

# 結構材料生命週期評估基準與耐久性評估 指標之建立(1)

內政部建築研究所委託研究報告

中華民國 100 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)



(國科會 GRB 編號)

PG10001-0202

10030107000G1024

# 結構材料生命週期評估基準與耐久性評估 指標之建立(1)

受委託者：國立台灣海洋大學

研究主持人：張建智

協同主持人：紀茂傑

研究員：葉為忠

研究助理：洪啟哲

## 內政部建築研究所委託研究報告

中華民國 100 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 .....	XI
摘要 .....	XV
第一章 緒論 .....	1
第一節 研究緣起與背景 .....	1
第二節 研究目的 .....	4
第三節 研究計畫之重要性 .....	7
第四節 研究流程 .....	10
第二章 文獻回顧 .....	13
第一節 生命週期評估 .....	13
第二節 國內外有關結構材料生命週期評估之研究情況.....	17
第三節 結構材料之耐久性評估 .....	20
第三章 生命週期評估 .....	33
第一節 界定範圍與目標 .....	33
第二節 鋼筋混凝土原料生產階段 .....	35
第三節 鋼筋混凝土原料運輸及製成產品階段 .....	63

第四節 生命週期盤查分析 .....	66
第四章 混凝土結構材料耐久性評估 .....	103
第一節 定義與範疇 .....	103
第二節 權重方法之決定 .....	103
第三節 材料因子耐久性指標之分層 .....	104
第四節 腐蝕現況耐久度指標介紹 .....	108
第五節 混凝土現況耐久度指標介紹 .....	119
第六節 耐久性綜合評估方法 .....	149
第七節 建築物耐久性評估實例分析 .....	152
第五章 結論與建議 .....	187
第一節 結論 .....	187
第二節 建議 .....	188
第三節 完成工作 .....	190
附錄一 各編號詳細質量數據 .....	191
附錄二 會議記錄表 .....	199
附錄三 專家問卷表 .....	201
附錄四 審查委員意見回覆 .....	227
參考書目 .....	245

## 表 次

表 2.1 國內目前常用檢測準則 .....	28
表 2.2 D.E.R.&U.評估準則.....	29
表 3.1 相關數據及編號 .....	34
表 3.2 98 年全國砂石供應量表 .....	36
表 3.3 花蓮縣土石採取、洗選場平均生產量統計表 .....	37
表 3.4 花蓮縣砂石碎解洗選場機具設備概況表 .....	37
表 3.4 花蓮縣砂石碎解洗選場機具設備概況表(續).....	38
表 3.4 花蓮縣砂石碎解洗選場機具設備概況表 (續) .....	39
表 3.4 花蓮縣砂石碎解洗選場機具設備概況表 (續) .....	40
表 3.5 挖掘機型號、耗油量 .....	41
表 3.6 推土機型號、耗油量 .....	41
表 3.7 鏟裝機型號、耗油量 .....	41
表 3.8 卡車型號、耗油量 .....	42
表 3.9 柴油及電力之熱值與 CO <sub>2</sub> 排放量計算 .....	44
表 3.10 乘載大陸砂石貨船資料表 .....	45
表 3.11 生產 1 立方公尺的砂石耗能量及排放 CO <sub>2</sub> 量.....	46
表 3.12 生產每公噸水泥平均需原料耗用百分比 .....	47

表 3.13 產 1 公噸水泥、爐石粉及飛灰 CO <sub>2</sub> 排放量.....	49
表 3.14 全國各大水泥業總耗能 .....	49
表 3.14 全國各大水泥業總耗能(續).....	49
表 3.15 生產 1 公噸水泥耗能多少(千卡/公噸).....	50
表 3.16 生產 1 公斤 slag sand cement 需排放到空氣的物質 .....	51
表 3.16 生產 1 公斤 slag sand cement 需排放到空氣的物質(續)..	52
表 3.17 生產 1 公斤 slag sand cement 需排放到水的物質 .....	53
表 3.17 生產 1 公斤 slag sand cement 需排放到水的物質(續).....	54
表 3.18 生產 1 公斤 slag sand cement 需排放到土壤的物質 .....	54
表 3.19 鋼胚及鋼筋生產單位產品耗能調查表 .....	57
表 3.20 鋼胚及鋼筋生產單位產品 CO <sub>2</sub> 排放量調查表.....	57
表 3.21 生產 1 噸鋼筋排放物質表 .....	58
表 3.21 生產 1 噸鋼筋排放物質表(續).....	59
表 3.21 生產 1 噸鋼筋排放物質表(續).....	60
表 3.21 生產 1 噸鋼筋排放物質表(續).....	61
表 3.22 生產 1 度水耗能及排放 CO <sub>2</sub> 量 .....	62
表 3.23 砂石、水泥、鋼筋、自來水運輸階段 CO <sub>2</sub> 排放量.....	64
表 3.24 砂石、水泥、鋼筋、自來水運輸階段耗能量 .....	64

表 3.25 混凝土成品運輸階段 CO <sub>2</sub> 排放量 .....	65
表 3.26 混凝土成品運輸階段耗能量 .....	65
表 3.27 鋼筋混凝土原料生產、產品製成及運輸階段耗能表.....	66
表 3.28 鋼筋混凝土原料生產、產品製成及運輸階段 CO <sub>2</sub> 排放 表 .....	66
表 3.29 Eco-Indicator95 之特徵化單位.....	69
表 3.30 Green house(溫室效應)常態化單位及權重因子 .....	70
表 3.31 Ozone layer(臭氧層破壞)常態化單位及權重因子 .....	71
表 3.32 Acidification(酸化)常態化單位及權重因子.....	72
表 3.33 Eutrophication(水質優養化)常態化單位及權重因子(續)	74
表 3.34 Heavy metals(重金屬)常態化單位及權重因子 .....	75
表 3.35 carcinogens(致癌物質)常態化單位及權重因子.....	76
表 3.36 pesticides(農藥使用)常態化單位及權重因子 .....	77
表 3.36 pesticides(農藥使用)常態化單位及權重因子(續).....	78
表 3.36 pesticides(農藥使用)常態化單位及權重因子(續).....	79
表 3.37 Summer smog(夏季煙霧)常態化單位及權重因子 .....	80
表 3.37 Summer smog(夏季煙霧)常態化單位及權重因子(續).....	81
表 3.37 Summer smog(夏季煙霧)常態化單位及權重因子(續).....	82

表 3.38 winter smog(冬季煙霧)常態化單位及權重因子 .....	82
表 3.39 Energy resources(能源消耗)常態化單位及權重因子 .....	83
表 3.39 Energy resources(能源消耗)常態化單位及權重因子 .....	84
表 3.40 Solid waste(廢棄物產生)常態化單位及權重因子 .....	85
表 3.40 Solid waste(廢棄物產生)常態化單位及權重因子(續).....	86
表 3.41 試體符號表 .....	87
表 3.42 試體編號表 .....	88
表 3.43 設計的配比( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).....	89
表 3.44 各配比抗壓強度(MPa) .....	89
表 3.45 柱受到各載重組合 .....	90
表 3.46 各配比混凝土柱邊長(m) .....	91
表 3.47 各配比特徵化後的數值(本國數據).....	95
表 3.48 各配比特徵化後的數值(水泥使用國外數據).....	96
表 3.49 河川、陸上砂石及進口砂石排放量 .....	97
表 3.50 建築資訊與建材使用量(實例一).....	97
表 3.51 建築資訊與建材使用量(實例二).....	99
表 4.1 『耐久性→材料因素』評估項目之權重問卷 .....	105
表 4.2 『耐久性→腐蝕現況』評估項目之權重問卷 .....	106

表 4.3 『耐久性→混凝土現況』評估項目之權重問卷 .....	106
表 4.4 結構混凝土中鋼筋鏽蝕電位的判定標準 .....	113
表 4.5 混凝土碳化深度的評定標準 .....	115
表 4.6 結構混凝土中氯離子含量的評判標準 .....	118
表 4.7 鋼筋鏽蝕電流的判定標準 .....	119
表 4.8 混凝土電阻率的評定標準 .....	122
表 4.9 非水平狀態檢測時回彈值修正值 .....	126
表 4.10 混凝土澆注表面、底面回彈值的修正 .....	127
表 4.11 泵送混凝土測區混凝土強度換算值的修正值 .....	129
表 4.12 結構混凝土現場檢測強度的評定標準 .....	131
表 4.13 混凝土建築結構構件表觀損傷的損傷度指標體 .....	132
表 4.14 混凝土建築結構構件表觀損傷的分級評定方法表 .....	133
表 4.15 鋼筋混凝土構件非結構受力裂縫分級評定標準 .....	134
表 4.16 工混凝土構件非結構受力裂縫分級評定標準 .....	135
表 4.17 預應力鋼筋混凝土構件非結構受力裂縫分級評定標準 .....	136
表 4.18 鋼筋混凝土構件結構受力裂縫分級評定標準表 .....	137
表 4.19 圯工混凝土構件結構受力裂縫分級評定標準 .....	138
表 4.20 預應力鋼筋混凝土構件結構受力裂縫分級評定標準 .....	139

表 4.21 鋼筋混凝土及圬工混凝土結構構件表觀損傷(除裂縫)分級評定標準 .....	140
表 4.22 預應力鋼筋混凝土構件表觀損傷(除裂縫)分級評定標準 .....	141
表 4.23 混凝土保護層厚度合判定係數值 .....	147
表 4.24 混凝土保護層厚度的評定標準 .....	148
表 4.25 混凝土構件材質狀況檢測指標與耐久性指標權重值.....	150
表 4.26 混凝土單一構件之耐久性評估標準 .....	150
表 4.27 結構整體的耐久性綜合評價標準 .....	151
表 4.28 鑽心取樣試體水溶性氯離子含量檢測結果(實例 1).....	158
表 4.29 鑽心取樣試體中性化檢測結果(實例 1) .....	159
表 4.34 腐蝕訊號量測結果(室內柱主筋) .....	163
表 4.35 腐蝕訊號量測結果(室內柱箍筋) .....	163
表 4.36 腐蝕訊號量測結果(戶外柱主筋) .....	164
表 4.37 腐蝕訊號量測結果(戶外柱箍筋) .....	165
表 4.38 混凝土試體抗壓強試驗結果(實例 1).....	168
表 4.39 戶外梁的混凝土材質狀況檢測指標與耐久性指標權重值	173
表 4.40 戶外柱的混凝土材質狀況檢測指標與耐久性指標權重值	173

表 4.41 戶外牆的混凝土材質狀況檢測指標與耐久性指標權重值	174
表 4.42 室內梁的混凝土材質狀況檢測指標與耐久性指標權重值	174
表 4.43 室內柱的混凝土材質狀況檢測指標與耐久性指標權重值	175
表 4.44 室內牆的混凝土材質狀況檢測指標與耐久性指標權重值	175
表 4.45 建築整體結構耐久性評價表(實例 1) .....	178
表 4.46 樓高及用途 .....	179
表 4.47 氯離子含量檢測結果(實例 2) .....	180
表 4.48 鋼筋探測試驗結果 .....	180
表 4.49 混凝土試體抗壓強試驗結果(實例 2) .....	181
表 4.50 混凝土中性化程度試驗結果 .....	181
表 4.51 一層的混凝土材質狀況檢測指標與耐久性指標權重值	182
表 4.52 二層的混凝土材質狀況檢測指標與耐久性指標權重值	182
表 4.53 建築整體結構耐久性評價表(實例 2) .....	183
表 5.1 研究進度及完成之工作項目 .....	190

## 結構材料生命週期評估基準與耐久性評估指標之建立(1)

## 圖 次

圖 1.1 結構材料之生命週期 .....	3
圖 1.2 典型混凝土製作的生命週期評估程序樹狀圖 .....	8
圖 1.3 本計畫之研究流程圖 .....	11
圖 2.1 生命週期評估的架構與應用 .....	15
圖 2.2 混凝土耐久性與性能關係圖 .....	21
圖 2.3 混凝土劣化之物理性因子 .....	22
圖 2.4 混凝土劣化之化學性因子 .....	23
圖 2.5 層級分析法與網絡分析法架構圖 .....	25
圖 2.6 服務功能、劣化因子、材料劣化程度、時間關係圖 .....	27
圖 2.7 耐久性評估架構圖 .....	32
圖 3.1 98 年全國砂石供應量統計圖 .....	35
圖 3.2 砂石產業產銷步驟示意圖 .....	36
圖 3.3 水泥生產流程圖 .....	48
圖 3.4 鋼鐵工業生產流程及產業體系 .....	56
圖 3.5 各配比混凝土試體特徵化圖(本國數據) .....	92
圖 3.6 溫室效應特徵化圖(本國數據) .....	93
圖 3.7 能源消耗特徵化圖(本國數據) .....	93

圖 3.8 各配比混凝土試體特徵化圖(水泥使用國外數據).....	96
圖 3.9 河川、陸上砂石及進口砂石特徵化圖 .....	98
圖 3.10 建築物各建材排放量比較(實例一).....	98
圖 3.11 整體建材物之建材排放量分析(實例一).....	99
圖 3.12 建築物各建材排放量比較(實例二).....	100
圖 3.13 整體建材物之建材排放量分析(實例二).....	100
圖 4.1 材料因子耐久性評估項目 .....	105
圖 4.2 腐蝕現況耐久度指標 .....	108
圖 4.3 銅/硫酸銅參考電極結構圖 .....	110
圖 4.4 測試系統簡圖 .....	112
圖 4.5 鑽孔取混凝土粉末的方法 .....	116
圖 4.6 利用 GalvaPulse 測量地區的示意圖 .....	119
圖 4.7 混凝土現況耐久度指標 .....	120
圖 4.8 混凝土電阻率測試技術示意圖 .....	121
圖 4.9 標定塊 .....	143
圖 4.10 (1)兩根鋼筋橫向並在一起/(2)兩根鋼筋豎向並在一起 ...	146
圖 4.11 房屋檢測體之地理位置.....	155
圖 4.12 鑽心取樣位置示意圖 .....	156

圖 4.13 室內柱腐蝕量測編號示意圖 .....	157
圖 4.14 戶外柱腐蝕量測編號示意圖 .....	158
圖 4.15 鑽心取樣試體水溶性氯離子含量試驗結果圖 .....	159
圖 4.16 鑽心取樣試體中性化檢測結果圖 .....	160
圖 4.17 鑽心取樣試體中性化檢測照片(1~4).....	161
圖 4.18 鑽心取樣試體中性化檢測照片(5~8).....	162
圖 4.19 腐蝕訊號-開路電位比較圖 .....	166
圖 4.20 腐蝕訊號-腐蝕電流密度比較圖 .....	166
圖 4.21 腐蝕訊號-混凝土電阻比較圖 .....	167
圖 4.22 室內柱開路電位平面圖 .....	169
圖 4.23 戶外柱開路電位平面圖 .....	170
圖 4.24 室內柱腐蝕電流密度平面圖 .....	171
圖 4.25 戶外柱腐蝕電流密度平面圖 .....	172
圖 4.26 宜蘭縣冬山國中基本位置圖 .....	179

## 結構材料生命週期評估基準與耐久性評估指標之建立(1)

## 摘要

關鍵詞：生命週期評估、耐久性評估、層級分析法

### 一、研究緣起

在天然資源逐漸減少以及環保意識提昇的今日，建築物的興建該採用何種方式以及對老舊建築物是否應該進行維修的判斷成為重要的課題。前者涉及到該使用何種營建材料，方能降低建築物的生命週期衝擊；後者則涉及到如何使用恰當的耐久性評估方法來評斷建築物目前的狀況，以做出是否應進行維修的決定，此兩者都與永續經營相關。緣此，本研究將針對此兩課題進行探討。

### 二、研究方法及過程

本計畫分為兩個部份，第一部份是對於結構材料進行生命週期評估，也就是基於組合材料的觀點對於建築物興建時會使用到的各種材料進行清單分析，並依此瞭解當使用不同比例時其對環境所造成之影響衝擊有多大；第二部份則是針對既存建築物之材料耐久性進行評價，所採用的方式乃是透過觀測混凝土現況以及腐蝕的相關檢測，然後依據專家所推薦的權重，可以計算出單一構件還有整體建築物的耐久性評價分數，最後可以依此瞭解建築物的耐久性狀況。

### 三、重要發現

在生命週期評估部份，我們發現 (1). 生命週期所需要的生產階段相關的數據，國內僅有二氧化碳排放量以及能源使用的數據，故使用國內數據所產生的生命週期衝擊只會出現此二類的影響；(2). 國內砂石來源不同時，所得到的生命週期評估會有不同，主要差異在開採器具的使用所造成的差異將由原產地吸收；(3). 依照生命週期評估從搖籃到墳墓的精神，應該也要考量建築物在使用時期還有拆除時期的數據，然而經過調查，國內建築物使用天然氣的狀況並無統計，又拆除後廢棄建材的回收使用率也無統計，因此無法達到全生命週期的評估，只能完成從原料開採到成品製成的生命週期評估。

## 結構材料生命週期評估基準與耐久性評估指標之建立(1)

在建築物材料耐久性評估部份，我們建立(1). 將混凝土材料耐久性評估，分為混凝土現況以及腐蝕狀況兩大類指標；(2). 已建立本土化權重；(3)層級分析法可以評斷單一構件之耐久性，也可以整合評斷建築物整體之耐久性。(4)本研究成果，可做為業界進行建築物耐久性評估之參考。

### 四、主要建議事項

在生命週期評估部份，我們建議應該加速國內相關數據之量測與統計工作，以使國內能更進行完整之生命週期評估。在建築物材料耐久性評估上，我們建議將來應該根據本研究精神，將其它會影響耐久性之因子如地震帶分級、坡地發生土石流潛能、施工良窳與否、齡期因子等納入，以同樣的精神進行考量。基於此，本研究提出以下建議：

#### 建議一

(建議事項)立即可行之建議—將地震帶分級、坡地發生土石流潛能、施工良窳與否、齡期等因子，納入建築物材料耐久性評估時之考量因素。

主辦單位：內政部建築研究所

對地震帶分級、坡地發生土石流潛能、施工良窳與否、齡期等因子進行五等份分級，再以影響係數相乘的方式將本研究成果加以應用，得到更具有代表性之耐久性評等，可以考慮另行以委託研究計畫案之方式達到。

#### 建議二

(建議事項)立即可行之建議—建議辦理研討會，推廣本研究案之研究成果。

主辦單位：內政部建築研究所

本研究之成果，建議辦理研討會，加以推廣。

### 建議三

(建議事項) 立即可行之建議—本研究案成果，可做為業界進行建築物耐久性評估之參考。

主辦單位：內政部建築研究所

本研究之成果，可以做為業界進行耐久性評估之參考，建議主辦單位可以透過報告分送各相關機構等方式推廣。

### 建議四

(建議事項) 長期可行之建議—加速國內有關營建材料生命週期相關數據量測與統計

主辦機關：經濟部能源局、內政部營建署

建議政府單位應盡快建立營建材料生命週期相關數據資料庫，特別是天然氣使用狀況以及混凝土回收使用狀況。

### 建議五

(建議事項) 長期可行之建議—建立營建材料生命週期評估之本土化軟體

主辦單位：內政部建築研究所

本研究針對營建材料生命週期評估從原料開採到鋼筋混凝土建築物興建完成，已經具有本土化數據。建議主辦單位再以委託計畫形式，對其它類型建築物如鋼骨加勁混凝土結構物、鋼結構等國內常用之建築型態進行類似之研究。統合本研究成果以及這些成果，將可以發展給建築設計師使用的本土化營建材料生命週期軟體。

## **ABSTRACT**

Keywords: Life-cycle assessment, durability evaluation, AHP

Nowadays, the nature resource decreases and environmental requirement becomes more and more important. To know what constructing materials should we use when a building is newly built and to know whether or not should we repair or maintain an existing building become important issues. The former one relates to selecting appropriate constructing materials such that the total life cycle impact can be reduced and the later one relates to using appropriate durability index to decide whether or not one should repair the structural members in the existing buildings. These two issues are important to the sustainable buildings. Based on the abovementioned reasons, it is proposed to do fundamental research in these two folds in this project.

This project consist two parts: the first part is to use the life cycle assessment to evaluate the construction materials. Based on the concept of construction materials, we evaluate the possible environmental impacts from all these construction materials. It is expected that after we have completed inventory analysis, we can analyze the environmental impacts for using different amounts of construction materials. The second part is the durability evaluation of existing buildings. We will use data from evaluating concrete status and corrosion status and use the weights recommended by professional specialists and calculate the final score for a single element and/or whole structure.

For the life cycle assessment, we have the following conclusions:

1. In our country, only data related to carbon dioxide emission and energy consumption exist such that we can only have environmental impact in these two folds.
2. When the sources of aggregates are different, the life cycle impacts will be different. It mainly comes from the fact that the energy consumption and carbon dioxide emission for using the extraction

machine will count for the location of sources.

3. According to the concept of from-cradle-to-grave in life cycle assessment, one should analysis from extraction of raw materials to tearing down of buildings. However, we found that the data of natural gas consumption of buildings and recycle percentage of demolishing waste is lack. Therefore, we can only have the life cycle assessment from the stage of extraction of raw materials to the stage of constructing the building.

For the durability of buildings from the material concept, we concluded:

1. We have categorized two categories to evaluate the material durability: concrete status and corrosion status.
2. We have constructed the domestic weighting coefficients for all indices.
3. The analytical hierarchy process (AHP) can be used to evaluate the material durability for a single structural member as well as the whole building.
4. The results of this research project can be applied for civil engineers to evaluate the durability of buildings.

For the life cycle assessment, we suggest the government and academic institutes should speed up constructing the data base to make the life cycle assessment for building possible. For the durability index, we suggest in the future the earthquake potential, landslide potential, construction quality and age of building can be considered together using the AHP structure. Based on the abovementioned points, we give the suggestions as follows:

#### Suggestion 1

(Suggestion) Immediate strategy: to use the same method in this study to include the effects of earthquake potential, landslide potential, construction quality and age of building into the durability indices.

## 結構材料生命週期評估基準與耐久性評估指標之建立(1)

Organizer: Architecture and Building Research Center, Ministry of the Interior.

We suggest the organizer can provide another research project to consider the earthquake potential, landslide potential, construction quality and age of building by dividing into five grades and then give each grade an appropriate enlarge coefficient such that the durability can be measured by multiplying the result from the current research with these enlarge coefficients.

### Suggestion 2

(Suggestion) Immediate strategy: to hold a forum to popularize the research results of the current project.

Organizer: Architecture and Building Research Center, Ministry of the Interior.

We suggest the organizer can hold a forum to popularize the research results of the current project.

### Suggestion 3

(Suggestion) Immediate strategy: to popularize the research result in this project and let civil engineers use the proposed method to perform the durability evaluation.

Organizer: Architecture and Building Research Center, Ministry of the Interior.

We suggest the organizer can popularize the research result of this study and let civil engineers use the proposed method to perform the durability evaluation. For example, the organizer can distribute the report of this project to related companies or institutions.

### Suggestion 4

(Suggestion) Long-term strategy: to collect and build up the database for the life cycle assessment of the construction materials.

Organizer: Bureau of Energy, Ministry of Economic Affairs & Construction and Planning Agency,

Ministry of the Interior.

We suggest the organizer begin to collect and build up the database for the life cycle assessment of the construction materials especially for the use of nature gas, the recycle percentage of concrete.

#### Suggestion 5

(Suggestion)Long-term strategy: to develop a domestic software for the life cycle assessment of the construction materials.

Organizer: Architecture and Building Research Center, Ministry of the Interior.

In this research project, we have obtained the domestic life-cycle-assessment data for the construction materials of the reinforced building from extraction of raw materials to the end of construction. We suggest the organizer to promote other project to collect the domestic life-cycle-assessment data for other structure types such as steel reinforced concrete (SRC) and steel structure. Combining these data, the domestic software for the life cycle assessment of the construction materials then can be developed and can be used by architecture engineers.



# 第一章 緒 論

## 第一節 研究緣起與背景

### 一、研究緣起

結構物本身使用大量營建材料，而材料本身在製造過程、使用過程、維護過程至最後拆除過程，其所產生之各樣對經濟成本、能源消耗及環境指標的影響，應該要經過詳細的生命週期評估，以利營建業者選擇出最佳的方案。結構材料其耐久性卻深深影響著構造物的服務性能，且材料本身耐久性攸關最後使用壽命的評斷，更需要訂立耐久性指標項目，並使用科學方法應用耐久性指標的狀況，亦即透過資料分析計算轉換成權重值，然後對耐久性提出適當的評估，以作為日後維修補強或拆除重建之參考依據，並可適時延長結構物的使用壽命。緣此，本計畫乃是針對結構材料本身的生命週期評估以及耐久性評估進行研究。

### 二、研究背景

營建材料是人類建造各類建築物或結構物所使用之一切材料的總稱。熟悉營建材料的各種性質，並掌握新材料的物理性質與化學組成特性，是進行結構設計與研究和工程管理必要的基本條件；反之，輕則影響結構的外觀與使用功能，重則危害結構的安全性，造成重大事故。營建材料可區分以功能性為主的建築材料與以力學性能為主的結構材料。

結構材料就是具有較好的力學性能，如強度、韌性及耐久性能等，結構材料依其變形型式可區分為塑性材料與脆性材料兩大類，在塑性材料方面最常用的結構材料是各種型號的鋼材；如鋼筋及其它金屬等也都屬於此類；而營建結構物使用最大量的混凝土材料則屬於脆性材料。另外，一般指具有更高的強度、硬度、塑性、韌性等力學性能，並適應特殊環境要求的結構材料，則歸類為高性能結構材料，包括新型金屬材料、高性能結構陶瓷材料和高分子材料等。結構材料是國民生活中應用最為廣泛的材料之一，從日用品、土木建築到汽車、飛機和衛星等，均以某種形式的結構框架獲得其外形、大小和強度。

## 結構材料生命週期評估基準與耐久性評估指標之建立(1)

營建業與國家建設、經濟發展、全民生活品質及居住環境之提升息息相關。任何產品（包括建築物）應以一種具整體生命週期的觀念來探討，若以產品生命週期的觀點來看，一棟建築物大致可分為建材生產、建造施工、使用維護、破壞拆除與廢建材棄置等五個階段，每個階段的成本、能源消耗以及將對環境的衝擊等均有關連性的相互影響[16,36]。隨著愈來愈多人察覺到建築物從設計、材料選擇到營造方式都和環境息息相關，永續性已成為營建業一個重要的考量因子。營建工程是一種高度客製化的產品，而影響建築物耐久性之原因，除了材料選擇與配比設計因素外，與其作業項目、施工方法及環境因素等均息息相關，此外也會因用途、條件與設計規範之不同而有所差異。國內建築物主要構造方式為鋼骨結構（Steel Scaffolded Concrete, SC）、鋼筋混凝土結構（Reinforced Concrete, RC）及鋼骨鋼筋混凝土結構（Steel Reinforced Concrete, SRC）。根據98年營建統計年報資料顯示，在各種構造型式核發使用執照之總樓地板面積依序分別為：依構造別分析，以混凝土(含鋼筋混凝土)構造1,544 萬 9 千平方公尺占77.6%居首，鋼構造262 萬 3 千平方公尺占13.2% 次之，鋼骨鋼筋混凝土構造 164 萬平方公尺占8.2%再次之，顯示台灣地區目前仍以鋼筋混凝土結構最受青睞。鋼筋混凝土構造物在施工過程中必須配合模板施作，達到結構物整體塑性之要求，所以在土木與建築結構體材料中，鋼筋與混凝土使用量佔最大比例，其花費的金額也相對較其他材料高。

工程品質與人民生活、安全與國家經濟發展息息相關，為落實工程品質管理，提升工程品質必須以生命週期導向之工程管理，從因果關係思考，工程管理除了施工階段外，必須往上推展至規劃、設計階段，並往下延伸至營運、維護階段，建置公共工程全生命週期管理架構，研擬從可行性研究、規劃、設計、施工及營運、維護管理等各階段之全面工程管理機制。依照ISO 14040 的定義，生命週期評估（Life Cycle Assessment, LCA）是以科學的方法，進行有系統的盤查產品、活動與服務，在其生命週期階段中所使用的能源、資源以及排放至環境的各種污染物，評估並量化以獲知對環境所產生的負荷及衝擊，同時提出結論來作為尋求改善的參考[31]。就結構材料而言，其生命週期可概分材料的開採、設計階段、營造階段、使用維護、破壞處理/再利用等五個階段，各階段所涉及的工作內容均有相關規範限制，但是目前國內對於結構材料的選擇、配比設計階段大多以生產製造成本為主要的考量因素，未能將結構材料的選擇重點延伸至使用

維護成本及使用年限，也因此造價成本較低的材料可能引起日後建築物耐久性降低及維護成本增加等情況。實際上，結構材料生命週期的五個階段互相有其關連性，就長期而言，有需要建構以生命週期導向之評估基準。因此，本計劃研究內容之一就是擬定結構材料生命週期評估之內容，並建構生命週期評估資料庫，應用生命週期評估工具探討結構材料對環境指標的影響，圖1.1為結構材料之生命週期。然而，在生命週期的五個階段中所需的資訊當中，有些階段甚難蒐集到國內之數據。如使用維護階段對環境指標的影響與產品本身(建築物)的使用目的有關，還有產品本身設計的方式(如是否使用綠建築設計法，使用足夠採光而減少能源消耗等)也會影響，故不擬納入本計畫之範疇內；另外在拆除/再利用階段則與再利用比例(此與建築物原使用材料的優劣有關)等因素有關，國內也缺乏此等數據，故也不擬納入本計畫之範疇內。

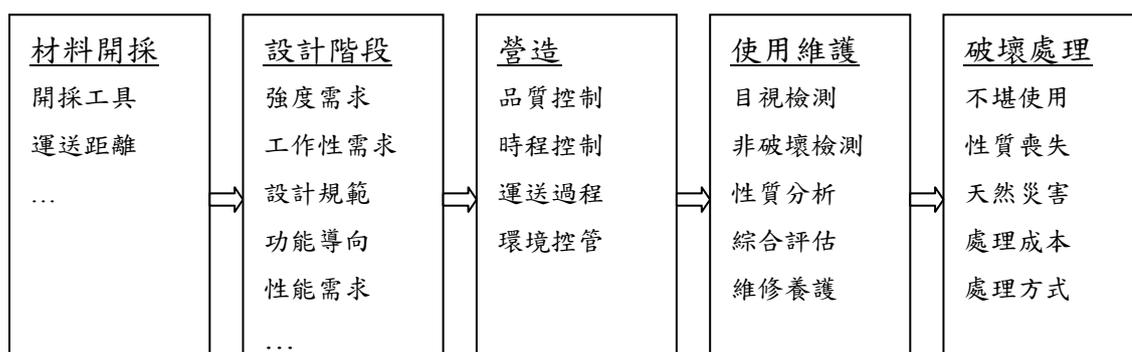


圖 1.1 結構材料之生命週期

(資料來源:文獻[31])

## 第二節 研究目的

目前，RC構造物的長期耐久性主要係考量其安全性、經濟性與環境性等因素。因此為了確保RC構造物在合理的建造成本下有較長的使用年限及規劃出適合的維護方式，世界各國在發展構造物長期耐久性的設計方面及精確的預測模式上，做了相當多的努力。在永續發展的架構下，混凝土的組成材料複雜性也跟著增加，包括使用輔助性的膠結材料(Supplementary cementing material, SCM)如飛灰、矽灰、爐石粉、蔗渣灰...等或再生材料，特別在混凝土耐久性方面的配比設計表現最為明顯[24]。RC構造物服務年限(Service life, SL)預測至少遭遇兩個主要的困難，特別是長期耐久性的需求以及各種不同的影響因子組合可能引起之耐久性問題[44]。因此，如果想要對結構物有一個既好又精確的長期預測，則需要有一套考慮完善又精確的評估工具。一方面可以參考Ishida et al.[35,47]所發展出的評估工具，其建置統一的電腦計算平台，在多重因素作用與多樣性的環境條件下，可以預測材料和結構的行為。另一方面，這個工具對傳統的專案，在使用上卻可能出現困難，如需很長的計算時間或需要許多輸入的資料。因此，一套涵蓋多方面評估因子的模型變得迫切需求，它必須包含各種不同影響RC構造物耐久性因素，不同的模組可以處理不同的問題，在這樣的概念下，法國土木工程學會工作團隊(Working Group of the French Association of Civil Engineer, AFGC)建立一套主要以材料性質來評估耐久性的模型，即所謂的耐久性指標(Durability indicators, DIs)[49,50]，目的在設計出可以保護結構物免於破壞如鋼筋腐蝕、鹼矽反應之配比設計，在使用壽命與環境條件已知的情況下，利用耐久性指標在設計階段即可預測新結構物的服務年限或已有之結構物的殘餘使用年限以及可能破壞之結構物的診斷，並提供可持續使用或須進行修護之決策等。因此DIs即為預測模式最主要的輸入資料。

鋼筋混凝土構造物會因組成材料、所處環境及使用條件的不同而有不同的反應行為。結構物設計的目的是使其能長期發揮其應有之功能，因此在結構物設計時，除了考量材料的強度與構件強度外，構件的使用性也是設計的基本需求之一，包括在設計混凝土結構物的強度時，除了考量其強度需承載預期內的荷重及抵抗不可預期之外力作用外，仍需考量其在使用期間內是否能滿足因外界環境因素的侵蝕作用下，尚能發揮其應

有之設計服務功能；亦即希望構物在使用上兼具耐久性。混凝土在耐久性的考量上，主要在如何減少混凝土內的孔隙及形成不連續的孔隙以阻斷有害物質之侵入。混凝土可被有害物質穿透的能力在其耐久性之評估上扮演著重要的角色，故評估混凝土耐久性考量上，都與混凝土的孔隙結構有關。欲訂定混凝土耐久性之評估標準或準則，主要是對混凝土之傳輸參數進行試驗，不過仍需建立於足夠的試驗數據上。然而，此種方式面臨的困難點在於不同的傳輸特性之間與混凝土抵抗物理或化學侵蝕的相關試驗數據相當有限，或相關文獻因試驗項目不同或配比設計也不一樣而無法進行整合分析。因此，本計劃研究內容另一目標就是係將過去混凝土耐久性影響因子與評估指標研究之相關文獻及研究成果進行蒐集、彙整與資料重建，藉由本研究結果建立混凝土耐久性方面的資料庫統計，應用統計方法，去發掘材料因子與耐久性之間的關係，建立耐久性評估指標。

營建工程最主要使用之結構材料為鋼筋、混凝土及鋼構材料。本研究計畫共分兩年，第一年主要針對鋼筋及混凝土之結構材料進行探討，第二年則會針對鋼結構與鋼骨鋼筋混凝土結構物進行探討。第一年之研究內容如下所示；

1. 擬定結構材料生命週期評估之內容，並建構生命週期評估資料庫；

生命週期評估的核心內容是對產品生命過程，包括原料的取得和加工、設計還有營造等過程對六項環境因子之評估和研究。本計畫之目標在建立以生命週期評估為考量之建築物設計方法，因此僅以材料的觀點，考量在材料的開採階段、設計階段以及營造階段等三階段，不同材料用量所產生之環境影響。為完成此目標，因此必須要建立材料之完整資料庫。

2. 應用生命週期評估工具探討結構材料對環境衝擊的影響；

本計畫在生命週期環境評估部分，則考慮資源耗竭、能源的消耗、空氣污染、水污染、溫室效應氣體排放及固體廢棄物六個指標，擬使用Simapro生命週期評估軟體或其他相關軟體，來進行結構材料之生命週期環境評估。

3. 蒐集國內外相關文獻資料及方法；

將分散於國內外各文獻有關結構材料如混凝土配比設計資料、混凝土材料力學性質資料與各種耐久性試驗結果資料，透過文獻探討的方式進行蒐集、整理、

## 結構材料生命週期評估基準與耐久性評估指標之建立(1)

分類，以瞭解材料因子對耐久性之影響，預計從ScienceDirect、SDOS、Google scholar、國家圖書館全球資訊網.....等資料庫進行資料蒐集。

### 4. 提出結構材料耐久性影響因子評估項目與等級

首先從建置的資料庫中，利用多因子變異數分析方法，提出結構材料耐久性影響因子並建立材料因子與耐久性之關係。其次藉由問卷設計調查及使用層級分析法建立單一構件材料各耐久性評估指標之權重值後，接著經由適當的計算模式將之組合疊加，以獲致量化的評分，然後再整合各單一構件所獲得的評分，最後透過耐久性等級分類，對整體結構材料耐久性給予綜合評價。

### 5. 經由上述之研究分析，提出結構材料生命週期評估方法與建立耐久性評估指標，並進行兩個案例探討，以提供 RC 構造物耐久性設計或評估時之參考。

### 第三節 研究計畫之重要性

目前台灣在建築物上使用大量的鋼筋混凝土結構，依營建署統計目前國內的新建築70%都是鋼筋混凝土構造，除了部分辦公大樓之外，鋼骨構造或木構造的建築物比例相對較低。以一棟建築物五、六十年的生命週期來看，確實在節能方面有值得檢討與改進的必要。目前許多企業開發新產品時，已經開始藉由LCA 具體量化的評估結果，評核產品在原料開採、生產、使用、廢棄等階段當中，對環境所造成影響。隨著愈來愈多人察覺到結構物從設計、材料選擇到營造方式都和環境息息相關，永續性已成為營建業一個重要的考量因子。對永續性的評估目前已發展出許多不同的工具，包括全生命成本（Whole life costing, WLC）和生命週期評估，統稱為生命週期分析。就營建工程而言，和生命週期評估主要有關的是材料的環境衝擊，包括從原料的取得、生產製程、建造、使用期間的維護、破壞到處理/再利用等。混凝土的生命週期評估是以一個特定的結構或是結構的一部分稱為功能性單元(functional unit)，它可以是整個結構或只是一個樓地板、基樁、橋墩或預力樑等。生命週期評估也可以被量化，如結構物中取1立方米的混凝土或結構物中取全部的鋼筋混凝土部份；同時，它也可以從一片預力牆中取1平方米。圖1.2為典型混凝土製作的生命週期評估程序樹狀圖[28]。

結構材料生命週期評估基準與耐久性評估指標之建立(1)

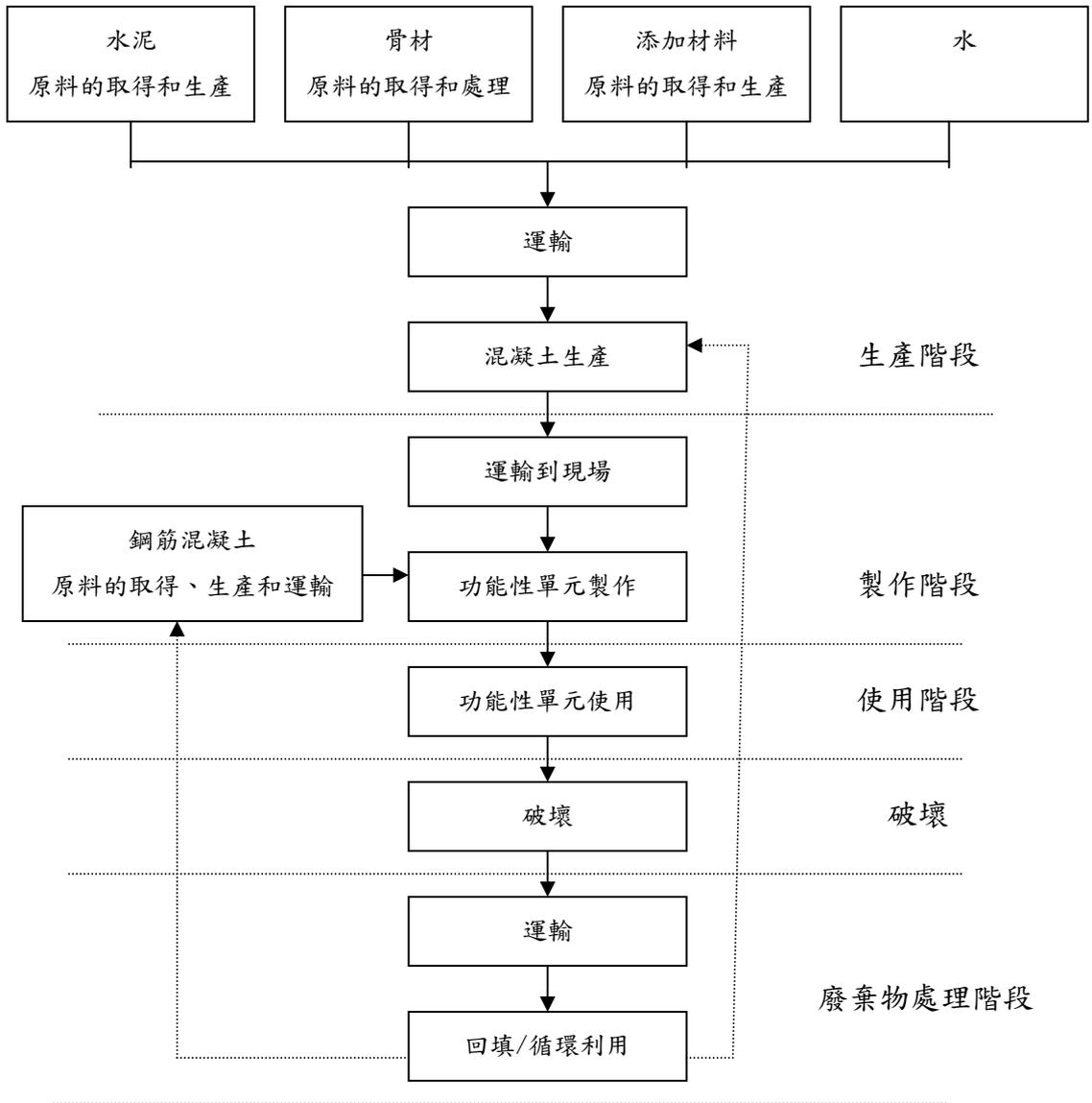


圖 1.2 典型混凝土製作的生命週期評估程序樹狀圖

(資料來源:文獻[28])

一般而言，鋼筋混凝土結構物會因暴露環境不同而遭受各種化學性或物理性的侵蝕，使得結構物未達設計年限就產生劣化與破壞等現象。因此，設計混凝土結構物除了考慮強度外，混凝土材料耐久性更是重要課題。以往評定混凝土的品質常常以抗壓強度為依據，但是強度高未必表示耐久性佳；混凝土的耐久性係指混凝土於使用年限內能維持其物理特性與力學性質不致發生嚴重劣化，以保障結構物安全。根據 ACI Committee 201 對卜特嵐水泥混凝土耐久性的定義如下：「耐久性是指其抵抗風化作用、化學侵蝕、磨損及其他劣化過程的能力，亦即具耐久性之混凝土，在不同暴露的環境下仍能保持其原來的幾何尺寸、品質與服務性」[22]。混凝土耐久性的問題受結構設計、材料選擇、施工技術及養護等因素控制，同時也需配合環境因子作用的影響。

混凝土結構物耐久性不足的主要因素可以分為混凝土的劣化及鋼筋的腐蝕。混凝土劣化係指混凝土受到外在或內在因素影響，導致化學或物理性質產生變化而使混凝土發生膨脹性開裂或產生連通性孔隙等現象。物理性侵蝕包括受風化作用引起混凝土劣化變質、受波浪作用或海流作用使混凝土表面被沖刷造成磨耗或孔蝕破壞以及因結構物受超載、衝擊載重及反覆載重作用使混凝土產生裂縫等；而化學性侵蝕主要包括侵蝕物質（如二氧化碳、氯離子、硫酸根離子等）與硬固水泥漿水化產物產生交換反應、硬固水泥漿體產生溶解及析晶之反應、產生膨脹物質之反應等[42]。在鋼筋腐蝕方面，主要為氯離子侵蝕、中性化作用及氧化還原作用造成膨脹腐蝕生成物，使混凝土開裂而增加鋼筋暴露程度，因而增加有害離子侵蝕鋼筋的機會。故若能針對鋼筋混凝土破壞的原因提出良好的預防與改善之道，對提升混凝土結構物的耐久性有相當的助益。

RC 構造物會因組成材料、所處環境及使用條件的不同而有不同的反應行為。結構物設計的目的是使其能長期發揮其應有之功能，因此在結構物設計時，除了考量材料的強度與構件強度外，構件的使用性也是設計的基本需求之一。過去，有關混凝土耐久性之研究大多以規劃若干組不同配比設計之混凝土試體，利用不同的試驗方法以

決定混凝土之傳輸參數(如氯離子擴散係數、氣體滲透係數、吸水率、混凝土中性化深度、腐蝕速率及水滲透係數等)，並配合適當的計算模式(如腐蝕數速率、離子擴散係數)來預測混凝土構造物的殘餘壽命[26,34]。但是單憑有限的實驗樣本不易也無法將混凝土耐久性作整體性與準確性的評估。因此，在探討混凝土耐久性影響因子與評估指標時，如何運用過去前人研究的成果當做資源，有效地加以發掘知識，是項重大的挑戰。

#### 第四節 研究流程

本計畫區分為兩個區塊，其一為從結構材料為出發，進行盤查分析，然後完成由原料取得階段直到拌合完成之生命週期評估，目標是讓建築師有一參考依據，知道所採用的各種方案中，其對環境之衝擊為何。第二個區塊則是使用層級分析法，由專家擬定權重，透過對於建築物的檢測結果，瞭解材料目前的耐久性狀況為何。本部份的研究，是以材料為出發點，故不將設計不良、超載、地震、基礎被掏空等其它原因所造成之結構劣化納入評估。預計此部份的完成，將可以提供國內業者對既存鋼筋混凝土結構物是否有腐蝕耐久性危機有一評等之機制，並可以從評分等級判斷該做何種處置。本計畫之研究流程圖見圖 1.3 所示：

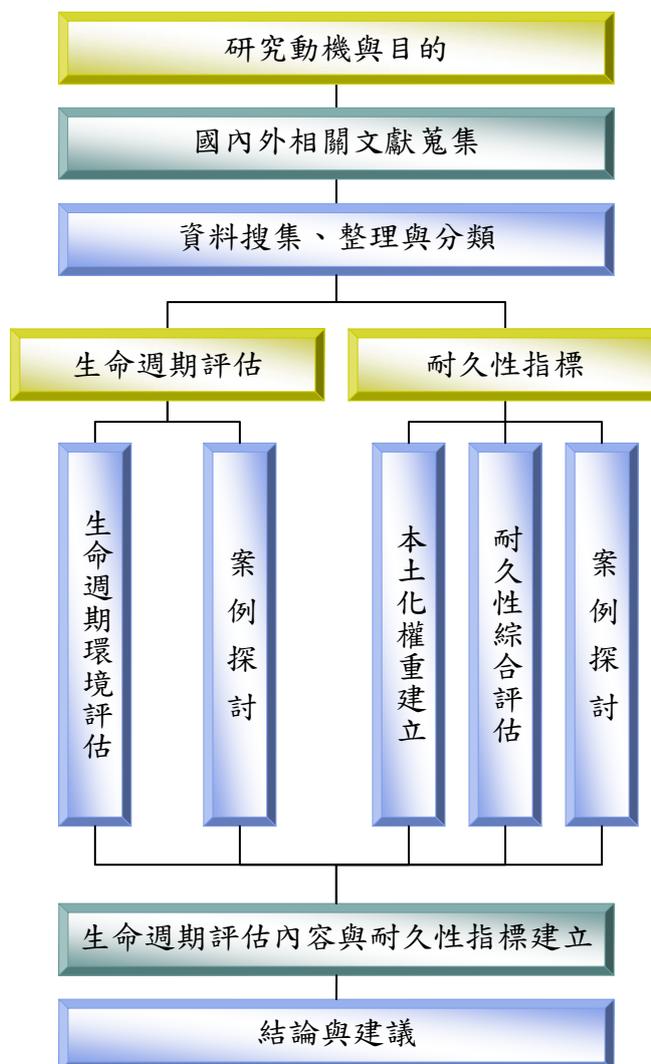


圖 1.3 本計畫之研究流程圖

(資料來源:本研究製作)

## 結構材料生命週期評估基準與耐久性評估指標之建立(1)

## 第二章 文獻回顧

### 第一節 生命週期評估

#### 一、生命週期評估的起源與發展

生命週期評估為目前持續發展中之技術，起源於1960年代，主要因應能源利用和規劃未來資源供給和使用方向的行動，並在1970年代正式開始實施[41]。1969年美國中西部資源研究所(Midwest Research Institute, MRI) 為可口可樂公司進行飲料罐之評估，比較不同的飲料罐對自然資源供給與環境排放污染之差異，為目前生命週期分析的方法奠定了基礎；在1970~80年代期間，生命週期評估仍多用於特定產品的設計評估，相關的評估方法與技術仍有待進一步的研究與規劃；直到1980年代後，生命週期評估才開始得到廣泛關注並迅速發展。隨著區域性與全球性環境問題日益嚴重，全球環境保護意識抬頭、永續發展觀念的普及與持續行動計畫的興起，大量的「資源和環境綱要分析」(Resource and Environmental Profile Analysis, REPA) 研究才重新開啟並獲得關注。1990年美國環境毒性和化學學會(Society of Environmental Toxicology and Chemistry, SETAC) 首次主持召開有關生命週期評估國際研討會，提出生命週期評估的概念。1992年 SETAC 成立五個研究工作組，由英國負責研究總體概念；德國負責研究生命週期清單(Life Cycle Inventory, LCI)總概念；日本負責生命週期清單分析具體操作；瑞典負責研究環境影響分析；法國負責研究改善評估，對 LCA 展開全面深入的研究工作，使 LCA 有長足的發展。1997年國際標準組織(International Organization for Standardization, ISO) 推出 ISO 14040「生命週期評估－原則與框架」；1999年推出 ISO 14041「生命週期評估－目標與範圍確定、清單分析」、ISO 14042「生命週期評估－生命週期評影響估析」與14043「生命週期評估－生命週期解釋」並於2000年公佈，至此生命週期評估儼然成為未來企業在永續經營與環境保護評估上的重要工具。

台灣在1994年才開始進行有關生命週期評估觀念與應用之研究，近年來許多單位如國科會、環保署、內政部建築研究所、經濟部技術處、工研院及

## 結構材料生命週期評估基準與耐久性評估指標之建立(1)

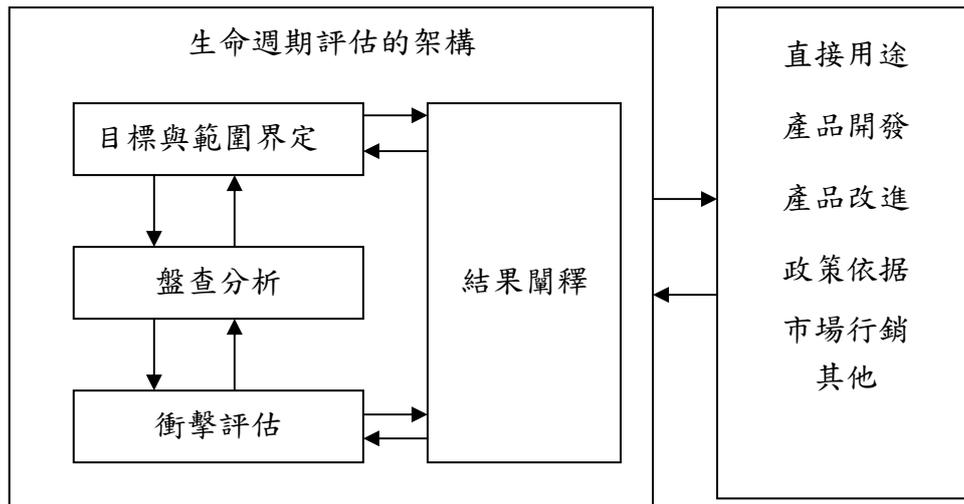
各大學院校與研究機構均投入相關的研究，開啟國內生命週期評估的技術研發。

### 二、生命週期評估的定義

一種產品從原料開採開始，經過原料加工、產品製造包裝、運輸和銷售，然後由消費者使用、維修，最後回收再循環或作為廢棄物處理和處置，整個過程，即產品從搖籃到墳墓（cradle to grave）期間稱為產品的生命週期。生命週期評估就是對某種產品，從原料開採、加工製造、運輸、使用維修到最終處置或回收等每一個過程，進行資源和環境影響分析與評估。然而，生命週期評估的定義依政府、企業和一些機構，站再各自的立場對它都有不同的論述。如美國環保局的定義：從最初自地球獲得原料開始，到最終的所有殘留物質回歸到地球的任何一種產品或人類活動，所帶來的污染物排放及其環境影響進行評估的方法；而根據國際標準組織ISO對LCA的定義為：生命週期評估是在產品的生命過程中（從搖籃到墳墓；Cradle to Grave），從原料的取得、製造、使用與廢棄等階段，評估其產生的環境衝擊。又根據SETAC所作的定義：生命週期評估是一個衡量產品生產或人類活動所伴隨產生之環境負荷的工具，不僅要知道整個生產過程的能量、原料需求量及環境的排放量，還要將這些能量、原料及排放量所造成的影響予以評估，並提出改善的機會及方法[10]。

### 三、生命週期評估的架構

1993年SETAC在「生命週期評估綱要-實用指南」中將生命週期評估的基本架構歸納為四個具關聯性的部份，分別是目標與範圍界定（goal and scope definition）、盤查分析（inventory analysis）、衝擊評估（impact assessment）和結果闡釋（interpretation）。目前，ISO對LCA進行了規範，ISO 14040確立了LCA的原則和框架，如圖2.1所示；ISO 14041規範了LCA的目的和範圍的確立以及盤查分析；ISO 14042規範了LCA的衝擊評估；ISO 14043確立了LCA解釋的內容和步驟。



**圖 2.1 生命週期評估的架構與應用**

(資料參考:文獻[20])

1. 目標與範圍界定 (Goal and Scope Definition) :

執行生命週期評估首先必須界定明確的研究目標與範圍，釐清進行生命週期評估結果使用的對象，採取客觀的評估立場，避免有特定評估導向，將評估範圍確實界定，清楚定義評估內容所需的資料與深度，如此方能得到有意義的評估結果，使評估結果得以與預期之應用目標一致。在目的與範疇界定階段應包含下列數項：目的、範圍、功能單元、系統邊界、數據品質與衝擊種類及衝擊評估之方法[39]。

2. 生命週期盤查分析 (Life Cycle Inventory) :

生命週期盤查分析包括了評估所需相關資料的收集及輸入、輸出資料的量化工作。輸入資料包含原料及能源的使用，輸出資料則為所生產之產品外，還包括了廢棄物與環境衝擊等排放。盤查分析可包括五個階段：原料開採、製造與加工、運輸、使用與維護、回收及廢棄物處理等，盤查分析可以由上述五階段的任何階段或其相關組合，其資料收集之範圍大小及詳細度，視使用者目的而定。盤查分析的結果應能滿足下列的基本要求：符合科學基礎、能夠量化、具有資料再現性、完整性、實用性以及能夠呈現適當的細節。此外，在此階段中所有之投入、產出數據均需依照功能單位進行標準化(normalization) [33]。

## 結構材料生命週期評估基準與耐久性評估指標之建立(1)

### 3. 生命週期衝擊評估 (Life Cycle Impact Assessment) :

生命週期衝擊評估係採用盤查分析的結果，評估其產生的環境衝擊。將評估系統的環境壓力因子予以衝擊分類 (Classification)，並將此環境衝擊的大小加以特徵量化 (Characterization)，最後將各類環境衝擊的因子給予適當權重並加以評價 (Valuation)，得到具有整合性的環境衝擊指標。

分類係將盤查清單中各物質依其對環境造成之衝擊不同來進行分類，然而有些物質可能會同時會造成兩種或兩種以上不同之環境衝擊，例如NO<sub>x</sub> 同時會造成毒性(toxic)、酸化(acidifying)及優養化(eutrophication)，因此單項物質會同時被分類在不同的衝擊類別中。然而，就單項環境衝擊類別而言，不同物質之貢獻度並不相同，要解決此問題，各項物質必須再乘上權重因子 (weighting factors)；因此，特徵化之主要意義為選擇一種衡量衝擊的方式，透過特定評估工具的應用，將不同負荷因子在各型態環境問題中的潛在衝擊加以分析，並量化成相同的型態或是同單位的大小。在特徵化步驟後，所得到的是各單項環境衝擊類別之衝擊加總值，而不同的環境衝擊類別之間並無特定的連結，亦缺乏一比較基準。因此在評價此步驟中，針對各項環境衝擊類別給予一相對應之權重因子 (weighting factor)，而由特徵化步驟所得的各單項環境衝擊之衝擊加總值再乘上其對應之權重因子，即可得到一整合之單項得點 (single score)，進而可使不同之衝擊類別間可進行比較。

### 4. 生命週期結果闡釋 (Life Cycle Interpretation) :

生命週期結果闡釋為生命週期評估之最後步驟，此步驟中必須依照所訂定之目的與範疇對評估結果作說明。同時，將盤查分析的過程與衝擊評估的結果整合解釋，闡釋結果應與評估目的與範圍定義時一致，並能提供選用低污染之原料、改善生產作業流程或提升產品環境保護貢獻等重大訊息給予決策者參考。

## 第二節 國內外有關結構材料生命週期評估之研究情況

目前許多企業開發新產品時，已經開始藉由LCA 來具體量化評核產品在生產、使用、廢棄等階段當中，對環境造成影響。隨著愈來愈多人察覺到結構物從設計、材料選擇到營造方式都和環境息息相關，永續性已成為營建業一個重要的考量因子。對永續性的評估目前已發展出許多不同的工具，包括全生命成本（Whole life costing, WLC）和生命週期評估，統稱為生命週期分析。就營建工程而言，和生命週期評估主要有關的是材料的環境衝擊，包括從原料的取得、原料運輸、生產製程、產品運輸、使用期間的維護、破壞到處理/再利用等。利用LCA可以評估混凝土及其他相關的營建材料對環境的影響，並且經由材料的選取和配比設計來生產對環境衝擊最小化的混凝土。

