

快速氣離子穿透試驗於含飛灰爐石混凝土耐久性能評估之研究

內政部建築研究所協同研究報告（
103 年度）

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

內政部建築研究所協同研究報告

中華民國 103 年 12 月

(本報告內容及建議，純屬研究小組意見，不代表本機關意見)

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

研究主持人：鄭元良 主任秘書

協同主持人：楊仲家 教授

研 究 員：卓世偉、林志彥、鄒思宇、厲妮妮、周楷峻

研究助理：江慶堂、高淑文

內政部建築研究所協同研究報告

中華民國 103 年 12 月

(本報告內容及建議，純屬研究小組意見，不代表本機關意見)

目次

目次	I
表次	V
圖次	VII
摘要	XV
ABSTRACT	XIX
第一章 緒論	1
第一節 研究緣起與背景	1
第二節 研究目的	4
第三節 本研究計畫之重要性.....	5
第四節 國內外有關本案之研究情況.....	6
第五節 研究主題範圍	7
第六節 報告內容說明	7
第二章 文獻回顧	11
第一節 RCPT 現行試驗標準說明.....	11
第二節 飛灰混凝土	15
第三節 爐石混凝土	18

第三章 試驗變數設計與方法	23
第一節 變數設計	23
第二節 混凝土組成材料性質	24
第三節 混凝土配比設計	29
第四節 試驗方法	33
第四章 研究成果	41
第一節 抗壓強度試驗結果	41
第二節 RCPT 電量試驗結果.....	54
第三節 RCPT 試驗後內部氯離子含量試驗結果.....	66
第四節 研究成果綜合分析	88
第五章 評估添加礦物摻料混凝土 RCPT 總電荷量改善方法	97
第一節 改善方法建立.....	97
第二節 CNS 14795 標準增修建議.....	101
第六章 專家諮詢會議	105
第七章 研究結論與發現	107
第一節 結論.....	107

第二節 建議.....	108
參考書目	111
附錄一-期初審查意見與回應	115
附錄二-第一次專家諮詢會議紀錄	119
附錄三-期中審查意見與回應	125
附錄四-第二次專家諮詢會議紀錄	129
附錄五-期末審查意見與回應	133

表次

表 1-1 執行工作內容與期末報告對照表與完成率	8
表 2-1 氯離子穿透性與 RCPT 總通過電量關係 ^{2,3,4}	15
表 2-2 CNS 3036 規定之飛灰品質要求 ²⁶	17
表 2-3 不同飛灰的典型化學成分 ²⁶	18
表 2-4 高爐石粉之物理性質 ^{29,30}	19
表 3-1 混凝土配比變數	24
表 3-2 拌合水試驗結果(ppm)	24
表 3-3 水泥之物理與化學性質	25
表 3-4 飛灰主要化學成分	26
表 3-5 爐石粉主要化學成分	27
表 3-6 篩分析試驗結果	27
表 3-7 細骨材之篩分析試驗結果	28
表 3-8 本研究混凝土配比編號設計（飛灰混凝土）	30
表 3-9 本研究混凝土配比編號設計（爐石混凝土）	30
表 3-10 本研究飛灰混凝土配比設計	31
表 3-11 本研究爐石混凝土配比設計	32
表 4-1 飛灰混凝土養護材齡 28 天抗壓強度試驗結果	42
表 4-2 飛灰混凝土養護材齡 91 天抗壓強度試驗結果	43
表 4-3 爐石混凝土養護材齡 28 天抗壓強度試驗結果	44
表 4-4 爐石混凝土養護材齡 91 天抗壓強度試驗結果	45
表 4-5 飛灰混凝土 RCPT 總電荷量試驗結果（養護材齡 28	

天)	55
表 4-6 飛灰混凝土 RCPT 總電荷量試驗結果 (養護材齡 91 天)	56
表 4-7 爐石混凝土 RCPT 總電荷量試驗結果 (養護材齡 28 天)	57
表 4-8 爐石混凝土 RCPT 總電荷量試驗結果 (養護材齡 91 天)	58
表 4-9 各飛灰混凝土配比 RCPT 後試體內部總氯離子含量與穿透深度	79
表 4-10 各爐石混凝土配比 RCPT 後試體內部總氯離子含量與穿透深度	80
表 5-1 氯離子穿透性與修正後 RCPT 總通過電量關係對照表	101

