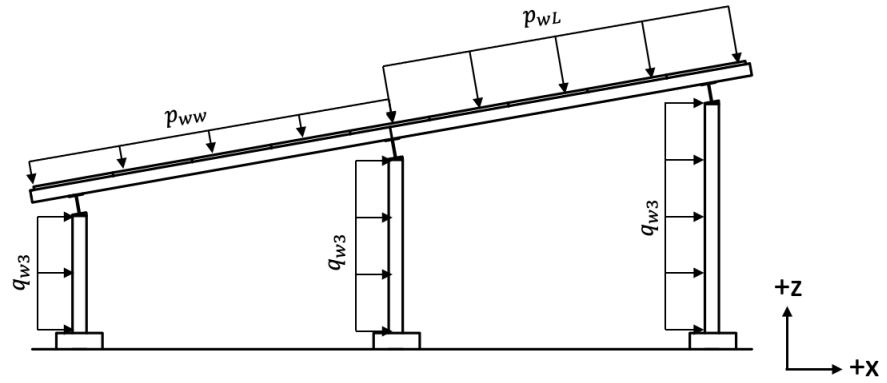


圖 7-26 示範例 5 擬議新版耐風規範之主要風力作用圖（風向角$180°$）

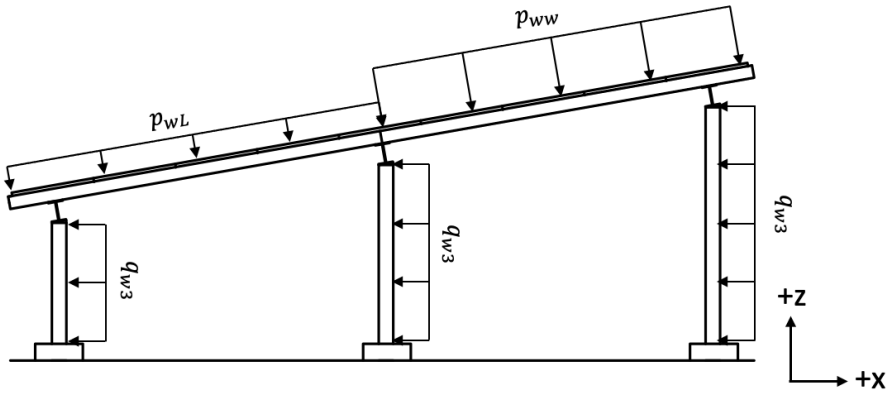


圖 7-27 示範例 5 擬議新版耐風規範之主要風力作用圖（風向角$0°$）

根據圖 7-28，若風朝 $+y$向吹，也就是風向角$90°$時，在載重類別 A 下由面板傳遞至支撐柱之設計風壓p_{w1}為$-45.19\ kgf/m^2$，載重類別 B 下由面板傳遞至支撐柱之設計風壓p_{w1}為$45.19\ kgf/m^2$。支撐柱本身之側向設計風力 $q_{w3} = 11.07\ kgf/m$。若風朝 $-y$向吹其設計風力與$+y$向相同，只是方向相反。

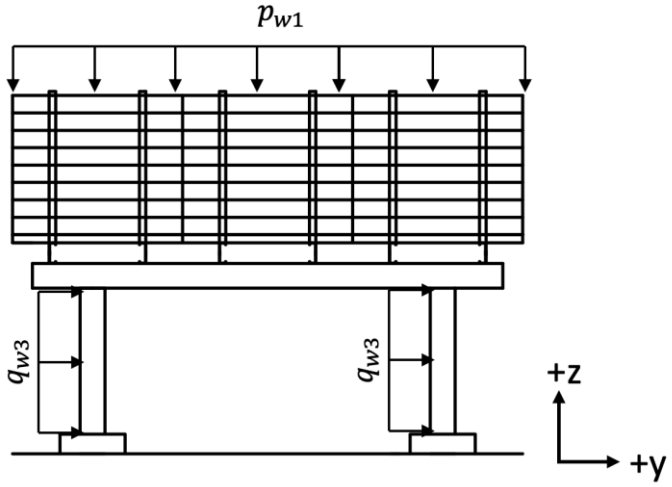


圖 7-28 示範例 5 擬議新版耐風規範之主要風力作用圖（風向角90°）

綜合以上三種風載重算法，由於 (2)、(3)之結果不適用於平屋頂單斜式棚架，本示範例選擇(1)所得風壓作柱及基座之檢核。

靜載重包含梁柱自重與模組自重，模組自重為$20kgf/$塊，故橫梁所受之模組單位長自重 $q_D = 10\ kgf/m$，橫梁單位長自重為 $7.51\ kgf/m$、縱梁及柱單位長自重為 $44.1\ kgf/m$。

本例利用 SAP 2000 分析，將構件的斷面、材料特性輸入，並施加風載重、靜載重及可求得柱變形量及構件的應力，為保守底部基座設為鉸接。載重組合有$D \pm 0.9375\ W$、$0.7D \pm 1.25W$。

表 7-13 示範例 5 所有載重組合下對 g 點下方柱產生的最大受力

由面板傳遞至支撐柱之設計風壓(力)之估算依據	柱軸拉力（kgf）	柱軸壓力（kgf）	柱頂側位移 (mm)	應力比
(1)「太陽光電系統之耐風設計規範研擬」成果報告之風壓公式	1198.18	-683.30	29.21	0.494
(2)現行耐風設計規範之主要構件風力公式	303.31	-551.95	9.16	0.174
(3)擬議新版耐風設計規範之主要構件風壓公式	620.11	-1328.16	24.00	0.401

表 7-14 示範例 5 所有載重組合下對 k 點下方柱產生的最大受力

由面板傳遞至支撐柱之設計風壓(力)之估算依據	柱軸拉力（kgf）	柱軸壓力（kgf）	柱頂側位移(mm)	應力比
(1)「太陽光電系統之耐風設計規範研擬」成果報告之風壓公式	370.62	-299.78	29.18	0.292
(2)現行耐風設計規範之主要構件風力公式	341.43	-526.43	9.15	0.087
(3)擬議新版耐風設計規範之主要構件風壓公式	271.35	-677.27	23.96	0.231

應力檢核

在載重組合 $0.7D - 1.25W$（風朝 $-x$向吹）下有最大軸拉力$1198.18\ kgf$，在載重組合$0.7D + 1.25W$（風朝 $+x$向吹）下有最大軸壓力$683.30\ kgf$，用 AISC-ASD96 進行檢核，得柱應力比小於1，確認符合規範。

變形檢核

因太陽光電版模組鎖固可能因為振動產生鬆弛，故建議增加撓度限制以約束螺栓鬆弛，例如可參考「建築技術規則建築設計施工編」第 245 條，確認容許層間變位二百分之一。在載重組合為$1.0D + 1.0W$下有最大變形量$=$ $29.21\ mm$。

容許變位$=\frac{\text{柱高}}{200} = 17.38\ mm < 29.21$ mm，最大變形 29.21 mm 未通過　，但因基座假設鉸接，所得位移應該非常保守，故此處與容許變位相差不大先暫且忽略。

第五節 扣件之耐風分析及檢核

扣件接合設計時，在實務上構件有接合的地方都需要檢核，除了螺栓、銲道以外，還有扣具、構件本身的強度。扣件接合設計時，除了考量螺栓本身可能發生的拉力破壞、剪力破壞、拉剪聯合破壞及承壓破壞等破壞模式，接合處的扣具及構件的破壞模式也須考慮，包括總斷面破壞、淨斷面破壞及塊狀剪力撕裂等。另外，若有進行銲接接合，銲材所承受之應力值也應符合容許應力範圍，使接合處強度滿足要求。本手冊僅示範螺栓拉力破壞及剪力破壞之檢核。

本例扣件之設計同樣使用容許應力法，參考「鋼結構容許應力設計法規範及解說」(2010)之規定，考慮載重組合$D \pm 0.9375\,W$、$0.7D \pm 1.25W$，此外對於接合點之偏心問題亦應適當考量。根據臺中市結構工程技師公會在 108 年編寫「太陽光電系統支撐架結構設計參考手冊草案(修訂版)」之 4.3 螺栓接合內容所述，使用熱軋型鋼構材並採容許應力設計法分析設計者，可參考「鋼結構容許應力設計法規範及解說」(2010)第 10.3 節進行檢核；使用冷軋型鋼構材者，可參考「冷軋型鋼構造建築物結構設計規範及解說」(2016)第 11.3 節及第 11.5 節進行檢核。

本範例針對螺栓拉力破壞、剪力破壞及拉剪聯合破壞以「鋼結構容許應力設計法規範及解說」 (2010)之規定進行螺栓：螺栓容許剪應力F_v及螺栓容許張應力 F_T可參考鋼結構容許應力設計 10.3 節得知，若螺栓承受拉力及剪力同時作用時，其標稱斷面 A_b上之應力需再按規定折減。

壹、面板接橫梁之扣件

面板接橫梁扣件 j 如圖 7-29 所示，兩片模組以中壓塊連接於下方橫梁上，中壓塊使用 A2-70 M8 螺栓鎖在橫梁上。

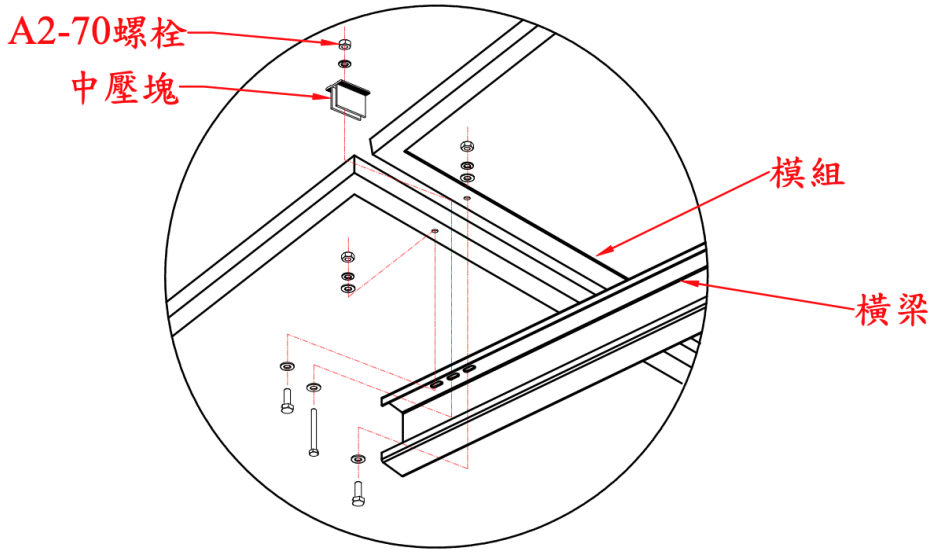


圖 7-29 屋頂單斜式棚架型系統之面板接橫梁扣件接合圖

資料來源：修改自[16]

