

(科技部 GRB 編號)

PG10801-0777

高強度鋼構造柱於高溫下受壓強度之研究

受委託者：國立交通大學
研究主持人：陳誠直 教授
研究助理：徐連君、莊鎬璟、黃薪曄
研究期程：中華民國 108 年 1 月至 108 年 12 月
研究經費：新臺幣 200 萬元

內政部建築研究所委託研究報告

中華民國 108 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	III
圖次	V
摘要	IX
ABSTRACT	XI
第一章 概論	1
第一節 研究緣起與背景	1
第二節 研究目的	2
第三節 研究方法	2
第二章 規範與文獻回顧	5
第一節 耐火實驗法	5
第二節 設計規範	6
第三節 文獻回顧	16
第三章 高強度銲接箱型鋼柱高溫實驗	25
第一節 試體規劃與設計	25
第二節 實驗設備與設置	34
第三節 量測儀器	35
第四節 實驗步驟	37
第四章 實驗結果與討論	39
第一節 實驗結果	39
第二節 實驗結果討論	67
第五章 受壓強度計算模式	70
第一節 規範計算值與討論	70
第二節 高溫下銲接箱型受壓構材之強度計算模式	74

第六章	結論與建議	76
第一節	結論.....	76
第二節	建議.....	77
附錄一	試體設計圖	78
附錄二	銲接箱型鋼柱四角隅銲接程序	96
附錄三	銲道超音波檢測	98
附錄四	高溫下試體受壓強度計算	106
附錄五	審查意見與答覆	114
參考書目	132

表次

表 1-1	溫度變化下鋼材之機械性質與折減係數	1
表 2-1	依截面強度荷載比 R 確定的鋼構件的臨界溫度 T'_d ($^{\circ}\text{C}$)	9
表 2-2	依穩定荷載比 R' 確定的軸心受壓鋼構件的臨界溫度 T''_d ($^{\circ}\text{C}$)	10
表 2-3	溫度變化下鋼材機械性質之折減係數	13
表 2-4	溫度變化下鋼材機械性質之折減係數	16
表 2-5	BISPLATE 80 及 XLERPLATE Gr. 350 之折減係數	17
表 2-6	SM570 鋼材高溫下之機械性質	18
表 2-7	Eurocode 3 與 Kwon 計算之折減係數比較	19
表 3-1	SM570MC 鋼材之化性及物性	27
表 3-2	GMX811-Ni1 鐳材之物性	27
表 3-3	試體參數表	29
表 4-1	實驗結果總表	65
表 5-1	不同規範計算之高溫受壓強度	72

圖次

圖 1-1	研究流程圖	3
圖 2-1	標準升溫曲線	6
圖 2-2	Yang and Hsu (2009)實驗設置圖	20
圖 2-3	Yang and Yang (2015)實驗設置圖	21
圖 2-4	Takagi and Deierlein (2007)模擬不同溫度下鋼柱受壓強度	22
圖 2-5	Wang 等人 (2013)高強度與普通強度鋼柱之穩定因數比較	23
圖 3-1	試體示意圖	26
圖 3-2	鋼柱構件以 AISC 計算常溫受壓強度與細長比關係.....	28
圖 3-3	鋼柱構件以 AISC 計算高溫受壓強度與細長比關係.....	28
圖 3-4	試體以 AISC 計算高溫受壓強度.....	30
圖 3-5	上端部銲接示意圖	30
圖 3-6	下端部銲接示意圖	31
圖 3-7	試體 U 型組立圖	31
圖 3-8	潛弧銲接 SAW 銲接施作圖	32
圖 3-9	超音波檢測圖	32
圖 3-10	試體完成圖	33
圖 3-11	鋼板試片應力應變曲線圖	33
圖 3-12	防火實驗中心之複合實驗爐	34
圖 3-13	實驗設置示意圖	35
圖 3-14	試體熱電偶測點高度及位置配置圖	36
圖 3-15	變形量測位置示意圖	37
圖 4-1	試體 B3T6-39 斷面測點溫度與爐內溫度-時間關係圖	40

圖 4-2	試體 B3T6-39 與爐內平均溫度-時間關係圖	41
圖 4-3	試體 B3T6-39 上下端板軸力-轉角圖	42
圖 4-4	試體 B3T6-39 軸力-軸向變形圖	42
圖 4-5	試體 B3T6-39 軸力-側向位移圖	43
圖 4-6	試體 B3T6-39 實驗後外觀	44
圖 4-7	試體 B3T6-39 實驗後外觀	44
圖 4-8	試體 B3T6-39 實驗後外觀	45
圖 4-9	試體 B4T7-29 斷面測點溫度與爐內溫度-時間關係圖	47
圖 4-10	試體 B4T7-29 與爐內平均溫度-時間關係圖	48
圖 4-11	試體 B4T7-29 上下端板軸力-轉角圖	49
圖 4-12	試體 B4T7-29 軸力-軸向變形圖	49
圖 4-13	試體 B4T7-29 軸力-側向位移圖	50
圖 4-14	試體 B4T7-29 實驗後外觀	50
圖 4-15	試體 B4T7-29 實驗後外觀	51
圖 4-16	試體 B4T7-29 實驗後外觀	51
圖 4-17	試體 B4T7-29 實驗後外觀	51
圖 4-18	試體 B5T6-23 斷面測點溫度與爐內溫度-時間關係圖	53
圖 4-19	試體 B5T6-23 與爐內平均溫度-時間關係圖	54
圖 4-20	試體 B5T6-23 上下端板軸力-轉角圖	55
圖 4-21	試體 B5T6-23 軸力-軸向變形圖	55
圖 4-22	試體 B5T6-23 軸力-側向位移圖	56
圖 4-23	試體 B5T6-23 實驗後外觀	57
圖 4-24	試體 B5T6-23 實驗後外觀	57
圖 4-25	試體 B5T6-23 實驗後局部挫屈外觀	57

圖 4-26	試體 B5T6-23 實驗後局部挫屈外觀	58
圖 4-27	試體 B6T7-19 斷面測點溫度與爐內溫度-時間關係圖	60
圖 4-28	試體 B6T7-19 與爐內平均溫度-時間關係圖	61
圖 4-29	試體 B6T7-19 上下端板軸力-轉角圖	62
圖 4-30	試體 B6T7-19 軸力-軸向變形圖	62
圖 4-31	試體 B6T7-19 軸力-側向位移圖	63
圖 4-32	試體 B6T7-19 實驗後外觀	64
圖 4-33	試體 B6T7-19 實驗後外觀	64
圖 4-34	試體 B6T7-19 實驗後外觀	64
圖 4-35	試體 B6T7-19 實驗後局部挫屈外觀	65
圖 5-1	鋼柱於常溫之受壓強度	70
圖 5-2	銲接箱型鋼柱於高溫之受壓強度	71
圖 5-3	試體高溫受壓強度與規範計算值之比較	74
圖 A-1	柱體挫屈示意圖	106

摘要

關鍵詞：高強度鋼、鋼柱、高溫

一、研究緣起

高強度鋼材的研發與應用已大量增多，高強度鋼材逐漸應用於橋梁與中高層建築物。相較於目前常用的鋼板，高強度鋼材具有高降伏強度與高抗拉強度的特性，因而高強度鋼材的應用於高層建築物有其優勢，特別是承受大載重的低層樓柱構件。國內外對於鋼柱構件於火害中之行為，已有相當程度之研究；然而過去研究大多集中於一般鋼材之火害實驗。反觀現今高強度鋼材的中高層建築物已日漸增多，但採用高強度鋼材的鋼柱於火害下之受壓強度與行為之研究甚少。高強度鋼材在高溫下，其降伏強度和彈性模數的衰減幅度皆大於一般鋼材，故本計畫將進行高強度鋼柱火害實驗，探討其高溫下的受壓強度與行為。

二、研究方法與過程

本研究方法採火害實驗與建立受壓強度計算模式。首先為蒐集與彙整國內外相關文獻與規範，了解影響鋼柱耐火性能之參數與各規範計算之方法。規劃四組 SM570MC 鋼材之實尺寸箱型鋼柱進行火害實驗，探討高強度鋼柱於火害下之行為、受壓強度、破壞模式。進而參考各國規範進行受壓強度計算模式的建立，計算試體的受壓強度並與實驗結果進行比對，建立高強度鋼材箱型鋼柱於高溫下受壓強度之計算模式。

三、重要發現

由實驗結果得知相同溫度下細長比愈大，受壓強度越低；而當鋼柱溫度愈高，鋼柱受壓強度亦愈低。當溫度高於 600°C 後溫度對受壓強度的影響較細長比對強度影響大。箱型斷面採全滲透銲接，實驗後觀察銲道並無破壞跡象。試體設計時箱型斷面皆採用塑性設計斷面，但實驗結果顯示四支試體中寬厚比較高之兩支試體於高溫下亦發生局部挫屈，常溫下符合塑性設計斷面之試體於高溫下仍會發生局部挫屈之現象。由試體受壓強度之計算結果發現以 AISC (2016)之鋼材高溫機械性質折減係數折減降伏強度與彈性模數後，代入國內鋼結構極限設計法之銲接箱型受壓構材公式計算所得之受壓強度最接近實驗值。

四、主要建議事項

1. 建議一

高強度內灌混凝土箱型鋼柱於高溫下抗壓強度之研究：立即可行之建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：中華民國鋼結構協會

國內實務上使用之高強度箱型鋼柱，一般亦內灌高強度混凝土，以提高其受壓強度。此種柱構件受火害高溫作用時，鋼材的導熱性高，鋼材強度與勁度將逐漸衰減；然而內灌的混凝土為熱的不良導體，兩者將相互影響柱構件的受壓強度。後續的研究可探討高強度內灌混凝土箱型鋼柱於高溫下的抗壓強度。

2. 建議二

高強度銲接箱型鋼柱於高溫下受壓強度之研究：中長期性之建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：中華民國鋼結構協會

國內外對於高強度銲接箱型鋼柱高溫下受壓強度之研究甚少，本研究使用四支箱型鋼柱進行火害試驗，由此建立計算模式之應用範圍有限，後續之研究可進行不同之溫度與細長比的定溫加載實驗，以建立完整之受壓強度計算模式。

Abstract

Keywords: high-strength steel, steel column, elevated temperature

The development and application of high-strength steels have been increased significantly. The high-strength steels are widely used in bridges and medium- and high-rise buildings. The high-strength steel has higher yield strength and tensile strength than mild steel. Therefore, the application of the high-strength steel on high-rise buildings has advantages, especially for columns subjected to heavy load. The behavior of steel columns in fire has been studied considerably. However, most of the study focused on the fire test of the mild steel. The use of the high-strength steel has been increasing, but the research of the compressive strength and behavior of steel columns using the high-strength steel under fire is lack. At elevated temperatures, the yield strength and elastic modulus of the high-strength steel decrease more significant than those of the mild steel. Therefore, this study carries out an experiment of the high-strength steel columns in fire to investigate the compressive strength and behavior under high temperature.

The fire test and compressive strength calculation were carried out. Relevant literature and codes were first collected to understand the parameters affecting the fire resistance and various codes' methodology. Four large-scale steel box columns using SM570MC high-strength steel were tested in fire to explore their behavior, compressive strength, and failure mode. Calculation model was studied to calculate the compressive strength of the specimens and to compare with test results. The calculation model for the compressive strength of the box column using high-strength steel at high temperatures was established.

The test results showed that the higher the slenderness ratio, the lower the compressive strength and the higher the temperature, the lower the compressive strength. When the temperature is higher than 600 °C, the influence of the temperature on the compressive is more significant rather than slenderness ratio. The complete joint penetration weld used to build-up the box section resulted in no damage on the weld. Although the cross section of the specimen is a plastic design section, local buckling occurred at high temperatures for two specimens with greater width-to-thickness ratio. Based on the calculation of the compressive strength of the specimens, it is found that the most accurate compressive strength at elevated

temperature of the box column is calculated by domestic codes using relevant reduction factors of the mechanical properties at elevated temperatures.

For immediate strategy:

The high-strength box columns used in engineering practice are generally filled with high-strength concrete to enhance their compressive strength. The strength and stiffness of the steel are gradually attenuated when the columns are at high temperature. However, the internally filled concrete is a poor conductor of heat. The steel and concrete will affect the strength of the column. Further study should be conducted to explore the compressive strength of the high-strength box column filled with high-strength concrete.

For long-term strategy:

There is little research on the compressive strength of high-strength steel box-columns at elevated temperature. In this study, only four specimens are used for fire test. The application of the calculation model based on this test result will be limited. Further study is needed to include other temperatures and slenderness ratios and to establish a complete calculation model of the compressive strength used for high-strength box column at elevated temperature.

第一章 概論

第一節 研究緣起與背景

鋼構造建築物遭受火災時，其強度與剛度會隨溫度上升而折減，易造成鋼構造建築物損壞或倒塌，嚴重威脅人員生命安全。表 1-1 為 Eurocode 3 (2005b) 所建議之高溫下鋼材機械性質，AISC (2016) 所列的機械性質與 Eurocode 3 (2005b) 所建議一致。由表 1-1 可見鋼材於 500°C 其降伏強度開始遞減，而彈性模數於 200°C 就開始遞減。為了避免人員傷亡，國內外皆訂定建築物防火時效之規定。建築防火對結構的要求為在結構遭受火害時，一定時間內能夠持續提供承載能力，不致造成結構崩塌，使人員能夠逃生並且將災害傷亡減至最低。

表 1-1 溫度變化下鋼材之機械性質與折減係數

Steel Temperature θ_a	Reduction factors at temperature θ_a relative to the value of f_y or E_a at 20°C		
	Reduction factor (relative to f_y) for effective yield strength $k_{y,\theta} = f_{y,\theta}/f_y$	Reduction factor (relative to f_y) for proportional limit $k_{p,\theta} = f_{p,\theta}/f_y$	Reduction factor (relative to E_a) for the slope of the linear elastic range $k_{E,\theta} = E_{a,\theta}/E_a$
20°C	1,000	1,000	1,000
100°C	1,000	1,000	1,000
200°C	1,000	0,807	0,900
300°C	1,000	0,613	0,800
400°C	1,000	0,420	0,700
500°C	0,780	0,360	0,600
600°C	0,470	0,180	0,310
700°C	0,230	0,075	0,130
800°C	0,110	0,050	0,090
900°C	0,060	0,0375	0,0675
1000°C	0,040	0,0250	0,0450
1100°C	0,020	0,0125	0,0225
1200°C	0,000	0,0000	0,0000

NOTE: For intermediate values of the steel temperature, linear interpolation may be used.

(資料來源：Eurocode 3 2005b)

除了訂定建築物防火時效之規定外，對於鋼構造耐火性能之研究國內外亦有相當程度之發展。然而過去研究大多集中於一般鋼材之火害實驗，對於高強度鋼材之研究較少，且實驗少而分析居多。國外之研究較著重於 H 型鋼柱，本研究重點則為國內工程實務常用的鉸接箱型鋼柱。

近年來國內外開始逐漸應用高強度鋼材於大跨度橋梁或中高樓層建築物。相較於一般鋼材，高強度鋼材有高降伏強度與高抗拉強度等特性，更適合用於高層建築物，尤其是需承受大載重之低層柱構件。高強度鋼材於火害下不論降伏強度和彈性模數的衰減程度皆高於一般鋼材，且於愈高溫的環境下其衰減的幅度愈趨明顯 (Chen 等人，2006)。因國內中高層建築物的柱構件一般採用箱型鋼柱，如果此部分之構件受火將對建築物造成嚴重損害甚至使建築物倒塌，因此高強度鋼柱火害實驗之研究值得探討。

第二節 研究目的

本研究目的為建立影響高強度鋼材之箱型鋼柱於高溫下受壓強度之參數與其受壓強度計算模式，故以火害實驗研究實尺寸高強度箱型鋼柱火害下行為，探討其破壞模式與受壓強度，以作為鋼構造防火設計之參考資料，並建置實驗研究資料庫。

第三節 研究方法

本研究採火害實驗與參數解析同時進行。首先蒐集與彙整國內外相關文獻與規範，了解影響高強度鋼柱耐火性能之參數與各規範計算高溫下受壓構材強度之限制條件。規劃四組 SM570MC 鋼材之實尺寸鉸接箱型鋼柱進行火害實驗。火害實驗依照國內 CNS 12514-1 (2014)「建築物構造構件耐火實驗法-第 1 部：一般要求事項」與 CNS 12514-7 (2014)「建築物構造構件耐火實驗法-第 7 部：柱特定要求」之相關規定，進行實尺寸鉸接箱型鋼柱定溫加載實驗。藉由配置熱電偶測點，量測試體斷面各部位於實驗中之溫度變化；並設置位移計以量測試體之變位。參數解析依各國規範進行並與實驗結果比對，探討高強度鉸

接箱型鋼柱於火害下之行為、受壓強度與破壞模式。詳細研究流程詳如圖 1-1。

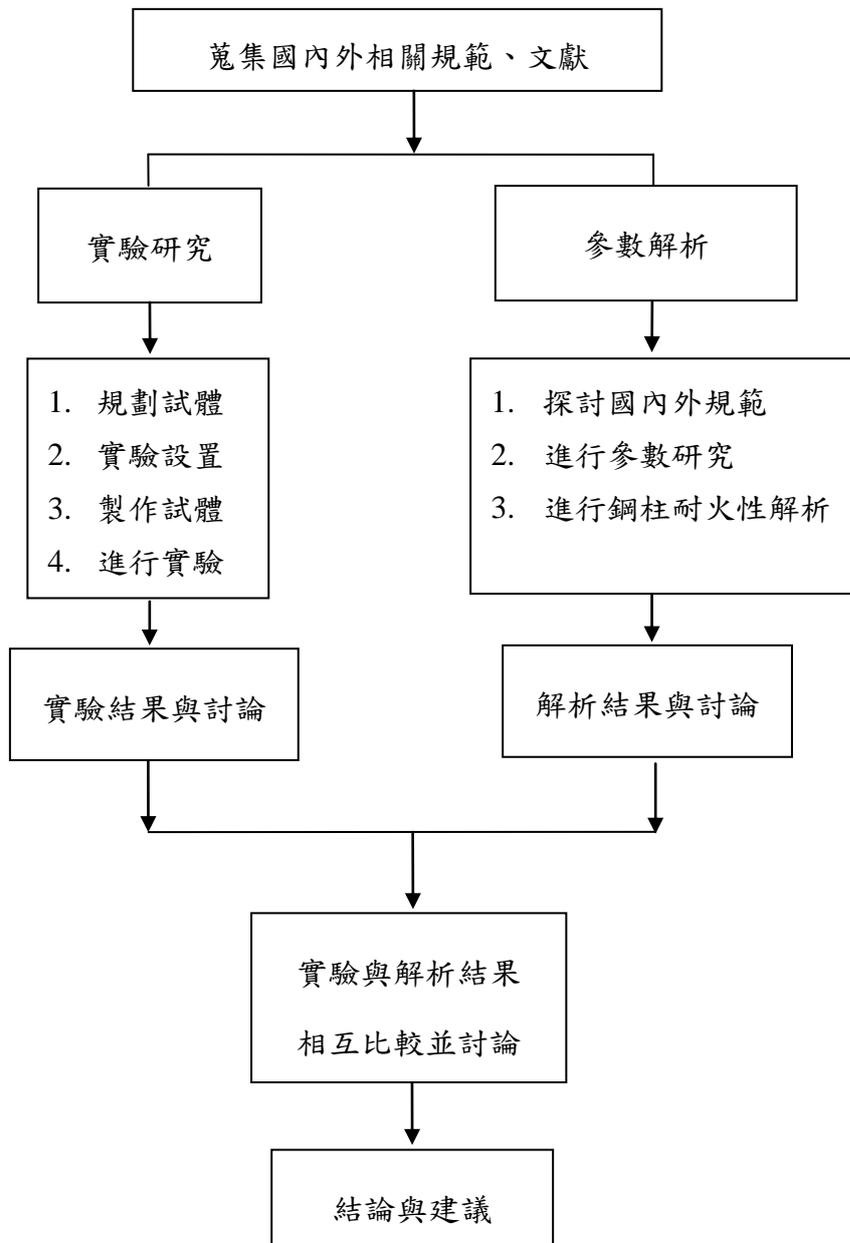


圖 1-1 研究流程圖

(資料來源：本研究整理)

第二章 規範與文獻回顧

本章節簡述國內外相關規範及文獻，確定鋼構造柱構件進行耐火實驗之規範，並了解各國規範針對構件於高溫下受壓強度之規定，瞭解影響高強度鋼柱耐火性之參數及高強度鋼材於高溫下與受火後之機械性質。

第一節 耐火實驗法

對於柱構件，國外學者普遍依照 ASTM E119 (2018) 或 ISO 834-1 (2012) 規定之方法，進行耐火性能實驗研究。我國則依照 CNS 12514-1 (2014) 「建築物構造構件耐火實驗法-第 1 部：一般要求事項」及 CNS 12514-7 (2014) 「建築物構造構件耐火實驗法-第 7 部：柱特定要求」之規定進行耐火實驗研究。

壹、ASTM E119

ASTM E119 (2018) 為建築物構造與材料耐火實驗標準方法，主要規定耐火實驗之加溫爐溫度、試體尺寸及試體破壞判定標準。加溫爐平均溫度於加熱 5 分鐘須達到 538°C，10 分鐘達到 704°C，30 分鐘達到 843°C，1 小時須達到 927°C，2 小時須達到 1010°C，4 小時須到達 1093°C，如圖 2-1 所示。對於承重柱試體受熱長度段不得小於 2.7 m，而無加載具防火被覆鋼柱受熱長度至少 2.4 m，且試體各面均須受熱。試體耐火性能為依實驗類別要求與鋼骨溫度判定構件是否破壞，如柱試體在耐火實驗期間可承受規範中計算之最大載重而未破壞，或未受載重之柱試體平均溫度超過 538°C 或任一量測點之溫度超過 649°C，則試體發生破壞。

貳、ISO 834-1

ISO 834-1 (2012) 規定耐火性能實驗之設備、標準升溫曲線、測量裝置、實驗步驟以及實驗終止條件等。進行耐火實驗時，初始平均溫度須小於 50°C，加溫爐內溫度須符合標準升溫曲線 $T = 345 \log_{10}(8t + 1) + 20$ ，其中 T 為攝氏溫度，t 為時間(分)，如圖 2-1 所示。對於柱試體之性能基準評定以構件承重能力判別，其規定承重構造破壞條件為超過最大軸向壓縮量(C)， $C = h/100$ (mm)，與超過最大軸向壓縮速率(dC/dt)， $dC/dt = 3h/1000$ (mm/min)。

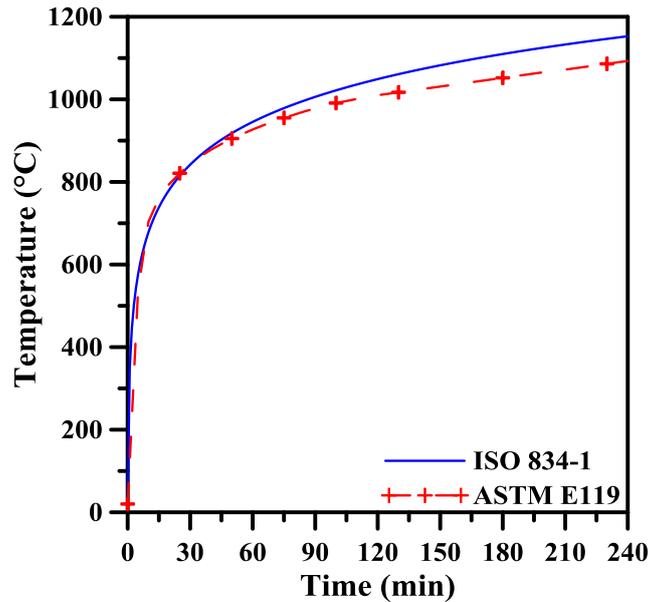


圖 2-1 標準升溫曲線

(資料來源：本研究整理)

參、CNS 12514-1 一般要求事項

目前我國標準 CNS 12514-1 (2014)對於實驗設備(包含加熱爐、載重設備、束制及支撐框架)、環境溫度、爐內壓力、量測及破壞準則皆有明確規定。加溫爐溫度依照標準升溫曲線進行加溫，耐火性能之破壞條件為鋼材最高溫超過 550°C 或平均溫度超過 500°C；進行耐火實驗時，試體需配置足夠之熱電偶測點以及位移量測測點。試體承重能力以變形量及變形速率判定，與 ISO 834-1 之規定相同。

肆、CNS 12514-7 柱特定要求

CNS 12514-7 (2014)對於柱構件試體之尺度、數量、安裝之束制條件及熱電偶配置進行明確規定。進行耐火實驗時，試體頂端及底端得載重表面互相平行，與柱的軸心成垂直，以避免彎曲變形的產生。柱試體受熱長度需大於 3 m 以上，試體曝火高度的每一端最多增加不超過 300 mm。熱電偶與量測儀器除規定之數量外，需增設代表性熱電偶測點以及位移量測測點以反映實際結構行為。

第二節 設計規範

設計規範包含國內外常溫下受壓構材設計規範及國外如美國、歐洲、中國大

陸之防火設計規範。國外之防火設計規範對於高溫下構材受壓強度皆有明確的計算公式，亦限制鋼材的使用條件。各國規範彙整結果如下。

壹、國內「鋼結構極限設計法規範及解說」(常溫)

國內「鋼結構極限設計法規範及解說」(2010)規定位於地震帶之耐震構架，其構件需為塑性設計斷面，銲接箱型受壓構材之肢材寬厚比不得大於 $45/\sqrt{F_y}$ 。常溫下銲接箱型受壓構材之標稱強度 P_n 以式(2-1)計算之，目前國內「鋼結構極限設計法規範及解說」(2010)仍缺少高溫下受壓構材之計算方式。

$$P_n = F_{cr} A_g \quad (2-1)$$

其中：

當 $\lambda_c \leq 1.5$

$$F_{cr} = (0.211\lambda_c^3 - 0.57\lambda_c^2 - 0.06\lambda_c + 1.0) F_y \quad (2-2)$$

當 $\lambda_c > 1.5$

$$F_{cr} = \left(\frac{0.7}{\lambda_c^2} \right) F_y \quad (2-3)$$

$$\lambda_c = \frac{KL}{\pi r} \sqrt{\frac{F_y}{E}} \quad (2-4)$$

A_g = 構材之全斷面積， cm^2 。

F_y = 標稱降伏應力， tf/cm^2 。

E = 彈性模數， tf/cm^2 。

K = 有效長度係數。

L = 構材之無側撐長度， cm 。

r = 對斷面挫屈軸之迴轉半徑， cm 。

貳、中國大陸「鋼結構設計標準」(常溫)

中國大陸「鋼結構設計標準」(2017)之常溫下軸心受壓構件以穩定性計算方

高強度鋼構造柱於高溫下受壓強度之研究

式為主，須考慮穩定係數與鋼材的強度設計值，依式(2-5)計算。穩定係數依構件細長比、鋼材降伏強度與構件截面種類決定，鋼材的強度設計值約為鋼材降伏強度的 0.8 至 0.9 倍，而中國大陸「鋼結構設計標準」(2017)所包含之鋼種最高降伏強度為 460 N/mm²。

$$\frac{N}{\varphi Af} < 1.0 \quad (2-5)$$

其中：

N = 軸心力，N。

φ = 常溫下軸心受壓鋼構件的穩定係數。

A = 鋼構件的毛截面面積，mm²。

f = 常溫下鋼材的強度設計值，N/mm²。

參、中國大陸「建築鋼結構防火技術規範」(高溫)

中國大陸「建築鋼結構防火技術規範」(2017)以承载力法及臨界溫度法兩種方法進行受壓構件之防火設計：

1. 承载力法：

承载力法與鋼構件穩定係數、截面積及高溫下鋼材的強度設計值有關。

$$\frac{N}{\varphi_T A} \leq f_T \quad (2-6)$$

其中：

N = 火災下鋼構件的軸壓力設計值，N。

A = 鋼構件的毛截面面積，mm²。

f_T = 高溫下鋼材的強度設計值，N/mm²。

$$\varphi_T = \alpha_c \varphi \quad (2-7)$$

φ_T = 高溫下軸心受壓鋼構件的穩定係數。

φ = 常溫下軸心受壓鋼構件的穩定係數。

α_c = 高溫下軸心受壓鋼構件的穩定驗算參數。

2. 臨界溫度法：

臨界溫度之定義為鋼構件受火災作用達到其耐火承载力極限狀態時的溫度。臨界溫度法與荷載比、截面積、穩定係數、細長比及常溫下鋼材的強度設計值有關。受壓構件之臨界溫度 T_d 應取 T'_d 、 T''_d 中較小者，兩者計算方法分別為：
(1)按照式(2-8)計算截面強度荷載比 R ，再根據表 2-1 決定 T'_d ；(2)按照式(2-9)計算構件穩定荷載比 R' ，再依表 2-2 決定 T''_d 。

$$R = \frac{N}{A_n f} \quad (2-8)$$

$$R' = \frac{N}{\phi A f} \quad (2-9)$$

其中：

A_n = 鋼構件的淨截面面積， mm^2 。

f = 常溫下鋼材的強度設計值， N/mm^2 。

表 2-1 依截面強度荷載比 R 確定的鋼構件的臨界溫度 T'_d ($^{\circ}\text{C}$)

R	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90
結構鋼構件	663	641	621	601	581	562	542	523	502	481	459	435	407
耐火鋼構件	718	706	694	679	661	641	618	590	557	517	466	401	313

(資料來源：建築鋼結構防火技術規範 2017)

表 2-2 依穩定荷載比 R' 確定的軸心受壓鋼構件的臨界溫度 T'_d (°C)

構件材料		結構鋼構件					耐火鋼構件				
$\lambda\sqrt{f_y/235}$		≤ 50	100	150	200	≥ 250	≤ 50	100	150	200	≥ 250
R'	0.30	661	660	658	658	658	721	743	761	776	786
	0.35	640	640	640	640	640	709	727	743	758	767
	0.40	621	623	624	625	625	697	715	727	740	750
	0.45	602	608	610	611	611	682	704	713	724	732
	0.50	582	590	594	596	597	666	692	702	710	717
	0.55	563	571	575	577	578	646	678	690	699	703
	0.60	544	553	556	559	560	623	661	675	686	691
	0.65	524	531	534	537	539	596	638	655	669	676
	0.70	503	507	510	512	513	562	600	623	644	655
	0.75	480	481	480	481	482	521	548	567	586	596
	0.80	456	450	443	442	441	468	481	492	498	504
	0.85	428	412	394	390	388	399	397	395	393	393
0.90	393	362	327	318	315	302	288	272	270	268	

λ = 構件的細長比
 f_y = 常溫下鋼材標稱降伏強度，N/mm²

(資料來源：建築鋼結構防火技術規範 2017)

肆、美國 AISC

AISC (2016)常溫下之受壓構材強度計算公式如式(2-10)所示，依據細長比大小分為兩條公式計算，如式(2-11)與式(2-12)，若斷面肢材為細長肢材則以構材有效面積 A_e 代替構材全斷面積 A_g 計算受壓構材之強度。

$$P_n = F_{cr} A_g \tag{2-10}$$

其中：

$$\text{當 } \frac{L_c}{r} \leq 4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

$$F_{cr} = \left(0.658^{\frac{F_y}{F_e}} \right) F_y \quad (2-11)$$

$$\text{當 } \frac{L_c}{r} > 4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

$$F_{cr} = 0.877 F_y \quad (2-12)$$

A_g = 構材之全斷面積。

L_c = 構材有效長度。

r = 構材截面迴轉半徑。

E = 彈性模數。

F_y = 標稱降伏應力。

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L_c}{r} \right)^2} \quad (2-13)$$

AISC (2016)於附錄 4 規定除以實驗驗證外，亦可以承載力驗算方法進行受壓構材之防火設計，此方法根據高溫下鋼材之降伏強度、彈性模數及細長比進行計算。規定鋼材於常溫下降伏強度不超過 450 N/mm²，而鋼材於高溫下機械性質則採用折減係數，鋼材之機械性質折減如表 2-3 所示。受壓構材於高溫 T 時之標稱強度 $P_n(T)$ 以式(2-14)計算之。

$$P_n(T) = F_{cr}(T) A_g \quad (2-14)$$

其中：

$$F_{cr}(T) = \left[0.658^{\frac{F_y(T)}{F_e(T)}} \right] F_y(T) \quad (2-15)$$

$$F_e(T) = \frac{\pi^2 E(T)}{\left(\frac{L_c}{r}\right)^2} \quad (2-16)$$

A_g = 構材截面積。

$F_{cr}(T)$ = 溫度為 T 時之臨界應力。

$F_e(T)$ = 溫度為 T 時之彈性挫屈應力。

$F_y(T)$ = 溫度為 T 時之鋼材標稱降伏強度。

$E(T)$ = 溫度為 T 時之鋼材彈性模數。

L_c = 構材有效長度。

r = 構材截面迴轉半徑。

表 2-3 溫度變化下鋼材機械性質之折減係數

鋼材溫度 °F (°C)	彈性模數之 折減係數 $k_E = E(T)/E$ $=G(T)/G$	比例限度之 折減係數 $k_p = F_p(T)/F_y$	降伏強度之 折減係數 $k_y = F_y(T)/F_y$	抗拉強度之 折減係數 $k_u = F_u(T)/F_y$
68 (20)	1.00	1.00	*	*
200 (93)	1.00	1.00	*	*
400 (200)	0.90	0.80	*	*
600 (320)	0.78	0.58	*	*
750 (400)	0.70	0.42	1.00	1.00
800 (430)	0.67	0.40	0.94	0.94
1000 (540)	0.49	0.29	0.66	0.66
1200 (650)	0.22	0.13	0.35	0.35
1400 (760)	0.11	0.06	0.16	0.16
1600 (870)	0.07	0.04	0.07	0.07
1800 (980)	0.05	0.03	0.04	0.04
2000 (1100)	0.02	0.01	0.02	0.02
2200 (1200)	0.00	0.00	0.00	0.00

註：當鋼材降伏強度超過 450 MPa，本表之機械性質將不適用於分析中。

*採常溫性質。

E = 常溫之鋼材彈性模數

$E(T)$ = 溫度為 T 時之鋼材彈性模數

G = 常溫之鋼材剪力模數

$G(T)$ = 溫度為 T 時之鋼材剪力模數

$F_p(T)$ = 溫度為 T 時之鋼材標稱比例限度

F_y = 常溫之鋼材標稱降伏強度

$F_y(T)$ = 溫度為 T 時之鋼材標稱降伏強度

$F_u(T)$ = 溫度為 T 時之鋼材標稱抗拉強度

(資料來源：本研究整理與 AISC 2016)

伍、歐洲 Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-1(常溫)

Eurocode 3 Design of steel structures – Part 1-1 (2005a)根據斷面之寬厚比將斷面分為等級 1、等級 2、等級 3 與等級 4，而受壓構件之設計須滿足式(2-17)，受壓構件強度計算公式依斷面等級不同分為兩種公式計算，如式(2-18)與式(2-19)。此外 Eurocode 3 (2005a)提到受壓鋼材降伏強度最高為 460 N/mm²。

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1 \quad (2-17)$$

其中：

當斷面等級為等級 1、等級 2 及等級 3

$$N_{c,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} \quad (2-18)$$

當斷面等級為等級 4

$$N_{c,Rd} = \frac{A_e f_f}{\gamma_{M0}} \quad (2-19)$$

N_{Ed} = 壓力設計值。

$N_{c,Rd}$ = 受壓斷面之設計抵抗力。

A = 斷面面積。

f_y = 降伏強度。

γ_{M0} = 斷面抵抗力之部分因子。

A_e = 有效面積。

陸、歐洲 Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-2(高溫)

Eurocode 3 (2005b)之鋼構件於高溫下受壓強度 $N_{b,fi,t,Rd}$ 的計算以細長比、截面積及構材溫度為 θ_a 時之降伏強度等為其參數。非均溫狀態之構件可保守的視為均溫計算，高溫下受壓強度可由式(2-20)計算，但式(2-20)僅適用於等級 1、2、3 類斷面。高溫下鋼材機械性質如表(2-4)所示。

$$N_{b,fi,t,Rd} = \chi_{fi} A k_{y,\theta} f_y / \gamma_{M,fi} \quad (2-20)$$

其中：

A = 構材截面積， mm^2 。

$k_{y,\theta}$ = 鋼材溫度為 θ 時降伏強度之折減係數。

f_y = 常溫下鋼材標稱降伏強度， N/mm^2 。

$\gamma_{M,fi}$ = 火災下相關材料性質部分因子，建議鋼材之 $\gamma_{M,fi} = 1$ 。

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi + \sqrt{\varphi^2 - \bar{\lambda}_\theta^2}} \quad (2-21)$$

$$\varphi = \frac{1}{2} \left[1 + \alpha \bar{\lambda}_\theta + \bar{\lambda}_\theta^2 \right] \quad (2-22)$$

$$\alpha = 0.65 \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (2-23)$$

$$\bar{\lambda}_\theta = \bar{\lambda} \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} \quad (2-24)$$

$\bar{\lambda}$ = 無因次化細長比。

$k_{E,\theta}$ = 鋼材溫度為 θ 時彈性模數之折減係數。

表 2-4 溫度變化下鋼材機械性質之折減係數

Steel Temperature θ_a	Reduction factors at temperature θ_a relative to the value of f_y or E_a at 20°C		
	Reduction factor (relative to f_y) for effective yield strength $k_{y,\theta} = f_{y,\theta}/f_y$	Reduction factor (relative to f_y) for proportional limit $k_{p,\theta} = f_{p,\theta}/f_y$	Reduction factor (relative to E_a) for the slope of the linear elastic range $k_{E,\theta} = E_{a,\theta}/E_a$
20°C	1,000	1,000	1,000
100°C	1,000	1,000	1,000
200°C	1,000	0,807	0,900
300°C	1,000	0,613	0,800
400°C	1,000	0,420	0,700
500°C	0,780	0,360	0,600
600°C	0,470	0,180	0,310
700°C	0,230	0,075	0,130
800°C	0,110	0,050	0,090
900°C	0,060	0,0375	0,0675
1000°C	0,040	0,0250	0,0450
1100°C	0,020	0,0125	0,0225
1200°C	0,000	0,0000	0,0000

NOTE: For intermediate values of the steel temperature, linear interpolation may be used.