圖次

圖 1-1 本研究流程圖	9
圖 3-1 三分碎石之級配級配分布圖	28
圖 3-2 粗砂之級配級配分布圖	29
圖 3-3 混凝土全斷面磨粉儀器	34
圖 3-4 穿透深度 1 cm 至 5 cm 切片磨粉取樣示意圖	34
圖 3-5 Metrohm 702 SM 型電位滴定儀	37
圖 3-6 滴定過程電位變化與硝酸銀加入量關係	37
圖 3-7 典型的離子層析法試驗結果	38
圖 3-8 Metrohm MIC 模組式離子層析儀	39
圖 4-1 不同水膠比飛灰混凝土替代量與抗壓強度之關係圖 (養護材齡 28 天)	46
圖 4-2 不同水膠比飛灰混凝土替代量與抗壓強度之關係圖 (養護材齡 91 天)	46
圖 4-3 不同水膠比爐石混凝土替代量與抗壓強度之關係圖 (養護材齡 28 天)	47
圖 4-4 不同水膠比爐石混凝土替代量與抗壓強度之關係圖 (養護材齡 91 天)	48
圖 4-5 不同替代量飛灰與爐石混凝土抗壓強度比較圖 (養護 材齡 28 天)	48
圖 4-6 不同替代量飛灰與爐石混凝土抗壓強度比較圖 (養護 材齡 91 天)	49

圖 4-7 不同替代量飛灰混凝土材齡與抗壓強度關係圖 (水膠比 0.35)	50
圖 4-8 不同替代量飛灰混凝土材齡與抗壓強度關係圖 (水膠比 0.45)	50
圖 4-9 不同替代量飛灰混凝土材齡與抗壓強度關係圖 (水膠比 0.55)	51
圖 4-10 不同替代量飛灰混凝土材齡與抗壓強度關係圖 (水膠比 0.65)	51
圖 4-11 不同替代量爐石混凝土材齡與抗壓強度關係圖 (水膠比 0.35)	52
圖 4-12 不同替代量爐石混凝土材齡與抗壓強度關係圖 (水膠比 0.45)	52
圖 4-13 不同替代量爐石混凝土材齡與抗壓強度關係圖 (水膠比 0.55)	53
圖 4-14 不同替代量爐石混凝土材齡與抗壓強度關係圖 (水膠比 0.65)	53
圖 4-15 飛灰混凝土替代量與總電荷量關係圖(材齡 28 天)	59
圖 4-16 飛灰混凝土替代量與總電荷量關係圖(材齡 91 天)	59
圖 4-17 爐石混凝土替代量與總電荷量關係圖(材齡 28 天)	60
圖 4-18 爐石混凝土替代量與總電荷量關係圖(材齡 91 天)	60
圖 4-19 不同替代量飛灰與爐石混凝土 RCPT 總電荷量比	

較圖 (養護材齡 28 天)	61
圖 4-20 不同替代量飛灰與爐石混凝土 RCPT 總電荷量比較圖 (養護材齡 91 天)	62
圖 4-21 不同替代量飛灰混凝土材齡與 RCPT 總電荷量關係圖 (水膠比 0.35)	62
圖 4-22 不同替代量飛灰混凝土材齡與 RCPT 總電荷量關係圖 (水膠比 0.45)	63
圖 4-23 不同替代量飛灰混凝土材齡與 RCPT 總電荷量關係圖 (水膠比 0.55)	63
圖 4-24 不同替代量飛灰混凝土材齡與 RCPT 總電荷量關係圖 (水膠比 0.65)	64
圖 4-25 不同替代量飛灰混凝土材齡與 RCPT 總電荷量關係圖 (水膠比 0.35)	64
圖 4-26 不同替代量飛灰混凝土材齡與 RCPT 總電荷量關係圖 (水膠比 0.45)	65
圖 4-27 不同替代量飛灰混凝土材齡與 RCPT 總電荷量關係圖 (水膠比 0.55)	65
圖 4-28 不同替代量飛灰混凝土材齡與 RCPT 總電荷量關係圖 (水膠比 0.65)	66
圖 4-29 控制組混凝土試體氯離子深度與含量關係圖 (28 天材齡)	67
圖 4-30 替代量 20% 飛灰混凝土試體氯離子深度與含量關係圖 (28 天材齡)	68
圖 4-31 替代量 30% 飛灰混凝土試體氯離子深度與含量關係圖 (28 天材齡)	68