螺栓拉力分析

風載重採用表 7-5 中面板接橫梁扣件 j 之設計正風力29.15 kgf，方向垂直指向面板上表面，對此螺栓而言為壓力；設計負風力117.95 kgf，方向垂直遠離面板上表面，對此螺栓而言為拉力；靜載重為所承受風壓面積中的模組自重，每塊 20kgf，故單一螺栓所承擔之靜載重為 20kgf/4 × 2 = 10 kgf，方向垂直指向地面。在載重組合0.7D − 1.25W下可對螺栓造成最大軸拉力140.54 kgf，此時造成的剪力為1.22 kgf。

螺栓應力檢核

因為在「鋼結構容許應力設計法規範及解說」(2010)和「冷軋型鋼構造建築物結構設計規範及解說」(2016)中都沒有不鏽鋼螺栓的標稱拉力及剪力強度，故參考 CNS 4234-1「不鏽鋼結件之機械性質－第 1 部：螺栓、螺釘及螺樁」得 A2-70 的抗拉強度為$F_u = 700MPa$、降伏強度$F_y = 450\ MPa$，以及 M8 螺栓標稱應力面積 $A = 39.2\ mm^2$，並配合「鋼結構容許應力設計法規範及解說」(2010)

的表 10.3-2「螺栓及螺牙桿件之容許應力」求得其容許張應力$F_t = 0.33F_u = 231\,MPa$，容許剪應力 $F_v = 0.17F_u = 119Mpa$。

螺栓容許拉力$F_T = 231\,MPa \times 39.2\,mm^2 = 923\,kgf > 140.54$ kgf，檢核通過。

螺栓容許剪力$F_S = 231\,MPa \times 39.2\,mm^2 = 4665\,N > 1.22$ kgf，檢核通過。

其它檢核

另外因接合之中壓塊厚度較薄，容易產生破壞，建議中壓塊之檢核全斷面降伏、淨斷面撕裂、塊狀剪裂等。

貳、橫梁接縱梁之扣件

橫梁接縱梁扣件如圖 6-30 所示，假設橫梁以扣件連接於下方縱梁上。所謂扣件包括角鋼及螺栓，橫梁以螺栓 A、B、C、D 固定於角鋼上，角鋼再以螺栓 E、F 固定於縱梁上，其中螺栓為 F10T-M10，角鋼為 L*100mm*75mm*7mm。

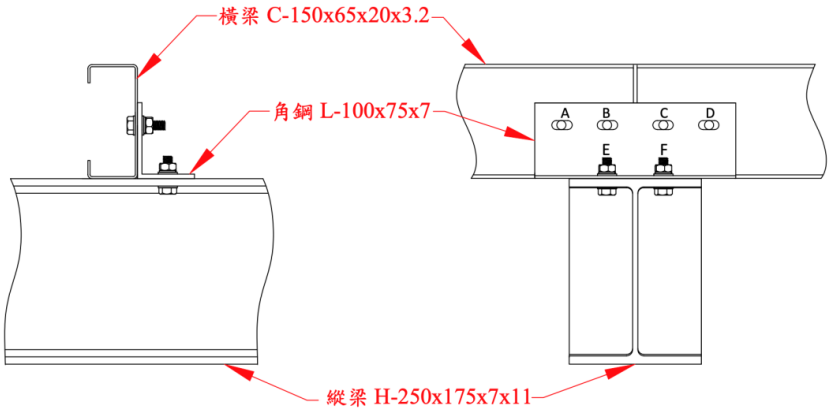


圖 7-33 屋頂單斜式棚架型系統之橫梁接縱梁扣件接合圖

資料來源：修改自[16]

螺栓分析

風載重採用表 7-5 中橫梁接縱梁扣件 c 之設計正風力97.45 kgf，方向垂直指向面板上表面，對螺栓 A 而言為剪力，對螺栓 E 而言為壓力；設計負風力386.72 kgf，方向垂直遠離面板上表面，對螺栓 A 而言為拉力，對螺栓 E 而言為壓力；靜載重為所承受風壓面積中的模組及橫梁自重，故單一扣件所承擔之淨載重為 70 kgf，方向垂直指向地面。

在載重組合$0.7D + 1.25W$下會造成傳進此扣件的最大軸壓力171.10 kgf，此時剪力為8.51 kgf。力量由螺栓A、B、C、D傳入，對螺栓A造成的拉力為2.13 kgf、剪力為42.78 kgf；之後載重傳至螺栓E、F，對螺栓E造成的壓力為85.55 kgf、剪力為4.26 kgf。

在載重組合$0.7D - 1.25W$下會造成傳進此扣件的最大軸拉力435.11 kgf，此時剪力為8.51 kgf。力量由螺栓A、B、C、D傳入，對螺栓A造成的拉力為2.13 kgf、剪力為 108.78 kgf；之後載重傳至螺栓 E、F，對螺栓 E 造成的拉力為217.56 kgf、剪力為4.26 kgf。

螺栓A剪力檢核

根據「鋼結構容許應力設計法規範及解說」(2010)的表 10.3-2「螺栓及螺牙桿件之容許應力」，F10T 之容許剪應力 $F_v = 1.87\ tf/cm^2$。M10 螺栓標稱應力面積 $A = 61.2\ mm^2$。螺栓容許剪力 $F_S = 1.87\ tf/cm^2 \times 61.2\ mm^2 = 1144\ kgf > 108.78$ kgf，檢核通過。

螺栓E拉力檢核

根據「鋼結構容許應力設計法規範及解說」(2010)的表 10.3-2「螺栓及螺牙桿件之容許應力」，F10T 之容許張應力$F_t = 3.62\ tf/cm^2$。M10 螺栓標稱應力面積 $A = 61.2\ mm^2$。螺栓容許拉力 $F_T = 3.62\ tf/cm^2 \times 61.2\ mm^2 = 2215kgf > 217.56$ kgf，檢核通過。

參、縱梁接柱之扣件

縱梁接柱扣件如圖 7-31 所示，假設縱梁以扣件連接於下方柱上。所謂扣件包括螺栓及柱頂板，縱梁以六個 F10T-M10 螺栓固定於柱頂板上，柱頂板與柱銲接固定，柱頂板尺寸為 280mm*125mm*10 mm。

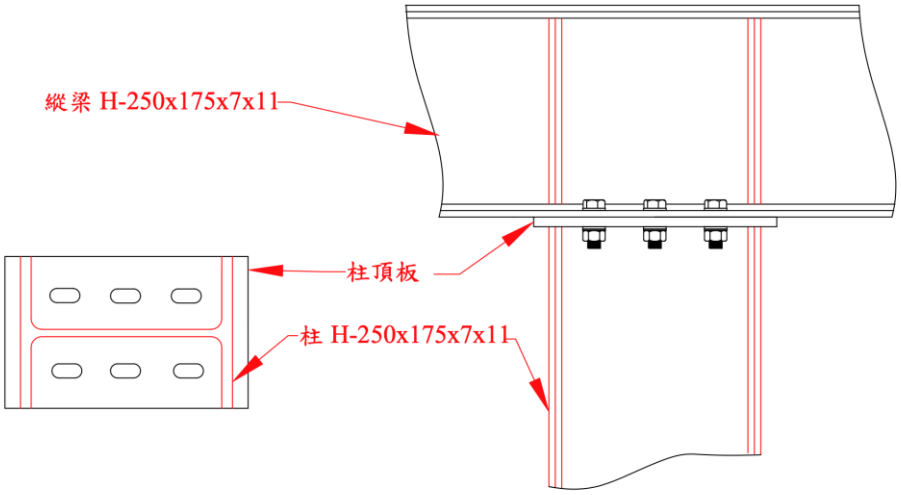


圖 7-34 屋頂單斜式棚架型系統之縱梁接柱扣件接合圖

資料來源：修改自[16]

螺栓分析

風載重採用表 7-5 中面縱梁接柱扣件的設計正風力307.41 kgf ，方向垂直指向面板上表面，對螺栓而言為壓力；設計負風力887.18 kgf，方向垂直遠離面板上表面，對螺栓而言為拉力；靜載重為所承受風壓面積中模組及橫梁、縱梁的自重，故單一螺栓所承擔之靜載重為 273.76 kgf，方向垂直指向地面。

在載重組合0.7D − 1.25W下會造成傳進此扣件的最大軸拉力920.25 kgf，此時造成的剪力為33.28 kgf。對單一螺栓造成的拉力為153.38 kgf，剪力為5.54 kgf。

螺栓應力檢核

根據「鋼結構容許應力設計法規範及解說」(2010)的表 10.3-2「螺栓及螺牙桿件之容許應力」，F10T 之容許張應力$F_t = 3.62\ tf/cm^2$。M10 螺栓標稱應力面積 $A = 61.2\ mm^2$。螺栓容許拉力 $F_T = 3.62\ tf/cm^2 \times 61.2\ mm^2 = 2215kgf > 153.38\ kgf$，檢核通過。