(資料來源：Eurocode 3 2005)

第三節 文獻回顧

壹、高強度鋼材高溫實驗

高溫下之鋼材機械性質為鋼構造防火設計中的重要因素，然而目前國內外之防火設計手冊或規範皆根據一般強度之鋼材而訂定。近年來高強度鋼材的廣泛使用，使得高強度鋼材於高溫下之機械性質日漸受到重視，以下整理關於高溫下及受火後之高強度鋼材機械性質相關研究。

Chen 等人(2006)使用高強度鋼材 BISPLATE 80 (降伏強度為 690 MPa，極限強度為 790 MPa；鋼材機械性質等同於 ASTM A514、EN 10137-2 Grade S690Q

或 JIS G 3128)及一般鋼材 XLERPLATE Grade 350 (降伏強度為 360 MPa, 極限強度為 450 MPa; 鋼材機械性質等同於 ASTM 573-450)進行火害實驗, 於特定溫度下進行穩態及瞬態測試, 探討兩者在相同應變下之彈性模數和降伏強度, 並了解其極限強度和熱伸長率。Chen 等人亦將實驗結果與 ASCE Manual (1992)、British Standard 5950-8 (1998)及 European Code 3 Part 1.2 (2001)進行比較, 探討規範是否保守。研究結果顯示, 當溫度高於 540°C 時, 高強度鋼材降伏強度與彈性模數的衰減幅度皆大於一般鋼材。此外相較於一般鋼材, 此研究所用之高強度鋼材在愈高溫的環境下, 鋼材機械性質衰減幅度愈趨明顯, 如表 2-5 所示。結果亦顯示若使用美國、英國及歐洲規範預測高強度鋼材於高溫下之降伏強度, 在高達約 1000°C 的溫度時, 各規範預測值是較為保守的。

表 2-5 BISPLATE 80 及 XLERPLATE Gr. 350 之折減係數

T (°C)	High strength steel		Mild steel		Comparison	
	$\left(\frac{f_{0.2,T}}{f_{0.2,normal}}\right)_{High}$	$\left(\frac{E_T}{E_{normal}}\right)_{High}$	$\left(\frac{f_{0.2,T}}{f_{0.2,normal}}\right)_{Mild}$	$\left(\frac{E_T}{E_{normal}}\right)_{Mild}$	$\frac{(f_{0.2,T}/f_{0.2,normal})_{High}}{(f_{0.2,T}/f_{0.2,normal})_{Mild}}$	$\frac{(E_T/E_{normal})_{High}}{(E_T/E_{normal})_{Mild}}$
22	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
60	0.95	1.04	0.96	1.00	0.99	1.04
120	0.94	1.01	0.95	0.95	0.99	1.06
150	0.96	1.04	0.94	0.96	1.02	1.08
180	0.92	1.02	0.92	0.98	1.00	1.04
240	0.89	0.98	0.90	1.03	0.99	0.95
300	0.89	1.00	0.95	0.95	0.94	1.05
410	0.87	0.92	0.90	0.91	0.97	1.01
460	0.8	0.94	0.81	0.89	0.99	1.06
540	0.75	0.87	0.78	0.90	0.96	0.97
600	0.60	0.73	0.71	0.82	0.85	0.89
660	0.43	0.73	0.56	0.77	0.77	0.95
720	0.21	0.51	0.35	0.65	0.60	0.78
830	0.08	0.33	0.15	0.48	0.53	0.69
940	0.05	0.12	0.09	0.27	0.56	0.44
				Mean	0.88	0.93
				COV	0.200	0.187

(資料來源：Chen 等人 2006)

Qiang 等人(2012)使用 S460 與 S690 兩種鋼材, 將其加熱至特定溫度(100°C 至 1000°C), 待冷卻至常溫後進行拉伸實驗, 並測定殘餘彈性模數、降伏強度、極限強度、延展性與冷卻後的應力應變關係, 探討高強度鋼材受火後之材料機械性質。實驗結果顯示 S460 與 S690 鋼材暴露於溫度 600°C 以下之火害後, 其機械性質不受影響, 可以保守方式考慮其再使用性。此外也發現 S460 與 S690 鋼

材暴露於 1000°C 之火害後仍具足夠之延展性。

Kwon (2013)以 SM520B 及 SM570 高強度鋼材做常溫與高溫下之拉伸實驗，並與 SS400 普通強度鋼材比較。SM570 鋼材之實驗結果如表 2-6 所示。以 Eurocode 3 (2005b)之彈性模數折減係數與 Kwon (2013)之折減係數比較，Eurocode 3 (2005b)在 700°C 以下較為保守，而溫度在 700°C 以上時則較不保守。以 Eurocode 3 (2005b)之降伏強度折減係數與 Kwon (2013)之折減係數比較，溫度在 600°C 時較為保守，其餘則較不保守，折減係數比較如表 2-7 所示。與 SS400 普通強度鋼材比較後發現，SM570 鋼材高溫下之降伏強度在 300°C 至 700°C 時，其衰減幅度較高。此外 Kwon 進行實驗時也發現 SM570 鋼材之熱伸長率與 SM520 鋼材相比，SM570 鋼材之熱伸長率較高，而 SM570 鋼材作為結構用鋼，其熱伸長率亦為進行防火設計時之考量因素。

表 2-6 SM570 鋼材高溫下之機械性質

Temperature (°C)	Yield point (MPa)		Tensile strength (MPa)	Elastic modulus (MPa)	Elongation (%)
	0.2% offset	1.0% offset			
Room	562.38	565.96	656.75	207555.67	24.97
100	534.57	542.15	616.23	202530.43	21.45
200	495.28	531.16	613.99	210368.53	21.28
300	495.62	551.64	645.95	188040.83	26.50
400	461.65	514.71	567.29	171875.94	25.53
500	392.56	437.43	443.42	149051.37	24.82
600	273.34	315.40	315.65	99236.59	33.08
700	102.97	115.62	115.06	26989.73	53.98
800	72.59	77.83	80.33	10152.50	85.83
900	25.67	32.96	58.85	8311.6	57.38

(資料來源：Kwon 2013)

表 2-7 Eurocode 3 與 Kwon 計算之折減係數比較

溫度 T	Eurocode 3 (2005b)之折減係數		Kwon (2013) SM570 折減係數	
	$F_y(T) / F_y$	$E(T) / E$	$F_y(T) / F_y$	$E(T) / E$
RT	1	1	1	1
100°C	1	1	0.95	0.98
200°C	1	0.9	0.88	1.01
300°C	1	0.8	0.88	0.91
400°C	1	0.7	0.82	0.83
500°C	0.78	0.6	0.70	0.72
600°C	0.47	0.31	0.49	0.48
700°C	0.23	0.13	0.18	0.13
800°C	0.11	0.09	0.13	0.05
900°C	0.06	0.0675	0.05	0.04

(資料來源：本研究整理)

Lee and Su (1997)研究了 AISI 4340 高強度合金鋼在不同回火條件下的力學性能和微觀結構。將試體淬火並回火至麻田散鐵，並通過動態材料實驗機 MTS 810 以固定應變速率加載至斷裂。研究中描述試體的形態特徵及其微結構在回火過程中的變化。Lee and Su 觀察了試體的顯微斷面圖，以分析試體斷裂和脆化的機制。拉伸實驗結果顯示，回火溫度與維持定溫的時間對力學性能和顯微組織有明顯的影響，隨著回火溫度和維持定溫的時間加長，回火後麻田散鐵的強度和硬度下降而延展性增加。微觀結構觀察顯示，碳化物在低溫下具有板狀結構，但在高溫下呈球狀。當在不同溫度下回火時，可以在微觀中觀察到不同形狀和尺寸的碳化沉澱物。碳化物的分佈將直接受到回火條件的影響。分析鋼材破壞模式發現回火溫度 300°C 之破壞模式為發生麻田散鐵脆化導致的脆性破壞，其他回火溫度則為延展性破壞。

貳、鋼柱於高溫下之相關研究

鋼材因高溫導致其機械性質衰減，故鋼柱之強度將隨著溫度上升而下降。除

溫度影響鋼柱於高溫下之強度外，另有其他參數可影響其強度與破壞模式。對於鋼構造柱於高溫下之相關研究包含實驗與分析，相關研究成果如下所示。

Yang and Hsu (2009)使用 SN490 鋼材之 H 型鋼柱，以不同的溫度、肢材寬厚比、細長比與殘餘應力進行定溫(室溫、500°C、550°C、600°C)加載的火害實驗，探討 H 型鋼柱於火害下之行為與受壓強度，其實驗設置圖如圖 2-2 所示。實驗結果顯示當試體溫度低於 550°C，鋼柱細長比對其受壓強度有顯著影響，細長比愈高其受壓強度愈低。結果亦發現短柱斷面為結實斷面，其於高溫下可避免局部挫屈的發生並保有良好之延展性，因此當進行防火設計時，鋼柱斷面建議使用結實斷面。

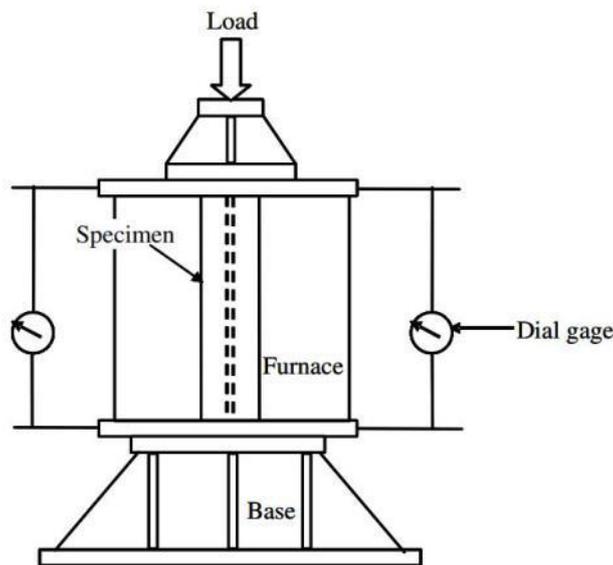


圖 2-2 Yang and Hsu (2009)實驗設置圖

(資料來源：Yang and Hsu 2009)

Yang and Yang (2015)使用 SN490 鋼材之箱型鋼柱，以全滲透開槽銲或部分滲透開槽銲等銲接型式、半結實斷面或結實斷面等肢材寬厚比與載重比為參數進行定溫(室溫、500°C)加載的火害實驗，探討箱型鋼柱於火害下的行為、破壞模式與受壓強度，其實驗設置圖如圖 2-3 所示。實驗結果顯示不論是全滲透開槽銲或部分滲透開槽銲，其破壞模式皆為局部挫屈，然而鋼柱以部分滲透開槽銲之方法銲接，則鋼柱於火害下其銲接處易形成裂縫使耐火性降低。結果亦發現載重比

與肢材寬厚比愈高鋼柱耐火性愈低。

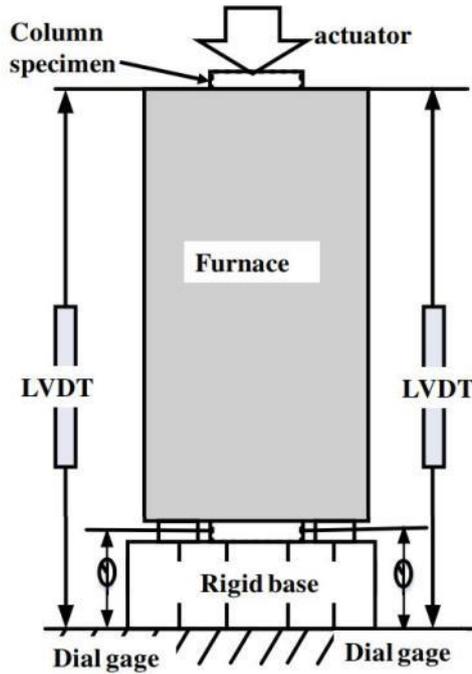


圖 2-3 Yang and Yang (2015)實驗設置圖

(資料來源：Yang and Hsu 2009)

Takagi and Deierlein (2007)以有限元素分析軟體建立了一系列受壓構材於高溫下的分析模型。在模擬不同溫度下，分析細長比與強度之對應關係，並與 AISC (2005)、Eurocode 3 (2005b)於高溫下受壓構材之規範比較。分析結果顯示相較於 AISC (2005)，Eurocode 3 (2005b) 有較高的精準度可預測高溫下構材受壓強度。AISC (2005)之規範則高估了受壓構材於高溫下的強度，並根據分析結果提出修正公式。隨後，AISC (2010)將此修正公式納入規範內。圖 2-4 為使用 W14 × 90 Gr.50 鋼柱模擬於不同溫度下之受壓強度。圖 2-4 (a)為常溫下受壓強度，圖 2-4 (b)為 200°C 下受壓強度，圖 2-4 (c)為 500°C 下受壓強度，圖 2-4 (d)為 800°C 下受壓強度。

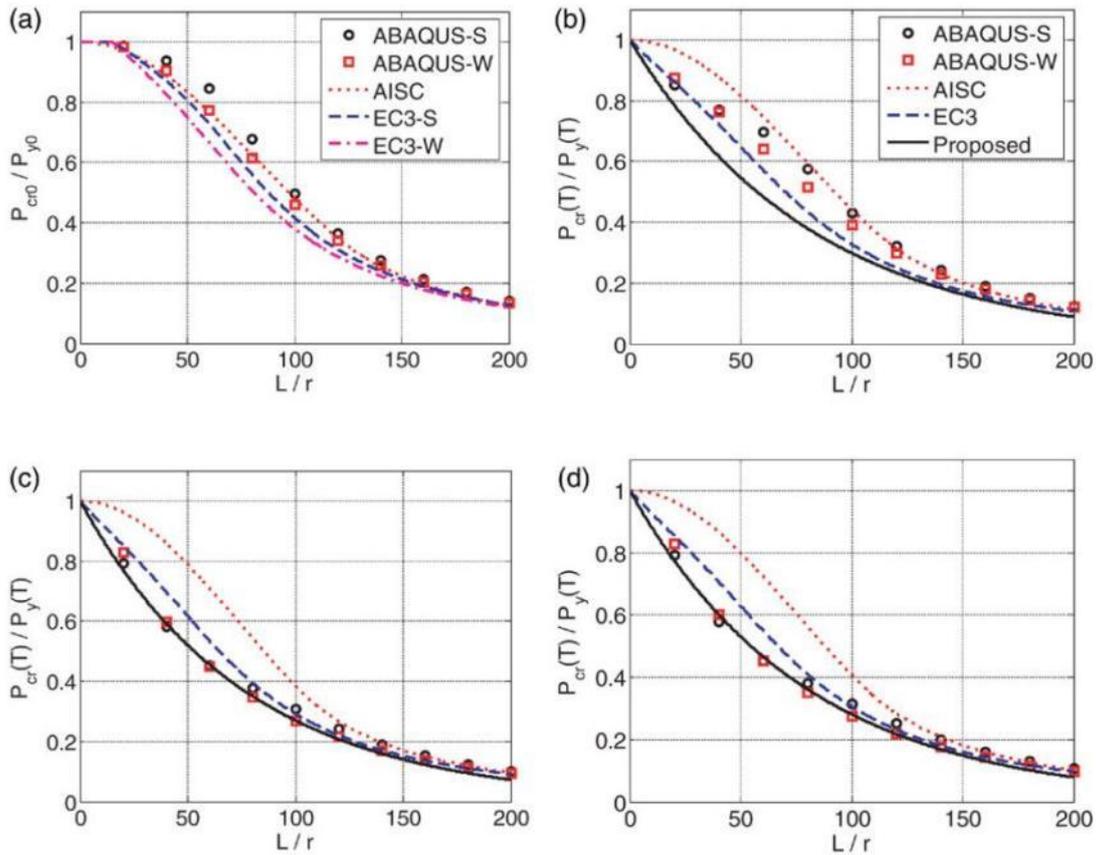


圖 2-4 Takagi and Deierlein (2007) 模擬不同溫度下鋼柱受壓強度

(資料來源：Takagi and Deierlein 2007)

Wang 等人 (2013) 提出一套分析模式，以高溫下之臨界應力 σ_{crT} 評估高強度鋼柱之耐火性，並與 CECS200-2006 (2006) 及 EC3 (2005) 一起做比較。如圖 2-5 所示，其中穩定因數 $\varphi_T = \sigma_{crT} / f_{yT}$ ， f_{yT} = 高溫下鋼材標稱降伏強度。此研究以殘餘應力、初始瑕疵、細長比、斷面尺寸及材料性質等作為比較參數。後以有限元素法分析應證結果，作為高強度鋼材受火害時其各性質是否會影響強度的依據。結果顯示殘餘應力與斷面尺寸對強度影響不明顯，而初始瑕疵只對短柱有影響。

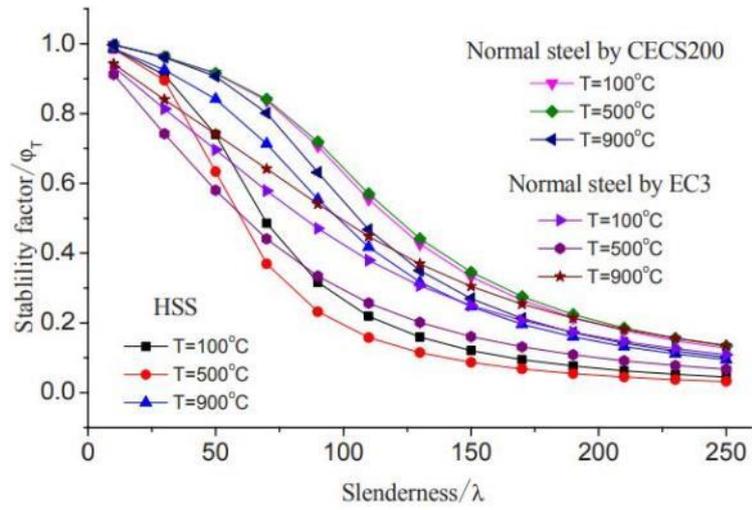


圖 2-5 Wang 等人 (2013) 高強度與普通強度鋼柱之穩定因數比較

(資料來源：Wang 等人 2013)

第三章 高強度銲接箱型鋼柱高溫實驗

第一節 試體規劃與設計

壹、試體規劃

為探討高強度銲接箱型鋼構造柱之火害行為與耐火性能，本研究依照我國國家標準 CNS 12514-1 (2014)及 CNS 12514-7 (2014)進行四組試體之高溫實驗，探討在特定溫度下銲接箱型鋼柱之受壓強度。

Wang 等人(2013)研究結果顯示，高強度鋼柱較普通強度鋼柱易局部挫屈。在 Yang and Yang (2015)研究中顯示寬厚比高的情況下，箱型鋼構造柱的耐火性會降低，亦提到銲接箱型鋼柱使用全滲透開槽銲相比於部分滲透開槽銲，使用全滲透開槽銲之銲接箱型鋼柱具有較高之耐火性。此外，由於台灣位於環太平洋地震帶，為符合耐震設計規範，鋼柱斷面皆採用塑性設計斷面，鋼柱銲接型式為全滲透銲，以避免破壞形式為局部挫屈或銲道破壞等非預期的破壞模式。

依據 AISC (2016)鋼柱於高溫下受壓強度公式，影響高溫下鋼柱強度之參數有細長比及溫度，故本實驗於規劃試體時考量到實務上常使用之斷面大小及細長比。為使實驗結果具代表性，於實驗設備容許範圍內選定兩個溫度作為實驗溫度，並設計四個不同細長比之試體以得到不同受壓強度，使後續解析實驗結果時有足夠差異得以計算實驗值與理論值之不同。

貳、試體設計與製作

參考國內「鋼結構極限設計法規範及解說」(2010)設計試體，柱體示意圖如圖 3-1 所示。高強度鋼 SM570M 較一般建築結構用鋼規格強度更高，其等級分為 A、B、C 及 C HW 等四種，C 級除具備及優異之銲接性、塑性變形能力及衝擊韌性外，尚考慮板厚方向特性及鋼材內部性質均勻性。由於 SM570M 系列鋼材取得不易，因此以鋼構廠現有且符合試體規劃要求之鋼板作為試體材料。試體均以 SM570MC 規格製作，板厚為 25 mm 與 28 mm，並採用 GMX811Ni1 銲材作為銲接材料。SM570MC 鋼材及 GMX811Ni1 銲材的化性與物性如表 3-1 及表 3-2 所示。

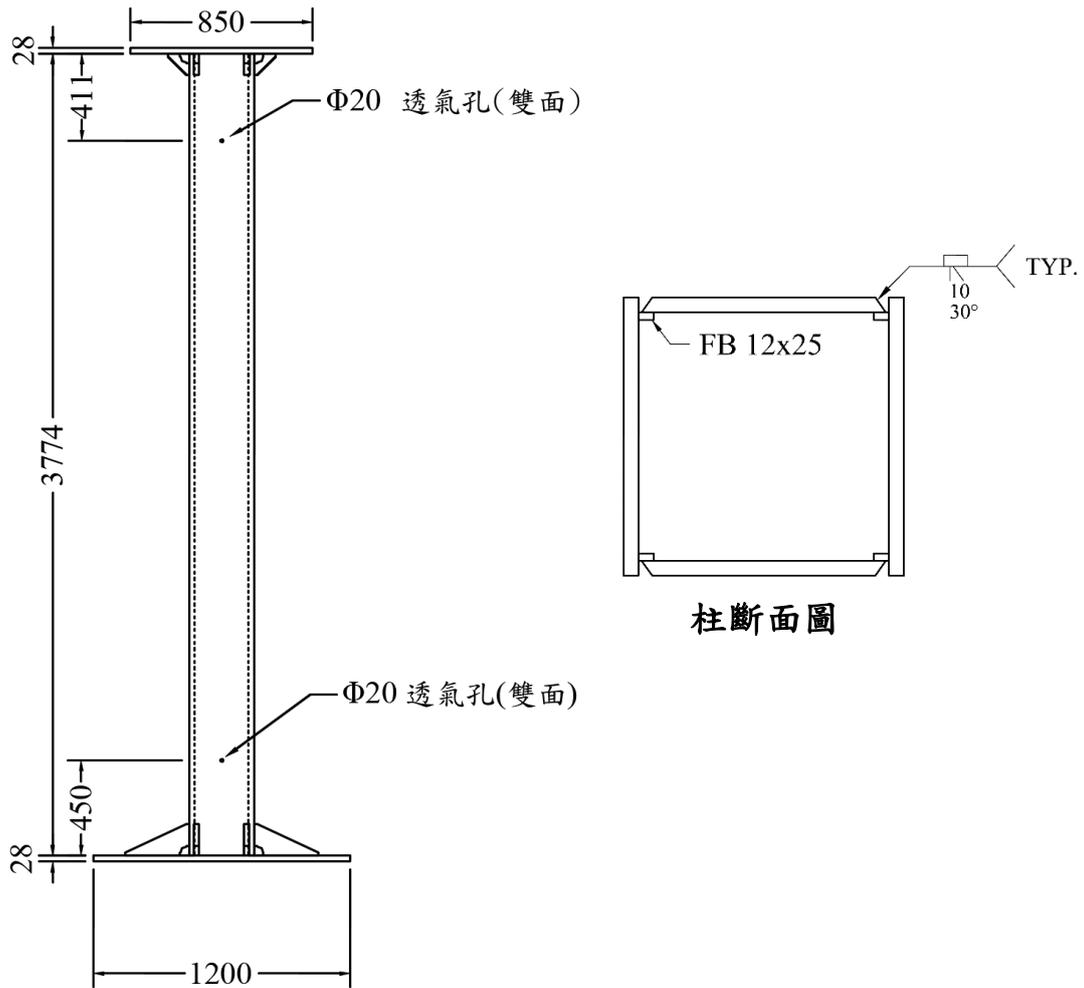


圖 3-1 試體示意圖

(資料來源：本研究整理)

表 3-1 SM570MC 鋼材之化性及物性

7.1.7.9 CSC SM570M 超高強度耐震結構用鋼

鋼種 (等級)	厚度 範圍 (t) mm	化學成分 %						機械性質																
		C	Si	Mn	P	S	Ceq	降伏 強度 N/mm ²	抗拉 強度 N/mm ²	降 伏 比 %	伸 長 率 %	厚度方向斷 面縮率 %		-5°C 衝擊試驗										
												平均值	個別值	試驗 位置	衝擊值 J	試片								
A	13 ≤ t < 50	0.18 以下	0.55 以下	1.60 以下	0.030 以下	0.008 以下	0.44 以下	420~ 540	570~ 720	85 以下	註 1	—		1/4	47 以上	4 號 平 行 軋 延 方 向								
B	13 ≤ t ≤ 40									85 以下	註 1	—		1/4	47 以上									
	40 < t < 50									80 以下	20 註 1	—		1/4	47 以上									
	50 ≤ t ≤ 60											25 以上	15 以上	1/4 1/2	47 以上 27 以上									
C	16 ≤ t < 50	0.18 以下	0.55 以下	1.60 以下	0.020 以下	0.008 以下	0.44 以下	420~ 540	570~ 720	85 以下	20 註 1	25 以上	15 以上	1/4	47 以上									
	50 ≤ t ≤ 80													1/4 1/2	47 以上 27 以上									
C HW 註 2	16 ≤ t < 50									0.18 以下	0.55 以下	1.60 以下	0.020 以下	0.008 以下	0.44 以下		420~ 540	570~ 720	85 以下	20 註 1	25 以上	15 以上	1/4	47 以上
	50 ≤ t ≤ 80																						1/4 1/2	47 以上 27 以上

註：1. 厚度 t ≤ 20mm，伸長率分別為 19% min(t ≤ 16mm) 及 26% min(16 < t ≤ 20mm)；厚度 t > 20mm，伸長率為 20% min。
 2. 鋼種 C HW 適用於高入熱量銲接，熱影響區可承受入熱量 ≤ 880KJ/CM，銲道 -5°C 衝擊試驗可保證達 15J 以上。
 3. 碳當量公式：Ceq(%) = C+Mn/6+Si/24+Ni/40+Cr/5+Mo/4+V/14
 4. 降伏強度係採用下降伏點值

(資料來源：中鋼型錄 2014)

表 3-2 GMX811-Ni1 銲材之物性

銲接金屬(全銲道)機械性能之一例			
降伏強度 N/mm ²	抗拉強度 N/mm ²	延伸率 %	衝擊值 (-30 °C) J
618	650	24.0	50

(資料來源：中鋼銲材廠股份有限公司 2018)

以 AISC (2016)計算常溫與高溫下受壓強度與細長比之關係，如圖 3-2 及圖 3-3 所示， P_{cr} 為構件之受壓強度， P_y 為構件之降伏強度。可以看出細長比為影響常溫與高溫下鋼構造柱受壓強度之重要參數。細長比愈高，柱構件之受壓強度愈低，且於溫度升高時其強度衰減幅度愈不明顯。為探討高溫下箱型鋼柱之受壓強度，考量實務需求及數據解析代表性，故由細長比 40 以內選取四個有一定差值之細長比，比較各參數下之實驗結果與規範理論值，並建立應用在高強度銲接箱型鋼柱之理論強度計算方式。試體斷面分別為 □300×300×25×25、□400×400×25

高強度鋼構造柱於高溫下受壓強度之研究

×25、□500×500×28×28 及 □600×600×28×28，柱高皆為 3830 mm。試體詳圖於附錄一所示。

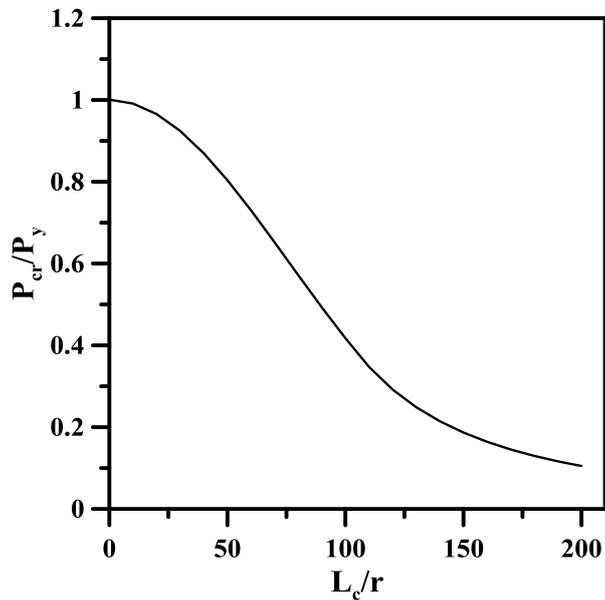


圖 3-2 鋼柱構件以 AISC 計算常溫受壓強度與細長比關係

(資料來源：本研究整理)

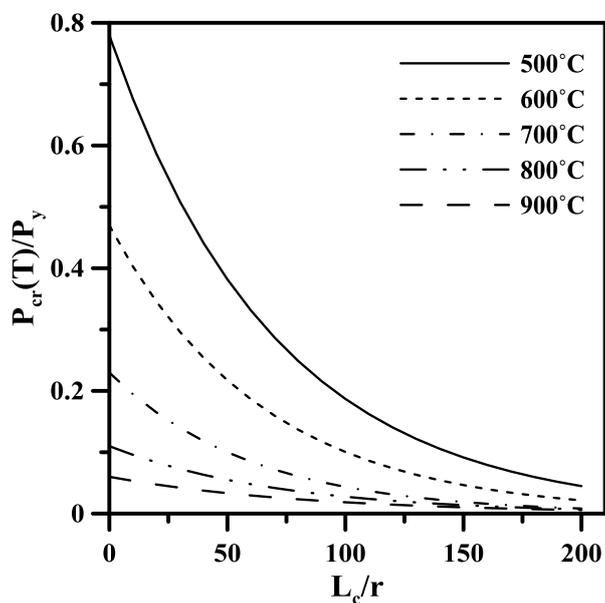


圖 3-3 鋼柱構件以 AISC 計算高溫受壓強度與細長比關係

(資料來源：本研究整理)

四組試體之設計參數如表 3-3 所示，試體在特定溫度下之預計受壓強度如圖 3-4 所示。試體編號以斷面尺寸表示，試體編號有 B3T6-39、B4T7-29、B5T6-23

及 B6T7-19，B 代表試體斷面為箱型，3、4、5 及 6 分別代表斷面寬度 300 mm、400 mm、500 mm 及 600 mm 之試體，T6 及 T7 代表實驗預計試體平均溫度為 600 度或 700 度，最後兩位數字代表細長比。斷面之寬厚比皆符合塑性設計斷面。試體箱型柱角隅皆採用全滲透開槽銲，銲接細節詳見附錄一，銲接施作方法為潛弧銲接(Submerged Arc Welding, SAW)，銲接程序詳見附錄二。柱端板採用厚度 28 mm 之 SM570MC 鋼板，柱端加勁板採用厚度 25 mm 之 SM570MC 鋼板，加勁板與柱體連接部分採用雙邊填角銲，試體端部銲接示意圖如圖 3-5 及圖 3-6 所示。