圖 4-32 替代量 40% 飛灰混凝土試體氯離子深度與含量關係圖 (28 天材齡)	69
圖 4-33 替代量 50% 飛灰混凝土試體氯離子深度與含量關係圖 (28 天材齡)	69
圖 4-34 替代量 20% 爐石混凝土試體氯離子深度與含量關係圖 (28 天材齡)	70
圖 4-35 替代量 30% 爐石混凝土試體氯離子深度與含量關係圖 (28 天材齡)	70
圖 4-36 替代量 40% 爐石混凝土試體氯離子深度與含量關係圖 (28 天材齡)	71
圖 4-37 替代量 50% 爐石混凝土試體氯離子深度與含量關係圖 (28 天材齡)	71
圖 4-38 控制組混凝土試體氯離子深度與含量關係圖 (91 天材齡)	72
圖 4-39 替代量 20% 飛灰混凝土試體氯離子深度與含量關係圖 (91 天材齡)	73
圖 4-40 替代量 30% 飛灰混凝土試體氯離子深度與含量關係圖 (91 天材齡)	73
圖 4-41 替代量 40% 飛灰混凝土試體氯離子深度與含量關係圖 (91 天材齡)	74
圖 4-42 替代量 50% 飛灰混凝土試體氯離子深度與含量關係圖 (91 天材齡)	74
圖 4-43 替代量 20% 爐石混凝土試體氯離子深度與含量關係圖 (91 天材齡)	75
圖 4-44 替代量 30% 爐石混凝土試體氯離子深度與含量關係	

圖 (91 天材齡)	75
圖 4-45 替代量 40% 爐石混凝土試體氯離子深度與含量關係 圖 (91 天材齡)	76
圖 4-46 替代量 50% 爐石混凝土試體氯離子深度與含量關係 圖 (91 天材齡)	76
圖 4-47 總氯離子含量定義圖	77
圖 4-48 穿透深度定義圖	78
圖 4-49 不同水膠比總氯離子含量、穿透深度關係圖 (飛灰 替代量 0%)	82
圖 4-50 不同水膠比總氯離子含量、穿透深度關係圖 (飛灰替 代量 20%)	82
圖 4-51 不同水膠比總氯離子含量、穿透深度關係圖 (飛灰替 代量 30%)	83
圖 4-52 不同水膠比總氯離子含量、穿透深度關係圖 (飛灰替 代量 40%)	83
圖 4-53 不同水膠比總氯離子含量、穿透深度關係圖 (飛灰 替代量 50%)	84
圖 4-54 不同水膠比總氯離子含量、穿透深度關係圖 (爐石 替代量 20%)	84
圖 4-55 不同水膠比總氯離子含量、穿透深度關係圖 (爐石 替代量 30%)	85
圖 4-56 不同水膠比總氯離子含量、穿透深度關係圖 (爐石 替代量 40%)	87
圖 4-57 不同水膠比總氯離子含量、穿透深度關係圖 (爐石	

替代量 50%)	87
圖 4-58 C350、F655、與 S655 配比抗壓強度、RCPT 結果比較圖	88
圖 4-59 所有試體 RCPT 總氯離子含量與總電荷量關係圖	89
圖 4-60 所有試體 RCPT 氯離子穿透深度與總電荷量關係圖	89
圖 4-61 添加礦物摻料混凝土與控制組 RCPT 總氯離子含量與總電荷量關係圖	90
圖 4-62 添加礦物摻料混凝土與控制組 RCPT 氯離子穿透深度與總電荷量關係圖	91
圖 4-63 添加礦物摻料混凝土與控制組總氯離子含量與總電荷量迴歸關係圖	92
圖 4-64 添加礦物摻料混凝土與控制組氯離子穿透深度與總電荷量迴歸關係圖	92
圖 4-65 飛灰混凝土 F352 與控制組 C350 配比 RCPT 氯離子穿透深度關係圖	93
圖 4-66 飛灰混凝土與控制組 28 天材齡 RCPT 試驗結果正規化比值比較圖	95
圖 4-67 飛灰混凝土與控制組 91 天材齡 RCPT 試驗結果正規化比值比較圖	95
圖 4-68 爐石混凝土與控制組 28 天材齡 RCPT 試驗結果正規化比值比較圖	96
圖 4-69 爐石混凝土與控制組 91 天材齡 RCPT 試驗結果正規化比值比較圖	96