肆、柱接基座之扣件

柱接基座扣件如圖 7-32 所示，柱接基座扣件假設柱以扣件連接於下方基座。所謂扣件包括化學錨栓及柱底板，將柱與柱底板銲接固定，並將其用化學錨栓將柱底板與基座混凝土相接。

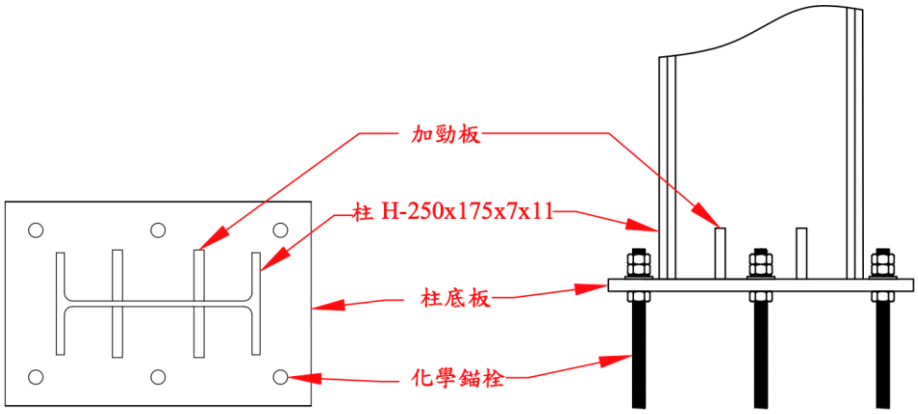


圖 7-35 屋頂單斜式棚架型系統之柱接基座扣件接合圖

資料來源：修改自[16]

基座分析

基座承受支撐柱所受風力及自重。其中面板傳遞至支撐柱之設計風壓，一樣建議取用「太陽光電系統之耐風設計規範研擬」成果報告(2019)之局部構件風壓公式計算結果進行檢核。可得載重組合 $0.7D-1.25W$（風朝 $-x$向吹）下會對一基座造成最大軸拉力 1146.84 kgf，此時剪力為296.04 kgf； $0.7D+1.25W$（風朝 $+x$向吹）下會對一基座造成最大軸壓力683.30 kgf，此時剪力為159.30 kgf。

錨栓檢核

混凝土基座之錨栓可依「建築物混凝土結構設計規範」(2023)進行檢核，確認錨栓及混凝土的強度皆足夠。

原屋頂檢核

根據「太陽光電系統之耐風設計規範研擬」成果報告(2019)，另需檢核建築物屋頂本身之強度能同時承受(1)太陽光電系統支撐架傳遞至屋頂之風載重及(2)非太陽光電板覆蓋之屋頂區域所受風載重；其中(1)之風載重依本節之規定決定，而(2)之風載重第三章之規定決定。

需考慮最後力量傳遞到基座時的植筋（栓）深度或是屋頂承載力是否足夠，不會造成既有屋頂面承載以及在拉拔力下是否會造成原有屋頂面及屋頂防水層的破壞，甚至棚架之總重對於屋頂承載是否容許、樓板有無貫穿破壞或是梁額外負載等也需考慮，以確保建築物屋頂本身之強度能同時承受太陽光電系統支撐架傳遞至屋頂之風載重及非太陽光電板覆蓋之屋頂區域所受風載重。

參考文獻

1. 內政部，「建築技術規則建築設計施工編」，2004。
2. 內政部，「鋼結構容許應力設計法規範及解說」，2010。
3. 內政部，「建築物耐風設計規範與解說」，2014。
4. 內政部，「冷軋型鋼構造建築物結構設計規範及解說」，2016。
5. 內政部建研所，「太陽光電系統之耐風設計規範研擬」，委託研究計劃成果報告，2019。
6. 內政部，「建築物混凝土結構設計規範」，2023。
7. 內政部建研所，「太陽光電系統耐風設計及結構分析手冊之研擬」，協同研究計劃成果報告，2024。
8. 經濟部，CNS 4234-1「不鏽鋼結件之機械性質－第 1 部：螺栓、螺釘及螺椿」，2012。
9. 經濟部，「設置再生能源設施免請領雜項執照標準」，2021
10. 經濟部，CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」，2022。
11. 臺中市結構工程技師公會，「太陽光電系統支撐架結構設計範例」，2016。
12. 臺中市結構工程技師公會，「太陽光電系統支撐架結構設計參考手冊」，2016。
13. 陳瑞華主編，「建築物耐風設計技術手冊」，內政部建研所，2017。
14. 陳瑞華主編，「帷幕牆系統結構耐風設計手冊」，內政部建研所，2020。
15. The Aluminum Association，「Aluminum Design Manual」，2005。
16. 全面性系統整合科技股份有限公司提供資料。

附錄二 期初審查意見及回應一覽表

內政部建築研究所 113 年度

「建築工程技術及資訊跨領域整合計畫協同研究計畫」遴用協同研究人員第 2 案「太陽光電系統耐風設計及結構分析手冊之研擬」

協同研究計畫案審查意見及廠商回應一覽表

項次	評選委員意見	回應
1	建築技術規則已有風力之相關規定，是否需要再另新規範？	本計畫之目標為編纂太陽光電系統耐風設計技術手冊，非另編新規範。
2	太陽能光電系統之構架連接在建築物上之斜放構造，其結構設計是否建築技術類別相關規定有不通用之處。	在實務上有一些不太一樣，將於技術手冊中述明。
3	國內建築物耐風設計規範及解說(2014)並未提供太陽光電系統完整的耐風設計規定，請問國外如美、日等國目前有無完整的太陽光電系統的耐風設計相關規範？	美日等國規範有提供特定種類太陽光電系統之設計風壓決定方式，但並不完整。108 年建研所委託研究計劃「太陽光電系統之耐風設計規範研擬」曾參考美日相關規範，同時執行一系列地面棚架型與平屋頂棚架型之風洞實驗。
4	若美日有完整的太陽光電系統的耐風設計相關規範，國內是否可沿用？若無法沿用的原因為何?是否因太陽光電系統之不同導致極值風壓係數不同而無法沿用？	108 年建研所委託研究計劃「太陽光電系統之耐風設計規範研擬」中之斜屋頂平貼型、地面踞置型、平屋頂踞置型及地面棚架型之規定納入 CNS16189。而平屋頂棚架型為國內主流，故以 108 年計畫的風洞實驗結果為準。
5	國內亦有多種不同的太陽光電系統，本研究是否因此而辦理系列的	本計畫並不涵蓋風洞試驗。

	風洞試驗，採用極值分析以求取各種不同太陽光電系統之極值風壓係數？	
6	本研究預計提供幾種形式之設計示範例，請補充說明。	斜屋頂平貼型、地面踞置型、平屋頂踞置型、地面棚架型及平屋頂棚架型五種。
7	預計完成手冊之研擬，除紙本外建議數位化，上網可供相關業者、從業人員參考。	需請建研所斟酌辦理。
8	手冊中是否提供沒有耐風設計造成的損壞案例，以利強調其重要性。	手冊前言中將納入過去風災破壞案例，強調正確耐風設計的重要性。
9	對於平屋頂棚架型的後續處理規劃？	根據108年建研所委託研究計劃「太陽光電系統之耐風設計規範研擬」之成果報告進行設計。
10	成果是否有機會適用於既有完成設計的案例？	本計畫將訪視業界，讓示範例盡量貼近現場情況。
11	本案對於水面型的適用性?	本計畫並不涵蓋水面型系統。
12	太陽光電系統安裝在屋頂，可能會影響屋頂防水，建議可在手冊中提醒使用者注意。	針對設置於屋頂上之太陽光電系統，手冊中會提醒應以風拉拔力檢核原屋頂之強度及防水層是否足夠。
13	結構安全應優於綠能推廣。	將舉辦專家座談，彙整多方意見。
14	本手冊除了設計方式外，在長期使用期間的檢查或管理維護(尤其颱風季前的檢核)是否納入或提出建議。	遵照辦理。
15	除了太陽能板本身以力學性質檢核外。其架設於屋頂上時屋頂之基本條件，以及對屋頂板之影響	屋頂樓板的部分，範例會提供太陽能板構架所造成之拉拔力算法，技師可根據此拉拔力計

	是否納入檢討。	算是否會造成防水層破壞，同時確認強度足夠。
16	收集破壞條例及注意指引，建議納入手冊。	遵照辦理。

附錄三 期中審查意見及回應一覽表

內政部建築研究所 113 年度

「建築工程技術及資訊跨領域整合計畫協同研究計畫」遴用協同研究人員第 2 案「太陽光電系統耐風設計及結構分析手冊之研擬」

協同研究計畫案審查意見及廠商回應一覽表

委員	專家學者意見	研究團隊綜合回應
王理事長炤烈	1. 本研究案目的是為提供技師設計光電系統之構架、基座及相關結構連接之參考。各技師在設計時需要遵循我國內政部公告的「建築物耐風設計規範及解說」進行設計，而非依照 CNS 標準，本研究所採用的設計依據與我國耐風設計規範有何不同？ 2. 目前我國的鋼結構規範和鋼筋混凝土規範都包括彈性設計法和強度設計法，且其載重組合所考慮的風力大小根據服務等級或強度等級而有所不同。建議在後續範例中應說明其所考慮之風力情形，以提高其實用性。 3. 任何結構物在受力時，不僅要考慮風力載重，還需要考慮自身的重量、地震力、施工載重等因素。因此，各種載重組合和結構設計方式會有所不同。建議本手冊能對各結構構造進行詳細說明。	1. 目前我國「建築物耐風設計規範及解說」是針對建築物進行耐風設計，其中僅對地面棚架型系統有相關規定。而下一版「建築物耐風設計規範及解說」將於其 4.1 節之解說中，新增說明太陽能光電系統耐風設計可參考國家標準 CNS 16189，故本手冊依據 CNS 16189 進行耐風設計。 2. 遵照辦理。 3. 會將相關說明納入手冊中。
朱教授佳仁	1. 台灣少數業者生產及使用追日型太陽能光電系統，可隨太陽的角度而變，本計畫之分析手冊是否適用於此種單柱式太陽能光電	1. 目前本案並不涵蓋單柱式太陽能光電系統。