本實驗使用之鋼板向東和鋼鐵企業股份有限公司採購，並由雄進鋼構股份有限公司銲接組立。試體製作過程先將鋼板組立為 U 型，如圖 3-7 所示；後以 SAW 銲接完成箱型鋼柱試體，如圖 3-8 所示。試體於受熱段之頂部與底部設有單向雙面之透氣孔，以避免在高溫下箱型鋼柱內氣體壓力過大。再執行超音波檢測銲道確認無瑕疵，如圖 3-9 所示；試體製作完成圖如圖 3-10 所示。

表 3-3 試體參數表

編號	試體尺寸 (mm)	細長比	寬厚比	溫度(°C)
B3T6-39	□ 300×300×25×3830	39.1	10.0	600
B4T7-29	□ 400×400×25×3830	28.7	14.0	700
B5T6-23	□ 500×500×28×3830	22.9	15.9	600
B6T7-19	□ 600×600×28×3830	18.9	19.4	700

(資料來源：本研究整理)

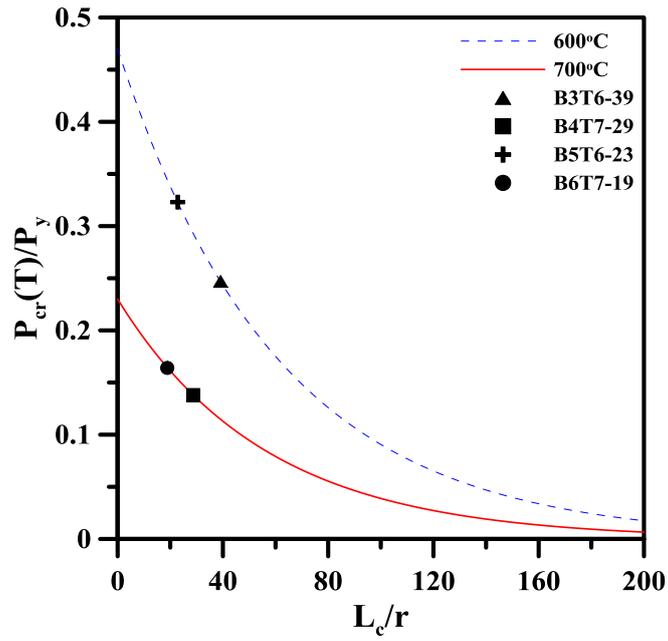
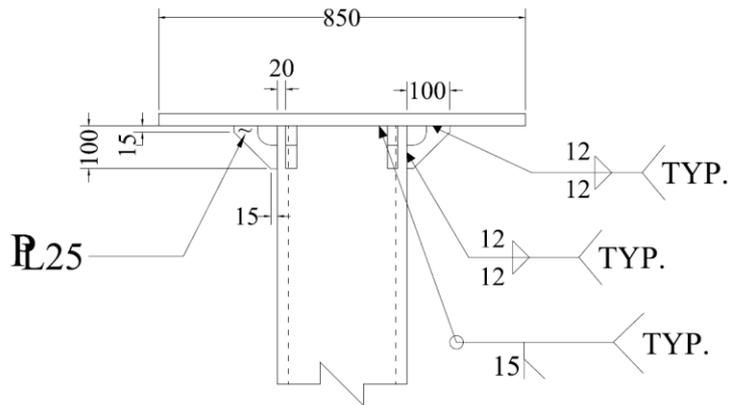


圖 3-4 試體以 AISC 計算高溫受壓強度

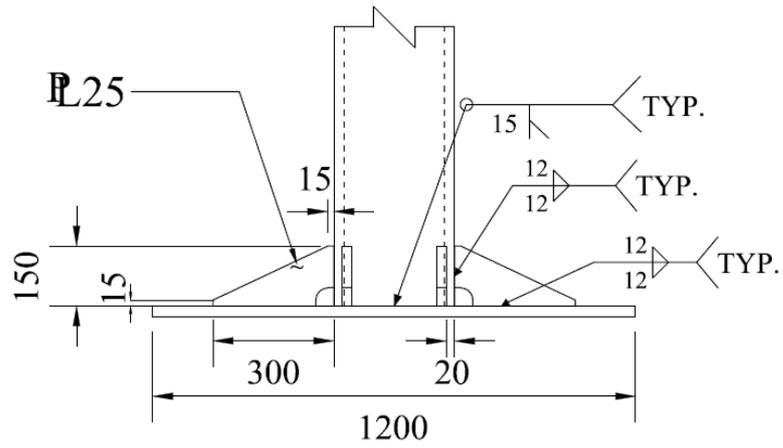
(資料來源：本研究整理)



Unit : mm

圖 3-5 上端部銲接示意圖

(資料來源：本研究整理)



Unit : mm

圖 3-6 下端部銲接示意圖

(資料來源：本研究整理)



圖 3-7 試體 U 型組立圖

(資料來源：本研究整理)



圖 3-8 潛弧銲接 SAW 銲接施作圖

(資料來源：本研究整理)



圖 3-9 超音波檢測圖

(資料來源：本研究整理)

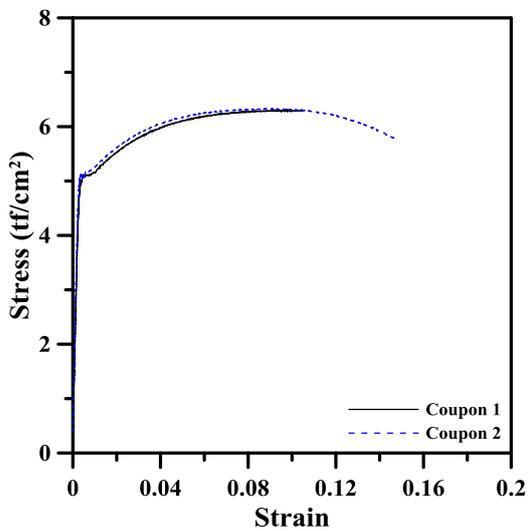


圖 3-10 試體完成圖

(資料來源：本研究整理)

本實驗鋼柱試體之高強度鋼板，厚度 25 mm 鋼板經拉伸實驗後所得之降伏強度為 5.04 tf/cm^2 ，彈性模數為 2167.9 tf/cm^2 ；厚度 28 mm 鋼板之降伏強度為 4.77 tf/cm^2 ，彈性模數為 2019.0 tf/cm^2 ，試片的應力應變曲線如圖 3-11 所示。

(a) 鋼板厚度 25 mm



(b) 鋼板厚度 28 mm

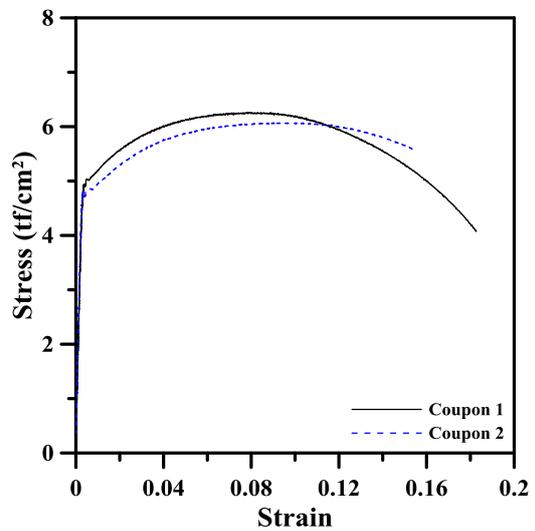


圖 3-11 鋼板試片應力應變曲線圖

(資料來源：本研究整理)

第二節 實驗設備與設置

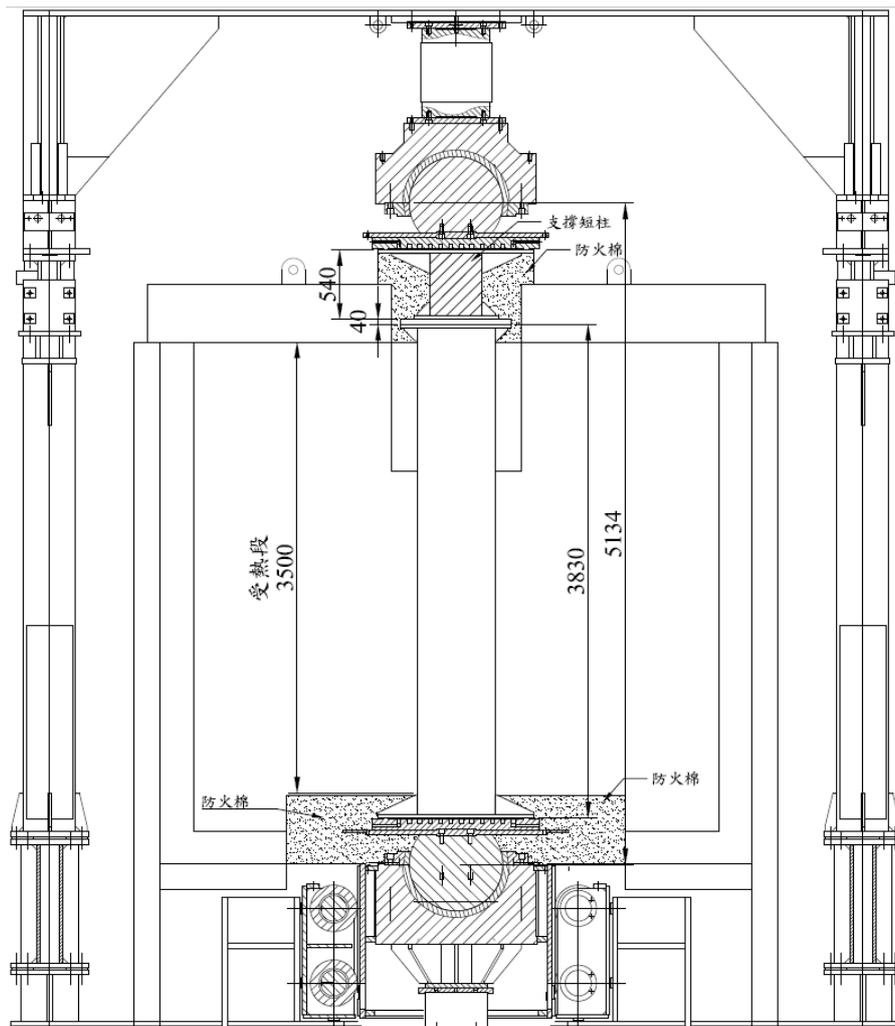
實驗將使用內政部建築研究所防火實驗中心之複合實驗爐，如圖 3-12 所示。實驗設置示意圖如圖 3-13 所示，支承型態為上下端皆為鉸支承，且局部束制柱端板使其只能往單向旋轉挫屈，柱之軸力由柱下端加載。

實驗設置程序為先將試體橫置於空地，並在預定位置安裝熱電偶線，再於熱電偶線上包覆防火棉。後將熱電偶線連結到資料擷取器，確定訊號正常後，鎖固支撐短柱，吊至加溫爐內安置於加載設備上。包覆防火棉於柱體上下端空隙，確保高溫氣體不致外洩影響人員安全。完成後蓋上爐蓋板，進行後續定溫加載實驗。



圖 3-12 防火實驗中心之複合實驗爐

(資料來源：本研究整理)



Unit: mm

圖 3-13 實驗設置示意圖

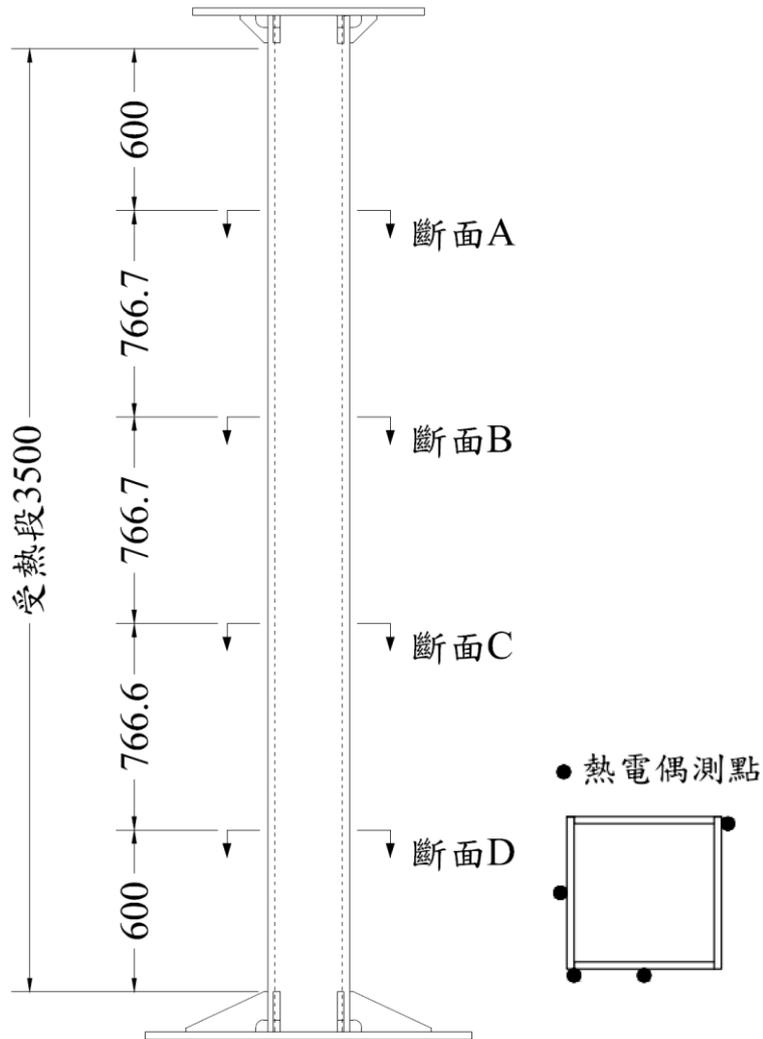
(資料來源：本研究整理)

第三節 量測儀器

壹、試體溫度測點規劃

根據 CNS 12514-7 (2014) 之規定，柱試體之熱電偶測點應放置 4 層，每一層至少要有 3 個熱電偶測點。最上層及最下層應距離柱受熱面端部 600 mm，且兩個中間層間距要一致。

本次實驗為觀察柱之溫度是否均勻，將於柱試體受熱段放置四層測點。試體熱電偶測點之配置高度及位置如圖 3-14 所示，每一試體共計 16 個測點。



Unit: mm

圖 3-14 試體熱電偶測點高度及位置配置圖

(資料來源：本研究整理)

貳、試體變形量量測

圖 3-15 所示為變形量測儀器設置位置示意圖，本實驗需量測試體之軸向壓縮量、軸向壓縮速率、側向位移量及上下端板轉角。於柱下端板設置位移計以進行柱軸向變位量量測，並於板之中心線設置傾斜儀量測端板之轉角，藉此獲得數據以計算是否達到性能基準及觀察試體變形行為，並於試體近高程中點處設置位移計量測側向位移。本實驗定義軸向變位壓縮為正。

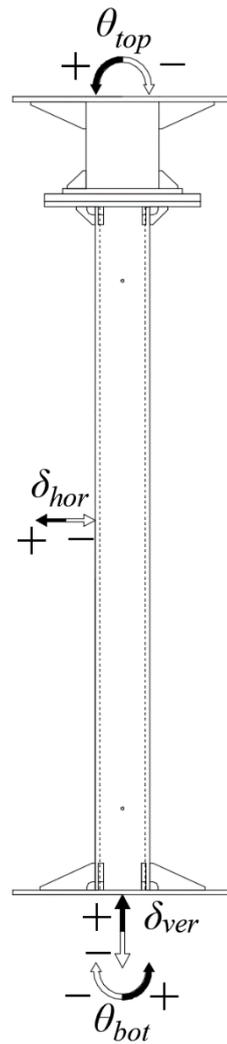


圖 3-15 變形量測位置示意圖

(資料來源：本研究整理)

第四節 實驗步驟

試體的耐火實驗依據 CNS 12514-1 (2014) 及 CNS 12514-7 (2014) 之相關規定進行，實驗步驟如下：

實驗開始前預備事項

1. 環境空氣的溫度應在 $25 \pm 15^\circ\text{C}$ 。
2. 實驗開始前 5 分鐘內，所有熱電偶之初始值須持續記錄並檢查一致性。試體之變形量測值及其他狀態亦須記錄。

高強度鋼構造柱於高溫下受壓強度之研究

3. 開始實驗前，爐內溫度需小於 50°C。

定溫加熱實驗過程

1. 實驗開始之際，試體之初始平均溫度和非加熱面溫度須為 $25\pm 15^\circ\text{C}$ 。
2. 確認資料擷取器之讀數皆正常。
3. 點火加熱並每分鐘計算一次試體平均溫度。
4. 將高溫爐加熱至試體之預定溫度並開始持溫。
5. 待試體平均溫度達預定溫度後開始進行軸向加熱。
6. 每分鐘量測試體之變形與變形速率。
7. 達試體受壓強度後結束實驗，觀察試體之變形並詳實記錄之。

實驗終止條件

1. 試體達最大受壓強度。
2. 因人員安全或設備可能遭受破壞之因素。

CNS12514-7 內提到之性能基準如下所述：

軸向承載構件性能基準，最大軸向壓縮量： $C = h/100$ (mm)，最大軸向壓縮速率： $dC/dt = 3h/1000$ (mm/min)，其中 h 為試體之初始高度。本實驗試體最大軸向壓縮量為 35 (mm)；且最大軸向壓縮速率不得超過 10.5 (mm/min)。

因本研究目的為探討高強度銲接箱型鋼柱之極限強度，故在安全的情況下將不以性能基準作為實驗終止的標準，而以試體無法承載更多壓力作為實驗終止基準。

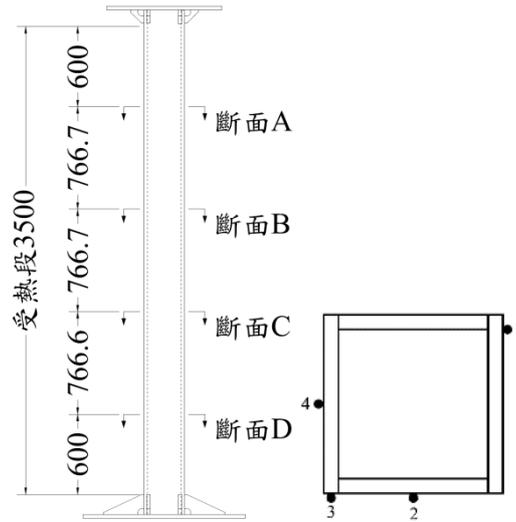
第四章 實驗結果與討論

第一節 實驗結果

本節將詳述各試體於實驗開始後之情況與實驗結束後之結果，並敘述銲接箱型鋼柱於高溫下之受壓行為。

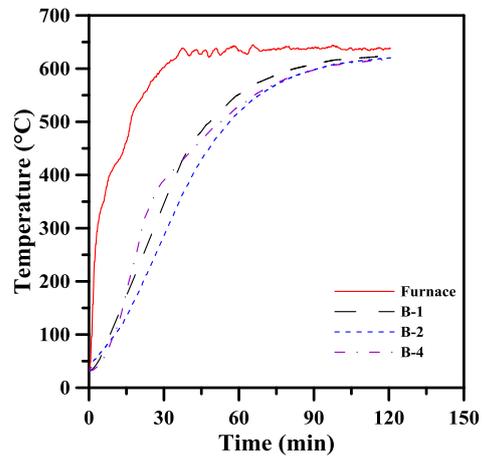
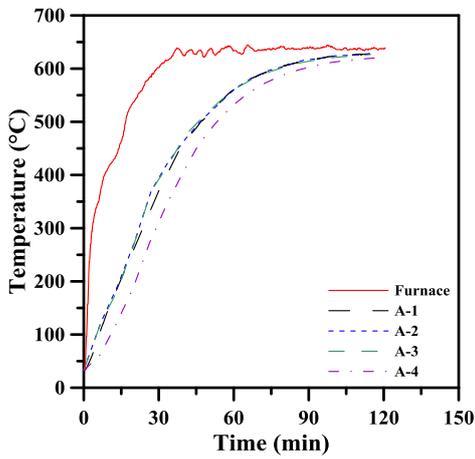
壹、試體 B3T6-39

實驗開始時加溫爐內溫度為 35°C，試體平均溫度約為 31.8°C。柱各斷面之測點溫度如圖 4-1 所示，其中測點 B-3 及 D-2 因訊號異常故不納入計算及討論。因加溫爐點火位置而使底層測點溫度皆高於其他層。實驗初期，爐溫快速升高而使試體溫度快速且穩定上升，試體軸向長度亦持續伸長，待試體溫度升至 450°C 後溫度上升速度開始趨緩。於點火 82 分 50 秒後試體平均溫度達到預定之實驗溫度 600°C，此時試體因熱膨脹達最大伸長量 29.5 mm。達預定溫度後開始進行軸向加載，由 20 噸加至 100 噸後持壓 30 秒，此時試體軸向壓縮量為 2.6 mm，上下端板皆無轉角；而後再加壓至 180 噸後持壓 30 秒，此時試體軸向壓縮量為 4.7 mm，上下端板亦無轉角；而後再加壓至 260 噸持壓 30 秒，此時軸向壓縮量為 7.0 mm，上下端板亦尚無轉角。之後皆進行手動加載，以 7.59 tf/min 的加載速率直至破壞。試體於加壓後 35 分 14 秒達最大載重 470.5 噸，此時加溫爐內平均溫度為 637°C，試體平均溫度為 625.1°C，而試體軸向壓縮量為 35.8 mm，此時上端板轉角為 0.6 度，下端板轉角為 0.06 度，側向位移為 0.7 mm，之後載重持續下降。試體於加壓後 36 分 37 秒達性能基準，此時加溫爐內平均溫度為 638°C，試體平均溫度為 625.3°C，施加载重為 463.8 噸而試體軸向壓縮量為 44.2 mm，同時側向位移與上端板轉角迅速增加，達性能基準時試體上端板旋轉 1.5 度而下端板旋轉 0.08 度。



(a) 斷面 A

(b) 斷面 B



(c) 斷面 C

(d) 斷面 D

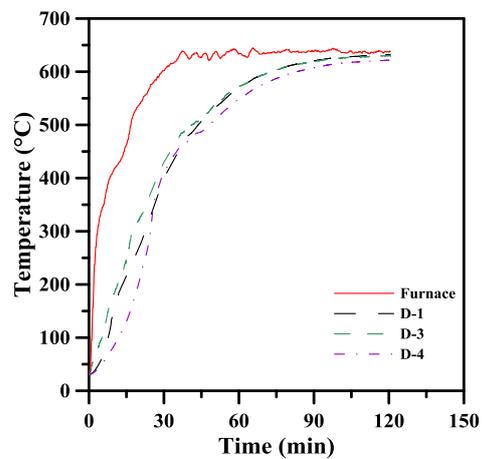
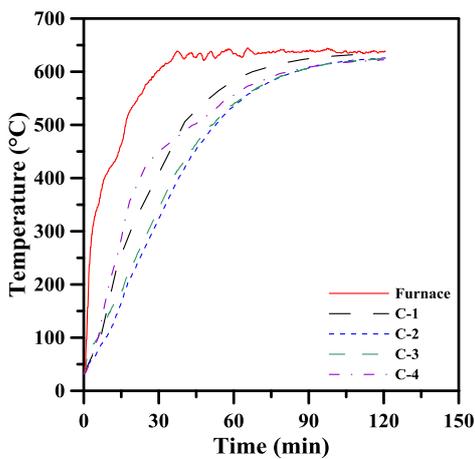


圖 4-1 試體 B3T6-39 斷面測點溫度與爐內溫度-時間關係圖

(資料來源：本研究整理)

加溫爐內試體溫度受點火位置影響而導致各高度斷面之溫度不同，故以所有測點之溫度平均值作為試體平均溫度，試體平均溫度與爐內平均溫度如圖 4-2 所示。試體軸向受壓力與上下端板轉角關係如圖 4-3 所示，可以發現試體近破壞時轉角才大幅增加。試體軸壓力與軸向位移如圖 4-4 所示，其中壓縮定義為正，可以發現試體加載初期載重增加迅速但位移增加慢，加載後期隨著載重增加其變形量迅速增加直至破壞。試體軸壓力與側向位移關係如圖 4-5 所示，可以發現臨近破壞時側向位移量才大幅增加。

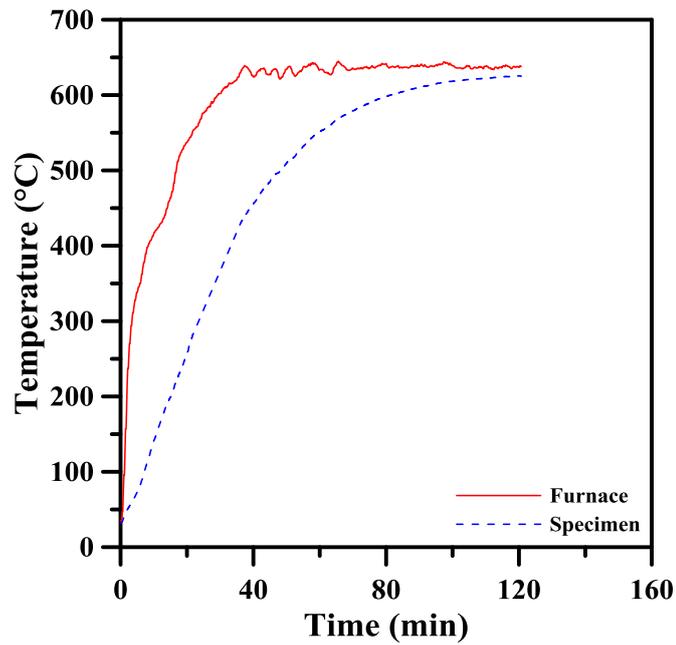


圖 4-2 試體 B3T6-39 與爐內平均溫度-時間關係圖

(資料來源：本研究整理)

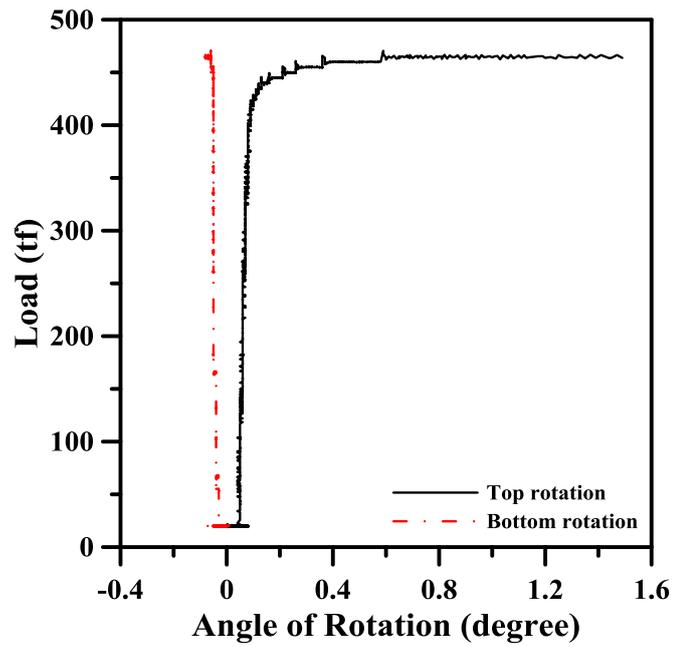


圖 4-3 試體 B3T6-39 上下端板軸力-轉角圖

(資料來源：本研究整理)

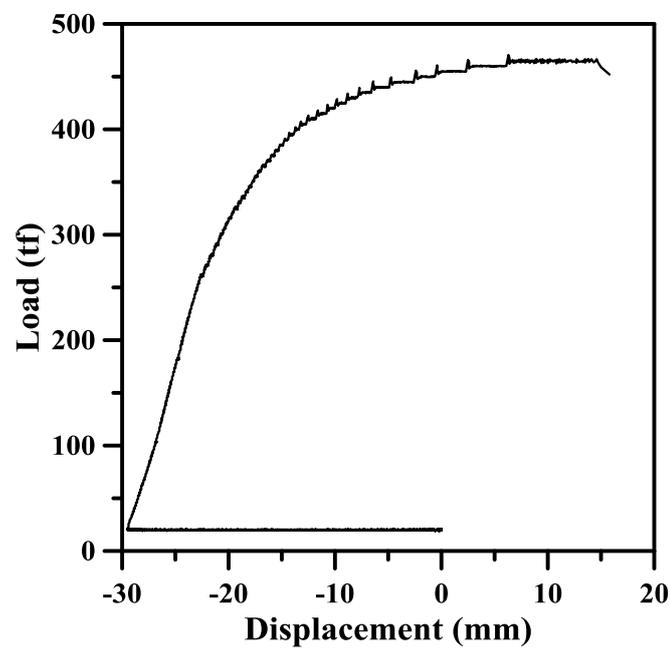


圖 4-4 試體 B3T6-39 軸力-軸向變形圖

(資料來源：本研究整理)

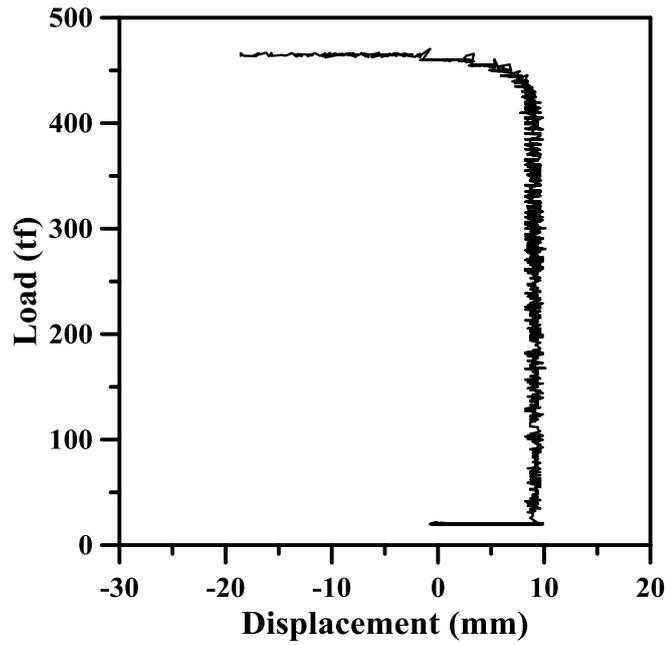


圖 4-5 試體 B3T6-39 軸力-側向位移圖

(資料來源：本研究整理)

待試體冷卻後，進入加溫爐內觀察試體受火受壓後之行為，如圖 4-6 至 4-8 所示。藉由觀察可以得知實驗後試體箱型鋼柱鋼板之銲道、試體連接端板之加勁版及端板鎖固之螺栓等皆無破壞，而試體發生整體挫屈變形，最大側向變位達 142 mm。

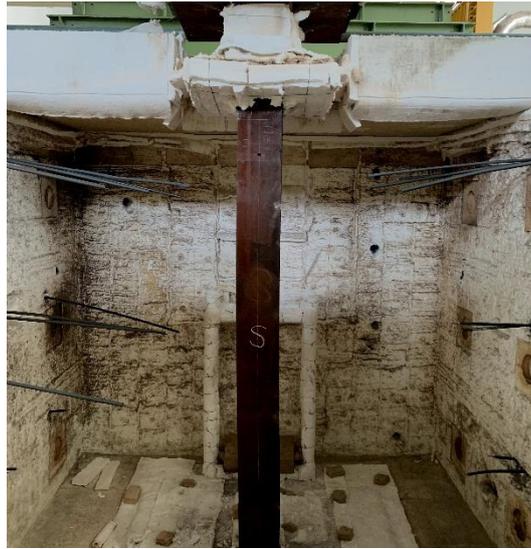


圖 4-6 試體 B3T6-39 實驗後外觀

(資料來源：本研究整理)



圖 4-7 試體 B3T6-39 實驗後外觀

(資料來源：本研究整理)



圖 4-8 試體 B3T6-39 實驗後外觀

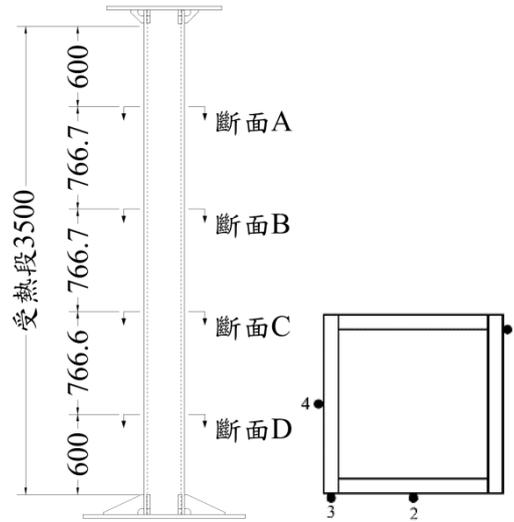
(資料來源：本研究整理)

貳、試體 B4T7-29

實驗開始時加溫爐內溫度為 33°C ，試體平均溫度約為 32.6°C 。柱各斷面之測點溫度如圖 4-9 所示，其中測點 D-1 因訊號異常故不納入計算及討論。由於加溫爐設備點火孔位置不同，故底層之溫度亦最高。實驗初期，爐溫快速升高至 420°C 後趨緩，三分鐘後再行加熱直至達預定溫度 700°C ，此時試體溫度穩定增加，試體軸向長度亦持續伸長。於點火 77 分 25 秒後試體平均溫度達到預定之實驗溫度 700°C ，此時試體軸向因熱膨脹達最大伸長量 36 mm。試體平均溫度達預定溫度後開始進行軸向加載，由 10 噸加至 60 噸後持壓 30 秒，此時試體軸向壓縮量為 1.7 mm，上下端板皆無轉角；而後再加壓至 110 噸後持壓 30 秒，此時試體軸向壓縮量為 3.6 mm，上下端板亦無轉角；而後再加壓至 160 噸持壓 30 秒，此時軸向壓縮量為 5.5 mm，上下端板亦尚無轉角，再行加載至 210 噸，此時軸向壓縮量為 8.7 mm。之後皆進行手動加載，以 5.76 tf/min 的加載速率直至破壞。試體於加壓後 32 分 30 秒達性能基準，此時加溫爐內平均溫度為 715°C ，試體平均溫度為 715.0°C ，施加載重為 304.1 噸而試體軸向壓縮量為 69 mm，同時側向位移與上端板轉角迅速增加，達性能基準時試體上端板旋轉 0.6 度而下端板旋轉 0.05 度。試體於加壓後 34 分 17 秒達最大載重 316.6 噸，此時加溫爐內平均溫度

