

綠色材料應用於快速道路橋樑結構 可行性與效益分析

受委託單位：財團法人臺灣營建研究院

研究主持人：王韡蓁 博士

協同主持人：鄭敏元 博士、徐敏晃 組長

研究期程：中華民國 104 年 11 月至 105 年 12 月

研究經費：新臺幣 280 萬元整

交通部公路總局西部濱海公路北區臨時工程
處委託研究

中華民國 106 年 2 月



摘要

本計畫在評估綠色材料用於橋梁對結構安全及經濟效益之影響。針對營建工程中用量最多的材料混凝土，先彙整研究文獻、國外規範及工程案例、國內工程施工經驗、及預拌混凝土產業的技術發展情形，再以添加高爐石粉及飛灰作為本研究的綠色材料，提高添加量(高爐石粉及飛灰分別取代 25% 及 10%、取代 35% 及 15%)，並進行混合水泥 IS(<70)(MS)型及 IP(HS-LH)型等所製成綠色混凝土的性質等研究。

試驗結果顯示，高爐石粉和飛灰添加愈多，初凝和終凝時間愈長，而混合水泥 IS(<70)(MS)與 IP(HS-LH)凝結時間又更長，會影響拆模時間。高爐石粉和飛灰添加愈多，水合熱愈低、熱壓膨脹量也愈小，而混合水泥的整體性能表現又更佳。不同高爐石粉和飛灰添加量的混凝土性質表現，坍度皆可符合設計要求，具有良好工作性。爐石粉和飛灰添加愈多強度發展愈慢，然而在 28 天時高爐石粉取代 25% 及飛灰取代 10% 組與高爐石粉取代 35% 及飛灰取代 15% 組之抗壓強度已與純水泥相同，混合水泥 IS(<70)(MS)型甚至有更好的強度表現；90 天時則所有試驗組強度皆已超過純水泥。

以不同高爐石粉飛灰配比澆置縮尺寸柱以模擬橋梁柱的受力研究方面，數據顯示，不同試驗柱的層間位移角均超過一般設計要求，且結構柱側力變形都是由柱主筋控制，不同材料混凝土產生之差異不大，故採用不同高爐石粉和飛灰比例及混和水泥的混凝土均能符合設計需求。

採用 AHP 層狀分析法，以權重加總方式在性能、材料成本及減碳效果上，用量化結果評估不同高爐石粉和飛灰與混合水泥配比之混凝土性質，則各有其優勢，若以 28 天強度為基準，混合水泥 IS(<70)(MS)組的效益最高，不同高爐石粉和飛灰添加比例的分數相近，若以 90 天強度為基準，則混合水泥 IP(HS-LH)組亦有不錯表現。

使用高爐石粉及飛灰有提升混凝土品質、降低成本、減少二氧化碳排放的效益，而使用工程會施工綱要規範規定的高爐石粉 35% 飛灰 15% 上限，也有良好之成效。而混合水泥 IS(<70)(MS)又比高爐石粉 35% 和飛灰 15% 組有更好的成效。高爐石粉和飛灰的添加量增加，將增加混凝土凝結時間，會影響模板拆模時間，在施工時需特別注意。若有拉預力需求，則不建議添加太多的高爐石粉及飛灰。

後續建議對高爐石粉及飛灰之使用進行更多試驗與研究以驗證成效。

關鍵詞：綠色材料、橋梁結構、生命週期、節能減碳、經濟效益



Abstract

The project evaluates the impact of structural safety and economic benefits for bridge construction using green materials. Focus on concrete which is the largest amount materials used in the construction project. The authors summarized the research literature, the foreign specification and engineering case, the domestic construction experience and the technical development situation of the ready-mixed concrete industry. The blast furnace slag and fly ash are used as the green materials of this research, and increasing the used amount (cement is replaced partly by blast furnace slag and fly ash of 25% and 10%, 35% and 15%, respectively). And studied the properties of green concrete made of mixed cement type IS (<70) (MS) and type IP (HS-LH).

The results show that the more addition amount of slag and fly ash, the longer the initial setting time and the final setting time. The setting time of mixed cement IS (<70) (MS) and IP (HS-LH) is more longer, will affect the demolding time. The more addition amount of slag and fly ash, the lower the hydration heat, the smaller the thermal expansion, and the overall performance of mixed cement is better. Concrete with different slag and fly ash addition, the slump can meet the design requirements, exhibits good workability. The more addition amount of slag and fly ash, the more slowly the strength developed. However, the compressive strength of the group with slag of 25% and fly ash of 10% and the group with slag of 35% and fly ash of 15% is the same as that of pure cement group. The mixed cement type IS (<70) (MS) has better strength performance, 90 days strength of all the test group is better than that of pure cement group.

The research on the downsize columns made using the mixes with different amount of slag and fly ash to simulate the bridge columns, the result shows that the displacement angle between two columns is more than the design requirements, and the deformation of the structural columns by lateral force is control by the main reinforcement of columns. The difference is little between concrete with different materials. So the concrete made with different proportion of slag and fly ash and mixed cement can meet the design requirements.

The AHP layer analysis method, using the weighting sum of concrete in performance, material cost and carbon reduction effect, is used to evaluate the properties of concrete with different mix proportion of slag, fly ash and mixed cement. Different mixes have different product features. The mixed cement IS (<70) (MS) group had the highest benefit on a 28-day strength basis, and the scores of concrete with the different slag and fly ash additions were similar. If the AHP analysis of concrete is based on the 90-day strength, the mixed cement IP (HS-LH) Group also has a good performance.



The use of slag and fly ash has the benefits such as improving the quality of concrete, cutting down costs and reducing the carbon emissions. Concrete with slag of 35% and fly ash of 15%, the upper limit specified by the specifications of Public Construction Commission, there is also a good performance. The performance of concrete using the mixed cement IS (<70) (MS) is better. In terms of resistance to sulfate attack, the durability of the mixed cement concrete using IP (HS-LH) is the best. The more slag and fly ash increases the setting time of concrete, will affect the formwork demolition time, so should be attention in construction. If the structural has the demand of the pre-stress, it is not recommended to add too much slag and fly ash.

We should make more research and testing for the slag and fly for long time.

Keywords: Green materials; Bridge structure; Life cycle; Energy saving; Economic benefits



交通部公路總局西部濱海公路北區臨時工程處

綠色材料應用於快速道路橋梁結構可行性與效益分析委託研究服務工作

目 錄

目 錄.....	I
表目錄.....	V
圖目錄.....	X
第一章 緒論.....	1
1.1 計畫背景.....	1
1.2 計畫目的.....	2
1.3 委辦工作項目及內容.....	2
1.4 研究範圍.....	3
1.5 計畫預期成果.....	6
1.6 計畫執行效益.....	6
1.7 工作流程.....	6
第二章 文獻蒐集整理分析.....	8
2.1 工程綠色內涵政策推動.....	8
2.1.1 行政院公共工程委員會.....	8
2.1.2 交通部.....	12
2.1.3 內政部建築研究所.....	17
2.2 綠色材料分類及探討.....	19
2.2.1 成熟性綠色材料.....	22
2.2.1.1 飛灰.....	22
2.2.1.2 高爐石粉.....	28
2.2.1.3 輕質粒料.....	38
2.2.1.4 轉爐石粒料.....	43
2.2.2 驗證性綠色材料.....	46



2.2.2.1 電弧爐氧化碴.....	46
2.2.3 待開發型綠色材料類別介紹.....	54
2.2.3.1 鹼激發材料.....	54
2.2.3.2 鋼渣(轉爐石)水泥.....	58
2.3 綠色材料運用於道路橋梁結構之發展.....	60
2.3.1 綠色材料運用於道路橋梁結構類型.....	60
2.3.2 綠色材料運用於道路橋梁結構之研究概況.....	61
2.3.3 綠色材料實務運用於道路橋梁結構介紹.....	64
2.4 國內外混凝土規範對高爐石粉飛灰之使用限制.....	80
2.4.1 國外混凝土規範對高爐石粉及飛灰之限制.....	80
2.4.2 國內混凝土規範對高爐石粉及飛灰之限制.....	83
2.5 橋梁設計規範對混凝土限制.....	92
2.6 快速道路定義.....	96
2.6.1 公路等級.....	96
2.6.2 車道寬度.....	97
2.6.3 路肩寬.....	98
2.6.4 中央分隔帶.....	98
2.6.5 耐震設計用途係數.....	98
2.7 文獻分析小結.....	100
第三章 影響綠色材料應用於道路橋梁之環境因素與耐久性防範.....	102
3.1 環境因素對綠色材料性質之影響.....	102
3.2 綠色材料於台灣道路橋梁環境之耐久性探討.....	108
3.3 環境影響因素小結.....	121
第四章 國內外橋梁結構使用綠色材料的能耗、穩定性與節能減碳效果.....	122
4.1 綠色材料結構能耗.....	122
4.2 綠色材料結構穩定性.....	129
4.3 綠色材料節能減碳評估.....	138
4.3.1 建材節能減碳係數探討.....	138



4.3.2 節能減碳之國外工程實績探討	142
4.4 能耗與穩定性小結	146
第五章 綠色材料作為道路橋梁材料之性質測試.....	147
5.1 綠色材料配比規劃	147
5.2 試驗規劃	150
5.3 電弧爐氧化矽安定化試驗	157
5.4 膠結材料試驗	159
5.4.1 初終凝試驗	159
5.4.2 水合熱試驗	160
5.4.3 熱壓膨脹	161
5.5 混凝土試驗	162
5.5.1 坍度	162
5.5.2 抗壓試驗	164
5.5.3 靜彈性模數	172
5.6 耐久性試驗	174
5.6.1 抗硫酸鹽試驗	174
5.6.2 乾縮試驗	175
5.6.3 潛變試驗	177
5.7 施工影響評估	178
5.8 性能評估小結	180
第六章 評估綠色材料之道路橋梁結構實驗.....	184
6.1 結構柱試體規劃	184
6.1.1 試體設計	184
6.1.2 試驗配置	185
6.1.3 試驗量測系統配置	188
6.1.4 混凝土溫度發展	190
6.2 試驗結果分析	191
6.2.1 混凝土強度試驗	191



6.2.2 鋼筋拉伸試驗	193
6.2.3 表心溫度量測	196
6.3 試體測試結果.....	200
6.3.1 純水泥柱試驗分析	201
6.3.2 爐灰 35:15 比例試驗柱試驗分析	204
6.3.3 IS(<70)(MS)混合水泥柱試驗分析	206
6.3.4 IP(HS-LH) 混合水泥柱試驗分析	209
6.4 試體強度與變形能力	211
6.4.1 試體外部變形(曲率).....	213
6.4.2 試體裂縫	217
6.5 結構試驗小結.....	218
第七章 綠色材料應用於道路橋梁結構之經濟性與節能減碳效益評估	219
7.1 綠色材料經濟效益評估	219
7.2 綠色材料節能減碳效益評估	222
7.3 以層級程序分析法進行不同配比混凝土的效益評估	224
7.4 效益分析小結	232
第八章 結論與建議	233
8.1 結論	233
8.2 建議	238
第九章 參考文獻	240

附件一 期初報告書審查會議紀錄及辦理情形

附件二 期中報告書審查會議紀錄及辦理情形

附件三 期末報告書審查會議紀錄及辦理情形

附件四 混凝土試驗及材料試驗

附件五 結構柱試驗照片



表目錄

表 1.4-1 計畫工作項目執行方法及報告對應章節內容	5
表 2.1.1-1 道路橋梁工程綠色內涵指標[2].....	10
表 2.1.1-2 綠色內涵具體作法[2]	10
表 2.1.1-3 道路橋梁結構綠色內涵項目與實例	11
表 2.1-4 ETC 通行效益.....	16
表 2.1.3-1 再生綠建材評定基準表	19
表 2.2-1 綠色材料定義彙整	20
表 2.2-2 全國 2012 廢棄物及可再利用資源物統計.....	21
表 2.2.1.1-1 西元 2007 年至 2013 年台灣煤灰產出量	24
表 2.2.1.2-1 高爐石粉之化學成份限制	30
表 2.2.1.2-2 高爐石粉之物理性質	31
表 2.2.1.2-3 爐石粉原廠試驗報告.....	31
表 2.2.1.2-4 日本高爐石粉之品質要求.....	32
表 2.2.1.2-5 不同等級高爐石粉、替代率與強度成長之關係	35
表 2.2.1.3-1CNS 3691 對輕質混凝土強度規定.....	41
表 2.2.1.3-2 輕質混凝土彈性模數與單位重、抗壓強度之關係	42
表 2.2.1.4-1 轉爐石瀝青混凝土各縣市道路鋪築實績資訊	45
表 2.2.2.1-1 電弧爐渣歷年申報量統計	47
表 2.2.2.1-2 各類爐渣的化學成份比較表	50
表 2.2.2.1-3 新拌電弧爐氧化渣混凝土坍度試驗	51
表 2.2.2.1-4 電弧爐氧化渣混凝土坍度損失表	51
表 2.2.2.1-5 新拌電弧爐氧化渣混凝土單位重試驗	52
表 2.2.3.2-2 大陸鋼渣水泥各項原料之化學成分	60
表 2.3.1-1 具實務驗證的道路橋梁綠色材料項目	61
表 2.3.3-1 國道六號南投段工程混凝土設計配比	65
表 2.3.3-2 國道六號南投段工程混凝土強度	65
表 2.3.3-3 烏日交流道穿越橋混凝土設計配比	65



表 2.3.3-4 高雄聯港外高架混凝土設計配比	66
表 2.3.3-5 國道 1 號五股至楊梅段拓寬工程配比設計	66
表 2.3.3-6 台北捷運環狀線工程混凝土配比設計	68
表 2.3.3-7 國立海洋生物博物館使用高爐石混凝土之配比(kg/m ³).....	69
表 2.3.3-8 台北 101 混凝土設計配比.....	70
表 2.3.3-9 中興工程研究大樓新建工程高摻量飛灰混凝土配比設計	71
表 2.3.3-10 國外高爐石粉摻量的混凝土配比設計	75
表 2.3.3-11 國內高爐石粉摻量的混凝土配比設計	76
表 2.3.3-12 高爐水泥與卜作嵐水泥的種類與用途	77
表 2.3.3-13 高雄都會大眾捷運系統紅橘線路網建設案混凝土配比設計	78
表 2.3.3-14 混合水泥種類與用途	79
表 2.3.3-14 淡海輕軌混凝土配比表	80
表 2.4.1-1 美國 ACI 318-14 礦物摻料最高使用比例	81
表 2.4.1-2 英國 BS EN 206-1 預拌混凝土中水泥與其他材料組合比例建議表	82
表 2.4.1-3 日本高爐石粉種類與適用替代率之範圍(%)	82
表 2.4.1-4 中國大陸 JGJ 55-2011 鋼筋混凝土礦物摻料最大摻量	83
表 2.4.2-1 工程會施工綱要規範對高爐石粉飛灰之使用限制	84
表 2.4.2-2 交通部施工規範對高爐石粉飛灰之使用限制	84
表 2.4.2-3 國工局施工規範對高爐石粉飛灰之使用限制	85
表 2.4.2-4 鐵工局施工規範對高爐石粉飛灰之使用限制	85
表 2.4.2-5 水利署施工規範對高爐石粉飛灰之使用限制	86
表 2.4.2-6 營建署施工規範對高爐石粉飛灰之使用限制	86
表 2.4.2-7 水保局施工規範對高爐石粉飛灰之使用限制	87
表 2.4.2-8 臺北市政府施工規範對高爐石粉飛灰之使用限制	87
表 2.4.2-9 台北捷運局施工規範對高爐石粉飛灰之使用限制	88
表 2.4.2-10 臺中市政府施工規範對高爐石粉飛灰之使用限制	89
表 2.4.2-11 台南市政府施工規範對高爐石粉飛灰之使用限制	89
表 2.4.2-12 高雄市政府施工規範對高爐石粉飛灰之使用限制	90



表 2.4.2-13 交通部公路總局施工說明書對高爐石粉飛灰之使用限制	91
表 2.5-1 混凝土最大水膠比及最低混凝土強度	93
表 2.5-2 位於不同海洋腐蝕區域中鋼筋最小保護層厚度	94
表 2.5-3 公路總局施工規範水泥種類及用途參考表	95
表 2.5-4 淡江大橋混凝土及鋼筋保護層規格表	95
表 2.6.1-1 公路等級與設計速率[112].....	97
表 2.6.2-1 設計速度與每車道寬 [112].....	98
表 2.6.3-1 公路等級與路肩最小寬度 [112].....	98
表 2.6.5-1 用途係數	99
表 3.1-1 暴露環境類別與分級	104
表 3.1-2 不同 S 暴露分級之混凝土要求	105
表 3.1-3 混凝土最大水溶性氯離子(Cl ⁻)含量	106
表 3.2-1 飛灰混凝土使用手冊允許飛灰取代水泥之上限	109
表 3.2-2 特殊暴露情況下混凝土之水膠比及強度要求	109
表 3.2-3 依據通過電荷量評估氯離子穿透性	115
表 3.2-4 含飛灰材料混凝土之氯離子電滲量	116
表 3.2-5 鋼筋混凝土劣化與環境因子相關指標	117
表 3.2-6 於中性化環境不同混凝土材料所需之保護層厚度(cm).....	118
表 3.2-7 一般環境中混凝土材料與鋼筋的保護層最小厚度 c (mm).....	119
表 3.2-8 一般環境下的作用等級	120
表 3.2-9 一般環境下混凝土材料與鋼筋的最小保護層厚度	120
表 3.2-10 鹽害環境下的作用等級	120
表 3.2-11 鹽害環境下混凝土最大水膠比及最低抗壓強度	121
表 3.2-12 鹽害環境下主要構件鋼筋最小保護層厚度	121
表 4.1-1 台灣主要各類能源之熱值與 CO ₂ 排放量計算結果	123
表 4.1-2 橋梁生命週期各階段評估之項目和內容	124
表 4.1-3 IPCC 二氧化碳估算方法[92].....	124
表 4.1-4 橋梁主要建材單位生產之 CO ₂ 排放量表	125



表 4.1-5 橋梁主要建材單位運輸之 CO ₂ 排放量表	126
表 4.1-6 混凝土橋梁在營建階段的 CO ₂ 排放量	126
表 4.1-7 我國 RC 橋梁相關拆除廢棄物再利用率	128
表 4.1-8 橋梁主要建材於生命週期中之 CO ₂ 排放量表	128
表 4.2-1 SCC 配比表(kg/m ³).....	130
表 4.2-2 高爐灰摻量混凝土之乾縮應變之影響	131
表 4.2-3 混凝土之乾縮應變之影響	132
表 4.3.1-1 粒料之材料碳排放係數整理	138
表 4.3.1-2 水泥生產主要排放源	139
表 4.3.1-3 單位高爐石粉取代水泥二氧化碳排放量比較	140
表 4.3.2-1 約克大學計算機科學大樓高飛灰量混凝土配比【107】	143
表 4.3.2-2 約克大學計算機科學大樓高飛灰量混凝土 CO ₂ 減排量【107】	144
表 4.3.2-3 溫哥華御景灣高層公寓大樓混凝土配比[108].....	145
表 4.3.2-4 日本明石海峽大橋頂版工程混凝土 CO ₂ 減排量	145
表 5.1-1 橋樑各部位設計強度及比例設計	149
表 5.2-1 綠色材料混凝土試驗規劃	154
表 5.2-2 電弧爐氧化矽混凝土試驗規劃	154
表 5.2-3 混凝土所用材料廠牌及型別	155
表 5.2-4 混凝土配比表	156
表 5.3-1 電弧爐氧化矽砂漿棒熱壓膨脹試驗結果	157
表 5.5.1-1 設計強度坍度試驗	163
表 5.5.1-2 飛灰取代細粒料坍度試驗	164
表 5.5.3-1 各膠結材料種類靜彈性模數試驗值與計算值比較	173
表 5.7-1 規範 03110 最少拆模時間	180
表 5.8-1 綠色材料工能安全性比較表	183
表 6.1.1-1 試驗柱配比	184
表 6.1.2-1 試體目標層間位移表	187
表 6.2.1-1 90 天齡期(測試齡期)混凝土圓柱試體抗壓強度.....	192



表 6.2.2-1 鋼筋拉伸試驗結果	196
表 6.2.3-1 最高溫及表心溫差比較表	197
表 6.4-1 試驗結果數據	211
表 7.1-1 預拌混凝土原料成本分析	219
表 7.1-2 預拌混凝土原料成本分析	220
表 7.2-1 混凝土使用不同膠結材料之每立方公尺減碳效益比較	223
表 7.3-1 項目總權重值	227
表 7.3-2 效益比較分析表	228
表 7.3-3 各項配比權重值分析(28 天強度).....	229
表 7.3-4 各項配比權重值分析(90 天強度).....	229
表 7.3-5 各配比加權權重值排行總表	231
表 8.1-1 重點成果對照表	234

圖目錄

圖 1.7- 1 計畫作業流程	7
圖 2.2.1.1-1 火力發電廠生產流程【12】	23
圖 2.2.1.2-1 高爐石之生產流程示意圖	29
圖 2.2.1.2-2 高爐石粉及卜特蘭高爐水泥生產流程	29
圖 2.2.1.2-3 高爐石粉水泥砂漿強度成長趨勢	34
圖 2.2.1.2-4 高爐石粉(100 級)不同替代率之水泥砂漿強度成長趨勢	35
圖 2.2.1.2-5 高爐石粉(120 級)不同替代率之水泥砂漿強度成長趨勢	36
圖 2.2.1.2-6 不同等級高爐石粉之水泥砂漿強度成長趨勢	36
圖 2.2.1.2-7 高爐石粉水泥砂漿達卜特蘭水泥砂漿相同強度所需之天數	36
圖 2.2.2.1-1 電弧爐渣產生之流程圖【11】	47
圖 2.2.2.1-2 電弧爐渣歷年申報量趨勢	48
圖 2.2.2.1-3 國內主要電弧爐煉鋼廠及其處理機構分佈【9】	48
圖 2.2.2.1-4 電弧爐氧化渣混凝土抗壓強度發展(骨材取代量 50%)	53
圖 2.2.2.1-5 電弧爐氧化渣混凝土抗壓強度發展(骨材取代量 100%)	53
圖 2.2.2.1-6 碳鋼電弧爐氧化渣於不同取代量之 210 kgf/cm ² 抗壓強度發展曲線	53
圖 2.2.2.1-7 電弧爐氧化渣隨不同取代量之抗壓強度發展曲線	54
圖 2.2.3.1-1 含鹼當量 4% 時不同鹼模數比下之抗壓強度	56
圖 2.2.3.1-2 含鹼當量 7% 時不同鹼模數比下之抗壓強度	56
圖 2.2.3.1-3 含鹼當量 10% 時不同鹼模數比下之抗壓強度	57
圖 2.2.3.1-4 不同細度之鹼活化還原渣漿體 28 天抗壓強度	57
圖 2.2.3.2-1 高/轉爐石產出流程圖【54】	59
圖 2.3.3-1 國道 1 號五股至楊梅段拓寬工程混凝土抗壓強度統計圖	67
圖 2.3.3-2 五楊拓寬段 SCC 28 天抗壓強度與水膠比關係	67
圖 2.3.3-3 台北捷運環狀線工程混凝土抗壓強度統計圖	68
圖 2.3.3-4 飛灰與高爐石粉添加對混凝土抗硫酸鹽侵蝕之影響	70
圖 2.3.3-5 高飛灰摻量混凝土抗壓強度發展曲線	71
圖 2.3.3-6 高飛灰摻量混凝土之耐久性測試	72

圖 2.3.3-7 高雄都會大眾捷運系統紅橘線路網建設案混凝土抗壓強度統計圖	78
圖 2.3.3-8 中聯資源筒槽大底新建工程混凝土抗壓強度統計圖	79
圖 2.3.3-9 混合水泥之材料抗硫酸鹽測試	79
圖 3.2-1 爐灰組與控制組之氯離子擴散關係圖(W/b=0.35).....	110
圖 3.2-2 爐灰組與控制組之氯離子擴散關係圖(W/b=0.45).....	110
圖 3.2-3 爐灰組與控制組之氯離子擴散關係圖(W/b=0.6).....	111
圖 3.2-4 氯離子擴散之關係圖(W/b=0.35).....	111
圖 3.2-5 氯離子擴散之關係圖(W/b=0.45).....	111
圖 3.2-6 氯離子擴散之關係圖(W/b=0.6).....	112
圖 3.2-7 飛灰混凝土替代量與總電荷量關係圖 (材齡 28 天)	113
圖 3.2-8 飛灰混凝土替代量與總電荷量關係圖 (材齡 91 天)	113
圖 3.2-9 高爐石粉混凝土替代量與總電荷量關係圖 (材齡 28 天)	114
圖 3.2-10 高爐石粉混凝土替代量與總電荷量關係圖 (材齡 91 天)	114
圖 3.2-11 高爐石粉不同替代率之混凝土氯離子電滲成長趨勢 (W/B=0.48)	116
圖 4.2-1 SCC 自體收縮發展趨勢	130
圖 4.2-2 SCC 乾燥收縮 (23°C, R.H.50%)發展趨勢	130
圖 4.2-3 SCC 潛變 (23°C, R.H.50%)發展趨勢	131
圖 4.2-4 飛灰摻量混凝土收縮行為	133
圖 4.2-5 飛灰摻量混凝土潛變行為	133
圖 4.2-6 飛灰與高爐石粉材料水合熱反應分析	134
圖 4.2-7 機場捷運 CA450A 標基礎混凝土溫度量測點	135
圖 4.2-8 機場捷運 CA450A 標基礎混凝土溫度發展曲線	135
圖 4.2-9 台電林口電廠鍋爐房基礎混凝土表心溫各組溫度埋設點	136
圖 4.2-10 台電林口電廠鍋爐房基礎混凝土表心溫各組溫度發展曲線	136
圖 4.2-11 中聯資源台北港筒槽大底基礎混凝土表心溫各組溫度埋設點	137
圖 4.2-12 中聯資源台北港筒槽大底基礎混凝土各組溫度發展曲線	137
圖 4.3.2-1 約克大學計算機科學大樓【107】	142
圖 4.3.2-2 約克大學計算機科學大樓高飛灰量混凝土與傳統混凝土強度發展【107】	143

圖 4.3.2-3 溫哥華御景灣高層公寓大樓[108].....	144
圖 5.3-1 安定化 3 小時之電弧爐氧化矽砂漿第一次熱壓膨脹試驗後之照片	158
圖 5.3-2 安定化 3 小時之電弧爐氧化矽砂漿棒第二次熱壓膨脹試驗後之照片	158
圖 5.3-3 安定化 6 小時之電弧爐氧化矽砂漿第一次熱壓膨脹試驗後之照片.....	158
圖 5.3-4 安定化 6 小時之電弧爐氧化矽砂漿第二次熱壓膨脹試驗後之照片.....	159
圖 5.4.1-1 各膠結材取代量初終凝	160
圖 5.4.2-1 各膠結材取代量水合熱	161
圖 5.4.3-1 熱壓膨脹試驗結果	161
圖 5.5.2-1 抗壓強度 210 kgf/cm ²	168
圖 5.5.2-2 抗壓強度成長率 210 kgf/cm ²	168
圖 5.5.2-3 抗壓強度 280 kgf/cm ²	169
圖 5.5.2-4 抗壓強度成長率 280 kgf/cm ²	169
圖 5.5.2-5 抗壓強度 350 kgf/cm ²	170
圖 5.5.2-6 抗壓強度成長率 350 kgf/cm ²	170
圖 5.5.2-7 抗壓強度 350 kgf/cm ² (SCC)	171
圖 5.5.2-8 抗壓強度成長率 350 kgf/cm ² (SCC)	171
圖 5.5.2-9 抗壓強度 420 kgf/cm ²	172
圖 5.5.2-10 抗壓強度成長率 420 kgf/cm ²	172
圖 5.5.3-1 各膠結材料種類靜彈性模數	173
圖 5.6.1-1 抗硫酸鹽試驗	175
圖 5.6.3-1 設計強度 350 kgf/cm ² 潛變圖	178
圖 5.6.3-2 設計強度 420 kgf/cm ² 潛變圖	178
圖 6.1.1-1 試體鋼筋配置圖(單位: mm)	185
圖 6.1.2-1 試驗配置圖(單位: mm)	186
圖 6.1.2-2 試體位移歷時	187
圖 6.1.3-1 位移量測系統配置圖(單位: mm)	188
圖 6.1.3-2 試體 S_C 位移量測系統配置情形	188
圖 6.1.3-3 應變計配置圖(單位: mm)	189

圖 6.1.4-1 混凝土溫度發展量測位置	190
圖 6.2.1-1 試體養護環境溫溼度圖	192
圖 6.2.1-2 試體混凝土圓柱試體強度趨勢	192
圖 6.2.2-1 鋼筋拉伸試驗實際測試情形	193
圖 6.2.2-2 試體 S_C、試體 S_IS(<70)(MS) S、試體 IP(HS-LH)鋼筋試片應力應變曲線	194
圖 6.2.2-3 試體 S_SF50 鋼筋試片應力應變曲線	195
圖 6.2.3-1 試體 S_C 溫度發展曲線	197
圖 6.2.3-2 試體 S_C 最高溫及表心溫差曲線	198
圖 6.2.3-3 試體 S_SF50 溫度發展曲線	198
圖 6.2.3-4 試體 S_SF50 最高溫及表心溫差曲線	198
圖 6.2.3-5 試體 IS(<70)(MS)溫度發展曲線	199
圖 6.2.3-6 試體 IS(<70)(MS)最高溫及表心溫差曲線	199
圖 6.2.3-7 試體 IP(HS-LH)溫度發展曲線	199
圖 6.2.3-8 試體 IP(HS-LH)最高溫及表心溫差曲線	200
圖 6.3-1 試體 S_SF50 白漆與網格繪製情形	200
圖 6.3.1-1 試體 S_C 載重-層間位移角曲線	202
圖 6.3.1-2 試體 S_C 試驗照片	203
圖 6.3.2-1 試體 S_SF50 載重-層間位移角曲線	204
圖 6.3.2-2 試體 S_SF50 試驗照片	205
圖 6.3.3-1 試體 S_IS(<70)(MS)載重-層間位移角曲線	207
圖 6.3.3-2 試體 S_IS(<70)(MS)試驗照片	208
圖 6.3.4-1 試體 S_IP(HS-LH)載重-層間位移角曲線	209
圖 6.3.4-2 試體 S_IP(HS-LH)試驗照片	210
圖 6.4-1 測試-預測強度與極限層間位移角關係	212
圖 6.4-2 試體 S_IS(<70)(MS)案例	212
圖 6.4.1-1 單元曲率計算	214
圖 6.4.1-2 平均曲率變化趨勢圖(單位:mm)	215
圖 6.4.1-3 不同層間位移角下各層曲率比較	216



圖 7.3-1 AHP 層級結構圖	226
圖 7.3-2 項目權重值	227



第一章 緒論

1.1 計畫背景

氣候變遷為當前全球面臨到最嚴重的挑戰之一，全球各國也都體認到政府及民間應合作，共同建構一個有效率的全球低碳經濟體，有鑑於此，交通部 99 年度所訂定的 2 大施政主軸之一「建構綠色運輸系統全面推動節能減碳交通建設與服務，而道路交通建設在運轉階段的最大耗能來源即為道路交通設施，因此綠色材料應用於快速道路橋樑結構，為符合「建構綠色運輸系統」的政策方向。

台灣地區經濟快速成長，對於快速道路橋梁運輸系統的需求與品質亦逐年提高，但因處於地震好發區域，強震對於橋梁安全構成危害將造成大眾生命財產的損失，因此維護道路橋梁結構工程之安全性，為橋梁設計之首要考量。綠色材料在使用前，需考量應用綠色材料所製作之結構體在其生命週期中可能面對的問題，例如完工後結構體可能受到自然條件改變(沖刷、地震)或由於人為因素(超載、人為建設)等所造成橋梁結構與設計當時的條件產生相當大變化等情形，而綠色材料應用是否會影響橋梁之安全性及適應服務期間環境條件改變等問題，均是實務與學術界所欲探討之重要課題，以支持達到「建構綠色運輸系統」的政策方向。

目前可應用於道路鋪面工程的再生材料個案中，以道路刨除料(可應用於再生瀝青混凝土)、高爐爐渣、煉鋼爐渣、廢玻璃(砂)、廢陶瓷、電廠灰渣及焚化爐灰渣等七項為主，惟因道路橋梁結構方面應用綠色材料的實務研究仍有不足，故需加強相關可行性分析研究。

本研究擬分析綠色材料應用於快速道路橋梁結構的可行性及節能減碳效益目標，藉由文獻蒐集與分析以整理道路橋梁結構工程能耗問題與降低生命週期中結構材料能耗之方法，依據不同型式橋梁結構需求，篩選可能應用於橋梁結構的綠色材料、分析綠色材料應用對道路橋梁結構物的性質影響、適合的結構工法及應用於工程實務的可行作法，再評估相關經濟效益與節能減碳成效，以提供相關主管機關編撰道路橋梁結構設計工作的有效參考資訊。



1.2 計畫目的

1.回顧綠色材料應用於道路橋梁結構工程之相關文獻

針對國內及國外相關文獻作廣泛的蒐集與回顧，包括道路橋梁結構體的使用性、安全性、經濟性及生態性等各個面相分析，探討道路橋梁結構使用綠色材料能耗與提升工程效率之方法。

2.了解不同橋梁結構搭配綠色材料可行性

針對不同類型橋梁結構與綠色材料特性，探討可能面對的結構安全性、材料經濟性組成與佈設方式，了解維持用路人交通安全所需的結構穩定性、使用性及對周遭自然環境產生的生態改變。

3.評估綠色材料作為道路橋梁材料對結構強度影響及環境適應性

依據不同類型橋梁型式會對其結構體有不同的強度及環境適應性要求，本研究將探討綠色材料應用作為橋梁結構材料時，對結構強度影響及評估其環境適應性。

1.3 委辦工作項目及內容

- 1.文獻蒐集整理分析。
- 2.分析不同綠色材料配比應用於道路橋梁上環境與耐久性。
- 3.分析國內外橋梁結構耗能提升穩定效能與節能減碳效果。
- 4.評估使用綠色材料後結構安全性、材料經濟性、組成及與佈設可行性。
- 5.評估綠色材料之道路橋梁結構對環境與結構強度關聯性分析。
- 6.綠色材料應用於道路橋梁結構之經濟效益與結論。

1.4 研究範圍

有關本計畫之研究範圍界定如下：

1. 文獻蒐集整理分析

文獻蒐集包含政府於綠色材料應用之政策推動、綠色材料的種類及應用探討、橋梁結構使用綠色材料之案例、國內外規範對使用高爐石粉與飛灰使用量限制及橋樑設計規範對混凝土的限制。

本計畫所稱高爐石粉係適用 CNS 12549 混凝土及水泥砂漿用水淬高爐爐渣粉，以下簡稱高爐石粉。飛灰係適用 CNS 3036 混凝土用飛灰及天然或煨燒卜作嵐攪和物，以下簡稱飛灰。混合水泥係適用 CNS 15286 水硬性混合水泥，以下簡稱混合水泥。輕質粒料適用 CNS 3691 結構混凝土用之輕質粒料，以下簡稱輕質粒料。電弧爐氧化渣適用 經濟部事業廢棄物再利用管理辦法編號十四電弧爐電鋼爐渣(石)之氧化渣(石)，以下簡稱電弧爐氧化渣或氧化渣。

2. 分析不同綠色材料配比應用於道路橋樑上環境與耐久性

本項主要研究對象為橋梁結構，因業主機關主辦工程多位於沿海地區，故環境與耐久性之研究主要探討研究文獻及各機關對於各不同侵蝕環境的混凝土耐久性規定，包含硫酸鹽侵蝕及氯鹽侵蝕，並佐以過往研究文獻及試驗探討混凝土添加不同比例的高爐石粉、飛灰或混合水泥時其耐久性試驗之成果

3. 分析國內外橋梁結構耗能提升穩定效能與節能減碳效果

本工作項目研究範圍界定為兩大部分，一為橋梁結構能耗及節能減碳，從過往文獻中探討營建工程生命週期中各階段的二氧化碳排放量所佔比例，再拆分各主要建材的二氧化碳排放係數，確認最有效的減排方式；二為橋梁結構的穩定性，因橋梁結構主要以混凝土為主，而混凝土的穩定性在於乾縮、潛變及水合熱，故本研究特蒐集國內工程應用案例及量測結果，先行瞭解添加綠色材料對結構穩定之影響。

4. 評估使用綠色材料後結構安全性、材料經濟性、組成與佈設可行性

本工作項目之結構安全性，主要研究添加不同比例高爐石粉、飛灰及混合水泥的各項材料性質及混凝土性質，如各齡期的強度；材料經濟性主要依所設計強度的混凝土其材料市場單價，計算材料成本，來探討添加不同比例高爐



石粉及飛灰的成本差異；組成及佈設可行性，則主要規劃不同高爐石粉及飛灰比例的縮尺寸柱試驗，以實際工程狀況之模擬，來確定使用綠色材料在結構行為上的可行性。

5. 評估綠色材料之道路橋梁結構對環境與結構強度關聯性分析

本工作項目綠色材料於道路橋梁的環境關聯性分析係針對使用不同比例高爐石粉及飛灰混凝土之抗環境侵蝕的耐久性性質，所規劃進行之試驗項目包含抗硫酸鹽、乾縮及潛變試驗。另綠色材料與橋梁結構關聯性分析部分，則依常用結構柱的設計強度，規劃不同高爐石粉及飛灰比例的縮尺寸柱，養護 90 天齡期進行結構試驗，探討不同柱的結構行為。

6. 綠色材料應用於道路橋梁結構之經濟效益與結論

本工作項目在彙整前項試驗結果，套入所調查的材料單價及二氧化碳排放係數，作綜合的經濟分析與節能減碳分析。並以 AHP 層狀分析模式，比較不同綠色材料添加比例的差異性，歸納入建議方案，作為後續工程機關採用綠色材料之參考。



委辦工作項目與報告對應章節內如如表 1.4-1。

表 1.4-1 計畫工作項目執行方法及報告對應章節內容

項次	工作項目	計畫報告對應章節
1	文獻蒐集整理分析	2.1 工程綠色內涵政策推對 2.2 綠色材料分類及探討 2.3 綠色材料運用於橋梁結構之發展 2.4 國內外混凝土規範對高爐石粉飛灰之使用限制 2.5 橋梁設計規範對混凝土限制
2	分析不同綠色材料配比應用於道路橋梁上環境與耐久性	3.1 環境因素對綠色材料性質之影響 3.2 綠色材料於台灣道路橋梁環境之耐久性探討
3	分析國內外橋梁結構耗能提升穩定效能與節能減碳效果	4.1 綠色材料結構能耗 4.2 綠色材料結構穩定性 4.3 綠色材料節能減碳評估
4	評估使用綠色材料後結構安全性、材料經濟性、組成與佈設可行性	5.1 綠色材料配比規劃 5.2 試驗規劃 5.3 氧化矽安定化試驗 5.4 膠結材料試驗與分析 5.5 混凝土試驗與分析 5.7 綠色材料功能安全性評估 6.1 快速道路定義 6.2 結構柱試體規劃 7.1 綠色材料經濟效益評估
5	評估綠色材料之道路橋梁結構對環境與結構強度關聯性分析	5.6 耐久性試驗與分析 6.3 試驗結果分析 6.4 試體測試結果 6.5 試體強度與變形能力 7.2 綠色材料節能減碳效益評估
6	綠色材料應用於道路橋梁結構之經濟效益與結論	7.1 綠色材料經濟效益評估 7.3 綠色材料綜合評估與最佳設計方式建議 8.1 結論 8.2 建議

依工作進度與成果彙整於各階段工作報告中。



1.5 計畫預期成果

1. 期初：整理文獻分析國內外道路橋梁結構工程使用綠色材料之現況，及對周圍環境影響與使用的耐久性等問題。
2. 期中：分析國內外道路橋梁使用綠色材料結構能耗與提升穩定效能之方案，以及節能減碳效果，亦可試驗評估使用綠色材料後結構安全性、材料經濟性、組成與佈設方式等可行性。
3. 期末：提出使用綠色材料道路橋梁結構之經濟效益與結論。

1.6 計畫執行效益

1. 降低新建、改建及修建道路橋梁結構使用一般材料所產生對環境的影響。
2. 增加橋梁結構可運用的綠色材料項目、配比設計方式及合適的橋梁結構工法。
3. 提供各道路主管機關道路橋梁結構工程設計使用綠色材料時，對結構強度影響及環境適應性等相關資訊。
4. 提出綠色材料應用於道路橋梁結構的經濟效益與節能減碳成效。

1.7 工作流程

本計畫整體工作共區分 6 大項，包括(一)文獻蒐集整理分析、(二)調查分析現有各種不同綠色材料配比強度與耐久性及應用於道路橋梁上對周圍環境影響、(三)分析國內外道路橋梁使用綠色材料結構能耗與提升穩定效能之方案，與節能減碳效果、(四)評估使用綠色材料後的結構安全性、材料經濟性、組成與佈設方式、(五)評估使用綠色材料之道路橋梁結構對應環境與結構強度關聯性分析、(六)綠色材料應用於道路橋梁結構之經濟效益與結論。本計畫規劃進度及成果依契約要求，展開分項工作與作業時程規劃如圖 1.7-1 所示。

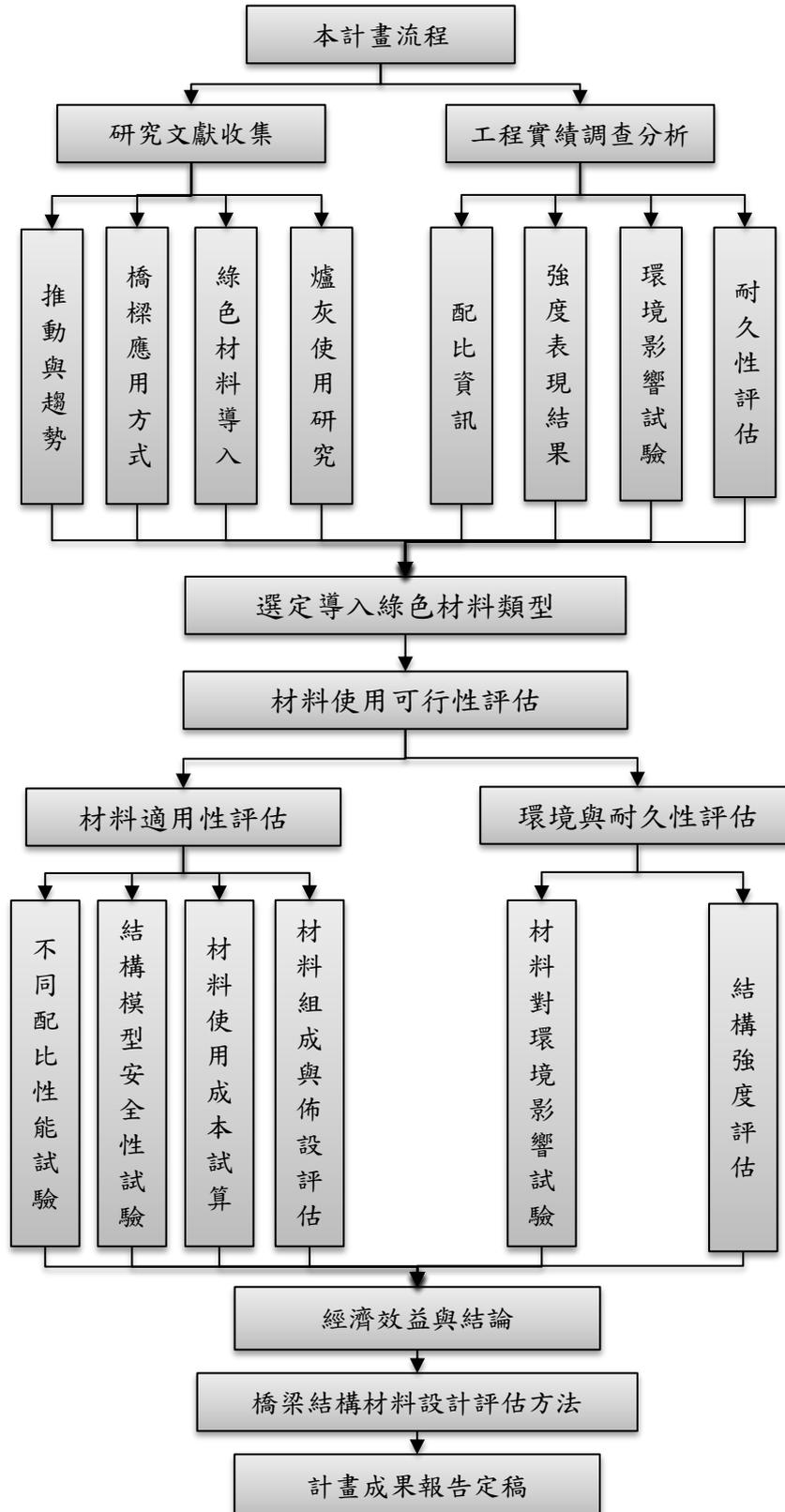


圖 1.7- 1 計畫作業流程

第二章 文獻蒐集整理分析

為共築有效率的全球低碳經濟體，國內道路橋梁建設依據交通部所訂定的「建構綠色運輸系統」施政主軸，導入適用的綠色材料組成，以達節能減碳之政策目標。本計畫針對道路橋梁結構使用綠色材料的可行性，以評估經濟效益與節能減碳為主軸，故參考工程會在水利工程綠色材料選用指標的分類，採飛灰或水淬高爐爐渣粉(以下簡稱高爐石粉)作為替代性材料，將有助降低材料使用過程的二氧化碳排放。此外，國外對於飛灰或高爐石粉的使用趨勢，已漸由嚴格設限添加比例，朝向以性能導向的設計方式，放寬飛灰及高爐石粉添加量的添加比例，例如 CNS 15286 之水硬性混合水泥，其工程實績效益比飛灰高爐石粉於預拌廠外添加更能符合工程功能需求。國內預拌混凝土廠雖然對於高爐石粉及飛灰的品質管控較以往已有明顯進步，仍宜規範使用比例、添加方式及組合料(水泥外摻高爐石粉與飛灰)物化性檢驗，至於使用比例則可由國內外之研究文獻、技術規範及試驗成果加以驗證，此為本計畫之重點。

計畫團隊對於道路橋梁結構的綠色材料選用評估，以「技術成熟、具應用實績，能突顯機關推動績效」的理念出發，將對飛灰與高爐石粉取代水泥的方式，包括飛灰及高爐石粉混用或個別添加與混合水泥，蒐集國內外使用實例，以掌握技術發展趨勢，並建立工程實績調查與分析的基礎，以下分別從政府對綠色材料推廣之政策趨勢，分析不同橋樑可能用到之綠色材料及對各種應用方式，探討目前技術發展之現況。

2.1 工程綠色內涵政策推動

2.1.1 行政院公共工程委員會

為振興國內經濟發展，擴大國內需求並加速國內經濟結構轉型及升級，行政院自 98 年起推動「振興經濟擴大公共建設投資計畫」[1]，辦理擴大公共建設投資，以提振及穩定經濟景氣，促進就業。期間同時面臨全球暖化與氣候變遷之問題，永續經濟的概念變成為國際競相發展的趨勢。同樣地，台灣亦無法置外於全球的體系，隨著四年 5,000 億振興經濟擴大公共建設投資計畫的推展，同步要落實節能減碳的執行，工程會亦於同年函送「振興經濟擴大公共建設投資計畫落實節能減碳執行方案」[2]，將節能減碳原則納入公共工程設計中，推動使用包括環境、工法、材料及能源等四大項的綠色內涵。其中，在「振興經濟擴大公共建設



投資計畫」共 64 項投資個案中，道路工程佔總體工程建設總經費 30% 以上，係為國內工程推動節能減碳目標之關鍵。依「振興經濟擴大公共建設投資計畫落實節能減碳執行方案」內的具體措施，對道路橋梁工程綠色內涵的闡釋，包括採用環保標章產品及環保署認定之可再使用材料，或個案工程計畫時，依其特性選擇表 2.1.1-1 中項目作為評估指標，公共工程落實綠色採購之具體作法，如表 2.1.1-2 所示。

打造具節能減碳效果之公共工程，落實環境保護，將公共建設提昇為子子孫孫的文化資產，並協助國內綠色產業發展，增進國內綠色能源產業競爭力，其政策如下：

1. 具體落實節能減碳政策

將行政院核定之「節能減碳無悔措施全民行動方案」、「永續能源政策綱領」及「永續公共工程—節能減碳政策白皮書」內容，具體落實於振興經濟擴大公共建設中。

2. 營造綠色產品內需市場

公共工程優先考量採用再生能源、節約能源或再生利用、綠建材等綠色環保產品、設備，並配合「綠色能源產業旭升方案」，以 LED 照明、太陽光電等國內主力產業為推動重點。

3. 鎖定重點工程落實推動

軌道、道路橋梁、水利、建築等四類工程，總經費約 80%，故以此四類工程為現階段加強落實推動之對象。



表 2.1.1-1 道路橋梁工程綠色內涵指標[2]

選用標的	指標	說明
綠色環境	生態 (景觀、綠化)	綠美化環境、延伸道路綠帶範圍、植生保護、採自然排水系統、生態池、生物廊道、施工棧橋及平台設計等。
	保水	設置滯洪池、沉砂池，排水系統考量減低對下游水路逕流之負荷，並提升地下水源含氧效益等。
	隔音	隔音牆設置等。
綠色工法	減廢(效率)	減少棄土、土石方回收再利用、自動化施工、可回收鋼材(含鋼模板等)、廢材再利用等。
	減量	減量設計等。
	延壽	補強設計等。
綠色材料	綠色瀝青混凝土	期達到營建資材再生利用之效益及紓解砂石資源短缺之問題。
	綠色混凝土	減少本工程使用水泥量，並降低生產水泥所耗費之能源及 CO ₂ 的產出。
綠色能源	再生能源系統	優先評估使用太陽能光電系統、太陽能熱水系統，至於風力發電系統、沼氣利用系統等視個案性質而定。
	節約能源設備	儘量使用取得節能標章之高效率空調設備及照明燈具、LED 應用產品。

表 2.1.1-2 綠色內涵具體作法[2]

綠色內涵	具體作法
綠色環境	<ol style="list-style-type: none"> 1. 最小營建規模，資源最佳化利用。 2. 發揮創意，創造節能減碳環境，如建築物利用自然採光、通風設計，排水系統儘量採重力排水等。 3. 注重環境友善，以「迴避、減輕、補償」等生態工程原則，減少對原有生態環境的衝擊。
綠色工法	<ol style="list-style-type: none"> 1. 因地制宜，選擇適當工法，優先採用可節省資材、能源或低耗能、減少廢棄物、施工自動化之工法及措施。 2. 拆除構材再利用，土方平衡減少外運，剩餘土石方資源化。
綠色材料	<ol style="list-style-type: none"> 1. 考量需求性及最佳化配置，優先採用再生能源、節約能源、低污染、省資源、再生利用、可回收、綠建材等綠色環保產品、設備。
綠色能源	<ol style="list-style-type: none"> 1. 公共工程在充分考量工程地點、結構型式等因素下，優先評估使用再生能源發電系統及節約能源設備，尤以太陽能發電系統及 LED 照明燈具為推動重點。



援此，工程主辦機關為配合工程會之節能政策之要求，釐清道路橋梁建設與環境相關匹配性，國內工程機關開始針對生態工法設計準則、照明對農作物及生態之影響及道路建設各生命週期可能衍生的環境議題進行研究，藉以歸納建立規劃、設計及養護等階段相關設計準則。

針對道路橋梁結構綠色內涵之推動，多強調應尊重原有地形，在自然環境生態較佳處，為維持原有環境之永續性，又因橋梁施工方法日新月異，對環境之衝擊層面亦有別於傳統的路堤式設計及施工方式，且需注意規劃設計時所應考量之各項設計原則，如橋梁本身造型、顏色與自然協調性、施工注意環境汙染、施工順序、橋墩座落位置及橋台位置等。

茲蒐集橋梁結構綠色內涵項目與國內外應用實例彙整如表 2.1.1-3。

表 2.1.1-3 道路橋梁結構綠色內涵項目與實例

類別	綠色內涵設計手法	案
設計	單柱單斷面	國道五號石碇高架橋。
	大跨徑設計	(1) 台四線崁津大橋。 (2) 台三線景山橋。 (3) 國道三號瑪陵橋。 (4) 國道三號九如段斜張橋。 (5) 日本管原城北大橋。 (6) 日本一般國道第 329 號。
	鋼橋橋梁	國道一號汐五高架橋北上高架段。
	動物移動橋梁	(1) 日本九州橫斷道路。 (2) 美國佛羅里達州, Interstate75。
	減少開挖量	-
工法	預鑄	(1) 美國 Linn Cove 高架橋。 (2) 美國科羅拉多州 I-70 公路。
	懸臂式平衡節塊推進	美國科羅拉多州 I-70 公路。
	支撐先進	國道五號石碇高架橋。
	系統模板	國道一號汐五高架橋-北上高架段。
材料	使用舊有梁	台十三線后豐大橋。
	輕質混凝土	國道六號南投段。
	高強度鋼筋	-
	高性能混凝土	國道一號五楊高架段。
	預拌砂漿與混凝土	-

資料來源：本計劃整理



2.1.2 交通部

交通部在法制面則透過公共工程審議制度再造、政府採購及促進民間參與公共建設相關法規的全面檢討，塑造節能減碳的制度環境，鼓勵機關與民間積極參與與落實，並於 99 年五月頒布「減能減碳規劃設計參考原則」[4]，其中包含「一般道路」、「高快速公路網」、「捷運系統」、「桃園航空城」、「自行車路網」提出節能減碳規劃設計參考原則。本計畫往來對象適用於快速道路工程，故就其中「高快速公路網」相關節能減碳規劃設計原則與措施彙整如下。

一、規劃設計參考原則

(一).營造綠色環境

- 1 應檢討計畫目標年實際需求，考量最小開發規模或採輕量設計，並依因地制宜、就地取材等原則，應用高效能、自然或再生營建材料，資源最佳化利用，達到減少二氧化碳排放量。
- 2 妥善進行環境設計，保護自然生態環境、注重環境友善，以「迴避、減輕、補償」等生態工程方式，減少對原有生態環境之衝擊。
- 3 工程施作時，現況環境將面臨道路整地、高架橋落墩等無可避免干擾影響，應盡量避免過度擾動現況植生環境，應多採「高架棧橋」、「高架構台」、「路肩」或是「路外地方道路」作為施工便道，採最小干擾之措施減低對現地環境之不良影響，以維持工程範圍內現有植物的最佳保存。
- 4 若施工過程遇到無可避免的干擾行為，應依植栽之景觀生態價值、存活率考量移植可行性及綠資材回收等措施，進行植栽保存或資源再利用處理。此外，於路權範圍內亦應進行景觀綠美化，並儘量採用原生物種進行植生綠化，以減少對原有生態環境的衝擊。
- 5 施工擾動區範圍內，尤其是現況林相豐盛區段，其表土中大多具有豐富的種子庫及有機質，經由表土保存與再利用的作法，可加速擾動區植栽的自然回復能力。
- 6 採用綠色資材，以生物沃土、土地種子庫優勢，加速新植植被快速回復，促使植栽生長速度及品質提升。另工程擾動區內不適移植樹種，經清除及



掘除過程後，將絞碎的枝葉混入表土增加孔隙度、保水度、土壤肥力，另將樹幹作為木樁生態池護岸綠資材及臨時水土保持措施之資材，或有效運用於主線路段週邊作為生態棲地復育的溫床，以供昆蟲以及各式生物利用。

(二).採用綠色工法

- 1 因地制宜，選擇適當工法，優先採用可節省資材、能源或低耗能、減少廢棄物、施工自動化之工法及措施。
- 2 使用節能減碳之工法及機具，採用自動化施工方式或是高效率的機具設備，非但能提高施工速率、節省經費，亦能減少施工過程中所排放之二氧化碳。
- 3 對於工地所使用的照明、運輸、用水、供電等臨時設施應採用節能減碳之設備，將能源作最有效之利用。
- 4 營建廢棄物再利用，土方平衡減少外運，剩餘土石方資源化。
- 5 減少邊坡開挖，以降低施工對工址環境之影響，使得長期已穩定的邊坡不受施工擾動，維持原有邊坡穩定並使得周遭環境受到保護。

(三).選用綠色材料

1 綠色混凝土：

透過添加卜作嵐材料（高爐石粉、飛灰）等再利用資源材料，以取代部份水泥，減少本工程使用水泥量，並降低生產水泥所耗費之能源及CO₂的產出，達到節能減碳及節約能源之效。

2 綠色瀝青混凝土：

回收再利用路面養護刨除之瀝青混凝土，以達到營建資材再生利用之效益及紓解砂石資源短缺之問題。

3 節能產品：

考量需求性及最佳化配置，優先採用再生能源、節約能源、低污染、省資源、再生利用、可回收等綠色產品，如LED照明、太陽光電系統及太陽能熱水系統。



二、節能減碳經費計算原則：下列各經費計算方式皆可納入綠色內涵中。

(一).綠色環境

- 1 生態（景觀、綠化）：綠美化環境、延伸道路綠帶範圍、植生保護、綠資材回收再利用採自然排水系統、生態池、生物廊道、施工棧橋及構台設計等。【計算原則】：相關費用全部納入計算。
- 2 保水：設置滯洪池、沉砂池、草溝、碎石溝等，排水系統考量減低對下游水路逕流之負荷，並提升地下水源涵養效益、增加生物棲地。【計算原則】：相關費用全部納入計算。
- 3 防音設施：沿線隔音牆、隔音板、住戶隔音窗設置等。【計算原則】：相關費用全部納入計算。

(二).綠色工法

- 1 減廢（效率）：減少棄土、土石方回收再利用、自動化施工、可回收鋼材（含鋼模板等）、廢材再利用等。

(1). 減少棄土、土石方回收再利用

【計算原則】：剩餘土石方採公共工程土方交換方式者全數納入計算。

(2). 混凝土橋採自動化施工

【計算原則】 = 上部結構造價之30%（人機費用）× γ （工法自動化係數）。

a. 預鑄節塊吊裝工法： $\gamma = 1.0$

b. 支撐先進工法： $\gamma = 0.9$

c. 場鑄節塊懸臂工法： $\gamma = 0.8$

d. 場鑄逐跨架設工法： $\gamma = 0.5$

(3). 可回收鋼材

【計算原則】：可回收鋼材殘值納入計算。

(4). 廢材再利用

【計算原則】：所利用廢材工程造價納入計算。



2 減量：即減量設計，採用較高強度材料或隔減震設施，使橋梁下部結構尺寸減小。【計算原則】：採用較高強度材料，提升混凝土設計強度，減少量體。

$$(1). \text{綠色混凝土價} = \text{原混凝土價} \times R$$

$$(2). R = \text{換算減少之量體比}$$

$$(3). \text{強度比 } \alpha = \text{新設計強度} \div \text{傳統設計強度}$$

(三). 綠色材料

1 綠色混凝土：透過添加卜作嵐材料（高爐石粉、飛灰）等再利用資源材料之綠混凝土，減少工程使用水泥量，並降低生產水泥所耗費之能源及CO₂的產出，以達節能減碳及節約能源之效。【計算原則】：依據使用添加卜作嵐材料之替代率計算減碳比 β ，綠色混凝土價為添加卜作嵐材料（飛灰、高爐石粉）之混凝土造價乘以減碳比 β 。

$$(1). \text{綠色混凝土價} = \text{原混凝土價} \times \beta$$

2 綠色瀝青混凝土：期達到營建資材再生利用之效益及紓解砂石資源短缺之問題。【計算原則】：再生營建資材相關費用全部納入計算。

3 光電節能產品：採用LED、太陽能之燈具及設施。【計算原則】：相關費用全部納入計算。

三、營運管理節能減碳參考原則

(一). 營運收費自動化

1. 參考原則：

高速公路局為減少車輛通過收費站因減速、停等、加速，而耗損時間、燃油、車輛、紙張等，推動電子收費系統(ETC)，以提升運輸效率。

2. ETC 節能減碳計算方式：

有關ETC 節能減碳之計算，係分別以大、小型車兩類，探討ETC車輛通過收費站所節省之燃油、行車時間及溫室氣體(CO₂)排放量等。高公局依據交通部運輸研究所估算結果，得到大、小型車通行ETC 車道對於時間、燃油及減少CO₂之效益數據(如表2.1-4)，同時考量自95年至今之平均

油價水準，將小型車每公升燃油價值訂為27元/公升、大型車23元/公升作為節能減碳計算基準。

表 2.1-4 ETC 通行效益

項目 \ 車種時段	小型車		大型車	
	尖峰	離峰	尖峰	離峰
節省時間(min)	3	0.5	3	0.5
節省燃油(cc)	35	10	60	15
減少CO ₂ 排放(g)	80	20	160	40

資料來源：交通部運輸研究所

(1).旅行時間減少：

$$\text{旅行時間(min)} = \text{ETC 交通量} \times \text{節省時間} \times \text{尖離峰比例}$$

(2).節省燃油：

$$\text{燃油(公升)} = (\text{ETC 交通量} \times \text{節省燃油} \times \text{尖離峰比例}) / 1000$$

(3).節省CO₂ 排放：

$$\text{CO}_2 \text{ 排放量(公噸)} = (\text{節省燃油數量} + \text{回數票節省數量}) / 1000$$

$$\text{CO}_2 \text{ 排放量價值(元)} = [\text{CO}_2 \text{ 排放量(公噸)}] \times \text{每公噸碳交易價格}$$

※每公噸碳交易價格以1,053 元(台幣)為計算基準

(二).交通管理智慧化

1.參考原則：

高速公路局為使人、車、路系統，能夠即時化、資訊化、通信化，推動智慧型運輸系統(ITS)，建置高快速公路整體路網交通管理系統，以提升運輸效率，減少燃油。

2.辦理情形：

高(快)速公路路網推動智慧型運輸系統建置已於99年底完成，完成後可達成下列目標：

- (1). 蒐集與監控交通狀況，掌握即時路況資訊，實行各種交通管理策略，以縮短行車時間並確保安全。

- (2). 發佈即時交通資訊，提供駕駛人瞭解目前的車流狀況及交管措施，作為行車的參考。
- (3). 降低交通壅塞，減少二氧化碳排放量。
- (4). 提昇運輸效率，減少能源消耗。
- (5). 大量使用資源可再回收HDPE管材及低消耗電力LED資訊顯示板、燈號等。

2.1.3 內政部建築研究所

建築生命週期包括設計、施工、使用、拆除及再利用。綜觀而論，建築物是一種高耗能、破壞生態，且對於長時間活動於期間的人們影響最深之產業。據內政部建築研究所 88 年「建築室內環境保健綜合指標之研究」[5]成果，空氣環境影響因子中建材相關要項達一半以上，顯見建材對人體健康影響之鉅。而建築構材在製造過程中為了性能考量，經常添加各種化學物質以達硬化、膠合及防腐等作用，致房屋裝修完成後，這些化學物質隨著時間和溫度變化大量地逸散於空氣中影響室內環境品質。而綠建材標章制度之建立，即在有效評斷並整合建材之健康、生態、再生、高性能資訊，以提供民眾選用材料時之依據。

綠材料的概念於 1988 年第一屆國際材料科學研究會上首次提出。直到 1992 年國際學術界才為綠建材下定義：「在原料採取、產品製造、應用過程和使用以後的再生利用循環中，對地球環境負荷最小、對人類身體健康無害的材料，稱為綠建材。」目前國際間對於綠建材的概念，可大致歸納為以下幾種特性：再使用（Reuse）、再循環（Recycle）、廢棄物減量（Reduce）、低污染（Low emission materials）。基本上綠建材之優點如下：

- 一、生態材料：減少化學合成材之生態負荷與能源消耗。
- 二、可回收性：減少材料生產耗能與資源消耗。
- 三、健康安全：使用自然材料與低揮發性有機物質建材，可減免化學合成材之危害。

自 1977 年德國提出藍天使標章，二十五年來世界各國之建材與環保標章認證日臻完善。除藍天使標章外，目前世界上尚有許多綠建材相關標章如：芬蘭建材分



級、丹麥與挪威的室內氣候標章、歐盟生態標章、美國綠防護計畫、中國大陸的中國環境標誌、加拿大環保標章、日本環保標章與 JIS、JAS 對建材甲醛濃度之逸散量規定，以及最近推行之住宅品質確保促進法與住宅性能表示制度等。針對上述標章制度建研所進行綠建材認證類別分析，其認證類別可歸納為健康、生態、再生、高性能等四大方向。

一、健康綠建材：(1)低逸散；(2)低污染；(3)低臭氣。

二、生態綠建材：(1)抑制溫室效應；(2)抑制臭氧層破壞；(3)使用本土建築材料；(4)省資源、省能源。

三、再生綠建材：(1)再循環；(2)再利用；(3)廢棄物減量。

四、高性能綠建材：(1)耐久性佳；(2)不需維護；(3)高隔熱、高防音。

我國地狹人稠，大多數室內空間之使用均有人口密度極高之困擾。加上國人在建材使用上，不論生產、施工或使用皆有過量趨勢，造成許多新的室內污染源。為有效控制室內污染源，有必要研擬適用於國內本土化之綠建材認定要項與標準，並提出具體可行之管制措施以保護國民健康。國際間有關綠建材之研究，已將建材製造階段及室內環境品質等因子訂定基準評估值。因應我國加入 WTO，為防止不良建材進口，加強建材健康管制，並積極協助國內相關建材產業轉型，推動綠建材標章制度有其必要性與迫切性。

內政部建築研究所推動「綠建材標章制度」[6]，自民國 88 年起即進行相關建材逸散分析研究及相關建材檢測試驗設備建置，歷經周密之規劃研究與研擬，於民國 92 年開始籌畫台灣綠建材標章制度，歷經草創時期的努力，綠建材標章制度於民國 93 年 7 月正式上路，率先針對「健康」綠建材、「再生」綠建材兩類進行審查與標章核發，而技術部份則有綠建材「通則」以及「健康」、「生態」、「再生」、「高性能」等四類綠建材評定基準，民國 94 年起台灣綠建材標章全面開放受理申請，陸續推行多項鼓勵綠建材標章申請的措施與多方進行綠建材觀念之推廣宣導。

其中對「再生綠建材」定義為「利用回收材料，經過再製程序，所製造之建材產品，並符合廢棄物減量(Reduce)、再利用(Reuse)及再循環(Recycle)等 3R 原則製成之建材。」



在法規配套部分，建築技術規則規定第三百二十一條規定[7]，建築物應使用綠建材，並符合下列規定：一、建築物室內裝修材料、樓地板面材料及窗，其綠建材使用率應達總面積百分之四十五以上。但窗未使用綠建材者，得不計入總面積檢討。二、建築物戶外地面扣除車道、汽車出入緩衝空間、消防車輛救災活動空間及無須鋪設地面材料部分，其地面材料之綠建材使用率應達百分之十以上。

混凝土為建築材料之大宗，故建研所於「再生綠建材」中，訂定「綠混凝土」，供混凝土生產者提出申請[8]，其評定基準如表 2.1.3-1。

表 2.1.3-1 再生綠建材評定基準表

建材項目	可使用之回收材料	回收材料使用比率(重量百分比)	品質試驗項目及方法	特殊要求或分級規定	參照之標準或規範及備註
綠混凝土 (R類) green concrete	營建剩餘土石方、污泥、水庫淤泥、無害之無機性廢料如廢陶瓷、廢玻璃、高爐石粉、飛灰、石質下腳料等。	回收粒料佔總粒料之比率(重量) 20%以上	抗壓強度依 CNS 1232 之方法；氯離子滲透電量試驗依 CNS 14795 之試驗方法。	28天抗壓強度大於210 kgf/cm ² 56天氣離子滲透電量小於2000庫倫。	CNS 1232 CNS 14795
綠混凝土 (G類) green concrete	高爐石粉、飛灰及其他符合 CNS 3036 之卜作嵐攪和物等。	卜作嵐材料佔膠結材料(包含水泥和添加之卜作嵐材料之總重量)之 40%以上。			
綠混凝土 (H類) green concrete	高爐石粉、飛灰及其他符合 CNS 3036 之卜作嵐攪和物等。	卜作嵐材料佔膠結材料(包含水泥和添加之卜作嵐材料之總重量)之 50%以上。		高性能綠混凝土 56天抗壓強度大於420 kgf/cm ² 56天氣離子滲透電量小於2000庫倫。	

資料來源：內政部建築營建研究所【6】

2.2 綠色材料分類及探討

綜合前項政策對綠色材料之定義如表 2.2-1。另彙整環保署「事業廢棄物申報及管理資訊系統」[9]所統計國內事業廢棄物及可再生資源之產出量統計(如表 2.2-2)，探討可作為橋梁結構用綠色材料的類別，在需能滿足工程品質要求之最低限度下，應具備能節能減碳、再生利用、能減少水泥用量、無污染性之特點，作為本研



究之標的。

表 2.2-1 綠色材料定義彙整

機關	指標	內容	
工程會	綠色材料	考量需求性及最佳化配置，優先採用再生能源、節約能源、低污染、省資源、再生利用、可回收、綠建材等綠色環保產品、設備。	
交通部	綠色材料	綠色混凝土	透過添加卜作嵐材料（高爐石粉、飛灰）等再利用資源材料之綠混凝土，減少工程使用水泥量，並降低生產水泥所耗費之能源及 CO ₂ 的產出，以達節能減碳及節約能源之效。
		綠色瀝青混凝土	回收再利用路面養護剷除之瀝青混凝土，以達到營建資材再生利用之效益及紓解砂石資源短缺之問題。
		光電節能產品	採用 LED、太陽能之燈具及設施。
內政部建研所	再生綠建材	利用回收材料，經過再製程序，所製造之建材產品，並符合廢棄物減量(Reduce)、再利用(Reuse)及再循環(Recycle)等 3R 原則製成之建材。	

資料來源：本計劃整理

表 2.2-2 全國 2012 廢棄物及可再利用資源物統計

項次	廢棄物/可再利用資源種類	年產出量(萬噸)
1	燃煤飛灰	538
2	高爐石粉	420
3	轉爐石	180
4	營建混合物	165
5	無機性污泥	146
6	電弧爐氧化渣	140
7	底灰	139
8	垃圾焚化廠焚化底渣	100
9	脫硫渣	42
10	電弧爐還原渣	40
11	有機性污泥	36
12	漿紙污泥	28
13	非有害廢集塵灰或其混合物	26

資料來源：環保署「事業廢棄物申報及管理資訊系統」【9】，本研究整理

針對道路橋梁結構的綠色材料使用，本計畫依市場技術能力的成熟度與工程實用經驗的提供，推廣使用策略採三階段的導入方式，細分為成熟型、驗證型與待開發型，分別介紹如下，以提供作為後續技術拓展的評估方向。

一、成熟型材料

所謂成熟型材料即表示不論材料或產品的特性皆已被精確掌握，相關產製或施工技術發展成熟，若將其應用在快速道路橋梁結構，需對材料結構的性質與外在環境影響進行評估後，將其回饋至材料結構設計中，以滿足道路橋梁結構設計要求。對道路橋梁結構屬成熟型的綠色材料，主要包括飛灰、高爐石粉及輕質骨材，其材料發展、應用情況與對混凝土品質之影響，如下說明詳 2.2.1 節。

二、驗證型材料

驗證型材料係指國外已有多年使用經驗與技術，國內卻無工程實績的材



料，經計畫團隊對國內各類廢棄物資源化推動的研究與分析，電弧爐煉鋼氧化渣(以下簡稱氧化渣)係屬該類型材料，日本針對氧化渣作為混凝土粒料使用已訂出標準可供依循(「JIS A 5011-4 混凝土爐渣骨材-電弧爐氧化渣骨材」[10])，國內依「經濟部事業廢棄物再利用種類及管理方式」[11](100年2月6日版)，氧化渣經安定化後可用於混凝土粒料及道路工程粒料，道路工程部份國家標準有CNS 15310瀝青鋪面混合料用鋼爐渣粒料作為規範，混凝土粒料部份則列於CNS 1240混凝土粒料第1.4節中，以可資源化再利用之固態一般事業廢棄物管制。有關氧化渣的材料性質及摻用混凝土之相關研究，詳2.2.2節。

惟本計畫進行期間，工業局於105年6月20修訂電弧爐渣再利用管理方式，已刪除混凝土粒料之再利用用途，故本計畫之氧化渣之相關試驗結果僅供參考，待未來更多研究驗證。

三、待開發型材料

針對道路橋梁結構適用的綠色材料，若僅在研究階段且國內外無工程實績，但具市場潛力的材料，將歸屬於待開發型材料。對此，計畫團隊依本計畫目的與效益，提出包括鹼激發材料、鋼渣水泥等，相關材料特性與適用性如2.2.3節說明。

2.2.1 成熟性綠色材料

國內混凝土中應用最成熟的綠色材料，以飛灰及高爐石粉為代表，其性質與相關混凝土研究成果如下說明。另輕質粒料原料來自水庫淤泥，具有質輕堅硬優點，國內亦有豐富之研究成果，並制定相關國家標準及施工規範以茲依循，故在此一併介紹。

2.2.1.1 飛灰

一、來源

台灣目前混凝土所用飛灰主要來自台電公司之火力發電廠及台塑的汽電共生廠，其所使用之燃料分為煤炭、石油及天然氣等；煤炭燃燒後所剩下的灰燼就是「煤灰」。以火力發電廠為例，由於燃燒的煤炭都先經磨成粉狀微粒，亦稱為微粉煤燃燒方式，燃燒後約有80%的灰燼會隨著燃氣上升，當煙

氣依照煙道流到靜電集塵器時，煙氣中全部的灰燼幾乎都被吸附下來，此部份的煤灰稱為「飛灰」，而另外一部份的煤灰粒徑較粗，重量較大，直接掉到鍋爐底部則稱為「底灰」。飛灰從集塵器底部灰斗，再以壓縮空氣輸送到灰倉，以供應外界提運利用。火力發電廠生產流程詳圖 2.2.1.1-1。

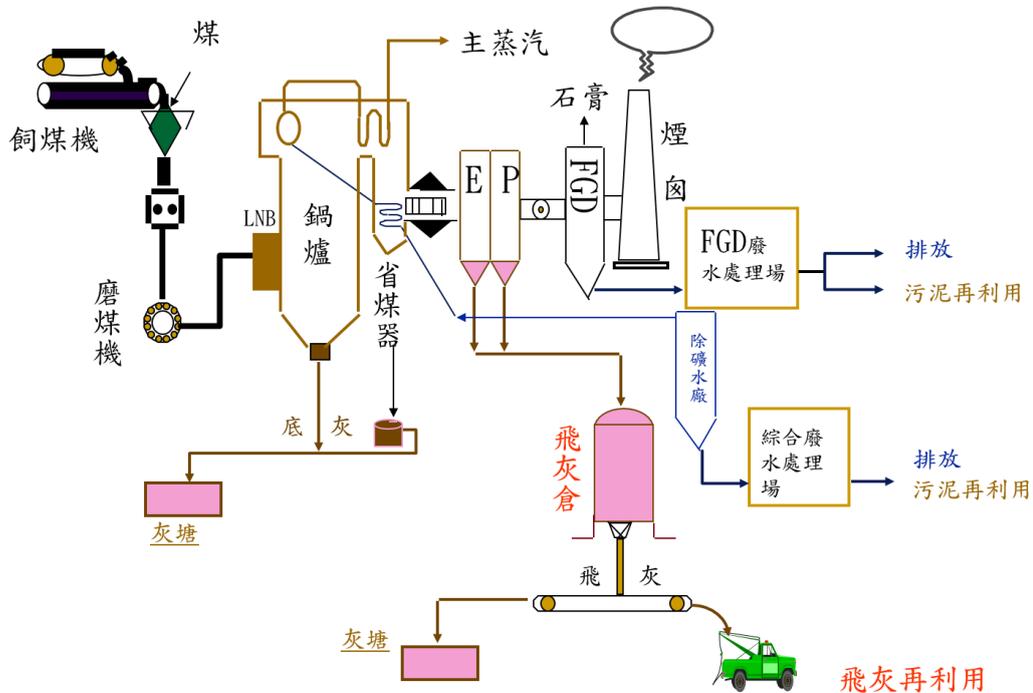


圖 2.2.1.1-1 火力發電廠生產流程【12】

二、市場供應量

飛灰係為燃煤發電機組在煤炭燃燒後所產生的煤灰的組成之一，依「經濟部事業廢棄物再利用種類及管理方式」規定，煤灰屬公告應回收或再利用廢棄物，產出及流向須至環保署「事業廢棄物申報及管理資訊系統」進行申報，其中產出事業單位(如火力電廠)及再利用單位(如預拌廠)都必須要上網勾稽申報，而清除業者的運輸車輛必須裝載 GPS 並登錄行車軌跡，已無棄置行為。全年度煤灰申報量可從環保署網站「事業廢棄物申報及管理資訊系統」查詢，申報代碼為「R-1101」(煤灰)，惟因應依照行政院環保署所公布之「因應煤灰再利用區分為飛灰及底灰運作管理，增修煤灰廢棄物代碼事宜。」，自 2015 年 1 月起飛灰與底灰將區分為不同之申報項目，「R-1106」(燃煤飛灰)及「R-1107」(燃煤底灰(或含燃煤飛灰之底灰))，以區別不同用途，而今年之過渡時期，仍可依原核准項目申報 R-1101 或 R-1106，故本報告統計時係綜整 R-1101、R-1106、R-1107 之總合，各年資料如表 2.2.1.1-1，包含了飛灰及底灰

申報量，由表 2.2.1.1-1 可知，目前平均煤灰年產出量超過 500 萬公噸。依過往研究文獻指出，火力電廠產出煤灰中飛灰與底灰產出比例約為 4:1，若以近五年平均煤灰申報量為 517 萬噸估算，推估飛灰申報使用量約 414 萬公噸。

表 2.2.1.1-1 西元 2007 年至 2013 年台灣煤灰產出量

年份	煤灰產出量(公噸)
2007	3,968,768
2008	4,333,549
2009	4,421,143
2010	5,058,264
2011	5,444,717
2012	5,580,691
2013	5,385,687

文獻來源：環保署(<http://waste.epa.gov.tw/prog/IndexFrame.asp>)【9】

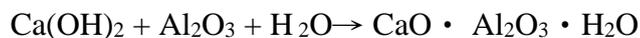
三、成份分析

飛灰的化學成分說明如下，一般規範之規定凡為最小值者，表示其成份愈高則顯現其品質愈佳；反之，凡為最大值者，代表該成份愈低，品質愈佳。

(一) SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3

規範對 F 類飛灰之 $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ 總百分率，要求其最小值為 70%，係因此三項化學成份具有影響混凝土品質之特性，如玻璃質 SiO_2 可與 CH (氫氧化鈣)發生反應，而形成 C-S-H 膠體，其反應如下：

$\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (glass) 同樣 Al_2O_3 亦有類似地反應，而形成 C-A-H 膠體，其反應如下：



(二) MgO 、 SO_3 與有效鹼

目前 CNS 3036 限制 MgO 最大值為 5%；惟目前新版的 ASTM C618 已取消這項規定；限制三氧化硫最大值為 5%，係為避免因其影響混凝土之強度與體積穩定性。至於有效鹼限制為 1.5%，乃為控制或避免鹼質與-粒料反應，造成混凝土膨脹。

(三) 燒失量

飛灰中含有燃燒未完全之碳粒，燒失量愈高顯示飛灰中的含碳量亦愈

高；其混凝土需水量也較高，對化學摻料的使用效果可能有不利影響。

飛灰的物理性質說明如下，物理性質之有關限制乃在確保混凝土使用飛灰時達到增進品質之目的。

(一) 細度

依 CNS 3036 規定飛灰細度溼篩洗法，以 No.325 篩之停留百分率，最大值為 34%；停留率愈大，顯示飛灰愈粗，含碳量愈大。顆粒愈小，則飛灰的比表面積愈大，卜作嵐活性指數愈高。

(二) 卜作嵐活性指數

係指依據 CNS 3036 規定經養護 28 天之飛灰與卜特蘭水泥砂漿試體強度對控制組(純卜特蘭水泥砂漿試體)之比率稱為卜作嵐活性指數；CNS 規定其最小值為 75%；卜作嵐活性指數愈大表示飛灰與氫氧化鈣之反應能力愈佳，更能增進混凝土品質。

(三) 高壓蒸鍋膨脹率

CNS 3036 規定飛灰混凝土在高壓蒸鍋中之膨脹率最大值為 0.8%，以防混凝土之不正常膨脹或收縮。

四、摻用混凝土之性質[12]

一般而言若飛灰品質穩定，且摻用量、配比設計、產製及施工等條件恰當，則摻用飛灰可改善混凝土性質，節省水泥用量、降低成本；達成節約能源與資源之目的。由於飛灰品質對混凝土性質影響甚大，在使用前須先經試驗評估其物理及化學性質，作為決定使用策略之參考。品質合格之飛灰混凝土可運用於下列公共工程：①土木與水利工程—大壩、道路、隧道、港灣與下水道等工程；②建築工程—現場澆置之建築構造物的柱、樑、版、基礎及筏基等工程項目。就材料而言，品質合格之飛灰也可使用於：①預拌混凝土—各種規格（用途與強度等）的普通或特殊要求之預拌混凝土。②預鑄混凝土—預鑄混凝土產品、一般水泥製品等。

(一) 新拌混凝土性質

1. 凝結時間

若在混凝土中添加飛灰以減少水泥用量，則會因飛灰的水化是在水泥



水化後才發生，故摻飛灰會延長混凝土的凝結時間及減緩強度成長速率；而須注意此種凝結時間延長及強度成長慢，對混凝土澆置施工與拆模時間的不利影響；但一般而言，飛灰混凝土之緩凝對正常施工之影響不大。

2.工作性

在配比設計中若用飛灰取代相等重量水泥，由於飛灰比重只約為水泥的三分之二，所以拌合時混凝土中的實際膠結漿量會增加；加上飛灰為表面光滑之球形，會在混凝土材料間有滾球潤滑作用，故摻用飛灰可改善混凝土的粘聚性與可塑性。在保持同樣坍度下，飛灰品質會影響其混凝土的用水量；然飛灰的燒失量與細度常有變異，故須注意飛灰混凝土的適宜拌和水量。通常飛灰對貧配比混凝土工作性的改善效果比富配比混凝土明顯；對不同配比的混凝土而言，存有飛灰摻量的最佳值，超過則混凝土工作性反而下降。

雖然使用品質優良的飛灰可改善混凝土的坍度，但若飛灰品質差，也會導致坍度減小，尤其在熱天施工時摻加飛灰對混凝土坍度損失的改善效果更是明顯。品質優良之飛灰在混凝土中可補償水泥用量的不足或細粒料中細粉之不足，堵塞新拌混凝土的泌水通道而降低泌水率，不易發生粒料析離。

若飛灰品質不良或攪拌能量不足，則飛灰混凝土有結球或不均勻現象；但若改善飛灰品質及有充份的攪拌時間，則飛灰混凝土的均勻性可獲提高，並增加混凝土的粘滯性。由於飛灰為中空圓球，顆粒比水泥細小，故保水性佳；在混凝土中添加適量飛灰可改善稠度，減低混凝土與泵送管壁間的摩擦力，而改善泵送性。

當摻用品質優良之飛灰在混凝土中，會使其表面修飾性與抹光效果獲得改善。但若飛灰品質不良，則會導致混凝土保水性差，面層有浮灰、浮碳粒、浮漿等現象發生，導致混凝土品質不良。

3.水合熱與混凝土溫度

在混凝土中以飛灰替代部份水泥，使混凝土中的水泥用量減少，降低水合熱，減少巨積混凝土的內外溫度差與因其產生之裂縫，有利於巨積



混凝土之施工。

4. 燒失量與化學摻料使用成效

若飛灰之燒失量過高，飛灰中所含碳粒可能會吸收化學摻料分子而降低使用化學摻料之預期效果，所以飛灰與化學摻料共同使用於混凝土時，應先經試拌以驗證其使用成效。

(二) 硬固混凝土性質

1. 早期強度

飛灰會與水泥水化產物中的氫氧化鈣在有足夠水份供應的環境中發生卜作嵐反應，但須注意飛灰混凝土的養護溫度不宜過低(20°C)，以使卜作嵐反應有效發揮，故養護條件會顯著影響飛灰混凝土的強度成長。在正常溫度下，28天齡期時卜作嵐反應尚在初期階段，故飛灰混凝土的早期強度一般低於普通混凝土。

2. 長期強度

飛灰的卜作嵐反應隨齡期之延長而不斷進行，產生水化矽酸鈣或鋁酸鈣等膠體填充骨材顆粒周圍的空隙、水膜層間隙等混凝土中之孔隙，使混凝土結構緻密化與發展強度；到更長齡期(91天)時，飛灰混凝土強度通常可達到或超過同齡期普通混凝土。

3. 彈性模數

飛灰混凝土之彈性模數與抗壓強度的關係，基本上與普通混凝土並無顯著差別；故相關規範中之以抗壓強度推算彈性模數的公式，仍可適用。

4. 體積穩定性

大多數飛灰混凝土的乾縮量與潛變量與普通混凝土稍有差異，使用時應先評估並加注意。

5. 耐久性

(1) 水密性

混凝土中的飛灰會與水泥的氫氧化鈣起反應生成膠體堵塞孔隙與

水路，增加水密性，降低滲透性。飛灰混凝土的抗滲性隨水膠比的增大而降低。在早齡期(約 28 天以前)飛灰混凝土之水密性較普通混凝土差，且隨飛灰摻量的增加而降低水密性；中齡期(約 60 天)時，飛灰混凝土的水密性可能已接近普通混凝土；晚齡期(約 91 天或 120 天以後)時飛灰混凝土的水密性繼續提高而可能超過普通混凝土。由於飛灰的卜作嵐效應對混凝土中之毛細孔有細化與堵塞作用，能抑制氯化物對混凝土中之鋼筋的侵蝕。

(2) 抗硫酸鹽

飛灰的卜作嵐反應可消耗氫氧化鈣與降低混凝土中的鹼度，抑制氫氧化鈣與硫酸根離子生成鈣石，防止混凝土體積膨脹發生龜裂。摻飛灰也相對減少水泥中之鋁酸三鈣含量，減少其與硫酸鹽反應生成硫酸鹽之機率。故在混凝土中添加飛灰，可提高抗硫酸鹽侵蝕之性能。

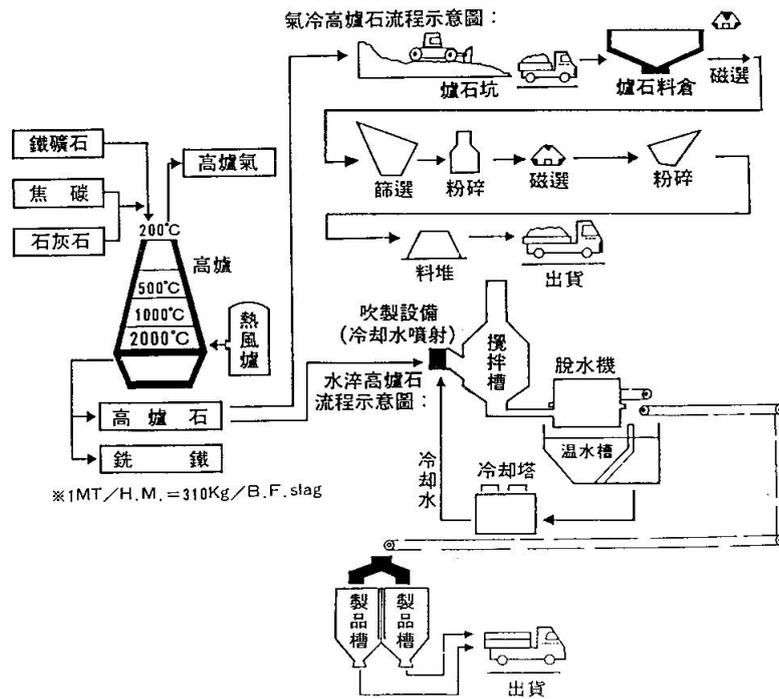
2.2.1.2 高爐石粉

一、來源

一貫作業煉鋼廠在以高爐煉鐵過程中，每生產一噸生鐵伴隨著產生約 300 公斤的高爐石。高爐石又依其冷卻方式之不同，分為氣冷高爐石及水淬高爐石，高爐石及高爐石粉之生產流程如圖 2.2.1.2-1 及圖 2.2.1.2-2 所示。中鋼公司早期僅生產氣冷高爐石，用於路基，或用做混凝土骨材。

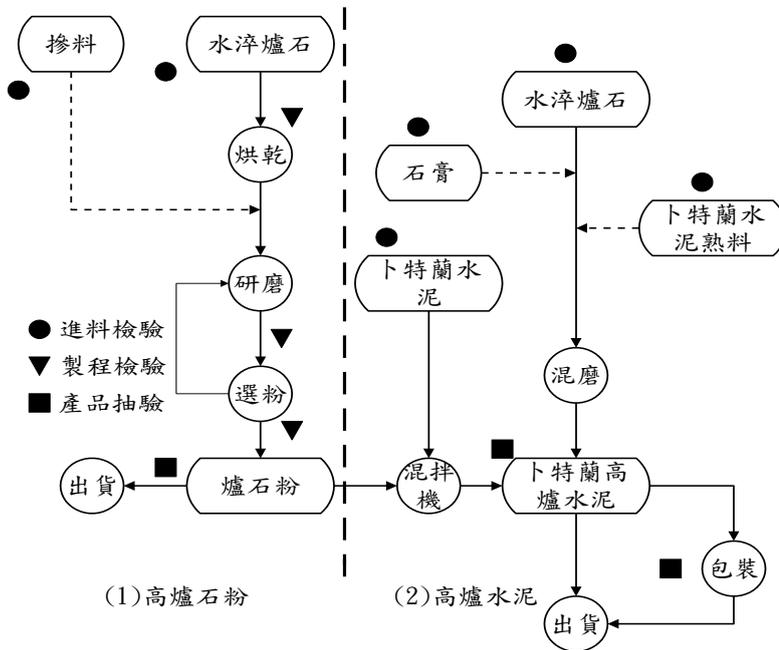
隨著中鋼之陸續擴建，產能提升，氣冷高爐石之產出量每年亦超過百萬噸，處理上亦愈感困難，加上國人環保意識及節約能源觀念逐漸抬頭，於是在 1980 年代時，開始將原來生產之氣冷高爐石，改用高壓噴水急速冷卻，因冷卻速率甚劇，產生大量玻璃質，而形成粒狀之水淬高爐石。