Asif et al.利用五種營建材料進行LCA，結果顯示總消耗能量為227.4 GJ，其中混凝土、木頭和磁磚是三種最主要的耗能材料，且單單混凝土就佔全部能量的65% [23]。Deborah 和 Thomas 使用LCA探討四種水泥：傳統卜特蘭水泥、混合水泥(添加卜作嵐材料)、水泥窯粉塵水泥( Cement kiln Dust, CkD)及部分材料使用CkD 之水泥等，其生產過程對環境衝擊的影響，結果顯示混合水泥對環境衝擊的影響最少，其次是部分材料使用CkD 之水泥，此外，在傳統水泥生產過程中，發現CkD的再生利用並沒有節省很多的環境資源[27]。Sungho et al. 比較使用年限50年之結構物、經由構件維護延伸到使用年限100年之結構物及使用高強度混凝土建造使用年限100年之結構物對環境衝擊的表現，結果發現使用高強度混凝土建造之結構物相較於使用年限50年及經由構件維護可延伸到使用年限100年之結構物，在耗能部份分別減少了15.53%和2.95%，在CO<sub>2</sub>的排放上也分別降低了16.70%和3.37 % [46]。Ulla-Maija et al. 探討工業副產品煤灰、再生混凝土和高爐石使用在路基營建工程之生命週期衝擊評估( Life Cycle Impact Asswssment, LCIA)，結果顯示路基工程對環境造成負荷主要來自於材料的生產與運輸階段；其中水泥的生產與礫石材料的破碎和營建材料運輸是主要的耗能階段，而大部分的氣體排放則來自於能源的生產[48]。

## 結構材料生命週期評估基準與耐久性評估指標之建立(1)

黃盈庭以水泥為例進行生命週期評估，將水泥生命週期分為原料開採階段、原料運輸階段、生產階段及水泥運輸階段。在能源消費上，以生產階段比例最高約94.15%，而在運輸階段約5.27%；在環境負荷上，全球暖化潛力以生產階段為最高約96.7%，酸化潛力約57%，水泥運輸階段則有35%，由水泥生命週期分析結果顯示若只考慮其生產階段，而忽略其他階段，將會低估使用水泥所產生之實際環境負荷[15]。郭文信針對國內水泥廠進行能源耗用普查，建立生產與能源使用系統模擬模式來進行二氧化碳排放減量方案之各情境模擬分析，研究結果顯示若國內水泥總產量不變下，二氧化碳排放的總減量效果最高可達19%；假設未來水泥總需求依人口成長數持續成長，二氧化碳排放的減量效果約可達8%；在替代能源之減量效果上，若不考慮燃料成本，以天然氣代替燃煤時，每增加10%的替代率約可增加3.2%的二氧化碳減量效果[11]。許多的科學證據顯示氣候變化 (climate change) 給人類社會帶來了危機，但更諷刺的是這些威脅卻是人類自己造成的[40]。

Gielen 與 Moriguchi依照鋼、鐵的生命週期，將其基本污染量定量來分析二氧化碳全球排放量之減量潛能，結果顯示1999年鋼、鐵在其生命週期中二氧化碳之全球排放約為 2100 ~ 2450 百萬噸，其中有 9 ~ 10 % 的二氧化碳排放量是源自於石化燃料，三分之二是因為使用煤炭所造成的，預期在未來二十年中，全球的二氧化碳排放量將可減量達 1000 百萬噸 [30]；Jeong 等人以某一鋼鐵公司為研究對象，將企業資源規劃 (enterprise resource planning, ERP)、環境管理系統 (environmental management system, EMS) 及能源服務系統 (energy server system, ESS) 等三種資料庫進行整合，使用線上資料收集系統對鋼鐵業之生命週期進行評估，結果顯示，此種線上資料收集系統優於過去之資料收集方法，且鋼鐵成品之 LCI 及 LCA 結果隨每個月的燃料使用比例而變動。此外，使用線上資料收集系統不僅可節省時間，並可提高數據可信度[32]。Chao 針對台灣之鋼鐵業進行生命週期盤查分析，並建立一貫作煉業煉鋼廠及電弧爐煉鋼廠在進行生命週期盤查分析(Life cycle inventory, LCI)時之功能單位、系統邊界及單位製程。在一貫作業煉鋼廠方面，物質及能源平衡是以每公斤碳鋼產品為基礎進行計算，包括鐵礦、廢鋼、煤、合金、

助熔劑、總能源耗用及用水量等投入，以及固態廢棄物、廢水、二氧化碳、煙塵、SO<sub>x</sub> 及NO<sub>x</sub> 等產出。此外，該研究亦包含電弧爐煉鋼廠製之生命週期盤查分析。研究結果與國際鋼鐵協會( International Steel Institute )之 LCI比較發現二者間具相當之一致性[25]。

陳秋龍以鋼鐵業為研究對象，將鋼鐵業之製程分為原料開採、原料運輸、生產及基本製程運輸等四個製程階段，利用投入產出方法進行生命週期分析，盤查結果顯示就台灣地區而言，生產每噸鋼產品，需投入 552 煤公斤當量、石油 119 公升、天然氣 2.73 立方米及電力 578 仟瓦小時，同時排放出 2738 公斤CO<sub>2</sub>、13.27 公斤NO<sub>x</sub>、2.73 N<sub>2</sub>O、及 4.35 公斤的SO<sub>x</sub>。就盤查結果而言台灣地區鋼鐵業在能源耗用及環境負荷方面，均是以生產階段之影響最大[12]。馮閔盛等人利用生命週期評估軟體 SimaPro 對建築物結構材料於製程階段產生之二氧化碳對環境衝擊進行分析，探討建築物對人體健康、生態品質及資源耗用之衝擊，提供環境危害、二氧化碳產出與造林樹種吸存關係之相關參考資料[17]；趙又嬋以兩間國內知名百貨公司為調查對象，探討百貨公司室內裝修建材耗能與單位面積CO<sub>2</sub> 排放量，得出 27 年中室內裝修單位樓地板面積CO<sub>2</sub> 排放量，並建議百貨公司室內裝修建材CO<sub>2</sub> 減量對策，可藉由製造低耗能、回收性高、可重複組裝及耐用性好之建材產品等方式，達到降低室內裝修環境負荷的目的[19]；鋼筋混凝土結構物的建造與使用階段會造成二氧化碳持續的排放，而大約四分之一的二氧化碳排放量來自於建築物能量的使用[50]。

### 第三節 結構材料之耐久性評估

#### 一、混凝土之耐久性

混凝土之耐久性係指在使用年限內能維持其物理特性與力學性質不致於發生嚴重劣化，以保障結構物的安全。根據 ACI Committee 201 對波特蘭混凝土(portland cement concrete)耐久性的定義，耐久性是指其抵抗風化作用(weathering action)、化學侵蝕(chemical attack)、磨蝕(abrasion)及其它劣化過程(process of deterioration)的能力。亦即在曝露的環境下，具耐久性的混凝土能保持良好的外觀、性質與使用性。

由於環境的影響與材料孔隙結構的改變，材料性質多隨著時間而變化，因此可以說沒有材料具有不變的耐久性。工程上所注重的是結構物的使用年限，通常可以材料的耐久性來評估使用年限。而材料的耐久性是指構件劣化達到使用上不安全或是不具經濟性的生命週期(life cycle)。

結構物耐久性的評估上與力學性質、建築費用等一樣重要，其重要性可分三方面說明。首先就經濟效益而言，在整個建築物的生命週期( life cycle )中，總投資成本應包括興建成本與後來的維修補強成本，如果在設計階段考量耐久性的因素，則可以降低維修補強的成本。就環保觀點而言，提高材料的耐久性即代表了避免自然資源的浪費[38]。最後，混凝土近年來廣泛使用在不同的結構上，諸如儲油槽、儲氣槽、核能電廠等多面臨高溫、低溫、高壓等異於一般環境的條件，甚至於濱海的橋梁上。所以耐久性需求更顯重要。圖 2.2 是混凝土耐久性與性能的關係圖[29]。

混凝土劣化的原因有許多，大致可分為物理性與化學性兩方面。物理性的原因如圖 2.3 所示[37,38]，表現出來的現象即為面層的破壞與裂縫的擴張；化學性的原因如圖 2.4 所示[37,38]，最常見的原因是由於侵蝕性物質與混凝土中的漿體產生化學反應。除此之外，混凝土亦可能因鋼筋腐蝕造成剝落(spalling)及裂縫擴張等現象。自然狀態下，混凝土的劣化是由許多因素混合造成的，但若能瞭解個別因素影響機理並提出預防之道，必能提升整體混凝土的耐久性

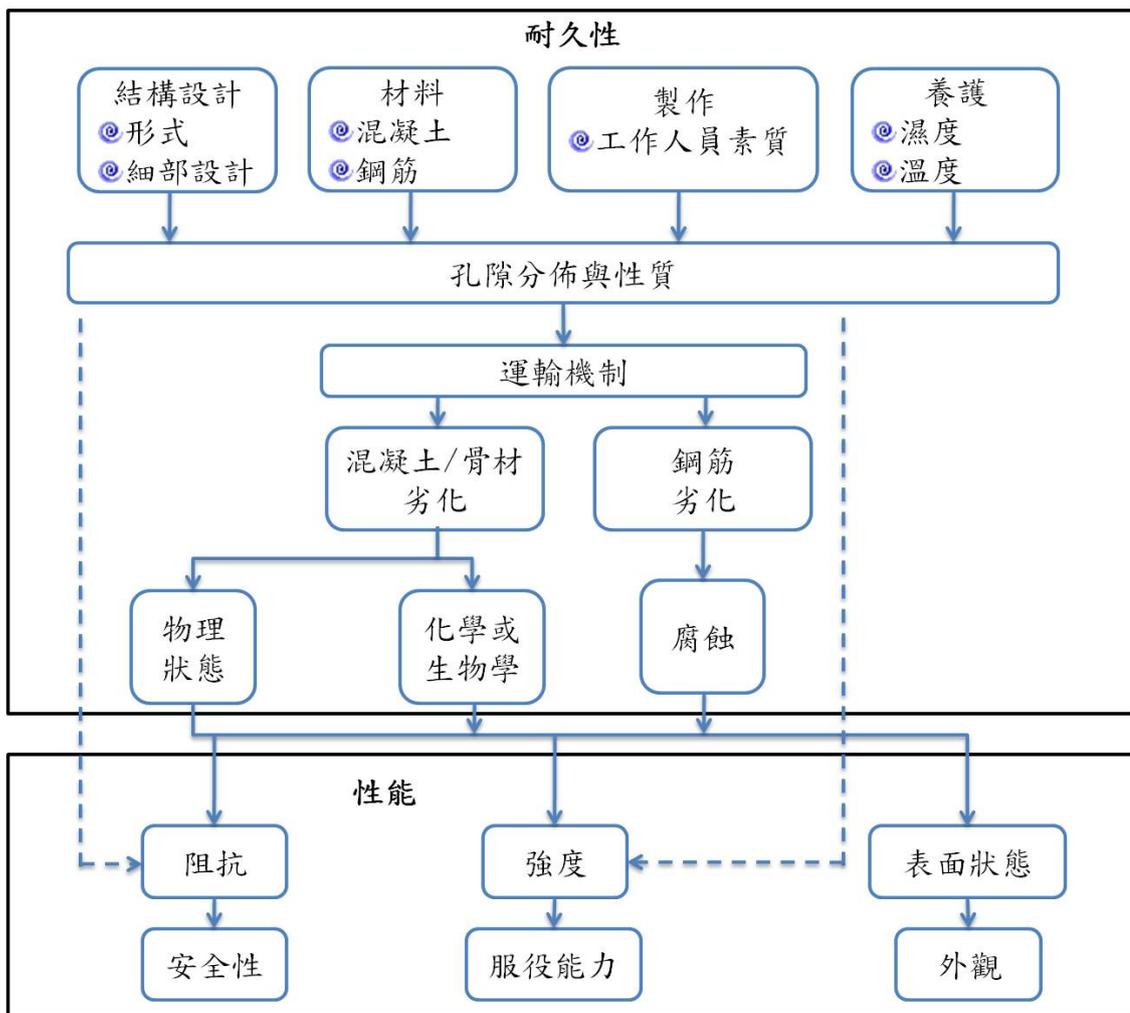
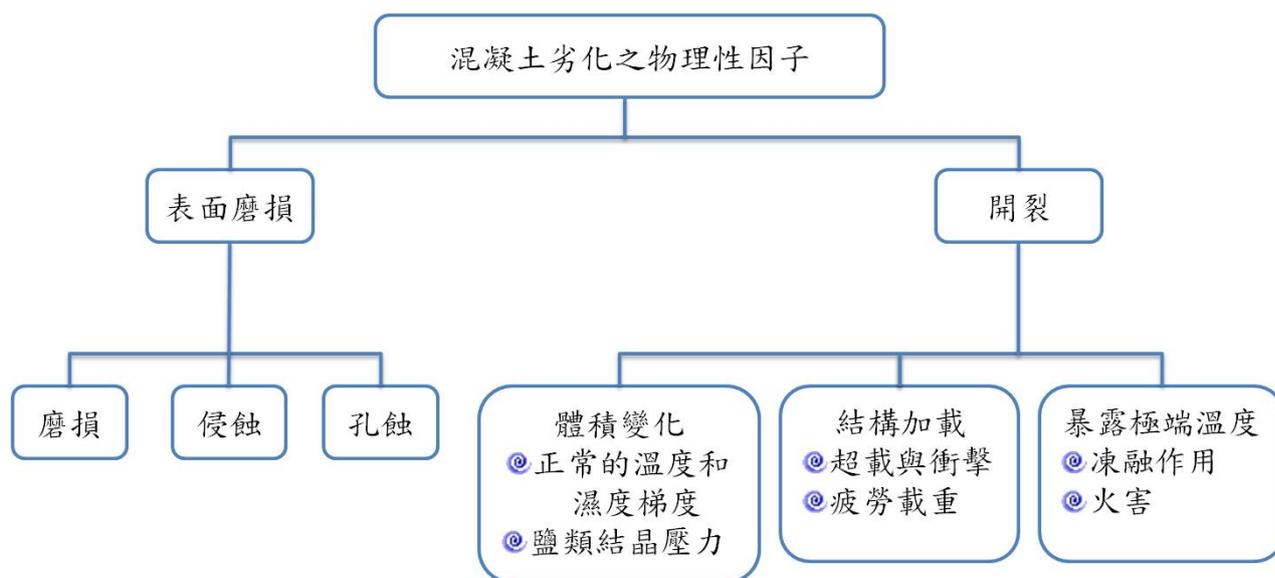


圖 2.2 混凝土耐久性與性能關係圖

(資料來源:文獻[29])



**圖 2.3 混凝土劣化之物理性因子**

(資料來源：文獻[37,38])

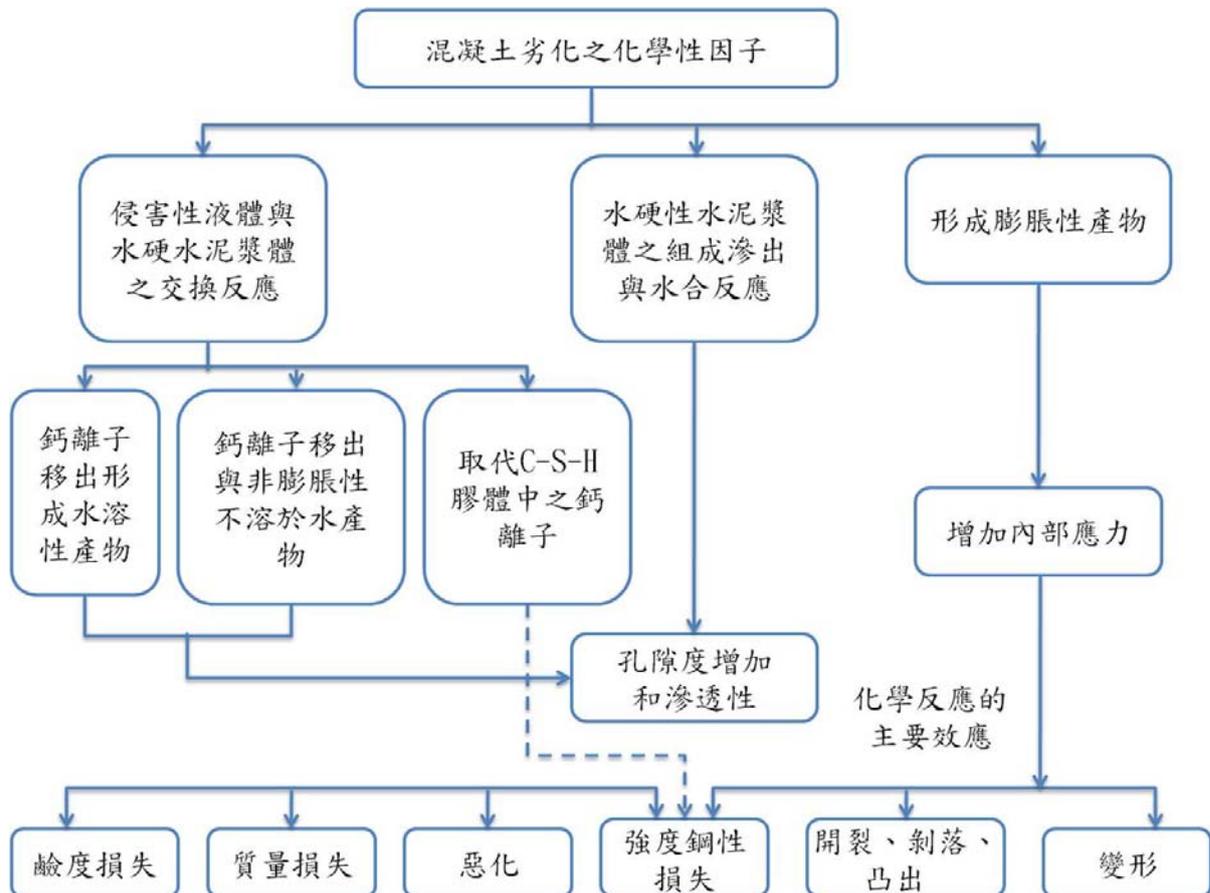


圖 2.4 混凝土劣化之化學性因子

(資料來源: 文獻[37,38])

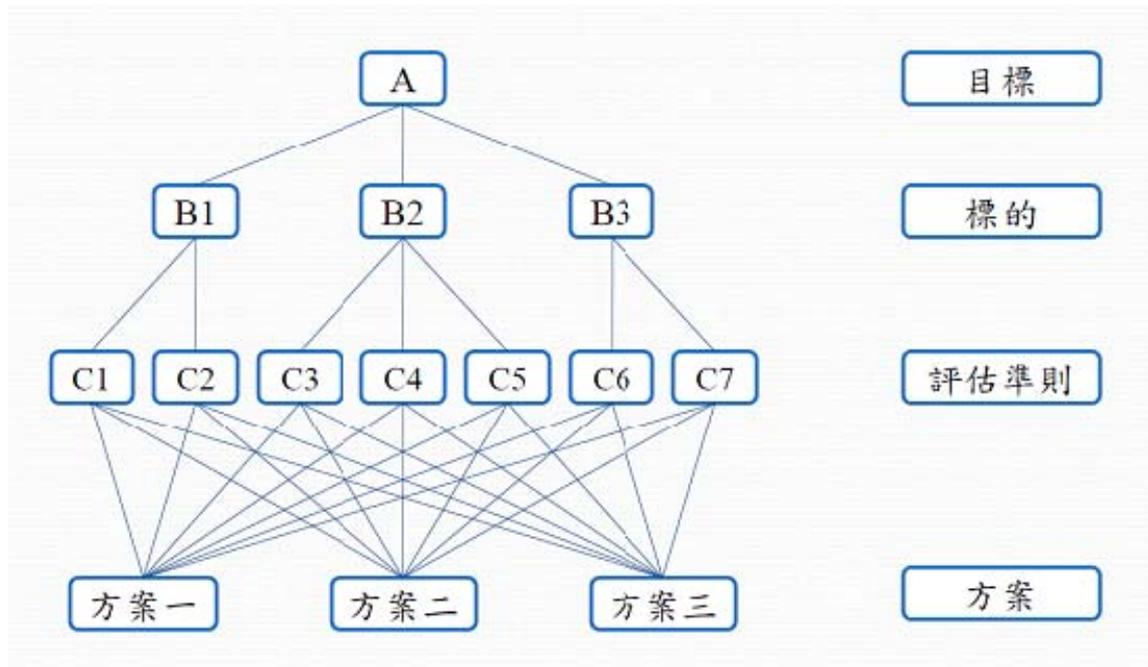
## 二、耐久性評估方法

耐久性的評估方法主要分為內政部營建署訂頒提供縣政政府使用之「A.B.C.D 評等法」及交通部國道高速公路局與公路總局使用之「D.E.R&U 評等法」、層級分析法(AHP)[45]、模糊數學法[52]以及網絡分析法[43]等。這些方法主要都需要通過以下步驟來完成評估

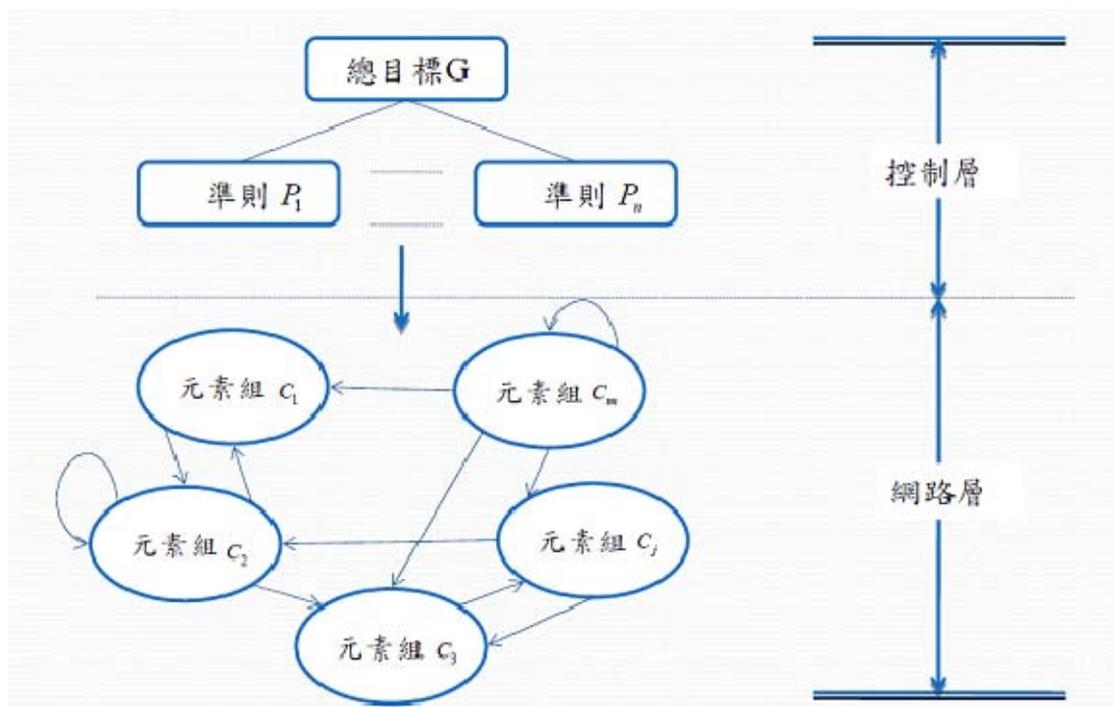
- (1) 定義何為評估所需使用的項目，此項目必須為影響因子；
- (2) 定義何為目標，如耐久性指標等，此項目為輸出目標；
- (3) 建立影響因子的量化（如果非為量化數據，則應採用數學手段將之量化）；
- (4) 建立各影響因子對輸出目標的響應函數（若為線性函數則是建立權重矩陣；若為非線性，則視響應函數定義而建立相關係數）
- (5) 定義目標函數的合理合格值或分類區間(如耐久性指標達 0.8)
- (6) 比較目前的目標函數值處於何範圍，作出評估與判斷。

以上的各種方法，其數學操作模式都已經制式化，而在處理上比較會出現差異的反而是在於步驟(1)、(2)、(4)以及(5)，因為這些都涉及到建模者本身如何去定義一個系統，也就是說這些與經驗還有判斷有關，受到人為影響以及當初問卷設計的影響較大。如何盡量排除人為因子，其實是評估法成功與否最重要的關鍵，因此選擇一個優良的方式來排除人為因子，是極為重要的。

在使用專家評價的方法當中，比較常用的是層級分析法(AHP)以及網絡分析法(ANP)。兩者的差異在於層級分析法假設每層的因子間為獨立的，不會互相影響，且層與層之間的傳遞為單線，不能夠有回饋產生；而網絡分析法則允許控制層之各因子可以互相影響，並可以回饋。理論上來說層級分析法是網絡分析法的特例，也就是說網絡分析法可以適用的範圍更為廣闊。然而，在數學操作上以及問卷的設計上，網絡分析法要比層級分析法要困難得多。網絡分析法與層級分析法的示意圖見圖 2.5 所示。



(a) 層級分析法架構圖



(b) 網路分析法架構圖

圖 2.5 層級分析法與網路分析法架構圖

(資料來源:文獻[43, 45])

## 結構材料生命週期評估基準與耐久性評估指標之建立(1)

國內學者[6]曾經使用層級分析法來分析橋梁耐久性，在他們的方法中，影響橋梁耐久性的因子分為五類：環境因子、施工因子、設計因子、材料因子、維護營運。根據層級分析法的精神，這代表這五類因子間是彼此互相獨立的。不過，這樣子的假設，並不理想。比如說材料因子中氯離子的濃度，明顯地是與曝露的地緣環境有關，故假定這兩類因子間無關是不合理的。

中國大陸學者[14]則提出不一樣的見解，他們認為材料因子為主要的考量，而其他的影響如環境因子可以相乘的方式視為放大或折減因子作用在材料因子上。這樣子的看法就是說，當我們對鋼筋混凝土橋梁耐久性得到一樣的指標時(如一樣的氯離子濃度、混凝土抗壓強度、...)，則不同的地域環境將會造成不同的最後評價。不過，在文獻[14]中，他們採用單一層級，將混凝土現況的指標與腐蝕的指標混在一起；本研究將會把指標分為兩類：即為混凝土現況指標與腐蝕現況指標。並且在腐蝕現況指標上，文獻[14]並沒有將腐蝕電流(或是腐蝕速率)作為指標，而是以半電池電位當作指標。理論上來說半電池電位僅能提供鋼筋腐蝕的熱力學趨勢，而並不是能夠量化來評斷腐蝕的程度，故實應將腐蝕速率納入。

而在文獻[14]中，也針對不同構件部位給予不同權重，再由各別構件之耐久性評價乘上權重總合而得到整體耐久性評價。本研究基本上也將採取同樣思考邏輯，設計本土化適用之權重。值得一提的是，建築物各部位的重要性其實跟設計法、環境等有關係，所以可以根據不同建築物由專家自訂出不同之權重出來。

除了使用專家給予權重之評估法以外，另外也可以用定量計算的方式來達成評估的目標。這必須要透過完成服務功能、劣化因子、材料劣化程度、時間之關係，如圖 2.6 所示[51]。當然其中的關係乃是基於實驗的經驗公式或是透過簡單推導出來的公式來評估。透過此種方法，則可以知道單一因子(如碳化)對於某一構件耐久性的影響(材料劣化程度)，甚至可以知道對於服務功能的影響(如梁之抗彎矩能力)，進而評估單一構件之壽命。

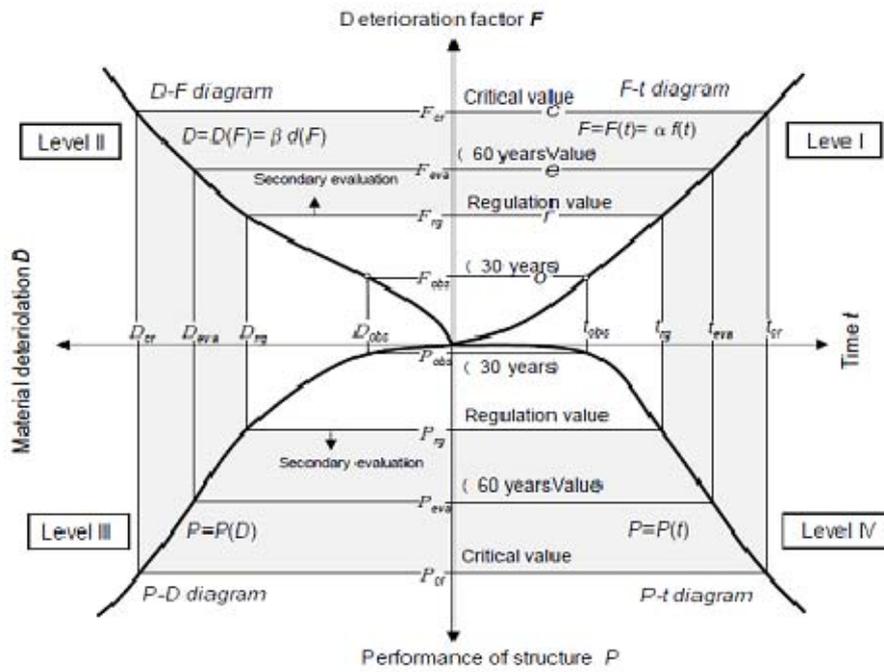


圖 2.6 服務功能、劣化因子、材料劣化程度、時間關係圖

(資料來源:文獻[51])

### 三、橋梁 D. E. R. & U. 目視檢測評估簡介

目視檢測之準則影響未來維修工法與構件選定之決策。過於簡略之檢測評估準則，無法提供足夠的資料給予管理單位進行維修決策；但太過複雜之檢測評估準則，卻會增加現場檢測人員之負擔。選擇適合的方法不但對整個橋梁檢測工作時程、成本有相當的影響，對於橋梁耐久性評估與建議的分析方法建立亦是以此為輸入與回饋的參考資料。

目前國內主要採用之檢測準則為 D.E.R.&U. 以及 A.B.C.D. 準則等，檢測準則之概要重點如表 2.1 所示。其中，D.E.R.&U. 檢測準則為昭凌工程顧問公司為國道高速公路局開發橋梁管理時制訂之目視檢測評估準則。A.B.C.D. 檢測準則為中華工程顧問公司為台灣省住都處所編定的「混凝土、鋼橋一般檢查手冊」中所制訂之目視檢測準則。雖然種檢測準則各有其優劣，但是於「台灣地區橋梁管理系統」開始，全國使用之目視檢測標準則以 D.E.R.&U. 檢測準則為主要目視檢測標準。

表 2.1 國內目前常用檢測準則

評估準則	檢測類別	檢測項目 分類方式	劣化評等標準	橋況評估指標	採用之機關
D.E.R.U.	目視檢測	依構件分為21項目	分為 1~4級	分為 CI、PI、FI、OPI 四種指標	高公局公路總局、基隆港務局
儀器檢測	分為 7種檢測項目				
A.B.C.D. 評等法	目視檢測	分為 8大類，及其細分項目	分為 A~D級	無	鐵路局住都處台北縣政府
危險度評等法	耐震能力 耐洪能力 承載能力	分成初步評估與詳細評估	加權分數計算法	以分數高低評定安全度	交通部科技顧問室研究使用

(資料來源：混凝土、鋼橋一般檢查手冊)

D.E.R.&U. 檢測準則中分別為，「劣化程度」(Degree)、「劣化範圍」(Extent)、「對

橋梁結構安全性與服務性之影響」(Relevancy)、「急迫性」(Urgency) 四個項目，前三個項目為檢測評估項目，最後之「急迫性」則為評估是否需緊急維修處理之項目如表 2.2 所示。而檢測評分等級則分為四等，評估值為 1~4，若評估值為 0，則代表特殊情形造成無法檢測與判定。

表 2.2 D.E.R.&amp;U.評估準則

劣化程度	無此項目	良好	尚可	差	嚴重損壞
劣化範圍	無法檢測	小於 10%	10% ~ 30%	30% ~ 60%	60%以上
影響程度	無法判別	微	小	中	大
維修急迫性	無法判別	例行維護	三年內	一年內	緊急處理

(資料來源：混凝土、鋼橋一般檢查手冊)

採用以 D.E.R.&U.檢測準使用上有以下優點：

1. 簡化電腦資料之輸入：僅針對有劣化之構件進行評估與記錄，可節省記錄不必要的資料。此外，記錄檢測之資料均為評分分數，對電腦的量化分析與處理有極佳的相容性。
2. 強調缺陷對橋梁整體重要性之影響：不僅只針對劣化嚴重程度與劣化範圍進行評估，亦可對缺陷對橋梁整體重要性之影響進行評估，其中包括對橋梁安全性與交通性之影響。
2. 可簡化檢測工作：僅需針對有劣化現象之構件進行評估，可凸顯橋梁損壞之重點。

#### 四、層級分析法的原理

因本研究中擬採用層級分析法，僅將層級分析法原理介紹如下。假設  $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  為多目標價值模型中所考量之特性因子，而  $\{w_1, w_2, \dots, w_n\}$  為各特性因子相對應之權重。以上可以看出來，若是要同時決定出所有之權重值，有其相當的困難性，並可能造成嚴重之誤差。層級分析法則應用特性因子之間的兩兩比較，得到特性因子之間的相對權重比值，形成一權重比例矩陣 A 如下所示：

結構材料生命週期評估基準與耐久性評估指標之建立(1)

$$A = \begin{bmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_{n-1} & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 & \dots & w_2/w_{n-1} & w_2/w_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \dots & w_n/w_{n-1} & w_n/w_n \end{bmatrix} \quad (\text{式 2.1})$$

經由一些簡單運算，可以發現以下關係存在

$$Aw = nw \quad (\text{式 2.2})$$

當已知矩陣  $A$ ，若要求  $w$  向量，此在數學上就是一特徵值問題，也就是解一  $Aw = \lambda w$  的特徵值問題。經由解出以上特徵值問題，就可以求得各特性因子之權重值。並且由線性代數理論可知，當求解一特徵值問題時，若矩陣  $A$  中之元素有極小擾動，將會對特徵值造成影響。如果將特徵向量問題表為下式：

$$Aw = \lambda_{\max} w \quad (\text{式 2.3})$$

若兩相比較之值具有一致性，則所得上式中之最大特徵值  $\lambda_{\max}$  將會相當接近  $n$  (當然實際上只會大於或等於  $n$ )，而其它之特徵值則會非常接近 0。由此，可以利用  $\lambda_{\max} - n$  之值來評估一致性及所得結果合理性。定義一致性指標 C.I 為

$$C.I. \equiv \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (\text{式 2.4})$$

由(2.4)可見，當一致性指標越接近 0，則代表所選取的權重越合理。

而由評估尺度 1~9 所產生的正倒數矩陣，在不同階數下，會產生不同之 C.I 值，稱為隨機指標(random index; R.I.)。其中矩陣階數為 1~11 階的 R.I 值為取 500 個樣本所得知平均數；階數 12~15 的 R.I.值則為取 100 個樣本所得平均數。

在相同矩陣階數下，其 C.I.值與 R.I.值的比例稱為一致性比值(consistency ratio, C.R.)，也就是

$$C.R. = \frac{C.I.}{R.I.} \quad (\text{式 2.5})$$

當  $C.R. \leq 0.1$  時，則代表矩陣的一致性程度令人滿意。

在計算各層級要素間之權重以後，必須要再進行整體層級權重計算。首先須將 C.I. 值以及  $w$  值代入，求出整體一致性指標 CIH 以及整體隨機性指標，

$$CIH = \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{i=1}^m \omega_{ij} CI_{i,j+1} \quad (\text{式 2.6})$$

$$RIH = \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{i=1}^m \omega_{ij} RI_{i,j+1} \quad (\text{式 2.7})$$

其中  $\omega_{ij}$  代表第  $j$  層級第  $i$  個元素之總權重值， $CI_{i,j+1}$  代表第  $j+1$  個層級所有元素對  $j$  層級第  $i$  個元素之一致性指標， $RI_{i,j+1}$  代表第  $j+1$  個層級所有元素對  $j$  層級第  $i$  個元素之隨機性指標。最後將 CIH 除以 RIH，則可以得到 CRH。若是 CRH 值小於 0.1 時，表示所建立之層級結構及計算之權重值是可以接受的。若是 CRH 大於 0.1 時，應對評估權重向量  $W$  重新評比後，再計算新的 CRH 值，檢驗其值是否小於 0.1。

這種層級分析法的過程當中，會涉及到如何設計權重，在本計畫中擬使用舉辦專家會議決定權重的方法進行。

一般對於結構材料耐久性評估上，考量之重點涵蓋環境因素、材料因素、設計因素、施工因素及維護管理因素等五大層面，如圖 2.7 所示[14]。其中各層級所含之子層級大致如下：

- (1). 環境因素：鹽害潛勢、沖刷潛勢、土石流潛勢、溫溼度因素、二氧化碳...等。
- (2). 材料因素：水泥、粒料、摻料、水灰比、抗壓強度、電阻值...等。
- (3). 設計因素：保護層厚度、設計強度...等。
- (4). 施工因素：氯離子含量、搗實、養護、施工縫處理...等。
- (5). 維護管理因素：裂縫現況、腐蝕狀態、維修狀況...等。

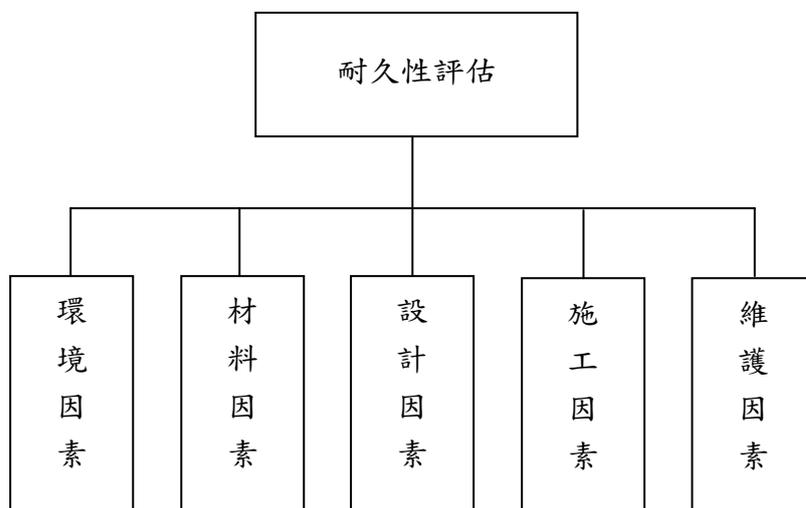


圖 2.7 耐久性評估架構圖

(資料來源:文獻[14])

## 第三章 生命週期評估

### 第一節 界定範圍與目標

#### 一、本報告生命週期評估之範圍界定如下：

1. 從原料取得(水泥、水、粒料、爐石粉、飛灰以及鋼筋)、原料運送及原料加工變為成品(混凝土拌合)到將組合料運送至現場為止。有關於鋼筋混凝土結構物在使用階段以及拆除/再利用階段均不在本研究之範圍內。

2. 本研究之質量流包括：

輸入：水、水泥、爐石粉、飛灰、鋼筋、粒料。

輸出：主要產品包括鋼筋混凝土構件

其它相關之空氣排放、水排放還有固體排放

本研究之能量流包括：

電能

油料

3. 本研究之邊界

- a. 電的輸入採用本國電力公司之數據。
- b. 水的輸入採用本國自來水公司之數據。
- c. 水泥採用本國數據或是假設生產工藝相差不多，由 Simapro 軟體中引用國外數據。
- d. 爐石粉數據採用本國數據。
- e. 飛灰採用本國數據。
- f. 鋼筋採用本國數據，並採用回收率為 0.8 計算；或是假設國內外製造工
- g. 粒料：採用兩種來源作分析，其一為使用陸地砂石，其二為採用由中國大陸船運砂石。

## 二. 本研究之目標

本研究主要是針對鋼筋混凝土使用之材料進行盤查分析，以提供建築師在設計階段針對設計方案，瞭解其對於環境之衝擊為何，從而可以選擇較為環保的設計方案。

表 3.1 相關數據及編號

編號	數據
LCI1	98 年砂石來源。
LCI2	河川進口砂石比例。
LCI3	98 年花蓮縣砂石來源統計。
LCI4	98 年花蓮縣砂石碎解場機具表。
LCI5	98 電力排放係數。
LCI6	挖土機、推土機、鏟土機耗油量。
LCI7	挖土機、推土機、鏟土機器具一小時產量。
LCI8	各類能源之熱值與 CO <sub>2</sub> 排放量計算。
LCI9	輪船燃油效率與貨運載重量。
LCI10	生產 1 噸水泥、爐石粉、飛灰 CO <sub>2</sub> 排放量。
LCI11	水泥業總耗能。
LCI12	高爐、電弧爐鋼胚及鋼筋耗能量及 CO <sub>2</sub> 排放量平均值。
LCI13	生產 1 度水耗能及排放 CO <sub>2</sub> 量。
LCI14	建材運輸公司資訊。
LCI15	大型預拌混凝土廠資訊。

(資料來源:本研究製作)

註:關於各編號詳細質量數據編寫於附錄

## 第二節 鋼筋混凝土原料生產階段

### 一、砂石的開採及生產

根據經濟部礦務局98年度臺灣地區砂土石產銷調查報告顯示，國內砂石總供應量為5,551萬立方公尺(LCI1)，其中河川砂石有2,318 萬立方公尺，占總供應量之41.76%，陸上砂石有1,415 萬立方公尺，占總供應量之25.50%，進口砂石1,614 萬立方公尺，占總供應量之29.08%，礦區礦石及批註土石203 萬立方公尺，占總供應量之3.66%(詳如圖3.1、表3.2)。

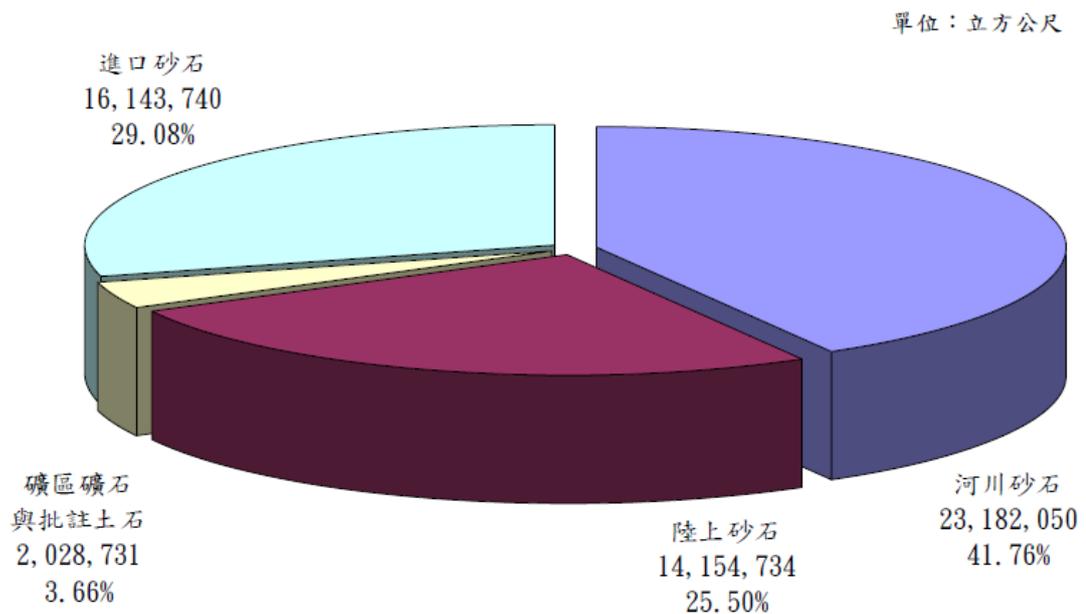


圖 3.1 98 年全國砂石供應量統計圖

(資料來源：經濟部礦務局 98 年度臺灣地區砂土石產銷調查報告)

表 3.2 98 年全國砂石供應量表

單位:立方公尺

項目	河川砂石	陸上砂石	進口砂石	礦區礦石	總供應量
合計	23,182,050	14,154,734	16,143,740	2,028,731	55,509,255
百分比	41.76%	25.50%	29.08%	3.66%	100%

(資料來源:經濟部礦物局)

由上表可知，國內砂石主要來源為河川砂石、陸上砂石以及進口砂石(不考慮營建剩餘土石)。根據礦務局統計河川砂石以東部宜蘭、花蓮一帶居多，而進口砂石又以大陸為大宗約佔 97%(其他地區為越南、菲律賓等地)(LCI2)。

台灣砂石產業產銷步驟，首先經由原料地開挖、運送至碎解洗選場進行碎解洗選處理，再運送至砂石需求地三步驟，如圖 3.2[4]。

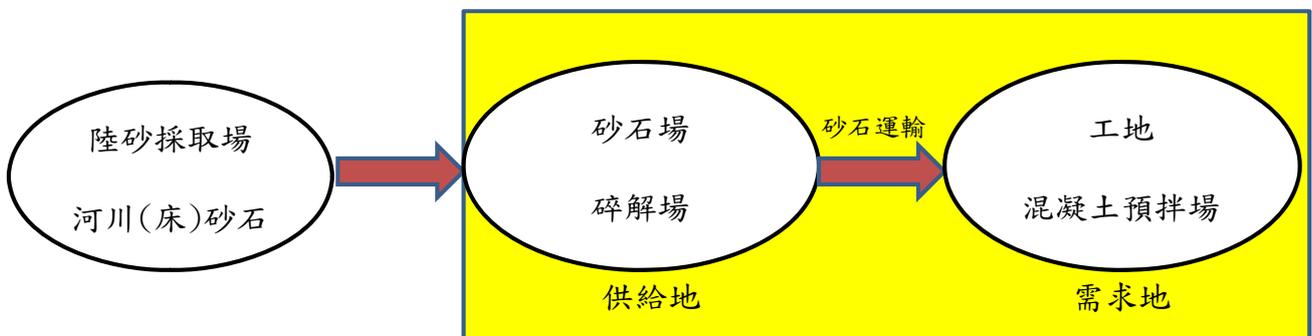


圖 3.2 砂石產業產銷步驟示意圖

(資料來源:本研究製作)

因河川砂石主要以宜蘭、花蓮為主要來源，所以本研究以花蓮縣為例，估算其河川及陸上砂石採取以及各碎解場之總耗電量和總砂石生產量進而計算生產1立方公尺砂石需耗費多少電能。98年每月花蓮縣平均生產量為砂155,533立方公尺，碎石181,941立方公尺，級配1457立方公尺，合計338,931立方公尺，參考表3.3(LCI3)。砂石碎解洗選場至98年底現存場數共有58場，其使用機具動力來源：計35家使用台電，18家自備發電機。其設備經統計，機械設備部分：卸料口53處、碎礦機120部、洗選機90部、篩分機113部、輸送帶588條、地磅46處。重機車輛部分：挖掘機92部、鏟裝機76部、卡車164部。各家機具設備情形，詳如表3.4(各機具以代號表示,代號資訊見表說明)(LCI4)：

表 3.3 花蓮縣土石採取、洗選場平均生產量統計表

土石採取區數			碎解場選場數			平均生產量(m <sup>3</sup> /月)			
河川	陸上	小計	河川	陸上	小計	砂	碎石	級配	合計
0	7	7	2	56	58	155,533	181,941	1457	338,931

(資料來源:經濟部礦物局)

表 3.4 花蓮縣砂石碎解洗選場機具設備概況表

項次	場名	契約電量	自備電量	機械設備						重機車輛			
				A1	A2	A3	A4	A5	A6	B1	B2	B3	B4
1	和順建材股份有限公司	500		1	1	1	1	4	1		1		
2	玫豪股份有限公司	720			1	1					1		
3	泰暘國際開發有限公司		300	1		2		4	1	1	1		1
4	振崇企業有限公司	250		1	1	2	1	12		2	2		3
5	南濱砂石廠有限公司	800		1	2	1	2	13		1	2		

表 3.4 花蓮縣砂石碎解洗選場機具設備概況表(續)

6	建安瀝青工業有限公司	300		2	2		2	6	1					
7	天下砂石公司		200	1	2	2	1	18	1	2	1		1	
8	泰溢(富國新)股份有限公司		850	1	3	3	2	13	1	1	1		2	
9	鳳勝股份有限公司	480		1	3	1	4	13	1	2	2		1	
10	景裕砂石行	510		1	3	1	3	10	1	1	1			
11	宏裕企業社	470		1	1	3	3	18	1	2	2		1	
12	駿益(合穩)興業股份有限公司	800		1	4	2	3	14	2	2	2		2	
13	興國砂石股份有限公司		750	1	3	4	7	28	1	3	1		1	
14	力擘實業股份有限公司		1800	1	4	2	3	12	1	3	1		9	
15	花建實業有限公司	300		1	2	2	2	10	1	4	1		4	
16	通達砂石行	300		1	2	1	2	6	1	1	1			
17	立得砂石股份有限公司	400		1	2	3	3	8	1	1	1		2	
18	日昇砂石公司		1800	1	4	2	3	12	1	3	2		9	
19	廣得砂石行	600		1	1	1	1	22	1	2	2	2	5	
20	祥裕砂石行		1500	1						1	1		3	
21	友豐預拌凝廠股份有限公司		350	1	1	2	1	11		1	2		4	
22	政旺企業有限公司	800		1	2	1	1	8	1	1	1		1	
23	鈺峻興業有限公司		350	1	3	2	1	7	1	1	1		3	
24	中心埔資源開發股份有限公司	400		1	3	1	3	8	1	1	1		1	
25	良豐行	20		1		1	1	2		1			2	
26	爵曜企業有限公司	460		1	1	1	3	11	1	1	1			
27	宏怡企業社	設場中												
28	萬里砂石行													
29	立順砂石行													
30	絃煜股份有限公司													

1.代號說明 A1:卸料口 A2:碎礦機 A3:洗選機 A4:篩分機 A5:輸送帶 A6:地磅

B1:挖掘機 B2:鏟裝機 B3:推土機 B4:卡車(礦場用)

2.契約電量為每月統計單位為 kw

3.資料來源:經濟部礦物局

表 3.4 花蓮縣砂石碎解洗選場機具設備概況表 (續)

項次	場名	契約電量	自備電量	機械設備						重機車輛			
				A1	A2	A3	A4	A5	A6	B1	B2	B3	B4
31	立光建設股份有限公司	300		1	3	2	4	12		2	1		2
32	東濱企業行		950	1	2	3	2	11		2	2		5
33	友正預拌混凝土廠有限公司	350		1	2		2	17	1	1	2		5
34	友正砂石有限公司		120	1	3	2	2	16	1	2	2		14
35	長盟砂石行		800	1	2	1	2	15	1	2	1		5
36	正昇企業有限公司	500		1	4	1	3	17	2	1	2		5
37	集耀有限公司		1900	1	4	5	5	16	1	4	2		3
38	威神企業有限公司	1000		1	4	2	3	13	1	2	2		2
39	同海砂石股份有限公司	640		1	2	4	6	14	1	2	3		4
40	東鑒企業公司		2100	1	7	3	5	17	1	2	1		20
41	福田實業有限公司	700		1	2	4	1	14	1	2	3		4
42	益鉅砂石廠	300		1	1	2	2	10	1	4	2		3
43	理新礦業股份有限公司	400		1	2	2	2	12	1	1	1		1
44	福田瀝青混凝土有限公司	500		1	1	1	1	4	1	3			
45	台灣鑛資工業股份有限公司	700		1	2	1	2	9	1	1	1		2
46	筍山有限公司	99		1	4	1	1	5	1	2	1		1
47	東興砂石行	500		1	2	2	3	11	1	1	1		2
48	弘華砂石有限公司	150	450	1	3	2	2	12		2	2		3
49	瑞岡砂石行		500	1	1	1	3	20	1	5	2		6
50	陸紀實業有限公司	500		1	2	1	1	5	1	1	1		1
51	聯騰砂石股份有限公司	550		1	1	1	1	7	1	3	1		3
52	三多砂石行		300	1	1	1	1	7	1	1	1		2

表 3.4 花蓮縣砂石碎解洗選場機具設備概況表 (續)

53	展信實業有限公司	120		1	3	1	1	20	1	1	1		6
54	磊信股份有限公司	120		1	3	1	1	8	1	2	1		2
55	慶豐陞砂石行	600		1	2	2	2	8	1	1	1		2
56	鴻旭砂石有限公司 (安通)		500	1	2	1	2	10	1	1	2		3
57	大元行		700	1	2	1	2	14	1	2	1		4
58	錦山砂石行	100		1	3	1	1	5	1	2	3		3

1.代號說明 A1:卸料口 A2:碎礦機 A3:洗選機 A4:篩分機 A5:輸送帶 A6:地磅

B1;挖掘機 B2:鏟裝機 B3:推土機 B4:卡車(礦場用)

2.契約電量為每月統計,單位為 kw

3.資料來源:經濟部礦物局

假設上表各家砂石場每月使用總電量約為契約電量,表 3.3 統計花蓮縣各家碎洗(選)契約電量為 32,459(kw),轉換為每月使用總電能為 23370480(kwh),表 3.2 統計花蓮縣總共生產 338,931(m<sup>3</sup>),要計算生產每平方公尺的砂石需耗費多少電能,其公式如式 3.1:

$$\text{單位:kwh} \quad \text{單位:m}^3 \quad \text{單位:(kwh/m}^3\text{)}$$

(砂石場之總耗能) / (砂石總產量)=產生 1 立方公尺砂石耗電能多少

(式 3.1)

$$23370480 \quad / \quad 338,931 \quad \doteq \quad 68.95$$

經由經濟部能源局 98 年電力排放係數,使用 1 度電(kwh)會排放出 0.623kg 的 CO<sub>2</sub>(LCI5),計算由電力換算生產每立方公尺砂石需耗費多少 CO<sub>2</sub>,算式如式 3.2:

$$\text{單位:(kwh / m}^3\text{)} \quad \text{單位: kg}$$

(產生 1 立方公尺砂石耗電能)×(98 年電力排放係數)=(換算 CO<sub>2</sub> 量)

(式 3.2)

$$68.95 \quad \times \quad 0.623 \quad = \quad 42.96$$

卸料口、碎礦機、洗選機、篩分機、輸送帶等機具,幾乎都是以電力為其動力來源,而挖掘機、鏟裝機、推土機、卡車(礦場用)需用到柴油來進行運作,所以必須考慮其耗油量計算。但因其大小型號耗油量差異性頗大,也因碎解場或礦場大小不依,選用機具也不同,故本研究選定其

中幾樣型號作為參考，訪問幾家製作及販賣挖掘機等機具的大型公司，調查結果如表 3.5、表 3.6、表 3.7、表 3.8(LCI6)，表中耗油量低代表為待機或啟動狀態所使用之油量，中代表為持續運作不過中途有間斷過，高代表為持續不間斷的持續運作。

表 3.5 挖掘機型號、耗油量

型號	PC220-7	PC450-7
承斗量	1.0m <sup>3</sup>	2.0m <sup>3</sup>
耗油量	低: 6.2~6.9 L/hr	低: 13.9~25.7 L/hr
	中: 8.9~13.4 L/hr	中: 28.7~32.1 L/hr
	高: 13.4~27.3 L/hr	高: 13.4~27.3 L/hr

(資料來源：多家販售大型機具的有限公司)

表 3.6 推土機型號、耗油量

型號	D41E-6	D155-5
操作重量	10700kg	22500kg
耗油量	低: 4.8~9.6 L/hr	低: 12.4~24.7 L/hr
	中: 9.6~14.4 L/hr	中: 24.7~37.2 L/hr
	高: 14.4~19.7 L/hr	高: 37.2~49.6 L/hr

(資料來源：多家販售大型機具的有限公司)

表 3.7 鏟裝機型號、耗油量

型號	WA250-5
承斗量	4.0 m <sup>3</sup>
耗油量	低: 7.2~10.1 L/hr
	中: 10.1~12.7 L/hr
	高: 12.7~16.7 L/hr

(資料來源：多家販售大型機具的有限公司)

表 3.8 卡車型號、耗油量

型號	HD405-6
承斗量	
耗油量	低:19.5~29.7 L/hr
	中:29.7~39.2 L/hr
	高:39.2~53.5 L/hr

(資料來源：多家販售大型機具的有限公司)

根據北部幾家砂石碎解及礦場口頭詢問的結果，使用挖掘機等機具 1 小時約可生產 200 平方公尺的砂石(LCI7)，假設持續運作一小時，約耗費 170 升的柴油（用高耗油量計算），計算生產每立方公尺砂石需耗費柴油，其公式見式 3.3：

$$\text{單位:L} \qquad \qquad \qquad \text{單位:m}^3 \qquad \qquad \qquad \text{單位:L/m}^3$$

耗費柴油量機具/一小時採多少立方公尺砂石=每立方公尺耗油量

(式 3.3)

$$170 \quad / \quad 200 \quad = \quad 0.85$$

根據 IPCC(聯合國氣候變化政府間專門委員會)的準則可計算各項能源的 CO<sub>2</sub> 排放量，其步驟簡述如下：

- (1) 估計結構物各階段之能源使用量，並以原始單位表示之。例如 煤以公噸表示，燃料油以公升表示，天然氣以立方公尺表示。
- (2) 將不同能源的消費量由原始單位轉換為熱值單位，最後都轉換成為「TJ」(10<sup>12</sup> 焦耳)，以方便後續的計算。
- (3) 將各種能源的熱值單位乘上各自的碳排放係數(carbon emission coefficient, 取自 IPCC)，即可得到碳排放量的初步估計。
- (4) 扣除碳固定化(carbon sequestered)的部分。
- (5) 考慮到燃燒的不完全，將總碳排放量的初步估計在減去碳固定化的部分後，再乘上化石

能源的碳氧化率 99%(天然氣 99.5%)的折減。

(6) 將排放的碳 (以重量單位表示) 轉換成相應的二氧化碳, 即乘

上分子量的比值 44/12 即可得到各階段能源使用的二氧化碳排放量。

再依據經濟部能源局所頒布的『能源產品單位熱值表』(見表 3.9) 經計算結果可得知每使用 1 公升的柴油, 該能源相當會排放出 2.578kg 的 CO<sub>2</sub>(LCI8)。前段計算生產每立方公尺砂石需耗費 0.85 公升的柴油, 乘上每公升柴油會排放 2.578kg 的 CO<sub>2</sub>, 可得生產每立方公尺砂石需排放多少公斤的 CO<sub>2</sub>, 其公式見式 3.4:

$$\begin{array}{llll} \text{單位: L/m}^3 & & \text{單位: kg} & & \text{單位: kg} \\ (\text{耗費柴油}) \times (\text{柴油排放 CO}_2) = (\text{需排放多少公斤的 CO}_2) \\ 0.85 & & 2.578 & = & 2.19 \end{array}$$