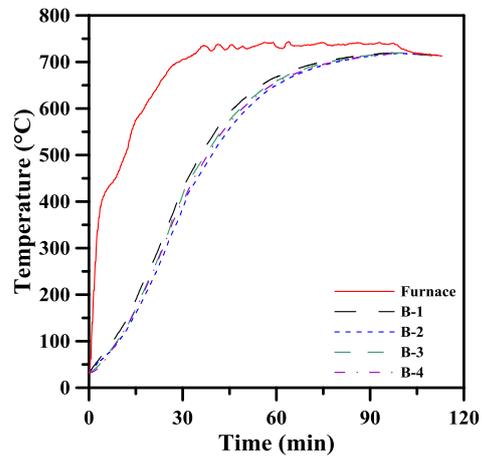
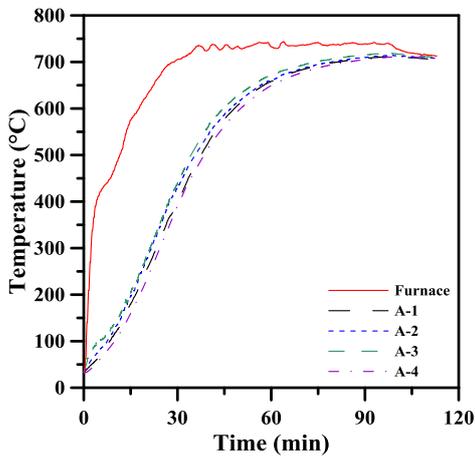
高強度鋼構造柱於高溫下受壓強度之研究

為 714°C，試體平均溫度為 714.3°C，而試體軸向壓縮量為 98.6 mm，此時上端板轉角為 1.94 度，下端板轉角為 0.03 度，側向位移為 61.8 mm。



(a) 斷面 A

(b) 斷面 B



(c) 斷面 C

(d) 斷面 D

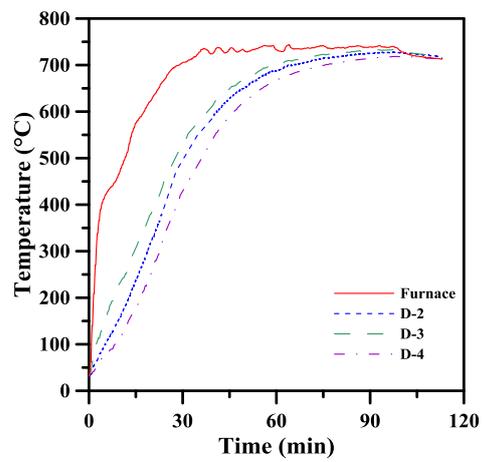
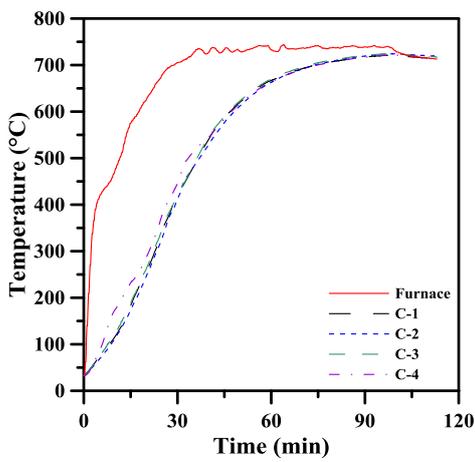


圖 4-9 試體 B4T7-29 斷面測點溫度與爐內溫度-時間關係圖

(資料來源：本研究整理)

試體平均溫度與爐內平均溫度如圖 4-10 所示。試體軸向受壓力與上下端板轉角關係如圖 4-11 所示。試體軸壓力與軸向位移如圖 4-12 所試體軸壓力與側向位移關係如圖 4-13 所示。加載初期載重增加迅速但軸向位移增加慢，加載後期載重增加慢而軸向壓縮量增加快直至試體破壞。可以發現側向位移與上端板轉角於試體臨近破壞時開始迅速增加。

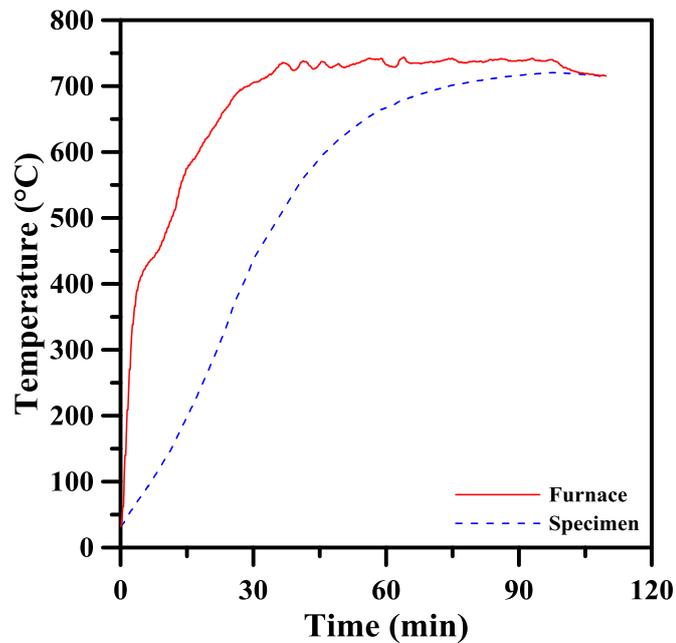


圖 4-10 試體 B4T7-29 與爐內平均溫度-時間關係圖

(資料來源：本研究整理)

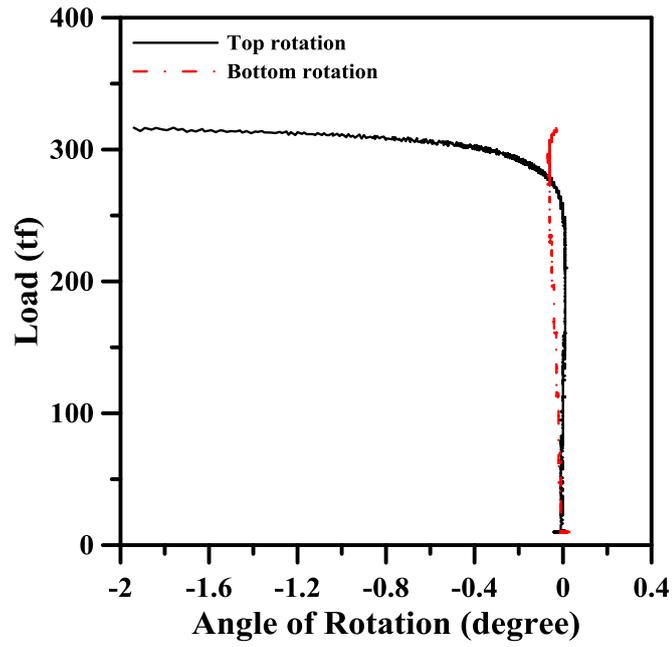


圖 4-11 試體 B4T7-29 上下端板軸力-轉角圖

(資料來源：本研究整理)

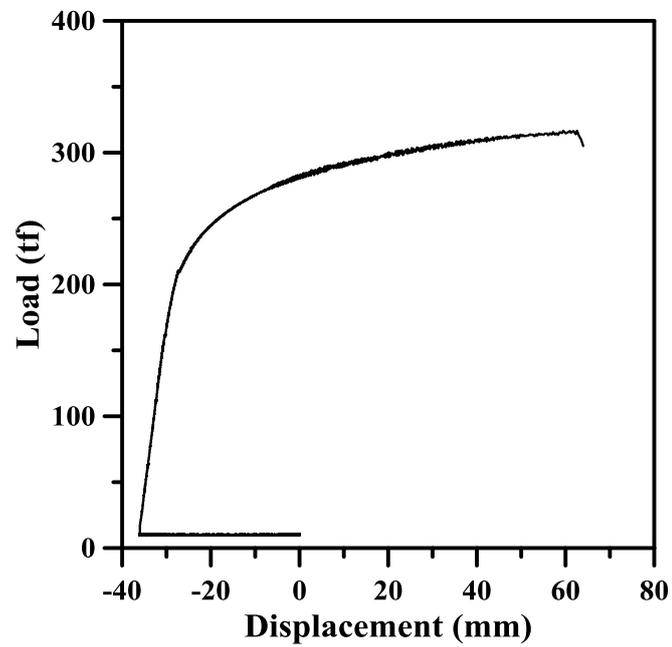


圖 4-12 試體 B4T7-29 軸力-軸向變形圖

(資料來源：本研究整理)

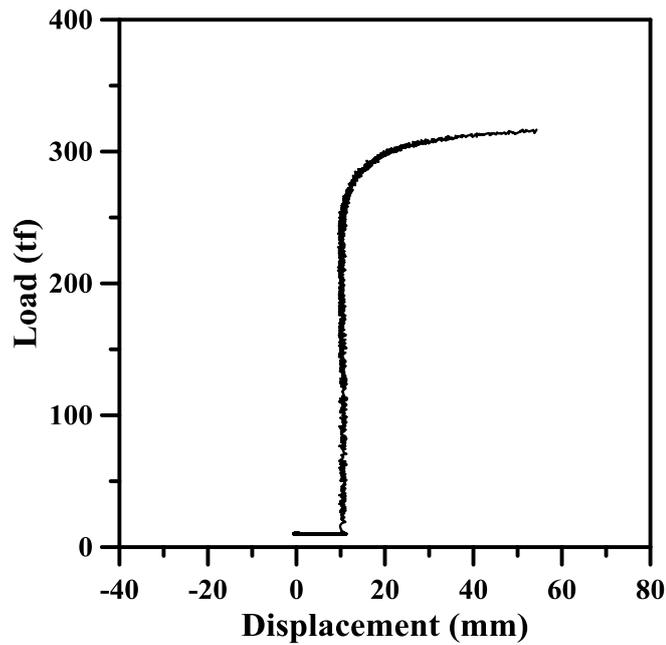


圖 4-13 試體 B4T7-29 軸力-側向位移圖

(資料來源：本研究整理)

待試體冷卻後，進入加溫爐內觀察試體受火受壓後之行為，如圖 4-14 至 4-17 所示。藉由觀察可以得知實驗後試體箱型鋼柱鋼板之銲道、試體連接端板之加勁版及端板鎖固之螺栓等皆無破壞。試體發生雙軸整體挫屈變形，其中一向挫屈之最大側向變位為 71 mm，而另一向挫屈之最大側向變位為 109 mm。



圖 4-14 試體 B4T7-29 實驗後外觀

(資料來源：本研究整理)



圖 4-15 試體 B4T7-29 實驗後外觀

(資料來源：本研究整理)



圖 4-16 試體 B4T7-29 實驗後外觀

(資料來源：本研究整理)

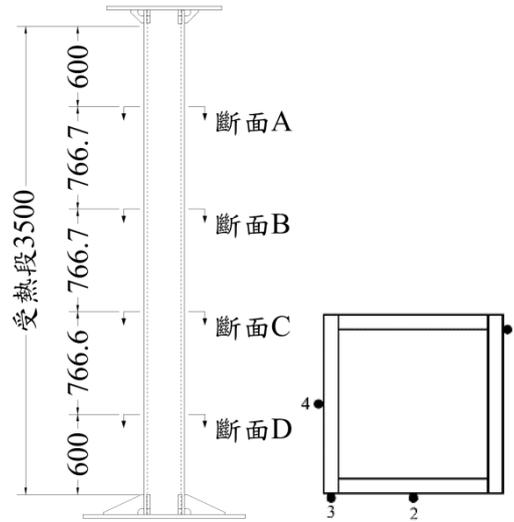


圖 4-17 試體 B4T7-29 實驗後外觀

(資料來源：本研究整理)

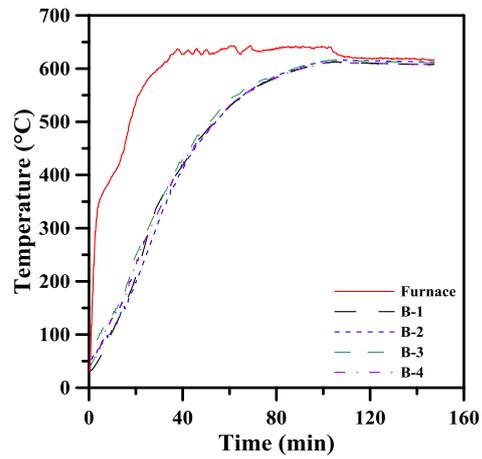
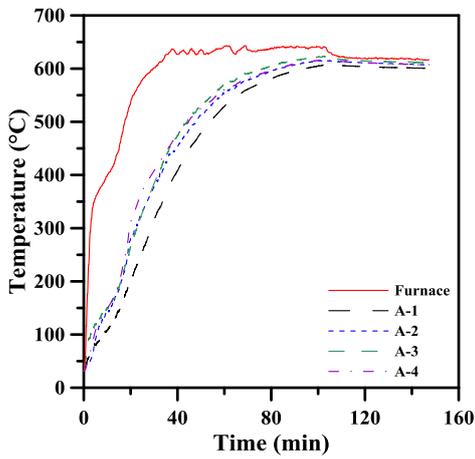
參、試體 B5T6-23

實驗開始時加溫爐內溫度為 33°C，試體平均溫度約為 31.6°C。柱各斷面之測點溫度如圖 4-18 所示，其中測點 D-1 因訊號異常故不納入計算及討論。由於加溫爐設備點火孔位置不同，故底層之溫度亦最高。實驗初期，爐溫快速升高至 350°C 後趨緩，後再行加熱直至達預定溫度 600°C，此時試體溫度穩定增加，試體軸向長度亦持續伸長。於點火 85 分 44 秒後試體平均溫度達到預定之實驗溫度 600°C，此時試體軸向因熱膨脹達最大伸長量 30.1 mm。試體平均溫度達預定溫度後開始進行軸向加載，由 20 噸加至 220 噸後持壓 30 秒，此時試體軸向壓縮量為 4.7 mm，上下端板皆無轉角；而後再加壓至 420 噸後持壓 30 秒，此時試體軸向壓縮量為 8.5 mm，上下端板亦無轉角；而後再加壓至 620 噸持壓 30 秒，此時軸向壓縮量為 13.0 mm，上下端板亦尚無轉角，再行加載至 820 噸，此時軸向壓縮量為 19.1 mm。之後皆進行手動加載，以 9.5 tf/min 的加載速率直至破壞。試體於加壓後 62 分 12 秒達性能基準，此時加溫爐內平均溫度為 616°C，試體平均溫度為 609.0°C，施加载重為 1132.6 噸而試體軸向壓縮量為 99.2 mm，此時上下端板之轉角尚無明顯變化，達性能基準時試體上端板旋轉 0.03 度而下端板旋轉 0.09 度。試體於加壓後 62 分 56 秒達最大載重 1144.6 噸，此時加溫爐內平均溫度為 615°C，試體平均溫度為 609.1°C，而試體軸向壓縮量為 110.3 mm，此時上端板轉角為 0.02 度，下端板轉角為 0.09 度，側向位移為 6.8 mm。



(a) 斷面 A

(b) 斷面 B



(c) 斷面 C

(d) 斷面 D

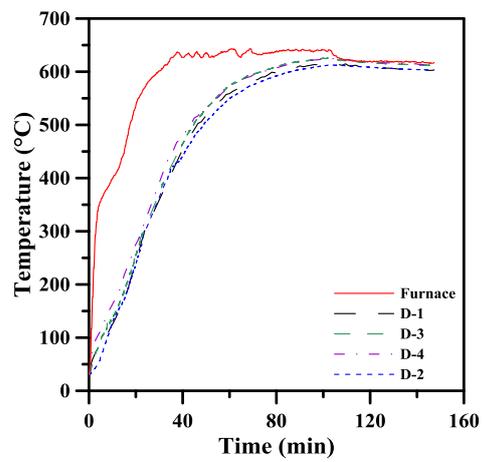
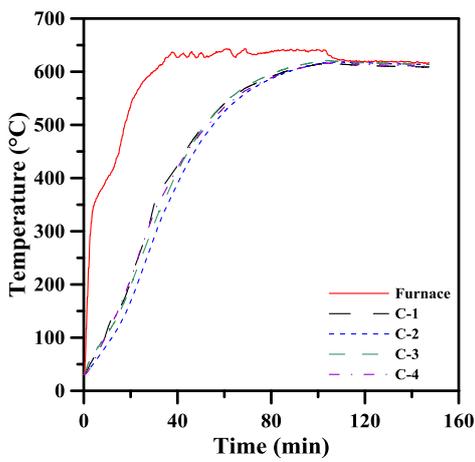


圖 4-18 試體 B5T6-23 斷面測點溫度與爐內溫度-時間關係圖

(資料來源：本研究整理)

試體平均溫度與爐內平均溫度如圖 4-19 所示。試體軸向受壓力與上下端板轉角關係如圖 4-20 所示，試體直至破壞上下端板皆無明顯轉角；試體軸壓力與軸向位移如圖 4-21 所示，可以發現加載初期載重增加迅速但軸向位移增加緩慢，加載後期載重增加緩慢而軸向位移迅速增加；試體軸壓力與側向位移關係如圖 4-22 所示，可以發現側向位移除熱膨脹外無明顯變化。

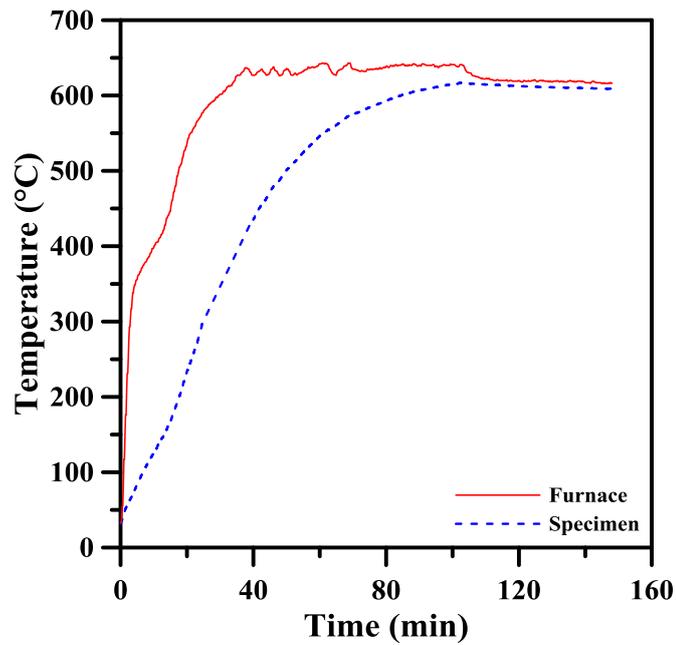


圖 4-19 試體 B5T6-23 與爐內平均溫度-時間關係圖

(資料來源：本研究整理)

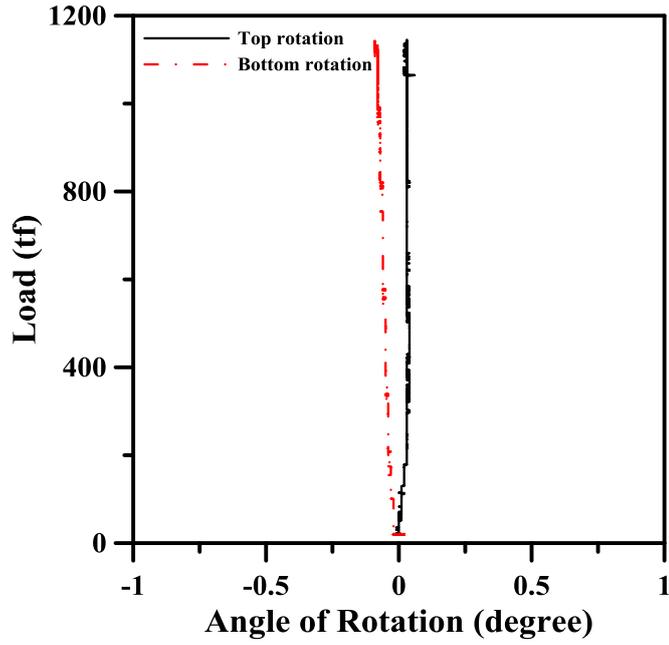


圖 4-20 試體 B5T6-23 上下端板軸力-轉角圖

(資料來源：本研究整理)

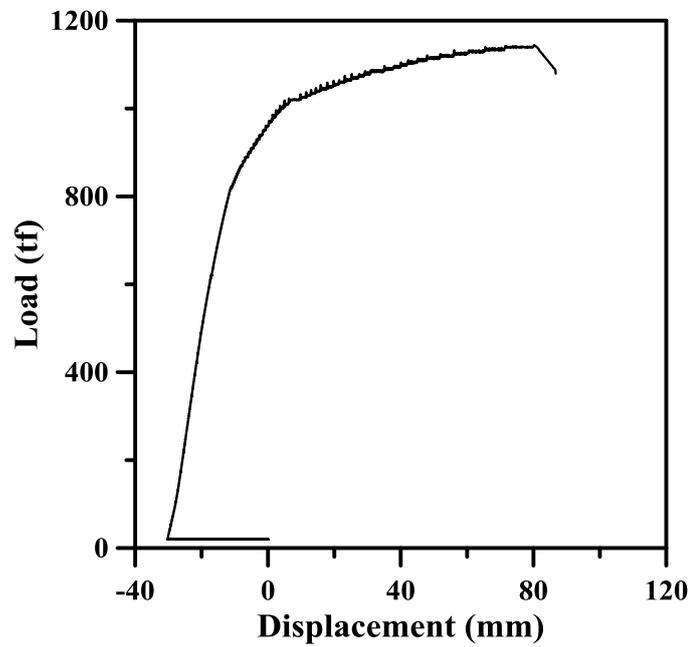


圖 4-21 試體 B5T6-23 軸力-軸向變形圖

(資料來源：本研究整理)

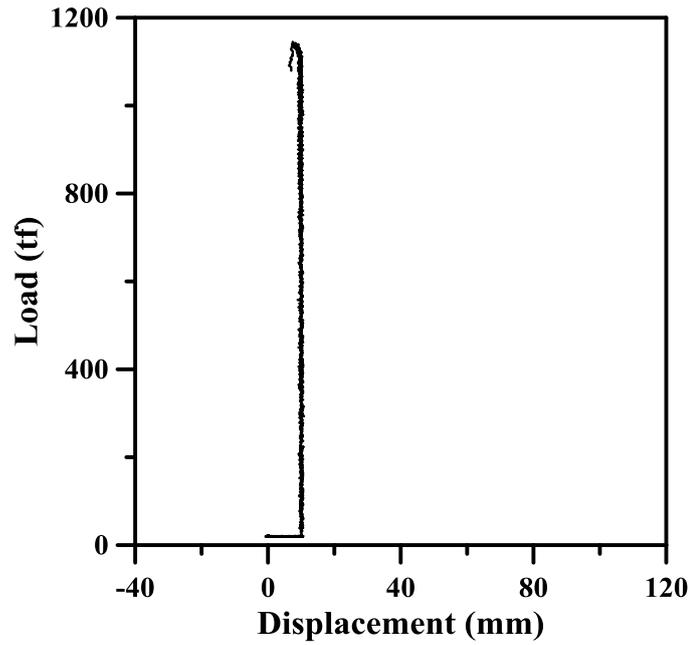


圖 4-22 試體 B5T6-23 軸力-側向位移圖

(資料來源：本研究整理)

待試體冷卻後，進入加溫爐內觀察試體受火受壓後之行為，如圖 4-23 至 4-26 所示。藉由觀察可以得知實驗後試體箱型鋼柱鋼板之銲道、試體連接端板之加勁版及端板鎖固之螺栓等皆無破壞。試體發生局部挫屈破壞，其最大隆起處隆起 30 mm，發生於距底板 130 cm 處；而最大凹陷處凹陷 18 mm，發生於距底板 110 處。



圖 4-23 試體 B5T6-23 實驗後外觀

(資料來源：本研究整理)



圖 4-24 試體 B5T6-23 實驗後外觀

(資料來源：本研究整理)

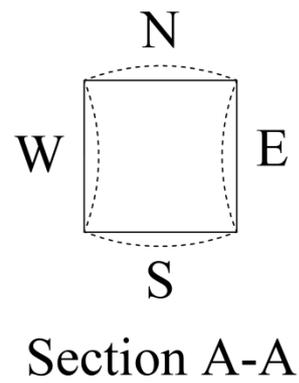


圖 4-25 試體 B5T6-23 實驗後局部挫屈外觀

(資料來源：本研究整理)

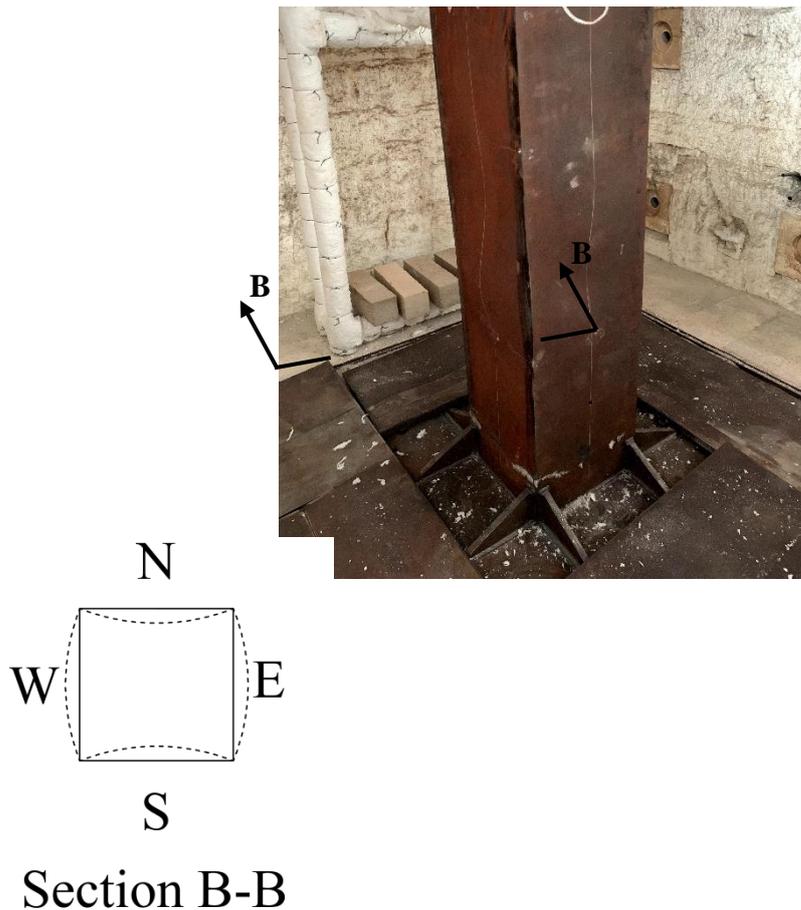


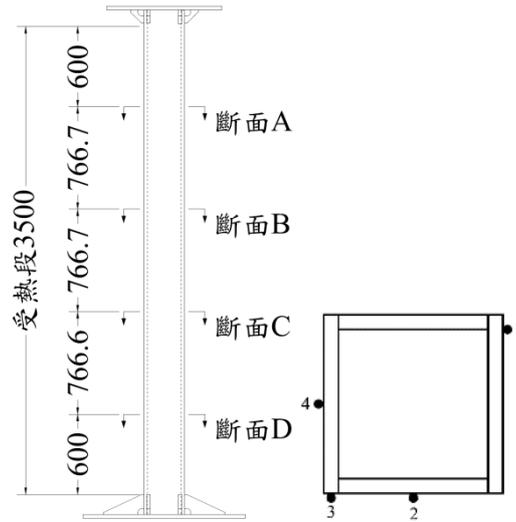
圖 4-26 試體 B5T6-23 實驗後局部挫屈外觀

(資料來源：本研究整理)

肆、試體 B6T7-19

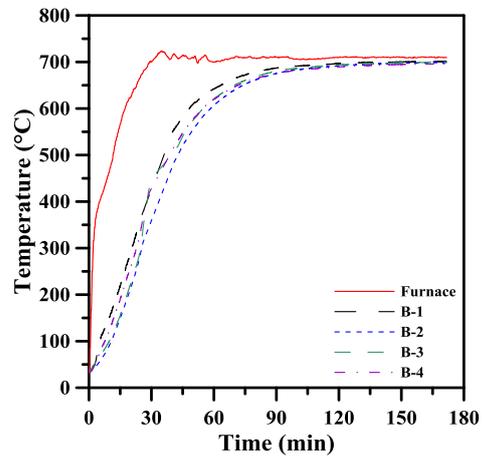
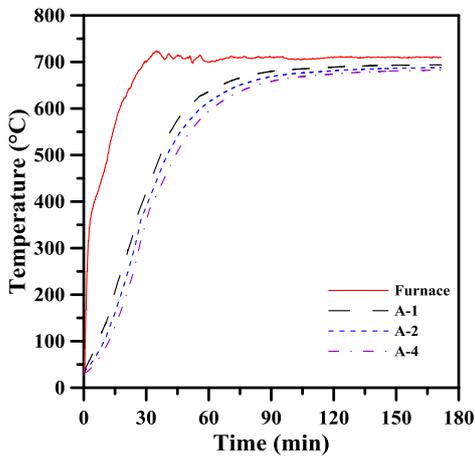
實驗開始時加溫爐內溫度為 34°C ，試體平均溫度約為 32.5°C 。柱各斷面之測點溫度如圖 4-27 所示，其中測點 A-3 因訊號異常故不納入計算及討論。由於加溫爐設備點火孔位置不同，故底層之溫度最高。實驗初期，爐溫快速升高至 370°C 後趨緩，後再行加熱直至達預定溫度 700°C ，此時試體溫度穩定增加，試體軸向長度亦持續伸長。於點火 135 分 30 秒後試體平均溫度達到預定之實驗溫度，此時試體軸向因熱膨脹達最大伸長量 33.0 mm。試體平均溫度達預定溫度後開始進行軸向加載，由 10 噸加至 110 噸後持壓 30 秒，此時試體軸向壓縮量為 3.9 mm，上下端板皆無轉角；而後再加壓至 210 噸後持壓 30 秒，此時試體軸向壓縮量為 7.0 mm，上下端板亦無轉角；而後再加壓至 310 噸持壓 30 秒，此時軸向壓縮量為 10.3 mm，上下端板亦尚無轉角，再行加載至 410 噸，此時軸向壓縮

量為 14.3 mm。之後皆進行手動加載，以 11.0 tf/min 的加載速率直至破壞。試體於加壓後 34 分 30 秒達性能基準，此時加溫爐內平均溫度為 710°C，試體平均溫度為 698.0°C，施加载重為 624.7 噸而試體軸向壓縮量為 73.8 mm，此時上下端板與轉角尚無明顯變化，達性能基準時試體上端板旋轉 0.66 度而下端板旋轉 0.12 度。試體於加壓後 35 分 45 秒達最大載重 638.7 噸，此時加溫爐內平均溫度為 710°C，試體平均溫度為 697.6°C，而試體軸向壓縮量為 92.5 mm，此時上端板轉角為 1.06 度，下端板轉角為 0.1 度，側向位移為 48.1 mm。



(a) 斷面 A

(b) 斷面 B



(c) 斷面 C

(d) 斷面 D

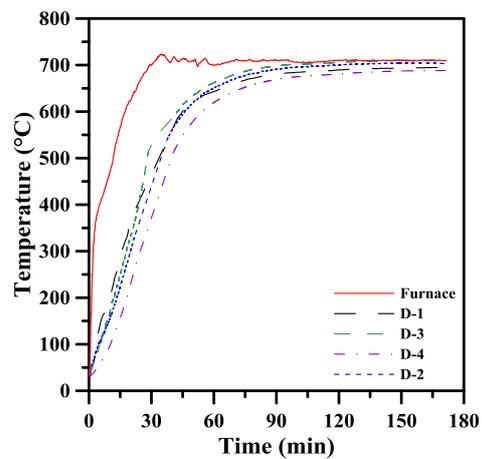
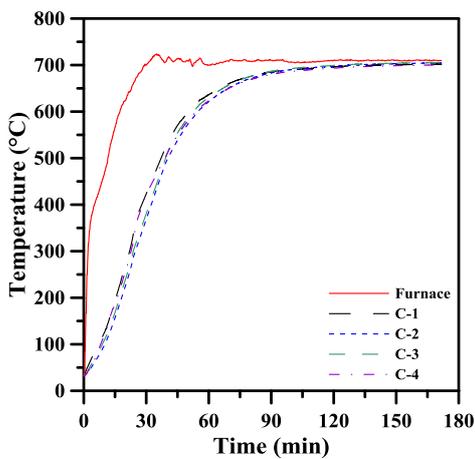


圖 4-27 試體 B6T7-19 斷面測點溫度與爐內溫度-時間關係圖

(資料來源：本研究整理)

試體平均溫度與爐內平均溫度如圖 4-28 所示。試體軸向受壓力與上下端板轉角關係如圖 4-29 所示，試體於加載後期上端板轉角緩慢增加，應與試體發生局部挫屈有關；試體軸壓力與軸向位移如圖 4-30 所示，加載初期軸力迅速增加而軸向位移增加緩慢，加載後期載重增加緩慢而軸向位移迅速增加；試體軸壓力與側向位移關係如圖 4-31 所示，試體臨近破壞時開始量測到些微側向位移，應為試體局部挫屈所致。

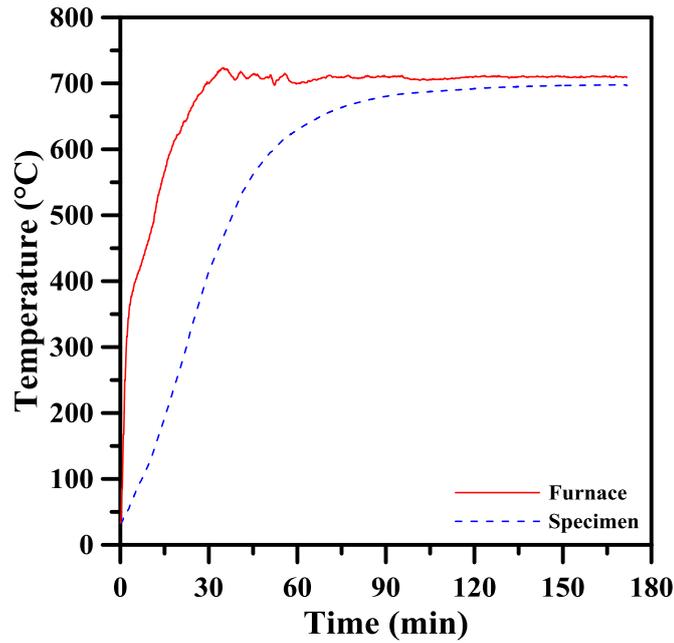


圖 4-28 試體 B6T7-19 與爐內平均溫度-時間關係圖

(資料來源：本研究整理)