	板？ 2. 建議畫圖顯示光電板正負風壓的施力方向。	2. 遵照辦理。
胡總監銘煌	1. 台灣目前正朝著淨零碳排的目標邁進，預計在 2050 年達成。太陽光電系統的安全性以及國家發電的長期穩定對此目標至關重要，因此本研究案的重要性首先應予以肯定。 2. 太陽光電系統的安全，包括太陽能板、扣件、支撐結構以及支撐結構的固定或地面基礎構造等，都與結構設計和施工相關。因此，專有名詞應作相應修改，例如將「面板」或「模板」改為「太陽能板」，將「棚架型」改為「構架型」。 3. 太陽光電系統中的太陽能板與扣件都是工業產品，其安全應有相關法規管制。此外，其施工過程需要制定標準作業程序（SOP）以確保安全。其他結構設計和施工則應由結構專業人士進行計算和簽證，以確保整體安全。	1. 感謝胡總監的肯定。 2. 由於不同領域對各專有名詞之講法不同，將參考辦理。 3. 同意委員的看法。
黃經理朝陽	1. 目前國內太陽光電系統無可參考之規範，CNS 16189 指引與目前系統的差異較大，的確需要相關設計分析的手冊，後續建議完成後可定期舉辦說明會來推廣此手冊的應用。 2. 淡江大學王仁牧教授有開發一套專家系統，建議未來手冊成果也可透過專家系統來檢核。	1. 感謝黃經理的意見。 2. 遵照辦理。
葉委員祥海	1. 本研究較為實用，可供專家於各型光電系統架構之耐風應力分析應用。 2. 封面標題宜以簡化或將正負標題以大小字型分開以明確重點。	1. 感謝葉委員的意見。 2. 已修正。

	3. 各分析範例，建議將其耐風設計及結構分析之作業程序先以流程圖呈現，以利設計者作業程序依循。 4. 第三章至第七章設計示範例建議能先展示光電板的基本模擬架構，提示支撐架與接點、基礎固定之應加強事項與標示，其計算案例或以既有案例圖示之。	3. 遵照辦理。 4. 遵照辦理。
賴教授啟銘	1. 進度符合預期，成效良好。 2. 本手冊內容加強破壞模式之分析說明特別是支撐架與既有結構體之銜接面。 3. 應於期中報告呈現手冊之章節標題。 4. 四種主要構造型式應在手冊前方之圖示及各項立面、剖面及照片說明。 5. 「構件耐風設計檢核」中，如何進行柱、基座與原建築構造接合設計檢核應予說明。	1. 感謝賴教授的肯定。 2. 遵照辦理。 3. 遵照辦理。 4. 將繪製立面、剖面及立體構架示意圖。 5. 遵照辦理。
蔡委員仁毅	1. 未來研究成果請考慮屋頂光電板受風災之後，因風力而產生之飄散效益及其影響範圍內之災害防護。 2. 本對於屋頂結構之安全維護，建議可比照「現有廣告物管理辦法」之規定，要求於一定規模以上之光電設備應依建築法之規定申請雜項執照，以利日後管控。	1. 這將是未來值得研究的課題。 2. 感謝蔡委員的意見。
林委員自勤	1. 除了光電板支架設施固定需要考慮耐風設計的拉拔力外，墩座鋼筋混凝土的拉力與剪力亦須考慮。 2. 除了結構體本身之設計力應考慮外，材料的鏽蝕防止亦應在設計	1. 遵照辦理。 2. 感謝林委員的意見，會將此納入手冊中建議事項，提醒使用者。

	中一併考慮進去(耐久性問題)。 3. 構架基底錨栓有分預埋式與後置式，在後續設計範例中是否分別舉例？	3. 將建議由設計技師決定。
楊委員澤欣	1. 分析型式樣態與實務相符，應予肯定。 2. 手冊建議分設置容量大小，用途等進行分類。部分小型容量可以依照標準施作方式施行，大型案件請專業技師簽證。	1. 感謝楊委員的肯定。 2. 依據「設置再生能源設施免請領雜項執照標準」第 5 條及第 6 條之規定，視太陽光電發電設備設置高度與範圍設置前需檢附設計者簽證之結構安全證明書或結構計算說明書，送所在地主管建築機關備查。
蔡副研究員宜中	1. 立法院於 2023 年三讀通過《再生能源發展條例》部分條文修正草案，明定建物應設置一定比例的太陽能光電板，條文增訂第12條之 1：(1) 建築物之新建、增建或改建達一定規模者，除有受光條件不足或其他可免除情形外，起造人應設置一定裝置容量以上之太陽光電發電設備；(2) 前項建築物範圍、一定規模、一定裝置容量與其計算方式、受光條件、可免除情形及其他相關事項之標準，由中央建築主管機關會同中央主管機關定之。所以目前國土管理署正緊鑼密鼓在召開相關子法研商會議，預計為配合 2050 年，臺灣 100%新建建築及超過 85%建築必須達到零碳排的淨零建築目標，以後太陽光電的建築物會非常多。故為使設計者能正確作太陽光電系統耐風設計以確保結構安全性，本手冊（草	1. 感謝蔡副研究員的意見。 2. 會將圖表改置於各章節適當位置。 3. 同意蔡副研究員看法。

	案）乃當務之急。 2. 本研究把所有圖表皆統一置於全文結束之後，較不利讀者參看，建議置於各自之圖表章節以利閱讀。 3. 若小家戶屋頂不經結構技師設計簽證負責，因為風災會有責任歸屬，明顯不可行。	
蔡組長綽芳	1. 除設計外，還有長期使用的問題，可再完工後定期去看看螺栓有無鬆脫問題，避免面板飛出去砸到人。 2. 建議未來專家座談會邀請國土署建管組的人員參加，以助於往後擬定相關法規。	1. 感謝蔡組長的意見，會將此納入手冊中建議事項，提醒使用者。 2. 未來專家座談會將邀請國土署建管組人員參加。

附錄四 期末審查意見及回應一覽表

內政部建築研究所 113 年度

「建築工程技術及資訊跨領域整合計畫協同研究計畫」遴用協同研究人員第 2 案「太陽光電系統耐風設計及結構分析手冊之研擬」

協同研究計畫案審查意見及廠商回應一覽表

委員	專家學者意見	研究團隊綜合回應
王理事長炤烈	1. 要詳細探討各種案件確實不容易，尤其電板的構造目前無標準，建議要詳細說明該手冊的條件，並建議蒐集破壞案例。 2. 對受風分析，分為兩種，一為超大風力（規範所稱之陣風），一為一般風力（規範所稱之常風），其中一般規範的常風下，其破壞案例，大都是長期受晃動（左右搖）所造成的損壞，建議此情形應要避免位移，既結構的側位移，此部分建議要使構架不晃動（如加斜撐）、接頭安裝固定性（例如加桿件），但此等情形似未讀到。 3. 對陣風力會是接頭與錨定處的破壞，其中螺栓接合，常不是使用高拉力螺栓（此螺栓要檢討鎖緊力），會是機械式螺栓，另下方錨定處常是下方混凝土的破壞。此等部分此案例亦談得不多。	1. 遵照辦理。 2. 將遵照 CNS 16189 之相關規定做耐風設計。 3. 將於手冊中建議定期檢核螺栓扭力，同時提供風造成之拉拔力供計師作基座設計檢核。
施理事長義芳	1. P.7 太陽光電系統之可能破壞類型，其位置可能在支撐架與屋頂接合處、面板框架處、面板框架與支撐架之接合處，與本結構分析手冊設計示範例所探討之分析	1. 手冊終將提供風造成之拉拔力供計師作基座設計檢核。 2. 遵照辦理。

	檢核項目未完全吻合，尤其是支撐架與屋頂或基礎接合處並未分析。 2. P.24 表 3-5 斜屋頂平貼型系統結構件的斷面性質，建議補充橫梁、支撐架尺寸、斷面圖、材質。 3. P.27 有關扣件尺寸及相關材質皆未註明與分析，目前手冊僅對螺栓分析而已。 4. P.34 圖 4-2 地面踞置型結構系統示意圖，面板傾斜方向與設計示範例不一致，請統一，以利研讀。 5. P.62 地面踞置型結構系統未分析設計基礎尺寸，基礎很重要，以免颱風侵襲拉拔而破壞。 6. 本結構分析手冊之所有耐風設計示範例，面板傾斜角 W=10°,由於台灣各地日照時間四季皆不相同，建議手冊中增列如何選擇面板傾斜方向、傾斜角度W，以利設計參考，求得最佳的日照效果。 7. 本結構分析手冊中耐風設計示範例，單位有公制、英制、SI 制未加以統一，建議加以整合一致。	3. 感謝委員之意見。 4. 遵照辦理。 5. 在各示範例中將計算基座在設計風速下所受拉拔力，並提示基座本身及下部接合處之設計檢核要項，以確保基座及原地面或屋頂不會被破壞。 6. 通常由業主考慮各項因素決定面板傾斜角。 7. 將修正手冊中所有耐風設計示範例將其單位保持一致性。
胡總監銘煌	1. 本研究案強調太陽光電系統的安全，包括太陽能面板、下部支撐結構及接合扣件結構之耐風設計與分析，請另以文字補充說明系統介面結構或結構基礎之安全之考量。 2. 文中“建議”提到“未來針對平屋頂單斜式棚架型下有阻擋之情況執行風洞試驗”，請問本研究案之第七章“平屋頂單斜式棚架型系統之耐風設計之示範例”有	1. 在各示範例中將計算基座在設計風速下所受拉拔力，並提示基座本身及下部接合處之設計檢核要項，以確保基座及原地面或屋頂不會被破壞。 2. 已於第七章中說明。 3. 遵照辦理。 4. 同意委員之意見。