圖 5-1 飛灰混凝土與控制組混凝土 RCPT 穿透深度與電量 之關係圖	98
圖 5-2 爐石混凝土與控制組混凝土 RCPT 穿透深度與電量 之關係圖	99
圖 5-3 飛灰混凝土電量修正式與原始 RCPT 總通過電量之 關係圖	100
圖 5-4 爐石混凝土電量修正式與原始 RCPT 總通過電量之 關係圖	100
圖 6-1 第一次專家諮詢會議.....	105
圖 6-2 第二次專家諮詢會議.....	106

摘要

關鍵詞：混凝土耐久性、快速氯離子穿透試驗、飛灰混凝土、爐石混凝土

一、研究緣起

CNS14795 快速氯離子穿透試驗為目前最常用來評估混凝土耐久性的試驗法。但因為此方法發展之初並未考量礦物摻料的影響，因此在使用飛灰與高爐爐渣粉添加混凝土時，會因為孔隙水中離子種類與熱效應的關係，導致試驗誤差，因此試驗標準於附註中，提及摻劑可能會影響試驗結果，若有疑問，建議進行長期貯鹽試驗驗證。本試驗原始研發單位 Federal Highway Administration (FHWA)亦開始探討修正此規範的相關研究。我國於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，國內過去超高層大樓如高雄 85 大樓與 101 大樓均有飛灰爐石使用於混凝土的配比設計。故對 CNS14795 快速氯離子穿透試驗方法原理探討，及應用於高劑量飛灰與高爐石粉添加混凝土時的修正方式有研究之必要性。對於 CNS14795 快速氯離子穿透試驗，使用於飛灰或爐石混凝土時，可使用兩種方式加以改善，(1)適當調整電量標準；(2)以氯離子穿透深度評估其耐久性。除可保有 RCPT 快速試驗優點外，亦可精確量化混凝土耐久性。並可藉以建立適用於我國的快速混凝土耐久性評估試驗法。

二、研究方法及過程

本研究以驗研究與文獻蒐集，對 CNS14795 快速氯離子穿透試驗法—RCPT 進行增修建議，以建立適用於我國的快速混凝土耐久性評估試驗法方式。由於

RCPT 電量表示耐久性的評估方法仍較為簡便，因此修正相關試驗法將藉由 CNS14795 標準 3.3 節中依據 RCPT 試驗結果評估氯離子穿透性分類的基礎點進行思考，建立適用於飛灰與爐石混凝土的氯離子穿透性分類。因此會先進行各種變數飛灰或爐石混凝土（包含未添加的控制組配比）RCPT 試驗結果，相關試驗變數將包含三大類，分別為水膠比、礦物摻料總類、與礦物摻料添加量。其中水膠比變數範圍為 0.35 至 0.65，此範圍可涵蓋目前業界混凝土產製的高中低設計強度。礦物摻料種類則為本研究主題之飛灰（F 級飛灰）與爐石（4000 型高爐爐渣粉）。在礦物摻料添加量方面，其設定為替代水泥量的 0%~50%。

試體依變數配比設計製作後，由試驗結果進行比對分析，且配合相關文獻蒐集說明 RCPT 運用於飛灰或爐石混凝土可能產生的試驗結果誤差與 RCPT 相關試驗機理。其次將試驗後的試體利用全斷面磨粉與切片磨粉取樣方式，量測試體於試驗後各深度位置混凝土氯離子濃度變化情形進行分析。由控制組混凝土氯離子濃度進入深度與總通過電量之關係，比對飛灰或爐石混凝土氯離子濃度進入深度與總通過電量之關係，轉換成適用飛灰或爐石混凝土氯離子穿透性分類，藉以建立適用於我國的快速混凝土耐久性評估試驗法。