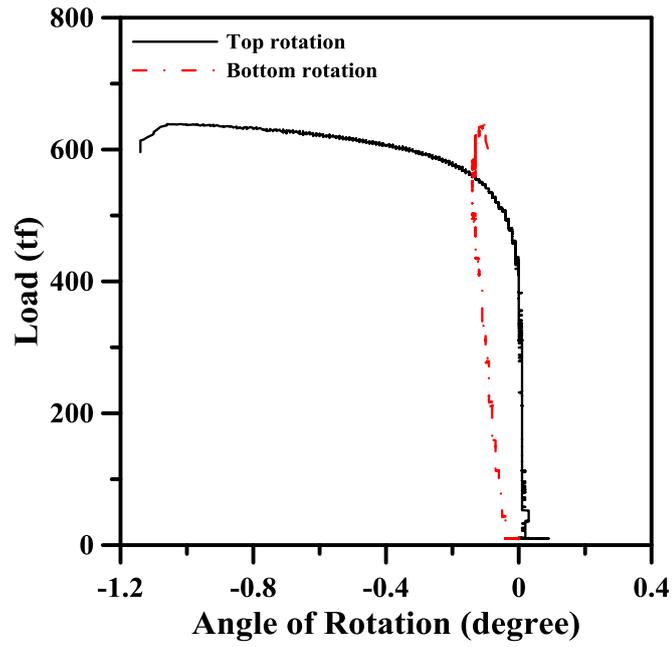


圖 4-29 試體 B6T7-19 上下端板軸力-轉角圖

(資料來源：本研究整理)

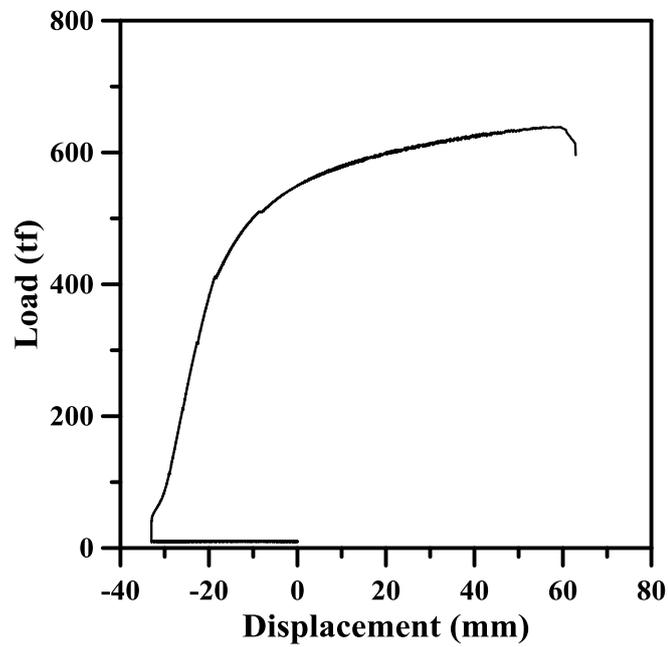


圖 4-30 試體 B6T7-19 軸力-軸向變形圖

(資料來源：本研究整理)

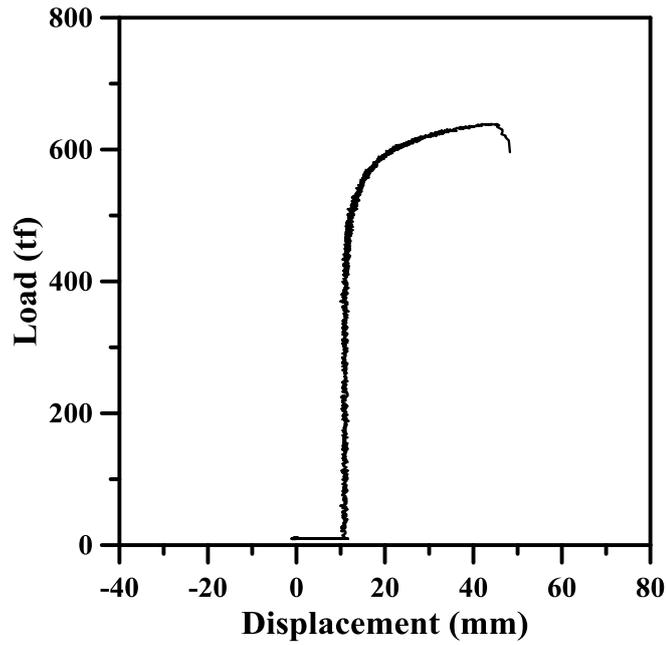


圖 4-31 試體 B6T7-19 軸力-側向位移圖

(資料來源：本研究整理)

待試體冷卻後，進入加溫爐內觀察試體受火受壓後之行為，如圖 4-32 至 4-35 所示。藉由觀察可以得知實驗後試體箱型鋼柱鋼板之銲道、試體連接端板之加勁版及端板鎖固之螺栓等皆無破壞。試體發生局部挫屈破壞，其最大隆起處隆起 33 mm，發生於距底板 180 cm 處；而最大凹陷處凹陷 17 mm，發生於距底板 218 cm 處。



圖 4-32 試體 B6T7-19 實驗後外觀

(資料來源：本研究整理)



圖 4-33 試體 B6T7-19 實驗後外觀

(資料來源：本研究整理)



圖 4-34 試體 B6T7-19 實驗後外觀

(資料來源：本研究整理)



圖 4-35 試體 B6T7-19 實驗後局部挫屈外觀

(資料來源：本研究整理)

詳細實驗記錄與實驗結果之比較如表 4-1 所示。

表 4-1 實驗結果總表

	B3T6-39	B5T6-23	B4T7-29	B6T7-19
細長比	39.1	22.9	28.7	18.9
寬厚比	10.0	15.9	14.0	19.4
預計試體平均溫度 (°C)	600	600	700	700
試體最大承受載重 (tf)	470.5	1144.6	316.6	638.7
破壞模式	整體挫屈	局部挫屈	整體挫屈	局部挫屈
升溫至預計溫度耗時 (分:秒)	82:50	85:45	77:25	135:30
開始加載時 試體平均溫度 (°C)	602.2	601.5	704.2	695.0
達最大載重時	625.1	609.1	714.3	697.6

高強度鋼構造柱於高溫下受壓強度之研究

試體平均溫度 (°C)				
達最大載重時壓縮量 (mm)	35.8	110.3	98.6	92.5
達性能基準時壓縮量 (mm)	44.2	99.2	69.0	73.8
達性能基準時試體溫度 (°C)	625.3	609.0	715.0	698.0
達性能基準時載重 (tf)	463.8	1132.6	304.1	624.7

(資料來源：本研究整理)

第二節 實驗結果討論

本節將就試體 B3T6-39、B4T7-29、B5T6-23 及 B6T7-19 於實驗後之結果進行討論，探討高強度箱型鋼構造柱於高溫下之受壓行為，並討論實驗參數對於試體行為與受壓強度之影響。

壹、試體行為

試體受火達到預設之實驗溫度後開始進行軸向加載，加載初期試體軸向壓縮量與軸力大小呈正相關，而試體皆無側向變形，上下端板亦無轉角。隨著軸力漸增軸向變形速率開始變快，當加載至達性能基準時，試體將依其寬厚比大小決定其破壞模式。寬厚比小者將產生整體挫屈破壞，而寬厚比大者將發生局部挫屈破壞。

若試體發生整體挫屈破壞，當受壓達臨界載重時可以觀察到試體軸向變形速率增加，且其側向變形亦快速增加，而載重則固定維持在臨界載重無法再加載。若試體發生局部挫屈破壞，當受壓達臨界載重時可以發現軸向變形速率明顯增加，但側向變形並無明顯增加，載重固定維持在臨界載重無法再加載，而因加溫爐內底層加熱孔皆有啟動點火，故試體底層溫度較高導致底層強度較低，局部挫屈破壞皆發生在底層附近，推測應為底層加熱孔開啟較多導致試體體層平均溫度較高所致。實驗結果顯示四支試體中寬厚比較高之兩支試體於高溫下亦發生局部挫屈，經計算得知此二試體於破壞時斷面皆達高溫下之降伏強度，推論為高溫下降伏強度折減，致使常溫下符合塑性設計斷面之試體於高溫下仍會發生局部挫屈之現象，而其餘兩支寬厚比較小之試體於破壞時其斷面並無達高溫下之降伏強度，故發生整體挫屈破壞。觀察試體 B5T6-23 及 B6T7-19 實驗後外觀可明顯看出鋼板呈現凹凸的情形，因試體採用全滲透鐸故鐸道並無開裂。而試體 B6T7-19 量測到微側向變形應是因量測到局部挫屈之鋼板變形所致。

觀察實驗後之試體可以發現試體底部端板幾無旋轉，僅頂部有旋轉，應為實驗設備影響。

貳、參數影響

影響鋼柱受壓強度之參數有降伏強度、彈性模數、細長比與溫度，本實驗就

高強度鋼構造柱於高溫下受壓強度之研究

細長比與溫度作為實驗之參數，而試體斷面皆採用塑性設計斷面。

由實驗結果可以發現試體 B5T6-23 比試體 B3T6-39 在 600°C 下強度增加 674.1 噸；而試體 B6T7-19 比試體 B4T7-29 在 700°C 下其強度增加 322.1 噸，由此可以發現細長比變小可提高其強度，但在溫度愈高的情況下降低細長比所能提高之強度愈少。

本次實驗亦發現雖試體 B5T6-23 及試體 B6T7-19 於常溫下皆為塑性設計斷面，在高溫下卻皆發生局部挫屈破壞，推論為高溫下強度衰減過多，常溫時的寬厚比規定值已偏不保守，設計之寬厚比接近結實斷面時於高溫下容易發生局部挫屈破壞。

第五章 受壓強度計算模式

本研究為建置一套高溫下銲接箱型鋼柱之受壓強度計算模式，故參照各國規範對鋼構造柱於常溫或高溫下受壓強度之計算方式。目前國外規範對高溫下銲接箱型鋼柱之適用性皆未提及。以高強度銲接箱型鋼柱之火害實驗結果與規範計算值比較，以期建立適用於高強度銲接箱型鋼柱受火害之受壓強度計算方式。

第一節 規範計算值與討論

計算銲接箱型鋼柱於常溫下的受壓強度，以 AISC (2016)受壓強度公式與國內「鋼結構極限設計法規範及解說」(2010)銲接箱型受壓構材公式，如圖 5-1 所示。可以發現以國內規範計算之受壓強度較低。以 AISC (2016)高溫下的鋼材機械性質代入國內「鋼結構極限設計法規範及解說」(2010)銲接箱型受壓構材之常溫公式計算，可得到高溫時之受壓強度與細長比之關係。圖 5-2 所示為國內、AISC (2016)與 Eurocode 3 (2005b)三者的比較，結果發現以國內規範計算之強度在細長比低時明顯偏高，而細長比高時則三者計算所得結果相近。此外因國內規範有以 λ_c 作為強度計算方式之區別，故可明顯於圖上看到兩段曲率不同的線段。

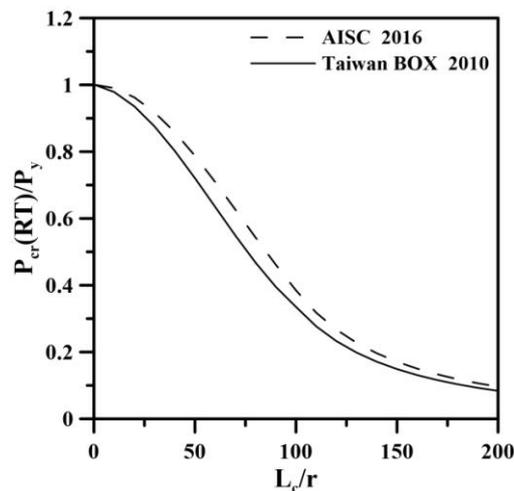


圖 5-1 鋼柱於常溫之受壓強度

(資料來源：本研究整理)

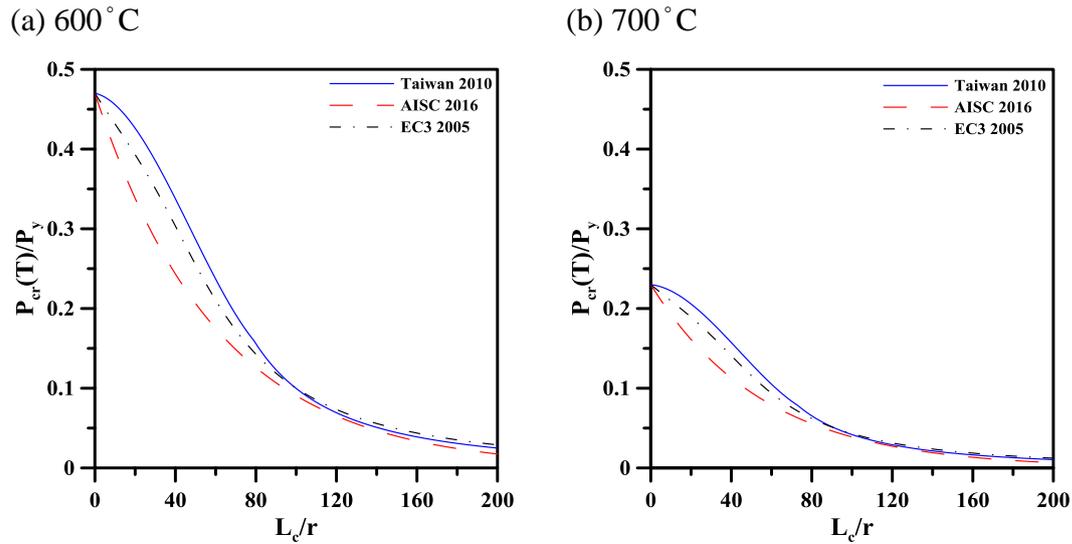


圖 5-2 銲接箱型鋼柱於高溫之受壓強度

(資料來源：本研究整理)

表 5-1 所示為本研究之試體，以 AISC (2016)與 Eurocode 3 (2005b)計算之高溫下受壓強度，與以 AISC (2016)之高溫鋼材機械性質代入國內常溫銲接箱型受壓構材公式計算受壓強度。詳細計算過程可見附錄四。

表 5-1 不同規範計算之高溫受壓強度

試體	P_{Test} (tf)	$P_{n,AISC}$ (tf)	$P_{n,TWN}$ (tf)	$P_{n,EC3}$ (tf)	$\frac{P_{Test}}{P_{n,AISC}}$	$\frac{P_{Test}}{P_{n,TWN}}$	$\frac{P_{Test}}{P_{n,EC3}}$
B3T6-39 (625.1°C)	470.5	296.0	410.3	370.5	1.59	1.15	1.27
B5T6-23 (609.1°C)	1144.6	740.1	954.6	873.6	1.49	1.20	1.31
B4T7-29 (714.3°C)	316.6	235.9	317.3	289.4	1.34	1.00	1.09
B6T7-19 (697.6°C)	638.7	513.0	648.4	596.2	1.25	0.99	1.07
平均比值	—	—	—	—	1.42	1.11	1.19

註：

P_{Test} = 火害實驗之實驗強度。

$P_{n,AISC}$ = AISC 附錄四公式計算之受壓強度。

$P_{n,TWN}$ = AISC 高溫鋼材機械性質代入國內銲接箱型受壓構材公式之受壓強度。

$P_{n,EC3}$ = Eurocode 3 計算之受壓強度。

(資料來源：本研究整理)

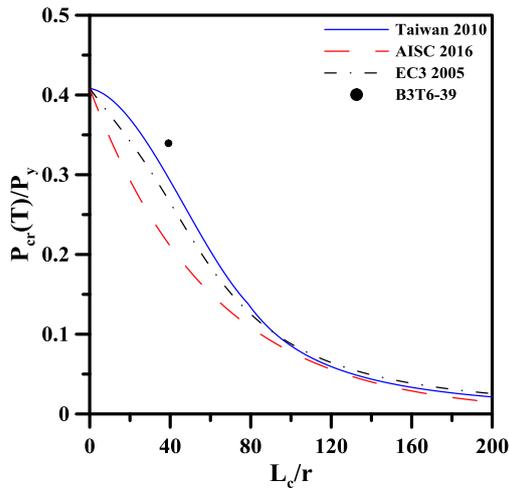
計算值與實驗值比較結果可初步得知無論於 600°C 或 700°C 時， $P_{n,TWN}$ 之受壓強度皆略高於 $P_{n,EC3}$ ；而 $P_{n,EC3}$ 之受壓強度亦高於 $P_{n,AISC}$ ，故得知以國內「鋼結構極限設計法規範及解說」(2010)常溫下銲接箱型受壓構材之強度計算方式計算所得之受壓強度最高。

AISC (2016)所使用之折減係數與 Eurocode 3 (2005b)之折減係數相同，而以此折減係數代入國內銲接箱型鋼柱強度計算公式所得之結果明顯高於其它兩者。推測因國內計算公式是透過回歸所得，又國內規範之適用範圍為常溫，而其它兩者之適用範圍為高溫，故以此公式估算高溫下銲接箱型鋼柱之受壓強度則較

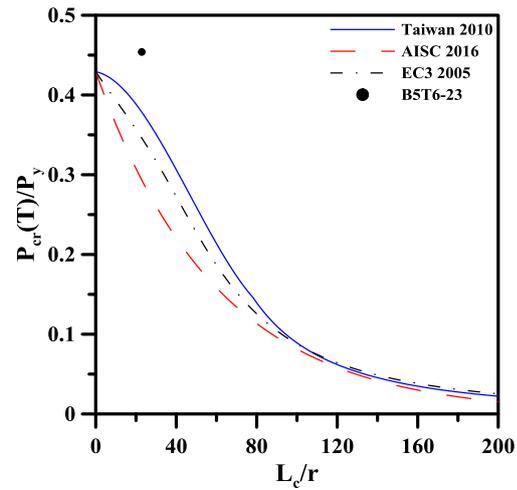
高。

由於國外規範之高溫下受壓強度計算公式是以 H 型鋼為主，對於鉸接箱型鋼柱之受壓強度計算方式則並未提及。故以火害實驗之結果與各國規範計算之受壓強度比較，以確認何種計算方式較為接近實驗結果。如圖 5-3 所示，在 600°C 時實驗結果皆高於各國之規範值，但仍以國內鉸接箱型鋼柱強度計算公式之規範值最為接近。在 700°C 時，實驗結果介於國內計算公式與 Eurocode 3 (2005b) 之間。試體之受壓強度與各國規範計算之受壓強度比值亦列於表 5-1，可以發現無論在 600°C 及 700°C 時，都以國內鉸接箱型鋼柱強度計算公式最為接近實驗結果。

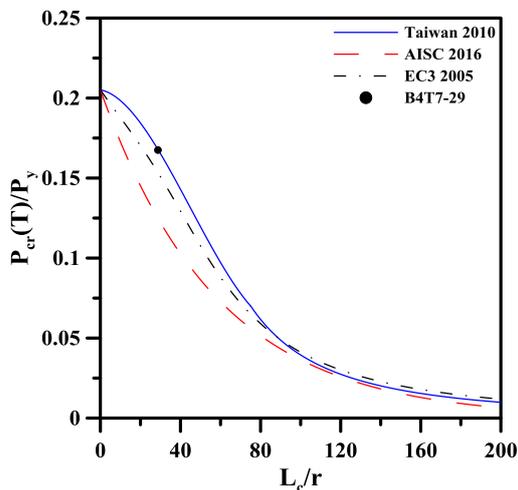
(a) 試體 B3T6-39



(b) 試體 B5T6-23



(c) 試體 B4T7-29



(d) 試體 B6T7-19

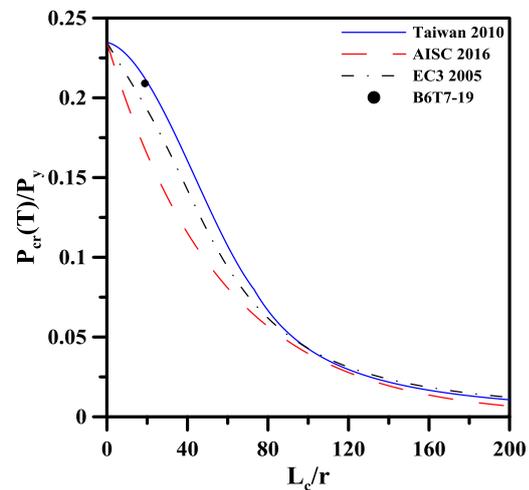


圖 5-3 試體高溫受壓強度與規範計算值之比較

(資料來源：本研究整理)

第二節 高溫下銲接箱型受壓構材之強度計算模式

本節參考前一節各規範計算值與實驗值之比較，以建立高溫下銲接箱型受壓構材之強度計算模式。

由表 5-1 可以得知，於 600°C 時，試體 B3T6-39 和試體 B5T6-23 之實驗值分別高於 AISC (2016)之規範值 59%及 49%；在 700°C 時，試體 B4T7-29 與試體 B6T7-19 之實驗值也分別高於 AISC (2016)規範值 34%及 25%。顯示 AISC (2016)

較為保守，若使用 AISC (2016) 高溫下鋼柱之受壓強度公式來計算箱型鋼柱斷面將低估其受壓強度。

Eurocode 3 (2005b)之規範值與代入 AISC (2016)高溫下折減係數之國內銲接箱型鋼柱受壓強度公式計算之規範值兩者較為接近，但國內之箱型鋼柱受壓強度公式更為貼近實驗結果。又考慮到 Eurocode 3 (2005b)之計算過程繁瑣，因此建議在細長比小於 40 的情況下，使用 AISC (2016)高溫下材料折減係數代入國內銲接箱型鋼柱受壓強度公式，以計算高溫下銲接箱型鋼柱之受壓強度。由於本研究之試體數量有限，且細長比皆落於非彈性挫屈公式內，並無法確認彈性挫屈公式之適用性，期望爾後能有後續研究來驗證彈性挫屈之受壓強度。

第六章 結論與建議

第一節 結論

本計畫進行四支採用 SM570MC 高強度鋼板的銲接箱型鋼柱於高溫下軸壓實驗，箱型斷面皆為塑性設計斷面且其銲接採用全滲透開槽銲接。研究參數為細長比與溫度，四支試體之細長比皆小於 40，試體預計溫度為 600°C 與 700°C。以定溫加載進行實驗，以獲得其受壓強度，並建立高強度箱型鋼柱於高溫下之受壓強度計算模式。總結研究成果提出以下結論：

1. 實驗結果顯示同溫度下細長比愈大其受壓強度越低，而當溫度在 600°C 以上，溫度於受壓強度的影響大於細長比對受壓強度之影響。
2. 試體之箱型斷面皆屬塑性設計斷面，而試體 B5T6-23 及試體 B6T7-19 之寬厚比分別為 15.9 及 19.4，小於規範規定之 20.0 及 20.6，卻於高溫下皆發生局部挫屈，應為高溫下之機械性質折減導致破壞時，斷面達高溫降伏應力所致。
3. 高溫下受壓強度建議之計算模式為當採用銲接箱型鋼柱且細長比介於 19 至 39，溫度為 609°C 至 714°C 時，使用 AISC 高溫機械性質代入國內常溫箱型鋼柱強度計算公式，所得結果會最接近實驗所得強度。以此模式預測強度在 600°C 時將預期保守 15%，而在 700°C 時預期與實驗所得強度幾乎一致。
4. 試體於 600°C 時受壓強度實驗值高於以 AISC 之計算值約 50%，試體於 700°C 時實驗值高於以 AISC 計算約 30%，顯示以 AISC 計算高溫的軸壓強度甚為保守。
5. 試體於 600°C 時受壓強度實驗值高於以 Eurocode 3 之計算值約 30%，試體於 700°C 時實驗值高於以 Eurocode 3 計算約 10%，顯示以 Eurocode 3 計算可以得到稍保守之預估值。
6. 以國內規範計算之受壓強度，於 600°C 時實驗值僅約高於規範計算值 17%，於 700°C 時實驗值則幾乎與規範計算相同。可以發現國內規範計算之受壓強度較其他規範準確。

第二節 建議

1. 建議一

高強度內灌混凝土箱型鋼柱於高溫下抗壓強度之研究：立即可行之建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：中華民國鋼結構協會

國內實務上使用之高強度箱型鋼柱，一般亦內灌高強度混凝土，以提高其受壓強度。此種柱構件受火害高溫作用時，鋼材的導熱性高，鋼材強度與勁度將逐漸衰減；然而內灌的混凝土為熱的不良導體，兩者將相互影響柱構件的受壓強度。後續的研究可探討高強度內灌混凝土箱型鋼柱於高溫下的抗壓強度。

2. 建議二

高強度銲接箱型鋼柱於高溫下受壓強度之研究：中長期性之建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：中華民國鋼結構協會

國內外對於高強度銲接箱型鋼柱高溫下受壓強度之研究甚少，本研究使用四支箱型鋼柱進行火害試驗，由此建立計算模式之應用範圍有限，後續之研究可進行不同之溫度與細長比的定溫加載實驗，以建立完整之受壓強度計算模式。

附錄一 試體設計圖

工程圖說文件內容

- 1.材料總表
- 2.注意事項
- 3.工程圖目錄
 - (1) S1-1 試體B3組裝圖
 - (2) S1-2 試體B3下端詳圖
 - (3) S1-3 試體B3上端詳圖
 - (4) S2-1 試體B4組裝圖
 - (5) S2-2 試體B4下端詳圖
 - (6) S2-3 試體B4上端詳圖
 - (7) S3-1 試體B5組裝圖
 - (8) S3-2 試體B5下端詳圖
 - (9) S3-3 試體B5上端詳圖
 - (10) S4-1 試體B6組裝圖
 - (11) S4-2 試體B6下端詳圖
 - (12) S4-3 試體B6上端詳圖
 - (13) C1-1 試體銲接詳圖
 - (14) C1-2 拉力試片詳圖

聯絡人:徐連君 (TEL: 0936-773-089 E-mail: newksac@gmail.com)
指導老師:陳誠直 教授 (TEL: 0921-841-225 E-mail: chrischen@mail.nctu.edu.tw)

國立交通大學土木工程學系

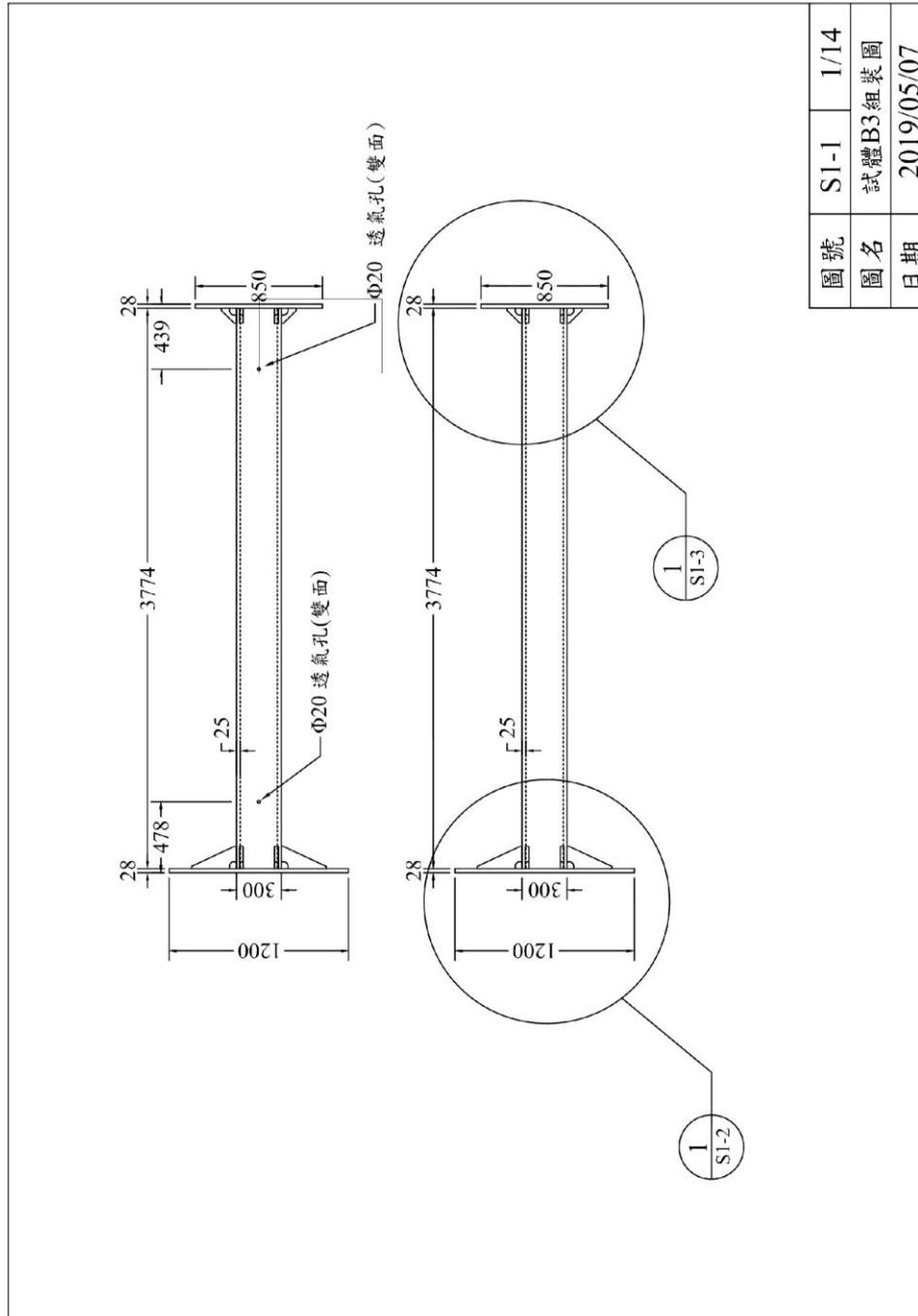
中華民國 108 年 5 月 07 日

材料總表

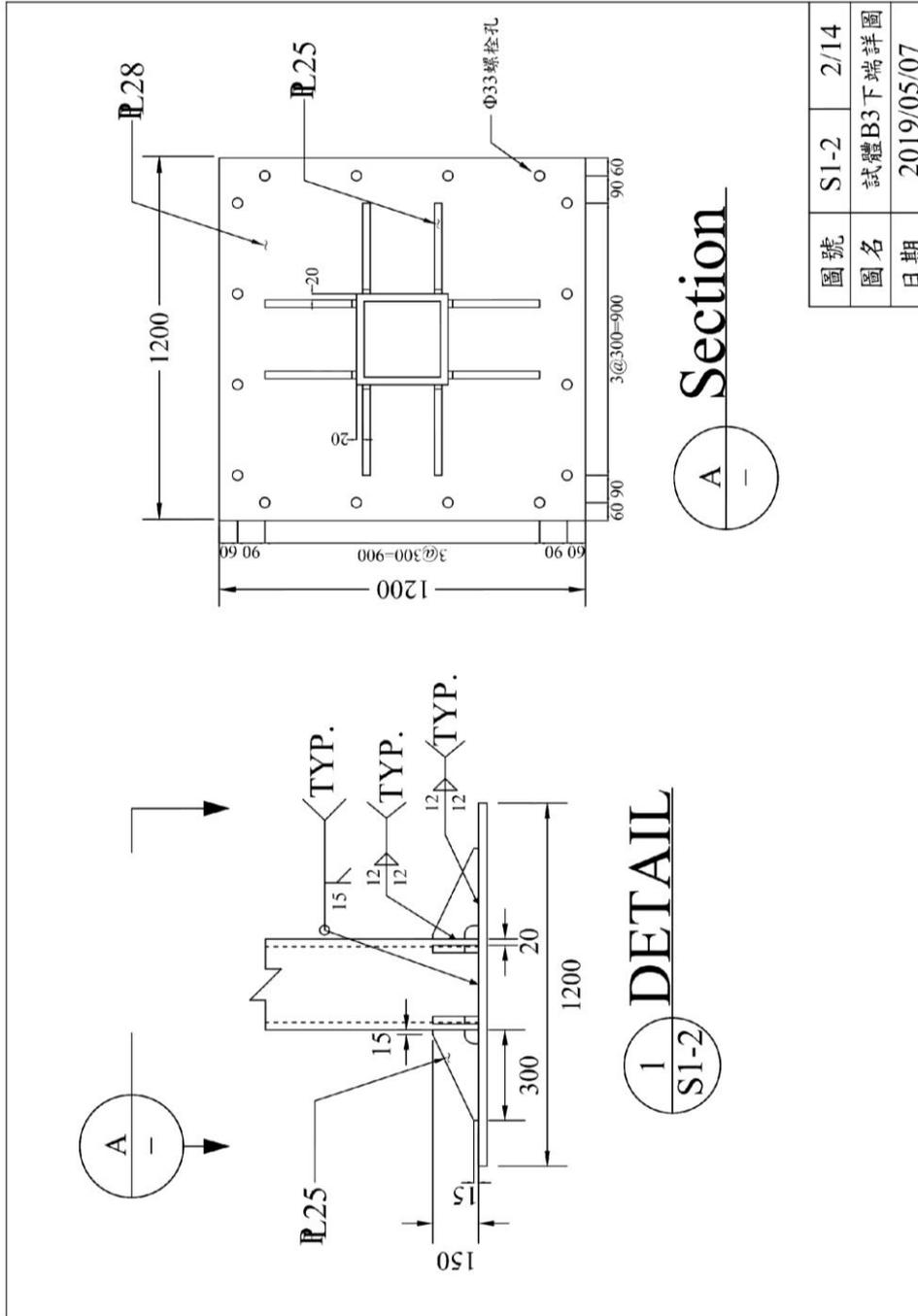
編號	名稱與尺寸 (unit : mm)	材料	數量	備註
1	柱 □ 300×300×25×3774	SM570MC	1	試體B3。尺寸詳圖S1-1、圖S1-2、圖S1-3。
2	柱 □ 400×400×25×3774	SM570MC	1	試體B4。尺寸詳圖S2-1、圖S2-2、圖S2-3。
3	柱 □ 500×500×28×3774	SM570MC	1	試體B5。尺寸詳圖S3-1、圖S3-2、圖S3-3。
4	柱 □ 600×600×28×3774	SM570MC	1	試體B6。尺寸詳圖S4-1、圖S4-2、圖S4-3。
5	柱下端加勁板 PL 25×150×300	SM570MC	32	試體B3、B4、B5、B6各8。
6	柱上端加勁板 PL 25×100×100	SM570MC	32	試體B3、B4、B5、B6各8。
7	柱下端板 PL 28×1200×1200	SM570MC	4	試體B3、B4、B5、B6各1。
8	柱上端板 PL 28×850×850	SM570MC	4	試體B3、B4、B5、B6各1。
9	背墊板 FB 12×25×3774	SM570MC	16	試體B3、B4、B5、B6各4。
10	拉力試片 PL 25×50×505	SM570MC	2	拉力試片長度方向請依鋼板滾壓方向裁切。
11	拉力試片 PL 28×50×505	SM570MC	2	拉力試片長度方向請依鋼板滾壓方向裁切。