	無阻擋之情況，宜特別說明。 3. 文中第 99 頁“地面單斜式棚架型系統之耐風設計之示範例”一、二行（含圖）都錯了，請修正。 4. 耐風系統支撐結構所用橫梁縱梁構件為特製產品，設計者只能選用，其配套安全須有特別規範規定，施工需有標準作業程序規定。 5. 結論“現階段建立簡易結構評估系統似不可行”很重要！完全贊成。	5. 感謝委員之意見。
黃經理朝陽	1. 本研究對於目前太陽光電系統結構設計有很好的幫助，提供各類型系統耐風設計範例。 2. 目前內政部正在制定未來新建、增建及改建之建築物強制一定面積以上，須強制建置太陽光電系統，此手冊可提供很好的參考內容。	1. 感謝委員之意見。 2. 感謝委員之意見。
葉委員祥海	1. 本研究轉化為手冊，實用性高，五種光電系統之耐風設計，分別詳細撰述其結構分析，可供其結構設計者引用參考，值得肯定。 2. 內文引用之各規範，如「建築物耐風設計規範與解說」等，係由內政部頒行，非營建署、國土署頒行，僅由其代辦部稿頒行。 3. 手冊（第 178 頁最後一行）第八章誤植內文「筆者」相關陳述宜酌修，圖 2A-2 及 2A-3「距置型」有誤。 4. 除設計及結構分析手冊之外，相關的施工技術品質亦甚重要，建議建研所考量研擬相關「施工手冊」，如構材規格尺寸、材質、扣件、螺栓及其墊片等及施作要	1. 感謝委員之意見。 2. 遵照委員意見作修改。 3. 遵照辦理。 4. 同意委員之意見。

	求技術，有所指示。	
朱教授佳仁	1. 此計畫利用設計範例說明太陽光電系統的耐風結構設計與施工應注意事項，有助於國內太陽光電系統的推廣。 2. 追日型太陽光電系統只有一根支柱支撐整個光電板，其構造更易受強風破壞，設計此型光電系統應注意事項?	1. 同意委員之意見。 2. 本計畫未包括追日型太陽光電系統。
羅教授元隆	1. 圖 3-1 的標題文字與內容不合，應作修改。 2. 圖 4-1 的流程中沒有說明桿件設計的合格與否的流程。 3. 除了斜屋頂平貼式的太陽光電外，其餘皆有變形檢核，建議研究團隊可以採用一表格統一顯示出，各種不同類型光電系統所需要檢核的項目。 4. 圖 5-1 的流程中沒有說明桿件設計的合格與否的流程。 5. 目前平屋頂棚架式光電系統的風洞試驗由工研院委託北科研究室進行中，其中考量了面板底下有無阻擋、有無女兒牆、面板是否突出於屋頂邊緣。預計於 2024 年 12 月完成，建議研究團隊與之合作，共同修訂 CNS 16189 內容。	1. 遵照辦理。 2. 遵照辦理。 3. 將於各示範例中詳列需檢核項目。 4. 遵照辦理。 5. 感謝委員之意見。
周建築師會宏	1. 針對太陽光電系統之設計風載重估算指引，本會樂見其成，但往往在設計時亦要考慮地震力的因素，故相關構件可能都會比本案設定值來的大，希望規範能有更多容許空間及彈性調整的可能性。	1. 通常太陽光電系統之設計由風載重控制，故本手冊著重於其耐風設計，將於手冊中提醒技師另需作耐震設計。

林技師自勤	3. 全文內的單位是否盡量一致，例如採用 M8 螺栓鎖固，可是後面的 A 計算卻採用 0.315 英吋計算斷面積。 4. 基礎錨定螺栓在規範內稱為錨栓，請區分螺栓與錨栓以顯示其放置位置。另外，全文未見錨栓固定時對混凝土破壞之檢核。 5. 金屬扣件之螺栓是否應規定鎖多緊才符合規定。 6. 鋼結構規範第 10 章無拉力與剪力同時作用採用之規定，可是內文皆參考此規定，請說明為何要採此方式做檢核。	1. 將修正手冊中所有耐風設計示範例，將其單位保持一致性。 2. 遵照辦理。 3. 通常由廠商提供螺栓所需扭力給施工團隊。 4. 此規定為舊規定，將於手冊中刪除。
黃理事允巍	1. 增加鋁支架結構強度建議。	1. 遵照辦理。
蔡副研究員宜中	1. 附錄一的手冊草案，是準備未來若付印出版時用的，故其部分編排可跳脫所裡研究案的規定，以一般市售手冊的方式來編輯。比如說：圖表若是自己畫的，就無需再寫「資料來源：本研究整理」；但是，若圖表是引述他人資料，當然應該清楚標明資料來源。 2. 太陽光電系統的設計包羅萬象，本研究所研擬之手冊草案不可能一一含括進來。本案所研擬的 5 種示範例，是一種拋磚引玉的作用，供技師們設計時參考。	1. 遵照辦理。 2. 感謝蔡副研究員之意見。
蔡組長綽芳	1. 近幾年太陽能板破壞漸漸比較少了，或許未來會用鋼構來做較不會破壞，但鋼構會不會造成屋頂更多的載重，這個問題可能需要了解一下，確認是否需要做結構計算。 2. 斜屋頂平貼型如何跟原本的屋頂	1. 理論上無論是用鋼構或鋁構，若作妥慎之耐風設計，且材料品質優良，皆可達到一定的安全性。手冊中之示範例將採用國內

	接合，以及被接合物的強度需注意。	常見型式。 2. 其接合方式將於示範例中以圖示說明，同時將計算屋頂所受拉拔力，並提示接合處之設計檢核要項，以確保原屋頂不會被破壞。

附錄五 第一次專家座談會議紀錄

內政部建築研究所協同研究案

「太陽光電系統耐風設計及結構分析手冊之研擬」

第 1 次專家座談會議

會議時間：113 年 6 月 19 日（星期三）下午 2 時 30 分

會議地點：內政部建築研究所 13 樓簡報室

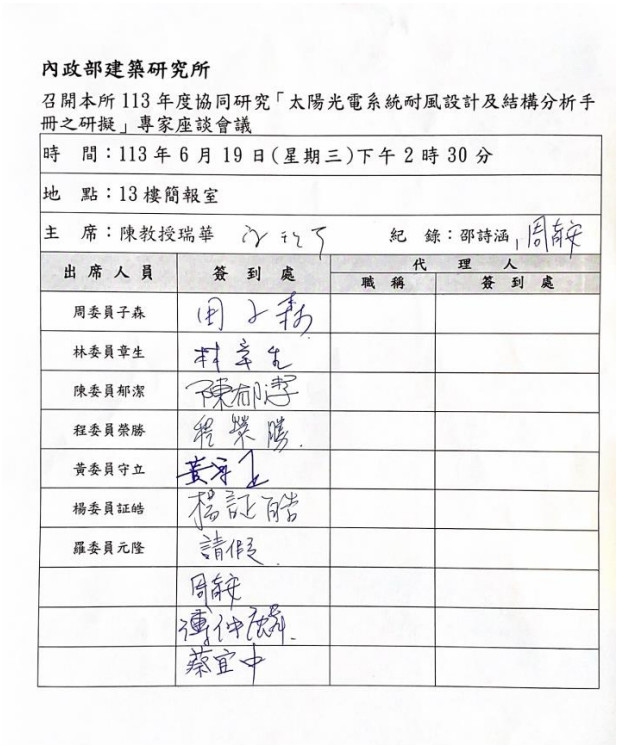
新北市新店區北新路三段 200 號

主 持 人：陳協同主持人瑞華

會議討論內容：(1)瞭解國內常見支撐架之結構型式及設計實務

(2)討論建立簡易結構評估系統之可行性

出席及請假委員：



內政部建築研究所

召開本所 113 年度協同研究「太陽光電系統耐風設計及結構分析手冊之研擬」專家座談會議

時　間：113 年 6 月 19 日(星期三)下午 2 時 30 分

地　點：13 樓簡報室

主　席：陳教授瑞華　　紀　錄：邵詩涵

出席人員	簽到處	代理人 職稱	代理人 簽到處
周委員子森			
林委員章生			
陳委員郁潔			
程委員榮勝			
黃委員守立			
楊委員証皓			
羅委員元隆	請假		

會議記錄：（依委員姓氏筆劃順序）

委員	專家學者意見	研究團隊綜合回應
周委員子森	1. 面板及骨架的撓度應明訂容許值以避免破壞或振動。震動或共振問題可參考規範對柔性結構的“陣風反應因子”相關章節規定 2. 有些新建案的光電板系統不在五種形式內，設計風壓建議提供指引，如空橋或屋簷板、造型鋼構包板頂部的光電板。	1. 本計劃會將撓度納入手冊中檢核事項。各示範例之支撐架皆假設為剛性結構，自然頻率大於 1Hz。 2. 本計畫只提供五種形式光電板系統，其他形式並未涵蓋，建議未來可納入其他研究計畫。
林委員章生	1. 因為主要破壞位置大部分在接合處，故面板和構架接合的強度分析為首要重點。 2. 不同風速、風向角的系統頻率會改變。一般而言，隨著風速上升頻率會隨之增加，可注意一下氣彈效應。 3. 輕量化是耐震效率考量，但會造成耐風性的下降。	1. 感謝林委員的意見，會納入分析考慮。 2. 各示範例之支撐架皆假設為剛性結構，自然頻率大於 1Hz，應無氣彈效應問題。 3. 同意委員的看法。
陳委員郁潔	1. 耐風設計手冊研究方向建議從兩方面發展： (1)傳統設計流程（建議靜力分析） (2) 廣納業界現有規格、預算，回饋比較市面產品可承受風壓與規範設計值之	(1)遵照辦理。 (2)宜由其他研究計劃進行探討。