三、重要發現

由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。控制組混凝土亦呈現好的線性關係。但飛灰或混凝土與控制組未添加礦物摻料混凝土線性關係為兩條不同的關係曲線，表示其 RCPT 在 2 種混凝土的傳輸機制明顯不同。而由氯離子穿透深度與電量關係分析可以建議飛灰混凝土電量調整式為 $Q_{Rf} = 1.18Q_f + 2042$ ；爐石混凝土電量調整式為 $Q_{Rs} = 1.23Q_s + 1776$ 。最後並依此建議我國 CNS 14795 條文增修之部分。

四、主要建議事項

本研究針對實驗結果發現，提出下列建議，說明如下。

建議一

進行爐石與飛灰混合混凝土電量調整公式相關研究：立即可行之建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：無

本計畫研究水膠比範圍為 0.35 至 0.65，礦物摻料種類為飛灰（F 級飛灰）與爐石（4000 型高爐爐渣粉），在礦物摻料添加量方面，其設定為替代水泥量的 0%~50%，由試驗分析結果分別獲得飛灰混凝土與爐石混凝土電量調整式。

建議未來可在此研究範圍外進行其他種變數組合 RCPT 試驗，然後依循本計畫模式進行分析，擴充本研究飛灰混凝土與爐石混凝土電量調整式的限制範圍，使對未來 CNS 14795 條文增修可更完整。

建議二

擴大或改變參數設定探討對電量及耐久性之影響：立即可行之建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：無

進行各種通電模式、試驗溶液改變、試體內部孔隙飽和溶液改變對電量的探討。RCPT 是標準電解電池的一種類型，因此試驗過程中對氧化還原反應影響的參數建議在未來研究中加以釐清。各種試驗環境下陰陽離子對活化能或電化學各種參數的影響。可對 RCPT 於試驗法上的影響機理更加清楚，並對未來若發展更迅速量測混凝土抗氯離子傳輸特性方法時有所幫助。

由於飛灰與爐石會降低混凝土的酸鹼度，而飛灰與爐石的混合方式，建議可為未來研究的方向，且擴大水膠比與礦物摻料替代量、與齡期相對關係的研究可了解長期混凝土耐久性的影響。

建議三

CNS 14795條文增修建議—長期性建議

主辦機關：經濟部標準局

協辦機關：內政部建築研究所

由於影響氯離子穿透性因素包括水灰比、聚合物摻料、試體材齡、氣孔與孔隙結構、粒料總類、搗實度與養護方式等，若混凝土使用礦物摻料如飛灰或爐石時，需依對試驗總電荷量結果進行修正。

建議可整理相關研究資料，並參考本研究第六章內容，對 CNS 14795 條文 10.3 節的參照表 1 進行評估試驗結果之增修，提供 RCPT 使用於飛灰或爐石混凝土抗氯離子傳輸特性時的判斷方式。

ABSTRACT

Keywords: concrete durability, rapid chloride ion penetration test, fly ash concrete, slag concrete

This research uses the rapid chloride ion permeability test to study durability of concrete containing fly ash slag. The rapid chloride ion penetration test developed in the 1970s for the American Association of State Highway and Transportation Officials, referred RCPT test, and is also included in Taiwan test standards, namely CNS 14795. This method use external 60V DC voltage allows quick access to the chloride ion into concrete. The current value was measured by calculating the total charge passed utilizes the wet saturated conductivity determine the overall concrete as concrete resistance to chloride ion intrusion. Since this method is simple and short measurement time-consuming way of advantages, it is widely used to assess the durability of concrete. However, many literatures indicate that the test results to RCPT for fly ash and slag concrete still doubts. The main reason for the ions in the pore water of fly ash and slag will be affected, leading to experimental error. Therefore, this study hope to be a series of experimental studies and literature collection, to put forward a draft of proposed amendments to this test method to be tested in the future fly ash or slag concrete can be followed.

This project concludes that:

1. The compressive strength of fly ash concrete in the age of 28 days, all compressive strength of fly ash concretes are lower than the control group, when the age of 91 days, most of fly ash concretes will be higher than the control groups.
2. The total charge passed of control group and slag concretes are increased with water binder ratio increasing. And increases with curing age, the total charge

passed of RCPT was reduced by 12.1 ~ 39.7%. The total charge passed of RCPT is reduced with increasing the slag content of concrete. Slag concrete at 28 days curing age decreased 41.6 ~ 82%, 91 days decreased 47.8 ~ 86.9% compared to the control group.