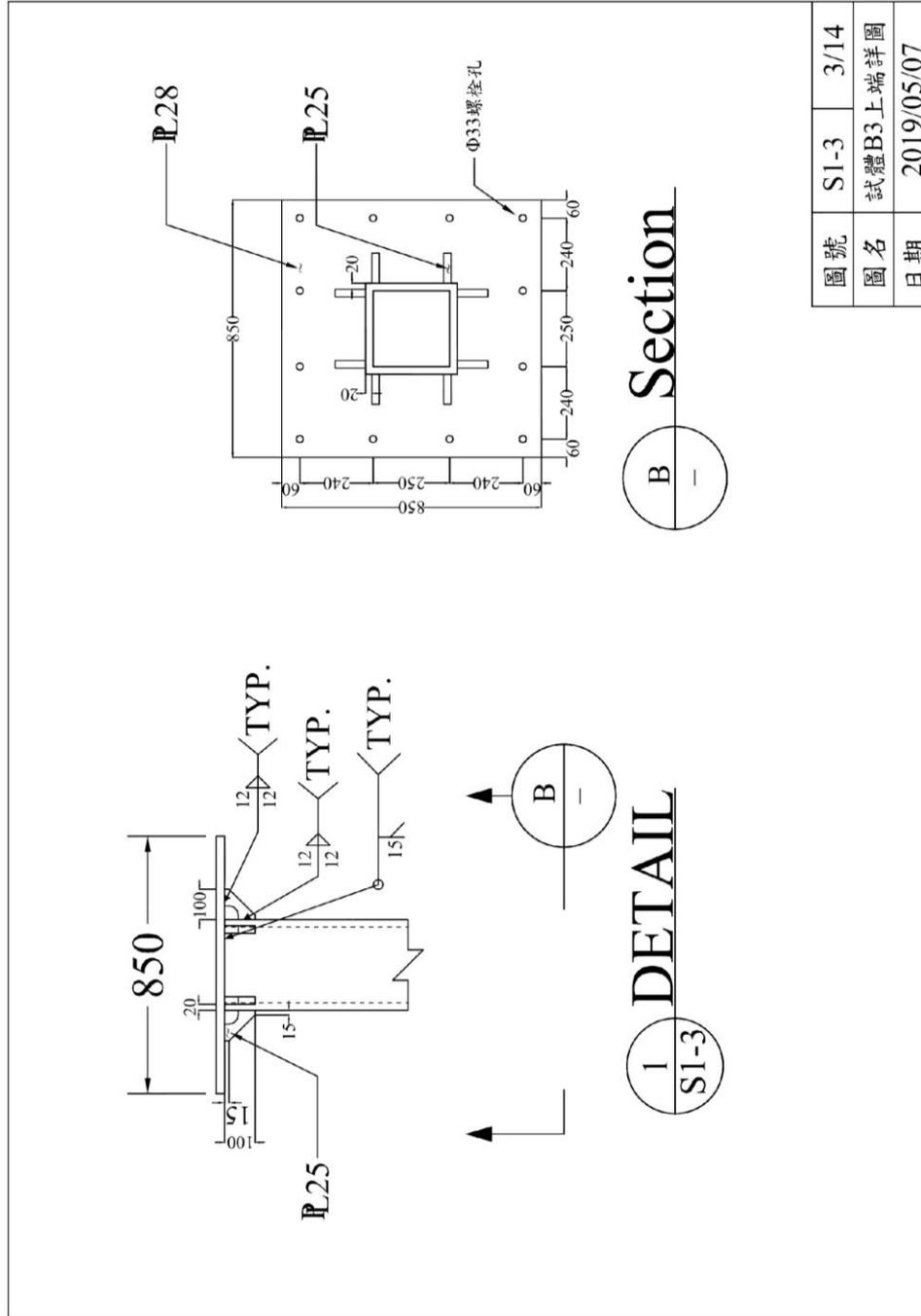
注意事項：

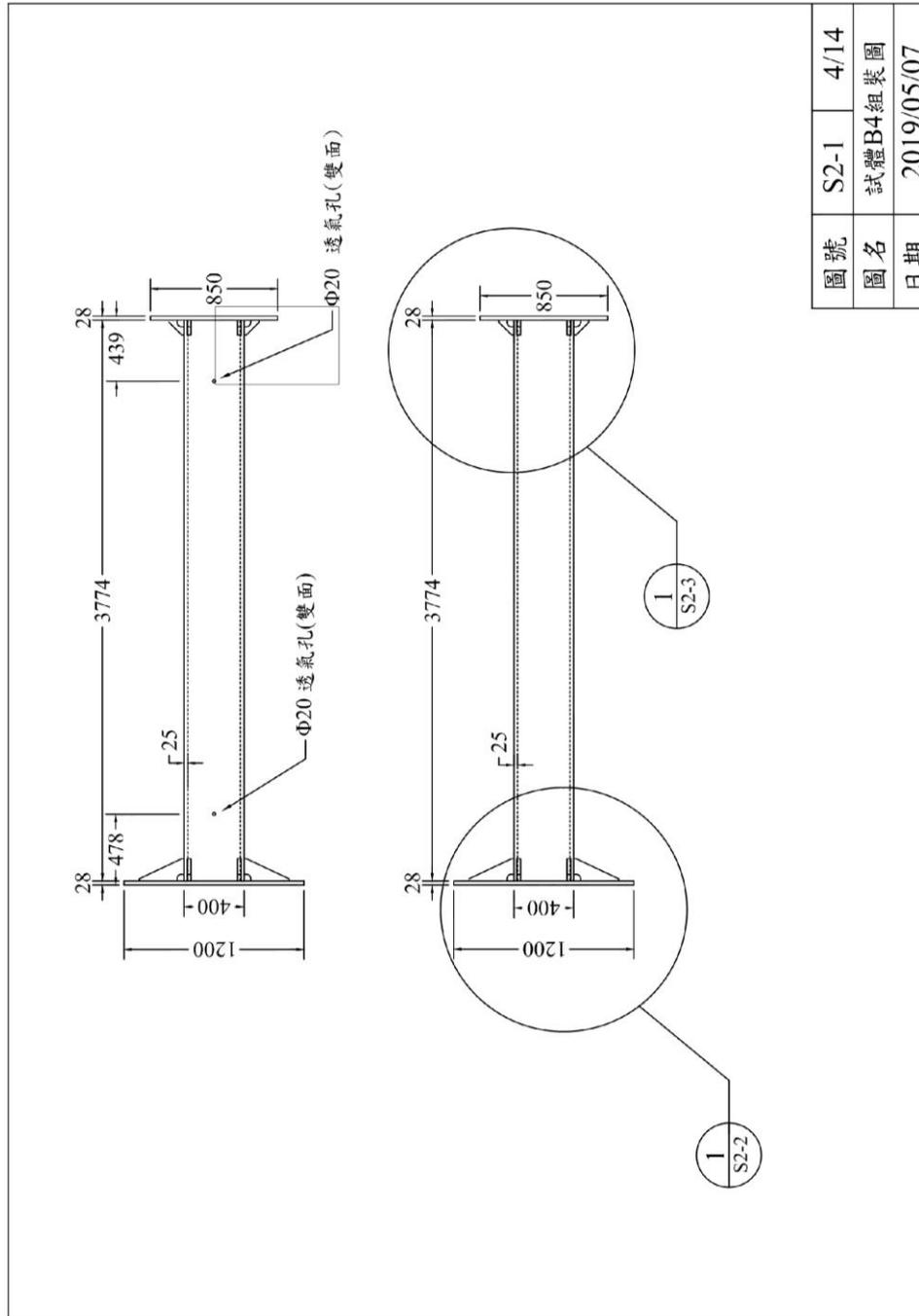
- 1.圖面上尺寸，均以公厘(mm)為單位。
- 2.所有結構圖應與其他相關圖說宜並查閱，遇有相互矛盾或不明之事情，應予以告知。
- 3.所有鋼結構材料為SM570MC。
- 4.銲接接合：
 - (1) 構材銲接均須符合美國銲接協會結構銲接規範AWS D1.1之規定。銲條採用天泰銲材TWE-811Ni1或同等品。
 - (2) 所有全滲透銲均需進行超音波檢測。
- 5.承包商若因施工製作之問題，必須變更設計時，須予以告知。
- 6.交貨地點：臺南市歸仁區六甲里中正南路一段2502號 內政部建築研究所 防火實驗中心。



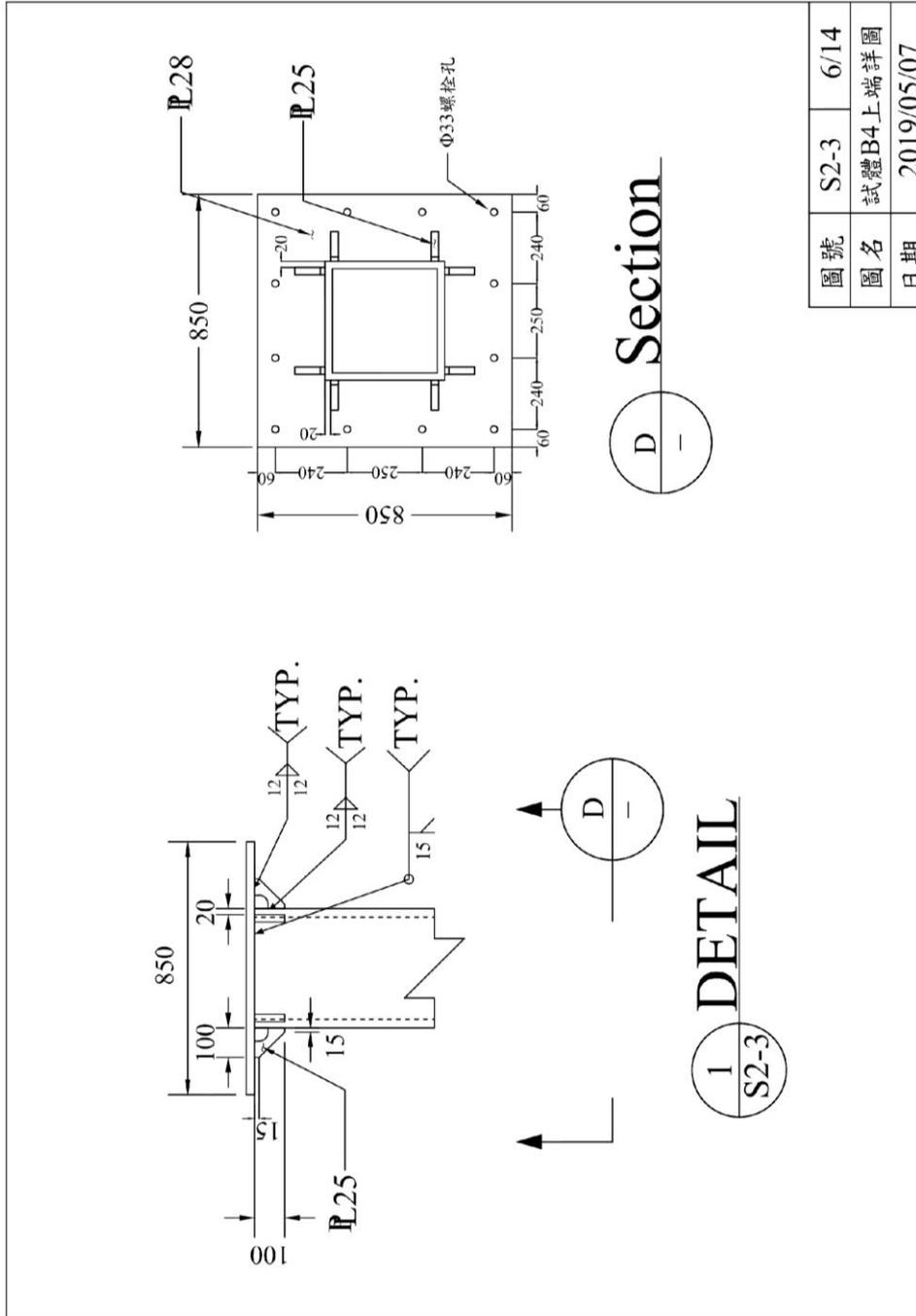
圖號	S1-1	1/14
圖名	試體B3組裝圖	
日期	2019/05/07	

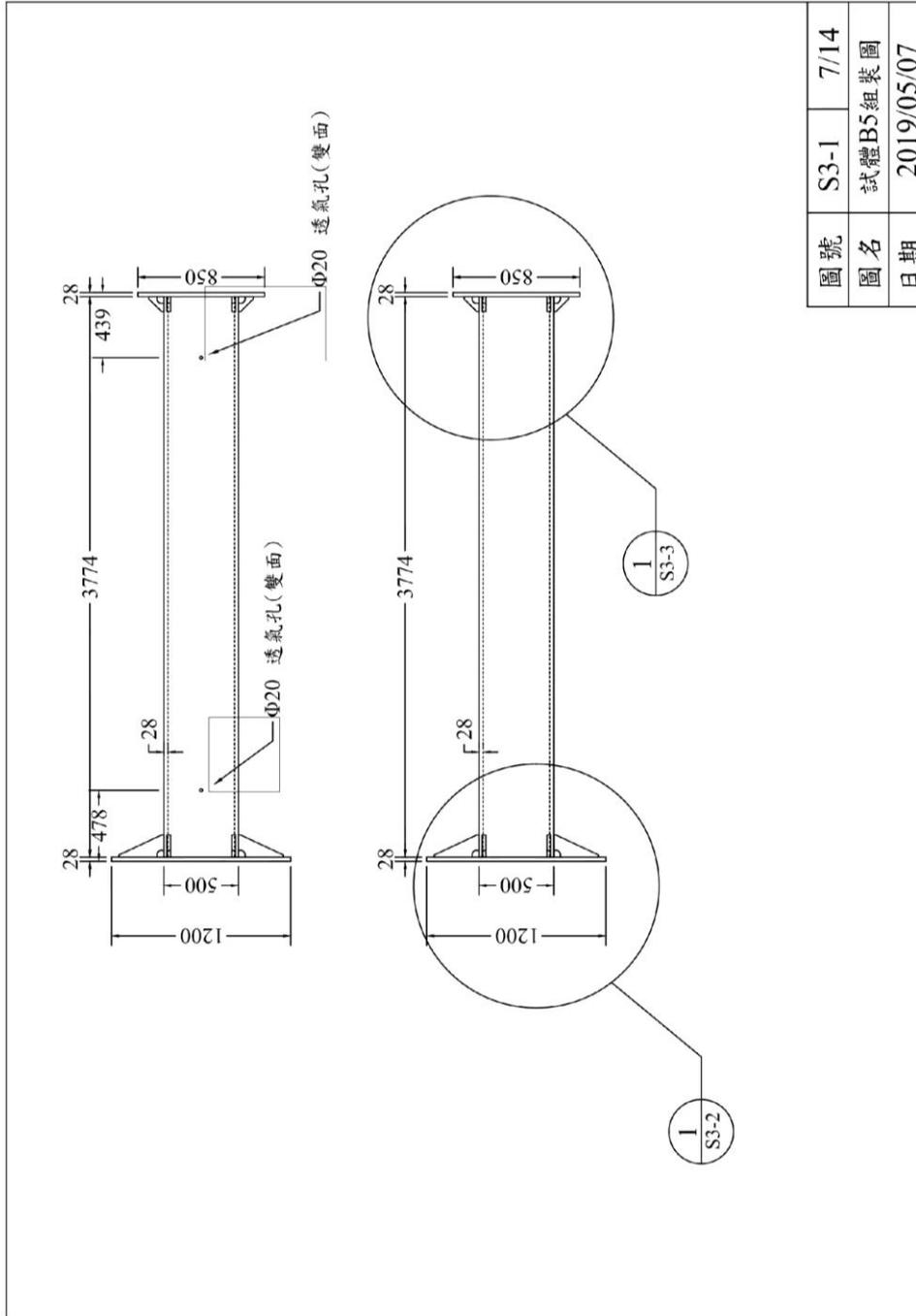




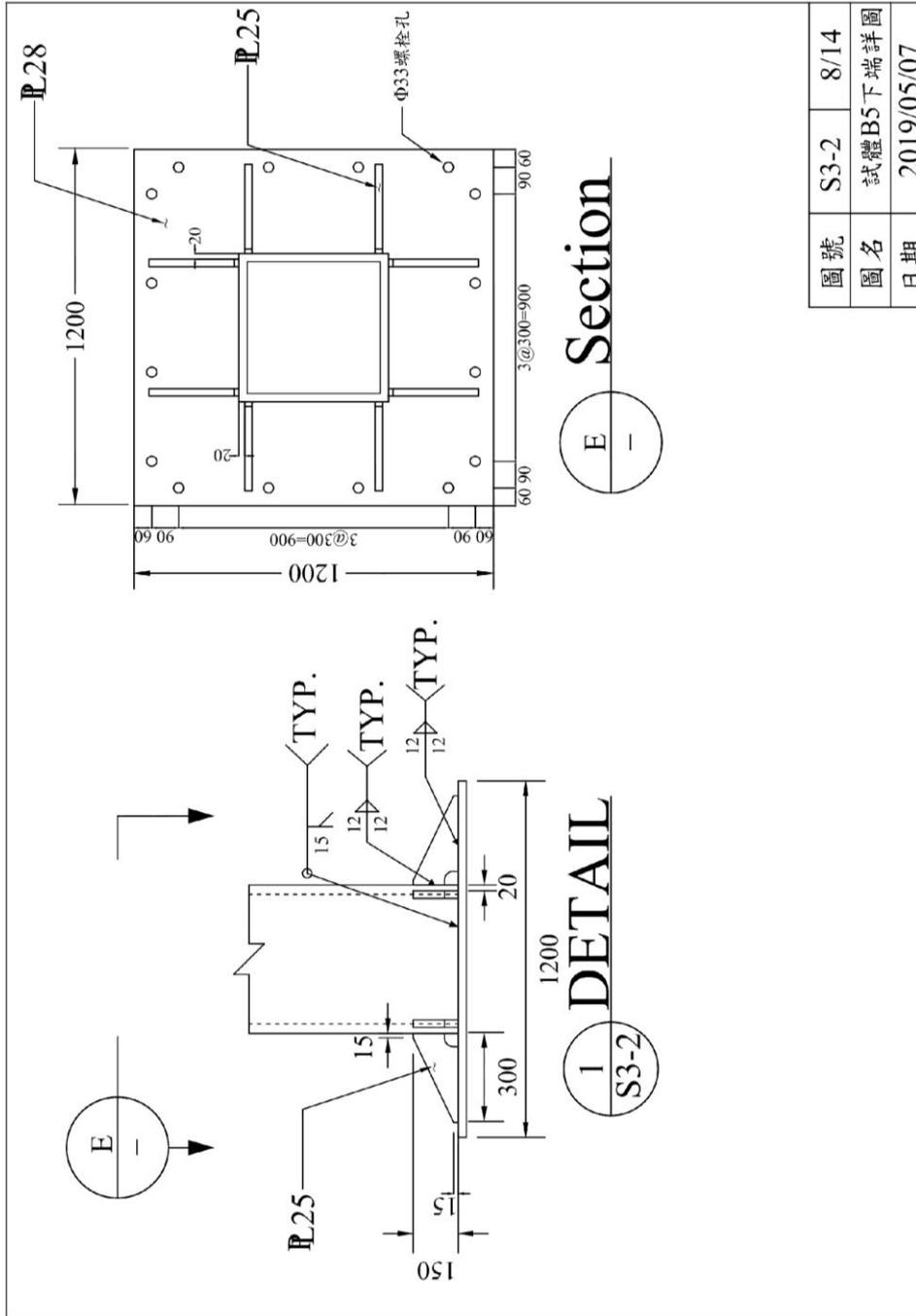


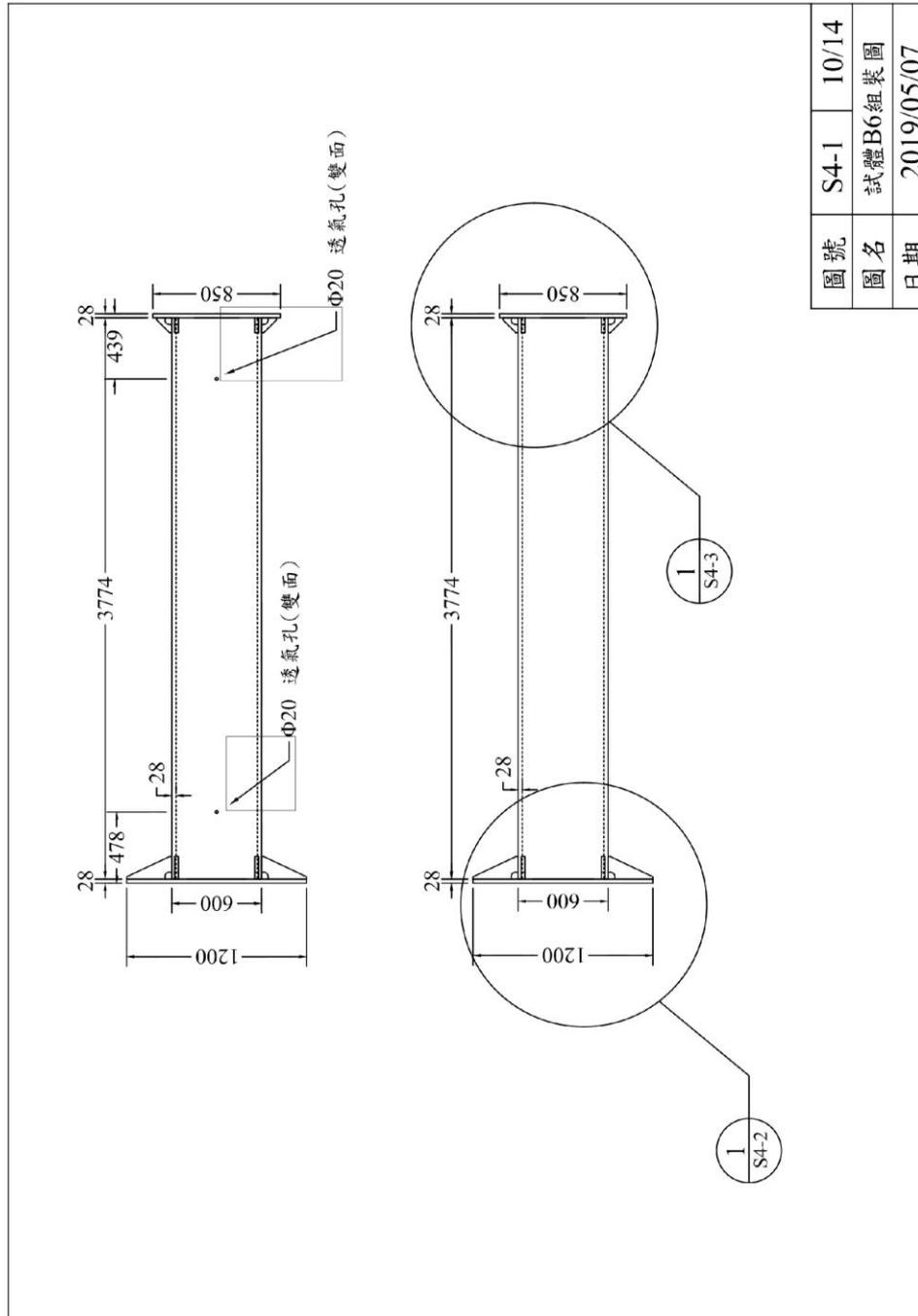
圖號	S2-1	4/14
圖名	試體B4組裝圖	
日期	2019/05/07	



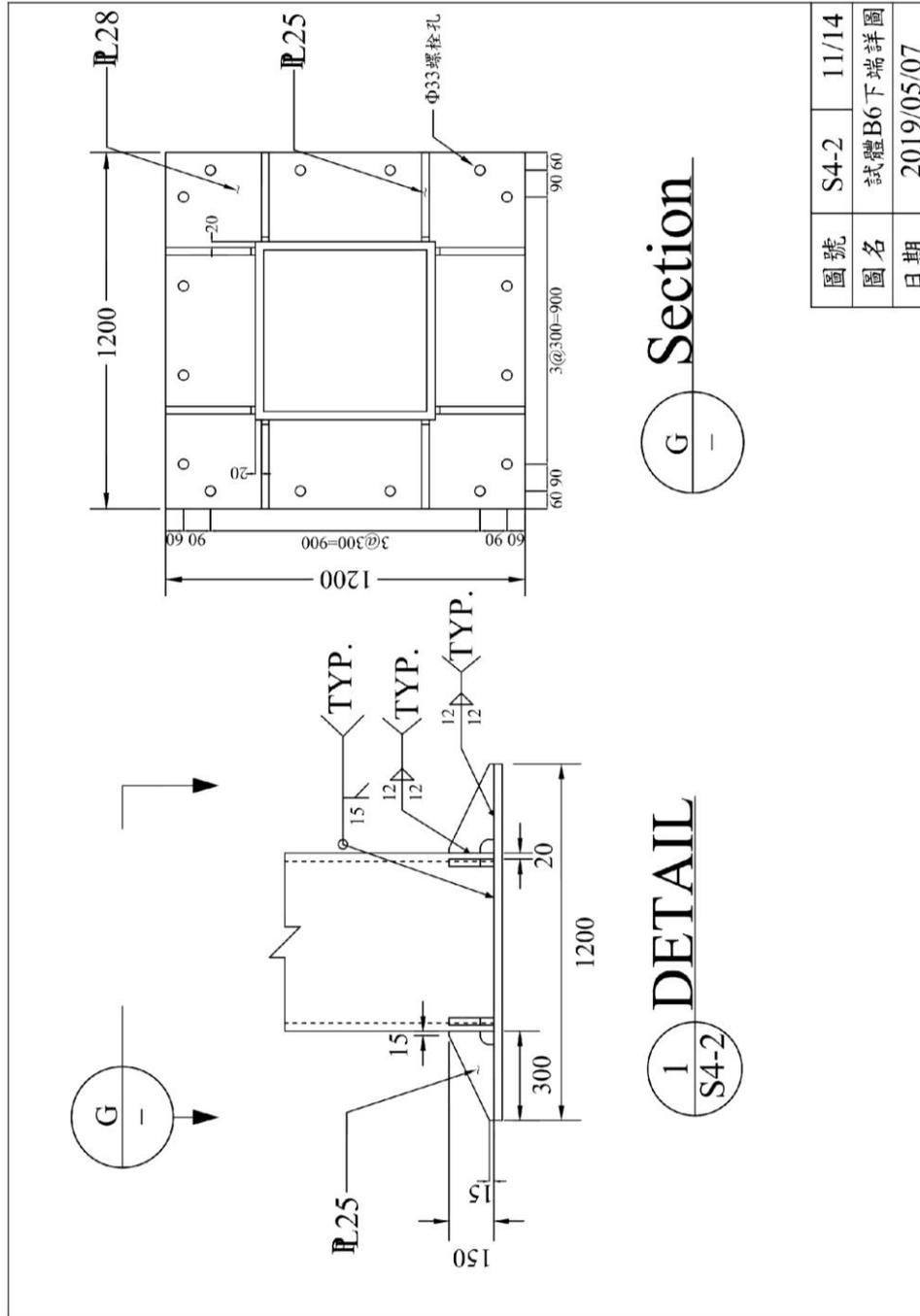


圖號	S3-1	7/14
圖名	試體B5組裝圖	
日期	2019/05/07	





圖號	S4-1	10/14
圖名	試體B6組裝圖	
日期	2019/05/07	



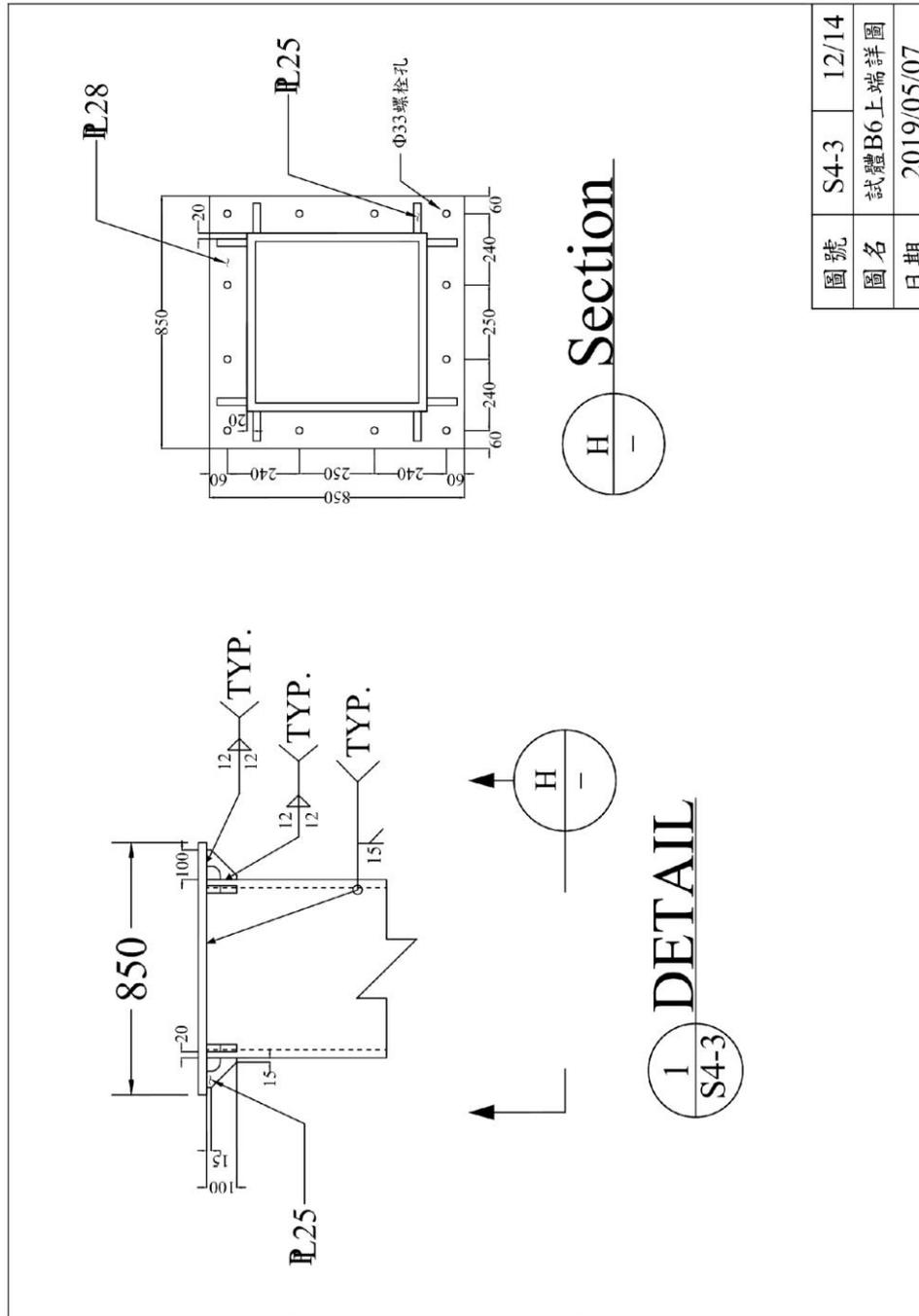
圖號	S4-2	11/14
圖名	試體B6下端詳圖	
日期	2019/05/07	