水淬高爐石由於其成分中含鈣、矽、鋁、鐵等氧化物之相圖與卜特蘭水泥熟料相近，並有高含量玻璃質，而且具有潛在水硬性膠結能力，若加以磨成高爐石粉與水泥混合，在與卜特蘭水泥併行之水合反應中藉由卜作嵐反應，可形成鈣、矽比較低之類似水泥熟料之低密度矽酸鈣 (C-S-H) 及鋁酸鈣 (C-A-H) 等水合物。由於高爐石與水泥性質相似，故可與水泥混合成為卜特蘭高爐水泥 (簡稱高爐水泥) 或作為混凝土之礦物摻料。



文獻來源：中國鋼鐵公司，爐石利用推廣手冊【23】

圖 2.2.1.2-1 高爐石之生產流程示意圖



文獻來源：中國鋼鐵公司，爐石利用推廣手冊【23】

圖 2.2.1.2-2 高爐石粉及卜特蘭高爐水泥生產流程



二、市場量

高爐石粉係由一貫作業煉鋼鐵廠(中鋼與中龍)高爐煉鐵的水淬高爐石加以研磨而成，以平均每噸鐵水(生鐵)約可產生 250 至 350 公斤的水淬高爐石。目前國內中鋼及中龍全年產出約可達 450 萬噸水淬高爐石(2015 年約 447 萬噸)，市場年需求約 500~650 萬噸，不足部份多係自日本、韓國、大陸等地進口。水淬高爐石粉幾乎全部用於預拌混凝土中，約 600 萬公噸，其餘少量用於水泥製品、地盤改量、袋裝零售。

三、成份性質

高爐石粉之種類：符合 CNS 12223 品質之水淬高爐石經研磨後稱為水淬高爐石粉，其品質須符合 CNS 12549 之規定。水淬高爐石粉依活性指數可分為 80 級、100 級和 120 級等三級。

高爐石粉之化學成份限制：高爐石粉應符合 CNS 12549 規定之成份限制，如表 2.2.1.2-1 所示。

表 2.2.1.2-1 高爐石粉之化學成份限制

化 學 成 份	規 範(最大值)
硫化物硫 (S)	2.5%
硫酸鹽離子 (以 SO ₃ 表示)	4.0%

資料來源：CNS 12549

高爐石粉之物理性質：高爐石粉之物理性質應符合 CNS 12549 之規定，如表 2.2.1.2-2 所示，其比重以 2.80 以上為宜。



表 2.2.1.2-2 高爐石粉之物理性質

試驗項目		規範
細度：(1)0.045mm CNS 386 濕篩後殘留量，最大值 (2)比表面積[CNS 2924 卜特蘭水泥細度檢驗法 (氣透儀法)]，最小值		20% 330 m ² /kg
高爐石粉攪料之空氣含量，最大值		12%
水淬高爐石粉活性指數		
7 天指數最小值	最近連續五個試樣平均值	任一試樣
80 級	--	--
100 級	75%	70%
120 級	95%	90%
28 天指數 最小值		
80 級	75%	70%
100 級	95%	90%
120 級	115%	110%

資料來源：CNS 12549

依中聯公司所提供於 104 年 10 月 27 日所辦理之爐石粉試驗報告，結果如表 2.2.1.2-3。

表 2.2.1.2-3 爐石粉原廠試驗報告

化學成分(%)						
項目	CNS 規範	試驗值	項目	CNS 規範	試驗值	
硫化物硫(S)	≤ 2.5	0.73	三氧化硫	≤ 4.0	0.37	
物理性質						
項目	CNS 規範	試驗值	項目	CNS 規範	試驗值	
空氣含量(%)	≤ 12	2.1	45μm 篩餘(%)	≤ 20	1.6	
活性指數 (%)	7 天	≥ 70	82	比表面積 (m ² /kg)	-----	440
	28 天	≥ 90	113	密度(g/cm ³)	-----	2.89

資料來源：中聯公司提供【20】

日本高爐石粉品質規範，依照 JIS A6206 之規定，按比表面積之大小分成三種，其品質要求如表 2.2.1.2-4[17]。一般經驗以使用比表面積 4000 cm²/g 者較多，惟混凝土以高流動化或高強度為目的時，應使用 6000 或 8000 cm²/g 者。

表 2.2.1.2-4 日本高爐石粉之品質要求

品質項目	種類	高爐石粉 4000 級	高爐石粉 6000 級	高爐石粉 8000 級
	比重		2.8 以上	
比表面積 (cm ² /g)		3000~5000	5000~7000	7000~10000
活性指數 (%)	齡期 7 天	55 以上	75 以上	95 以上
	齡期 28 天	75 以上	95 以上	105 以上
	齡期 91 天	95 以上	105 以上	105 以上
流度 (%)		95 以上	90 以上	85 以上
氧化鎂 MgO (%)		10 以下		
三氧化硫 SO ₃ (%)		4.0 以下		
燒失量 (%)		3.0 以下		
氯離子 Cl ⁻ (%)		0.02 以下		

資料來源：JIS A 6206:2013 コンクリート用高炉スラグ微粉末【17】

四、對混凝土之性質[18]

高爐石粉替代混凝土中部分水泥可有效改善新拌混凝土之工作性及硬固混凝土之強度與耐久性，特別是可提高水密性、降低水合熱及提高抵抗硫酸鹽侵蝕、氯離子滲透及具有優異的強度及抗海水之能力，所以被應用在水壩、橋樑、隧道及港灣工程上。國內外重大工程使用高爐石粉之實例，均以混凝土之工作性、水密性、水合熱及耐久性等為主要考慮因素，且亦有節能減碳之效能，目前國內之第 I 型卜特蘭水泥中，國家標準 CNS 61 已允許添加 5% 以下之高爐石粉或飛灰，但當考慮高爐石粉之替代率時，其影響可以不考慮。在台灣，高爐石粉之使用開始於 1983 年，在土木水利工程方面之使用較少。國內工程項目中包括台北 101 大樓、台灣高鐵、員子山分洪道及五楊高架道路等多為高爐石粉使用之實例，由於產官學界積極研究探討，並與國外研究成果及經驗比較，印証高爐石混凝土的特性與效益，認為高爐石粉是值得重視與推廣之材料，但大多應用在建築工程上，重大公共工程則以高雄捷運工程應用為代表。此外，國外針對爐石或飛灰的添加量，由限制添加比例，逐漸發展以混凝土功能性為導向，以「CNS 15286 水硬性混合水泥」為代表，例如期中的 IS 型高爐水泥，日本使用高爐水泥已有 90 年，故已經是一種十分成熟之產品，而且非常普遍地應用於許多重要工程，所以日本各地方政府在設計上列結構物時，常建議優先使用高爐水泥或高爐石粉。惟其適用性以土



木、水利、港灣、地下工程等較為適宜，值得重視。

(一)新拌混凝土性質

1.工作性

混凝土之工作性會改善，主要原因有二：

- (1) 高爐石粉比重略小於水泥，混凝土中漿體之體積有所增加。
- (2) 高爐石粉之表面較水泥不吸附水分，使游離水增加，故摻用高爐石粉之混凝土，在相同之拌和水量下，其坍度略為增加。

2.坍損

由於高爐石粉之水合反應較慢，故新拌混凝土之坍損會減緩。

3.凝結時間

對混凝土凝結時間之影響與混凝土之初始溫度(澆置時之混凝土溫度)有很大關係，尤以水泥用量較低之混凝土為甚。混凝土初始溫度較高(約高於30°C)時，凝結時間沒有太大改變；若混凝土初始溫度太低(約低於15°C)，可能會有明顯的緩凝。其影響隨高爐石粉之添加量而定，在常溫(23°C)下，混凝土之初凝時間可能會延長半小時至一小時，須加以注意。

4.浮水

一般適量使用高爐石粉之混凝土對浮水現象無明顯之影響，但過量使用(替代率過高且規定強度較低)或高爐石粉細度偏低(顆粒較粗)時，可能會有增加浮水之現象。

(二)硬固混凝土性質

1.強度發展

高爐石混凝土強度發展與高爐石粉之反應活性有密切關係，依ACI 233R資料顯示，相對於普通水泥砂漿而言，採用120級高爐石粉(CNS 12549)，早期(1至3天)強度較低，晚期強度(7天以後)較高；採用100級高爐石粉，早期(1至21天)強度較低，晚期強度相同或較高；採用80級高爐石粉，各期強度均較低，參閱圖2.2.1.2-3。

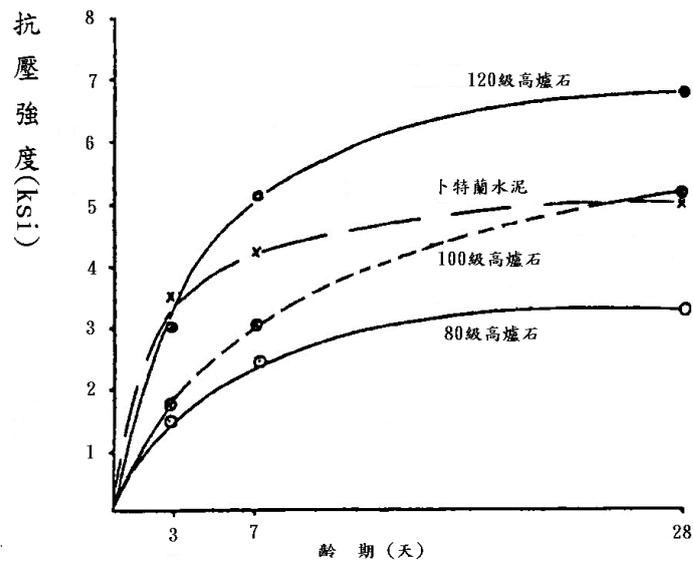


圖 2.2.1.2-3 高爐石粉水泥砂漿強度成長趨勢
(以各級高爐石粉(替代率 50%)之標準水泥砂漿試體測得)【19】

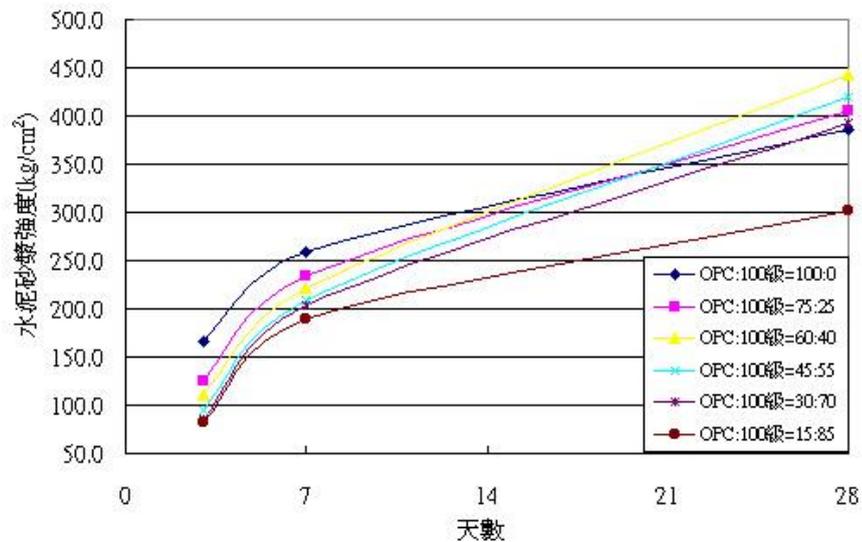
工程會發行的高爐石混凝土使用手冊中，亦有相關高爐石粉以不同替代率水泥砂漿強度成長之研究結果[20]，請參閱表2.2.1.2-5。高爐石粉不同替代率之水泥砂漿強度成長趨勢如圖2.2.1.2-4、2.2.1.2-5所示。不同等級高爐石粉之水泥砂漿強度如圖2.2.1.2-6所示。高爐石粉水泥砂漿達到卜特蘭水泥砂漿相同強度時最少需要天數如圖2.2.1.2-7所示。[18]

高爐石粉對混凝土強度發展之影響與混凝土之水膠比、養護溫度及替代率比例亦有很大關係。水膠比愈低，尤其替代率較高時，高爐石粉對混凝土規定強度之提昇愈明顯；高溫養護有助於高爐石混凝土強度(特別是早期強度)之提昇；高爐石粉替代率愈高，早期強度發展愈緩慢。

表 2.2.1.2-5 不同等級高爐石粉、替代率與強度成長之關係

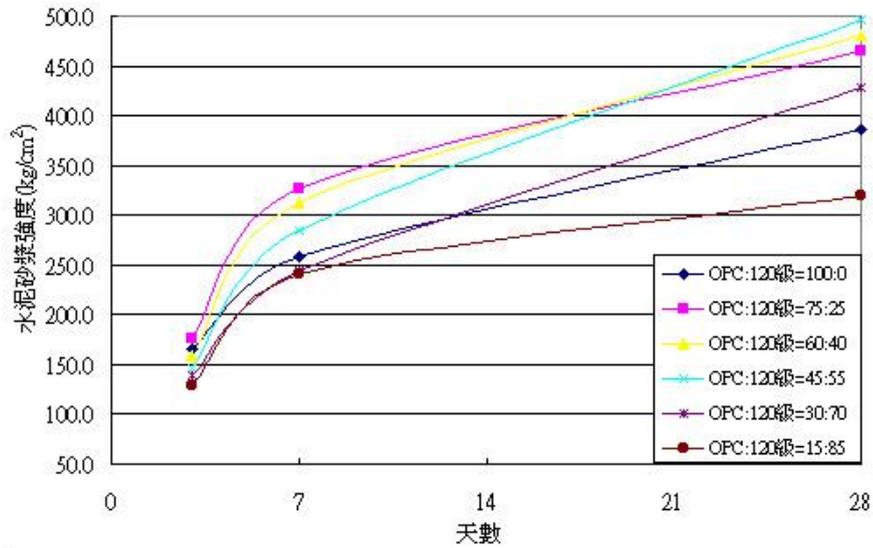
卜特蘭水泥量(%)	*高爐石粉替代率(%)		水泥砂漿強度(kgf/cm ²)			強度比		
	100 級	120 級	3 天	7 天	28 天	3 天	7 天	28 天
100	0	0	165.8	259.0	385.7	100.0	100.0	100.0
75	25	0	124.4	233.4	406.0	75.0	90.1	105.3
60	40	0	110.4	221.6	442.0	66.6	85.6	114.6
45	55	0	94.1	209.3	419.0	56.8	80.8	108.6
30	70	0	85.0	203.1	392.0	51.3	78.4	101.6
15	85	0	81.4	188.5	301.6	49.1	72.8	78.2
75	0	25	175.3	326.3	464.9	105.7	126.0	120.5
60	0	40	158.6	313.4	481.5	95.7	121.0	124.8
45	0	55	145.5	284.7	496.0	87.8	109.9	128.6
30	0	70	140.1	244.9	428.5	84.5	94.6	111.1
15	0	85	128.4	241.6	319.2	77.4	93.3	82.8

資料來源：公共工程高爐石混凝土使用手冊【18】

 *高爐石粉 100 級之比表面積為 4100 cm²/g，120 級之比表面積為 5700 cm²/g。


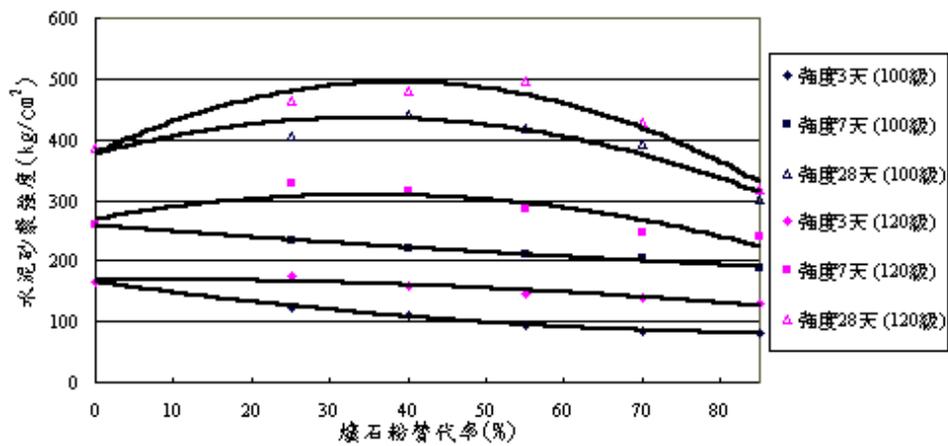
資料來源：公共工程高爐石混凝土使用手冊【18】

圖 2.2.1.2-4 高爐石粉(100 級)不同替代率之水泥砂漿強度成長趨勢



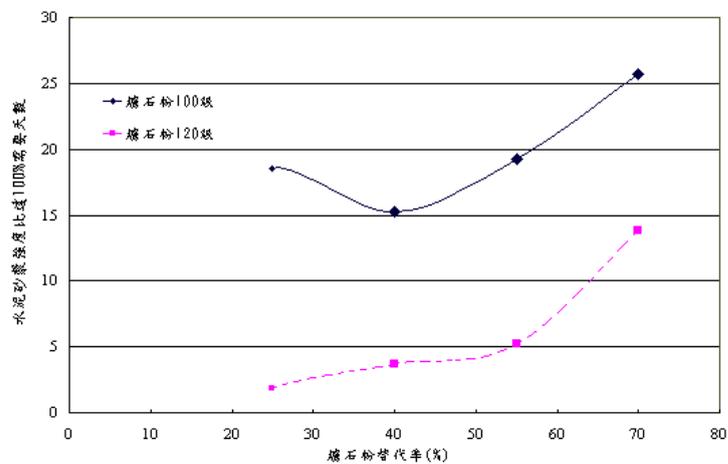
資料來源：公共工程高爐石混凝土使用手冊【18】

圖 2.2.1.2-5 高爐石粉(120 級)不同替代率之水泥砂漿強度成長趨勢



資料來源：公共工程高爐石混凝土使用手冊【18】

圖 2.2.1.2-6 不同等級高爐石粉之水泥砂漿強度成長趨勢



資料來源：公共工程高爐石混凝土使用手冊【18】

圖 2.2.1.2-7 高爐石粉水泥砂漿達卜特蘭水泥砂漿相同強度所需之天數



2. 彈性模數

在正常養護情況下，混凝土中以高爐石粉適量替代水泥時，對混凝土之彈性模數無明顯影響。

3. 體積穩定性

高爐石粉對混凝土乾縮潛變影響尚無定論，但大多數資料顯示，在適當養護情況下，高爐石粉對混凝土乾縮潛變之影響甚微；但養護不足時，則會明顯增加，尤其預力混凝土構件應特別注意，另應注意拌合水量對乾縮潛變之影響。

4. 水合熱與混凝土溫度

高爐石粉適量替代水泥，可降低初期水合熱及混凝土內部溫度上升之速率，替代率愈高或高爐石粉活性愈差時，隨水泥用量減少，其降低之程度愈明顯。

5. 水密性

高爐石混凝土硬固後有很好的水密性(低透水性)；在適量替代率下，替代率愈高，水密性愈好。高爐石粉之卜作嵐反應，使混凝土中水泥漿體內之毛細孔直徑減小，微觀結構緻密，因此非常顯著地增加混凝土之水密性。

6. 耐久性

混凝土中以高爐石粉適量替代部分水泥後，因漿體微觀結構較緻密，使混凝土之耐久性提高，例如抵抗硫酸鹽侵蝕，鹼質與粒料反應及鋼筋銹蝕之能力。研究顯示，以高爐石粉替代50%之第I型水泥，混凝土抗硫酸鹽侵蝕之能力與使用第V型水泥相當，以相同比例替代第II型水泥，則效果更佳，這是因為高爐石粉之使用使混凝土中 C_3A 及 C_3S 之含量降低，而且卜作嵐反應使C-S-H與C-A-H之膠體量增多，水密性提昇之結果。

2.2.1.3 輕質粒料

一、來源

台灣地區面積狹小及地形陡峭，且因降雨分佈過於集中，故可用之水資源有限，因此為了確保水資源，政府歷年亦興建了許多水庫用於防洪濟枯。這些水庫所蓄積之水，就成了台灣地區大部分灌溉、民生、發電及工業用水的水源。然而，隨著工商業的發展，國民經濟活動逐漸由都市轉向水庫集水區，因而在水庫集水區大量開發，從事農業及遊憩活動，導致地表植被銳減，故每逢暴雨時泥砂易受沖刷流入水庫，造成水庫淤積使蓄水功能亮起紅燈。近年來，由於全台水庫淤患的情形日益嚴重，再加上水庫疏浚清淤及集水區保育治理的工作成效不佳，導致水庫防洪蓄水之功能日減，因而用水之問題逐漸受到社會大眾及政府部門的關切。

為此，於 1993 年起，中興大學顏聰教授、陳豪吉教授及台灣科技大學黃兆龍教授等，在行政院國科會及內政部建研所等資助下，利用水庫的黏土質淤泥為原料，開發水庫淤泥輕質骨材之製造技術，並進行輕質骨材混凝土的工程性質測試，建立了本土水庫淤泥輕質骨材混凝土應用技術的資料庫 [24]。同期間 1999 年 5 月，湧源工程股份有限公司，率先提出台灣第一座輕質骨材廠設廠申請，同時與顏聰、陳豪吉及黃兆龍等 3 位教授合作開發本土型的輕質骨材燒製技術。採用石門水庫的浚淤淤泥作為原材料，創新研發淤泥加工造粒技術和改良式旋轉窯煅燒製程，成功產製出商業用之淤泥輕質骨材。[25]

至此，台灣終於成功建立屬於本土之水庫淤泥輕質骨材產業，並也正式進入商業生產階段。可惜，當時唯一生產廠家湧源工程股份有限公司，在 2002 年生產幾千立方公尺的優質輕質骨材後，因營運管理問題而被迫停產，事後雖有短暫的恢復生產，但始終無法達到原設計的產能，且產品品質也不穩定。故於 2003 年又再次停產。

後續在中華輕質骨材學會的努力下，一直與國內磚窯產業研發輕質骨材自主技術，在經過多年設備及材料的改進後，位於彰化的明春磚窯場於 105 年 11 月正式點火生產輕質骨材，在有充足的產量供應下，國內的輕質骨材有

望為市場所接受，用量逐漸提升。

二、市場量

國內之輕質混凝土大多應用於鋼構造物之樓板或隔間裝修，較少使用於結構主體，每年市場需求量約 5~10 萬立方米。工程應用於道路橋梁結構以國道六號南投段 C605 標石灼巷跨越橋為代表案例及台北 101 大樓的裙樓，然而，國外使用輕質混凝土則已有 30 多年之經驗，其中非結構性輕質骨材混凝土，主要為無細粒料之混凝土，大都以磚塊或板塊方式應用於房屋建築上的牆或平板，是不承重的構件，隔熱效能為其主要目的，應用型式大致有混凝土磚塊，磚塊尺寸相當大，用以砌造外牆或隔間牆，隔熱性理想。磚塊有多種尺寸，一般型者為 50 cm×25 cm×(10~30cm) (長×寬×厚)。另有尺寸較大者，為 62.5 cm×25 cm×(12.5~30 cm)。其中，磚塊亦有製作成空心磚之方式，另外，混凝土板塊，板塊都為預鑄板方式，可為長形板，尺寸依房屋構造製作，用於外牆居多，或屋頂板；結構性輕質骨材混凝土，以承重為考量之結構性輕質骨材混凝土，能夠廣泛應用於各種結構性構造物上，如高樓建築、橋梁、海中構造(混凝土船、海域鑽油平台)、預鑄構造等，又以北歐的挪威為首，該國應用於斜張橋、懸臂橋與浮橋等橋梁結構，首座橋梁實例於 1987 年完工，使用迄今已 17 餘年，其選用輕質骨材混凝土之理由可歸納如下：

1. 造型美觀、經濟與節省重量耐久。
2. 橋台之跨距可拉長，有利於航行與海洋牧場養殖。
3. 可減少橋面版所需預力鋼絞線數量。
4. 可解決跨度不對稱現象，以結構體及地形景觀美感各方面考量。
5. 耐久性考量。
6. 不需使用昂貴的施工鷹架，施工簡便。
7. 可節省橋墩基礎施工費用。
8. 縮小橋面版斷面，使其具美觀。
9. 縮減混凝土數量。
10. 可減輕橋面版之自重。

三、成份性質[26]

台灣區水庫淤泥之形成，主要由頁岩、板岩及原生粘土等經過風化及雨水沖刷進而搬運堆積至水庫大壩內。外觀顏色普遍為黃色、灰色或灰黑色（視有機質多寡而異），常見之礦物成分有石英（Quartz）、綠泥石（Chlorite）、伊利石（Illite）及長石（Feldspar）等。就西半部 15 座水庫淤泥而言，皆具有適合燒製輕質骨材之礦物成分綠泥石及伊利石。

國內水庫淤泥為矽鋁酸鹽的混合物，主體成分為 SiO_2 及 Al_2O_3 約占 8 成（76%~91%），另含高量的 Fe_2O_3 （4.5%~8.9%），少量的鹼土屬助熔物（ $\text{CaO}+\text{MgO}$ ），約 1.9~6.9%，微量的鹼金屬助熔物（ $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ ） $\leq 3.3\%$ 。

對於水庫淤泥是否適合燒製成輕質骨材，可利用 C.M.Riley 建議之適宜熔液黏度化學成分三相圖進行初步評估。上揭水庫淤泥之化學成分落點皆在 Riley 之三相圖上合適範圍內，因此當雜粒形成液相時，若有足量的氣體產生，應可於 2300°F 內，促使雜粒形成發泡膨脹的效果。由此可知，水庫淤泥具備有燒製輕質骨材之潛力。

四、對混凝土之性質[27]

(一)單位重

輕質混凝土其氣乾單位重一般均不超過 $2,000 \text{ kg/m}^3$ ，但此種界定並非強制性的標準，例如 ASTM 則規定輕質混凝土的氣乾單位重為 $1,840 \text{ kg/m}^3$ 以下。一般認為性質良好的輕質混凝土，其單位重應較相同配比之常重混凝土約低 25~40% 為佳。

(二)抗壓強度

輕質混凝土強度與其單位重有密切關係，故 CNS 3691、DIN 和 ASTM C330 中對強度性質的規定，都以單位重作為分級的標準。抗壓強度和單位重之比例關係，是衡量輕質粒料混凝土品質優劣的重要依據。因此，對輕質混凝土而言，顯著影響抗壓強度的主要因素是單位重與水泥用量而非水灰比。影響輕質混凝土抗壓強度之因素包括粒料種類、級配、強度、水泥漿量及水灰比等。粒料粒徑愈大對混凝土強度愈不利，故一般建議輕質粒料最大粒徑應在 25 mm 以下。水灰比對輕質混凝土工作性影響頗大；全輕質粒料混凝土在低水灰比時，工作性將嚴重受影響，解決的

方法有增加水泥漿量或使用天然砂做為細粒料，天然砂輕質粒料混凝土較經濟可行。在相同水灰比下，天然砂輕質混凝土之抗壓強度較高，這點不因輕質粒料種類不同而有差異，但其隔熱性則因密度提高而有所折損。

輕質混凝土在同等強度下，其水泥砂漿強度將比一般常重混凝土所用水泥砂漿強度高，意即其需較多之水泥用量或較小之水灰比來拌製混凝土，相對地其亦會發生早強現象。此結果有利於預鑄預力組件的應用，可縮短施拉預力的時間。

表 2.2.1.3-1CNS 3691 對輕質混凝土強度規定

規範	最大平均單位重 (kg/m^3)	最小平均 28 天 抗劈、張力強度 (kgf/cm^2)	最小平均 28 天 抗壓強度 (kgf/cm^2)
CNS 3691	1840	20.0	280 以上
	1760	20.0	210
	1680	20.0	175

資料來源：規範 CNS 3691

(三) 應力應變關係

輕質粒料混凝土之應力—應變曲線較普通混凝土更接近直線，因為輕質混凝土在降伏破壞以前，其應力主要由水泥砂漿承受，而水泥砂漿較接近均質材料，故應力—應變關係近似線性發展。當輕質混凝土受力超過強度上限而破壞時，水泥漿體承受力量迅速傳至輕粒料，將因粒料強度無法承受而急遽破壞，所以使輕質混凝土之破壞更具脆性。

(四) 彈性模數及柏松比

輕質混凝土之彈性模數一般約介於 $1.0 \sim 2.4 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 之間。影響彈性模數的因素甚多，一般研究大都歸納出彈性模數與混凝土單位重、抗壓強度之關係式，ACI與多數學者皆主張彈性模數 $E_c = K_c^{2/3} f_c$ 。由此可知，影響彈性模數最主要因子為單位重，其次為抗壓強度。輕質混凝土與常重混凝土之柏松比相近，其值約介於 $0.15 \sim 0.25$ 間，視粒料種類、用漿量、齡期及含水量等因素而定。

表 2.2.1.3-2 輕質混凝土彈性模數與單位重、抗壓強度之關係

抗壓強度 N/mm ² (MPa)	彈性模數 N/mm ²		
	輕質混凝土		常重混凝土
	單位重 1400 kg/m ³	單位重 1900 kg/m ³	單位重 2400 kg/m ³
30	11	19	28
40	12	21	31
50	13	23	34
60	14	25	36

資料來源：本研究整理

(五) 乾縮與潛變

乾縮的發生在於混凝土中水份的喪失，因此如果能減少水泥漿量或降低水灰比，或是採用緻密而大的粒料，均能有效減少乾縮。一般輕質粒料混凝土之乾縮值約在 4×10^{-4} 至 6×10^{-4} 間居多，而普通混凝土為 7×10^{-4} 至 10×10^{-4} ，故輕質混凝土乾縮量平均較低。但部份文獻則指出，輕質混凝土乾縮量比普通混凝土高；顯見乾縮量之高低並非絕對，而且變數亦多，如水灰比、用漿量、粒料種類、環境條件及尺寸效應等，都有影響，無法一概而論。不過，蒸汽養護可減少10~20%之乾縮量，尤其是高壓蒸汽養護更具效果，這點是可以肯定的。一般規範如CNS、ASTM等，對輕質混凝土乾縮量之規定是不得大於0.01%。

在潛變方面，影響之因素包括：水泥性質、粒料種類、級配、水泥漿體品質、用量、環境條件、所受應力大小及加載時間點等。由其影響因素可知，潛變與乾縮有密切之關係，因為潛變之發生通常都是從乾縮或膨脹變形處開始蔓延的。強度較高之輕質混凝土，承載能力較高、潛變量少，另低壓蒸氣養護比濕養之試體可減少25%至40%之潛變，而高壓蒸氣養護則可減少高達60%至80%之潛變。

(六) 熱傳導性

熱傳導性除受材質影響外，最重要的是依其孔隙率或單位重而定。對同一材料而言，內部孔隙含量愈大者，熱傳導係數愈小。由於輕質粒料混凝土內部含有大量孔隙，在其他組成材料相同的條件下，具有比普通混凝土小的熱傳導係數。普通混凝土的熱傳導係數K介於1.0~1.5 W/mK，而結構輕質混凝土K值，依其單位重降低至0.50~0.90 W/mK。若

為非結構輕質混凝土，則其K值將因孔隙率的提高而大幅降低。由多數文獻可知，不同輕質骨材拌製而成的輕質混凝土，其熱傳導係數與單位重之間存在有相當穩定的拋物線關係。輕質混凝土的熱傳導係數隨單位重增加而有增大的趨勢；當單位重大於 $1,600 \text{ kg/m}^3$ 以上時，K值呈明顯的增大傾向。

2.2.1.4 轉爐石粒料

「轉爐石粒料」係指氣冷轉爐石(規格 $<50\text{mm}$)經過磁選、破碎及篩分成不同粒徑之產品，產品粒徑：(1)3.5mm~8mm-轉爐石二分料；(2)8mm~15mm-轉爐石三分料；(3)15mm~25mm-轉爐石六分料。其應用途徑包含道路鋪築、非結構性混凝土、農地應用、大地工程、海洋牧場、水域改善等，茲就與本計畫相關的瀝青混凝土應用成果說明如下。[44]

轉爐石粒料主要作為道路瀝青混凝土鋪面骨材使用，其優點如下：

1. 親油性較佳，瀝青膠泥不易剝脫。
2. 添加轉爐石後的滯留強度指數比天然石高，較具抗剝脫能力。
3. 洛杉磯磨損率較低。
4. 破裂面多，稜角率高，優於天然粒料。
5. 扁平率比一般天然石低，滾壓時不易破裂降級。
6. 穩定值、動彈性模數較高。
7. 抗車轍變形能力較佳。
8. 最佳含油量比天然骨材級配低，可節省用油成本。
9. 可提升路面抗滑能力。
10. 比重大，取代量高時鋪設成本較高。
11. 較天然骨材堅硬耐磨耗，對AC拌合廠設備磨損較大。
12. 全取代粗粒料的瀝青混凝土，VMA 偏低約1%，但不影響性能展現(40%以下取代對VMA 則無明顯影響)。



國內現階段轉爐石以瀝青混凝土用粒料作為研究推廣的主要方向，已經有許多研究成果及工程實績，例如林登峰教授與黃隆昇教授的「轉爐石瀝青混凝土應用於屏東縣縣道之研究」[45]、張偉哲教授與陳偉全教授的「嘉義縣重載道路鋪設瀝青路面工程成效評估之研究」[46]、陳建旭教授的「轉爐石與天然粒料瀝青混凝土績效評估—以台南市為例」[47]、林登峰教授與陳筠昀教授的「探討轉爐石瀝青混凝土試驗道路成果—以高雄市大業北路為例」[48]、陳建旭教授的「轉爐石應用於密級配和開放級配瀝青混凝土之成效評估(以國道一號、國道三號為例)」[49]。

目前高雄市政府與生產轉爐石 AC 粒料的中聯公司合作模式，係由公家機關依據需求提訂購單，中聯公司免費運送轉爐石 AC 粒料至指定地點，若為民間單位如瀝青廠則須自行派車至中聯領料，價格每噸 30~100 元，接著由承包商進行配合設計、試驗、調整含油量、到正式施工，由表 2.2.1.4-1 可知已在嘉義縣、台南市、高雄市及屏東縣完成二十多條以轉爐石 AC 粒料作為瀝青混凝土鋪面之道路，由於其成效優於以天然砂石為粒料之瀝青混凝土，故高雄市政府已將轉爐石 AC 粒料正式納入施工規範第 02741 章瀝青混凝土之一般要求，作為承包廠商施工之依據。另外，台南市政府也將轉爐石 AC 粒料納入路平專案發包採購材料中。



表 2.2.1.4-1 轉爐石瀝青混凝土各縣市道路鋪築實績資訊

編號	主辦單位	鋪築道路名稱	鋪設時程
1	嘉義縣政府	縣府1-1外環道路	101.03.27
2	台南市政府	中華南路	101.03.18
3	台南市政府	關廟田大路	102.01.04
3	台南市政府	永成路(一期)	103.11.15
4	台南市政府	中華西路	104.08.01
5	台南市政府	永成路(二期)	104.08.26
6	台南市政府	濱南路	104.11.09
7	台南市政府	中華北路	104.11.12
8	台南市政府	東山路	105.09.24
9	台南市政府	南74線	105.10.15
10	高雄市政府	南星路	104.06.17
11	高雄市政府	大業北路	101.04.18
12	高雄市政府	金福路	101.11.24
13	高雄市政府	擴建路、新生路	102.02.22
14	高雄港務局	亞太路	102.03.23
15	高雄市政府	擴建路	102.06.27
16	高雄市政府	南星路(一期)	104.06.17
17	高雄市政府	南星路(二期)	105.05.03
18	高雄市政府	沿海路	105.06.29
19	高雄市政府	186市道	105.10.24
20	屏東縣政府	屏29縣道	101.01.09
21	屏東縣政府	185縣道	103.02.15
22	屏東縣政府	屏29縣道	101.01.09

資料來源：本研究整理

2.2.2 驗證性綠色材料

在現今環保意識的高漲，全球資源日益匱乏之趨勢下，工業製程所產生的副產物，如何有效再利用資源化，使將所稱的廢棄資源轉換為可用性材料，以減少隨意掩埋或非法處理，達到廢棄物減量化、安定化、無害化的效果，並可降低環境的衝擊，在高爐石粉飛灰已經成為再利用之典範後，找尋下一個可以穩定再利用之事業廢棄物已成為綠色環保之重要課題。

經本團隊研究電弧爐氧化渣具質地堅硬、產量穩定、產出量大等特點，若能將過適當安定化處理，除了可作為回填材料、道路基底層級配、瀝青混凝土粒料原料之外，亦有作為非結構性混凝土粒料之潛力，針對國內氧化渣之研究成果綜整如下。

2.2.2.1 電弧爐氧化渣

一、來源

電弧爐煉鋼廠將廢鐵、廢鋼經初步分類、稱重後加料，使廢鐵原料熔解成液態鋼水，此為熔解期，並為加速熔解，再通入高壓氧氣以加速氧化作用，此階段為氧化期，此時部分的鐵及其它雜質(如矽、錳)生成氧化物和先期投入的少量石灰開始生成少量之氧化渣，再通入更多之氧氣，雜質則氧化生成更大量的固態氧化渣及氣態氧化物(廢氣)。此時，因鋼液中含氧量過高，因此需加以還原，其作法是先將氧化渣排除，再加入大量石灰石、碳粉等副原料重新造渣，此階段即為還原期，主要使其與氧化物反應，產生還原渣並去氧脫硫，以清潔鋼液。而隨著冶煉的完成，製程中所產生的爐渣因其比重較小的原理與鋼液分離，爐渣即被從電弧爐中排出。電弧爐渣依產生的階段，又可分為氧化渣及還原渣，流程圖如 2.2.2.1-1 所示。依事業廢棄物之氧化渣與還原渣依其再利用法規「經濟部事業廢棄物再利用管理辦法」規定，再利用前，應先經破碎、磁選及篩分等處理程序，以達到工程所需之品質規格。

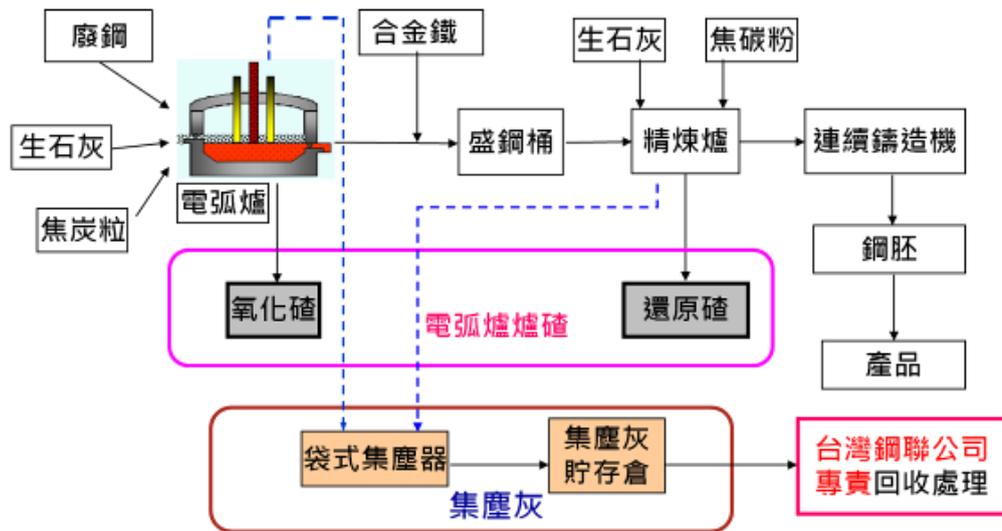


圖 2.2.2.1-1 電弧爐渣產生之流程圖【11】

二、市場量

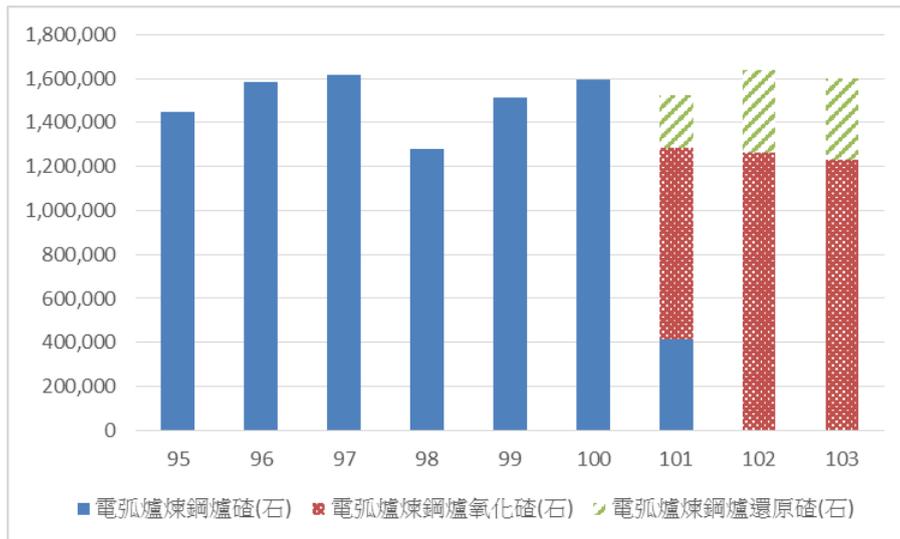
國內共 19 家電弧爐鋼鐵廠，依環保署之申報資料得知，電弧爐氧化渣之年產出量約為 120~140 萬公噸，其中以豐興、東和及中龍為前三大鋼鐵廠，依工業局「經濟部事業廢棄物再利用管理辦法」規定，鋼鐵廠產出之電弧爐渣應送至合法的再利用處理機構處理，並跟規定上網申報流向。由於電弧爐渣分為氧化渣及還原渣，在民國 100 年以前再利用管理辦法統稱為「電弧爐煉鋼爐渣(石)」(R-1203)，但由於電弧爐氧化渣及還原渣性質有所差異，處理過程及用途一不相同，為加強管理，於民國 101 年後將兩者區分出來，分成 R-1209 電弧爐煉鋼氧化渣(石)及 R-1210 電弧爐電鋼還原渣(石)，鋼鐵廠在廠內必須確實分類，分別申報，再送至再利用機構處理。彙整環保署電弧爐渣產出量的申報資料如表 2.2.2.1-1。

表 2.2.2.1-1 電弧爐渣歷年申報量統計

爐渣類別及代碼	95	96	97	98	99	100	101	102	103
電弧爐煉鋼爐渣(石)R-1203	144	158	161	127	151	159	41	-	-
電弧爐煉鋼爐氧化渣(石)R-1209	-	-	-	-	-	-	86	126	1,22
電弧爐煉鋼爐還原渣(石)R-1210	-	-	-	-	-	-	23	37	36

資料來源：環保署事業廢棄物申報及管理資訊系統【9】

單位：萬公噸



資料來源：環保署事業廢棄物申報及管理資訊系統【9】 單位：公噸

圖 2.2.2.1-2 電弧爐渣歷年申報量趨勢

國內目前約有 19 家鋼鐵廠(包含碳鋼及不銹鋼)、22 家再利用處理機構，主要電弧爐煉鋼廠及其處理機構分佈如圖 2.2.2.1-3。

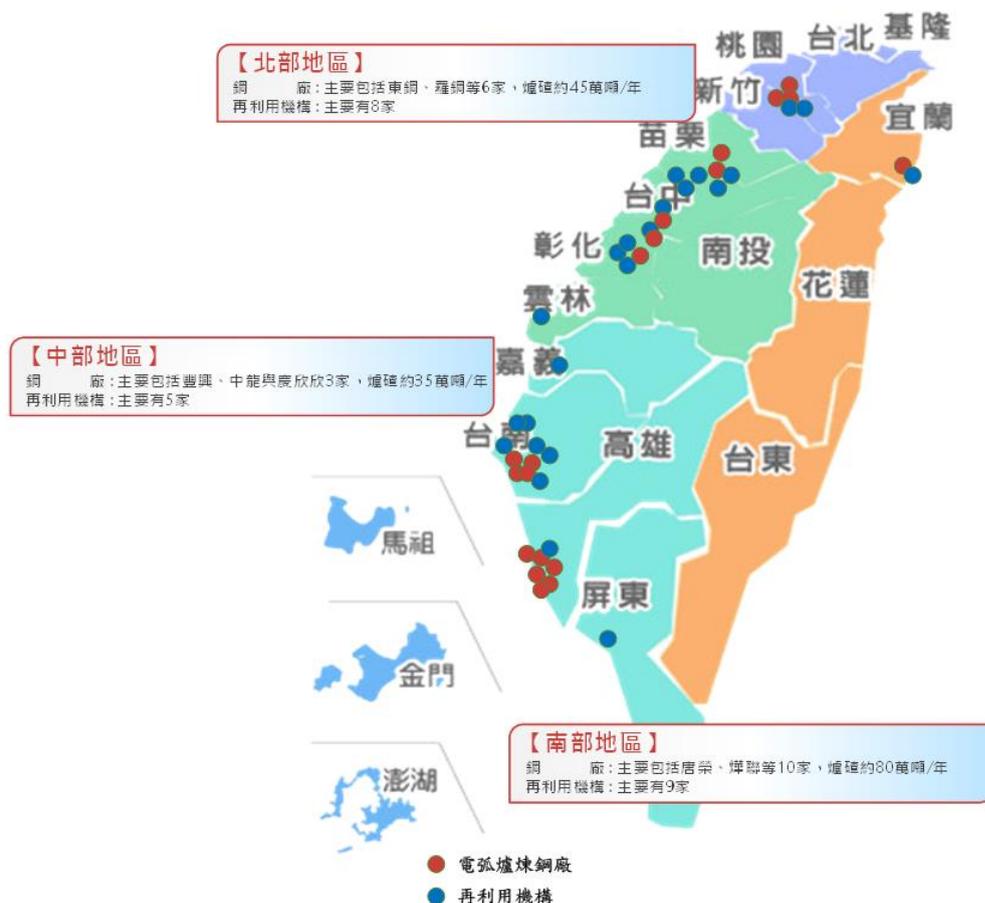


圖 2.2.2.1-3 國內主要電弧爐煉鋼廠及其處理機構分佈【9】

三、成份分析[29]

在礦物組成方面，爐渣以冶金化學角度分析，主要是含鈣、鎂、鋁、鐵和矽等元素組成的 $\text{CaO}(\text{MgO})\text{-Al}_2\text{O}_3(\text{Fe}_2\text{O}_3)\text{-SiO}_2$ 三元系統，介於矽酸鹽水泥熟料和高爐爐渣間之產物；由礦物組成上觀之，一般煉鋼爐渣均含有矽酸三鈣(C_3S)、矽酸二鈣(C_2S)、鐵鋁酸鈣(C_4AF)、鐵酸鈣(C_2F)、鈣鎂橄欖石(CMS)、鎂薔薇輝石(C_3MS_2)和少量游離氧化鈣及 RO 相等多種礦物，其中矽酸鈣、鐵鋁酸鈣等是活性組份，具有膠凝性，鈣鎂橄欖石和鎂薔薇輝石是惰性礦物，而游離氧化鈣是有害物質，RO 相是鎂、鐵和錳及少量鈣等二價氧化物的固溶體，通常是穩定的。

(一)物理性質

1. 密度：爐渣的密度一般約為 $3.1\sim 3.6\text{g/cm}^3$ ，但由於電弧爐煉鋼爐渣含鐵量較高，因此其密度較高爐渣之密度為大，而密度較高相對較具耐磨性。
2. 單位容積重量：爐渣之單位容積重量不但受其成分影響，還與粒度有關，一般而言，通過80目標準篩的渣粉，高爐石密度約為 1.74 g/cm^3 ，電弧爐渣約為 1.62 g/cm^3 左右。
3. 易磨性：煉鋼爐渣由於結構較為緻密，故較一般砂更具耐磨性。以易磨指數表示，標準砂為1，高爐渣為0.96，而轉爐石及電弧爐煉鋼爐渣均為0.7。
4. 活性： C_3S 、 C_2S 等為活性礦物，具有水硬膠凝性，因此 C_3S 、 C_2S 含量高的高鹼度電弧爐煉鋼爐渣，可作為水泥生產原料或製造建材製品。
5. 穩定性：煉鋼爐渣含游離氧化鈣(f-CaO)、游離氧化鎂(f-MgO)、 C_3S 、 C_2S 等，這些組成在一定條件下都具有不穩定性。鹼度高的熔渣在緩緩冷卻時， C_3S 會在 $1,250^\circ\text{C}$ 到 $1,100^\circ\text{C}$ 時緩緩分解為 C_2S 和 f-CaO ； C_2S 在 675°C 時 $\beta\text{-C}_2\text{S}$ 相會變為 $\gamma\text{-C}_2\text{S}$ 相，並且發生體積膨脹，其膨脹率達10%。另外煉鋼爐渣吸水後， f-CaO 會消解為氫氧化鈣〔 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 〕，體積將會膨脹100~300%， f-MgO 會消解為氫氧化鎂〔 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 〕，體積亦會膨脹約77%，因此含 f-CaO 、 f-MgO 的常溫煉鋼爐渣乃是處於不穩定狀態的，只有當 f-CaO 、 f-MgO 消解完成或含量很少時，才會穩定。

(二)化學性質

不同的原料、冶煉方式、生產製程、鋼品種類及不同的爐次等，都會使爐渣的組成成份與產生量有些差異，但一般爐渣仍以三個部分構成，即有效成份、氧化物及氧化金屬，其中有效成份多數以氧化矽和氧化鈣為主要的成份，氧化金屬則以氧化鋁、氧化鎂、氧化鐵等占最多比例，其他物質則為氧化錳和氧化鈦，各類爐渣的化學成份含量如表 2.2.2.1-2 所示。

表 2.2.2.1-2 各類爐渣的化學成份比較表

成份 種類	高爐石	轉爐石	電弧爐渣		安山岩	水泥
			氧化渣	還原渣		
SiO ₂	33.4	10.9	25.2	28.2	59.6	22.1
CaO	41	42.9	40.4	49.4	5.8	64.6
Al ₂ O ₃	14.5	1.5	4.8	11.8	17.3	5.4
FeO	0.4	20.7	18.5	2.1	3.1	3.1*
MgO	6	7.2	3.7	7.6	2.8	1.4
S	1	0.09	0.06	0.26	-	2.0**
MnO	0.7	5.2	6.5	0.2	0.2	-
TiO ₂	1.5	1.4	0.3	-	0.8	-
Ca/SiO ₂	1.0~1.3	2.5~5.0	1.2~3.0	1.5~3.5	-	-

註：*以 Fe₂O₃ 表示，**以 SO₃ 表示。

資料來源：電弧爐煉鋼還原渣資源化應用技術手冊，2001。[30]

四、對混凝土之性質

依中央大學黃偉慶教授於民國 90 年曾做一系列的「電弧爐氧化渣為混凝土骨材之可行性研究」[31]，研究以爐渣混凝土之配比設計係參照 ACI 318 混凝土配合設計法，混凝土抗壓強度為 210 kg/cm²、目標坍度 12 cm、最大骨材粒徑 3/4 in，爐渣取代天然骨材以體積取代法進行，爐渣取代天然骨材之比例分為兩種(即 50%與 100%)，未取代者即為控制組，級配參照 CNS 1240 混凝土粒料級配規定，電弧爐氧化渣來源以桂裕、東和桃園廠、燁聯三家公司為主。試驗結果彙整如下。

(一)工作性

水泥混凝土坍度試驗，係測定新拌水泥混凝土之稠度，以表示水泥混凝土之流動性，同時判別其工作度是否合乎工程品質之要求，工作度不佳之情

況下，水泥混凝土將產生潰裂、分離等現象。

在新拌混凝土的坍度試驗部分，試驗結果如表 2.2.2.1-3，於相同水灰比及試驗條件下，三廠爐渣取代 50%天然骨材所拌製之混凝土坍度均較天然骨材所拌製之混凝土約低 3%，而爐渣取代 100%天然骨材所拌製之混凝土坍度較天然骨材所拌製之混凝土約低 6~8%，由於電弧爐爐渣的吸水率較一般天然骨材吸水率略高，因此造成爐渣混凝土坍度略為降低，且取代量愈大，坍度降低之情形相對較為明顯。

表 2.2.2.1-3 新拌電弧爐氧化渣混凝土坍度試驗

廠別	桂裕廠		東和桃園廠		燁聯廠		天然
取代量	50%	100%	50%	100%	50%	100%	0%
坍度(cm)	12.3	11.7	12.1	11.6	12.3	11.9	12.7

資料來源：黃偉慶「電弧爐氧化渣為混凝土骨材之可行性研究」【31】註：設計強度 210 kgf/cm²

該研究另進行抗壓強度為 350 kg/cm² 之混凝土坍度試驗，試驗步驟及方法與前述抗壓強度 210 kg/cm² 之混凝土相同，爐渣混凝土中粗骨材採用桂裕煉鋼廠爐渣及東和桃園廠爐渣替代之，並與天然骨材所拌製的混凝土之坍度進行比較，試驗結果如表 2.2.2.1-4 所示，兩廠爐渣混凝土坍度損失約略一致，但仍較普通混凝土之坍度損失約高 20%，顯示在相同水灰比條件下爐渣混凝土之流動性相對略差，由於一般工地現場混凝土澆置作業均已考慮預拌廠之運距，在鋼筋密集處澆置混凝土或長距離運送混凝土考慮工作性時，可添加適量強塑劑或化學藥劑增加爐渣混凝土之流動性，整體而言以電弧爐氧化渣拌製混凝土在工作性方面並無太大疑慮。

表 2.2.2.1-4 電弧爐氧化渣混凝土坍度損失表

混凝土種類	坍度(cm)					60min 坍損
	0 min	15 min	30 min	45 min	60 min	
天然骨材	9.9	8.9	7.1	6.2	5.3	46%
桂裕廠氧化渣	10.7	7.2	5.5	4.5	3.7	65%
東和廠氧化渣	11.0	8.9	6.3	4.8	4.1	63%

資料來源：黃偉慶「電弧爐氧化渣為混凝土骨材之可行性研究」【31】註：設計強度 350 kgf/cm²

(二)單位重

新拌混凝土單位重試驗，可以作為硬固後水泥混凝土單位重的一個指

標，由爐渣物性試驗中顯示爐渣比重較天然骨材為高，因而預期爐渣混凝土單位重較傳統混凝土單位重 2.4 t/m^3 為高，試驗結果如表 2.2.2.1-5 所示。表中顯示 50% 及 100% 之電弧爐氧化渣取代天然骨材所拌製之混凝土，單位重介於 $2.5 \sim 2.6 \text{ t/m}^3$ 及 $2.64 \sim 2.74 \text{ t/m}^3$ 間，而較天然骨材所拌製的傳統混凝土之單位重約高 4~8% 及 10~14%，此結果與預期一致，而電弧爐氧化渣取代量愈大之混凝土其單位重也有愈高的趨勢。單位重較高之氧化混凝土可適用於重力壩、堤防及建物基礎底版等，就橋梁結構而言，則可應用於下部結構及基礎。

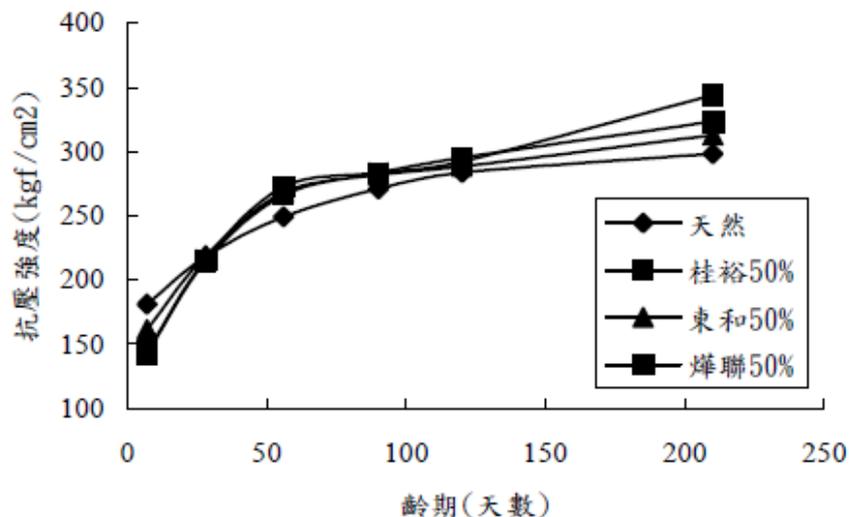
表 2.2.2.1-5 新拌電弧爐氧化渣混凝土單位重試驗

廠別	桂裕廠		東和桃園廠		燁聯廠		天然
取代量	50%	100%	50%	100%	50%	100%	0%
單位重(t/m^3)	2.54	2.66	2.60	2.74	2.50	2.64	2.40

資料來源：黃偉慶「電弧爐氧化渣為混凝土骨材之可行性研究」【31】註：設計強度 210 kgf/cm^2

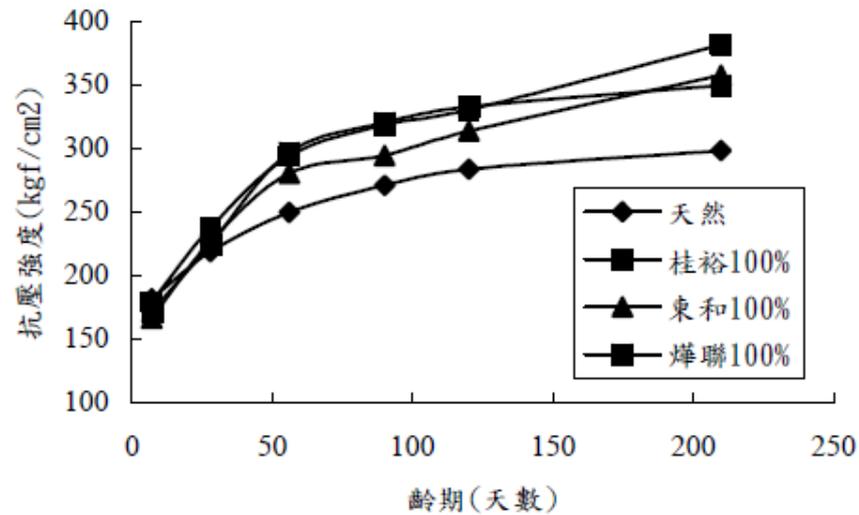
(三) 抗壓強度

該研究以三個煉鋼廠所生產之爐渣依不同的取代量(0%、50%、100%)分別製作混凝土圓柱試體，供各齡期之強度試驗之用。六個齡期之混凝土強度試驗結果如圖 2.2.2.1-4 及 2.2.2.1-5 所示。不同取代量(50%及 100%)之爐渣混凝土的抗壓強度均較天然骨材混凝土的抗壓強度大，同一煉鋼廠爐渣取代量愈多，混凝土強度亦有升高之趨勢，於相同取代量條件下，各廠之爐渣混凝土的抗壓強度差異不大，均較一般天然骨材所拌製之混凝土抗壓強度為高。



資料來源：黃偉慶「電弧爐氧化渣為混凝土骨材之可行性研究」【31】

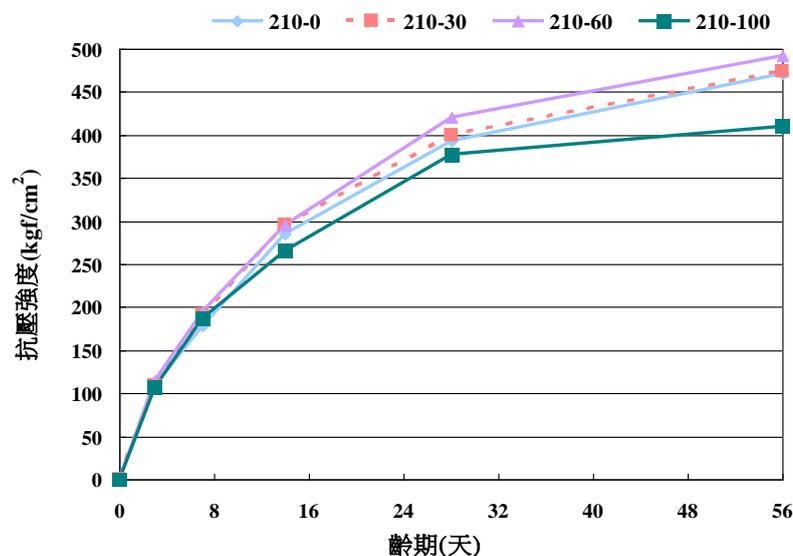
圖 2.2.2.1-4 電弧爐氧化矽混凝土抗壓強度發展(骨材取代量 50%)



資料來源：黃偉慶「電弧爐氧化矽為混凝土骨材之可行性研究」【31】

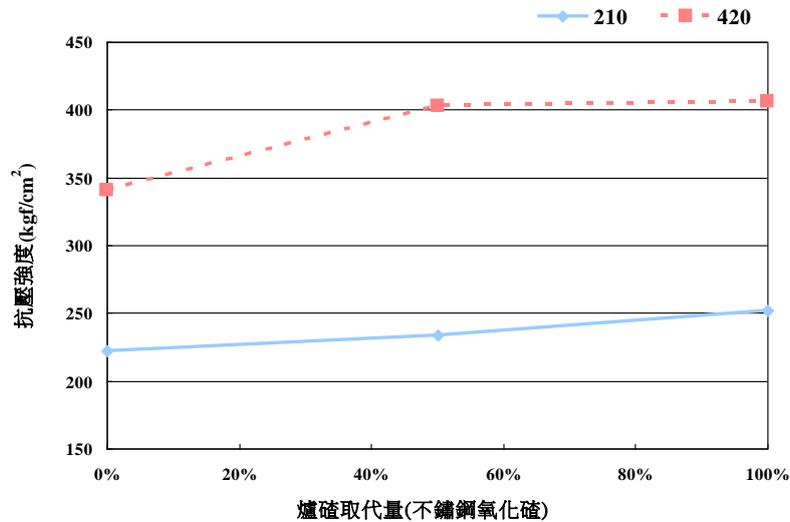
圖 2.2.2.1-5 電弧爐氧化矽混凝土抗壓強度發展(骨材取代量 100%)

除了黃偉慶教授的研究外，營建院於 103 年受鋼鐵公會委託辦理「爐矽再利用方案可行性評估及推廣策略計畫」[29]，針對電弧爐氧化矽作為混凝土粒料進行一系列適用性試驗與評估可得，碳鋼電弧爐氧化矽是於取代細粒料之量 60% 以下的強度優於一般細粒料之混凝土(如圖 2.2.2.1-6)；不鏽鋼電弧爐氧化矽則是取代粗粒料的量愈多其強度皆優於一般粗粒料之混凝土(如圖 2.2.2.1-7)。



資料來源：台灣營建研究院「爐矽再利用方案可行性評估及推廣策略計畫」【29】

圖 2.2.2.1-6 碳鋼電弧爐氧化矽於不同取代量之 210 kg/cm² 抗壓強度發展曲線



資料來源：台灣營建研究院「爐渣再利用方案可行性評估及推廣策略計畫」【29】

圖 2.2.2.1-7 電弧爐氧化渣隨不同取代量之抗壓強度發展曲線

2.2.3 待開發型綠色材料類別介紹

針對道路橋梁結構適用的綠色材料，若僅在研究階段且國內外無工程實績，但具市場潛力的材料，將歸屬於待開發型材料。對此，計畫團隊依本計畫目的與效益，提出包括鹼激發材料、鋼渣水泥、轉爐石粒料等，相關材料特性與適用性如下說明。

2.2.3.1 鹼激發材料

近年許多研究陸續發現，化學藥劑可用來提高低活性卜作嵐材料之水化反應，這些化學藥劑中包括氯化鈣(CaCl_2)、硫酸鈉(Na_2SO_4)、無水石膏(CaSO_4)及二水石膏($\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$)等，一般稱這些額外的添加劑為活化劑。在 Shi 與 Day 的研究中[32][33]，氯化鈣及硫酸鈉對飛灰漿體之影響，顯示添加 5% 氯化鈣在任何齡期下，均能有效提升低鈣飛灰漿體之抗壓強度。此外，於高鈣飛灰中，添加 5% 的硫酸鈉，可得相同的效果；而添加 4% 的含水氯化鈣($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)，只對晚期強度發展有所貢獻。至於硫酸鈉與氯化鈣提高卜作嵐反應之機制，目前還不是很明確，但若同時添加，對強度並無進一步的貢獻，這可能表示，加入氯化鈣或硫酸鈉，產生加速水化是來自同一種機制。在產生的水化產物中，當高鈣飛灰漿體中加入硫酸鈉時， C_3AH_6 的生成量隨著硫酸鈉的添加量增加而增加；而低鈣飛灰漿體中，加入氯化鈣時， C_4AH_{13} 與 $\text{C}_4\text{AH}_{13} \cdot \text{CaCl} \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 固溶體的生成量，隨著氯化鈣的添加量增加而增加，根據以上這些結果，推測此類活化劑對早期強度

的貢獻，可能是因為形成 C-A-H 膠體的緣故。[36][37][38]

由於國內許多事業廢棄物均為強鹼性，如電弧爐還原渣、轉爐石、副產石灰 (CFB) 等，因此可利用本身所具有之高鹼特性，達到提升活性之目的，有助於混凝土強度的提升。鹼活化劑之反應機理主要是運用本身具有之高鹼特性，提高環境中鹼性濃度，破壞材料表面之玻璃質晶型，進而達到與鹼活化劑離子快速反應之目的。Shi 與 Day 的研究中，將鹼活化劑與材料產生的反應分為兩個階段。

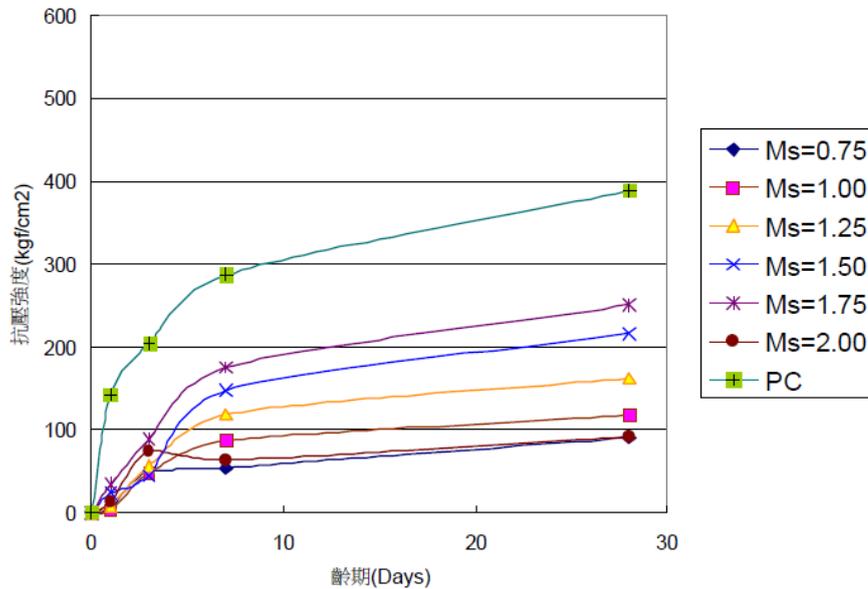
1. 利用鹼活化劑之高 pH 值破壞結晶形態下矽、鋁氧化物間之鍵結，而使其轉化成矽、鋁離子以利反應；
2. 鹼活化劑所解離出的陰離子或陰離子群，與灰渣顆粒所溶解出的 Ca^{2+} 發生反應，生成水化產物。

在第一階段反應過程中，活化劑之 pH 值在初期溶解灰渣顆粒扮演了一個很重要的角色，影響部份初期水化產物的生成；然而，真正控制主要水化產物生成反應的是第二階段反應中鹼活化劑所解離出之陰離子。換句話說，在第一階段的反應，鹼活化劑之 pH 值只須高於某一特定值，即可提供足夠的能量溶解並破壞矽、鋁氧化物之鍵結及 Ca^{2+} 之溶出；在 Song 及 Jennings 的研究中提到[34][35]，鹼活化劑以 pH 值 11.5 作為可否加速水化反應之界定標準，而一般鹼活化劑皆在此值之上。而真正影響灰渣強度發展的第二階段，因反應物的生成取決於鹼活化劑陰離子或陰離子群之種類，所以不同種類的活化劑決定生成物之間的差異，同時也是影響反應的重要因素之一。

黃偉慶教授於「鹼活化電弧爐還原渣之水化反應特性」研究中[36]，運用矽酸鈉搭配氫氧化鈉調配 6 個鹼模數比， $M_s=0.75, 0.1, 1.25, 1.5, 1.75$ 及 2.0，與 3 個含鹼當量 4%、7%、10%，量測鹼活化劑添加後漿體於各齡期之抗壓強度。

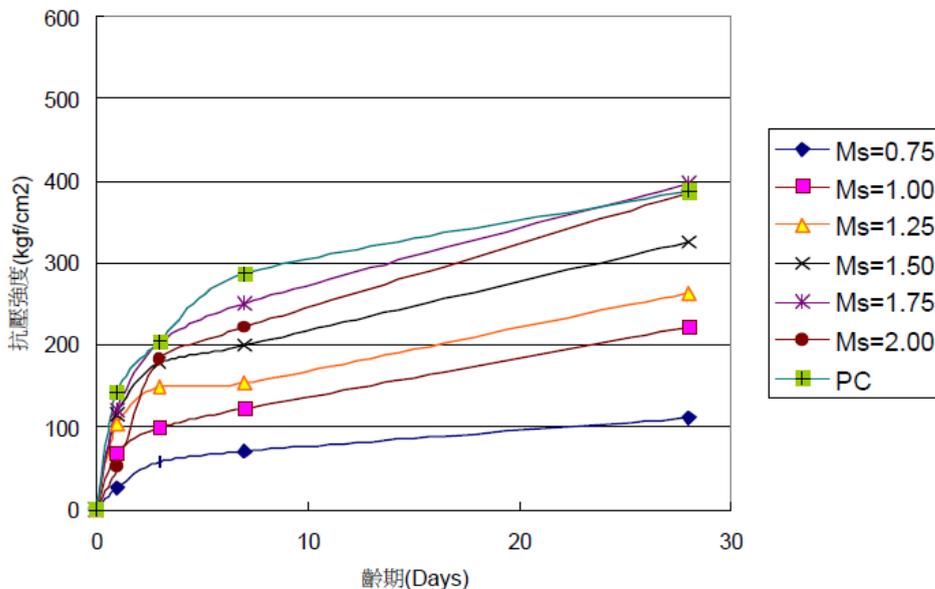
在三種含鹼當量等級中，其活化效果明顯具有隨劑量的增加而提昇之趨勢，其中以含鹼當量 10% 為最佳，其次為 7%，而 4% 者相對較差。在含鹼當量 4% 時，如圖 2.2.3.1-1 所示，初期階段之抗壓強度雖無隨鹼模數比逐漸提高而產生明顯之差距，但至 28 天齡期時，已可清楚看出抗壓強度隨鹼模數比提高而增強之趨勢。另外，比較不添加鹼活化劑之水泥漿體對照組，無論早期或晚期階段，不同鹼模數比下之漿體強度均遠較對照組之 388 kgf/cm^2 低。其中值得注意的是，當鹼模數比提高至 2.0 時，還原渣漿體之抗壓強度發展並無隨鹼模數比的提高而產生

較明顯提高之跡象，反而造成強度之下降，圖 2.2.3.1-2 中顯示鹼模數比 2.0 之抗壓強度與鹼模數比 0.75 時相當；而含鹼當量於 7% 及 10% 時均具有類似之情形發生，推斷在添加鹼活化劑的過程中，因過多之劑量使未完全反應之藥劑增加且堆積於漿體內，造成漿體內部結構鬆散，最後導致試體之抗壓強度下降。



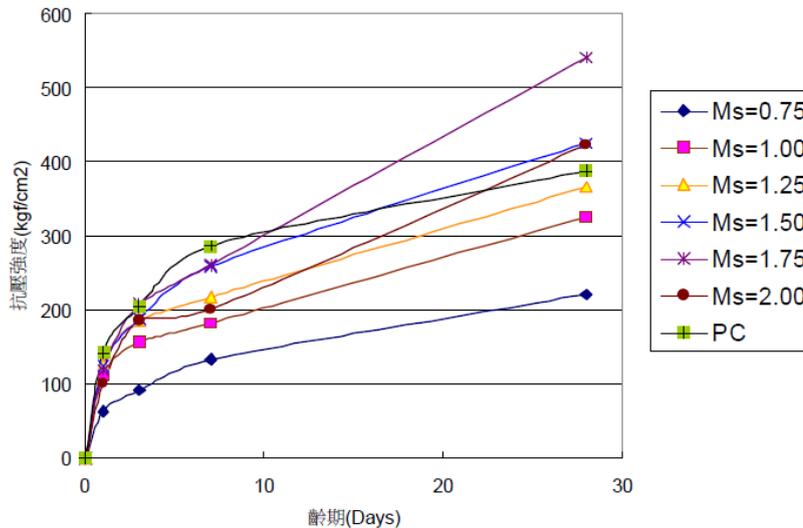
資料來源：蕭遠智、黃偉慶，鹼活化電弧爐還原渣之水化還原反應特性，2002【36】

圖 2.2.3.1-1 含鹼當量 4% 時不同鹼模數比下之抗壓強度



資料來源：蕭遠智、黃偉慶，鹼活化電弧爐還原渣之水化還原反應特性，2002【36】

圖 2.2.3.1-2 含鹼當量 7% 時不同鹼模數比下之抗壓強度

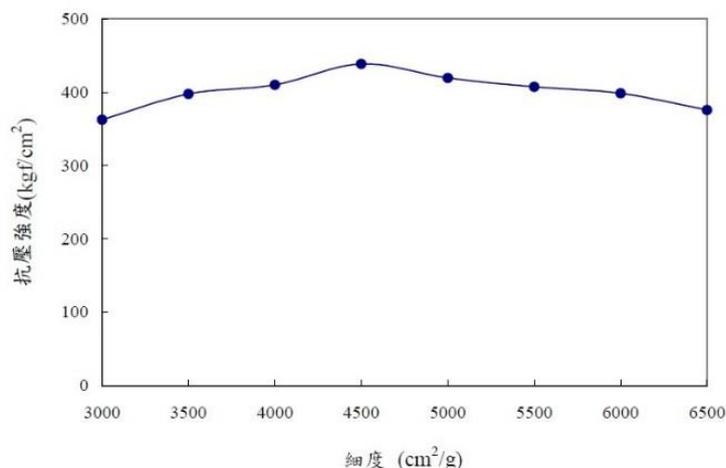


資料來源：蕭遠智、黃偉慶，鹼活化電弧爐還原渣之水化還原反應特性，2002【36】

圖 2.2.3.1-3 含鹼當量 10% 時不同鹼模數比下之抗壓強度

與不添加鹼活化劑之對照組水泥漿體作比較，可發現隨著活化劑量的提昇，無論是含鹼當量或鹼模數比，於初期階段與水泥之間的抗壓強度差距有逐漸縮小之趨勢，而隨著齡期的增加，至晚期階段，高含鹼當量、高鹼模數比之還原渣漿體強度已超過對照組許多；此現象說明鹼活化劑所具有之早強特性，將隨劑量之提昇而漸形明顯。

另有關於高爐石粉的鹼激發研究，根據 Shi 及 Li 的研究中指出[32][33]，鹼活化爐石混凝土使用的高爐石粉最佳細度為 $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ 。Wang et al. [40]的研究顯示 $4500 \sim 5000 \text{ cm}^2/\text{g}$ 為鹼活化爐石混凝土之最佳細度範圍。李宜桃的研究則顯示 $3500 \sim 4500 \text{ cm}^2/\text{g}$ 為鹼活化電弧爐還原渣之最佳細度範圍[37]。圖 2.2.3.1-4 為不同細度之鹼活化還原渣漿體 28 天之抗壓強度。



資料來源：Shi 及 Li[32][33]

圖 2.2.3.1-4 不同細度之鹼活化還原渣漿體 28 天抗壓強度

相較於水泥漿體，添加鹼活化劑所製成之高爐石粉或飛灰混凝土，具有以下之優點：早期強度較高、對化學侵蝕有較好的抵抗性、及抵抗中性化之能力較佳；另一方面，鹼活化還原渣漿體之抗壓強度發展主要受到鹼模數比與含鹼當量之影響，根據李宜桃研究可知[37]，鹼活化還原渣漿體之最佳鹼模數比為 1.75，且當鹼模數比為 1.75、含鹼當量為 7 % 時，還原渣漿體之 28 天抗壓強度可達水泥漿體之抗壓強度。

2.2.3.2 鋼渣(轉爐石)水泥

鋼渣即為轉爐石，為高爐在煉鐵時之副產物，在中國大陸稱為鋼渣。鋼渣水泥為在中國地區使用之煉鋼爐渣水泥，雖鋼渣水泥早期水硬膠凝性與易磨性較差，但中國已對此訂定國家標準 GB/T50912-2013，以規範其使用滿足材料或結構之耐久性。

轉爐石是一貫化作業鋼廠煉鋼過程中所形成的工業副產物，鋼廠於煉製鋼液時，將鐵水、副原料、廢鋼加入轉爐後，以純氧吹煉，產出鋼液及熱熔渣，鋼液溫度約 1600~1680°C，熱熔渣溫度約 1000~1200°C，冷卻之熱熔渣稱為轉爐石。高轉爐石產出流程如圖 2.2.3.2-1 所示。

高爐熔融鐵水在運至轉爐後，須於轉爐中吹入純氧加以精煉，並於吹煉時加入石灰等助熔劑以造渣，主要是將鐵水中的 C、Si、Mn、P、S 等不需要的成分降低，以獲取目標成份鋼液。上述成分則與氧反應生成氧化物成為轉爐熔渣，熔渣的比重較小而浮在鋼液上層，於吹煉完成後熔渣倒出，冷卻後即為轉爐石。吹煉一噸鋼則產生約有 135 公斤的轉爐石。

由於熔渣倒出時無法完全與鋼液分離乾淨，所以轉爐石中常含有鐵的成份。另外為了能去除鋼液中的雜質，經常加入高量的石灰，故在吹煉完成後轉爐石中也常存在有未反應的石灰。

目前國內的煉鋼方法大致分為轉爐、電弧爐和平爐煉鋼等。按煉鋼方法分，煉鋼爐石分轉爐煉鋼爐石、電弧爐煉鋼爐石和平爐煉鋼爐石。按熔渣性質分，則可分為鹼性渣和酸性渣等。

國內對於轉爐石用於混凝土相關研究包括海洋大學張建智、張宜中等人在「添加轉爐石粉對於混凝土耐久性影響之研究」中，探討添加轉爐石粉對於混

土耐久性質之影響。分別以高爐石粉、轉爐石粉取代水泥用量之方式，製作混凝土試體進行相關試驗及研究；試驗項目包括混凝土圓柱試體抗壓強度、電阻率試驗、表面吸水率試驗、滲透性試驗、氯離子快速滲透試驗；試驗材料變數包含水膠比(0.4 與 0.6)及高爐石粉、轉爐石粉用量取代水泥重量百分率(10%，20%，30%)。試驗結果顯示高爐石粉及轉爐石粉各替代率之混凝土抗壓強度隨著齡期增加而成長；當水膠比提高抗壓強度會降低。水膠比 0.6 條件下，抗壓強度以高爐石粉取代水泥量 10 % 為最佳，轉爐石粉取代水泥量則以 20 % 為最佳，電滲試驗與四極式電阻試驗之結果有相同之趨勢，另外，於大陸文獻中，徐兵等人提到寶鋼轉爐渣之冷卻方式係以淺盤水淬來進行處理[54]，則經過處理後之轉爐渣化學成分如表 2.2.3.2-1 所示。先將寶鋼轉爐渣通過熱分析試驗，可由試驗結果看出轉爐渣因於 1600°C 以上之高溫預熔形成，因此礦物組成較為穩定及均勻，有利於水泥中之應用。寶鋼轉爐渣於水泥應用上之優勢如下：

- 一、寶鋼轉爐渣中 Fe_2O_3 及 FeO 之含量約為 30% 左右，可作為水泥生料之配料使用。
- 二、由於寶鋼轉爐渣之礦物組成含有 30% 之 C_2S 及 10% 左右之 C_3S ，能夠有利於晶體礦物之快速形成，促進固向反應，並且提前出現液相溫度。
- 三、寶鋼轉爐渣含有約為 42% 之 CaO ，不同於石灰石須分解吸熱，因此可節約煤耗損。

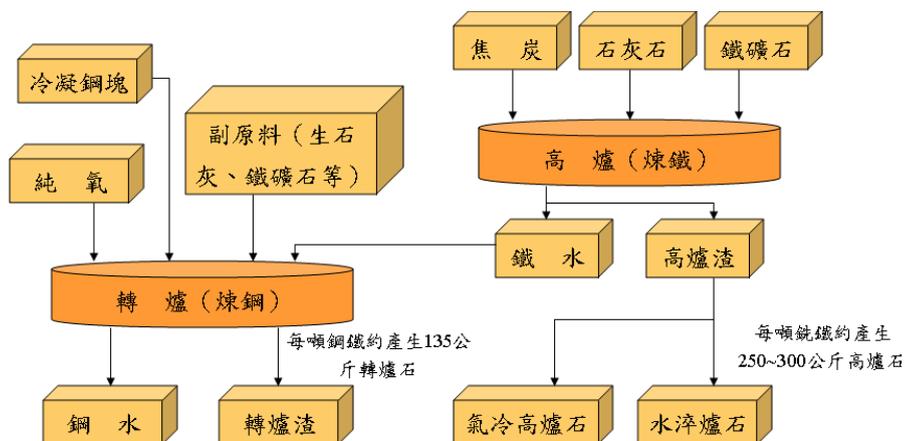


圖 2.2.3.2-1 高/轉爐石產出流程圖【54】

表 2.2.3.2-2 大陸鋼渣水泥各項原料之化學成分

名稱	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	FeO	P ₂ O ₅	燒失量	f-CaO
石灰石	51.20	1.77	1.21	0.82	1.32	-	-	40.05	-
粘土	7.54	58.56	4.25	12.06	1.50	-	-	10.05	-
鐵粉	2.62	24.90	50.66	19.75	1.42	-	-	5.52	-
寶鋼轉爐渣	38.4	9.6	8.6	6.5	13.1	18.1	0.9	-	7.1

資料來源：本研究整理

2.3 綠色材料運用於道路橋梁結構之發展

依據上節綠色內涵推動政策所述，道路橋梁之節能減碳推動可分為環境設計、施工方法及材料選用等三方向互相搭配，促使及擴大公共建設投資項目能達綠色內涵使用費用不低於工程預算(不含土地、地上物補償及勞務採購等非工程經費)10%的目標，並藉此降低道路橋梁結構對周圍環境的影響，落實節能減碳的目的。

2.3.1 綠色材料運用於道路橋梁結構類型

針對道路橋梁工程的綠色材料結構，主要可分為瀝青混凝土與混凝土兩大項，由於道路橋梁結構係關係用路人生命財產安全，關乎政府單位對公共安全的把關與維繫，應在確保安全性的前提下，節能減排的要求才具意義。針對道路橋梁結構的綠色材料選用思維，應以能提供同天然材料的使用安全性為基準，建議亦經國內外工程實際使用，再將其納入主要結構體中，尤以混凝土結構更需待時間的證明。援此，彙整已具工程實績的道路橋梁工程綠色材料種類，參引工程會對水利工程綠色材料選用指標的分類可分成再生利用材料、耐久性材料、替代性材料及自然材料等四種類型，如表 2.3.1-1 所示。

本計畫執行目的係以評估道路橋梁結構使用的綠色材料為主，使用後的經濟效益以連結材料成本與節能減碳的概念，以符合「構建綠色運輸系統」的政策方向。故先以能降低二氧化碳為設定條件，評估目前表 2.3.1-1 所列的材料用途，選用替代性材料將最具可行性。

表 2.3.1-1 具實務驗證的道路橋梁綠色材料項目

分類指標	材料用途	說
替代性材料	飛灰或高爐石粉替代水泥(橋梁結構) 轉爐石透水瀝青(道路鋪面)	以替代性材料取代傳統材料， 最具二氧化碳減排效益 。
耐久性材料	<ul style="list-style-type: none">高性能混凝土(橋梁結構)高強度鋼筋(橋梁結構)	優先採用耐久性材料，延長使用年限及減少維修或更新施工時開挖道路之次數，以節省資源。
再生利用材料	<ul style="list-style-type: none">輕質混凝土(橋梁結構)再生瀝青(道路鋪面)再生瀝青混凝土(道路鋪面)	使用營建及事業廢棄物等資源再生(回收再利用)產品。但材料需經處理製程，並產生額外能耗， 節能功效需透過後續結構設計達成 。
自然材料	<ul style="list-style-type: none">表土再利用(邊坡)乾砌塊石(擋土)多孔質砌石護岸(橋梁結構)木材圍籬或木材隔音牆(其它)	使用就地取材之材料或天然材料，以降低工程對環境衝擊， 以不增加工程額外能耗與碳排為主 。

2.3.2 綠色材料運用於道路橋梁結構之研究概況

依循上節道路橋梁結構對綠色材料選用思維，本計畫以評估飛灰或高爐石粉作為卜作嵐材料及混合水泥替代水泥的可行性為工作重點展開，並以混凝土為研究對象，另考量未來綠色材料之多元化，本團隊針對不同可資源再利用之事業廢棄物進行研究探討，在不同的環境條件，以適材適用的角度展現綠色材料的價值性，真正的達到資源循環利用的核心目標。

對此，除 2.2 節對各項綠色材料的介紹外，本團隊蒐集過往國內各政府機關對於綠色材料及運用於道路橋梁結構之研究文獻，概述如下：

一、交通部公路總局

101 年曾委託詹穎雯教授進行台灣地區大氣中氯鹽與橋梁腐蝕劣化環境之研究[55]，目的為建立台灣全島地區鹽害潛勢分區，進而擬定腐蝕防治對策，亦有防蝕設計規範能夠依循。

西部濱海公路中區工程處於 103 年委託黃兆龍教授辦理「高性能混凝土運用於橋樑之委託研究工作」[56]，研究項目為製作高性能混凝土預力梁，並進行構件力學試驗，探討不同 HPC 類型預力構件之撓曲行為、剪力行為及其裂

縫發展，以及預力損失等，彙集與掌握各類型 HPC 材料性質特性與預力構件行為，作為國內公路總局橋樑工程設計與應用之參考資訊。

二、交通部台灣區國道新建工程局

94 年曾委託顏聰教授及陳豪吉教授進行「輕質高強度混凝土在橋樑工程之應用」[57]，依據預力橋樑之強度要求，進行輕質骨材的基本性質研究，進而研擬輕質混凝土配比，完成輕質混凝土之新拌與硬固性質及工程性質之研究。

104 年曾委託詹穎雯教授辦理「活性粉混凝土材料應用於橋梁工程之研究」[58]，活性粉混凝土（Reactive Powder Concrete, RPC）為超高性能混凝土（UHPC）之一種，具有超高強度、高韌性及高耐久性之特色將 RPC 材料應用於橋梁工程，可縮小構件斷面尺寸、減輕上部結構自重及地震力影響，減少墩柱與基礎尺寸及基礎開挖數量，降低砂石材料用量，低滲透的高耐久特性並能抑制鹽害侵蝕、延長橋梁使用壽命，以全生命週期之永續工程觀念看待 RPC 材料，其具有降低對環境衝擊之效益。

三、交通部運輸研究所

99 年曾委託黃然教授進行「RC 橋梁材料耐久性評估與殘餘壽命預測之研究」[59]，該計畫針對鋼筋混凝土橋梁的材料劣化評估以及殘餘壽命預測進行研究。研究供做橋梁結構物耐久性的參考，而且可以作為橋梁系統管理的決策依據，亦即作為既有鋼筋混凝土橋梁維修、補強或拆除的參酌。

四、內政部建築研究所

98 年曾委託張大鵬教授進行「綠混凝土性質與指標之研究」[8]，規劃與建立台灣相關綠色混凝土性質與指標之最佳時機，期能建立本土化指標與推廣平台，帶動混凝土科技與相關產業朝向智慧、潔淨、效能及永續之目標前進，除了減少二氧化碳的產生量與提升混凝土耐久性質之外，並可增加其工業廢棄物的附加價值與再利用性，以達到節能減碳永續發展之目標。

100 年曾委託黃然教授進行「永續混凝土材料之實驗開發與應用研究」[60]，其研發主要考量混凝土結構的全生命週期，著重於可產生重大影響的創新技術的開發，以建造符合永續發展的建築物。未來的混凝土不僅需滿足耐就性的要求，更要符合能源、環境永續發展的趨勢。綠建築、永續性與永續發展目前並無全球共同接受的定義，一般認為除能滿足這一代需要的各項發展，而

不會影響後代滿足他們各項需求的能力，即為永續發展。所以，永續發展兼顧環境議題、社會議題與經濟議題三大範疇。

101 年曾委託黃然教授進行「使用爐渣(石)對於混凝土力學與耐久性能之研究」[61]，在節能減碳永續需求下，減用卜特蘭水泥已是混凝土科技研發的主要課題，適量的使用高爐石粉除可少用水泥用量外，亦可能增進混凝土性能如耐久性等，達到永續混凝土或生態混凝土的需求。該研究主要探討水淬高爐石粉三種作為混凝土膠結料的技術內涵，包括使用量、使用條件與限制條件等。

五、科技部(行政院國家科學委員會)

83 年曾委託趙文成教授進行「高性能混凝土在單軸作用力下之力學行為」計畫[62]，研究 HPC 之單軸力學性質，並與國科會目前推動之高性能混凝土研究群之需要相結合，作出適合本土使用 HPC 之基本力學性質。

99 年曾委託張大鵬教授進行「先進混凝土材料應用於防洪構造之研究---總計畫暨子計畫：綠混凝土防洪耐久及耐震性質研究」[63]，該研究旨在開發具耐水流和與土石流之沖刷及衝擊磨損與地震力等外力作用之綠混凝土材料，用於水工防洪構造之建造及維修，確保防洪構造之良好服務功能與長期使用壽命，以期公共工程之維護與國家資源之利用均能達到「永續發展與節能減碳」之綠色目標。

100 年曾委託陳君弢教授進行「添加石灰石於水泥及混凝土之性能研究」[64]，添加石灰石以取代部份水泥及混凝土中的粗細粒料已為國外所廣泛應用。然於國內受限於法規要求、性能及來源不確定性等因素，目前相關製品的製造量與使用量有限。有鑑於此，該計畫特針對石灰石添加於卜特蘭水泥之後的性能及其應用於混凝土之可行性進行研究，期能協助營造業達節能減碳之目的。