(式 3.4)

根據表 3-8 也可換算耗費電能及使用柴油所換算的排放熱量如式 3.5、式 3.6

$$\begin{array}{llll} \text{單位: kwh} & & \text{單位:kcal} & & \text{單位: kcal} \\ (\text{耗費電量}) \times (\text{熱值轉換單位}) = (\text{電力所換算的排放熱量}) \\ 68.95 \quad \times & & 860 & \simeq & 59297 \end{array}$$

(式 3.5)

$$\begin{array}{llll} \text{單位: L/m}^3 & & \text{單位:kcal} & & \text{單位: kcal} \\ (\text{耗費柴油}) \times (\text{熱值轉換單位}) = (\text{柴油所換算的排放熱量}) \\ 0.85 \quad \times & & 8400 & = & 7140 \end{array}$$

(式 3.6)

表 3.9 柴油及電力之熱值與 CO<sub>2</sub> 排放量計算

使用能源別	單位	熱值單位 (kcal/單位)	熱值轉換 單位 (TJ)	碳排放係 數 (T-C/TJ)	碳氧化率	碳固定化 比率	CO <sub>2</sub> 排放量 (kg-CO <sub>2</sub> /單 位)
柴油	公升	8400 (自 88 年 起)	3.51624E-05	20.2	0.99	0	2.578
電力	度	860	-	-	-	-	0.623 (98 年)

(資料來源:羅紹文,「預力 I 型樑橋之二氧化碳排放量評估」, 2010)

綜合以上,生產每立方公尺的河川及陸上砂石需耗費 66437(kcal)(電力轉換+柴油轉換)的能量以及 45.15(kg)(電力轉換+柴油轉換)的 CO<sub>2</sub>,本節一開始提到國內的砂石來源來自河川及陸上砂石的約占 70%,進口砂石約占 30%左右,故以上之計算結果須再乘上 0.7,不過,本研究因研究對象主要是針對國內做環境衝擊評估,所以在進口砂石部份不考慮在大陸地區開挖礦場及碎解場之耗能,只計算由貨櫃船海運來台所耗費之油量轉換而來的耗能及 CO<sub>2</sub>(貨櫃船油量使用主要由國所提供),耗能及 CO<sub>2</sub> 排放量以 70%來自河川及陸上砂石及 30%來自進口砂石計算其結果,如式 3.7:

單位: kg

(河川及陸上砂石排放 CO<sub>2</sub> 量) × (砂石來源比例)

單位: kg

= (國內排放 CO<sub>2</sub> 量由河川及陸上來源所提供) (式 3.7)

$$45.15 \times 0.7 = 31.61$$

同理可得耗能为 46506 (kcal)

國內進口砂石來源,約 97%主要仰賴於中國大陸,3%則來自菲律賓及越南等地,從中國大陸進口來台的航運路線總共有 2 條,一條是以廣東珠江一帶運送至台中港、高雄港、安平港,一條是以福州閩江一帶運送至台北港、基隆港。運載大陸砂石之貨船主要有以下之特色[4]:

1. 船隻主要以散裝船為主,一般都是以雜貨船改裝而成。

2.船齡幾乎都超過 15 年以上。

3.載重噸約在 1 萬~1 萬 5 噸之間。

有關乘載大陸砂石貨船的資料表，見表 3.10。本研究以福州閩江一帶運送至台北港、基隆港這條航運路線，詢問有船隻航行這條路線的 A 船運公司，得到船隻資料如表下(LCI9):

船名:xxx 輪 註冊港:香港

船舶總噸: 約 16500 船舶淨噸:約 8150

貨艙容積:約 32000 立方公尺(散裝): 31200 立方公尺(包裝)

耗油量:航行時約 0.2(海哩/公升)燃料油,不考慮停港時耗油量。

表 3.10 乘載大陸砂石貨船資料表

中文船名	英文船名	總噸位	載重噸	製造年份	國籍
東方星	LONG XING	20925	24000	1971	柬埔寨
大聖	DA SHEN	17107	24000	1982	巴拿馬
興華	XING HUA	16699	24000	1977	香港
藍天客	SKYTEC	16368	22000	1981	香港
永祥	EVER FORTUNE	14750	18000	1981	吐魯瓦
泰順	TAI SHUN	11638	17000	1977	香港
建華	JIAN HUA	11280	17000	1975	巴拿馬
國砂	GOLD SAND	10826	16500	1979	巴拿馬
太陽星	SUN STAR	7409	12000	1978	柬埔寨

(資料來源：王傳偉，「台灣北部地區船貨運供應鏈管理相關問題之研究」，2006)

每一條船的輸出馬力不同,所以耗油量也就不同,這也牽涉到主機保養的問題,更牽涉到載貨量的多少以及天候,只要其中一項有變化,所耗費的油量就會不同,故本研究假設全體砂石貨船都為上述調查船隻之耗油量，進而計算其 CO<sub>2</sub> 排放量，假設此船由基隆港出發，至福州閩江一帶載運 32000 立方公尺的砂石，再回基隆港約航行 290 海哩，計算總共需耗費多少燃料油,如式 3.8 表示:

結構材料生命週期評估基準與耐久性評估指標之建立(1)

$$\begin{matrix} \text{單位:海哩} & & \text{單位:海哩/公升} & & \text{單位:公升} \\ (總航行海哩) & / & (\text{燃油效率 } 0.2) & = & (\text{總共需要燃料油}) \end{matrix}$$

(式 3.8)

$$290 \quad / \quad 0.2 \quad = \quad 1450$$

根據表 3.9 每耗費 1 公升燃料油會排放 3.078 公斤的 CO<sub>2</sub>，由表 3.9 可知 1450 公升燃料油需排放約 4463 公斤的 CO<sub>2</sub>，運載 32000 立方公尺砂石排放約 4463 公斤的 CO<sub>2</sub>，分到運載 1 立方公尺砂石約排放 0.14 公斤的 CO<sub>2</sub>。

進口砂石約占所有砂石來源的 30%，故如同式 3.7 所示，可得排放 0.042 公斤的 CO<sub>2</sub> 由進口砂石來源所提供的。同理根據表 3.9 燃料油所換算的熱值單位也可得 131(kcal)的耗能由進口砂石來源所提供的。表 3.11 為整理生產 1 立方公尺的砂石耗能量及排放 CO<sub>2</sub> 量。

**表 3.11 生產 1 立方公尺的砂石耗能量及排放 CO<sub>2</sub> 量**

項目	數量
耗能(kcal)	46637(kcal)
CO <sub>2</sub> (kg)	31.75(kg)

(資料來源:本研究整理)

## 二、水泥及添加材料開採及生產

製造水泥的主要來源有石灰石、矽砂、黏土、石膏以及鐵渣，石灰石在開採破碎後，依表 3.12[15]之比例與矽砂、黏土、石膏及鐵渣混合而成。其製造過程主要分為生料製備、熟料燒成和水泥研磨三個部分，其簡述如下：

1. 生料製備：首先利用壓(鄂)碎機將石灰石進行粗(破)碎，按傳統工法是先經過一次破碎至大小在 100mm 左右的塊料，或再經第二次破碎至小於 25mm 的塊料(近年來已發展一次即破碎至小於 25mm 的塊料)，再利用刮料機將石灰石碎石刮進傳送帶中，最後送至生料磨(可將原料

磨成規定細度的粉末)中研磨，研磨中藉由靜電集塵器來分離及去除氣體中的粉塵顆粒，一般是使用靜電分離及靜電凝集，其除塵效果可達 99%[18]。

2.熟料燒成：在熟料燒成製程上，大致可分為預熱系統、旋窯及冷卻系統等三部分，將已經製備好的生料送進儲存庫中，先經由預熱機懸浮預熱。目前國內的水泥廠一般使用新式懸浮預熱系統(new suspension preheater, NSP)，在預熱機的底部入窯處增設分解爐(precalciner)，利用噴煤將生料加熱，提高生料溫度 800~900°C

。此時近 80~90%的碳酸鈣已分解，可減少進入旋窯內的燃燒時間，節省燃料煤的使用。而預熱機所排出的廢熱，則可回收用於發電，生料在進入旋窯之後，旋窯以每分鐘 2~3 轉的速度旋轉，將生料逐漸混合在一起。至燒成段再加熱至 1450°C，此時生料成半熔融狀態，稱之為熟料。熟料進入冷卻機加以急速冷卻至 150~300°C 後，再送進熟料庫儲存。冷卻機所排出的廢熱，可用於乾燥原料或發電。廢熱氣回收再使用後均經由靜電集塵機收塵，在由煙囪排出[18]。

3.水泥研磨:熟料經過一適當預存期(preliminary period)後，輸送至熟料料斗，另將已壓碎的石膏，一起經由秤量績秤量後，依一定比例混合飼入水泥研磨機磨成細粉，即成為水泥。水泥研磨過程中，可加入其他添加劑，如爐渣、矽類物質、飛灰等，以生產各種混合水泥。水泥製成後儲存於水泥圓庫，再依發貨需求以散裝或貨裝方式運銷各地[18]。有關於水泥生產流程圖，請參考圖 3.3：

表 3.12 生產每公噸水泥平均需原料耗用百分比

原料種類	每公噸水泥耗用量(公噸)	百分比(%)
石灰石	1.28~1.40	76.92~85.34
矽砂	0.05~0.10	3.33~5.49
鐵渣	0.05~0.10	3.33~5.49
黏土	0.09~0.18	6.00~9.00
石膏	0.03~0.04	2.00~2.20

(資料來源：1.孫孟哲，1994 2.黃盈庭，2000)

結構材料生命週期評估基準與耐久性評估指標之建立(1)

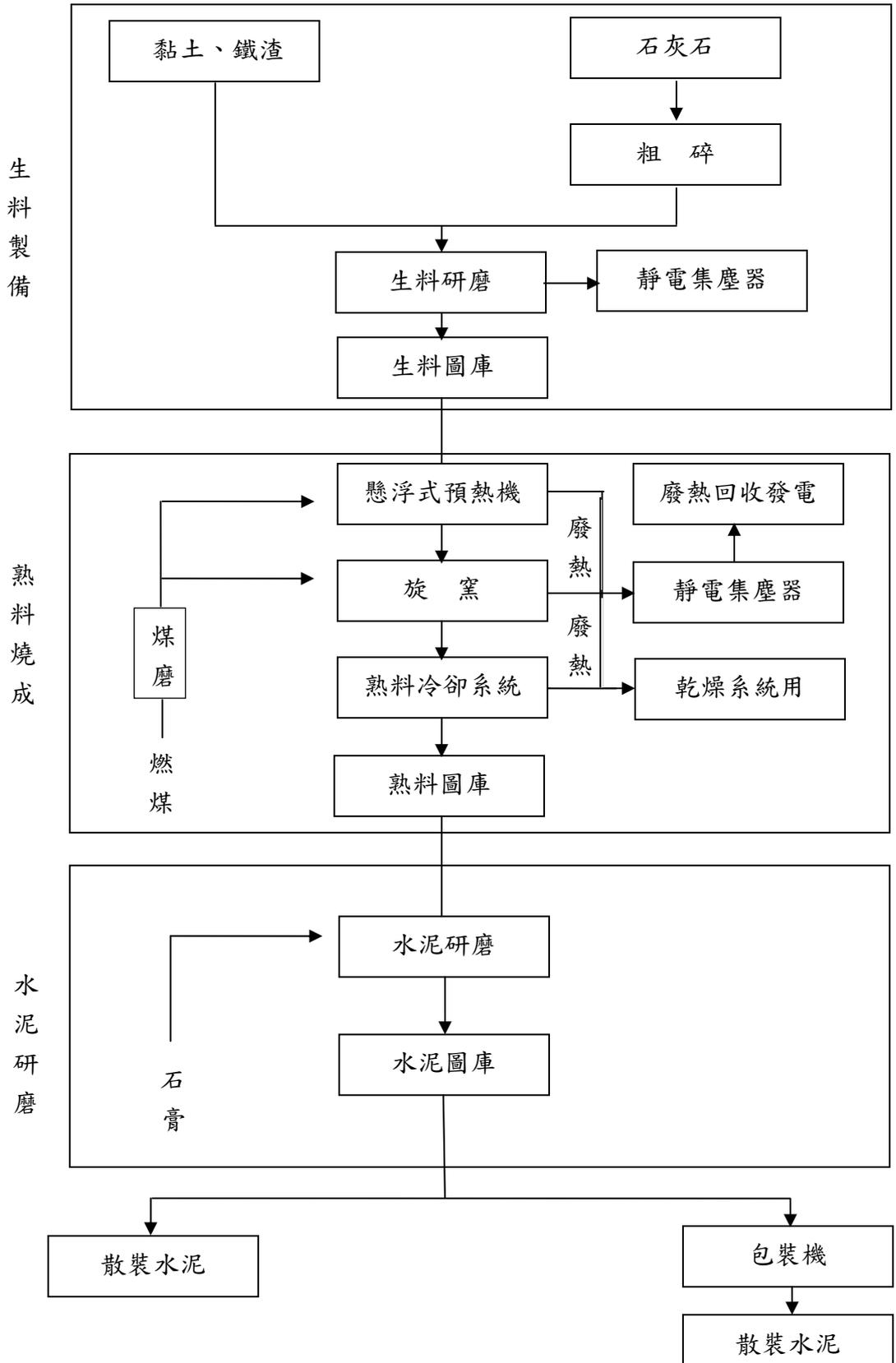


圖 3.3 水泥生產流程圖

(資料來源:文獻[18])

本研究只調查從水泥原料開採至水泥產品製成所耗之能量及 CO<sub>2</sub> 的排放量，不分別調查各階段(生料製備、熟料燒成、水泥研磨)之耗能量與 CO<sub>2</sub> 排放量。

添加材料，本研究選用爐石粉及飛灰當作代表，爐石粉為煉鋼工業產生的副產品(爐渣)經過研磨加工後所製造完成的，而飛灰則是火力發電產生的副產品。根據經濟部能源委員會「能源查核管理輔導計劃」中，生產 1 噸水泥、爐石粉及飛灰 CO<sub>2</sub> 排放量平均值，如表 3.13 所示(LCI10)：

表 3.13 產 1 公噸水泥、爐石粉及飛灰 Z 排放量

項目	CO <sub>2</sub> 排放量	註記
水泥	880kg/ton	
爐石粉	98.3kg/ton	爐石研磨時之耗能
飛灰	0kg/ton	無須研磨

(資料來源:經濟部能源委員會「能源查核管理輔導計劃」)

表 3.13 調查並不把煉鋼及火力發電耗能計算在內，爐石粉國內外一般都以爐石研磨成粉所需耗費電能換算，由表 3.13 可推算約為 135695(kcal)，飛灰則都是併入發電耗能計算，所以值為 0。

生產 1 噸水泥所需耗的能量則參考馮炳勳博士論文裡，調查全國 2001~2003 各大水泥業，所得結果如表 3.14 所示(LCI11)：

表 3.14 全國各大水泥業總耗能

年度	燃煤		電力		油品		能源耗用總量 (10 <sup>10</sup> 千卡)
	耗用量 (10 <sup>10</sup> 千卡)	比例 (%)	耗用量 (10 <sup>10</sup> 千卡)	比例 (%)	耗用量 (10 <sup>10</sup> 千卡)	比例 (%)	
2001	1353	84.0	190	11.8	68	4.2	1611
2002	1599	87.5	195	10.7	33	1.8	1826

表 3.14 全國各大水泥業總耗能(續)

結構材料生命週期評估基準與耐久性評估指標之建立(1)

2003	1462	86.5	190	11.3	38	2.2	1690
------	------	------	-----	------	----	-----	------

(資料來源：1.馮炳勳，「台灣水泥業因應二氧化碳排放減量策略之研究」，2006。  
2.經濟部能源局，2004。)

將表 3.13 總耗能( $10^{10}$  千卡)除以當年水泥產量(千公噸)，在經由換算可得生產 1 公噸水泥需耗能(千卡)多少，如表 3.15 所示：

表 3.15 生產 1 公噸水泥耗能多少(千卡/公噸)

年度	能源耗用總量 ( $10^{10}$ 千卡)	水泥總產量 (千公噸)	生產 1 公噸水泥耗能(千 卡/公噸)
2001	1611	18011	894453
2002	1826	19363	943053
2003	1690	18474	914799

(資料來源：馮炳勳，「台灣水泥業因應二氧化碳排放減量策略之研究」，2006。)

根據表 3.15 生產 1 公噸水泥耗能取平均值為 918028(千卡/公噸)。

根據國外 simapro(瑞士)資料庫，生產 1 公斤 slag sand cement(爐石粉水泥)需排放 0.649 公斤  $CO_2$ ，詳細排放資料見表 3.16、表 3.17、表 3.18：

表 3.16 生產 1 公斤 slag sand cement 需排放到空氣的物質

排放到空氣的物質	數量	單位
Acetaldehyde(乙醛)	1.077E-07	kg
Acetic acid(乙酸)	0.00000001	kg
Aluminium(鋁)	0.00012434	kg
Ammonia(氨)	0.000023263	kg
Antimony(銻)	1.5E-09	kg
Arsenic(砷)	9.1E-09	kg
Benzene(苯)	2.3131E-08	kg
Benzo(a)pyrene	1.9175E-10	kg
Beryllium(鈹)	2.2943E-09	kg
Cadmium(鎘)	5.4035E-09	kg
Carbon dioxide(二氧化碳)	0.64961	kg
Carbon monoxide (一氧化碳)	0.00046152	kg
Chromium(鉻)	2.2283E-09	kg
Cobalt(鈷)	3.059E-09	kg
Copper(銅)	1.7067E-08	kg
Dinitrogen monoxide(一氧化物)	7.9309E-07	kg
Ethane, 1,1,1,2-tetrafluoro-, HFC-134a (乙烷)	1.2506E-08	kg
Ethane, hexafluoro-, HFC-116	1.5949E-09	kg
Ethyne(乙炔)	1.1545E-10	kg
Formaldehyde(甲醛)	2.2241E-07	kg
Heat, waste(廢熱)	3.0835	MJ
Hydrocarbons, aliphatic, alkanes, unspecified (脂肪烷烴)	1.0238E-07	kg
Hydrocarbons, aromatic(芳烴)	2.9805E-08	kg
Hydrocarbons, chlorinated(氯化烴)	1.8812E-09	kg
Hydrogen(氫)	5.9539E-10	kg
Hydrogen chloride(氯化氫)	5.2892E-06	kg
Hydrogen fluoride(氟化氫)	5.7338E-08	kg
Hydrogen sulfide	4.5772E-08	kg
Iron(鐵)	5.8557E-09	kg
Lead(鉛)	6.8444E-08	kg

表 3.16 生產 1 公斤 slag sand cement 需排放到空氣的物質(續)

Manganese(錳)	7.8758E-10	kg
Mercury(汞)	2.6149E-08	kg
Methane, biogenic(甲烷,生物造成)	1.5431E-06	kg
Methane, fossil(甲烷,化石燃料造成)	7.0507E-06	kg
Methane, tetrafluoro-, CFC-14	1.4354E-08	kg
Methanol(甲醇)	5.0658E-09	kg
NMVOOC, non-methane volatile (非甲烷揮發性)	0.000057637	kg
organic compounds unspecified origin (有機化合物)	4.5301E-09	kg
Nickel(鎳)	0.00093904	kg
Nitrogen oxides(氧化氮)	0.00093904	kg
Ozone(臭氧)	5.3322E-07	kg
PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons (多環芳香碳氫化合物)	8.998E-09	kg
Particulates, < 2.5 um(微粒)	6.3717E-06	kg
Particulates, > 10 um	1.2361E-06	kg
Particulates, > 2.5 um, and < 10um	1.0379E-06	kg
Phenol(酚)	1.9307E-10	kg
Selenium(硒)	1.5513E-09	kg
Sulfur dioxide(二氧化硫)	0.00027448	kg
Sulfur hexafluoride(六氟化硫)	4.7423E-09	kg
Thallium(鉈)	9.9417E-09	kg
Tin(錫)	7.3432E-09	kg
Toluene(甲苯)	4.6315E-08	kg
Vanadium(釩)	3.8531E-09	kg
Water(水)	0.000019106	kg
Xylene(二甲苯)	2.5755E-08	kg
Zinc(鋅)	6.0123E-08	kg

(資料來源： simpapro7.3 資料庫)

表 3.17 生產 1 公斤 slag sand cement 需排放到水的物質

排放到水的物質	數量	單位
Aluminium(鋁)	5.6466E-10	kg
BOD5, Biological Oxygen Demand(生化需氧量)	1.5453E-07	kg
Barium(鋇)	5.938E-10	kg
Bromine(溴)	4.4716E-10	kg
COD, Chemical Oxygen Demand(化學需氧量)	1.5637E-07	kg
Cadmium, ion(鎘離子)	2.4223E-10	kg
Calcium, ion(鈣離子)	6.7073E-09	kg
Chloride(氯化物)	3.4487E-07	kg
Chromium VI(鉻)	9.6931E-11	kg
Copper, ion(銅離子)	1.2934E-09	kg
Cyanide(氰化物)	6.2264E-10	kg
DOC, Dissolved Organic Carbon(溶解性有機碳)	2.3448E-08	kg
Fluoride(氟化物)	1.1248E-09	kg
Formaldehyde(甲醛)	5.7254E-10	kg
Heat, waste(廢熱)	0.000040051	MJ
Hydrocarbons, unspecified(碳氫化合物)	2.1568E-09	kg
Iron, ion(鐵離子)	1.2446E-07	kg
Lead(鉛)	8.6827E-10	kg
Lithium, ion(鋰離子)	2.2424E-09	kg
Magnesium(鎂)	1.3086E-09	kg
Manganese(錳)	6.9822E-10	kg
Methanol(甲醇)	1.7176E-10	kg
Nickel, ion(鎳離子)	1.4045E-09	kg
Oils, unspecified(油, 未經定義的)	2.0818E-08	kg
Radium-226(鐳-226)	2.0818E-08	kg
Radium-228(鐳-228)	3.8863E-09	kg
Sodium, ion(鈉離子)	6.9878E-06	kg
Strontium(鋇)	1.1376E-10	kg
Sulfate(硫酸鹽)	1.8692E-09	kg

表 3.17 生產 1 公斤 slag sand cement 需排放到水的物質(續)

Suspended solids, unspecified(懸浮固體)	2.1015E-07	kg
TOC, Total Organic Carbon(有機總碳量)	2.3448E-08	kg
Zinc, ion(鋅離子)	2.902E-08	kg

(資料來源： simpapro7.3 資料庫)

表 3.18 生產 1 公斤 slag sand cement 需排放到土壤的物質

排放到土壤的物質	數量	單位
Boron(硼)	4.0668E-09	kg
Chloride(氯化物)	0.000010091	kg
Chromium VI(鉻)	2.2958E-08	kg
Copper(銅)	1.4988E-08	kg
Fluoride(氟化物)	1.5543E-08	kg
Heat, waste(廢熱)	0.0024414	kg
Iron(鐵)	1.2657E-06	kg
Lead(鉛)	4.0078E-10	kg
Oils, biogenic(油, 生物提供的)	1.4337E-08	kg
Oils, unspecified(油, 未經定義的)	4.2516E-07	kg
Sodium(鈉)	3.3442E-08	kg
Zinc(鋅)	2.7504E-08	kg

(資料來源： simpapro7.3 資料庫)

由上表可得知，國外對生產水泥原料各項排放量數據，都以具有相當完整且詳細的報告，國內卻相當缺乏這些相關資料，盼望將來能加以改進且修正。

國外生產一噸爐石粉水泥(slag sand cement)，由表 3.16 得知 CO<sub>2</sub> 排放量為 650kg/ton，其水泥配比為熟料 76%，爐石粉 19%，石膏 5%。

國內生產一噸水泥(cement)，由表 3.13 可得知 CO<sub>2</sub> 排放量 880kg/ton，生產爐石粉 CO<sub>2</sub> 排放量為 98.2kg/ton，假設以 19%爐石粉取代水泥用量，其排放量可為式 3.9 表示：

$$880 \times 0.81 + 98.2 \times 0.19 = 736$$

(式 3.9)

上式中 880 為(生產 1 噸水泥 CO<sub>2</sub> 排放量)(單位:kg/ton)，0.81 為(水泥熟料占比例)，98.2 為 (生產 1 噸爐石粉 CO<sub>2</sub> 排放量) (單位：kg/ton)，19 為(爐石粉占比例)。

比較國內外生產以 19%爐石粉取代水泥用量的爐石粉水泥，排放 CO<sub>2</sub> 量可差至 86 kg/ton，顯示國內在生產水泥技術或設備方便仍待加強。由式 3.9 可得知，添加爐石粉對於生產水泥排放的 CO<sub>2</sub> 量，有明顯減少的情形，不過其工作性質仍有待商確，可見本研究第四節生命週期盤查分析。

### 三、鋼筋及自來水的生產

鋼筋為煉鋼工業所製成的產品之一，而鋼鐵使用量可以成為一個國家工業化程度之指標。在所有製造業中，煉鋼工業的生產流程特性屬於高度能源密集的製程，能源消耗及排放量居所有製造業別之首，對環境衝擊十分巨大，必須加以探討與分析。

煉鋼工業其使用原料與生產設備，可分為以鐵礦砂為原料之高爐、氧氣轉爐的一貫作業煉鋼廠。和以廢鋼為主要原料之電弧爐煉鋼廠等兩種類型。依鋼鐵成品程序之不同，鋼鐵業之製程可區分為煉鐵、煉鋼及軋鋼三部份。煉鐵是指以鐵礦、廢鐵及生鐵為原料煉製生鐵及合金鐵之製程，高爐為極具效率之製鐵方法，但其投資金額高，進料又需要昂貴及高污染的鐵礦燒結及煤炭煉焦工廠。煉鋼是指冶煉及鑄造碳鋼、不銹鋼及合金鋼等鋼材之製程，其中以鐵礦砂為原料的一貫作業鋼廠是採用少渣冶煉技術，可有效提高金屬之回收並降低鐵水消耗。連鑄是指由煉鋼製程所生產之鋼液經由澆鑄或連鑄後，產品形式可包括半成品的大鋼胚(Bloom)、小鋼胚(Billet)、扁鋼胚(Slab)及鋼錠(Ignot)以及成品的鑄鋼，一般所稱之鋼胚即為軋延工場入口之原料。由轉爐或電弧爐生產所得的鋼液經連續鑄造後，即成為鋼胚，鋼胚再經過軋延後才可製程鋼板、線材及條鋼等產品。如圖 3.4 所示為鋼鐵工業生產流程及產業體系[3]。

結構材料生命週期評估基準與耐久性評估指標之建立(1)

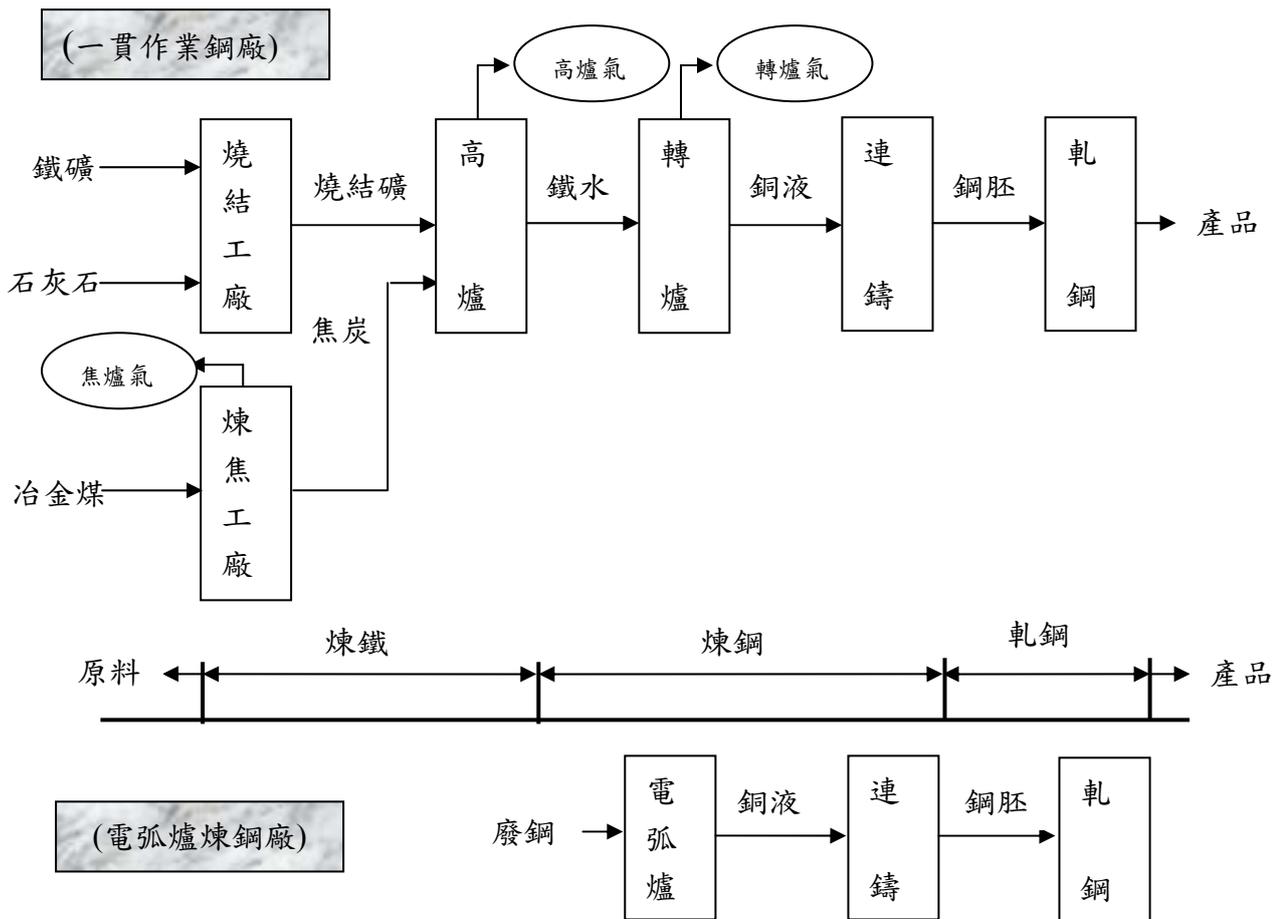


圖 3.4 鋼鐵工業生產流程及產業體系

(資料來源:文獻[3])

本研究只調查從鋼筋原料開採至鋼筋產品製成所耗之能量及 CO<sub>2</sub> 的排放量，不分別調查各階段(煉鐵、煉鋼、軋鋼)之排放量資訊。根據李正義根據民國 82~91 年「行業耗能指標」鋼鐵業調查報告，顯示高爐鋼胚、電弧爐鋼胚及鋼筋耗能量及 CO<sub>2</sub> 排放量平均值，如表 3.19、表 3.20(LCI12) [5]所示：

表 3.19 鋼胚及鋼筋生產單位產品耗能調查表

產品項目	產品名稱	產品產量	單位 (t)	單位產品耗 能(Mcal/t)
1	電弧爐鋼胚	5,295,475	噸	1243
2	高爐鋼胚	9,260,000	噸	5350
3	鋼筋	6,475,543	噸	422.1

註:上表鋼筋為鋼胚軋鋼成鋼筋所耗之能量

(資料來源：文獻[5])

表 3.20 鋼胚及鋼筋生產單位產品 CO<sub>2</sub> 排放量調查表

	產品名稱	產品產量	單位 (t)	單位產品 CO <sub>2</sub> 排放量(噸/t)
1	電弧爐鋼胚	5,295,475	噸	0.459
2	高爐鋼胚	9,260,000	噸	2.104
3	鋼筋	6,475,543	噸	0.148

註:上表鋼筋為鋼胚軋鋼成鋼筋所排放 CO<sub>2</sub> 量

(資料來源：文獻[5])

結構材料生命週期評估基準與耐久性評估指標之建立(1)

上表鋼筋總 CO<sub>2</sub> 排放量 (高爐鋼胚+軋鋼鋼筋)為 2.252(噸/t)，考慮 8 成鋼筋回收效益計算，其計算如式 3.10[13]：

$$2.252 \times 1 - (2.104-0.0459) \times 0.8 = 0.936(\text{t-CO}_2)$$

高爐鋼胚+軋鋼鋼筋 高爐鋼胚 電弧爐鋼胚 回收率 鋼筋 CO<sub>2</sub> 排放值

(式 3.10)

同理可得鋼筋耗能為 2486.5(Mcal)，經由單位換算可得生產 1 噸鋼筋需耗能 2486500(kcal)以及 936(kg-CO<sub>2</sub>)。

國外，根據 simapro(瑞士)資料庫，生產一噸鋼筋約排放 0.766 噸的 CO<sub>2</sub>，(詳細排放資料見表 3.21)，預估可能回收率高於 90%左右(90%為 0.77)。

表 3.21 生產 1 噸鋼筋排放物質表

排放到空氣的物質	數量	單位
Acenaphthene	1.22E-16	kg
Acetaldehyde(乙醛)	4.85E-08	kg
Acetic acid(乙酸)	4.25E-07	kg
Acrolein(丙烯醛)	7.11E-14	kg
Aldehydes, unspecified	5.23E-13	kg
Aluminium(鋁)	0.00014	kg
Ammonia(氨)	6.15E-05	kg
Antimony(銻)	3.66E-11	kg
Arsenic(砷)	2.2E-10	kg
Barium(鋇)	4.9E-17	kg
Benzal chloride(二氯甲苯)	9E-18	kg
Benzene(苯)	1.08E-06	kg
Benzene, hexachloro-	7.46E-09	kg
Benzo(a)pyrene	4.35E-09	kg
Beryllium(鈹)	5.49E-11	kg
Boron(硼)	2.84E-16	kg
Bromine(溴)	2.32E-16	kg
Butadiene(丁二烯)	1.43E-13	kg
Butane(正丁烷)	1.29E-10	kg

表 3.21 生產 1 噸鋼筋排放物質表(續)

Cadmium(鎘)	2.64E-08	kg
Carbon dioxide (二氧化碳)	0.76666	kg
Carbon disulfide	1E-18	kg
Carbon monoxide(一氧化碳)	0.021853	kg
Chlorine(氯)	1.8E-11	kg
Chloroform(三氯甲烷)	0	kg
Chromium(鉻)	9.89E-07	kg
Chromium VI(鉻 VI)	1.05E-11	kg
Cobalt(鈷)	7.32E-11	kg
Copper(銅)	2.72E-07	kg
Cumene(異丙基苯)	0	kg
Cyanide	3.2E-17	kg
Dinitrogen monoxide(一氧化物)	4.2E-06	kg
Dioxin, 2,3,7,8 Tetrachlorodibenzo-p-	6.27E-12	kg
Ethane(乙烷)	1.91E-10	kg
Ethane, 1,1,1,2-tetrafluoro-, HFC-134a	4.06E-08	kg
Ethane, 1,1,1-trichloro-, HCFC-140	1E-18	kg
Ethane, hexafluoro-, HFC-116	6.71E-09	kg
Ethene, tetrachloro-	1.12E-15	kg
Ethylene oxide(環氧乙烷)	1.38E-12	kg
Ethyne(乙炔)	4.19E-10	kg
Fluorine(氟)	5.58E-12	kg
Formaldehyde(甲醛)	1.59E-07	kg
Furan	0	kg
Heat, waste(廢熱)	12.987	MJ
Helium(氦氣)	7.82E-16	kg
Hexane(正己烷)	1.11E-10	kg
Hydrocarbons, aliphatic, alkanes, unspecified	9.47E-05	kg
Hydrocarbons, aliphatic, unsaturated	8.7E-17	kg
Hydrocarbons, aromatic	2.87E-05	kg
Hydrocarbons, chlorinated	8.49E-09	kg
Hydrogen(氫)	2.52E-08	kg
Hydrogen chloride(氯化氫)	3.53E-05	kg

表 3.21 生產 1 噸鋼筋排放物質表(續)

Hydrogen fluoride(氟化氫)	7.53E-06	kg
Hydrogen sulfide	6.86E-06	kg
Iodine(碘)	1.18E-16	kg
Iron(鐵)	6.1E-06	kg
Isoprene(異戊二烯)	1E-18	kg
Lead(鉛)	3.2E-06	kg
Lead-210	4.92E-14	kBq
Magnesium(鎂)	2.65E-13	kg
Manganese(錳)	8.11E-07	kg
Mercury(汞)	8.84E-07	kg
Methane, biogenic(甲烷,生物造成)	9.46E-06	kg
Methane, bromo-, Halon 1001	2E-18	kg
Methane, dichlorodifluoro-, CFC-12	1E-18	kg
Methane, fossil(甲烷,化石燃料造成)	2.83E-06	kg
Methane, tetrachloro-, CFC-10	6.13E-16	kg
Methane, tetrafluoro-, CFC-14	6.04E-08	kg
Methanol(甲醇)	2.14E-07	kg
Molybdenum	2.98E-13	kg
NM VOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	0.000389	kg
Nickel(鎳)	5.34E-07	kg
Nitrogen oxides(氧化氮)	0.001351	kg
Ozone(臭氧)	2.58E-06	kg
PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons	4.63E-07	kg
Particulates, < 2.5 um(微粒)	0.000314	kg
Particulates, > 10 um	6.79E-05	kg
Particulates, > 2.5 um, and < 10um	0.000101	kg
Pentane(正戊烷)	1.6E-10	kg
Phenol(酚)	5.38E-10	kg
Phosphorus(紅磷)	1.91E-11	kg
Polonium-210	9E-14	kBq
Polychlorinated biphenyls	1.28E-08	kg
Potassium-40	1.21E-14	kBq

表 3.21 生產 1 噸鋼筋排放物質表(續)

Propanal(丙醛)	4E-18	kg
Propane	9.83E-11	kg
Propene(丙烯)	1.16E-13	kg
Propionic acid(丙酸)	5.09E-08	kg
Propionic acid	2.23E-12	kg
Radium-226(鐳-226)	1.27E-14	kBq
Radium-228(鐳-228)	3.77E-15	kBq
Radon-220	2.64E-13	kBq
Radon-222	1.48E-13	kBq
Selenium(硒)	1.49E-10	kg
Silicon	3.09E-15	kg
Sodium(鈉)	2.37E-11	kg
Strontium(銦)	4.4E-17	kg
Styrene(苯乙烯)	0	kg
Sulfate	7.24E-11	kg
Sulfur dioxide(二氧化硫)	0.000977	kg
Sulfur hexafluoride(六氟化硫)	3.56E-08	kg
Thallium(鉍)	2.38E-10	kg
Thorium-228	2.03E-15	kBq
Thorium-232	3.19E-15	kBq
Tin(錫)	1.9E-09	kg
Titanium	1.04E-08	kg
Toluene(甲苯)	1.04E-07	kg
Uranium-238	1.06E-14	kBq
Vanadium(釩)	2.86E-08	kg
Water(水)	0.000216	kg
Xylene(二甲苯)	9.7E-08	kg
Zinc(鋅)	9.13E-06	kg

(資料來源: simapro 資料庫)

## 結構材料生命週期評估基準與耐久性評估指標之建立(1)

國內生產自來水耗能方面主要由淨水場所占比例為最多，其他為管線運送部分(本研究忽略)，根據 98 年自來水事業統計年報以及自來水網站，生產 1 度水耗能及排放 CO<sub>2</sub> 量，如表 3.22 所示(LCI13):

表 3.22 生產 1 度水耗能及排放 CO<sub>2</sub> 量

項目	排放量
耗電能(淨水場)(度/度)	0.16
CO <sub>2</sub> 排放量(kgCO <sub>2</sub> /度)	0.19

(資料來源:1.自來水公司網站 2.本研究整理)

根據式 3.5 把生產 1 度水耗能轉換為熱值單位約為 138(kcal)。

### 第三節 鋼筋混凝土原料運輸及製成產品階段

#### 一、鋼筋混凝土原料運輸

國內建材(包括砂石、水泥、鋼筋等)的運輸，一般可區分為鐵路、公路、航海及航空等四種運輸模式。目前台灣在建材產品的運輸主要以公路及鐵路運輸為主，根據交通部統計資料顯示，台灣公路運輸的貨運量為全國總貨運量的 96%以上[13] [21]。故本研究探討以公路為建材運輸模式調查其能源消耗量。

口頭詢問北部幾家大型建材運輸公司，其結果如下(LCI14)：

- 1.運送建造房舍及高樓的建材一般以運載量 35T 的大型貨車運載。
- 2.運送一般零售建材約以 16T 小型貨車運載。
- 3.大小型貨車燃油效率約為 2.5(公里/公升)及 8.4(公里/公升)。
- 4.貨車燃料種類幾乎都為柴油。

假設燃油效率為 4(公里/公升)(介在大、小貨車之間) [13]，貨車燃料全部使用柴油，根據經濟部統計處頒布的「97 年汽車貨運調查報告[5]」中，可得知各類建材產品全年的貨運量、車行走的公里數。單位重量建材的平均運輸距離(km)、單位運輸耗油量及建材單位重量之運輸階段 CO<sub>2</sub> 排放量計算，如式 3.11、式 3.12、式 3.13：

總延噸公里(T-km)/總貨運量(T) = 單位重量建材的平均運距(km/T)

(式 3.11)

單位重量建材的平均運距(km/T)/燃油效率(L/km) = 單位運輸耗油量(L/T)

(式 3.12)

單位運輸耗油量(L/T) × 每公升柴油 CO<sub>2</sub> 排放量(kg/L)

= 單位重量建材之運輸階段 CO<sub>2</sub> 排放量(kg/T) (式 3.13)

表 3.23 為砂石、水泥、鋼筋、自來水運輸階段 CO<sub>2</sub> 排放量。

表 3.23 砂石、水泥、鋼筋、自來水運輸階段 CO<sub>2</sub> 排放量

商品別	總延噸公里 (T-km)	總貨運量 (T)	平均運距 (km/T)	單位運輸耗油 量(L/T)	CO <sub>2</sub> 排放量 (kg-CO <sub>2</sub> 單位)
建築用砂石	3142693186	81685658	38.47	9.62	24.80
水泥	41029781	7911887	51.84	12.96	33.41
鋼筋	320374586	3779689	84.76	31.19	54.63
自來水	99562867	5582198	17.84	4.46	11.50

(資料來源：1.97 年汽車貨運調查報告

2.羅紹文，「預力 I 型梁橋之二氧化碳排放量評估」，2010)

依表 3.9 也可推算運輸階段各產品之耗能，整理至表 3.24

表 3.24 砂石、水泥、鋼筋、自來水運輸階段耗能量

商品別	總延噸公里 (T-km)	總貨運量 (T)	平均運距 (km/T)	單位運輸耗油 量(L/T)	耗能量 (kcal 單位)
建築用砂石	3142693186	81685658	38.47	9.62	80808
水泥	41029781	7911887	51.84	12.96	108854
鋼筋	320374586	3779689	84.76	31.19	261996
自來水	99562867	5582198	17.84	4.46	37464

(資料來源：1.97 年汽車貨運調查報告

2.羅紹文，「預力 I 型梁橋之二氧化碳排放量評估」，2010)

將砂石單位轉換成運輸每 m<sup>3</sup> 砂石需耗費多少 CO<sub>2</sub> 及耗能，假設砂石比重為 2.65，經換算結果為每運輸 1 m<sup>3</sup> 砂石需耗費 65.72kg 的 CO<sub>2</sub> 及 214141kcal 的能量。

## 二、鋼筋混凝土成品運輸

調查台北一家大型預拌混凝土廠，詢問結果如下：

1. 預拌混凝土車燃油效率約為 2(km/L)。
2. 拌合混凝土機約每生產 1m<sup>3</sup> 混凝土約耗費 2.1 度電能(不考慮黃油耗費量)(LCI15)。

依(式 3.2)及(式 3.7) 生產 1m<sup>3</sup> 混凝土耗費 2.1 度電能換算約排放 1.31(kg)的 CO<sub>2</sub> 及耗能 1806(kcal)。根據 4-1 節利用凝土車燃油效率約為 2(km/L)則可推算混凝土成品運輸階段 CO<sub>2</sub> 排放量，如表 3.25 所示：

表 3.25 混凝土成品運輸階段 CO<sub>2</sub> 排放量

商品別	總延噸公里 (T-km)	總貨運量 (T)	平均運距 (km/T)	單位運輸耗油 量(L/T)	CO <sub>2</sub> 排放量 (kg-CO <sub>2</sub> 單位)
預拌混凝土	1344503586	101038922	13.30	6.65	17.14

(資料來源： 97 年汽車貨運調查報告)

依表 3.9 也可推算運輸階段混凝土之耗能，整理至表 3.26

表 3.26 混凝土成品運輸階段耗能量

商品別	總延噸公里 (T-km)	總貨運量 (T)	平均運距 (km/T)	單位運輸耗油 量(L/T)	耗能量 (kcal 單位)
預拌混凝土	1344503586	101038922	13.30	6.65	55860

(資料來源： 97 年汽車貨運調查報告)

假設混凝土單位重為 2400kg/m<sup>3</sup>，換算為運輸每 m<sup>3</sup> 混凝土所需耗費的 CO<sub>2</sub> 及耗能量為 41.14kg 的 CO<sub>2</sub> 和 55860kcal 的能量。

## 第四節 生命週期盤查分析

整理第二及第三節鋼筋混凝土原料生產、產品製成及運輸階段耗能及 CO<sub>2</sub> 排放量數據，整理至表 3.27、表 3.28：

表 3.27 鋼筋混凝土原料生產、產品製成及運輸階段耗能表

項目	單位	耗能(kcal)		耗能(kcal) (生產含運輸)
		生產階段	運輸階段	
砂石	m <sup>3</sup>	46637	214141	260778
水泥	T	914799	108854	1023653
爐石粉	T	135695		135695
飛灰	T	0		0
鋼筋	T	2486500	261996	2748496
自來水	度	138	37464	37602
混凝土成品	m <sup>3</sup>	1806	55860	57666

(資料來源:本研究整理)

表 3.28 鋼筋混凝土原料生產、產品製成及運輸階段 CO<sub>2</sub> 排放表

項目	單位	CO <sub>2</sub> 排放 (kg)		CO <sub>2</sub> 排放(kg) (生產含運輸)
		生產階段	運輸階段	
砂石	m <sup>3</sup>	14.51	65.72	80.23
水泥	T	880	33.41	913.41
爐石粉	T	98.3		98.3
飛灰	T	0		0
鋼筋	T	936	54.63	990.63
自來水	度	0.19	11.50	11.69
混凝土成品	m <sup>3</sup>	1.31	41.14	42.45

(資料來源:本研究整理)

根據以上資料便完成了生命週期評估中之生命週期盤查清單分析的步驟，接下來便要決定對環境衝擊評估的模式及方法。

## 一、生命週評估軟體

目前在執行生命週期評估的軟體的種類十分眾多，例如 Boustead(英)、R.F.Weston(美)、ChemSystem 之 LIMS(美)、EMPA 之 EcoRro(瑞士)、PIRA International(英)、Charlimers Industriteknik(瑞典)、Environmental Conscious Design Support Support System(美) 及 Pre-simapro 等等[3] [7] [9]，其中以 simapro 從 1990 發展至今成為目前應用最廣的生命週期評估軟體，此軟體內含完整的盤查資料庫，分為以下五種資料庫[3] [7] [9]：

### 1.方法資料庫

包含不同環境衝擊分類之相對指數，例如：各種污染物之溫室效應因子(GWP)、臭氧層破壞潛能(ODP)之評估權重。

### 2.製程資料庫

包含物質、能源、運輸、製成、使用、廢棄物處理及處置等資料。

### 3 處置百分比資料庫

對於產品使用後廢棄之焚化、資源回收及掩埋百分比。

### 4.物質資料庫

包含空氣、水、廢棄物料之名稱及單位。

### 5.單位換算資料庫

可提供各種度量衡單位換算之功能。

同時，該軟體具有以下特色[3] [7]：

1. 一個產品之生命週期，可組合不同製成或產品之生命週期。
2. 可以產品分景，並就每個分解的零件是否回收做環境上之考量。
3. 可研究不同廢棄物處理策略對環境的影響。
4. 對於環境衝擊評估可利用不同的特徵化、標準及權重的方法。
5. 可以分析所得之結果以不同的方式呈現。

## 結構材料生命週期評估基準與耐久性評估指標之建立(1)

6. 可以購買多人使用版本。

根據以上幾點，本研究採用 simapro 生命週期評估軟體，其基本架構為以下五項[3] [21]：

### 1.選擇環境衝擊評估方法

Simapro 內建十分多種對於環境衝擊評估的方法，例如： IPCC2007、CML2、Eco-Incidator95、Eco-Incidator99.....等。首先必須選擇適當的評估方法，通常跟評估物品或所屬環境有關。

### 2.分類(classification)

決定完環境衝擊方法完後，確定所要評估的物品所造成的衝擊類別，確定類別後，將造成同一類衝擊之環境負荷歸類到環該環境衝擊類別中。

### 3. 特徵化(characterization)

特徵化的主要功用便是將在各類環境衝擊中，不同的環境負荷或污染排放因子分析其潛在衝擊，並量化成相同型態或相同單位。

### 4. 標準化(normalization)

進行標準化目的在於增加不同種類衝擊類別結果之可比較性(comparability)(Baumann H,and Tillman A.M.,2004)，並提供進行下一步驟「評價」之基礎。

在標準化之後，各衝擊指標已具有相同之單位，通常為(1/yr)，進而使得各項衝擊指標較易進行相互之比較。此外，標準化可應用於特徵化結果。許多方法論允許衝擊種類指標與一參考值作比較，亦即衝擊種類須除以該基準值，此參考值通常是由某一城市之年平均環境負荷除以該地區總人口數而得。

在此步驟中，必須將各環境衝擊類別之特徵化結果再除以其相對應衝擊類別之實際（或預期）衝擊強度（Baumann H.and Tillman A.M.,2004）。以 Eco-Indicator95 模式為例，即是以平均每年每位歐洲人士所引起之環境衝擊作為一基準值進行標準化，進而得到各項環境衝擊類別之標準化因子。

## 5. 評價(evaluation)

將不同類別的環境衝擊類別給予相對的重要性(權重)，

可得到整合性的衝擊指標，但此權重將會因不同目標或技術的提升而改變。

## 二、環境衝擊評估方法

本研究生命週期盤查分析，擬定由 simapro 軟體中選定 Eco-Indicator95 衝擊評估方法進行蒐集與調查，Eco-Indicator95 評估方法共有十一項：(1)溫室效應(greenhouse effect)；(2)臭氧層破壞(ozone layer depletion)；(3)酸化(acidification)；(4)優養化(eutrophication)；(5)重金屬(heavy metal)；(6)致癌物質(carcinogenic substances)；(7)冬季煙霧(winter smog)；(8)夏季煙霧；(9)殺蟲劑(pesticides)；(10)能源資源耗用(energy resource)；(11)固體廢棄物(solid waste)。再經由特徵化(characterization)、常態化(normalization)、評價加權(weighting)及單項得點(single score)等四項分析步驟，進而得最終衝擊值。其特徵化單位及環境衝擊指標項目整理如表 3.29 所示：

表 3.29 Eco-Indicator95 之特徵化單位

環境衝擊指標	特徵化單位
Green house(溫室效應)	kg CO <sub>2</sub>
Ozone layer(臭氧層破壞)	kg CFC11
Acidification(酸化)	kg SO <sub>2</sub>
Eutrophication(水質優養化)	kg PO <sub>4</sub>
Heavy metals(重金屬)	kg Pb
Carcinogens(致癌物質)	kg B(a)P
Pesticides(農藥使用)	kg act. subst
Summer smog(夏季煙霧)	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>
Winter smog(冬季煙霧)	kg SPM
Energy resources(能源消耗)	kJ LHV
Solid waste(廢棄物產生)	kg

(資料來源:simapro 資料庫)

各項環境衝擊指標常態化單位及權重因子，整理至表 3.30~3.40

表 3.30 Green house(溫室效應)常態化單位及權重因子

排放項目區分	項目	權重因子	常態化單位
空氣	*Carbon dioxide(二氧化碳)	1	kg CO <sub>2</sub> /kg
空氣	Chlorinated fluorocarbons, hard(氟氯碳化物(強))	7100	kg CO <sub>2</sub> /kg
空氣	Chlorinated fluorocarbons, soft(氟氯碳化物(弱))	1600	kg CO <sub>2</sub> /kg
空氣	*Chloroform (三氯甲烷)	25	kg CO <sub>2</sub> /kg
空氣	*Dinitrogen monoxide(一氧化二氮(笑氣))	270	kg CO <sub>2</sub> /kg
空氣	Ethane,1-chloro-1,1-difluoro-,HCFC-142b(1-氯-1,1-二氟乙烷)	1800	kg CO <sub>2</sub> /kg
空氣	Ethane,1,1-dichloro-1-fluoro-,HCFC-141b(1-氯-1,1-二氯乙烷)	580	kg CO <sub>2</sub> /kg
空氣	*Ethane,1,1-dichloro-,HFC-152a(1,1-二氯乙烷)	150	kg CO <sub>2</sub> /kg
空氣	*Ethane,1,1,1-trichloro-,HCFC-140(1,1,1-三氯乙烷)	100	kg CO <sub>2</sub> /kg
空氣	Ethane,1,1,1-trichloro-,HFC-143a(1,1,1-三氯乙烷)	3800	kg CO <sub>2</sub> /kg
空氣	*Ethane,1,1,1,2-tetrafluoro-,HFC-134a(1,1,1,2-四氯乙烷)	1200	kg CO <sub>2</sub> /kg
空氣	Ethane,1,1,2-trichloro-1,2,2-trifluoro-,CFC-113	4500	kg CO <sub>2</sub> /kg
空氣	*Ethane,1,2-dichloro-1,1,2,2-tetrafluoro-,CFC-114	7000	kg CO <sub>2</sub> /kg
空氣	Ethane,2-chloro-1,1,1,2-tetrafluoro-,HCFC-124	440	kg CO <sub>2</sub> /kg
空氣	Ethane,2,2-dichloro-1,1,1-trifluoro-,HCFC-123	90	kg CO <sub>2</sub> /kg
空氣	Ethane,chloropentafluoro-,HFC-115(五氯乙烷)	7000	kg CO <sub>2</sub> /kg
空氣	*Ethane,hexafluoro-,HFC-116(六氯乙烷)	6200	kg CO <sub>2</sub> /kg
空氣	Ethane,pentafluoro-,HFC-125(五氯乙烷)	3400	kg CO <sub>2</sub> /kg
空氣	*Methane(甲烷)	11	kg CO <sub>2</sub> /kg
空氣	*Methane,biogenic(甲烷(由生物造成))	8	kg CO <sub>2</sub> /kg
空氣	*Methane,bromochlorodifluoro-,Halon1211(溴氯二氟甲烷)	4900	kg CO <sub>2</sub> /kg
空氣	*Methane,bromotrifluoro-,Halon1301(三氯溴甲烷)	4900	kg CO <sub>2</sub> /kg
空氣	*Methane,chlorodifluoro-,HCFC-22(一氯二氟甲烷)	1600	kg CO <sub>2</sub> /kg
空氣	Methane,chlorodifluoro-,CFC-13(氯三氟甲烷)	13000	kg CO <sub>2</sub> /kg
空氣	Methane,dichloro-,HCC-30(二氯甲烷)	15	kg CO <sub>2</sub> /kg
空氣	*Methane,dichlorodifluoro-,CFC-12(二氯二氟甲烷)	7100	kg CO <sub>2</sub> /kg
空氣	*Methane,fossil(甲烷(由化石燃料造成))	11	kg CO <sub>2</sub> /kg
空氣	*Methane,tetrachloro-,CFC-10(四氯化碳)	1300	kg CO <sub>2</sub> /kg
空氣	*Methane,tetrachloro-,CFC-14(四氯甲烷)	4500	kg CO <sub>2</sub> /kg
空氣	*Methane,trichlorofluoro-,CFC-11(三氯氟甲烷)	3400	kg CO <sub>2</sub> /kg

(註:有\*代表為水泥或鋼筋有此排放量數據 資料來源:simapro7.3 資料庫)

表 3.31 Ozone layer(臭氧層破壞)常態化單位及權重因子

排放項目 區分	項目	權重 因子	常態化單位
空氣	Chlorinated fluorocarbons, hard(氟氯碳化物(強))	1	kg CFC11/kg
空氣	Chlorinated fluorocarbons, soft(氟氯碳化物(弱))	0.055	kg CFC11/kg
空氣	Ethane,1-chloro-1,1-difluoro-,HCFC-142b(1-氯-1,1-二氟乙烷)	0.065	kg CFC11/kg
空氣	Ethane,1,1-dichloro-1-fluoro-,HCFC-141b(1-氟-1,1-二氯乙烷)	0.11	kg CFC11/kg
空氣	*Ethane,1,1,1-trichloro-,HCFC-140(1,1,1-三氯乙烷)	0.12	kg CFC11/kg
空氣	Ethane,1,1,1-trifluoro-2,2-chlorobromo-,Halon 231	0.14	kg CFC11/kg
空氣	Ethane,1,1,1,2-tetrafluoro-2-bromo-,Halon 2401	0.25	kg CFC11/kg
空氣	*Ethane,1,1,2-trichloro-1,2,2-trifluoro,CFC-113	1.07	kg CFC11/kg
空氣	Ethane,1,2-dibromotetrafluoro-,Halon 2402	7	kg CFC11/kg
空氣	*Ethane,1,2-dichloro-1,1,2,2-tertrafluoro-,CFC-114	0.8	kg CFC11/kg
空氣	Ethane,2-chloro-1,1,1,2-tetrafluoro-,HCFC-124	0.022	kg CFC11/kg
空氣	Ethane,2,2-dichloro-1,1,1-trifluoro-,HCFC-123	0.02	kg CFC11/kg
空氣	Ethane,chloropentafluoro,HFC-115(五氟氯乙烷)	0.5	kg CFC11/kg
空氣	*Methane,bromo-,Halon 1001(溴甲烷)	0.6	kg CFC11/kg
空氣	*Methane,bromochlorodifluoro-,Halon1211(溴氯二氟甲烷)	4	kg CFC11/kg
空氣	Methane,bromotrifluoro-,Halon1201(二氟溴甲烷)	1.4	kg CFC11/kg
空氣	*Methane,bromotrifluoro-,Halon1301(三氟溴甲烷)	16	kg CFC11/kg
空氣	*Methane,chlorodifluoro-,HCFC-22(一氯二氟甲烷)	0.055	kg CFC11/kg
空氣	Methane,chlorodifluoro-,CFC-13(氯三氟甲烷)	1	kg CFC11/kg
空氣	Methane,dibromotrifluoro-,Halon1202(二溴二氟甲烷)	1.25	kg CFC11/kg
空氣	*Methane,dichlorodifluoro-,CFC-12(二氟二氯甲烷)	1	kg CFC11/kg
空氣	*Methane,tetrachloro-,CFC-10(三氟氯甲烷)	1.08	kg CFC11/kg
空氣	*Methane,trichlorofluoro-,CFC-11(三氟氯甲烷)	1	kg CFC11/kg
空氣	Propane,1,3-dichloro-1,1,2,2,3-pentafluoro-,HCFC-225cb	0.033	kg CFC11/kg
空氣	Propane,3,3-dichloro-1,1,1,2,2-pentafluoro-,HCFC-225ca	0.025	kg CFC11/kg