3. The control group and the fly ash concrete in total charge passed, total chloride ion content, and the chloride ion penetration depth have the same trend. All properties increase with water-binder ratio and mineral admixtures content increase.
4. The test results also show that a good linear relationship between total charge passed and the chloride ion penetration depth in each mix groups. However, different linear relationships represent RCPT transport mechanism is significantly different in different concrete group.
5. By chloride ion penetration depth and total charge passed relations analysis can suggest the fly ash concrete results of RCPT adjustment formula $Q_{Rf} = 1.18Q_f + 2042$. Slag concrete results of RCPT adjustment formula is $Q_{Rs} = 1.23Q_s + 1776$.

This project comes to the immediate and long-term strategies.

For immediate strategies:

1. Suggestions can follow this project mode, and then proceed with the research of concrete mixed with fly ash and slag adjustment formula to the future of CNS 14795 upgrading can be more complete.
2. Recommended that future research can be a variety powered mode, change the test solution, and the changes internal concrete pore solution. In order to better clarify the influence of ions or electrochemical activation of various parameters under various experimental conditions.
3. Proposes to expand study of the effects of water-binder ratios, the contents of mineral admixtures, and curing ages.

For long-term strategies:

1. Suggestions collation research data, and refer to this research, conducted on CNS 14795 upgrading provisions. Explained using RCPT to determine the chloride ion resistance of fly ash and slag concrete.

第一章 緒論

第一節 研究緣起與背景

CNS14795 快速氯離子穿透試驗為目前最常用來評估混凝土耐久性的試驗法。但因為此方法發展之初並未考量礦物摻料的影響，因此在使用飛灰與高爐爐渣粉添加混凝土時，會因為孔隙水中離子種類與熱效應的關係，導致試驗誤差，因此試驗標準於附註中，提及其他摻劑可能會影響試驗結果，若有疑問，建議進行長期貯鹽試驗驗證。本試驗原始研發單位 Federal Highway Administration (FHWA)亦開始探討修正此規範的相關研究。我國於新版的綠建材標章已將添加再生材料如回收高爐爐渣粉（以下簡稱爐石）、飛灰、再生粒料等，需佔總重量 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，國內過去超高層大樓如高雄 85 大樓與 101 大樓均有飛灰爐石使用於混凝土的配比設計。故對 CNS14795 快速氯離子穿透試驗方法原理探討，及應用於高劑量飛灰與高爐石粉添加混凝土時的修正方式有研究之必要性。對於 CNS14795 快速氯離子穿透試驗，使用於飛灰或高爐爐渣粉混凝土（以下簡稱爐石混凝土）時，可使用兩種方式加以改善，(1) 適當調整電量標準；(2)以氯離子穿透深度評估其耐久性。除可保有 RCPT 快速試驗優點外，亦可精確量化混凝土耐久性。並可藉以建立適用於我國的快速混凝土耐久性評估試驗法。

1970 年 Whiting¹利用電化學的原理發展出一種快速評估混凝土抵抗氯離子滲透能力的試驗方法—氯離子快速滲透試驗 (Rapid Chloride ion Permeability Test, 以下簡稱 RCPT); 其後美國公路運輸協會 (American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO) 與美國材料試驗學會 (American Society for

¹ D. Whiting, "Rapid measurement of the chloride permeability of concrete", Public Roads, Vol. 45, pp. 101-112 (1981).

Testing and Materials, ASTM) 並依此先後建立試驗規範(AASHTO T277², ASTM C1202³), 此規範名為「以總通過電荷量表示混凝土抗氯離子穿透能力之標準試驗方法」, 英文名稱為 Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration。我國於民國 93 年 1 月 9 日公布為 CNS 14795 國家標準, 其名為「混凝土抗氯離子穿透能力試驗法—通過電荷量表示法」。此標準在適用範圍上即說明:「本試驗主要為混凝土導電性之測定, 以做為評估混凝土抗氯離子入侵能力之快速指標。」而在方法概要上的說明:「本試驗主要量測 6 小時試驗期間內, 通過厚 51 mm 標稱直徑 102 mm 鑽心試體或圓柱試體之電流。試體的一側浸於氯化鈉溶液, 另一側浸於氫氧化鈉溶液中, 試體兩端直流電壓差維持為 60V; 總通過電荷量(庫倫)與試體抵抗氯離子穿透能力有關。」⁴