101 年曾委託李明君教授進行「混凝土之減碳技術研究」[65]，評估與研發各式水泥混凝土吸附二氧化碳之能力，研究內容包括搜集探討綠水泥混凝土與其吸附二氧化碳之機理文獻資料，再進行相關實驗部分佐證。

103 年曾委託黃兆龍教授進行「歐盟大型整合全廢棄物計畫—永續、創新及節能的混凝土 (SUS-CON)」計畫[66]，針對農工業廢棄物、回收廢棄物



等，以材料科學角度將廢棄物轉化為可用且附有經濟價值之綠建材。

103 年曾委託黃然教授進行「水淬高爐石粉及轉爐石粉混合使用對混凝土性質及減碳效益之研究」[67]，高爐渣及轉爐渣是鋼鐵工業的副產品，其化學性質相近卜特蘭水泥，因此可做為混凝土的輔助膠凝材料或水泥熟料。該研究主要將兩種材料的特性混合運用，開發成一種完全未添加卜特蘭水泥的水泥質膠凝材料，評估不同混配比凝土對環境衝擊的影響，研究成果有助改善資源過度使用、全球暖化的問題和解決資源再利用之問題。

2.3.3 綠色材料實務運用於道路橋梁結構介紹

根據國內外發展應用情況的蒐集，不同綠色材料配比應用可分成「飛灰與高爐石粉取代水泥一般比例」、「飛灰與高爐石粉取代水泥高摻量比例」、「混合水泥」等三類，故本團隊蒐集不同綠色材料配比應用之工程實績，實務產製的配比與強度表現、周圍環境對材料結構影響與材料耐久特性等資訊，並藉此作為後續工作執行之參考依據，以下各節依序舉列目前所彙整的案例資料，以作為本計畫選定的綠色材料組成評估依據。

一、飛灰與高爐石粉取代水泥一般比例

國內對飛灰與高爐石粉取代水泥之使用，目前多以飛灰與高爐石粉添加不超過總膠結材料重量之 50% 為上限，並註明於施工規範中，相關工程實績包括中山高五楊拓寬段、二高烏日橋、高雄東帝士 85 層、台北市 101 大樓、南港車站地下化工程等工程。另針對飛灰與高爐石粉添加超過 50% 門檻的工程案例，為目前正興建中的台北捷運環狀線工程，針對結構混凝土配比設計所使用飛灰與高爐石粉取代水泥之添加量，占總膠結材料量 50%，主要目的為提升結構體抗侵蝕能力。該工程全長共 15.4 公里，14 車站(地下 1 站，高架 13 站)。

本計畫蒐集的各工程機關應用實績如下。

(一)交通部台灣區國道新建工程局

國工局工程的使用多設定添加至總膠結材料重量 45% 為上限門檻，以該局辦理國道六號南投段工程、國道三號烏日橋、高雄聯港外高架及國道一號五股至楊梅段拓寬工程為例，如下所列。

1. 國道六號南投段工程

國道六號南投段工程，未開放飛灰使用，係考量對飛灰品質管控信心度不足，該工程為國工局首件大量採用水淬高爐石粉工程，所用水淬高爐石粉細度為120級，須注意當澆置較大體積構件，可能產生水合熱問題，此時總膠結量約為 480 kg/m^3 ，如表2.3.3-1所示，混凝土強度，如表2.3.3-2所示。

表 2.3.3-1 國道六號南投段工程混凝土設計配比

項目	水泥	高爐石粉	水	藥劑	細粒料	粗粒料
配比 350(W/B=0.372)	253	207	165	5.98	848	864
配比 420(W/B=0.357)	264	216	165	6.24	830	864

資料來源：本團隊訪談預拌廠整理

單位： kg/m^3

表 2.3.3-2 國道六號南投段工程混凝土強度

齡期(天)	3	5	7	14	28
配比 350(W/B=0.372)	326	451	516	646	688
配比 420(W/B=0.357)	346	462	571	686	774

資料來源：本團隊訪談預拌廠整理

單位： kg/m^3

2. 國道三號烏日橋

烏日穿越橋因首用SCC，配比設計較保守，總膠結材量近 600 kg/m^3 ，其28天抗壓強度高達 720 kgf/cm^2 ，在配比上與一般混凝土不同，如表2.3.3-3所示。雖高性能混凝土之生產與施工已能掌握，惟其硬固後之力學與變形特性如乾縮及潛變係數等，是否會因配比特性而對構件產生不同的影響，則有待加以了解及探討。

表 2.3.3-3 烏日交流道穿越橋混凝土設計配比

計畫別	施工期間	水膠比	各項材料使用量(kg/m^3)		
			水泥	飛灰	高爐石粉
烏日交流道穿越橋	1999-2001	0.32	320	93	183

資料來源：本團隊訪談預拌廠整理

3. 高雄港聯外高架

此計畫預鑄墩柱節塊使用自充填混凝土 (Self-Compacting Concrete，簡稱SCC)，為縮短混凝土強度發展所需時間，使其混凝土能提早到達拆

模所需之強度，以提高預鑄場的生產效率，此計畫採用420 kgf/cm²(早強)SCC，配比如表2.3.3-4所示，混凝土澆置則採吊桶裝料澆注之方式辦理。

表 2.3.3-4 高雄聯港外高架混凝土設計配比

水膠比	各項材料使用量(kg/m ³)						
	水泥	飛灰	高爐石粉	水	砂	粗骨材	附加劑
0.35	275	0	225	169	898	806	7.5

資料來源：本團隊訪談預拌廠整理【100】

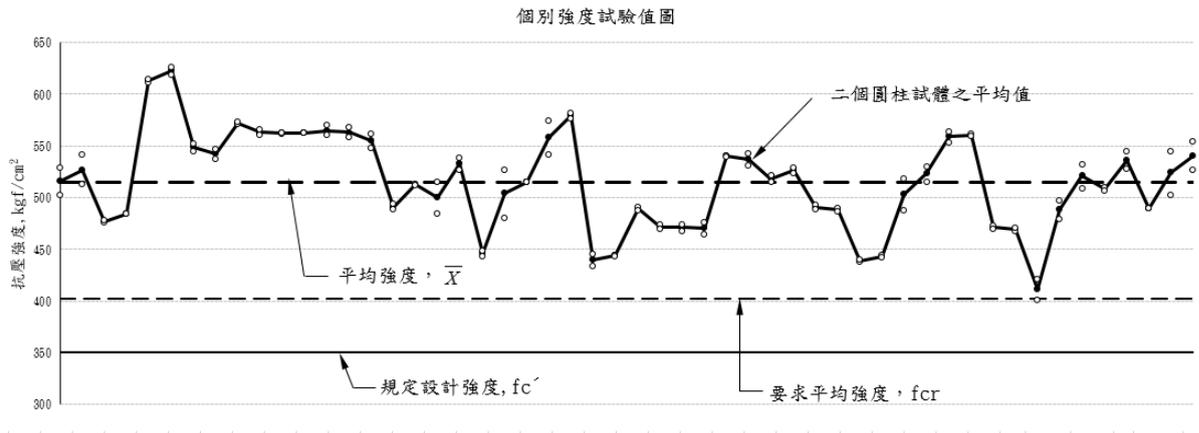
4. 國道一號五股至楊梅段拓寬工程

該工程所使用的混凝土強度從80 kgf/cm²到420 kgf/cm²間，其中針對混凝土強度 350 kgf/cm²的配比資訊如表2.3.3-5所示。據該該配比強度進行的統計分析資料所示(蘆竹中壢段北上線及內壢交流道段墩柱，材料配比如類屬 C 類)，28天強度平均強度為 515 kgf/cm²，皆可達到抗壓強度(400 kgf/cm²)管控要求(如圖 2.4.3-1示)，28天抗壓強度與水膠比關係(如圖2.3.3-2所示)。

表 2.3.3-5 國道 1 號五股至楊梅段拓寬工程配比設計

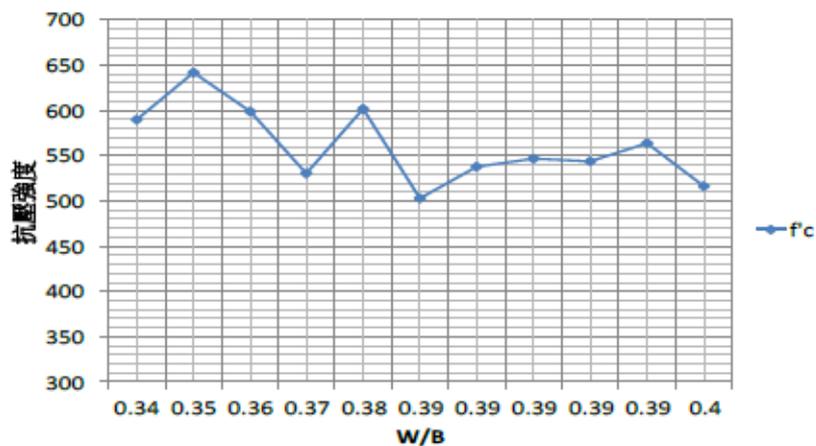
類別	水膠比	水泥(kg/m ³)	飛灰(kg/m ³)	高爐石粉(kg/m ³)	水(kg/m ³)	細粒料(kg/m ³)	粗細料(kg/m ³)
A	0.37	250	45	155	170	905	802
B	0.39	250	45	155	175	919	795
C	0.39	250	45	155	171	917	807
D	0.38	250	45	155	170	918	799
E	0.39	250	45	155	170	930	799
F	0.34	250	45	155	170	988	799
G	0.35	250	45	155	170	918	793

資料來源：本團隊訪談預拌廠整理【100】



資料來源：本團隊訪談預拌廠整理【100】

圖 2.3.3-1 國道 1 號五股至楊梅段拓寬工程混凝土抗壓強度統計圖



資料來源：本團隊訪談預拌廠整理【100】

圖 2.3.3-2 五楊拓寬段 SCC 28 天抗壓強度與水膠比關係

5.金門大橋

有關興建中的金門大橋因考量跨海橋、海水、海風等外在條件，為降低環境侵蝕及提升結構耐久性，設計單位在該工程混凝土應用條款中規定可添加飛灰及高爐石粉作為礦物摻料使用，膠結材料的組成分別為水泥、高爐石粉、飛灰，其用量比例分別為 55%、35%、10%，其強度表現以設計強度 350 kgf/cm² 為例，平均抗壓強度約 600 kgf/cm²，皆可達到目標強度 (400 kgf/cm²) 管控要求。

(二) 臺北市政府捷運工程局

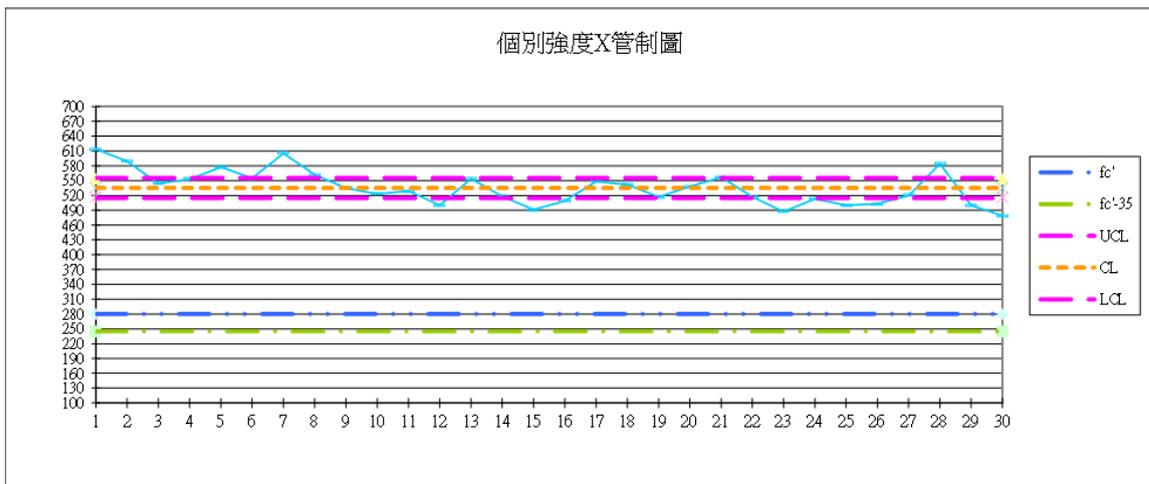
針對添加至總膠結材料量 50% 的工程案例，以台北捷運環狀線工程為例，其中大坪林站車站結構體採用自充填混凝土，其澆置用配比如表 2.3.3-6 所示，一般結構及側牆皆採 280 kgf/cm²，以 A 配比來看 28 天

抗壓強度約 509 kgf/cm^2 ，皆可達到目標強度(350 kgf/cm^2)管控要求，如圖 2.3.3-3 所示。

表 2.3.3-6 台北捷運環狀線工程混凝土配比設計

類別	水膠比	水泥 (kg/m^3)	飛灰 (kg/m^3)	高爐石粉 (kg/m^3)	水 (kg/m^3)	細粒料 (kg/m^3)	粗細料 (kg/m^3)
A	0.39	225	90	135	172	870	822
B	0.38	235	94	141	172	860	812
C	0.35	250	100	150	167	868	788

資料來源：本計畫團隊訪談預拌廠整理【100】



資料來源：本計畫團隊訪談預拌廠整理【100】

圖 2.3.3-3 台北捷運環狀線工程混凝土抗壓強度統計圖

(三) 國立海洋生物博物館

有關添加飛灰與高爐石粉取代水泥的材料結構對周圍環境與耐久性的部分，根據屏東國立海洋生物博物館興建工程在考量工址屬於潮濕海域環境及工程設計年限 75 年為目標前提下，採用高爐石粉及飛灰作為礦粉摻料取代部分水泥進行高耐久性等級的混凝土配比設計，其中高爐石粉及飛灰佔總膠結材料約 45%。其中，該工程分別針對高爐石粉及飛灰之抗硫酸鹽能力進行 56 天的長期檢測，且規定氯離子滲透電量測試值(AASHTOT-277)小於 1,000 庫倫方符合混凝土施工品質，檢測結果如圖 2.3.3-4 所示，混凝土之滲透量平均約為 500 庫倫，說明其滲透係數非常小，顯示混凝土有較高的水密性，能抵抗氯化物侵入腐蝕鋼筋，可有效提升結構耐久性。

該工程混凝土之配比如表 2.3.3-7 所示。其中飛灰高爐石粉佔總膠結料

之 42-46%，主要有如下考量原因：

1. 增加工作度

由前述可知，飛灰高爐石粉取代部分水泥有助於提昇混凝土之工作度。該工程為保證混凝土品質而採用高流動性混凝土。飛灰高爐石粉之使用是達成這一目標之經濟而有效方法。

2. 降低水合熱

該工程由耐久性考量而混凝土之水膠比較低，所以膠結料用量在 400 kg/m³ 以上。如不使用飛灰高爐石粉等礦粉摻料，恐有水合熱過高產生溫度裂縫之慮。

3. 增加水密性及耐久性

該工程為海洋工程，氯離子侵蝕較為嚴重。為達成 75 年之設計使用年限，混凝土必須有較高之水密性，以抵抗氯離子侵入，腐蝕鋼筋。礦粉摻料(特別是細度較高之高爐石粉)可有效地提昇混凝土之水密性與耐久性。該工程所用混凝土之氯離子滲透量(AASHTOT-277)為 500 庫倫，說明其滲透係數非常小。

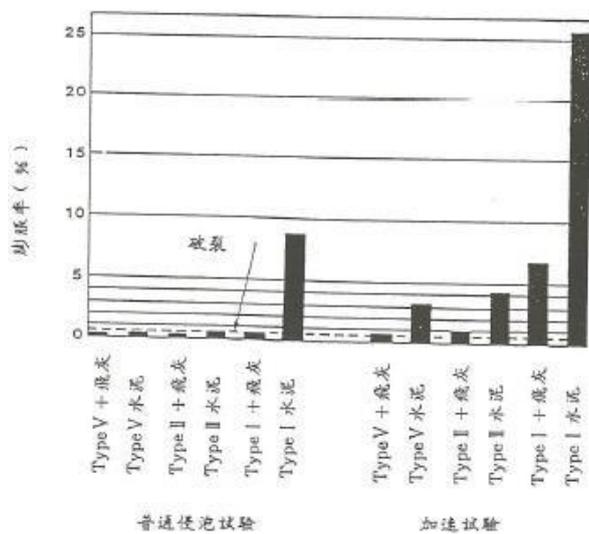
表 2.3.3-7 國立海洋生物博物館使用高爐石混凝土之配比(kg/m³)

材料配比 (kgf/cm ²)	水泥	水	飛灰	高爐石粉	細骨材	粗骨材		強塑劑(F)	腐蝕抑制劑	水膠比
						19 mm	9.5 mm			
A 級(280)	220(I)	123	115	70	884	481	481	7.0	0	0.32
B 級(280)	260(II)	106	118	90	863	475	475	9.0	14.3	0.28
C 級(350)	290(II)	143	118	90	815	370	560	9.5	14.3	0.34
E 級(280)	260(II)	113	118	90	830	475	475	9.0	0	0.26

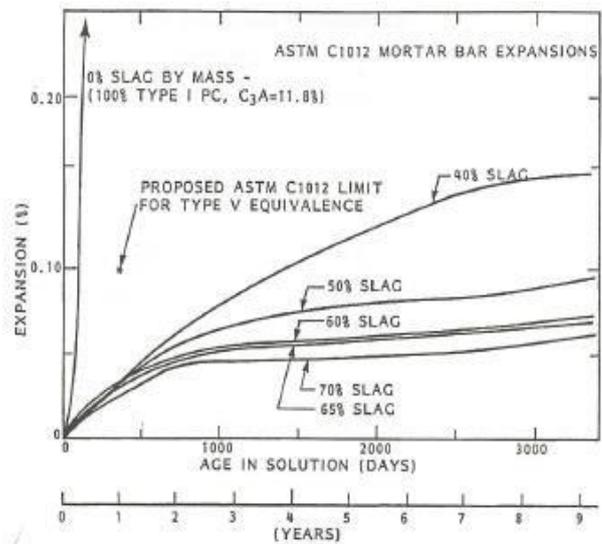
註：1. 設計坍度 22.2 cm；含氣量 2% 以下。

2. D 級配比係 140 kgf/cm² 之打底混凝土，因未添加高爐石粉，故不予表列。

資料來源：本計畫團隊訪談預拌廠整理【100】



(1) 添加飛灰



(2) 添加高爐石粉

資料來源：Singh, D and Tiong, R. L. K. 【89】

圖 2.3.3-4 飛灰與高爐石粉添加對混凝土抗硫酸鹽侵蝕之影響

(四) 台北101

自充填混凝土之開發與運用，不僅可解決混凝土之澆置問題，更可免除搗實工作，使混凝土品質大幅提昇，同時達到施工合理化、省力化，減少技術工人需求及縮短工期等自動化目標，以台北 101 工程為例，其澆置用配比如表 2.3.3-8 所示，設計強度皆為 704 kgf/cm²，高爐石粉添加量為 20~30%，規格採用 100 級。

表 2.3.3-8 台北 101 混凝土設計配比

工程名稱	設計強度 (kgf/cm ²)	W/B	各項材料使用量(kg/m ³)				
			水泥	高爐石粉	飛灰	矽灰	石粉
台北 101	704	0.33	340	150	-	30	-
	704	0.31	340	130	-	30	80

資料來源：本計畫團隊訪談預拌廠整理

二、飛灰與高爐石粉取代水泥高摻量比例

(一) 高飛灰摻量

高摻量飛灰混凝土(High Volume Fly Ash Concrete, HVFAC)係指採用了高添加比例(>50%)以上之飛灰以替代水泥作為膠結材料的混凝土，且由預拌業者於生產時按配比直接計量使用。國內針對高飛灰摻量混凝土應用成功之工程實績「中興工程研究大樓新建工程」[68][69]，為國內首例採用 HVFAC 於基礎版及連續壁建置作業內，其中基礎版混凝土澆置量約

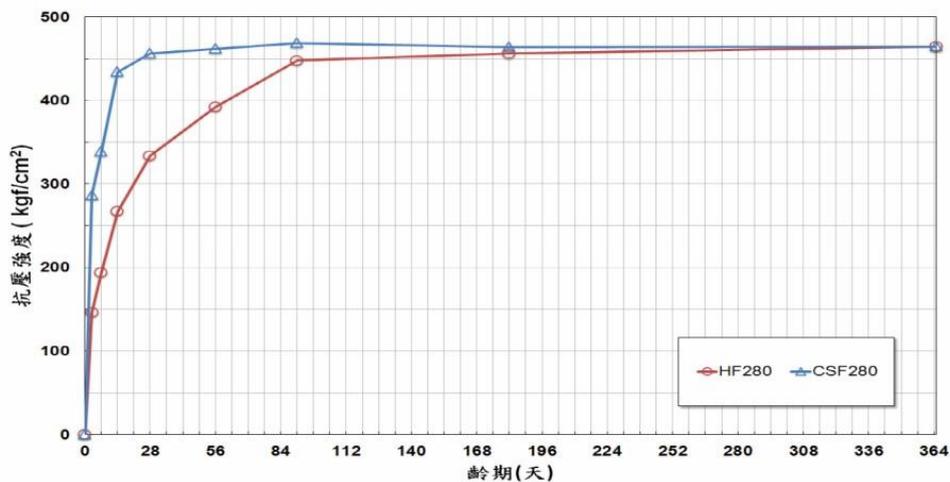
1,386m³，使用 50% 飛灰取代量之 280 kgf/cm² 等級 HVFAC；連續壁單元混凝土澆置量約 262m³，使用 50% 飛灰取代量之 310 kgf/cm² 等級 HVFAC。兩組 HVFAC 配比設計之水膠比皆小於 0.4，膠結材用量分別為 390 kg/m³ 與 396 kg/m³，詳細配比設計如表 2.3.3-9。

其中，以基礎版配比設計(HF280)為例，HF280 配比早期強度發展較 CSF280 配比緩慢(如圖 2.3.3-5 所示)，在 91 天齡期前，其強度幾乎以每階段 15%~20% 之 28 天抗壓強度作成長，但在 91 天齡期時，HF280 配比之強度已與 CSF280 配比相近，1 年齡期後 HF280 配比之強度則已與 CSF280 配比相同，因此 HVFAC 未來在工程設計時，便應著重於其長齡期之強度效益，並以 56 天齡期或 91 天齡期之強度作為設計需求值，如此始可實質應用飛灰取代水泥以達節能減碳效益，且發揮飛灰於長齡期時之耐久性特點。

表 2.3.3-9 中興工程研究大樓新建工程高摻量飛灰混凝土配比設計

工項	配比編號	飛灰取代率(%)	水膠比	水泥(kg/m ³)	飛灰(kg/m ³)	高爐石粉(kg/m ³)	水(kg/m ³)	細粒料(kg/m ³)	粗細料(kg/m ³)
基礎	HF280	50	0.394	195	195	0	149	798	985
	CSF280	10	0.444	238	40	119	172	754	1037
連續壁	HF310	50	0.380	198	198	0	145	899	884
	CSF310	10	0.460	316	42	63	192	795	923

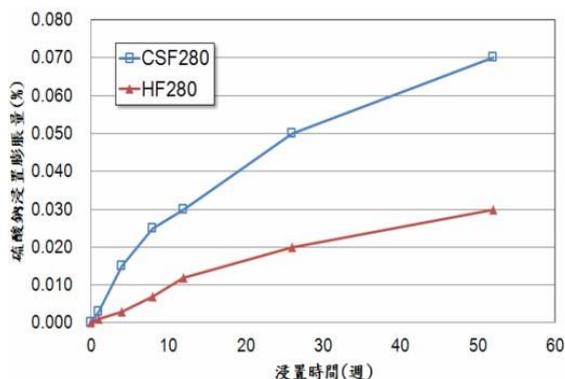
資料來源：中興工程顧問社「中興工程研究大樓新建工程」【85】



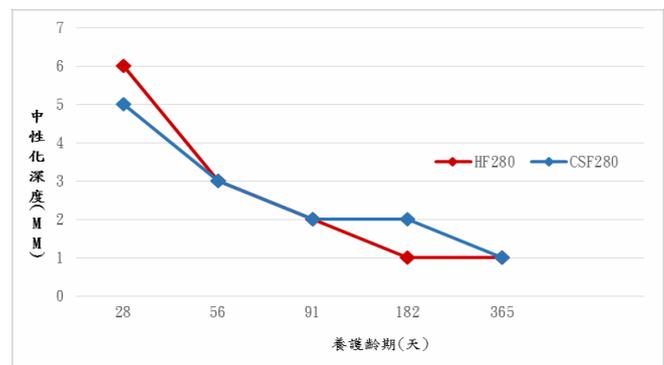
資料來源：中興工程顧問社「中興工程研究大樓新建工程」【85】

圖 2.3.3-5 高飛灰摻量混凝土抗壓強度發展曲線

另針對使用高摻量飛灰之材料結構對周圍環境與耐久性的部分，HVFA 混凝土由於飛灰之使用量高，因此抗硫酸鹽侵蝕之性能佳，52 週之浸置試驗下，僅產生 0.03% 之膨脹量；至於 CSF280 配比，其雖然亦使用飛灰、水淬高爐石粉等卜作嵐材料取代部分水泥，但其相對比例仍較 50% 之 HF280 為低，因此其抗硫酸鹽侵蝕之性能略為下降，但皆較無卜作嵐摻料之純水泥混凝土為佳。另透過 HF280 配比與 CSF280 配比於不同齡期之中性化評估可知(圖 2.3.3-6)，HF280 混凝土由於飛灰與氫氧化鈣之二次水化作用，因此混凝土中之氫氧根離子 OH^- 被快速消耗，故混凝土之 pH 值將朝中性發展，所以高飛灰摻量有加速混凝土中性化之效應，但透過長齡期之養護，中性化深度將可明顯減緩，因此，就中性化之角度而言，HVFAC 之應用應以基礎或為地下結構為主，因為此部分結構體接觸之二氧化碳濃度較低，且結構體在土壤覆蓋下具一定程度養護效果，對於 HVFAC 耐久性具增強效益。



(1) 硫酸鈉侵蝕膨脹量



(2) 中性化量測

資料來源：中興工程顧問社「中興工程研究大樓新建工程」【85】
圖 2.3.3-6 高飛灰摻量混凝土之耐久性測試

(二)高比例高爐石粉摻量

正確使用高爐石粉替代混凝土中部分水泥可有效改善新拌混凝土之工作度及硬固混凝土之強度與耐久性。特別是可以提高水密性、降低水合熱及提高抵抗硫酸鹽侵蝕、氯離子滲透及鹼骨材反應之能力。因此，如果養護條件及時間符合規定，高爐石粉可應用於高流動性、高水密性、低水合熱、高耐久性之混凝土工程。依工程會所頒訂公共工程高爐石混凝土使用手冊[18]，明列相關高爐石粉以不同替代率水泥砂漿強度成長之研究結果。高爐石粉替代水泥達 70% 的條件下，即便早期強度略顯不足，但 28

天的強度仍然與純水泥相近。

國內外重大工程使用高爐石粉之實例，均以混凝土之工作度、水密性、水合熱及耐久性等為主要考慮因素。以下介紹國內外一些應用實例，以說明使用水淬高爐石粉之效益。

日本東京灣橫斷道路位於橫濱東京灣中央部位，總長 15 km(海底隧道 10 km 及橋梁 5 km)。該工程之海底隧道所使用的混凝土環片係在海底下的軟弱地盤當中，承受 6 kgf/cm^2 水壓之作用，因此必須具優良的耐海水性及高水密性。此外，亦應避免因水合熱上升速率過快可能引發之溫度裂縫。基於因應上述問題而採用高爐石混凝土（高爐石粉替代率 50%）。

實例證明，該工程使用高爐石粉獲得如下效益：

1. 改善水密性

添加高爐石粉可提昇混凝土的水密性，係因使用高爐石粉可以減少混凝土的細孔量，特別是其中孔徑較大者之減少尤為顯著。此項成效咸認為可以抑制水在混凝土內部的移動，並防止水的滲透及鋼筋銹蝕。

2. 抑制氯化物(鹽分)滲透

使用高爐石粉的混凝土，除了水密性可以獲得改善以外，氯化物的滲透情形也大幅度受到抑制，抑制了混凝土內部鋼筋的銹蝕效果。

3. 抑制溫度龜裂

該工程 RC 環片厚達 65cm 屬巨積混凝土。使用高爐石粉有效抑制了構材內部溫度的上昇，而使最高溫度降低至 16°C ，符合規範要求，免除了由於溫度應力所產生的龜裂。

4. 強度發展

添加高爐石粉的混凝土以蒸氣方法養護時，養護條件與強度的關係與一般混凝土比較類似，經由最高溫度的上昇及最高溫度保持時間的適度延長，乃至前置時間的確保等等，拆模強度可以獲得提高。

5. 拌合的均勻性

在製作環片時，高爐石粉係在生產環片的預鑄廠添加。經過試拌結

果，確認每種拌合設備，都可以達到均勻拌合的效果。

6. 高爐石粉的品質

使用在此項RC環片的高爐石粉的品質，除了符合日本土木學會的混凝土用高爐石粉規格之外，還增加了細度(4500~5000 cm^2/g)及鹽基度(1.8以上)的規格。以上述檢討為基礎，在各個環片工場進行試作實驗，高爐石粉乃被採用為東京灣橫貫道路工程所使用的RC環片混凝土所需的添加材料。

另日本明石海峽大橋(總長 3,920m，中央跨之長度 1,990m)是日本最長吊橋。該橋下部結構使用 142 萬 m^3 混凝土。由於墩柱體積龐大，且其錨座鋼筋密集，施工不便，除了須控制水泥之水合熱外，混凝土也需有良好之流動性。該工程使用較高之高爐石粉替代率(80%)，解決了水合熱問題，也提高了混凝土之流動性，便於施工。此外，混凝土工作度之提昇配合澆置自動化，使澆置時間縮短而縮短整個工程之工期。

而長谷水庫位於兵庫縣神崎郡大河內町市川系，提供 1,280MW 電力。水壩為混凝土重力壩，壩高 102m，底部寬度 70m，壩體混凝土總體積約 54 萬 m^3 ，因此屬於巨積混凝土工程。為控制溫度裂縫，本工程規定混凝土澆置時之初始溫度不得超過 22°C ，及每昇層高度為 75cm(每層澆置最大厚度 25cm)，其中心部分混凝土使用第 II 型水泥，並使用高爐石粉替代水泥(替代率 65%)，有效降低混凝土內部溫度之上升。

有關前述工程其高爐石粉摻量的混凝土配比請參閱表 2.3.3-10。

表 2.3.3-10 國外高爐石粉摻量的混凝土配比設計

工程名稱	施工年份	設計強度 (kgf/cm ²)	水膠比 (W/B) (%)	膠結材 (kg/m ³)	用水量 (kg/m ³)	砂石比 S/A (%)	爐石粉		混凝土 數量 (m ³)
							細度 (cm ² /g)	替代率 (%)	
長谷水堤體工程	1988~ 1993	172(91 天)	77.1	140	108	28	3300	65	539,000
明石海峽大橋 頂版工程	1992~ 1998	240(28 天)	52.3	260	186	40	6000	83	25,300
東京灣橫斷道 路預鑄環片	1992	480(28 天)	30.6	420	137	42	4750	50	500,000
東京灣川崎人 工島連續壁	1992	360(91 天)	35.7	420	150	48	4300	45	120,000
首都高灣岸線 沉埋箱涵	1993	350(28 天)	34.6	507	175	52.2	6000	70	860

資料來源：公共工程高爐石混凝土手冊【18】

至於國內使用高摻量高爐石粉的工程案例，如高屏溪攔河堰及南星計畫。高屏溪攔河堰工程位於高雄縣大樹鄉，於民國 85 年 4 月至 88 年 5 月施工，主體結構採用第 II 型卜特蘭水泥施工，但兩岸固床工混凝土塊(3×3×3m)共有 15 萬 m³ 混凝土均採用高爐水泥（高爐石粉含量 40%）施工，以取代第 II 型卜特蘭水泥，降低水合熱，減少溫度裂縫，有很好效果，並節省水泥費用 1,700 萬元以上。

南星計畫工程位於高雄市大林浦為填海造陸工程，中程計畫第 I 區、第 II 區及相關配合工程於民國 84 年至 91 年施工，混凝土主體結構為消坡塊、胸牆、堤面等三部份，因為混凝土須具備抗海水及鹽份侵蝕等耐久性作用，全部採用高爐水泥（高爐石粉含量 40%）取代卜特蘭 II 型水泥施工，效果非常好，混凝土共約 47 萬 m³，共採用水泥約 14 萬噸，節省水泥費用約 7500 萬元，如表 2.3.3-11 所示。

表 2.3.3-11 國內高爐石粉摻量的混凝土配比設計

工程名稱	施工年份	28 天設計強度 (kgf/cm ²)	水膠比 (%)	膠結材 (kg/m ³)	用水量 (kg/m ³)	砂石比 S/A (%)	爐石粉		混凝土數量 (m ³)
							細度 (cm ² /g)	替代率 (%)	
高屏溪攔河堰	1996~1999	140	73	222	162	37	-	40	150,000
南星計畫 消波塊、胸牆堤面	1995~2000	210	65	311	202	45	-	40	470,000
		175	69	285	196	44			

資料來源：本計畫團隊訪談中聯公司整理

三、混合水泥

隨著工程界愈形重視混凝土耐久性質，對混凝土的品質、均勻性、穩定性等更有更高之需求，先進國家又發展出將高爐水泥及卜作嵐水泥預先調配合成混合水泥，並制定相關的標準規範。國內針對混合水泥材料規格已訂定 CNS 15286「水硬性混合水泥」國家標準，因混合水泥因添加部分的卜作嵐材料，適度的改善了混凝土的性能，不僅能用於一般用途，在特殊用途上(例如抗硫酸鹽、早強、低水合熱)能有更佳之效益。混合水泥應用即為提倡在性能導向的前提下，高爐水泥中其高爐石粉添加比可不受限制，最高添加比可達總量 95%，更提升結構抵抗環境之能力，為未來應用開發趨勢。

混合水泥係採用高爐爐渣或卜作嵐材料或以上兩者，與卜特蘭水泥或卜特蘭水泥熟料製成，或與高爐爐渣與石灰製成。過往國家標準將此類型之水泥分成卜特蘭高爐水泥 CNS 3654 及卜特蘭飛灰水泥 CNS 11270，但隨著國際規範之修訂，國內於 98.10.21 訂定 CNS 15286 水硬性混合水泥，並於 100.3.16 廢止卜特蘭高爐水泥 CNS 3654 及卜特蘭飛灰水泥 CNS 11270，全部併入 CNS 15286 中。惟過往高爐水泥於國內已累積相當工程實績，故將高爐水泥與混合水泥之工程應用分述如下。

(一)高爐水泥

高爐水泥混凝土係指採用了高爐水泥完全替代水泥作為膠結材料的混凝土，其中所指高爐水泥係取水泥熟料與高爐石粉共同研磨或均勻拌製而成，其型別如表 2.3.3-12。有關高爐水泥混凝土之使用，國內成功實績有「高雄都會大眾捷運系統紅橘線路網建設案」、「大鵬灣跨海大橋



新建工程」及「淡海一期環狀線輕軌工程」等。以「高雄都會大眾捷運系統紅橘線路網建設案」為例，工程中除部分高架段及隧道環片採一般低鹼水泥外，其餘結構體均採用高爐水泥混凝土進行建置作業。各區段標所使用之高爐水泥混凝土，其設計強度皆為 280 kg/m^2 ，相關配比設計資訊如表 2.3.3-13 所示。以 CO_2 區段標之配比設計為例，其在 28 天後之抗壓強度表現如圖 2.3.3-7 所示，預拌廠商之生產供應品質穩定外，其抗壓強度統計結果平均在 530 kg/m^3 符合設計要求強度，惟抗壓強度結果偏高，尤其是晚期強度，隨著卜作嵐反應而持續增加，於後續進行配比設計進行安全係數設定時宜特別注意。

表 2.3.3-12 高爐水泥與卜作嵐水泥的種類與用途

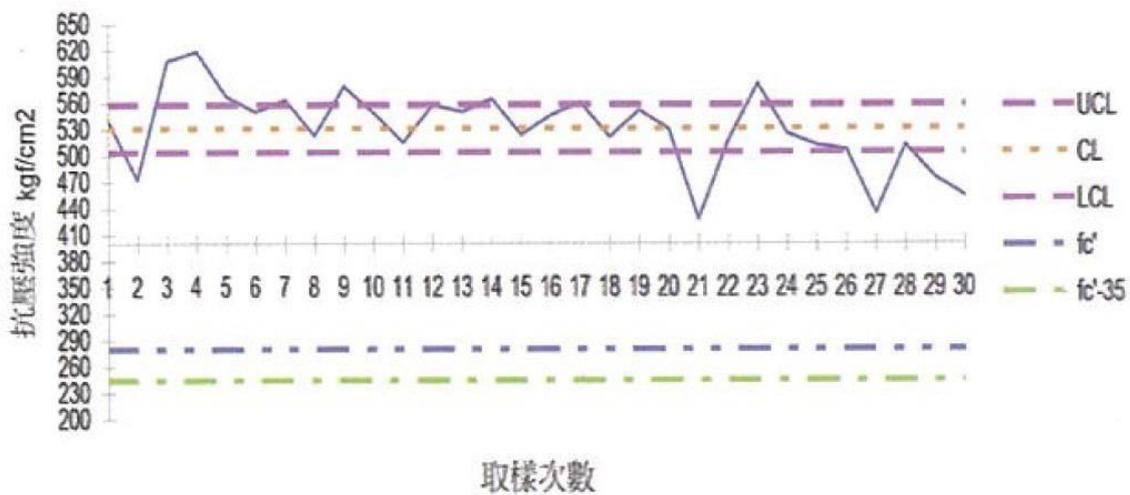
種類		用途	混凝土種類	
卜特蘭水泥 (CNS 61 R 2001)	水硬性混合水泥 (CNS 15286)			
		IS 混合水泥 卜特蘭高爐水泥	IP 混合水泥 卜特蘭卜作嵐水泥	
第 I 型：普通水泥	IS(<70)	IP	一般構造物	一般混凝土
第 II 型：中度抗硫酸鹽水泥	IS(<70)(MS)	IP(MS)	臨海構造物、地下結構混凝土工程	中度抗硫混凝土
第 III 型：早強水泥	—	—	緊急工程，需縮短工期之工程	早強混凝土
第 IV 型：低熱水泥	—	IP(LH)	水壩等巨積混凝土工程	低熱混凝土
第 V 型：高度抗硫酸鹽水泥	IS(<70)(HS)	IP(HS)	抗鹽蝕、海灣、海中構造物、抗酸蝕、污水下水道、溫泉及特殊環境之地下結構工程	高度抗硫混凝土
其他混合水泥型別：中熱型(MH)、早強型(HES)、緩凝型(R)、減水型(WR)、減水早強型(WRH)、減水緩凝型(WRR)				

資料來源：本計畫整理

表 2.3.3-13 高雄都會大眾捷運系統紅橘線路網建設案混凝土配比設計

工程名稱	水膠比	高爐水泥 IS-MS(45%) (kg/m ³)	飛灰 (kg/m ³)	高爐 石粉 (kg/m ³)	水 (kg/m ³)	細粒料 (kg/m ³)	粗細料 (kg/m ³)
CR1/CR5	0.440	300	100	NA	175	931	764
CR2	0.357	470	-	NA	168	907	822
CR3	0.365	449	-	NA	160	926	835
CO2	0.389	450	-	NA	175	892	836

資料來源：本計畫團隊訪談預拌廠整理



資料來源：本計畫團隊訪談預拌廠整理

圖 2.3.3-7 高雄都會大眾捷運系統紅橘線路網建設案混凝土抗壓強度統計圖

(二)混合水泥

有關混合水泥產品規格訂於 CNS15286 「水硬性混合水泥」中，根據混合水泥之種類與用途整理於表 2.3.3-13 所示。國內成功案例有中龍鋼鐵二、三階擴建、中聯資源高爐石粉筒槽大底新建、淡海輕軌等大型建設工程之實績等。以中聯資源高爐石粉筒槽大底新建工程為例，建置時採用 IP (HS-LH) 型混合水泥設計強度 280 kgf/cm² 之混合水泥混凝土進行澆置，總使用量約 3,000 立方米，28 天抗壓強度統計值如圖 2.3.3-9 示，平均抗壓強度為 334 kgf/cm²，皆符合設計要求。另針對使用混合水泥之材料結構對周圍環境與耐久性的部分，依測試結果顯示(如圖 2.3.3-8 示)，有助提高硫酸鹽侵蝕性能。

淡海輕軌則基於抗硫酸鹽及耐久性考量，採用 IS(<70)(MS)型混合水

泥之混凝土進行澆置，其設計強度從 140 kgf/cm² 至 420 kgf/cm² 皆有，配比如表 2.3.3-4，其抗壓結果皆能符合設計需求。

表 2.3.3-14 混合水泥種類與用途

型別		型別編號						
混合水泥	IS 卜特嵐高爐水泥	IS(<70)	IS(<70) (MS)	IS(<70) (MH)	IS(<70) (MS-MH)	IS (HS)	----	IS(≥70)
適用範圍		一般混凝土結構，部要求其它特殊性能者	特別需要抵抗中度硫酸鹽侵蝕者	特別需要中度水合熱者	特別需要抵抗中度硫酸鹽侵蝕及中度水合熱者	特別需要抵抗高度硫酸鹽侵蝕者	特別需要低度水合熱者	特殊用途

資料來源：本研究整理

資料來源：中聯資源股份有限公司「筒槽大底新建工程」【50】

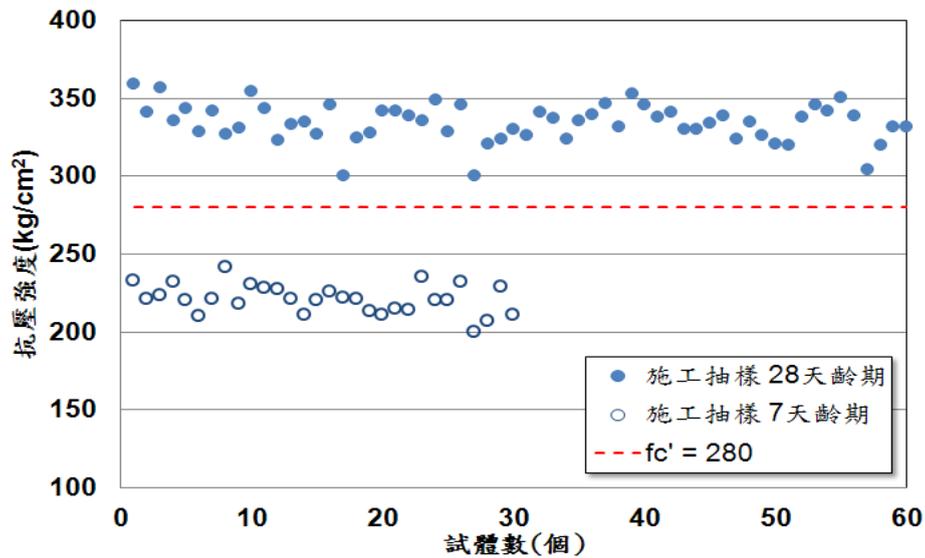
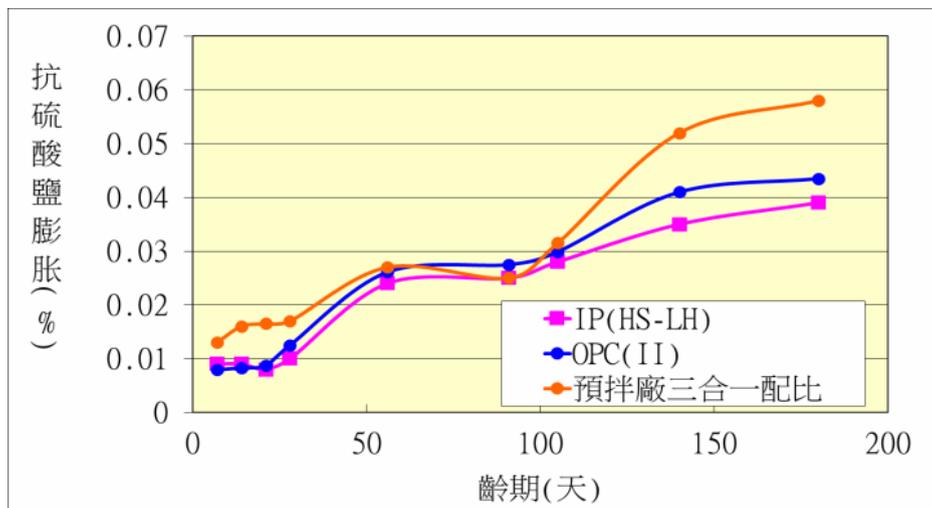


圖 2.3.3-8 中聯資源筒槽大底新建工程混凝土抗壓強度統計圖



資料來源：中聯資源股份有限公司「筒槽大底新建工程」【50】

圖 2.3.3-9 混合水泥之材料抗硫酸鹽測試

表 2.3.3-14 淡海輕軌混凝土配比表

編號	設計強度 kgf/cm ²	水膠比 w/cm	坍度 cm	最大粒徑 mm	混合水泥 kg	型別	細粒料 kg	粗粒料 kg	水 kg	化學摻料 kg
1	140	0.71	18	25	245	IS(<70)(MS)	963	967	172	2.70
2	210	0.59	18	25	300	IS(<70)(MS)	892	986	174	3.30
3	280	0.45	18	25	385	IS(<70)(MS)	810	1003	171	3.85
4	280W	0.45	18	25	400	IS(<70)(MS)	817	971	175	4.00
5	350	0.39	18	25	455	IS(<70)(MS)	757	984	175	4.32
6	420	0.38	18	25	480	IS(<70)(MS)	742	972	177	4.56
7	350SCC	0.40	65	19	440	IS(<70)(MS)	926	832	172	4.62

資料來源：本研究整理

2.4 國內外混凝土規範對高爐石粉飛灰之使用限制

高爐石粉與飛灰在國外已是應用成熟之輔助膠結材料，因此本計畫特蒐集國外各國對於混凝土中使用高爐石粉與飛灰使用比例之相關規定，與國內其他工程單位之混凝土施工規範規定做綜合比較，以作為後續混凝土規範檢討精進之參考。

2.4.1 國外混凝土規範對高爐石粉及飛灰之限制

一、美國

美國「ACI 318-14 Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary」[77]，規定礦物摻料最高使用比例為『符合 ASTM C618 之飛灰或其他卜作嵐材料取代水泥不可超過 25%；符合 ASTM C989 之礦渣取代水泥不可超過 50%；符合 ASTM C1240 之矽灰取代水泥不可超過 10%；混用飛灰或其他卜作嵐材料、礦渣與矽灰取代水泥總量不可超過 50%；混用飛灰或其他卜作嵐材料與矽灰取代水泥總量不可超過 35%』等規定，如表 2.4.1-1 所示。



表 2.4.1-1 美國 ACI 318-14 礦物摻料最高使用比例

Cementitious materials	Maximum percent of total cementitious materials by weight*
Fly ash or other pozzolans conforming to ASTM C618	25
Slag conforming to ASTM C989	50
Silica fume conforming to ASTM C1240	10
Total of fly ash or other pozzolans, slag, and silica fume	50 [†]
Total of fly ash or other pozzolans and silica fume	35 [†]
*The total cementitious material also includes ASTM C150, C595, C845, and C1157 cement. The maximum percentages above shall include: (a) Fly ash or other pozzolans in Type IP, blended cement, ASTM C595, or ASTM C1157; (b) Slag used in the manufacture of an IS blended cement, ASTM C595, or ASTM C1157; (c) Silica fume, ASTM C1240, present in a blended cement. [†] Fly ash or other pozzolans and silica fume shall constitute no more than 25 and 10 percent, respectively, of the total weight of the cementitious materials.	

資料來源：ACI 318-14 【77】

二、英國

英國「BS 8500-1：2006 Concrete- Complementary British Standard to BS EN 206-1」[78]，針對預拌混凝土中水泥與其他材料組合比例，有詳細建議參考用量，如表 2.4.1-2 所示。



表 2.4.1-2 英國 BS EN 206-1 預拌混凝土中水泥與其他材料組合比例建議表

Broad designation ^{B)}	Composition	Comprises cement and combination types (see BS 8500-2:2006, Table 1)
CEM I	Portland cement	CEM I
SRPC	Sulfate-resisting Portland cement	SRPC
IIA	Portland cement with 6% to 20% fly ash, ground granulated blastfurnace slag, limestone, or 6% to 10% silica fume ^{C)}	CEM II/A-L, CEM II/A-LL, CIIA-L, CIIA-LL, CEM II/A-S, CIIA-S, CEM II/A-V, CIIA-V, CEM II/A-D
IIB-S	Portland cement with 21% to 35% ground granulated blastfurnace slag	CEM II/B-S, CIIB-S
IIB-V	Portland cement with 21% to 35% fly ash	CEM II/B-V, CIIB-V
IIB+SR	Portland cement with 25% to 35% fly ash	CEM II/B-V+SR, CIIB-V+SR
IIIA ^{D), E)}	Portland cement with 36% to 65% ground granulated blastfurnace slag	CEM III/A, CIIIA
IIIA+SR ^{E)}	Portland cement with 36% to 65% ground granulated blastfurnace slag with additional requirements that enhance sulfate resistance	CEM III/A+SR ^{F)} , CIIIA+SR ^{F)}
IIIB ^{E), G)}	Portland cement with 66% to 80% ground granulated blastfurnace slag	CEM III/B, CIIIB
IIIB+SR ^{E)}	Portland cement with 66% to 80% ground granulated blastfurnace slag with additional requirements that enhance sulfate resistance	CEM III/B+SR ^{F)} , CIIIB+SR ^{F)}
IVB-V	Portland cement with 36% to 55% fly ash	CEM IV/B(V), CIIVB

A) There are a number of cements and combinations not listed in this table that may be specified for certain specialist applications. See BRE Special Digest 1 [1] for the sulfate-resisting characteristics of other cements and combinations. See IP 17/05 [7] for the use of high ggbs content cements and combinations in secant piling applications.

B) The use of these broad designations is sufficient for most applications. Where a more limited range of cement or combinations types is required, select from the notations given in BS 8500-2:2006, Table 1.

C) When IIA or IIA-D is specified, CEM I and silica fume may be combined in the concrete mixer using the *k*-value concept; see BS EN 206-1:2000, 5.2.5.2.3.

D) Where IIIA is specified, IIIA+SR may be used.

E) Inclusive of low early strength option (see BS EN 197-4 and the "L" classes in BS 8500-2:2006, Table A.1).

F) "+SR" indicates additional restrictions related to sulfate resistance. See BS 8500-2:2006, Table 1, footnote D.

G) Where IIIB is specified, IIIB+SR may be used.

資料來源：BS 8500-1 【78】

三、日本

為確保高爐石混凝土品質，高爐石粉應適量使用，設計者可依據設計需求，日本土木學會在「高爐石粉末應用於混凝土施工指針」[79]建議高爐石粉之替代率應在 30~70%之間，有關各等級高爐石粉及各用途之使用比例，詳表 2.4.1-3。

表 2.4.1-3 日本高爐石粉種類與適用替代率之範圍(%)

種類 用途	高爐石粉 4000 級	高爐石粉 6000 級	高爐石粉 8000 級
水合熱引起溫度上昇之抑制	50~70	60~70	60~70
鹼-骨材反應之抑制	40~70	40~70	40~70
提高耐硫酸鹽	50~70	50~70	50~70
對海水之化學抵抗性(含鹽害)	45~55	45~60	45~70
高流動化	30~70	30~70	30~60
高強度化	---	30~50	30~60

資料來源：日本「高爐石粉末應用於混凝土施工指針」[79]



四、中國大陸

中國大陸「JGJ 55-2011 普通混凝土配合比設計規程」[80]，針對鋼筋混凝土中礦物摻料最大用量進行要求，明定礦物摻料在混凝土中摻量應通過試驗確定，依水膠比及水泥不同，限定摻料添加比例。另在混合使用兩種或兩種以上礦物摻料時，礦物摻料總摻量應符合水膠比 ≤ 0.40 時，最大摻量為65%；水膠比 > 0.40 時，最大摻量為55%規定，其他有關鋼筋混凝土礦物摻料最大摻量比例要求如表 2.4.1-4 所示。

表 2.4.1-4 中國大陸 JGJ 55-2011 鋼筋混凝土礦物摻料最大摻量

礦物摻料種類	水膠比	最大摻量(%)	
		採用硅酸鹽水泥時	採用普通硅酸鹽水泥時
粉煤灰	≤ 0.40	45	35
	> 0.40	40	30
粒化高爐礦渣粉	≤ 0.40	65	55
	> 0.40	55	45
鋼渣粉	-----	30	20
磷渣粉	-----	30	20
硅粉	-----	10	10
複合摻合料	≤ 0.40	65	55
	> 0.40	65	45

資料來源：中國大陸「JGJ 55-2011 普通混凝土配合比設計規程」[80]

2.4.2 國內混凝土規範對高爐石粉及飛灰之限制

一、行政院公共工程委員會

目前公共工程混凝土摻用高爐石粉飛灰大多參考工程會頒訂的高爐石混凝土使用手冊及飛灰混凝土使用手冊，但此兩篇手冊制定至今已超過10年，在預拌廠設備製程技術及化學摻料的進步下，原建議的高爐石粉、飛灰使用量限制已逐漸不符施工現況實際需求，故原規定飛灰使用不得超過水泥用量25%，高爐石粉使用不得超過水泥用量65%，且對於預拌廠常用的三合一混凝土亦未明列使用建議。

為有效的運用工業廢棄物資源，提升預拌產業之環保意象，讓施工規範能更符合產業施工現況，營建院參考美國 ACI 318 第 4.4.2 節之規定，提案工程會見請增修施工綱要規範第 03050 章「混凝土基本材料與一般規定」，將飛灰及水淬高爐渣粉混用取代水泥之上限為明訂為總膠結材料重量之



50%，以合理放寬之高爐石粉及飛灰添加比例，工程會於 102 年 7 月 3 日通過 V9.0 版修訂，修改後內容如表 2.4.2-1 所示。

表 2.4.2-1 工程會施工綱要規範對高爐石粉飛灰之使用限制

2.1.6	礦物摻料
(1)	礦物摻料包括飛灰、水淬高爐爐渣粉及矽灰。
(2)	飛灰做為膠結材料時，應符合 CNS 3036 之 F 類規定。使用時應經工程司事先核可，如礦物摻料僅使用飛灰時，飛灰用量不得超過總膠結材料重量之[25%]。
(3)	水淬高爐爐渣粉做為膠結材料時，應符合 CNS 12549 之規定。使用時應經工程司事先核可，如礦物摻料僅使用水淬高爐爐渣粉時，水淬高爐爐渣粉用量不得超過總膠結材料重量之[50%]。
(4)	飛灰、水淬高爐爐渣粉及矽灰混用做為膠結材料時，應經工程司事先核可，且飛灰、水淬高爐爐渣粉及矽灰總量不得超過總膠結材料重量之[50%]，其中飛灰不得超過[15%]。
(5)	如為巨積混凝土或特殊用途混凝土，則依其他章節之規定。

二、交通部

查交通部頒訂的施工規範第 03053 章「水泥混凝土之一般要求」中規定，允許高爐石粉與飛灰的使用，但未規定使用比例限制，其詳細規定如表 2.4.2-2。

表 2.4.2-2 交通部施工規範對高爐石粉飛灰之使用限制

2.1.7	卜作嵐材料：卜作嵐材料如使用飛灰，須為符合 CNS 3036 之飛灰。如使用高爐石粉，須為符合 CNS 12549 之水淬高爐爐渣粉。
-------	---

三、交通部台灣區國道新建工程局

國道新建工程局所主辦之工程以國道新建為主，考量國道之重要性與耐久性，故很早就導入高爐石粉與飛灰之使用，促使混凝土藉由卜作嵐反應來提升混凝土之長期強度發展。查國工局施工規範第 03053 章「水泥混凝土之一般要求」中規定，高爐石粉與飛灰使用量以不超過 45% 為限，其中飛灰不



得超過 10%。其詳細規定如表 2.4.2-3。

表 2.4.2-3 國工局施工規範對高爐石粉飛灰之使用限制

2.1.6 膠結材料：各等級混凝土可使用水泥、高爐石粉及飛灰作為膠結材料，膠結材料中高爐石粉及飛灰重量百分率不得高於 45%(其中飛灰重量百分率不得高於 10%)，或使用 100 級以上高爐石粉所占百分率在 45%以下之高爐水泥，或使用 A 種類飛灰水泥。為如使用於上部結構之混凝土，為考量早期強度，可使用 120 級(細度 5000 cm^2/g)以上之高爐石粉，所需增加費用不另計付。

四、交通部鐵路改建工程局

經查鐵工局現行混凝土規範第 03053 章「水泥混凝土之一般要求」對高爐石粉及飛灰使用限制規定，比照國工局規定，高爐石粉與飛灰使用量以不超過 45%為限，其中飛灰不得超過 10%。其詳細規定如表 2.4.2-4。

表 2.4.2-4 鐵工局施工規範對高爐石粉飛灰之使用限制

2.2.1 膠結材料：各等級混凝土可使用水泥、高爐石粉及飛灰作為膠結材料，膠結材料中高爐石粉及飛灰重量百分率不得高於 45%(其中飛灰重量百分率不得高於 10%)，或使用 100 級以上高爐石粉所占百分率在 45%以下之高爐水泥，或使用 A 種類飛灰水泥。為如使用於上部結構之混凝土，為考量早期強度，可使用 120 級(細度 5000 cm^2/g)以上之高爐石粉，所需增加費用不另計付。

五、經濟部水利署

水利署主辦工程多為堤防、水庫及水利構造物，經查水利署現行施工規範第 03310 章「結構用混凝土」對爐石粉及飛灰使用限制規定，與工程會就有版本類似，規定高爐石粉用量不得超過 50%，飛灰使用量不得超過 20%，若水泥、高爐石粉、飛灰同時使用時則高爐石粉飛灰之取代量不得超過 30%，其中飛灰不得超過 15%。其詳細規範內容如表 2.4.2-5。

表 2.4.2-5 水利署施工規範對高爐石粉飛灰之使用限制

2.5 礦物摻料

2.5.1 除契約另有規定外，無論礦物摻料含量多寡，皆應提送配比設計資料，經監造單位核准後使用。

2.5.2 飛灰做為膠結料時，應符合 CNS 3036 之 F 類規定，且飛灰使用量不得超過總膠結料重量之 20%。

2.5.3 水淬高爐爐渣粉做為膠結料時，應符合 CNS 12549 之規定，且水淬高爐爐渣粉使用量不得超過總膠結料重量之 30%。

2.5.4 飛灰與水淬高爐爐渣粉同時做為膠結料時，其總量不得超過總膠結料重量之 30%，且飛灰使用量不得超過 15%。

六、內政部營建署

營建署主辦工程以市區快速道路、生活圈快速道路、中央部分之建築工程為主，經查營建署現行施工規範第 03050 章「混凝土基本材料及施工一般要求」對高爐石粉及飛灰使用限制規定，仍以舊的高爐石粉混凝土使用手冊及飛灰混凝土使用手冊所建議用量為主，規定高爐石粉用量不得超過 65%，飛灰使用量不得超過 25%，且無水泥、高爐石粉、飛灰同時使用時之比例規定，仍維持工程會施工綱要規範過往版本規定(V8.0 以前)。其詳細規範內容如表 2.4.2-6。

表 2.4.2-6 營建署施工規範對高爐石粉飛灰之使用限制

2.1.6 礦物摻料

(1) 礦物摻料僅用於取代水泥，除契約另有規定外，則無論礦物摻料含量多寡，皆應提送配比設計資料，送工程司審核。

(2) 飛灰做為水泥摻料，應符合 CNS 3036 之 F 類規定。使用時應經工程司事先核可，且飛灰量不得超過水泥重量之 20%。預力混凝土飛灰用量不得超過水泥重量之 10%。

(3) 水淬高爐爐渣粉做為水泥摻料時，應符合 CNS 12549 之規定。使用時應經工程司事先核可，且水淬高爐爐渣粉不得超過水泥重量之 65%。

七、農委會水土保持局

經查水保局施工規範第 03050 章「混凝土基本材料及施工一般要求」對高爐石粉及飛灰使用限制規定，仍參考舊的高爐石粉混凝土使用手冊及飛灰混凝土使用手冊所建議用量為主，且規定更低的使用量，規定高爐石粉用量不得超過 30%，飛灰使用量不得超過 20%，且無水泥、高爐石粉、飛灰同時使用時之比例規定。其詳細規範內容如表 2.4.2-7。

表 2.4.2-7 水保局施工規範對高爐石粉飛灰之使用限制

2.1.6 礦物摻料

- (1) 礦物摻料僅用於取代水泥，除契約另有規定外，則無論礦物摻料含量多寡，皆應提送配比設計資料及施工計畫經工程司核可。
- (2) 飛灰做為水泥摻料時，應符合 CNS 3036 之 F 類規定。使用時應提送施工計畫經工程司事先核可，且飛灰量不得超過水泥重量之 20%。
- (3) 水淬高爐爐渣粉做為水泥摻料時，應符合 CNS 12549 之規定。使用時應提送施工計畫經工程司事先核可，且水淬高爐爐渣粉不得超過水泥重量之 30%。

八、臺北市政府工務局

經查臺北市政府工務局施工規範第 03050 章「混凝土基本材料及施工一般要求」，僅規定使用卜作嵐材料需符合 CNS 3036 之規定，然 CNS 3036 係飛灰之標準，未將高爐石粉標準納入，且未規範使用比例。其詳細規範內容如表 2.4.2-8。

表 2.4.2-8 臺北市政府施工規範對高爐石粉飛灰之使用限制

2.1.6 卜作嵐材料

卜作嵐材料用於混凝土為摻料時，應符合 CNS 3036 A2040 之規定。

九、臺北市政府捷運工程局

臺北市政府捷運工程局施工規範第 03010 章「卜特蘭水泥混凝土」，102 年 4 月版本中，僅規定巨積混凝土可使用飛灰作為添加劑，其規格應符合 CNS 3036 之 F 級，飛灰用量佔膠結料之重量百分率不得超過 25%，未將高爐石粉標準納入，且一般混凝土只能使用純水泥。

今年度(105 年)經修改後，已比照工程會施工綱要規範版本，將飛灰及水淬高爐爐渣粉混用取代水泥之上限為明訂為總膠結材料重量之 50%，以合理放寬之高爐石粉及飛灰添加比例，捷運局於 105 年 7 月正式公告，往後新工程標案將茲從新的規範規定，修改後內容如表 2.4.2-9 所示。

表 2.4.2-9 台北捷運局施工規範對高爐石粉飛灰之使用限制

2.1.7	礦物摻料
(1)	礦物摻料包括飛灰、水淬高爐爐渣粉。
(2)	飛灰及天然或鍛燒卜作嵐攪和物應符合 CNS 3036 之規定。飛灰應為符合 F 類之規定。使用時應經工程司事先核可。
(3)	水淬高爐爐渣粉應符合 CNS 12549 100 級且細度達 4,000 cm ² /g 以上之規定。使用時應經工程司事先核可。
(4)	飛灰、水淬高爐爐渣粉混用做為膠結材料時，應經工程司事先核可，且飛灰、水淬高爐爐渣粉總量不得超過總膠結材料重量之 50%，其中飛灰不得超過 15%。
(5)	如為巨積混凝土、預力混凝土、或其他特殊用途混凝土，則依其他規定。



十、臺中市政府

經查臺中市政府施工規範第 03050 章「混凝土基本材料及施工方法」，僅規定使用卜作嵐材料需符合 CNS 3036 之規定，然 CNS 3036 係飛灰之標準，未將高爐石粉標準納入，且未規範使用比例。其詳細規範內容如表 2.4.2-10。

表 2.4.2-10 臺中市政府施工規範對高爐石粉飛灰之使用限制

2.1.6 卜作嵐材料

卜作嵐材料用於混凝土為摻料時，應符合 CNS 3036 A2040 之規定。

十一、台南市政府

經查台南市政府施工規範第 03050 章「混凝土基本材料及施工一般要求」對高爐石粉及飛灰使用限制規定，仍參考舊的高爐石粉混凝土使用手冊及飛灰混凝土使用手冊所建議用量為主，規定高爐石粉用量不得超過 65%，飛灰使用量不得超過 20%，且無水泥、高爐石粉、飛灰同時使用時之比例規定。其詳細規範內容如表 2.4.2-11。

表 2.4.2-11 台南市政府施工規範對高爐石粉飛灰之使用限制

2.1.6 礦物摻料

- (1) 礦物摻料僅用於取代水泥，除契約另有規定外，則無論礦物摻料含量多寡，皆應提送配比設計資料，送工程司審可。
- (2) 飛灰做為水泥摻料時，應符合 CNS 3036 之 F 類規定。使用時應提送施工計畫經工程司事先核可，除另有規定外飛灰量不得超過水泥重量之 20%，預力混凝土飛灰用量不得超過水泥重量之 10%。
- (3) 水淬高爐爐渣粉做為水泥摻料時，應符合 CNS 12549 之規定。使用時應經工程司事先核可，且水淬高爐爐渣粉不得超過水泥重量之 65%。



十二、高雄市政府

經查高雄市政府施工規範第 03050 章「混凝土基本材料及施工一般要求」比照台北市政府，僅規定使用卜作嵐材料需符合 CNS 3036 之規定，然 CNS 3036 係飛灰之標準，未將高爐石粉標準納入，且未規範使用比例。其詳細規範內容如表 2.4.2-12。

表 2.4.2-12 高雄市政府施工規範對高爐石粉飛灰之使用限制

2.1.7 卜作嵐材料

卜作嵐材料用於混凝土為摻料時，應符合 CNS 3036 A2040 之規定。

十三、交通部公路總局

經查交通部公路總局施工說明書第 03050 章「混凝土基本材料及施工一般要求」2.1.9 節，規定使用卜作嵐材料用於取代水泥時，除契約另有規定者外，則無論卜作嵐材料含量多寡，皆應提送配比設計資料，送工程司核可。飛灰用於混凝土為摻料時，須符合 CNS 3036 規定，且飛灰量不得超過水泥重量之 25%。使用於抑制混凝土鹼質粒料反應時，應符合 F 類規定。而使用水淬高爐爐渣粉用於混凝土為摻料時，須符合 CNS 12549 之規定，且水淬高爐爐渣粉不得超過水泥重量之 65%。使用於抑制混凝土鹼質粒料反應時，須符合 CNS 12549 中 100 級或 120 級規定。其詳細規範內容如表 2.4.2-13。

表 2.4.2-13 交通部公路總局施工說明書對高爐石粉飛灰之使用限制

2.1.9 卜作嵐材料

- (1) 卜作嵐材料用於取代水泥時，除契約另有規定者外，則無論卜作嵐材料含量多寡，皆應提送配比設計資料，送工程司核可。
- (2) 飛灰用於混凝土為摻料時，須符合 CNS 3036 規定，且飛灰量不得超過水泥重量之 25%。使用於抑制混凝土鹼質粒料反應時，應符合 F 類規定。
- (3) 水淬高爐爐渣粉用於混凝土為摻料時，須符合 CNS 12549 之規定，且水淬高爐爐渣粉不得超過水泥重量之 65%。使用於抑制混凝土鹼質粒料反應時，須符合 CNS 12549 中 100 級或 120 級規定。

2.3.5 巨積混凝土工程，水泥以飛灰取代量不得超過水泥重量 25%；水泥以水淬高爐爐渣粉取代量不得超過水泥重量 65%。一般混凝土水泥以飛灰取代量不得超過水泥重量之 20%；水泥以水淬高爐爐渣粉取代量不得超過水泥重量 50%。預力混凝土水泥以飛灰取代量不得超過水泥重量之 10%；水泥以水淬高爐爐渣粉取代量不得超過 25%。唯承包商須提送施工計畫，俟工程司核可後才能辦理。並應符合公共工程飛灰混凝土使用手冊或公共工程高爐石混凝土使用手冊之規定。

小結：

從前述交通部的設計規範及施工規範可知，混凝土對於橋梁之功能需求仍以抗壓強度為主，然因外部環境侵蝕而有耐久性需求時，則應考慮到抗硫酸鹽侵蝕特性及低水合熱特性。這些是在選用綠色材料時之首要考量。

由國內的混凝土規範對於高爐石粉及飛灰之使用規定可知，高爐石粉及飛灰作為輔助性膠結材料已普遍使用，用量可達 50%，因此工程會施工綱要規範亦據此修訂高爐石粉及飛灰之使用比例限制，以與國際接軌，回應資源再利用趨勢。國內重要的工程建設單位如國工局及鐵工局，亦允許使用高爐石粉及飛灰合計最高 45%，來提升混凝土耐久性及品質，台北捷運局的施工規範，於今年(105 年)起，亦放寬高爐石粉與飛灰之使用，直接比照工程會施工綱要規範之規定，不再堅持

純水泥，甚至新北市捷運局主辦的淡海輕軌工程採用混合水泥 IS(<70)(MS)型，來確保混凝土的耐久性及抗硫酸鹽性質，皆有良好的成效。以工程會施工綱要規範為依據，往後可預見將有愈來愈多工程主辦機關逐漸放寬高爐石粉及飛灰之使用，甚至直接設計混合水泥，此亦為本計畫之主要目的，以試驗結果來兼顧功能性、環保節能性及耐久性需求，在符合規範的要求下，作為為後續工程使用之參考。

2.5 橋梁設計規範對混凝土限制

交通部於民國 98 年時依 90 年頒布之公路橋梁設計規範及美國州公路及運輸官員協會之公路橋梁設計規範 (AASHTO, 2002 年版) 為藍本，修訂頒布「公路橋梁設計規範」[82]作為公路橋梁設計之依據。規範適用於跨徑 150 公尺以下之一般性鋼筋混凝土結構、預力混凝土結構及鋼結構等新建公路橋梁。特殊性橋梁如吊橋、斜張橋、桁架橋、活動橋或臨時便橋等及跨徑超過 150 公尺者，除本規範可適用者外，應就其特殊性另作考量。有關耐震設計部份，應依部頒「公路橋梁耐震設計規範」之規定辦理。

彙整該規範對於混凝土及耐久性之要求規定如下。

5.6.14 預力混凝土樁

基樁受冰凍融解、及潮濕乾燥反覆作用時需用輸氣混凝土。預力樁之混凝土規定抗壓強度(f'_c)最小應為 350 kgf/cm²

5.8.4 沈箱體結構設計

沉箱基礎之材料，可採用鋼筋混凝土構材或以型鋼及鋼管加強之合成構材。沈箱式基礎之混凝土規定抗壓強度不得小於 245 kg/cm²。

7.1.2 材料

1. 混凝土

- (1) 結構體各部份所使用混凝土之規定抗壓強度 f'_c 應載明於設計圖上。
- (2) 混凝土之規定抗壓強度 f'_c 應作為工程驗收之標準。 f'_c 應依據混凝土圓柱體試驗數據決定，圓柱體之製作及試驗應符合 CNS 相關規定辦



理。

8.22 先拉預力之錨碇區

除非有特別規定，應等到混凝土試體抗壓強度達到 280 kgf/cm² 始可施加預力；試體之養治方法應與構材相同。

8.23 傳遞應力時之混凝土強度

除另有規定者外，先拉法構材之混凝土圓柱試體之抗壓強度至少為 280 kgf/cm² (基樁除外)；後拉法構材及先拉法預力基樁至少為 245 kgf/cm² 時，始可施預力。試體之養治方法應與構材相同。

12.3.1 混凝土橋

混凝土橋之防蝕措施可從混凝土性能、鋼筋保護層厚度、鋼筋表面保護、混凝土摻料、混凝土表面塗料等方式處理。

1. 混凝土最大水膠比及最低混凝土強度

提高混凝土防蝕性能以增加混凝土緻密性為主，可從混凝土水膠比及混凝土強度來規範之。

表 2.5-1 混凝土最大水膠比及最低混凝土強度

	極嚴重鹽害區	嚴重鹽害區	中度鹽害區	一般區域
最大水膠比	0.4	0.4	0.45	0.5
最低混凝土強度 f'c (kgf/cm ²)	350	350	280	245

資料來源：公路橋梁設計規範【82】

為維持混凝土之施工性，於低水膠比混凝土澆置時，可添加適度之強塑劑。

2. 鋼筋保護層厚度

鋼筋保護層厚度依橋梁部位及所處腐蝕區域列於下表 2.5-2：

表 2.5-2 位於不同海洋腐蝕區域中鋼筋最小保護層厚度

海洋腐蝕區域 橋梁部位	極嚴重鹽害區		嚴重鹽害區	中度鹽害區	一般區域
	主筋	箍筋			
基礎、基樁	10		10	10	參考 7.1.5 節規定
柱、牆	10		7.5	7.5	
橋面版頂層筋	6.5		5	5	
橋面版下層筋	6.5		4	4	
箱梁底層筋	6.5		4	4	
「I」「T」梁、箱梁腹 版外露面	6.5		4	4	
緣石、欄杆	2.5		2.5	2.5	
混凝土面未直接曝露於 大氣、未與土壤或水接 觸	主筋	4	4	4	
	箍筋	2.5	2.5	2.5	

資料來源：公路橋梁設計規範【82】

註：單位為公分

3. 特殊保護措施

(1) 鋼筋表面保護

鋼筋表面處理可採用環氧樹脂或鍍鋅來增強抵抗腐蝕環境。環氧樹脂材料應符合 ASTM A934 之規定；鍍鋅鋼筋應符合 CNS14771 或 ASTM A767/A-2006 之規定。若使用環氧樹脂鋼筋或鍍鋅鋼筋，其受拉伸展長度、搭接長度、標準彎鉤之伸展長度應適度增加。

(2) 混凝土摻料

- a. 為達到混凝土密實性增加防水性，混凝土可填加卜作嵐材料或其他不影響混凝土基本性質之摻料，如高爐石粉、煤灰、矽灰等。
- b. 混凝土中添加腐蝕抑制劑可減緩混凝土中鋼材腐蝕時間。腐蝕抑制劑之效能試驗依照 ASTM G129-91 之規定辦理。混凝土添加腐蝕抑制劑後，不應影響混凝土基本性質，其抗壓、抗彎強度依 AASHTO M194 之規定不得低於未添加者混凝土強度之 90%。

另查公路總局施工規範「第 03050 章混凝土基本材料與施工一般要求」，有關水泥種類及用途規定如表 2.5-3。

表 2.5-3 公路總局施工規範水泥種類及用途參考表

種 類		用 途
卜特蘭水泥	第 I 型：普通水泥	一般構造物。
	第 II 型：抗中度硫酸鹽水泥	抗鹽蝕、海灣、臨海、海中構造物、需要中度水合熱者。
	第 III 型：早強水泥	緊急工程，需縮短工期之工程。
	第 IV 型：低熱水泥	巨積混凝土工程。
	第 V 型：抗高度硫酸鹽水泥	抗酸蝕、下水道、地下室、溫泉區等特殊環境之工程。
卜特蘭輸氣水泥	輸氣第 I A 型	一般構造物需要輸氣者。
	輸氣第 II A 型	抗鹽蝕構造物需要輸氣者。
	輸氣第 III A 型	緊急工程需要輸氣者。

資料來源：公路總局施工規範第 03050 章混凝土基本材料與施工一般要求【115】

另蒐集淡江大橋及其連絡道路 2K+606~5+000 段新建工程設計圖說中關於各橋梁部位混凝土抗壓強度要求如表 2.5-4。

表 2.5-4 淡江大橋混凝土及鋼筋保護層規格表

橋梁部位		抗壓強度 fc' kgf/cm ²	最大水膠比	最小保護層厚度 cm
預力混凝土	箱型梁橋	420	0.4	橋面板頂面 6.5
				箱型樑外側 6.5
				箱型梁內側及隔梁 4
鋼筋混凝土	橋墩	350	0.4	墩柱 10
				鋼筋混凝土墊 10
	橋墩基礎	350	0.4	10
	橋台	350	0.4	軀體、翼牆 10
				基礎 10
				進橋板頂面及側面 10
				進橋板底面 10
	場鑄基樁	350	0.4	10
	橋護欄分隔島	280	0.5	4
	緣石	280	0.5	4
	箱涵	350	0.4	內側 10
外側 10				
擋土牆	350	0.4	牆身 10	
			基礎 10	
無筋混凝土	重力式擋土牆	>210	-	
	基礎墊底	140	-	



2.6 快速道路定義

本計畫規劃以縮尺寸結構柱，模擬實際橋梁道路載重變位情形，因此特就設計規範對快速道路之要求條件，說明如下。

2.6.1 公路等級

依據我國交通部國道高速公路局頒布之《高速公路及快速公路交通管制規則》[111]第二條名詞釋義中，快速公路指「除高速公路外，其出入口完全或部分控制，中央分隔雙向行駛，除起迄點外，並得與主、次要道路立體相交或平面相交，專供汽車行駛之公路。」

依交通部於民國 100 年頒布之《公路路線設計規範》[112]，在 1.2 節公路分類中，高速公路及快速公路是以交通功能分類，其中高速公路為公路之最高級型式，屬於完全出入管制之公路，除起迄點外，出入口均設有交流道，而快速公路為公路之次高級型式，屬於完全或部分出入管制之公路，出入口原則應設交流道；但必要時，其與主、次要公(道)路相交之出入口可為號誌管制路口。兩者皆為雙向分隔行車或單方向為雙車道以上之公路。其中規範 1.4 節將公路分為六級，其中高速公路涵蓋一級及二級路，快速公路涵蓋二級及三級路，級數的差別主要在於最低設計速率如表 2.6.1-1 所示。



表 2.6.1-1 公路等級與設計速率[112]

公路等級	地域特性分類		最低設計速率 V_d (公里/小時)	交通功能分類	行政系統分類
一級路	鄉區	平原區	120	高速公路	國道 省道
		丘陵區	100		
		山嶺區	80		
	市區	80			
二級路	鄉區	平原區	100	高速公路 快速公路	國道 省道 縣道
		丘陵區	80		
		山嶺區	60		
	市區	60			
三級路	鄉區	平原區	80	快速公路 主要公路	國道 省道 縣道
		丘陵區	60		
		山嶺區	50		
	市區	60			
四級路	鄉區	平原區	60	主要公路 次要公路	省道 縣道 鄉道
		丘陵區	50		
		山嶺區	40		
	市區	50			
五級路	鄉區	平原區	50	主要公路 次要公路	省道 縣道 鄉道
		丘陵區	40		
		山嶺區	30 ^{註 1}		
	市區	40			
六級路	鄉區	平原區	40	地區公路	縣道 鄉道
		丘陵區	30		
		山嶺區	20		

註 1：按 30 公里/小時設計將對環境造成劇烈衝擊或經費劇增時，其最低設計速率得採用 20 公里/小時。

2.6.2 車道寬度

根據公路路線設計規範[112]，車道設計寬度與行車速率相關詳表 2.6-2。根據表 2.6.1-1 與表 2.6.2-1 內定義，高速公路除於市區及山嶺區之二級路外，每車道寬為 3.50~3.75 公尺；而快速公路每車道寬則介於 3.25~3.75 公尺間。

表 2.6.2-1 設計速度與每車道寬 [112]

設計速率, V_d (公里/小時)	每車道寬, W (公尺)
$V_d \geq 80$	3.50 ~ 3.75
$50 < V_d < 80$	3.25 ~ 3.50
$V_d \leq 50$	3.00* ~ 3.50

*：設計速率若低於 30 公里/小時，受地形或空間限制之路段，最小車道寬得採 2.75 公尺

2.6.3 路肩寬

根據公路路線設計規範[112]，路肩最小設計寬度依公路等級不同而改變，詳表 2.6.3-1，高速公路內側路肩寬建議值為 1.0 公尺，外側路肩寬分為 3 公尺及 2.5 公尺；快速公路內側車道路肩寬分為 1.0 公尺及 0.5 公尺，外側車道分為 2.5 公尺及 1.5 公尺。

表 2.6.3-1 公路等級與路肩最小寬度 [112]

公路等級	路肩寬 W_s (公尺)			
	內(左)側		外(右)側	
	建議值	容許最小值	建議值	容許最小值
一級路	1.0	0.5	3.0	2.5
二級路	1.0	0.5	2.5	2.5
三級路	0.5	0.25	1.5	1.2
四級路	0.5	0.25	1.5	1.2
五級路	0.5	0.25	1.0	0.5
六級路	0.5	0.25	1.0	0.5

2.6.4 中央分隔帶

依公路路線設計規範[112] 2.4 節建議，高速公路(一、二級公路)中央分隔帶寬度應 1.8 公尺以上；快速公路中，二級路亦應為 1.8 公尺以上，三級路無硬性規定。

2.6.5 耐震設計用途係數

依公路橋梁耐震設計規範中[113]，計地震下之水平設計地震力 V_D 應依式 (2.6.5-1)計算：

$$V_D = \frac{I}{1.2\alpha_y} \left(\frac{S_{aD}}{F_{uD}} \right)_m W \geq \frac{I}{1.2\alpha_y} \left(\frac{0.4S_{DS}}{F_{uD}} \right)_m W \quad \text{式(2.6.5-1)}$$

其中

- V_D = 設計地震下之水平設計地震力；
 W = 橋梁振動單元靜載重；
 I = 用途係數；
 α_y = 起始降伏地震力放大倍數；
 S_{aD} = 設計地震水平譜加速度係數；
 S_{DS} = 短週期設計水平譜加速度係數；
 F_{uD} = 設計地震結構系統地震力折減係數；

$$\left(\frac{S_{aD}}{F_{uD}} \right)_m = \text{詳式(2.6.5-2)}。$$

$$\left(\frac{S_{aD}}{F_{uD}} \right)_m = \begin{cases} \frac{S_{aD}}{F_{uD}} & ; \quad \frac{S_{aD}}{F_{uD}} \leq 0.3 \\ 0.20 \frac{S_{aD}}{F_{uD}} + 0.24 & ; \quad 0.3 < \frac{S_{aD}}{F_{uD}} < 0.8 \\ 0.50 \frac{S_{aD}}{F_{uD}} & ; \quad \frac{S_{aD}}{F_{uD}} \geq 0.8 \end{cases} \quad \text{式(2.6.5-2)}$$

不同橋梁分類在設計地震力上主要差別在於用途係數不同如表 2.6.5-1 所示，高速公路橋梁在地震中損壞可能造成較大損失，因此用途係數 I 採用 1.2。而一般公路橋梁，若跨越重要設施，其損壞會連帶破壞此些設施者， I 亦取 1.2。此外，如某路線係某城鎮之主要聯外公路，地震後仍須維持其機能者，則其橋梁之設計 I 亦取 1.2。其他一般性公路橋梁， I 取 1.0 即可。

表 2.6.5-1 用途係數

橋梁類別	用途係數， I
高速公路	1.2
重要公路、跨越重要設施之公路橋梁、城鎮之主要聯外公路橋梁	1.2
其他	1.0

小結

回顧公路路線設計規範[112]，高速公路與快速道路定義有部分重疊區域(二級高速公路與快速道路幾乎相同)，而二者可能差異主要包含：(1)出入口型式不同；

(2)速限不同；(3)車道、路肩與中央分隔帶寬度不同；以及(4)耐震設計用途係數不同，就結構設計而言，特別針對橋柱設計，第(2)、(3)與(4)項會影響活載重、靜載重、與設計地震力的大小，但這些差異並不會影響本計畫相關研究成果，本研究主要考慮使用不同膠結材料之橋柱往復載重行為，相關實驗數據應可同時應用於快速道路與高速公路。

2.7 文獻分析小結

- 一、已蒐集分析相關政府單位對於公共工程節能減碳政策內容，包含於工程會「振興經濟擴大公共建設投資計畫落實節能減碳執行方案」、交通部「減能減碳規劃設計參考原則」、內政部建研所「綠建材標章」，分析綠色設計、綠色工法、綠色材料、綠色能源之各項綠色內涵指標，並符合廢棄物減量(Reduce)、再利用(Reuse)及再循環(Recycle)等 3R 原則，降低生產材料產品所耗費之能源及 CO₂ 的產出，回應本計畫所強調之綠色材料，建議以混凝土為主要對象。
- 二、從混凝土適用之綠色材料中，依技術成熟度、法規配套、市場供應度等面向，綜整出成熟型綠色材料、驗證型綠色材料、待開發型綠色材料，作短中長期推動綠色材料之參考。
- 三、已彙整混凝土用各式綠色材料的來源、市場供需、成份、混凝土性質的基本研究文獻，因高爐石粉與飛灰為市場與技術最成熟的綠色材料，故本計畫將以混凝土摻用高爐石粉與飛灰之性質為本計畫之主要研究方向，並探討其經濟性及減能減碳效益。
- 四、因預拌廠端的高爐石粉飛灰添加量有其限制，國外逐漸發展以混凝土功能性為導向的混合水泥，國內混合水泥之發展在國家標準、施工規範及工程應用日趨成熟的情況下，有助於臨海道路橋梁品質與耐久性之提升，因此本計畫將混合水泥一併納入研究範疇。
- 五、除高爐石粉與飛灰外，本計畫評估可用於混凝土的可再利用廢棄資源，其中以電弧爐氧化矽最具可行性，亦納入試驗項目，探討功能性及環保性。惟依「經濟部事業廢棄物再利用種類及管理方式」(105 年 6 月 20 日)中已將電弧爐矽再利用用途刪除非結構性混凝土，故後續電弧爐氧化矽之使用仍需符合



規法規定。

六、依國外規範對高爐石粉飛灰之使用限制，最高可使用總膠結材料的 50%，而國內工程會施工綱要規範中高爐石粉飛灰可使用至總膠結材料的 50%，其中飛灰不超過 15%；國工局及鐵工局施工規範中高爐石粉飛灰可使用至總膠結材料的 45%，其中飛灰不超過 10%，因此目前業主機關所使用之高爐石粉飛灰比例仍有向上提升之空間。

第三章 影響綠色材料應用於道路橋梁之環境因素與耐久性防範

混凝土的耐久性問題貫穿於混凝土結構設計、材料選擇、施工和運行管理全過程。通常研究混凝土的耐久性需要考慮結構型式、應力狀態和環境條件(包括整體環境和局部環境)；根據研究對象來區分，混凝土結構的耐久性研究包括環境層次、材料層次及結構層次的研究。

3.1 環境因素對綠色材料性質之影響

台灣位處海域環境，強風、高鹽分鹽害問題、潮濕、高溫及嚴重工業污染相當嚴重，尤其在離島及海域地區更需要特別的注意環境危害對混凝土耐久性問題。影響混凝土耐久性的環境因素相當多，包含凍融循環、水滲透、氯離子侵入、中性化作用、鋼筋鏽蝕膨脹、硫酸鹽侵蝕、鹼質粒料反應及體積變形造成的混凝土開裂等，茲依 ACI 318-14 第 19 章混凝土設計與耐久性要求中對曝露環境分類與分級之規定[77]，說明如下。

一、暴露類別 F：適用暴露於潮濕與凍融循環環境，不論有無去冰化學藥劑的戶外混凝土。

暴露類別 F 混凝土是否會受凍融循環損害，視混凝土凍結時，空隙內之水量而定。此水量可用混凝土的飽和度來表示。若飽和度夠高，混凝土孔隙中的水量足以結凍膨脹，產生內拉應力而造成混凝土孔隙開裂。不需要整個構材全部飽和才會受損，例如，版之頂層 3/8 in. 或牆之外層 1/4 in. 呈飽和狀態，不論內部多乾燥，此版頂或牆外層部分易受凍融所損。

對於任何需要抵抗凍融的構材部位而言，其混凝土需有足夠的輸氣量與強度。藉由低 w/cm 比獲得適當的強度，也減少孔隙體積與增加抵抗水進入的能力。輸氣使混凝土較難達到飽和，並允許水結凍時膨脹。

暴露分級隨著暴露於水的程度而改變，因其影響暴露於凍融循環時混凝土任何部分飽和的可能性。增加飽和度潛勢的條件，包括長期或經常接觸水且無排水或乾燥時機。構材中混凝土飽和的可能性與工程地點、結構中構材的位置與方位及氣候有關。既有結構中於概略相同位置的類似構材性能紀錄，可提供暴露分級的指引。

暴露類別 F 次分為四種暴露分級：

- (a)F0 級暴露為不暴露於反覆凍融循環之混凝土。
- (b)F1 級暴露為受反覆凍融且受潮有限之混凝土。受潮有限係指混凝土與水有某些接觸與吸水，但不預期會吸收足夠的水而呈飽和狀態。證照設計專業人員宜謹慎檢視暴露條件以支持其決定，即預期冰凍前混凝土無飽和之虞。即使在此分級的混凝土不預期飽和，仍需要最低輸氣 3.5% 至 6% 以降低萬一因部分混凝土構材飽和而受損的機會。
- (c)F2 級暴露為受反覆凍融且經常暴露於水之混凝土，經常暴露於水意指部分混凝土會在結冰前吸收足夠水量而呈飽和狀態。若指定 F1 級與 F2 級有疑慮時，得選用較保守的 F2 級。F1 級與 F2 級是不預期會暴露於去冰化學藥劑的環境。
- (d)F3 級暴露與 F2 級為受潮條件相同，且暴露於凍融循環下的混凝土。此外，F3 級暴露的混凝土會暴露於去冰化學藥劑，該藥劑會增加吸水和留存水分，使混凝土較迅速飽和。

二、暴露類別 S：適用於接觸含有害量之水溶性硫酸根離子之土壤或水的混凝土。

暴露類別 S 次分為 4 種分級：

- (a)S0 級暴露適用於接觸低濃度水溶性硫酸鹽不需考慮硫酸鹽侵蝕之條件。
- (b)S1、S2 與 S3 級暴露適用於直接接觸到含水溶性硫酸鹽之土壤或水的結構混凝土構材。暴露的嚴重程度由 S1 級至 S3 級遞增，以土壤中所量測之水溶性硫酸鹽濃度或水中溶解硫酸鹽濃度之臨界值為依據。海水環境列為 S1 級暴露。

三、暴露類別 W：適用於接觸水但不暴露於凍融、氯鹽或硫酸鹽的混凝土。

暴露類別 W 次分為兩種分級：

- (a)W0 級暴露適用於乾燥環境或與水接觸，但不需規定低透水性之構材
- (b)W1 級暴露適用於需具低透永性的混凝土，水滲入混凝土可能降低構材的耐久性，例如地下水面以下的基礎牆。