(註:有\*代表為水泥或鋼筋有此排放量數據

資料來源:.simapro7.3 資料庫)

表 3.32 Acidification(酸化)常態化單位及權重因子

排放項目區分	項目	權重因子	常態化單位
空氣	*Ammonia(氨)	1.88	kg SO <sub>2</sub> /kg
空氣	*Ammonium carbonate(碳酸銨)	0.67	kg SO <sub>2</sub> /kg
空氣	Ammonium nitrate(硝酸銨)	0.4	kg SO <sub>2</sub> /kg
空氣	*Ammonium,ion(銨(離子))	1.78	kg SO <sub>2</sub> /kg
空氣	*Hydrogen chloride(鹽酸)	0.88	kg SO <sub>2</sub> /kg
空氣	*Hydrogen fluoride(氟化氫)	1.6	kg SO <sub>2</sub> /kg
空氣	Nitric acid(硝酸)	0.51	kg SO <sub>2</sub> /kg
空氣	Nitric oxide(一氧化氮)	1.07	kg SO <sub>2</sub> /kg
空氣	Nitrogen dioxide(二氧化氮)	0.7	kg SO <sub>2</sub> /kg
空氣	*Nitrogen oxides(二氧化氮)	0.7	kg SO <sub>2</sub> /kg
空氣	*Sulfur dioxide(二氧化硫)	1	kg SO <sub>2</sub> /kg
空氣	Sulfur oxides(硫氧化物)	1	kg SO <sub>2</sub> /kg
空氣	Sulfur trioxide(三氧化硫)	0.8	kg SO <sub>2</sub> /kg
空氣	*Sulfur acid(硫酸)	0.65	kg SO <sub>2</sub> /kg

(註:有\*代表為水泥或鋼筋有此排放量數據)

資料來源: simapro7.3 資料庫)

表 3.33 Eutrophication(水質優養化)常態化單位及權重因子

排放項目 區分	項目	權重因子	常態化單位
空氣	*Ammonia(氨)	0.33	kg PO <sub>4</sub> /kg
水	*Ammonia(氨)	0.33	kg PO <sub>4</sub> /kg
土壤	Ammonia(氨)	0.33	kg PO <sub>4</sub> /kg
空氣	*Ammonium carbonate(碳酸銨)	0.12	kg PO <sub>4</sub> /kg
空氣	Ammonium nitrate(硝酸銨)	0.074	kg PO <sub>4</sub> /kg
土壤	Ammonium nitrate(硝酸銨)	0.074	kg PO <sub>4</sub> /kg
空氣	*Ammonium,ion(銨(離子))	0.33	kg PO <sub>4</sub> /kg
水	*Ammonium,ion(銨(離子))	0.33	kg PO <sub>4</sub> /kg
土壤	Ammonium,ion(銨(離子))	0.33	kg PO <sub>4</sub> /kg
水	*COD,Chemical Oxygen Demand(化學需氧量)	0.022	kg PO <sub>4</sub> /kg
水	kjeldahl-N(氮(由凱氏所定義))	0.42	kg PO <sub>4</sub> /kg
空氣	*Nitrate(硝酸鉀)	0.1	kg PO <sub>4</sub> /kg
水	*Nitrate(硝酸鉀)	0.1	kg PO <sub>4</sub> /kg
土壤	Nitrate(硝酸鉀)	0.1	kg PO <sub>4</sub> /kg
空氣	Nitric acid(硝酸)	0.093	kg PO <sub>4</sub> /kg
水	Nitric acid(硝酸)	0.093	kg PO <sub>4</sub> /kg
土壤	Nitric acid(硝酸)	0.093	kg PO <sub>4</sub> /kg
空氣	Nitric oxide(一氧化氮)	0.2	kg PO <sub>4</sub> /kg
空氣	*Nitrite(亞硝酸鹽)	0.13	kg PO <sub>4</sub> /kg
水	*Nitrite(亞硝酸鹽)	0.13	kg PO <sub>4</sub> /kg
水	*Nitrogen(氮)	0.42	kg PO <sub>4</sub> /kg
空氣	Nitrogen dioxide(過氧化氮)	0.13	kg PO <sub>4</sub> /kg
空氣	*Nitrogen oxides(二氧化氮)	0.13	kg PO <sub>4</sub> /kg
水	Nitrogen oxides(二氧化氮)	0.13	kg PO <sub>4</sub> /kg
土壤	Nitrogen oxides(二氧化氮)	0.13	kg PO <sub>4</sub> /kg
空氣	*Nitrogen,total(氮(全部))	0.42	kg PO <sub>4</sub> /kg
水	*Nitrogen,total(氮(全部))	0.42	kg PO <sub>4</sub> /kg
土壤	Nitrogen,tota(氮(全部))	0.42	kg PO <sub>4</sub> /kg
空氣	*Phosphate(磷酸鹽)	1	kg PO <sub>4</sub> /kg
水	*Phosphate(磷酸鹽)	1	kg PO <sub>4</sub> /kg
水	Nitrite(亞硝酸鹽)	0.13	kg PO <sub>4</sub> /kg
空氣	*phosphoric acid(磷酸)	0.97	kg PO <sub>4</sub> /kg

表 3.33 Eutrophication(水質優養化)常態化單位及權重因子(續)

水	*phosphoric acid(磷酸)	0.97	kg PO <sub>4</sub> /kg
土壤	phosphoric acid(磷酸)	0.97	kg PO <sub>4</sub> /kg
空氣	*Phosphorus(紅磷)	3.06	kg PO <sub>4</sub> /kg
水	*Phosphorus(紅磷)	3.06	kg PO <sub>4</sub> /kg
土壤	Phosphorus(紅磷)	3.06	kg PO <sub>4</sub> /kg
空氣	phosphorus pentoxide(五氧化二磷)	1.34	kg PO <sub>4</sub> /kg
水	phosphorus pentoxide(五氧化二磷)	1.34	kg PO <sub>4</sub> /kg
土壤	phosphorus pentoxide(五氧化二磷)	1.34	kg PO <sub>4</sub> /kg
空氣	*phosphorus,total(紅磷(全部))	3.06	kg PO <sub>4</sub> /kg
水	*phosphorus,total(紅磷(全部))	3.06	kg PO <sub>4</sub> /kg
土壤	phosphorus,total(紅磷(全部))	3.06	kg PO <sub>4</sub> /kg

(註:有\*代表為水泥或鋼筋有此排放量數據

資料來源:simapro7.3 資料庫)

表 3.34 Heavy metals(重金屬)常態化單位及權重因子

排放項目區分	項目	權重因子	常態化單位
水	*Antimony(銻)	2	kg Pb/kg
水	*Arsenic,ion(砷(離子))	1	kg Pb/kg
水	*Barium(鋇)	0.014	kg Pb/kg
水	*Boron(硼)	0.03	kg Pb/kg
空氣	*Cadmium(鎘)	50	kg Pb/kg
空氣	Cadmium oxide(氧化鎘)	50	kg Pb/kg
水	*Cadmium,ion(鎘(離子))	3	kg Pb/kg
水	*Chromium,ion(鉻(離子))	0.2	kg Pb/kg
水	*Copper,ion(銅(離子))	0.005	kg Pb/kg
空氣	*Heavy metals,unspecified(重金屬(未具體說明的))	1	kg Pb/kg
空氣	*Lead(鉛)	1	kg Pb/kg
水	*Lead(鉛)	1	kg Pb/kg
空氣	*Manganese(錳)	1	kg Pb/kg
水	*Manganese(錳)	0.02	kg Pb/kg
空氣	*Mercury(汞)	1	kg Pb/kg
水	*Mercury(汞)	10	kg Pb/kg
水	*Metallic ions,unspecified(金屬(離子)(未具體說明))	0.002223	kg Pb/kg
空氣	*Metals ,unspecified(金屬(未具體說明的))	0.03867	kg Pb/kg
水	*Molybdenum(鉬)	0.14	kg Pb/kg
水	*Nickel,ion(鎳(離子))	0.5	kg Pb/kg

(註:有\*代表為水泥或鋼筋有此排放量數據)

資料來源: simapro7.3 資料庫)

表 3.35 carcinogens(致癌物質)常態化單位及權重因子

排放項目區分	項目	權重因子	常態化單位
空氣	Acrylonitrile(丙烯清)	0.00022	kgB(a)P /kg
空氣	*Arsenic(砷)	0.044	kgB(a)P /kg
空氣	*Benzene(苯)	0.000044	kgB(a)P /kg
空氣	*Benzene,ethyl-(乙基苯)	0.000044	kgB(a)P /kg
空氣	*Benzo(a)pyrene(苯并[a]芘)	1	kgB(a)P /kg
空氣	*Chromium VI(鉻酸鉀)	0.44	kgB(a)P /kg
空氣	*Ethene,chloro-(氯乙烯)	0.000011	kgB(a)P /kg
空氣	Fluoranthene(芘)	1	kgB(a)P /kg
空氣	Hydrocarbons,aromatic(芳香烴)	0.000044	kgB(a)P /kg
空氣	*Metals,unspecified(金屬(未具體說明的))	0.0001786	kgB(a)P /kg
空氣	*Nickel(鎳)	0.0044	kgB(a)P /kg
空氣	*PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons(多環芳香烴)	0.4792	kgB(a)P /kg
空氣	Tar(噻唑偶氮苯二酚)	0.000044	kgB(a)P /kg

(註:有\*代表為水泥或鋼筋有此排放量數據

資料來源:.simapro7.3 資料庫)

表 3.36 pesticides(農藥使用)常態化單位及權重因子

排放項目 區分	項目	權重因 子	常態化單位
水	2,4-D(2,4 二氯苯氧乙酸)	1	kg act. Subst /kg
水	2,4,5-T(2,4,5 三氯苯氧乙酸)	1	kg act. Subst /kg
水	Acephate(乙酰甲胺磷)	1	kg act. Subst /kg
水	Aldicarb	1	kg act. Subst /kg
水	Aldrin(二氯丙酸)	1	kg act. Subst /kg
水	Anilazine	1	kg act. Subst /kg
水	Atrazine	1	kg act. Subst /kg
水	Azinphos-eth	1	kg act. Subst /kg
水	Azinphos-methyl	1	kg act. Subst /kg
水	Benomyl	1	kg act. Subst /kg
水	Bentazone	1	kg act. Subst /kg
水	Bifenthrin	1	kg act. Subst /kg
水	Bis(2-chloroethyl)ether(二氯乙醚)	1	kg act. Subst /kg
水	Bis(chloroethyl)ether	1	kg act. Subst /kg
水	Captafol	1	kg act. Subst /kg
水	Captan	1	kg act. Subst /kg
水	Carbaryl	1	kg act. Subst /kg
水	Carbendazim	1	kg act. Subst /kg
水	Carbofuran	1	kg act. Subst /kg
水	Chlordane	1	kg act. Subst /kg
水	Chlorfenvinphos	1	kg act. Subst /kg
水	Chloridazon(磷機聚羧酸)	1	kg act. Subst /kg
水	Chlorothalonil	1	kg act. Subst /kg
水	Chlorpropham(氯苯胺靈)	1	kg act. Subst /kg
水	Chlorpyrifos	1	kg act. Subst /kg
水	Coumafos	1	kg act. Subst /kg
水	Cyanazine	1	kg act. Subst /kg
水	DDT(2,3-二脫氧陶甘)	1	kg act. Subst /kg
水	Deltamethrin(溴氫菊酯)	1	kg act. Subst /kg
水	Demeton	1	kg act. Subst /kg
水	Desmetry	1	kg act. Subst /kg

表 3.36 pesticides(農藥使用)常態化單位及權重因子(續)

水	Diazinon	1	kg act. Subst /kg
水	Dichlorprop	1	kg act. Subst /kg
水	Dichlorvos	1	kg act. Subst /kg
水	Dieldrin	1	kg act. Subst /kg
水	Dimethoate	1	kg act. Subst /kg
水	Dinoseb	1	kg act. Subst /kg
水	Dinoterb(芸香酸二壬酯)	1	kg act. Subst /kg
水	Diquat dibromide	1	kg act. Subst /kg
水	Disinfectants,unspecified(消毒劑(未具體說明的))	1	kg act. Subst /kg
水	Disulfoton	1	kg act. Subst /kg
水	Diuron	1	kg act. Subst /kg
水	DNOC(4,6-二硝基鄰甲酚)	1	kg act. Subst /kg
水	Endosulfan(硫丹)	1	kg act. Subst /kg
水	Endrin	1	kg act. Subst /kg
水	Ethoprop	1	kg act. Subst /kg
水	Fenitrothion	1	kg act. Subst /kg
水	Fenthion	1	kg act. Subst /kg
水	Fentin acetate(三苯基錫醋酸鹽)	1	kg act. Subst /kg
水	Fentin chloride(三苯基氯化錫)	1	kg act. Subst /kg
水	Fentin hydroxide(三苯基氫氧化錫)	1	kg act. Subst /kg
水	Folpet	1	kg act. Subst /kg
水	Fungicides,unspecified(殺真菌劑(未具體說明的))	1	kg act. Subst /kg
水	Glyphosate	1	kg act. Subst /kg
水	Heptachlor	1	kg act. Subst /kg
水	Herbicides,unspecified(除草劑(未具體說明的))	1	kg act. Subst /kg
水	Insecticides,unspecified(殺蟲劑(未具體說明的))	1	kg act. Subst /kg
水	Iprodione	1	kg act. Subst /kg
水	Isoproturon	1	kg act. Subst /kg
水	Lindane	1	kg act. Subst /kg
水	Lindane,alpha-	1	kg act. Subst /kg
水	Lindane,bera-	1	kg act. Subst /kg
水	Linuron	1	kg act. Subst /kg
水	Malathion	1	kg act. Subst /kg

表 3.36 pesticides(農藥使用)常態化單位及權重因子(續)

水	Maneb	1	kg act. Subst /kg
水	MCPA(2 - 甲基 - 4 - 氯苯氧乙酸)	1	kg act. Subst /kg
水	Mecoprop	1	kg act. Subst /kg
水	Metamitron	1	kg act. Subst /kg
水	Metazachlor	1	kg act. Subst /kg
水	Metribuzin	1	kg act. Subst /kg
水	Mevinfos	1	kg act. Subst /kg
水	Monolinuron	1	kg act. Subst /kg
水	Oxamyl	1	kg act. Subst /kg
水	Oxydemeton,methyl	1	kg act. Subst /kg
水	Parathion(對硫磷)	1	kg act. Subst /kg
水	Parathion,methyl	1	kg act. Subst /kg
水	Permethrin(氯菊酯)	1	kg act. Subst /kg
水	Pesticides,unspecified(農藥(未具體說明的))	1	kg act. Subst /kg
水	Phoxim(辛硫磷)	1	kg act. Subst /kg
水	Pirimicarb	1	kg act. Subst /kg
水	Propachlor	1	kg act. Subst /kg
水	Propoxur	1	kg act. Subst /kg
水	Pyrazophos	1	kg act. Subst /kg
水	Simazine	1	kg act. Subst /kg
水	Thiram	1	kg act. Subst /kg
水	Tolclophos-methyl	1	kg act. Subst /kg

(資料來源:.simapro7.3 資料庫)

表 3.37 Summer smog(夏季煙霧)常態化單位及權重因子

排放項目 區分	項目	權重因 子	常態化單位
空氣	2-Propanol(異丙醇)	0.196	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /kg
空氣	*Acetaldehyde(乙醛)	0.527	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /kg
空氣	*Acetone(丙酮)	0.178	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /kg
空氣	*Acetonitrile(乙腈)	0.416	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /kg
空氣	*Acrolein(丙烯醛)	0.603	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /kg
空氣	Acrylonitrile(丙烯腈)	0.416	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /kg
空氣	*Alcohols,unspecified(酒精(未具體說明的))	0.196	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /kg
空氣	*Aldehydes,unspecified(醛(未具體說明的))	0.443	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /kg
空氣	*Benzaldehyde(苯甲醛)	0.334	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /kg
空氣	*Benzene(苯)	0.189	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /kg
空氣	*Benzene,ethyl-(乙基苯)	0.593	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /kg
空氣	*Benzo(a)pyrene(苯并[a]芘)	0.761	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /kg
空氣	Biphenyl(聯苯)	0.761	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /kg
空氣	*Butane(正丁烷)	0.41	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /kg
空氣	*Butene(順-2-丁烯)	0.992	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /kg
空氣	Caprolactam(己內酰胺)	0.761	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /kg
空氣	*Chloroform(三氯甲烷)	0.021	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /kg
空氣	Crude oil(石油原油)	0.398	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /kg
空氣	Diethyl ether(乙醚)	0.398	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /kg
空氣	*Ethane(乙烷)	0.082	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /kg
空氣	*Ethane, 1,1,1-trichloro-, HCFC-140(1,1,1-三氯乙烷)	0.021	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /kg
空氣	*Ethane, 1,2-Dichloro-(1,2-二氯乙烷)	0.021	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /kg
空氣	*Ethanol(乙醇)	0.268	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /kg
空氣	*Ethene(乙烯)	1	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /kg
空氣	*Ethene,chloro-(氯乙烯)	0.021	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /kg
空氣	*Ethene,tetrachloro-(四氯乙烯)	0.005	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /kg
空氣	*Ethene,trichloro-(三氯乙烯)	0.021	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /kg
空氣	Ethlene glycol(乙二醇)	0.196	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /kg
空氣	*Ethlene oxide(環氧乙烷)	0.377	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /kg
空氣	*Ethyne(乙炔)	0.168	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /kg
空氣	*Formaldehyde(甲醛)	0.421	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /kg

表 3.37 Summer smog(夏季煙霧)常態化單位及權重因子(續)

空氣	*Heptane(庚烷)	0.529	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /kg
空氣	*Hexane(正己烷)	0.421	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /kg
空氣	*Hydrocarbons,aliphatic, alkanes ,unspecified	0.398	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /kg
空氣	Hydrocarbons,aliphatic, alkenes ,unspecified	0.906	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /kg
空氣	*Hydrocarbons,aliphatic ,unspecified	0.398	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /kg
空氣	*Hydrocarbons,aromatic(芳香煙)	0.761	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /kg
空氣	*Hydrocarbons,chlorinated(氯化煙)	0.021	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /kg
空氣	Hydrocarbons,halogenated(鹵化煙)	0.021	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /kg
空氣	Hydrocarbons,unspecified	0.398	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /kg
空氣	kerosene(煤油)	0.398	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /kg
空氣	ketones,unspecified(酮)	0.326	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /kg
空氣	*Methane(甲烷)	0.007	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /kg
空氣	*Methane,biogenic(甲烷(由生物產生))	0.007	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /kg
空氣	*Methane,dichloro-,HCC-30(二氯甲烷)	0.021	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /kg
空氣	*Methane,fossil(甲烷(由化石燃料產生))	0.007	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /kg
空氣	*Methane,tetrachloro-,CFC-10(四氯化碳)	0.021	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /kg
空氣	*Methanol(甲醇)	0.123	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /kg
空氣	*Methyl ethyl ketone(丁酮)	0.473	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /kg
空氣	Methyl mercaptan(甲硫醇)	0.377	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /kg
空氣	Naphthalene(萘)	0.761	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /kg
空氣	*NMVOC(非甲烷揮發性有機化合物)	0.416	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /kg
空氣	*PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons(多環芳香煙)	0.04932	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /kg
空氣	*Pentane(戊烷)	0.408	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /kg
空氣	Petrol(石油)	0.398	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /kg
空氣	*Phenol(苯酚)	0.761	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /kg
空氣	Phenol,chloro-(氯坊)	0.021	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /kg
空氣	*Phenol,pentachloro	0.021	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /kg
空氣	Phthalic anhydride	0.761	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /kg
空氣	*Propane(丙烷)	0.42	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /kg
空氣	*Propene(丙烯)	1.03	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /kg
空氣	*Propionic acid(丙酸)	0.377	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /kg
空氣	*Styrene(苯乙烯)	0.761	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /kg
空氣	Vinyl acetate(醋酸乙烯)	0.223	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /kg

表 3.37 Summer smog(夏季煙霧)常態化單位及權重因子(續)

空氣	*VOC(揮發性有機化合物)	0.398	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /kg
----	----------------	-------	--------------------------------------

(註:有\*代表為水泥或鋼筋有此排放量數據)

資料來源:..simapro7.3 資料庫)

表 3.38 winter smog(冬季煙霧)常態化單位及權重因子

排放項目 區分	項目	權重 因子	常態化單位
空氣	Carbon black(黑炭)	1	kg SPM /kg
空氣	Iron dust(鐵粉)	1	kg SPM /kg
空氣	*Particulates,<10µm(顆粒<10 微米)	1	kg SPM /kg
空氣	*Particulates,<10µm(mobile)	1	kg SPM /kg
空氣	*Particulates,<10µm(stationary)	1	kg SPM /kg
空氣	*Particulates,<2.5µm(顆粒<2.5 微米)	1	kg SPM /kg
空氣	*Particulates,>2.5µm,and<10µm	1	kg SPM /kg
空氣	Particulates,diesel soot(顆粒,柴油煤煙)	1	kg SPM /kg
空氣	Particulates,SPM(顆粒,電子顯微鏡下的)	1	kg SPM /kg
空氣	Soot(煤煙)	1	kg SPM /kg
空氣	*Sulfur dioxide(二氧化硫)	1	kg SPM /kg
空氣	Sulfur oxide(硫氧化物)	1	kg SPM /kg

(註:有\*代表為水泥或鋼筋有此排放量數據)

資料來源:..simapro7.3 資料庫)

表 3.39 Energy resources(能源消耗)常態化單位及權重因子

排放項目 區分	項目	權重因子	常態化單位
未加工的	Biomass,feedstock(生物質,原料)	1	MJ LHV /MJ
未加工的	Coal,18MJ per kg, in ground	18	MJ LHV /kg
未加工的	Coal,26.4MJ per kg, in ground	26.4	MJ LHV /kg
未加工的	Coal,29.3MJ per kg, in ground	29.3	MJ LHV /kg
未加工的	Coal,brown,10MJ per kg, in ground	10	MJ LHV /kg
未加工的	Coal,brown,8MJ per kg, in ground	8	MJ LHV /kg
未加工的	*Coal,brown, in ground	10	MJ LHV /kg
未加工的	Coal,feedstock,26.4MJ per kg, in ground	26.4	MJ LHV /kg
未加工的	*Coal,hard,unspecified, in ground	19.1	MJ LHV /kg
未加工的	Energy,form coal(能量(從煤所得))	1	MJ LHV /MJ
未加工的	Energy,form coal,brown(能量(從褐色的煤所得))	1	MJ LHV /MJ
未加工的	Energy,form gas,natural(能量(從天然瓦斯所得))	1	MJ LHV /MJ
未加工的	Energy,form hydro power(能量(從水力發電所得))	1	MJ LHV /MJ
未加工的	Energy,form hydrogen(能量(從氫所得))	1	MJ LHV /MJ
未加工的	Energy,form oil(能量(從油所得))	1	MJ LHV /MJ
未加工的	Energy,form peat(能量(從泥煤所得))	1	MJ LHV /MJ
未加工的	Energy,form sulfur(能量(從硫磺所得))	1	MJ LHV /MJ
未加工的	Energy,form uranium(能量(從鈾所得))	1	MJ LHV /MJ
未加工的	Energy,form wood(能量(從木頭所得))	1	MJ LHV /MJ
未加工的	Energy,geothermal(能量(從地熱所得))	1	MJ LHV /MJ
未加工的	*Energy,gross calorific value, in biomass	1	MJ LHV /MJ
未加工的	*Energy,kinetic(in wind),converted	1	MJ LHV /MJ
未加工的	Energy,recovered(重新獲得的能量)	1	MJ LHV /MJ
未加工的	*Energy,solar,recovered(重新獲得的太陽能)	1	MJ LHV /MJ
未加工的	*Energy,unspecified(能量(未具體說明的))	1	MJ LHV /MJ
未加工的	Gas,mine,off-gas,process,coal mining/kg	49.8	MJ LHV /kg
未加工的	*Gas,mine,off-gas,process,coal mining/m3	39.8	MJ LHV /m <sup>3</sup>
未加工的	Gas,natural,30.3MJ per kg,in ground	30.3	MJ LHV /kg
未加工的	Gas,natural,35MJ per m3,in ground	35	MJ LHV /m <sup>3</sup>
未加工的	Gas,natural,36.6MJ per m3,in ground	36.6	MJ LHV /m <sup>3</sup>
未加工的	Gas,natural,46.8MJ per kg,in ground	46.8	MJ LHV /kg

表 3.39 Energy resources(能源消耗)常態化單位及權重因子

未加工的	Gas,natural,feedstock,35MJ per m3,in ground	35	MJ LHV /m <sup>3</sup>
未加工的	Gas,natural,feedstock,46.8MJ per kg,in ground	46.8	MJ LHV /kg
未加工的	Gas,off-gas,oil production,in ground	40.9	MJ LHV /kg
未加工的	Gas,petroleum,35MJ per m3 ,in ground	35	MJ LHV /m <sup>3</sup>
未加工的	*Gas,natural,in ground	38	MJ LHV /kg
未加工的	*Methane(甲烷)	35.9	MJ LHV /kg
未加工的	Oil,crude,38400MJ per m3,in ground	38400	MJ LHV /m <sup>3</sup>
未加工的	Oil,crude,41MJ per kg,in ground	41	MJ LHV /kg
未加工的	Oil,crude,42MJ per kg,in ground	42	MJ LHV /kg
未加工的	Oil,crude,42.6MJ per kg,in ground	42.6	MJ LHV /kg
未加工的	Oil,crude,42.7MJ per kg,in ground	42.7	MJ LHV /kg
未加工的	Oil,crude,feedstock,41MJ per kg,in ground	41	MJ LHV /kg
未加工的	Oil,crude,feedstock,42MJ per kg,in ground	42	MJ LHV /kg
未加工的	*Oil,crude,in ground	45.8	MJ LHV /kg
未加工的	*Peat,in ground	13	MJ LHV /kg
未加工的	Steam form waste incuneration(垃圾焚化的蒸汽)	1	MJ LHV /MJ
未加工的	Uranium ore,1.11 GJ Per kg, in ground	1110	MJ LHV /kg
未加工的	Uranium 2291 GJ Per kg, in ground	2291000	MJ LHV /kg
未加工的	Uranium 451 GJ Per kg, in ground	451000	MJ LHV /kg
未加工的	Uranium 560 GJ Per kg, in ground	560000	MJ LHV /kg
未加工的	*Uranium, in ground	560000	MJ LHV /kg
未加工的	Water,barrage(水壩)	0.01	MJ LHV /kg
未加工的	Wood and wood waste, 9.5MJ per kg	9.5	MJ LHV /kg
未加工的	Wood ,feedstock	15.3	MJ LHV /kg
未加工的	*Wood ,unspecified standing/kg(木頭(未具體說明的))	15.3	MJ LHV /kg

(註:有\*代表為水泥或鋼筋有此排放量數據

資料來源: simapro7.3 資料庫)

表 3.40 Solid waste(廢棄物產生)常態化單位及權重因子

排放項目區分	項目	權重因子	常態化單位
廢物	Aluminum waste(廢棄鋁)	1	kg /kg
廢物	Asbestos(石棉)	1	kg /kg
廢物	Asphalt waste(瀝青廢棄物)	1	kg /kg
廢物	Bilge oil(艙底廢油)	1	kg /kg
廢物	Bitumen waste(瀝青廢棄物)	1	kg /kg
廢物	Bulk waste, unspecified(體積大的廢棄物(未具體說明的))	1	kg /kg
廢物	Calcium fluoride waste(氟化鈣廢棄物)	1	kg /kg
廢物	Cardboard waste(紙板廢棄物)	1	kg /kg
廢物	Carton waste(廢物箱)	1	kg /kg
廢物	Catalyst waste(催化劑廢液)	1	kg /kg
廢物	Cathode iron ingots waste(從陰極排放鐵錠廢棄物)	1	kg /kg
廢物	Cathode loss(陰極損失)	1	kg /kg
廢物	Chemical waste,inert(化學廢棄物(惰性的))	1	kg /kg
廢物	Chemical waste,regulated(化學廢棄物(有管制的))	1	kg /kg
廢物	Chemical waste,unspecified(化學廢棄物(未具體說明的))	1	kg /kg
廢物	Chromium waste(含鉻廢水)	1	kg /kg
廢物	Coal ash(煤灰)	1	kg /kg
廢物	Coal tailings(煤尾礦)	1	kg /kg
廢物	Construction waste(建設的廢棄物)	1	kg /kg
廢物	Copper waste(含銅廢水)	1	kg /kg
廢物	Dross(浮渣)	1	kg /kg
廢物	Dust,break-out(突然產生的塵土)	1	kg /kg
廢物	E-saving bulb plastic waste(節能燈泡塑膠部分的廢棄物)	1	kg /kg
廢物	E-saving bulb waste(節能燈泡的廢棄物)	1	kg /kg
廢物	Electronic waste(電力所產生的廢棄物)	1	kg /kg
廢物	Fluoride waste(含氟廢水)	1	kg /kg
廢物	Fly ash(飛灰)	1	kg /kg
廢物	Gas pipe waste(煤氣管廢棄物)	1	kg /kg
廢物	Glass waste(玻璃廢棄物)	1	kg /kg
廢物	Iron waste(含鐵廢水)	1	kg /kg
廢物	Light bulb waste(燈泡廢棄物)	1	kg /kg

表 3.40 Solid waste(廢棄物產生)常態化單位及權重因子(續)

廢物	Limestone waste(石灰石廢棄物)	1	kg /kg
廢物	Metal waste(金屬(合金)廢棄物)	1	kg /kg
廢物	Mineral waste(礦物廢棄物)	1	kg /kg
廢物	Mineral waste,from mining(採礦所產生得廢棄物)	1	kg /kg
廢物	Mineral wool waste(礦棉廢棄物)	1	kg /kg
廢物	Oil waste(含油廢水)	1	kg /kg
廢物	Packaging waste,paper and board	1	kg /kg
廢物	Packaging waste,plastic(用塑膠包裝的廢棄物)	1	kg /kg
廢物	Packaging waste,steel(用鋼筋包裝的廢棄物)	1	kg /kg
廢物	Packaging waste,unspecified	1	kg /kg
廢物	Packaging waste,wood(用木頭包裝的廢棄物)	1	kg /kg
廢物	Paint waste(油漆塗料的廢棄物)	1	kg /kg
廢物	Photovoltaic cell waste(光伏電池廢棄物)	1	kg /kg
廢物	Photovoltaic panel waste(光伏面板廢棄物)	1	kg /kg
廢物	Photovoltaic production waste(光伏面板廢棄物)	1	kg /kg
廢物	Plastic waste(塑膠廢棄物)	1	kg /kg
廢物	Polyvinyl chloride waste(聚氯乙烯廢料)	1	kg /kg
廢物	Process waste(工藝廢棄物)	1	kg /kg
廢物	Production waste(產品所產生的廢棄物)	1	kg /kg
廢物	Pruduction waste,not inert	1	kg /kg
廢物	Rejects(被拋棄的東西)	1	kg /kg
廢物	Residues(廢墟)	1	kg /kg
廢物	Slags(爐渣)	1	kg /kg
廢物	Slags and ashes(爐渣和灰)	1	kg /kg
廢物	Sludge(汙泥)	1	kg /kg

(註:此環境衝擊項目均無水泥或鋼筋排放量數據

資料來源:.simapro7.3 資料庫)

由以上的表格可以知道，若是要進行確切的生命週期評估，則須要對於產品的表示國內的數據並不足以進行所有環境衝擊的評估，故本研究針各過程是否產生清單上之物質進行試驗方式即可。不過，目前我們發現國內的數據僅有對二氧化碳還有耗能方面有數據，其它並無任何數據。所以本研究針對溫室效應及能源消耗指標進行環境衝擊評估。

### 三、案例探討

以水膠比 0.45，漿體量  $350\text{kg/m}^3$ ，設計坍度為  $18\pm 2\text{cm}$ ，28 天強度為 28MPa，參考（方銜尉，「爐石粉細度與膠結材組合對混凝土性質影響之研究」）[2] 其研究使用爐石粉取代水泥量分別 0%、25%、35%、45%，飛灰則固定取代 15%，配比採用 ACI-211 設計步驟求得各種材料單位重量；三合一混凝土之飛灰及爐石粉之添加量為參考 CNS12283 規範，分別設計出飛灰以及爐石粉取代水泥之百分比，空氣含量 2%。

表 3.41、3.42 為試體符號及試體編號表：

表 3.41 試體符號表

符號	說明
S	減水劑
F	飛灰
O	普通波特蘭水泥
B	爐石粉
25、35、45	爐石粉取代水泥比例（重量%）

（資料來源：文獻[2]）

表 3.42 試體編號表

符號	說明
OS	普通波特蘭水泥 水泥 100% (重量%)
OFS	普通波特蘭水泥 水泥：飛灰=85：15 (%)
OFSB <sub>25</sub>	爐石粉水泥 水泥：爐石粉：飛灰=60：25：15 (%)
OFSB <sub>35</sub>	爐石粉水泥 水泥：爐石粉：飛灰=50：35：15 (%)
OFSB <sub>45</sub>	爐石粉水泥 水泥：爐石粉：飛灰=40：45：15 (%)

(資料來源：文獻[2])

設計的配比及各配比 28 天抗壓強度，如表 3.43、3.44 所示：

表 3.43 設計的配比(kg/m<sup>3</sup>)

項目 代號	水泥	爐石粉	飛灰	水	粗骨材	細骨材	減水劑
OS	350	0	0	157.5	1084.42	828.99	3.5
OFS	297.5	0	52.5	157.5	1084.42	828.99	3.5
OFSB <sub>25</sub>	210	87.5	52.5	157.5	1084.42	828.99	3.5
OFSB <sub>35</sub>	175	122.5	52.5	157.5	1084.42	828.99	3.5
OFSB <sub>45</sub>	140	157.5	52.5	157.5	1084.42	828.99	3.5

(資料來源：文獻[2])

表 3.44 各配比抗壓強度(MPa)

代碼 齡期	OS	OFS	OFSB <sub>25</sub>	OFSB <sub>35</sub>	OFSB <sub>45</sub>
1day	6.92	13.56	7.38	5.20	3.30
3day	12.03	17.33	10.05	8.91	7.97
7day	15.74	27.85	16.79	13.36	13.32
14day	23.32	34.76	29.71	29.84	26.93
28day	26.05	39.61	38.79	40.81	36.98

結構材料生命週期評估基準與耐久性評估指標之建立(1)

56day	28.08	40.67	42.13	48.17	43.63
-------	-------	-------	-------	-------	-------

(資料來源：文獻[2])

根據表 3.44 代號為 OS 混凝土試體的 28 天抗壓強度約為 26 Mpa，依式 3.14 可推算其允許壓應力( $\sigma_{allow}$ )：

$$\sigma_{allow}(FS) = \sigma_{strength}(\text{假設 } FS=2)$$

$$2\sigma_{allow} = \sigma_{strength} = 26\text{MPa}$$

$$\sigma_{allow} = 13\text{Mpa} \quad (\text{式 } 3.14)$$

參考「混凝土設計規範之應用」【24】例題 26-3，此題一樓邊柱受到各載重組合如表 3.45 所示：

表 3.45 柱受到各載重組合

載重組合	軸力 Pu(tf)
1.2D+1.6L	454.9
1.2D+0.5L+E	327.9
	459.0
0.9D+E	208.6
	339.7

(資料來源：「混凝土設計規範之應用」)

採用混凝土柱承受載重  $P_u=459(\text{tf})$ ，允許壓應力為  $\sigma_{allow}=13\text{Mpa}$ ，依式 3.15 計算其混凝土柱邊長(假設混凝土柱為正方形)：

$$1\text{tf} = 1000\text{kgf} = 9800\text{N}$$

$$P = 9800(459) = 4498200(\text{N})$$

$$P/A=4498200/A=13\text{Mpa}$$

$$A=4498200/13 \times 10^6=0.346\text{m}^2$$

$$\sqrt{4.4982\text{m}^2} \approx 0.588\text{m} \quad (\text{式 3.15})$$

由式 3.15 可推得表 3.44 各配比混凝土柱邊長，整理至表 3.46：

表 3.46 各配比混凝土柱邊長(m)

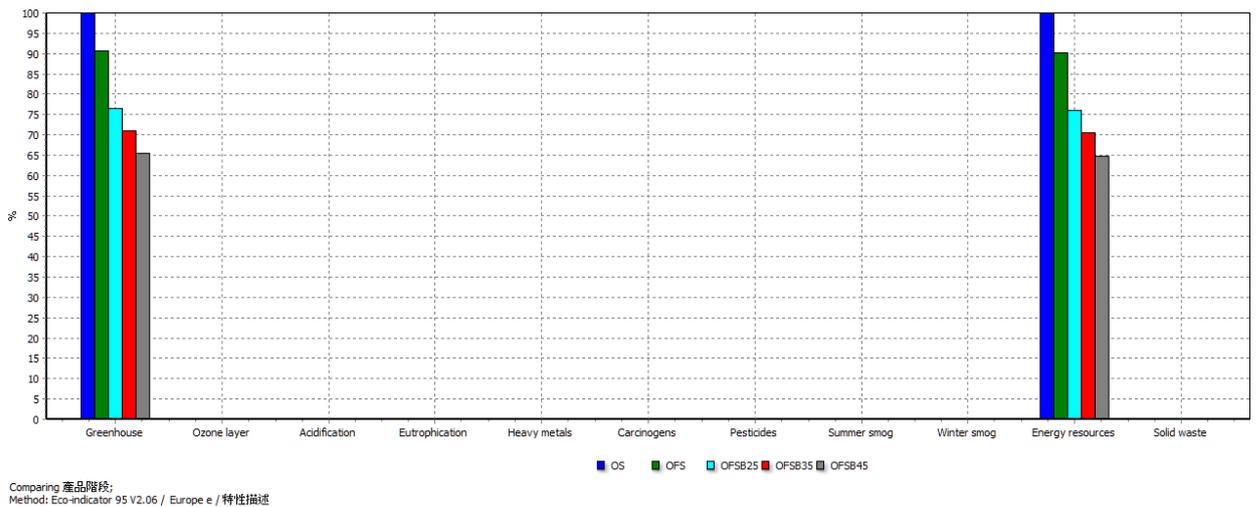
強度	26.05	39.61	38.79	40.81	36.98
邊長	0.588	0.477	0.482	0.470	0.493
配比	水泥 100% (重量%)	水泥：飛灰 = 85：15 (%)	水泥：爐石粉： 飛灰 = 60：25： 15 (%)	水泥：爐石 粉：飛灰 = 50：35：15 (%)	水泥：爐石 粉：飛灰 = 40：45：15 (%)

(資料來源：本研究整理)

表 3.44 可看到一現象，混凝土強度越大所需試體邊長就越小，相對的截面積也就越小，因此原料使用量就會減少，對環境影響也會降低許多。

## 結構材料生命週期評估基準與耐久性評估指標之建立(1)

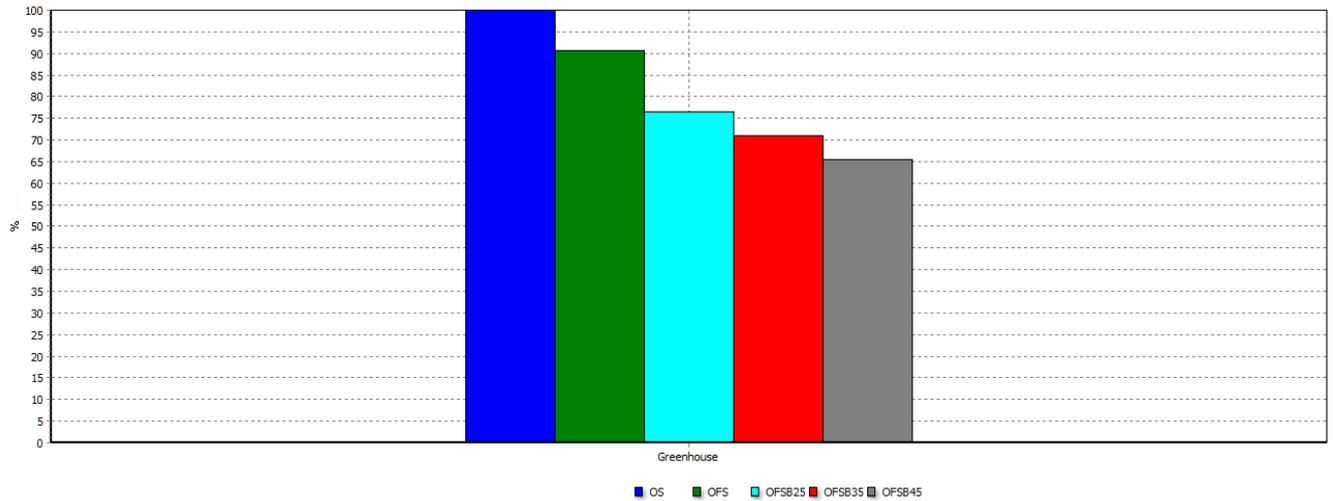
將表 3.43 混凝土各配比原料依照表 3.27、表 3.28 排放資訊輸入進 simapro 軟體(減水劑排放量資訊忽略不記，假設使用長寬高各為 1m<sup>3</sup> 的混凝土柱，鋼筋用量均為 1kg)，使用 Eco-Indicator95 環境衝擊方法，結果如圖 3.5 所示。



**圖 3.5 各配比混凝土試體特徵化圖(本國數據)**

(資料來源: 本研究製作)

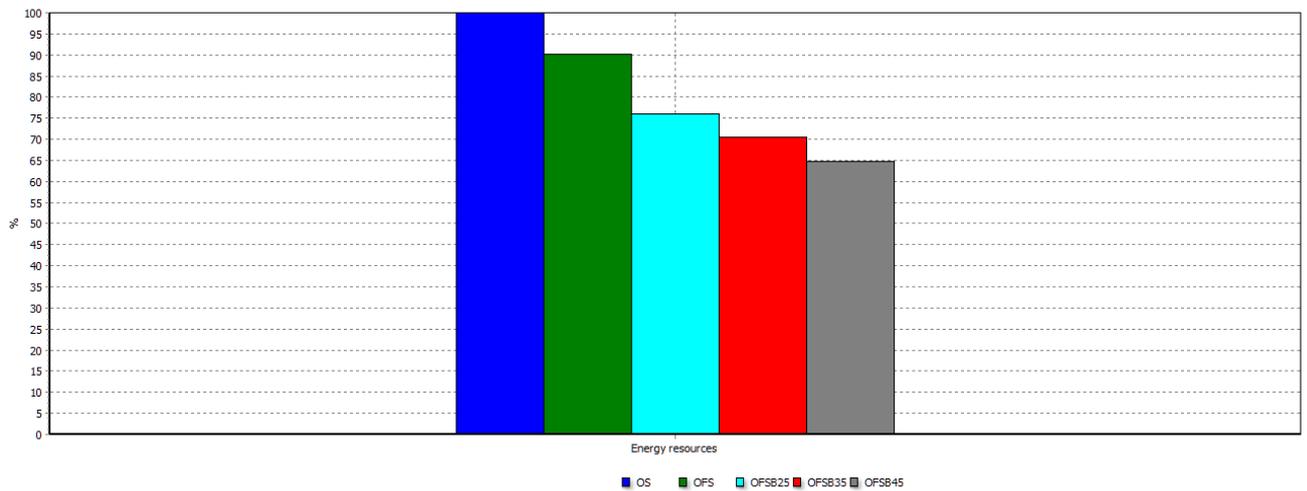
圖 3.5 為各配比混凝土試體使用 Eco-Indicator95 環境衝擊方法的特徵化圖，十一項衝擊指標因只輸入 CO<sub>2</sub> 及耗能的數據，故只有溫室效應(Green house)跟能源消耗(Energy resources)指標有顯示影響百分比，截取 2 個指標分別給予影響，如圖 3.6、圖 3.7 所示。經特徵化計算後之數值整理至表 3.47。



Comparing 產品階段;  
Method: Eco-indicator 95 V2.06 / Europe e / 特性描述

圖 3.6 溫室效應特徵化圖(本國數據)

(資料來源: 本研究製作)



Comparing 產品階段;  
Method: Eco-indicator 95 V2.06 / Europe e / 特性描述

圖 3.7 能源消耗特徵化圖(本國數據)

(資料來源: 本研究製作)

## 結構材料生命週期評估基準與耐久性評估指標之建立(1)

表 3.47 各配比特徵化後的數值(本國數據)

衝擊指標	特徵化單位	OS	OFS	OFSB <sub>25</sub>	OFSB <sub>35</sub>	OFSB <sub>45</sub>
Greenhouse	kg CO <sub>2</sub>	508.9237	460.9912	389.7049	361.1904	332.6335
Ozone layer	kg CFC11	0	0	0	0	0
Acidification	kg SO <sub>2</sub>	0	0	0	0	0
Eutrophication	kg PO <sub>4</sub>	0	0	0	0	0
Heavy metals	kg Pb	0	0	0	0	0
Carcinogens	kg B(a)P	0	0	0	0	0
Pesticides	kg act.subst	0	0	0	0	0
Summer smog	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0	0	0	0	0
Winter smog	kg SPM	0	0	0	0	0
Energy resources	MJ LHV	2326.162	2100.937	1775.262	1644.992	1514.622
Solid waste	kg	0	0	0	0	0

(資料來源:本研究整理)

在其他環境指標，在實際情形上不可能會無影響，故把水泥排放資訊引用 simapro(瑞士)資料庫中的 portland cement，得到結果如圖 3.8：

結構材料生命週期評估基準與耐久性評估指標之建立(1)

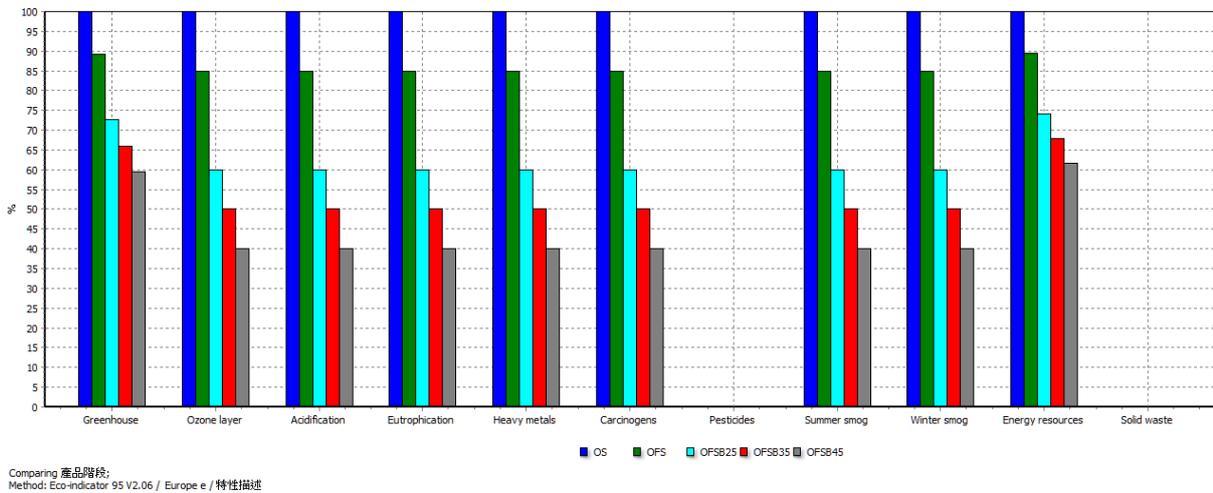


圖 3.8 各配比混凝土試體特徵化圖(水泥使用國外數據)

(資料來源: 本研究製作)

使用國外水泥數據替代國內數據, 如圖 3.8 可以看到除了農藥使用(pesticides)以及固體廢棄物(soild waste)指標外, 其它均有衝擊影響, 可見國內生命週期資料庫的建立, 真的有待加強。各配比特徵化計算後的數值整理至表 3.48。

表 3.48 各配比特徵化後的數值(水泥使用國外數據)

衝擊指標	特徵化單位	OS	OFS	OFSB <sub>25</sub>	OFSB <sub>35</sub>	OFSB <sub>45</sub>
Greenhouse	kg CO <sub>2</sub>	664.6793	593.3834	483.1583	439.0682	394.9357
Ozone layer	kg CFC11	1.85E-06	1.57E-06	1.11E-06	9.26E-07	7.41E-07
Acidification	kg SO <sub>2</sub>	2.420092	2.057078	1.452055	1.210046	0.968037
Eutrophication	kg PO <sub>4</sub>	0.160285	0.136242	0.096171	0.080143	0.064114
Heavy metals	kg Pb	0.000418	0.000356	0.000251	0.000209	0.000167
Carcinogens	kg B(a)P	1.56E-06	1.33E-06	9.39E-07	7.82E-07	6.26E-07
Pesticides	kg act.subst	0	0	0	0	0
Summer smog	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0.015683	0.01333	0.00941	0.007841	0.006273
Winter smog	kg SPM	1.698326	1.443577	1.018995	0.849163	0.67933
Energy resources	MJ LHV	2662.781	2387.063	1977.233	1813.302	1649.27
Solid waste	kg	0	0	0	0	0

(資料來源: 本研究整理)

(1)實例一

探討砂石來源均是由河川、陸上砂石或均是由進口砂石所提供，比較對其環境衝擊的影響大小(排放量整理至表 3.49)，這次根據實際建築物進行計算，參照張又升博士論文裡調查台中市一棟住宅的鋼筋和混凝土使用量(不包括水電、設備、室內裝潢及室外工程用量)，將各建材使用量與此住宅資訊整理至表 3.50。

表 3.49 河川、陸上砂石及進口砂石排放量

項目	河川、陸上砂石	進口砂石
耗能(kcal)	66437	145
CO <sub>2</sub> 排放量(kg)	45.15	0.14

(資料來源：本研究整理)

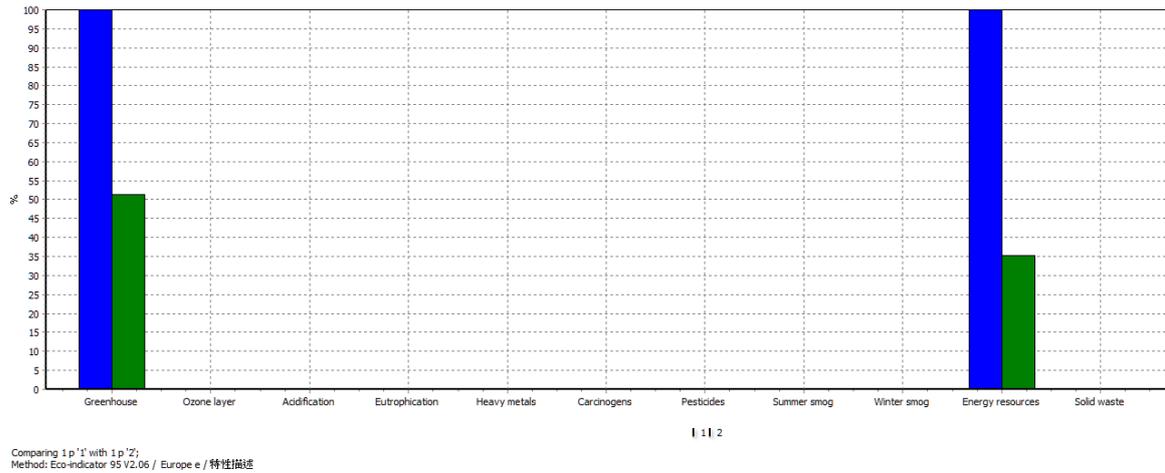
表 3.50 建築資訊與建材使用量(實例一)

建築類型		住宅
工程地點		台中市
樓層規模：地上(下)		14(1)
建 材 用 量	鋼筋(噸)	1215
	混凝土(m <sup>3</sup> )	7904
	砂石粒料(kg)	15123592
	水泥(kg)	2766400
	水(kg)	1244880

(資料來源:文獻[13])

將以上資訊輸入 simapro 進行計算，結果如圖 3.9(圖中 1 代表使用河川、路上砂石排放量，2 為使用進口砂石排放量)：

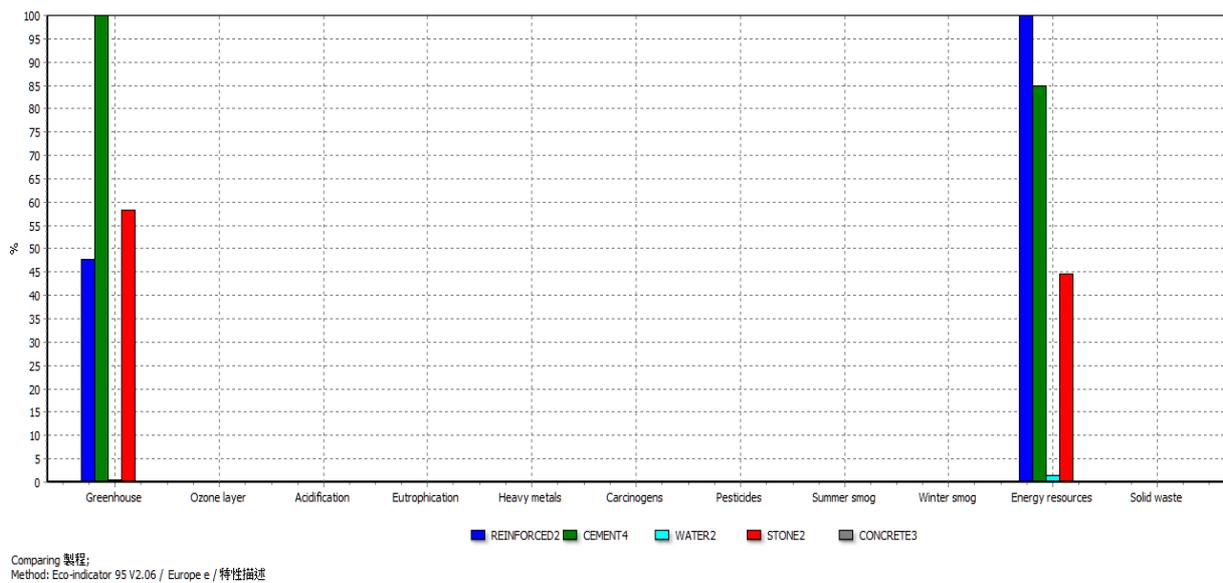
## 結構材料生命週期評估基準與耐久性評估指標之建立(1)



**圖 3.9 河川、陸上砂石及進口砂石特徵化圖**

(資料來源: 本研究製作)

將表 3.50 各項建材輸入 simapro 進行其排放量比較, 如圖 3.10 所示。分析整體建築物之建材排放量, 如圖 3.11 所示(圖中 reinforced2 代表為鋼筋排放量, cement4 代表為水泥排放量, stone2 砂石排放量, water2 代表為自來水排放量, concrete3 代表混凝土排放量, 以上排放量都包括製程、開採及運輸等階段)。



**圖 3.10 建築物各建材排放量比較(實例一)**

(資料來源: 本研究製作)

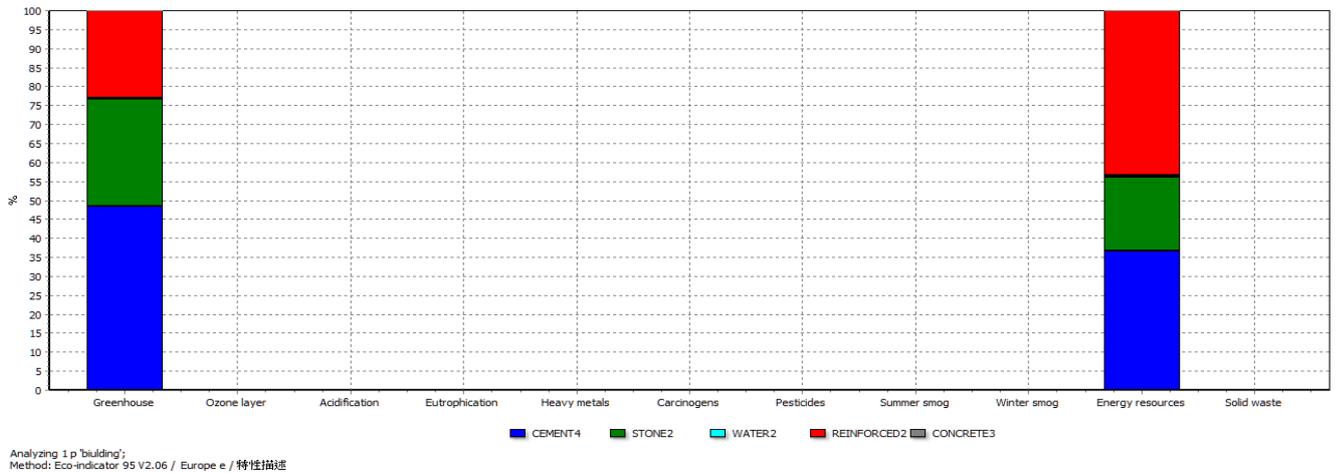


圖 3.11 整體建材物之建材排放量分析(實例一)