	差異	
程委員榮勝	1. 支架結構計算及簽證費用非主要考量。 2. 有必要針對太陽光電系統耐風設計及結構分析提出可供遵循的規範。 3. 第三方審核結構計算書或現場工程查核應有一定幫助。	1. 感謝程委員的意見。 2. 本研究根據 CNS 16189 研擬示範例。 3. 同意林委員的意見。
黃委員守立	1. 建議比較橋梁結構設計規範，以撓度來限制約束太陽能面板模組鎖固材產生振動鬆弛的可能性。 2. 目前市面上支架結構型式種類繁多，再擬定設計手冊前建議應先做分類才能擬定標準化作業。 3. 建議於設計手冊中規定必要之分析項目、流程及檢驗標準，供技師於檢核計算時有參考遵循依據。 4. 桁梁的間距及長度會影響太陽能面板模組鎖固的程度，建議應於手冊中建議可採用的 L/H 比例值，L:桁梁跨度(Span)，H:桁梁斷面深度，供技師及太陽能施工廠商於佈設支架結構時，有一個初步的遵循依據，後續結構分析再檢核有效應力比及容許撓度值，或可因此減輕技師及施工承商往復檢討支架結構布局的時間與人力成	1. 本計劃會將撓度納入手冊中檢核事項。 2. 會做業界訪談以得到更多相關資訊。 3. 遵造辦理。 4. 本計劃會將撓度納入手冊中檢核事項。

	本。	
楊委員証皓	1. 建築物太陽光電系統設計之案例類型建議可廣泛設計。 2. 多樣化之光電模組扣件宜建立系統結構動態震動分析之參考依據。 3. 簡易結構評估應在安全優先條件下，應需結構分析簽證，方符合實際安全需求。	1. 感謝楊委員的意見。 2. 本計劃為依據 CNS16189 及 108 年建研所委託研究計劃「太陽光電系統之耐風設計規範研擬」之成果報告所做之耐風設計，未涵蓋結構動態分析問題。 3. 結構安全的確應優先。
蔡副研究員宜中	1. CNS16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」已在 2022 年頒布施行，也預計下一版之「建築物耐風設計規範及解說」可能會於 4.1 節之解說，新增說明太陽能光電系統耐風設計可參考國家標準 CNS16189，故為使設計者能正確根據 CNS16189 作耐風設計以確保結構安全性，本手冊（草案）乃當之急。 2. 由簡報可瞭解此手冊（草案）針對常見太陽光電系統分為 5 種類型，但 CN16189 卻只有 4 種類型，比此手冊（草案）少了「平屋頂棚架型」是否以後 CNS16189 還要增修許以符合需求？或者可增加「BIPV」（建築物一體型太陽光電系統，用在屋頂、外牆、遮陽板或路	1. 感謝蔡副研究員的支持。 2. 感謝蔡副研究員的意見。CNS 16189 未來會增加平屋頂單斜式棚架型之設計規定，在修訂之前，本計畫暫以「太陽光電系統之耐風設計規範研擬」成果報告做設計。 BIPV 建議於其他計畫中考慮。 3. 感謝蔡副研究員的意見。

	燈)。 3. 基本上立法院希望我們要建立太陽光電系統簡易評估系統，是要減少結構技師簽證費（約每八千~三萬元）可是(1)節省的錢非給屋主，而是給太陽能工程公司，不見得會回饋給屋主；(2)如以 20 年的租期，結構技師簽證三萬元等於每年一千五百元，省小錢若對未來造成巨大風災有意義嗎？	
蔡組長綽芳	1. 目前國土署正在進行太陽能板之相關法規討論，鑒於屋頂棚架型系統之太陽能板有無突出建築立面對風壓係數影響甚大，建議未來專家座談會邀請國土署建管組的人員參加，以助於往後擬定相關法規。 2. 面板可能有傷害人的危險，若目前研究還不夠保險，可以在手冊寫個警語，可在管理維護做汰換或修正。 3. 要注意被固定的本體結構強度是否足夠。	1. 感謝蔡組長的建議。下次專家座談會嘗試邀清國土署建管組的人員參加。 2. 研究團隊會考慮將此警語納入手冊中。 3. 針對設置於屋頂上之太陽光電系統，手冊中會提醒應以風拉拔力檢核原屋頂之強度及防水層是否足夠。

附錄六 第二次專家座談會議紀錄

內政部建築研究所協同研究案

「太陽光電系統耐風設計及結構分析手冊之研擬」

第 2 次專家座談會議

會議時間：113 年 9 月 27 日（星期三）下午 2 時 30 分

會議地點：內政部建築研究所 15 樓簡報室

新北市新店區北新路三段 200 號

主 持 人：陳協同主持人瑞華

會議討論內容：針對「太陽光電系統耐風設計及結構分析手冊」之初稿提供建議

出席及請假委員：（詳如簽到單）

內政部建築研究所

召開本所 113 年度協同研究「太陽光電系統耐風設計及結構分析手冊之研擬」專家座談會議

時　間：113 年 9 月 27 日(星期五)下午 2 時 30 分			
地　點：15 樓簡報室			
主　席：陳教授瑞華		紀　錄：邵詩涵、周育安	
出席人員	簽到處	代理人 職稱	代理人 簽到處
王委員人牧	王世牧		
阮委員于軒	阮于軒		
周委員俊融	周俊融		
陳委員威成	陳威成		
黃委員朝揚	請假		
蔡委員國林	蔡國林		
陳瑞華	陳瑞華		
傅仲麟	傅仲麟		
周育安	周育安		
邵詩涵	邵詩涵		
蔡宜中	蔡宜中		

會議記錄：（依委員姓氏筆劃順序）

委員	專家學者意見	研究團隊綜合回應
王委員人牧	1. 本案算例對業界使用 CNS 16189 指引進行光電系統耐風設計之結構設計應極具參考價值。 2. CNS 16189 指引中各種類型太陽光電系統風載重評估方式所適用範圍可在算例手冊中多加提示注意。 3. 屋頂單斜式棚架型之風洞試驗研究宜加速進行，以符合工程實務之需求，算例之作法是目前可行的方案。	1. 感謝王委員的肯定。 2. 會將適用範圍納入手冊中。 3. 感謝王委員的意見。
阮委員于軒	1. 本計畫所考慮之不同型式之太陽光電系統之類型合理含蓋台灣現況，可再貼加目前法規和政策所放寬之違建和空屋之建築物，可貼加之示範例，和最高棚架式太陽能板之高度，以利未來建築物結合太陽能板之全面執行和政策推行。	1. 感謝阮委員的意見。
周委員俊融	1. 柱長度應免雜項規定，應含模組為 4.5 m 內，也會有細長比過大之情況，導致側位移過大。 2. 請補上鋁擠型強度。 3. 相關扣件（夾具、壓塊）的破壞型態，例：全斷面降伏、淨斷面斷裂、塊狀剪力破壞、螺栓破壞、承壓破壞等，建議納入手冊中。	1. 感謝周委員的意見，會將納入手冊注意事項中。 2. 已補上鋁擠型強度。 3. 感謝王委員的意見，會將納入手冊注意事項中。

陳委員威成	1. 依再生能源發展條例第12-1條，未來新建建築物強制設置太陽光電板，本計劃有助於未來政策推動。 2. 請教本案使用現行耐風設計規範或研修中之規範？如採用新規範應於手冊中加註。 3. 建議可含括「設置再生能源設施免請領雜項執照標準」第五條、第六條之各種型式高度。 4. 依能源署規定，太陽光電模組產品應通過 CNS 61215或IEC 61215之靜態機械正負向加載 5400 帕斯卡試驗，是否已符合耐風設計之風力？	1. 感謝陳委員的肯定。 2. 採用現行耐風設計規範，以及CNS 16189、108年建研所委託研究計劃「太陽光電系統之耐風設計規範研擬」之成果報告，會加註所採用規範。 3. 感謝陳委員的意見。 4. 針對面板本身而言，一般應無問題，但在特殊情形下(例如太陽能板超出建築物外牆)，有可能會超出 IEC 61215試驗之風力。
蔡委員國林	1. 太陽能光電板建議依CNS 11526 進行測試，試驗其耐風壓性能。 2. 一般帷幕牆使所之螺栓材質為不鏽鋼。 3. 丟料鋁擠型一般為 6063-T5、6105-T5。 4. 太陽能板超出建築物外牆，因其風壓數倍於設置於建築物內，且為懸臂結構，建議審慎評估。	1. 感謝蔡委員的意見。 2. 已修正。 3. 感謝蔡委員的意見。 4. 同意委員意見。
蔡副研究員宜中	1. 有關本所 2019 年「太陽光電系統之耐風設計規範研擬」研究中所列設計風壓值是基於「面板未超出建築物外牆」之假設。然而根據風洞實驗結果，屋頂棚架型面板若超出建築物外牆，會使所受風壓大	1. 感謝蔡副研究員的意見。 2. 根據風洞實驗結果，屋頂棚架型面板若超出建築物外牆，會使所受風壓大增，且在「太陽光電系統之耐風設計規範研擬」中所列設計風壓值亦是基於面板未超出建

	增。 2. 而「設置再生能源設施免請領雜項執照標準」第 6 條規定：「太陽光電發電設備設置於屋頂、露臺或屋頂突出物者，得視為屋簷，其最大設置範圍以建築物外牆中心線或其代替柱中心線外一公尺為限，且不得超過建築基地範圍」。若有此情形會使屋頂棚架型面板所受風壓大增，雖然同法亦規定有此情形者另應檢附依法登記開業或執業之建築師、土木技師或結構技師出具太陽光電發電設備結構計算說明書，但仍會增加耐風設計之因難處。	築物外牆之假設。但「設置再生能源設施免請領雜項執照標準」允許設置範圍超出建築物外牆中心線，技師耐風設計會有困難，此問題有待未來各方共同研議解決。