四、暴露類別 C：適用於暴露條件需要額外防護，以抵抗鋼筋腐蝕的非預力與預力混凝土。

暴露類別 C 次分為三種分級：



(a)C0 級暴露適用於不需額外防護鋼筋腐蝕的條件。

(b)C1 與 C2 級暴露適用於非預力和預力混凝土構材，依使用情況下所暴露於外界濕度與氯離子的程度而定。暴露於外來氯離子的例子，包括混凝土直接接觸去冰化學藥劑、鹽、鹽水、半鹹水、海水，或此等之潑濺水。

有關暴露環境類別與分級，詳表 3.1-1。

表 3.1-1 暴露環境類別與分級

類別	分級	條件	
凍融 (F)	F0	混凝土不會暴露於凍融循環	
	F1	混凝土暴露於受潮有限的凍融循環	
	F2	混凝土暴露於經常潮濕的凍融循環	
	F3	混凝土暴露於經常潮濕及使用去冰化學藥劑的凍融循環	
硫酸鹽 (S)		土壤中的水溶性硫酸鹽 (SO_4^{2-})，質量% ^[1]	水中溶解之硫酸鹽 (SO_4^{2-})，ppm ^[2]
	S0	$SO_4^{2-} < 0.10$	$SO_4^{2-} < 150$
	S1	$0.10 \leq SO_4^{2-} < 0.20$	$150 \leq SO_4^{2-} < 1500$ 或海水
	S2	$0.20 \leq SO_4^{2-} \leq 2.00$	$1500 \leq SO_4^{2-} \leq 10,000$
	S3	$SO_4^{2-} > 2.00$	$SO_4^{2-} > 10,000$
與水接觸 (W)	W0	混凝土處於乾燥環境 混凝土與水接觸，不要求低透水性	
	W1	混凝土與水接觸，需要求低透水性	
鋼筋的腐蝕防護 (C)	C0	混凝土處於乾燥環境或有防潮處理	
	C1	混凝土暴露於潮濕 但無外來氯鹽的環境	
	C2	混凝土暴露於潮濕有外來氯鹽的環境，如去冰化學藥劑、鹽、鹽水、海水或其潑濺水	

^[1]土壤中硫酸鹽的質量百分比應依 ASTM C1580 測定。

^[2]水中溶解硫酸鹽的濃度 ppm 應依 ASTM D516 或 ASTM D4130 測定。

資料來源：ACI 318-14 【77】

台灣地理環境屬於亞熱帶季風氣候，濕熱多雨型之天候，且由於為海島型國家，容易受硫酸根(SO_4^{2-})(土壤中或是水中)及氯鹽(Cl⁻)侵蝕，侵入到混凝土中，影響混凝土的耐久性。因此分別就 S 級暴露級 C 級暴露下的混凝土材料要求概述如下。

1. 抗硫酸鹽侵蝕

ACI-318 對於抗硫酸鹽侵蝕之混凝土膠結材料要求如表 3.1-2，暴露不同硫酸鹽侵蝕條件時，適當的水泥型式、w/cm 最高限、及 f_c' 最低限。選用抗硫酸鹽侵蝕水泥，主要是考慮鋁酸三鈣(C₃A) 的含量。

台灣沿海條件適用 S1 級暴露環境，ASTM C150 第 II 型水泥之 C3A 的最高含量限制為 8.0%，可適用於暴露 S1 級，亦可使用 ASTM C595 中有標記 MS 的混合水泥。自 2009 年起，ASTM C595 包括二元 (IP 和 IS) 及三元 (IT) 混合水泥的要求。ASTM C595 中，適合的二元與三元混合水泥為 IP(MS) 型、IS(MS) 型及 IT(MS) 型，其中 MS 附註代表水泥合於抗中度硫酸鹽侵蝕的要求。在 ASTM C1157 中，適合暴露中度硫酸鹽的類型為 MS。詳表 3.1-2。

表 3.1-2 不同 S 暴露分級之混凝土要求

暴露分級	最大 w/c 比	最小 f_c' psi	附加要求			膠結材之限制
			膠結材料種類			
			ASTM C150	ASTM C595	ASTM C1157	氯化鈣摻料
S0	N/A	2500	無限制	無限制	無限制	無限制
S1	0.50	4000	II	含(MS)標記的 IP、IS 或 IT 分類	MS	無限制
S2	0.45	4500	V	含(HS)標記的 IP、IS 或 IT 分類	HS	不允許
S3	0.45	4500	V 加上卜作嵐或高爐水泥	含(HS)標記的 IP、IS 或 IT 分類加上卜作嵐或高爐水泥	HS 加上卜作嵐或高爐水泥	不允許

資料來源：ACI 318-14【77】

2. 抗氯鹽侵蝕

C 類暴露氯離子的限制：氯離子含量的限制適用於等級 C0、C1 及 C2 的暴露環境。對於非預力混凝土而言，於齡期 28 至 42 天間，依 ASTM C1218 所量測之混凝土內水溶性氯離子含量，與暴露於預期之外界濕度與氯離子的來源相關。對於預力混凝土而言，不論暴露環境，水溶性氯離子的限值為水泥重量的 0.06%。

ACI 提供氯離子對鋼筋腐蝕影響的附加資訊，ACI201.2R 可做為混凝土耐久性指南。ACI 222R 提供混凝土內金屬腐蝕影響因子指南。藉由個別檢測混凝土組成材料的氯離子含量，可初步評估混凝土拌合物的總氯離子含量。假如以混凝土配比計算之總氯離子含量超出表 3.1-3 的限值，需要測試硬固混凝土樣品的水溶性氯離子含量。依 ASTM C1218 方法檢測水溶性氯離子含量時，有些存在於混凝土組成材料的氯離子，可能不溶於水或在水化過程中與水泥反應變成不溶於水的氯離子。

混凝土中水溶性氯離子含量的檢測，宜於齡期 28 至 42 天間進行。表 3.1-3 的限值適用於來自混凝土組成材料的氯離子，而非來自外在環境。對於乾燥環境下的非預力混凝土（C0 級暴露）而言，來自混凝土製作材料的水溶性氯離子限值為 1.00%。

表 3.1-3 混凝土最大水溶性氯離子(Cl-)含量

暴露分級	最大 w/c 比	最小 f'_c psi	非預力混凝土	預力混凝土	額外規定
C1	N/A	2500	1.00	0.06	無
C1	N/A	2500	0.30	0.06	
C2	0.40	2500	0.15	0.06	混凝土保護層

註：混凝土最大水溶性氯離子(Cl-)含量為水泥重量百分比(%)

資料來源：ACI 201.2R【116】

然而台灣四周臨海，砂石資源有限，為避免不肖商人偷摻海砂，重演過往海砂屋事件，內政部營建署特訂定「施工中建築物氯離子含量檢測實施要點」，要求每批預拌混凝土均需辦理水溶性氯離子檢驗，並作為勘驗之文件。依國家標準「CNS 3090 預拌混凝土」(104.01 版)之規定，無論是結構混



凝土或預力混凝土，其氯離子標準皆為 0.15 kg/m^3 (混凝土每立方含量)。若該批預拌混凝土水泥用量為 360 kg/m^3 ，則標準相當於 0.042% (水泥重量百分比)，台灣標準已較 ACI 318-14 更為嚴格。

除 ACI 318-14 對曝露氯鹽環境的分級外，國際標準組織 (ISO) 亦對不同區域進行腐蝕分類 (以各種金屬於開始使用後第一年測得的腐蝕速率 ($\mu\text{m/yr}$)，按不同的五個腐蝕速率範圍區分作 C1 至 C5 五個腐蝕環境等級)，特徵如下[56]：

(一) 惡劣腐蝕環境 (C5+)：表示其腐蝕速率超過 C5 環境的上限值。

一般而言 C5+ 腐蝕環境多位於重鹽害、強酸雨、或硫磺區內。例如花蓮、陽明山、佳洛水、及林口等地。

(二) 嚴重腐蝕環境 (C5)

重鹽害及酸雨：都市環境、海洋環境、工業環境，例如基隆距海十公里範圍內，屬都市和海洋環境。另外小港、興達、高雄等對某些金屬而言都已達到 C5 的腐蝕環境等級。

(三) 高度腐蝕環境 (C4)

一般而言，C4 腐蝕環境區大多位於輕度鹽害及酸雨地區，屬於都市環境、海洋環境、或工業環境。例如：基隆、台北、宜蘭等的市郊地區就是屬於鄉村及海洋的環境。

(四) 中度腐蝕環境 (C3)

一般而言 C3 腐蝕環境區大都位於本省的鄉村地帶，例如：斗南、新竹等地區對某些金屬而言都已達到 C3 的腐蝕環境等級。

(五) 低度腐蝕環境 (C2)

台灣屬於 C2 腐蝕環境區的地方不多，只有少數偏遠的山區才可能具有如此的低度腐蝕環境。嘉義縣奮起湖就是屬這種低度腐蝕環境。另外其他大部份的山區都是屬於這種環境。

(六) 輕微腐蝕環境 (C1)

這種環境大都是屬於非常乾燥的地區，各種金屬在這地方的腐蝕速率都很低。例如沙漠地方就是屬於輕微腐蝕環境，台灣並沒有這種腐蝕環境。

台灣由於多屬於有氯離子影響的環境，尤其在海岸工程混凝土、離島地區等，為了避免混凝土腐蝕危及長期品質，因此對氯離子含量的要求，基本上不得超過水泥重量的 1% 或每 m^3 混凝土體積的 0.15 kg。而在採用預力混凝土的區域，如預力橋梁等，則鋼筋或鋼腱會受到應力腐蝕，加上氯化物後，則使鋼鐵表面之劣化更早產生，而加速腐蝕的發生機率，所以要求更嚴格，氯離子含量最高只能為水泥重量的 0.06%，或每 m^3 混凝土只能容許 0.15 kg。

另一方面，由於台灣屬於高度工業化地區，工業排放污染物加上汽車所排放之氣體，造成台灣地區空氣污染物、一氧化碳、二氧化碳、臭氧、二氧化氮的濃度相當高，且因處在高濕度及高降雨環境下，以致台灣地區雨水酸鹼度相對偏酸。因此台灣地區混凝土之設計應考慮會有酸蝕的問題產生，以及表面易產生粉化等問題，在設計時必須特別注意，而適量的應用綠色材料於混凝土中，對於混凝土抵抗以上污染物應有正面效應。

3.2 綠色材料於台灣道路橋梁環境之耐久性探討

材料層次的研究是混凝土結構耐久性研究最基礎的部分，是本研究主要討論的內容。根據混凝土劣化的主導因素和作用機理，混凝土耐久性問題研究主要集中在以下方面：(1) 氯離子滲透試驗(RCPT)；(2) 抗硫酸鹽試驗。針對不同使用量在環境耐久性之表現說明如下。

一、規範規定

國內目前並無耐久性混凝土專章規範，因此對於高爐石粉及飛灰等綠色材料之使用量規定皆分散於各規範中。如行政院公共工程委員會「公共工程飛灰混凝土使用手冊」建議飛灰使用量如表 3.2-1，其中海邊及地下工程混凝土允許飛灰取代水泥量之參考值為 25% [12]。

表 3.2-1 飛灰混凝土使用手冊允許飛灰取代水泥之上限

種類	允許飛灰取代水泥之上限(以重量計)
1. 混凝土(不屬(2)~(7)項者)	20%
2. 預力混凝土	10%
3. 版混凝土	15%
4. 海邊及地下工程混凝土	25%
5. 巨積混凝土	25%
6. 水密性混凝土	20%
7. 鋪面混凝土	20%

資料來源：公共工程飛灰混凝土使用手冊【12】

註：當飛灰混凝土同時用於不同工程部位時，以飛灰取代水泥量小者為準。

行政院公共工程委員會「公共工程高爐石混凝土使用手冊」指出高爐石粉之添加量應依添加目的、膠結材料及摻料品質、混凝土規定強度及大氣溫度等條件而異，並依試拌結果決定之。目前 CNS 12549 對高爐石粉之添加量並未規定，故建議參考 JIS R5211，設計單位可訂定高爐石粉添加量之要求。依日本土木學會建議，若需提高抗硫酸鹽能力，則高爐石粉(6000 級)取代量為 50~70%，若要提升對海水之化學抵抗性(含鹽害)，則高爐石粉(6000 級)取代量為 45~60%。

內政部營建署「結構混凝土施工規範」中[83]，對特殊暴露情況之混凝土，其水膠比及強度要求如表 3.2-2。

表 3.2-2 特殊暴露情況下混凝土之水膠比及強度要求

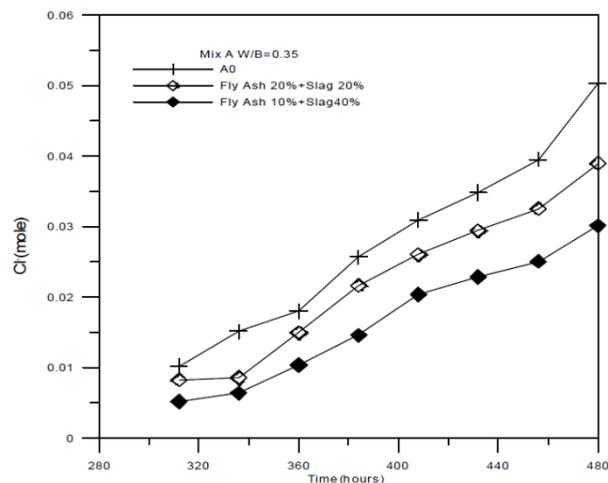
暴露情況	常重混凝土最大水膠比	常重及輕質骨材混凝土 最小規定抗壓強度
(1)暴露於清水中需具水密性	0.50	280 kgf/cm ²
(2)暴露於凍融潮濕或去冰鹽	0.45	315 kgf/cm ²
(3)鋼筋混凝土暴露於去冰鹽、 鹽份、海水、鹽霧等氯離子環 境必須考慮鋼筋防蝕	0.40	350 kgf/cm ²

資料來源：營建署「結構混凝土施工規範」【83】

二、學術研究

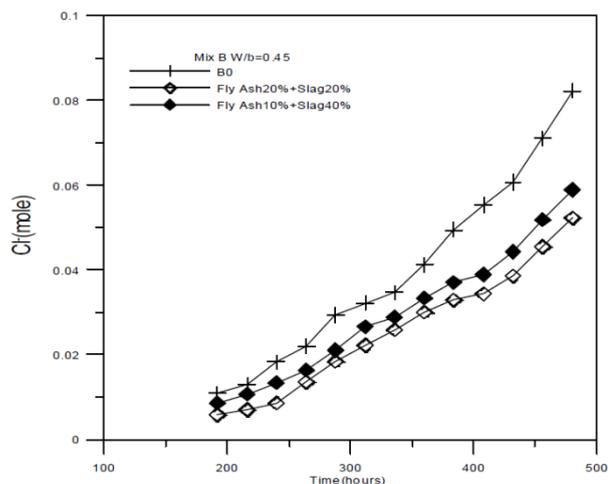
氯離子滲透率與混凝土中的孔隙有關，可作為耐久性指標。依黃然教授於 90 年進行的「添加卜作嵐材料對於混凝土耐久性影響之探討」[84]，針對高爐石粉與飛灰量添加比例之耐久性試驗如圖 3.2-1 至圖 3.2-4 顯示以混合比例 10% 飛灰 40% 高爐石粉為最佳，次之混合比例 20% 飛灰 20% 高爐石粉，再

次之為爐石組。圖 3.2-5 至圖 3.2-6 顯示，當水膠比 0.35 時，以爐灰組 (FASG14) 為最佳，高爐石粉組(40%)次之，接著飛灰組(20%)，其次爐灰組 (FASG22)及高爐石粉組 (20%)，再次之為飛灰組(10%)。當水膠比 0.45 時，飛灰組(20%)為最佳，爐石組 (20%)次之，接著為爐灰組(FASG22)，其次飛灰組(10%)，次之爐灰組(FASG14)，次之爐石粉組(40%)。當水膠比 0.60 時，爐灰組(FASG14)為最佳，爐石組(40%)次之，接著飛灰組(20%)，次之高爐石粉組(20%)，其次飛灰組(10%)，次次之爐灰組 (FASG22)，所有配比皆以控制組為最差。考量結構耐久性、結構使用年限、混凝土經濟性及節能減碳效益，以台灣四面環海環境，混凝土中以高爐石粉及飛灰各別取代水泥 40%、10% 最具效益。



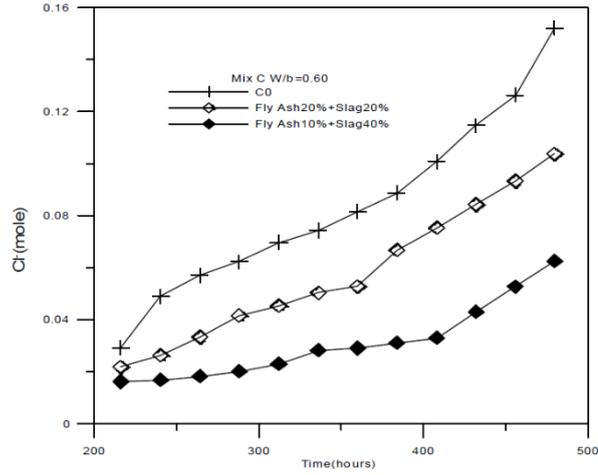
資料來源：黃然，添加卜作嵐材料對於混凝土耐久性影響之探討 2001【84】

圖 3.2-1 爐灰組與控制組之氯離子擴散關係圖(W/b=0.35)



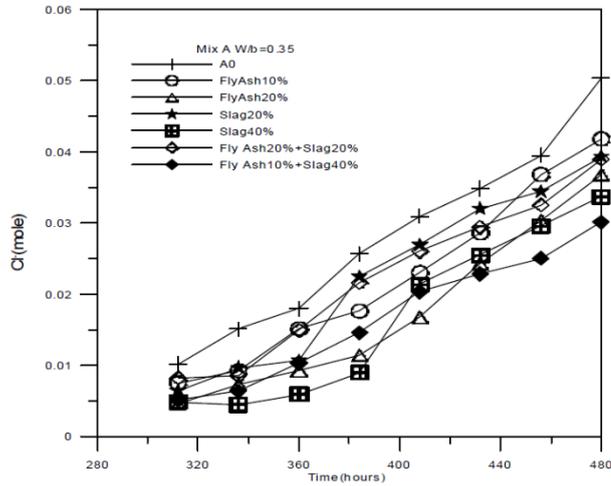
資料來源：黃然，添加卜作嵐材料對於混凝土耐久性影響之探討 2001【84】

圖 3.2-2 爐灰組與控制組之氯離子擴散關係圖(W/b=0.45)



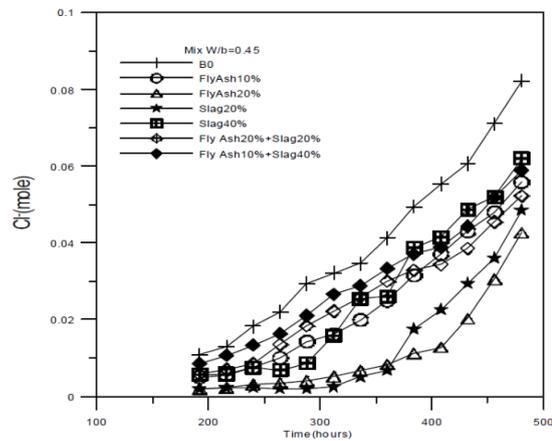
資料來源：黃然，添加卜作嵐材料對於混凝土耐久性影響之探討 2001【84】

圖 3.2-3 爐灰組與控制組之氯離子擴散關係圖(W/b=0.6)



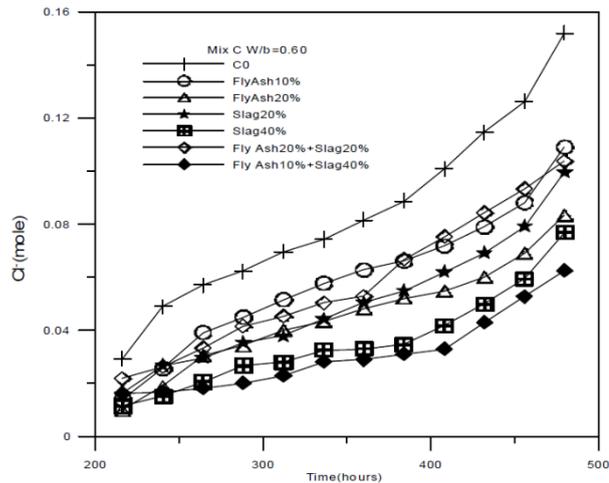
資料來源：黃然，添加卜作嵐材料對於混凝土耐久性影響之探討 2001【84】

圖 3.2-4 氯離子擴散之關係圖(W/b=0.35)



資料來源：黃然，添加卜作嵐材料對於混凝土耐久性影響之探討 2001【84】

圖 3.2-5 氯離子擴散之關係圖(W/b=0.45)



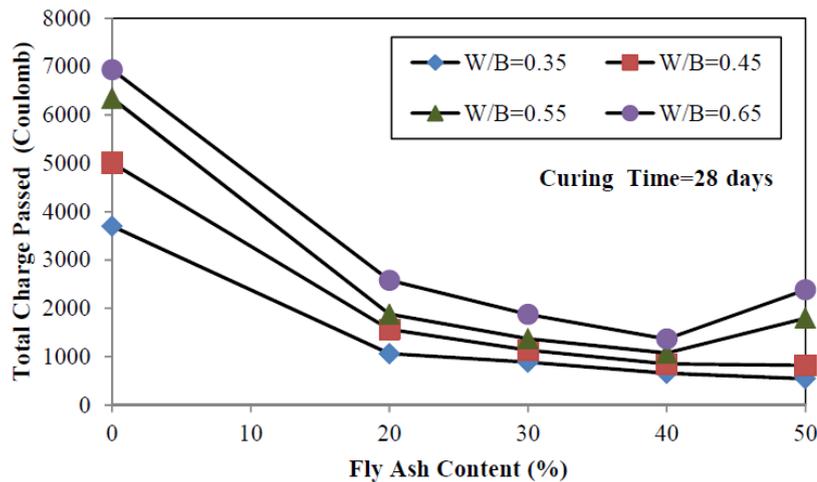
資料來源：黃然，添加卜作嵐材料對於混凝土耐久性影響之探討 2001【84】

圖 3.2-6 氯離子擴散之關係圖(W/b=0.6)

內政部建築研究所於 103 年委託台灣海洋大學楊仲家教授進行「快速氯離子穿透試驗於含飛灰爐石混凝土耐久性能評估之研究」[109]，因 CNS14795 快速氯離子穿透試驗(RCPT)為目前最常用來評估混凝土耐久性的試驗法。新版的綠建材標章已將添加再生材料（回收高爐爐渣粉、飛灰、再生粒料等）佔總重量 50% 以上的綠混凝土列入再生綠建材認證。其中並將快速氯離子穿透試驗的氯離子滲透電量結果應小於 2000 庫倫列入認證要求。可見未來高劑量飛灰與高爐石粉添加混凝土的設計方式會日益增加，因此研究不同高爐石粉飛灰添加量的混凝土強度，其 RCPT 試驗結果之差異。

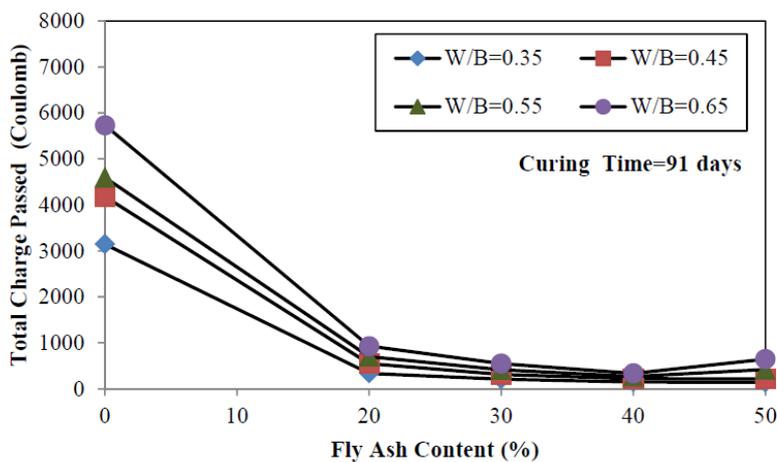
試驗研究成果發現在抗壓強度上飛灰組的強度會隨著養護材齡增加而增加，在養護達 28 天時，所有的飛灰組強度皆低於控制組，當養護達 91 天時大部分飛灰組試體都會高於對照組。在 RCPT 總通過電荷量方面，控制組與爐石組一樣隨著水膠比提升而增加，隨著養護材齡的增加電量降低了 12.1~39.7%，而相較於控制組，添加爐石後，總電量隨著爐石添加量增加而減少，爐石組 28 天降低了 41.6~82%，91 天降低了 47.8~86.9%。而飛灰混凝土方面，控制組與飛灰組混凝土配比中總電量、總氯離子含量、穿透深度彼此之間分佈的趨勢大致相同，都是隨著水膠比增加而增加，而隨取代量增加而下降，且同樣在飛灰取代 50% 時水膠比在 0.55、0.65 等試體都會有不穩定的上升情況發生。而 RCPT 後飛灰或爐石混凝土總通過電量與總氯離子含量之間的關係有不錯的線性關係，而總通過電量與穿透深度的關係也為良好線性關係。

飛灰混凝土替代量與總電荷量關係如圖 3.2-7、圖 3.2-8，高爐石粉混凝土替代量與總電荷量關係如圖 3.2-9、圖 3.2-10，由試驗結果可知，飛灰高爐石粉添加量愈多，通過電荷量愈低，代表混凝土愈緻密，耐久性愈好，強度愈高，電荷量也會愈低。而 90 天齡期又比 28 天齡期要來的低，添加飛灰對於增加緻密性效果又比高爐石粉更加顯著。



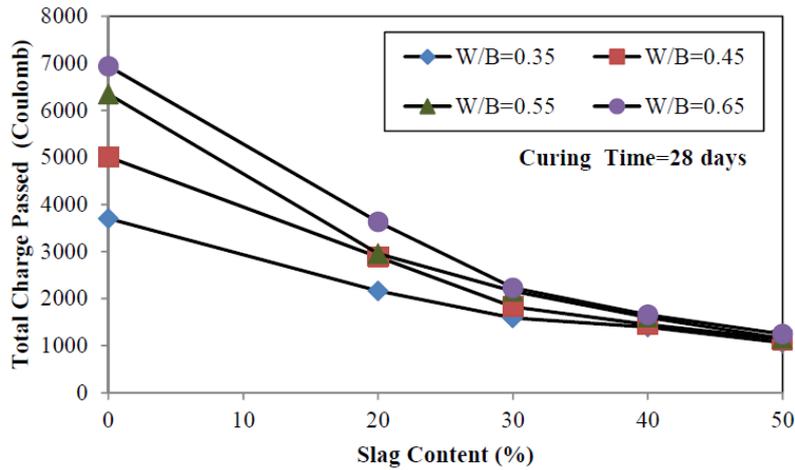
資料來源：楊仲家，快速氯離子穿透試驗於含飛灰爐石混凝土耐久性能評估之研究 2014【109】

圖 3.2-7 飛灰混凝土替代量與總電荷量關係圖（材齡 28 天）



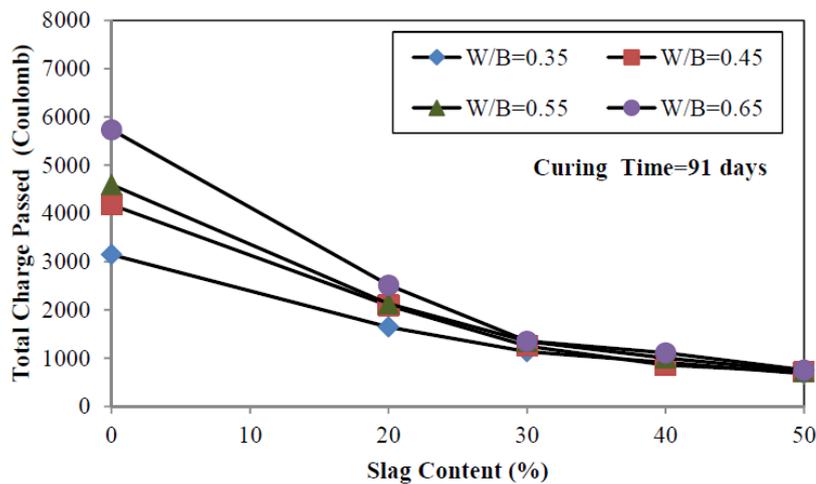
資料來源：楊仲家，快速氯離子穿透試驗於含飛灰爐石混凝土耐久性能評估之研究 2014【109】

圖 3.2-8 飛灰混凝土替代量與總電荷量關係圖（材齡 91 天）



資料來源：楊仲家，快速氯離子穿透試驗於含飛灰爐石混凝土耐久性能評估之研究 2014【109】

圖 3.2-9 高爐石粉混凝土替代量與總電荷量關係圖（材齡 28 天）



資料來源：楊仲家，快速氯離子穿透試驗於含飛灰爐石混凝土耐久性能評估之研究 2014【109】

圖 3.2-10 高爐石粉混凝土替代量與總電荷量關係圖（材齡 91 天）

另黃兆龍教授於「卜作嵐混凝土使用手冊」一書中[88]，分別探討混凝土添加高爐石粉及飛灰的耐久性性質，該書依 ASTM C1202-93 編訂一套可檢測混凝土抗氯離子侵蝕的方法，依據通過電荷量評估氯離子穿透性，俾評定混凝土抗滲透的性質，總電荷量愈少，代表抵抗氯離子之能力愈強，穿透標準如表 3.2-3。

表 3.2-3 依據通過電荷量評估氯離子穿透性

通過電荷量(庫倫)	氯離子穿透性
>4,000	高(High)
2,000 ~ 4,000	中(Moderate)
1,000 ~ 2,000	低(Low)
100 ~ 14,000	甚低(Very low)
< 100	可忽略(Negligible)

資料來源：ASTM C1202-93【117】

該研究試驗幾種高含量飛灰之混凝土的氯離子電滲量之量測結果如表 3.2-4，依混凝土齡期而言；時間愈長久，內部組織愈顯緻密，以致可讓細小氯離子滲透量也逐漸降低。其中採用 ACI 規範之無飛灰混凝土配比設計之電滲量，齡期 91 天仍高於 4000 庫倫，屬於高滲透量之性質，然而若添加 25% 飛灰整體上是明顯降低混凝土的電滲量，而且養護時間愈長降幅愈大，至齡期 1 年時皆低於 2000 庫倫，達到低滲透量，顯示添加飛灰材料可使孔隙細微化而降低混凝土的滲透性，具有與減滲劑相同的效應。而同樣地降低拌合水量至 160 kg/m^3 時，混凝土氯離子電滲量之降幅更顯著，甚至長期電滲量可低於 1000 庫倫的甚低滲透等級。然而若增加飛灰至 30 % 以上則會有略為升高的趨勢，這結果對應表面電阻值是有相同的關係，飛灰的添加量是應該低於 25%，而不宜過量摻合於混凝土。針對不同燒失量飛灰之各齡期混凝土的氯離子電滲量之量測結果，顯示低燒失量飛灰混凝土的電滲量是略低於高燒失量飛灰混凝土，抗滲性較佳，但彼此間差距並不多，主要因飛灰所提供的封孔固化與緻密效應，受到燒失量變化的影響不大。

綜合前述結果；摻用適量及低燒失量飛灰並採取少拌和水量的配比設計，將可降低混凝土的氯離子滲透性，對處於不良環境之結構混凝土，諸如海域環境、硫酸鹽濃度高的地區，具有優良的鋼筋防銹蝕效果而增進混凝土的服務壽命。

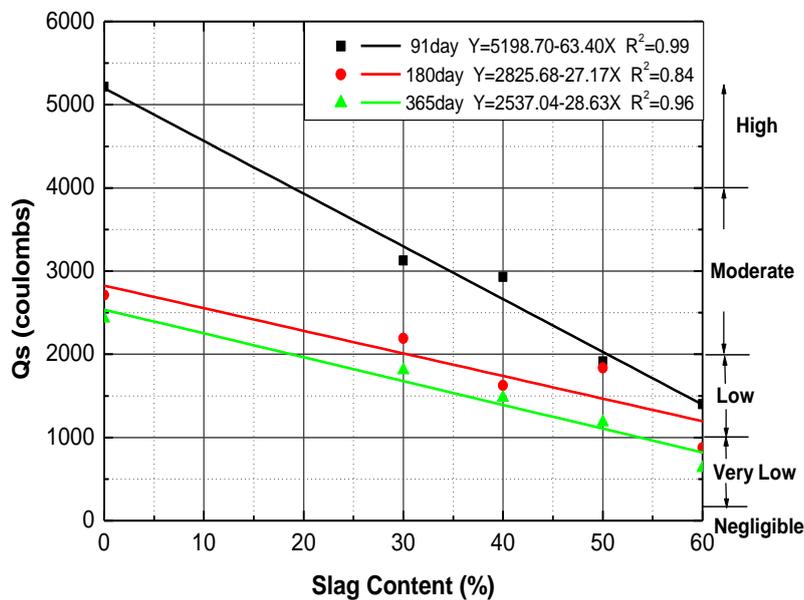
表 3.2-4 含飛灰材料混凝土之氯離子電滲量

W/B	拌和水量 (kg/m ³)	飛灰燒失量 (%)	飛灰取代水 泥量 (%)	氯離子電滲量(Coulombs)		
				56 天	91 天	365 天
0.40	220	—	0	4770	4150	3984
0.30	192 ⁺	4	25	—	1250	965
0.30	192 ⁺	6	25	—	1370	1053
0.30	192 ⁺	11	25	—	1495	1186
0.28	160*	4	25	1490	970	610
0.32	160*	4	30	1985	1320	745
0.40	160*	4	40	2140	1570	815

資料來源：黃兆龍「卜作嵐混凝土使用手冊」【85】

註：+添加 2.5% 強塑劑(SP)；*添加 3.5% 強塑劑(SP)。

圖 3.2-11 顯示高爐石混凝土抵抗氯離子電滲性質隨著高爐石粉替代量增加而增強，此外，隨齡期的增長，高爐石混凝土持續水化、高爐石粉的卜作嵐反應及細微顆粒填塞效應，可使混凝土氯離子電滲量降低，提升了耐久性。



資料來源：黃兆龍，卜作嵐混凝土使用手冊【85】

圖 3.2-11 高爐石粉不同替代率之混凝土氯離子電滲成長趨勢 (W/B=0.48)

三、機關研究

依本計畫團隊協助交通部台灣區國道新建工程局制定「公路橋梁隧道設計使用年限與耐久性規範草案之研擬」[87]計畫之經驗，結構物之耐久性主要與環境條件、材料性質(混凝土、鋼筋與可能的輔助材料系統)及構造細部設計等三大因素息息相關。從材料面觀點來看，一般道路橋梁多採用鋼筋混凝土進行設計，而鋼筋混凝土結構耐久性問題則以產生鋼筋腐蝕及混凝土劣化為重要指標，因為腐蝕介質之侵入可使鋼筋直徑變小及拉力承受度下降，混凝土也因鋼筋銹蝕而導致大裂縫及保護層剝落，致使構件整體承载力大幅滑落，引發安全顧慮，鋼筋混凝土與環境因子相關指標如表 3.2-5 所示。因此提升混凝土品減少其劣力程度與機率，使外在腐蝕介質不易侵入，此為延長橋梁結構整體耐久性之直接手段。

表 3.2-5 鋼筋混凝土劣化與環境因子相關指標

劣化機構	劣化要因	劣化指標
中性化	二氧化碳	中性化深度/鋼材腐蝕量
鹽害	氯離子	氯離子濃度/鋼材腐蝕量
化學的侵蝕	酸性物質/硫酸根離子	劣化因子滲透深度/中性化深度/鋼材腐蝕量
鹼質與粒料反應	反應性粒料	膨脹量
凍害	凍結溶解作用	凍害深度/鋼材腐蝕量

資料來源：「公路橋梁隧道設計使用年限與耐久性規範草案之研擬」[87]

鋼筋混凝土構造物耐久性考量因子包含了「氯離子入滲」、「混凝土中性化」、「硫酸鹽類侵蝕」、「凍融」、「化學侵蝕」等，其影響程度因環境條件而有所不同，而耐久性設計主要由鋼筋之腐蝕行為所決定，通常指混凝土鋼筋腐蝕至足以影響該構造物之使用或安全所需之時間，因此，對鋼筋的保護程度即成為決定鋼筋混凝土構造物之耐久性能。

該研究計畫中彙整國外規範指出，在一般環境下中性化影響所需之保護層厚度，目前僅有日本混凝土標準規範書中有公式可供計算，其考量的參數包含了設計年限、水膠比、環境作用等級及預測準確性之安全係數等，此外，亦考量了添加飛灰及高爐石粉礦物摻料對混凝土 pH 值影響。分別將純水泥、高爐石粉取代量 20%、高爐石粉取代量 40%、爐灰取代量 30% 及飛灰取代量 20% 等五種混凝土，及水膠比 0.35、0.45、0.55 和 0.65 代入公式，可

得到中性化環境不同混凝土材料所需之保護層厚度，如表 3.2-6 所示。

將表中的結果與歐盟和中國的規範比較顯示，在中性化最嚴重的環境等級中，設計年限為 50 年的情況下，歐盟規範的要求為 3 cm，中國規範的要求在水膠比為 0.45 時為 3.5 cm，下表計算出在水膠比為 0.45 時，最大保護層厚度為飛灰取代量 20% 混凝土的 3.1 cm，顯示各國規範的要求差異不大。

表 3.2-6 於中性化環境不同混凝土材料所需之保護層厚度(cm)

混凝土種類	W/B	50 年(一般環境)		100 年(一般環境)	
		潮濕	乾濕交替	潮濕	乾濕交替
純水泥	0.35	1.0	1.0	1.0	1.0
	0.45	1.4	1.7	1.6	2.0
	0.55	2.2	3.0	2.7	3.8
	0.65	3.0	4.3	3.9	5.6
高爐石粉 取代量 20%	0.35	1.0	1.0	1.0	1.0
	0.45	1.7	2.1	1.9	2.5
	0.55	2.5	3.4	3.1	4.4
	0.65	3.4	4.8	4.4	6.4
高爐石粉 取代量 40%	0.35	1.0	1.0	1.0	1.0
	0.45	1.9	2.5	2.3	3.1
	0.55	2.8	3.9	3.6	5.2
	0.65	3.8	5.4	4.9	7.2
爐灰取代 量 30%	0.35	1.1	1.2	1.2	1.3
	0.45	2.1	2.7	2.5	3.5
	0.55	3.0	4.3	3.9	5.6
	0.65	4.0	5.8	5.2	7.8
飛灰取代 量 20%	0.35	1.3	1.5	1.5	1.7
	0.45	2.3	3.1	2.9	4.0
	0.55	3.3	4.7	4.3	6.3
	0.65	4.3	6.4	5.7	8.6

資料來源：公路橋梁隧道設計使用年限與耐久性規範草案之研擬」[87]

一般環境中的配筋混凝土結構構件，其普通鋼筋的保護層最小厚度與相應的混凝土強度等級、最大水膠比應符合表 3.2-7 的要求。

大截面混凝土墩柱在加大保護層厚度的前提下，其混凝土強度等級可低於下表中的要求，但降低幅度不應超過兩個強度等級，且設計使用年限為 100 年和 50 年的構件，其強度等級不應低於 C25 和 C20。當採用的混凝土強



度等級比下表的規定低一個等級時，混凝土保護層厚度應增加 5 mm；當低兩個等級時，混凝土保護層厚度應增加 10 mm。

表 3.2-7 一般環境中混凝土材料與鋼筋的保護層最小厚度 c (mm)

設計使用年限 環境作用等級		100 年			50 年			30 年		
		混凝土強度等級	最大水膠比	c	混凝土強度等級	最大水膠比	c	混凝土強度等級	最大水膠比	c
板、牆等 面形結構	I-A	C30	0.55	20	C25	0.60	20	C25	0.60	20
	I-B	C35	0.50	30	C30	0.55	25	C25	0.60	25
		≥C40	0.45	25	≥C35	0.50	20	≥C30	0.55	20
I-C	C40	0.45	40	C35	0.50	35	C30	0.55	30	
	C45	0.40	35	C40	0.45	30	C35	0.50	25	
	≥C50	0.36	30	≥C45	0.40	25	≥C40	0.45	20	
梁、柱等 條形結構	I-A	C30	0.55	25	C25	0.60	25	≥C25	0.60	20
		≥C35	0.50	20	≥C30	0.55	20			
	I-B	C35	0.50	35	C30	0.55	30	C25	0.60	30
≥C40		0.45	30	≥C35	0.50	25	≥C30	0.55	25	
I-C	C40	0.45	45	C35	0.50	40	C30	0.55	35	
	C45	0.40	40	C40	0.45	35	C35	0.50	30	
	≥C50	0.36	35	≥C45	0.40	30	≥C50	0.45	25	

註：1.I-A 環境中使用年限低於 100 年的板、牆，當混凝土骨料最大標稱粒徑不大於 15 mm 時，保護層最小厚度可降為 15 mm，但最大水膠比不應大於 0.55。
2.年平均氣溫大於 20℃ 且年平均濕度大於 75% 的環境，除 I-A 環境中的板、牆構件外，混凝土最低強度等級應比表中規定提高 1 級，或將保護層厚度增大 5 mm。
3.直接接觸土體澆築的構件，其混凝土保護層厚度不應小於 70 mm，有混凝土墊層時可按上表規定。
4.處於流動水中或同時受水中泥沙沖刷的構件，其保護層厚度宜增加 10~20 mm。
5.預鑄構件的保護層厚度可比表中規定減少 5 mm。
6.當膠凝材料中粉煤灰和礦渣等摻量小於 20% 時，表中水膠比低於 0.45 可適當增加。

資料來源：公路橋梁隧道設計使用年限與耐久性規範草案之研擬 [87]

交通部公路橋梁設計規範中[82]，分別於第五章「基礎」、第七章「鋼筋混凝土設計」及第八章「預力混凝土設計」有規定保護層厚度，並另外於第十二章「海洋環境下防蝕設計」中規定了各構件於不同海洋腐蝕環境分區下之保護層厚度。台灣位處於海域環境、強風、高鹽份、潮濕高溫，因此該計畫之鋼筋混凝土橋梁耐久性設計將以中性化及氯化物環境下之耐久性設計為主，經長期試驗結果提出以下建議。

其中，一般環境係指在正常大氣作用下的中性化環境，內容包含一般規定、環境作用等級、材料與保護層規定等規定；海洋鹽害環境係指海洋和臨海地區接觸海水、飛沫、大氣中氯鹽等氯化物的環境，內容亦包含一般規



定、環境作用等級、材料與保護層等規定。一般環境對鋼筋混凝土結構的環境作用等級應根據實際情況依據表 3.2-8 而確定；一般環境中的鋼筋混凝土結構構件，其鋼筋的最小保護層厚度與混凝土最大水膠比應符合表 3.2-9 的要求；海洋鹽害環境之作用等級，依離海岸的距離可分為極嚴重鹽害區 S、嚴重鹽害區 I、中度鹽害區 II 及輕度鹽害區 III 四種等級，各作用等級相應之離海岸距離可按表 3.2-10 之規定設計；海洋鹽害環境中各環境作用等級的鋼筋混凝土構件，混凝土最大水膠比及最低抗壓強度應符合表表 3.2-11 之規定；主要構件鋼筋保護層厚度依設計年限、橋梁部位及所處環境作用等級列於下表 3.2-12。

表 3.2-8 一般環境下的作用等級

環境作用等級	環境條件	結構構件示例
I	非乾濕交替環境	箱梁內部等。
II	乾濕交替環境	柱、橋台、版、「I」「T」梁、箱梁外露面等。

資料來源：交通部公路橋梁設計規範【82】

表 3.2-9 一般環境下混凝土材料與鋼筋的最小保護層厚度

設計年限 環境作用等級	100 年		50 年	
	最大水膠比	最小保護層厚度 cm	最大水膠比	最小保護層厚度 cm
I	0.50	3.5	0.50	3.0
	0.45	3.0	0.45	2.5
II	0.45	4.5	0.50	4.0
	0.40	4.0	0.45	3.5
	0.35	3.5	0.40	3.0

資料來源：交通部公路橋梁設計規範【82】

表 3.2-10 鹽害環境下的作用等級

環境作用等級		離海岸的距離
S	極嚴重鹽害區	海上部分及距海岸線 50 m 陸上範圍
I	嚴重鹽害區	距海岸線 50 m 至 300 m 陸上範圍
II	中度鹽害區	距海岸線 300 m 至 600 m 陸上範圍
III	輕度鹽害區	距海岸線 600 m 至 1500 m 陸上範圍

資料來源：交通部公路橋梁設計規範【82】

表 3.2-11 鹽害環境下混凝土最大水膠比及最低抗壓強度

	極嚴重鹽害區(S)	嚴重鹽害區(I)	中度鹽害區(II)	輕度鹽害區(III)
最大水膠比	0.4	0.4	0.45	0.45
最低抗壓強度 f'c (kgf/cm ²)	350	350	280	280

資料來源：交通部公路橋梁設計規範【82】

表 3.2-12 鹽害環境下主要構件鋼筋最小保護層厚度

設計年限 環境作用等級	50 年				100 年			
	S	I	II	III	S	I	II	III
橋梁部位								
基礎、基樁	10	10	10	10	10	10	10	10
柱、牆	10	7.5	7.5	7.5	10	10	7.5	7.5
橋面版頂層筋	6.5	5.5	5	5	7.5	6.5	6	5
橋面版下層筋	6.5	5.5	5	4	7.5	6.5	6	5
箱梁底層筋	6.5	5.5	5	4	7.5	6.5	6	5
「I」「T」梁、箱梁腹版外 露面	6.5	5.5	5	4	7.5	6.5	6	5
混凝土面未直接曝露於大 氣、未與土壤或水接觸	4	4	4	4	4	4	4	4

資料來源：交通部公路橋梁設計規範【82】

註：單位為公分

3.3 環境影響因素小結

- 一、依 ACI 318 對混凝土受環境侵害分類與分級，考量台灣為濕熱多雨之海島國家，因此抗硫酸鹽(SO₄²⁻)侵蝕及抗氯鹽(Cl⁻)為耐久性之指標。
- 二、彙整國內重大工程使用高爐石粉飛灰的混凝土抗壓強度統計分析結果，當水膠比在 0.4 以下時 28 天抗壓強度皆超過 500 kgf/cm²，品質表現優良，皆符合設計強度要求。
- 三、氯離子滲透率與混凝土中的孔隙有關，因為可作為耐久性指標。依過往試驗結果，無論高水膠比或低水膠比，添加高爐石粉飛灰 50% 比例之配比(高爐石粉 35%、飛灰 15%)因提升混凝土緻密性，而有最佳之表現。

第四章 國內外橋梁結構使用綠色材料的能耗、穩定性與節能減碳效果

經國內外實績驗證將高爐石粉及飛灰替代水泥使用於各類工程結構混凝土，對於提升結構強度發展及耐久性極具可行性，然在性能導向高比例添加之趨勢下，使用高爐石粉、飛灰及混合水泥對於道路橋梁結構之體積穩定性影響係決定添加比例的重要因素，即相對應可碳減排效益亦有重要關聯性。爰此，本計畫團隊將對高爐石粉、飛灰及混合水泥的能耗與材料穩定分析，進而評估使用後的節能減碳效果。

4.1 綠色材料結構能耗

在公共工程永續發展相關研究中，生命週期(life cycle cost, LCC)之概念主要被應用於成本及環境評估兩方面，將建築物或建築材料視為產品，對其生命週期進行成本或環境衝擊的評估，例如 Singh 與 Tiong[89]針對公路橋梁生命週期成本進行評估，探討如何以最低成本達到建物結構效用最佳化；在環境評估方面，Suzuki 與 Oka[90]收集 10 棟樓地板面積介於 1,253 至 22,982 m² 間辦公室建築物之相關營建資料，將其生命週期分為建造階段、使用維修階段及拆除階段並以建築物 40 年使用年限進行 CO₂ 排放量計算，結果顯示 10 棟建築在全生命週期所產生之 CO₂ 排放總體平均量為每平方公尺(m²)樓地板排放 4,430 kg-CO₂，其中建築物使用維護階段 CO₂ 排放量為 3,480 kg/m²。Kellenberger 與 Althaus[91]將建築物生命週期中，從建材製作至建築物拆除之環境負荷量進行盤查分析，包含建材運輸至施工現地、建造機具燃料耗用、建材施工報廢率、輔助建材使用(連接器、黏合劑)及完工後剩餘建材等相關參數也一併納入考量，利用 Eco-indicator 99 生命週期衝擊評估模式，針對化石燃料、核能、水資源、風力、地熱及生質能源之耗用，描述不同的建材組件對環境的衝擊影響和資源利用效率。

對此，二氧化碳數量推估的依據援引跨政府氣候變遷專家委員會(IPCC)於 2007 發表第四份評估報告，係以科學方式計算各種能源燃燒時之排碳量，建立各種能源之碳排放係數，針對國家或區域以統計能源之總消費作為該國家或區域之碳排放基準，並無法計算產品或企業之碳排放量；碳足跡則導入生命週期之觀念，以 IPCC 提供之碳排放係數，依照不同國家或區域的排放特性，建立本地之碳排放係數，可針對個人、產品或企業進行個別之碳排放計算。其中，IPCC 評估準則是用於評估國家或整體物質與能源耗用後所產生之溫室氣體排放量，在範疇界

定及評估項目上並不適用於評估產品，若欲評估產品之排碳量，應以碳足跡準則為宜。IPCC 或是碳足跡，在二氧化碳推估上，都是以活動數據乘上排放係數計算，而二氧化碳主要來源為能源消耗上，係會根據活動數據(activity data)，即各種資源的使用數量，例如當我們要統計「石化能源燃燒所排放二氧化碳」時，活動數據即為石化能源提供量；以及排放係數(emission factor)，即對應每單位「活動數據」的二氧化碳當量排放量，兩種能源消耗方式推估二氧化碳排放。

目前各單位耗能種類中，大部分的能量來源為石化燃料的燃燒外，電力的使用，電能亦為能量的主要來源之一，大量的機械使用電動馬達運作，各生產線的二氧化碳排放量亦與電能使用量息息相關，而每單位電能的二氧化碳排放量各國並不相同，其差別來自於發電結構的差異，例如在七成以上用電能源仰賴火力發電的台灣，建材生產只要使用 1 度電能就排放相當約 0.612 Kg 的二氧化碳排放，火力發電比例越高，其用單位電產生的二氧化碳排放值越大。國內經濟部能源局於 98 年公佈最新的能源排放係數，如下表 4.1-1，此為針對台灣單位能源二氧化碳排放量計算結果，將可輕易由此表查出某項能源使用所產生二氧化碳排放量。

表 4.1-1 台灣主要各類能源之熱值與 CO₂排放量計算結果

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	CO ₂ 排放量 (Kg-CO ₂ /單位)
電力	度	860	-	-	-	0.612
燃料油	公升	9,600	3.2405E-04	21.1	0.99	3.111
柴油	公升	8,400	3.1023E-04	20.2	0.99	2.606
重油	公升	-	-	-	-	3.110

資料來源：經濟部能源局【118】

生命週期評估法係全盤考量構造物在其生命週期中各階段對環境造成的負荷。構造物材料的生命週期包括原料開採、建材生產、運輸營建、日常使用、維護修繕、拆除回收以至廢棄物處理等階段。以橋梁工程為例，依結構型式的不同，所使用建材的數量亦有所差異；目前台灣的橋梁仍以鋼筋混凝土構造為主，所使用的主要材料為混凝土、鋼筋、模板等，不同建材數量對於環境所造成的影響與負荷，自是不同，茲將鋼筋混凝土橋梁的生命週期各階段所考量評估的項目和內容列如表 4.1-2。

表 4.1-2 橋梁生命週期各階段評估之項目和內容

項目	內容
原料開發階段	1.開採砂石及運送過程 2.開採水泥、鐵礦原料運送過程 3.開採木材、其他原料及運送過程
建材製造階段	1.生產水泥、製造鋼材及運送過程 2.砂石場生產粗骨材及運送過程 3.預拌混凝土製造及運送過程 4.模板及其他建材製造及運送過程
施工建造階段	1.橋梁主體結構之興建過程
日常使用階段	1.橋梁完成後至拆除前之使用過程
拆除階段	1.橋梁之拆除階段
廢棄物處理階段	1.橋梁拆除後廢混凝土塊之分離、回收或廢棄過程

資料來源：本計畫團隊整理

伍勝民教授、楊明德教授及林憲正於「RC 橋梁生命週期之溫室氣體排放量評估」研究中[92]，以 IPCC(政府間氣候變化專業委員會)所提供的二氧化碳估算方法(如表 4.1-3)，該計算橋梁的二氧化碳排放量。

表 4.1-3IPCC 二氧化碳估算方法[92]

	內容
1	估計結構物生命週期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，並最後都轉換成為「TJ」(10 ¹² 焦耳)，以方便後續的計算。
3	以各種能源的熱值單位乘上各自的碳排放係數，得到碳排放量的初步估計。
4	扣除碳固定化 (carbon sequestered) 的部分。由於本研究在各階段之能源使用時，皆無用到需要扣除碳固定化的能源，故可不計算此部分。
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%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即可得到建築生命週期各階段能源使用的二氧化碳排放量。

一、建材在生產階段的溫室氣體排放量解析

該研究對於建材生產之單位生產耗能量，依據成功大學碩士論文，劉漢卿[93]、楊煦照[94]與張又升[95]之研究調查資料，及經濟部統計處「工業統計調查報告」與經濟能委會委託能資所所做的「能源查核制度管理輔導計畫整理計算得到，簡述如表 4.1-4。

表 4.1-4 橋梁主要建材單位生產之 CO₂ 排放量表

主要建材	單位	CO ₂ 排放量(kg)
鋼筋及鐵件 1	M ³	2.23(0.84)
木模板 2	M ³	0.13
鋼模板 3	M ³	0.40(0.02)
210 kgf/cm ² 混凝土	M ³	143.58
350 kgf/cm ² 混凝土	M ³	192.73
瀝青混凝土	M ³	238.82

註 1：鋼筋 CO₂ 排放量為 2.23 kg，若考慮回收利用率八成計算，依高爐(新鋼胚)與電弧爐(回收鋼胚)的提煉法估算，得出 CO₂ 排放量為 0.84 kg，列於括弧內。
2.木模板以使用三次計算，因其回收率差，故未計算其碳素固定作用。
3.以 1.6mm 厚電弧爐使用 10 次作基準，回收率以 95%計算，得出 CO₂ 排放量為 0.02 kg，列於括弧內。

資料來源：經濟能委會委託能資所「能源查核制度管理輔導計畫」【118】

二、建材在運輸階段的溫室氣體排放量解析

各建材在運輸階段的溫室氣體排放量是如表 4.1-2 所示。此表內容取自國立成功大學建築研究所張又升之碩士論文[95]。其計算係以公路運輸的為主來作分析建材公路的能源消費種類為柴油與汽油兩種，將其換算成熱值單位(1012 焦耳)，乘上各自的碳排放係數 21.1 與 18.9 公噸碳/1012 焦耳，即得碳排放量，再將各能源的排放量加總，乘上各自的碳氧化率，最後乘上碳素的 CO₂ 重量比 44/12，即得各主要建材單位運輸的 CO₂ 排放量。

表 4.1-5 橋梁主要建材單位運輸之 CO₂ 排放量表

主要建材	單位	CO ₂ 排放量(kg)	備註
鋼筋及鐵件	Kg	0.0030	
木模板	M ²	0.0081	使用三次計算
鋼模板	M ²	0.0005	使用十次計算
預拌混凝土	M ³	0.0007	各強度均相同
瀝青混凝土	M ³	0.0008	

資料來源：張又升、林憲德，建築物生命週期二氧化碳排放量之研究 1997【95】

三、建材在營建階段的溫室氣體排放量解析

鋼筋混凝土橋梁的施工，除了預鑄 I 型梁吊裝及場撐箱梁等傳統施工方法外，近年台灣已陸續引進採用懸臂、節塊推進、支撐先進及預鑄節塊懸臂吊裝等工法。這些不同的工法除了有替代性而難以比較其營建階段的 CO₂ 排放量外，又國內各工程機關在編列設計預算書時，對於不同工法的工料分析亦無明確的資料可資採用。為簡化計算，依據行政院環保署「台灣建築生命週期二氧化碳排放減量之研究」統計[96]，1994 年我國營建相關產業，其營建過程之耗能量為生產含運輸階段的 2.48%，CO₂ 排放量為生產運輸階段的 0.52%。表 4.1-6 該研究即依此比例推算 RC 橋梁在營建階段的 CO₂ 排放量。

表 4.1-6 混凝土橋梁在營建階段的 CO₂ 排放量

主要建材	單位	CO ₂ 排放量(kg)			
		(A)生產階段	(B)運輸階段	(A)+(B)	建造階段
鋼筋及鐵件	Kg	0.84	0.0030	0.8431	0.0044
木模板	M ²	0.13	0.0081	0.1381	0.0007
鋼模板	M ²	0.02	0.0005	0.0205	0.0001
210 kgf/cm ² 混凝土	M ³	143.58	0.0007	143.5807	0.7467
350 kgf/cm ² 混凝土	M ³	192.73	0.0007	192.7307	1.0022
瀝青混凝土	M ³	238.82	0.0008	238.8208	1.2419

資料來源：行政院環保署「台灣建築生命週期二氧化碳排放減量之研究」【96】

四、橋梁在使用階段的溫室氣體排放量解析

RC 橋梁在日常使用階段的溫室氣體排放量相關項目，除了照明用電外，就是維護工作了。由於大部分的橋梁路燈設置不固定，該研究並未將照明設備列入 CO₂ 排放量的評估範圍。

至於 RC 橋梁的維護工作，甚為簡單，只有磨耗層的翻修而已。本研究以平均每五年翻修一次為計算基準，也就是說橋梁每五年會將 AC 面層刨除 5 cm，再加以鋪設新的瀝青混凝土。RC 橋梁的平均壽命以 50 年計算，在其使用階段將翻修九次 AC 面層。

AC 面層之翻修，須使用刨除機刨除，刨除的舊 AC 面層將產生 1.3 倍體積的廢棄物需要清運，然後才能新鋪瀝青混凝土面層。刨除機刨下的廢 AC 料即自動送上卡車載走運棄，經訪實際操作廠商，估計每刨除 100 m² 面積之五公分厚 AC 面層，需消耗油料（含卡車清運運距 10 km）為汽油 0.372 加侖與柴油 0.51 加侖，依據前述計算方式換算為刨除每 m² 瀝青混凝土之 CO₂*排放量為 0.0231 kg。再加上新瀝青混凝土 CO₂ 排放量，則每翻修一次 AC 面層的 CO₂*排放量為 12.0262 kg/m²，橋齡 50 年翻修 9 次的 CO₂*排放量計為 108.2361 kg/m²，以 5 公分厚面層換算則為 2164.722 kg/m³。

五、橋梁在拆除回收階段的溫室氣體排放量解析

RC 橋梁的拆除一般業者皆採用破碎拆除工法來拆除，業者常用怪手與破碎機進行拆除，部分使用重力球與瓦斯切割機等機械設備來輔助拆除作業。依據行政院環保署「台灣建築生命週期二氧化碳排放減量之研究」研究，計算出平均拆除 1 立方公尺混凝土結構體的 CO₂ 排放量為 3.5 kg。再以建造時混凝土的使用量乘以 1.4 的膨脹係數（因一般計算混凝土體積數量時皆包含鋼筋體積）作為營建廢棄土的產生量，從而計算出營建廢棄土的運輸耗能與 CO₂ 排放量。該研究據以反推算出每運除 1 立方公尺體積結構體之廢棄土，其 CO₂ 排放量為 3.7 kg。合計每拆除與運輸 1 立方公尺單位體積結構體之 CO₂ 排放量為 7.2 kg，如表 4.1-7 我國 RC 橋樑相關拆除廢棄物再利用率。

表 4.1-7 我國 RC 橋梁相關拆除廢棄物再利用率

廢棄物種類	處理方式	百分比%	備註
混凝土	掩埋場掩埋	50	含各式運棄掩埋
	路基填料	30	
	回填料	20	
	再生骨材	0	
鋼筋鐵件	再生鋼材	70	鋼模板回收率為 95%
木模板	再利用或作燃料	0	掩埋或焚化處理

資料來源：行政院環保署「台灣建築生命週期二氧化碳排放減量之研究」【96】

六、小結

綜合前面各節所述，已將 RC 橋梁各主要建材於生命週期中的 CO₂ 排放量作解析，茲再整理成表 4.1-8。

表 4.1-8 橋梁主要建材於生命週期中之 CO₂ 排放量表

主要建材	單位	各階段之CO ₂ 排放量(kg)						備註
		生產	運輸	建造	使用	拆除	小計	
鋼筋及鐵件	Kg	0.84	0.0030	0.0044	0	0.0026	0.85	回收併入生產階段
木模板	M ²	0.13	0.0081	0.0007	0	0	0.1388	
鋼模板	M ²	0.02	0.0005	0.0001	0	0	0.0206	
210 kgf/cm ² 混凝土	M ³	143.58	0.0007	0.7467	0	7.2	151.52	
350 kgf/cm ² 混凝土	M ³	192.73	0.0007	1.0022	0	7.2	200.93	
瀝青混凝土	M ³	238.82	0.0008	1.2419	2164.7	7.2	2411.9	以5cm計

資料來源：本計畫團隊整理

除了瀝青混凝土外，其餘建材在生產階段所產生的 CO₂ 最多，瀝青混凝土在使用階段會多是因為刨除重鋪的原因。而混凝土 CO₂ 排放量又比鋼筋及模板高，由此可見預拌混凝土及瀝青混凝土在整個生命週期中所站的碳排比重，因此若能以綠色材料取代水泥，有效的降低混凝土的二氧化碳排放量，則在整體結構耗能應有良好之成效。

4.2 綠色材料結構穩定性

混凝土體積穩定性主要受到乾縮(Shrinkage)與潛變(Creep)影響，混凝土內會產生乾縮的部份為水泥漿體，因為水泥漿體內有大量的水份，水份蒸發就形成乾縮龜裂。至於粒料本身之乾縮有限，對混凝土之乾縮性無多大影響。因此混凝土之乾縮變化主要來自水泥漿體，水泥漿體量多時混凝土較易龜裂。而預力混凝土結構體因受預力鋼線之長期收縮壓力，日久有發生梁的長度漸漸縮短之現象謂之潛變，此潛變現象會影響預力效果，潛變愈大預力效果愈差，故對預力混凝土而言，潛變愈小愈好。混凝土內粒料受力產生相對變位是潛變的主因，而粒料產生變位之大小又與粒料間之水泥漿體厚度有關，漿體愈厚則粒料間愈容易剪動。另混凝土於拌和後乃至澆築及固化之過程，隨著水泥的水化反應，混凝土構造體的溫度亦不斷地改變，由室溫升溫至最高溫度與由最高溫度冷卻到最終穩定溫度時，若混凝土內部及外部溫度差異過大時，混凝土就可能因內部引起過大的溫度應力而產生早齡期溫差裂縫。因此不論乾縮與潛變或裂縫，均與混凝土之水泥用量有關。

爰此，高爐石粉及飛灰係取代水泥作為混凝土膠結材料，相對其產生之漿體應會直接影響到混凝土體積的穩定性。以下茲以混凝土的乾縮潛變及水合熱因素分別探討。

一、乾縮潛變分析

(一)台北捷運工程松山線新建工程

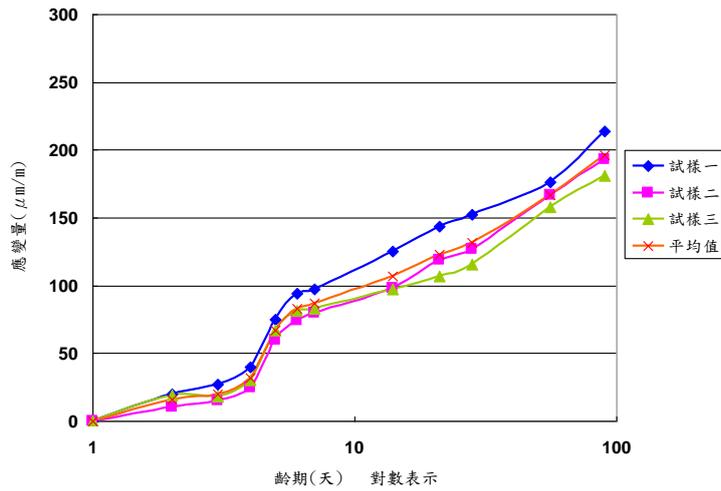
因為乾縮潛變所引起的體積穩定性對混凝土構造物之施工精度會有甚大影響，而自充填混凝土含有高量的高爐石粉及飛灰，故台北捷運局於規範中要求施工廠商應對量測自充填混凝土的 90 天乾燥收縮量(濕度 50%)、自體收縮量、潛變收縮量。

依營建院協助預拌廠商辦理的乾縮潛變試驗結果[99]，某預拌廠的自充填混凝土配比如表 4.2-1，拌製完成後經 90 天零期的量測結果，自體收縮結果如圖 4.2-1，乾燥收縮試驗(23°C，R.H.50%)結果如圖 4.2-2，潛變試驗(23°C，R.H.50%)結果如圖 4.2-3。

表 4.2-1 SCC 配比表(kg/m³)

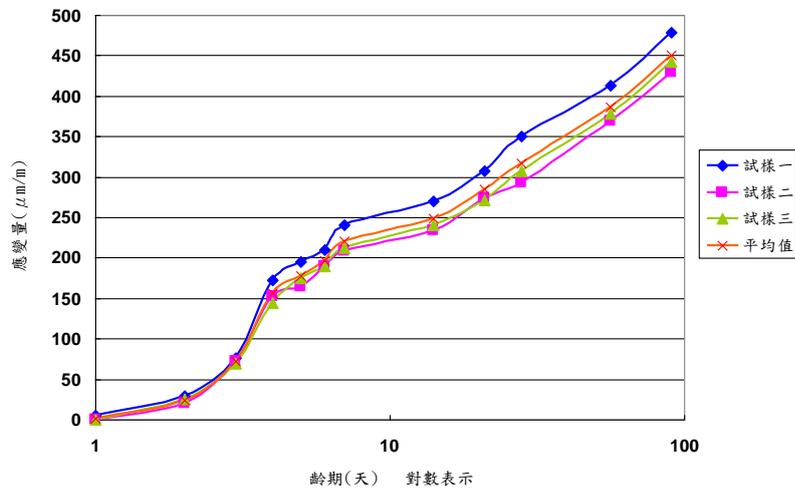
設計強度	水膠比	水	水泥	爐石	飛灰	粗骨材	細骨材	強塑劑
280	0.39	170	190	150	110	810	902	6.6

資料來源：台灣營建研究院〔高性能混凝土潛變乾縮性質試驗報告〕[99]



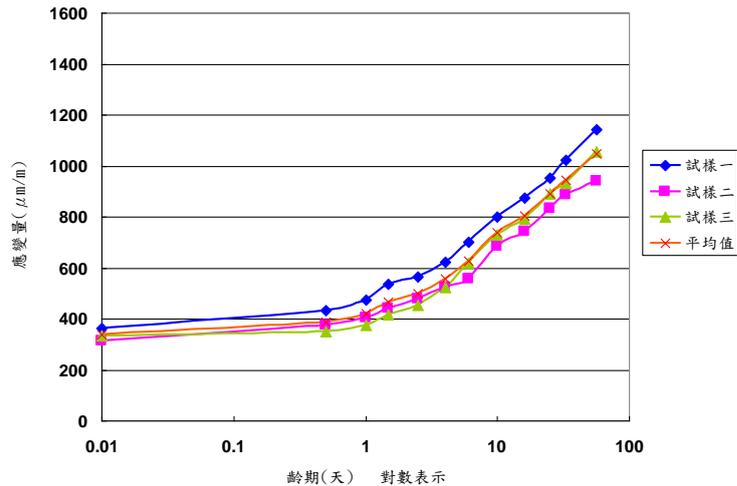
資料來源：台灣營建研究院〔高性能混凝土潛變乾縮性質試驗報告〕[99]

圖 4.2-1 SCC 自體收縮發展趨勢



資料來源：台灣營建研究院〔高性能混凝土潛變乾縮性質試驗報告〕[99]

圖 4.2-2 SCC 乾燥收縮 (23°C, R.H.50%)發展趨勢



資料來源：台灣營建研究院〔高性能混凝土潛變乾縮性質試驗報告〕[99]

圖 4.2-3 SCC 潛變 (23°C, R.H.50%) 發展趨勢

期間營建院協助多家預拌廠辦理自充填混凝土的乾縮潛變試驗，各廠的試驗結果如表 4.2-2。水膠比皆約在 0.39~0.42 之間，28 天抗壓強度接近，高爐石粉飛灰取代比例從 48% 至 60%，惟可發現乾縮及潛變量與高爐石粉飛灰之取代比例並無太大關聯，本計畫亦將乾縮潛變納入試驗項目，以作為未來規範應就不同類型之混凝土材料提供不同之體積變化設計值，獲得更佳之施工精度。

表 4.2-2 高爐灰摻量混凝土之乾縮應變之影響

廠別	水膠比	水泥 (kg/m ³)	高爐石粉 (kg/m ³)	飛灰 (kg/m ³)	水 (kg/m ³)	粗粒料 (kg/m ³)	細粒料 (kg/m ³)	藥劑 (kg/m ³)	乾燥收縮 (μm/m)	自體收縮 (μm/m)	潛變收縮 (μm/m)
A 廠	0.39	190	150	110	170	810	802	10.6	450	196	1136
B 廠	0.4	220	120	100	170	832	264	6.16	581	107	1026
C 廠	0.4	225	135	90	173	821	875	5.4	477	152	1291
D 廠	0.42	215	129	86	177	802	877	5.07	512	142	1185
E 廠	0.41	180	160	110	180	790	880	6.5	478	157	1169

資料來源：台灣營建研究院〔高性能混凝土潛變乾縮性質試驗報告〕彙整[99]

(二)國工局二高烏日橋

根據交通部台灣區國道新建工程局辦理二高烏日橋工程含高爐石粉飛灰之配比分析，其混凝土之乾縮除會影響預力損失外，對結構系統產生之變位變形亦將對構件造成額外之應力。經搜集目前國內之試驗數據顯示，高性能

混凝土之乾縮情況較一般混凝土為高。本文分別假設當高性能混凝土之乾縮應變量為一般混凝土乾縮應變量之 1.26、1.46、1.8、2.46 倍時，對橋梁構件之影響，結果如表 4.2-3 所列。分析結果當乾縮應變量增加為 2.46 倍時，梁中央點之拉應力增加為 1.7 倍，梁中央點位移增加為 1.5 倍。

潛變影響部分，依據目前所搜集到日本對於高性能混凝土有關潛變係數之試驗資料顯示，其潛變係數與 ACI 建議一般混凝土之潛變係數數值差不多，由此可判斷高性能混凝土潛變對橋梁結構之影響，與一般混凝土差不多，甚至影響更小。

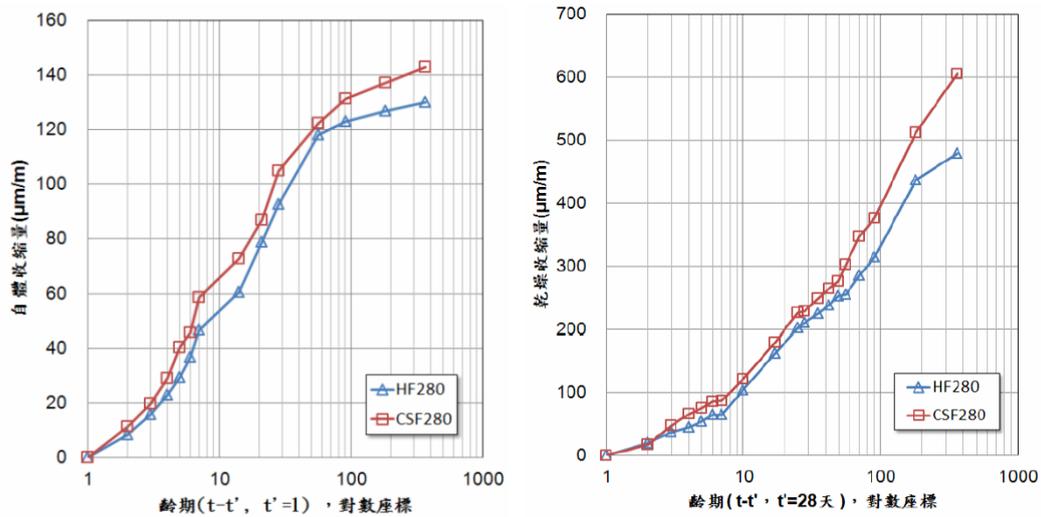
表 4.2-3 混凝土之乾縮應變之影響

量測點	(乾縮應變量)/(設計乾縮應變量)				
	1.00	1.26	1.46	1.80	2.46
梁中央點拉應力(kgf/cm ²)	-8.21	-9.26	-10.11	-11.51	-14.20
梁中央點位移(cm)	1.63	1.76	1.88	2.06	2.41

資料來源：本計畫團隊整理

(三)高飛灰摻量混凝土

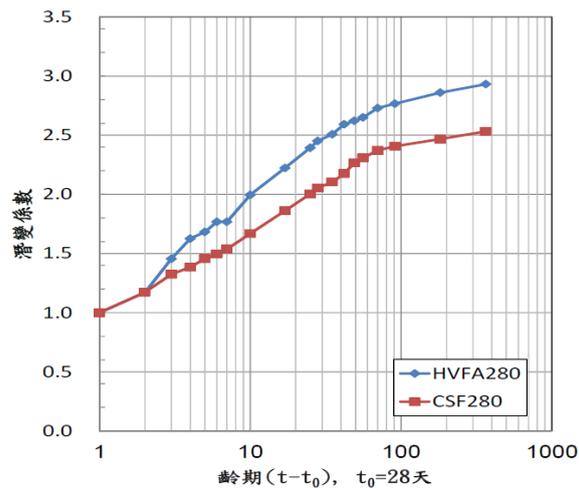
以高飛灰摻量混凝土收縮行為來看(圖 4.2-4)，其 1 年齡期之自體收縮量為 130 $\mu\text{m}/\text{m}$ 與添加 10% 飛灰配比之自體收縮量約略相同；1 年齡期之乾燥收縮量為 479 $\mu\text{m}/\text{m}$ ，與國外相關文獻中提出之 500 $\mu\text{m}/\text{m}$ 差異不大，但較添加 10% 飛灰配比之乾燥收縮量為低，其原因可歸於高飛灰摻量混凝土配比之水膠比較高，另外添加 10% 飛灰配比中同時有使用高爐石粉，而高爐石粉對於混凝土乾燥收縮之行為有略為增加之趨勢。另如圖 4.2-5 所示，高飛灰摻量混凝土之 1 年齡期的潛變高於普通混凝土，其原因為高飛灰摻量混凝土之強度發展較為緩慢，因此在預力施載時，其混凝土微結構尚未完全發展，故潛變量較一般混凝土為大，此現象與一般混凝土在不同齡期施加預力所獲得之結果相似，但高摻量飛灰混凝土較大潛變之行為則有利於巨積混凝土之應用，以減少溫差造成之拉應力及溫度裂縫。



資料來源：中興工程顧問社〔HVFA 高灰摻量計畫〕[69]

(1)自體收縮量變化 (2)乾燥收縮量變化

圖 4.2-4 飛灰摻量混凝土收縮行為

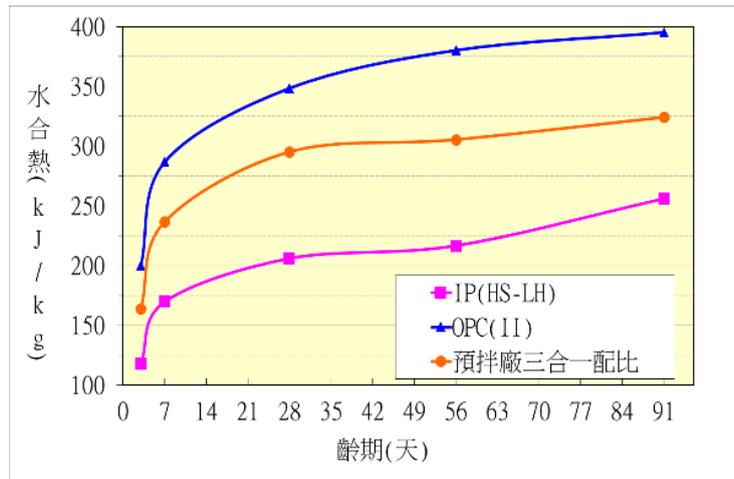


資料來源：中興工程顧問股份有限公司〔HVFA 高灰摻量計畫〕[69]

圖 4.2-5 飛灰摻量混凝土潛變行為

二、水合熱分析

除此之外，材料之水合熱反應亦為另一項混凝土材料穩定的控制關鍵，以使用於巨積構造物為案例分析，比較包括添加飛灰與高爐石粉、混合水泥與二型水泥等三種可能的膠結材料種類，將可以觀察出使用混合水泥，是最可有效降低與減緩水合熱反應，三合一則次之。另以高雄捷運工程為例，現地量測一週高爐水泥混凝土的水合熱反應如圖 4.2-6 所示。



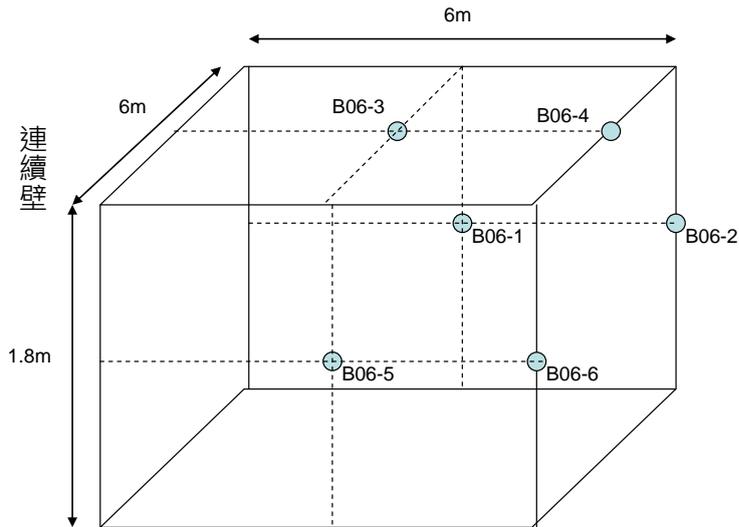
資料來源：中聯資源股份有限公司品管處報告【20】

圖 4.2-6 飛灰與高爐石粉材料水合熱反應分析

三、混凝土溫度發展分析

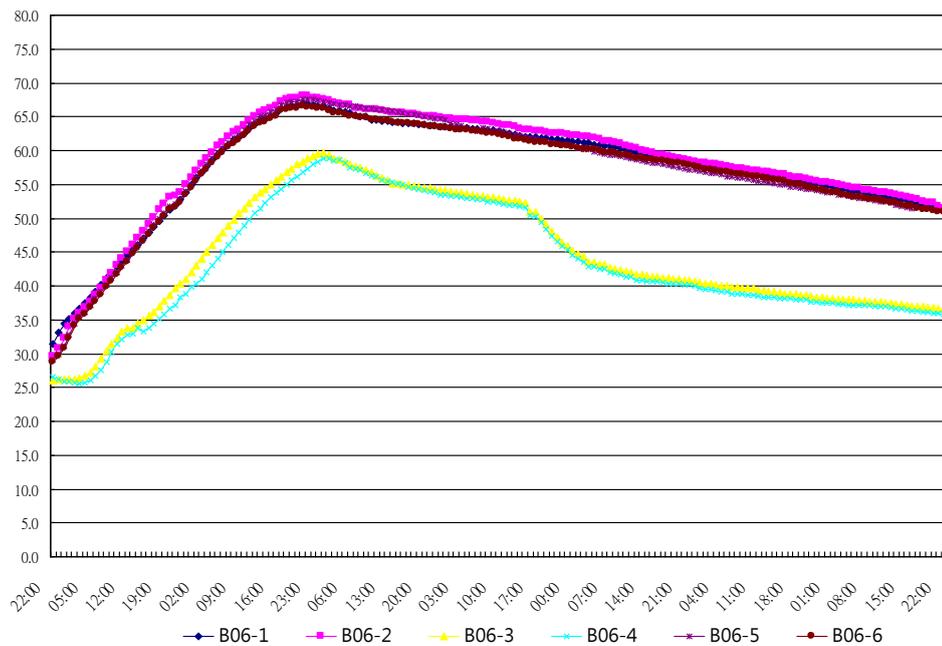
混凝土受水合熱的影響，內部體積會不斷膨脹，但表面混凝土因水合熱易散發而產生收縮，尺寸愈大，影響愈明顯，依工程會第 03700 章巨積混凝土施工綱要規範，澆置混凝土中心溫度不得超過 70°C，心表溫差不得超過 20°C，若依台北市政府捷運局第 03054 章水泥混凝土構造物施工規範，則求澆置混凝土中心最大溫度不得超過 80°C，表心溫不超過 20°C。而台電林口電廠新建工程施工規範中，規定混凝土溫度不得超過 75°C，若中心超過 75°C，則應提送資料至監造單位檢討配比。另規定混凝土中心及表面溫度相差不能超過 20°C，若超越此溫度差產生之應力將超過混凝土之開裂應用而產生裂縫，因此必須以適當之保溫措施，如保溫毯、或蒸汽養護等防止混凝土開裂。

依營建院協助台北捷運工程辦理自充填混凝土，膠結材料設計用量為 450 kg，其中水泥用量 225 kg、高爐石粉用量 135 kg、飛灰用量 90 kg，現場基礎混凝土各溫度量測點如圖 4.2-7，量測結果如圖 4.2-8。最高溫為 68.1°C，最高溫差為 19.5°C。[100]



資料來源：台灣營建研究院「SCC巨積混凝土表心溫試驗報告」[100]

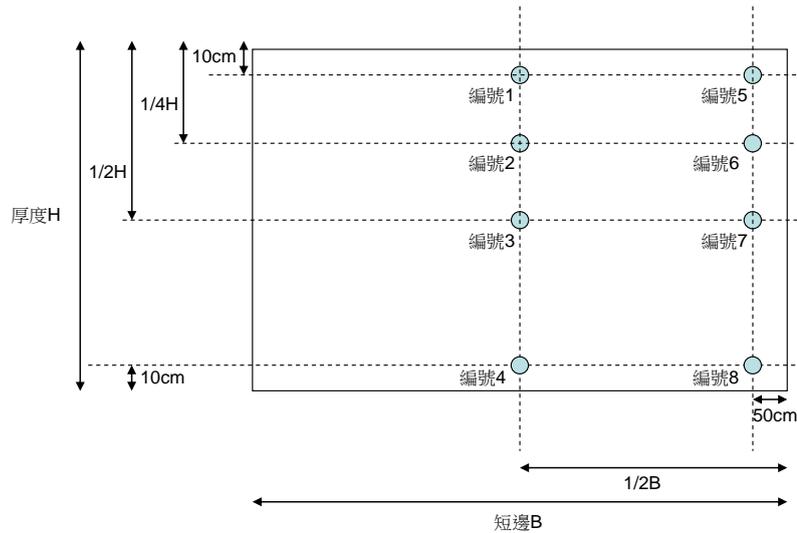
圖 4.2-7 機場捷運 CA450A 標基礎混凝土溫度量測點



資料來源：台灣營建研究院「SCC巨積混凝土表心溫試驗報告」[100]

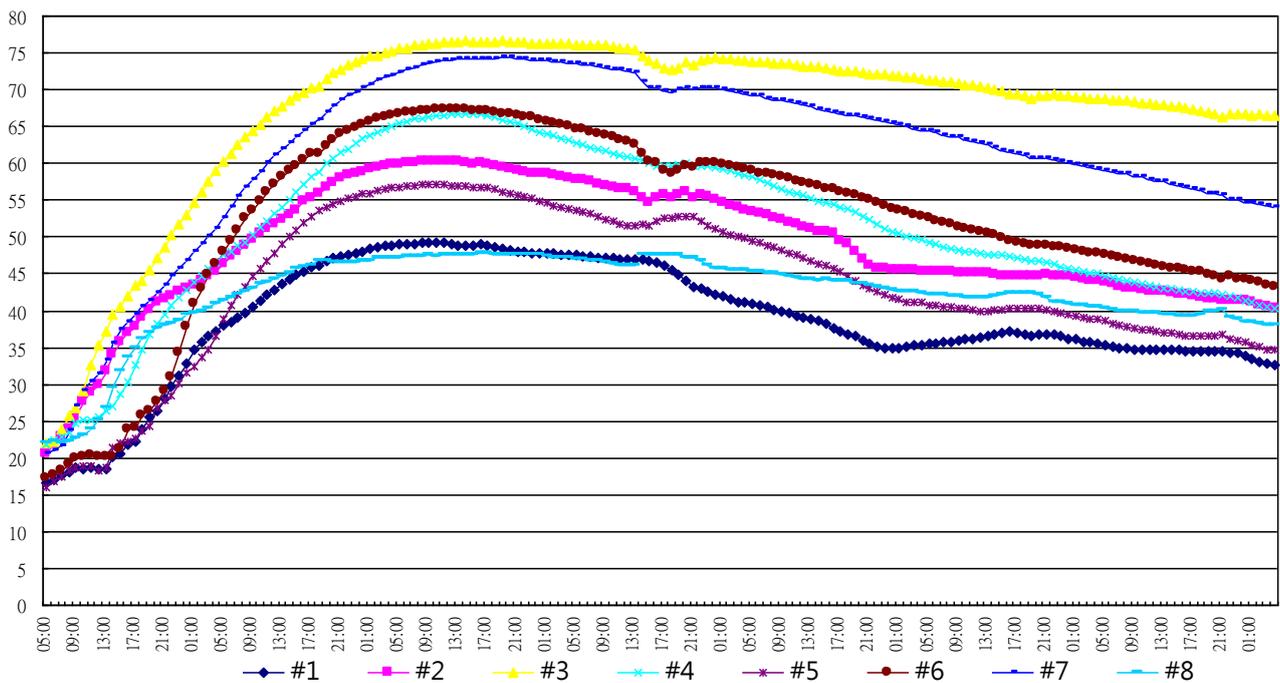
圖 4.2-8 機場捷運 CA450A 標基礎混凝土溫度發展曲線

另依營建院辦理台電林口電廠一號機鍋爐房基礎混凝土溫度量測結果 [101]，量測點如圖 4.2-9，混凝土配比採用 II 型水泥，膠結材料用量為 313 kg，其中水泥用量 259 kg，飛灰用量 54 kg，量測結果如圖 4.2-10，最高溫為 76.6°C，最高表面溫差為 23.8°C。



資料來源：台灣營建研究院「林口電廠巨積混凝土表心溫監測試驗報告」[101]

圖 4.2-9 台電林口電廠鍋爐房基礎混凝土表心溫各組溫度埋設點

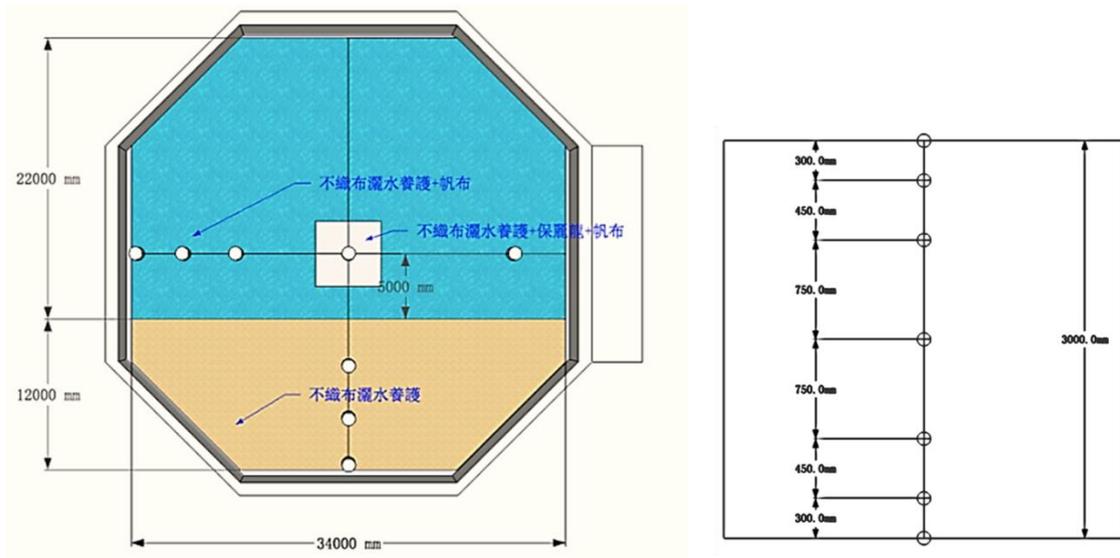


資料來源：台灣營建研究院「林口電廠巨積混凝土表心溫監測試驗報告」[101]

圖 4.2-10 台電林口電廠鍋爐房基礎混凝土表心溫各組溫度發展曲線

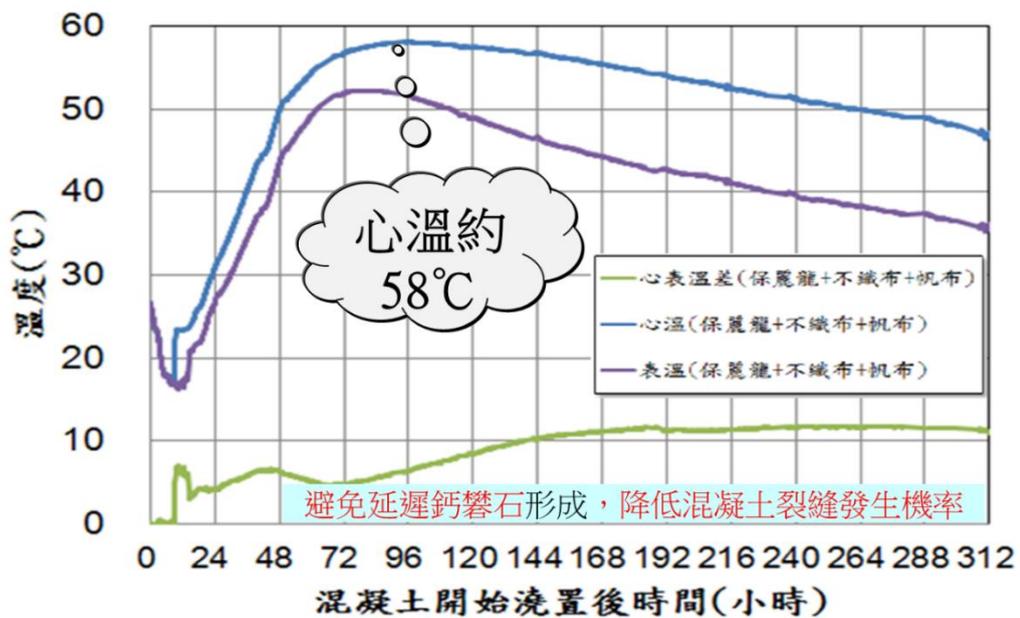
營建院協助中聯資源台北港筒槽大底基礎厚度 3 米之混凝土工程，膠結材料設計使用 IP(HS-LH)型，用量為 382 kg，現場基礎混凝土各溫度量測點如圖 4.2-11，量測結果如圖 4.2-12。最高溫 58.0°C，最高溫差 12.0°C。[110]