(資料來源: 本研究製作)

(2)實例二

根據實際建築物進行計算，參照李夢熊建築師事務所及汪裕成建築師事務所提供之資料中顯示嘉義市某技術學院商學院的鋼筋和混凝土使用量(不包括水電、設備、室內裝潢及室外工程用量)，將各建材使用量與此住宅資訊整理至表 3.51。

表 3.51 建築資訊與建材使用量(實例二)

建築類型		某技術學院 商學院
工程地點		嘉義市
樓層規模：地上(下)		6
建材 用 量	鋼筋(噸)	588
	混凝土(m <sup>3</sup> )	2532
	砂石粒料(kg)	4602550
	水泥(kg)	861313
	水(kg)	331675

(資料來源：李夢熊建築師事務所、汪裕成建築師事務所，2004。)

將表 3.51 各項建材輸入 simapro 進行其排放量比較，如圖 3.12 所示。分析整體建築物之建材排放量，如圖 3.13 所示(圖中 reinforced2 代表為鋼筋排放量， cement4 代表為水泥排放量， stone2 砂石排放量， water2 代表為自來水排放量， concrete3 代表混凝土排放量，以上排放量都包括製程、開採及運輸等階段)。

結構材料生命週期評估基準與耐久性評估指標之建立(1)

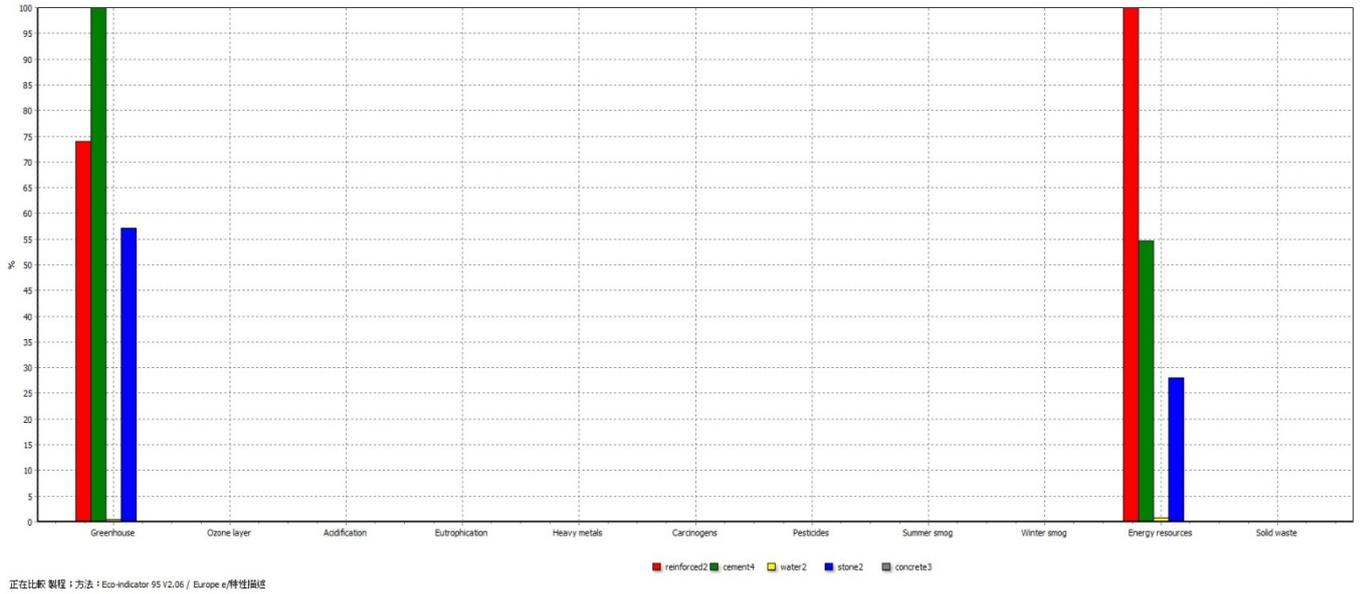


圖 3.12 建築物各建材排放量比較(實例二)

(資料來源：本研究製作)

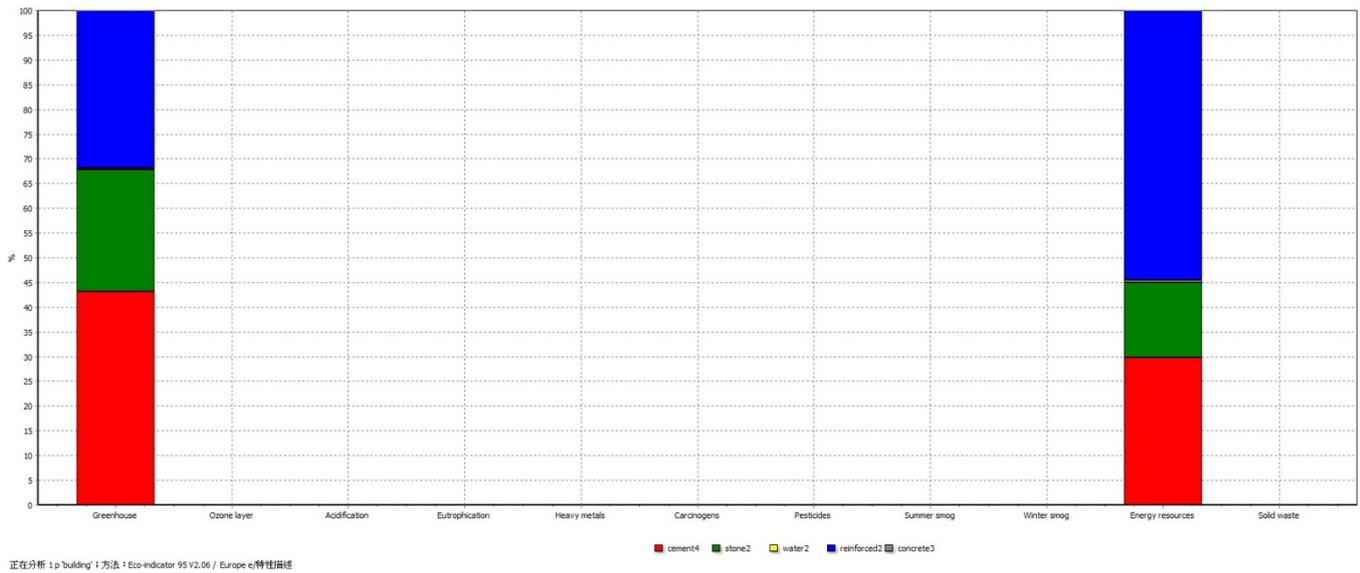


圖 3.13 整體建材物之建材排放量分析(實例二)

(資料來源：本研究製作)

#### 四、衝擊評估分析

根據圖 3.6 及圖 3.7 可以發現水泥用量 100(%)的配比不管在溫室效應及能源消耗部分，均比其他配比來的高，在溫室效應指標方面，單純以 15%飛灰、25%爐石粉及 15%飛灰，35%爐石粉及 15%飛灰、45%爐石粉及 15%飛灰取代水泥用量之配比，比純用水泥配比約降低 9%、23%、28%、34%衝擊影響。在耗能指標方面，約降低了 10%、24%、29%、35%衝擊影響。且依表 3.43 純用水泥配比抗壓強度也較其他配比來的低，故以飛灰、爐石粉取代水泥用量對混凝土結構材料不管在強度跟環境衝擊方面，均有十分顯著的助益。不過不管在國內外均把飛灰耗能及 CO<sub>2</sub> 排放量併入火力發電一起計算，爐石粉則只採取爐石研磨成粉耗電能，所以跟在實際情況上有些出入，希望以後能在這部分多加探討。

根據圖 3.8 發現使用純進口砂石比純河川、陸上砂石在溫室效應指標及耗能指標方面約降低 50%及 65%的衝擊影響，因進口砂石只計算從大陸貨運來台之排放量，不過根據本研究調查大部份的大陸砂石貨船直接從河邊直接裝載貨運來台，並無進行洗選及碎解之程序，故其砂石工作性質仍有待商榷。圖 3.10、3.12 發現水泥、鋼筋、砂石幾乎包含全體的耗能及 CO<sub>2</sub> 排放量，尤其以水泥為最高。

## 結構材料生命週期評估基準與耐久性評估指標之建立(1)

## 第四章 混凝土結構材料耐久性評估

### 第一節 定義與範疇

首先在研究範疇界定上，主要係針對鋼筋混凝土結構材料耐久性進行評估。而影響鋼筋混凝土結構的耐久性因子甚多，粗略來分可以環境因子、施工因子、設計因子、材料因子、維護營運因子等五類。若是將所有因子全部考量，則會造成兩個困境：其一為各因子所需的調查量以及數據過於龐雜，而使得最後評估的作業難以實踐；其二為若採用層級分析法作為決定因子間的相對權重時，因為層級分析法假設各層因子間為獨立關係，並無相關，最後整體的評價乃是由各因子評定分數乘上相對權重再加總起來。然而，如日本或是中國大陸[14]則採用不同思維，他們認為影響建築物耐久性的主要因素為材料因子，而其他的影響因子的作用則可以用放大係數將材料因子所得到的評分加以放大。這種思維很顯然地把其他因子的作用視為會影響材料因子，而非獨立的，此種思維在實務操作上較為可行。因此在本研究中，僅針對材料因子進行評估作業，至於其他因子則以放大係數的觀念加入最後整體的評價當中。

### 第二節 權重方法之決定

在決定權重上，一般來說可以採用層級分析法或是網路分析法來決定。層級分析法基本上每一層的各因子間是互相獨立的，也就是說它們不會互相影響或是影響可以忽略；網路分析法則可以容許因子間互相影響，甚至自我影響。理論上來說，網路分析法比層級分析法更具合理性，不過以實際的應用層面來說，卻存在以下的弊端：其一為結果對各因子間的相互影響係數非常敏感，因此如果問卷設計上無法得到準確評斷，則經過累乘加總之後，其收斂值將會差異甚大；換言之，在問卷設計上須要分級精確；其二網路分析法雖然理論上可以讓因子間存在互相影響的關係，不過若是因子間的影響關係不明確時(如氯離子與碳化深度之關係)，則即使在問卷設計上分級詳盡，但是確因為資訊不足造成專家無法確定其影響為何。緣此，本研究在決定材料因子的權重上採用層級分析法。

### 第三節 材料因子耐久性指標之分層

選定材料耐久性指標的原則在於：

1. 選定指標要具有現地可實作之可能，量測方法須明確。
2. 選定指標的評斷應該有明確之分級標準。

基於此原則，任何可以反應材料耐久性之試驗或方法都可以當作指標。本研究參照文獻[14]之作法及國內常用之方法，共選定十個指標如下。

首先，將影響鋼筋混凝土結構材料耐久性因子分為兩類：混凝土現況與腐蝕現況。此兩因子羅列在第一層，其間相互關係的決定如表 4.1 所示，將進行專家訪談來決定其相對權重。決定相對權重其實會取決於所選定之指標的量測方法準確性、可信度等影響。

而針對混凝土現況，則羅列出第一類表面損傷(裂縫)、第二類表面損傷(層離、剝落或露筋、掉稜與缺角)、第三類表面損傷(蜂窩麻面、表面侵蝕、表面沉積)、混凝土強度、鋼筋分布與保護層厚度、混凝土電阻率共六個指標。其相對權重可經由專家決定，問卷調查如表 4.2 所示；針對腐蝕現況，羅列出鋼筋自然電位、腐蝕電流、中性化深度、氯離子濃度四個指標。相對權重可經由專家決定，問卷調查如表 4.3 所示。

與文獻[14]中相比較，本研究分為兩層級，而文獻[14]中採用單一層級。並且，在指標上本研究相較於文獻[14]，則多採用腐蝕電流作為指標。雖然本研究所採用手段與文獻[14]相近，不過因為不同地區之專家對於各因子的重要性看法不盡相同，故最後成果應會有差異性。

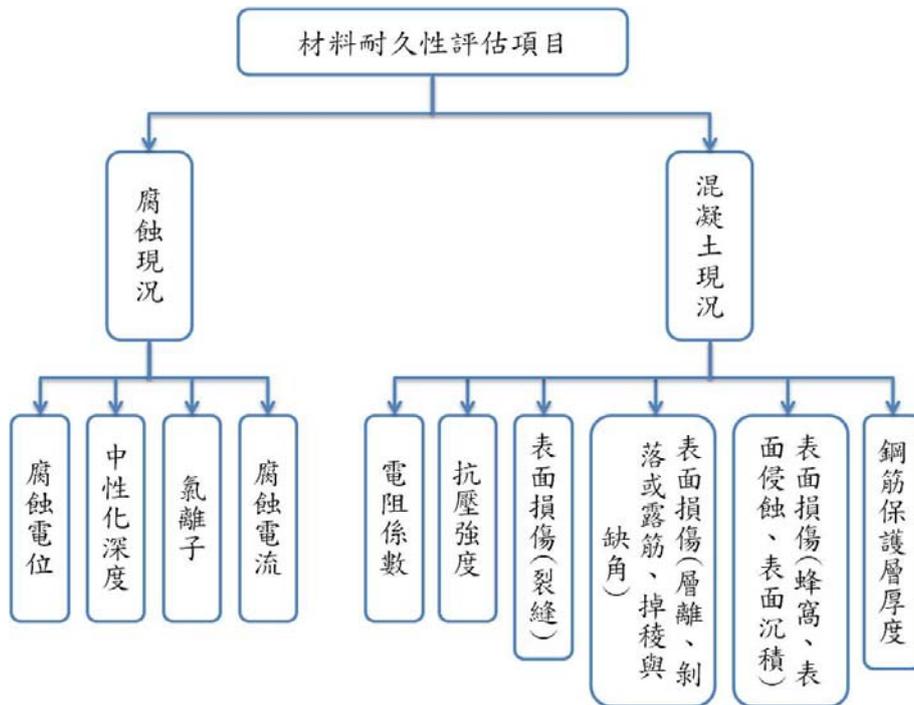


圖 4.1 材料因子耐久性評估項目

(資料來源: 本研究製作)

表 4.1 『耐久性→材料因素』評估項目之權重問卷

針對耐久性項目，主要將其分為腐蝕現況、混凝土現況兩個評估準則，分別加以評估，下表之圈選方式是以左邊評估準則為準，與右邊評估準則作相對重要程度的比較。

評估準則	左邊重要性較右邊重要									↔	右邊重要性較左邊重要									評估準則
	絕對重要	相當重要			重要	稍微重要			相等	稍微重要	重要	相當重要			絕對重要					
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9			
腐蝕現況																			混凝土現況	

(資料來源: 本研究製作)

表 4.2 『耐久性→腐蝕現況』評估項目之權重問卷

針對腐蝕現況項目，主要將其分為腐蝕電位、中性化深度、氯離子、腐蝕電流四個評估準則，分別加以評估，下表之圈選方式是以左邊評估準則為準，與右邊評估準則作相對重要程度的比較。

評估準則	左邊重要性較右邊重要								↔	右邊重要性較左邊重要								評估準則
	絕對重要	相當重要		重要		稍微重要		相等		稍微重要	重要		相當重要		絕對重要			
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1		1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	
腐蝕電位																		中性化深度
腐蝕電位																		氯離子
腐蝕電位																		腐蝕電流
中性化深度																		氯離子
中性化深度																		腐蝕電流
氯離子																		腐蝕電流

(資料來源：本研究製作)

表 4.3 『耐久性→混凝土現況』評估項目之權重問卷

針對混凝土現況項目，主要將其分為電阻係數、抗壓強度、表面損傷(裂縫)、表面損傷(層離、剝落或露筋、掉稜與缺角)、表面損傷(蜂窩、表面侵蝕、表面沉積)、鋼筋保護層厚度六個評估準則，分別加以評估，下表之圈選方式是以左邊評估準則為準，與右邊評估準則作相對重要程度的比較。

第四章 混凝土結構材料耐久性評估

評估準則	左邊重要性較右邊重要								↔	右邊重要性較左邊重要								評估準則	
	絕對重要	相當重要		重要		稍微重要		相等		稍微重要	重要		相當重要		絕對重要				
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1		1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8		1:9
電阻係數																			抗壓強度
電阻係數																			表面損傷 (裂縫)
電阻係數																			表面損傷 (層離、剝落或 露筋、掉稜與 缺角)
電阻係數																			表面損傷 (蜂窩、表面侵 蝕、表面沉積)
電阻係數																			鋼筋保護層厚 度
抗壓強度																			表面損傷 (裂縫)
抗壓強度																			表面損傷(層離、 剝落或露筋、 掉稜與缺角)
抗壓強度																			表面損傷(蜂窩、 表面侵蝕、表 面沉積)
抗壓強度																			鋼筋 保護層厚度
表面損傷 (裂縫)																			表面損傷(層離、 剝落或露筋、 掉稜與缺角)
表面損傷 (裂縫)																			表面損傷(蜂窩、 表面侵蝕、表 面沉積)
表面損傷 (裂縫)																			鋼筋 保護層厚度
表面損傷 (層離、剝落 或露筋、掉 稜與缺角)																			表面損傷(蜂窩、 表面侵蝕、表 面沉積)
表面損傷 (層離、剝落 或露筋、掉 稜與缺角)																			鋼筋 保護層厚度
表面損傷 (蜂窩、表面 侵蝕、表面 沉積)																			鋼筋 保護層厚度

(資料來源：本研究製作)

## 第四節 腐蝕現況耐久度指標介紹

材料因子耐久性評估分為腐蝕現況與混凝土現況兩大類，首先依序腐蝕現況裡的各項耐久度指標介紹，如圖 4.2。

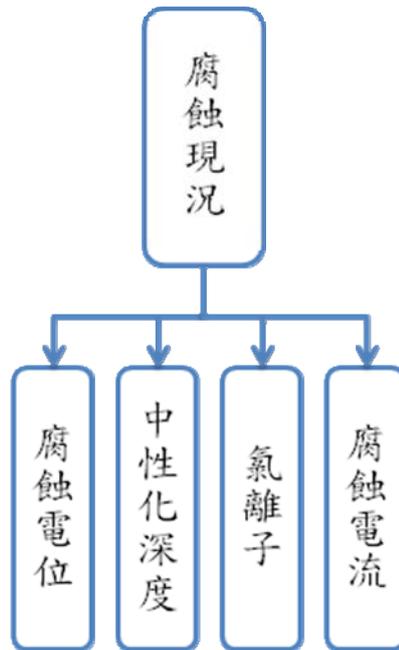


圖 4.2 腐蝕現況耐久度指標

(資料來源：本研究製作)

### 一、鋼筋銹蝕電位的檢測與判定

1. 本方法主要針對半電池電位法檢測混凝土中鋼筋銹蝕狀況的原理，規定儀器的使用方法、檢測方法和判定標準的應用方法。
2. 鋼筋銹蝕狀況檢測範圍，應為主要承重構件或承重構件的主要受力部位，或根據一般檢查結果有跡象表明鋼筋可能存在銹蝕的部位。
3. 本方法用於評定混凝土中鋼筋的銹蝕活化程度。提出的判定標準針對特殊環境如海水濺浪區、處於鹽霧中的混凝土結構等，不具有普遍適用性。

(A)應用

1. 本方法用於估測正在使用的現場和實驗室硬化混凝土中無鍍層鋼筋的半電池電位，測試與這些鋼筋的尺寸和埋在混凝土中的深度無關。
2. 本方法可以在混凝土構件使用壽命中的任何時期使用。
3. 已經乾燥到絕緣狀態的混凝土或已發生脫空層離的混凝土表面，測試時不能提供穩定的電迴路，不適用本方法。
4. 電位的測量應由有經驗的、從事結構檢測的工程師或相關技術專家檢測並解試，除了半電池電位測試之外，有必要使用其他數據，如氯離子含量、碳化深度、層離狀況、混凝土電阻率和所處環境調查等，以形成關於鋼筋腐蝕活動及其對結構使用壽命可能產生的影響。

(B) 測試原理

半電池電位法是利用混凝土中鋼筋銹蝕的電化學反應引起的電位變化來測定鋼筋銹蝕狀態的一種方法。通過測定鋼筋/混凝土半電池電極與在混凝土表面的銅/硫酸銅參考電極之間的電位差的大小，評定混凝土中鋼筋的銹蝕活化程度。

(C) 測量裝置

參考電極(半電池):

1. 本方法參考電極為銅/硫酸銅半電池。它由一根不與銅或硫酸銅發生化學反應的剛性有機玻璃管、一只通過毛細作用保持濕潤的多孔塞、一個處在剛性管裡飽和硫酸銅溶液中的紫銅棒構成，如圖 4.3 所示。
2. 銅/硫酸銅參考電極溫度係數為  $0.9\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ 。

## 結構材料生命週期評估基準與耐久性評估指標之建立(1)

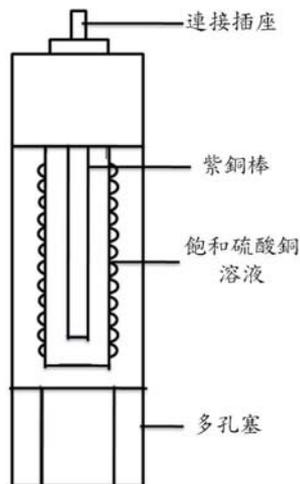


圖 4.3 銅/硫酸銅參考電極結構圖

(資料來源：本研究製作)

(D) 二次儀表的技術性能要求:

1. 測量範圍大於 1V。
2. 準確度優於  $0.5\% \pm 1\text{mV}$ 。
3. 輸入電阻大於  $10^{10}\Omega$ 。
4. 儀器使用環境條件:環境溫度  $0\sim +40^{\circ}\text{C}$ ；相對濕度  $\leq 95\%$ 。
5. 導線總長不應超過 150m，一般選擇截面積大於  $0.75\text{mm}^2$  的導線，以使在測試迴路中產生的電壓降不超過 0.1mV。
6. 接觸液為使銅/硫酸銅電極與混凝土表面有較好的電接觸，可在水中加適量的家用液態洗滌劑對被測表面進行濕潤，減少接觸電阻與電路電阻。
7. 在使用接觸液後仍然無法得到穩定的電位差時，應分析是否為電迴路的電阻過大或是附近存在與建築連通的大地波動電流，在以上情況下，不應使用半電池電位法。

(E) 測試方法

1. 測區的選擇與測點布置

- (1) 鋼筋銹蝕狀況檢測範圍應為主要承重構件或承重構件的主要受力部位，或根據一般檢查結果有跡象表明鋼筋可能存在銹蝕的部位，但測區不應有明顯的銹蝕脹裂、脫空或層離

現象。

(2) 在測區上布置測試網格，網格結點為測點，網格間距可選

**20cm × 20cm、30cm × 30cm、20cm × 10cm** 等，根據構件尺寸而定，測點位置距構件邊緣應大於 5cm，一般不宜少於 20 個測點。

(3) 當一個測區內存在相鄰測點的讀數超過 150mV，通常應減小測點的間距。

(4) 測區應統一編號，註明位置，並描述外觀情況。

## 2. 混凝土表面處理

用鋼絲刷、砂紙打磨測區混凝土表面，去除塗料、浮漿等，並用接觸液將表面潤濕。

## 3. 二次儀表與鋼筋的電連接

(1) 現場檢測時，銅/硫酸銅電極一般接二次儀表的正輸入端，鋼筋接二次儀表的負輸入端。

(2) 局部打開混凝土或選擇裸露的鋼筋，在鋼筋上鑽一小孔並擰上自攻螺釘，用加壓型鱷魚夾夾住並濕潤，確保有良好的電連接。若在遠離鋼筋連接點的測區進行測量，必須用萬用表檢查內部鋼筋的連續性，如不連續，應重新進行鋼筋的連接。

(3) 銅/硫酸銅參考電極與測點的接觸。測量前應預先將電極前端多孔塞充分浸濕，以保證良好的導電性，正式測讀前應再次用噴霧器將混凝土表面潤濕，但應注意被測表面不應存在游離水。連接方法如圖 4.4。

## 4. 銅/硫酸銅電極的準備

飽和硫酸銅溶液由硫酸銅晶體溶解在蒸餾水中製成。當有多餘的未溶解硫酸銅結晶體沉積在溶液底部時，可以認為該溶液是飽和的。電極銅棒應清潔，無明顯缺陷，否則需用稀釋鹽酸溶液清潔銅棒，並用蒸餾水徹底沖淨。硫酸銅溶液應注意更換，保持清潔，溶液應充滿電極，以保證電連接。

## 5. 測量值的收集

測點讀數變動不超過 2mV，可視為穩定。在同一測點，同一支參考電極，重複測讀的差異不超過 10mV；不同的參考電極重複測讀的差異不超過 20mV。若不符合讀數穩定要求，

## 結構材料生命週期評估基準與耐久性評估指標之建立(1)

應檢查測試系統的各個環節。

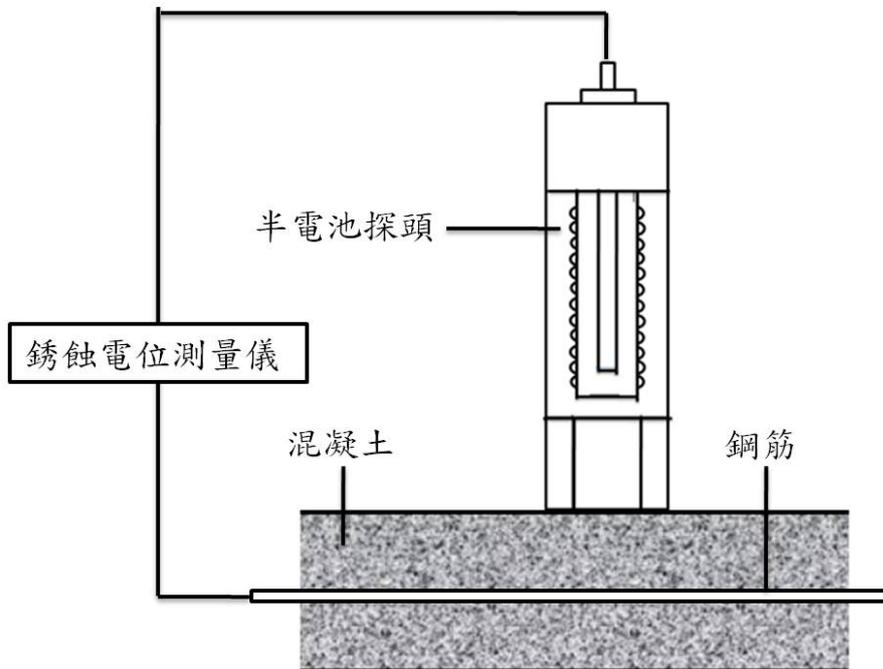


圖 4.4 測試系統簡圖

(資料來源: 本研究製作)

影響測量準確度的因素及修正:

- (1) 混凝土含水量對測值得影響較大，測量時構件應處在自然乾燥狀態。
- (2) 為提高現場評定鋼筋狀態的可靠度，一般要進行現場比較性試驗。現場比較性試驗通常按已暴露鋼筋的銹蝕程度不同，在他們的周圍分別測出相應的銹蝕電位，比較這些鋼筋的銹蝕程度和相應測值的對應關係，提高評判的可靠度，但不能與有明顯銹蝕、脹裂、脫空、層離現象的區域比較。
- (3) 若環境溫度在  $22 \pm 5^{\circ}\text{C}$  範圍之外，對應銅/硫酸銅電極做溫度修正。
- (4) 各種外界因素產生的波動電流對測量值影響較大，特別是靠近地面的測區，因此應避免各種電、磁場的干擾。
- (5) 混凝土保護層電阻對測量值有一定影響，除測區表面處理要符合規定外，儀器的輸入阻抗要符合技術要求。

(F) 鋼筋銹蝕電位的判定標準

1. 在對已處理的數據(已進行溫度修正)進行判讀之前，按慣例將這些數據加以負號，繪製等電位圖，然後進行判讀。
2. 按照表 4.4 的規定判斷混凝土中鋼筋發生銹蝕的概率或鋼筋正在發生銹蝕的銹蝕活化程度係數 $T_c$ 。

表 4.4 結構混凝土中鋼筋鏽蝕電位的判定標準

評定標度值	序號	電位水平(mV)	鋼筋狀態
1	1	0 ~ -200	無銹蝕活動或銹蝕活動性不確定
2	2	-200 ~ -300	有銹蝕活動性，但銹蝕狀態不確定，可能抗蝕
3	3	-300 ~ -400	銹蝕活動性較強，發生銹蝕概率大於90%
4	4	-400 ~ -500	銹蝕活動性強，嚴重銹蝕可能性極大
5	5	< -500	構件存在銹蝕開裂區域
備註	(1)表中電位水平為採用銅-硫酸銅電極時的測量值 (2)混凝土濕度對量測值有明顯影響，量測時構件應為自然狀態，否則用此評定標準誤差較大。		

(資料來源：本研究整理)

## 二、結構混凝土碳化深度的檢測與評定

### (A) 檢測方法

1. 鋼筋銹蝕電位測試結果得知鋼筋可能發生銹蝕的區域，應進行混凝土碳化深度測量。
2. 混凝土碳化狀況的檢測通常採用在混凝土新鮮斷面噴灑酸鹼指示劑，通過觀察酸鹼指示劑顏色變化來確定混凝土的碳化深度。

### (B) 檢測步驟

1. 選擇測區位置可參照鋼筋銹蝕自然電位測試的要求，若在同一測區，應先進行保護層和銹蝕

## 結構材料生命週期評估基準與耐久性評估指標之建立(1)

電位、電阻率的測量，在進行碳化深度及氯離子含量的測量。

### 2. 測區及測孔布置

(1) 測區應包含銹蝕電位測量結果有代表性的區域，也能反應不同條件及不同混凝土質量的部位，結構外側面應布置測區。

(2) 測區數不應小於 3 個，測區應均勻布置。

(3) 測孔距構件邊角的距離應大於 2.5 倍保護層厚度。

(4) 每一測區應布置三個測孔，孔距根據構件尺寸大小確定，但應大於 2 倍孔徑。

### 3. 使用酸鹼指示劑噴在混凝土的新鮮破損面，根據指示劑顏色的變化，測量混凝土的碳化深度，量測值準確至毫米。

(1) 配置指示劑(酚酞試劑):75%的酒精溶液與白色酚酞粉末配置成酚酞濃度為 1%~2%的酚酞溶劑，裝入噴霧器備用，溶劑應為無色透明的液體。

(2) 用裝有 20mm 直徑直徑鑽頭的衝擊鑽在測點位置鑽孔。

(3) 成孔後用圓形毛刷將孔中碎屑、粉末清除，露出混凝土新。

(4) 將酚酞指示劑噴在測孔壁上。

(5) 待酚酞指示劑變色後，用捲尺測量混凝土表面至酚酞變色交界處的深度，準確至 1mm。  
酚酞指示劑從無色變為紫色時，代表混凝土未碳化，酚酞指示劑未改變顏色處的混凝土已經碳化。

(6) 將測區、測孔統一編號，並畫出示意圖，標上測量結果。

(7) 測量值的整理應標列出最大、小值和平均值。

### (C) 評定標準

混凝土碳化深度對鋼筋銹蝕影響的評定，可取構件的碳化深度平均值與該類構件保護層厚度平均值之比，並考慮其離散情況，參考表 4.5 對單個構件進行評定。

表 4.5 混凝土碳化深度的評定標準

評定標度值	1	2	3	4	5
碳化層深度/保護層厚度	$<1^{*1}$	$<1$	$=1$	$>1$	$>1^{*2}$
備註	1. <sup>*1</sup> 構件全部實測比值均小於1； 2. <sup>*2</sup> 構件全部實測比值均大於1； 3. 宜分構件逐一進行評定				

(資料來源：本研究整理)

### 三、結構混凝土中氯離子含量的測定與評判

#### (A) 測定方法

1. 混凝土中氯離子可引起並加速鋼筋的銹蝕。氯離子含量的測定方法主要有兩種：試驗室化學分析法和滴定條法(Quanta-Strips)。滴定條法可在現場完成氯離子含量的測定。
2. 混凝土中的氯離子含量，可採用現場按混凝土不同深度取樣，測定結果須能反應氯離子在混凝土中隨深度的分布，根據鋼筋處的混凝土氯離子含量判斷引起鋼筋銹蝕的危險性。
3. 氯離子含量測定，應根據構件的工作環境條件及構件本身的質量狀況確定測區，測區應能代表不同工作條件及不同混凝土質量的部位，測區宜參考鋼筋銹蝕電位測量結果確定。

#### (B) 取樣

1. 混凝土粉末分析樣品的取樣部位和數量
  - (1) 分析樣品的取樣部位可參照鋼筋銹蝕電位測試測區布置原則確定。
  - (2) 測區的數量應根據鋼筋銹蝕電位檢測結果以及結構的工作環境條件確定。在電位水平不同的部位、工作環境條件、質量狀況有明顯差異的部位布置測區。
  - (3) 每一測區取粉的鑽孔數量不宜少於3個，取粉孔可與碳化深度測量孔合併使用。
  - (4) 測區、測孔應統一編號。

## 2. 取樣方法

- (1) 使用直徑 20mm 以上的衝擊鑽在混凝土表面鑽孔，鑽孔前應先確定鋼筋位置。
- (2) 鑽孔取粉應分層收集，一般深度間隔可取 3mm、5mm、10mm、15mm、20mm、25mm、50mm 等。若需指定深度處的鋼筋周圍氯離子含量，取粉間隔可進行調整。
- (3) 鑽孔深度使用附在鑽頭側面的標尺杆控制。
- (4) 用一硬塑料管和塑料袋收集粉末，如圖 4.5，對每一個深度應使用一個新的塑料袋收集粉末，每次收集後，鑽頭、硬塑料管及鑽孔內都應用毛刷將殘留粉末清理乾淨，以免不同深度粉末混染。
- (5) 同一測區不同孔相同深度的粉末可收集在一個塑料袋內，重量不應少於 25g，若量不夠，可增加同一測區測孔數量。不同測區測孔相同深度的粉末不應混合在一起。

收集粉末後，塑料袋應立即封口保存，註明測區、測孔編號及深度。

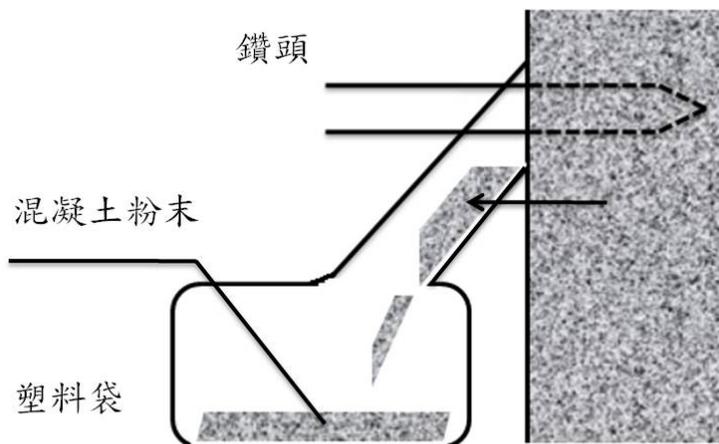


圖 4.5 鑽孔取混凝土粉末的方法

(資料來源：本研究製作)

### 3. 滴定法

分析步驟:

- (1) 將收集的樣品過篩，除去其中較大的顆粒。
- (2) 將樣品至於  $105 \pm 5^\circ\text{C}$  烘箱內烘 2 小時，冷卻至室溫。
- (3) 取 5g 樣品粉末(準確度優於  $\pm 0.1\text{g}$ ) 放入燒杯中。
- (4) 緩慢加入 50ml (1.0mol)  $\text{HNO}_3$ ，並徹底攪拌直至嘶嘶聲停止。
- (5) 用石蕊試紙檢查溶液是否呈酸性(石蕊試紙變紅)，如果不呈酸性，再加入適量硝酸。
- (6) 加入約 5g 無水碳酸鈉( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )。
- (7) 用石蕊試紙檢查溶液是否呈中性(石蕊試紙不變)，否則再加入少量無水碳酸鈉直至容易呈中性。
- (8) 用過濾紙做一錐斗加入液體。
- (9) 當純淨的溶液滲入錐頭後，把滴定條插入液體中。
- (10) 待到滴定條頂端水平黃色細條轉變成藍色，取出滴定條並順著由下至下的方向將其擦乾。
- (11) 讀取滴定條顏色變化處的最高值，在該批滴定條表中查出所對應的氯離子含量值，此值是以百萬分之幾(ppm)表示的。

### 4. 氯離子含量檢測

本氯離子濃度之量測採電位滴定儀。電位滴定儀測精度達 10ppm，且可由電腦連線紀錄試驗資料。主要藉由電極量測滴定過程中氯離子的氧化電位，當電位突然巨幅變化時，此為滴定終點 (equivalence point, EP)。

#### (C) 氯離子含量的評判標準

1. 氯化物浸入混凝土引起鋼筋的銹蝕，其銹蝕危險性受到多種因素的影響，如碳化深度、混凝土含水量、混凝土質量等，因此應進行綜合的分析。
2. 根據每一取樣層氯離子含量的測定值，做出氯離子含量的深度分部曲線，判斷氯化物是混凝土

## 結構材料生命週期評估基準與耐久性評估指標之建立(1)

土生成時已有的，還是結構使用過程中由外界滲入的以及浸入的。

3. 混凝土中的氯離子含量可按表 4.6 的評判標準確定其引起鋼筋銹蝕的可能性。

表 4.6 結構混凝土中氯離子含量的評判標準

評定標度值	1	2	3	4	5
氯離子含量 (占水泥含量的百分比)	< 0.15	0.15~0.4	0.4~0.7	0.7~1.0	> 1.0
誘發鋼筋銹蝕的可能性	很小	不確定	有可能誘發鋼筋銹蝕	會誘發鋼筋銹蝕	鋼筋銹蝕活化

(資料來源: 本研究整理)

### 四、鋼筋銹蝕電流的檢測與判定

#### (A) 鋼筋腐蝕偵測特色與適用範圍

腐蝕量測儀 GPM-5000 應用於混凝土結構內鋼筋的腐蝕電位、腐蝕電流及電阻之評估。測得鋼筋之腐蝕電位(平衡電位)後，然後使用一固定電流從輔助電極流向鋼筋(工作電極)，使整個系統構成一個迴路，進而求得待測鋼筋之腐蝕電位與腐蝕速率以及電極與鋼筋間混凝土的電阻，如圖 4.6。

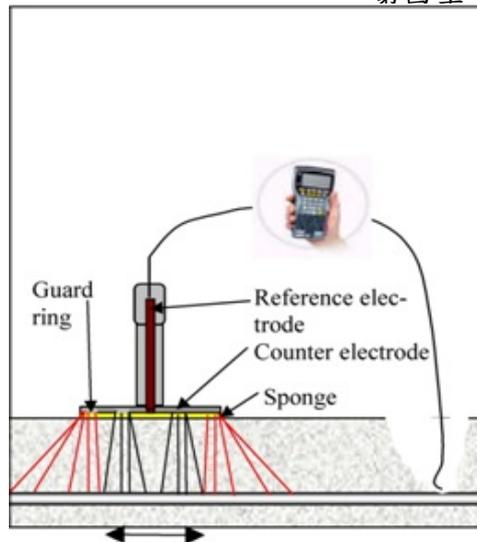


圖 4.6 利用 GalvaPulse 測量地區的示意圖

(資料來源:本研究製作)

## (B) 測定方法

1. 開始量測以前，先將 GPM 儀器前端海綿浸濕，即可開始量測開路電位、腐蝕速率及電阻。
2. 應用機理為通以一固定電流，通常在 5 到 400 mA 的範圍內，持續約 10 秒。
3. 將實驗數據平均出圖繪製成電壓與電流的關係圖，並將 GP-5000 數據存入於電腦工作端中，以求出腐蝕電位( $E_{corr}$ )及腐蝕電流( $I_{corr}$ )，並繪出其區塊腐蝕程度示意圖。

鋼筋銹蝕電流的判定標準如表 4.7

表 4.7 鋼筋銹蝕電流的判定標準

評定標度值	$I_{corr} (\mu A/cm^2)$	Corrosion rate(mpy)	腐蝕程度
1	< 0.5	<0.23	忽略
2	0.5 - 5	0.23 - 2.3	低
3	5 - 10	2.3 - 4.6	中
4	10 - 15	4.6 - 6.9	高
5	> 15	>6.9	嚴重

(資料來源:本研究整理)

### 第五節 混凝土現況耐久度指標介紹

材料因子耐久性評估分為腐蝕現況與混凝土現況兩大類，依序混凝土現況裡的各項耐久度指標介紹，如圖 4.7。

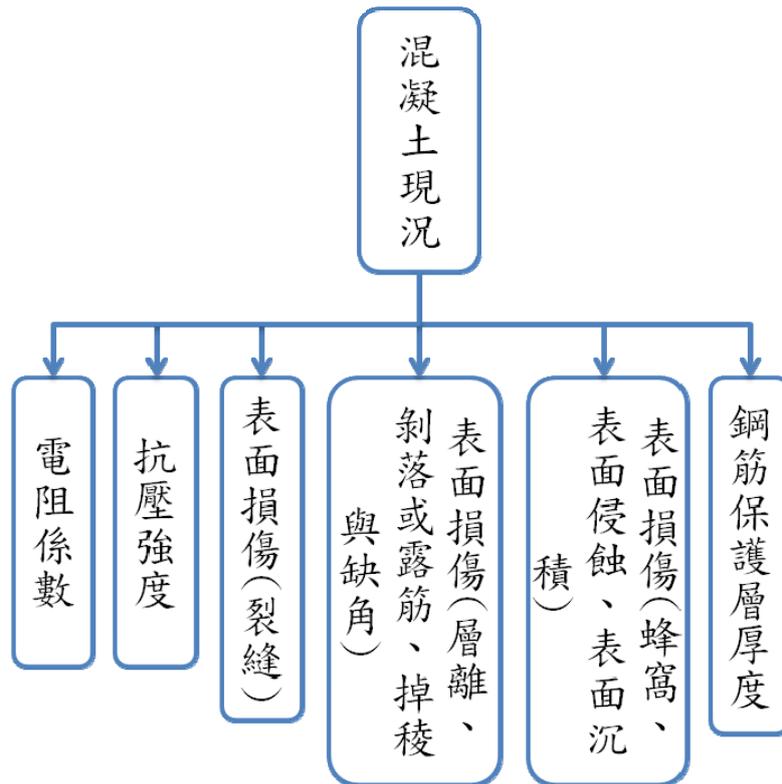


圖 4.7 混凝土現況耐久度指標

(資料來源:本研究製作)

#### 一、混凝土電阻率的檢測與評定

##### (A) 混凝土電阻率的檢測方法

1. 混凝土的電阻率影響其導電性。混凝土電阻率大，若鋼筋發生銹蝕，則發展速度慢，擴散能力弱；混凝土電阻率小，銹蝕發展速度快，擴散能力強。因此對鋼筋狀況進行檢測評定，測量混凝土的電阻率是一項重要的內容。
2. 混凝土電阻率檢測測區，應根據鋼筋銹蝕電位量測結果確定，對鋼筋鏽蝕

電位測試結果表明鋼筋可能銹蝕活化的區域，應進行混凝土電阻率測量。混凝土電阻率可採用四極式電阻測定，即在混凝土表面等間距接觸四支電極，兩外側電極為電流電極，兩內側電極為電壓電極，通過檢測兩電壓電極間的混凝土阻抗得知混凝土電阻率 $\rho$ 。如圖 4.8 所示。

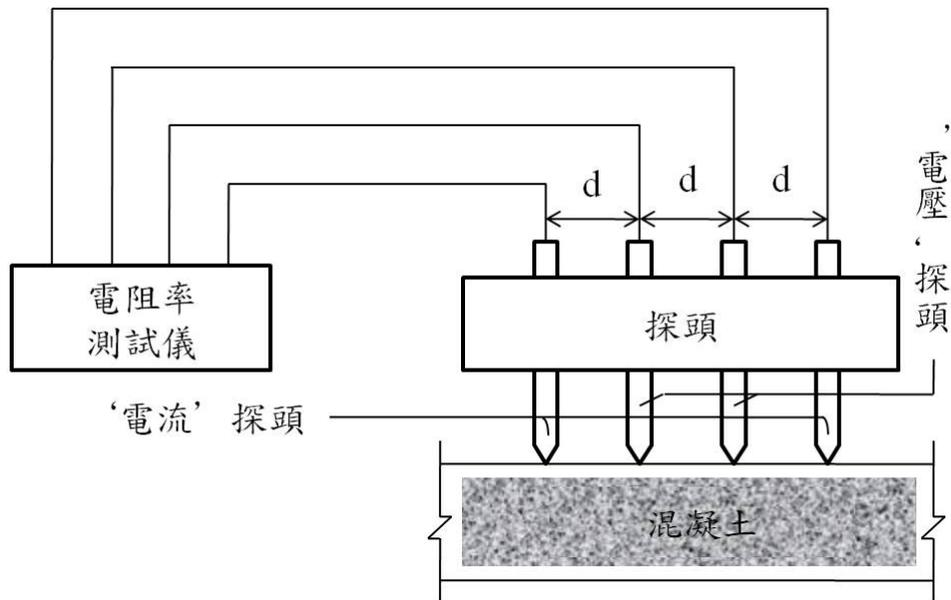


圖 4.8 混凝土電阻率測試技術示意圖

$$\rho = \frac{2\pi dV}{I}$$

式中：V=電壓電極間所測電壓；

I=電流電極通過的電流；

d=電極間距。

### (B) 儀器檢查

在四個電極上分別接上三隻電阻，則儀器的顯示值為相應的電阻率值。例如：電阻值為  $1k\Omega$ ，相應電阻率值為： $2\pi d \times 1k\Omega \cdot cm$ 。

### (C) 混凝土電阻率的測量

測區與測位布置可參照鋼筋鏽蝕自然電位測量的要求，在電位測量網格間進行，並且做好編號。

## 結構材料生命週期評估基準與耐久性評估指標之建立(1)

混凝土表面應清潔、無油脂、無塵。為了提高量測的準確性，必要時可去掉表面碳化層。調節好電極的間距，一般採用的間距為 50mm。為了保證電極與混凝土表面有良好、連續的電接觸，應在電極前端塗上合劑，特別是當讀數不穩定時。測量時探頭應垂直置於混凝土表面，並施加適當的壓力。混凝土電阻率的評定標準如表 4.8。

表 4.8 混凝土電阻率的評定標準

評定標度值	電阻率 ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )	鋼筋發生銹蝕可能的銹蝕速度
1	>20000	很慢
2	15000~20000	慢
3	10000~15000	一般
4	5000~10000	快
5	<5000	很快
備註	混凝土濕度對量測值有明顯影響，量測時構件應為自然狀態，否則不能使用此評判標準。	

(資料來源:本研究整理)

## 二、結構混凝土強度的檢測與評定

### (A) 結構混凝土強度檢測方法分類與要求

1. 結構混凝土強度的檢測方法可分為非破壞檢測、半破壞檢測和破壞檢測。對於常用的反彈錘法測定混凝土強度方法作出規定。
2. 為了突出混凝土建築結構的特殊性，混凝土強度檢測評定分為結構或構件的強度檢測評定與承重構件的主要受力部位的強度檢測評定。如主樑，根據具體檢測目的和檢測要求，選擇合適的方法進行檢測時，可對主樑整個構件進行檢測評定，也可對主樑跨中部位進行混凝土強

度的檢測評定，但測區布置必須滿足本研究規定。

3. 原則上對結構不採取破損檢測，但在其他方法不能準確評估結構(構件)或承重構件主要受力部位的混凝土強度時，應採用取芯法結合其他方法綜合評定。在結構上鑽、截取試件時，應儘量選擇在承重構件的次要部位或次要承重構件上，應採取有效措施，確保結構安全。鑽、截取試件後，應及時進行修復或加固處理。

#### (B) 反彈錘法檢測結構混凝土強度的方法

1. 對於被測混凝土建築結構或構件，當只有一個可測面時，可採用反彈錘法檢測其結構混凝土強度。
2. 下列情況下，不宜應用反彈錘法檢測結構混凝土強度：
  - (1) 遭受凍害、化學腐蝕、高溫損傷的混凝土。
  - (2) 被測構件厚度小於 10cm。
  - (3) 結構表面溫度低於  $-4^{\circ}\text{C}$  或高於  $60^{\circ}\text{C}$ 。
  - (4) 碳化嚴重，表層與內部質量有明顯差異或其他內部存在缺陷的混凝土結構或構件。

#### (C) 檢測技術

##### 1. 一般規定：

- (1) 採用反彈錘法檢測結構或構件混凝土強度宜具有下列資料：
  - (a) 工程名稱及設計、施工、監督和建設單位名稱。
  - (b) 結構或構件名稱、外形尺寸、數量及混凝土強度等級。
  - (c) 水泥品種、強度等級、安定性、出產產名、沙、石品種、粒徑、混凝土配比等。
  - (d) 模板類型、混凝土灌注和養護情況以及成型日期。
  - (e) 檢測原因。
- (2) 建築結構或構件混凝土強度檢測可採用下列兩種方式：
  - (a) 構件檢測:適用於單個結構或構件的檢測。
  - (b) 部位檢測:適用於對結構或構件關鍵控制部位的檢測。

## 結構材料生命週期評估基準與耐久性評估指標之建立(1)

- (3) 按構件方式檢測時，每一結構或構件的測區應符合下列規定：
- (a) 每一結構或構件測區數不應少於 10 個。
  - (b) 對某一方向尺寸小於 4.5m 且另一方向尺寸小於 0.3m 的構件，其測區數量可適當減少，但不可低於 6 個。
  - (c) 相鄰兩測區の間距控制在 2m 以內。
  - (d) 測區距構件端部或施工縫邊緣的距離不宜大於 0.5m，不宜小於 0.2m。
  - (e) 測區面積不宜大於  $0.04\text{m}^2$ ，且應均勻分布。
  - (f) 在構件的重要部位及薄弱部位必須布置測區，並應避開預埋件。
- (4) 按部位檢測方式檢測時，每一部位的測區應符合下列規定：
- (a) 每一部位的測區數不應少於 6 個。
  - (b) 相鄰兩測區の間距應控制在 0.4m 以內。
  - (c) 測區距構件端部或施工縫邊緣的距離不宜大於 0.4m，不宜小於 0.2m。
  - (d) 測區面積不宜大於  $0.04\text{m}^2$ ，且應均勻分布，並應避開預埋件。
- (5) 混凝土檢測面應清潔、平整，不應有疏鬆層、浮漿、油垢以及蜂窩、麻面，必要時可用砂輪清除疏鬆層和雜物，且不應有殘留的粉末或碎屑。
- (6) 結構或構件的測區應標有清晰的編號，必要時應在記錄紙上描述測區布置和外觀質量情況。

### 2. 回彈值的測量

- (1) 檢測時，反彈錘的軸線應始終垂直於混凝土檢測面，緩慢施壓，準確讀數，快速復位。
- (2) 測點宜在測區範圍內均勻分布，相鄰兩測點的淨距不宜小於 20mm；測點距外露鋼筋、預埋件的距離不宜小於 30mm。測點不應在氣孔或外露石子上，同一測點只應彈擊一次。每一測區應記取 16 個回彈值，每一測點的回彈值讀數估讀至 1。

### 3. 碳化深度值測量

- (1) 回彈值測量完畢後，應在有代表性的位置上測量碳化深度值，測點數不應少於測區數的

30%，取其平均值為該構件每測區的碳化深度值。

(2) 當碳化深度值級差大於 2.0mm，應在每一測區量碳化深度值。

(3) 碳化深度值的測量方法，每一測孔測量值應不少於 3 個，取其平均值，每次讀數精確至 0.5mm。

#### 4. 回彈值的計算

(1) 計算測區平均回彈值，應從該測區的 16 個回彈值中，分別剔除 3 個最大值和最小值，將餘下的 10 個回彈值按下列公式計算：

$$R_m = \sum_{j=1}^{10} R_j / 10$$

式中： $R_m$  —— 測區平均回彈值，精確至 0.1；

$R_i$  —— 第  $i$  個測點的回彈值。

(2) 非水平狀態檢測混凝土澆注側面時，應按下式進行修正：

$$R_a = R_{ma} + R_{aa}$$

式中： $R_{ma}$  —— 非水平狀態檢測測區平均回彈值，精確至 0.1；

$R_{aa}$  —— 非水平狀態檢測時回彈值修正值，可按表 4.9 採用。

表 4.9 非水平狀態檢測時回彈值修正值

$R_{ma}$	$\alpha$ $R_{\alpha a}$	測試角度 $\alpha$							
		+90°	+60°	+45°	+30°	-30°	-45°	-60°	-90°
20		-6.0	-5.0	-4.0	-3.0	+2.5	+3.0	+3.5	+4.0
30		-5.0	-4.0	-3.5	-2.5	+2.0	+2.5	+3.0	+3.5
40		-4.0	-3.5	-3.0	-2.0	+1.5	+2.0	+2.5	+3.0
50		-3.5	-3.0	-2.5	-1.5	+1.0	+1.5	+2.0	+2.5
備註		1.表中修正值可用內插法求得，精確至0.1； 2. $R_{ma}$ 小於20或大於50時，均分別按20或50查表							

(資料來源:本研究整理)

(3) 水平方向檢測混凝土澆注頂面或底面時，應按下列公式修正:

$$R_m = R_m^t + R_a^t$$

$$R_m = R_m^b + R_a^b$$

式中: $R_m^t$ 、 $R_m^b$ ——水平方向檢測混凝土澆注表面、底面時，測區的平均回彈值，精確至 0.1；

$R_a^t$ 、 $R_a^b$ ——混凝土澆注表面、底面回彈值修正值，可按表 4.10 採用。

表 4.10 混凝土澆注表面、底面回彈值的修正

$R_m$	$\Delta R_s$	
	混凝土澆注表面	混凝土澆注底面
20	+2.5	-3.0
25	+2.0	-2.5
30	+1.5	-2.0
35	+1.0	-1.5
40	+0.5	-1.0
45	0	-0.5
50	0	0
備註	1.表中修正值可用內插法求得，精確至0.1； 2. $R_m^t$ 、 $R_m^b$ 小於20或大於50時，均分別按20或50查表 3.混凝土澆注表面為一般原漿抹面； 4.表列修正值為底面和側面採用同一類模板在正常澆注情況下的修正值	

(資料來源:本研究整理)

(4) 檢測時，如反彈儀處於非水平狀態，同時混凝土檢測面又不是混凝土的澆注測面，則應對測得測區平均回彈值，先進行角度修正，再進行不同澆注面的修正。

### 5.強度曲線

(1) 混凝土強度換算值，一般可採用以下三類測強曲線計算：

- (a) 統一測強曲線:由全國有代表性的材料、成型養護工藝配製的混凝土試件，通過試驗所建立的曲線。
- (b) 地區測強曲線:由本地區常用的材料、成型養護工藝配製的混凝土試件、通過試驗所建立的曲線。
- (c) 專用測強曲線:由於結構或構件混凝土相同的材料、成型養護工藝配製的混凝土試

## 結構材料生命週期評估基準與耐久性評估指標之建立(1)

件，通過試驗所建立的曲線。

(2) 檢測時，應按專用測強曲線、地區測強曲線、統一測強曲線的次序，選用測強曲線

(3) 統一測強曲線的表達式為：

$$f_{cu,i}^c = 0.250 \cdot R_{mi}^{2.0108} \cdot 10^{-0.00888 d_{mi}}$$

式中： $f_{cu,i}^c$  —— 測區混凝土換算強度值，精確至 0.1MPa；

$R_{mi}$  —— 測區經修正後的平均回彈值，精確至 0.1；

$d_{mi}$  —— 測區平均碳化深度，精確至 0.5mm。 $d_{mi} < 0.5mm$ 時，按無碳化處理； $d_{mi} \geq 6mm$ 時，按 $d_{mi} = 6mm$ 計算。

(4) 統一測強曲線的平均相對誤差(δ)為±14.0%，相對標準差( $e_r$ )為±17.0%。

(5) 當有下列情況之一時，測區混凝土強度值不得使用統一測強曲線換算：

- (a) 粗集料最大粒徑大於 60mm。
- (b) 特種成型工藝製作的混凝土。
- (c) 檢測部位曲率半徑小於 250mm。
- (d) 潮濕或浸水混凝土。

(6) 當構件混凝土抗壓強度大於 60MPa 時，可採用標準能量大於 2.207J 的混凝土反彈儀，並應另行制訂檢測方法及專用測強曲線進行檢測。

### 6. 混凝土強度的計算

(1) 當有地區測強曲線或專用測強曲線時，混凝土強度換算值應按地區測強曲線或專用測強曲線換算得出。

(2) 對於泵送混凝土，當碳化深度值不大於 2.0mm 時，每一測區混凝土強度換算值應按表 4.11 進行修正。

表 4.11 泵送混凝土測區混凝土強度換算值的修正值

碳化值深度	抗壓強度值(MPa)				
0.0 ; 0.5 ; 1.0	$f_{cu}^c$ (MPa)	≤40.0	45.0	50.0	55.0 ~ 60.0
	$k$ (MPa)	+4.5	+3.0	+1.5	0.0
1.5 ; 2.0	$f_{cu}^c$ (MPa)	≤30.0	35.0	40.0 ~ 60.0	—
	$k$ (MPa)	+3.0	+1.5	0.0	—
備註	表中未列入的 $f_{cu,i}^c$ (MPa) 值可用內插法求得其修正值，精確至0.1MPa				

(資料來源:本研究整理)

- (3) 結構或構件或關鍵控制部位的測區混凝土換算強度平均值，可根據各測區的混凝土強度換算值計算。當測區數為 10 個及以上時，應計算強度標準差。平均值及標準差應按下列公式計算：

$$m_{f_{cu}^c} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m f_{cu,i}^c$$

$$s_{f_{cu}^c} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f_{cu,i}^c)^2 - n(m_{f_{cu}^c})^2}{n-1}}$$