因此 RCPT 將水泥質材料的孔隙結構視為電解電池的鹽橋, 內部的孔隙水溶液便為電子通路, 與離子移動的媒介。以外加 60V 直流電壓, 使得氧化與還原反應於系統內產生, 藉由 6 小時內通過的電量評估混凝土抗氯離子傳輸的能力。RCPT 試驗法並不需像其他試驗方法(如 ASTM C1542-Ponding test 貯鹽試驗), 需進行氯離子進入混凝土深度與濃度的量測, 所以 RCPT 具有耗時較短與量測方式精簡等優點, 目前廣泛應用於評估混凝土耐久性試驗中。但在多年研究下, 部分學者將此試驗用於含有飛灰與爐石的混凝土的耐久性評估, 對試驗結果發現疑問。例如 Wee 等⁵對混凝土配比在固定水膠比、養護條件、與材齡, 但添加不同細度爐石粉與砂灰的條件下進行 RCPT 與 90 天貯鹽試驗之研究, 試驗結果指出

² AASHTO T277-07, "Electrical Indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration", Standard specification for transportation materials and methods of sampling and testing (2007).

³ ASTM C1202-12, "Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration", American Society for Testing and Materials (2012).

⁴ CNS 14795, "以總通過電荷量表示混凝土抗氯離子穿透能力之標準試驗方法", 中華民國國家標準, (2004).

⁵ T. H. Wee, A. K. Suryavanshi, and S. S. Tin, "Evaluation of rapid chloride permeability test (RCPT) results for concrete containing mineral admixture", ACI Materials Journal, Vol. 97, No. 2, pp.221-232 (2000).

兩者之間並無良好的線性相依之關係。因此在規範中亦說明當混凝土摻有亞硝酸鈣 (calcium nitrite) 類抗腐蝕劑時，會獲致較高的庫倫值，顯示比相同配比但未摻用亞硝酸鈣的混凝土 (控制組) 具有較低的抗氯離子穿透能力。然而，長期的氯離子貯鹽試驗顯示摻用亞硝酸鈣混凝土至少與控制組混凝土具有一樣的抵抗氯離子穿透的能力。且於附註亦註明其他摻劑也可能會影響試驗結果。若懷疑摻劑會有影響，建議進行長期貯鹽試驗。

另外部分學者亦由電化學觀點說明 RCPT 可能發生的疑慮。由於 RCPT 為典型標準電解電池，由外加電場 (外加電壓) 強制供給陰極試驗容器電子，使其形成還原反應。另一方面則從陽極試驗容器中強制吸收電子造成氧化反應。而混凝土材料試體的多孔性質使得兩試驗容器溶液內解離的離子可以相互游離。因此陰極試驗容器內的氯化鈉可以解離出氯離子進入混凝土內，最後並游離至陽極槽內，而陽極槽內的 $NaOH$ 溶液則目的在於避免氯氣產生⁶。然而在外加電場施加的過程中，混凝土內部的離子會傳導部分電流，因而導致試驗結果產生誤判，例如混凝土材料中的孔隙水通常含有大量的 OH^+ 、 K^+ 、 Na^+ 等離子，其中以氫氧根離子 (OH^+) 最為主要，然而氯離子在無限稀釋溶液下的離子移動率卻只是氫氧根離子的 0.39 倍⁷，Byfors⁸ 曾針對添加不同礦物摻料混凝土的孔隙水進行研究，發現混凝土中添加爐石與飛灰會導致孔隙水 pH 值下降。因而當外加電場導電時，所反應的電流可能是掌控在氫氧根離子而非氯離子。例如 Andrade⁹ 與 Zhang¹⁰ 等均提出相同論點。Page and Vennesland¹¹ 於試驗結果中亦提出當水泥以 30% 砂

⁶ D. W. Pfeifer, "Coulombs passed and chloride intrusion: Is it a numbers game?", ASCENT Magazine, Precast / Prestressed Concrete Institute, p.35 (1993).