綜合所述，使用混合水泥或添加高爐石粉及飛灰皆有助於降低混凝土的溫度，避免心表溫差過大，降低開裂之風險，尤其混合水泥的表現更佳。



資料來源：台灣營建研究院「混合水泥應用於巨積混凝土研討會」[110]

圖 4.2-11 中聯資源台北港筒槽大底基礎混凝土表心溫各組溫度埋設點



資料來源：台灣營建研究院「混合水泥應用於巨積混凝土研討會」[110]

圖 4.2-12 中聯資源台北港筒槽大底基礎混凝土各組溫度發展曲線

4.3 綠色材料節能減碳評估

4.3.1 建材節能減碳係數探討

由前述可知建材為工程整體生命週期中二氧化碳占有最大比例，採用添加高爐石粉飛灰的混凝土與純水泥的混凝土在工廠生產耗能階段、產品運輸階段、現場施工階段、使用階段及廢棄回收階段並無太大差異，因此本研究重點在於混凝土本身的原料組成階段。

依吳國洋、林志棟於「混凝土製品應用於土木工程之減碳效益評估-以道路、建築工程為例」[102]研究中，針對混凝土各項原料之碳排放係數研究如下。

一、粒料

對於混凝土製品而言，其最大宗的成分比例為粒料，經整理國外蒐集之數據如表 4.3.1-1，由所蒐集之國外計算數據粒料之碳排放係數範圍為 $1 \text{ CO}_2\text{-e kg/T} \sim 7 \text{ CO}_2\text{-e g/T}$ 。

而由國內粒料廠商開採部分主要從河川開採完整施作流程下做統計，包含水保施工、測量畫地、表土清除、開挖、載運、過磅秤重、出料等，統計主要開採機具等所消耗之能源及其所開挖獲得之材料產量。原料開採完成後加工處理階段包含砂石運輸、進料、篩選、破碎、洗選、出料和堆置等步驟，同樣以調查加工機具所消耗之能源及其加工後之材料產量。

表 4.3.1-1 粒料之材料碳排放係數整理

材料名稱	單位	CO ₂ 排放量(kg)	國別
粒料	M ³	3.11	台灣
Aggregate(粒料)	T	5.2	UK
Sand(砂礫)	T	4.8	UK
Generic crushed rock (碎石)	T	4.32	UK
Coarse aggregate	T	5.10	Korea
Fine aggregate	T	1.60	Korea
砂礫	T	1.03	Japan
碎石	T	1.17	Japan

資料來源：「混凝土製品應用於土木工程之減碳效益評估-以道路、建築工程為例」[102]

砂石場內能源消耗主要為電力及柴油，經算得每月總排放量除以每月產量後，經廠商訪查結果求得砂石原料開採階段耗能約在 0.4 ~0.5 CO₂-e kg/m³ 之間，經過加權平均和單位轉換求得國內廠商於砂石原料開採耗能單位排碳量為 0.218 CO₂-e kg/T，砂石原料加工單位碳排放量為 1.800 CO₂-e kg/T，總計砂石成品單位碳排放量為 2.02 CO₂-e kg/T。

二、水泥

水泥業本身生產至承包含原料採掘、生料研磨、熟料燒成和水泥研磨，其中在原料開採過程中分成開採、碎石、輸送作業，開採作業其中有鑽孔、炸藥填裝、爆破、鏟運；碎石作業中含有粗碎、次碎兩階段；而輸送作業分為直井、隧道、高架進而到入廠石灰石倉。而各種原料經過嚴模使其具有特定細度、成份適當且均勻的粉料為生料，其過程佔工廠總用量比例 20%。其後在水泥燒成過程為溫室氣體排放的最大宗。而進到水泥研磨階段佔工廠總用電比例的 40%。

對於水泥產業而言，由於各類水泥產品成分比例不同，進而其製程上有一定程度之差異，故對於水泥本身碳排放係數有相對之影響，故產品類別規則對於水泥只限於至熟料燒成，各國對於熟料之盤查結果大致趨於相似，故以熟料作為重點之設定可為一盤查準則如表 4.3.1-2。

表 4.3.1-2 水泥生產主要排放源

排放源		說明	比例%
主要	熟料燒成製程	原料鍛燒 燃燒煤炭	94.49%
次要	各製程設備	外購電力之間接 CO ₂ 排放	5.0%
微量	自用發電設備 運輸機具 推煤廠	使用重油、柴油及汽油 產生之 CO ₂ CH ₄ 之逸散	0.5%
可忽略	其餘設備	-	0.01%

資料來源：「混凝土製品應用於土木工程之減碳效益評估-以道路、建築工程為例」[102]

水泥產品因其成分比例及生產製程後段差異，導致於其溫室氣體排放量變異較大，由於水泥產品本身有超過一半的溫室氣體排放來自於水泥熟料之生產，各國水泥碳排放係數範圍從 650~930 kg CO₂-e/T，平均大概為 810 kg CO₂-e/T，國內經濟部能委會則是以碳排放量 880 CO₂-e kg/T 作為基準。

三、飛灰

由於燃煤飛灰屬於火力發電廠運作之副產物其為卜作嵐材料。燃煤飛灰本身並無須藉由消耗能源而生產。以經濟部能委會「能源查核管理輔導計畫」中提及，由於飛灰在其生產過程中不需經過加工則可直接利用，故其材料生產之碳排放量為零，而國外所蒐集之碳排放量亦接近零，故於本研究之計算過程中，燃煤飛灰的原料生產碳排放量為零。

四、高爐石粉

目前國內所使用之高爐石粉皆為由水淬爐石研磨而成，由中聯資源股份有限公司所提供。水淬爐石為煉鋼廠於煉鐵過程中所生產之副產品，其餘材料生產過程本應不需要消耗能量，但由於該材料於使用之前須經過研磨加工至一定的粒徑大小以便於使用，故須計算該水淬爐石研磨過程之耗能。

單獨針對以高爐石粉單位量取代水泥之情況，其生產耗能及排碳量差異計算如表 4.3.1-3 所示，每噸之碳排放量差異為 827.8 kg CO₂-e。二氧化碳排放量上所造成的差異主要是由於原料本身，相較之下高爐石粉僅需消耗研磨過程之能量，水泥之碳排放量則高出許多，故若使用高爐石粉做為卜作嵐材料能有效地降低二氧化碳排放量。而其碳排放係數將以國內生產最大宗代表廠商中聯資源股份有限公司做為計算依據，求得碳排放係數為 68.3 kg CO₂-e/T。

表 4.3.1-3 單位高爐石粉取代水泥二氧化碳排放量比較

產品	石灰石	燃煤	電力(度)	CO ₂ 排放量(kg)
高爐石粉	0	14	70	52.2
水泥	1200	110	110	880
差異	-1200	-96	-40	-827.8

資料來源：中聯資源股份有限公司

五、混合水泥

依 CNS 15286 之定義，水硬性混合水泥係採用高爐爐渣或卜作嵐材料或以上兩者，與卜特蘭水泥或卜特蘭水泥熟料製成，或與高爐爐渣與石灰製成。目前國內所使用之混合水泥多由中聯資源股份有限公司所生產，生產型



號高爐水泥 IS(<70)、IS(<70)(MS)型為主，主要為中度抗硫酸鹽特性，卜作嵐水泥則以 IP(HS-LH)為主，屬低水合熱特性。依中聯公司委託 BSI 公司所作的產品碳足跡查證，高爐水泥 IS(<70)(MS)型的 CO₂ 排放量為 512 kg CO₂-e/T、卜作嵐水泥 IP (HS-LH)的 CO₂ 排放量為 310 kg CO₂-e/T，較水泥低上許多。原因係混合水泥屬功能性用途，為達到 CNS 所規定的抗硫酸鹽性質或水合熱性質，必須添加一定量的高爐石粉及飛灰，故在節能減碳上混合水泥具有良好之成效。

六、電弧爐氧化矽

電弧爐氧化矽屬可再利用之事業廢棄物，產品本身無需消耗能量，但因使用於混凝土中取代細粒料，估需經破碎篩分析達規範要求粒徑，此加工設備與一般砂石場相似。

小結

依生命週期的概念，混凝土依原料應各階段(含生產及運輸)來看，每使用 1 噸水泥、高爐石粉、飛灰，其二氧化碳排放量分別為 880 Kg、68.3 Kg、0.0 Kg，若添加 50% 飛灰的高飛灰摻量來看，每立方混凝土可減少 98 Kg 的碳排放量，相對一般水泥混凝土減少 34.5% 的碳排放；若添加 45% 高爐石粉的高爐水泥來看，每立方少 40 Kg 碳排放量，倘若能以高爐石粉及飛灰取代 50% 水泥(高爐石粉 35%、飛灰 15%)，則混凝土的二氧化碳排放僅剩原來的 54%，減量幾可達將近一半(減量 46%)，若以混合水泥來看，IS(<70)(MS)型二氧化碳排放量僅 512 kg，僅原來純水泥的 58%，若是 IP (HS-LH)型二氧化碳排放量更僅 310 kg，為原來水泥的 35%，減碳效果更明顯。上述皆可說明高比例添加高爐石粉及飛灰等綠色材料，可有效從源頭達成節能減碳的效益。對此，本計畫將針對飛灰與高爐石粉取代水泥不同比例以及混合水泥部分，進行消耗及二氧化碳排放量估算，以評估其材料組成之節能減碳效益。

4.3.2 節能減碳之國外工程實績探討

使用高飛灰摻量之混凝土相較於傳統混凝土有顯著的節能減碳效益，以加拿大多倫多安大略省的約克大學計算機科學大樓為例[107]，如圖 4.3.2-1 所示，設計上考量了幾個重點，建築節能、自然採光、減少資源消耗、減少污染物排放、使用再生材料等等，其中混凝土為滿足再生材料的使用目標，採用高飛灰量混凝土，以飛灰取代水泥 50% 設計混凝土配比如表 4.3.2-1 所示，該建築中之柱、牆及基礎版採用 30 MPa 的高飛灰量混凝土，樓版則採用 25 MPa 的高飛灰量混凝土，最大水膠比為 0.45。30 MPa 之高飛灰量混凝土與傳統混凝土強度發展如圖 4.3.2-2 所示，高飛灰量混凝土 28 天強度已優於傳統混凝土。



圖 4.3.2-1 約克大學計算機科學大樓【107】

表 4.3.2-1 約克大學計算機科學大樓高飛灰量混凝土配比【107】

	Typical mix	Job mixes	
	30MPa (4350 psi)	25 MPa (3625 psi)	30 MPa (4350 psi)
Cement (Type I/Type 10)	380 (640)	150 (253)	170 (287)
Fly ash	0	150 (253)	170 (287)
Stone	1130 (1905)	1150 (1938)	1110 (1871)
Sand	716 (1207)	850 (1433)	800 (1348)
Water	171 (288)	135 (228)	135 (228)
w/cm	0.45	0.45	0.40

(Hopkins 2001)

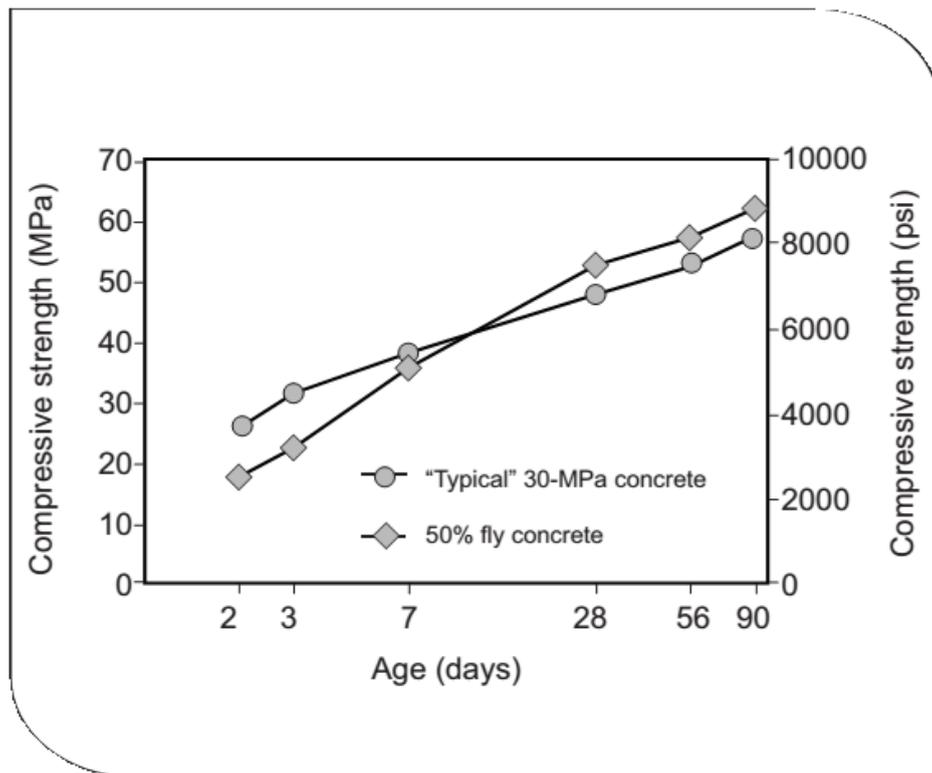


圖 4.3.2-2 約克大學計算機科學大樓高飛灰量混凝土與傳統混凝土強度發展【107】

混凝土原料中，每公噸水泥的二氧化碳排放量為 880 kg、高爐石粉為 68.3 kg、飛灰為 0.0 kg，以約克大學計算機科學大樓為例，其混凝土由傳統混凝土改為高飛灰量混凝土，每立方混凝土膠結料產生的 CO₂ 由 334.4 kg/m³，減少為 149.6 kg/m³，每一立方混凝土減少 184.8 kg 的 CO₂ 排放量如表 4.3.2-2。

表 4.3.2-2 約克大學計算機科學大樓高飛灰量混凝土 CO₂ 減排量【107】

混凝土類型與強度	水泥 (kg/m ³)	飛灰 (kg/m ³)	碳排放量 (kg/m ³)	碳減量 (kg/m ³)
傳統混凝土-280 kgf/cm ²	380	0	334.4	
高飛灰量混凝土-280 kgf/cm ²	170	170	149.6	184.8

1999 年至 2001 年間溫哥華於御景灣的 30 樓高層公寓大樓新建工程中如圖 4.3.2-3[108]，依不同結構部位之季節需求，使用不同飛灰添加量的混凝土，如表 4.3.2-3 所示。讓工程依不同的結構部位使用不同飛灰添加量的混凝土，其中以大樓之基礎結構使用的混凝土飛灰添用量最高達 45%，依此建築大樓使用的混凝土配比與傳統混凝土相比，仍有可觀的 CO₂ 減排量。此工程使用的飛灰較以往平均值高 13%。



圖 4.3.2-3 溫哥華御景灣高層公寓大樓[108]

表 4.3.2-3 溫哥華御景灣高層公寓大樓混凝土配比[108]

Table 11. Concrete Requirements and Fly Ash Levels Used in the Bayview High-Rise Apartment

Element	Min. 28-day strength, MPa (psi)	Fly ash content (%)	w/cm
Parking slabs and slab bands	35 (5000)	33	0.40
Slab on grade—interior parking	25 (3600)	20	0.50
Slab on grade - exterior	32 (4600)	20	0.45
Core footing	30 (4350)	45	0.50
Other footings	25 (3600)	45	0.50
Shear walls and columns			
<i>Foundation to 8th floor</i>	40 (5800)	33	0.45
<i>8th to 12th floor</i>	35 (5000)	33	0.45
<i>12th to 16th floor</i>	30 (4350)	33	0.45
<i>16th floor to roof and other walls</i>	25 (3600)	33	0.45
Tower slabs	25 (3600)	15 to 25	
Toppings and housekeeping pads	20 (2900)	45	

(Busby and Associates 2004)

使用高爐石粉摻量之混凝土相較於傳統混凝土有顯著的節能減碳效益，以日本明石海峽大橋(總長 3,920m，中央跨之長度 1,990m)是目前世界上最長之吊橋為例。該橋下部結構使用 142 萬 m³ 混凝土，使用較高之高爐石粉替代率(80%)，解決了水合熱問題，也提高了混凝土之流動性，便於施工；而明石大橋頂版工程亦為高爐石粉替代率配比(83%)，詳如表 4.3.2-4。該工程使用高爐石粉替代率配比(83%)，每立方混凝土的碳排放量與傳混凝土相比，減少 175 kg/m³，除了有利於該工程的施工及防裂外，對節能減碳亦有助益。

表 4.3.2-4 日本明石海峽大橋頂版工程混凝土 CO₂ 減排量

混凝土類型與強度	水泥 (kg/m ³)	高爐石粉 (kg/m ³)	碳排放量 (kg/m ³)	碳減量 (kg/m ³)
傳統混凝土-240 kgf/cm ²	260	0	228.8	-
高爐石粉替代量 混凝土-240 kgf/cm ²	44.2	215.8	53.8	175

資料來源：本計畫團隊整理

4.4 能耗與穩定性小結

- 一、橋梁的生命週期包含原料開發階段、建材製造階段、施工建造階段、日常使用階段、拆除階段、廢棄物處理階段，經評估結果仍以建材在生產階段所產生的 CO₂ 最多，尤其是預拌混凝土及瀝青混凝土，此若能以綠色材料取代水泥，有效的降低混凝土的二氧化碳排放量，則在整體結構耗能應有良好之成效。
- 二、橋梁結構的穩定性與混凝土乾縮潛變有關，配比中的用水量、粗粒料用量及現場環境為影響混凝土體積變化之重要因素。依過往試驗結果，高膠結材料的混凝土會較低膠結材料為高，由於添加高量的高爐石粉飛灰國內上未建立完整的混凝土乾縮潛變數據，本計畫亦將乾縮潛變納入試驗項目，以作為未來規範應就不同類型之混凝土材料提供不同之體積變化設計值，獲得更佳之施工精度。
- 三、混凝土受水合熱的影響，內部體積會不斷膨脹，但表面混凝土因水化熱易散發而產生收縮，尺寸愈大，影響愈明顯，目前工程會第 03700 章巨積混凝土的施工規範要求澆置混凝土中心最大溫度不得超過 70°C，中心及表面溫度相差不能超過 20°C，使用混合水泥或添加高爐石粉飛灰有助於降低混凝土溫度發展(混合水泥效果最佳)，維持體積穩定性。
- 四、彙整混凝土各原料之碳排放係數，每公噸水泥的二氧化碳排放量為 880 kg、高爐石粉為 68.3 kg、飛灰為 0.0 kg、砂石粒料為 2.02 kg、IS(<70)(MS)型混合水泥為 512 kg、IP (HS-LH)型混合水泥為 310 kg、電弧爐氧化渣細粒料為 1.8 kg，混凝土為工程中最大宗的材料，若能採用混合水泥或高爐石粉飛灰，其節能減碳效益相當可觀。

第五章 綠色材料作為道路橋梁材料之性質測試

綜整前述資料分析結果，以性能為導向綠色結構材料，適度添加一定比例之高爐石粉及飛灰，除有助於混凝土結構體降低環境侵蝕之外，對於碳減排亦有良好的效益，然隨配合材料性質及配比設計添加量的不同，會使混凝土結構體產生不一樣的行為，因此評估綠色材料應用於快速道路橋梁系統工程時結構之安全性及對應環境之適應性，是為未來推動使用須考量方向。本計畫擬依前項工作的調查與分析，以提出適於道路橋梁結構使用之綠色材料與組成，並透過材料與結構試驗，以及搭配組成材料成本計算，以進行所設定選用的材料安全與經濟的評估。

本計畫推動理念秉持突顯計畫執行的績效展現，針對添加飛灰與高爐石粉取代水泥的應用，參考美國 ACI 318-14 表 26.4.2.2(b)規定「建議飛灰及水淬高爐爐渣粉混用取代水泥之上限訂為 50%」，進而別於目前國內僅以添加至總膠結材料重量 45% 門檻，以樹立國內首例突破 45% 限制的道路橋梁結構工程標竿。

5.1 綠色材料配比規劃

就材料面而言，使用高爐石粉及飛灰於快速道路橋梁結構時，相較一般水泥，除前期強度發展影響為安全考量因素外，混凝土之乾縮、潛變等亦會影響結構之穩定性。故本計畫為評析於選定添加比例之適用性，參考目前工程常用設計強度包含 210 kgf/cm²、280 kgf/cm²、350 kgf/cm²、350(SCC) kgf/cm² 與 420(早強) kgf/cm²，試驗變數包含不同高爐石粉飛灰取代量、不同類型水泥及驗證型綠色材料導入，說明如下。

一、高爐石粉飛灰取代量規劃

本研究以純水泥(不含高爐石粉飛灰)配比為對照組，設計工程常用的所用爐石 25% 及飛灰 10% 作為第一試驗組，為突顯綠色材料之效益，參考美國 ACI 318 結構混凝土設計規範及工程會施工綱要規範第 03050 章中對高爐石粉及飛灰之添加比例上限，本團隊以爐石飛灰取代水泥 50%(高爐石粉 35%、飛灰 15%) 作為第二試驗組。

二、混合水泥規劃

混合水泥因添加卜作嵐材料，改善了混凝土的性能，不僅具有添加高爐石粉飛灰的優點，而且因為是在水泥廠內先混拌，在以成品運置預拌廠使用，其優點包括：從原料進廠、生產到出貨，均由水泥廠分別取樣檢驗，品質穩定性較佳、生產過程的嚴格品管及拌合均勻性的提升、對色澤及工作性有正面的助益、生產過程有降溫效果、水泥到場溫度較低、對於鹼質反應性及抗硫酸鹽侵蝕性能，已有 CNS 標準供依循，符合國際間以性能為導向的趨勢，例如有耐久性需求的工程可採用 MS 型混合水泥，有高硫酸鹽侵蝕風險的可採用 HS 型，要應用於巨積混凝土有低水合熱需求的則可採用 LH 型，無需再以配比設計方式來達到工程需求，具推廣之效益。

考量業主機關主辦工程以臨海道路及橋梁為主，有抗硫酸鹽及當水合熱等耐久性需求，因此本團隊採用混合水泥 IS(<70)(MS)型(高爐石水泥)及 IP (HS-LH)型(卜作嵐水泥)作為第三試驗組、第四試驗組，同時進行各項材料性質試驗。

三、驗證型綠色材料規劃

電弧爐氧化渣則具有耐磨、比重大、質地堅硬的特點，在安定化後適合用於基礎、基樁，增加橋梁的穩定性，有助於資源環保再利用，且一年產出量高達 140 萬噸，具有發展潛力，亦是綠色材料之代表，本團隊特選擇驗證型材料「電弧爐氧化渣」作為第五試驗組將適度的規劃合適的混凝土材料試驗。

惟本計畫執行期間，原「經濟部事業廢棄物再利用管理辦法」(100.2.6)編號十四電弧爐渣(石)之再利用用途包含非結構性混凝土粒料原料，但於 105 年 6 月 20 日編號十四電弧爐渣(石)之再利用管理方式進行修訂，已刪除非結構性混凝土粒料原料。故電弧爐氧化渣之使用仍需符合法令規定。



四、飛灰取代細粒料規劃

有鑑於飛灰較高爐石粉材料單價更低、碳排係數為零之優點，在追求更經濟更環保的配比設計下，在高爐石粉飛灰取代水泥 50% 的上限下，為提高飛灰用量，本計劃規劃以飛灰取代細粒料之混凝土試驗，取代量分別為細粒料的 5% 及 10%，試驗在不同設計強度下，對坍度及強度之影響，並與前項試驗結果作比較，以作為研究更環保混凝土材料之準備。

本團隊規劃之配比種類詳表 5.1-1 所示。規劃試驗項目如下，期透過實驗數據之分析結果，作為訂定指標性材料配比之參考依據。

表 5.1-1 橋樑各部位設計強度及比例設計

配比強度 (Kg/cm ²)	傳統 配比	部分工程標所 用配比 ^(註1)	施工綱要規範 03050 章上限	混合水泥	所用橋梁部位 ^(註2)
210	純水泥	高爐石粉 25% 飛灰 10%	高爐石粉 35% 飛灰 15%	IS(<70)(MS)、 IP (HS-LH)	重力式擋土牆
280	純水泥	高爐石粉 25% 飛灰 10%	高爐石粉 35% 飛灰 15%	IS(<70)(MS)、 IP(HS-LH)	分隔島、橋護 欄、緣石
350	純水泥	高爐石粉 25% 飛灰 10%	高爐石粉 35% 飛灰 15%	IS(<70)(MS)、 IP (HS-LH)	場鑄基樁、箱 涵、擋土牆
350 SCC(R2)	NA	高爐石粉 20% 飛灰 10%	高爐石粉 35% 飛灰 15%	IS(<70)(MS)、 IP (HS-LH)	橋墩、橋墩基 礎、橋台
420 (早強)	純水泥	純水泥	高爐石粉 35% 飛灰 15%	-	箱型梁橋

註 1：參考西濱快速公路 WH10-B 標 60K+312~64K+005 新建工程永協預拌廠所用混凝土配比中高爐石粉與飛灰的添加比例

註 2：參考淡江大橋及其連絡道路 2K+606~5+000、7K+000~8K+165 路段新建工程設計圖說中關於各橋梁部位之混凝土抗壓強度要求

註 3：飛灰取代細粒料之試驗係以高爐粉 35% 飛灰 15% 為基準，將飛灰取代 5% 及 10% 的細粒料進行混凝土坍度及強度試驗

5.2 試驗規劃

一、膠結材試驗

膠結材試驗包括水合熱試驗、熱壓膨脹試驗、初凝試驗及終凝試驗，據以判斷不同高爐石粉飛灰添加比例的材料性質。對照組為純水泥組，試驗組分為高爐石粉 25% 飛灰 10% 組(以下簡稱爐灰 25:10)、高爐石粉 35% 飛灰 15% 組(以下簡稱爐灰 35:15)、混合水泥 IS(<70)(MS)型組、混合水泥 IP (HS-LH) 組，依比例混拌後進行各項試驗。

(一)水合熱試驗

依據「CNS 2248 水泥水合熱試驗法」規定，配製水泥砂漿，並依熱容量測定方式，檢測試體養護 7 天、28 天試體之溶解熱變化量。

(二)熱壓膨脹試驗

依據「CNS 1258 卜特蘭水泥熱壓膨脹試驗法」規定，每組配比製作三根試體。試體為 25×25×285mm 之方柱形試體，模製後存放在濕室 24 小時，量其長度，爾後放入高壓蒸氣加熱，維持 3 小時後，立即將試體放入溫度 90℃ 以上水內，並以試體周圍之水溫之冷水進行降溫，使降至 23℃，維持 15 分鐘，擦乾後量其長度，將三個體試體之前後長度之差除以標距以百分比表示，而檢驗結果之平均值即為熱壓膨脹量。

(三)初凝試驗

依據「CNS 786 水硬性水泥凝結時間檢驗法」規定，在水泥加適量水拌合後，將直徑 1mm，重 300 克的貫入針置於試體表，當貫入針恰好在 30 秒內，貫入 25mm 深度，所經過的時間即為初凝時間。

(四)終凝試驗

使用同初凝檢測時的貫入針，在水泥漿表面開始不留痕跡的時間。

二、混凝土材料試驗

混凝土材料試驗包括坍度試驗、抗壓試驗、彈性模數試驗、乾縮試驗及潛變試驗。規劃於搭配的預拌廠中依設定配比進行混凝土拌製，於新拌混凝土階段進行坍度試驗，合格後澆置試體，於標準養護條件下進行養護，待規定齡期進行各項試驗。試驗將於所搭配的預拌廠品管試驗室、大專院校混凝土實驗室或 TAF 認證合格實驗室辦理。所有的檢測儀器皆需經校正合格。

(一) 坍度試驗

依據「CNS 1176 混凝土坍度試驗法」規定進行，將拌製完成之新拌混凝土分三層填入平截圓錐模具中並以搗棒每層搗實 25 下後刮平，再將模具提起使混凝土坍下，量取錐模頂面至坍下試樣頂面中心點之垂直距離，並計算坍損時間。試驗時，拌合混凝土應經目視無泌水及析離現象且坍度達到控制值才得以製作圓柱試體。

(二) 抗壓試驗

依據「CNS 1232 混凝土圓柱試體強度之檢測法」之規定，將圓柱試體兩端用蓋平石膏蓋平後，在齡期 3、7、28、56、90 天時進行抗壓試驗。抗壓試驗機之加壓速度為 $1.41 \text{ kgf/cm}^2 \sim 3.52 \text{ kgf/cm}^2$ 。

(三) 彈性模數試驗

依 ASTM C469 「Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression」規定，混凝土之彈性模數依組成材料及其混凝土配比等而定，於 28 天進行抗壓試驗時同時量測。混凝土之彈性模數可用規範中之公式 5-1 計算如下：

$$E_c = (0.4fc' - S_1) / (\varepsilon_2 - 0.0000 \zeta) \dots \dots \dots (5-1)$$

$$\text{其中 } S_1 = \varepsilon_1 = 0.0000 \zeta \text{ 之應力, } \varepsilon_2 = 0.4fc', \zeta = \text{波松比} = \nu = \frac{\varepsilon_{t2} - \varepsilon_{t1}}{\varepsilon_{l2} - \varepsilon_{l1}}$$

三、混凝土耐久性試驗

耐久性可由內部的體積穩定性及外部的侵蝕環境判別。體積穩定性係由混凝土材料性質所決定，可由乾縮試驗及潛變試驗來檢驗；而環境侵蝕係因台灣地區沿海地段頗多，所形成的侵蝕環境成為國內道路橋梁結構損壞主要來源。過去設計者往往較重視材料的力學反應，但卻忽視結構物暴露環境對材料或結構物耐久性之影響，使暴露在一般環境下的結構物在未達設計使用年限前，便會發生損壞，如需繼續使用，必將耗費大量資源加以維修或補強。所以若能針對在設計時將對結構物各影響耐久性因子作深入研究，並根據檢測成果對結構物耐久性作合理的評定與殘餘使用壽命預測，應可避免日後不必要的資源浪費。

本計畫另以不同的高爐石粉飛灰添加比例及混合水泥不同型別進行抗硫酸鹽試驗，來評估高爐石粉飛灰及混合水泥對硫酸鹽之抵抗能力。各項試驗說明如下。

(一)抗硫酸鹽試驗

依 CNS 14794 「水硬性水泥砂漿棒暴露於硫酸鹽溶液中之長度變化試驗法」，進行不同膠結材料配比水泥砂漿浸泡於硫酸鹽溶液中長度之變化，以評估混凝土對硫酸鹽之抵抗能力，並經由濾液分析，量測鈣的溶出情形。

(二)乾縮試驗

依據「CNS 14603 硬固水泥砂漿及混凝土長度變化試驗法」規定，每組配比為純水泥、爐灰 35%+15%、混合水泥 IS(<70)(MS)、混合水泥 IP(HS-LH)製作三個試體。將試體置於溫度 23°C 相對溼度 50% 之環境中，養護 7、14、28 天，量測三個試體乾縮之應變量，求其數據之平均值以降低誤差，利用式 5-2 可得出各齡期下長度變化量。

$$\Delta L_x = \frac{L_x - L_i}{G} \times 100 \dots \dots \dots (5-2)$$

式中： ΔL_x = 試體於第 X 齡期之長度變化(%)；

式中： L_x = 試體於第 X 齡期之長度比較測微器之讀值減去同齡期參考

桿之比較測微器讀值(mm)；

式中： L_i = 試體之初始長度比較測微器之讀值減去同齡期參考桿之比較測微器讀值(mm)；

式中： G = 標稱之有效標距 250mm。

(三)潛變試驗

依據「ASTM C512 Standard Test Method for Creep of Concrete in Compression」之規定進行試驗。每組配比为純水泥、爐灰 35%+15%、混合水泥 IS(<70)(MS)、混合水泥 IP(HS-LH)製作 $\phi 15 \times 30$ cm 圓柱試體，乾燥潛變與基本潛變的試體經溼養護 7 天後，每個試體於長軸方向上黏貼混凝土表面應變計，將基本潛變試體加封三層塑膠袋以隔絕試體與空氣接觸，乾燥潛變的試體就不必加封塑膠袋，再將乾燥潛變與基本潛變的試體移置溫度 23°C 相對溼度 50% 之環境中，等 28 天後進行試體架設。然後推疊上彈簧基座潛變架上並施加預力，而所加載荷重為 0.4fc' 之應力，並量測後續齡期(1、7、14、28、56、91 天)潛變之應變量。

四、電弧爐氧化矽安定性試驗

依 CNS 1240「混凝土粒料」之規定，若要使用可資源化再利用之固態一般事業廢棄物，除需先確認材料無害及品質符合標準要求外，使用前必須先經安定劃處理程序，使其安定性在預期使用條件下或相同耐久性測試結果，與使用天然粒料之體積穩定性相同或更佳。因此本試驗所用之電弧爐氧化矽所進行之安定性試驗規劃如下：

電弧爐氧化矽膨脹特性試驗方法，先將取得的電弧爐氧化矽粗碎，參考 CNS 1258 試驗的熱壓程序進行 1 及 2 次(3 及 6 小時)的安定化處理，再以未安定化、安定 3 小時及 6 小時的電弧爐氧化矽，分別製作砂漿棒四根，其水泥：粒料(OD)體積比採用 1：3，如此可以增加爐矽的膨脹量表現；粒料級配符合 ASTM C227 級配要求，使用 CNS 1012 水泥砂漿流度試驗所得的標準流度用水量，製成的砂漿棒依 CNS 1258 卜特蘭水泥熱壓膨脹試驗程序進行 1 及 2 次試驗(3 及 6 小時)，觀察砂漿棒的完整性及長度變化。



五、試驗項目規劃

綜整本計畫之試驗規劃詳表 5.2-1、表 5.2-2。包含試驗項目、設計強度、取代比例變數、試驗齡期及參照 CNS 試驗標準。

表 5.2-1 綠色材料混凝土試驗規劃

規劃	試驗項目	設計強度 Kgf/cm ²	取代比例	齡期天數(天)	參照標準	
膠結材試驗	初終凝試驗	-	對照組： 1.純水泥	-	CNS 786	
	水合熱試驗			-	CNS2248	
	熱壓膨脹			-	CNS1258	
	抗硫酸鹽			7、14、21、28、56、90(共 6 個齡期)	CNS 14794	
混凝土試驗	坍度及坍損	210	試驗組： 2.爐灰 25%+10% (西濱北現行最高) 3.爐灰 35%+15% (工程會規範最高) 4.混合水泥 IS(<70)(MS) 5.混合水泥 IP (HS-LH)	-	CNS 1176	
	抗壓試驗	280 350(一般)		3、7、28、56、90 (共 5 個齡期)	CNS 1232	
	靜彈性模數	350(SCC) 420(早強)		28(共 1 個齡期)	ASTM C-469	
	潛變試驗	350(一般) 420(早強)		對照組： 1.純水泥	1、7、14、28、56、90(共 6 個齡期)	ASTM C512
	乾縮試驗			試驗組： 2.爐灰 35%+15% 3.混合水泥(取代 I 型)(IS<70) 4.混合水泥 IP(HS-LH)	4、7、14、28、56、90 (共 6 個齡期)	CNS14603
註：1.350(SCC)無純水泥變數、420(早強)無爐灰 25%+10%變數 2.抗硫酸鹽、乾縮、潛變為耐久性試驗。 3.混合水泥 IS(<70)(MS)及混合水泥 IP (HS-LH)不適用早強，故不辦理 420 強度試驗。						

表 5.2-2 電弧爐氧化矽混凝土試驗規劃

規劃	試驗項目	設計強度 Kgf/cm ²	取代比例	齡期天數(天)	參照標準
混凝土試驗	坍度及坍損	210 350(一般)	對照組： 1.爐灰 25%+10% (西濱北現行最高) 天然粒料 試驗組： 2.爐灰 25%+10% (西濱北現行最高) 氧化矽-100%細粒料	-	CNS 1176
	抗壓試驗			3、7、28、56、90 (共 5 個齡期)	CNS 1232
	靜彈性模數			28(共 1 個齡期)	ASTM C-469
	RCPT			90(共 1 個齡期)	CNS 14795
	潛變試驗			1、7、14、28、56、90(共 6 個齡期)	ASTM C512
	乾縮試驗			4、7、14、28、56、90 (共 6 個齡期)	CNS14603



六、配比設計

本次混凝土試拌作業於龍形預拌廠辦理(位於新北市八里區大崁村忠八街60號)，該廠鄰近西濱快速道路，過往承攬許多公共工程，實拌經驗豐富，有關廠方所用之原料性質與廠牌如表 5.2-3，依材料性質按 CNS 12891 混凝土配比設計準則進行配比設計，如表 5.2-4。

表 5.2-3 混凝土所用材料廠牌及型別

材料	廠牌型別
水泥	幸福水泥公司所產卜特蘭 I 型水泥
高爐石粉	100 級水淬高爐爐渣粉
飛灰	台塑六輕所產 F 級飛灰
細粒料	中國大陸進口，FM2.75
粗粒料	中國大陸進口
水	自來水
化學摻料	台灣西卡公司所產 type-G 化學摻料
電弧爐氧化渣	東和鋼鐵公司桃園廠
混合水泥	中聯公司所產 IS(<70)(MS)型及 IP (HS-LH)型混合水泥

資料來源：龍形預拌混凝土廠【119】



表 5.2-4 混凝土配比表

編號	設計強度 kgf/cm ²	水膠比 w/cm	坍度 cm	最大粒徑 mm	水泥 kg	型別	高爐石粉 kg	飛灰 kg	細粒料 kg	粗粒料 kg	水 kg	化學摻料 kg
1	210	0.59	18	25	300	I 型	0	0	920	942	174	3.0
2	210	0.59	18	25	195	I 型	75	30	912	934	174	3.0
3	210	0.59	18	25	150	I 型	105	45	908	930	174	3.0
4	210	0.59	18	25	300	IS	0	0	920	942	174	3.0
5	210	0.59	18	25	300	IP	0	0	920	942	174	3.0
6	280	0.50	18	25	360	I 型	0	0	858	944	178	3.24
7	280	0.50	18	25	234	I 型	90	36	848	933	178	3.24
8	280	0.50	18	25	180	I 型	126	54	844	929	178	3.24
9	280	0.50	18	25	360	IS	0	0	858	944	178	3.24
10	280	0.50	18	25	360	IP	0	0	858	944	178	3.24
11	350	0.40	18	25	450	I 型	0	0	788	939	178	3.6
12	350	0.40	18	25	293	I 型	112	45	776	926	178	3.6
13	350	0.40	18	25	225	I 型	157	68	770	919	178	3.6
14	350	0.40	18	25	450	IS	0	0	788	939	178	3.6
15	350	0.40	18	25	450	IP	0	0	788	939	178	3.6
16	350SCC	0.40	65	19	293	I 型	112	45	967	741	175	4.28
17	350SCC	0.40	65	19	225	I 型	157	68	960	736	175	4.28
18	350SCC	0.40	65	19	450	IS	0	0	981	752	175	4.28
19	350SCC	0.40	65	19	450	IP	0	0	981	752	175	4.28
20	420	0.38	18	25	475	I 型	0	0	746	963	176	3.56
21	420	0.38	18	25	475	I 型	142	95	725	935	176	3.56
22	210	0.63	18	25	195	I 型	75	30	1017	905	185	3.0
23	350	0.46	18	25	293	I 型	112	45	852	868	205	3.6
24	210	0.59	18	25	150	I 型	105	82	855	930	177	3.0
25	210	0.59	18	25	150	I 型	105	118	802	930	180	3.0
26	280	0.50	18	25	180	I 型	126	87	797	929	178	3.24
27	280	0.50	18	25	180	I 型	126	122	750	929	178	3.24
28	350	0.40	18	25	225	I 型	157	99	730	919	178	3.6
29	350	0.40	18	25	225	I 型	157	130	689	919	178	3.6

註 1：IS 為 IS(<70)(MS)型混合水泥、IP 為 IP (HS-LH)型混合水泥

2：SCC 所用化學摻料為高效能減水劑

3：22 及 23 號配比以電弧爐氧化矽取代 50%細粒料

4：24、26、28 號配比以飛灰取代 5%細粒料(體積比)，25、27、29 號配比以飛灰取代 10%細粒料(體積比)

5.3 電弧爐氧化矽安定化試驗

電弧爐氧化矽砂漿棒熱壓膨脹試驗結果列於表。安定 3 小時及安定 6 小時的電弧爐氧化矽，所製作的砂漿棒經 3 小時及 6 小時熱壓膨脹試驗後的照片如圖 5.3-1~圖 5.3-4 所示。結果顯示，未經安定化處理的電弧爐氧化矽砂漿棒，在第一次熱壓膨脹試驗時均斷裂，顯示具有膨脹特性；經 3 小時安定化的電弧爐氧化矽砂漿棒，在第一次熱壓膨脹試驗時，砂漿棒均未斷裂，平均膨脹量為 0.0228 %，顯然安定化處理可以降低電弧爐氧化矽的膨脹性，再進行第二次熱壓膨脹試驗時，則有二根試體斷裂，平均膨脹量增加為 0.0458 %；經 6 小時安定化的電弧爐氧化矽砂漿棒，在第一次熱壓膨脹試驗時，砂漿棒均未斷裂，平均膨脹量為 0.0220 %，再進行第二次熱壓膨脹試驗時，則有一根試體斷裂，平均膨脹量增加為 0.0426 %，顯然較長時間安定化處理又可以降低電弧爐氧化矽的膨脹性。

上述結果說明了電弧爐氧化矽在作為水泥基質材料時，需要檢測其是否已安定化，若誤用未安定化的電弧爐氧化矽於水泥基質材料中，可能會有潛在膨脹問題，進而造成混凝土的膨脹爆裂問題。而熱壓膨脹方式為可以運用的安定化方法，但在實務運用時會有耗能的問題並不實際，但以熱壓膨脹試驗檢測砂漿棒的膨脹性卻是可以運用的方法，至於膨脹量多少才有安定效果則需進行長期試驗證實。

表 5.3-1 電弧爐氧化矽砂漿棒熱壓膨脹試驗結果

試體編號	處理方式	第一次熱壓膨脹試驗 膨脹量(%)		第二次熱壓膨脹試驗 膨脹量(%)	
		個別值	平均值	個別值	平均值
S0-1	未安定化	斷裂			
S0-2		斷裂			
S0-3		斷裂			
S0-4		斷裂			
S3-1	安定化處理 3 小時	0.0309	0.0228	斷裂	0.0458
S3-2		0.0186		0.0352	
S3-3		0.0183		0.0564	
S3-4		0.0232		斷裂	
S6-1	安定化處理 6 小時	0.0235	0.0220	0.0508	0.0426
S6-2		0.0231		斷裂	
S6-3		0.0203		0.0375	
S6-4		0.0211		0.0395	

資料來源：本研究試驗整理

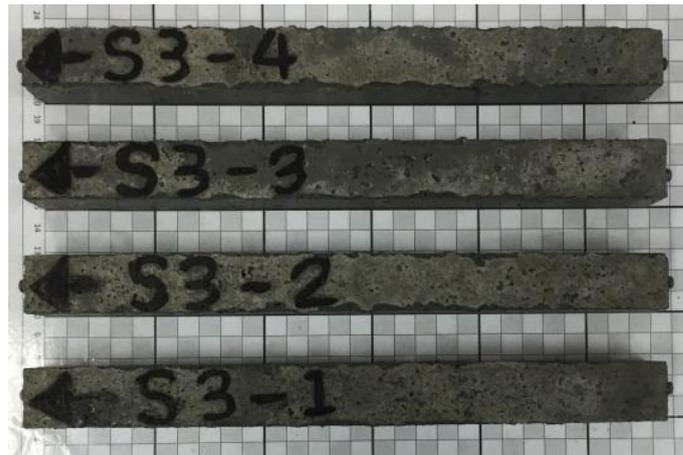


圖 5.3-1 安定化 3 小時之電弧爐氧化矽砂漿第一次熱壓膨脹試驗後之照片

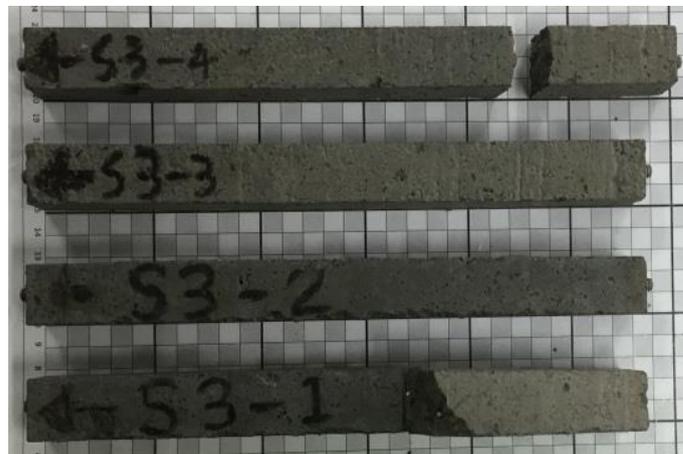


圖 5.3-2 安定化 3 小時之電弧爐氧化矽砂漿第二次熱壓膨脹試驗後之照片

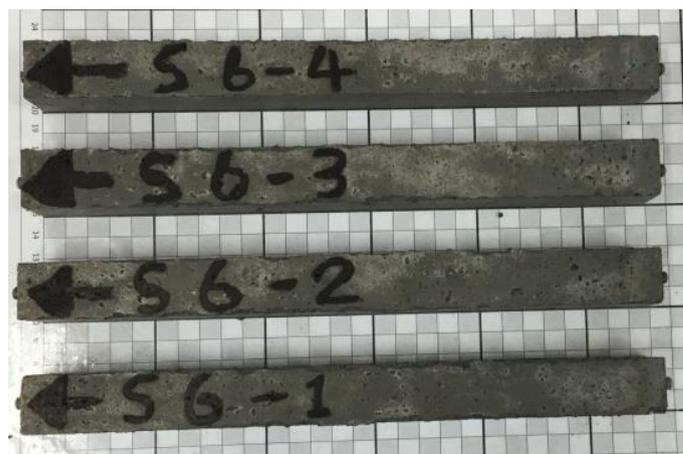


圖 5.3-3 安定化 6 小時之電弧爐氧化矽砂漿第一次熱壓膨脹試驗後之照片



圖 5.3-4 安定化 6 小時之電弧爐氧化矽砂漿第二次熱壓膨脹試驗後之照片

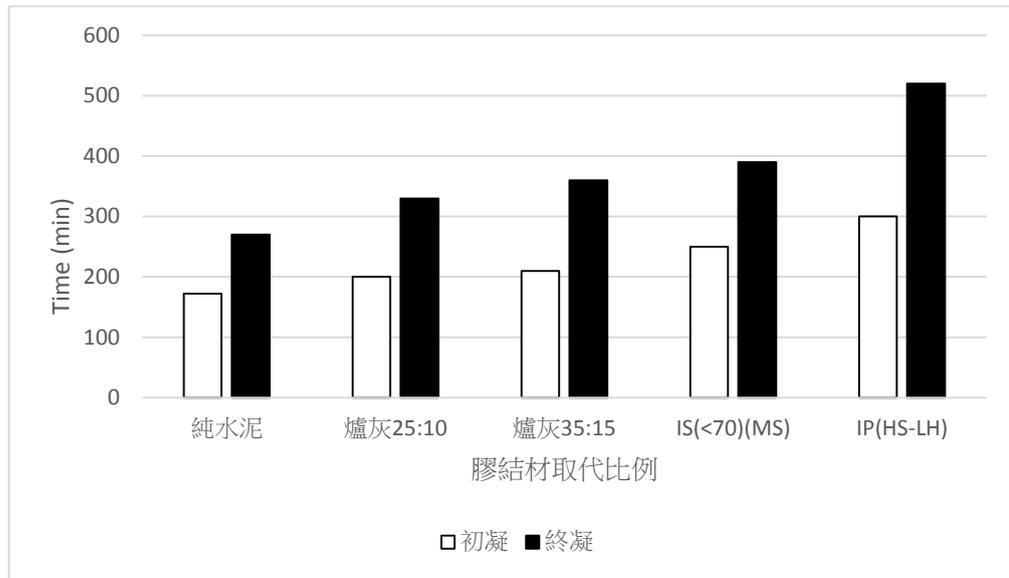
5.4 膠結材料試驗

5.4.1 初終凝試驗

本計畫初終凝試驗係依 CNS 786 試驗程序，進行純水泥與其他不同爐石飛灰取代比例及混合水泥試驗，試驗結果純水泥初凝時間約 172 分鐘，終凝時間約 270 分鐘，符合 CNS 61 卜特蘭水泥規範，初凝不少於 45 min，終凝不多於 375 min 之要求。在爐灰取代比例 25:10 初凝為 200 分鐘，終凝為 330 分鐘，因為加入了 35% 爐灰，初凝時間約延遲 30 分鐘，終凝時間約延遲 60 分鐘，爐灰取代比例 35:15 組初凝時間為 210 分鐘，終凝時間為 360 分鐘，加入 50% 爐灰的漿體初凝時間又都較加入 35% 爐灰的漿體增長方面都減緩許多，但仍符合 CNS 61 之要求。

另 IS(<70)(MS)混合水泥初凝時間為 250 分鐘，終凝時間為 390 分鐘，IP(HS-LH)初凝時間為 300 分鐘，終凝時間為 520 分鐘，與前述純水泥與添加爐灰組之初凝時間為更久，但仍符合 CNS 15286 水硬性混合水泥的要求，初凝不少於 45 min，終凝不多於 7 hrs 之要求。

使用高爐石粉飛灰或混合水泥時，因初終凝時間皆較純 I 型水泥長，會影響拆模時間，施工時需特別注意。本次試驗結果如圖 5.4.1-1。



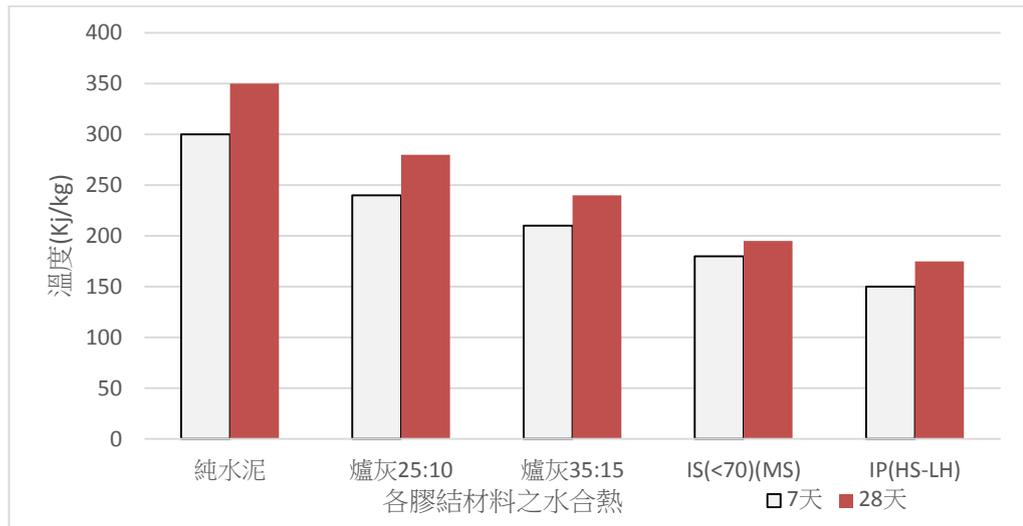
資料來源：本研究試驗整理

圖 5.4.1-1 各膠結材取代量初終凝

5.4.2 水合熱試驗

本項目係依 CNS 2248 標準規範進行對純水泥與不同爐灰取代比例進行水合熱試驗，包含 7 天與 28 天齡期，試驗結果純水泥 7 天水合熱為 300 kj/kg、28 天水合熱為 350 kj/kg，添加不同比例的爐灰 25:10 水合熱為 7 天 240 kj/kg、28 天為 270 kj/kg(28 天)，水合熱較純水泥為低，爐灰 35:15 水合熱為 7 天 210 kj/kg、28 天為 240 kj/kg，又較爐灰 25:10 組為低。可知水泥裡面的矽酸三鈣(C_3A)、矽酸二鈣(C_2S)、鋁酸三鈣(C_3A)、鋁鐵酸四鈣(C_4AF)及少量的氧化鎂(MgO)、氧化鈣(CaO)等四種礦物的形成量及反應速率，與膠結材料中的氧化物組程有關，添加爐灰的膠結材料，形成高水化熱的 C_3S 及 C_3A 含量少，卜作嵐反應也是與水泥水化形成的氫氧化鈣進行反應，再形成低水化熱的 C_2S ，因此，高爐石粉飛灰添加量愈高，水合熱愈低。

混合水泥 IS(<70)(MS)型水合熱在 7 天時為 180 kj/kg，較純水泥結果少了 120 kj/kg，IP(HS-LH)水合熱與純水泥相較少了 150 kj/kg 以上，此結果與混合水泥較純水泥及添加爐灰水泥的凝結時間長的趨勢是符合的，顯見此兩型混合水泥較爐灰 35:15 更符合巨積混凝土的應用，而 IP(HS-LH)型混合水泥則有更低的水合熱。本次試驗結果如圖 5.4.2-1。



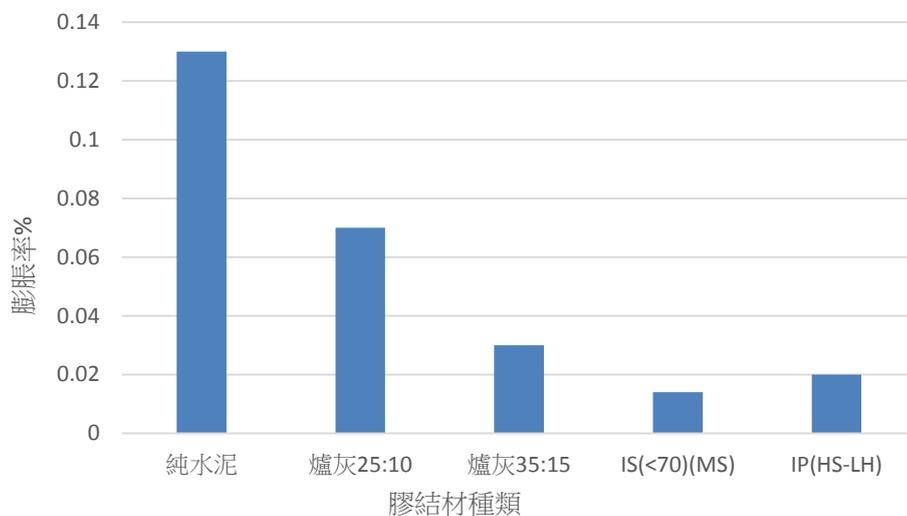
資料來源：本研究試驗整理

圖 5.4.2-1 各膠結材取代量水合熱

5.4.3 熱壓膨脹

依熱壓膨脹試驗結果，純水泥組膨脹量為 0.13%，爐灰 25:10 組為 0.07%、爐灰 35:15 組為 0.03%、混合水泥 IS(<70)(MS)組為 0.014%、混合水泥 IP(HS-LH)組為 0.02%，由 5.4.3-1 圖可知，以添加爐灰 25:10 取代水泥與爐灰 35:15 取代量與純水泥相比較，膨脹量明顯降低許多，隨高爐石粉飛灰取代量增加，熱壓膨脹值越低，體積穩定性更佳

而混合水泥 IS(<70)(MS)組及 IP(HS-LH)組膨脹量又較爐灰 35:15 組為低，顯示混合水泥 MS 型的混凝土體積穩定性較自行混拌的水泥高爐石粉飛灰更佳。本次試驗結果如圖 5.4.3-1。



資料來源：本研究試驗整理

圖 5.4.3-1 熱壓膨脹試驗結果

5.5 混凝土試驗

5.5.1 坍度

本研究試驗係於混凝土拌合後，依 CNS 1176 規範測試新拌混凝土的坍度，膠結材料種類包括純水泥、爐灰 25:10、爐灰 35:15、混合水泥 IS(<70)(MS)、混合水泥 IP(HS-LH)，設計強度包括 210 kgf/cm²、280 kgf/cm²、350 kgf/cm²(一般)、350 kgf/cm²(SCC)、420 kgf/cm²(早強)進行新拌混凝土坍度試驗，配比如表 5.2-4。另因應綠色材料之發展趨勢，增作電弧爐氧化矽混凝土試驗及飛灰取代細粒料混凝土試驗。坍度試驗結果詳表 5.5.1-1。

一、一般混凝土

無論是 210 kgf/cm²、280 kgf/cm² 或 350 kgf/cm²，純水泥新拌混凝土的坍度與添加不同比例的高爐石粉飛灰新拌混凝土相比較，坍度試驗結果皆在 18~20cm 之間，彼此並無太大差異，可知添加高爐石粉飛灰仍可滿足原設計坍度之要求。

另於 350 kgf/cm² 純新拌混凝土坍度試驗時，量測 30 分鐘後的坍度變化，純水泥組坍損 2cm，其餘有添加高爐石粉飛灰的各組坍度損失皆在 0.5cm 以內，混合水泥組坍度甚至無變化，可知有添加高爐石粉飛灰有助於降低坍度損失，而使用混合水泥亦能長時間保時良好的工作性。

二、自充填混凝土(SCC)

自充填混凝土的工作性試驗包含坍流度、V 型流下試驗及箱型試驗，由試驗結果顯示，不同爐灰取代量及各型混合水泥皆可拌出符合自充填混凝土的產品規格，從目測檢測混凝土皆無泌水及析離現象，其坍流度及 V 型流下試驗表現差異不大，箱型試驗結果皆能滿足自充填混凝土對填充性的需求。

三、電弧爐氧化矽混凝土

電弧爐氧化矽混凝土在試拌過程流動性表現差，須額外添加化學摻料以維持工作度。210 kgf/cm² 氧化矽混凝土的坍度僅回復至 18cm，350 kgf/cm² 電弧爐氧化矽混凝土的坍度則回復為 19cm，與純水泥相較電弧爐氧化矽混凝土工作性表現較差，原因在於電弧爐氧化矽為多孔隙粒料，會吸取部分拌合水，而且粒料表面不平滑，以致降低坍度，於配比設計時應多注意。



四、高灰量混凝土

在飛灰取代細粒料的新拌混凝土試驗部份，無論在各強度等級其坍度表現均優於原對照配比，且坍度表現相差不大，惟當飛灰取代細粒料用量為 10%時，低強度工作性表現較高強度好，且飛灰取代量愈多，即便坍度一樣，坍流度隨之下降，強度愈高，下降愈明顯。其坍度及坍流度試驗結果詳表 5.5.1-2。

表 5.5.1-1 設計強度坍度試驗

210 kgf/cm ² (3000Psi)						
純水泥	高爐石粉 飛灰 25:10	高爐石粉飛 灰 35:15	混合水泥 IS(<70)(MS)	混合水泥 IP(HS-LH)	電弧爐 氧化矽 (高爐石粉飛 灰 25:10)	
19	20	19	19.5	19	18	
280 kgf/cm ² (4000Psi)						
純水泥	高爐石粉飛 灰 25:10	高爐石粉飛灰 35:15	混合水泥 IS(<70)(MS)	混合水泥 IP(HS-LH)		
19.5	18.5	18.5	19.5	18		
350 kgf/cm ² (5000Psi)						
	純水泥	高爐石粉 飛灰 25:10	高爐石粉飛 灰 35:15	混合水泥 IS(<70)(MS)	混合水泥 IP(HS- LH)	電弧爐 氧化矽 (高爐石粉飛 灰 25:10)
0min	19.5	20.5	21	20.5	19.5	19
30min	18	20	20.5	20.5	20.5	-
350 kgf/cm ² (5000Psi)SCC						
	高爐石粉飛 灰 25:10(cm)	高爐石粉飛灰 35:10(cm)	混合水泥 IS(<70)(MS)(cm)	混合水泥 IP(HS- LH)(cm)		
V 留下時間(S)	10.56	10.94	8.84	12.35		
箱型高度(cm)	33.5	33	33.5	33.5		
坍流度(cm)	65*66	66*67	67*65	67*67		
30min 坍流度	65*66	66*67	-	-		
420 kgf/cm ² (早強)						
	純水泥(cm)			高爐石粉飛灰 35:15(cm)		
0min 坍度	18.5			25		
30min 坍度	18			26		

資料來源：本研究試驗整理

表 5.5.1-2 飛灰取代細粒料坍度試驗

210 kgf/cm ² (3000Psi)		
	飛灰取代細粒料 5% (高爐石粉飛灰 35:15)	飛灰取代細粒料 10% (高爐石粉飛灰 35:15)
坍度(cm)	22.5	22.5
坍流度(cm)	41*44	38*39
280 kgf/cm ² (4000Psi)		
	飛灰取代細粒料 5% (高爐石粉飛灰 35:15)	飛灰取代細粒料 10% (高爐石粉飛灰 35:15)
坍度(cm)	22.5	22
坍流度(cm)	37*37	34*35
350 kgf/cm ² (5000Psi)		
	飛灰取代細粒料 5% (高爐石粉飛灰 35:15)	飛灰取代細粒料 10% (高爐石粉飛灰 35:15)
坍度(cm)	22.5	20
坍流度(cm)	32*32	29*30

資料來源：本研究試驗整理

5.5.2 抗壓試驗

混凝土抗壓強度性質為鋼筋混凝土結構物設計中非常重要，抗壓數字也是一般必須檢測之品質控制指標。本計劃之各類型混凝土設計強度為 210 kgf/cm²、280 kgf/cm²、350 kgf/cm²(一般)、350 kgf/cm²(SCC)、420 kgf/cm²(早強)，分別進行抗壓試驗並依據 CNS 1232 規範養護，依齡期分別量測 3 天、7 天、28 天、56 天、90 天之抗壓強度，以建立強度成長資訊。

一、一般混凝土

設計強度 210 kgf/cm²(w/cm=0.59)之抗壓結果顯示，純水泥 7 天的抗壓強度約為 260 kgf/cm²，而爐灰 25:10 與爐灰 35:15 的 7 天強度分別為 207 kgf/cm²及 180 kgf/cm²，僅約純水泥的 75%，而混合水泥的早期表現中，IS(<70)(MS)的 7 天強度為 241 kgf/cm²，表現較摻用爐灰組要好，IP(HS-LH)的 7 天強度為 179 kgf/cm²，雖然 3 天強度表顯緩慢，但 7 天時已與爐灰 35:15 組相近。28 天齡期時混合水泥 IS(<70)(MS)的強度已較純水泥為高，其餘爐灰 25:10 組與 35:10 組已與純水泥相近，而在 90 天時，爐灰 25:10 組、爐灰 35:15 組、混合水泥 IS(<70)(MS)、IP(HS-LH)的強度皆已超過純水泥的強度，其中以混合水泥 IS(<70)(MS)表現最佳，約為純水泥的 128%，其次為爐灰 35:15，約為純水泥的 120%，而爐灰 25:10 組與混合

水泥 IP(HS-LH)有相近之結果，約為純水泥的 114%。其抗壓試驗結果與強度成長百分率詳圖 5.5.2-1 及圖 5.5.2-2。

設計強度 280 kgf/cm^2 ($w/cm=0.50$) 之抗壓結果顯示，純水泥 7 天的抗壓強度約為 341 kgf/cm^2 ，而爐灰 25:10 與爐灰 35:15 的 7 天強度分別為 278 kgf/cm^2 及 234 kgf/cm^2 ，僅約純水泥的 8 成及 7 成，而混合水泥的早期表現中，IS(<70)(MS)的 7 天強度為 304 kgf/cm^2 ，表現較摻用爐灰組要好，IP(HS-LH)的 3 天強度僅為 48 kgf/cm^2 ，表現最低，7 天強度則為 225 kgf/cm^2 ，已與爐灰 35:15 組相近。28 天齡期時混合水泥 IS(<70)(MS)的強度已與純水泥相近，約 477 kgf/cm^2 左右，爐灰 25:10 組強度為 458，爐灰 35:10 組強度為 411 kgf/cm^2 ，仍略差於純水泥，IP(HS-LH)強度為 382 kgf/cm^2 ，約為純水泥的 80%。而在 90 天時，爐灰 25:10 組、爐灰 35:15 組、混合水泥 IS(<70)(MS)、IP(HS-LH)的強度皆已超過純水泥的強度，其中以混合水泥 IS(<70)(MS)表現最佳，約為純水泥的 109%，其餘爐灰 35:15、爐灰 25:10 組與 IP(HS-LH)三者 90 天的抗壓結果相近，約為純水泥的 103%。其抗壓試驗結果與強度成長百分率詳圖 5.5.2-3 及圖 5.5.2-4。

設計強度 350 kgf/cm^2 ($w/cm=0.40$) 之抗壓結果顯示，純水泥 7 天的抗壓強度約為 419 kgf/cm^2 ，而爐灰 25:10 與爐灰 35:15 的 7 天強度分別為 350 kgf/cm^2 及 304 kgf/cm^2 ，僅約純水泥的 83% 及 73%，而混合水泥的早期表現中，IS(<70)(MS)的 7 天強度為 349 kgf/cm^2 ，表現與爐灰 25:10 組相近，IP(HS-LH)的 7 天強度為 256 kgf/cm^2 ，早期強度表現緩慢，尚無法達爐灰 35:15 組強度。28 天齡期時爐灰 25:10 組與混合水泥 IS(<70)(MS)的強度已較純水泥為高，其餘爐灰 35:10 組略差於純水泥，IP(HS-LH)的 28 天強度僅約為純水泥的 61%。而在 90 天時，爐灰 25:10 組、爐灰 35:15 組、混合水泥 IS(<70)(MS)、IP(HS-LH)的強度皆已超過純水泥的強度，其中以爐灰 25:10 組及 IS(<70)(MS)表現最佳，約為純水泥的 118%，其次為爐灰 35:15，約為純水泥的 115%，而 IP(HS-LH)約為純水泥的 107%。其抗壓試驗結果與強度成長百分率詳圖 5.5.2-5 及圖 5.5.2-6。

另因 420 kgf/cm^2 ($w/cm=0.38$) 係為早強需求，故設定抗壓齡期為 1、3、7、14、28 天，比較純水泥與爐灰 50% 配比之強度差異。 420 kgf/cm^2 (早強) 混凝土抗壓強度第 1 天試驗結果純水泥配比為 161 kgf/cm^2 ，爐灰 50% 配比為 45 kgf/cm^2 ，於第 3 天試驗結果純水泥配比為 396 kgf/cm^2 ，強度已達 94%，施預力起始抗壓強度為 336 kgf/cm^2 ，可進行施拉預力，爐灰 50% 配比為 299 kgf/cm^2 ，於第 7 天試驗結果分別

為 491 kgf/cm^2 與 435 kgf/cm^2 ，強度已達 104%，可進行施拉預力，在後期 14 天後，有添加爐灰比例 35:15 強度已可超過純水泥，其 28 天強度是純水泥的 114%。得知純水泥拉預力時間較爐灰僅早 4 天，若評估節能減碳效果與成本效益，爐灰高摻量仍具有優勢。其抗壓試驗結果與強度成長百分率詳圖 5.5.2-9 及圖 5.5.2-10。

若比較不同爐灰添加比例與混合水泥的各齡期強度發展趨勢，純水泥的 3 天強度約為 28 天強度的 40~50%，爐灰組及混合水泥 IS(<70)(MS)組僅約 30%，IP(HS-LH)組僅約 11~15%，7 天時純水泥已可達 28 天強度的 70%，其於爐灰組及混合水泥組約為 28 天強度的 60%，但是到達 90 天時，純水泥的 90 天強度僅約為 28 天的 117%，但爐灰組及 IS(<70)(MS)組約為 28 天的 130%~140%，IP(HS-LH)組甚至可高達 28 天的 150%，可見添加高爐石粉飛灰對混凝土晚期強度的影響，而從長期強度發展來看，混合水泥 IP(HS-LH)晚期強度仍會繼續成長。

二、自充填混凝土(SCC)

由於純水泥的配比設計難以達到自充填混凝土所要求之工作性與填充性，故自充填混凝土的配比設計以添加高爐石粉飛灰與使用混合水泥為主，設計強度以一般橋梁設計的 350 kgf/cm^2 為標的，依抗壓結果顯示，而爐灰 25:10 與爐灰 35:15 的 7 天強度分別為 292 kgf/cm^2 及 257 kgf/cm^2 ，而混合水泥的早期表現 IS(<70)(MS)7 天強度為 293 kgf/cm^2 ，表現與爐灰 25:10 組相近，IP(HS-LH)的 7 天強度為 285 kgf/cm^2 ，僅 3 天早期強度表現緩慢。28 天齡期時爐灰 25:10 組與混合水泥 IS(<70)(MS)的強度表現相近，分別為 472 kgf/cm^2 及 465 kgf/cm^2 ，而爐灰 35:10 組與 IP(HS-LH)的 28 天強度表現相近，分別為 446 kgf/cm^2 及 447 kgf/cm^2 。而在 90 天時，以爐灰 25:10 組最高、混合水泥 IP(HS-LH)其次，再來是 IS(<70)(MS)及爐灰 35:15 組，然此四組強度差異並不明顯，惟其強度表現略差於一般設計強度 350 kgf/cm^2 的混凝土。其抗壓試驗結果與強度成長百分率詳圖 5.5.2-7 及圖 5.5.2-8。

三、電弧爐氧化矽混凝土

對於有添加電弧爐氧化矽材料從設計強度 210 kgf/cm^2 與 350 kgf/cm^2 作了抗壓測試，其結果與一般混凝土結果相近，顯示使用電弧爐氧化矽作為細粒料其抗壓強度結果仍能符合設計要求。

四、高灰量混凝土

另為增加綠色材料效益，以爐灰 35:15 組為對照組，將飛灰分別取代 5% 及

10%的細粒料體積，分別製作設計強度 210 kgf/cm²、280 kgf/cm² 及 350 kgf/cm² 而齡期設定為 3、7、14、28、56 天的混凝土圓柱試體，其代號分別為 5F(飛灰+5%) 及 10F(飛灰+10%)。

在設計強度 210 kgf/cm² 方面，雖然飛灰多取代 5% 及 10% 細粒料組 3 天早期強度表現良好，可分別達 118 kgf/cm² 及 138 kgf/cm²，較爐灰 35:15 的 78 kgf/cm² 佳，但在 7 天時即與爐灰 35:15 組的強度相近，28 天時強度分別為 332 kgf/cm² 及 363 kgf/cm²，已略差於爐灰 35:15 的 372 kgf/cm²，56 天時強度發展緩慢，甚至不及純水泥的強度。

在設計強度 280 kgf/cm² 方面，同樣飛灰多取代 5% 及 10% 細粒料組 3 天早期強度表現良好，可分別達 143 kgf/cm² 及 149 kgf/cm²，較爐灰 35:15 的 96 kgf/cm² 佳，但在 7 天時即與爐灰 35:15 組的強度相近，28 天時強度皆為 416 kgf/cm²，與爐灰 35:15 的 411 kgf/cm² 相近，然 56 天時強度發展緩慢，僅為 431 kgf/cm² 及 448 kgf/cm²，甚至不及純水泥的強度 497 kgf/cm²。

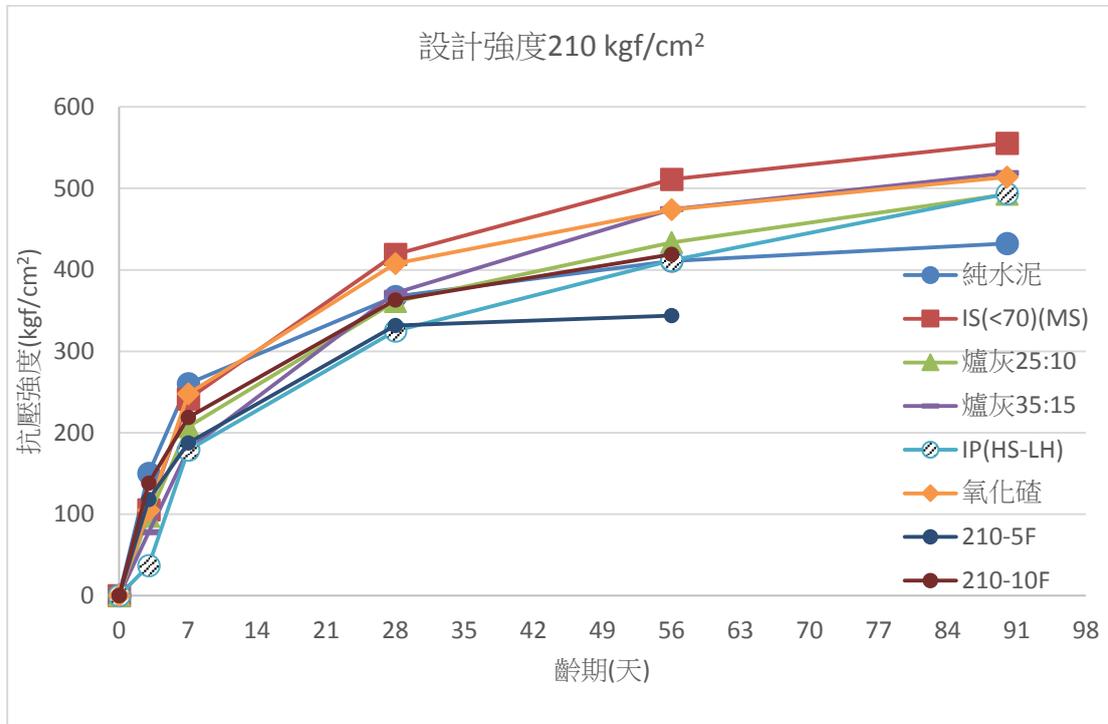
最後在設計強度 350 kgf/cm² 方面亦有類似的結果，飛灰多取代 5% 及 10% 細粒料組 3 天早期強度表現良好，可分別達 180 kgf/cm² 及 175 kgf/cm²，較爐灰 35:15 組的 140 kgf/cm² 為佳，但在 7 天時則略低於爐灰 35:15 組的強度，28 天時強度分別為 477 kgf/cm² 及 459 kgf/cm²，已低於爐灰 35:15 的 28 天強度 503 kgf/cm²，56 天時強度發展緩慢，僅為 537 kgf/cm² 及 505 kgf/cm²，為所有試驗組強度表現最低者。

小結：

在各抗壓強度平均值顯示，有添加爐灰比例的 25:10 組與 35:15 組的混凝土，都比純水泥的強度要來的高，雖然早期強度爬升較慢，但是到了 28 天齡期後，強度成長率都已經達到 100%，在 56 天齡期過後，有添加爐灰比例混凝土抗壓強度明顯高於純水泥，經由抗壓數據顯示隨著添加爐灰比例增加，在晚期強度會有增加趨勢，添加爐灰比例 35:15 在晚期強度平均最高。

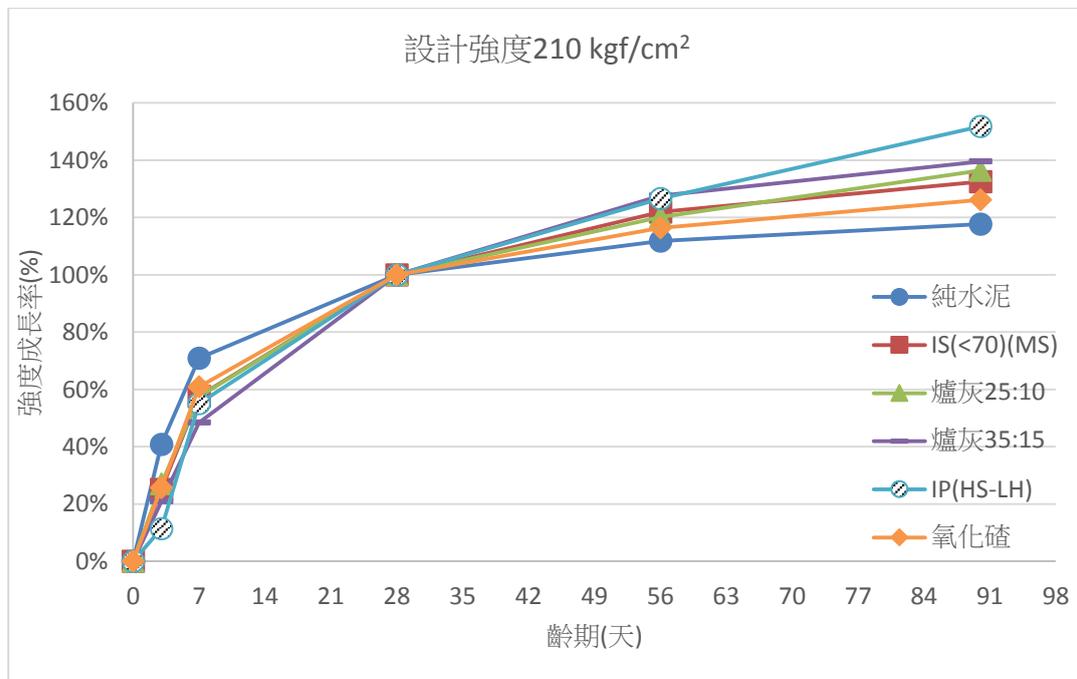
而混合水泥在強度表現方面，IS(<70)(MS)組的強度表現均較爐灰 35:15 組為良好，而 IP(HS-LH)早期強度最低，雖可符合 28 天的目標強度需求，但於現場時工時須注意拆模問題，但在 56 天及 90 天其強度仍有明顯成長，均可超過純水泥的強度。

本次試驗有新增高灰量試驗，由試驗結果可知，以飛灰取代細粒料對早期強度有所助益，但會影響晚期強度，因此對於飛灰添加量應有特別注意。



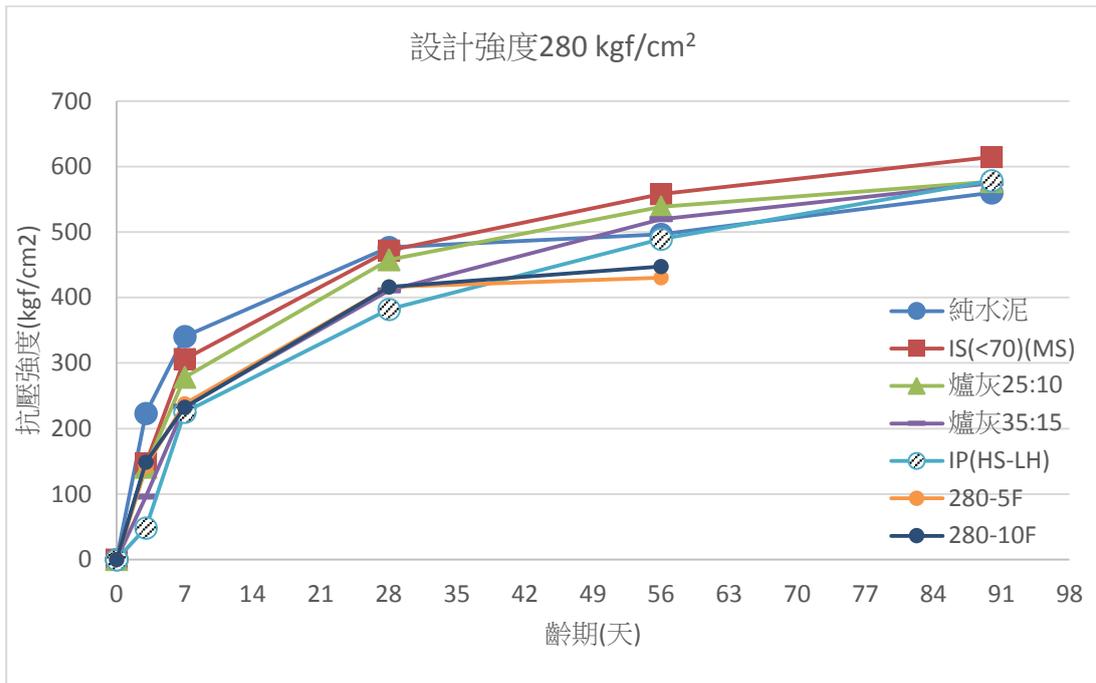
資料來源：本研究試驗整理

圖 5.5.2-1 抗壓強度 210 kgf/cm²



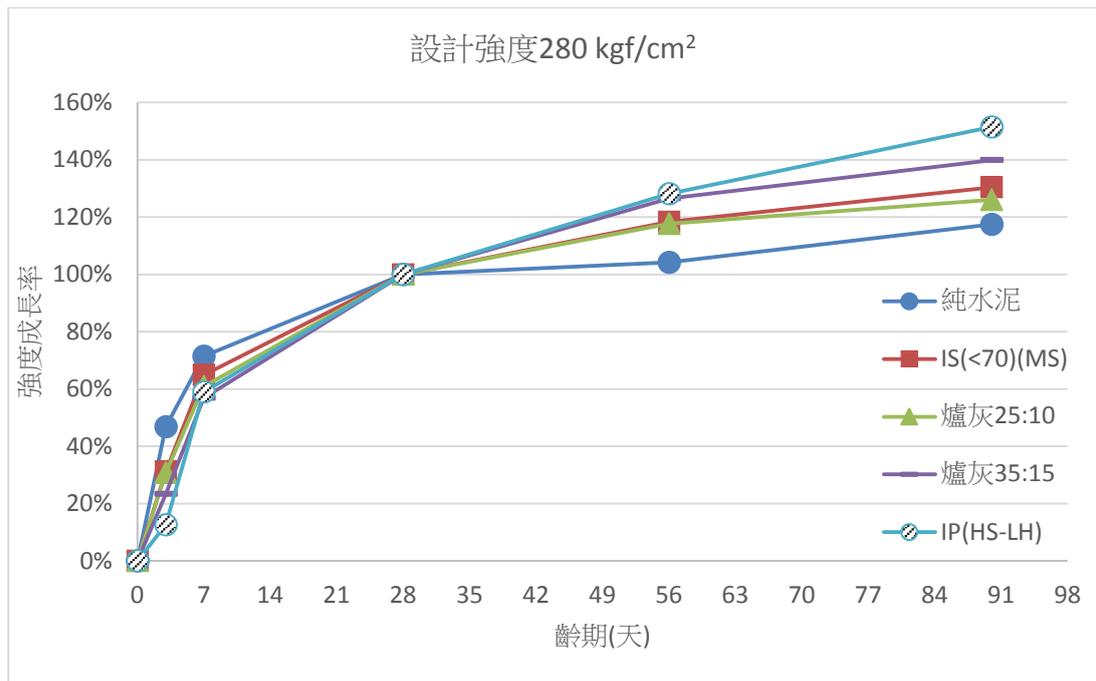
資料來源：本研究試驗整理

圖 5.5.2-2 抗壓強度成長率 210 kgf/cm²



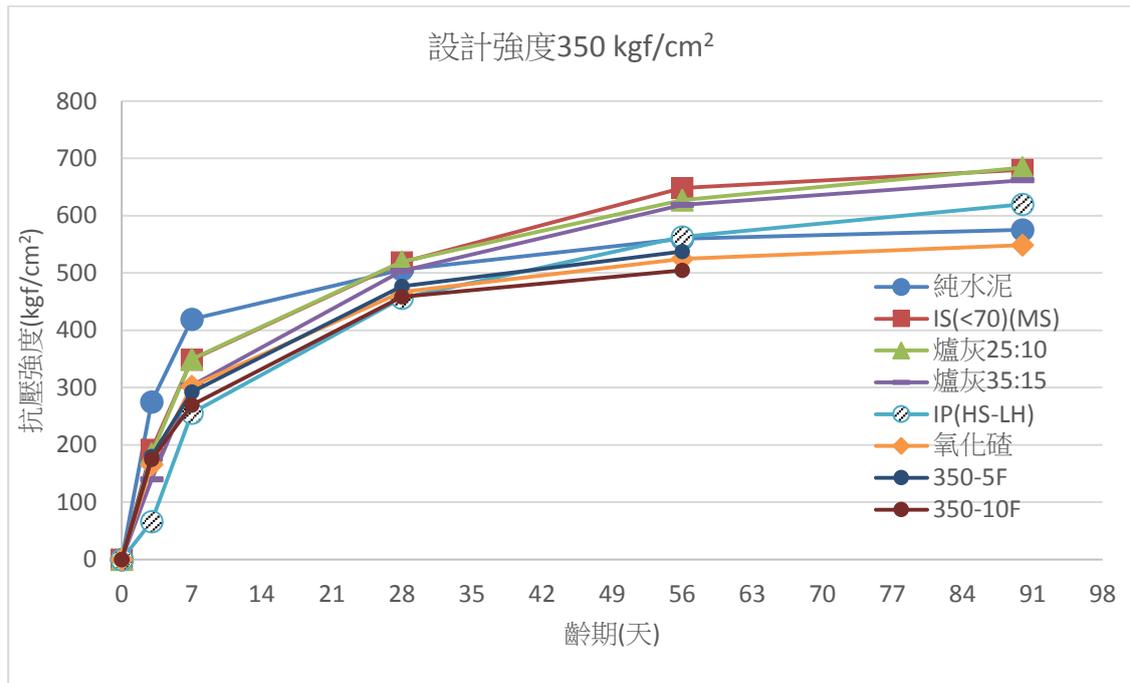
資料來源：本研究試驗整理

圖 5.5.2-3 抗壓強度 280 kgf/cm²



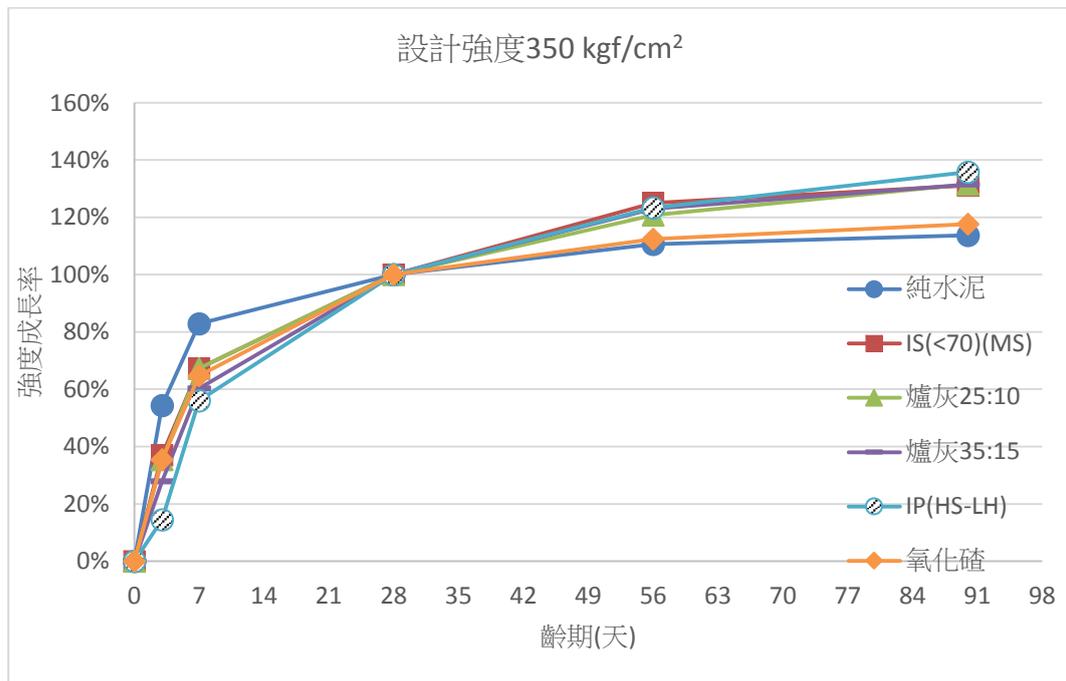
資料來源：本研究試驗整理

圖 5.5.2-4 抗壓強度成長率 280 kgf/cm²



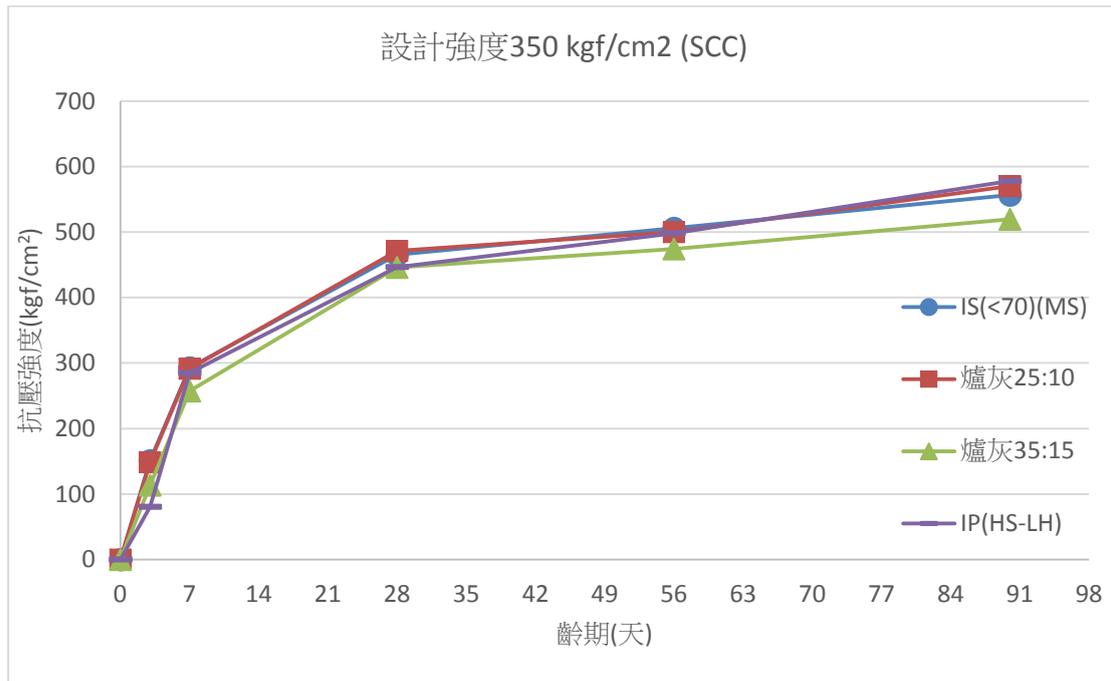
資料來源：本研究試驗整理

圖 5.5.2-5 抗壓強度 350 kgf/cm²



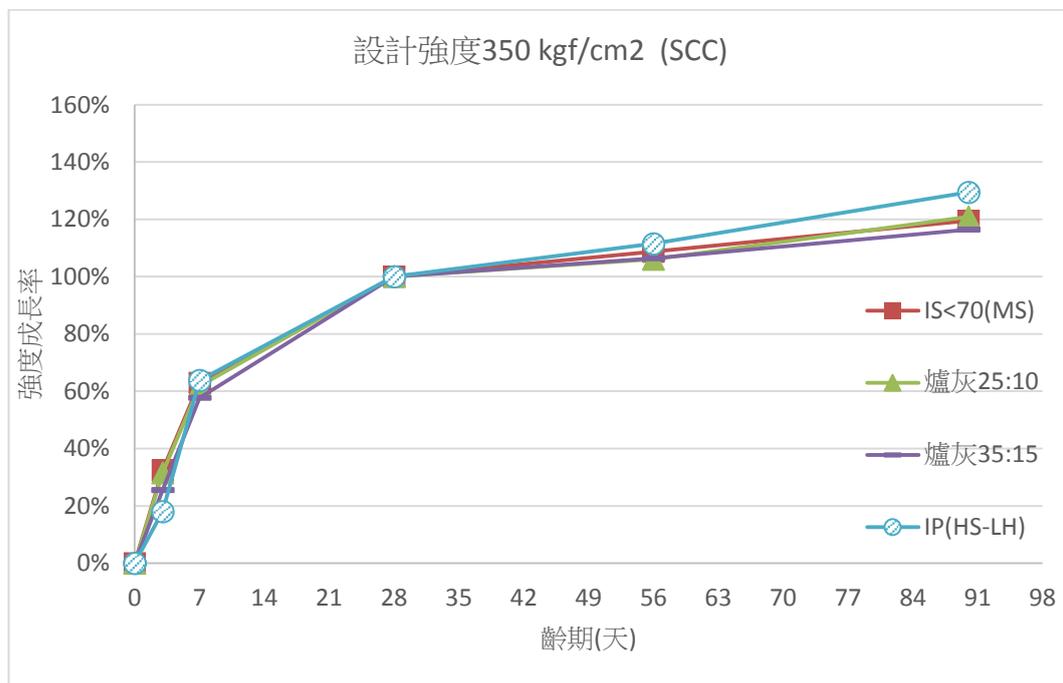
資料來源：本研究試驗整理

圖 5.5.2-6 抗壓強度成長率 350 kgf/cm²



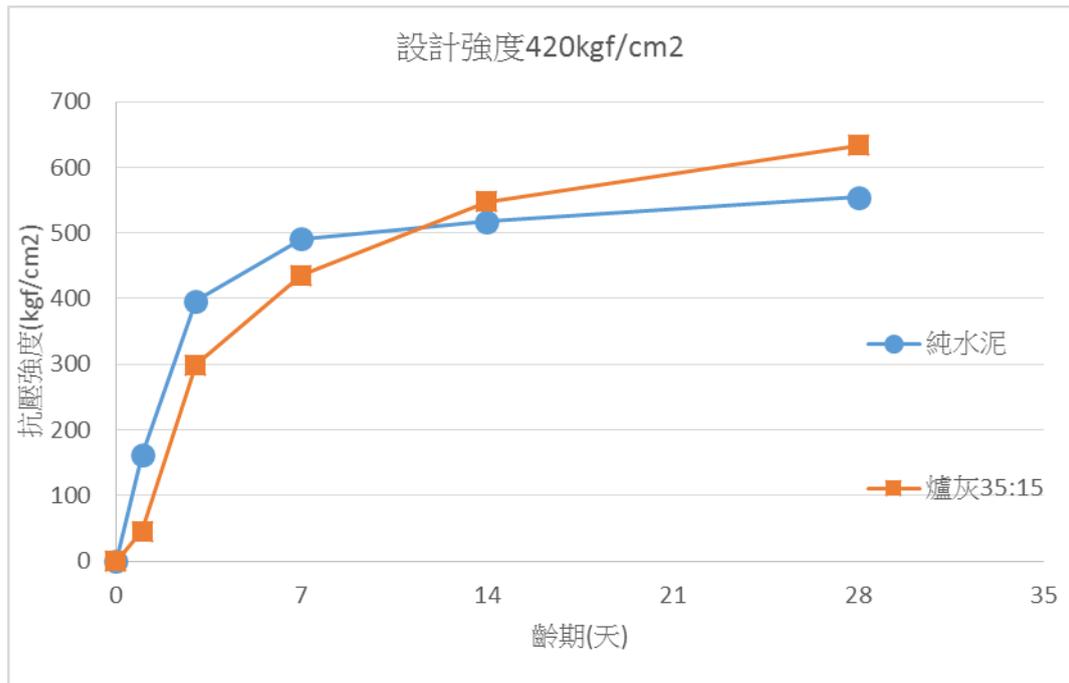
資料來源：本研究試驗整理

圖 5.5.2-7 抗壓強度 350 kgf/cm²(SCC)