附錄七 第三次專家座談會議紀錄

內政部建築研究所協同研究案

「太陽光電系統耐風設計及結構分析手冊之研擬」

第 3 次專家座談會議

會議時間：113 年 11 月 11 日（星期三）下午 2 時 30 分

會議地點：內政部建築研究所 15 樓簡報室

新北市新店區北新路三段 200 號

主 持 人：陳協同主持人瑞華

會議討論內容：針對「太陽光電系統耐風設計及結構分析手冊」之初稿提供建議

出席及請假委員：（詳如簽到單）

內政部建築研究所

召開本所 113 年度協同研究「太陽光電系統耐風設計及結構分析手冊之研擬」專家座談會議

時　間：113 年 11 月 11 日(星期一)下午 2 時 30 分

地　點：15 樓簡報室

主　席：陳協同主持人瑞華　　紀　錄：邵詩涵、周育安

出席人員	簽到處	代理人 職稱	代理人 簽到處
王委員人牧			
周委員子森			
陳委員威成			
陳委員郁潔	請假		
黃委員朝揚			
黃委員守立			
黎委員益肇			
賴委員映宇			
陳瑞華			
傅仲麟			
周育安			
邵詩涵			
蔡宜中			

會議記錄：（依委員姓氏筆劃順序）

委員	專家學者意見	研究團隊綜合回應
王委員人牧	1. 簡報中三示範例，呈現三種不同種類類型太陽光電系統之設計過程，包括系統型態參數，設計指引使用方式，風力風壓係數計算程序，構件及扣件應力計算設計檢核等步驟，相當詳盡，應對正確使用指引有相當助益。 2. 構件及扣件設計部分應是呈現專家訪談的結果，可在收集更多資料提供更符合實務設計之操作。 3. 最後，特別讚許專案執行方非常具有前瞻性，已預先檢核新版規範內容。	1. 感謝王委員的肯定。 2. 感謝王委員的意見。 3. 感謝王委員的肯定。
周委員子森	1. 設計依據建議增加 AISC-ASD/LRFD，AISC Design Guide 27(SUS steel)，鋼結構極限強度設計法等，供設計者引用。 2. 容許撓度建議不用乘上 1.25 風力係數。 3. 6061-T6 極限強度應為 38 ksi(262Mpa)。 4. 螺栓拉力建議可兼採用 AAMA 公式設計。	1. 一般業界對太陽光電系統是採用 ASD 規範，將於手冊中列出參考規範。 2. 遵照辦理。 3. 將仔細檢查數據。 4. 感謝周委員的意見。
陳委員威成	1. 簡報中列出幾種風災破壞模式，建議可將破壞模式照片納入手冊中。 2. 據悉，今年幾次風災，有屋頂棚架或屋頂踞置型系統基座破壞，亦有可能屋頂版強度不足或錨定不良，建議予以提示。 3. 風雨球場類型高度 9 公尺者是否適用於本手冊? 4. 各種類型是否需耐震設計?如何需考量建議說明。	1. 遵照辦理。 2. 遵照辦理。 3. 只要滿足 CNS 的條件(a)支撐架具支撐柱，獨立設置於地面，及(b) 棚架至少有兩個側面各有 80%以上面積為開口，應都為適用。 4. 通常太陽光電系統之設計由風載重控制，故本手冊著重於其耐風設計，將於手冊中提醒技師另需作耐震設計。
黃委員朝揚	1. 建議加入分析設計流程。 2. 建議比較目前業界結構計算書分	1. 會於手冊各章示範例前提供分析設計流程

	析與手冊案例的差異。	圖。 2. 感謝委員的意見。
賴委員映宇	1. 耐風設計建議納入專家風力系統，以減低工程師誤用可能性。 2. 建議示範例將需檢核的部分列表作為基礎計算的細項依據，讓工程師有所依循，例如：目錄（細項編列頁碼）、設計載重（自重、風力、地震力...）、載重組合、設計規範、材料強度（斷面性質）、主構架強度及接合、面板強度及接合、基礎接合（與主體結構或是）原有地面等。 3. 示範例中，材質 6061-T6 較少見，且使用鋼結構設計規範的載重組合，適用性可再斟酌。 4. 示範例斷面形狀建議厚度至少 3 mm 以上，面板扣件是否適度增加以提升贅餘度。 5. 面板與構件的受力方式可思考以集中力增加，並比對與均佈力的差異。 6. 橫梁接縱梁扣件連接處請小心檢核。	1. 建議納入其他研究案。 2. 遵照辦理。 3. 台灣業界常見之構件材質為 6063-T5，扣件材質為 6061-T6，可適用美國鋁結構規範「Aluminum Design Manual」(2005)作設計。 4. 會確認面板扣件的厚度。 5. 感謝委員的意見，會斟酌加載方式。 6. 感謝委員的意見。
黎委員益肇	1. 本計畫完成太陽光電系統耐風設計及結構分析手冊，對於食物設計上有極大的幫助，值得肯定。 2. 手冊圖片引用需授權。 3. 手冊撰寫用字遣詞應謹慎且易讀。 4. 建議手冊前面加入符號表說明。 5. 單斜式棚架型太陽能板，均用底下無阻擋，建議加上有阻擋案例，讓使用者了解如何判斷有無阻擋。	1. 感謝委員的肯定。 2. 會去確認圖片授權。 3. 會再確認手冊用字。 4. 將參考辦理。 5. 會以文字說明單斜式棚架下方阻塞比低於 50%，視為無阻擋。
陳委員郁潔	1. 簡報距置型範例 20/56：計算所得設計風壓僅約當或小於 100kgf/m^2，與工程經驗或生活經驗有段差異。另外若設置在高樓設計風壓大約是多少？ 2. 計算範例第五章節內容扣件檢核只針對螺栓計算，實際上鋁擠型、鋼材、鋁扣件的厚度及有效寬度都缺少計算，無法真正確保	1. 由於一般距置型系統高度不高，故風壓小於高樓所受風壓。 2. 會以螺栓作為例子說明如何計算受力，而螺栓接合母材的檢核會以警語形式納入手冊，提醒使用者注意需要檢核。

	接頭或扣件安全。 3. 簡報 84 頁，懸臂立柱除了軸力還有柱底彎矩，只靠二顆 M8 螺栓強度是否足夠，請確認。 4. 面板本體強度也應納入檢討。 5. 目前為初稿階段，請先評估此階段內容範圍，如果分析手冊要放入各類型光電系統範例，應該先調查目前業界設計標準或參考相關風洞研究以免設計載重太低或太高。此外範例的檢核內容應該要完整，以做為工程界正確的引導。	3. 遵照辦理。 4. 參考辦理。 5. 感謝委員的意見。
蔡副研究員 宜中	1. 本研究是準備未來出版手冊時用的，故其內文的單位請盡量一致，以利設計參考。手冊中耐風設計示範例，單位有公制、英制、SI 制均未加以統一，建議加以整合以達其一致性。 2. 耐風系統支撐結構所用橫梁縱梁構件均為特製產品，設計者只能選用，其配套安全須有特別規定，相關的施工技術品質亦很重要。如能有施工標準作業程序規定，內容當更豐富完整。 3. 設計依據只要顯示一級單位（如內政部，不要寫內政部國土管理組）。	1. 將整合以確保手冊中所有耐風設計示範例的單位保持一致。 2. 同意委員的意見。 3. 遵照辦理。

附錄八 第一次專家訪談紀錄

內政部建築研究所協同研究案

「太陽光電系統耐風設計及結構分析手冊之研擬」

第 1 次專家訪談

訪談時間：113 年 5 月 20 日（星期一）下午 1 時 30 分

訪談地點：全面性系統整合科技股份有限公司

臺中市西屯區臺灣大道四段 925 號 17 樓之 6

訪談主題：太陽能板專業問題

出席人員：邱智佑技師

訪談記錄：

項次	問題	技師回應
1	有效面積計算	面板扣件可視為單向版進行計算。 其餘桿件一般不會用第三章進行計算，不用進行有效面積計算。 而面板（含面板框架）本身不用再檢核。 (註:本研究將參考技師意見，根據建築物耐風設計規範及 CNS 16189 之規定，研擬手冊之設計示範例。)
2	桿件應力分析	除面板扣件，其餘桿件為避免過度設計，一般用耐風規範第二章進行風力計算，並將風力以點荷重形式施加在扣件位置（亦或以線載重施加在連接面板之桿件上）以軟體進行分析桿件應力，用軟體判斷桿件應力是否合乎標準。利用率一般控制在應力比為 0.7~0.9。

		(註:本研究將參考技師意見，根據建築物耐風設計規範及 CNS 16189 之規定，研擬手冊之設計示範例。)
3	扣件應力分析	用耐風規範第二章進行風力計算，並將風力輸入軟體進行分析。取桿件連接處之剪力、x、y 向彎矩出來進行人工分析，不過此處要注意連接形式可傳遞的力為何。利用率一般控制應力比為在 0.7~0.9。 (註:本研究將參考技師意見，根據建築物耐風設計規範及 CNS 16189 之規定，研擬手冊之設計示範例。)
4	常見構架形式	分斜屋頂平貼型、地面或平屋頂踞置型。邱技師所慣用的是全面性系統整合科技股份有限公司所特製的鋁擠斷面及鋁製零件，可方便現場接合（如下圖）；而棚架型則是一般鋼構架形式。 斜屋頂平貼型要注意面板若離屋頂太近會影響能源利用效率，導致效率差，而太遠風壓會過大，一般業界會控制在 15~25 cm 之間，通常 30cm 為零界值。 為達到最佳的能源利用效率，太陽能板的傾斜角度一般會向南且與所在工址緯度相同。
5	一般太陽能板角度為何	目前國內太陽能板角度為 5 度、10 度、15 度最常見，越往南角度越小。
6	鋼構、鋁擠型桿件使用時機	因為太陽能板有電位差的問題，所以會加速構件的氧化，使用熱鍍鋅鋼一般能撐 20~30 年，而鋁會在表面產生緻密氧化層避免繼續氧化鏽蝕（ISO9223）。若有使用年限需求可考慮用鋁。 棚架型使用 H 型鋼連接 C 型鋼或鋁製構件；踞置型、斜屋頂平貼型一般使用特製的鋁製構件。
7	與地面或屋頂接合方式	1. 用自攻螺栓連接構件，再鋪上防水