式中： $m_{f_{cu}^c}$  —— 結構或構件測區混凝土強度換算值的平均值，精確至

0.1MPa；

$n$  —— 結構或構件或關鍵控制部位的測區數；

$s_{f_{cu}^c}$  —— 測區混凝土換算強度值的標準差，精確至 0.1MPa。

- (4) 結構或構件或關鍵部位的混凝土強度推定值  $f_{cu,e}$  應按下列公式確定：

(a) 當該結構或構件測區數少於 10 個時：

結構材料生命週期評估基準與耐久性評估指標之建立(1)

$$f_{cu,e} = f_{cu,min}^a$$

式中:  $f_{cu,min}^a$  --- 結構或構件中或關鍵控制部位最小的測區混凝土換算強度值。

(b) 當該結構或構件的測區強度值中出現小於 10.0MPa 時:

$$f_{cu,e} = 10.0MPa$$

(c) 當該結構或構件測區數不少於 10 個時，應按下列公式計算:

$$f_{cu,e} = m_{f_{cu}} - 1.645S_{f_{cu}}$$

(d) 當結構或構件或關鍵控制部位的測區數大於 10 個時，但測區混凝土強度換算值標準差過大(當混凝土強度等級低於或等於 C30 時， $S_{f_{cu}} > 4.0MPa$ ；當混凝土強度等級高於 C30 時， $S_{f_{cu}} > 5.0MPa$ )時，則其混凝土強度推定值  $f_{cu,e}^a$  可按下式計算:

$$f_{cu,e}^a = f_{cu,min}^a$$

(5) 結構或構件的混凝土強度推定值是指相應於強度換算值總體分布中保證率不低於 95% 的結構或構件或關鍵部位中的混凝土抗壓強度值。

(D) 結構混凝土現場檢測強度的評定標準

1. 結構混凝土強度，應在結構承重構件或其主要受力部位布置測區。
2. 對混凝土建築結構，應根據每一承重構件或其主要受力部位的實測強度推定值和測區平均換算強度值，按下式計算其推定強度均質係數  $K_{bc}$  和平均強度均質係數  $K_{bm}$ ，並可按表 4.12 對其強度狀態做出評定。

表 4.12 結構混凝土現場檢測強度的評定標準

評定標度值	$K_{bt}$	$K_{bm}$	強度狀態
1	$\geq 0.95$	$\geq 1.00$	良好
2	$0.95 > K_{bt} \geq 0.90$	$\geq 0.95$	較好
3	$0.90 > K_{bt} \geq 0.80$	$\geq 0.90$	較差
4	$0.80 > K_{bt} \geq 0.70$	$\geq 0.85$	差
5	$< 0.70$	$< 0.85$	很差
註	<p>式中: <math>K_{bt}</math> = 推定強度均質係數;  <math>R_{it}</math> = 承重構件或主要受力部位混凝土的實測強度推定值  <math>R</math> = 承重構件混凝土極限抗壓強度設定值</p> <p>(1) <math>K_{bt} = \frac{R_{it}}{R}</math></p> <p>式中: <math>K_{bm}</math> = 平均強度均質係數;  <math>R_{im}</math> = 承重構件或主要受力部位測區平均換算強度值</p> <p>(2) <math>K_{bm} = \frac{R_{im}}{R}</math></p>		

(資

料來源:本研究整理)

### 三、表觀損傷的檢測與評定

#### (A) 混凝土建築結構構件表觀損傷分類

混凝土建築結構構件的表觀損傷總體上可分為如下三類:一是裂縫,包括非結構受力裂縫和結構受力裂縫;二是層離、剝落或露筋及掉棱或缺角;三是蜂窩麻面、表面侵蝕及表面沉積等。

#### (B) 混凝土建築結構構件表觀損傷的損傷度指標

混凝土建築結構構件表觀損傷的損傷度指標如表 4.13 所例。

表 4.13 混凝土建築結構構件表觀損傷的損傷度指標

表觀損傷類型		損傷度指標
裂縫	非結構受力裂縫	(1)裂縫最大寬度； (2)開裂區域面積 $A_i$ 占其所在構件表面面積 $A_{pi}$ 的比值 $V$ ，即 $V = A_i / A_{pi}$
	結構受力裂縫	(1)裂縫長度或高度； (2)受力鋼筋處的裂縫寬度； (3)裂縫的最小與平均間距
層離、剝落或露筋、掉棱或缺角		<p>累計損傷面積 <math>\sum A_i</math> 占構件外露表面積 (<math>A_p</math>) 的比值 <math>\alpha</math>，即 <math>\alpha = \frac{\sum A_i}{A_p}</math>；</p> <p>由於損傷引起的構件截面積最大損失率 <math>\delta</math>，</p> $\delta = 1 - \frac{A_{pmin}}{A}$ <p>式中：<math>A_{pmin}</math> =扣除損傷影響後的構件最小有效截面面積； <math>A</math> =構件初始截面面積</p>
蜂窩麻面、表面侵蝕、表面沉積		<p>累計損傷面積 <math>\sum A_i</math> 占構件外露表面積 (<math>A_p</math>) 的比值 <math>\alpha</math>，即 <math>\alpha = \frac{\sum A_i}{A_p}</math>；</p>

(資料來源:本研究整理)

(C) 混凝土建築結構構件表觀損傷檢測

裂縫檢測的主要內容為:裂縫的形態；裂縫分布情況；裂縫周圍有無銹跡、銹蝕產物和凝膠泌出物；裂縫的寬度、長度和間距等。檢測方法以目力檢查為主，輔以刻度放大鏡(最小分辨

率不得大於 0.05mm)量測。用鋼捲尺(最小分辨率不得大於 1.0mm)測量裂縫的長度和間距。

在進行裂縫檢測時，應注意查明裂縫發生的時間和原因，並判斷裂縫是否趨於穩定，對尚未穩定的裂縫可用千分表、引伸儀等監測裂縫寬度和長度的發展情況，監測時間以 6~12 個月為宜。

對層離、剝落或露筋、掉棱或缺角、蜂窩麻面、表面侵蝕及表面沉積等表觀損傷的檢測，主要檢測面積和深度，檢測方法為人力目測、輔助鋼尺測量和錘擊檢查。

在進行表觀損傷檢測時，應檢查寬度超過 0.05mm 的裂縫以及大小超過 20mm 的其他表觀損傷。

裂縫檢測結果的描述應注意如實反映裂縫的形態、分布情況和裂縫周邊混凝土表面狀況，盡可能採用圖形和照相進行表觀損傷的描述，對所有的表觀損傷均應有詳盡的文字描述。

(D) 表觀損傷的分級評定

對混凝土建築結構構件的表觀損傷，可根據表觀損傷程度(大小、多少或輕重)、表觀損傷對結構使用功能的影響程度(無、小、大)和表觀損傷發展變化狀況(趨向穩定、發展緩慢、發展較快)等三個方面，以累加評分的方法作出等級評定。具體評定方法見表 4.14。

表 4.14 混凝土建築結構構件表觀損傷的分級評定方法表

表觀損傷程度及標度		組合評定標度				
		程度	小→大 少→多 輕度→嚴重			
			標度	0	1	2
表觀損傷對結構使用功能的影響程度	無、不重要	0	0	1	2	
	小、次要	+1	1	2	3	
	大、重要	+2	2	3	4	
以上兩項評定組合標度			0	1	2	3 4
表觀損傷發展變化狀況的修正	趨向穩定	-1	0	1	2	3
	發展緩慢	0	1	2	3	4
	發展較快	+1	1	2	3	4 5
最終評定結果			1	2	3	4 5
結構構件表觀技術狀況			良好	較好	較差	差的 很差

(資料來源:本研究整理)

結構材料生命週期評估基準與耐久性評估指標之建立(1)

1. 混凝土建築結構構件表觀損傷的分級評定標準。

(1) 鋼筋混凝土構件非結構受力裂縫按表 4.15 分級標準進行評定。

表 4.15 鋼筋混凝土構件非結構受力裂縫分級評定標準

評定標度值	分級標準		
	裂縫最大寬度(mm)	裂縫部位	裂縫形態與分布
1	≤ 0.25	次要受力部位	少量短細裂縫
	≤ 0.20	主要受力部位	少量短細裂縫
2	≤ 0.30	次要受力部位	出現短細裂縫，開裂區域面積占其所在構件表面積的3%以下
	≤ 0.25	主要受力部位	出現短細裂縫，開裂區域面積占其所在構件表面積的2%以下
3	≤ 0.35	次要受力部位	出現較多的短細裂縫，開裂區域面積占其所在構件表面積的6%以下
	≤ 0.30	主要受力部位	出現較多的短細裂縫，開裂區域面積占其所在構件表面積的4%以下
4	≤ 0.40	次要受力部位	出現網狀裂縫，開裂區域面積占其所在構件表面積的10%以下；或出現沿受力鋼筋方向的裂縫
	≤ 0.35	主要受力部位	出現網狀裂縫，開裂區域面積占其所在構件表面積的7%以下；或出現沿受力鋼筋方向的裂縫
5	> 0.40	次要受力部位	出現網狀裂縫，開裂區域面積占其所在構件表面積的10%以上；或出現沿受力鋼筋方向的裂縫，縫口有銹跡
	> 0.35	主要受力部位	出現網狀裂縫，開裂區域面積占其所在構件表面積的7%以上；或出現沿受力鋼筋方向的裂縫，縫口有銹跡
備註	當結構所處環境條件影響係數大於等於1.1時，表觀裂縫寬度限值減去0.05mm後取用		

(資料來源:本研究整理)

## 2. 工混凝土構件非結構受力裂縫按表 4.16 分級標準進行判定

表 4.16 工混凝土構件非結構受力裂縫分級評定標準

評定標度值	分級標準	
	裂縫最大寬度(mm)	裂縫形態與分布
1	$\leq 0.30$	少量短裂縫
2	$\leq 0.40$	出現短細裂縫，開裂區域面積占其所在構件表面積的3%以下
3	$\leq 0.50$	出現較多的短裂縫，開裂區域面積占其所在構件表面積的6%以下
4	$\leq 0.60$	出現網狀裂縫，開裂區域面積占其所在構件表面積的10%以下；或出現沿受力鋼筋方向的裂縫
5	$> 0.60$	出現網狀裂縫，開裂區域面積占其所在構件表面積的10%以上；或出現沿受力鋼筋方向的裂縫，縫口有銹跡
備註	當結構所處環境條件影響係數大於等於1.1時，表觀裂縫寬度限值減去0.05mm後取用	

(資料來源:本研究整理)

結構材料生命週期評估基準與耐久性評估指標之建立(1)

3. 預應力鋼筋混凝土構件非結構受力裂縫按表 4.17 分級標準進行評定。

表 4.17 預應力鋼筋混凝土構件非結構受力裂縫分級評定標準

評定標度值	分級標準		
	裂縫最大寬度(mm)	裂縫部位	裂縫形態與分布
1	≤0.10	次要受力部位	少量短細裂縫
	無	主要受力部位或預應力筋部位	無裂縫
2	≤0.15	次要受力部位	出現短細裂縫，開裂區域面積占其所在構件表面積的3%以下
	≤0.05	主要受力部位或預應力筋部位	少量短細裂縫
3	≤0.20	次要受力部位	出現較多的短細裂縫，開裂區域面積占其所在構件表面積的6%以下
	≤0.10	主要受力部位或預應力筋部位	出現短細裂縫，開裂區域面積占其所在構件表面積的3%以下
4	≤0.25	次要受力部位	出現網狀裂縫，開裂區域面積占其所在構件表面積的10%以下；或出現沿受力鋼筋方向的裂縫
	≤0.15	主要受力部位或預應力筋部位	出現網狀裂縫，開裂區域面積占其所在構件表面積的6%以下
5	>0.25	次要受力部位	出現網狀裂縫，開裂區域面積占其所在構件表面積的10%以上；或出現沿受力鋼筋方向的裂縫
	>0.15	主要受力部位或預應力筋部位	出現網狀裂縫或出現沿預應力筋方向的裂縫，開裂區域面積占其所在構件表面積的6%以上
備註	當結構所處環境條件影響係數大於等於1.1時，表觀裂縫寬度限值減去0.05mm後取用		

(資料來源:本研究整理)

4. 鋼筋混凝土構件結構受力裂縫按表 4.18 分級標準

表 4.18 鋼筋混凝土構件結構受力裂縫分級評定標準表

評定標度值	分級標準			
	裂縫部位	裂縫長度或高度	受力鋼筋處裂縫寬度(mm)	裂縫的最小與平均間距(cm)
1	次要受力部位	縱向長度小於構件長度1/6，或高度不足截面尺寸1/3	≤ 0.10	≥ 50cm
	主要受力部位		≤ 0.05	
2	次要受力部位	縱向長度介於構件長度1/6~1/4，或高度介於截面尺寸1/3~1/2	≤ 0.15	≥ 30cm
	主要受力部位		≤ 0.10	
3	次要受力部位	縱向長度介於構件長度1/4~1/3，或高度介於截面尺寸1/2~2/3	≤ 0.20	≥ 20cm
	主要受力部位		≤ 0.15	
4	次要受力部位	縱向長度介於構件長度1/3~1/2，或高度大於截面尺寸2/3	≤ 0.25	< 20cm
	主要受力部位		≤ 0.20	
5	次要受力部位	縱向長度大於構件長度1/2，或裂縫基本貫穿	> 0.30	開裂嚴重，裂縫與受力鋼筋方向、間距重合，縫口有銹跡
	主要受力部位		> 0.25	
備註	當結構所處環境條件影響係數大於等於1.1時，表觀裂縫寬度限值減去0.05mm後取用			

(資料來源:本研究整理)

結構材料生命週期評估基準與耐久性評估指標之建立(1)

5. 圬工混凝土構件結構受力裂縫按表 4.19 分級標準進行評定。

表 4.19 圬工混凝土構件結構受力裂縫分級評定標準

評定標度值	分級標準		
	裂縫最大寬度(mm)	裂縫類型	裂縫形態與分布
1	≤0.25	拱圈徑向	少量短細裂縫
	≤0.40	拱圈環向	少量短細裂縫
2	≤0.30	拱圈徑向	出現短細裂縫，開裂區域面積占其所在構件表面積的3%以下
	≤0.50	拱圈環向	出現短細裂縫，開裂區域面積占其所在構件表面積的2%以下
3	≤0.35	拱圈徑向	出現較多的短細裂縫，開裂區域面積占其所在構件表面積的6%以下
	≤0.60	拱圈環向	出現較多的短細裂縫，開裂區域面積占其所在構件表面積的4%以下
4	≤0.40	拱圈徑向	出現網狀裂縫，開裂區域面積占其所在構件表面積的10%以下；或出現沿受力鋼筋方向的裂縫
	≤0.70	拱圈環向	出現網狀裂縫，開裂區域面積占其所在構件表面積的7%以下；或出現沿受力鋼筋方向的裂縫
5	>0.40	拱圈徑向	出現網狀裂縫，開裂區域面積占其所在構件表面積的10%以上；或出現沿受力鋼筋方向的裂縫，縫口有銹跡
	>0.70	拱圈環向	出現網狀裂縫，開裂區域面積占其所在構件表面積的7%以上；或出現沿受力鋼筋方向的裂縫，縫口有銹跡
備註	當結構所處環境條件影響係數大於等於1.1時，表觀裂縫寬度限值減去0.05mm後取用		

(資料來源:本研究整理)

6. 預應力鋼筋混凝土構件結構受力裂縫按表 4.20 分級標準進行評定。

表 4.20 預應力鋼筋混凝土構件結構受力裂縫分級評定標準

評定標度值	分級標準			
	裂縫部位	裂縫長度或高度	受力鋼筋處裂縫寬度(mm)	裂縫的最小與平均間距(cm)
1	次要受力部位	縱向長度小於構件長度1/6，或高度不足截面尺寸1/4	≤0.05	≥50cm
	主要受力部位		無	
2	次要受力部位	縱向長度介於構件長度1/6~1/4，或高度介於截面尺寸1/4~1/3	≤0.10	≥30cm
	主要受力部位		無	
3	次要受力部位	縱向長度介於構件長度1/4~1/3，或高度介於截面尺寸1/3~1/2	≤0.15	≥20cm
	主要受力部位		無	
4	次要受力部位	縱向長度介於構件長度1/3~1/2，或高度大於截面尺寸1/2~2/3	≤0.20	<20cm
	主要受力部位		≤0.10	
5	次要受力部位	縱向長度大於構件長度1/2，或高度大於截面尺寸2/3，裂縫基本貫穿	>0.20	開裂嚴重，裂縫與受力鋼筋方向、間距重合
	主要受力部位		>0.10	
備註	當結構所處環境條件影響係數大於等於1.1時，表觀裂縫寬度限值減去0.05mm後取用			

(資料來源:本研究整理)

結構材料生命週期評估基準與耐久性評估指標之建立(1)

7. 鋼筋混凝土及圬工混凝土結構構件表觀損傷(除裂縫)按表 4.21 分級標準進行判定。

表 4.21 鋼筋混凝土及圬工混凝土結構構件表觀損傷(除裂縫)分級評定標準

評定標度值	分級標準	
	缺陷部位	缺陷類型： 層離、剝落或露筋、掉棱或缺角 蜂窩麻面、表面侵蝕、表面沉積
1	主要受力部位	累積損傷面積占構件外露表面積的3%以下，或由於損傷引起的構件截面最大損失率小於5%
	次要受力部位	累積損傷面積占構件外露表面積的6%以下，或由於損傷引起的構件截面最大損失率小於10%
2	主要受力部位	累積損傷面積占構件外露表面積的10%以下，或由於損傷引起的構件截面最大損失率小於15%
	次要受力部位	累積損傷面積占構件外露表面積的15%以下，或由於損傷引起的構件截面最大損失率小於20%
3	主要受力部位	累積損傷面積占構件外露表面積的15%以下，或由於損傷引起的構件截面最大損失率小於20%
	次要受力部位	累積損傷面積占構件外露表面積的20%以下，或由於損傷引起的構件截面最大損失率小於25%
4	主要受力部位	累積損傷面積大於構件外露表面積的15%，或由於損傷引起的構件截面最大損失率大於20%
	次要受力部位	累積損傷面積大於構件外露表面積的20%，或由於損傷引起的構件截面最大損失率大於25%
5	主要受力部位	累積損傷面積大於構件外露表面積的15%，或由於損傷引起的構件截面最大損失率大於20%
	次要受力部位	累積損傷面積大於構件外露表面積的20%，或由於損傷引起的構件截面最大損失率大於25%

(資料來源:本研究整理)

8. 預應力鋼筋混凝土結構構件非表觀損傷(除裂縫)按表 4.22 分級標準進行評定。

表 4.22 預應力鋼筋混凝土構件表觀損傷(除裂縫)分級評定標準表

評定標度值	分級標準	
	缺陷部位	缺陷類型： 層離、剝落或露筋、掉棱或缺角 蜂窩麻面、表面侵蝕、表面沉積
1	主要受力部位	構件外觀基本完好
	次要受力部位	累積損傷面積占構件外露表面積的3%以下，或由於損傷引起的構件截面最大損失率小於5%
2	主要受力部位	
	次要受力部位	累積損傷面積占構件外露表面積的6%以下，或由於損傷引起的構件截面最大損失率小於10%
3	主要受力部位	
	次要受力部位	累積損傷面積占構件外露表面積的10%以下，或由於損傷引起的構件截面最大損失率小於15%
4	主要受力部位	
	次要受力部位	累積損傷面積占構件外露表面積的15%以下，或由於損傷引起的構件截面最大損失率小於20%
5	主要受力部位	
	次要受力部位	累積損傷面積大於構件外露表面積的15%，或由於損傷引起的構件截面最大損失率大於20%

(資料來源:本研究整理)

#### 四、混凝土中鋼筋分布及保護層厚度的檢測與評定

##### (A) 適用範圍

1. 本方法主要介紹了估測鋼筋位置、深度和尺寸的電磁檢測儀器工作原理，規定儀器的使用方法和評定標準的應用方法。
2. 檢測針對主要承重構件或承重構件的主要受力部位，或鋼筋銹蝕電位測試結果表明鋼筋可能銹蝕活化的部位，以及根據結構檢算及其他檢測需要確定的部位。

##### (B) 應用

1. 用於估測混凝土中鋼筋的位置、深度和尺寸。
2. 在無資料或其他原因需要對結構進行調查的情況下。
3. 進行其他測試之前需要避開鋼筋進行的測試。
4. 本項調查與檢測工作應由有經驗的、從事結構檢測的工程師解釋，除了混凝土中鋼筋分布及保護層厚度檢測以外，根據需要有必要結合其他項目，如銹蝕電位、氯離子含量、碳化深度和混凝土電阻率等，以綜合評定混凝土中鋼筋銹蝕活動及其對結構使用壽命的影響。

##### (C) 檢測方法及原理

1. 檢測方法:採用電磁法無損檢測方法確定鋼筋位置，現場修正確定保護層厚度，估測鋼筋直徑，量測值準確至毫米。
2. 儀器探頭產生一個電磁場，當某條鋼筋或其他金屬物體位於這個電磁場內時，會引起這個電磁場磁力線的改變，造成局部電磁場強度的變化。電磁場強度的變化和金屬物大小與探頭距離存在一定對應關係，如果把特定尺寸的鋼筋和所要調查的材料進行適當標定，通過探頭測量開由儀表顯示出來這種對應關係，即可估測混凝土中鋼筋位置、深度和尺寸。

##### (D) 儀器

1. 檢測儀器一般包含探頭、儀表和連接導線，儀表可進行模擬或數字的指示輸出，較先進的儀表還具有圖形顯示功能，儀器可用電池或外接電源供電。
2. 鋼筋保護層測試儀的技術要求

- (1) 鋼筋保護層測試儀應通過技術鑑定，必須具有產品合格證。
- (2) 儀器的保護層測量範圍應大於 120mm。
- (3) 儀器的準確度應滿足：
  - a. 0~60mm， $\pm 1\text{mm}$ 。
  - b. 60~120mm， $\pm 3\text{mm}$ 。
  - c.  $\geq 120\text{mm}$ ， $\pm 10\%$ 。
- (4) 適用的鋼筋直徑範圍應為 $\phi 6\sim\phi 50$ ，並不少於符合有關鋼筋直徑系列規定的 12 個檔次。
- (5) 儀器應具有在未知保護層厚度的情況下，測量鋼筋直徑的功能。
- (6) 儀器應能適用於溫度 0~40℃、相對濕度 $\leq 85\%$ 、無強磁場干擾的環境條件。
- (7) 儀器工作時應為直流供電，連續正常工作時間不小於 6h。

(E) 儀器的標定

1. 鋼筋保護層測試儀使用期間的標定校準應使用專用的標定塊。當測量標定塊所給定的保護層厚度時，測讀值應在儀器說明書所給定的準確度範圍之內。
2. 標定塊由一根 $\phi 16$ 的普通碳素鋼筋垂直澆鑄在長方體無磁性的塑料塊內，使鋼筋距四個側面分別為 15mm、30mm、60mm、90mm，如圖 4.9 所示。
3. 標定應在無外界磁場干擾的環境中進行。
4. 每次試驗檢測前均應對儀器進行標定，若達不到應有的準確度，應送專業機構維修檢驗。

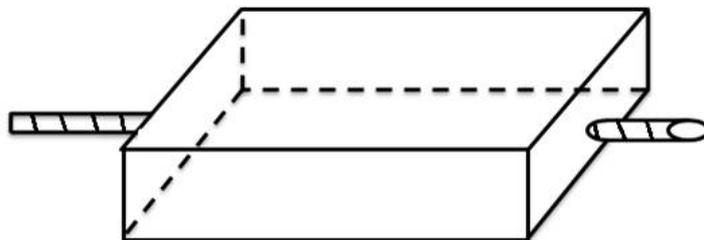


圖 4.9 標定塊

(資料來源:本研究製作)

(F) 操作程序

1. 混凝土結構鋼筋分布狀況調查的範圍，應為主要承載構件或承重構件的主要受力部位，或鋼筋銹蝕電位測試結果表明鋼筋可能銹蝕活化的部位，以及根據結構檢算及其他檢測需要確定的部位。
2. 測區布置原則
  - (1) 按單個構件檢測時，應根據尺寸大小，在構件上均勻布置測區，每個構件上的測區數不應少於三個。
  - (2) 對於最大尺寸大於 5m 的構件，應適當增加測區數量。
  - (3) 測區應均勻分布，相鄰兩測區的間距不宜小於 2m。
  - (4) 測區表面應清潔、平整，避開接縫、蜂窩、麻面、預埋件等部位。
  - (5) 測區應註明編號，並記錄測區位置和外觀情況。
  - (6) 測點數量及要求：
    - a. 對構件上每一測區應檢測不少於 10 個測點。
    - b. 測點間距應小於保護層測試儀傳感器長度。
  - (7) 對某一類構件的檢測，可採取抽樣的方法，抽樣數不少於同類構件數的 30%，且不少於 3 件，每個構件測區布置按單個構件要求進行。
  - (8) 對結構整體的檢測，可先按構件類型分類，再按類型進行檢測。
3. 測量步驟
  - (1) 測試前應了解有關圖紙資料，以確定鋼筋的種類和直徑。
  - (2) 進行保護層厚度測讀前，應先在測區內確定鋼筋的位置與走向，做法如下：
    - a. 將保護層測試儀傳感器在構件表面平行移動，當儀器顯示值最小時，傳感器正下方即是所測鋼筋的位置。
    - b. 找到鋼筋位置後，將傳感器在原處左右轉動一定角度，儀器顯示最小值時傳感器長軸線的方向即為鋼筋的走向。

c. 在構件測區表面劃出鋼筋位置與走向。

(3) 保護層厚度的測讀。

a. 將傳感器置於鋼筋所在位置正上方，並左右稍稍移動，讀取儀器顯示最小值即為該處保護層厚度。

b. 每一測點值宜讀取 2~3 次穩定讀數，取其平均值，準確至 1mm。

c. 應避免在鋼筋交叉位置進行量測。

(4) 對於缺少資料、無法確定鋼筋直徑的構件，應首先測量鋼筋直徑。對鋼筋直徑的測量宜採用 5~10 次測讀，剔除異常數據，求其平均值的測量方法。

(G) 影響測量準確度的因素及修正

1. 影響測量準確度的因素有：

(1) 避免外加磁場的影響。

(2) 混凝土若具有磁性，測量值需加以修正。

(3) 鋼筋品種對測量值有一定影響，主要是高強鋼筋需加以修正。

(4) 不同的布筋狀況，鋼筋間距影響測量值，當  $D/S \leq 3$  時需修正測量值。

D 為鋼筋淨間距(mm)，即鋼筋邊緣至邊緣的間距；

S 為保護層厚度，即鋼筋邊緣至保護層表面的最小距離。

2. 保護層測量值的修正。當鋼筋直徑、材質、布筋狀況、混凝土性質都確知時，才能準確測量保護層厚度，而實際測量時，往往這些因素都是未知的。

(1) 儀器測量直徑檔的選擇

兩根鋼筋豎向開在一起(如圖 4.10.1)，等效直徑  $d_{\text{等效}} = 3(d_1 + d_2)/4$ ；

兩根鋼筋橫向開在一起(如圖 4.10.2)，等效直徑  $d_{\text{等效}} = d_1 + d_2$ 。

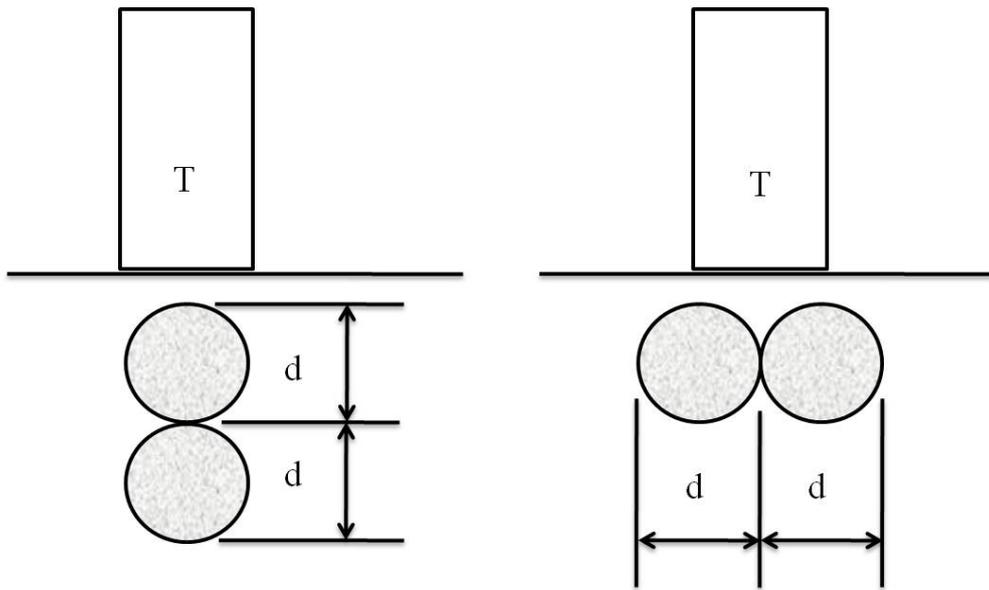


圖 4.10 (1)兩根鋼筋橫向並在一起/(2)兩根鋼筋豎向並在一起

(資料來源:本研究製作)

(2) 用標準墊塊進行綜合修正，這種方法適用於現場檢測，標準墊塊用硬質無磁性材料製成，例如，工程塑料或電工用絕緣板，平面尺寸與儀器傳感器底面相同，厚度  $S_b$  為 10mm 或 20mm 修正係數 K 計算方法如下：

- a. 將傳感器直接置於混凝土表面已標好的鋼筋位置正上方，讀取測量值  $S_{m1}$ 。
- b. 將標準墊塊置於傳感器原在混凝土表面位置，並把傳感器放於標準墊塊之上，讀取測量值  $S_{m2}$ ，則修正係數 K 為：

$$K = \frac{S_{m1} - S_{m2}}{S_b} \text{-----(1)}$$

- c. 對於不同鋼種和直徑應確定各自的修正係數，每一修正係數應採用 3 次平均求得。

(3) 用校準孔進行綜合修正，這也是現場校準測量值的有效方法。

- a. 用 6mm 鑽頭在鋼筋位置正上方，垂直於構件表面打孔，手接觸到鋼筋立即停止，用捲尺測鑽孔深度，即為實際的保護層厚度  $S_r$ ，則修正係數為：

$$K = \frac{S_m}{S_r} \text{-----(2)}$$

式中:  $S_m$ -----儀器讀數值。

- b. 對於不同鋼種和直徑應打各自的校準孔，一般應不小於 2 個，求其平均值。

- (4) 現場檢測的準確度。經過修正後確定的保護層厚度值，準確度可在 10%以內，因混凝土表面的平整度及各種影響因素仍會給測量帶來誤差。
- (5) 用圖示方式註明檢測部位及測區位置，將各個測區的鋼筋分布、走向繪製成圖，並在圖上標註間距、保護層厚度及鋼筋直徑等數據。

(H).鋼筋分布及保護層厚度的評定標準

1. 數據處理

- (1) 首先根據某一測量部位各測點混凝土厚度實測值，按下式求出混凝土保護層厚度平均值  $\bar{D}_n$  (精確至 0.1mm)。

$$\bar{D}_n = \frac{\sum_{i=1}^n D_{ni}}{n} \text{-----}(3)$$

式中:  $D_{ni}$ -----結構或構件測量部位測點混凝土保護層厚度，精確至 1mm；  
n-----測點數。

- (2) 按照下式計算確定測量部位混凝土保護層厚度特徵值  $D_{ne}$  (精確至 0.1mm):

$$D_{ne} = \bar{D} - K S_D \text{-----}(4)$$

式中:  $S_D$ -----測量部位測點保護層厚度的標準差，精確至 0.1mm；

$$S_D = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (D_{ni})^2 - n(\bar{D}_n)^2}{n-1}} \text{-----}(5)$$

K-----合格判定係數值，按表 4.23 取用。

表 4.23 混凝土保護層厚度合判定係數值

n	10~15	16~24	≥25
K	1.695	1.645	1.595

(資料來源:本研究整理)

2. 根據測量部位實測保護層厚度特徵值  $D_{ne}$  與其設計值  $D_{nd}$  的比值，混凝土保護層厚度對結構鋼筋耐久性評定標度按表 4.24 來評判。

表 4.24 混凝土保護層厚度的評定標準

評定標度值	$D_{ne} / D_{nd}$	對結構混凝土耐久性的影響
1	>0.95	影響不顯著
2	0.85~0.95	有輕度影響
3	0.70~0.85	有影響
4	0.55~0.70	有較大影響
5	<0.55	鋼筋易失去鹼性保護，發生銹蝕

(資料來源:本研究整理)

## 第六節 耐久性綜合評估方法

本在文獻[41]中，提出先以單一構件作出耐久性評價，然後再總合計算整體性耐久性評價的觀念。在本研究中，亦採用同樣的概念並加以修正。首先針對單一構件的耐久性評估計算方式如下：

$$D_l = \sum_{i=1}^2 \sum_{m=1}^n \beta_i A_{im} \alpha_{im}$$

其中  $D_l$  代表第  $l$  種單一構件的耐久性評價， $\beta_i$  為第  $i$  類因子所代表之權重(其中共有兩類，分別為混凝土現況以及腐蝕現況)， $A_{im}$  為第  $i$  類因子中第  $m$  個指標所得到之評價(一律分為五級，值分別由 1 至 5)， $\alpha_{im}$  則為第  $i$  類因子中第  $m$  個指標在第  $i$  類因子中所佔之權重。 $p_i$  代表第  $i$  類中之耐久性指標總數，若  $i = 1$ ，則  $p_1 = 6$ ；若  $i = 2$ ，則  $p_2 = 4$ 。經由一次專家座談會求得各項權重值如表 4.25，附錄二、三。

在實際操作上，可能在各類指標中實際所操作之項目並未達到建議之總指標數，而僅進行部份之檢測，則可以將各類指標之總合計算如下式所示：

$$D_i = \left[ \sum \beta_i \frac{\sum_{m=1}^n A_{im} \alpha_m}{\sum_{m=1}^n \alpha_m} \right]$$

表 4.25 混凝土構件材質狀況檢測指標與耐久性指標權重值

項目		耐久性指標數	Local 權重值	Global 權重值
腐蝕現況			0.2	0.2
	腐蝕電位	1	0.139	0.028
	中性化深度	2	0.216	0.043
	氯離子	3	0.449	0.090
	腐蝕電流	4	0.196	0.039
混凝土現況			0.8	0.8
	電阻係數	5	0.047	0.038
	抗壓強度	6	0.182	0.146
混凝土表面 觀損傷	裂縫	7	0.241	0.56 0.193 0.146 0.110 0.448
	層離、剝落或露筋、調校與缺角	8	0.182	
	蜂窩麻面、表面侵蝕、表面沉積	9	0.137	
	鋼筋保護層厚度	10	0.211	0.169

(資料來源:本研究製作)

因為在未考量放大因子前，單一構件之最大值 5(這是因為我們分為五評等級之故)，乘上放大因子之後，則可能會有超過 5 的情況出現。我們由此可以將單一構件耐久性之評斷分為五級如表 4.26 所示：

表 4.26 混凝土單一構件之耐久性評估標準

$D_i$ 之範圍	$0 \leq D_i < 2$	$2 \leq D_i < 3$	$3 \leq D_i < 4$	$4 \leq D_i < 5$	$5 \leq D_i$
單一構件 耐久性等 級	5	4	3	2	1
構件耐久 性狀況	良好	較好	一般	較差	極差

(資料來源:本研究製作)

有了單一構件之耐久性評價，則可以針對整體混凝土結構耐久性作整體評價如下式所示：

$$D_{total} = \sum_{j=1}^q D_j \gamma_j$$

其中  $D_{total}$  代表整體混凝土結構物之耐久性評價， $D_j$  代表第  $j$  個構件之單一構件耐久性評價， $\gamma_j$  則代表第  $j$  個構件在整體結構中所佔之權重， $q$  則代表考量之構件總數。有關可量構件之權重，可參考文獻[14]所建議，但是實作上可依據混凝土結構物所處環境、設計時之考量等之不同，由專家進行評價再給與權重。

同樣地在整體混凝土結構物耐久性評價上，我們也可以針對整體混凝土結構物耐久性評價分級，如表 4.27 所示。

表 4.27 結構整體的耐久性綜合評價標準

$D_{total}$ 之範圍	$0 \leq D_{total} < 2$	$2 \leq D_{total} < 3$	$3 \leq D_{total} < 4$	$4 \leq D_{total} < 5$	$5 \leq D_{total}$
結構整體耐久性等級	5	4	3	2	1
整體耐久性狀況	良好	較好	一般	較差	極差

(資料來源:本研究製作)

## 第七節 建築物耐久性評估實例分析

### 一、 建築耐久性評估規劃

一棟建築物之檢測內容極為繁雜，為避免現場檢測時有所缺漏不完整，以致於檢測不完整，或須另行再赴現場補行檢測，耗時費力，故應於檢測前妥為規劃檢測作業，擬定詳細之檢測計畫，方能順利的完成檢測任務。

#### (A) 整體評估作業流程

通常一次完整之建築物耐久性評估檢測包含下列幾點[14]：

##### 1. 研擬評估計畫

為使評估作業能夠在有順序的系統下進行，評估者得事前做好評估計畫，這項計畫須包括(B)中之各項因素。

##### 2. 準備作業

事先準備評估所需要的適當工具及設備，研讀建築結構檔案，並由地圖上找出建築的所在地。

##### 3. 執行評估作業

根據適當的順序以及建築構件編碼系統進行評估作業。

##### 4. 準備評估報告

評估者須收集足夠的資訊，力求報告之完整性。

##### 5. 確定需要維護保養及維修之項目

評估作業結束後，研判所收集之資料後，對於其中之缺失項目，應確定其需要維護保養及維修之項目，以達到延長建築使用年限之目標。

(B) 檢測計畫之考慮因素

擬定建築物檢測計畫時，應考慮下列幾點：

1. 建築物之種類與結構形式
2. 建築物檢測之時程
3. 建築物大小
4. 建築物構造之複雜性
6. 所需之檢測人員
7. 所需之檢測儀器、材料、或特殊設備
8. 是否需要特殊檢測單位支援

(C) 建築物檢測前之準備作業

現場檢測評估工作的成敗決定於先期的準備作業是否充

分。檢測主要的準備作業包括：

1. 研讀建築物結構檔案
2. 建立建築物結構定位系統
3. 研擬檢測程序
4. 準備檢測表格、記事本及建築物簡圖
5. 安排適當到達構件之方法及設備
6. 整理檢測工具及設備
7. 安排檢測現場之交通維持
8. 檢查安全設施

除了以上各項事前之準備工作外，檢測時亦須要備妥必要之交通維持設施、規劃適當人員數目並且作好適當之安全措施，才能使整體檢測過程順利且圓滿的完成。

## 結構材料生命週期評估基準與耐久性評估指標之建立(1)

## 二、 耐久性檢測實例

為驗證上述理論的可行性與可靠性，本計畫中選定一濱海之房屋建築物與冬山國中作為案例分析。

### 1、濱海之房屋建築物實例

該建築物為二層樓之構造物，位於東北角海岸，北臨龍洞岬，自民國 79 年 7 月動工興建，迄今已屆二十年屋齡之久。在地理環境上，該物依山傍水緊鄰太平洋海域，夏秋之際颱風盛行，冬季則有強勁東北季風吹襲，長期受海風侵蝕與鹽份腐蝕之影響，其地理位置如圖 4.11 所示。

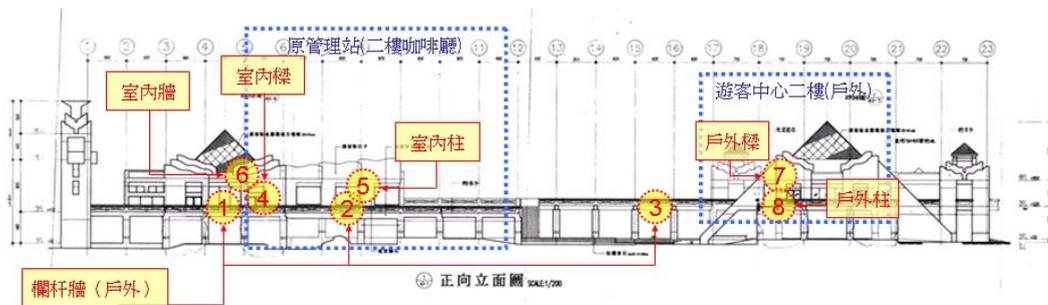


圖 4.11 房屋檢測體之地理位置

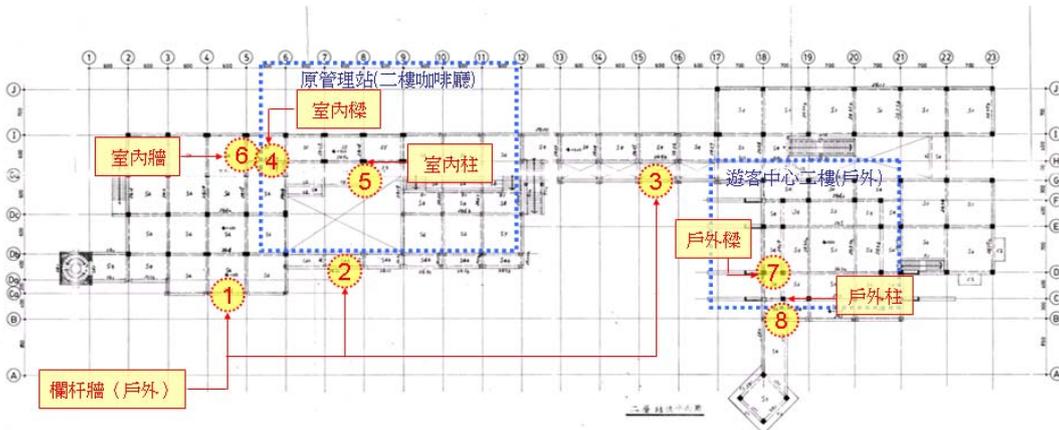
(資料來源：龍洞南口海洋公園計有結構物安全調查評估及改善策略之研究)

## 結構材料生命週期評估基準與耐久性評估指標之建立(1)

為瞭解目前結構體混凝土的品質狀況，於現場進行鑽心取樣，共計取得 8 個圓柱試體，由位置如圖 4.12 所示，所取得之試體將帶回實驗室，進行抗壓強度、氯離子含量與中性化檢測。分別於北側結構物之戶外樑、戶外柱，南側結構物之室內牆、室內樑、室內柱鑽取試體各 1 個，另外戶外欄杆牆三處各取 1 個，合計 8 個。現場鑽心取樣係利用膨脹螺絲將鑽孔機固定於欲鑽孔處，再進行取樣工作。



(a) 立面圖



(b) 平面圖

圖 4.12 鑽心取樣位置示意圖

(資料來源：龍洞南口海洋公園計有結構物安全調查評估及改善策略之研究)

腐蝕量測試中，腐蝕量測儀之導線需接觸到待測之鋼筋，才可藉由探頭透過混凝土，直接量測內部鋼筋之腐蝕訊號，因此試驗之位置需配合鑽心取樣，選擇一個室內柱(取樣點 5)與一個戶外柱(取樣點 8)，於鑽心試體取得後，依照配筋圖，以鑽孔機鑽孔使鋼筋露出，腐蝕量測儀之導線方可順利接觸待測鋼筋，形成一迴路。室內柱主筋及箍筋共量測 22 個測點，戶外柱主筋及箍筋共量測 30 個測點，所量測之測點編號示意圖如圖 4.13 與 4.14 所示。

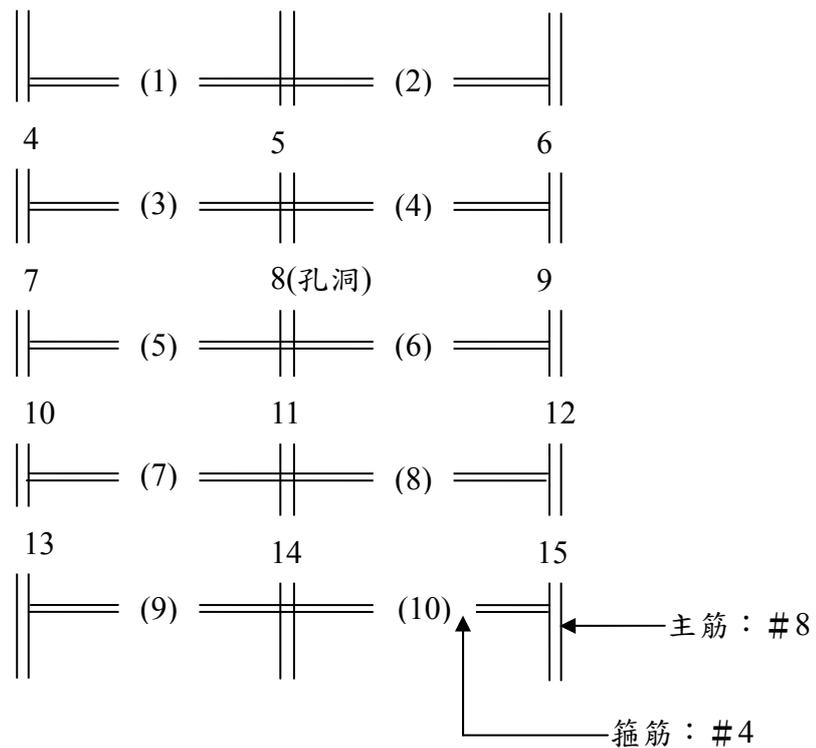


圖 4.13 室內柱腐蝕量測編號示意圖

(資料來源：龍洞南口海洋公園計有結構物安全調查評估及改善策略之研究)

結構材料生命週期評估基準與耐久性評估指標之建立(1)

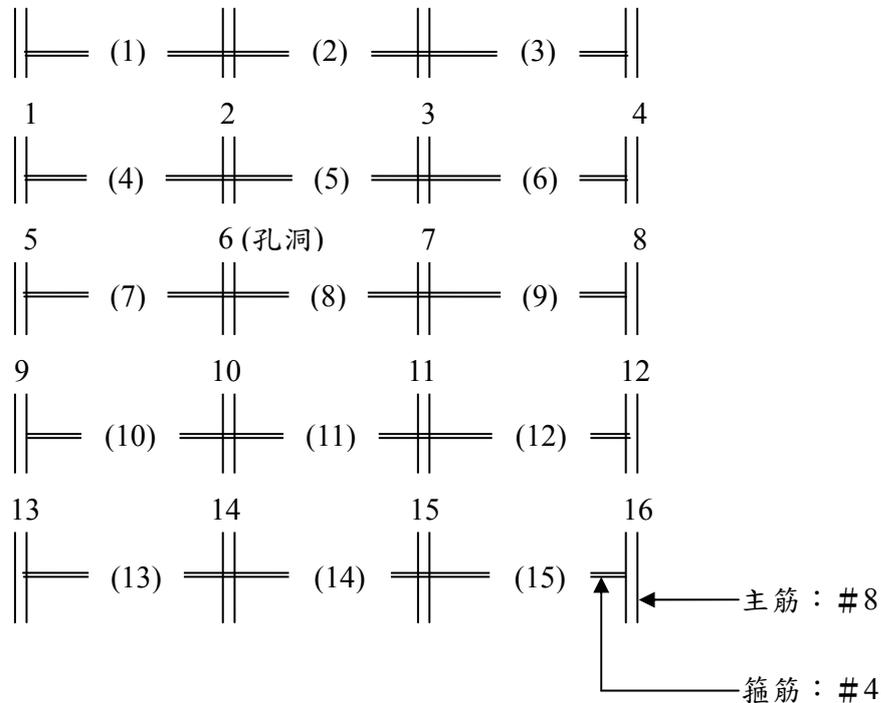


圖 4.14 戶外柱腐蝕量測編號示意圖

(資料來源：龍洞南口海洋公園計有結構物安全調查評估及改善策略之研究)

氯離子含量檢測

表 4.28 鑽心取樣試體水溶性氯離子含量檢測結果(實例 1)

試體編號	試體位置	氯離子含量(%)	氯離子含量(kg/m <sup>3</sup> )
1	戶外牆	0.0577	0.198
2	戶外牆	0.0507	0.174
3	戶外牆	0.0507	0.174
4	室內梁	0.0840	0.288
5	室內柱	0.0367	0.126
6	室內牆	0.0743	0.225
7	戶外梁	0.0507	0.174
8	戶外柱	0.1015	0.348

(資料來源：龍洞南口海洋公園計有結構物安全調查評估及改善策略之研究)

氯離子含量的評定標度值：

戶外梁:0.0507% ，戶外柱:0.1015%，戶外牆:0.0507%~0.0577%

室內梁:0.0840%，室內柱:0.0367%，室內牆:0.0743%

氯離子含量小於 0.15% 則誘發鋼筋鏽蝕的可能性很小。氯離子含量的評定標度值皆取 1。

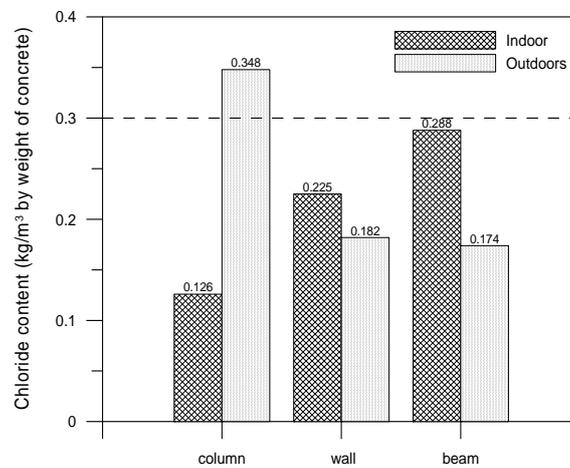


圖 4.15 鑽心取樣試體水溶性氯離子含量試驗結果圖

(資料來源：龍洞南口海洋公園計有結構物安全調查評估及改善策略之研究)

中性化深度檢測

表 4.29 鑽心取樣試體中性化檢測結果(實例 1)

試體編號	試體位置	碳化深度 (cm)	保護層厚度 (cm)	碳化深度/保護層厚度
1	戶外牆	0	6.5	0
2	戶外牆	0	6.72	0
3	戶外牆	0.348	6.4	0.05
4	室內梁	2.314	6	0.39
5	室內柱	3.37	6	0.56
6	室內牆	3.66	6	0.61
7	戶外梁	0.674	6.5	0.10
8	戶外柱	0.481	6	0.08

## 結構材料生命週期評估基準與耐久性評估指標之建立(1)

(資料來源：龍洞南口海洋公園計有結構物安全調查評估及改善策略之研究)

中性化深度的評定標度值:

碳化層深度與保護層厚度之比值皆小於 1，故取評定標度值皆取 1。

鋼筋保護層厚度的評定標度值:

戶外梁:  $D_{ne}=6.5$ 、 $D_{nd}=5$ ， $D_{ne}/D_{nd}=1.3$

戶外柱:  $D_{ne}=6$ 、 $D_{nd}=5$ ， $D_{ne}/D_{nd}=1.2$ ，因比值大於 0.95，故評定標度值取 1。

戶外牆:  $D_{ne}=6.26$ 、 $D_{nd}=5$ ， $D_{ne}/D_{nd}=1.252$ ，因比值大於 0.95，故評定標度值取 1。

室內梁:  $D_{ne}=6$ 、 $D_{nd}=5$ ， $D_{ne}/D_{nd}=1.2$ ，因比值大於 0.95，故評定標度值取 1。

室內柱:  $D_{ne}=6$ 、 $D_{nd}=5$ ， $D_{ne}/D_{nd}=1.2$ ，因比值大於 0.95，故評定標度值取 1。

室內牆:  $D_{ne}=6$ 、 $D_{nd}=5$ ， $D_{ne}/D_{nd}=1.2$ ，因比值大於 0.95，故評定標度值取 1。

因  $D_{ne}/D_{nd}$  比值皆大於 0.95，故評定標度值皆取 1。

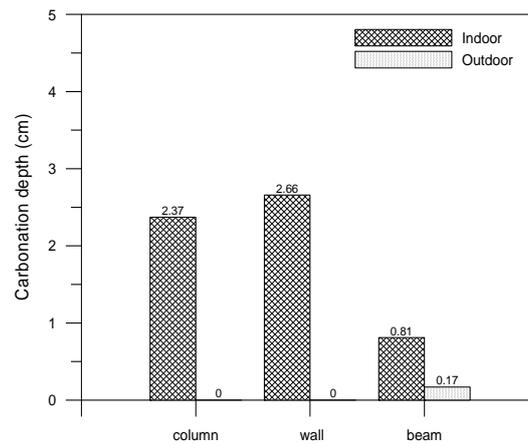


圖 4.16 鑽心取樣試體中性化檢測結果圖

(資料來源：龍洞南口海洋公園計有結構物安全調查評估及改善策略之研究)



取樣點 1



取樣點 2



取樣點 3



取樣點 4

圖 4.17 鑽心取樣試體中性化檢測照片(1~4)

(資料來源：龍洞南口海洋公園計有結構物安全調查評估及改善策略之研究)

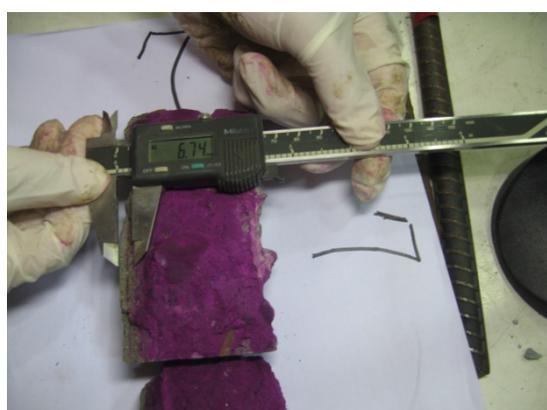
結構材料生命週期評估基準與耐久性評估指標之建立(1)



取樣點 5



取樣點 6



取樣點 7



取樣點 8

**圖 4.18 鑽心取樣試體中性化檢測照片(5~8)**

(資料來源：龍洞南口海洋公園計有結構物安全調查評估及改善策略之研究)

## 鋼筋腐蝕訊號量測

表 4.34 腐蝕訊號量測結果(室內柱主筋)

測點	電位(Cu/CuSO <sub>4</sub> ) (mV)	腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	電阻 ( $\Omega\cdot\text{cm}$ )
4	71.01	0.2163	106400
5	74.07	0.2501	83500
6	97.21	0.1372	102400
7	-3.12	0.6248	102400
8	-	-	-
9	47.63	0.1173	112100
10	94.85	0.2837	112300
11	43.86	0.6912	92800
12	84.23	0.2781	113500
13	111.61	0.2086	121500
14	50	0.4053	120700
15	75.49	0.1788	102100
平均	67.90	0.3083	106300

(資料來源：龍洞南口海洋公園計有結構物安全調查評估及改善策略之研究)

表 4.35 腐蝕訊號量測結果(室內柱箍筋)

測點	電位(Cu/CuSO <sub>4</sub> ) (mV)	腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	電阻 ( $\Omega\cdot\text{cm}$ )
(1)	91.78	0.5100	100600
(2)	138.52	0.4429	111900
(3)	80.68	0.4852	113200
(4)	130.97	0.8655	109800
(5)	-8.08	0.8054	81400
(6)	68.19	0.2039	91700
(7)	91.07	0.6450	101000
(8)	92.72	0.1925	112800
(9)	72.19	0.9191	102900
(10)	-17.29	0.1634	98100
平均	74.08	0.5233	102300

結構材料生命週期評估基準與耐久性評估指標之建立(1)

(資料來源：龍洞南口海洋公園計有結構物安全調查評估及改善策略之研究)

室內柱實測

腐蝕電流、電位及電阻的評定標度值：

腐蝕電流密度平均值為  $0.4158 (\mu\text{A}/\text{cm}^2)$ ，該值小於 0.5 故評定標度值取 1。

電位平均值為 71.35(mV)，故評定標度值取 1。

電阻平均值為 104300(Ohm.cm)，該值大於 20000 故電阻的評定標度值取 1。

表 4.36 腐蝕訊號量測結果(戶外柱主筋)

測點	電位(Cu/CuSO <sub>4</sub> ) (mV)	腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	電阻 ( $\Omega.\text{cm}$ )
1	3.25	0.9702	14000
2	-1.23	1.8008	10000
3	-17.29	2.5129	9300
4	-23.66	2.6241	5600
5	-9.97	3.8194	8800
6	-	-	-
7	-20.35	2.3368	8700
8	-15.87	3.6412	5500
9	-6.19	3.0930	8600
10	-18.7	2.8739	6800
11	-7.13	3.1192	7300
12	-17.29	3.4520	5600
13	-38.3	2.6715	7600
14	-40.89	4.7483	7200
15	-20.12	5.1168	7100
16	-21.3	6.9068	6300
平均	-28.44	3.3126	7900

(資料來源：龍洞南口海洋公園計有結構物安全調查評估及改善策略之研究)

表 4.37 腐蝕訊號量測結果(戶外柱箍筋)

測點	電位(Cu/CuSO <sub>4</sub> ) (mV)	腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	電阻 ( $\Omega\cdot\text{cm}$ )
(1)	14.58	3.4591	10000
(2)	4.67	11.063	9300
(3)	0.89	4.7605	79000
(4)	-38.53	7.8055	8100
(5)	-30.98	5.3644	7800
(6)	-14.45	6.7868	7600
(7)	-33.81	6.4725	6500
(8)	-30.51	4.8928	7500
(9)	-10.44	2.6032	6500
(10)	-21.77	1.8161	9000
(11)	-25.55	11.742	7900
(12)	-37.59	11.525	6800
(13)	-44.91	7.1690	6400
(14)	-38.53	6.8253	6900
(15)	-54.82	3.7628	5700
平均	-24.12	6.4032	7600

(資料來源：龍洞南口海洋公園計有結構物安全調查評估及改善策略之研究)