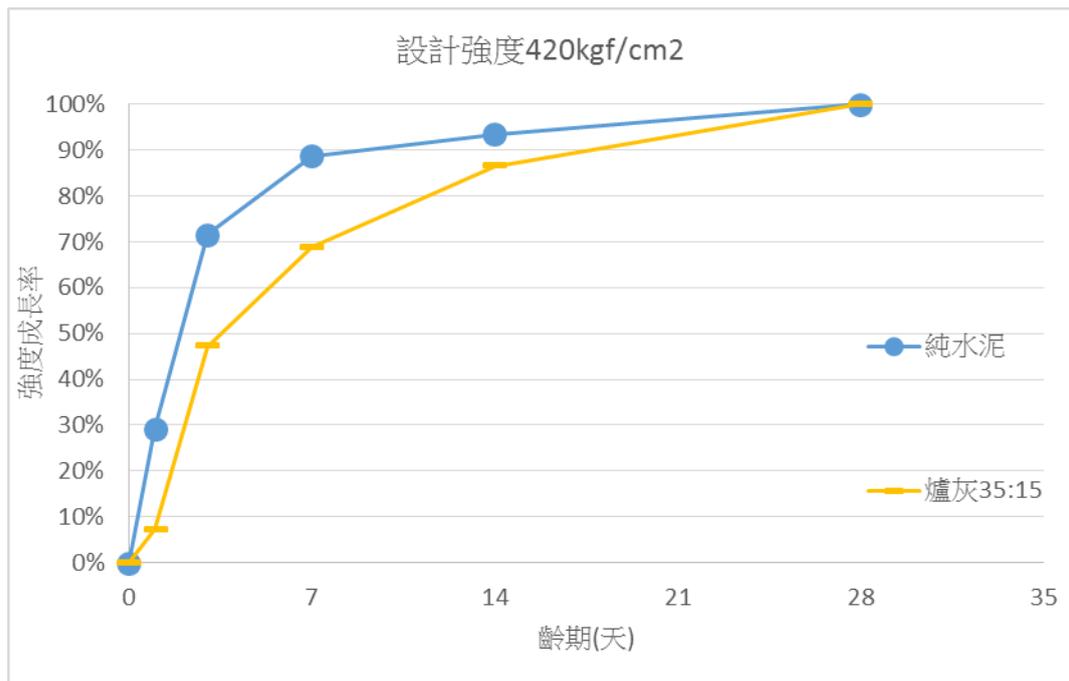


資料來源：本研究試驗整理

圖 5.5.2-8 抗壓強度成長率 350 kgf/cm²(SCC)



資料來源：本研究試驗整理

圖 5.5.2-9 抗壓強度 420 kgf/cm²

資料來源：本研究試驗整理

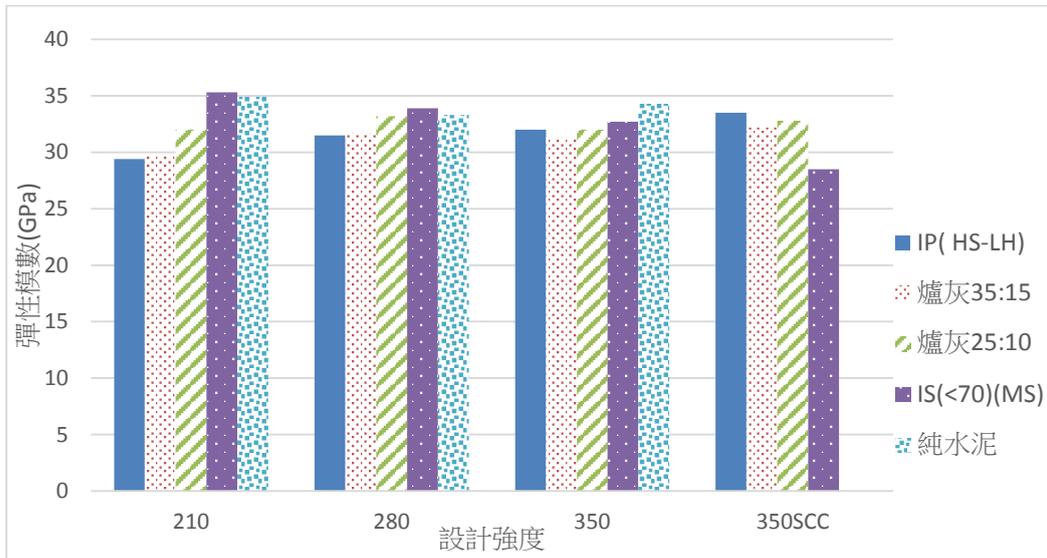
圖 5.5.2-10 抗壓強度成長率 420 kgf/cm²

5.5.3 靜彈性模數

本計劃試驗結果如圖 5.5.3-1，無論是哪種設計強度，使用不同高爐石粉飛灰比例或不同型號的混合水泥，與純水泥的彈性模數差異不大。

依混凝土設計規範常重混凝土 E_c 計算公式(GPa)為 $4730\sqrt{f_c}$ ，由公式計算結果與本次試驗量測結果相比較，不論純水泥、不同高爐石粉飛灰添加量、混合水泥

等試驗值與公式計算值皆十分接近，因此，設計單位在計算彈性模數E值作結構分析時，可援引原E值計算公式。如表 5.5.3-1。



資料來源：本研究試驗整理

圖 5.5.3-1 各膠結材料種類靜彈性模數

表 5.5.3-1 各膠結材料種類靜彈性模數試驗值與計算值比較

設計強度	膠結材取代量	破壞應力 (MPa)	50 μ 時應力 (MPa)	40%應力 (MPa)	40%應力時應變 (μ)	實驗值 E(GPa)	計算值 E(GPa)
210 (kgf/cm ²)	純水泥	38.3	2.2	15.3	438	33.9	29.3
	IS(<70)(MS)	43.9	2.2	17.6	487	34.6	31.3
	爐灰 25:10	40.0	1.9	16.0	496	31.6	29.9
	爐灰 35:15	39.2	1.7	15.7	521	29.8	29.6
	IP(HS-LH)	34.7	2.3	13.9	461	28.1	27.9
	電弧爐氧化渣	44.0	1.9	17.6	500	34.8	31.4
280 (kgf/cm ²)	純水泥	51.6	2.5	20.6	610	32.3	34.0
	IS(<70)(MS)	53.0	2.3	21.2	621	33.2	34.4
	爐灰 25:10	47.4	2.4	19.0	558	32.7	32.6
	爐灰 35:15	44.8	2.0	17.9	573	30.4	31.7
	IP(HS-LH)	41.1	2.7	16.5	500	30.5	30.3
350 (kgf/cm ²)	純水泥	53.2	2.7	21.3	596	34.1	34.5
	IS(<70)(MS)	58.7	2.6	23.5	710	31.7	36.2
	爐灰 25:10	56.2	1.9	22.5	701	31.5	35.5
	爐灰 35:15	54.6	2.8	21.8	669	30.8	35.0
	IP(HS-LH)	47.3	1.6	18.9	602	31.4	32.5
	電弧爐氧化渣	51.4	2.3	20.6	563	35.7	33.9
350 SCC (kgf/cm ²)	IS(<70)(MS)	47.8	1.9	19.1	685	27.2	32.7
	爐灰 25:10	48.6	2.3	19.4	585	32.0	33.0
	爐灰 35:15	41.1	2.3	16.5	500	31.4	30.3
	IP(HS-LH)	45.6	2.4	18.2	527	33.1	31.9

註：依混凝土設計規範常重混凝土 E_c 計算公式(GPa)為 $4730\sqrt{f_c}$

資料來源：本研究試驗整理

5.6 耐久性試驗

5.6.1 抗硫酸鹽試驗

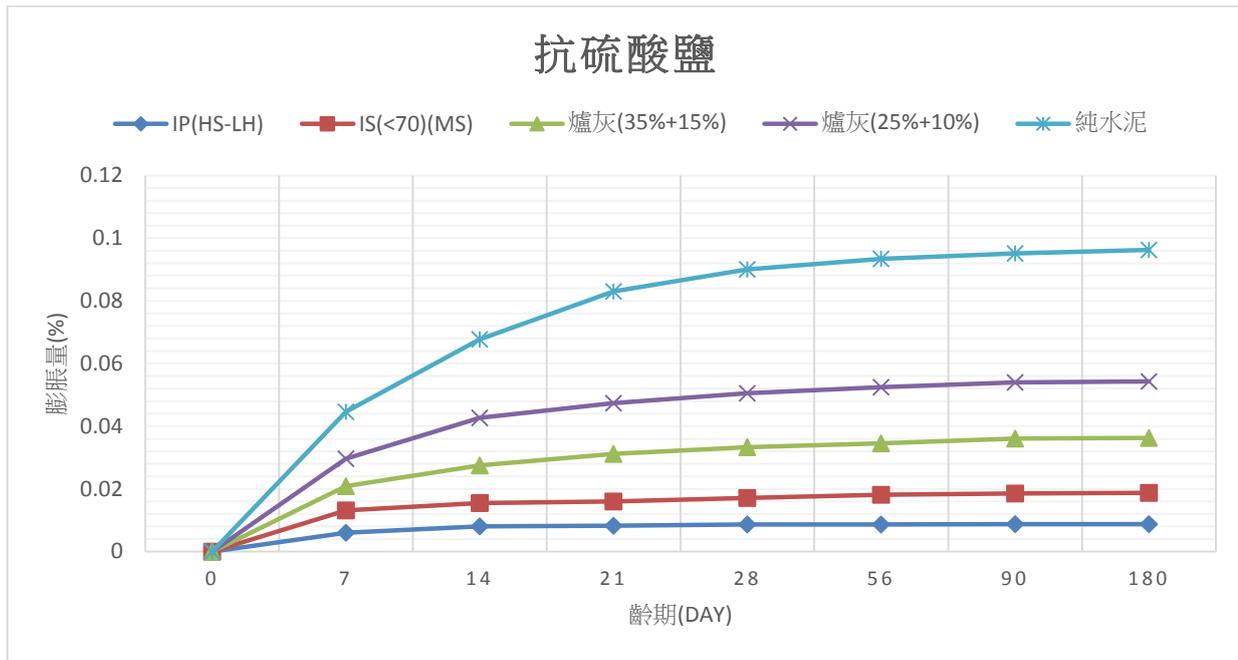
本研究考量海域環境及工業區硫酸鹽侵蝕環境因素，於配比中加入卜作嵐材料除能填塞空隙及增進水密性，並可有效消耗氫氧化鈣及鹼性物質生成 C-S-H 膠體，形成緻密防護網，抑制硫酸鹽侵入破壞。本研究試驗分別以純水泥、爐灰 25:10、爐灰 35:15、混合水泥 IS(<70)(MS)型、混合水泥 IP(HS-LH)型五種不同種類水泥灌製砂漿棒，並分別於 7 天、14 天、21 天、28 天、56 天、90 天、180 天時，依據 CNS 14794 規範進行抗硫酸鹽試驗，此試驗將水泥砂漿棒浸泡於硫酸鈉飽和溶液進行耐久性試驗，以評估混凝土耐久性能。

由圖 5.6.1-1 數據顯示純水泥與爐灰 25:10 和 35:15 在齡期 7 天時，純水泥膨脹量明顯提升，顯示純水泥對於抗硫酸鹽侵蝕性能較弱，添加爐灰比例 25:10 組與爐灰 35:15 組之抗硫酸鹽侵蝕性能較純水泥為佳，而混合水泥 IS(<70)(MS)組、IP(HS-LH)組因具抗硫酸鹽侵蝕性，在齡期 7 天膨脹量只增加了 0.005%，由此可知具有非常良好的抗硫酸鹽環境侵蝕性。

在齡期 28 天純水泥與爐灰 25:10 組和爐灰 35:15 組，純水泥膨脹量依然持續上升，但有添加爐灰 25:10 組和 35:15 組上升速度趨緩，膨脹量低於純水泥，而 IS(<70)(MS)型、IP(HS-LH)型兩種混合水泥趨於平緩狀態，在抗腐蝕性有相當良好的成效。

齡期 90 天時，從圖 5-6.1-1 顯示純水泥從 28 天膨脹量持續上升，但有添加爐灰 25:10 組和爐灰 35:15 組上升趨緩，因爐灰取代水泥量後，對於混凝土抗侵蝕性有提升效果，而 IS(<70)(MS)型、IP(HS-LH)型兩種混合水泥從齡期 21 天後膨脹量則無明顯提升。

齡期 180 天時，純水泥膨脹量持續上升，而添加爐灰 25:10 組和爐灰 35:15 組趨緩上升，IS(<70)(MS)型、IP(HS-LH)型兩種混合水泥膨脹量已經趨於平緩狀態，表面無明顯剝落，水泥砂漿棒能保持完整性，其中 IP(HS-LH)型混合水泥膨脹量更低，顯示其抗硫酸鹽性能更佳。



資料來源：本研究試驗整理

圖 5.6.1-1 抗硫酸鹽試驗

5.6.2 乾縮試驗

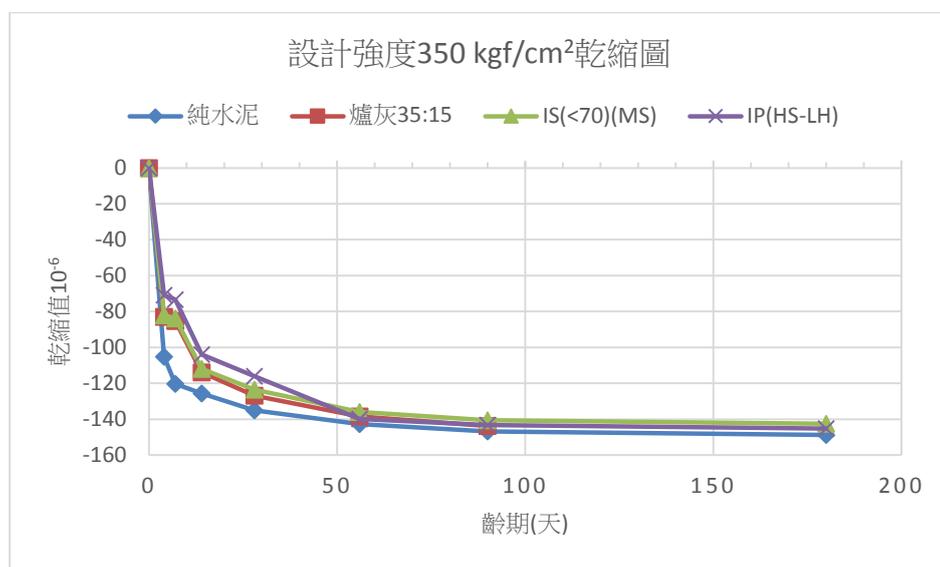
乾縮試驗目標為設計強度 350 kgf/cm^2 混凝土，純水泥與有添加爐灰比例 35:15 相較之下，在 7 天齡期時有添加爐灰比例 35:15 的乾縮值較純水泥的乾縮值為低，而混合水泥 IS(<70)(MS)與 IP(HS-LH)乾縮值兩者皆近，亦較純水泥為低。28 天齡期後，以純水泥跟有添加爐灰比例 35:15 相較之下，純水泥乾縮值較爐灰 35:15 組偏高，而 IS(<70)(MS)與 IP(HS-LH)兩種混合水泥乾縮值兩者相近，且與爐灰 35:15 組無明顯差異，而 90 天至 180 天後，乾縮值趨於穩定，添加爐灰比例 35:15 與 IS(<70)(MS)、IP(HS-LH)兩款混合水泥，乾縮值無明顯差異，亦僅略低於純水泥乾縮值。

設計強度 420 kgf/cm^2 純水泥與有添加爐灰 35:15 相比，純水泥乾縮值較大，有添加爐灰 35:15 與 IS(<70)(MS)與 IP(HS-LH)混合水泥都較無明顯差異。而 420 kgf/cm^2 在齡期 90 天與 180 天有添加爐灰比例 35:15 與 IS(<70)(MS)、IP(HS-LH)兩款混合水泥，乾縮值較無明顯差異，同樣都較純水泥為低。

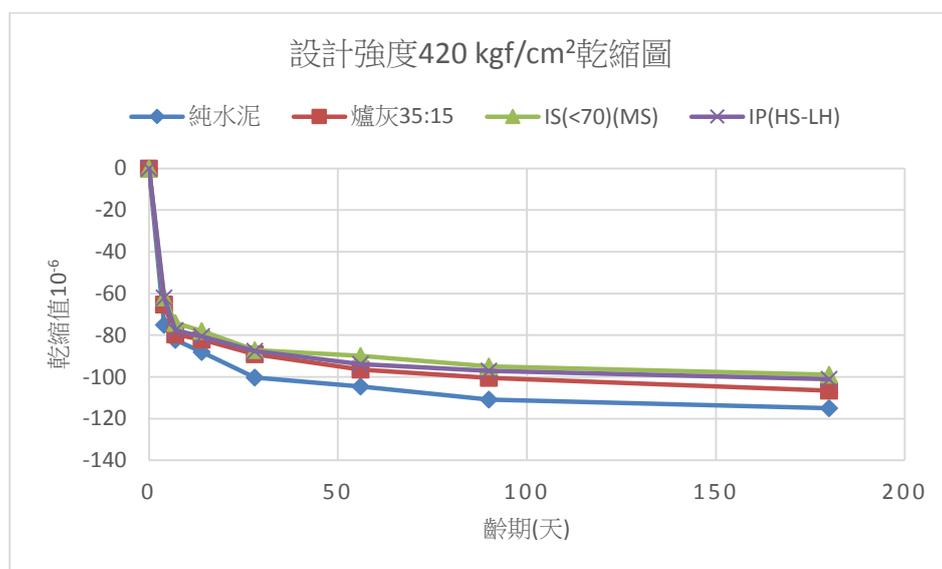
有關不同高爐石粉飛灰添加比例的乾縮試驗結果詳圖 5.6.2-1 與圖 5.6.2-2。

依據「混凝土性質與行為」(黃兆龍, 2002)[114]一書第拾柒章貳、混凝土的體積變化 二、乾燥收縮該節指出，乾縮為乾燥過程中，水泥漿體中水分蒸發或擴

散，以致體積收縮的一種行為，這種收縮發生在終凝以後，水量多寡為乾燥收縮的主要因子，水泥漿體中所含水量愈低，乾縮值會愈低。本研究所設計配比相同強度不同高爐石粉飛灰添加量的用水量皆相同，故乾縮值差異不大。再比較使用卜作嵐材料對乾縮之影響，純水泥漿水化速度較快，水化產生之 C-S-H 膠體在一般濕度養護下，微結構水份較快失去，相對會有較快乾縮發生。而其他組因有添加較高量的高爐石粉及飛灰，水化速度較慢，而氫氧化鈣與高爐石粉及飛灰產生之卜作嵐反應速度較慢，C-S-H 膠體水分散失慢，因此乾縮值會略低於純水泥。而 420kgf/cm² 的用水量低於 350kgf/cm²，所以乾縮值較低。



資料來源：本研究試驗整理

圖 5.6.2-1 設計強度 350 kgf/cm² 乾縮圖

資料來源：本研究試驗整理

圖 5.6.2-2 設計強度 420 kgf/cm² 乾縮圖

5.6.3 潛變試驗

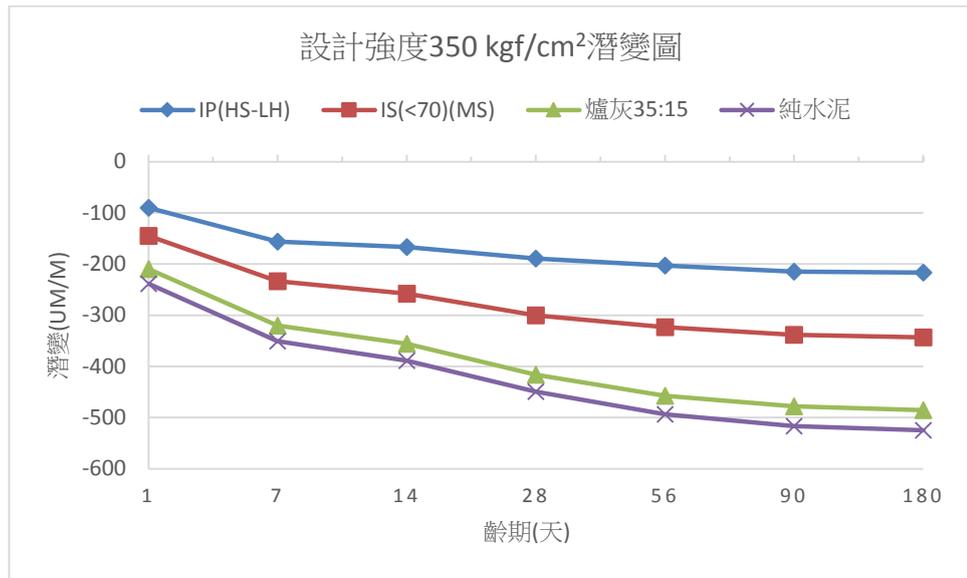
混凝土潛變為混凝土承受載重下，隨時間長期變形的一種擴散行為，會影響混凝土長期性能及耐久性質。潛變與乾縮類似，但主要仍受到作用力的影響。潛變如果設計不當，沒有加以控制的話，可能會損害結構的安全性，而在高層建築偏心加載柱和大跨距的橋梁，潛變變形會導致結構構件過度撓曲、偏轉、或其它安全性問題。

潛變試驗測試結果顯示，設計強度 350 kgf/cm^2 經過 7 天後有添加爐灰比例 35:15 潛變值比純水泥要來的低，而 IS(<70)(MS)與 IP(HS-LH)潛變值相差不多，但 IS(<70)(MS)混合水泥潛變值較大，則 IP(HS-LH)混合水泥潛變值緩慢上升，較無明顯差異，兩者皆較純水泥為低。經過 90 天與 180 天的長期間齡期下，純水泥潛變值依然上升，而有添加爐灰比例 35:15 潛變值緩慢上升，而 IS(<70)(MS)與 IP(HS-LH)混合水泥潛變值趨於平緩狀態。180 天時潛變值以純水泥為最大，其次為爐灰 35:15，再其次為混合水泥 IS(<70)(MS)型，最佳為混合水泥 IP(HS-LH)型。

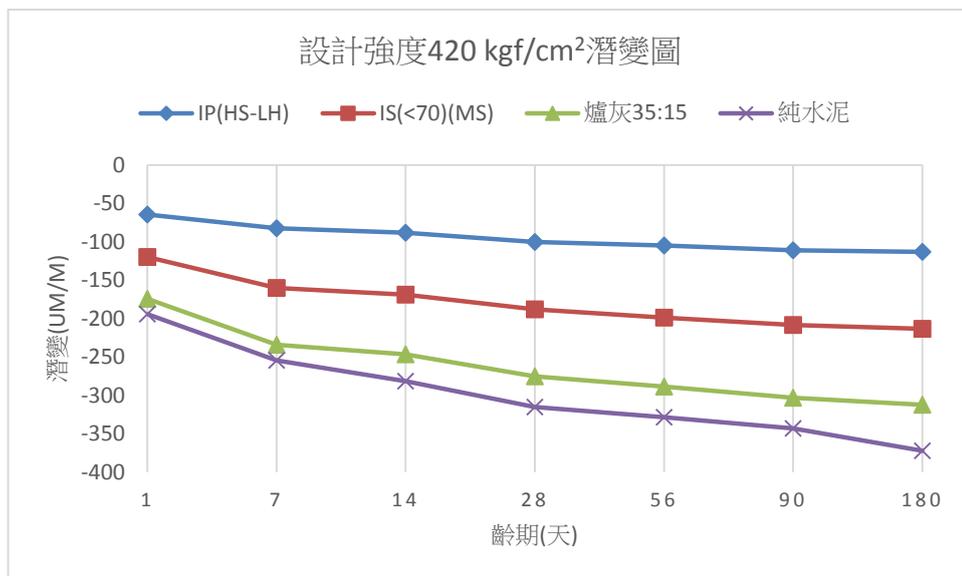
設計強度 420 kgf/cm^2 的潛變試驗結果與 350 kgf/cm^2 相似，180 天時潛變值以純水泥為最大，其次為爐灰 35:15，再其次為混合水泥 IS(<70)(MS)型，最佳為混合水泥 IP(HS-LH)型。

有關不同高爐石粉飛灰添加比例與混合水泥的潛變試驗結果詳圖 5.6.3-1 及圖 5.6.3-2。

依據「混凝土性質與行為」(黃兆龍, 2002)[114]一書第拾柒章貳、混凝土的體積變化 五、混凝土潛變該節指出，潛變為混凝土承受一持續荷重隨時間持續的變形，影響因素包含作用力、水灰比、水膠比、養護條件、溫度及配比等。細探水泥組成份對潛變的影響，C3A 的水化會產生劇烈的崩解反應，既使水泥中有添加石膏仍無法完全紓解這種「崩解作用」，雖然在水泥中 C3A 含量在 10%左右，但其物理化學作用不容忽視。C3S 之水化會強化微結構，使混凝土組織更強，正面減少潛變的發生。因此第 I 型普通水泥比第 III 型早強水泥有較高之潛變量，而低熱水泥成分中，含有高爐石粉或卜作嵐材料，則因為高爐石粉會斥水及影響早期強度而提高潛變量，主要因卜作嵐材料等細緻化孔隙，而會增加毛細管張力，所以利用高爐石粉或飛灰等卜作嵐材料填塞骨材空隙，使混凝土更緻密。自然會減少潛變的量。



資料來源：本研究試驗整理

圖 5.6.3-1 設計強度 350 kgf/cm² 潛變圖

資料來源：本研究試驗整理

圖 5.6.3-2 設計強度 420 kgf/cm² 潛變圖

5.7 施工影響評估

混凝土使用爐石飛灰雖然有助於提升長期強度及耐久性，但凝結時間確比純水泥要長，添加比例愈高凝結時間愈慢，影響拆模時間，茲就施工影響評估如下。

一、依交通部公路總局施工說明書第 03110 章場鑄結構混凝土用模板第 3.2.4 節之規定，最少拆模時間如表 5.7-1。

柱、牆及梁之不做支撐側模最少拆模時間為 24 小時，雙向欄柵板不影響支撐

之盤模最少拆模時間分別為 3 天(75 cm 以下)及 4 天(大於 75 cm)。由於此模板行為不負擔載重，依 5.4.1 節初終凝試驗結果皆在 24 小時內，故此構件之模板拆模時間應不受爐石飛灰添加比例之影響，亦不影響施工工期。

單向板淨跨距小於 3 m 之構件，最少拆模時間為 4 天，淨跨距 3 m 至 6 m 之構件最少拆模時間為 7 天，淨跨距大於 6 m 之構件最少拆模時間為 10 天。拱模最少拆模時間為 14 天，欄柵肋梁、小梁及大梁底模淨跨距小於 3 m 之最少拆模時間為 7 天，淨跨距 3 m 至 6 m 之最少拆模時間為 14 天，淨跨距大於 6 m 之最少拆模時間為 21 天，惟規範中並未規定混凝土最低拆模強度，故另依內政部營建署「結構混凝土施工規範」[83]第 4.7.5 節解說之建議「除經監造者許可外，通常版或梁拆除模板支撐時，工地養護試體強度不得低於設計之規定強度之 70%。」故依 5.5.2 節抗壓強度試驗結果，推估不同爐石飛灰添加比例之混凝土配比達設計強度 70% 之齡期時間，已確認是否可滿足拆模時間之要求。

設計強度 210 kgf/cm^2 之 70% 強度為 147 kgf/cm^2 ，依圖 5.5.2-1 檢核結果純水泥需 3 天齡期，爐灰添加比例 25:10 組需 5 天齡期，IS(<70)(MS)組需 5 天，爐灰添加比例 25:10 組需 6 天齡期，IP(HS-LH)組需 7 天。

設計強度 280 kgf/cm^2 之 70% 強度為 196 kgf/cm^2 ，依圖 5.5.2-3 檢核結果純水泥需 3 天齡期，爐灰添加比例 25:10 組需 5 天齡期，IS(<70)(MS)組需 4 天，爐灰添加比例 35:15 組需 6 天齡期，IP(HS-LH)組需 7 天。

設計強度 350 kgf/cm^2 之 70% 強度為 245 kgf/cm^2 ，依圖 5.5.2-5 檢核結果純水泥需 3 天齡期，爐灰添加比例 25:10 組需 5 天齡期，IS(<70)(MS)組需 5 天，爐灰添加比例 35:15 組需 6 天齡期，IP(HS-LH)組需 7 天。

查機關主辦西濱快速道路 WH10-B 標所使用之混凝土配比爐石飛灰比例為 25% 及 10%，若工程改採用混合水泥 IS(<70)(MS)型則達 70% 強度之齡期一樣，不影響拆模時間，若工程改採用爐石飛灰比例 35% 及 15% 配比，則達 70% 強度之齡期會多一天，若工程改採用混合水泥 IP(HS-LH)型則達 70% 強度之齡期會多兩天。惟不同設計強度不同爐石飛灰添加比例之配比，皆可在 7 天內達設計強度的 70%，在達規範要求的拆模時間時其混凝土強度皆已超過 70%，故不影響施工工期。僅淨跨距小於 3m 單向板之拆模時間較短需會略有不足，但由於該工項構件在機關主辦工程極少見，故僅需特別注意即可。

表 5.7-1 規範 03110 最少拆模時間

構件名稱	最少拆模時間	
柱、牆及梁之不做支撐側模	24 小時	
雙向欄柵板不影響支撐之盤模 75cm	3 天	
以下大於 75cm	4 天	
	活載重不大於靜載重	活載重大於靜載重
單向板		
淨跨距小於 3m	4 天	3 天
淨跨距 3m 至 6m	7 天	4 天
淨跨距大於 6m	10 天	7 天
拱模	14 天	7 天
欄柵肋梁、小梁及大梁底模		
淨跨距小於 3m	7 天	4 天
淨跨距 3m 至 6m	14 天	7 天
淨跨距大於 6m	21 天	14 天
雙向板	依施工計畫辦理	
後拉預力板系統	全部預力施加完成後	

添加爐石飛灰對預力橋梁構件施預力時間之影響，預力橋梁設計強度為 420 kgf/cm²，依設計圖說施加預力之最低強度為 336 kgf/cm²，依圖 5.5.2-9 抗壓強度曲線分析，純水泥配比約 3 天達最低強度 336 kgf/cm²，而爐石飛灰 35:15 組則需 5 天齡期，較原排定工期多 2 天。因此建議有施加預力及早期強度需求者，仍應以純水泥配比為主。

5.8 性能評估小結

依本計劃對不同膠結材料所製成的混凝土評估各項品質指標試驗成果，如表 5.8-1 所示，○○表示性能指標明顯優於純水泥，○表示性能指標優於純水泥，△表示性能指標較純水泥稍好，×表示性能指標略差於純水泥，××表示性能指標明顯較純水泥差。綜合論述結果如下。

- (1) 在初終凝部分，高爐石粉飛灰添加愈多、初終凝時間愈緩慢，不論高爐石粉飛灰或混合水泥都會影響拆模時間，又以 IP(HS-LH)要特別注意。水合熱及熱壓膨脹試驗部分剛好相反，高爐石粉飛灰添加愈多，水合熱愈低、熱壓膨脹量也愈小，有助於體積穩定性，降低裂縫風險，其中又以混合水泥的整體性能表現最佳。

- (2) 不同高爐石粉飛灰添加量的混凝土性質表現，坍度皆可符合設計要求，具有良好工作性。純水泥配比早期強度發展快，但 90 天強度僅比 28 天强度高 20%，高爐石粉飛灰 25:10、高爐石粉飛灰 35:10、混合水泥 IS(<70)(MS) 型早期強度不若純水泥，高爐石粉飛灰添加愈多發展愈慢，其中以混合水泥 IP(HS-LH) 早期強度發展最為緩慢。爐石飛灰組在 28 天時強度大致已與純水泥強度相同，在 90 天時多超過 28 天的 30%，亦比純水泥強度更高，可知添加高爐石粉飛灰對混凝土長期強度有正面助益。其中以混合水泥 IP(HS-LH) 的長期強度發展率最高，各配比之強度發展皆有類似結果。另各組配比彈性模數相差不大，原彈性模數計算方式可適用。至於 420 kgf/cm² 早強試驗部份，純水泥在 3 天即可達 80% 的設計強度(336 kgf/cm²)，達施加預力之標準，高爐石粉飛灰 50% 配比強度在 7 天方達 80% 設計強度，因此若採用高爐石粉飛灰 50% 之混凝土配比，則施加預力等待時間會略長於純水泥。
- (3) 耐久性部分，混合水泥 IP(HS-LH) 型及 IS(<70)(MS) 型因主要性能為抗硫酸鹽，所以在硫酸鹽侵時膨脹試驗部分表現良好，其次為高爐石粉飛灰 25:10 及高爐石粉飛灰 35:10，純水泥膨脹率最高。
- (4) 不同高爐石粉飛灰或使用混合水泥的混凝土乾縮量及潛變量差異不大，水泥略為偏高，可見添加高爐石粉飛灰有助於體積穩定性。
- (5) 以電弧爐氧化矽取代細粒料拌製混凝土與一般天然砂石混凝土的坍度、強度、彈性係數等性質相近，雖性能表現可符合設計要求，然電弧爐氧化矽細粒料進行安定性試驗時，仍有膨脹反應，因此應須更長時間作安定化處理。
- (6) 以飛灰取代 5% 及 10% 細粒料的混凝土試驗結果，坍度可符合現場工地要求，然而在 28 天強度及 56 天強度卻反而比原對照組配比高爐石粉飛灰 50% 組要低，雖仍可達設計強度，但高量的飛灰對強度效益已不明顯，此涉及用水量、化學摻料用量等之配比調整，仍須經更多試驗加以驗證。

針對工程設計配比之策略與使用範圍部份，參考淡江大橋及其連絡道路 2K+606~5+000、7K+000~8K165 路段新建工程設計圖說中關於各橋梁部位之混凝土抗壓強度要求，重力式擋土牆適用 210 kgf/cm² 混凝土，建議可以使用



IS(<70)(MS)型混合水泥或高爐石粉飛灰比例可使用達 35% 及 15%。

分隔島、橋護欄、緣石所用混凝土適用 280 kgf/cm^2 設計強度，因較無拆模時間考量，建議可以使用 IS(<70)(MS)型混合水泥或高爐石粉飛灰比例可使用達 35% 及 15%。

場鑄基樁、箱涵、擋土牆等所用之混凝土適用 350 kgf/cm^2 設計強度，因位於地下與土壤接觸需有抗硫酸鹽考量，建議可以使用 IS(<70)(MS)型混合水泥或高爐石粉飛灰比例可使用達 35% 及 15% 型混合水泥，若於臨海結構則建議使用 IP(HS-LH)型混合水泥，以提供更佳的耐環境侵蝕能力。橋墩、橋墩基礎、橋台所用之混凝土設計強度亦為 350 kgf/cm^2 ，且由於橋梁結構所用鋼筋密集，應採用自充填混凝土以提升施工品質，膠結材料比例同樣建議可以使用 IS(<70)(MS)型混合水泥或高爐石粉飛灰比例可使用達 35% 及 15%，若於臨海結構或為巨積混凝土結構時，則建議使用 IP(HS-LH)型混合水泥，以提供更佳的耐環境侵蝕能力、更低心溫及降低溫度裂縫的發生。

箱型橋梁因有拉預力需求，故設計強度為 420 kgf/cm^2 ，另設計圖說多會規定抗壓強度應達 336 kgf/cm^2 始可先拉預力，因有規定早期強度及施工進度考量，故建議仍使用純水泥或爐灰 25:10。

就本計劃試驗結果可回饋業主機關作為後續工程設計之參考，惟仍建議後續持續進行長期試驗研究，尤其是乾縮潛變等與結構穩定性相關之性質，累積更多試驗結果後更具有參考價值。



表 5.8-1 綠色材料工能安全性比較表

	純水泥(基準)	爐灰 25:10	爐灰 35:15	IS(<70)(MS)	IP(HS-LH)
初終凝	-	× 時間拉長	× 時間拉長	×× 時間更長	×× 時間更長
水合熱	-	△ 略降	○ 降低較多	○○ 明顯降低	○○ 明顯降低
熱壓膨脹	-	△ 略降	○ 降低較多	○○ 明顯降低	○○ 明顯降低
坍度	-	△ 可滿足工作性	△ 可滿足工作性	△ 可滿足工作性	△ 可滿足工作性
早期強度	-	△ 早期略低	× 早期較低	× 早期較低	×× 早期很低
28 天強度		△ 28 天相近	△ 28 天相近	△ 28 天相近	× 28 天略低
90 天強度		○ 90 天超過	○○ 90 天超過	○○ 90 天超過	○ 90 天超過
彈性模數	-	△ 依設計公式	△ 依設計公式	△ 依設計公式	△ 依設計公式
抗硫酸鹽	-	△ 略降	○ 降低較多	○○ 明顯降低	○○ 明顯降低
乾縮	-	△ 相近	△ 相近	△ 相近	△ 相近
潛變	-	△ 相近	△ 相近	△ 相近	△ 相近

資料來源：本研究試驗整理

第六章 評估綠色材料之道路橋梁結構實驗

6.1 結構柱試體規劃

6.1.1 試體設計

本研究在材料試驗結束後，利用研發之綠色混凝土材料，於國立臺灣科技大學結構實驗室進行結構實驗，總共測試四組試體，每座試體均由三個部分所組成，分別是頂部混凝土塊、柱試體、與底部混凝土塊，其中頂部混凝土塊尺寸為 1000 mm × 1280 mm × 600 mm(長×寬×高)，主要用來施加往復水平載重以及軸壓，柱試體部分淨跨距為 1400 mm，橫斷面為 400 mm × 400 mm，底部混凝土塊尺寸為 1400 mm × 1400 mm × 800 mm(長×寬×高)，主要用來固定試體於強力樓版上。四組試體鋼筋配置完全一致，如圖 6.2.1-1 所示，縱向鋼筋使用為 8 支 SD420(標稱強度 420 MPa) D25 鋼筋，橫向鋼筋使用 SD420 之 D16 鋼筋、間距 100 mm，體保護層 30 mm。主要測試變數為試體混凝土材料。

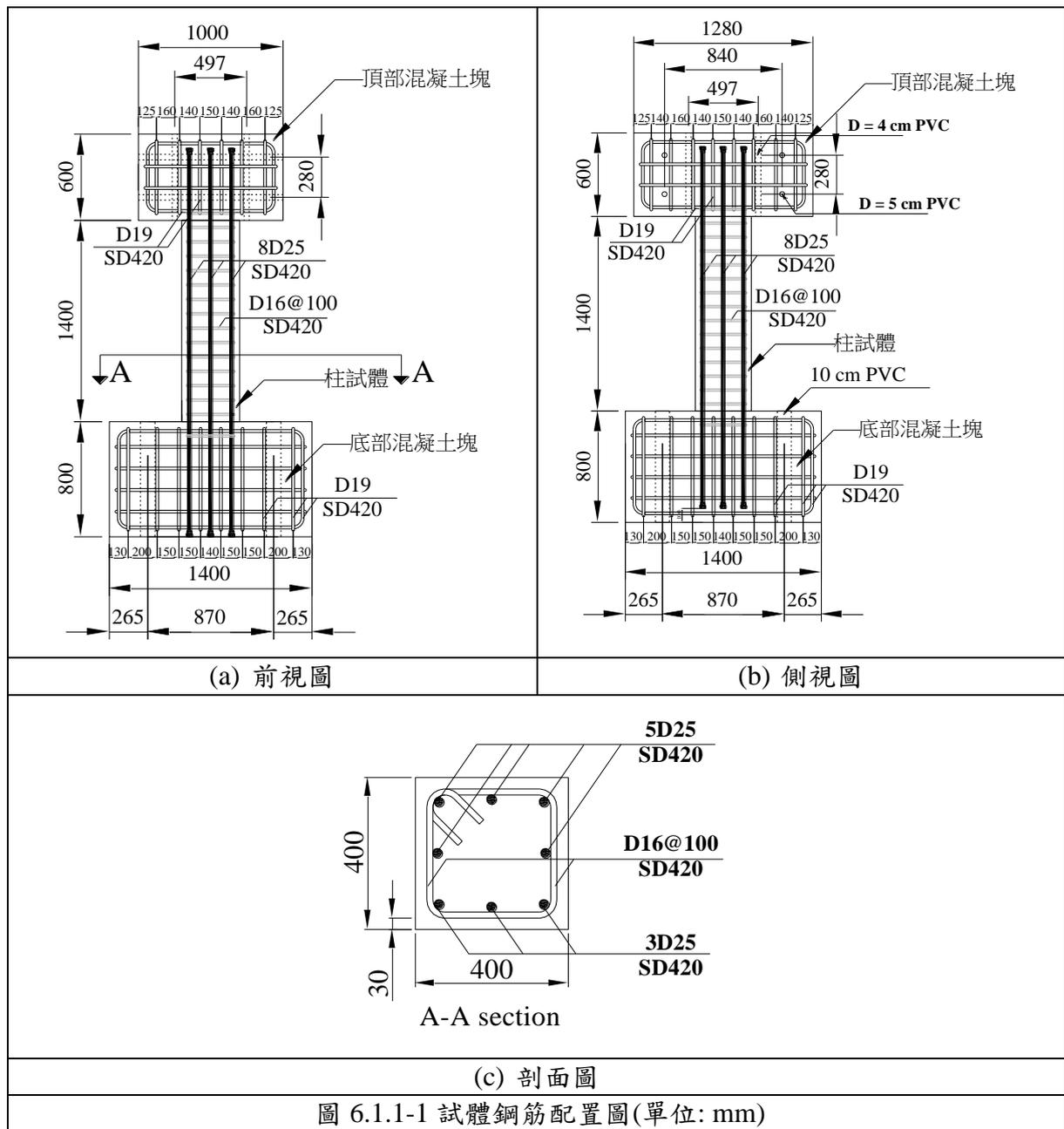
本試驗所測試之試體名稱分別為 S_C、S_SF50、S_IS(<70)(MS)及 S_IP(HS-LH)，設計標稱混凝土強度皆為 35 MPa，其中 S_C 代表一般型水泥配比混凝土，為控制組試體，S_SF50 混凝土配比與試體 S_C 相同，惟試體 S_SF50 內 50%之膠結材料以 35%之高爐石粉及 15%之飛灰取代，試體 S_IS(<70)(MS)及試體 S_IP(HS-LH)使用混合水泥混凝土，該混合水泥由中聯提供。

本次規劃之四組試體於台科大結構實驗室組模綁鋼筋，由龍形預拌廠依設計配比之混凝土出貨澆置，配比表如表 6.2.1-1，所用原物料的廠牌、型別、來源皆與前章混凝土試驗相同，預拌廠抵達現場後經坍度檢驗符合規定後，卸料於泵送車經輸送管進行澆置，期間皆施以振動棒搗實，澆置現況詳附錄三。

表 6.1.1-1 試驗柱配比

試體	編號	設計強度 kgf/cm ²	水膠比 w/cm	坍度 cm	最大粒 徑 mm	水泥 kg	型別	高爐 石粉 kg	飛灰 kg	細粒料 kg	粗粒料 kg	水 kg	化學 摻料 kg
S_C	11	350	0.40	18	25	450	I型	0	0	788	939	178	3.6
S_SF50	13	350	0.40	18	25	225	I型	157	68	770	919	178	3.6
S_IS(<70)(MS)	14	350	0.40	18	25	450	IS	0	0	788	939	178	3.6
S_IP(HS-LH)	15	350	0.40	18	25	450	IP	0	0	788	939	178	3.6

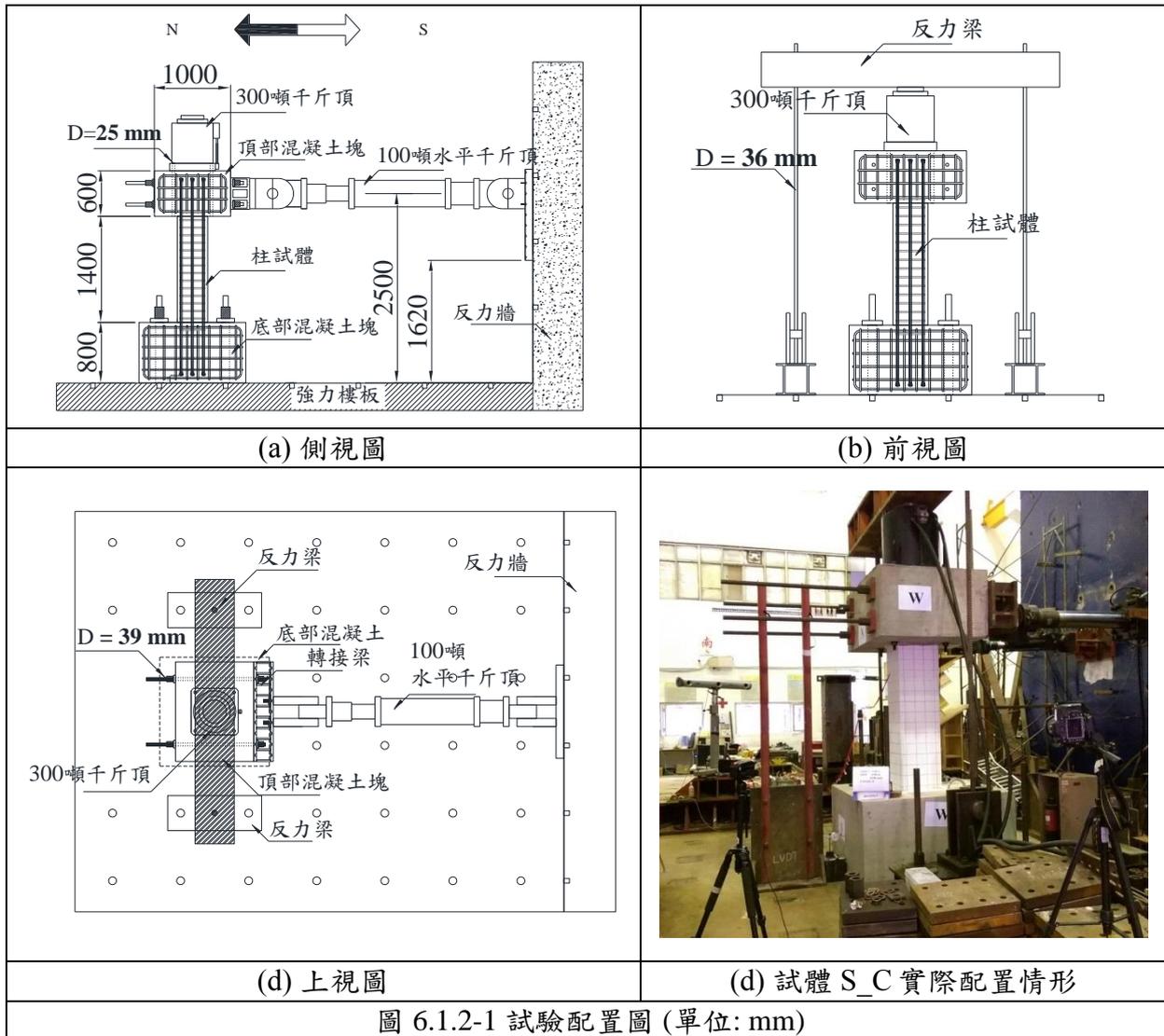
註：IS 為 IS(<70)(MS)型混合水泥、IP 為 IP (HS-LH)型混合水泥



6.1.2 試驗配置

試體實驗配置如圖 6.1.2-1 所示，水平往復位移主要由水平千斤頂提供，且測試過程中水平千斤頂以位移控制、加載速度控制在 1 mm/sec 內，其水平載重歷時如圖 6.1.2-2 與表 6.1.2-1 所示，每一目標位移下從事三次往復載重，正值代表千斤頂往北向移動，層間位移轉角(Drift)係定義為千斤頂水平移動距離除以橋柱剪力跨距(1700 mm)，剪力跨距係由水平千斤頂中心高度到底部混凝土塊頂之距離，使用水平千斤頂 100 噸 1 支。除水平往復位移外，為模擬橋柱垂直載重，使用一 300 噸千斤頂施加一固定軸力於頂部混凝土塊上方，該千斤頂以力量控制，軸力大小於

測試過程中固定在 $0.1A_gf'_c$ ，其中 A_g 表示試體斷面積 (400×400 mm)， f'_c 為試體測試當天所得之混凝土圓柱試體平均壓應力，該壓應力由三組混凝土標準圓柱試體 (150×300 mm) 平均求得。底部混凝土塊主要提供試體固接邊界條件，使用四支預力鋼棒將試體固定於強力樓版上，每支鋼棒施加約 70 噸預力，此佈置會使試體同時承受固定軸壓以及單曲率側向變形，與現實橋柱受力情形一致。



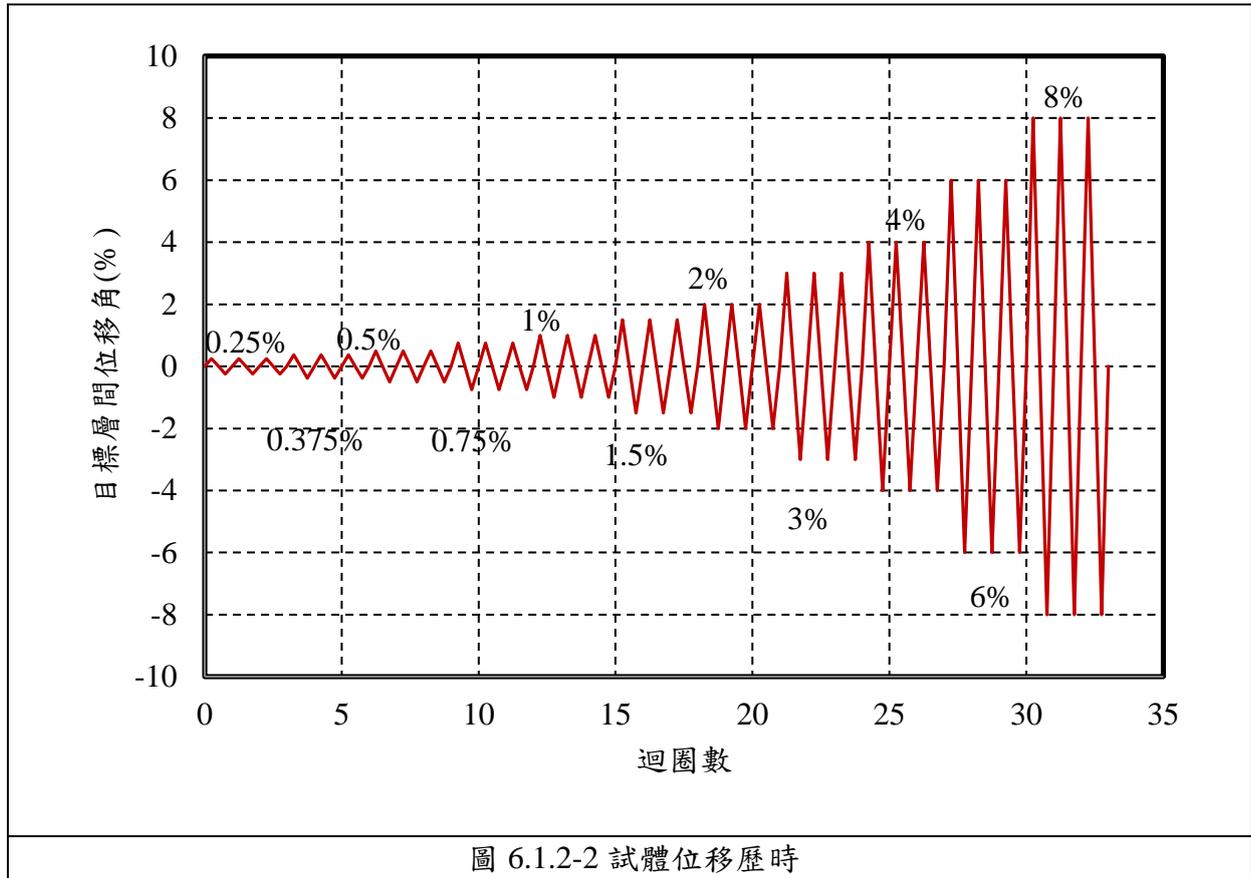


圖 6.1.2-2 試體位移歷時

表 6.1.2-1 試體目標層間位移表

目標層間位移轉角 Drift (%)	往復載重次數	剪力跨距 (mm)	目標水平位移量 (mm)
0	3	1700	0
0.25	3	1700	4.250
0.375	3	1700	6.375
0.5	3	1700	8.500
0.75	3	1700	12.750
1	3	1700	17.0
1.5	3	1700	25.5
2	3	1700	34.0
3	3	1700	51.0
4	3	1700	68.0
6	3	1700	102.0
8	3	1700	136.0
10	1	1700	170.0

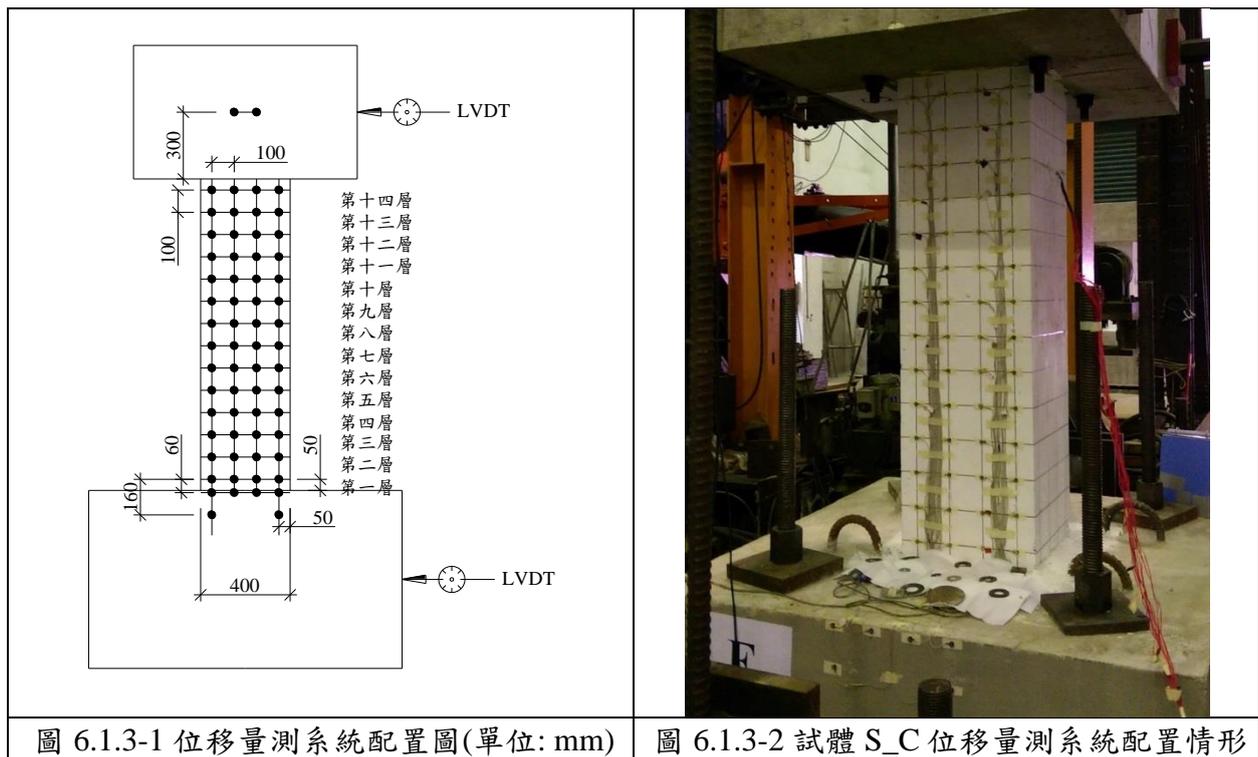
6.1.3 試驗量測系統配置

(1) 裂縫:

試體在測試過程中會產生裂縫，研究團隊紀錄在不同水平位移量下裂縫寬度、繪製裂縫數量及位置，以提供後續服務性能參考。

(2) 位移測量:

由於測量儀器特性不同，測試過程中試體位移量使用二種不同儀器作紀錄，其中兩組線性位移計(LVDT)分別架設於頂部混凝土塊(水平力量施加點之中央高度)與底部混凝土塊(中央高度)，分別用來量測頂部與底部混凝土塊之水平位移量。除了使用 LVDT，實驗還使用光學感應器(Optical System)來監測試體外部變形量，光學感應器可在設定的頻率下紀錄感應元件(Maker)三維空間座標，藉由感應元件裝置於試體不同位置，可以計算試體局部變形量，本實驗配置之光學感應原件位置如圖 6.2.3-1 所示，底部混凝土塊使用 6 顆感應元件，可以求得底部混凝土塊水平位移與轉角，試體使用 56 顆感應元件，每列 4 顆總共 14 列，第一列元件置於底部混凝土塊頂部以上 50 mm 處，之後每列元件間距 100 mm，頂部混凝土塊使用 2 顆感應元件，高度與水平千斤頂位置相同，圖 6.2.3-2 為實際配置情形，於試體 S_C 在測試前所拍攝之照片。



(3) 內部鋼筋應變量測:

內部鋼筋應變量使用應變計進行量測，透過電阻值的變化計算出鋼筋受力狀態下之應變，本實驗於每組試體上裝設 12 組應變計，應變計位置如圖 6.1.3-3(a) 所示，實際應變計配置如圖 6.1.3-3(b) 所示，該照片於試體 S₋IP(HS-LH) 封模前拍攝。

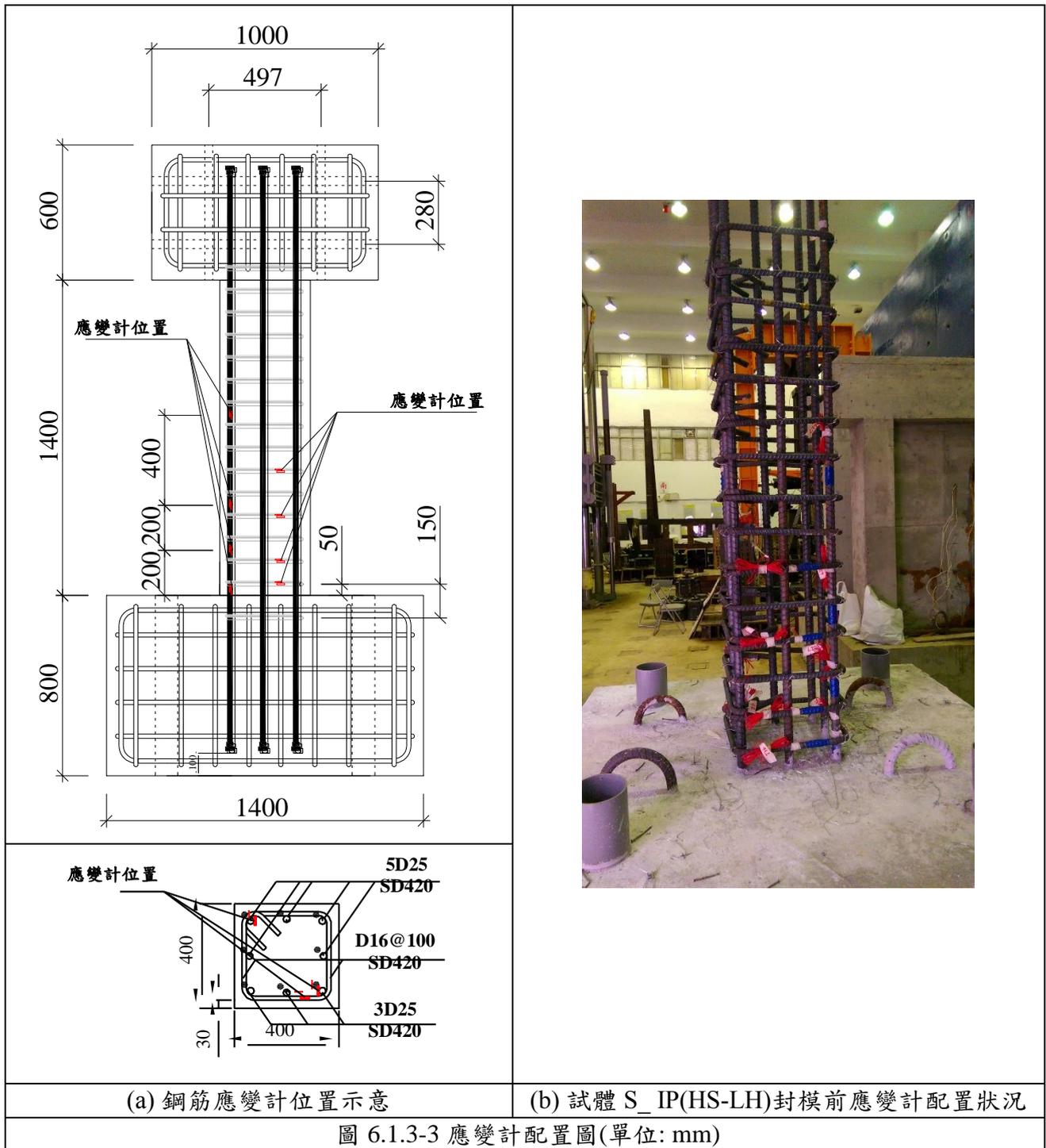


圖 6.1.3-3 應變計配置圖(單位: mm)

6.1.4 混凝土溫度發展

本次柱的混凝土配比設計中水泥用量已超過 360 kg/m^3 ，且混凝土橋梁工程常見的筏基、橋台、橋墩尺寸經常超過2公尺，依ACI301定義已被歸類於巨積混凝土，需特別注意水化熱所引起體積不穩定的問題。參考工程會施工綱要規範第 03700 章巨積混凝土的主要規定「...巨積混凝土之澆置須於澆置前提送施工澆置計畫書送工司核可後始得進行澆置施工，澆置時須埋設溫度計於混凝土內，量測澆置當時混凝土之溫度及自動觀測澆置後(連續7天)混凝土內之溫度，拌合場應依據量測結果採取適當措施，使澆置後混凝土心溫不大於 70°C ，及心表溫差不大於 20°C 。控制溫度之措施經工程司認可後方可繼續其他巨積混凝土之澆置。」顯見混凝土溫度發展管控之重要性。

因此本團隊特於混凝土柱頂部內部鋼筋上埋置溫度熱電偶線，配合現場鋼筋綁紮時間於混凝土澆置前約 3~5 天前往埋設溫度感測線，埋設完成後並安裝自動溫度記錄器進行測試，瞭解不同高爐石粉飛灰比例、各型混合水泥等溫度發展與純水泥混凝土之差異。溫度量測點如圖 6.1.4-1，#1 黏貼於表層鋼筋，#2 黏貼於中心點，#3 黏貼於底層鋼筋，#4 黏貼於中心偏外側鋼筋，#5 黏貼於側向鋼筋中間，#6 為室溫，量測產出數據為柱頂部中心溫度及表溫及心溫差距。本計劃使用之溫度記錄器廠牌為竣豐公司所代理 prova 800 多功能數據型溫度記錄器，可同時紀錄 8 點溫度，最小讀取時間間距為 1 秒，最小讀取溫度單位為 0.1°C ，溫度記錄器與電腦連線後可擷取所量測之數據，經 Excel 轉換繪製成圖形後進行判讀。

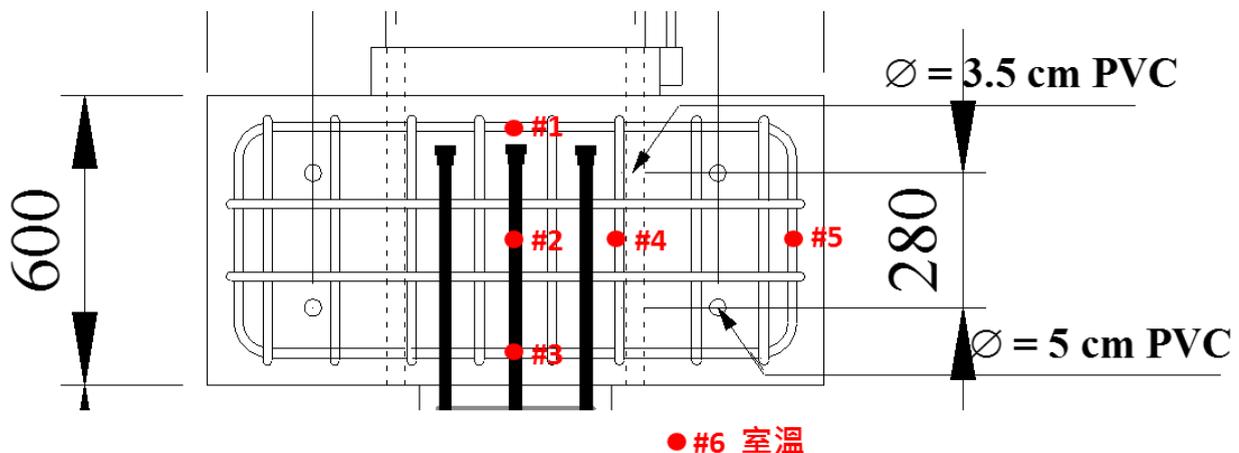
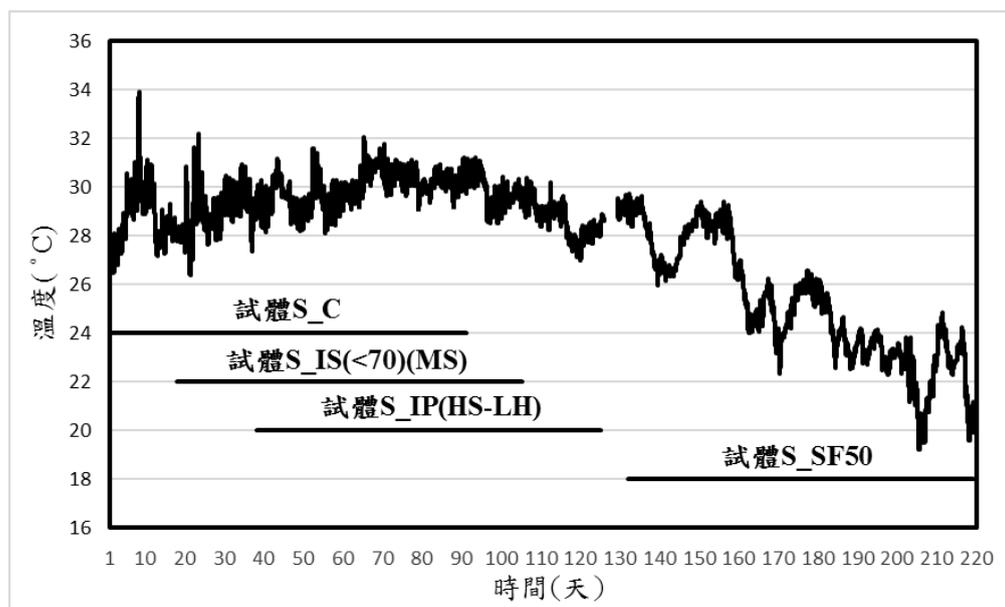


圖 6.1.4-1 混凝土溫度發展量測位置

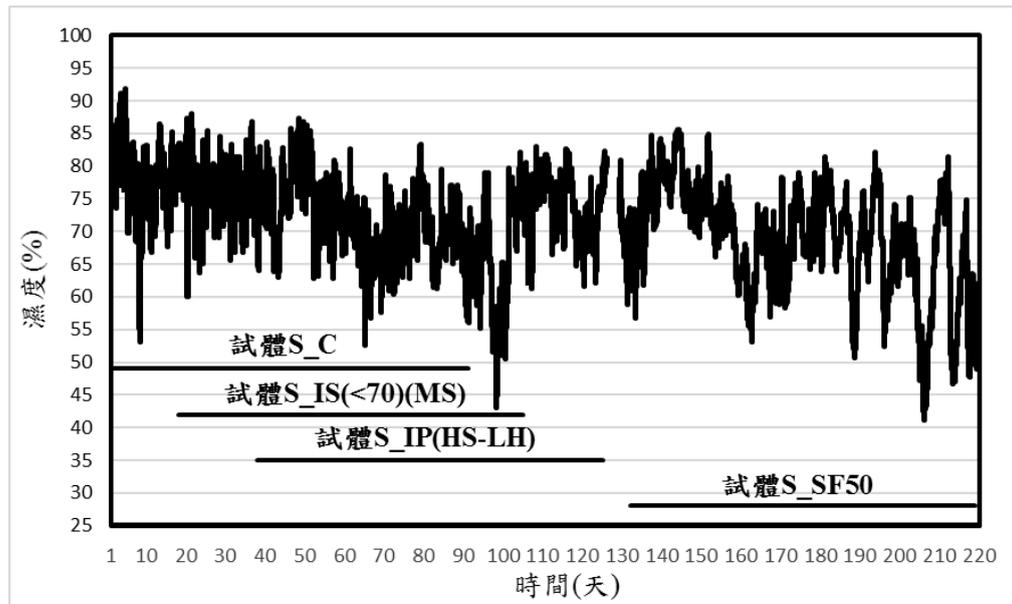
6.2 試驗結果分析

6.2.1 混凝土強度試驗

混凝土強度試驗是由抗壓試驗機進行單向加載，試體混凝土設計強度為 35MPa，每座試體分兩次灌漿，第一次灌漿主要為試體之底部混凝土塊，第二次灌漿為柱試體及頂部混凝土塊，其中四組試體底部混凝土塊灌漿材料均來自於同一部混凝土車，柱試體及頂部混凝土塊部分則因試體混凝土材料不同而於不同天灌漿，其中試體 S_SF50 及試體 S_IS(<70)(MS)試體因於澆注時工作性不佳，加入強塑劑，該強塑劑名稱為 SikaPlast25，試體 S_SF50 加入約 350c.c.，產品批號為 L105-1248，而試體 S_IS(<70)(MS)加入約 580c.c.，產品批號為 L105-0808。每組試體底部混凝土塊取樣 3 組標準混凝土圓柱試體(15 cm × 30 cm)、而試體本身取樣 15 組標準混凝土圓柱試體，放置於試驗場空氣養護，環境溫度及濕度如圖 6.2.1-1 所示，收集頻率為每五分鐘一筆。由於第一組試體 S_SF50 於測試時發生嚴重扭轉變形，研究團隊補作第二組試體，因此其溫度溼度走勢位於圖內末段且與其他試體在養護時間上沒有重疊，之後除了混凝土溫度發展以外，其他測試結果均來自第二組補作試體。柱試體及頂部混凝土塊於特定齡期 3 天、7 天、28 天、56 天，及 90 天(測試齡期)執行抗壓試驗，而底部混凝土塊之試體於測試當天(90 天)執行抗壓試驗。90 天齡期之所有圓柱試體測試結果如表 6.2.1-1 所示，混凝土圓柱試體強度在不同齡期之強度增加趨勢則如圖 6.2.2-2 所示，圖中之值為三組圓柱試體之平均。



(a) 溫度變化



(b) 濕度變化

圖 6.2.1-1 試體養護環境溫溼度圖

表 6.2.1-1 90 天齡期(測試齡期)混凝土圓柱試體抗壓強度

試體名稱	90 天齡期抗壓強度, f'_c (MPa)							
	底部混凝土塊			平均	柱試體及頂部混凝土塊			平均
	1	2	3		1	2	3	
S_C	29.6	30.6	30.9	30.4	41.1	41.1	40.6	40.9
S_SF50	28.1	28.2	30.1	28.8	46.1	48.4	48.0	47.5
S_IS(<70)(MS)	31.3	31.4	31.7	31.5	46.5	47.3	47.3	47.0
S_IP(HS-LH)	31.6	32.2	28.6	30.8	40.2	41.4	41.1	40.9

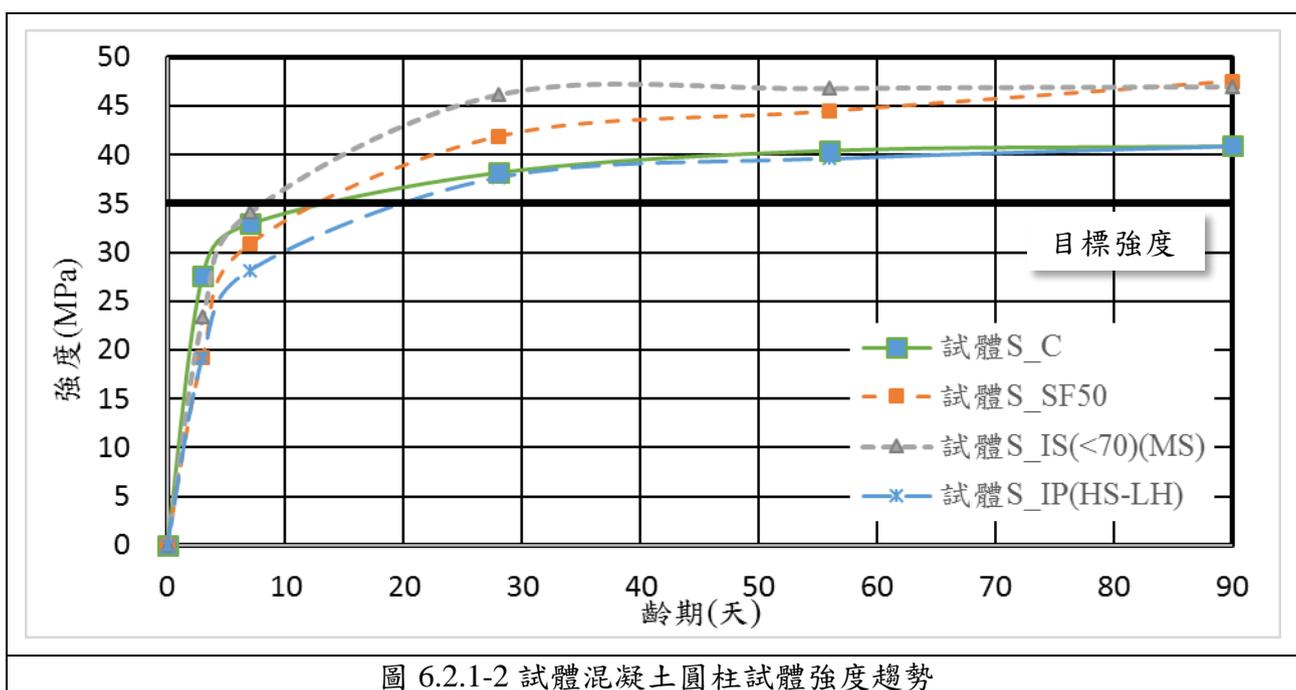


圖 6.2.1-2 試體混凝土圓柱試體強度趨勢

6.2.2 鋼筋拉伸試驗

鋼筋拉伸試驗以萬能試驗機對鋼筋單向加載，搭配光學量測系統(Optical System)及感應元件(Marker)輔助量測鋼筋應變情形，其中黏貼於鋼筋試體上感光元件之距離約 200~203mm，實際測試情形如圖 6.2.2-1 所示。本研究使用三種不同號數 SD420 鋼筋，分別為 D25、D19 及 D16，每組鋼筋各測試三支試體，試體測試結果如圖 6.2.2-2(a)~(c)所示，其中試體 S_SF50 使用之鋼筋與其他試體不同批，分開測試之結果如圖 6.2.2-3(a)~(c)所示，關鍵測試數據則記錄於表 6.2.2-1 內。

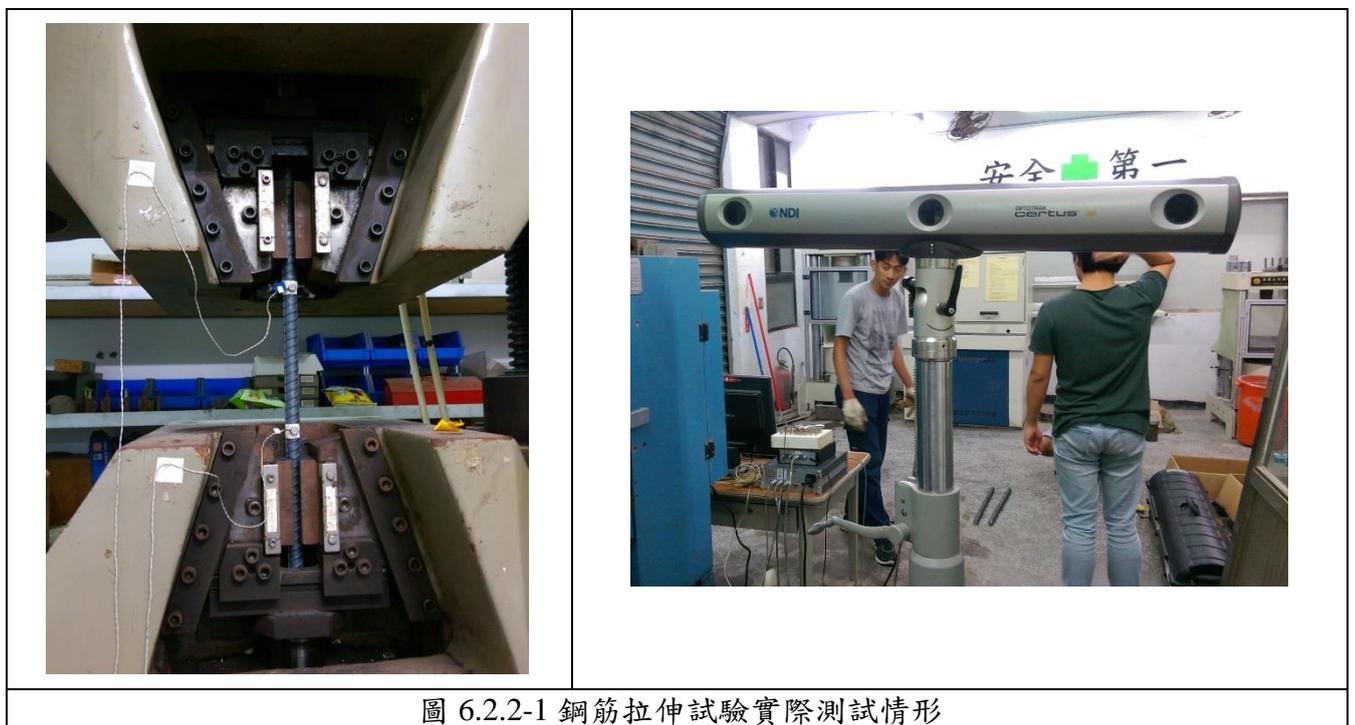
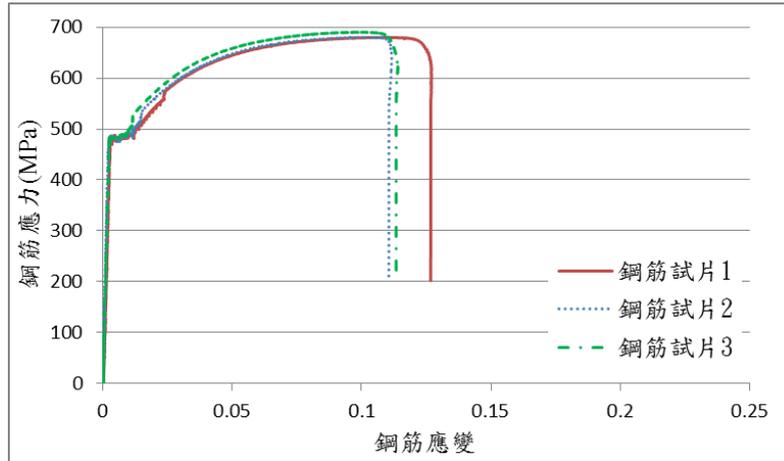
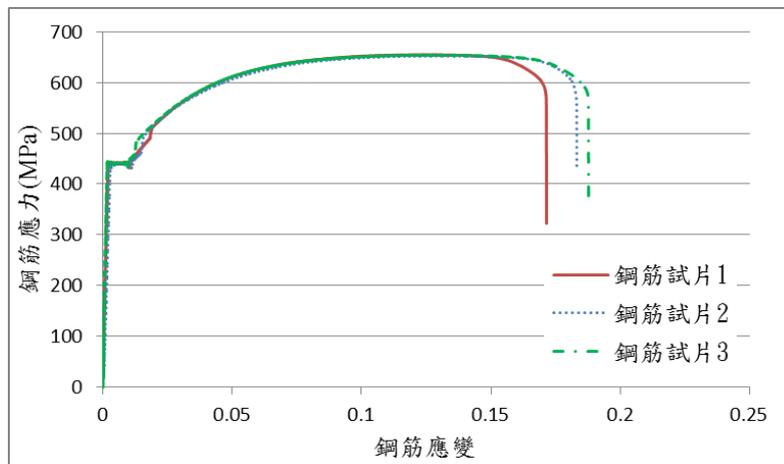


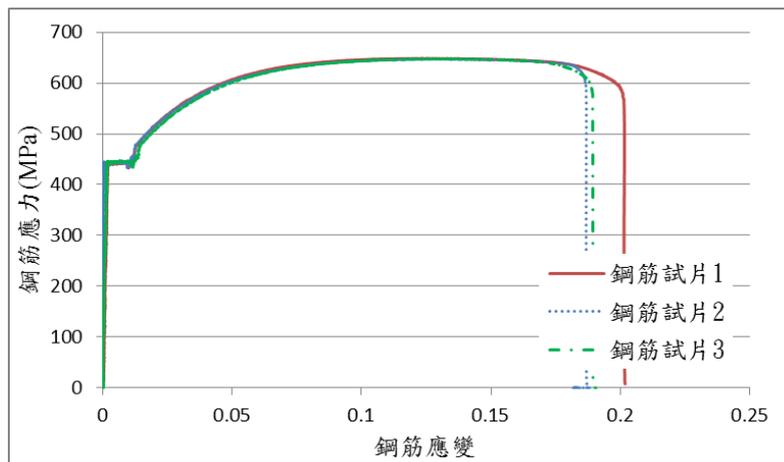
圖 6.2.2-1 鋼筋拉伸試驗實際測試情形



(a) D16 SD420 鋼筋應力應變曲線

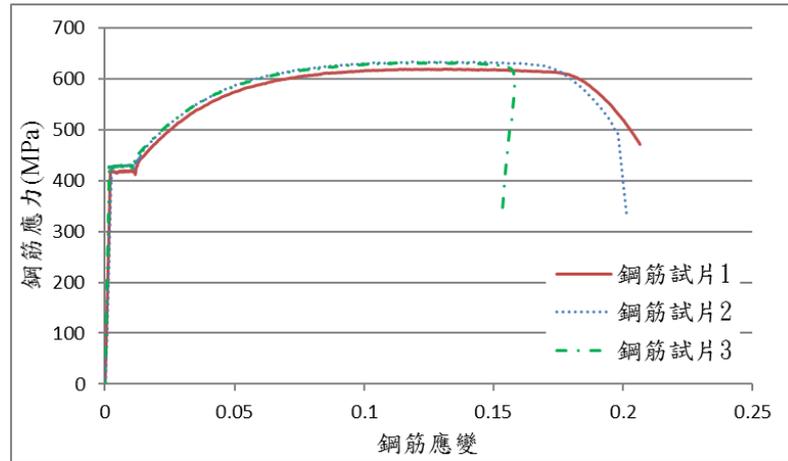


(b) D19 SD420 鋼筋應力應變曲線

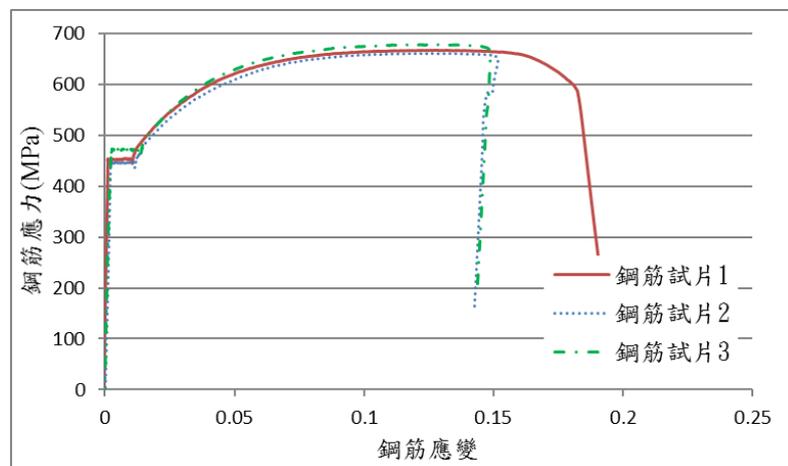


(c) D25 SD420 鋼筋應力應變曲線

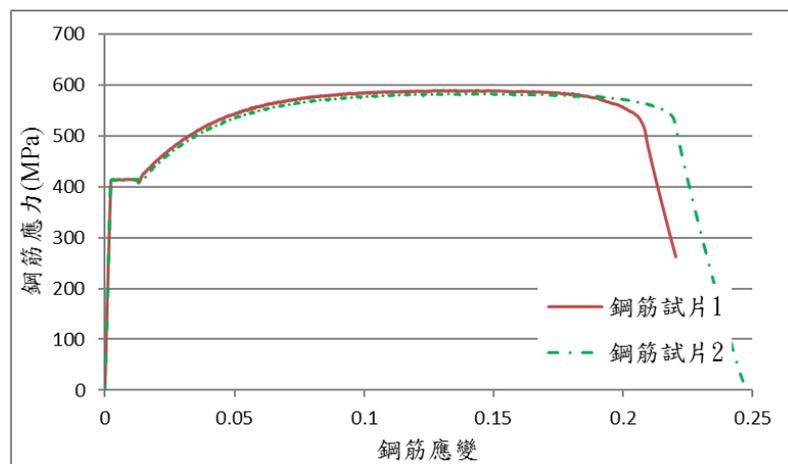
圖 6.2.2-2 試體 S_C、試體 S_IS(<70)(MS) S、試體 IP(HS-LH)鋼筋試片應力應變曲線