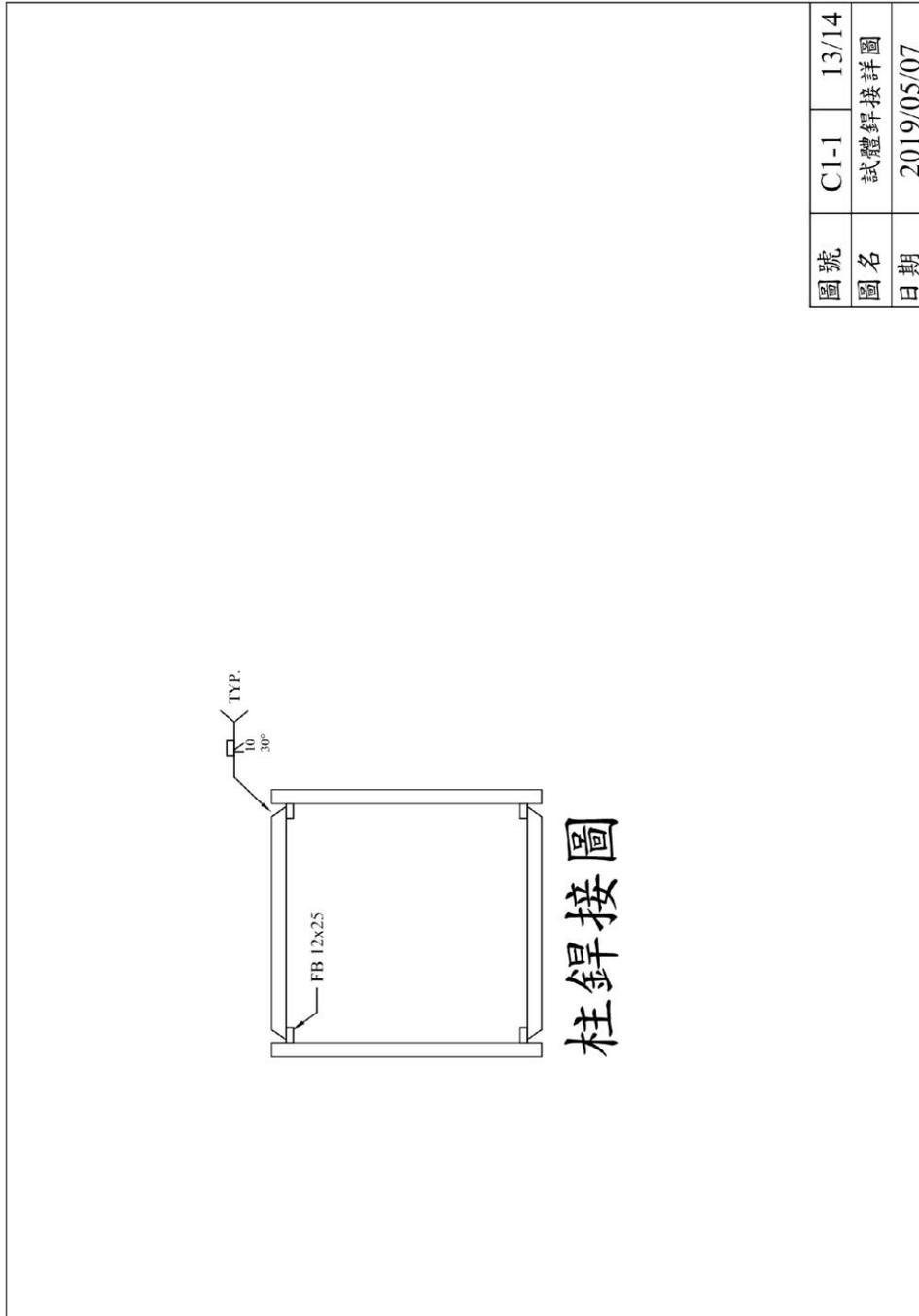
G
—

Section

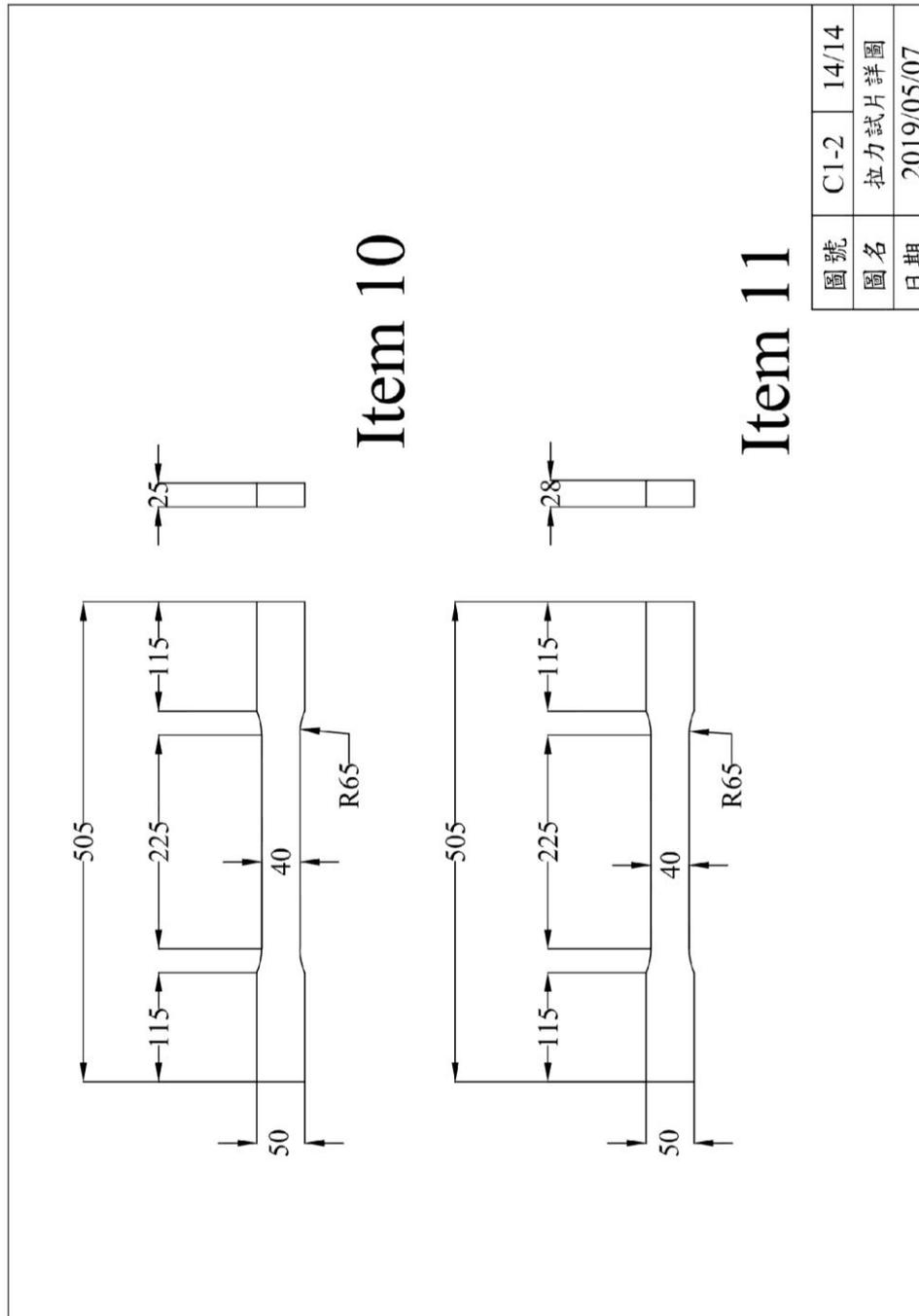
1
S4-2

DETAIL



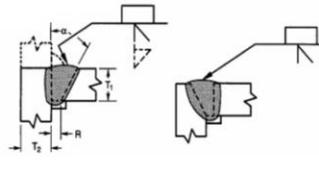


圖號	C1-1	13/14
圖名	試體銲接詳圖	
日期	2019/05/07	



圖號	C1-2	14/14
圖名	拉力試片詳圖	
日期	2019/05/07	

附錄二 銲接箱型鋼柱四角隅銲接程序

銲接程序		WELDING PROCEDURE SPECIFICATION (WPS)								
公司名稱 Co. Name		TUNG KANG STEEL STRUCTURE CORP.			銲接方式 WELDING PROCESS		SAW			
制訂者 Formulated by		H.P. YU	日期 Date	2013.01.30	銲接區分 Using Type		銲接 For Welding	√ 修補 For Repairing	√	
授證者 Authorized by		T.C. CHEN	日期 Date	2013.01.30	型式 Type		手動式 Manual	— 半自動 Semi-Automatic	—	
輔助 PQR 文號 Supporting PQR No.		SM570M-No.5	校訂 Rev.	1			機械式 Machine	√ 全自動 Automatic	—	
接頭設計 JOINT DESIGN USED					銲接位置 POSITION					
型式 Type		Single-bevel-groove weld, TC-joint			開槽位置 Position of Groove		1G	填角銲 Fillet	—	
單邊銲 Single Weld		√	雙邊銲 Double Weld		—		立銲前進方式 Vertical Progression			
背襯板 Backing		是 Yes	√	否 No	—		由下而上 Up		— 由上而下 Down	
背襯板材料 Backing Material		SM490A			電流性質 ELECTRICAL CHARACTERISTICS					
開槽間隙 R Root Opening		10 mm	開槽根部尺寸 f Root Face Dimension		—		轉換型式 Transfer Mode(GMAW)		短弧 Short-Circuiting	—
開槽角度 α Groove Angle		30°	半徑 r Radius (J-U)		—		球狀 Globular		— 噴銲 Spray	—
背割 Back Gouging		是 Yes	—	否 No	√	方法 Method		—		
母材 BASE METALS					銲接技術 TECHNIQUE					
材料規格 Material Spec.		SM570M			直線或擺動 Stringer or Weave Bead		Stringer			
型式或等級 Type or Grade		—A;B;C HW			單層銲或多層銲		Multiple			
厚度 Thickness		—			Multi-pass or Single Pass (per side)		—			
開槽 Groove		Unlimited	填角 Fillet		—		電極數 Number of Electrodes		3	
直徑(管)Diameter(Pipe)		—			電極間隔		縱向 Longitudinal		1-2(20~40mm) · 2-3(10~30mm)	
銲材 FILLER METALS		—			Electrode Spacing		橫向 Lateral		1-2(0~4mm) · 2-3(0~4mm)	
規格 AWS Specification		A5.23			角度 Angle		80°~90° (All Electrodes)			
等級 AWS Classification		EG-G			槍嘴距離 Contact Tube to Work Distance		25~45mm(All Electrodes)			
被覆材料 SHIELDING					敲擊 Peening					
銲粉 Flux		AWS F8A2			層間清理 Interpass Cleaning		Slag Removed			
銲條-銲粉(等級) Electrode-Flux (Class)		F8A2-EG-G			銲機種類 WELDING MACHINE		Lincoln DC-1500 · AC-1200			
氣體 Gas		—			銲接程序編號 Identification No.		TKSS-WPS5-TC-U4a 1-S-1G			
成份 Composition		—	流量 Flow Rate		—		—			
氣體出口口徑 Gas Cup Diameter		—			—		—			
預熱/層間溫度(最小) Preheat/Interpass Temp.(Min.)		3~20 mm	10°C		銲後熱處理 POSTWELD HEAT TREATMENT		Temp.		N/A	
		>20~50 mm	65°C				Time		N/A	
		>50mm	110°C						N/A	
銲接程序 WELDING PROCEDURE										
層次 Pass or Weld Layer(s)	銲材 Filler Metals		電流 Current (A)		電壓 Volts (V)	行走速度 Travel Speed (mm / min)	接合型式 Joint Details			
	直徑 Diameter (mm)	型式或電極 Type & Polarity	安培或送線速度 Amps or Wire Feed Speed				TC-U4a 1-S			
Root Pass 1~2(打底)	4.8	DCEP	450-650		25-30	530-730				
Fill Pass 3~8(填銲)	4.8	DCEP	550-1,000		25-40	765-1035				
		AC	550-900		30-45					
Cap Pass 9~n(蓋面)	4.8	DCEP	650-900		30-40	680-920				
Root Pass		AC	650-900		35-45					

(資料來源：東鋼鋼結構股份有限公司 2013)

附錄三 銲道超音波檢測

台陞工程檢驗有限公司 TIMES CONSTRUCTION INSPECTION CO.,LTD		台 TCI 陞 檢測日期：108.06.12-108.06.13 表格編號：TCI-NDE-11-03 報告編號：雄進-10810-UT-01 頁次：第1頁 共3頁
超音波檢測報告 Report of Ultrasonic Testing		

工程名稱：內政部建築研究所委託研究計劃
試體製作箱型鋼柱SAW銲道



業 主：國 立 交 通 大 學
承造單位：雄 進 鋼 構 股 份 有 限 公 司

台陞工程檢驗有限公司
非破壞檢測實驗室
TIMES CONSTRUCTION INSPECTION CO, LTD
高雄市仁武區八德西路1763號
TEL：(07) 372-2498 FAX：(07) 374-7078
E-mail：times.ndt@msa.hinet.net

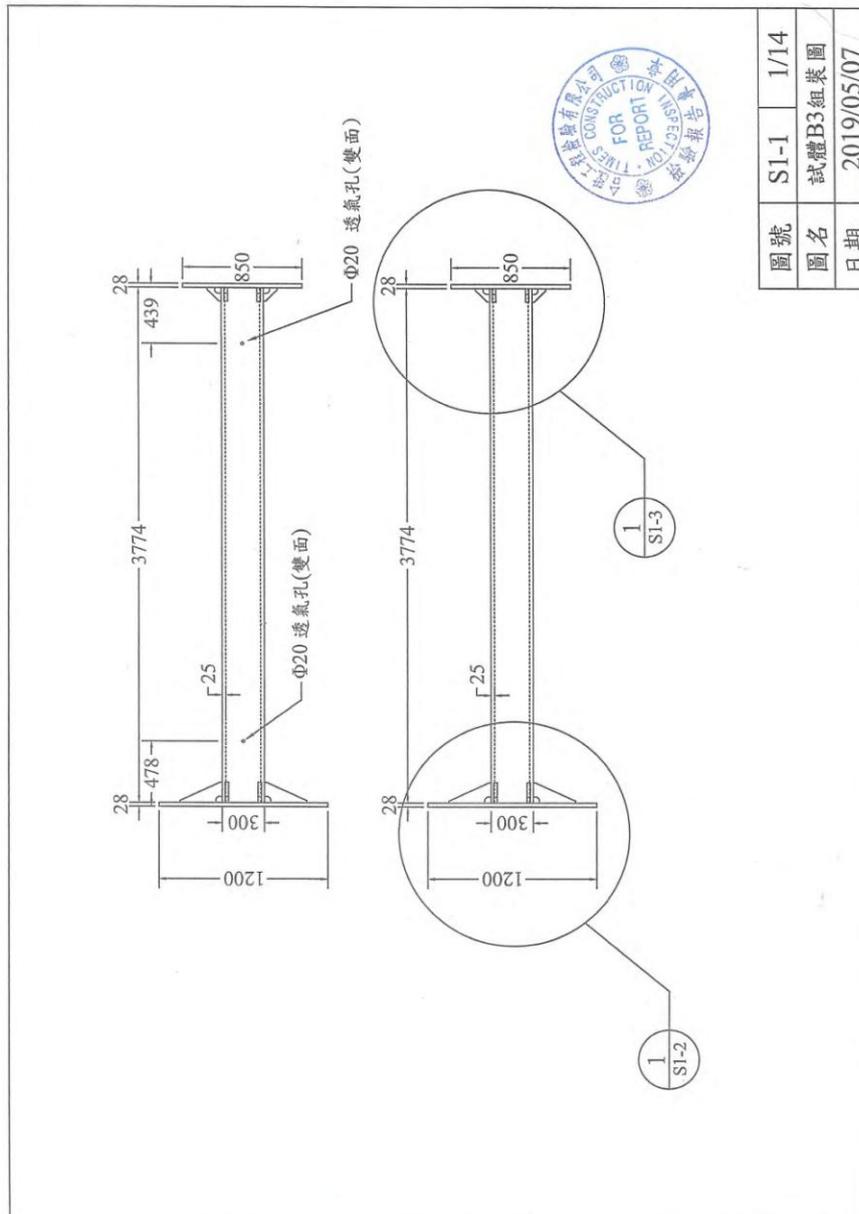
台陸工程檢驗有限公司 TIMES CONSTRUCTION INSPECTION CO.,LTD		台 TCI 陸 檢測日期：108.06.12-108.06.13 表格編號：TCI-NDE-11-04 報告編號：雄進-10810-UT-01 頁次：第2頁 共3頁
超音波檢測報告 Report of Ultrasonic Testing		

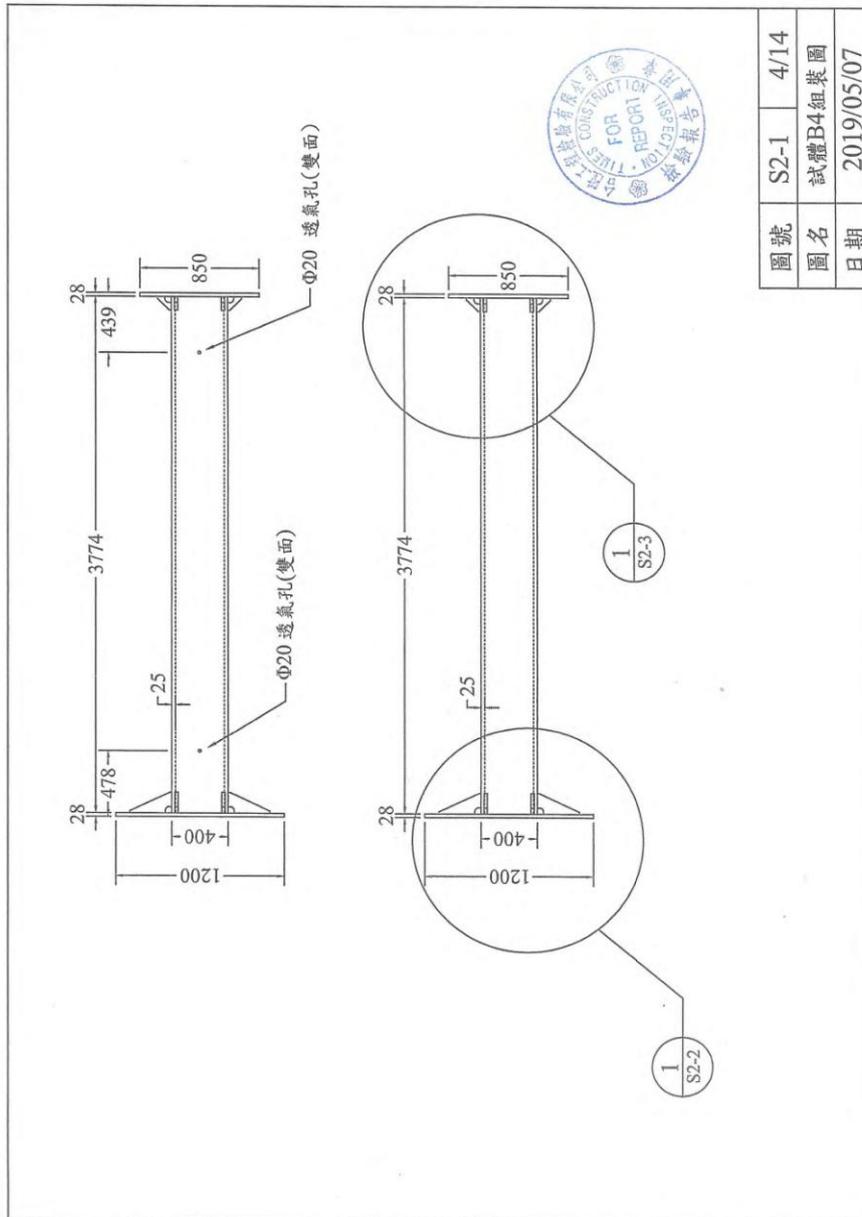
顧客/Customer： 雄進鋼構股份有限公司 地址/Address： 屏東縣新園鄉西平路91號	檢測地點： 屏東縣新園鄉西平路91號 Inspection Site
工程名稱：內政部建築研究所委託研究計劃 Job Title 試體製作箱型鋼柱SAW鐸道	檢測規範：CNS 12618(最新版)靜態(二級) Inspection Code
工程編號： NA Job No.	程序書編號/版本/版次：TCI-NDE-11/2/1.0 Procedure /Ver.
儀器型式/序號： K.K USN 58L / 022LPF Equipment No.	換能器型式/編號： ■斜束:2Z20x20A70 /TCI-A-11 Probe No. ■直束 母材品質檢測:2M 24φ /TCI-S-07
接觸媒質：C. M. C Couplant	靈敏度： ■斜束 STB-A1 1.5φ-40% Sensitivity
表面狀況：良好 Surface Condition	規塊： ■斜束 STB-A1 Block
檢測方法：直接接觸法 Test Method	儀器評鑑日期：108.05.06 Ultrasonic equipment Calibration date
Sketch (依附圖所示)	



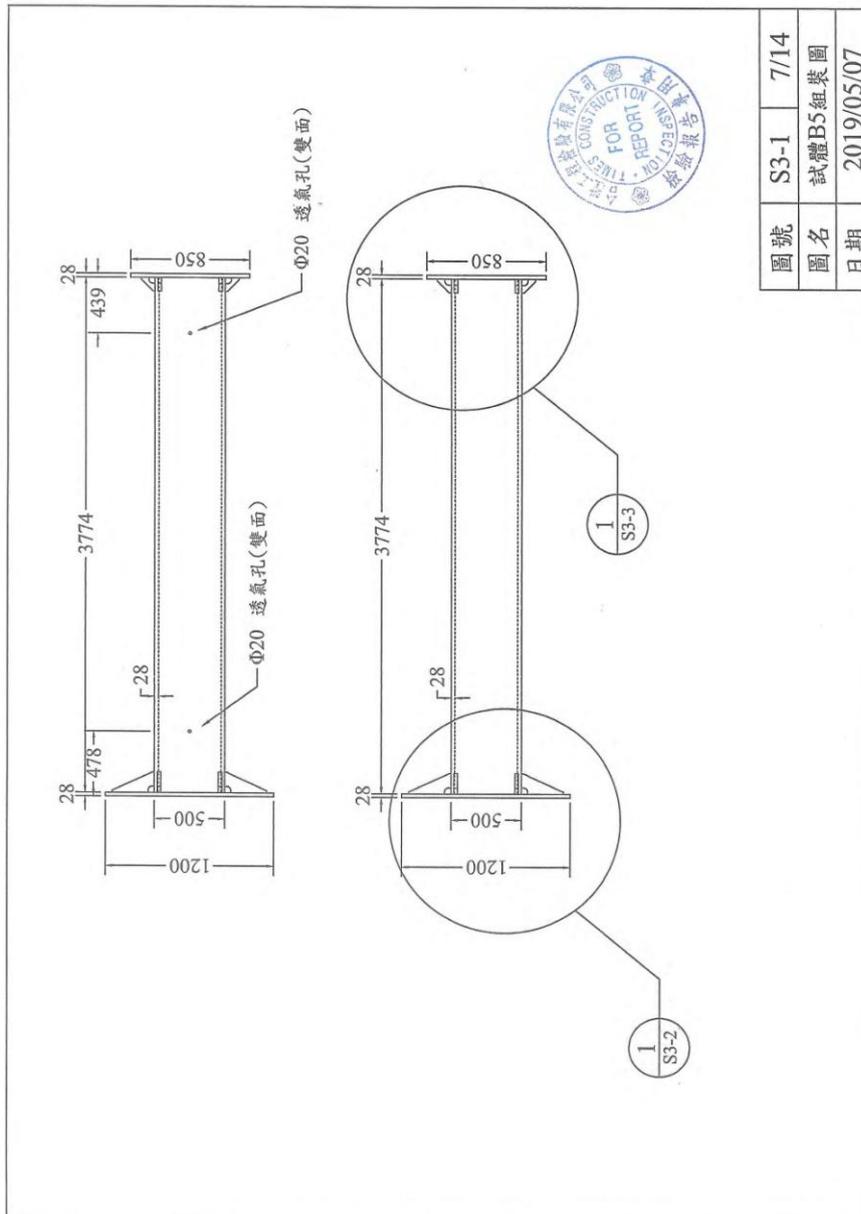
會 驗 者 Witness	高/中級檢測師 Level III/II Inspector	中/初級檢測師(員) Level II/I Inspector
	N.D.T 楊越川 楊越川 LEVEL II	N.D.T 蔡東逸 蔡東逸 LEVEL II

註Note：(1)除非獲得本實驗室同意，報告不得摘錄複製。
This report shall not be reproduced, without the written approval of TCI.
(2)本檢測結果僅對被檢樣品有效。
The testing results only effective to the items tested.

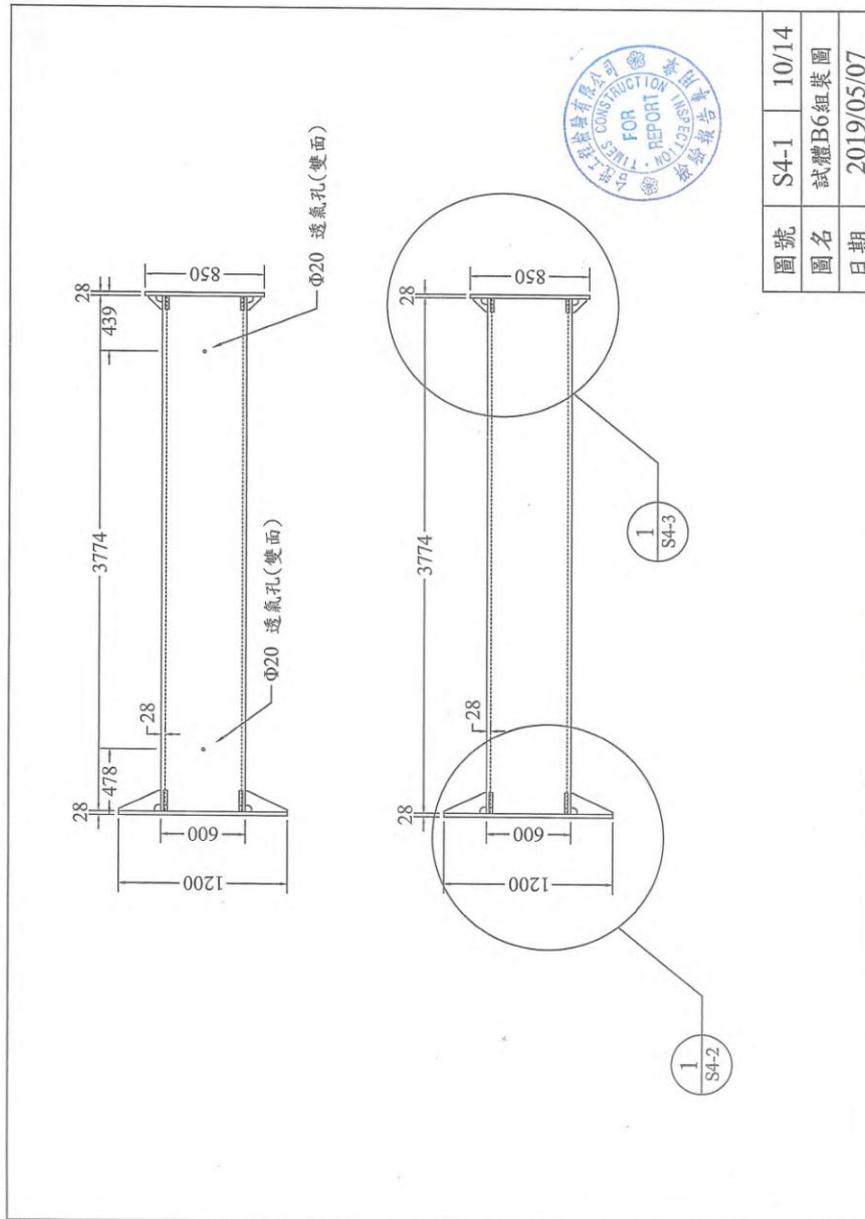




圖號	S2-1	4/14
圖名	試體B4組裝圖	
日期	2019/05/07	



圖號	S3-1	7/14
圖名	試體B5組裝圖	
日期	2019/05/07	



圖號	S4-1	10/14
圖名	試體B6組裝圖	
日期	2019/05/07	

高強度鋼構造柱於高溫下受壓強度之研究

台陞工程檢驗有限公司 TIMES CONSTRUCTION INSPECTION CO.,LTD		台 TCI 陞 檢測日期：108.06.12-108.06.13 表格編號：TCI-NDE-11-05 報告編號：雄進-10810-UT-01 頁次：第3頁 共3頁
超音波檢測報告 Report of Ultrasonic Testing (BOX柱試體鑄道)		Testing Laboratory 1205

項次 Line number	鑄道編號 Indication number	換能器角度 Transducer angle	檢測面 From face	跨距 Leg	分貝 Decibels				瑕疵 Discontinuity				判定 Discontinuity evaluation	檢測厚度 Check thickness(mm)	檢測長度 Check length(mm)	備註 Remarks	
					瑕疵位準 Indication level	比較位準 Reference level	衰減係數 Attenuation factor	瑕疵評估 Indication rating	射束路程 Angular distance (sound path)	長度 Length	深度 Depth from "A" Surface	距離 Distance					
												W					L
1	B3-SAW-N-R	70	A										Accept	3774			
2	-L	70	A										Accept	3774			
3	-S-R	70	A										Accept	3774			
4	-L	70	A										Accept	3774			
5	B4-SAW-N-R	70	A										Accept	3774			
6	-L	70	A										Accept	3774			
7	-S-R	70	A										Accept	3774			
8	-L	70	A										Accept	3774			
9	B5-SAW-N-R	70	A										Accept	3774			
10	-L	70	A										Accept	3774			
11	-S-R	70	A										Accept	3774			
12	-L	70	A										Accept	3774			
13	B6-SAW-N-R	70	A										Accept	3774			
14	-L	70	A										Accept	3774			
15	-S-R	70	A										Accept	3774			
16	-L	70	A										Accept	3774			
17	THE END																
18																	
19																	
20																	
21																	
22																	
23																	
24																	
25																	
26																	
27																	
28																	
29																	
30																	
31																	
32																	



數量Quantity: 60384 mm

財團 台灣 非破壞 檢測 協會
 The Society for Nondestructive Testing & Certification of Taiwan

茲 證 明 Be it known that

楊越川 YA-CHOAN YANG

業已符合本協會非破壞檢測人員合格基準之規定應授予
 has met heretofore established and published Requirements for ROCSNT-PQ-01 Certification as

中級檢測師資格證書
 NDT LEVEL II

合格授證之檢測方法暨有效期限詳列如下

In the Nondestructive Testing Methods as specified in the Endorsements

Certificate No.:	PQ-MC-397
TESTING METHOD	VT LEVEL II
ISSUE DATE	JUNE.2018
EXPIRATION DATE	JUNE.2021
CHAIRMAN-PQCC	蘇詠舜

Certificate No.:	PQ-MC-397
TESTING METHOD	RT LEVEL II
ISSUE DATE	JUNE.2016
EXPIRATION DATE	JUNE.2021
CHAIRMAN-PQCC	蘇詠舜

蘇詠舜
 總經理
 (President)

蘇詠舜
 人員評審委員會召集人
 (Chairman-Personnel Qualification and Certification Committee)

MC-397
 證 號
 (Certificate Number)

Endorsements-The Holder of this Certificate has been Certified by NTSCT as NDT Level II in the General Requirements for the NDT Methods specified Below:

Certificate No.:	PQ-MC-397								
TESTING METHOD	PT LEVEL II	TESTING METHOD	MT LEVEL II	TESTING METHOD	UT LEVEL II	TESTING METHOD	RT LEVEL II	TESTING METHOD	ET LEVEL II
ISSUE DATE	JUNE.2018	ISSUE DATE	JUNE.2018	ISSUE DATE	JUNE.2016	ISSUE DATE	JUNE.2013	ISSUE DATE	JUNE.2016
EXPIRATION DATE	JUNE.2021	EXPIRATION DATE	JUNE.2021	EXPIRATION DATE	JUNE.2021	EXPIRATION DATE	JUNE.2016	EXPIRATION DATE	JUNE.2021
CHAIRMAN-PQCC	蘇詠舜								

財團 中華民國 非破壞 檢測 協會
 The Nondestructive Testing Society of China-Taipei

茲 證 明 Be it known that

蔡東逸

業已符合本協會非破壞檢測人員合格基準之規定應授予
 has met heretofore established and published Requirements for ROCSNT-PQ-01 Certification as

中級檢測師資格證書
 NDT LEVEL II

合格授證之檢測方法暨有效期限詳列如下

In the Nondestructive Testing Methods as specified in the Endorsements

何文龍
 總經理
 (President)

黃志珍
 人員評審委員會召集人
 (Chairman-Personnel Qualification and Certification Committee)

NOA-007
 證 號
 (Certificate Number)

Endorsements-The Holder of this Certificate has been Certified by NTSCT as NDT Level I in the General Requirements for the NDT Methods specified Below:

Certificate No.:	PQ-NOA-007						
TESTING METHOD	MT LEVEL II	TESTING METHOD	UT LEVEL II	TESTING METHOD	PT LEVEL II	TESTING METHOD	VT LEVEL II
ISSUE DATE	OCT.2018	ISSUE DATE	OCT.2016	ISSUE DATE	OCT.2018	ISSUE DATE	OCT.2018
EXPIRATION DATE	OCT.2021						
CHAIRMAN-PQCC	蘇詠舜	CHAIRMAN-PQCC	蘇詠舜	CHAIRMAN-PQCC	蘇詠舜	CHAIRMAN-PQCC	蘇詠舜

附錄四 高溫下試體受壓強度計算

壹、有效長度因子 K 值推導

假設：柱上端為鉸支承，而下端為不可轉動之固定端，未受熱段之勁度遠大於中間受熱段。取中間受熱段長度 l_3 計算 K 值。

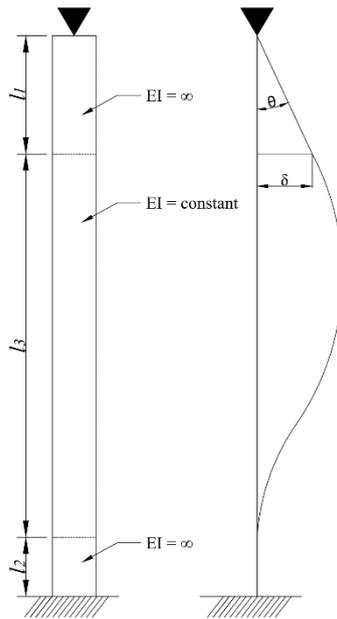


圖 A-1 柱體挫屈示意圖

其中： $l_1 = 1.08 \text{ m}$ $l_2 = 0.54 \text{ m}$ $l_3 = 3.5 \text{ m}$ $\delta = \theta l_1$

由中間受熱段之變形曲線 $EIy'' = M = Py$ 可解得 $y(x)$ 為：

$$y(x) = \left(\frac{\theta l_1}{\sin(p^* l_3)} \right) \sin(p^* x) \quad ; \text{其中 } p^* = \sqrt{\frac{P}{EI}}$$

$$y' = p^* \theta l_1 \left(\frac{\cos(p^* x)}{\sin(p^* l_3)} \right)$$

→ 以 $y'(0) = 0$ 代入

$$\text{得 } 0 = \frac{p^* \theta l_1}{\sin(p^* l_3)}, P = 0 \dots\dots\dots \text{trivial solution}$$

→ 以 $y'(l_3) = -\theta$ 代入

$$\text{得 } p^* \theta l_1 \left(\frac{\cos(p^* l_3)}{\sin(p^* l_3)} \right) = -\theta$$

解得 $p^* l_3 = 2.487$

$$p^* = \sqrt{\frac{P}{EI}} = \frac{2.487}{l_3} = 0.7106$$

$$\text{解得 } P = \frac{2.487^2 \times EI}{l_3^2} = \frac{\pi^2 EI}{(Kl_3)^2} \Rightarrow K = 1.26$$

貳、高溫下銲接箱型鋼柱受壓強度計算

高溫下之銲接箱型鋼柱，斷面尺寸分別為 300×300×25×25 mm、400×400×25×25 mm、500×500×28×28 mm 與 600×600×28×28 mm，柱長度皆為 3830 mm。計算時使用之降伏強度 F_y 及彈性模數 E 皆以拉力試片所得之結果，而柱有效長度 L_c 則以受熱段長度計算。試體於高溫下受壓強度計算參考 AISC (2016)附錄四之計算方式與國內「鋼結構極限設計法規範及解說」(2010)常溫下銲接箱型受壓構材之標稱強度計算方式，並使用 Eurocode 3 (2005b)之鋼材高溫機械性質計算。