室外柱實測：

腐蝕電流、電位及電阻的評定標度值：

腐蝕電流密度平均值為  $4.8579 (\mu\text{A}/\text{cm}^2)$ ，該值介於 5~10 故評定標度值取 1。

電位平均值為  $-26.28(\text{mV})$ ，該值介於 0~-200 故評定標度值取 1。

電阻平均值為  $7750(\Omega\cdot\text{cm})$ ，該值介於 5000~10000 故評定標度值取 4。

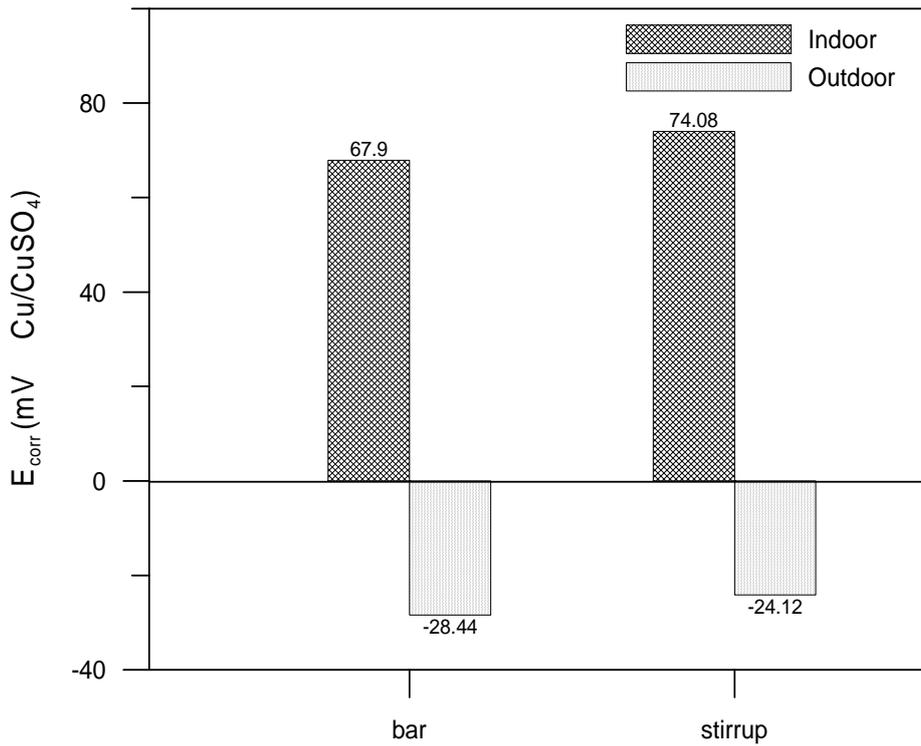


圖 4.19 腐蝕訊號-開路電位比較圖

(資料來源：龍洞南口海洋公園計有結構物安全調查評估及改善策略之研究)

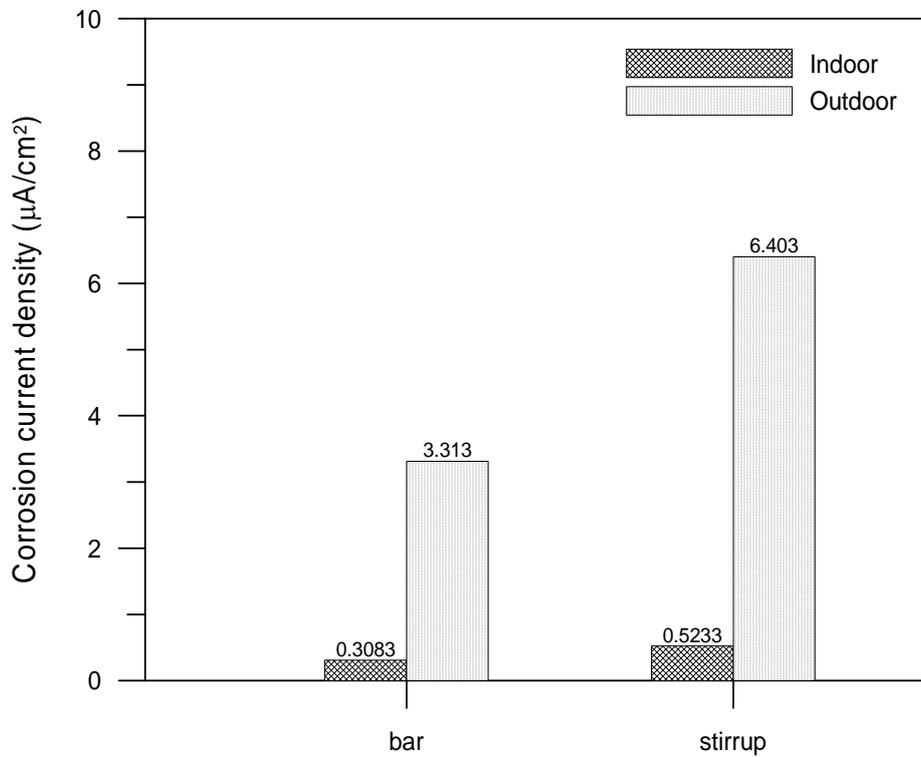


圖 4.20 腐蝕訊號-腐蝕電流密度比較圖

(資料來源：龍洞南口海洋公園計有結構物安全調查評估及改善策略之研究)

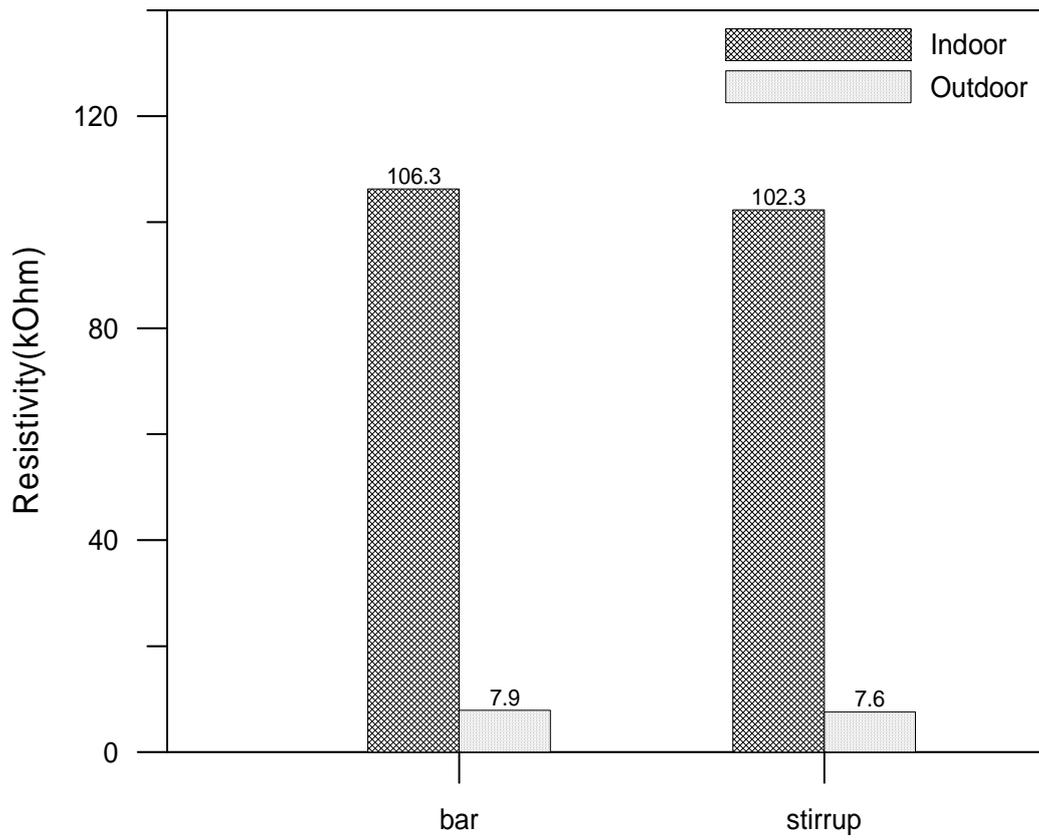


圖 4.21 腐蝕訊號-混凝土電阻比較圖

(資料來源：龍洞南口海洋公園計有結構物安全調查評估及改善策略之研究)

混凝土試體抗壓強試驗

表 4.38 混凝土試體抗壓強試驗結果(實例 1)

檢測位置 說明	試體編號	試體抗壓強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	平均強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )
室內柱	1	239	243.3
	2	266	
	3	188	
	4	212	
	5	199	
	6	243	
	7	257	
	8	283	
	9	276	
	10	270	
戶外牆	1	344	330
	2	312	
	3	322	
	4	329	
	5	342	

(資料來源：龍洞南口海洋公園計有結構物安全調查評估及改善策略之研究)

抗壓強度評定標度值：

本案混凝土設計強度  $f_c' = 210 \text{ kg/cm}^2$

室內柱：

$R_{im} = 243.3$ ， $K_{bm} = 1.159$ ，因  $K_{bt}$  皆大於等於 0.95 且  $K_{bm}$  大於 1，故評定標度值取 1。

戶外牆：

$R_{im} = 322$ ， $K_{bm} = 1.571$ ，因  $K_{bt}$  皆大於 0.95 且  $K_{bm}$  大於 1，故評定標度值取 1。

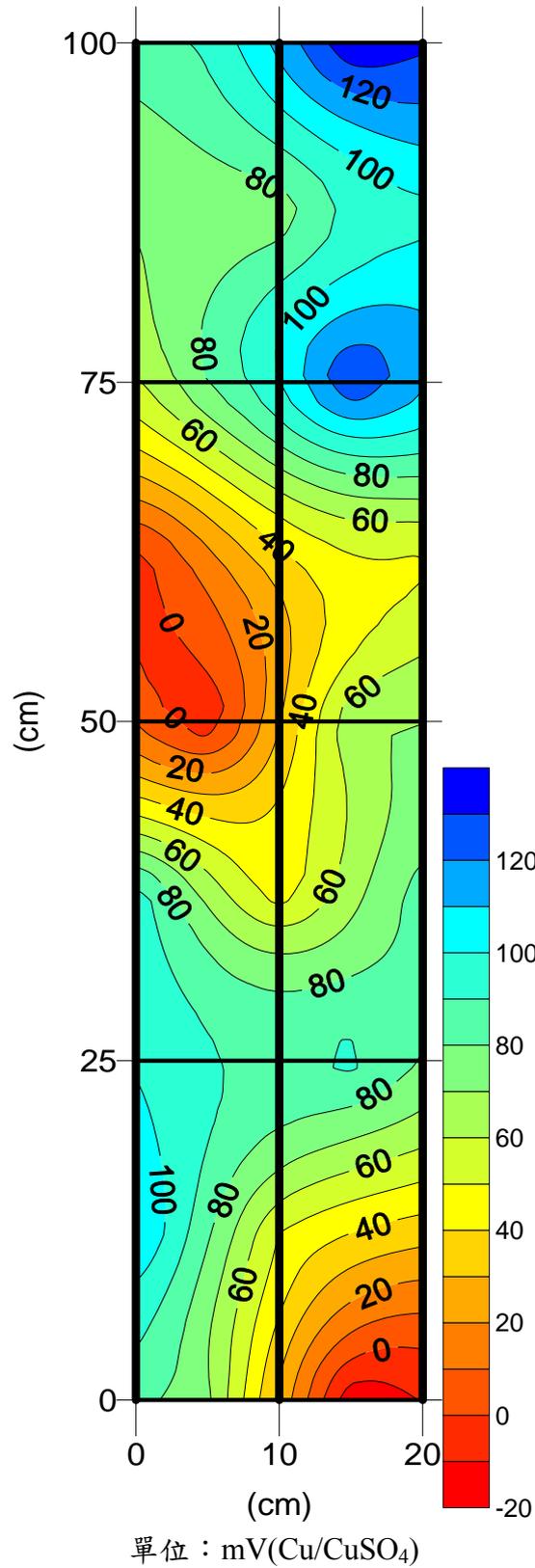


圖 4.22 室內柱開路電位平面圖

(資料來源：龍洞南口海洋公園計有結構物安全調查評估及改善策略之研究)

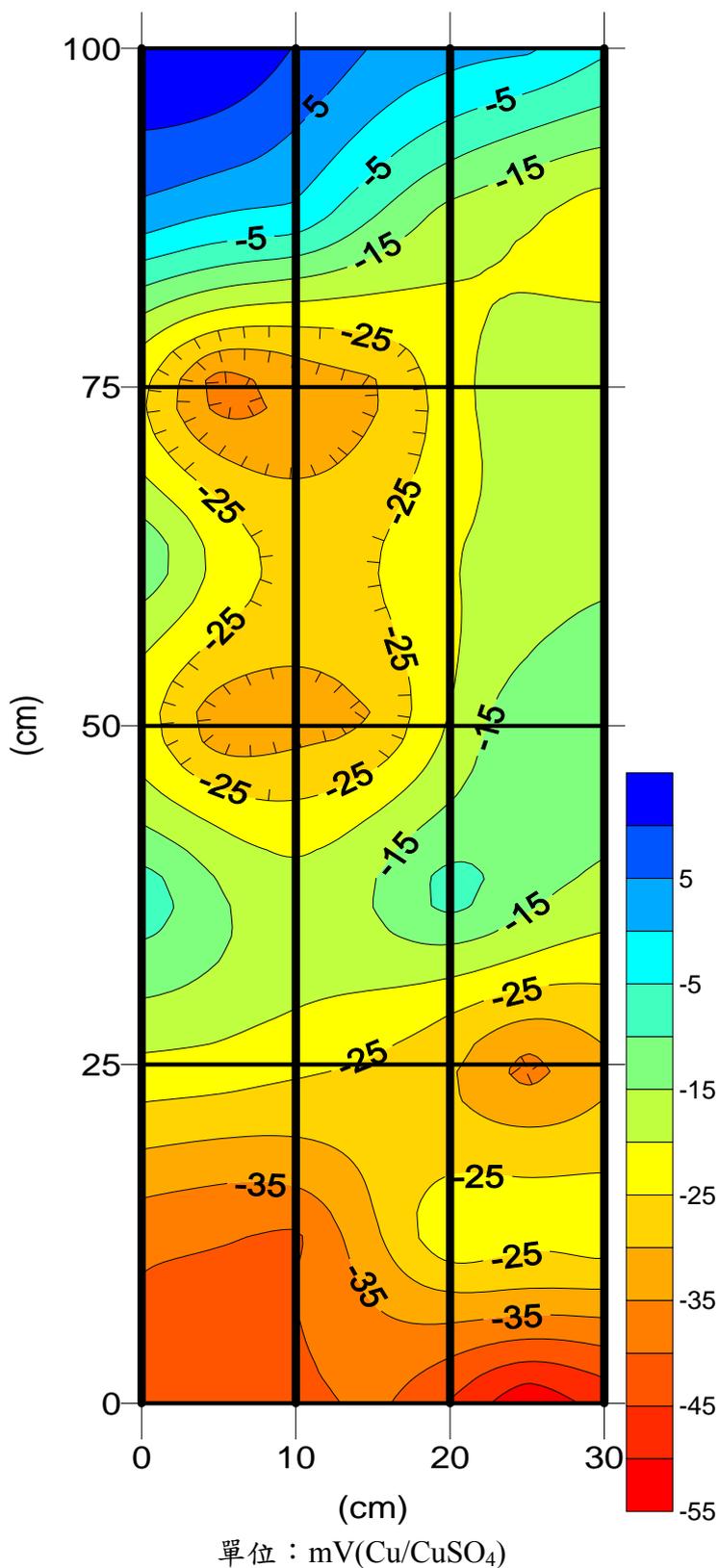


圖 4.23 戶外柱開路電位平面圖

(資料來源：龍洞南口海洋公園計有結構物安全調查評估及改善策略之研究)

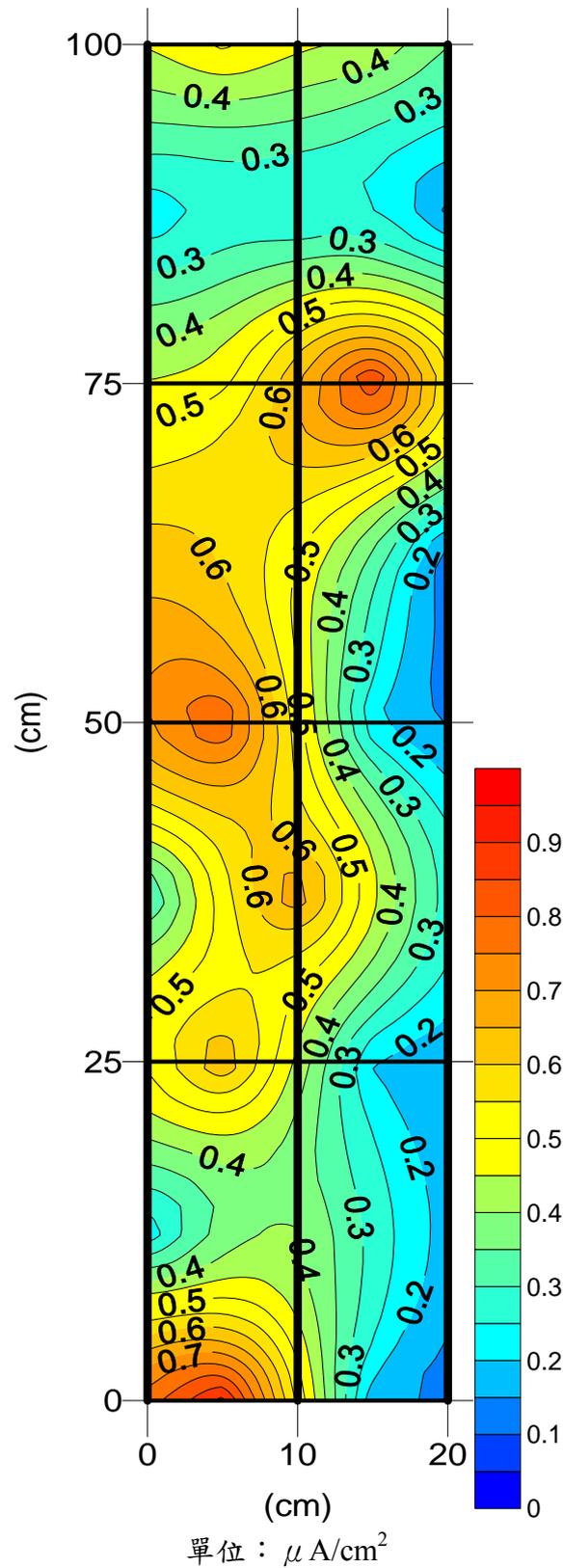


圖 4.24 室內柱腐蝕電流密度平面圖

(資料來源：龍洞南口海洋公園計有結構物安全調查評估及改善策略之研究)

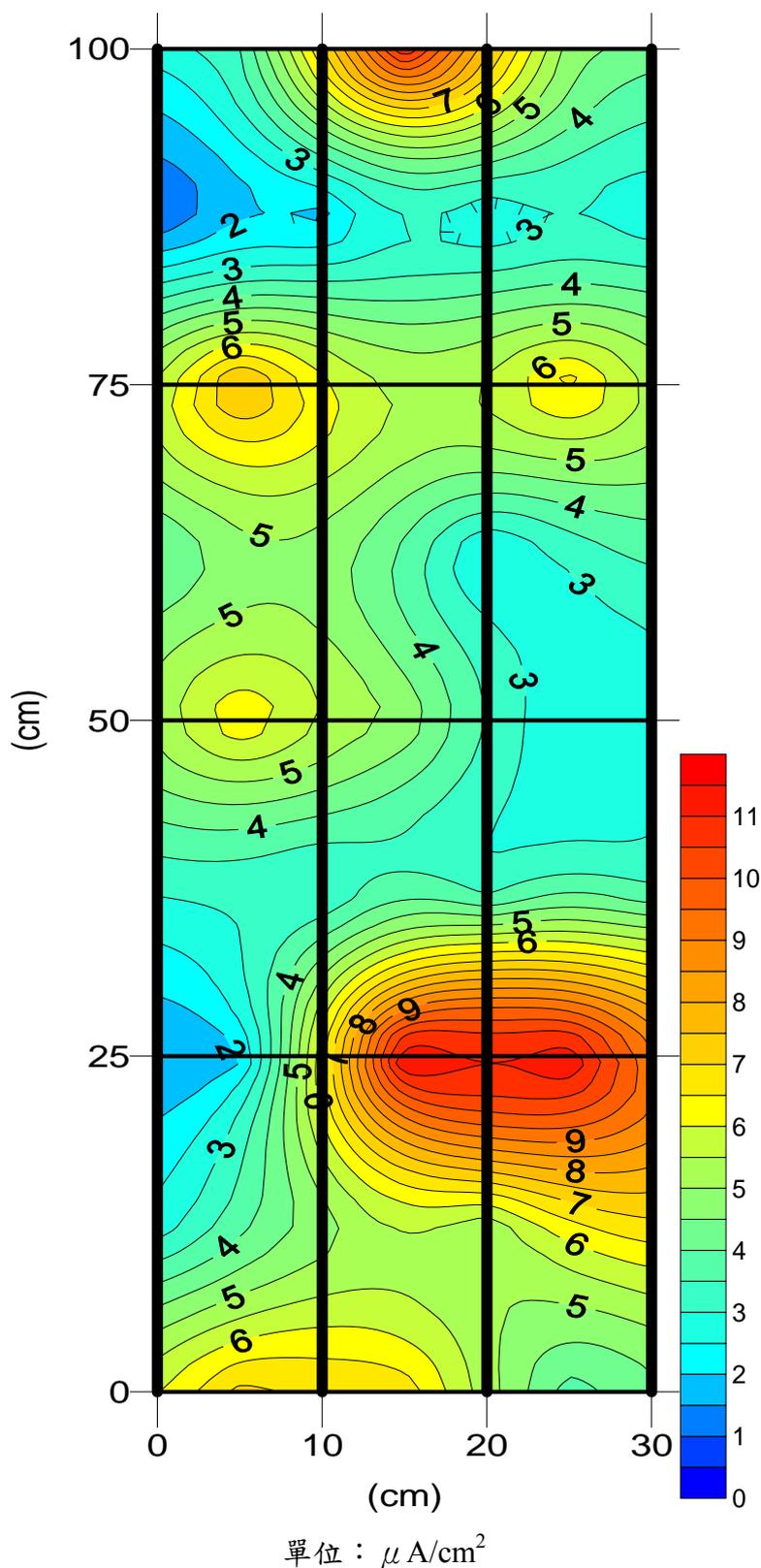


圖 4.25 戶外柱腐蝕電流密度平面圖

(資料來源：龍洞南口海洋公園計有結構物安全調查評估及改善策略之研究)

表 4.39 戶外梁的混凝土材質狀況檢測指標與耐久性指標權重值

項目		耐久性指標數	權重值		評定標度值
<b>腐蝕現況</b>			0.2		
腐蝕電位		1	0.139		NA
中性化深度		2	0.216		1
氯離子		3	0.449		1
腐蝕電流		4	0.196		NA
<b>混凝土現況</b>			0.8		
電阻係數		5	0.047		NA
抗壓強度		6	0.182		NA
混凝土表觀損傷	裂縫	7	0.241	0.56	NA
	層離、剝落或露筋、調棱與缺角	8	0.182		NA
	蜂窩麻面、表面侵蝕、表面沉積	9	0.137		NA
鋼筋保護層厚度		10	0.211		1

(資料來源：本研究製作)

表 4.40 戶外柱的混凝土材質狀況檢測指標與耐久性指標權重值

項目		耐久性指標數	權重值		評定標度值
<b>腐蝕現況</b>			0.2		
腐蝕電位		1	0.139		1
中性化深度		2	0.216		1
氯離子		3	0.449		1
腐蝕電流		4	0.196		1
<b>混凝土現況</b>			0.8		
電阻係數		5	0.047		4
抗壓強度		6	0.182		NA
混凝土表觀損傷	裂縫	7	0.241	0.56	NA
	層離、剝落或露筋、調棱與缺角	8	0.182		NA
	蜂窩麻面、表面侵蝕、表面沉積	9	0.137		NA
鋼筋保護層厚度		10	0.211		1

(資料來源：本研究製作)

表 4.41 戶外牆的混凝土材質狀況檢測指標與耐久性指標權重值

項目		耐久性指標數	權重值		評定標度值
<b>腐蝕現況</b>			0.2		
腐蝕電位		1	0.139		NA
中性化深度		2	0.216		1
氯離子		3	0.449		1
腐蝕電流		4	0.196		NA
<b>混凝土現況</b>			0.8		
電阻係數		5	0.047		NA
抗壓強度		6	0.182		1
混凝土表觀損傷	裂縫	7	0.241	0.56	NA
	層離、剝落或露筋、調棱與缺角	8	0.182		NA
	蜂窩麻面、表面侵蝕、表面沉積	9	0.137		NA
鋼筋保護層厚度		10	0.211		1

(資料來源：本研究製作)

表 4.42 室內梁的混凝土材質狀況檢測指標與耐久性指標權重值

項目		耐久性指標數	權重值		評定標度值
<b>腐蝕現況</b>			0.2		
腐蝕電位		1	0.139		NA
中性化深度		2	0.216		1
氯離子		3	0.449		1
腐蝕電流		4	0.196		NA
<b>混凝土現況</b>			0.8		
電阻係數		5	0.047		NA
抗壓強度		6	0.182		NA
混凝土表觀損傷	裂縫	7	0.241	0.56	NA
	層離、剝落或露筋、調棱與缺角	8	0.182		NA
	蜂窩麻面、表面侵蝕、表面沉積	9	0.137		NA
鋼筋保護層厚度		10	0.211		1

(資料來源：本研究製作)

表 4.43 室內柱的混凝土材質狀況檢測指標與耐久性指標權重值

項目		耐久性指標數	權重值	評定標度值
<b>腐蝕現況</b>			0.2	
	腐蝕電位	1	0.139	1
	中性化深度	2	0.216	1
	氯離子	3	0.449	1
	腐蝕電流	4	0.196	1
<b>混凝土現況</b>			0.8	
	電阻係數	5	0.047	1
	抗壓強度	6	0.182	1
混凝土表 觀損傷	裂縫	7	0.241	NA
	層離、剝落或露筋、調棱與缺角	8	0.182	NA
	蜂窩麻面、表面侵蝕、表面沉積	9	0.137	NA
	鋼筋保護層厚度	10	0.211	1

(資料來源：本研究製作)

表 4.44 室內牆的混凝土材質狀況檢測指標與耐久性指標權重值

項目		耐久性指標數	權重值	評定標度值
<b>腐蝕現況</b>			0.2	
	腐蝕電位	1	0.139	NA
	中性化深度	2	0.216	1
	氯離子	3	0.449	1
	腐蝕電流	4	0.196	NA
<b>混凝土現況</b>			0.8	
	電阻係數	5	0.047	NA
	抗壓強度	6	0.182	NA
混凝土表 觀損傷	裂縫	7	0.241	NA
	層離、剝落或露筋、調棱與缺角	8	0.182	NA
	蜂窩麻面、表面侵蝕、表面沉積	9	0.137	NA
	鋼筋保護層厚度	10	0.211	1

(資料來源：本研究製作)

## 結構材料生命週期評估基準與耐久性評估指標之建立(1)

耐久性評估：

將統計好的數據帶入單一構件的耐久性評估計算公式如下：

$$D_1 = \delta_1 \cdots \delta_k \left( \sum_{i=1}^2 \beta_i \frac{\sum_{m=1}^n A_{im} a_m}{\sum_{m=1}^n a_m} \right)$$

戶外梁：

$$D_1 = \left( 0.2 \times \frac{(1 \times 0.216 + 1 \times 0.449)}{(0.216 + 0.449)} \right) + \left( 0.8 \times \frac{1 \times 0.211}{0.211} \right) = 1$$

，見表 4.26， $1 \leq D_1 < 2$  構件耐久等級等級為 5，耐久性狀況為完好。

戶外柱：

$$D_1 = \left( 0.2 \times \frac{(1 \times 0.139 + 1 \times 0.216 + 1 \times 0.449 + 1 \times 0.196)}{(0.139 + 0.216 + 0.449 + 0.196)} \right) + \left( 0.8 \times \frac{4 \times 0.047 + 1 \times 0.211}{0.047 + 0.211} \right) = 1.437$$

，見表 4.26， $1 \leq D_1 < 2$  構件耐久等級等級為 5，耐久性狀況為完好。

戶外牆：

$$D_1 = \left( 0.2 \times \frac{(1 \times 0.216 + 1 \times 0.449)}{(0.216 + 0.449)} \right) + \left( 0.8 \times \frac{1 \times 0.182 + 1 \times 0.211}{0.182 + 0.211} \right) = 1$$

，見表 4.26， $1 \leq D_1 < 2$  構件耐久等級等級為 5，耐久性狀況為完好。

室內梁：

$$D_1 = \left(0.2 \times \frac{(1 \times 0.216 + 1 \times 0.449)}{(0.216 + 0.449)}\right) + \left(0.8 \times \frac{1 \times 0.211}{0.211}\right) = 1$$

，見表 4.26， $1 \leq D_1 < 2$  構件耐久等級等級為 5，耐久性狀況為完好。

室內柱：

$$D_1 = \left(0.2 \times \frac{(1 \times 0.139 + 1 \times 0.216 + 1 \times 0.449 + 1 \times 0.196)}{(0.139 + 0.216 + 0.449 + 0.196)}\right) + \left(0.8 \times \frac{1 \times 0.047 + 1 \times 0.182 + 1 \times 0.211}{0.047 + 0.182 + 0.211}\right) = 1$$

，見表 4.26， $1 \leq D_1 < 2$  構件耐久等級等級為 5，耐久性狀況為完好。

室內牆：

$$D_1 = \left(0.2 \times \frac{(1 \times 0.216 + 1 \times 0.449)}{(0.216 + 0.449)}\right) + \left(0.8 \times \frac{1 \times 0.211}{0.211}\right) = 1$$

，見表 4.26， $1 \leq D_1 < 2$  構件耐久等級等級為 5，耐久性狀況為完好。

表 4.45 建築整體結構耐久性評價表(實例 1)

構(部)件	名稱	推薦權重	評定標度值
1	戶外梁	0.21	1
2	戶外柱	0.21	1.437
3	戶外牆	0.03	1
4	室內梁	0.21	1
5	室內柱	0.21	1
6	室內牆	0.03	1
7	板	0.10	1

(資料來源：本研究製作)

有了單一構件之耐久性評價(其中假定板之耐久性狀況完好，評定標度值為 1)，則可以針對建築物整體結構耐久性作整體評價如下式所示：

$$D_{total} = \sum_{j=1}^n D_j Y_j$$

$$D_{total} = \frac{(1 \times 0.21 + 1.437 \times 0.21 + 1 \times 0.03 + 1 \times 0.21 + 1 \times 0.21 + 1 \times 0.03 + 1 \times 0.1)}{(0.21 + 0.21 + 0.21 + 0.21 + 0.03 + 0.03 + 0.1)} = 1.09177$$

見表 4.27， $1 \leq D_{total} < 2$  結構耐久等級評定度為 5，結構整體耐久性狀況為完好。

2. 宜蘭縣冬山國中檢測實例

本案建築物位於宜蘭縣冬山鄉南興村照安路26號，為地上3層鋼筋混凝土構造建築物，約於民國75年間完工，總樓地板面積為940.5m<sup>2</sup>各層樓樓高（建築物基底面定於1FL）及現況用途如下表所示。

表 4.46 樓高及用途

樓高及用途				
樓層別	高度	樓地板面積	現況用途	原設計用途
1F	3.6 m	475.6	教室	教室
2F	3.6m	456.1	教室	教室

（資料來源：立展工程顧問有限公司）



圖 4.26 宜蘭縣冬山國中基本位置圖

（資料來源：立展工程顧問有限公

氯離子含量檢測

表 4.47 氯離子含量檢測結果(實例 2)

冬山國中—大學樓			
編號	位置	氯離子含量(kg/m <sup>3</sup> )	氯離子含量(%)
1	1F-1	0.10	0.029
2	2F-1	0.13	0.038

(資料來源：立展工程顧問有限公司)

氯離子含量的評定標度值：

如上表所示，氯離子含量皆小於 0.15%，故誘發鋼筋鏽蝕的可能性很小，氯離子含量的評定標度值皆取 1。

鋼筋探測試驗

表 4.48 鋼筋探測試驗結果

冬山國中—大學樓						
樓層桿件 (編號)	掃描結果		原設計		保護 層厚 度 (cm)	備註
	主筋	箍筋	主筋	箍筋		
SC1-1	3-#5	#3@25cm	3-#5	#3@25cm	5.0	一樓柱
SC1-2	3-#5	#3@25cm	3-#5	#3@25cm	5.5	一樓柱
SC1-3	3-#6	#3@25cm	3-#6	#3@25cm	7.0	一樓柱
SC1-4	2-#5	#3@25cm	3-#5	#3@27cm	7.5	一樓樑
SC1-5	2-#5	#3@25cm	3-#5	#3@27cm	6.0	一樓樑
SC1-6	3-#5	#3@25cm	3-#5	#3@27cm	5.0	一樓樑
SC2-1	2-#5	#3@25cm	3-#5	#3@25cm	7.0	二樓柱
SC2-2	3-#5	#3@25cm	3-#5	#3@25cm	6.0	二樓柱
SC2-3	2-#6	#3@20cm	3-#6	#3@25cm	5.5	二樓柱
SC2-4	3-#5	#3@25cm	3-#5	#3@27cm	7.0	二樓樑

SC2-5	3-#5	#3@25cm	3-#5	#3@27cm	6.0	二樓樑
SC2-6	3-#5	#3@25cm	3-#5	#3@27cm	6.0	二樓樑

(資料來源：立展工程顧問有限公司)

一層： $D_{ne}=4.22$ 、 $D_{nd}=5$ ， $D_{ne}/D_{nd}=0.844$ ，因比值介於0.70~0.85，故評定標度值取3

二層： $D_{ne}=5.21$ 、 $D_{nd}=5$ ， $D_{ne}/D_{nd}=1.042$ ，因比值大於0.95，故評定標度值取1。

#### 混凝土試體抗壓強試驗

表 4.49 混凝土試體抗壓強試驗結果(實例 2)

冬山國中—大學樓			
樓層	試體編號	試體抗壓強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	平均強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )
一層	1	292	295
	2	340	
	3	253	
二層	4	379	322
	5	285	
	6	303	

(資料來源：立展工程顧問有限公司)

抗壓強度評定標度值：

本案混凝土設計強度 $f'_c = 210\text{kg/cm}^2$

一層： $R_{im}=295$ ， $K_{bm}=1.404$ ，因 $K_{bt}$ 皆大於0.95且 $K_{bm}$ 大於1，故評定標度值取1。

二層： $R_{im}=322$ ， $K_{bm}=1.533$ ，因 $K_{bt}$ 皆大於0.95且 $K_{bm}$ 大於1，故評定標度值取1。

表 4.50 混凝土中性化程度試驗結果

冬山國中—大學樓				
樓層	試體編號	中性化深度	保護層厚度	碳化深度/保護層厚度
一層	1	0.0	5	0
	2	0.2	5.5	0.04
	3	0.2	5	0.04
二層	4	1.5	6	0.25

結構材料生命週期評估基準與耐久性評估指標之建立(1)

	5	0.6	5	0.12
	6	0.5	5.5	0.09

(資料來源：立展工程顧問有限公司)

中性化深度的評定標度值：

碳化層深度與保護層厚度之比值皆小於 1，故取評定標度值皆取 1。

表 4.51 一層的混凝土材質狀況檢測指標與耐久性指標權重值

項目		耐久性指標數	權重值		評定標度值
<b>腐蝕現況</b>			0.2		
腐蝕電位		1	0.139		NA
中性化深度		2	0.216		1
氯離子		3	0.449		1
腐蝕電流		4	0.196		NA
<b>混凝土現況</b>			0.8		
電阻係數		5	0.047		NA
抗壓強度		6	0.182		1
混凝土表面觀損傷	裂縫	7	0.241	0.56	NA
	層離、剝落或露筋、調校與缺角	8	0.182		NA
	蜂窩麻面、表面侵蝕、表面沉積	9	0.137		NA
鋼筋保護層厚度		10	0.211		3

(資料來源：本研究室製作)

表 4.52 二層的混凝土材質狀況檢測指標與耐久性指標權重值

項目		耐久性指標數	權重值		評定標度值
<b>腐蝕現況</b>			0.2		
腐蝕電位		1	0.139		NA
中性化深度		2	0.216		1
氯離子		3	0.449		1
腐蝕電流		4	0.196		NA
<b>混凝土現況</b>			0.8		
電阻係數		5	0.047		NA
抗壓強度		6	0.182		1

混凝土表 觀損傷	裂縫	7	0.241	0.56	NA
	層離、剝落或露筋、調棱與缺角	8	0.182		NA
	蜂窩麻面、表面侵蝕、表面沉積	9	0.137		NA
鋼筋保護層厚度		10	0.211		1

(資料來源：本研究室製作)

將統計好的數據帶入單一構件的耐久性評估計算公式如下：

$$D_1 = \delta_1 \cdots \delta_k \left( \sum_{i=1}^k \beta_i \frac{\sum_{m=1}^n A_{im} \alpha_m}{\sum_{m=1}^n \alpha_m} \right)$$

一層：

$$D_1 = \left( 0.2 \times \frac{(1 \times 0.216 + 1 \times 0.449)}{(0.216 + 0.449)} \right) + \left( 0.8 \times \frac{1 \times 0.182 + 3 \times 0.211}{0.182 + 0.211} \right) = 1.859$$

，見表 4.26， $1 \leq D_1 < 2$  構件耐久等級等級為 5，耐久性狀況為完好。

二層：

$$D_1 = \left( 0.2 \times \frac{(1 \times 0.216 + 1 \times 0.449)}{(0.216 + 0.449)} \right) + \left( 0.8 \times \frac{1 \times 0.182 + 1 \times 0.211}{0.182 + 0.211} \right) = 1$$

，見表 4.26， $1 \leq D_1 < 2$  構件耐久等級等級為 5，耐久性狀況為完好。

表 4.53 建築整體結構耐久性評價表(實例 2)

構(部)件	名稱	推薦權重	評定標度值
1	一層	0.5	1.859
2	二層	0.5	1

(資料來源：本研究室製作)

有了單一構件之耐久性評價，則可以針對建築物整體結構耐久性作整體評價如下式所示：

$$D_{total} = \sum_{j=1}^q D_j Y_j$$

結構材料生命週期評估基準與耐久性評估指標之建立(1)

$$D_{\text{total}} = \frac{(1.859 \times 0.5 + 1 \times 0.5)}{(0.5 + 0.5)} = 1.4295$$

見表 4.27， $1 \leq D_{\text{total}} < 2$  結構耐久等級評定度為 5，結構整體耐久性狀況為完好。



## 結構材料生命週期評估基準與耐久性評估指標之建立(1)

## 第五章 結論與建議

### 第一節 結論

生命週期評估做為一種環境管理工具，不僅可以對當前的環境影響進行有效的定量化分析評價，而且可以對產品及其「從搖籃到墳墓」(cradle to grave)的全過程所涉及的环境問題進行評價。營建業與國家建設、經濟發展、全民生活品質及居住環境之提升息息相關，任何產品（包括建築物）應以一種具整體生命週期的觀念來探討。結構材料的生命週期可分為原料的取得、原料運輸、生產製造、混凝土運輸、使用與維護與破壞處理/再利用等階段，每個階段互相有其關連性且各階段所涉及的工作內容均有相關規範限制。然而，在生命週期評估的階段中使用維護與拆除/再利用等階段與建築物的使用目的及設計方式具有絕對性的關聯，且過去許多研究顯示生命週期環境評估主要在探討能源的消耗與二氧化碳排放量，表示能源的消耗與二氧化碳排放量是評估結構材料生命週期對環境衝擊相當重要的因子，本研究從結構材料之原料的取得、原料運輸、生產製造與產品運輸等階段擬訂生命週期評估之內容及建構生命週期評估資料庫架構。希望藉由結構材料生命週期評估內容的規劃與資料收集、分類來建立結構材料生命週期評估基準，了解地球目前所面臨的環境衝擊問題。在本研究中，生命週期評估基於 Eco-95 分析包括(1)溫室效應、(2)臭氧層破壞、(3)酸化、(4)優養化、(5)重金屬、(6)致癌物質、(7)冬季煙霧、(8)夏季煙霧、(9)殺蟲劑、(10)能源資源耗用、(11)固體廢棄物(solid waste) 共十一項指標。

另外，本研究也發現因為國內砂石來源有採用本土開採以及使用船運大陸砂石的方式，其所產生之生命週期也不相同。這是因為開採時所使用之機具所產生的生命週期衝擊是計算在產地上。

再者，若依照生命週期的由搖籃到墳墓的精神，想要完成建築物生命週期評估。在本地化建築材料上，缺乏使用階段的天然氣消耗量數據還有拆除廢棄階段的回收比率之數據，故目前只能完成由原料開採到建築物興建完成之生命週期評估。

## 結構材料生命週期評估基準與耐久性評估指標之建立(1)

生命週期評估在國內尚不普遍屬於萌芽階段，加上國內在進行生命週期評估時常常無法獲得完整相關之資料，以至於評估過程中，若遇資料不足之部分只能引用國外數據或進行假設，有時會造成評估結果和實際存在某種程度之差異。因此，當務之急應投入人力並與政策配合，建立本土化資料庫才能建立完整的生命週期評估。

關於建築物耐久性評價方面，目前已經完成兩層次的耐久性評估系統，包括了混凝土現況與腐蝕現況因子。混凝土現況因子包括了混凝土電阻係數、抗壓強度、表面損傷(裂縫)、表面損傷(層離、剝落或露筋、掉稜與缺角)、表面損傷(蜂窩、表面侵蝕、表面沉積)以及鋼筋保護層厚度共六項指標。腐蝕現況因子則包括了腐蝕電位、中性化深度、氯離子與腐蝕電流四項指標。為了瞭解各因子的權重所需要進行專家座談的問卷已經設計完成，並且已經舉辦專家座談會，產生本土化的權重。也已經完成兩案例之示範操作。

## 第二節 建議

### 建議一

(建議事項)立即可行之建議—將地震帶分級、坡地發生土石流潛能、施工良窳與否、齡期等因子，納入建築物材料耐久性評估時之考量因素。

主辦單位：內政部建築研究所

對地震帶分級、坡地發生土石流潛能、施工良窳與否、齡期等因子進行五等份分級，再以影響係數相乘的方式將本研究成果加以應用，得到更具有代表性之耐久性評等，可以考慮另行以委託研究計畫案之方式達到。

### 建議二

(建議事項)立即可行之建議—建議辦理研討會，推廣本研究案之研究成果。

主辦單位：內政部建築研究所

本研究之成果，建議辦理研討會，加以推廣。

### 建議三

(建議事項) 立即可行之建議—本研究案成果，可做為業界進行建築物耐久性評估之參考。

主辦單位：內政部建築研究所

本研究之成果，可以做為業界進行耐久性評估之參考，建議主辦單位可以透過報告分送各相關機構等方式推廣。

### 建議四

(建議事項) 長期可行之建議—加速國內有關營建材料生命週期相關數據量測與統計

主辦機關：經濟部能源局、內政部營建署

應儘速建立本土化數據庫，以利完整評估生命週期評估。尤其天然氣使用量數據以及廢棄建築材料回收比例之數據，應盡快建立。

### 建議五

(建議事項) 長期可行之建議—建立營建材料生命週期評估之本土化軟體

主辦單位：內政部建築研究所

本研究針對營建材料生命週期評估從原料開採到鋼筋混凝土建築物興建完成，已經具有本土化數據。建議主辦單位再以委託計畫形式，對其它類型建築物如鋼骨加勁混凝土結構物、鋼結構等國內常用之建築型態進行類似之研究。統合本研究成果以及這些成果，將可以發展給建築設計師使用的本土化營建材料生命週期軟體。

### 第三節 完成工作

本研究完成之工作項目見表 5.1 所示。

表 5.1 研究進度及完成之工作項目

工作項目	完 成 進 度	備 註
文獻蒐集與彙整	100%	
資料整理與分類	100%	
生命週期評估	100%	
耐久性指標評估	100%	
期中報告撰寫	100%	
數據分析與討論	100%	
生命週期評估準則與耐久性指標建立	100%	

(資料來源:本研究製作)

## 附錄一 各編號詳細質量數據

### (LCI1)：98 年全國砂石來源

指示器	得分	注釋
可靠性	2	由經濟部礦務局提供，它們提供數據的幾乎涵蓋全國所有砂石來源。
完整性	1	提供全台各地砂石來源資料。
時間相關性	1	民國 98 年數據。
地域相關性	1	來自台灣各地砂石統計。
技術相關性	1	統計砂石數據。

(資料來源：經濟部礦物局)

### (LCI2)：河川進口砂石比例

指示器	得分	注釋
可靠性	2	由經濟部礦務局提供。
完整性	2	統計各地砂石來源，由經濟部礦務局提供。
時間相關性	1	民國 98 年數據。
地域相關性	1	來自台灣各地砂石統計。
技術相關性	1	統計砂石數據。

(資料來源：經濟部礦物局)

結構材料生命週期評估基準與耐久性評估指標之建立(1)

(LCI3)：98 年花蓮縣砂石來源統計

指示器	得分	注釋
可靠性	2	由經濟部礦務局提供。
完整性	1	幾乎涵蓋所有可能砂石來源。
時間相關性	1	民國 98 年數據。
地域相關性	1	統計花蓮縣砂石來源。
技術相關性	1	統計砂石場數據。

(資料來源：經濟部礦物局)

(LCI4)：98 年花蓮縣砂石碎解場機具表

指示器	得分	注釋
可靠性	2	由經濟部礦務局提供。
完整性	2	供花蓮縣各地合法砂石來源資料，可能有非法營造廠並無資料。
時間相關性	1	民國 98 年數據。
地域相關性	1	來自花蓮縣各地砂石場統計。
技術相關性	1	由專業人員計算而得。

(資料來源：經濟部礦物局)

(LCI5) : 98 電力排放係數

指示器	得分	注釋
可靠性	2	由經濟部能源局統計。
完整性	1	有充足的樣本點和適合得期限。
時間相關性	1	民國 98 年數據。
地域相關性	1	來自台灣經濟部能源局統計。
技術相關性	1	由專業人計算而得。

(資料來源：經濟部礦物局)

(LCI6) : 挖土機、推土機、鏟土機耗油量

指示器	得分	注釋
可靠性	4	口頭詢問全國幾家大型製造挖土機公司。
完整性	3	型號眾多,只挑選其中常用機型。
時間相關性	1	民國 100 年詢問之結果。
地域相關性	1	來自台灣各大型挖土機具公司。
技術相關性	1	詢問挖土機具公司專業人員獲得。

(資料來源: 1.全國各大製造挖土機具公司 2.本研究整理而得)

結構材料生命週期評估基準與耐久性評估指標之建立(1)

(LCI7)：挖土機、推土機、鏟土機器具一小時產量

指示器	得分	注釋
可靠性	4	口頭詢問花蓮縣幾家砂石碎解場。
完整性	3	並無全部全部詢問得到之結果。
時間相關性	1	民國 100 年詢問之結果。
地域相關性	2	來自花蓮縣,無調查全台各地砂石場。
技術相關性	1	詢問砂石場專業人員獲得。

(資料來源：本研究整理而得)

(LCI8)：各類能源之熱值與 CO<sub>2</sub> 排放量計算

指示器	得分	注釋
可靠性	2	計算方式按照 IPCC 所頒布的 CO <sub>2</sub> 估算方法。
完整性	1	估算方法之方式詳盡且具公信力。
時間相關性	3	約 10 年前制定。
地域相關性	3	屬於世界性之估算方法。
技術相關性	1	由世界專家討論而得。

(資料來源：文獻[21])

(LCI9)：輪船燃油效率與貨運載重量

指示器	得分	注釋
可靠性	4	口頭詢問運送福州閩江至基隆港之船運公司。
完整性	3	並無全部詢問到每家船運公司。
時間相關性	1	100 年詢問而得。
地域相關性	2	來自台灣北部之調查。
技術相關性	1	詢問公司專業人員而得。

(資料來源:本研究整理而得)

(LCI10)：生產 1 噸水泥、爐石粉、飛灰 CO<sub>2</sub> 排放量

指示器	得分	注釋
可靠性	2	由經濟部部能源委員會統計。
完整性	3	只有水泥、爐石粉、飛灰成品統計並無其成分細項統計。
時間相關性	5	並不清楚時間。
地域相關性	2	由台灣經濟部部能源委員會統計。
技術相關性	1	專業人員計算而得。

(資料來源:經濟部能源委員會「能源查核管理輔導計劃」)

結構材料生命週期評估基準與耐久性評估指標之建立(1)

(LCI11)：水泥業總耗能

指示器	得分	注釋
可靠性	2	由經濟部能源局統計台灣各大水泥業資料。
完整性	1	提供全台各水泥大業資料。
時間相關性	3	較古老的數據(2001~2003)。
地域相關性	1	來自台灣水泥業統計。
技術相關性	1	專業人員統計而得。

(資料來源：1. 馮炳勳、陳家榮「台灣水泥業因應二氧化碳排放減量策略之研究」  
2. 經濟部能源局)

(LCI12)：高爐、電弧爐鋼胚及鋼筋耗能量及 CO<sub>2</sub> 排放量平均值

指示器	得分	注釋
可靠性	4	由專家統計各大鋼鐵業排放量資訊。
完整性	2	只有平均值統計，並無細項年份及鋼鐵原料統計。
時間相關性	3	較古老的數據(1993~2002)。
地域相關性	1	統計台灣各大鋼鐵業專業人員統計而得。
技術相關性	1	專業人員統計而得。

(資料來源:文獻[5])

(LCI13)：生產 1 度水耗能及排放 CO<sub>2</sub> 量

指示器	得分	注釋
可靠性	2	由自來水公司所提供。
完整性	2	只有淨水廠耗能，並無統計管線運送部分。
時間相關性	1	民國 98 及 100 年數據。
地域相關性	1	統計台灣自來水生產。
技術相關性	1	專業人員統計計算而得。

(資料來源:1.自來水事業統計年報 2.自來水公司網站)

(LCI14)：建材運輸公司資訊

指示器	得分	注釋
可靠性	4	口頭詢問北部幾家建材運輸公司。
完整性	2	並無詢問全部建材運輸公司。
時間相關性	1	民國 100 年詢問而得。
地域相關性	1	詢問台灣北部建材運輸公司。
技術相關性	1	詢問公司專業人員而得。

(資料來源:本研究整理)

(LCI15)：大型預拌混凝土廠資訊

指示器	得分	注釋
可靠性	4	口頭詢問台北 1 家預拌混凝土廠。
完整性	4	只有詢問台北 1 家大型預拌混凝土廠。
時間相關性	1	民國 100 年詢問而得。
地域相關性	1	詢問台灣台北 1 家預拌混凝土廠。
技術相關性	1	詢問公司專業人員而得。

(資料來源:本研究整理)

## 附錄二 會議記錄表

會議記錄表	
開會事由	RC 建築耐久性評估之指標座談會
時間	2011/09/30(五) 下午 1 點 30 分
地點	台灣科技大學國際大樓 7 樓 707 會議室
地址	台北市大安區基隆路 4 段 43 號
主席	黃然教授、葉為忠教授
出席者	紀茂傑、黃然、張清雲、何信隆、翁在龍、杜明星、陳榮福、陳書煥、鄭安、陳璽安、徐輝明、蔡嘉榮、林威廷、葉為忠、陳君弢、鄒思宇、錢少陵、蘇錦江、林世堂、羅志傳
會議內容	<p>開場由黃然教授介紹整個計畫的動機與目的、計畫流程與細節。接著請葉為忠教授說明今天會議的目的。首先說明層級分析法是一種決策分析，由在場所有專家學者每位填一份問卷，利用該法取得耐久性項目中彼此的權重值。填寫問卷時須有一定的共識程度與明白瞭解每項實驗的重要性，統整過後才能達到一致性指標。</p>
備註	<p>會議照片</p> 



### 附錄三 專家問卷表

專家 1

『耐久性→材料因素』評估項目之權重問卷

評估準則	左邊重要性較右邊重要								↔	右邊重要性較左邊重要								評估準則	
	絕對重要	相當重要	重	重要	稍微重要	相等	稍微重要	重		重要	相當重要	絕對重要							
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1		1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8		1:9
腐蝕現況													■						混凝土現況

『耐久性→腐蝕現況』評估項目之權重問卷

評估準則	左邊重要性較右邊重要								↔	右邊重要性較左邊重要								評估準則
	絕對重要	相當重要	重	重要	稍微重要	相等	稍微重要	重		重要	相當重要	絕對重要						
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1		1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	
腐蝕電位						■												中性化深度
腐蝕電位													■					氯離子
腐蝕電位								■										腐蝕電流
中性化深度															■			氯離子
中性化深度						■												腐蝕電流
氯離子			■															腐蝕電流

『耐久性→混凝土現況』評估項目之權重問卷

評估準則	左邊重要性較右邊重要					↔	右邊重要性較左邊重要					評估準則						
	絕對重要	相當重要	重要	稍微重要	相等		稍微重要	重要	相當重要	絕對重要								
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1		4:1	3:1	2:1	1:1	1:2		1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8
電阻係數															■			抗壓強度
電阻係數															■			表面損傷(裂縫)
電阻係數															■			表面損傷(層離、剝落或露筋、掉稜與缺角)
電阻係數															■			表面損傷(蜂窩、表面侵蝕、表面沉積)
電阻係數															■			鋼筋保護層厚度
抗壓強度																		表面損傷(裂縫)
抗壓強度			■															表面損傷(層離、剝落或露筋、掉稜與缺角)
抗壓強度			■															表面損傷(蜂窩、表面侵蝕、表面沉積)
抗壓強度			■															鋼筋保護層厚度
表面損傷(裂縫)				■														表面損傷(層離、剝落或露筋、掉稜與缺角)
表面損傷(裂縫)															■			表面損傷(蜂窩、表面侵蝕、表面沉積)
表面損傷(裂縫)															■			鋼筋保護層厚度
表面損傷(層離、剝落或露筋、掉稜與缺角)															■			表面損傷(蜂窩、表面侵蝕、表面沉積)
表面損傷(層離、剝落或露筋、掉稜與缺角)					■								■					鋼筋保護層厚度
表面損傷(蜂窩、表面侵蝕、表面沉積)															■			鋼筋保護層厚度

專家 2

『耐久性→材料因素』評估項目之權重問卷

評估準則	左邊重要性較右邊重要								↔	右邊重要性較左邊重要								評估準則		
	絕對重要	相當重要	重要	稍微重要	相等	稍微重要	重要	相當重要	絕對重要	絕對重要	相當重要	重要	稍微重要	相等	稍微重要	重要	相當重要		絕對重要	
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9			
腐蝕現況																			█	混凝土現況

『耐久性→腐蝕現況』評估項目之權重問卷

評估準則	左邊重要性較右邊重要								↔	右邊重要性較左邊重要								評估準則		
	絕對重要	相當重要	重要	稍微重要	相等	稍微重要	重要	相當重要	絕對重要	絕對重要	相當重要	重要	稍微重要	相等	稍微重要	重要	相當重要		絕對重要	
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9			
腐蝕電位																			█	中性化深度
腐蝕電位																			█	氯離子
腐蝕電位																			█	腐蝕電流
中性化深度																			█	氯離子
中性化深度																			█	腐蝕電流
氯離子																			█	腐蝕電流

『耐久性→混凝土現況』評估項目之權重問卷

評估準則	左邊重要性較右邊重要								↔	右邊重要性較左邊重要								評估準則	
	絕對重要	相當重要		重要		稍微重要		相等	稍微重要	重要		相當重要		絕對重要					
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9		
電阻係數																			抗壓強度
電阻係數																			表面損傷(裂縫)
電阻係數																			表面損傷(層離、剝落或露筋、掉稜與缺角)
電阻係數																			表面損傷(蜂窩、表面侵蝕、表面沉積)
電阻係數																			鋼筋保護層厚度
抗壓強度																			表面損傷(裂縫)
抗壓強度																			表面損傷(層離、剝落或露筋、掉稜與缺角)
抗壓強度																			表面損傷(蜂窩、表面侵蝕、表面沉積)
抗壓強度																			鋼筋保護層厚度
表面損傷(裂縫)																			表面損傷(層離、剝落或露筋、掉稜與缺角)
表面損傷(裂縫)																			表面損傷(蜂窩、表面侵蝕、表面沉積)
表面損傷(裂縫)																			鋼筋保護層厚度
表面損傷(層離、剝落或露筋、掉稜與缺角)																			表面損傷(蜂窩、表面侵蝕、表面沉積)
表面損傷(層離、剝落或露筋、掉稜與缺角)																			鋼筋保護層厚度
表面損傷(蜂窩、表面侵蝕、表面沉積)																			鋼筋保護層厚度

專家 3

『耐久性→材料因素』評估項目之權重問卷

評估準則	左邊重要性較右邊重要								↔	右邊重要性較左邊重要								評估準則	
	絕對重要	相當重要	重要	稍微重要	相等	稍微重要	重要	相當重要	絕對重要	絕對重要	相當重要	重要	稍微重要	相等	稍微重要	重要	相當重要		絕對重要
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9		
腐蝕現況																			混凝土現況

『耐久性→腐蝕現況』評估項目之權重問卷

評估準則	左邊重要性較右邊重要								↔	右邊重要性較左邊重要								評估準則	
	絕對重要	相當重要	重要	稍微重要	相等	稍微重要	重要	相當重要	絕對重要	絕對重要	相當重要	重要	稍微重要	相等	稍微重要	重要	相當重要		絕對重要
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9		
腐蝕電位																			中性化深度
腐蝕電位																			氯離子
腐蝕電位																			腐蝕電流
中性化深度																			氯離子
中性化深度																			腐蝕電流
氯離子																			腐蝕電流

『耐久性→混凝土現況』評估項目之權重問卷

評估準則	左邊重要性較右邊重要								↔	右邊重要性較左邊重要								評估準則	
	絕對重要	相當重要		重要		稍微重要		相等		稍微重要	重要		相當重要		絕對重要				
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1		1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8		1:9
電阻係數																			抗壓強度
電阻係數																			表面損傷 (裂縫)
電阻係數																			表面損傷 (層離、剝落或 露筋、掉稜與 缺角)
電阻係數																			表面損傷 (蜂窩、表面侵 蝕、表面沉積)
電阻係數																			鋼筋保護層厚 度
抗壓強度																			表面損傷 (裂縫)
抗壓強度																			表面損傷(層離、 剝落或露筋、 掉稜與缺角)
抗壓強度																			表面損傷(蜂窩、 表面侵蝕、表 面沉積)
抗壓強度																			鋼筋 保護層厚度
表面損傷 (裂縫)																			表面損傷(層離、 剝落或露筋、 掉稜與缺角)
表面損傷 (裂縫)																			表面損傷(蜂窩、 表面侵蝕、表 面沉積)
表面損傷 (裂縫)																			鋼筋 保護層厚度
表面損傷 (層離、剝落 或露筋、掉 稜與缺角)																			表面損傷(蜂窩、 表面侵蝕、表 面沉積)
表面損傷 (層離、剝落 或露筋、掉 稜與缺角)																			鋼筋 保護層厚度
表面損傷 (蜂窩、表面 侵蝕、表面 沉積)																			鋼筋 保護層厚度