(b) D16 SD420 鋼筋應力應變曲線



(c) D19 SD420 鋼筋應力應變曲線



(d) D25 SD420 鋼筋應力應變曲線

圖 6.2.2-3 試體 S_SF50 鋼筋試片應力應變曲線

表 6.2.2-1 鋼筋拉伸試驗結果

試體 S_C、試體 S_IS(<70)(MS) S、試體 IP(HS-LH)鋼筋試片試驗結果									
鋼筋號數	D16			D19			D25		
試體編號	1	2	3	1	2	3	1	2	3
降伏應力 f_y (Mpa)	486.65	487.60	493.53	439.54	435.83	441.65	442.68	443.49	445.99
降伏應變 ϵ_y	0.0024	0.0024	0.0025	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022
極限應力 f_u (MPa)	679.67	680.11	689.99	654.52	652.03	653.87	648.31	646.91	647.39
極限應變 ϵ_u	0.1084	0.1038	0.1005	0.1248	0.1315	0.1274	0.1228	0.1280	0.1266
平均降伏應力 f_y (MPa)	489.26			439.01			444.05		
平均降伏應變 ϵ_y	0.0024			0.0022			0.0022		
平均極限應力 f_u	683.25			653.48			647.53		
試體 S_SF50 鋼筋試片試驗結果									
鋼筋號數	D16			D19			D25		
試體編號	1	2	3	1	2	3	1	2	3
降伏應力 f_y (Mpa)	416.83	428.58	427.63	452.16	446.21	472.20	413.96	412.72	N/A
降伏應變 ϵ_y	0.0021	0.0021	0.0021	0.0023	0.0022	0.0024	0.0021	0.0021	N/A
極限應力 f_u (MPa)	618.94	633.19	631.84	666.89	660.97	678.01	589.48	583.10	N/A
極限應變 ϵ_u	0.1321	0.1188	0.1245	0.1277	0.1262	0.1281	0.1435	0.1432	N/A
平均降伏應力 f_y (MPa)	424.35			456.85			413.34		
平均降伏應變 ϵ_y	0.0021			0.0023			0.0021		
平均極限應力 f_u	627.99			668.62			586.29		

6.2.3 表心溫度量測

四組試體混凝土澆置起隨即記錄各溫度感應點的溫度，試體 S_C 各點的溫度發展曲線如圖 6.2.3-1，表心溫差如圖 6.2.3-2；試體 S_SF50(高爐石粉 35% 飛灰 15%)各點的溫度發展取線如圖 6.2.3-3，表心溫差如圖 6.2.3-4；試體 IS(<70)(MS)各點的溫度發展取線如圖 6.2.3-5，表心溫差如圖 6.2.3-6；試體 IP(HS-LH) 各點的溫度發展取線如圖 6.2.3-7，表心溫差如圖 6.2.3-8。由量測結果可知，最高溫皆為中心點(#2)，最低溫為表面溫度(#1)，彙整不同柱之最高心溫及最高表心溫差如表 6.2.3-1。

表 6.2.3-1 最高溫及表心溫差比較表

試體	類別	最高心溫	發生時間	最高表心溫差
S_C	純水泥	62.6°C	15hr12min	11.7°C
S_SF50	高爐石粉飛灰 50%	57.6°C	24hr5min	9.8°C
S_IS(<70)(MS)	IS(<70)(MS)	57.7°C	21hr6min	10.9°C
S_IP(HS-LH)	IP (HS-LH)	51.4°C	23hr42min	6.8°C

由試驗結果可知，第一根柱因純水泥水化熱高的原因，溫度上升很快，於 15 小時後及達最高溫 62.6°C，而添加高爐石粉飛灰 50% 及使用混合水泥 IS(<70)(MS) 的柱子最高溫即已降至 57.7°C，而發生時間是在 21 小時，至於使用混合水泥 IP (HS-LH) 因其用途為低水合熱，故最高溫僅 51.4°C，最高心表溫差也僅 6.8°C。

橋梁墩柱尺寸動輒超過 1.5 公尺，若以純水泥灌置則勢必導致高的混凝土溫度，由本次試驗結果，添加高爐石粉飛灰確實有助於降低混凝土溫度，添加量愈多效果愈明顯。倘若爐石飛灰已添加至 50% 仍無法滿足規範要求，建議參照工程會第 03700 章巨積混凝土之材料規定，採用低水化熱的混合水泥 IP (HS-LH)，對降低混凝土溫度、維持體積穩定性有良好之成效。

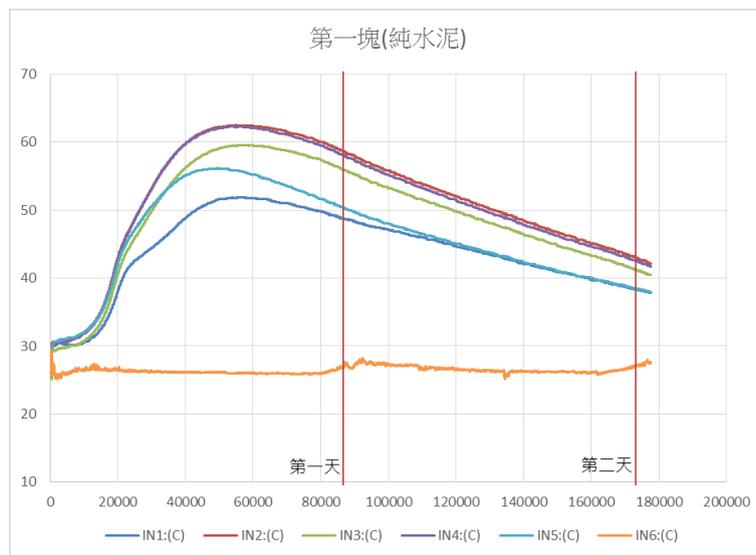


圖 6.2.3-1 試體 S_C 溫度發展曲線

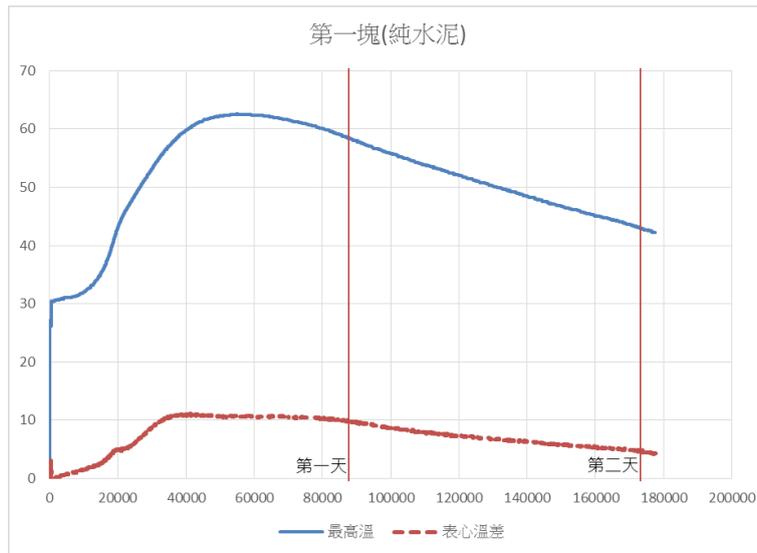


圖 6.2.3-2 試體 S_C 最高溫及表心溫差曲線

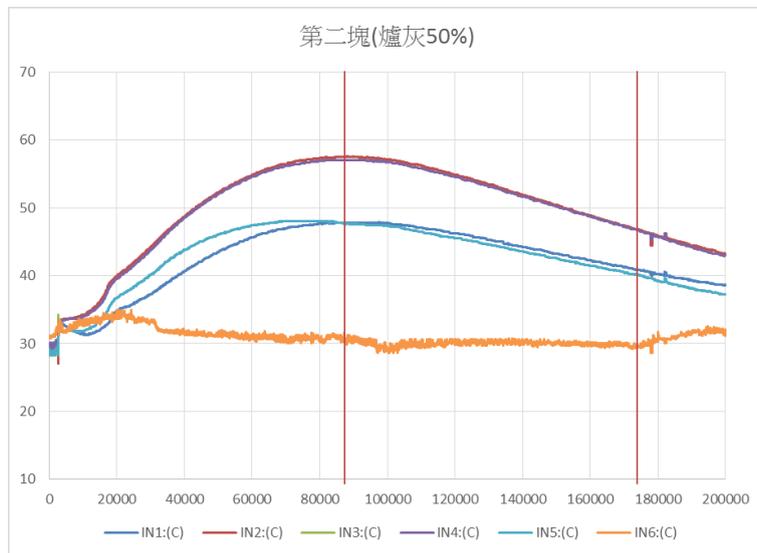


圖 6.2.3-3 試體 S_SF50 溫度發展曲線

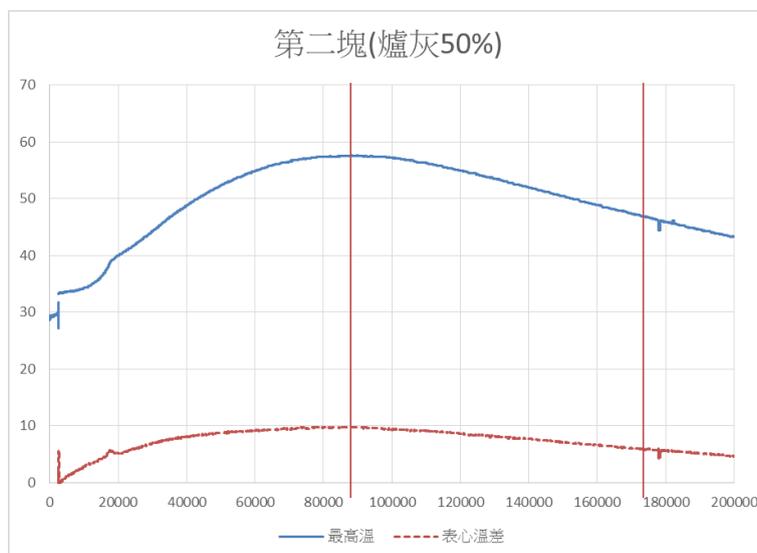


圖 6.2.3-4 試體 S_SF50 最高溫及表心溫差曲線

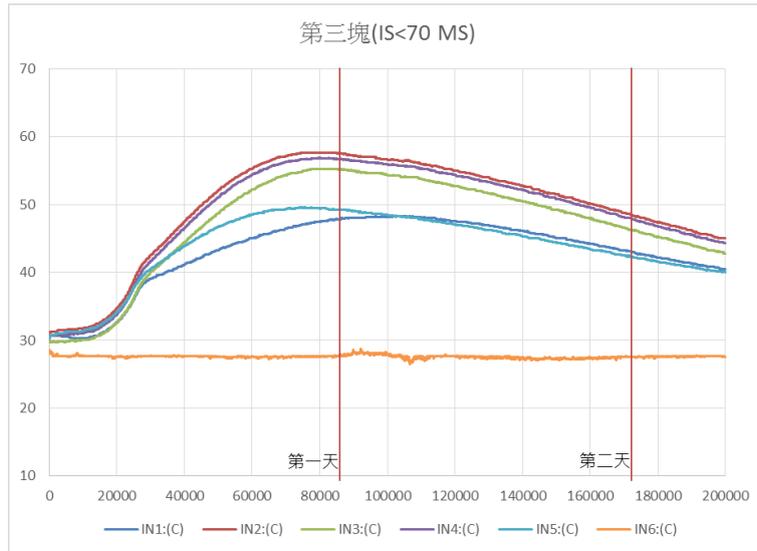


圖 6.2.3-5 試體 IS(<70)(MS)溫度發展曲線

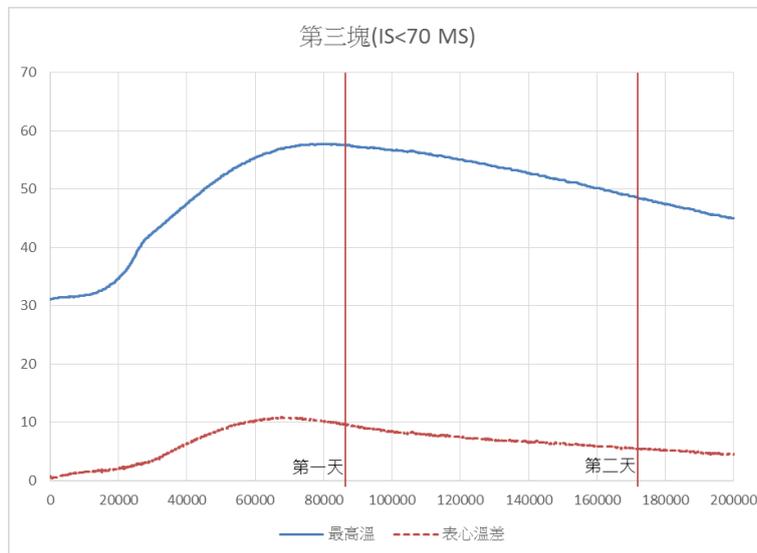


圖 6.2.3-6 試體 IS(<70)(MS)最高溫及表心溫差曲線

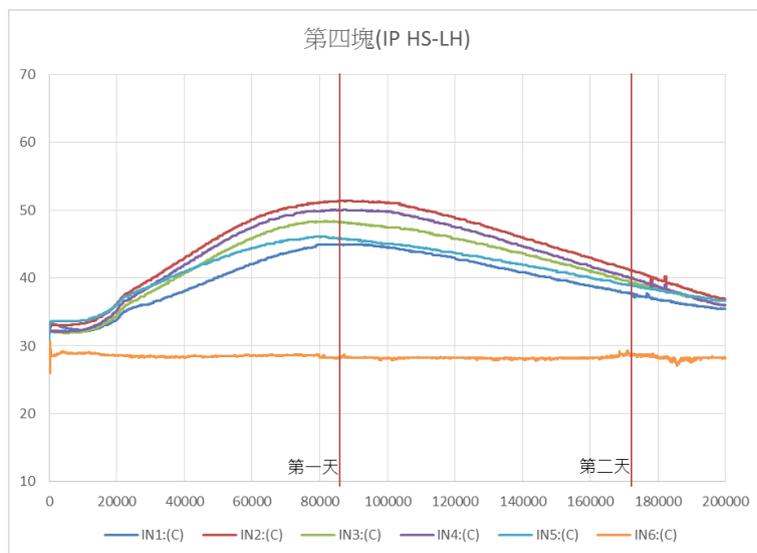


圖 6.2.3-7 試體 IP(HS-LH)溫度發展曲線

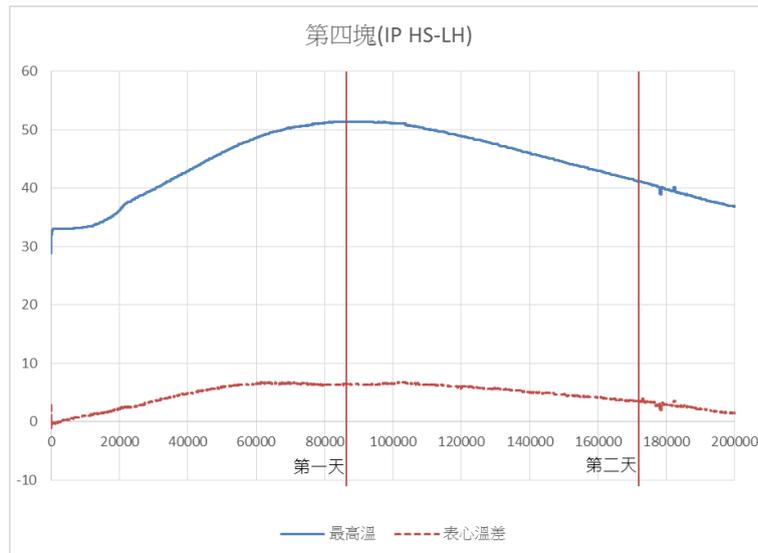


圖 6.2.3-8 試體 IP(HS-LH)最高溫及表心溫差曲線

6.3 試體測試結果

每座試體於試驗前均先檢查是否有初始裂縫，檢查完後於試體表面塗上白漆，並繪製 10cm × 10cm 的網格，提供感光元件黏貼位置及了解動態攝影下裂縫走勢情形，如圖 6.3-1 所示。在測試過程中，當試體達到第一次目標層間位移量時，進行裂縫描繪，並量測最大裂縫寬度，其中紅色奇異筆線描繪正向加載時的裂縫、藍色奇異筆線描繪負向加載時的裂縫，裂縫寬度以裂縫尺目視量測。

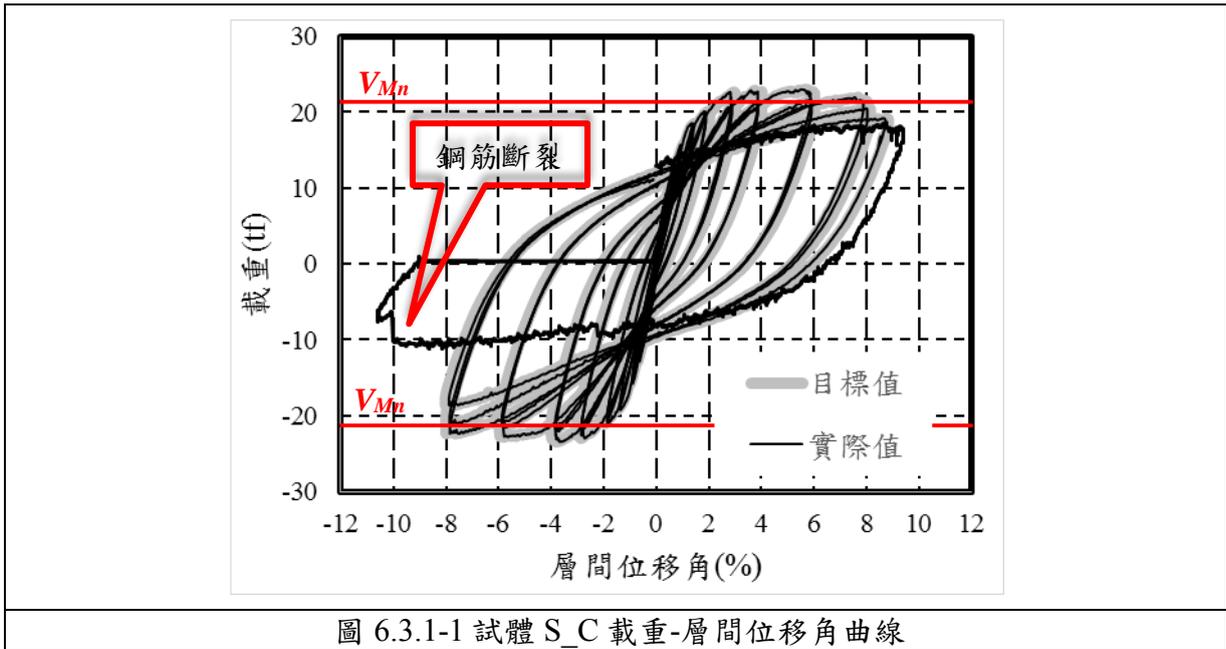


圖 6.3-1 試體 S_SF50 白漆與網格繪製情形

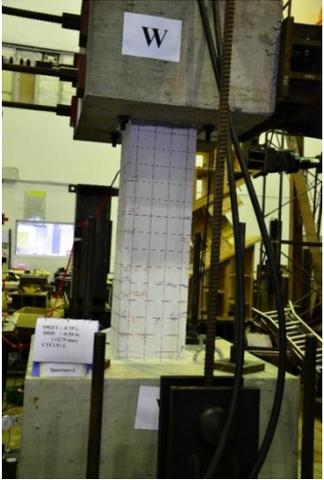
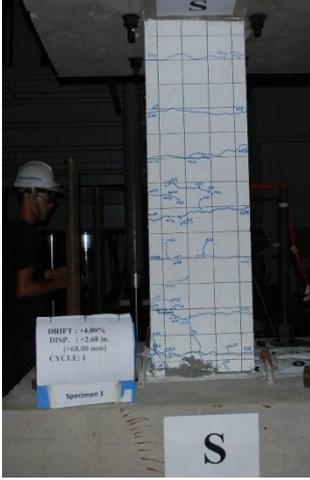
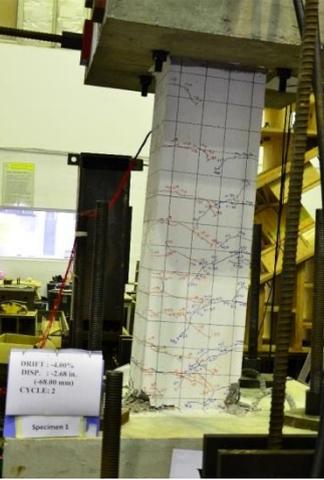
6.3.1 純水泥柱試驗分析

根據混凝土圓柱試體平均壓應力 40.9MPa，求得加載軸力大小為 66.7 噸 ($0.1A_gf'_c$)。試體載重-層間位移角曲線如圖 6.3.1-1 所示，圖中包含兩條曲線，灰色實線是根據目標層間位移角所繪製、而目標層間位移量主要根據頂部混凝土塊 LVDT 所量得水平位移量得到，本試體為第一支試體，其變形能力超出預期，造成頂部混凝土塊 LVDT 線長不足，因此灰色實線數據僅記錄至 8% 目標層間位移角，黑色實線則是根據實際層間位移角所繪製，將目標層間位移角量扣除底部混凝土塊水平位移量與轉角所得(由底部混凝土塊感光元件決定)，在目標層間位移 8% 之後，目標層間位移角改由頂部混凝土塊上的感光元件決定，為了避免混淆，本文之後除非明確指出是目標值，所有層間位移角均指實際值。

當目標層間位移角達 0.375% 時，於試體南側首先觀察到水平撓曲裂縫(如圖 6.3.1-2(a)所示)，此時的最高水平裂縫寬度為 0.05mm；到了目標層間位移角 0.5% 時，北側及西側量得最高水平裂縫寬度增加至 0.1mm；當目標層間位移角達 0.75% 時，於試體西側觀察到斜向裂縫(如圖 6.3.1-2 (b)所示)，寬度為 0.05mm；到達目標層間位移角 3% 時，受壓側底部混凝土產生碎裂(如圖 6.3.1-2 (c)所示)；從目標層間位移角 3% 到 4%，試體有更多裂縫產生，且原有裂縫持續擴大，當試體在目標層間位移角 4% 第一迴圈時，距離頂部混凝土塊約 50 公分處混凝土保護層剝落(如圖 6.3.1-2 (d)所示)，圖 6.3.1-2 (e)顯示試體在完成 4% 第一迴圈後裂縫走向圖，；到了目標層間位移角 8% 第一迴圈時，移除第一層及第二層外側感光元件；完成目標層間位移角 8% 時，距離頂部混凝土塊約 450 公分以下混凝土保護層剝落(如圖 6.3.1-2 (f)所示)；實驗繼續目標層間位移角 10% 第一迴圈時，側向力在負方向(南向)均損失超過最大側向力 20%，且當千斤頂由正向 10% 往負向移動時(由北往南)，試體北側中間主筋突然斷裂如圖 6.3.1-2 (g)所示，伴隨相當大的斷裂聲響。試驗在完成目標層間位移角 10% 第一週期後結束，值得一提的是，即便主筋斷裂，初始垂直力(66.7 噸)在整個測試過程中均維持的相當良好，將鬆脫混凝土去除後，試體最終狀態如圖 6.3.1-2 (h) 與圖 6.3.1-2 (i)所示，可以發現試體南側與北側三支主筋有不同程度的挫曲，位於中間的主筋挫曲情形似乎較為嚴重。





 <p>DRIFT = 0.375% DISP. = 0.23 in. (5.94 mm) CYCLE: 1 Specimen S</p>	 <p>DRIFT = 0.75% DISP. = 0.46 in. (11.83 mm) CYCLE: 1 Specimen S</p>	 <p>DRIFT = 3.00% DISP. = 2.41 in. (61.10 mm) CYCLE: 1 Specimen S</p>
<p>(a) 目標層間位移 0.375% 南側</p>	<p>(b) 目標層間位移角 0.75% 西側</p>	<p>(c) 目標層間位移 3% 北側</p>
 <p>DRIFT = 4.00% DISP. = 2.48 in. (62.99 mm) CYCLE: 1 Specimen S</p>	 <p>DRIFT = 4.00% DISP. = 2.48 in. (62.99 mm) CYCLE: 2 Specimen S</p>	 <p>DRIFT = 8.00% DISP. = 4.96 in. (125.98 mm) CYCLE: 1 Specimen S</p>
<p>(d) 目標層間位移角 4% 南側</p>	<p>(e) 目標層間位移角 4% 西側</p>	<p>(f) 目標層間位移角 8% 北側</p>
 <p>DRIFT = 10.00% DISP. = 6.25 in. (158.75 mm) CYCLE: 1 Specimen S</p>		
<p>(g) 目標層間位移角 10% 北側</p>	<p>(h) 測試結束北側中間主筋斷裂</p>	<p>(i) 測試結束南側主筋挫曲</p>
<p>圖 6.3.1-2 試體 S_C 試驗照片</p>		

6.3.2 爐灰 35:15 比例試驗柱試驗分析

根據混凝土圓柱試體平均壓應力 47.5MPa，求得加載軸力大小為 77.54 噸 ($0.1A_gf'_c$)。試體載重-層間位移角曲線如圖 6.3.2-1 所示。

當目標層間位移角達 0.25% 時，於試體各向觀察到水平撓曲裂縫(如圖 6.3.2-2(a) 所示)，此時最大水平裂縫寬度為 0.05mm；當目標層間位移角達 0.75% 時，於試體西側觀察到斜向裂縫，最大斜向裂縫寬度為 0.05mm(如圖 6.3.2-2 (b)所示)；到達目標層間位移角 1% 時，試體南側沿柱底產生水平裂縫(如圖 6.3.2-2 (c)所示)；目標層間位移角從 1% 到 2%，試體有更多裂縫產生，且原有裂縫寬度持續增加，圖 6.3.2-2(d) 顯示試體在完成目標層間位移角 2% 第一迴圈後裂縫走向圖；當目標層間位移達 3% 時，而觀察發現試體南側柱底部角隅處出現混凝土保護層剝落的跡象(如圖 6.3.2-2(e) 所示)；目標層間位移角 4% 時，試體柱底部混凝土保護層剝落更加嚴重，尤其在試體高度約 150 公分位置，水平裂縫寬度已達 2.5mm，如圖 6.3.2-2 (f)所示，但此現象並沒有影響試體垂直載重能力與側力強度；當完成目標層間位移角 6% 第三迴圈時，試體南側及北側高度約 250 公分以下混凝土大量剝落，如圖 6.3.2-2(g)所示；完成目標層間位移角 8% 第二迴圈時，試體南側及北側有鋼筋外露的情況，如圖 6.3.2-2(h) 所示；試體在目標層間位移角 10% 第二迴圈負向加載過程中，產生巨大聲響，現場觀察無法確認聲響的主要原因，試體在完成目標層間位移角 10% 第二迴圈後結束，實驗結束後觀察到北側中央主筋斷裂，應該實驗過程中巨大聲響的原因，然此現象並未伴隨側向力損失，且試體仍能支撐初始軸力。試體最終狀態如圖 6.3.2-2(i) 所示，可以觀察到主筋挫曲，且位於北側中間的主筋斷裂。

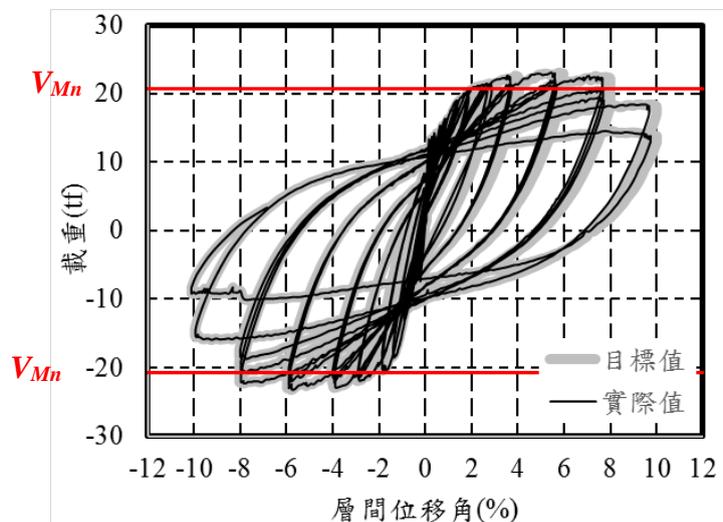


圖 6.3.2-1 試體 S_SF50 載重-層間位移角曲線

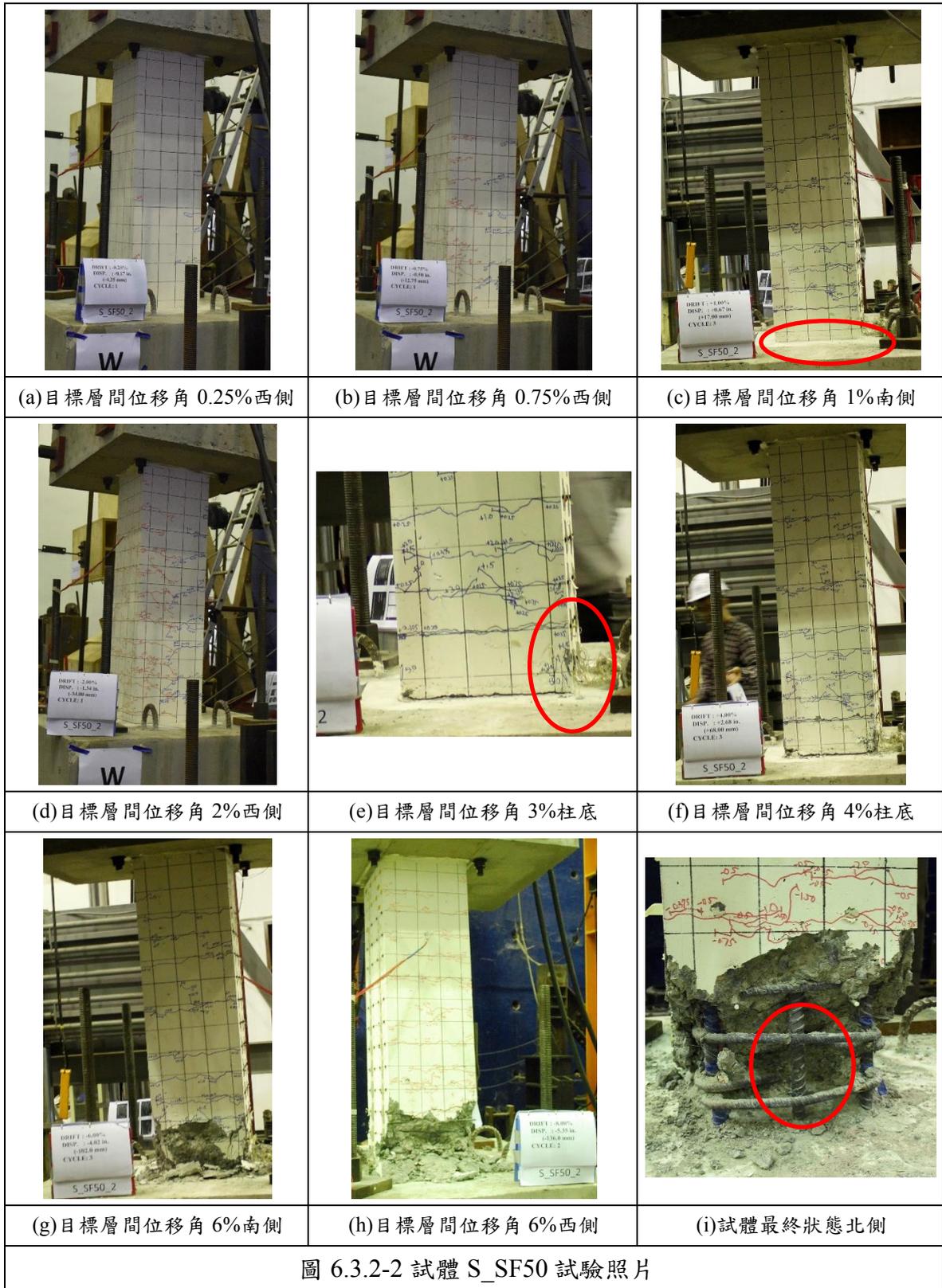
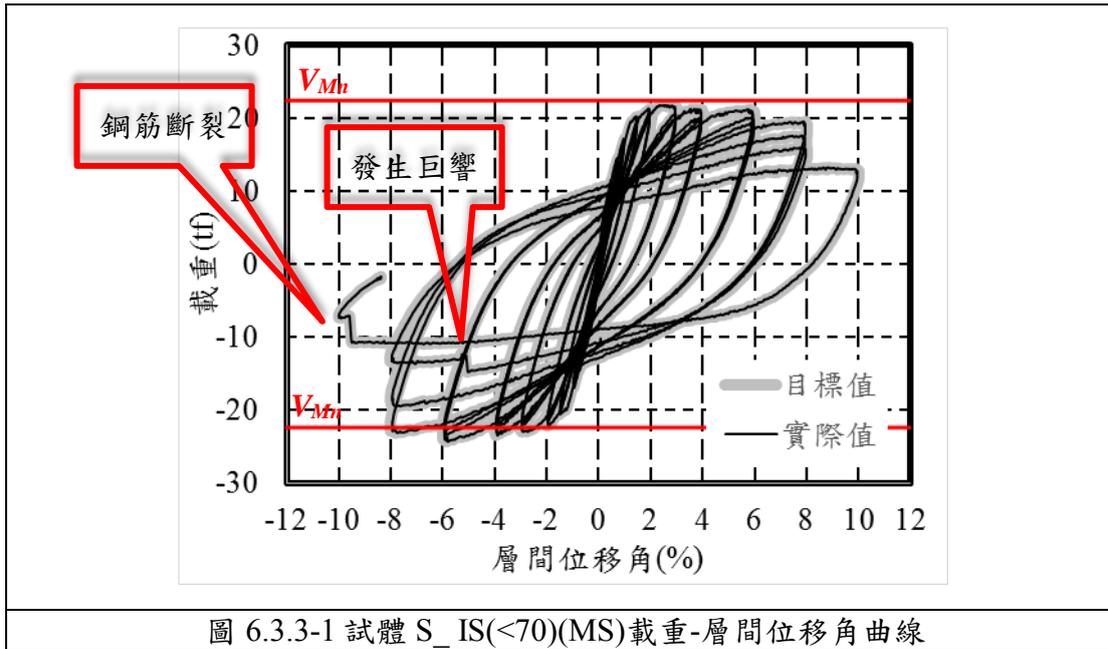


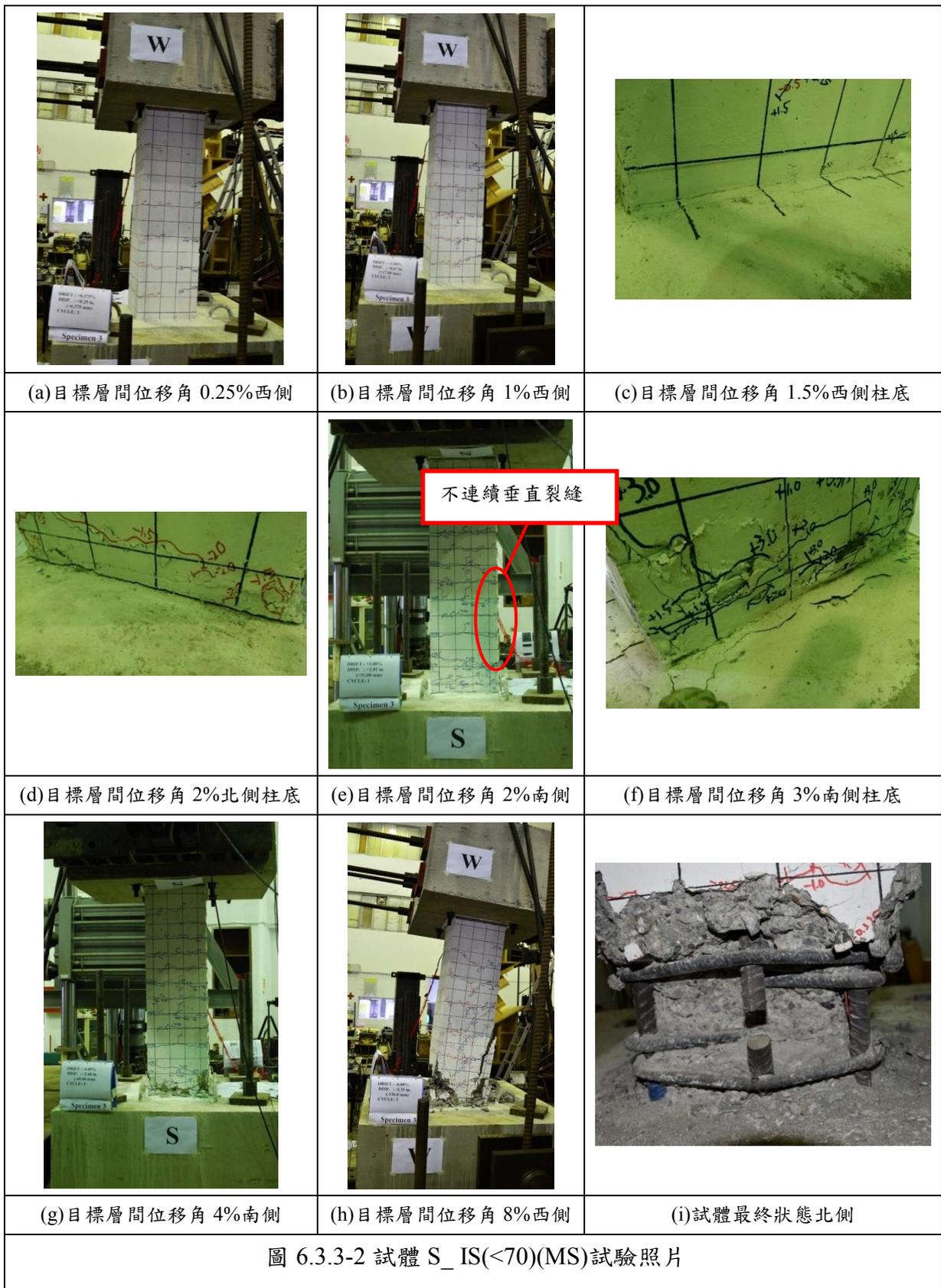
圖 6.3.2-2 試體 S_SF50 試驗照片

6.3.3 IS(<70)(MS)混合水泥柱試驗分析

根據混凝土圓柱試體平均壓應力 47MPa，求得加載軸力大小 76.7 噸($0.1A_g f'_c$)。試體載重-位移曲線如圖 6.3.3-1 所示。

在目標層間位移角達到 0.25% 時，於試體北側及西側首先觀察到水平撓曲裂縫，此時最大水平撓曲裂縫寬度為 0.05mm(如圖 6.3.3-2(a)所示)；當目標層間位移角達 0.375% 時，於試體南側觀察到水平裂縫，此時試體最大裂縫寬度為 0.05mm；當目標層間位移達 1% 時，於試體西側觀察到斜向裂縫(如圖 6.3.3-2 (b)所示)，最大斜向裂縫寬度約為 0.05mm，此時最大水平裂縫寬度增加至 0.35mm；當層間位移角達 1.5% 時，最大水平裂縫增加至 0.45mm，最大斜向裂縫增加至 0.1mm，同時於試體南側觀察到沿柱底部之裂縫(如圖 6.3.3-2 (c)所示)；當層間位移角達 2% 時，試體北側觀察到沿柱底部之裂縫，且有混凝土保護層剝落之跡象(如圖 6.3.3-2 (d)所示)，此時最大水平裂縫寬度增加至 0.65mm，且於試體南側距離底部混凝土頂約 450 公分至 850 公分處產生不連續之垂直裂縫(如圖 6.3.3-2 (e)所示)；當層間位移角來到 3% 第一迴圈時，柱底部可以明顯發現混凝土保護層有被推出的情形(如圖 6.3.3-2 (f)所示)，此時最大水平撓曲裂縫寬度增加至 2.5mm；完成目標層間位移角 4% 時，柱底部混凝土保護層開始剝落，同樣在角隅處較為嚴重如圖 6.3.3-2 (g)所示，但試體在此階段仍然維持其垂直與水平承载力；從目標層間位移角 6% 到 8%，混凝土保護層壓碎剝落情形加劇(如圖 6.3.3-2 (h)所示)；試體在目標層間位移角 8% 第三個迴圈加載過程中發出巨大聲響，現場根據肉眼觀察無法確認此聲響主要成因，但與第一迴圈相比，負向第三迴圈側向力損失近 50%；因為外觀並無明顯損壞集中的區域，試體繼續加載至目標層間位移角 10%，試體在完成目標層間位移負向 10% 第一迴圈後結束，試體北側主筋在尚未到達目標層間位移角前斷裂，伴隨瞬間側向力損失，但試體仍能支撐初始軸力。試驗於目標層間位移角 10% 第一迴圈結束後停止，鋼筋斷裂情形如圖 6.3.3-2 (i)所示。





6.3.4 IP(HS-LH) 混合水泥柱試驗分析

根據混凝土圓柱試體平均壓應力 40.9MPa，求得加載軸力大小為 66.7 噸 ($0.1A_gf'_c$)。試體載重-位移曲線如圖 6.4.4-1 所示。

在目標層間位移角 0.25% 時，試體各向觀察到水平撓曲裂縫(如圖 6.3.4-2(a)所示)，此時最大裂縫寬度為 0.05mm；從目標層間位移角 0.25% 到 1%，試體有更多裂縫產生，且原有裂縫持續擴大，圖 6.3.4-2 (b)顯示試體在完成 1% 後裂縫走向圖；當目標層間位移角來到 1.5% 時，於試體西側觀察到斜向裂縫(如圖 6.3.4-2 (c)所示)，寬度為 0.05mm，此時最大水平撓曲裂縫寬度增加至 0.6mm；完成目標層間角達 2% 時，於試體南側有混凝土保護層剝落(如圖 6.3.4-2 (d)所示)，此時最大水平裂縫寬度為 0.85mm，最大斜向裂縫寬度為 0.15mm；當目標層間位移達 3% 時，試體北側底部混凝土有壓碎的跡象(如圖 6.3.4-2 (e)所示)，此時最大水平裂縫寬度為 4.5mm；當目標層間位移角達 4% 時，試體北側距離底部混凝土塊約 250 公分位置之混凝土保護層開始剝落(如圖 6.3.4-2 (f)所示)；目標層間位移角達到 6% 時，試體北側混凝土剝落的現象擴展至距離底部混凝土塊約 350 公分位置(如圖 6.3.4-2 (g)所示)，此時已移除第一層及第二層感光元件，；試驗進行至目標層間位移角正向 8% 第二周期時，試體北側及南側混凝土保護層已嚴重剝落，鋼筋露出，且於試體南側觀察到箍筋(由底部混凝土塊頂算起第二層)彈出如圖 6.3.4-2 (h)所示，導致試體由正向往負向加載時瞬間喪失垂直與水平承载力，可能與主筋挫曲有關；試驗於完成目標層間位移角 8% 第二周期結束。試驗完畢，將鬆脫混凝土去除後，試體之最終狀態如圖 6.3.4-2 (i)所示，有別於其他試體的破壞模式，此試體同時損失垂直與水平承载力，試體在底部顯示嚴重變形，所有柱主筋均呈現嚴重挫曲情形。

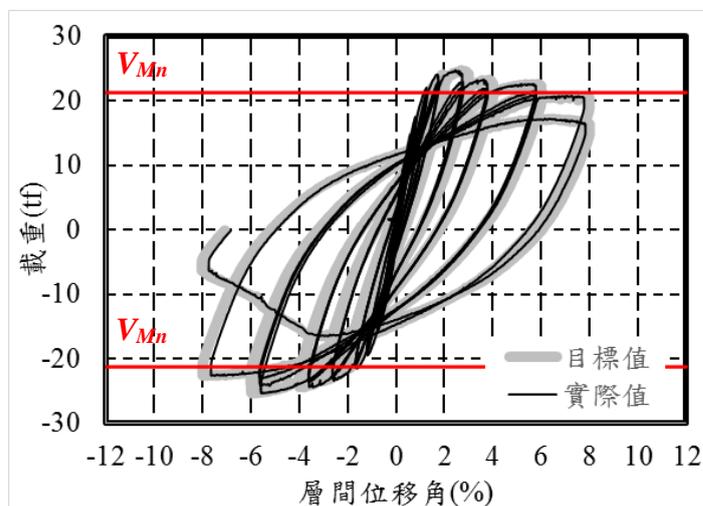


圖 6.3.4-1 試體 S_IP(HS-LH) 載重-層間位移角曲線

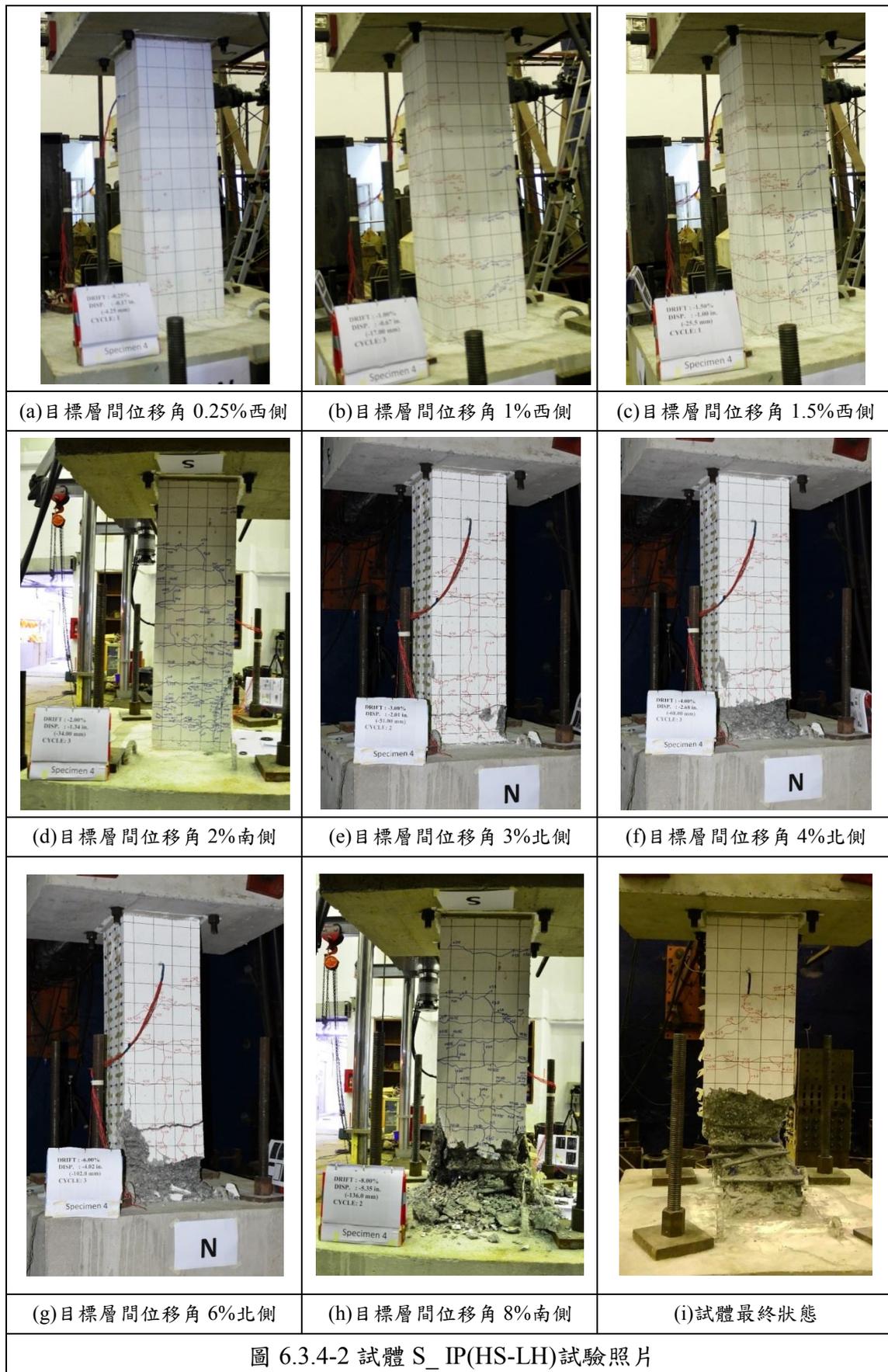


圖 6.3.4-2 試體 S_{IP}(HS-LH)試驗照片

6.4 試體強度與變形能力

所有試體關鍵測試數據記錄於表 6.4-1 內，其中測試-預測強度比值與試體變形能力關係於圖 6.4-1 內呈現，試體預測撓曲強度(M_n)係由材料測試強度配合規範使用等效混凝土應力塊與假設鋼筋應力應變曲線完美塑性去決定，而其對應剪力大小(V_{Mn})則是將預測撓曲強度除以剪力跨距(1700 mm)；試體極限變形能力(d_u)主要由兩個原則去決定：(1)若試體在同一層間位移量下任一迴圈之側向力低於第一迴圈側向力之 80%或在迴圈中有試體無法支持初始垂直承載力，則 d_u 就等於該層間位移角，(2)若試體在同一層間位移量下維持側向力與垂直承載力，則 d_u 由試體力量-位移之包絡線決定，該 d_u 表示包絡線上側向力損失超過該方向最大測試強度(V_{test})之 20%所對應之層間位移角，圖 6.4.3-2 以試體 S_ IS(<70)(MS)為案例說明上述 d_u 決定方法，正向 d_u 由原則(1)決定，而負向 d_u 由原則(2)決定。

表 6.4-1 試驗結果數據

試體		S_C	S_SF50	S_ IS(<70)(MS)	S_ IP(HS-LH)
測試最大彎矩值 M_{max} (tf-m)	正向	38.6	39.3	36.4	41.1
	負向	-38.5	-39.5	-40.4	-42.8
預測彎矩值 M_n (tf-m)*		36.1	37.2	38.1	36.2
M_{max}^+/M_n		1.07	1.06	0.96	1.14
M_{max}^-/M_n		1.07	1.06	1.07	1.19
極限層間位移角(%)	正向	8.32	9.65	8.40	7.78
	負向	-8.49	-9.39	-7.93	-7.65
剪應力/ $\sqrt{f'_c}$ (MPa)	正向	0.22	0.21	0.19	0.23
	負向	-0.22	-0.21	-0.21	-0.24

*：考量 $0.1A_g f'_c$ 軸力與材料測試強度之預測撓曲強度

根據實驗觀察與數據分析，可以推論所有試體之測試強度(V_{test})應由撓曲強度控制，該強度可由材料測試強度所得之標稱撓曲強度(V_{Mn})合理預測；而試體最大變形能力(d_u)，應與柱主筋挫曲能力有關，由圖 6.4.1(h)~(i)、圖 6.4.2(i)、圖 6.4.3(i)與圖 6.4.4(i)可知各試體在試驗結束後南北面主筋均嚴重挫曲的情形，其中試體 S_C、試體 S_SF50 與試體 S_ IS(<70)(MS)還有一支主筋斷裂情形，該主筋斷裂也應與主筋挫曲有關，此推論主要根據三組試體斷裂之主筋均位於中間，該位置主筋得到橫向箍筋圍束能力較低，因此在實驗過程中，該位置主筋挫曲變形量較大，可能在受壓挫曲過程中產生裂縫，因此當主筋在拉伸時比角落主筋容易斷裂。雖然各試體 d_u 不同，但是每支試體均可維持設計力量到接近8%層間位移角，該值遠超過最大考量地

震力下一般預期值3%。據此，可以初步結論在滿足目前規範鋼筋配置的情況下，橋柱往復載重行為對於使用混合水泥與一般水泥之差異並不明顯，本研究探討之兩種混合水泥材料在強度相同的情況下應可取代一般水泥於橋柱內使用，但實驗數據有限，本研究試驗結果僅適用於低軸壓約 $0.1A_g f'_c$ 且剪應力約 $0.25\sqrt{f'_c}$ (MPa) 之橋柱試體。

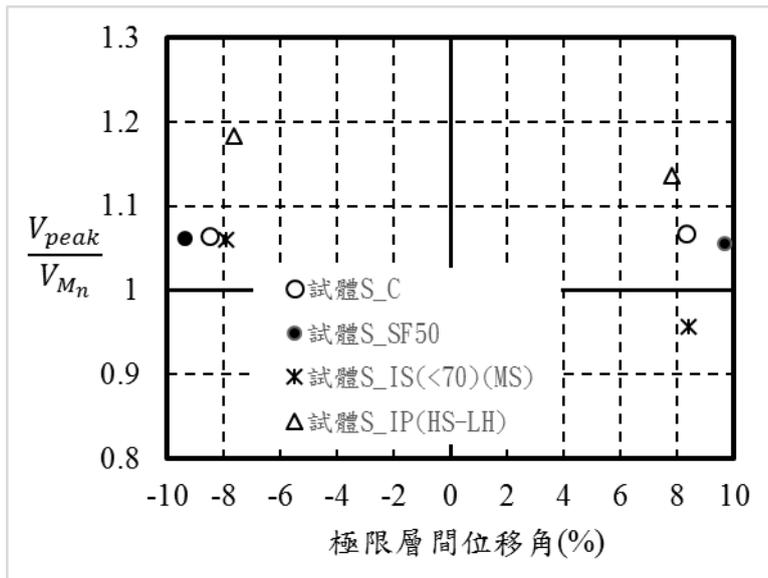


圖 6.4-1 測試-預測強度與極限層間位移角關係

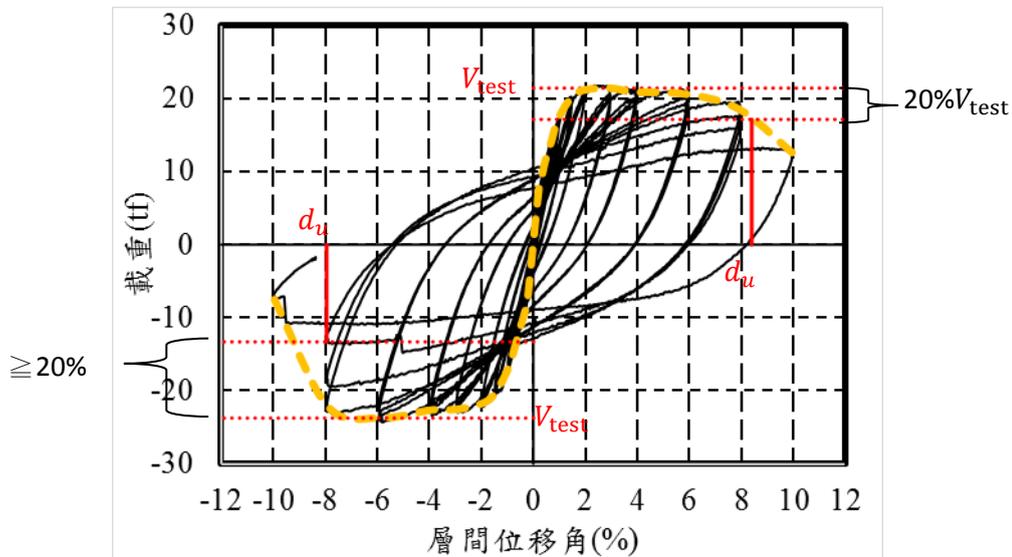


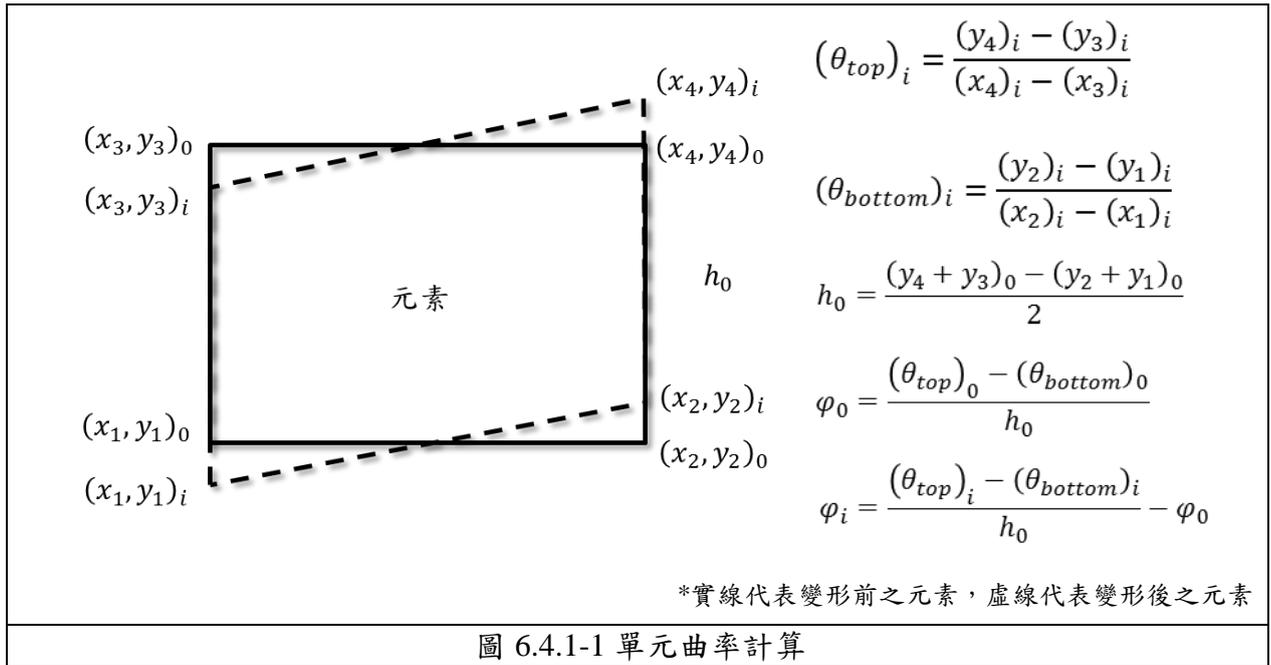
圖 6.4-2 試體 S_IS(<70)(MS) 案例

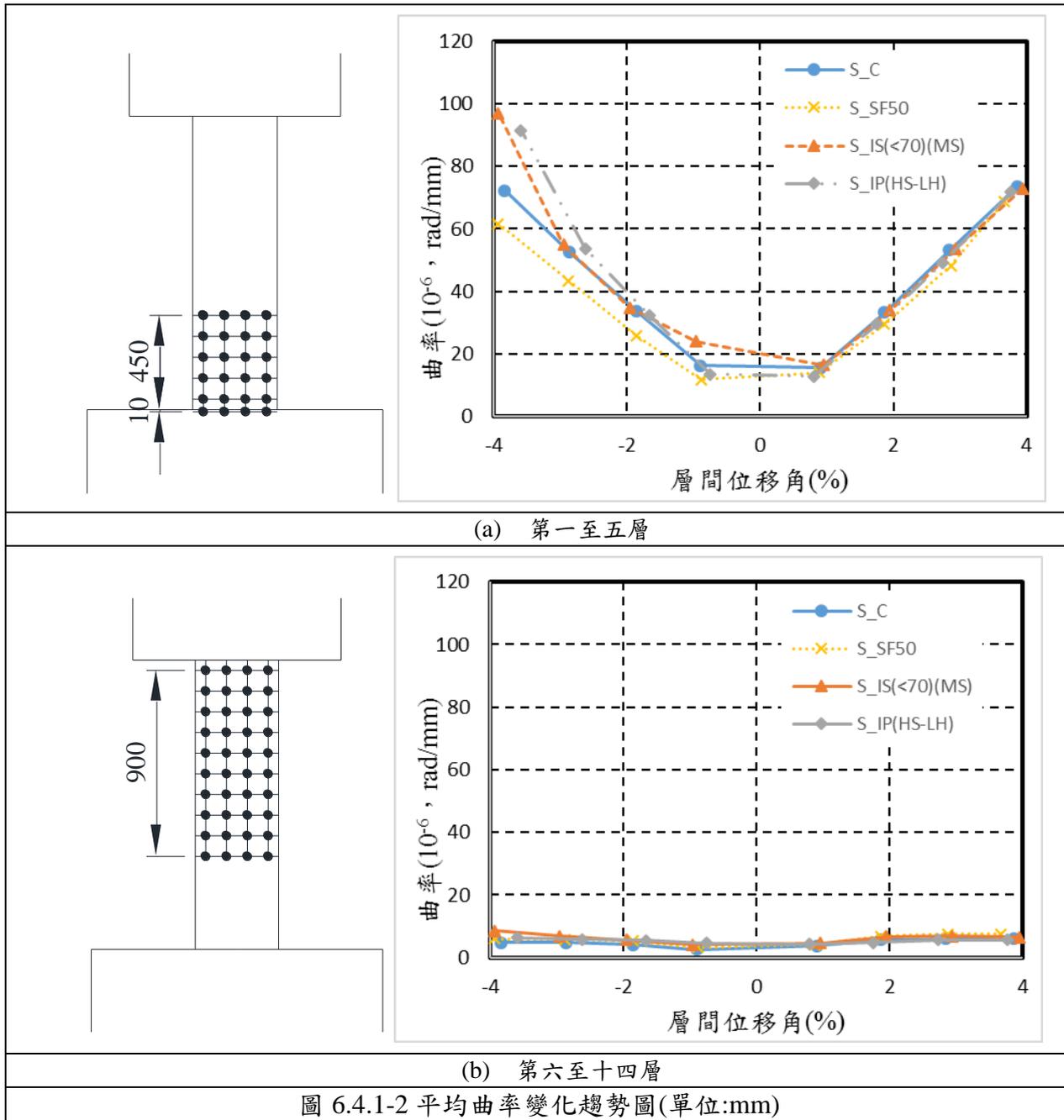
6.4.1 試體外部變形(曲率)

試體外部變形由感光元件(marker)移動位移量決定，每四個感光元件構成一單元，而單元內曲率大小則可決定如圖 6.4.1-1 所示。試體於第一層到第五層間、第一迴圈最大位移量下之平均曲率與層間位移角變化趨勢如圖 6.4.1-2(a)所示，而第五層到以上之平均曲率則於圖 6.4.1-2(b)呈現，其中層數定義請參考圖 2.4，每層包含 4 單元，各層曲率係由該層內 3 單元曲率平均決定，第一層表示由試體底部(底部混凝土塊頂面)到試體高度 50 公分內之距離，之後則是分別向上增加 100 公分之距離來分第二層到第五層。

因為試體主要承受單曲率變形，曲率較大之區域主要集中在試體底部，分析發現試體在第六層以上區域之曲率沒有太大分別且值很小，因此第一層到第五層內詳細曲率變化數據特別於圖 6.4.1-3 呈現，由圖 6.4.1-3(e)就可得知其實第五層內之曲率值與前面四層內之大小有明顯差異。數據僅呈現至層間位移角 4% 左右，因為試體在大變形量下混凝土保護層剝落嚴重，部分感光元件在該目標層間位移角下移除，而其他感光元件在 4% 目標層間位移角後所得數據可信度會有爭議。

雖然圖 6.4.1-3 顯示不同試體各層間曲率並不相同，但要注意的是曲率大小對於裂縫位置相當敏感，若有裂縫發生在某特定層間，則該層曲率值會偏大，所以用平均的方式(圖 6.4.1-2)可能是比較合理的判斷依據，據此，可以初步判定試體外部變形，在層間位移角約 4% 之前，不論是塑鉸區(圖 6.4.1-2(a))或是非塑鉸區(圖 6.4.1-2(b))對於使用不同材料混凝土的影響並不顯著，此值間接反應不同混凝土材料在本實驗配置下可以提供類似(equivalent)平均壓應變。





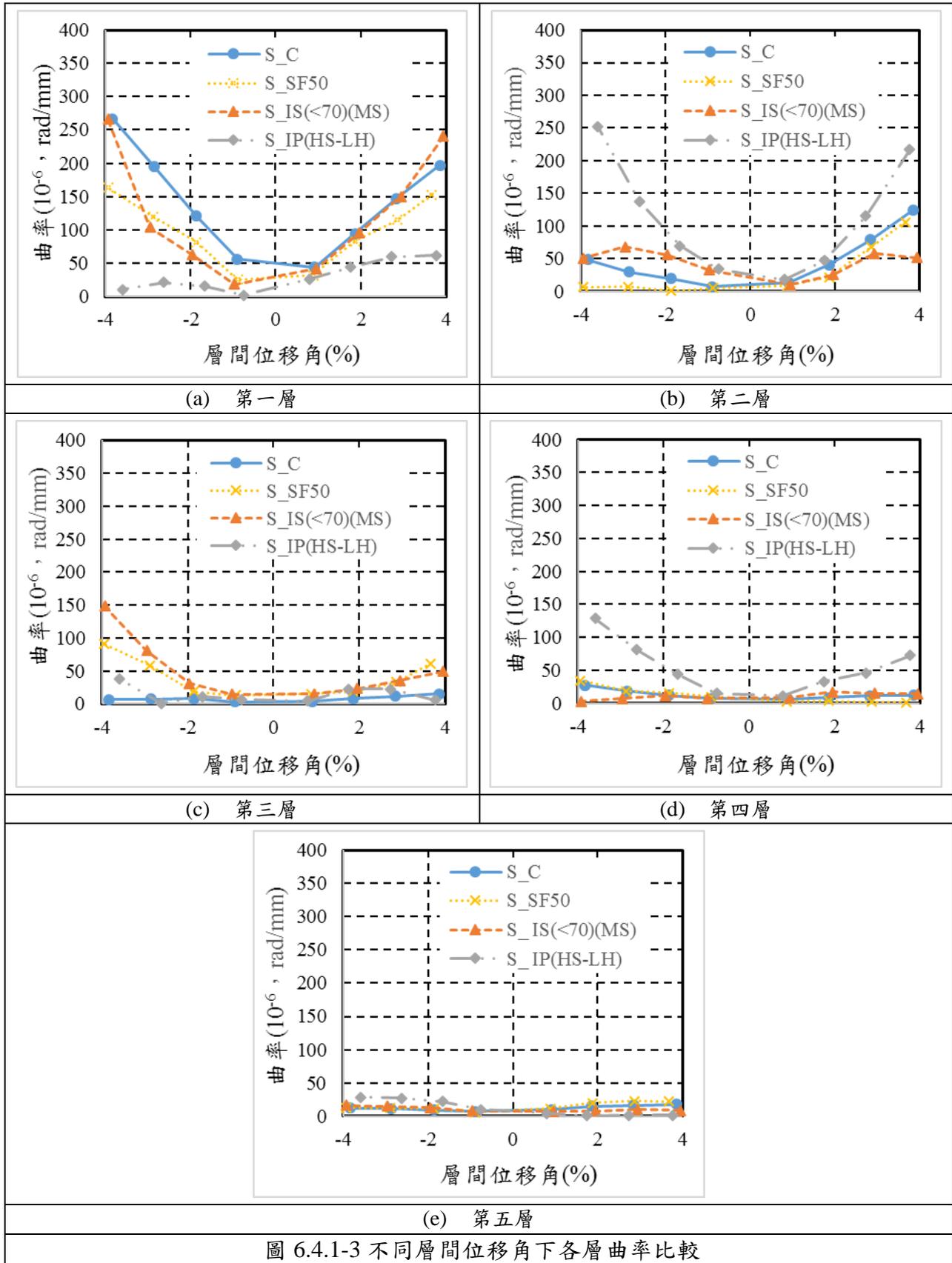


圖 6.4.1-3 不同層間位移角下各層曲率比較

6.4.2 試體裂縫

四組試體裂縫量測以裂縫尺作為量測工具，其中裂縫寬度係於試體西側量測所得，圖 6.4.2-1 及 6.4.2-2 為各試體在不同層間位移角下之最大裂縫寬度。

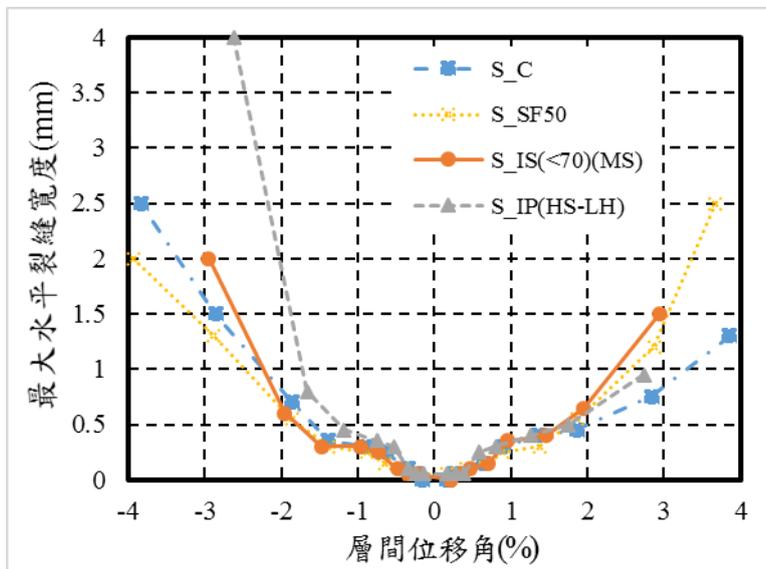


圖 6.4.2-1 各層間位移角下之最大水平裂縫寬度

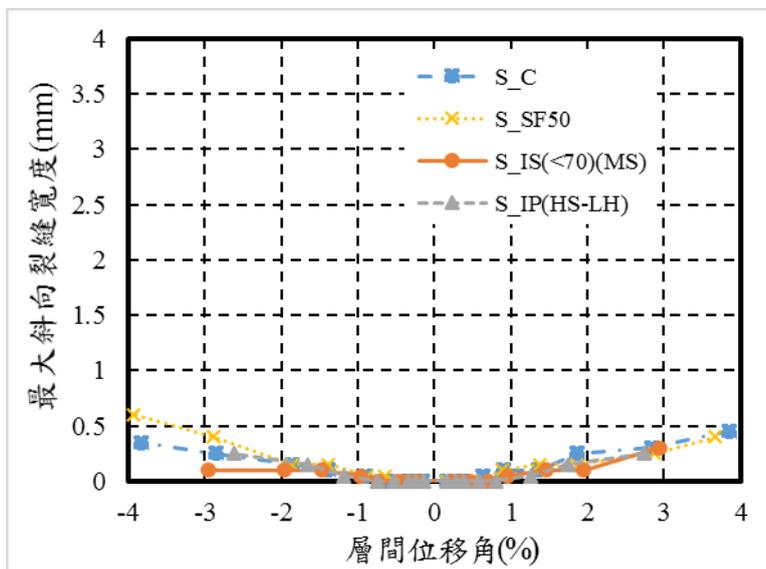


圖 6.4.2-2 各層間位移角下之最大斜向裂縫寬度

6.5 結構試驗小結

根據實驗觀察與數據分析，試體之測試強度應由撓曲強度控制，該強度可由材料測試強度所得之標稱撓曲強度(V_{Mn})合理預測。

試體最大層間位移角於正負側力載重方向均達約 8%，超過一般設計需求，根據觀察，四組試體最大變形能力應與柱主筋挫曲能力有關。

根據外部變形量測數據，試體在層間位移角約 4% 之前，不論在塑鉸區或是非塑鉸區對於使用不同材料混凝土的所產生的差異並不顯著，此值間接反應不同混凝土材料在本實驗配置下可以提供類似(equivalent)平均壓應變。

縱合以上所述，混合水泥(綠色材料)應可取代傳統水泥於橋柱灌漿使用，但實驗數據有限，本研究試驗結果僅適用於低軸壓約 $0.1A_g f'_c$ 且剪應力約 $0.25\sqrt{f'_c}$ (MPa) 之橋柱試體。

第七章 綠色材料應用於道路橋梁結構之經濟性與節能減碳效益評估

7.1 綠色材料經濟效益評估

為進一步展現使用綠色材料之經濟效益，本計畫擬定將指標性材料配比之原物料成本進行市場價調查，並評估預拌廠生產效能及成本，以推算未來綠色材料使用快速道路橋梁系統時的經濟效益符合性。

依本團隊所調查 105 年 3 月混凝土各原料之各地區單價如表 7.1-1。本階段所試驗之各項配比，以台北地區原料單價為計算基準，比較不同強度不同高爐石粉飛灰添加比例之材料成本差異，詳 7.1-2。百分比係為不同高爐石粉飛灰配比成本與純水泥配比成本之比值。

表 7.1-1 預拌混凝土原料成本分析

地區 原料	台北地區單價 (元/kg)	台中地區單價 (元/kg)	高雄地區單價 (元/kg)
水泥 I 型	2.5	2.5	2.3
高爐石粉	1.8	1.5	1.2
飛灰	0.8	0.8	0.7
水	-	-	-
細粒料	0.53	0.51	0.49
粗粒料	0.48	0.46	0.44
一般化學摻料	14	14	14
高性能減水劑	18	18	18
混合水泥 IS(<70)(MS) 型	2.3	2.2	2.1
混合水泥 IP(HS-LH)型	2.3	2.2	2.1
電弧爐氧化矽 細粒料	0.2	0.2	0.2

註：1.粒料的計價方式係採實際混凝土出貨量計算（即出口方價格）。

2.各原物料之單價為訪問該區預拌廠之平均價格。



表 7.1-2 預拌混凝土原料成本分析

編號	設計強度 kgf/cm ²	水泥 kg	型別	高爐 石粉 kg	飛灰 kg	細粒料 kg	粗粒料 kg	水 kg	化學摻料 kg	原料成本 (元)	百分比
1	210	300	I型	0	0	920	942	174	3	1,732	100%
2	210	195	I型	75	30	912	934	174	3	1,620	94%
3	210	150	I型	105	45	908	930	174	3	1,570	91%
4	210	300	IS	0	0	920	942	174	3	1,642	95%
5	210	300	IP	0	0	920	942	174	3	1,642	95%
6	280	360	I型	0	0	858	944	178	3.24	1,853	100%
7	280	234	I型	90	36	848	933	178	3.24	1,718	93%
8	280	180	I型	126	54	844	929	178	3.24	1,659	89%
9	280	360	IS	0	0	858	944	178	3.24	1,745	94%
10	280	360	IP	0	0	858	944	178	3.24	1,745	94%
11	350	450	I型	0	0	788	939	178	3.6	2,044	100%
12	350	293	I型	112	45	776	926	178	3.6	1,876	92%
13	350	225	I型	157	68	770	919	178	3.6	1,799	88%
14	350	450	IS	0	0	788	939	178	3.6	1,909	93%
15	350	450	IP	0	0	788	939	178	3.6	1,909	93%
16	350SCC	293	I型	112	45	967	741	175	4.28	1,915	100%
17	350SCC	225	I型	157	68	960	736	175	4.28	1,839	96%
18	350SCC	450	IS	0	0	981	752	175	4.28	1,948	102%
19	350SCC	450	IP	0	0	981	752	175	4.28	1,948	102%
20	420	475	I型	0	0	746	963	176	3.56	2,109	100%
21	420	475	I型	142	95	725	935	176	3.56	1,824	86%
22	210	195	I型	75	30	1017	905	185	3	1,494	86%
23	350	293	I型	112	45	852	868	205	3.6	1,748	86%
24	210	150	I型	105	82	855	930	177	3	1571	91%
25	210	150	I型	105	118	802	930	180	3	1572	91%
26	280	180	I型	126	87	797	929	178	3.24	1660	90%
27	280	180	I型	126	122	750	929	178	3.24	1663	90%
28	350	225	I型	157	99	730	919	178	3.6	1803	88%
29	350	225	I型	157	130	689	919	178	3.6	1806	88%

註 1：IS 為 IS(<70)(MS)型混合水泥、IP 為 IP(HS-LH)型混合水泥

註 2：22、23 組配比为電弧爐氧化矽混凝土，電弧爐氧化矽取代 50%細粒料

註 3：24、26、28 組配比为飛灰取代 5%細粒料，25、27、29 組為飛灰取代 10%細粒料

註 4：百分比為各不同高爐石粉飛灰配比成本與該強度純水泥成本之比值

從原料成本分析結果，採用高爐石粉飛灰有助於降低混凝土原料成本，以百分比來看，採用高爐石粉 25% 飛灰 10% 的混凝土成本僅為純水泥配比的 92~94%；若採用高爐石粉 35% 飛灰 15% 的混凝土成本僅為純水泥配比的 88~91%；若採用 IS(<70)(MS)型混合水泥的混凝土成本僅為純水泥配比的 93~95%；若採用 IP (HS-LH)型混合水泥的混凝土成本同樣為純水泥配比的 93~95%。

若以單價來看，設計強度 210 kgf/cm² 採用高爐石粉 25% 飛灰 10% 的每立方米混凝土成本比純水泥配比的低了 112 元，採用高爐石粉 35% 飛灰 15% 的混凝土成本比純水泥配比的低了 162 元，採用 IS(<70)(MS)型或 IP (HS-LH)混合水泥的混凝土成本比純水泥配比的低了 95 元；計強度 280 kgf/cm² 採用高爐石粉 25% 飛灰 10% 的混凝土成本比純水泥配比的低了 124 元，採用高爐石粉 35% 飛灰 15% 的混凝土成本比純水泥配比的低了 180 元，採用 IS(<70)(MS)型或 IP (HS-LH)混合水泥的混凝土成本比純水泥配比的低了 108 元；計強度 350 kgf/cm² 採用高爐石粉 25% 飛灰 10% 的混凝土成本比純水泥配比的低了 155 元，採用高爐石粉 35% 飛灰 15% 的混凝土成本比純水泥配比的低了 226 元，採用 IS(<70)(MS)型或 IP(HS-LH)混合水泥的混凝土成本比純水泥配比的低了 135 元。

由此可知，綠色材料在適當使用之情況下，皆具有經濟效益，亦即高爐石粉飛灰等綠色材料使用量愈多，對整體工程的成本降低愈明顯，其中添加飛灰又比高爐石粉有更加之效益，惟飛灰早期強度低，且品質較水泥及高爐石粉不穩定，使用時應特別注意。

倘若某工程 280 kgf/cm² 混凝土用量 10 萬立方米估算，採用高爐石粉 35% 飛灰 15% 綠色材料即可較用純水泥的工程材料經費節省 1950 萬元，具經濟效益。

另比較電弧爐氧化矽混凝土的經濟效益，在相同條件下，取代電弧爐氧化矽取代細粒料 50% 的混凝土成本與未取代的天然粒料混凝土相比，僅為 84%，每立方米混凝土節省 238 元，有更具經濟效益，其原因為砂石所佔的比重高，電弧爐氧化矽為再生資源材料，價格較天然砂石便宜。

最後比較飛灰取代細粒料的混凝土經濟效益，設計強度 210 kgf/cm² 時飛灰取代 5% 細粒料僅較爐灰 35:15 的每立方米配比成本增加 1 元，飛灰取代 10% 細粒料的成本僅較未添加增加 2 元，價格幾乎一樣；其餘再設計強度 280 kgf/cm² 及設計強度 350 kgf/cm² 中，飛灰取代細粒料的成本與原爐灰 35:15 的成本幾乎一樣，亦



即在以飛灰取代細粒料在 10% 範圍內，對混凝土成本幾乎無影響。

7.2 綠色材料節能減碳效益評估

使用綠色材料對節能減碳效果之評估為本計畫重點項目之一，依前項文獻所彙整之各材料碳排放係數，水泥為 0.88 kg CO₂ eq /kg，高爐石粉為 0.0683 kg CO₂ eq /kg，飛灰為 0，混合水泥 IS(<70)(MS)型為 0.512 kg CO₂ eq /kg，混合水泥 IP (HS-LH)型為 0.31 kg CO₂ eq /kg，砂石粒料為 0.00202 kg CO₂ eq /kg，電弧爐氧化矽為 0.0018 kg CO₂ eq /kg，水為 0，依本計畫試驗之設計配比，比較不同強度不同高爐石粉飛灰添加比例之二氧化碳排放量差異，詳表 7.2-1。



表 7.2-1 混凝土使用不同膠結材料之每立方公尺減碳效益比較

編號	設計強度 kgf/cm ²	水泥 kg	型別	高爐 石粉 kg	飛灰 kg	細粒料 kg	粗粒料 kg	碳排放 kg	百分比
1	210	300	I 型	0	0	920	942	268	100%
2	210	195	I 型	75	30	912	934	180	67%
3	210	150	I 型	105	45	908	930	143	53%
4	210	300	IS	0	0	920	942	157	59%
5	210	300	IP	0	0	920	942	97	36%
6	280	360	I 型	0	0	858	944	320	100%
7	280	234	I 型	90	36	848	933	216	67%
8	280	180	I 型	126	54	844	929	171	53%
9	280	360	IS	0	0	858	944	188	59%
10	280	360	IP	0	0	858	944	115	36%
11	350	450	I 型	0	0	788	939	399	100%
12	350	293	I 型	112	45	776	926	269	67%
13	350	225	I 型	157	68	770	919	212	53%
14	350	450	IS	0	0	788	939	234	59%
15	350	450	IP	0	0	788	939	143	36%
16	350SCC	293	I 型	112	45	967	741	269	100%
17	350SCC	225	I 型	157	68	960	736	212	79%
18	350SCC	450	IS	0	0	981	752	234	87%
19	350SCC	450	IP	0	0	981	752	143	53%
20	420	475	I 型	0	0	746	963	421	100%
21	420	475	I 型	142	95	725	935	222	53%
22	210	195	I 型	75	30	1017	905	180	67%
23	350	293	I 型	112	45	852	868	269	67%
24	210	150	I 型	105	82	855	930	143	53%
25	210	150	I 型	105	118	802	930	143	53%
26	280	180	I 型	126	87	797	929	170	53%
27	280	180	I 型	126	122	750	929	170	53%
28	350	225	I 型	157	99	730	919	212	53%
29	350	225	I 型	157	130	689	919	212	53%

註 1：IS 為 IS(<70)(MS)型混合水泥、IP 為 IP (HS-LH)型混合水泥

註 2：22、23 組配比為電弧爐氧化矽混凝土，電弧爐氧化矽取代 50%細粒料

註 3：24、26、28 組配比為飛灰取代 5%細粒料，25、27、29 組為飛灰取代 10%細粒料

註 4：百分比為各不同高爐石粉飛灰配比碳排放量與該強度純水泥碳排放量之比值

從分析結果來看，採用高爐石粉飛灰對降低混凝土的碳排放量有極大助益，不分是哪種設計強度，採用高爐石粉 25% 飛灰 10% 的碳排放量僅為純水泥配比的 67%；若採用高爐石粉 35% 飛灰 15% 的碳排放量僅為純水泥配比的 53%；若採用 IS(<70)(MS) 型混合水泥的碳排放量本僅為純水泥配比的 59%；若採用 IP (HS-LH) 型混合水泥的碳排放量僅為純水泥配比的 36%。

亦即高爐石粉飛灰等綠色材料使用量愈多，對整體工程的碳排放量降低愈明顯，其中添加飛灰又比高爐石粉有更佳之減碳排放效益，惟施工規範對於飛灰之使用量仍有一定之規定，若要達更加之節能減碳效益，建議可採用 IP 型混合水泥。

另比較電弧爐氧化矽混凝土的碳排放量，在相同條件下，電弧爐氧化矽取代細粒料 50% 的混凝土碳排放量與未取代的天然粒料混凝土相比，幾乎一樣，其原因為砂石為天然資源，取得幾乎不耗能源，僅加工過程能源之消耗，故碳排放量微乎其微。惟考量台灣砂石資源有限，以可再利用之觀點電弧爐氧化矽混凝土仍具有可發展之特性。

最後比較飛灰取代細粒料的混凝土碳排放量，飛灰取代 5% 細粒料及 10% 細粒料對碳排放量影響微乎其微，計算結果與原本採用高爐石粉 35% 飛灰 15% 的碳排放量一樣，亦即在以飛灰取代細粒料在 10% 範圍內，對混凝土碳排放量幾乎無影響。

7.3 以層級程序分析法進行不同配比混凝土的效益評估

經濟性是混凝土在傳統設計時的一項主要考慮指標，然設計時除了考慮材料本身價格外，還應一併考慮到混凝土的性能表現、符合施工現場的需求、對環境友善、可達到結構的穩定性、及節能減碳之效果等，如此綜合評估後方能符合現今營建追求「綠色」混凝土之內涵。

目前對於綠色材料的分析本研究嘗試使用 AHP 層級法，此法基本上是針對成本、強度性能及節能減碳 CO₂ 等三大指標，訪問 10 位國內產、官、學界專家學者，再進行優先決策面向權重值加權評分分析，以提出最佳化的綠色材料摻配比例。本次測試條件將以 28 天及 90 天的強度性能為基準，以百分比關係進行相互比較，以求得使用的權重值及優先程度。

本團隊彙整前述各項配比的試驗成果，分析各配比添加綠色材料的經濟性、環保減碳性及性能表現，透過經濟評估技術，以加權評分方式提出最佳化的摻配比例，提供後續工程設計混凝土之參考。

一、理論原理

層級程序分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)是由美國賓州匹茲堡大學 T.L.Saaty 於 1971 年首創的一套多屬性決策分析方法。該分析方法可使複雜的問題系統簡化為簡明的因素層級系統。由不同的層面給予層級分解，並透過量化的方式，將層級系統加以綜合評估，以提供決策者選擇適當的方案；利用層級結構，將複雜問題由高層次(High Level)往低層次(Low Level)逐步分解，並彙集有關決策人員及專家意見與評估後，以名目尺(Nominal Scale)進行各準則間相對重要程度的計算，以求得各階層之權數，再計算總權數，以求得各方案的優勢比重值，凡該值越大的方案，表示被採納的優先次序越高。

基本上，AHP 法是將複雜且非結構的情況分割成數個組成成分，安排這些成分或變數為階層次序，將每個變數的相關重要性利用主觀判斷給予數值；綜合這些判斷來決定哪一個變數有最高優先權(Priority)。而問題的每個變數必須給予一個數值，以幫助決策者思考而得到結論。

依 Saaty 的經驗，AHP 法可運用於下列十二種類型之問題：

1. 評定優先順序 (Setting Priorities)
2. 替選方案的產生 (Generating Set of Alternatives)
3. 評選最佳方案 (Choosing a Best Policy Alternatives)
4. 決定需求條件 (Determining Requirements)
5. 分配資源 (Allocating Resources)
6. 結果預測—風險評估 (Predicting Outcomes—Risk Assessment)
7. 績效衡量 (Measuring Performance)
8. 系統設計 (Designing a System)
9. 確保系統穩定 (Ensuring System Stability)
10. 最適化 (Optimizing)
11. 規劃 (Planning)
12. 衝突解決 (Conflict Resolution)

二、層級程序分析法之作業程序

應用 AHP 進行一個問題的決策，根據 R. Ramanathan 的研究，說明如下：

羅列評估問題與建構層級模型 (Structuring of the decision problem into a hierarchical model)，參考相關文獻或採用群體腦力激盪法 (Brainstorming)，Saaty 定義此種結構乃是將我們對問題所認定之要素 (Entities) 組合成幾個互斥的集合，而形成上下『隸屬』的層級關係。層級的多寡視問題而定，但一層次中的評估因素以不超過 7-9 個為原則。於建構層級架構，分為最上層之問題中心、中間層準則和最低層三個層次，如圖 7.3-1 所示。

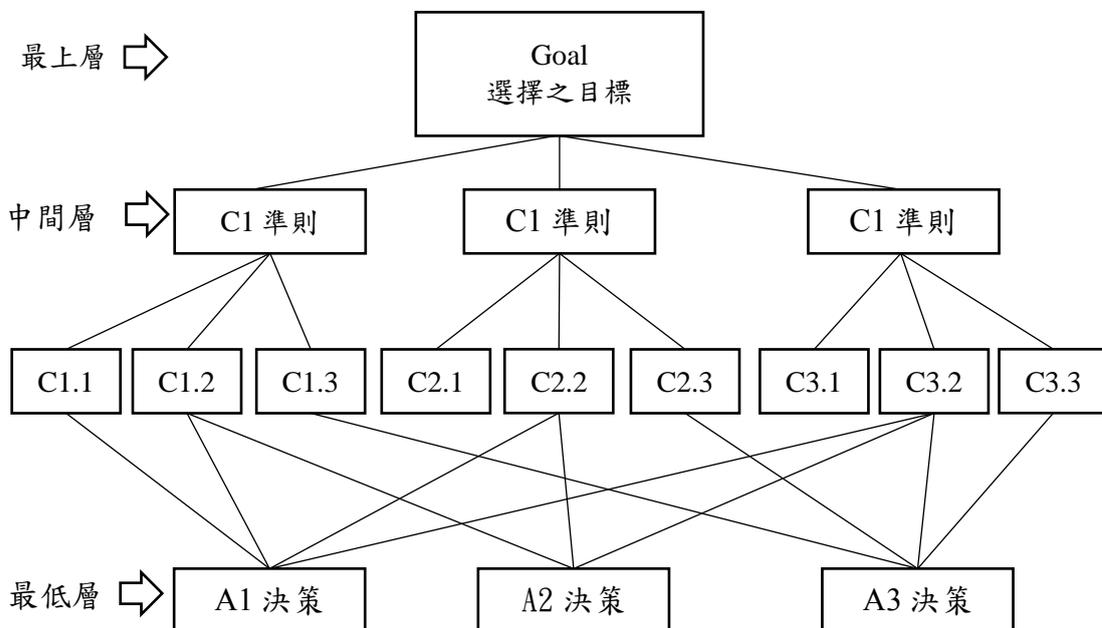


圖 7.3-1 AHP 層級結構圖

AHP 法利用數值分析終場用的特徵值 (Eigenvalue) 解法，找出特徵向量或優先向量 (Priority Vector)，代表各因素間的優先程度或重要性。Basak 與 Saaty (1993) 曾提到加權的幾何平均數更可加強反應評價強度。因本計畫對綠色材料混凝土的評估因子包含混凝土的性能、經濟成本及節能減碳，為能有一致性之量化準則，本研究團隊將以 3 個項目總權重值計為 10 分衡量值，依重要程度予以配分，最高不超過 10 分，最低為 0 分，代表相對重要與相對不重要，計算其因素權重與最大特徵值，如圖 7.3-2。