1. 斷面肢材寬厚比要求：

$$25 \text{ mm 鋼板之 } \lambda_{pd} = \frac{45}{\sqrt{F_y}} = 20.0$$

$$28 \text{ mm 鋼板之 } \lambda_{pd} = \frac{45}{\sqrt{F_y}} = 20.6$$

$$\text{B3T6-39 斷面：} \frac{b}{t} = 10 \leq \lambda_{pd} \quad \text{OK}$$

$$\text{B4T7-29 斷面：} \frac{b}{t} = 14 \leq \lambda_{pd} \quad \text{OK}$$

$$\text{B5T6-23 斷面：} \frac{b}{t} = 15.86 \leq \lambda_{pd} \quad \text{OK}$$

$$\text{B6T7-19 斷面：} \frac{b}{t} = 19.43 \leq \lambda_{pd} \quad \text{OK}$$

2. 試體之標稱強度計算：

計算 $P_{n,AISC}$ ：

高強度鋼構造柱於高溫下受壓強度之研究

試體 B3T6-39 在 625.1 °C 時之斷面強度：

$$A_g = 275 \text{ cm}^2, I = 34947.92 \text{ cm}^4, r = \sqrt{\frac{I}{A_g}} = 11.27 \text{ cm}$$

$$F_e(625.1) = \frac{\pi^2 E(625.1)}{\left(\frac{L_c}{r}\right)^2} = 3.69 \text{ tf/cm}^2$$

$$F_{cr}(625.1) = \left[0.42 \sqrt{\frac{F_y(625.1)}{F_e(625.1)}} \right] F_y(625.1) = 1.08 \text{ tf/cm}^2$$

$$P_{n,AISC} = F_{cr}(625.1) \times A_g = 296.0 \text{ tf}$$

試體 B4T7-29 在 714.3 °C 時之受壓強度：

$$A_g = 375 \text{ cm}^2, I = 88281.25 \text{ cm}^4, r = \sqrt{\frac{I}{A_g}} = 15.34 \text{ cm}$$

$$F_e(714.2) = \frac{\pi^2 E(714.2)}{\left(\frac{L_c}{r}\right)^2} = 3.15 \text{ tf/cm}^2$$

$$F_{cr}(714.2) = \left[0.42 \sqrt{\frac{F_y(714.2)}{F_e(714.2)}} \right] F_y(714.2) = 0.63 \text{ tf/cm}^2$$

$$P_{n,AISC} = F_{cr}(714.2) \times A_g = 200.5 \text{ tf}$$

試體 B5T6-23 在 609.1 °C 時之受壓強度：

$$A_g = 528.64 \text{ cm}^2, I = 196978.31 \text{ cm}^4, r = \sqrt{\frac{I}{A_g}} = 19.3 \text{ cm}$$

$$F_e(609.1) = \frac{\pi^2 E(609.1)}{\left(\frac{L_c}{r}\right)^2} = 10.67 \text{ tf/cm}^2$$

$$F_{cr}(609.1) = \left[0.42 \sqrt{\frac{F_y(609.1)}{F_e(609.1)}} \right] F_y(609.1) = 1.4 \text{ tf/cm}^2$$

$$P_{n,AISC} = F_{cr}(609.1) \times A_g = 740.1 \text{ tf}$$

試體 B6T7-19 在 697.6 °C 時之受壓強度：

$$A_g = 640.64 \text{ cm}^2, I = 350182.37 \text{ cm}^4, r = \sqrt{\frac{I}{A_g}} = 23.38 \text{ cm}$$

$$F_e(697.6) = \frac{\pi^2 E(697.6)}{\left(\frac{L_c}{r}\right)^2} = 7.48 \text{ tf/cm}^2$$

$$F_{cr}(697.6) = \left[0.42 \sqrt{\frac{F_y(697.6)}{F_e(697.6)}} \right] F_y(697.6) = 0.8 \text{ tf/cm}^2$$

$$P_{n,AISC} = F_{cr}(697.6) \times A_g = 513.0 \text{ tf}$$

計算 $P_{n,EC3}$:

試體 B3T6-39 在 625.1 °C 時之斷面強度 :

$$N_{b,fi,t,Rd} = \chi_{fi} A k_{y,\theta} f_y / \gamma_{M,fi} = 370.5 \text{ tf}$$

其中 $\gamma_{M,fi} = 1.0$

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi_\theta + \sqrt{\varphi_\theta^2 - \bar{\lambda}_\theta^2}} = 0.65$$

$$\varphi_\theta = 0.5 \left[1 + \alpha \bar{\lambda}_\theta + \bar{\lambda}_\theta^2 \right] = 0.95$$

$$\alpha = 0.65 \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 0.45$$

$$\bar{\lambda}_\theta = \bar{\lambda} \left[\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}} \right]^{0.5} = 0.75$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} = 0.6$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_t^2} = 3844.92$$

試體 B4T7-29 在 714.3 °C 時之受壓強度 :

$$N_{b,fi,t,Rd} = \chi_{fi} A k_{y,\theta} f_y / \gamma_{M,fi} = 289.4 \text{ tf}$$

其中 $\gamma_{M,fi} = 1.0$

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi_\theta + \sqrt{\varphi_\theta^2 - \bar{\lambda}_\theta^2}} = 0.75$$

$$\varphi_\theta = 0.5 \left[1 + \alpha \bar{\lambda}_\theta + \bar{\lambda}_\theta^2 \right] = 0.79$$

高強度鋼構造柱於高溫下受壓強度之研究

$$\alpha = 0.65 \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 0.45$$

$$\bar{\lambda}_\theta = \bar{\lambda} \left[\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}} \right]^{0.5} = 0.57$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{Af_y}{N_{cr}}} = 0.44$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_t^2} = 9712.57$$

試體 B5T6-23 在 609.1 °C 時之受壓強度：

$$N_{b,fi,t,Rd} = \chi_{fi} Ak_{y,\theta} f_y / \gamma_{M,fi} = 873.6 \text{ tf}$$

其中 $\gamma_{M,fi} = 1.0$

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi_\theta + \sqrt{\varphi_\theta^2 - \bar{\lambda}_\theta^2}} = 0.81$$

$$\varphi_\theta = 0.5 \left[1 + \alpha \bar{\lambda}_\theta + \bar{\lambda}_\theta^2 \right] = 0.7$$

$$\alpha = 0.65 \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 0.46$$

$$\bar{\lambda}_\theta = \bar{\lambda} \left[\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}} \right]^{0.5} = 0.44$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{Af_y}{N_{cr}}} = 0.35$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_t^2} = 20182.91$$

試體 B6T7-19 在 697.6 °C 時之受壓強度：

$$N_{b,fi,t,Rd} = \chi_{fi} Ak_{y,\theta} f_y / \gamma_{M,fi} = 596.2 \text{ tf}$$

其中 $\gamma_{M,fi} = 1.0$

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi_\theta + \sqrt{\varphi_\theta^2 - \bar{\lambda}_\theta^2}} = 0.83$$

$$\varphi_\theta = 0.5 \left[1 + \alpha \bar{\lambda}_\theta + \bar{\lambda}_\theta^2 \right] = 0.66$$

$$\alpha = 0.65 \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 0.46$$

$$\bar{\lambda}_\theta = \bar{\lambda} \left[\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}} \right]^{0.5} = 0.39$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{Af_y}{N_{cr}}} = 0.29$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_t^2} = 35880.59$$

計算 $P_{n,TWN}$:

試體 B3T6-39 在 625.1 度時之斷面強度 :

$$A_g = 275 \text{ cm}^2, I = 34947.92 \text{ cm}^4, r = \sqrt{\frac{I}{A_g}} = 11.27 \text{ cm}$$

$$\lambda_c = \frac{KL}{\pi r} \sqrt{\frac{F_y(625.1)}{E(625.1)}} = 0.75$$

$$F_{cr}(625.1) = (0.211\lambda_c^3 - 0.57\lambda_c^2 - 0.06\lambda_c + 1)F_y(625.1) = 1.49 \text{ tf/cm}^2$$

$$P_{n,TWN} = F_{cr}(625.1) \times A_g = 410.3 \text{ tf}$$

試體 B4T7-29 在 714.3 °C 時之受壓強度 :

$$A_g = 375 \text{ cm}^2, I = 88281.25 \text{ cm}^4, r = \sqrt{\frac{I}{A_g}} = 15.34 \text{ cm}$$

$$\lambda_c = \frac{KL}{\pi r} \sqrt{\frac{F_y(714.3)}{E(714.3)}} = 0.57$$

$$F_{cr}(714.3) = (0.211\lambda_c^3 - 0.57\lambda_c^2 - 0.06\lambda_c + 1)F_y(714.3) = 0.85 \text{ tf/cm}^2$$

$$P_{n,TWN} = F_{cr}(714.3) \times A_g = 317.3 \text{ tf}$$

試體 B5T6-23 在 609.1 °C 時之受壓強度 :

$$A_g = 528.64 \text{ cm}^2, I = 196978.31 \text{ cm}^4, r = \sqrt{\frac{I}{A_g}} = 19.3 \text{ cm}$$

$$\lambda_c = \frac{KL}{\pi r} \sqrt{\frac{F_y(609.1)}{E(609.1)}} = 0.44$$

$$F_{cr}(609.1) = (0.211\lambda_c^3 - 0.57\lambda_c^2 - 0.06\lambda_c + 1)F_y(609.1) = 1.81 \text{ tf/cm}^2$$

$$P_{n,TWN} = F_{cr}(609.1) \times A_g = 1.863 \times 528.64 = 954.6 \text{ tf}$$

高強度鋼構造柱於高溫下受壓強度之研究

試體 B6T7-19 在 697.6 °C 時之受壓強度：

$$A_g = 640.64 \text{ cm}^2, I = 350182.37 \text{ cm}^4, r = \sqrt{\frac{I}{A_g}} = 23.38 \text{ cm}$$

$$\lambda_c = \frac{KL}{\pi r} \sqrt{\frac{F_y(697.6)}{E(697.6)}} = 0.39$$

$$F_{cr}(697.6) = (0.211\lambda_c^3 - 0.57\lambda_c^2 - 0.06\lambda_c + 1) F_y(697.6) = 1.01 \text{ tf/cm}^2$$

$$P_{n,TWN} = F_{cr}(697.6) \times A_g = 648.4 \text{ tf}$$

附錄五 審查意見與答覆

壹、期初審查意見與答覆

會議日期：108 年 1 月 24 日，下午 02 時 30 分

地點：內政部建築研究所 15 樓第 3 會議室

新北市新店區北新路三段 200 號 15 樓

項次	審查委員意見	廠商回應
1	本計畫選用 SM570 鋼材為研究主軸，請說明其緣由為何？且試體厚度為多少？	國內鋼構造建築物使用高強度鋼以 SM570 為主，且鋼構造設計規範內亦有相關規範。試體採用鋼板的厚度將視相關參數而決定。
2	請說明鋼柱試體銲接材料採用何種型式？	高強度鋼 SM570 銲接的相稱銲接可用 E81Ni1，如天泰銲材 TWE-811Ni1。
3	本研究計畫預計選用的實驗溫度及細長比值為何？並請說明其選用數據的理由及預計呈獻結果。	試體的選定細長比將考量國內鋼構造建築物常用的範圍與實驗設備容量。火害的溫度選定須達降伏強度及彈性模數有一定量的折減。研究成果將建立鋼柱受壓強度與細長比、溫度的關係。
4	文獻回顧中提及國外 2 規範有防火設計，而國內規範只限於常溫，本計畫實驗結果是否將納入規範中，或是僅供火害後建築物評估參考。	本計畫預期成果為提供鋼構造建築物採用 SM570 箱型鋼柱於高溫下的受壓強度，提供 SM570 箱型鋼柱的防火設計。
5	請說明本案所稱「高強度」鋼的界定強度為何？究竟係朝與現在鋼結構設計規範俱進提升	高強度鋼之定義是相對於時代與技術進步而變化的，而目前高強度鋼泛指降伏強度在 450 MPa 以上之鋼材。

	鋼構材料的使用上限，還是做為前瞻目標以瞭解鋼構火害之行為。	目前鋼構造建築設計規範的耐震設計允許採用 SM570 鋼，本計畫預期瞭解 SM570 鋼柱的火害行為。
6	請說明本案研究之預期成果，將做為何項規範或防火設計規定之應用。	本研究預期成果可做為「鋼構造建築物防火設計技術參考手冊」之參考資料。
7	請說明本案研究試體規劃的斷面型式，以及斷面細部如 b/t 或 B/D 等參數，並請於服務建議書中說明。	試體規劃考量國內中高層建築物常用的斷面與爐內高度，斷面為箱型。試體的寬度比須符合塑性設計斷面，細長比將考量國內實務常用的範圍。
8	研究成果之預期項目中，請說明實驗研究資料庫如何規劃與既有資料整合，及未來應用方式。	實驗研究資料庫的建立將涵蓋本研究的實驗數據，並整合國內外相關實驗資料。資料庫的建立可供後續研究所用。
9	鋼構科技研究已與本組防火計畫整合，請對於未來鋼構研究發展的方向、議題以及進行鋼構防火研究對社會之貢獻，提出建議。	<p>鋼構造防火的研究隨著時代與研究成果而有不同的進展，且進行鋼構防火研究對社會貢獻在於降低火災對鋼構造建築物的危害。對於國內鋼構造研究發展的方向與議題建議如下：</p> <p>(a)結構火害實驗的進行：</p> <p>火害實驗依構件、子結構、結構系統、束制及溫度均勻與否，其行為各有差異。國內外已進行諸多構件火害實驗，著重於子結構或結構系統的火害實驗有重要性，且其實驗數據可驗證數值模</p>

		<p>擬。</p> <p>(b)數值模擬的建立：</p> <p>結構火害實驗十分耗時與耗錢，結構火害的模擬是一個複雜的過程。數值模擬結構火害過程有其重要性。經實驗結果驗證的數值分析模式可取代結構火害實驗進行研究。</p> <p>(c)結構性能化防火設計的推廣：</p> <p>目前結構火害的實驗基於標準升溫曲線，然而實際火災是千遍萬化的，不同的建築結構對防火要求也可能是不同的。性能化防火設計為針對不同的建築結構訂定不同的設計目標進行防火設計。故結構防火性能設計有其優勢。</p>
--	--	--

貳、第一次專家學者諮詢座談會

會議日期：108 年 5 月 2 日，下午 02 時 00 分

列席：蔡組長綽芳、陳博士柏端

地點：內政部建築研究所 13 樓討論室

新北市新店區北新路三段 200 號 13 樓

委員	專家學者意見	答覆
方教授一匡	<ol style="list-style-type: none"> 1. 試體所採用之 L/r 是否與實務常用之情況有密切關聯性，請確認。以有限試體如何建立類似 AISC (2016) 的 $P_{cr}(T) / P_y$、L/r 與溫度的設計圖，建請再詳細規劃。 2. 試體設計；相關細節是否具有代表性，以便讓實驗的參數減少為 L/r、溫度及加載的大小。 3. 本次實驗擬以定溫加載方式測試，目前所用大型高溫爐的溫度控制，在實務上其變異量能否達到預期的要求。 4. 建議在後續研究中加強對高強度鋼在高溫作用材質微結構改變的特性文獻搜集。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 實務上箱型鋼柱之細長比以低於 50 居多，本實驗取細長比 20 至 45 間做為試體設計。試體數量雖然有限，但將收集文獻以擴大試體數量，驗證參數的影響。 2. 影響試體之參數有細長比、寬厚比、載重比及溫度等。本研究採用定溫加載，以細長比及溫度作為研究參數。文獻顯示塑性斷面在高溫時，寬厚比對強度的影響小。因本研究將探討鋼柱在高溫下的極限強度，而載重比將影響防火時效，非本研究試體的參數。 3. 會與委託實驗之單位討論，將溫度的變異量控制

	<p>5. 本研究之預期效益很需要理論分析來輔助，實驗的工作則要確認分析結果。</p>	<p>在一定範圍內。</p> <p>4. 遵照辦理，於第二章第三節討論。</p> <p>5. 本研究之實驗與解析同步進行，將蒐集其他研究之實驗數據與規範進行比較。</p>
<p>陳技師正平</p>	<p>1. 火場升溫速度及鋼板厚度會影響防火時效之計算。</p> <p>2. 實驗試體之長度計算，似取受熱段反曲點作為“L”，K取0.5較易計算(但兩端溫度不同致K可能小於0.5)。</p> <p>3. 實務上受熱非均勻，上下段亦不同，會影響防火時效計算。</p> <p>4. 接合銲造型式宜以實務用法考量。</p>	<p>1. 銘謝指教。</p> <p>2. 本研究將以火害實驗時試體的實驗設置，詳細計算試體受熱段的K值。</p> <p>3. 火害時高溫爐的升溫，爐內各點溫度差異的容許值將參考標準升溫曲線的規定。試體的溫度則採試體各量測的平均值。</p> <p>4. 箱型鋼柱的組合將保守採全滲透開槽銲。</p>
<p>鍾教授興陽</p>	<p>1. SM570 鋼材之高溫折減係數，是否與一般鋼材相同?可否獲得以估算實驗試體的強度?</p> <p>2. 細長比較高的試體是否有規劃量測柱子的水平側向位移?</p>	<p>1. SM570 鋼材之高溫折減係數與一般鋼材不同。由Kwon (2013)所實驗之鋼材性質顯示，SM570 之降伏強度折減係數較低而彈性模數折減係數則較高。將以文獻 Kwon 的實驗結果</p>

	<p>3. 大爐子的持溫與均溫維持不易，建議與建研所的同仁多討論測試。</p>	<p>估算試體的強度。</p> <p>2. 在實驗設備允許情況下將量測柱側向變位。</p> <p>3. 遵照辦理。</p>
林研究員克強	<p>1. 箱型鋼柱受高溫的受壓行為，除了與溫度與細長比的影響外，箱型鋼柱的銲接細節也會影響其性能，因此試體設計應說明其銲接細節。</p> <p>2. 試體的細長比較一般建築的工程實務有所差異，請說明其原因。</p> <p>3. 鋼材強度與勁度受高溫的性能衰減，主要與何者參數影響較大。</p> <p>4. 實驗中能否紀錄高溫受軸壓下的整體與局部挫屈行為。</p> <p>5. 定溫的可靠度為何？實驗時請適當考量。</p> <p>6. 研究目的應更精準描述。</p>	<p>1. 報告將詳述試體的銲接細節。</p> <p>2. 實務上箱型鋼柱之細長比以低於 50 居多，本實驗取細長比 20 至 45 間做為試體設計既有實務之代表性亦有利後續參數解析。</p> <p>3. 鋼材強度與勁度受高溫的性能衰減與鋼材之製程有關，而高強度鋼材之強度與勁度折減亦與普通強度鋼材不同。鋼柱高溫的極限強度受 F_y 影響較大。</p> <p>4. 實驗中難以記錄，待試體冷卻後再行紀錄。</p> <p>5. 實務上受熱非均勻，上下段亦不同，會影響防火時效計算。單一試體會有 16 個熱電偶測點，實驗過程中會取其平均值，並盡量控制在所需溫度。</p> <p>6. 遵照辦理。</p>
梁技師宇宸	<p>1. 製程與高強度鋼種受火</p>	<p>1. 製程與高強度鋼種受火害</p>

	<p>害應有相關性。</p> <ol style="list-style-type: none">2. 試體建議以 SAW 製作。3. 是否有 SN490 系列的文獻(箱型柱)。	<p>之關係需由其受高溫時之晶相轉變而定。如第二章第三節文獻所述。</p> <ol style="list-style-type: none">2. 遵照辦理。3. SN490 之箱型鋼柱實驗可見於 Yang (2015)之文獻。
--	--	--

參、期中審查會議

會議日期：108年7月10日，下午02時00分

地點：內政部建築研究所15樓第3會議室

新北市新店區北新路三段200號15樓

委員	專家學者意見	答覆
方教授一匡	<ol style="list-style-type: none"> 1. 依據報告書第36頁，柱頂端與底端承壓板的位移計佈設計畫，目前只量測單面的彎曲變位，建議增加量測垂直方向的彎曲變位，讓量測數據更周延。 2. 建議列明設計之升溫曲線(升溫階段的升溫速率)。 3. 根據報告書第26頁，請列出本研究所用試體之材料，(1)性質測試值(降伏強度，抗拉強度，伸長率及化學性質等)，(2)建議在文獻回顧中增列國內外現有之高強度鋼材在高溫條件的力學性質。 4. 建議在期末報告中酌量放入鋼柱在高溫實驗後的鐸道非破壞性檢測資料(照片及測試值)。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 本實驗因柱斷面為方形斷面，故只設計量測單軸挫屈，會於另一向加束制墊塊避免柱往另一軸挫屈。 2. 有關實驗試體溫度600°C、700°C之設計升溫速率，防火實驗中心已經先行完成測試，預計於30分鐘到達預定爐溫後，保持爐溫待鋼柱試體表面達到既定溫度後再進行軸力加載。 3. 遵照辦理，詳第三章第一節。 4. 本研究實驗後並無進行鐸道非破壞性檢測，僅以目視檢驗法確認鐸道無破壞，試體火害後照片詳第四章第一節。

<p>郭教授詩毅</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 實驗的規劃完整可行，由於實驗完成後尚有大量資料整理分析，應留意研究計畫的相關時程及進度。 2. 高強度鋼材之受溫溫度、強度、晶相(微觀結構)變化等，文獻回顧可增加討論了解。 3. 期中報告建議加入研究進度說明，實驗試體規劃詳細說明，補充於報告書第三章中。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 遵照辦理。 2. 遵照辦理，詳第二章第三節。 3. 遵照辦理。
<p>藍技師英昭</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 報告書第37頁請補充定溫加熱實驗步驟。 2. 研究案建立影響高強度鋼材之箱型鋼柱於高溫下受壓強度，是否依據我國鋼結構極限設計法規範建立參數，此參數為溫度、鋼柱細長比、肢材寬厚比與銲接型式等關係，如何建立數值模式，及本次實驗如何控制參數，請說明。 3. 請補充說明實驗鋼柱上下端點束制條件，此會影響實驗後鋼柱承載強度及變形趨勢。 4. 對本次實驗採用同材 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 遵照辦理，詳第三章第四節。 2. 因國內規範並無高溫下強度計算公式，故採用 AISC (2016)之高溫下受壓強度計算公式內使用之參數作為本次實驗的控制參數。寬厚比皆使用塑性設計斷面，銲接形式柱體部分皆採用全滲透銲。其餘參數則為溫度及細長比，做為實驗之參數。本研究將以實驗結果與規範計算之結果進行比較並從各國規範之計算模式中建立最適合之計算模式。本次實驗試

	<p>質，不同斷面4支鋼柱，是否有模擬其不同行為，而於實驗中進行驗證。</p> <p>5. 請補充報告書第37頁試體達到性能基準內容，即實驗終止條件。</p> <p>6. 報告書表5-1不同機械性質之高溫受壓強度，請說明試體條件差異。</p>	<p>體參數詳第三章。</p> <p>3. 實驗設置提供之上下端點束制將使試體破壞時僅受單軸彎矩。</p> <p>4. 試體設計時皆為塑性設計斷面，故實驗前皆預期四支試體破壞模式為整體挫屈。</p> <p>5. 性能基準內容詳第三章第四節，本研究因欲求得試體抗壓強度，故實驗終止條件將在安全的前提下不依性能基準，改為直至載重無法再增加。</p> <p>6. 試體條件差異為細長比與實驗時之試體溫度。</p>
<p>陳技師正平</p>	<p>1. 國內使用 SM570鋼材，因有 ESW 銲接高入熱量的問題，因此都採用 SM570 MCHW。</p> <p>2. 報告書第6頁 CNS 12514-1對平均500°C及高溫550°C視為破壞，是否太嚴格。</p> <p>3. 報告書第31頁全滲透銲接符號似乎 ISO 與 AWS 混用，會造成施工錯誤。</p> <p>4. 報告書表2-3及表2-4材料</p>	<p>1. 因考量計畫執行之時程，需與鋼構場協調現有之鋼板，且 SM570MC 與 SM570MC HW 之物性及化性皆相同，故本研究採用 SM570MC 之鋼板。</p> <p>2. 此為舊版 CNS 判定是否破壞之規定，現已使用新版之性能基準做為破壞標準。</p> <p>3. 本實驗之試體設計圖使用</p>

	<p>性質與折減係數中之“與”是否應為“之”之誤。</p>	<p>AWS 銲接符號。</p> <p>4. 於期末報告中修正，銘謝指教。</p>
林技師文宗	<p>1. 報告書引用各國規範比較，期待本實驗能提供如本國規範有不保守處之修正建議。</p> <p>2. 國內箱型柱銲接點於角隅，火害高溫是否會造成銲道破壞，煩請留意觀察。</p>	<p>1. 遵照辦理，詳第五章內容。</p> <p>2. 銘謝指教，箱型柱組合皆採用全滲透銲，經實驗結束後觀察確認銲道無破壞。</p>
楊建築師勝德	<p>1. 高強度鋼材，當溫度越高，其強度衰減的幅度越明顯，亦即其受火害影響大，較普通鋼材來的不利，建議實驗後數據資料可反應在實務設計及施工規範，俾利工程界。</p>	<p>1. 遵照辦理，詳第五章內容。</p>

肆、期末審查會議

會議日期：108年10月31日，下午02時30分

地點：內政部建築研究所15樓第4會議室

新北市新店區北新路三段200號15樓

委員	專家學者意見	答覆
方教授一匡	<ol style="list-style-type: none"> 1. 在結論中提到「建立高強度箱型鋼柱於高溫下之受壓強度計算模式...」,但在結論的各點敘述中並未明示本計算模式的預測情形,請補列相關敘述。 2. 本研究在結論中提出不同溫度及不同規範對高強度鋼材製作箱型柱的受壓強度影響及預測特性,建請註明各計算值所依據之規範及鋼材之高溫性質特性。 3. 本研究所用鋼材的高溫性質相較於一般鋼材的高溫性質,請列表註明高溫下性質差異之特性,並在結論中列明。 4. 本研究所測試4組試體的實驗後外觀照片,建議增列局部變形之狀況以供參考。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 遵照辦理。 2. 遵照辦理。 3. 受限於材料實驗設備不足,故本研究並未進行試體所使用鋼材之高溫材料性質試驗。 4. 遵照辦理,詳第四章內容。

<p>林研究員克強</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 試體長度3500 mm 與報告書圖3-14不相符，請說明；另圖3-2、3-3、3-4之圖說請註明依照何規範及如何求得。 2. 請說明報告書表5-1中各規範計算強度的公式，並註明圖5-3中溫度。 3. 是否可提出國內規範對鋼骨箱型柱受高溫壓力強度的建議設計方法。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 遵照辦理，已予修正。 2. 遵照辦理，各規範計算強度公式詳第二章及附錄四所述。 3. 受限於本次實驗試體量，僅能建議當箱型鋼柱之溫度介於 600°C至 700°C且細長比介於 19 至 39 之計算模式。
<p>藍技師英昭</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 請說明報告書第27頁「細長比50」之意義，另與報告書第77頁結論中敘述「4支試體細長比皆小於40」二者間之差異為何。 2. 請說明報告書第39頁“性能基準”條件，及試體上端板旋轉1.5度而下端板旋轉0.08度，是否與上下端板構造及邊界條件有關。 3. 請說明報告書第68頁「試體將依寬厚比大小決定其破壞模式」，能否由寬厚比大小研判其破壞模式。 4. 請說明報告書第68頁「局部挫屈破壞」及「局部挫屈破壞皆發生在底層附 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 已修正 27 頁內容為小於40，因本研究試體之最大細長比為39，故以細長比小於40敘述之。 2. 性能基準之內容詳第三章第四節所述。實驗設備之束制為上端鉸接下端固端，故轉角與實驗設置有關。 3. 本次實驗結果顯示在高溫下寬厚比大的試體破壞模式為局部挫屈，寬厚比小的試體產生整體挫屈。寬厚比造成不同破壞模式的界線尚待更多實驗驗證。 4. 遵照辦理，詳第四章第二節。

	<p>近」之現象及狀況。</p> <p>5. 請說明報告書第76頁「因此建議在細長比小於50的情況下，使用 AISC (2106)高溫下材料折減係數代入國內鉸接箱型鋼柱受壓強度公式，以計算高溫下鉸接箱型鋼柱之受壓強度」，是否可直接套用第73頁係數。</p>	<p>5. 並無法直接套用係數，此為實驗值與規範計算值之比值而非高溫下機械性質折減係數。</p>
<p>陳技師正平</p>	<p>1. 以全滲透開槽鉸柱板之試體屬較高之品質標準，應用於非全滲透之情況恐偏向於不安全側，故結論應敘明以免誤用(非全滲透可能局部挫屈先產生)。</p> <p>2. 本研究以高強度鋼材試體做試驗，符合實務應用趨勢。</p>	<p>1. 遵照辦理。</p> <p>2. 銘謝指教。</p>
<p>林技師文宗</p>	<p>1. 報告書第78頁建議一之後續研究，內灌混凝土箱型鋼柱於高溫抗壓強度之研究，頗符合實務，基於內灌混凝土高流動性之需求，高性能混凝土使用甚多，哪些混凝土不適用於高溫，建議可列入研究範圍。</p>	<p>1. 後續有此研究計畫時，將列入研究範圍。</p>

<p>楊建築師勝德</p>	<p>1. 建議事項值得研究，但鋼柱內灌漿為高載重狀況，恐不容易模擬，請加以考量。</p>	<p>1. 銘謝指教。</p>
---------------	---	-----------------

伍、第二次專家學者諮詢座談會

會議日期：108 年 11 月 26 日，上午 10 時 00 分

地點：國立交通大學工程二館 208 會議室

新竹市東區大學路 1001 號

委員	專家學者意見	答覆
涂教授耀賢	<ol style="list-style-type: none"> 1. 請補充 $F_y = ?$ 2. 國內現行常用鋼材為 SN 系列，建議試驗可考慮 SN 系列。 3. 計算強度與實驗值之比較，AISC 結果與細長比成反比，而 EC3 及台灣之結果無此趨勢，建議可探討可能原因。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. F_y 為鋼材之降伏強度。 2. SN 系列鋼材並無高強度鋼材可使用，故使用 SM 系列。 3. 因試體數量不足，尚無法確定此趨勢。
鄭教授復平	<ol style="list-style-type: none"> 1. 檢討寬厚比造成局部挫屈的情況。 2. 中間設置側位移量測，以邊界條件限制發生方向，請於論文中闡述。量測點置於板中央可能受局部挫屈及旋轉影響，也有可能受試體扭轉影響。 3. 建議加入初始高溫及試體達到預定溫度之時間。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 實驗結果顯示在高溫下寬厚比大的試體破壞模式為局部挫屈，寬厚比小的試體產生整體挫屈。 2. 遵照辦理。 3. 遵照辦理，詳第四章第一節。

<p>陳教授垂欣</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 請確定國內外參考文獻數量足夠。 2. 請確定試體溫度的取法，若為平均溫度，請確認報告中名稱正確。 3. 請注意清楚說明為何測試定溫加熱而非定載加熱。 4. 常溫下以 AISC 計算 P_{cr} 比實際小 40% ~ 50% (根據過去文獻)，本研究中高溫下之 P_{cr} 亦差距 40% ~ 50%，可探討此差異是因溫度或其他原因造成。 5. 報告中請說明加熱速度。 6. 請說明為何規範曲線隨試體而異。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 遵照辦理。 2. 遵照辦理。 3. 因本研究欲求得高溫下之極限載重而非防火時效，故採用定溫加熱。 4. 推測應為其計算皆非常保守所致。 5. 遵照辦理，詳第四章第一節。 6. 因高溫下折減係數隨溫度變化大，各試體破壞時溫度不同，固有不同受壓強度-細長比曲線。
<p>廖副處長仁壽</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 結論中提及之溫度應為實驗之溫度範圍。 2. 請說明加熱速率。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 遵照辦理。 2. 遵照辦理，詳第四章第一節。
<p>呂段長正安</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 請說明為何選此細長比。 2. 是否有實驗過試體之縮時影片。 3. 期望未來有更多實驗，以獲得完整之高溫下強度計算模式。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 為貼近實務常使用之細長比，故選用此些細長比。 2. 僅有上端板之錄影，因設備因素故無試體之錄影片段。 3. 銘謝指教。

參考書目

- AISC (2016). "Specification for structural steel buildings." ANSI/AISC 360-16, American Institute of Steel Construction, Chicago.
- ASTM E119 (2018). "Standard test methods for fire tests of building construction and materials." American Society for Testing and Materials.
- Chen, J., Young, B., Uy, B. (2006) "Behavior of high strength structural steel at elevated temperatures." J. Struct. Eng., 2006, 132(12): 1948-1954.
- Eurocode 3 (2005a). "Design of steel structures, Part 1.1, General rules and rules for buildings.", Eurocode 3 DD ENV 1993-1-1 : 2005, British Standards Institution, London.
- Eurocode 3 (2005b). "Design of steel structures, Part 1.2, General rules - Structural fire design." Eurocode 3 DD ENV 1993-1-2 : 2005, British Standards Institution, London.
- ISO 834-1. (2012). "Fire resistance tests-elements of building construction, Part 1, General requirements." International Standard ISO 834, Geneva.
- Kwon, I.K. (2013). "Evaluation study on the mechanical and thermal properties of high strength structural steel at high temperature." Journal Korean Institute Fire Science and Engineering, Vol. 27, No. 3, 72-79.
- Lee, W.S., Su, T.T. (1999). "Mechanical properties and microstructural features of AISI 4340 high-strength alloy steel under quenched and tempered conditions." Journal of Materials Processing Technology 87, 198-206.
- Qiang, X.H., Frans S.k. Bijlaard, Henk Kolstein (2012). "Post-fire mechanical properties of high strength structural steels S460 and S690." Engineering Structures 35, 1-10.
- Takagi, J. and Deierlein, G.G. (2007). "Strength design criteria for steel members at elevated temperatures." Journal of Constructional Steel Research, Elsevier, Vol. 63, pp. 1,036-1,050.
- Wang, W.Y., Ohmiya, Y., Ma, G.F. (2013). "Fire resistance study of axially loaded high strength steel columns." Science Direct Procedia Engineering 62,

690–701.

Yang, K.C., Hsu, R.J. (2009). “Structural behavior of centrally loaded steel columns at elevated temperature.” *Journal of Constructional Steel Research* 65, 2062–2068.

Yang, K.C., Yang, F.C. (2015). “Fire performance of restrained welded steel box columns.” *Journal of Constructional Steel Research* 107, 173–181.

中國鋼鐵(2014)，型鋼目錄手冊。

中華人民共和國國家標準 GB 50017 (2017)，「鋼結構設計標準」，中華人民共和國建設部、中華人民共和國國家質量監督檢驗檢疫總局。

中華人民共和國國家標準 GB 51249 (2017)，「建築鋼結構防火技術規範」，中國計劃出版社。

中華民國國家標準 CNS 12514-1 (2014)，「建築物構造構件耐火實驗法，第一部：一般要求事項」，經濟部標準檢驗局。

中華民國國家標準 CNS 12514-7 (2014)，「建築物構造構件耐火實驗法，第七部：柱特定要求」，經濟部標準檢驗局。

中鋼鐸材廠股份有限公司(2018)，低合金鋼：低溫鋼用包藥鐸線。

內政部營建署(2010)，「鋼構造建築物鋼結構設計技術規範鋼結構極限設計法規範及解說」。

東鋼鋼結構股份有限公司(2013)，「SM570 系列使用鋼結構工程鐸接程序書」。

高強度鋼構造柱於高溫下受壓強度之研究

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：陳誠直、徐連君、莊鎬璟、黃薪擘

出版年月：108 年 12 月

版次：第 1 版

ISBN：978-986-5448-14-1