		層。 2. 鋪上防水層用自攻螺栓連接混凝土基座，再用自攻螺栓連接構件，再鋪上第二層防水層。 3. 不破壞原地板，使用大片混凝土基座，以自重抵抗風壓。
8	推薦之業界人士	不同技師或顧問公司習慣的設計樣式都不同，或有自己特製的接合扣件，宜參考多方意見：1. 全面性系統整合科技股份有限公司的陳昱帆專案副理（23583908 分機 131）：許多特製的鋁擠斷面和造型，方便接合。2. 林建全技師（0915-62008）:設計很有特色，建議做訪談。3. 廖禎松技師

附錄九 第二次專家訪談紀錄

內政部建築研究所協同研究案

「太陽光電系統耐風設計及結構分析手冊之研擬」

第 2 次專家訪談

訪談時間：113 年 7 月 31 日下午 1 時 30 分

訪談地點：臺北市中正區重慶南路一段 104 號

訪談主題：太陽能板專業問題

出席人員：林建全技師

訪談記錄：

項次	問題	技師回應
1	棚架型、距置型、斜屋頂平貼型太陽光電系統之常見構架形式？	因自重考量斜屋頂平貼型一般用鋁擠型。棚架型、距置型一般柱與梁使用鋼構，只有上部接合處可能會使用鋁。
2	太陽光電系統與地面或屋頂接合方式？	一般是植筋，若不希望破壞原有防水層可用自重式（直接澆鑄）。
3	將梁分析視為簡支梁，使風力重簡化成線載重。	風力若是下壓可視為線荷載，若是上揚由面板扣件承拉可視為點荷載，但都可簡化為線載重。
4	梁可否忽略扭轉問題？	可以，且 H 型鋼本身就不用檢核扭轉。
5	若只針對風力和靜載，梁柱彎矩所造成之應力是否為控制項？	是，幾乎由彎矩控制，只有少數會由剪力控制。
6	鋁擠型台灣沒有規範，一般是使用什麼進行檢核？國外規範 ADM？	以鋼構規範檢核，使用 ASD 的載重組合和材力方法 0.6fy 去檢核鋁擠型的內力已足夠保守。

7	面板模組是否需要檢核？	不檢核，只在計算書提供面板風力。
8	變形量是否需檢核？	不需要。
9	連接處之應力檢核？ 螺栓檢核：拉力、剪力、聯合應力比 擋板：彎曲應力檢核	混凝土基座之螺栓可用「喜利得」檢核。 梁柱連接處螺栓用鋼構規範檢核(附錄D)，基座之螺栓還要考慮混凝土強度。 擋板、柱基板無需檢核，但會比主結構厚。
10	斜屋頂平貼型若單用夾具該如何檢核？	單用夾具看廠商給的實驗數據，若用自攻螺栓以冷軋鋼構規範檢核。
11	是否可繪製桿件接合處螺栓細部之立體示意圖？	目前技師工作繁忙，詢問其他人選。
12	推薦之業界人士？	賴志青技師

附錄十 第三次專家訪談紀錄

內政部建築研究所協同研究案

「太陽光電系統耐風設計及結構分析手冊之研擬」

第 3 次專家訪談

訪談時間：113 年 10 月 22 日下午 1 時 30 分

訪談地點：全面性系統整合科技股份有限公司

臺中市西屯區臺灣大道四段 925 號 17 樓之 6

訪談主題：太陽能板專業問題

出席人員：邱智佑技師

訪談記錄：

項次	問題	技師回應
1	若是在兩種不同構材間，該用哪一種規範比較恰當？	個人的處理方式為 ASD 比冷軋的載重組合更可以取得較大的力量，所以取 ASD 的載重組合力量來設計（不代表其他技師），螺栓檢核亦是用 ASD 規範。
2	焊道是否需要檢核？	柱底（頂）鈑一般會採用滲透焊，所以不會去檢討焊道。
3	手冊研擬中第四節、第五節檢核的部分，有沒有誤用規範或對規範的理解有誤，或是其他錯誤需要修正？	棚架縱梁及橫梁的定義，在文章中有錯置，有點混淆要說明的部分。一般縱梁指的是縱深方向，也就是面對架台的方向（由南向北）。不過，應該也無傷大雅
		H250*175*7*11 鋼材的實際尺寸應為 244*175*7*11，需注意一下。
		SUS304 不鏽鋼的 F_u=500Mpa, F_y=200Mpa

		A2-70 螺栓的 F_y =700Mpa, F_y =450Mpa，A2-50 螺栓的材質才是 SUS304 不鏽鋼。詳細螺栓規格可參考 CNS 4234-1，用粗牙螺栓進行檢核。
		螺栓檢核的方式大致上沒什麼問題。
4	不鏽鋼螺絲規範只有抗拉強度，沒有抗剪強度，該如何檢核？	不鏽鋼螺絲其實國外有定義（AAMA），但是簡化來說，慣用的是採用鋼結構的方式估算，容許拉力 0.33Fu，容許剪力 0.17Fu。
5	有沒有實務上一般會檢核但文章中卻遺漏的部分，或者是額外建議檢核的項目？	在實務上桿件有接合的地方都需要檢核，除了螺栓、焊道以外還有扣具、桿件本身的強度，最後力量傳遞到基礎時的錨定螺栓、植筋（栓）深度或是基礎承載力，甚至屋頂型之總重對於屋頂承載是否容許、樓板有無貫穿破壞或是梁額外負載等等。相信這些細項不容易在學術文章中均予以納入喔，但可以考慮看看。有看過其他技師的計算書，其實相當簡略也不見得完整，以示範例而言算是豐富。

附錄十一 第四次專家訪談紀錄

內政部建築研究所協同研究案

「太陽光電系統耐風設計及結構分析手冊之研擬」

第 4 次專家訪談

訪談時間：113 年 11 月 2 日上午 9 時 30 分

訪談地點：全面性系統整合科技股份有限公司

臺中市西屯區臺灣大道四段 925 號 17 樓之 6

訪談主題：太陽能板專業問題

出席人員：林建全技師

訪談記錄：

項次	問題	技師回應
1	所編寫的手冊研擬中，有沒有誤用規範或對規範的理解有誤，或是其他錯誤需要修正？	關於流程圖，可分成上部結構、下部結構進行檢核，把下部結構的基礎移到最後。
		可以在開頭列出有什麼章節，每節針對的計算或檢核項目為何。
		可以在開頭列出太陽能結構計算書需要的項目：平面圖、立面圖、剖面圖、構架圖、接合設計詳圖、基座或基礎設計詳圖、構件及接合物材料規格註明、套繪既有建築物屋頂結構平面圖、規範依據說明、材料規格強度及斷面性質說明、設計載重計算、主構架結構模型建立及受力分析、構件應力及強度檢核、接合強度檢核計算、面板扣件及桁梁受力檢核計算、基座接合設計或基礎設計檢核及基座接合設計或基礎設計檢核。

		雖然規範中會分區計算風壓，但實務上為計算方便會統一使用風壓最大的三區風壓值。
		理論上四面地況不同的情況要分開討論，但實務上為計算方便也可挑出會造成最大風力的地況進行分析。
		因為是根據 CNS16189 進行風力計算，與現今一般業界使用的風力規範有所差別，所以在風力分析的部分很難提出相關的意見。
		桿件應力比求出來都偏小，可以再確認一下分析軟體內的參數設置有無錯誤。
		大致上而言，螺栓檢核的方式沒什麼問題。
2	焊道是否需要檢核？	可以使用滲透焊，就不用特別去檢討焊道。
3	不鏽鋼螺絲規範只有抗拉強度，沒有抗剪強度，該如何檢核？	可參考 AA-ADM-2005，抗拉強度與抗剪強度會差根號三，但個人慣用的是採用鋼結構的方式估算，容許拉力 0.33Fu，容許剪力 0.17Fu。

參考文獻

1. 內政部，「建築技術規則建築設計施工編」，2004。
2. 內政部，「鋼結構容許應力設計法規範及解說」，2010。
3. 內政部，「建築物耐風設計規範與解說」，2014。
4. 內政部，「冷軋型鋼構造建築物結構設計規範及解說」，2016。
5. 內政部建研所，「太陽光電系統之耐風設計規範研擬」，委託研究計劃成果報告，2019。
6. 內政部，「建築物混凝土結構設計規範」，2023。
7. 經濟部，CNS 4234-1「不鏽鋼結件之機械性質－第 1 部：螺栓、螺釘及螺椿」，2012。
8. 經濟部，「太陽光電系統支撐架結構設計範例」，2016。
9. 經濟部，「太陽光電系統支撐架結構設計參考手冊」，2016。
10. 經濟部，「設置再生能源設施免請領雜項執照標準」，2021
11. 經濟部，CNS 16189「太陽光電系統之設計風載重估算指引」，2022。
12. 陳瑞華(主編)，建築物耐風設計技術手冊，2017。
13. 陳瑞華(主編)，帷幕牆系統結構耐風設計手冊，2020 年。
14. The Aluminum Association，「Aluminum Design Manual」，2005。
15. 全面性系統整合科技股份有限公司提供資料。

太陽光電系統耐風設計及結構分析手冊之研擬
出版機關：內政部建築研究所
電話：(02) 89127890
地址：新北市新店區北新路 3 段 200 號 13 樓
網址：http://www.abri.gov.tw
編者：**欒中丕、陳瑞華、傅仲麟、蔡宜中、賴宜暉、劉青峰、周育安、邵詩涵**
出版年月：113 年 12 月
版次：第 1 版
ISBN：978-626-7501-19-1　(平裝)