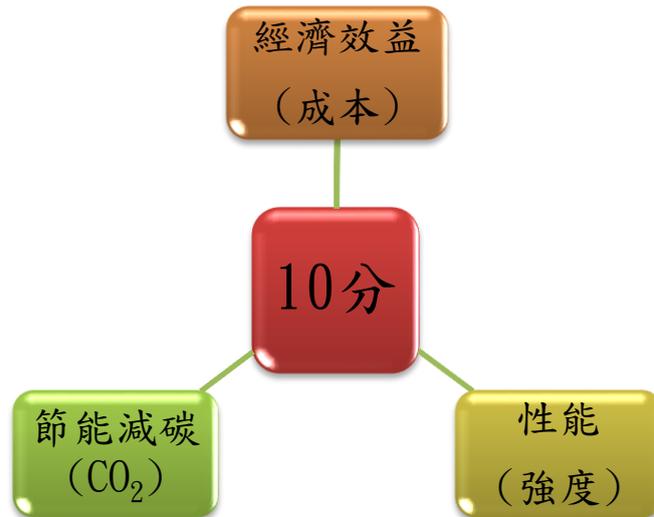


圖 7.3-2 項目權重值

而三個評估因子(性能、經濟成本及節能減碳)的權重分配，本團隊分別訪問10位混凝土專家學者，涵蓋產官學不同領域，就其專業認知為此三個評估因子進行配分，以求得優先程度與重要性，此時每列所示結果便代表因素之優先數值量，亦為評估因素權重，訪問結果如表 7.3-1 所示。惟部份調查結果予實務工程認知偏差過大，基於統計之可靠度將極端值予以剔除。

表 7.3-1 項目總權重值

委員	成本	性能(強度)	節能減碳(CO ₂)
專家學者 1	1	8	1
專家學者 2*	0	10	0
專家學者 3	2	7	1
專家學者 4*	5	3	2
專家學者 5	3	5	2
專家學者 6	2	5	3
專家學者 7	2.5	5	2.5
專家學者 8	3	5	2
專家學者 9	2	5	3
專家學者 10	3	5	2
平均(權重值)	2.31	5.63	2.06
註*：為提升統計之可靠度，極端之分數予以剔除，為學者 2(配分全為性能)及學者 4(成本較性能重要)。			

經過訪談調查結果，混凝土的專家學者們一致認為為最重要須考量之因子，其次為成本，在其此為節能減碳效應，其重要性之分數權重分別為 5.63 分、2.31 分及 2.06 分。

而各配比評估因子之比值，係以純水泥之表現為基準，建立不同高爐石粉飛



灰添加比例的配比表現與純水泥比值百分比，其中性能比又分成 28 天強度與 90 天強度，如表 7.3-2，如此可將評估因子全部換算成百分比，以讓計算有疊加之基準。

表 7.3-2 效益比較分析表

編號	設計強度 kgf/cm ²	水泥 kg	型別	高爐 石粉 kg	飛灰 kg	性能(強度)				節能減碳效益		成本分析	
						28 天 (kgf/cm ²)	百分比 (%)	90 天 (kgf/cm ²)	百分比 (%)	碳排放 kg	百分比 (%)	原料成 本(元)	百分比 (%)
1	210	300	I 型	0	0	367	100.0	432	100.0	268	100	1,732	100
2	210	195	I 型	75	30	361	98.4	493	114.1	180	67	1,620	94
3	210	150	I 型	105	45	372	101.4	519	120.1	143	53	1,570	91
4	210	300	IS	0	0	419	114.2	555	128.5	157	59	1,642	95
5	210	300	IP	0	0	325	88.6	493	100.0	97	36	1,642	95
6	280	360	I 型	0	0	477	100.0	560	113.6	320	100	1,853	100
7	280	234	I 型	90	36	458	96.0	577	117.0	216	67	1,718	93
8	280	180	I 型	126	54	411	86.2	574	116.4	171	53	1,659	89
9	280	360	IS	0	0	472	99.0	615	124.7	188	59	1,745	94
10	280	360	IP	0	0	382	80.1	579	117.4	115	36	1,745	94
11	350	450	I 型	0	0	506	100.0	576	100.0	399	100	2,044	100
12	350	293	I 型	112	45	520	102.8	684	118.8	269	67	1,876	92
13	350	225	I 型	157	68	503	99.4	662	114.9	212	53	1,799	88
14	350	450	IS	0	0	519	102.6	680	118.1	234	59	1,909	93
15	350	450	IP	0	0	456	90.1	620	107.6	143	36	1,909	93

各配比評估因子之計算係為與該組純水泥百分比(100%)之差值，較純水泥有更加之效益為正值，反之為負值，強度愈高愈好，節能減碳及成本愈低愈好，為正值。

以設計強度 210 kgf/cm² 為例，性能因子 28 天抗壓強度爐灰比例 25:10 為純水泥強度的 98.4%，相差 1.6%，計為-1.6；碳排放量為純水泥的 67%，計為+33；成本為純水泥的 94%，計為+6，即可得評估因子。各評估因子乘以前述之權重，總加除以 10 即以求得與純水泥之量化比值，故強度 210 kgf/cm² 爐灰比例 25:10 組的效益分數為(-1.6*5.63+33*2.06+6*2.31)/10=7.26，公式如下，可藉以判別各配比最佳優先程度。

$$\text{各配比效益分數} = \frac{\sum(\text{評估因子} \times \text{權重})}{10}$$



各配比之量化比值計算結果如表 7.3-3 及表 7.3-4。

表 7.3-3 各項配比權重值分析(28 天強度)

配比		純水泥	爐灰 25:10	爐灰 35:15	IS(<70)(MS)	IP(HS-LH)	權重值
210	性能(強度)	0	-1.6	1.4	14.2	-11.4	5.63
	成本	0	6	7	5	5	2.31
	節能減碳	0	33	33	41	64	2.06
加權權重值平		0	7.26	9.18	17.58	7.90	
配比		純水泥	爐灰 25:10	爐灰 35:15	IS(<70)(MS)	IP(HS-LH)	權重值
280	性能(強度)	0	1.7	-13.8	-1.0	-19.9	5.63
	成本	0	7	11	6	6	2.31
	節能減碳	0	33	47	41	64	2.06
加權權重值		0	9.4	4.4	9.2	3.4	
配比		純水泥	爐灰 25:10	爐灰 35:15	IS(<70)(MS)	IP(HS-LH)	權重值
350	性能(強度)	0	2.8	-0.6	2.6	-9.9	5.63
	成本	0	8	12	7	7	2.31
	節能減碳	0	33	47	41	64	2.06
加權權重值		0	10.2	12.1	11.5	9.2	
權重總值		0	26.83	25.74	38.33	20.49	

表 7.3-4 各項配比權重值分析(90 天強度)

		純水泥	爐灰 25:10	爐灰 35:15	IS(<70)(MS)	IP(HS-LH)	權重值
210	性能(強度)	0	14.1	20.1	28.5	14.1	5.63
	成本	0	6	7	5	5	2.31
	節能減碳	0	33	33	41	64	2.06
加權權重值		0	16.1	19.8	25.6	22.3	
		純水泥	爐灰 25:10	爐灰 35:15	IS(<70)(MS)	IP(HS-LH)	權重值
280	性能(強度)	0.0	3.0	2.5	9.8	3.4	5.63
	成本	0	7	11	6	6	2.31
	節能減碳	0	33	47	41	64	2.06
加權權重值		0	10.1	13.6	15.4	16.5	
		純水泥	爐灰 25:10	爐灰 35:15	IS(<70)(MS)	IP(HS-LH)	權重值
350	性能(強度)	0	18.8	14.9	18.1	7.6	5.63
	成本	0	8	12	7	7	2.31
	節能減碳	0	33	47	41	64	2.06
加權權重值		0	19.2	20.9	20.2	19.1	
權重總值		0	45.46	54.24	61.22	57.87	

若以 28 天為性能基準，設計強度 210 kgf/cm² 加權權重值效益評比結果，最佳

配比設計是 IS(<70)(MS)，第二為爐灰 35:15，第三為 IP(HS-LH)，第四為爐灰 25:10。

設計強度 280 kgf/cm² 加權權重值效益評比結果，最佳配比設計則是爐灰 25:10，第二為 IS(<70)(MS)，第三為爐灰 35:15，第四為 IP(HS-LH)。

設計強度 350 kgf/cm² 加權權重值效益評比結果，最佳配比設計則是爐灰 35:15，第二為 IS(<70)(MS)，第三為爐灰 25:10，第四為 IP(HS-LH)。

然而以齡期 90 天為性能基準時，其評比結果與 28 天齡期性能為基準的結果有差異。

設計強度 210 kgf/cm² 加權權重值效益評比結果，最佳配比設計是 IS(<70)(MS)，第二為爐灰 IP(HS-LH)，第三為爐灰 35:15，第四為爐灰 25:10。

設計強度 280 kgf/cm² 加權權重值效益評比結果，最佳配比設計則是 IP(HS-LH)，第二為 IS(<70)(MS)，第三為爐灰 35:15，第四為爐灰 25:10。

設計強度 350 kgf/cm² 加權權重值效益評比結果，最佳配比設計則是爐灰 35:15，第二為 IS(<70)(MS)，第三為爐灰 25:10，第四為 IP(HS-LH)。

有關各配比權重值排行總表如表 7.3-5。

由 AHP 分析結果可知有使用高爐石粉飛灰之效益皆大於使用純水泥，由權重總值來看(三個強度加權權重質相加)，若僅以 28 天強度來看，則高爐石粉飛灰添加 25:10 組及 35:15 組有相似之效益分數，而混合水泥 IS(<70)(MS)組效益分數則明顯高於高爐石粉飛灰組，至於 IP(HS-LH)組因強度雖符合目標強度但略低，效益分數為最低。但若將強度拉長至 90 天，混合水泥 IS(<70)(MS)組效益分數仍是最高，其次則為 IP(HS-LH)組，因其後期強度增長明顯高於純水泥與爐灰組，再其次為爐灰 35:15 組，最後則為爐灰 25:10 組。



表 7.3-5 各配比加權權重值排行總表

齡期 項目	齡期 28 天				齡期 90 天			
	<u>210 kgf/cm²</u>							
最佳順位	(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)	(4)
配比	IS(<70) (MS)	爐灰 35:15	IP (HS- LH)	爐灰 25:10	IS(<70) (MS)	IP (HS-LH)	爐灰 35:15	爐灰 25:10
性能 (強度)	14.2	1.4	-11.4	-1.6	28.5	14.1	20.1	14.1
成本	5	7	5	6	5	5	7	6
節能減碳	41	33	64	33	41	64	33	33
加權權重值	17.60	9.20	7.92	7.28	25.65	22.28	19.73	16.12
設計強度	<u>280 kgf/cm²</u>							
最佳順位	(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)	(4)
配比	爐灰 25:10	IS(<70) (MS)	爐灰 35:15	IP (HS- LH)	IP (HS-LH)	IS(<70)(MS)	爐灰 35:15	爐灰 25:10
性能(強度)	1.7	-1.0	-13.8	-19.9	3.4	9.8	2.5	3.0
成本	7	6	11	6	6	6	11	7
節能減碳	33	41	47	64	64	41	47	33
加權權重值	9.37	9.27	4.45	3.37	16.48	15.35	13.63	10.10
設計強度	<u>350 kgf/cm²</u>							
最佳順位	(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)	(4)
配比	爐灰 35:15	IS(<70) (MS)	爐灰 25:10	IP (HS- LH)	爐灰 35:15	IS(<70)(MS)	爐灰 25:10	IP (HS-LH)
性能(強度)	-0.6	2.6	2.8	-9.9	14.9	18.1	18.8	7.6
成本	12	7	8	7	12	7	8	7
節能減碳	47	41	33	64	47	41	33	64
加權權重值	12.12	11.53	10.22	9.23	20.84	20.25	19.23	19.08

7.4 效益分析小結

採用高爐石粉 25% 飛灰 10% 的混凝土成本僅為純水泥配比的 92~94%；若採用高爐石粉 35% 飛灰 15% 的混凝土成本僅為純水泥配比的 88~91%；若採用 IS(<70)(MS) 型混合水泥的混凝土成本僅為純水泥配比的 93~95%；若採用 IP (HS-LH) 型混合水泥的混凝土成本同樣為純水泥配比的 93~95%，採用高爐石粉飛灰或混合水泥確實有助於降低混凝土原料成本。

採用高爐石粉飛灰對降低混凝土的碳排放量有極大助益，採用高爐石粉 25% 飛灰 10% 的碳排放量僅為純水泥配比的 67%；若採用高爐石粉 35% 飛灰 15% 的碳排放量僅為純水泥配比的 53%；若採用 IS(<70)(MS) 型混合水泥的碳排放量本僅為純水泥配比的 59%；若採用 IP (HS-LH) 型混合水泥的碳排放量僅為純水泥配比的 36%。高爐石粉飛灰等綠色材料使用量愈多，對整體工程的碳排放量降低愈明顯，其中又以混合水泥的效益最佳、添加飛灰又比高爐石粉有更佳之效益。

本計畫以 AHP 層狀分析法將綠色材料的性能、成本與減排效應作加權權重分析，由 AHP 分析結果可知有使用高爐石粉飛灰之效益皆大於使用純水泥，由權重總值來看，若僅以 28 天強度來看，則高爐石粉飛灰添加 25:10 組及 35:15 組有相似之效益分數，而混合水泥 IS(<70)(MS) 組效益分數則明顯高於高爐石粉飛灰組，為最佳配比。若將強度拉長至 90 天，混合水泥 IS(<70)(MS) 組效益分數仍是最高，其次則為 IP(HS-LH) 組，因其後其強度增長明顯以高於純水泥與爐灰組，在其次為爐灰 35:15 組，最後為爐灰 25:10 組。

對照目前業主機關常用之爐石飛灰添加比例 25% 與 10%，基於長期強度表現，可將爐石飛灰添加比例提高至 35% 及 15%，或者是使用 IS(<70)(MS) 型混合水泥，則有更加之效益。若是需低水合熱、或高度抗硫酸鹽環境，則可考慮使用 IP(HS-LH) 型混合水泥。本節之評估結果可作為工程主辦機關採用高爐石粉飛灰及混合水泥等綠色材料之參考。

第八章 結論與建議

8.1 結論

本計畫之成果結論如下，合約工作項目與重點成果詳 8.1-1 成果對照表。

- 一、工程為高耗能產業，配合政府節能減碳政策，降低生產材料產品所耗費之能源及 CO₂ 的產出，回應本計畫所強調之綠色材料，在橋梁道路所用材料中，建議以混凝土為綠色材料研究目標。而從技術成熟度、法規配套、市場供應度等面向評估，高爐石粉與飛灰為市場與技術最成熟的綠色材料，作為本計畫之主軸。
- 二、評估橋梁的生命週期，包含原料開發階段、建材製造階段、施工建造階段、日常使用階段、拆除階段、廢棄物處理階段，以建材在生產階段所產生的 CO₂ 最多，尤其是預拌混凝土及瀝青混凝土，此若能以綠色材料取代水泥，有效的降低混凝土的二氧化碳排放量，則在整體結構耗能應有良好之成效。
- 三、依國外規範對高爐石粉飛灰之使用限制，最高可使用總膠結材料的 50%，而國內工程會施工綱要規範中高爐石粉飛灰可使用至總膠結材料的 50%，其中飛灰不超過 15%；國工局及鐵工局施工規範中高爐石粉飛灰可使用至總膠結材料的 45%，其中飛灰不超過 10%，因此目前機關所使用之高爐石粉飛灰比例仍有向上提升之空間。
- 四、經本計畫之試驗結果，高爐石粉和飛灰添加愈多，初凝和終凝時間愈長，而混合水泥 IS(<70)(MS)與 IP(HS-LH)凝結時間又更長，會影響拆模時間。高爐石粉和飛灰添加愈多，水合熱愈低、熱壓膨脹量也愈小，而混合水泥的整體性能表現又更佳。不同高爐石粉和飛灰添加量的混凝土性質表現，坍度皆可符合設計要求，具有良好工作性。高爐石粉和飛灰添加愈多強度發展愈慢，然而在 28 天時高爐石粉取代 25%及飛灰取代 10%組與高爐石粉取代 35%及飛灰取代 15%組之抗壓強度已與純水泥相同，混合水泥 IS(<70)(MS)型甚至有更好的強度表現；90 天時則所有試驗組強度皆已超過純水泥。
- 五、依強度試驗結果，達 70%設計強度時間純水泥需 3 天齡期，爐灰添加比例 25:10 組需 5 天齡期，IS(<70)(MS)組需 5 天，爐灰添加比例 35:15 組需 6 天齡期，IP(HS-LH)組需 7 天。惟不同設計強度不同爐石飛灰添加比例之配比，皆可在 7



天內達設計強度的 70%，可達規範要求的至少拆模時間，故使用爐石飛灰並不影響施工工期。僅淨跨距小於 3m 單向板之拆模時間較短會略有不足，但由於該工項構件在機關主辦工程中極少見，故僅需特別注意即可。若有施預力或早期強度考量，則建議仍應以純水泥為主。

六、為確認高爐石粉與飛灰對橋梁結構行為影響，本計畫以不同高爐石粉飛灰配比澆置縮尺寸柱以模擬橋梁柱的受力研究方面，數據顯示，不同試驗柱的層間位移角均超過一般設計要求，且結構柱側力變形都是由柱主筋控制，不同材料混凝土產生之差異不大，故採用不同高爐石粉和飛灰比例及混和水泥的混凝土均能符合設計需求。

七、採用 AHP 層狀分析法，以權重加總方式在性能、材料成本及減碳效果上，用量化結果評估不同高爐石粉和飛灰與混合水泥配比之混凝土性質，則各有其優勢，若以 28 天強度為基準，混合水泥 IS(<70)(MS)組的效益最高，不同高爐石粉和飛灰添加比例的分數相近，若以 90 天強度為基準，則混合水泥 IP(HS-LH)組亦有不錯表現。

八、綜合本計畫成果，使用高爐石粉及飛灰有提升混凝土品質、降低成本、減少二氧化碳排放的效益。當使用工程會施工綱要規範規定的高爐石粉 35% 飛灰 15% 上限，具良好之成效，而混合水泥 IS(<70)(MS)又比高爐石粉 35%和飛灰 15%組有更好的效果。在抗硫酸鹽侵蝕方面，以採用 IP(HS-LH)型混合水泥混凝土的耐久性最佳。然在施工實務上，高爐石粉和飛灰的添加量增加，將增加混凝土凝結時間，影響模板拆模時間，在施工時需特別注意。若有拉預力需求，則不建議添加太多的高爐石粉及飛灰。

九、本計畫謹就文獻及試驗結果進行分析探討，後續建議宜對高爐石粉及飛灰之使用進行更多試驗與研究以驗證成效。

表 8.1-1 重點成果對照表

重點項目	主要結論
一、 綠色材料適用範圍	<ul style="list-style-type: none"> ● 彙整混凝土用各式綠色材料的來源、市場供需、成份、混凝土性質的基本研究文獻，因高爐石粉與飛灰為市場與技術最成熟的綠色材料，故本計畫將以混凝土摻用高爐石粉



	<p>與飛灰之性質為本計畫之主要研究方向，並搭配混合水泥，一併探討其經濟性及減能減碳效益。</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 依國外規範對高爐石粉飛灰之使用限制，最高可使用總膠結材料的 50%，而國內工程會施工綱要規範中高爐石粉飛灰可使用至總膠結材料的 50%，其中飛灰不超過 15%；國工局及鐵工局施工規範中高爐石粉飛灰可使用至總膠結材料的 45%，其中飛灰不超過 10%，因此目前業主機關主辦工程所使用之高爐石粉飛灰比例 25%及 10%仍有向上提升之空間。 	
<p>二、 綠色 材料 性能 試驗</p>	<p>試驗規劃</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● 本計畫參考業主機關現有工程之橋梁各部為混凝土設計強度，規劃 210 kgf/cm²、280 kgf/cm²、350 kgf/cm²、350 kgf/cm²(SCC)、420 kgf/cm² (早強)等不同設計強度參數，比較純水泥、添加高爐石粉飛灰 35%(高爐石粉 25%、飛灰 10%)、添加高爐石粉飛灰 50%(其中高爐石粉 35%、飛灰 15%)、混合水泥 IS(<70)(MS)型(中度抗硫酸鹽)、混合水泥 IP (HS-LH)(高度抗硫酸鹽-低水合熱)，進行各項混凝土試驗。
	<p>凝結時間</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● 高爐石粉飛灰添加愈多、初終凝時間愈緩慢，不論高爐石粉飛灰或混合水泥都會影響拆模時間，高爐石粉飛灰 50%之終凝時間比純水泥要晚 90 分鐘，也比高爐石粉飛灰 35%之終凝時間晚 30 分鐘，而 IP(HS-LH)更晚，養護及拆模要特別注意。
	<p>水合熱</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● 高爐石粉飛灰添加愈多，水合熱愈低、熱壓膨脹量也愈小，有助於體積穩定性，降低裂縫風險，其中又以混合水泥的整體性能表現最佳。
	<p>熱壓膨脹</p>	
	<p>坍度</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● 不同高爐石粉飛灰添加量的混凝土性質表現，坍度皆可符合設計要求，具有良好工作性。
<p>強度</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● 高爐石粉飛灰添加愈多發展愈慢，7 天強度仍以純水泥表現最好，爐石飛灰組在 28 天時強度大致已與純水泥強度相同，在 90 天時多超過 28 天的 30%，亦比純水泥強度更高， 	



		可知添加高爐石粉飛灰對早期強度有影響，但對混凝土長期強度有正面助益。
	彈性模數	● 添加高爐石粉飛灰的各組配比彈性模數相差不大，原彈性模數計算方式可適用
	抗硫酸鹽	● 高爐石粉飛灰添加愈多，在硫酸鹽侵時膨脹試驗部分表現良好，混合水泥 IP (HS-LH)型及 IS(<70)(MS)型因主要性能為抗硫酸鹽，膨脹量最低，其次為高爐石粉飛灰 25:10 及高爐石粉飛灰 35:10，純水泥膨脹率最高。
	乾縮	● 不同高爐石粉飛灰或使用混合水泥的混凝土乾縮量及潛變量差異不大，水泥略為偏高，可見添加高爐石粉飛灰有助於體積穩定性。
	潛變	
	三、 綠色材料節能減 碳效果	<ul style="list-style-type: none"> ● 依前項文獻所彙整之各材料碳排放係數，水泥為 0.88 kg CO₂ eq/kg，高爐石粉為 0.0683 kg CO₂ eq/kg，飛灰為 0，故採用高爐石粉飛灰對降低混凝土的碳排放量有極大助益。 ● 依本計畫配比計算結果，採用高爐石粉 25%飛灰 10%的碳排放量僅為純水泥配比的 67%；若採用高爐石粉 35%飛灰 15%的碳排放量僅為純水泥配比的 53%；若採用 IS(<70)(MS)型混合水泥的碳排放量本僅為純水泥配比的 59%；若採用 IP (HS-LH)型混合水泥的碳排放量僅為純水泥配比的 36%。高爐石粉飛灰等綠色材料使用量愈多，對整體工程的碳排放量降低愈明顯，其中又以混合水泥的效益最佳、添加飛灰又比高爐石粉有更佳之效益。
	四、 綠色材料經濟效 益	<ul style="list-style-type: none"> ● 混凝土原料單價中，水泥最貴，其次是高爐石粉，再其次是飛灰。故以高爐石粉及飛灰來取代水泥有助於降低成本。 ● 採用高爐石粉 25%飛灰 10%的混凝土成本僅為純水泥配比的 92~94%；若採用高爐石粉 35%飛灰 15%的混凝土成本僅為純水泥配比的 88~91%；若採用 IS(<70)(MS)型混合水泥的混凝土成本僅為純水泥配比的 93~95%；若採用 IP (HS-LH)型

	<p>混合水泥的混凝土成本同樣為純水泥配比的 93~95%，對降低工程經費有所助益。</p>
五、 綜合評估建議	<ul style="list-style-type: none">● 本計畫以 AHP 層狀分析法將綠色材料的性能、成本與減排效應作加權權重分析，由 AHP 分析結果可知有使用高爐石粉飛灰之效益皆大於使用純水泥，經加權總值計算，若僅以 28 天強度來看，則高爐石粉飛灰添加 25:10 組及 35:15 組有相似之效益分數，而混合水泥 IS(<70)(MS)組效益分數則明顯高於高爐石粉飛灰組，為最佳配比。若將強度拉長至 90 天，混合水泥 IS(<70)(MS)組效益分數仍是最高，其次則為 IP(HS-LH)組，因其後期強度增長明顯以高於純水泥與爐灰組，在其次為爐灰 35:15 組，最後為爐灰 25:10 組。● 對照目前業主機關常用之爐石飛灰添加比例 25%與 10%，基於長期強度表現，可將爐石飛灰添加比例提高至 35%及 15%，或者是使用 IS(<70)(MS)型混合水泥，則有更加之效益。若是需低水合熱、或高度抗硫酸鹽環境，則可考慮使用 IP(HS-LH)型混合水泥。
六、 結構柱試驗分析	<ul style="list-style-type: none">● 添加高爐石粉飛灰確實有助於降低混凝土溫度，添加量愈多效果愈明顯。倘若高爐石粉飛灰已添加至 50%仍無法滿足規範要求，建議可參照工程會第 30700 章巨積混凝土施工網要規範，採用低水合熱的混合水泥 IP (HS-LH)型，對降低混凝土溫度有良好之成效。● 根據外部變形量測數據，試體柱 S_C、試體柱 S_IS(<70)(MS)、與試體柱 S_IP(HS-LH)在層間位移角約 4% 之前，不論在塑鉸區或是非塑鉸區對於使用不同材料混凝土的所產生的差異並不顯著，故可知使用不同比例高爐石粉飛灰與混合水泥皆可滿足設計要求，達純水泥之功效，故不論使用高爐石粉飛灰或混合水泥皆可取代傳統水泥於橋柱灌漿使用。

8.2 建議

- 一、目前道路橋梁之混凝土設計強度多為 280 kgf/cm^2 及 350 kgf/cm^2 ，預力梁因有早期強度需求各設計強度為 420 kgf/cm^2 ，然在化學摻料及產製技術的進步下，生產 700 kgf/cm^2 強度的混凝土已非難事。混凝土強度之提升有助於縮減結構尺寸，減少材料用量，促使整體工程二氧化碳減排效益。同時強度之提升也有助於混凝土的耐久性，拉長使用年限，從生命週期角度來看更具環保效益。因此建議後續可研究超高強度混凝土於橋梁結構之可行性及效益分析。
- 二、依目前道路橋梁設計，重力式擋土牆混凝土設計強度為 210 kgf/cm^2 、基樁混凝土設計強度為 210 kgf/cm^2 、箱涵護欄分隔島混凝土設計強度為 245 kgf/cm^2 ，然就成本分析來看，因預拌廠製程完全相同，混凝土單價相差不大，但提升強度卻有助於混凝土的耐久性，故建議可提升此類混凝土設計強度至 280 kgf/cm^2 。
- 三、目前對耐久性之要求常以水膠比作限制，但若以該水膠比作配比設計，其抗壓強度結果通常遠高於設計強度，若施工時僅以設計強度來驗收通常會成為耐久性檢驗之盲點，故建議應以限制水膠比對應之目標強度來管控耐久性較為適合。
- 四、一般橋梁結構設計時，開裂模式多為鋼筋拉力控制，因此選用綠色材料混凝土影響不大，然而若為混凝土材料控制，則粗粒料用量就可能對結構行為有所影響，建議後續能持續進行試驗探討。
- 五、交通部國道新建工程局橋梁下部結構允許高爐石粉飛灰添加比例為 45%，在國內已有台中生活圈快速道路、國道五楊高架段諸多工程實績，應具結構可行性。而本計畫為試驗室中小規模試驗結果，仍待長期工程實際應用驗證，建議於所主辦工程中，擇部份混凝土構件進行綠色材料混凝土試辦，以實際鑽心試體進行各項性質指標試驗，並進行整個橋梁結構之可行性與效益分析，以確認工程應用之成效。
- 六、本計畫雖以水泥混凝土為主，但瀝青混凝土也是道路橋梁的材料大宗，由文獻可知電弧爐氧化渣及轉爐石用於瀝青鋪面有助於提升耐久性，具有抗車轍能力及更耐磨，同時也是良好的綠色材料，於南部地區已有多條成功的工程案例。業主機關所主辦的西濱快速道路及淡江大橋工程多為重車行走，若能導入電弧爐氧化渣及轉爐石取代粗粒料應具效益，建議可於後續作進一步研究探討。



七、高爐石粉飛灰等綠色材料應用於混凝土中已被證實具可行效益，惟查公路總局施工規範對爐石飛灰之使用比例限制卻不明確，亦未納入混合水泥規格，建議可參考工程會施工綱要規範版本進行修訂，以讓爐石飛灰之使用得以合理化，讓規範與時俱進。

第九章 參考文獻

- 【1】 行政院經濟建設委員會，振興經濟擴大公共建設投資計畫，2009。
- 【2】 行政院公共工程委員會，振興經濟擴大公共建設投資計畫落實節能減碳執行方案，2009。
- 【3】 黃榮堯、徐偉國，道路工程綠色內涵探討之研究，國立中央大學營建管理學系碩士論文，2010。
- 【4】 交通部，減能減碳規劃設計參考原則，2010。
- 【5】 江哲銘、賴啟銘、周伯丞、李彥頤，建築室內環境保健綜合指標之研究，內政部建築研究所，1999。
- 【6】 財團法人台灣建築中心，綠建材標章，內政部建築研究所，2004。
- 【7】 建築技術規則，內政部營建署，2016。
- 【8】 張大鵬, 黃兆龍，綠混凝土性質與指標之研究，內政部建築研究所，2009。
- 【9】 環保署「事業廢棄物申報及管理資訊系統」
(<http://waste.epa.gov.tw/prog/IndexFrame.asp>)
- 【10】 JIS A 5011-4 混凝土爐渣骨材-電弧爐氧化矽骨材，2013
- 【11】 經濟部事業廢棄物再利用種類及管理方式，2016。
- 【12】 行政院公共工程委員會，公共工程飛灰混凝土使用手冊，1999。
- 【13】 陳朝和，飛灰混凝土使用手冊，台電公司煤灰處理與利用小組，1987。
- 【14】 陳朝和，飛灰混凝土配比設計與實例，，台灣電力公司 81 年度煤灰於土木工程應用研討會，台電公司環保處，1992。
- 【15】 陳朝和，飛灰混凝土產製與品管，正確使用飛灰以提昇混凝土品質研討會，台電公司台灣營建研究中心，1996。
- 【16】 葉茂財，飛灰混凝土施工與品管，飛灰及爐石混凝土應用研討會，國立中央大學，1994。
- 【17】 JIS A 6206:2013 コンクリート用高炉スラグ微粉末，2013
- 【18】 行政院公共工程委員會，公共工程高爐石混凝土使用手冊，2001。
- 【19】 ACI Committee 233, "Ground Granulated Blast-Furnace Slag as a Cementitious Constituent in Concrete", American Concrete Institute, Detroit, 1996
- 【20】 高爐石粉不同替代率水泥砂漿強度成長趨勢研究，中聯資源股份有限公司品管



處研究報告。

- 【21】 洪文方，普通水泥中添加高爐熟料之影響，國立台灣工業技術學院碩士論文，1985。
- 【22】 日本土木學會，高爐石粉末應用於混凝土施工指針，1996。
- 【23】 中國鋼鐵公司，爐石利用推廣手冊。
- 【24】 顏聰，陳豪吉，國內輕質骨材燒製與輕質混凝土之拌製可行性研究，中華民國建築學會第六屆建築研究成果發表會論文集，1993。
- 【25】 顏聰、黃兆龍、陳豪吉等，水庫淤泥輕質骨材產製及輕質骨材混凝土應用與推廣，內政部建研所，2003。
- 【26】 王順元、黃中和，臺灣水庫淤泥輕質骨材產製技術研究，混凝土科技期刊 4:3，2010
- 【27】 莊文宏、楊宏仁、張廷瑩、輕質混凝土應用於橋梁工程可行性評估，中華技術季刊(68期)，2005。
- 【28】 黃兆龍主編，高性能混凝土設計與應用，科技圖書股份有限公司，2000。
- 【29】 財團法人臺灣營建研究院，爐渣再利用方案可行性評估及推廣策略計畫，台灣鋼鐵工業同業公會，2013。
- 【30】 中興工程顧問股份有限公司，電弧爐煉鋼還原渣資源化應用技術手冊，經濟部工業局，2001。
- 【31】 陳立、黃偉慶，電弧爐氧化渣為混凝土骨材之可行性研究，國立中央大學土木工程系博士論文，2003。
- 【32】 Shi, C., and Day, R. L., "A calorimetric study of early hydration of alkali-slag cement," *Cement and Concrete Research* 25(6), pp. 1333-1346, 1995
- 【33】 Shi, C., and Day, R. L., "Some factors affecting early hydration of alkali-slag cement," *Cement and Concrete Research* 26(3), pp. 439-447, 1996.
- 【34】 Song, S., and Jennings, H. M., "Pore solution chemistry of alkali-activated ground granulated blast-furnace slag," *Cement and Concrete Research* 29(2), pp. 159-170 (1999).
- 【35】 Jimenez, A. F., Palomo, J. G., and Puertas, F., "Alkali-activated slag mortars: Mechanical strength behavior," *Cement and Concrete Research*

29(8), pp. 1313-1321 (1999).

- 【36】 蕭遠智、黃偉慶，鹼活化電弧爐還原渣之水化反應特性，國立中央大學土木系碩士論文，2002。
- 【37】 李宜桃、黃偉慶，鹼活化還原渣漿體收縮及抑制方法之研究，國立中央大學土木系碩士論文，2003。
- 【38】 郭硯華、黃偉慶，以鹼活化技術資源化電弧爐煉鋼還原渣之研究，國立中央大學土木系碩士論文，2007。
- 【39】 黃慶慶、黃偉慶，鹼活化電弧爐還原渣製作混凝土可行性研究，國立中央大學土木系碩士論文，2008
- 【40】 Wang, S. D., Scrivener, K. L., and Pratt, P. L., “Factors affecting the strength of alkali-activated slag.” *Cement and Concrete Research*, 24 (6), 1033-1043, 1994.
- 【41】 Shi, C., and Li, Y., “Investigation on some factors affecting the characteristics of alkali-activated phosphorus slag cement.” *Cement and Concrete Research*, 19 (4), 527-533, 1989.
- 【42】 Shi, C., (1996). “Strength, Pore Structure and Permeability of Alkali-Activated Slag Mortars.” *Cement and Concrete Research*, 26 (12), 1789-1799.
- 【43】 Shi, C., and Xie, P. (1998). “Interface between cement paste and quartz sand in alkali-activated slag mortars.” *Cement and Concrete Research*, 28 (6), 887-896.
- 【44】 許伯良、林平全、徐登科，轉爐石產製與工程應用，轉爐石應用於瀝青混凝土鋪面研討會，2011。
- 【45】 黃隆昇、林登峰、王昱凱，轉爐石瀝青混凝土應用於屏東縣縣道之研究，轉爐石瀝青混凝土研討會，2012
- 【46】 張偉哲、陳偉全、彭俊，嘉義縣重載道路鋪設轉爐石瀝青路面工程成效評估之研究，轉爐石瀝青混凝土研討會，2012
- 【47】 陳建旭、陳偉全、廖敏志、陳海通，天然粒料與轉爐石瀝青混凝土績效評估—以台南市為例，轉爐石瀝青混凝土研討會，2012
- 【48】 林登峰、陳筠昀、蔡昕融、王美雲，探討轉爐石瀝青混凝土試驗道路成果—以高雄市大業北路為例，轉爐石瀝青混凝土研討會，2012

- 【49】 陳建旭、陳偉全、廖敏志、廖敏松，轉爐石應用於密級配和開放級配瀝青混凝土之成效評估
- 【50】 財團法人臺灣營建研究院，飛灰鋼鐵爐石適用評估計畫，中聯資源股份有限公司，2005。
- 【51】 王韡蒨、許書王、劉志堅、李釗，混凝土鹼質與粒料反應檢測與防治方法探討，混凝土科技，第五卷第二期，2011年4月。
- 【52】 Kellenberger, D. and Althaus, H.-J., “Relevance of simplifications in LCA of building components,” Building and Environment, Vol. 44, No. 4, pp. 818-825, 2009.
- 【53】 張宜中、張建智，添加轉爐石粉對於混凝土耐久性影響之研究，國立海洋大學河海工程學系，2006。
- 【54】 徐兵、徐永斌，寶鋼轉爐渣-水泥生產的綠色資源，寶鋼綜合開發公司，中國科學院上海冶金研究所材料物理與化學(專業)，2000。
- 【55】 詹穎雯，台灣地區大氣中氯鹽與橋梁腐蝕劣化環境之研究，交通部公路總局，2012，
- 【56】 黃兆龍，高性能混凝土運用於橋樑之委託研究工作，交通部公路總局西部濱海公路中區工程處，2014
- 【57】 顏聰、陳豪吉，輕質高強度混凝土在橋樑工程之應用，交通部國道新建工程局，2005
- 【58】 詹穎雯，活性粉混凝土材料應用於橋梁工程之研究，交通部國道新建工程局，2015
- 【59】 黃然，RC 橋梁材料耐久性評估與殘餘壽命預測之研究，交通部運輸研究所，2010
- 【60】 黃然，永續混凝土材料之實驗開發與應用研究，內政部建築研究所，2011
- 【61】 黃然，使用爐渣(石)對於混凝土力學與耐久性能之研究，內政部建築研究所，2012
- 【62】 趙文成，高性能混凝土在單軸作用力下之力學行為，國家科學委員會，1994。
- 【63】 張大鵬，先進混凝土材料應用於防洪構造之研究---總計畫暨子計畫：綠混凝土防洪耐久及耐震性質研究，國家科學委員會，2010
- 【64】 陳君弢、添加石灰石於水泥及混凝土之性能研究，國家科學委員會，2011
- 【65】 李明君，混凝土之減碳技術研究，國家科學委員會，2012



- 【66】 黃兆龍，歐盟大型整合全廢棄物計畫－永續、創新及節能的混凝土（SUS-CON），科技部，2014
- 【67】 黃然，水淬高爐石粉及轉爐石粉混合使用對混凝土性質及減碳效益之研究，科技部，2014
- 【68】 陳清楠、劉庭芬，中興工程研究大樓智慧綠建築之實踐經驗分享(上)、(下)，水利土木科技資訊，59-60期，2014年6月-12月。
- 【69】 廖同柏、顏志欽、邱暉仁，高飛灰摻量混凝土於中興工程研究大樓新建工程之應用，中興工程季刊，第128期，2015年7月。
- 【70】 鍾禮榮、陳俊融，高捷運高爐水泥混凝土與自充填混凝土之應用，混凝土科技，第三卷第三期，2009年六月。
- 【71】 ACI 226.3R, “Use of Fly Ash in Concrete” .
- 【72】 王福元、吳正嚴，”粉煤灰利用手冊，”中國電力出版社，北京。
- 【73】 V.M. Malhotra and A.A Ramezaniapur,1994,” Fly Ash in Concrete, ” CANMET, Natural Resources Canada, Ottawa.
- 【74】 V.M Malhotra and P.Kumar Mehta,1996,” Pozzolanic and Cementitious Materials,” Gordon and Breach Publishers.
- 【75】 陳振川、詹穎雯，填加飛灰與高爐石粉混凝土之體積穩定探討，高爐石粉與飛灰資源在混凝土工程上應用研討會論文集，1986。
- 【76】 財團法人台灣營建研究院，飛灰爐石使用，2001。
- 【77】 ACI 318-14 Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary，2014
- 【78】 BS 8500-1：2006 Concrete- Complementary British Standard to BS EN 206-1，2006
- 【79】 日本土木學會，高爐石粉末應用於混凝土施工指針，平成八年。
- 【80】 中華人民共和國國家標準，JGJ 55-2011 普通混凝土配合比設計規程，2011
- 【81】 中華人民共和國國家標準GB/T 50476-2008 混凝土結構耐久性設計規範，2008。
- 【82】 交通部，公路橋梁設計規範，2009。
- 【83】 內政部營建署，結構混凝土施工規範，2002
- 【84】 劉裕意、黃然，添加卜作嵐材料對於混凝土耐久性影響之探討，國立海洋大學河海工程學系碩士論文，2001。
- 【85】 黃兆龍，卜作嵐混凝土使用手冊，中興工程顧問社，2007



- 【86】 湛淵源、黃兆龍，高性能混凝土材料設計和應用—HPC 的減碳及永續使用發展，中華民國建築公會全國聯合會第六屆台灣建築論壇—921 震災 10 週年回顧及展望，2009 年 12 月。
- 【87】 財團法人台灣營建研究院，公路橋梁隧道設計使用年限與耐久性規範草案之研擬，交通部台灣區國道新建工程局，2014。
- 【88】 周瑞生、葉冠志，生命週期之建築物生命週期之排碳量模擬與環境成本分析：混凝土預鑄與場工法之比較，營建管理季刊，2013.3。
- 【89】 Singh, D. and Tiong, R. L. K., “Development of life cycle costing framework for highway bridges in Myanmar,” *International Journal of Project Management*, Vol. 23, No. 1, pp. 37-44., 2005.
- 【90】 Suzuki, M. and Oka, T., “Estimation of life cycle energy consumption and CO2 emission of office buildings in Japan,” *Energy and Buildings*, Vol. 28, No. 1, pp. 33-41, 1998.
- 【91】 Kellenberger, D. and Althaus, H.-J., “Relevance of simplifications in LCA of building components,” *Building and Environment*, Vol. 44, No. 4, pp. 818-825 , 2009.
- 【92】 林憲正、伍勝民、楊明德，RC 橋梁生命週期之溫室氣體排放量評估，朝陽科技大學碩士論文，2001。
- 【93】 劉漢卿、林憲德，建築生命周期能源消費分析與溫室氣體排放量估算，國立成功大學建築研究所碩士論文，1994
- 【94】 楊煦照、林憲德，建築物之耗能及環境衝擊解析，國立成功大學建築研究所碩士論文，1996
- 【95】 張又升、林憲德，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碩士論文，1997
- 【96】 張世典，台灣建築生命週期二氧化碳排放減量之研究，行政院環境保護署，1998
- 【97】 馮豐隆，環境評估方法之比較與網路益本法之提出，1998。
- 【98】 張德鑫、王韡蓓、陳獻、李宗勳，新興公共工程計畫落實節能減碳評估，行政院農業委員會林務局，2011。
- 【99】 財團法人臺灣營建研究院，高性能混凝土潛變乾縮性質試驗報告，信一預拌混凝土股份有限公司，2011



- 【100】財團法人臺灣營建研究院，SCC 巨積混凝土表心溫試驗報告，鍵蒼企業股份有限公司，2010
- 【101】財團法人臺灣營建研究院，林口電廠巨積混凝土表心溫監測試驗報告，大陸工程股份有限公司，2013。
- 【102】吳國洋、林志棟，混凝土製品應用於土木工程之減碳效益評估-以道路、建築工程為例，國立中央大學土木系碩士論文，2011。
- 【103】潘彥任、黃榮堯，廢棄混凝土不同再利用方式節能減碳效益之評估，國立中央大學土木系碩士論文，2010。
- 【104】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，國立成功大學資源工程研究所博士論文，2006
- 【105】林建榮、賴榮平，住宅設備生命週期二氧化碳排放量解析，國立成功大學建築工程研究所碩士論文，2003
- 【106】溫善政，建築物施工暨營運階段碳足跡探討-以嘉創中心為立，中華大學營建管理系碩士論文，2013
- 【107】Hopkins, D.S., Thomas, M.D.A., Girn, G. and Munro, R., “York University uses High-Volume Fly Ash Concrete for Green Building”, Annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineering, CSCE, 2001
- 【108】Busby and Associates, Use of EcoSmart Concrete in the Bayview High-Rise Apartment, Vancouver, B.C., Busby and Associates Architects, www.ecosmartconcrete.com, 2002
- 【109】鄭元良、楊仲家，快速氯離子穿透試驗於含飛灰爐石混凝土耐久性能評估之研究，內政部建築研究所，2014
- 【110】財團法人台灣營建研究院，混合水泥應用於巨積混凝土研討會，中聯資源股份有限公司，2013。
- 【111】高速公路及快速公路交通管制規則，交通部國道高速公路局，2007
- 【112】公路路線設計規範，交通部，2011
- 【113】公路橋樑耐震設計規範，交通部，2009
- 【114】黃兆龍，混凝土性質與行為，詹氏書局，2002
- 【115】交通部公路總局施工說明書第 03050 章「混凝土基本材料及施工一般要求」
2.1.9 節



- 【116】 ACI 201.2R Guide to Durable Concrete , 1997
- 【117】 ASTM 1202-00, “Electrical Indication of Concrete’ s Ability to Resist Chloride Ion Penetration” , American Society for Testing and Materials (2000).
- 【118】 經濟部能源局，<http://www.moeaboe.gov.tw/ECW/populace/home/Home.aspx>
- 【119】 混凝土所用材料廠牌及型別，龍形預拌混凝土廠。

「綠色材料應用於快速道路橋梁結構可行性與效益分析」

期初報告審查會紀錄

壹、時間：105年2月18日上午10時整

貳、地點：本處第一會議室

參、主持人：魏課長維男

審查意見		辦理情形
一、張委員大鵬		
1	期初報告內容豐富與詳實。	感謝委員指導。
2	本研究「綠色材料」之定義宜事先定義與說明。	感謝委員指導，遵照辦理。已彙整各機歸政策對於綠色材料之定義，詳期中報告表 2.2-1。
3	本研究標題係針對「快速道路橋梁結構」，因此，研究計畫中宜事先針對「快速道路橋梁結構」之定義、特性、設計條件基本須求、設計年限要求等項目加以說明，再闡述如何與綠色材料應用做關聯性說明(處 P84 表 5.1.1-1 為其中一項要項)。	感謝委員指導，遵照辦理。已納入交通部橋梁設計規範對混凝土之要求，並與後續綠色材料性質研究試驗作估聯性說明，詳期中報告 2.5 節。
4	可行性分析與評估模式與方法宜說明。	感謝委員指導，遵照辦理。綠色材料應用於混凝土之功能可行性評估已進行各項膠結材料、試驗、硬固混凝土試驗、耐久性試驗，初步結果詳第六章，有關縮尺寸柱的結構可行性分析經於預定齡期時計測試後再進行。
5	效益分析與評估之模式與方法宜說明。	感謝委員指導，遵照辦理。有關使用綠色材料的經濟性效益及節能減碳效益初步分析結果詳第七章。
6	單位重之單位為 kg/cm^3 ，不是 kgf/cm^3 ，請修正(p32 之 $2000\text{kgf}/\text{cm}^3$ 、p33 之 kgf/cm^3 、p35 之 kgf/cm^3 、..... 等)。	感謝委員指導，遵照辦理。報告內容已全面修正。
7	抗壓強度之單位為 kgf/cm^2 ，不是 kgf/m^2 ，請修正(如 p 表 2.3.3-1， kgf/m^2)。	感謝委員指導，遵照辦理。報告內容已全面修正。
8	報告中單位宜統一(如 p33，表 2.3.3-2 用 SI)。	感謝委員指導，遵照辦理。除引用文獻照原文獻上之寫法陳述外，其餘報告內容已全面修正。
9	建議將 p32，圖 2.3.3-1 之彩色圖示，改用不同形狀之黑白圖示，以利日後方便以黑白印製。	感謝委員指導，遵照辦理。已修正。
10	期初報告中所使用圖表如係引用他人資料	感謝委員指導，遵照辦理。報告內容已

	時，宜將文獻出處列出(如 p37、p41、p51~p73、p73-p82)。	全面修正。
11	P81公式(5-1)標示請往右靠齊;公式(5-1)為線彈性材料對彈性模數之定義，但在實務應用，混凝土中彈性模數之計算公式為 $E_c = (0.4f_c' - S_1) / (\epsilon_c - 0.0000\zeta)$ ，其中 $S_1 = \epsilon_c E_c = 0.0000\zeta$ 之應力， $\epsilon_c = 0.4f_c'$ 之應變，請列入報告中。	感謝委員指導，遵照辦理。彈性模數公式已修正。
12	建議委託單位將道路之非結構構件，如分隔島、橋護欄、緣石等之抗壓強度提昇至 280kgf/cm^2 (4,000psi)，甚至 350kgf/cm^2 (5,000psi)以上，以提升整體快速道路、高速公路等系統之美觀性與耐久性，達到綠色內涵永續工程之目標。	感謝委員指導，遵照辦理。將納入本報告建議事項中。
二、李委員釗		
1	研究單位經驗豐富，足於執行本計畫。	感謝委員指導。
2	橋梁可分成多項部份，上部結構、下部結構、墩柱、梁、橋台、引道及附屬設施等多了部分，各部分角色、受行為不同，對材料的要求亦不同，建議可對橋梁先分類，再針對不同分類，研究使用綠色材料的做法。	感謝委員指導，遵照辦理。已納入交通部橋梁設計規範、公路總局施工規範及淡江大橋設計圖說對混凝土之要求，並據以作為研擬綠色材料試驗項目之參考。詳期中報告2.5節。
3	依一般經驗，在混凝土中使用飛灰和水淬爐石粉，會增加混凝土的收縮和潛變行為，建議考量此特性，以適當使用綠色材料。	感謝委員指導，遵照辦理。有關添加爐石粉與飛灰對混凝土體積穩定性影響部份，已納為本次研究試驗項目，試驗初步結果詳期中報告5.5節。
4	除飛灰和水淬爐石粉外，可能亦有適當可行可用的摻料和土法，有助實現綠色橋梁，建議可適當著墨，但對近期尚在研發短期不易應用於橋梁的綠色材料，可不必探討太多。	感謝委員指導，遵照辦理。已蒐集國內事業廢棄物及可再用資源物之種類與年產量(詳表2.2-2)，探討除爐石粉及飛灰外其與可再利用於橋梁工程之綠色材料，依此增列電弧爐氧化矽之研究，詳期中報告2.2.2節。
5	參考文獻的75%為中文資料，建議可增加外文文獻，以增加廣度。	感謝委員指導，遵照辦理。
三、西濱北工處工程課		
1	氧化矽是否影響品質?單價分析是否差異?	感謝指導。依本研究之試驗成果氧化矽混凝土皆可符合設計需求，試驗結果詳第五章。另依市場訪查每噸氧化矽單價比天然砂石低200元，具經濟效益，初步成本分析詳7.1節。
2	說明爐石(鋼渣)和爐石粉差異?	感謝指導。電弧爐矽與高爐爐矽之主要

		差異為原料及製程設備差異，電弧爐碴以廢鋼為原料，經電弧爐煉製，高爐爐碴以天然鐵礦砂為原料，經高爐煉製，有關兩者之介紹詳期中報告2.2.1節及2.2.2節。
3	工地實務中飛灰、爐石是否水泥廠預先摻合？	感謝指導，目前預拌混凝土廠使用爐石飛灰皆於廠內拌製，但仍可於水泥廠內預先拌製，再運送給預拌廠使用，此類摻合飛灰爐石的水泥應符合 CNS 15286 水硬性混合水泥之規定。有關混合水泥的工程實績詳期中報告 2.3.3 節。
4	爐石35%、飛灰15% 合計50%;不同強度、不同結構，採不同配比，請提具體建議比例。	感謝指導，不同結構部位依設計規範及設計圖說有不同抗壓強度要求，不論爐石飛灰添加比例皆需符合抗壓強度需求。另預力梁需考量早期強度，墩柱應考慮體積穩定性(乾縮潛變影響)，巨積混凝土應考慮水合熱，皆已列為本研究試驗項目，將依試驗結果提具體建議。
四、西濱北工處第二工務段		
1	報告P31:「3.可減少橋面版所需預力鋼數量」字樣，請修正為「3.可減少橋面版所需預力鋼絞線數量」;「9.縮減打數量，降低打費用」語意不詳，請再詳述;「10.減輕橋面版之載重」字樣，請修正為「10.減輕橋面版之自重」。	感謝指導，遵照辦理。該段文字敘述已修正。
2	報告P71倒數第1行「詳細試驗驗證，詳2.5節」字樣，請修正為「詳細試驗驗證，詳2.4節」。	感謝指導，遵照辦理。本節配合期中報告撰寫已重新修正。
3	報告內容引用文獻之處，請在句末標示文獻編號，以利辨識。	感謝指導，遵照辦理。報告內容已全面修正。
八、結論		
1	基本上，快速道路橋梁材料只有混凝土橋與鋼橋，而鋼橋在製作上屬耗能產業，列入綠色材料將有爭議，故同意研究單位所提研究方向。	感謝指導，遵照結論執行後續計畫。
2	各工程單位對混凝土性質並不清楚，請研究單位在後續的報告中，可就相關材料之應用方法，作明確建議，讓各工程單位可用大膽使用。	感謝指導，遵照結論執行後續計畫。
3	材料單位請統一使用公制。	感謝指導，遵照辦理。除引用文獻照原文獻上之寫法陳述外，其餘報告內容已全面修正。

4	請研究單位就各委員及出席單位的審查意見作修正後，將修正報告送處。	感謝指導，遵照結論執行後續計畫。
5	初步報告原則通過，請研究單位續辦後續作業。	感謝指導，遵照辦理。

「綠色材料應用於快速道路橋梁結構可行性與效益分析」

期中報告審查會紀錄

壹、時間：105年8月17日下午14時整

貳、地點：本處第一會議室

參、主持人：詹副處長益祥

審查意見	辦理情形
一、張委員大鵬	
1 研究計畫中對於綠色膠結材料使用於快速道路、橋樑所涉及重要工程性質如工作性（初終凝、坍度及坍損、水化熱）使用性（抗壓強度、靜彈性模數）及耐久性（熱壓膨脹、抗硫酸鹽試驗、RCPT、乾縮、潛變）等均有實驗成果有足夠之實務性與實用性予以肯定。	感謝委員指導。
2 針對前述試驗結果完成後，在綜合結論時希望能針對研究主題在快速道路橋樑結構可行性與效益分析時，能提出適當之配比策略與使用範圍。	感謝委員指導，遵照辦理。已依據研究成果提出結構部位及強度提出配比策略與使用範圍，詳期末報告5.7節及7.3節。
3 報告中請再仔細區分圖表資料，如係引用自其他參考文獻中，須確實標示文獻出處（如P21.表2.2.1-1-1文獻年代，全文名稱，P26.圖2.2.1-2-1，2.2.1.2-2…等）。	感謝委員指導，遵照辦理。報告已全面修正。
4 報告中有部分表格之單位未註明(如P111,表4.2, P133表5.2-4 kg/m^3)上下標未標示(如 kgf/cm^2)，應力單位名稱 kgf/cm^2 （如表p113,表4.2-3…等）	感謝委員指導，遵照辦理。報告已全面修正。
5 對於快速道路橋梁中非結構性構件(如護欄混凝土塊,分隔島混凝土塊)宜亦能利用本研究計畫研究成果加以改進,使用較高強度綠色材料混凝土,以增加這些非結構性構件之日後耐久性與美觀性,建議使用至少280 kgf/cm^2 強度。	感謝委員指導，遵照辦理。已將非結構性混凝土提高綠色材料比例並將設計強度至280 kgf/cm^2 納入報告建議事項中，詳期末報告8.2節。
二、李委員釗	
1 請界定本計畫工作項目的研究範圍，如道路橋梁、環境與耐久性，穩定效能等，確認清楚。	感謝委員指導，遵照辦理。已界定本計畫工作項目之研究範圍，詳期末報告1.4節。
2 數字單位呈現方式應一致，例如210 kgf/cm^2 數字與單位中間須再空一格	感謝委員指導，遵照辦理。報告已全面修正。
3 本計畫係採用高比例的卜作嵐材料作試驗，	感謝委員指導，遵照辦理。有鑑於卜作

	然卜作嵐材料需較長反應時間，時間愈長愈能表現出綠色材料之特性，建議試驗齡期可再拉長，再評估各項試驗結果之差異性。	嵐作用需較長時間反應，已增辦綠色材料抗硫酸鹽、乾縮、潛變180天齡期試驗，並納入期末報告5.6節中，評估試驗結果之差異。
4	氯離子電滲試驗受添加卜作嵐材料之影響，混凝土愈緻密會有愈佳的抗滲透性，建議研究團隊就本計畫氯離子電滲試驗結果請教專家學者，做進一步探討確認。	感謝委員指導，已補充氯離子電滲文獻，納入添加卜作嵐材料的混凝土抗滲透性，詳期末報告3.2節。
5	氧化矽用途需符合再利用管理辦法之規定，範圍有限，故結論應用需謹慎評估，建議增作高壓蒸煮試驗確認其安定性。	感謝委員指導，遵照辦理。已增作氧化矽安定性試驗，結果顯示氧化矽須更長時間作安定化處理，詳期末報告5.3節。
	本計畫成果豐富，可能成為混凝土綠色材料之重要文獻，故試驗成果之敘述請加強嚴謹度。	感謝委員指導，遵照辦理。已重新修潤試驗成果之論述，詳期末報告第5章。
	建議公路總局思考混凝土耐久性之檢驗方式，耐久性常以水膠比作限制，但若以該水膠比作配比設計，其抗壓強度結果通常遠高於設計強度，這時驗收即不宜以設計強度來作為合格標準，請再考量。	感謝委員指導，遵照辦理。經洽詢工務段主辦工程司表示，若有耐久性考量時，會以該支配比試拌時之抗壓強度的85%作為驗收標準，而非僅以設計強度作為合格標準。有關混凝土耐久性之檢驗方式已納入建議事項中，詳期末報告8.2節。
	期末報告請就計畫成果比較目前機關工程執行現況，建議更佳方案，讓綠色材料後續得以更廣泛使用。	感謝委員指導，遵照辦理。已評估各綠色材料配比的機能性、經濟性、減碳性以AHP作綜合分析比較，量化評估指標，並依機關工程現況提出最佳配比方案建議，詳期末報告7.3節。
三、西濱北工處第三工務段		
1	報告書第5頁之流程圖建議照標準流程圖較佳，其字體建議比照原文章，較有統一性。	感謝指導，遵照辦理。已修改流程圖及字體，詳期末報告1.6節。
2	部分錯別字修正再請留意。	感謝指導，遵照辦理。已全面修正。
3	報告書第9頁的表下之名稱需修正，建議對公務門稱呼國道3號，非國3。	感謝指導，遵照辦理。已修正。
4	報告書中部分圖太小，有需多資訊看不清楚，建議再調整。	感謝指導，遵照辦理。已全面檢核圖片大小之合適性並進行調整。
5	報告書第121頁結論，是否可彙整對照表表示會更加清楚。	感謝指導，遵照辦理。工作項目與報告內容對應章節詳表1.4-1。重點結論對照表詳表8.1-1。
八、結論		
1	請研究單位就各委員及出席單位的審查意見作修正，並同期末報告送處。	感謝指導，遵照辦理。

2	期中報告原則通過，請研究單位續辦後續作業。	感謝指導，遵照辦理。
---	-----------------------	------------

「綠色材料應用於快速道路橋梁結構可行性與效益分析」

期末報告審查會紀錄

壹、時間：106年1月16日下午14時整

貳、地點：本處第一會議室

參、主持人：詹副處長益祥

審查意見		辦理情形
一、張委員大鵬		
1	請將6.1節快速道路定義移到第二章文獻蒐集中做綜合論述。	感謝委員指導，遵照辦理。已將6.1節移到第二章，詳見成果報告書2.6節。
2	圖表所引用之資料來源請增加文獻編號，以利文獻查詢。並儘量避免圖表或標題跨頁情形。	感謝委員指導，遵照辦理。報告已全面修正，增列參考文獻編號，並修訂圖表或標題跨頁情形。
3	報告中部份強度標記為Kgf/cm ² ，K請以小寫表示。	感謝委員指導，遵照辦理。報告已全面修正。
4	AHP層狀分析訪談專家學者配比因子權重時，部分與平均及認知偏差較大，基於統計之可靠度建議將極端值予以剔除。	感謝委員指導，遵照辦理。報告已將專家學者配比因子權重極端值刪除，重新計算效益分數，詳成果報告7.3節。
二、李委員釗		
1	建議第一章能清楚寫出合約工作內容與要求	感謝委員指導，遵照辦理。成果報告1.3節已詳列委辦工作項目及內容。
2	合約內容不能變動，其他若於內文未討論的項目宜刪除(如CI)	感謝委員指導，遵照辦理。針對合約要求工作項目界定研究範圍詳成果報告1.4節，已涵蓋合約內容。
3	表1.4-1明列計畫工作項目與報告對應的章節，方便閱讀。	感謝委員指導，遵照辦理。報告已明列合約工作項目與報告對應章節對照表，詳表1.4-1。
4	報告部分章節文字應用的嚴謹度有改善空間，錯字應核對。	感謝委員指導，遵照辦理。已重新檢核報告文字敘述，並修改錯別字。
5	爐石粉、高爐石粉，用字宜尊重CNS。	感謝委員指導，遵照辦理。依CNS 15286，高爐石粉完整名稱為水淬高爐爐渣粉，惟名詞太長報告引用不便，故於成果報告1.4節研究範圍中先行說明簡稱為高爐石粉，後章再改用一致性名詞用語。
6	報告中綠色材料所用名詞請依CNS國家標準或法規標準用詞，若名詞太長可於報告前章先行說明簡稱，後章再用一致性名詞用語。	感謝委員指導，遵照辦理。成果報告1.4節研究範圍中先行說明所用材料名詞簡稱，包含高爐石粉、混合水泥等，後章再改用一致性名詞用語。

7	2.4.2節國內混凝土規範對爐石粉及飛灰之限制一節請增列討論公路總局的規範情形。	感謝委員指導，遵照辦理。報告已增列公路總局施工規範對高爐石粉及飛灰之使用限制，詳成果報告2.4.2節。
8	報告中各表不宜跳頁排報。	感謝委員指導，遵照辦理。報告已修改。
9	收集相關規範的章節，宜增加小結，提出研究團隊的看法。	感謝指導，遵照辦理。已彙整各機關施工規範對卜作嵐材料之使用要求，提出綜合建議列為該節小結，詳成果報告2.4.2節尾。
10	本報告係以不同爐石粉飛灰比例之試體進行各項試驗，應明列主要成分，另所用IS型及IP型混合水泥係為工能性規格，亦應明列主要成分，如水淬爐石粉與飛灰。IS、IP為規範中的水泥形式，無法與25/10、35/15爐石+飛灰的配比比對。	感謝指導，遵照辦理。依CNS 15286水硬性混合水泥第1節適用範圍備考：「本標準依某些性能要求而規定混合水泥之組成與配比，此與純粹之水硬性水泥標準不同，因純粹之水硬性水泥性能標準僅以性能規範控管產品及其驗收」而市售混合水泥IS型及IP型皆以性能導向，分別添加適量之高爐石粉及卜作嵐材料以符合CNS 15286要求，故仍得以就不同高爐石粉及飛灰添加比例座混凝土各項性能試驗分析。
11	5.6.2乾縮試驗與5.6.3潛變試驗的結果，顯示使用卜作嵐材料後的變形量低於純水泥的控制組，與一般經驗和相關文獻不同，建議加強說明原因。	感謝指導，遵照辦理。已補充說明使用卜作嵐材料有助於減少乾縮與潛變之原因，詳成果報告5.6.2節與5.6.3節。
12	摘要中說明，結果皆優於純水泥，請再確認。	感謝指導，遵照辦理。成果報告摘要論述已修改為各有優勢。
13	有關報告P134頁第4行CNS標準均有量化說明，宜明確表列。避免寫”偷摻”(第7行)，敘述不合宜處建請修改。	感謝指導，遵照辦理。本頁內容論述已修改，”偷摻”用詞已刪除，詳成果報告5.1節。
14	氧化矽再利用法規規定已修改，請一併更新。另飛灰取代細骨材在本計畫中是否有執行，若無可不提。	感謝指導，遵照辦理。經濟部事業廢棄物再利用管理辦法中電弧爐渣(石)業已於105年6月20日修訂公告，報告中有關電弧爐渣(石)再利用用途部分已依新規定修正，詳成果報告5.1節。另團隊已辦理飛灰取代細骨材之混凝土試驗，配比詳表5.2-4，強度比較分析詳5.5.2節四、高灰量混凝土，各強度分析比較詳圖5.5.2-1、圖5.5.2-3、圖5.5.2-5。
15	純水泥與添加爐石飛灰之試驗結果需長期研究驗證，因此摘要中對於結論說明建議在保守點。	感謝指導，遵照辦理。已修正成果報告摘要中對使用高爐石粉及飛灰之成效論述，建議長期研究驗證。

16	建議第八章針對工作項目之結論移置各章節最後，而8.1節結論應對研究主題作綜合結論。	感謝指導，遵照辦理。已修正成果報告8.1節結論。
17	8.2節第三點建議的RCPT試驗對於爐石飛灰混凝土恐有高估之虞，在尚未有定論前建議仍以限制水膠比對應之目標強度來管控耐久性。	感謝指導，遵照辦理。已修正成果報告8.2節第三點對耐久性檢驗作為，暫行刪除RCPT建議。
18	P133頁內容所提ACI318請註明引用年份版本。	感謝指導，遵照辦理。該處已增註年份。
三、西濱北工處第三工務段		
1	添加爐石飛灰會延長混凝土凝結時間，請說明對工期之影響	感謝指導，遵照辦理。已就使用爐石飛灰對工期影響進行探討，詳成果報告5.7節。
四、西濱北工處代表意見		
1	P135頁表5.1-1引用參考淡江大橋及其聯絡道路2K+606到5K路段，後面建議新增7K+000到8K+165路段。	感謝指導，遵照辦理。已修正，詳成果報告表5.1-1。
2	第8、9頁有圖表跳頁情況，請修改。	感謝指導，遵照辦理。已全面修改圖片大小之合適性並進行調整。
五、西濱北工處設計課意見		
1	期末報告關於50%爐石粉飛灰試驗柱因已重做，請更新數據及結果分析。	感謝指導，遵照辦理。已更新50%爐石粉飛灰試驗柱之試驗成果，詳成果報告6.4.2節。
八、結論		
1	對於初凝時間較一般混凝土長，對拆模時間與施預力之時間是否影響？本案僅對單一構件有所研究論述，對於整個橋梁結構之可行性與效益分析則未述及，請予探討補充。	感謝指導，遵照辦理。添加高爐石粉及飛灰對拆模時間及施預力時間影響評估詳成果報告5.7節。國工局橋梁下部結構允許爐石粉飛灰添加比例為45%，在國內已有台中生活圈快速道路、國道五楊高架段諸多工程實績，應具結構及效益可行性，有關後續之建議詳成果報告8.2節。
2	各委員及出席單位意見，請參照修正。	感謝指導，遵照辦理。
3	原則上修正後通過。	感謝指導。
4	請依契約規定，收到審查紀錄後15日曆天內提送定稿報告書(含資料光碟)15份至處。	感謝指導，遵照辦理。

初終凝照片



維卡針初終凝試驗



維卡針初終凝試驗



維卡針初終凝試驗



維卡針初終凝試驗

抗硫酸鹽試驗



抗硫酸試驗



抗硫酸試驗

混凝土拌製



坍度試驗



溫度試驗

坍度試驗



溫度試驗

溫度試驗



坍度試驗

氣離子試驗



坍流度試驗

坍流度試驗



210 kgf/cm² 坍度試驗(純水泥)



210 kgf/cm² 坍度試驗
(混合水泥 IS(<70)(MS))



210 kgf/cm² 坍度試驗
(混合水泥 IS(<70)(MS))



210 kgf/cm² 坍度試驗
(爐灰比例 25:10)



210 kgf/cm² 坍度試驗
(爐灰比例 25:10)



210 kgf/cm² 坍度試驗
(爐灰比例 35:15)



210 kgf/cm² 坍度試驗
(混合水泥 IP(HS-LH))



210 kgf/cm² 坍度試驗
(混合水泥 IP(HS-LH))



280 kgf/cm² 坍度試驗(純水泥)



280 kgf/cm² 坍度試驗(純水泥)



280 kgf/cm² 坍度試驗
(混合水泥 IS(<70)(MS))



280 kgf/cm² 坍度試驗
(爐灰比例 25:10)



280 kgf/cm² 坍度試驗
(爐灰比例 25:10)



280 kgf/cm² 坍度試驗
(混合水泥 IP(HS-LH))



350 kgf/cm² 坍度試驗
(純水泥)



350 kgf/cm² 坍度試驗
(混合水泥 IS(<70)(MS))



350 kgf/cm² 坍度試驗
(爐灰比例 25:10)



350 kgf/cm² 坍度試驗
(爐灰比例 35:15)



350 kgf/cm² 坍度試驗
(混合水泥 IP(HS-LH))



350 SCC kgf/cm² V型漏斗試驗



350 SCC kgf/cm² IS(<70)(MS)
箱型漏斗試驗



350 SCC kgf/cm² IS(<70)(MS)
V型漏斗試驗



420 kgf/cm² (純水泥)坍度試驗



420 kgf/cm² (爐灰比例 35:15)坍度試驗



箱型試驗



V型漏斗試驗



試體總數



試體總數



坍流度試驗



小型廠拌



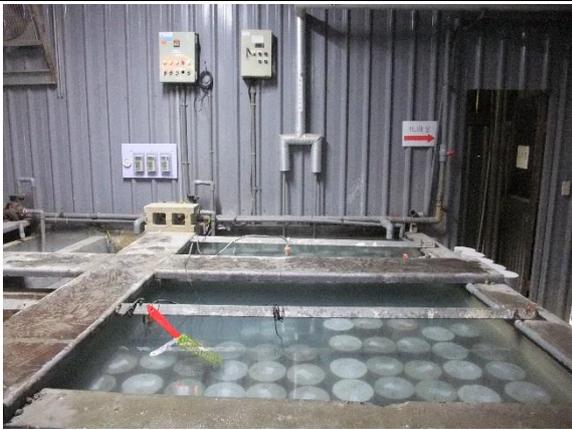
小型廠拌



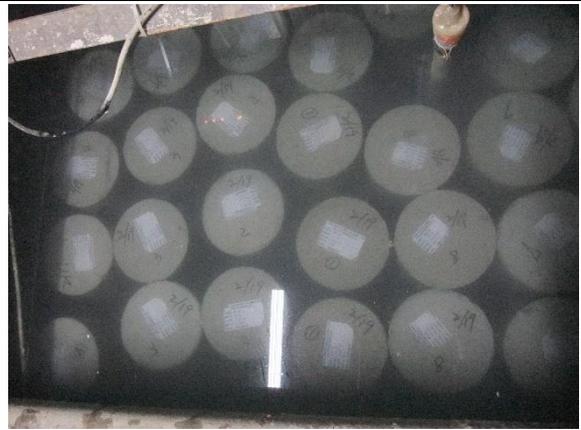
試體養護



廠內澆製

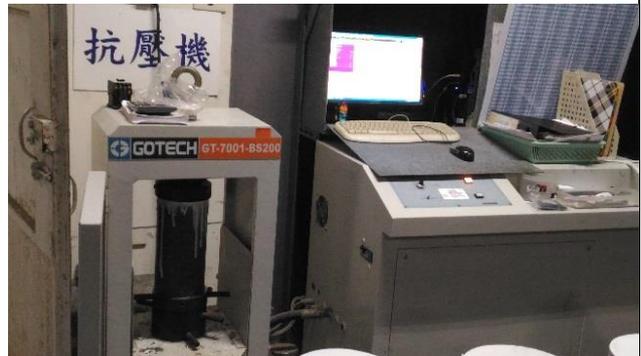
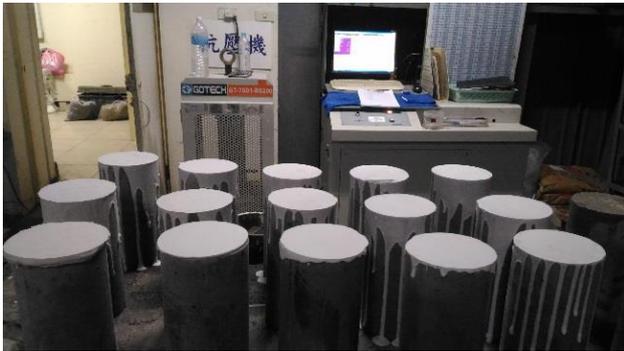


試體灌製



試體養護

試體養護



試體蓋平

抗壓試驗



潛變試驗準備



乾縮試驗



潛變試驗



乾縮試驗

高灰量試驗



設計強度 210 kgf/cm² 取代 5%



計強度 210 kgf/cm² 取代 5%



設計強度 210 kgf/cm² 取代 5%(坍流度試驗)



設計強度 210 kgf/cm² 取代 5%(坍流度試驗)



設計強度 210 kgf/cm² 取代 10%(坍度試驗)



設計強度 210 kgf/cm² 取代 10%(空氣含量)



設計強度 210 kgf/cm² 取代 10%



設計強度 210 kgf/cm² 取代 10%



設計強度 280 kgf/cm² 取代 5%(坍流度試驗)



設計強度 280 kgf/cm² 取代 5%(空氣含量)



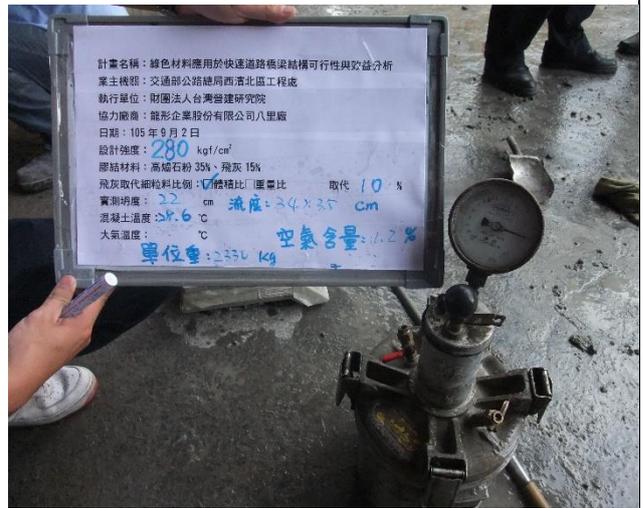
設計強度 280 kgf/cm² 取代 5%



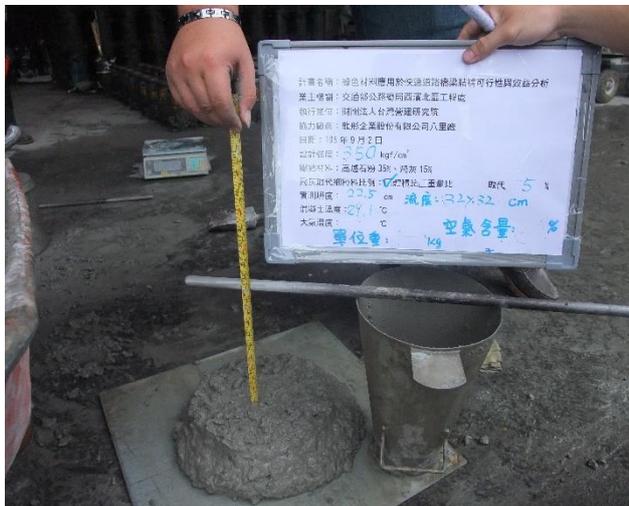
設計強度 280 kgf/cm² 取代 5%



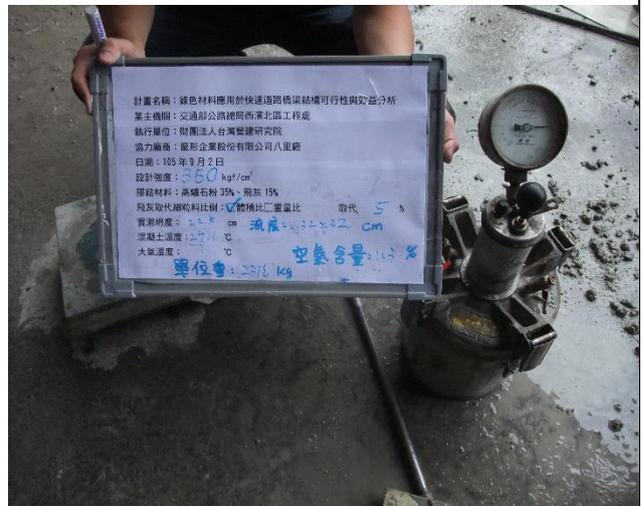
設計強度 280 kgf/cm² 取代 10%
(坍流度試驗)



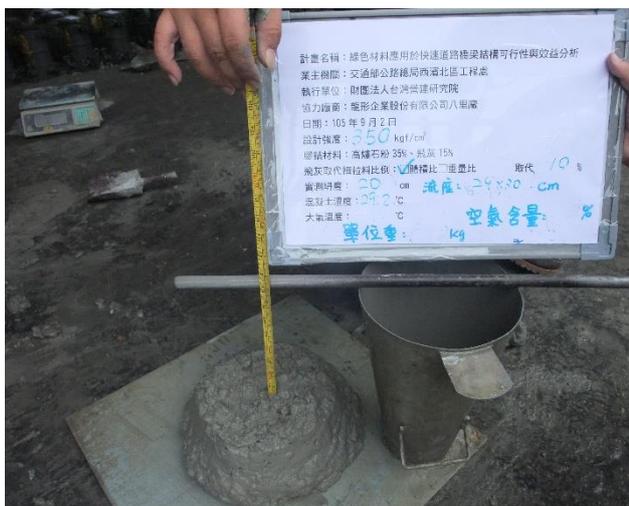
設計強度 280 kgf/cm² 取代 10%
(空氣含量)



設計強度 350 kgf/cm² 取代 5%
(坍流度試驗)



設計強度 350 kgf/cm² 取代 5%
(空氣含量)



設計強度 350 kgf/cm² 取代 10%
(坍流度試驗)



設計強度 350 kgf/cm² 取代 10%
(空氣含量)



試體總數



試體總數



試體總數



試體總數



柱底部配筋



黏貼應變計



底板澆置



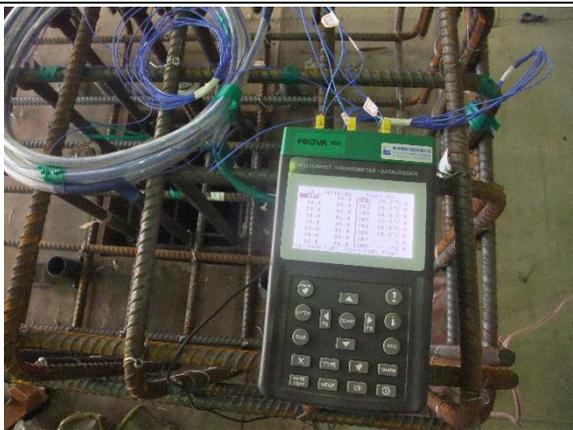
柱及頂部配筋



頂部配筋



溫度感應線埋設



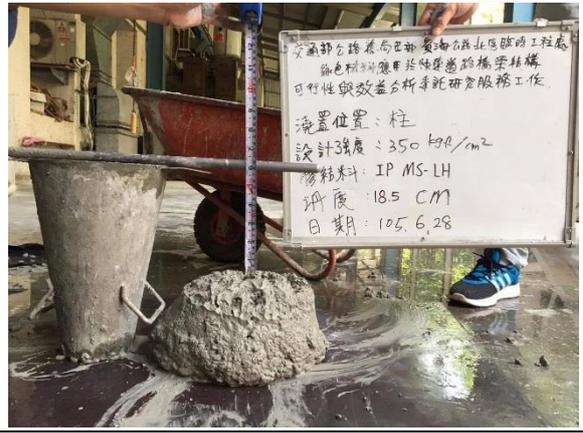
溫度讀取器安裝



混凝土澆置



混凝土取樣



坍度檢驗



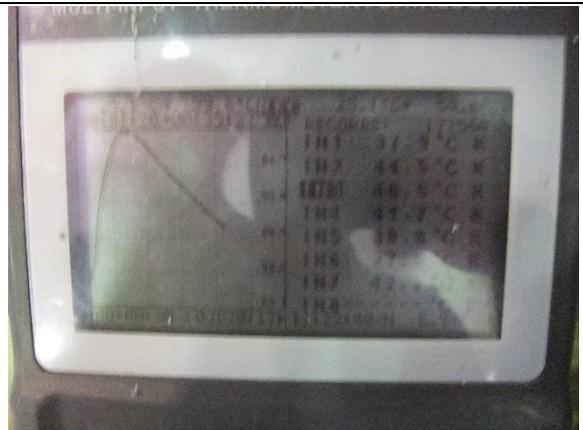
泵送準備



泵送及搗實



澆置完成



混凝土溫度讀取



結構柱拆模



結構實驗室



結構柱量測



結構柱量測



結構柱量測



結構柱破壞



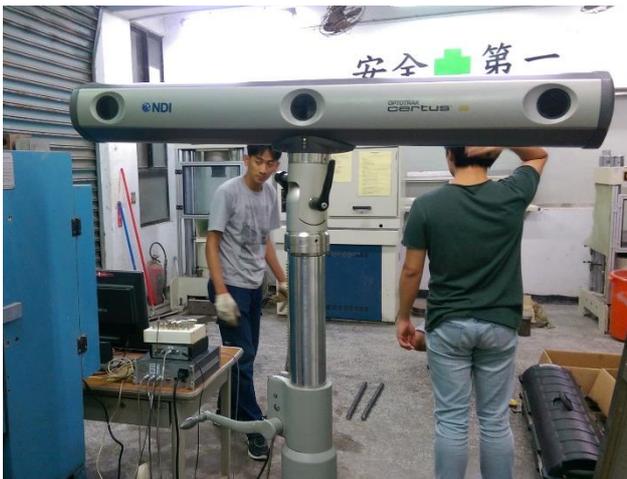
結構柱破壞



結構柱破壞



結構柱破壞



鋼筋拉伸試驗實際測試情形



鋼筋拉伸試驗實際測試情形

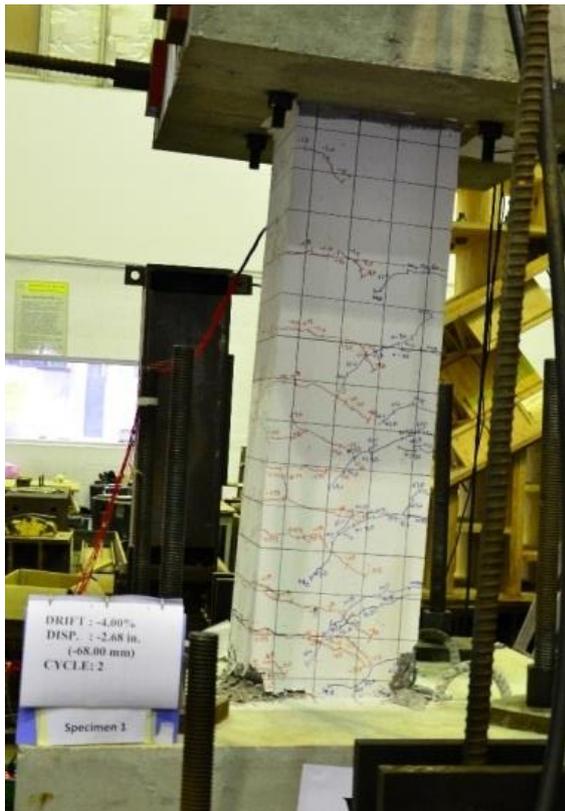
試體爐灰比例 35:15 白漆與網格繪製情形



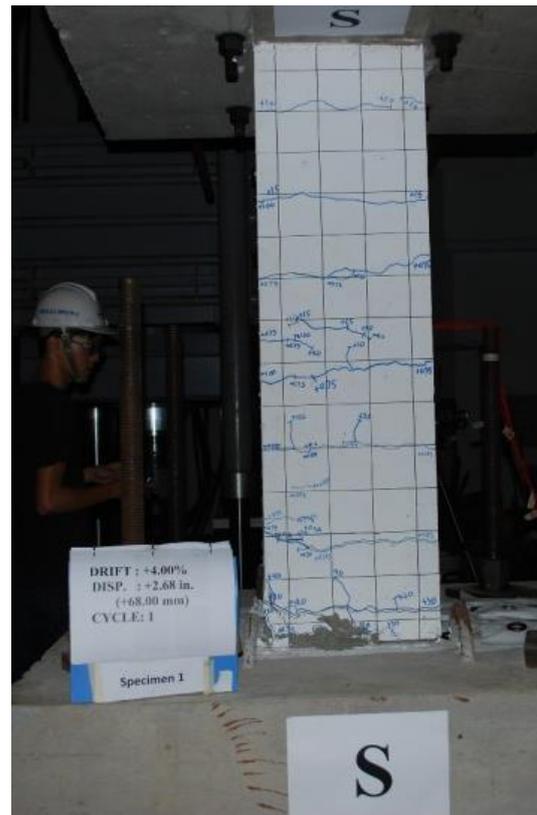
目標層間位移 0.375%南側
(試體純水泥柱試驗照片)



目標層間位移角 0.75%西側
(試體純水泥柱試驗照片)



目標層間位移 3%北側
(試體純水泥柱試驗照片)



目標層間位移角 4%南側
(試體純水泥柱試驗照片)



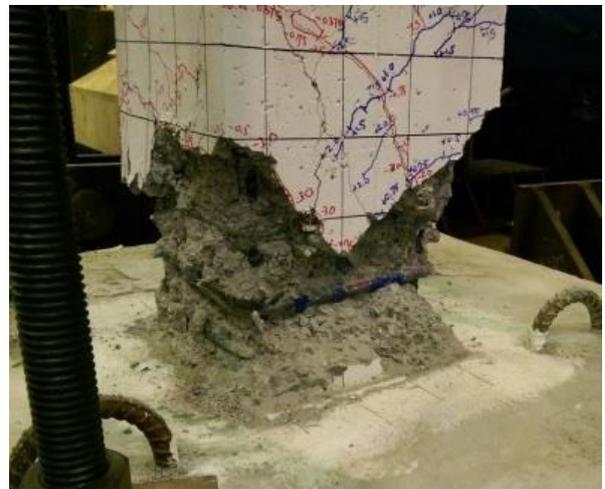
目標層間位移角 4%西側
試體爐灰 35:15 比例柱體試驗照片



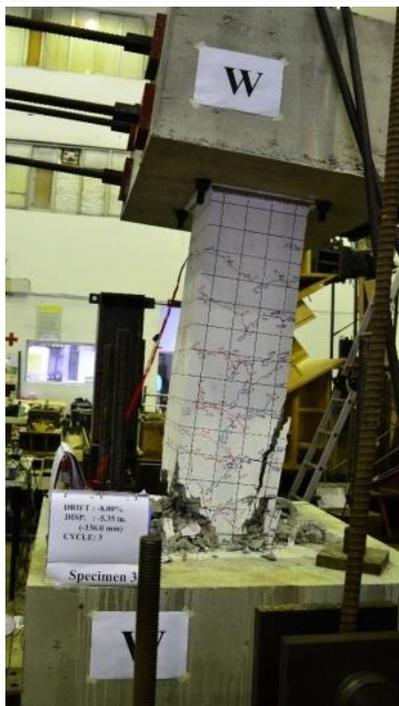
目標層間位移角 8%北側
試體爐灰 35:15 比例柱體試驗照片



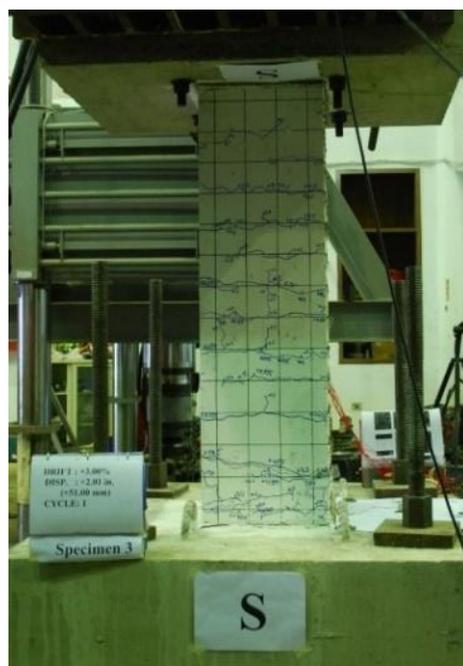
目標層間位移角 10%北側
試體爐灰 35:15 比例柱體試驗照片



測試結束北側中間主筋斷裂
試體爐灰 35:15 比例柱體試驗照片



測試結東南側主筋挫曲
(試體 IS(<70)(MS)柱體試驗照片)



目標層間位移角 2%南側
(試體 IS(<70)(MS)柱體試驗照片)



目標層間位移角 2%南側柱底
(試體 IS(<70)(MS)柱體試驗照片)



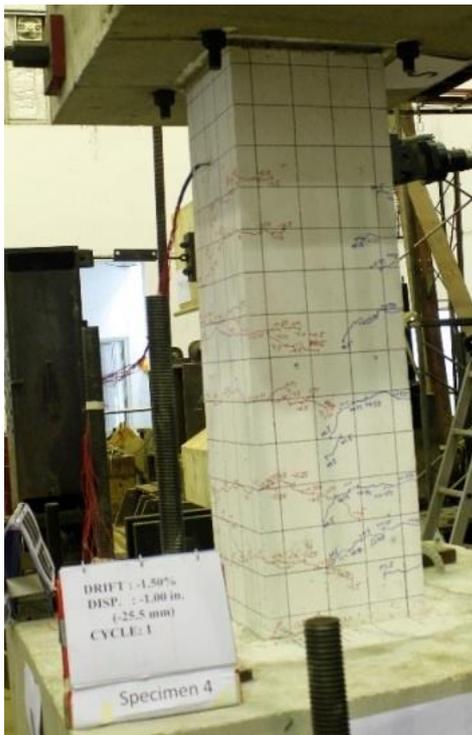
目標層間位移角 4%南側
(試體 IS(<70)(MS)柱體試驗照片)



目標層間位移角 2%西側
(試體 IP(HS-LH)柱體試驗照片)



目標層間位移角 3%西側
(試體 IP(HS-LH)柱體試驗照片)



目標層間位移角 1.5%西側
(試體 IP(HS-LH)柱體試驗照片)



試體最終狀態
(試體 IP(HS-LH)柱體試驗照片)