專家 4

『耐久性→材料因素』評估項目之權重問卷

評估準則	左邊重要性較右邊重要								↔	右邊重要性較左邊重要								評估準則	
	絕對重要	相當重要	重要	稍微重要	相等	稍微重要	重要	相當重要	絕對重要	絕對重要	相當重要	重要	稍微重要	相等	稍微重要	重要	相當重要		絕對重要
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9		
腐蝕現況											—								混凝土現況

『耐久性→腐蝕現況』評估項目之權重問卷

評估準則	左邊重要性較右邊重要								↔	右邊重要性較左邊重要								評估準則	
	絕對重要	相當重要	重要	稍微重要	相等	稍微重要	重要	相當重要	絕對重要	絕對重要	相當重要	重要	稍微重要	相等	稍微重要	重要	相當重要		絕對重要
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9		
腐蝕電位													—					中性化深度	
腐蝕電位														—				氯離子	
腐蝕電位		—																腐蝕電流	
中性化深度															—			氯離子	
中性化深度				—														腐蝕電流	
氯離子																—		腐蝕電流	

『耐久性→混凝土現況』評估項目之權重問卷

評估準則	左邊重要性較右邊重要								↔	右邊重要性較左邊重要								評估準則
	絕對重要	相當重要		重要		稍微重要		相等		稍微重要	重要		相當重要		絕對重要			
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1		1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	
電阻係數															■			抗壓強度
電阻係數															■			表面損傷(裂縫)
電阻係數															■			表面損傷(層離、剝落或露筋、掉稜與缺角)
電阻係數												■						表面損傷(蜂窩、表面侵蝕、表面沉積)
電阻係數													■					鋼筋保護層厚度
抗壓強度														■				表面損傷(裂縫)
抗壓強度												■						表面損傷(層離、剝落或露筋、掉稜與缺角)
抗壓強度												■						表面損傷(蜂窩、表面侵蝕、表面沉積)
抗壓強度												■						鋼筋保護層厚度
表面損傷(裂縫)				■														表面損傷(層離、剝落或露筋、掉稜與缺角)
表面損傷(裂縫)					■													表面損傷(蜂窩、表面侵蝕、表面沉積)
表面損傷(裂縫)			■															鋼筋保護層厚度
表面損傷(層離、剝落或露筋、掉稜與缺角)			■															表面損傷(蜂窩、表面侵蝕、表面沉積)
表面損傷(層離、剝落或露筋、掉稜與缺角)						■												鋼筋保護層厚度
表面損傷(蜂窩、表面侵蝕、表面沉積)							■											鋼筋保護層厚度

專家 5

『耐久性→材料因素』評估項目之權重問卷

評估準則	左邊重要性較右邊重要								↔	右邊重要性較左邊重要								評估準則
	絕對重要	相當重要	重要	稍微重要	相等	稍微重要	重要	相當重要		絕對重要								
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1		1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	
腐蝕現況													■					混凝土現況

『耐久性→腐蝕現況』評估項目之權重問卷

評估準則	左邊重要性較右邊重要								↔	右邊重要性較左邊重要								評估準則
	絕對重要	相當重要	重要	稍微重要	相等	稍微重要	重要	相當重要		絕對重要								
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1		1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	
腐蝕電位													■					中性化深度
腐蝕電位														■				氯離子
腐蝕電位				■														腐蝕電流
中性化深度																■		氯離子
中性化深度					■													腐蝕電流
氯離子																■		腐蝕電流

『耐久性→混凝土現況』評估項目之權重問卷

評估準則	左邊重要性較右邊重要							↔	右邊重要性較左邊重要							評估準則		
	絕對重要	相當重要	重	重要	稍微重要	相等	稍微重要		重	重要	相當重要	絕對重要						
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1		2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6		1:7	1:8
電阻係數															■			抗壓強度
電阻係數															■			表面損傷(裂縫)
電阻係數															■			表面損傷(層離、剝落或露筋、掉稜與缺角)
電阻係數													■					表面損傷(蜂窩、表面侵蝕、表面沉積)
電阻係數													■					鋼筋保護層厚度
抗壓強度															■			表面損傷(裂縫)
抗壓強度													■					表面損傷(層離、剝落或露筋、掉稜與缺角)
抗壓強度													■					表面損傷(蜂窩、表面侵蝕、表面沉積)
抗壓強度													■					鋼筋保護層厚度
表面損傷(裂縫)																■		表面損傷(層離、剝落或露筋、掉稜與缺角)
表面損傷(裂縫)																■		表面損傷(蜂窩、表面侵蝕、表面沉積)
表面損傷(裂縫)															■			鋼筋保護層厚度
表面損傷(層離、剝落或露筋、掉稜與缺角)															■			表面損傷(蜂窩、表面侵蝕、表面沉積)
表面損傷(層離、剝落或露筋、掉稜與缺角)																■		鋼筋保護層厚度
表面損傷(蜂窩、表面侵蝕、表面沉積)																■		鋼筋保護層厚度

專家 6

『耐久性→材料因素』評估項目之權重問卷

評估準則	左邊重要性較右邊重要								↔	右邊重要性較左邊重要								評估準則		
	絕對重要	相當重要	重要	稍微重要	相等	稍微重要	重要	相當重要	絕對重要	絕對重要	相當重要	重要	稍微重要	相等	稍微重要	重要	相當重要		絕對重要	
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9			
腐蝕現況																			—	混凝土現況

『耐久性→腐蝕現況』評估項目之權重問卷

評估準則	左邊重要性較右邊重要								↔	右邊重要性較左邊重要								評估準則		
	絕對重要	相當重要	重要	稍微重要	相等	稍微重要	重要	相當重要	絕對重要	絕對重要	相當重要	重要	稍微重要	相等	稍微重要	重要	相當重要		絕對重要	
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9			
腐蝕電位																			—	中性化深度
腐蝕電位																			—	氯離子
腐蝕電位																			—	腐蝕電流
中性化深度																			—	氯離子
中性化深度																			—	腐蝕電流
氯離子																			—	腐蝕電流

『耐久性→混凝土現況』評估項目之權重問卷

評估準則	左邊重要性較右邊重要								↔	右邊重要性較左邊重要								評估準則	
	絕對重要	相當重要		重要		稍微重要		相等	稍微重要	重要		相當重要		絕對重要					
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9		
電阻係數																			抗壓強度
電阻係數																			表面損傷(裂縫)
電阻係數																			表面損傷(層離、剝落或露筋、掉稜與缺角)
電阻係數																			表面損傷(蜂窩、表面侵蝕、表面沉積)
電阻係數																			鋼筋保護層厚度
抗壓強度																			表面損傷(裂縫)
抗壓強度																			表面損傷(層離、剝落或露筋、掉稜與缺角)
抗壓強度																			表面損傷(蜂窩、表面侵蝕、表面沉積)
抗壓強度																			鋼筋保護層厚度
表面損傷(裂縫)																			表面損傷(層離、剝落或露筋、掉稜與缺角)
表面損傷(裂縫)																			表面損傷(蜂窩、表面侵蝕、表面沉積)
表面損傷(裂縫)																			鋼筋保護層厚度
表面損傷(層離、剝落或露筋、掉稜與缺角)																			表面損傷(蜂窩、表面侵蝕、表面沉積)
表面損傷(層離、剝落或露筋、掉稜與缺角)																			鋼筋保護層厚度
表面損傷(蜂窩、表面侵蝕、表面沉積)																			鋼筋保護層厚度

專家 7

『耐久性→材料因素』評估項目之權重問卷

評估準則	左邊重要性較右邊重要								↔	右邊重要性較左邊重要								評估準則		
	絕對重要	相當重要	重要	稍微重要	相等	稍微重要	重要	相當重要	絕對重要	絕對重要	相當重要	重要	稍微重要	相等	稍微重要	重要	相當重要		絕對重要	
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9			
腐蝕現況																			█	混凝土現況

『耐久性→腐蝕現況』評估項目之權重問卷

評估準則	左邊重要性較右邊重要								↔	右邊重要性較左邊重要								評估準則		
	絕對重要	相當重要	重要	稍微重要	相等	稍微重要	重要	相當重要	絕對重要	絕對重要	相當重要	重要	稍微重要	相等	稍微重要	重要	相當重要		絕對重要	
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9			
腐蝕電位																			█	中性化深度
腐蝕電位																			█	氯離子
腐蝕電位																			█	腐蝕電流
中性化深度																			█	氯離子
中性化深度																			█	腐蝕電流
氯離子																			█	腐蝕電流

『耐久性→混凝土現況』評估項目之權重問卷

評估準則	左邊重要性較右邊重要								↔	右邊重要性較左邊重要								評估準則	
	絕對重要	相當重要		重要		稍微重要		相等		稍微重要	重要		相當重要		絕對重要				
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1		1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8		1:9
電阻係數																			抗壓強度
電阻係數																			表面損傷 (裂縫)
電阻係數																			表面損傷 (層離、剝落或 露筋、掉稜與 缺角)
電阻係數																			表面損傷 (蜂窩、表面侵 蝕、表面沉積)
電阻係數																			鋼筋保護層厚 度
抗壓強度																			表面損傷 (裂縫)
抗壓強度																			表面損傷(層離、 剝落或露筋、 掉稜與缺角)
抗壓強度																			表面損傷(蜂窩、 表面侵蝕、表 面沉積)
抗壓強度																			鋼筋 保護層厚度
表面損傷 (裂縫)																			表面損傷(層離、 剝落或露筋、 掉稜與缺角)
表面損傷 (裂縫)																			表面損傷(蜂窩、 表面侵蝕、表 面沉積)
表面損傷 (裂縫)																			鋼筋 保護層厚度
表面損傷 (層離、剝落 或露筋、掉 稜與缺角)																			表面損傷(蜂窩、 表面侵蝕、表 面沉積)
表面損傷 (層離、剝落 或露筋、掉 稜與缺角)																			鋼筋 保護層厚度
表面損傷 (蜂窩、表面 侵蝕、表面 沉積)																			鋼筋 保護層厚度

專家 8

『耐久性→材料因素』評估項目之權重問卷

評估準則	左邊重要性較右邊重要								↔	右邊重要性較左邊重要								評估準則
	絕對重要	相當重要	重要	稍微重要	相等	稍微重要	重要	相當重要		絕對重要								
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1		1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	
腐蝕現況											—							混凝土現況

『耐久性→腐蝕現況』評估項目之權重問卷

評估準則	左邊重要性較右邊重要								↔	右邊重要性較左邊重要								評估準則
	絕對重要	相當重要	重要	稍微重要	相等	稍微重要	重要	相當重要		絕對重要								
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1		1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	
腐蝕電位										—								中性化深度
腐蝕電位												—						氯離子
腐蝕電位										—								腐蝕電流
中性化深度										—								氯離子
中性化深度										—								腐蝕電流
氯離子							—											腐蝕電流

『耐久性→混凝土現況』評估項目之權重問卷

評估準則	左邊重要性較右邊重要									↔	右邊重要性較左邊重要									評估準則
	絕對重要	相當重要	重	重要	稍微重要	相等	稍微重要	重	重要	相當重要	絕對重要									
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9			
電阻係數																			抗壓強度	
電阻係數																			表面損傷(裂縫)	
電阻係數																			表面損傷(層離、剝落或露筋、掉稜與缺角)	
電阻係數																			表面損傷(蜂窩、表面侵蝕、表面沉積)	
電阻係數																			鋼筋保護層厚度	
抗壓強度																			表面損傷(裂縫)	
抗壓強度																			表面損傷(層離、剝落或露筋、掉稜與缺角)	
抗壓強度																			表面損傷(蜂窩、表面侵蝕、表面沉積)	
抗壓強度																			鋼筋保護層厚度	
表面損傷(裂縫)																			表面損傷(層離、剝落或露筋、掉稜與缺角)	
表面損傷(裂縫)																			表面損傷(蜂窩、表面侵蝕、表面沉積)	
表面損傷(裂縫)																			鋼筋保護層厚度	
表面損傷(層離、剝落或露筋、掉稜與缺角)																			表面損傷(蜂窩、表面侵蝕、表面沉積)	
表面損傷(層離、剝落或露筋、掉稜與缺角)																			鋼筋保護層厚度	
表面損傷(蜂窩、表面侵蝕、表面沉積)																			鋼筋保護層厚度	

專家 9

『耐久性→材料因素』評估項目之權重問卷

評估準則	左邊重要性較右邊重要								↔	右邊重要性較左邊重要								評估準則		
	絕對重要	相當重要	重要	稍微重要	相等	稍微重要	重要	相當重要	絕對重要	絕對重要	相當重要	重要	稍微重要	相等	稍微重要	重要	相當重要		絕對重要	
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9			
腐蝕現況																			—	混凝土現況

『耐久性→腐蝕現況』評估項目之權重問卷

評估準則	左邊重要性較右邊重要								↔	右邊重要性較左邊重要								評估準則		
	絕對重要	相當重要	重要	稍微重要	相等	稍微重要	重要	相當重要	絕對重要	絕對重要	相當重要	重要	稍微重要	相等	稍微重要	重要	相當重要		絕對重要	
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9			
腐蝕電位																			—	中性化深度
腐蝕電位																			—	氯離子
腐蝕電位					—															腐蝕電流
中性化深度									—											氯離子
中性化深度										—										腐蝕電流
氯離子																			—	腐蝕電流

『耐久性→混凝土現況』評估項目之權重問卷

評估準則	左邊重要性較右邊重要								↔	右邊重要性較左邊重要								評估準則
	絕對重要	相當重要		重要		稍微重要		相等		稍微重要	重要		相當重要		絕對重要			
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1		1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	
電阻係數												■						抗壓強度
電阻係數												■						表面損傷(裂縫)
電阻係數												■						表面損傷(層離、剝落或露筋、掉稜與缺角)
電阻係數												■						表面損傷(蜂窩、表面侵蝕、表面沉積)
電阻係數												■						鋼筋保護層厚度
抗壓強度											■							表面損傷(裂縫)
抗壓強度											■							表面損傷(層離、剝落或露筋、掉稜與缺角)
抗壓強度											■							表面損傷(蜂窩、表面侵蝕、表面沉積)
抗壓強度												■						鋼筋保護層厚度
表面損傷(裂縫)										■								表面損傷(層離、剝落或露筋、掉稜與缺角)
表面損傷(裂縫)										■								表面損傷(蜂窩、表面侵蝕、表面沉積)
表面損傷(裂縫)										■								鋼筋保護層厚度
表面損傷(層離、剝落或露筋、掉稜與缺角)										■								表面損傷(蜂窩、表面侵蝕、表面沉積)
表面損傷(層離、剝落或露筋、掉稜與缺角)										■								鋼筋保護層厚度
表面損傷(蜂窩、表面侵蝕、表面沉積)										■								鋼筋保護層厚度

專家 10

『耐久性→材料因素』評估項目之權重問卷

評估準則	左邊重要性較右邊重要								↔	右邊重要性較左邊重要								評估準則		
	絕對重要	相當重要	重要	稍微重要	相等	稍微重要	重要	相當重要	絕對重要	絕對重要	相當重要	重要	稍微重要	相等	稍微重要	重要	相當重要		絕對重要	
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9			
腐蝕現況																			—	混凝土現況

『耐久性→腐蝕現況』評估項目之權重問卷

評估準則	左邊重要性較右邊重要								↔	右邊重要性較左邊重要								評估準則		
	絕對重要	相當重要	重要	稍微重要	相等	稍微重要	重要	相當重要	絕對重要	絕對重要	相當重要	重要	稍微重要	相等	稍微重要	重要	相當重要		絕對重要	
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9			
腐蝕電位																			—	中性化深度
腐蝕電位																			—	氯離子
腐蝕電位					—															腐蝕電流
中性化深度									—											氯離子
中性化深度									—											腐蝕電流
氯離子							—													腐蝕電流

『耐久性→混凝土現況』評估項目之權重問卷

評估準則	左邊重要性較右邊重要								↔	右邊重要性較左邊重要								評估準則
	絕對重要	相當重要		重要		稍微重要		相等	稍微重要	重要		相當重要		絕對重要				
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	
電阻係數												■						抗壓強度
電阻係數												■						表面損傷(裂縫)
電阻係數												■						表面損傷(層離、剝落或露筋、掉稜與缺角)
電阻係數												■						表面損傷(蜂窩、表面侵蝕、表面沉積)
電阻係數												■						鋼筋保護層厚度
抗壓強度											■							表面損傷(裂縫)
抗壓強度											■							表面損傷(層離、剝落或露筋、掉稜與缺角)
抗壓強度											■							表面損傷(蜂窩、表面侵蝕、表面沉積)
抗壓強度													■					鋼筋保護層厚度
表面損傷(裂縫)									■									表面損傷(層離、剝落或露筋、掉稜與缺角)
表面損傷(裂縫)									■									表面損傷(蜂窩、表面侵蝕、表面沉積)
表面損傷(層離、剝落或露筋、掉稜與缺角)									■									鋼筋保護層厚度
表面損傷(層離、剝落或露筋、掉稜與缺角)									■									表面損傷(蜂窩、表面侵蝕、表面沉積)
表面損傷(蜂窩、表面侵蝕、表面沉積)									■									鋼筋保護層厚度

專家 11

『耐久性→材料因素』評估項目之權重問卷

評估準則	左邊重要性較右邊重要								↔	右邊重要性較左邊重要								評估準則
	絕對重要		相當重要		重要		稍微重要		相等		稍微重要		重要		相當重要		絕對重要	
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	
腐蝕現況														■				混凝土現況

『耐久性→腐蝕現況』評估項目之權重問卷

評估準則	左邊重要性較右邊重要								↔	右邊重要性較左邊重要								評估準則
	絕對重要		相當重要		重要		稍微重要		相等		稍微重要		重要		相當重要		絕對重要	
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9	
腐蝕電位													■				中性化深度	
腐蝕電位														■			氯離子	
腐蝕電位					■												腐蝕電流	
中性化深度									■								氯離子	
中性化深度								■									腐蝕電流	
氯離子						■											腐蝕電流	

『耐久性→混凝土現況』評估項目之權重問卷

評估準則	左邊重要性較右邊重要							↔	右邊重要性較左邊重要							評估準則		
	絕對重要	相當重要		重要		稍微重要	相等		稍微重要	重要		相當重要		絕對重要				
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1		2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6		1:7	1:8
電阻係數												■						抗壓強度
電阻係數												■						表面損傷(裂縫)
電阻係數												■						表面損傷(層離、剝落或露筋、掉稜與缺角)
電阻係數												■						表面損傷(蜂窩、表面侵蝕、表面沉積)
電阻係數												■						鋼筋保護層厚度
抗壓強度												■						表面損傷(裂縫)
抗壓強度											■							表面損傷(層離、剝落或露筋、掉稜與缺角)
抗壓強度											■							表面損傷(蜂窩、表面侵蝕、表面沉積)
抗壓強度													■					鋼筋保護層厚度
表面損傷(裂縫)									■									表面損傷(層離、剝落或露筋、掉稜與缺角)
表面損傷(裂縫)								■										表面損傷(蜂窩、表面侵蝕、表面沉積)
表面損傷(裂縫)								■										鋼筋保護層厚度
表面損傷(層離、剝落或露筋、掉稜與缺角)								■										表面損傷(蜂窩、表面侵蝕、表面沉積)
表面損傷(層離、剝落或露筋、掉稜與缺角)									■									鋼筋保護層厚度
表面損傷(蜂窩、表面侵蝕、表面沉積)										■								鋼筋保護層厚度

專家 12

『耐久性→材料因素』評估項目之權重問卷

評估準則	左邊重要性較右邊重要									↔	右邊重要性較左邊重要									評估準則
	絕對重要		相當重要		重要		稍微重要		相等	稍微重要		重要		相當重要		絕對重要				
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9			
腐蝕現況										█								混凝土現況		

『耐久性→腐蝕現況』評估項目之權重問卷

評估準則	左邊重要性較右邊重要									↔	右邊重要性較左邊重要									評估準則
	絕對重要		相當重要		重要		稍微重要		相等	稍微重要		重要		相當重要		絕對重要				
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9			
腐蝕電位										█								中性化深度		
腐蝕電位													█					氯離子		
腐蝕電位													█					腐蝕電流		
中性化深度													█					氯離子		
中性化深度										█								腐蝕電流		
氯離子							█											腐蝕電流		

『耐久性→混凝土現況』評估項目之權重問卷

評估準則	左邊重要性較右邊重要								↔	右邊重要性較左邊重要								評估準則
	絕對重要	相當重要		重要		稍微重要		相等		稍微重要	重要		相當重要		絕對重要			
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1		1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	
電阻係數																	■	抗壓強度
電阻係數			■															表面損傷(裂縫)
電阻係數			■															表面損傷(層離、剝落或露筋、掉稜與缺角)
電阻係數				■														表面損傷(蜂窩、表面侵蝕、表面沉積)
電阻係數									■									鋼筋保護層厚度
抗壓強度			■															表面損傷(裂縫)
抗壓強度			■															表面損傷(層離、剝落或露筋、掉稜與缺角)
抗壓強度			■															表面損傷(蜂窩、表面侵蝕、表面沉積)
抗壓強度			■															鋼筋保護層厚度
表面損傷(裂縫)																■		表面損傷(層離、剝落或露筋、掉稜與缺角)
表面損傷(裂縫)																■		表面損傷(蜂窩、表面侵蝕、表面沉積)
表面損傷(裂縫)																■		鋼筋保護層厚度
表面損傷(層離、剝落或露筋、掉稜與缺角)									■									表面損傷(蜂窩、表面侵蝕、表面沉積)
表面損傷(層離、剝落或露筋、掉稜與缺角)											■							鋼筋保護層厚度
表面損傷(蜂窩、表面侵蝕、表面沉積)												■						鋼筋保護層厚度

專家 13

『耐久性→材料因素』評估項目之權重問卷

評估準則	左邊重要性較右邊重要								↔	右邊重要性較左邊重要								評估準則	
	絕對重要	相當重要	重要	稍微重要	相等	稍微重要	重要	相當重要	絕對重要	絕對重要	相當重要	重要	稍微重要	相等	稍微重要	重要	相當重要		絕對重要
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9		
腐蝕現況																		■	混凝土現況

『耐久性→腐蝕現況』評估項目之權重問卷

評估準則	左邊重要性較右邊重要								↔	右邊重要性較左邊重要								評估準則	
	絕對重要	相當重要	重要	稍微重要	相等	稍微重要	重要	相當重要	絕對重要	絕對重要	相當重要	重要	稍微重要	相等	稍微重要	重要	相當重要		絕對重要
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8	1:9		
腐蝕電位																	■	中性化深度	
腐蝕電位																	■	氯離子	
腐蝕電位																	■	腐蝕電流	
中性化深度																	■	氯離子	
中性化深度																	■	腐蝕電流	
氯離子																	■	腐蝕電流	

『耐久性→混凝土現況』評估項目之權重問卷

評估準則	左邊重要性較右邊重要								↔	右邊重要性較左邊重要								評估準則		
	絕對重要	相當重要	重要	稍微重要	相等	稍微重要	重要	相當重要		絕對重要	絕對重要	相當重要	重要	稍微重要	相等	稍微重要	重要		相當重要	絕對重要
	9:1	8:1	7:1	6:1	5:1	4:1	3:1	2:1		1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7	1:8		1:9	
電阻係數																		■	抗壓強度	
電阻係數																		■	表面損傷 (裂縫)	
電阻係數																		■	表面損傷 (層離、剝落或 露筋、掉稜與 缺角)	
電阻係數																		■	表面損傷 (蜂窩、表面侵 蝕、表面沉積)	
電阻係數																			■	鋼筋保護層厚 度
抗壓強度																			■	表面損傷 (裂縫)
抗壓強度																			■	表面損傷(層離、 剝落或露筋、 掉稜與缺角)
抗壓強度																			■	表面損傷(蜂窩、 表面侵蝕、表 面沉積)
抗壓強度																			■	鋼筋 保護層厚度
表面損傷 (裂縫)																			■	表面損傷(層離、 剝落或露筋、 掉稜與缺角)
表面損傷 (裂縫)																			■	表面損傷(蜂窩、 表面侵蝕、表 面沉積)
表面損傷 (裂縫)																			■	鋼筋 保護層厚度
表面損傷 (層離、剝落 或露筋、掉 稜與缺角)																			■	表面損傷(蜂窩、 表面侵蝕、表 面沉積)
表面損傷 (層離、剝落 或露筋、掉 稜與缺角)																			■	鋼筋 保護層厚度
表面損傷 (蜂窩、表面 侵蝕、表面 沉積)																			■	鋼筋 保護層厚度

## 附錄四 審查委員意見回覆

## 期初審查委員意見回覆

委員	審查委員意見	研究團隊回應
江慶堂教授	本案對於現有構造物之評估，是否列入研究範圍內？	生命週期評估主要是使用在構造物設計階段，以決定何方案對環境的衝擊較小。當然對於現有構造物，只要知道其材料的使用量，也可以計算其對環境的影響。
	結構材料耐久性之環境因子是否亦列入考量？	環境因子將以放大折減因子的方式考量，也就是先就材料的現況做出評估，再把環境不同會造成耐久性的未來發展以放大因子的方式乘上。
高健章教授	因國外模擬系統及資料庫與本地有所差異，而需建立適合本土化的研究，即為提出本計畫之理由。因此，基於材料的不同而建立本土的資料庫應可理解，建議在模擬系統方面也應有所研究開發。	要建立模擬系統，首先要有正確的資料庫系統。因此，在本計畫內，我們將把主軸放在如何建立正確的生命週期表單，並且對本土數據進行蒐集。至於模擬系統，恐須在本計畫完成後，視成果再研究是否由後續計畫來完成。
王韻瑾課長	請扼要說明耐久性綜合評估的內容及預計如何選擇所需評估對象？	耐久性綜合評估的對象主要是針對任何建築物。透過單一構件的耐久性指標評定，然後再由每個構件不同權重來做出整體的評估。預計將針對兩棟RC建築物進行耐久性評估的演練。

	<p>貴團隊可否預期將來所訂定之生命週期評估及耐久性評估指標與以往有何不同？</p>	<p>生命週期評估與以往國內學者工作的最大不同有兩點：第一，評估指標非為單一指標；第二，將做出最後整體評估。耐久性評估指標與以往國內學者工作的最大不同點有兩處：第一，我們以材料的觀點出發，簡化整體程序的；第二，我們可以得到整體的評價，而非是單一評價。</p>
	<p>所訂定的結果，是否可提供實務界應用？</p>	<p>本研究將會針對耐久性評估以及生命週期評估提出簡單可行的方法，讓實務界可以參考使用。</p>
	<p>對於人才培訓可否有較具體實施的計畫？</p>	<p>以目前的經費、時程與執行範圍內容，恐無法辦理教育訓練。</p>
<p>鄒本駒 研究員</p>	<p>本案執行期程分為兩年，第二年研究內容之架構是否應先列出？</p>	<p>本研究擬在第一年先針對鋼筋混凝土建築物進行研究，第二年則針對鋼構及鋼骨鋼筋混凝土建築物進行研究。</p>
	<p>研究對象除了鋼筋混凝土構造、鋼構造之外，是否應包括鋼骨鋼筋混凝土構造方面？另外，計畫將執行一個案例的應用，唯經費預估有所增加，是否可增加案例的數目？</p>	<p>遵照辦理。本研究主要是方法論，個案只是操練而已。但是，為了使大眾能夠更加瞭解內容，擬將案例數目由一個增加為兩個。</p>
	<p>本案具有前瞻性。例如，超高強度鋼筋混凝土構造，強度的提高可延長生命週期，對耐久性、節能、環保均有助益。計畫內容請提供相關影響之量化資料，俾供該類建築結構之具體數據，以利推動。</p>	<p>在生命週期分析上，我們可以使用超高強度混凝土的設計作為案例分析，以提供瞭解與傳統建物的差異所在。</p>

呂文弘 研究員	<p>服務建議書第 21 頁之流程圖中，計畫內容有關「結構材料生命週期評估內容(準則)」與本案委託研究之課題「結構材料生命週期評估基準」稍有落差，建議酌予調整，俾能符合採購需求。</p>	<p>經由參與成員討論，決議將生命週期評估方面的研究定義為提供建築物進行生命週期評估時，所應遵照的標準流程，其清單應包含之內容，及計算的方式。</p>
	<p>提案單位擬採用的生命週期評估軟體 ATHENA，係以整體建築構造體總合評估，如何就本案主題「結構材料」進行聚焦收斂？請補充說明。</p>	<p>ATHENA 具有各種材料對環境影響的數據(清單分析)，具體進行對某一建築物之分析時，則必須要有對各種材料的用量，因此 ATHENA 使用建築物設計的各樣尺寸進行量的計算。本研究也會照這樣的思維進行。</p>
	<p>本案擬進行的案例分析數量、資料庫規模及耐久性實測案例數目，建議於服務建議書補述。</p>	<p>案例分析擬以兩案例分析，資料庫規模則在可蒐集的範圍內盡量完成，此項說明將在服務建議書內加以補述。</p>
林建宏 組長	<p>題目範圍甚廣，研究範圍須先確認。尤其在分年執行部分，應先清楚界定，以利執行。</p>	<p>範圍以建立建築物進行生命週期評估的標準流程、表單分析及整體分析還有建築物耐久性評估方法為研究之內容。分年執行部分擬在第一年以 RC 構造物為研究對象，第二年則以鋼構造及 SRC 構造物為對象。</p>
	<p>所訂定之基準與指標，未來在業界如何使用？有何助益？應先思考。</p>	<p>本研究成果，提供業界可以使用的生命週期評估方法以及耐久性評估方法。與目前國內已知的方法相比，最大差異在於具有整體評價的方法，而不是只有單一指標；另外，使用的方法簡易，不會成為複雜不可行的操作。</p>

## 期中審查委員意見回覆

委員	審查委員意見	研究團隊回應
中華民國全國建築師公會	研究內容對現在或未來納入法規後，影響之施工規範有哪些，請列表整理。	本研究有關生命週期評估部分的內容將提供建築設計師在選擇可能之建築材料方案時，瞭解各方案對環境之衝擊，並不會影響現有的法規以及施工規範；而有關建築物材料耐久性評估的部分，也只是提供檢測者可以將評估之指標統合，得出對現有建築物構件或是整體結構之耐久性評估，一樣並不會影響現有的法規以及施工規範。
中華民國結構技師公會全聯會	報資料第 48 頁，電阻係數是否應歸屬於腐蝕現況類，請確認。	電阻係數間接代表混凝土內孔隙狀況，故應該歸類於混凝土現況。簡報資料為筆誤，感謝委員指正。
	簡報資料第 48 頁，混凝土現況中有關表面損傷，是否可將主結構體如梁、柱、剪力牆、基礎之結構性裂損列為主要評估項目？因為蜂窩、層離等並非屬於結構破壞之主要原因。	有關混凝土現況評估之混凝土表面損傷方面，共有三類: a.表面開裂狀況、b.表面出現層離或剝落 c. 表面出現麻面或蜂窩。委員所提及結構物出現開裂是屬於第一類，本研究確有考量。
	問卷設計格式尚無法立即瞭解填寫內容，請再加強。	問卷將會再加強設計，並清楚說明各選項所代表意義。
	由腐蝕電位、電流、電阻係數之檢測值，不易判斷，可否再加入「現場勘查結果」綜合研判，以符合實際？	本研究所採取十個指標內，有關混凝土表面損傷均屬於現場勘查目視，故已經有所考量。

	報告書第 31 頁，請註明生命週期評估方法。	感謝委員指正，將在期末報告中，對於生命週期評估方法說明清楚。基本上本研究採用 Eco-95 評估方法，共有十一項環境衝擊評估項目。
台灣省建築材料商業同業公會聯合會	結構材料生命週期評估，擬於國內目前公共工程對能源消耗及環境影響，列為永續發展的必要項目之一。	同意委員看法，這也是本研究努力之目標。
	目前國內營建、土木專業人才既多且廣，如能建立結構營建材料耐久性評估指標及生命週期評估基準，將可以科學量化的數據，達到提升公共工程品質升級及永續發展的目標。	感謝委員期許，本研究將戮力完成量化方式。
石正義建築師	期中報告第 6 頁第 5 點「...提出...與建立耐久性評估指標...」，因為期中報告第 25 頁第 17 行「...針對台灣地域環境，將考量環境影響以及重車流量影響...」，因此第 6 頁第 5 點建議修改為「...與建立 <u>環境影響以及重車流量影響</u> 之耐久性評估指標...」。	感謝委員指正，委員指出部分為筆誤。本研究針對建築物耐久性評估，與車流量無關。我們將考量的修正因子可能會包括環境因子、齡期因子與地震帶因子等。

	<p>LCA 評估的權重，建議應考量台灣的特殊環境。</p>	<p>感謝委員指正。有關使用 Simapro 的各項排放物對各種環境衝擊指標之轉換權重，此為國際認可之轉換，與地域無關，故將會沿用。不過最後在進行總評價時，因各種環境衝擊對於各地區的影響並不相同，故會採用專家座談的方式決定權重，然後再以此等權重計算對環境的總體衝擊量。</p>
--	--------------------------------	--

邱昌平顧問	<p>本年度研究之結構以 RC 為主，以 LCA 評估法利用 simapro 軟體對混凝土組成材料、製程及鋼筋材料等在生命週期各階段可能產生之二氧化碳等環境衝擊效應做基本調查，建立權重等以完成環境衝擊之分析。</p>	<p>感謝委員之意見，本研究將努力完成各樣調查。</p>
	<p>本年度另一研究重點則為 RC 之耐久性。但以混凝土劣化之物理性及化學性等因子為主，並以層級分析法進行耐久性評估。</p>	<p>因為各因子間並不等價，為要得到整體評估值，必須要進行歸一化，層級分析法是透過專家意見得到各項目之間的相對權重。</p>
	<p>與本研究無關之項目，如表 3.2 至表 3.12 中某些部份，請勿列出。</p>	<p>感謝專家指正，將在期末報告中改進。</p>

沈 得 縣 教 授	本報告書缺少期初審查意見及問題回應對照表，請於期末報告中，一併補正。	感謝委員指正，有關期初審查意見回覆還有期中報告審查意見回覆將在期末報告中陳列。
	期中報告文獻蒐集詳細，主要建立結構物耐久性評估指標，值得肯定。	感謝委員肯定。
	本計畫研究範圍廣泛，針對結構物與結構材料之定義，請再明確定義清楚。	感謝委員指正，將在期末報告將研究範疇定義更為清楚。
	結構物耐久性只考慮材料因子，是否合理？應加以說明。	耐久性是眾多因素的綜合，本研究僅針對在做檢測時常會進行之相關試驗探討，因此僅以材料做出發點，研究材料劣化對耐久性的影響。其他影響因子如齡期因子、設計因子、施工因子、環境因子、地震因子等，將擇重要者以粗略的放大係數的觀念融入所得到之材料評估中加以修正。
	結構材料要能推廣應用，應研擬材料之品質標準及施工規範。	同意委員意見，不過研擬材料之品質標準及施工規範並不在本研究範疇之內。
	本計畫建議選擇幾種範例的方式，進行說明比較。	在期末報告，針對研究範疇內之材料生命週期評估還有材料耐久性評估都會進行實際案例說明。
高 健 章 教 授	RC 結構構件可大致分為工廠預鑄構件與現場澆置構件。另外亦有半預鑄構件，建議本案可對此分類納入考量。	感謝委員意見。目前調查僅針對預拌混凝土，至於工廠預鑄工法，若在計畫期限內可以調查完成，將納入期末報告中。
	期初報告審查之審查意見與回應需列入附件，供評審委員參考。	感謝委員意見，將在期末報告中補正。

張 大 鵬 教 授	報告書第 60 頁所列數據與分析的工作，包含哪些項目應敘明。	針對生命週期評估方面，在期末報告中將會對清單中各樣數據蒐集完成(部份數據可能並沒有本土化數據)。然後將以實際的案例說明，當建築師在達成同樣安全性要求下，如果採用不同的混凝土配比設計，將會出現不同的材料用量，此時各方案間會有怎樣的差異，對環境的影響有多少。針對耐久性評估部分，將會針對實例，將檢測結果代入模式中，計算得到單一構件以及整體結構之耐久性評價。
	報告書第 55 頁耐久性綜合評估方法，有無實務驗證之方法，請說明。	將在期末報告納入實際操作案例。
	本研究案之研究內容實用價值高，值得嘉許。	感謝委員肯定。
	報告書中表 3.1 至表 3.12，公斤的單位縮寫 Kg 應改為 kg。	將在期末報告中補正。
	報告書的圖表之字體大小宜一致，如第 27 頁的公式(2.1)文字過小；圖 2.7 字體過大，請改正。	感謝委員指正，將在期末報告中補正。
	報告書第 11 頁圖 1.3 流程圖之項目是否適宜，請再檢討。	感謝委員指正，圖 1.3 為原始提案中的構想，現在已經有所變化。在期末報告中將補正之。

黃 兆 龍 教 授	國內外相關文獻十分廣泛，在分析上宜考慮本土化之因素，才能有效評估生命週期。	感謝委員指正，將盡量考量使用本土化數據進行生命週期評估。
	營建材料生命週期之評估是與材料設計有相關性。除了調查外，宜考慮劣化基因及材料設計準則。	本研究希望能夠提供設計使用，故當初並沒有考慮將設計年限(與耐久性，混凝土劣化等有關)考量入內。在期末報告中，將進行實際案例分析，將會說明當採用不同材料時，所造成之影響為何，如平均每年之排碳量之差異。
	耐久性指標除了目前項目外，仍宜考慮配比之基因，以確認物理性及化學性劣化之機制，並且設定設計準則。	同意委員意見。然而，考量到設計配比與實際配比可能有差異，並且老舊建築可能並無此等資料，故並未考量之。我們認為配比的差異所造成之物理性與化學性劣化，應該都會反應在最後巨觀的行為，也就是我們採用的十個指標內。有關設計準則，本研究並無法針對簡單兩三個案例分析，就足以建立耐久性評估指標與真實耐久性之相關性。必須要經過長期統計資料後，達到一定的正相關性後，才足以考量耐久性設計準則的修正。

	<p>本案可落實政府推動永續發展之目標，但仍須進行數據量化及建立評估指標。</p>	<p>本研究主要在提供方法論，於生命週期評估的內容，可提供建築師於設計階段，在選擇建築材料方案時瞭解各方案對環境之衝擊；而在建築物材料耐久性評估的部分，則是提供檢測者可以將評估之指標統合，得出對現有建築物構件或是整體結構之耐久性評估，相關的評估項目與數據於本研究中已有搜集並分類整理，在應用上可依本研究提供的評估程序進行評估。不論是生命週期評估或是耐久性評估，都包含數個不同的評估項目與指標的綜合歸納推測，因此實際切確的應用，必須針對每個項目都進行操作後，再進行統計綜合判斷。</p>
	<p>本案研究對於培育相關人才，及增進公共服務設施品質與效能，係屬可行。</p>	<p>感謝委員肯定。</p>
<p>王亭復技師</p>	<p>本研究之結構材料生命週期評估內容尚不包括使用維護及破壞處理，則所獲得之對環境影響的成果是否正確、影響多大，宜先予以評估。</p>	<p>本研究初始研究目標是提供建築師在設計時，瞭解在達到同樣安全性要求，使用不同組合材料下，最後對環境的衝擊影響為何，故為給設計使用的一種生命週期評估，此點與市面上售的土建用生命週期評估軟體功能相當。當然完整的生命週期評估，應該包含維護使用階段還有破壞處理階段。我們沒有涵蓋此兩部分，理由除上述原因外，還有以下之原因：使用維護階段之數據將與建築物本身的使用目的(如商用、民宅)以及設計的方式(向陽面、有無植被等)、維護周期都有關係，國內目前僅有排碳量還有能源使用的數值模型，並無真實數據，故僅屬於合理推估，數據的質量</p>

	<p>與其他階段無法相比。而在拆除破壞階段，最重要的是回收率的數據，以目前調查結果，並無政府的公開數據，因此可能數據質量也不足夠。這也就是為何我們並未將此二階段放入調查考量。在期末報告，我們會以舉例說明，引用有限本土化數據說明在維護使用階段還有破壞拆除階段的影響，若無數據，將會採用假設值代入。</p>
<p>生命週期評估所採用 simapro 軟體宜在報告中簡要說明使用目的、使用方法、原理及需準備之輸入資料、輸出資料判讀，最好有一完整範例。</p>	<p>在期末報告中，將對如何使用 Simapro 更加詳細說明。並且在實際案例分析中，將說明如何使用 Simapro 得到各項環境衝擊指標的數值。</p>
<p>有關耐久性評估所述方法，如 A.B.C.D 或 D.E.R&amp;U 等，均為對既有橋樑混凝土(鋼造亦可以) 的評估方法，其資料甚為豐富，可採取範例說明。部份老舊、公有建築物亦有很多完整檢測資料，亦可作為耐久性評估之案例。</p>	<p>感謝委員建議，將會參考使用。</p>

### 期末審查委員意見回覆

委員	審查委員意見	研究團隊回應
邱昌平 顧問	以鋼筋、混凝土、砂石粒料、水泥、水等結構材料之取得、運輸、生產、產品製造、產品運輸等生命週期中之耗能、碳排放與耐久性為主要因素，並以兩棟建築物做為試驗案例，計算評估其耐久性，結果顯示耐久性良好，本案研究內容豐富。	感謝委員肯定。
	實例 1 已有 20 年屋齡，8 個試體之中性化深度尚合理，但抗壓強度似偏高(243 及 330 kgf/cm <sup>2</sup> )；實例 2 也有 25 年屋齡，抗壓強度偏高(295 及 322 kgf/cm <sup>2</sup> )，中性化深度似過低，又表 4.48 中鋼筋探測確實可以看出#5 及#6 甚至#3 之區別？箍筋間距全部是 25 cm，每根都不差？	實例 1 為公有建築物，抗壓強度為鑽心取樣的實測值(為本團隊過去實際操作的案例)。實例 2 為參考顧問公司報告，中性化深度與抗壓強度是否合理，並無法真確知道，箍筋間距的合理性，確實值得懷疑，將在期末報告中定稿中說明該數據並非由本團隊實測得到等文字，以免誤導使用者。
蘇南	本報告質化與量化分析完整，具應用性。	感謝委員肯定
	建議針對混凝土施工時所造成的噪音、污染，與鋼結構施工進行比較。	本研究所使用之 Simapro 軟體，並無法考量噪音問題，故無法進行比較。日本的 LCA 概念則有包括施工噪音等問題之考量，較符合委員所提之想法。將來若本計畫再延伸執行，可考量進行此方面之研究。本研究在本年度是以鋼筋混凝土構造物為考量對象，未來本計畫若有延伸，則可以續針對鋼結構或是鋼骨混凝土結構進行研究，則可以建立完整之建築材料資料

	<p>針對耐久性評估，建議與鋼結構進行比較。</p>	<p>庫，可以提供使用者比較不同結構型態對環境之衝擊為何。</p> <p>本研究是針對鋼筋混凝土結構物之材料耐久性進行評估，本計畫若有延伸，則可以續針對鋼結構或是鋼骨混凝土結構進行研究，則可以全面瞭解如何針對各種不同形式之建築物進行耐久性評估。</p>
	<p>建議考量地區的特性(如台灣多地震、颱風)、人民生活習慣及工作精準度，審慎思考生命週期相關因素的影響。</p>	<p>地區的特性對於耐久性影響很大，將來可以考量在耐久性因子前乘上各種因子的放大係數，以達到更準確的評斷。</p>

台灣省建築材料商業同業公會聯合會	本研究就建築物之能源消耗及環境保護層面，對營建材料耐久性評估、評定，具參考性。	感謝委員肯定
	國內 RC 建築耐久性結構材料產業、學術界北、中、南均有為數眾多的人才及業者，如需建立評估指標，應凝聚共識，以達事半功倍的預期成果。	本次進行計畫在耐久性指標的權重決定上雖召開專家會議，但因為所使用軟體只能最多納入 25 位專家的意見，因此難免有遺珠之憾。然而，相信若本研究之方法可行，將來可以納入更多專家的意見，得到較具代表性的權重。
曹昌勝建築師	推薦值的比重，室內樑(0.21)大於室內柱(0.03)? 是否合理?	該表中之權重為誤植。室內樑、柱與戶外樑柱權重均應為 0.21，而戶內板、牆與戶外牆權重均應為 0.03。將在期末報告定稿中修正。
沈得縣教授	期末報告內容豐富值得肯定，但在結論與建議中針對生命週期評估基準及耐久性評估指標之說明仍不完整，請補充。	感謝委員肯定。關於生命週期評估基準及耐久性指標之說明，將在期末報告定稿中結論與建議一章中再加強說明。
	針對生命週期評估與耐久性評估，建議研擬相關之使用手冊，以利推廣應用。	本研究之研究成果，已具體呈現在報告中，研擬使用手冊，並不在本研究之工作項目內。若後續有需要進行推廣，研究單位會配合研擬相關手冊。

<p>生命週期評估中，缺乏使用維護及拆除再利用，對推廣綠建材仍不合理，請再說明。</p>	<p>本研究採用嚴謹之生命週期評估方法，故不擬使用假設之數據進行研究。在使用維護階段，經調查國內目前在電力耗能方面根據建物使用目的不同，有數據；然而天然氣使用方面，卻沒有任何統計資料。據瞭解，建物主要使用能量就是電能與天然氣，若缺乏天然氣數據，所評估出來的結果也沒有意義。在拆除階段，經調查也發現僅有鋼筋回收比例為 0.8，但是粒料回收率不詳，因此也無法套入計算。本研究雖無法進行評估，但是已在報告中明確指出所缺數據，這些數據應該盡快完備，以完整建立國內生命週期評估之資料庫。</p>
--	--

	<p>請列表比較各種材料生命週期評估項目及評估基準。</p>	<p>本研究研究報告中已經說明生命週期評估項目是根據 Eco-Indicator 95 十一項指標進行盤查分析，而每一項目應調查之項目已經明確列表。</p>
	<p>請列表比較各種材料耐久性之評估項目及評估指標。</p>	<p>本研究研究報告中已經說明材料耐久性評估項目共分兩大類：混凝土現況項目共六項，腐蝕現況項目共四項。其中在章節中已經詳細說明各項目應該如何操作，並如何得到評估等級。因為說明甚冗長，無法以表簡化說明之，敬請見諒。</p>
	<p>期末報告中有評估基準、評估準則、評估指標及評定標準各種名詞，建議深入探討，簡化相關名詞。</p>	<p>將仔細推敲統一用字，感謝委員意見。</p>
<p>王亭復技師</p>	<p>在生命週期評估基準部分，因涉及資料庫的完整性，很多材料的來源，製造過程均或有不同，甚至其影響範圍是要溯至何種範圍，則評估之節能減碳結果亦會有差異，例如水進淨水場前之水庫，水壩之建造、養護、河道之疏浚，河岸保護等亦均為其中不可缺項目，又混凝土之骨材若採至淤積之河川、水庫等均難以某固定式項目分析。又如第 91 頁混凝土柱邊長的推測，事實上又與鋼筋多寡有關很難予量化。</p>	<p>1. 生命週期評估首先要建立明確邊界，為了不讓本研究失焦，故本研究將鋼筋混凝土建築物之材料當作輸入項目，因此生產製程的差異、原料之差異等不納入考量。91 頁之案例為假設例，僅說明當組合材料不同時，會產生不一樣之生命週期衝擊。真實的案例計算，當然需要確實考量真實材料用量，才能確實評估。</p>

	<p>有關表 4.6 含氯離子評判標準出自何處？又如何與碳化深度評定值結合而訂出該結構物之氯含量。</p>	<p>表 4.6 氯離子含量是以水泥重量為基準，應該是以美國 ACI 的規定為準。本研究參照中國大陸學者的作法，將規定之上限值與低標值間作五等分，分別給予不同等級的分類。</p>
	<p>下期研究建議以本土情況比較混凝土構造物與鋼構造物之生命週期評估，並簡化為表格以為設計前參數。</p>	<p>本計畫若有延續，將參照委員意見加深研究內容，並簡化程序。</p>

## 參考書目

1. 土木水利協會(2002)，混凝土工程設計規範之應用。
2. 方衡尉(2008)。爐石粉細度與膠結材組合對混凝土性質影響之研究。國立台灣海洋大學河海工程學系碩士論文。
3. 王景玟(2005)。結合生命週期評估及生態效益分析研究-以鋼鐵廠製品為例。國立成功大學環境工程學系碩士論文，台南。
4. 王傳偉(2006)。台灣北部砂石船貨船運供應鏈管理相關之研究。國立台灣海洋大學船運管理學系研究所碩士論文，台北。
5. 李正義(2003)。行業指標介紹。經濟部工業溫室減量技術研討會論文級。
6. 邱贊儒(2003)。建立橋梁耐久性評估方法之研究。國立中央大學碩士論文，桃園。
7. 呂穎彬。生命週期評估資料庫應用，工業污染防治，第 66 期，p113-140。
8. 人民交通出版社。定指南及工程實例。
9. 林敬智。環境化設計發展趨勢及應用工具介紹，永續產業發展雙月刊，Vol.5，p53-62。
10. 高惠玲、盧明俊、周幼寧(1995)。環保策略工具-生命週期評析技術之內涵及發展現況。工業污染防制第 54 期。
11. 郭文信(1999 年 6 月)。台灣地區水泥業因應二氧化碳排放減量策略之模擬分析。國立成功大學資源工程學系碩士論文，台南。
12. 陳秋龍(2001)。鋼鐵業之生命週期盤查分析—投入產出生命週期評估模型之應用。國立台北大學資源管理研究所碩士論文，台北。
13. 張又升(2002)。建築物生命週期二氧化碳減量評估。國立成功大學建築研究所博士論文，台南。

14. 張勁泉、宿健、程壽山、何玉珊等編著(2006)。混凝土舊橋材質狀況與耐久性檢測評定指南及工程實例。人民交通出版社。
15. 黃盈庭(2000年,6月)。投入產出分析應用於生命週期評估-台灣地區水泥範例研究。國立成功大學資源工程學系碩士論文,台南。
16. 彭文正(2003)。以生命週期評估技術應用於建築耗能之研究。環境工程與管理所碩論士論文。朝陽科技大學,台中縣。
17. 馮閔盛、薩支高(2004)。以生命週期評估建築物主體結構用材及造林抵銷二氧化碳產出之研究,第十七屆環境規劃與管理研討會,中華民國環境工程學會第十六屆年會暨學術研討會論文摘要集光碟,台南。
18. 馮炳勳(2006)。台灣水泥業因應二氧化碳排放減量策略之研究。國立成功大學資源工程研究所博士論文,台南。
19. 趙又嬋(2004)。百貨公司室內裝修生命週期二氧化碳排放量推估。國立成功大學建築學系碩博士班碩士論文,台南。
20. 聶祚仁、高峰、陳文娟、龔先政、王志宏;左鐵鏞等(2009,7月)。材料生命週期的評價研究。材料報導:綜述篇,第23卷,第7期。
21. 羅紹文(2010)。預力 I 型樑橋之二氧化碳排放量評估。私立逢甲大學土木工程學系碩士論文,台中。
22. ACI Committee 201.2R(1922)*Guide to Durable Concrete*, ACI Manual of Concrete Practice, Proc., Vol. 74, pp.573-609
23. Asif. M. et al. (2007)*Life cycle assessment: A case study of a dwelling home in Scotland* *Life cycle assessment: A case study of a dwelling home in Scotland*. Building and Environment 43 , p. 1391-1394
24. Baroghel-Bouny, V., et al.(2007) *Proceedings of international RILEM workshop on performance based evaluation and indicators for concrete durability. in Proceedings of*

*international RILEM*, Madrid, Spain, RILEM Publ, Bagnaux.

25. Chao C.C.(2001). *Life cycle inventory for steel in Taiwan*. 東海學報，第 42 卷，pp. 1-11。
26. Dhir, R.k., M.R. Jones, and H.E.H. Ahmed, *Concrete Durability Estimation of Chloride Concentration During Design*. Magazine of Concrete Research, 1991. 43: p. 37-44.
27. Deborah N. Huntzinger, Thomas D. Eatmon(2009). *A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies*. Journal of Cleaner Production, 17, p.668 – 675.
28. European Federation of Concrete Admixtures Associations: *Life Cycle Assessment/ Analysis of Concrete*, LCIA rev5 -04/02/04 jmd.
29. Fookes, P.G(1997). *Aggregates: a Review of Prediction and Performance, Prediction of Concrete Durability*. Proceedings of Stats 21st Anniversary Conference, E&FN SPON, London..
30. Gielen, D.J. & Moriguchi, Y(2003). *Technological potentials for CO2 emission reduction in the global iron and steel industry*. International journal of energy technology and policy, Vol. 1, No. 3, pp. 229-249.
31. ISO14040(1997)ed. *Environmental management–life cycle assessment– principles and framework*. ISO: Paris.
32. Jeong Min Moon, ki Suk'Chung, Jong Hwan Eun and Jong Shik Chung(2003). *Life cycle assessment through on-line database linked with various enterprise database systems*, Int J LCA, Vol. 8, No. 4, pp. 226-234.
33. J. Monahan, J.C. Powell(2011). *An embodied carbon and energy analysis of modern methods of construction in housing: A case study using a lifecycle assessment framework*,

Energy and Buildings, 43, p.179–188.

34. Kropp, J. and H.K. Hilsdorf,(1995)eds. *Performance Criteria for Concrete Durability*.
35. K, M., I. T, and C. N. (2007)*Computational life-cycle assessment of structural concrete subjected to coupled severe environment and mechanistic actions. in Proceedings of the fifth international conference on concrete under severe conditions: environment and loading*. Tours, France.
36. Lee, k., S.(2009)Tae, and S. Shin, *Development of a Life Cycle Assessment Program for building (SUSB-LCA) in South korea*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 13, p. 1994–2002.
37. Mehta, P.k. and Gerwick, B.C.(1982). *Journal of Concrete International*, 4, pp.45-51.
38. Mehta, P.k. and Monteiro, J.M(1993). *Concrete Structures, Properties and Materials, 2nd Edition*, Prentice Hall Inc., New Jersey.
39. Mohapatra P.k., Siebel M.A., Gijzen H. J., J.P. van der Hoek and Groot C.A,(2002) “Improving eco-efficiency of Amsterdam water supply: A LCA approach, *Journal of water supply*”: Research and technology-AQUA, Vol. 54, No. 4, pp. 217-227.
40. N. Stern(2007).*The Economics of Climate Change: The stern Review*, Cabinet Office HM Treasury.
41. Rebitzer G., Ekvall T., Frischknecht R., Hunkeler D., Norris G., Rydberg T., Schmidt W.P., Suh S., Weidema B.P., Pennington D.W.(2004) *Life cycle assessment Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications*. Environment International, Vol.30, pp. 701-720.
42. Seabrook, P.,(1989). *Discussion of Papers on Physical and Chemical Cause of Deterioration of Concrete in Seawater*. Proc. Ben Gerwick Sympoisum on International Experience with Durability of Concrete in Marine Environment, University of California at

Berkeley, Editor: P.k. Mehta, pp.73-74.

43. Saaty, Thomas L. (1996). *Decision Making with Dependence and Feedback: The Analytic Network Process*. Pittsburgh, Pennsylvania: RWS Publications. ISBN 0-9620317-9-8.
44. Sepulcre-Aguilar A. and F. Hernández-Olivares(2009), *Assessment of phase formation in lime-based mortars with added metakaolin*, Portland cement and sepiolite, for grouting of historic masonry, *Cement and Concrete Research*, in press.
45. Saaty, Thomas L..(2008).*Relative Measurement and its Generalization in Decision Making: Why Pairwise Comparisons are Central in Mathematics for the Measurement of Intangible Factors - The Analytic Hierarchy/Network Process"*. RACSAM (Review of the Royal Spanish Academy of Sciences, Series A, Mathematics) 102 (2): pp.251–318.
46. Sungho Tae, Cheonghoon Baek, Sungwoo Shin(2011). *Life cycle CO2 evaluation on reinforced concrete structures with high-strength concrete* . *Environmental Impact Assessment Review* 31, p.253–260.
47. T, I., M. RTS, and M. k.(2001)*An integrated computational framework for performance evaluation of cementitious materials and structures under various environmental actions. in Proceedings of the sixth international conference*. Cambridge, USA.
48. Ulla-Maija M., Paula E., Jutta L(2001).*Life-cycle impacts of the use of industrial by-products in road and earth construction*. *Waste Management* 21 , p.271-277.
49. V, B.-B. (2007)*Durability indicators: relevant tools for an improved assessment of RC durability editors.(CONSEC'07),vol. 1.: LCPC; 2007. p. 67–84. in Proceedings of fifth international conference on concrete under severe condition.: environment and loading* ,Tours, France.
50. V., B.-B(2007) *Concrete design for a given structure service life –durability management with regards to reinforcement corrosion and alkali–silica reaction. State-of-the-art and guide for the implementation of a predictive performance approach based upon durability*

*indicators*, Scientific and technical documents of AFGC.

51. Y. kitsutaka(2010).*Methodology on the Integrity Evaluation of Deteriorated Concrete Structures*, The 4th Asian Concrete Fedration International Conference, Taipei, Taiwan.
52. Zadeh, L.A.,Fuzzy (2007)*Sets and Applications: Selected Papers*. R.R. Yager, S. Ovchinnikov, R.M. Tong and H.T. Nguyen, editors, Wiley-Interscience.

結構材料生命週期評估基準與耐久性評估指標之建立(1)

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三段 200 號 13 樓

網址：<http://www.abri.gov.tw>

編者：張建智、紀茂傑、葉為忠、洪啟哲

出版年月：100 年 12 月

版次：第一版

ISBN 978-986-03-0999-7 (平裝)