⁷ C. Shi, J. A. Stegemann, and R. J. Caldwell, "Effect of supplementary cementing materials on the specific conductivity of pore solution and its implications on the rapid chloride permeability test (AASHTO T277 and ASTM C1202) results", ACI Materials Journal, Vol. 95, No.4, pp.387-394 (1998).

⁸ Byfors, K., "Pore solution expression as a method to determine the influence of mineral additives on chloride binding", Cement and Concrete Research, Vol. 16, pp.760-770 (1986).

⁹ C. Andrade, "Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements", Cement and Concrete Research, Vol.23, pp.724-742 (1993).

¹⁰ M. H. Zhang, and O. E. Gjølrv, "Permeability of high-strength lightweight concrete", ACI Materials Journal, Vol. 88, No. 5, pp.463-469 (1991).

¹¹ C. L. Page, and V. Vennesland, "Pore solution composition and chloride binding capacity of silica-fume cement pastes", Materials and Structures, Vol.16, pp.19-25 (1983).

灰替代後，在 28 天材齡時，試體內孔隙水中 OH^+ 的濃度會從 743 mmole/L 下降至 10mmole/L。以實驗觀點來看，若在 RCPT 試驗結束後於陽極試驗容器內取樣，並未發現氯離子的存在，也有相關文獻藉由 RCPT 試驗結束後試體內部氯離子含量變化說明上述之結果¹²。因此在試驗過程 6 小時中氯離子並未穿透試體，因此亦說明由於 RCPT 試驗過短，所反應的電流可能會受到內部離子影響。

綜上所述，RCPT 發展之初並未考量礦物摻料的影響，因此在使用飛灰與高爐爐渣粉添加混凝土時，會因為孔隙水中離子種類與熱效應的關係，導致試驗誤差，因此試驗標準於附註中，提及摻劑可能會影響試驗結果，若有疑問，建議進行長期貯鹽試驗驗證。而我國於新版的綠建材標章已將添加再生材料佔總重量 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，國內過去超高層大樓如高雄 85 大樓與 101 大樓均有飛灰爐石使用於混凝土的配比設計。故對 CNS14795 快速氯離子穿透試驗方法原理探討，及應用於高劑量飛灰與高爐石粉添加混凝土時的修正方式有研究之必要性。因此本研究希望藉由一連串的試驗研究與文獻蒐集，期能提出此試驗法修正建議草案，以對未來於添加飛灰或爐石混凝土耐久性能評估可有所依循。

第二節 研究目的

本研究目的為將行之多年的 CNS14795 快速氯離子穿透試驗法—RCPT 進行增修建議，以運用於添加飛灰或爐石混凝土耐久性能評估時可有所依循。首先針對 RCPT 試驗法過去研究所提出的疑慮進行文獻蒐集整理，得知各國對 RCPT 試驗法的進一步運用或修改情形。再由一連串試驗進行探討和建立適用於我國的快速

¹² M. Castellote, C. Andrade, and C. Alonso, "Electrochemical Chloride Extraction: Influence of Testing Conditions and Mathematical Modelling", *Advanced in Cement Research*, Vol.11, pp.63-80 (1999)

混凝土耐久性評估試驗法方式。相關研究內容如下：

1. CNS14795 快速氯離子穿透試驗原理文獻蒐集與整理。
2. 飛灰及爐石混凝土對長期曝曬試驗結果影響文獻蒐集與整理。
3. 高劑量飛灰與爐石粉添加，對混凝土耐久性之影響與快速氯離子穿透試驗結果之影響。
4. RCPT 試驗電壓與熱效應對 CNS14795 快速氯離子穿透試驗結果之影響。
5. 使用飛灰及爐石混凝土時，適當調整電量標準。
6. 利用 CNS14795 快速氯離子穿透試驗，以氯離子穿透深度評估其耐久性。

第三節 本研究計畫之重要性

目前以電壓加速離子傳輸的試驗法有變成主流評估方式之趨勢。然而在 RCPT 量測除了熱焦耳效應的影響外，大部分文獻還是指出當水泥質材料添加摻料（飛灰、爐石、或腐蝕抑制劑）時，電量會有低估現象^{7,8,9,10,12}，多位學者也證實貯鹽試驗與以電壓加速離子傳輸的試驗過程中顯現出 RCPT 電量與其關連性不佳。原因曾有研究提出為孔隙水 OH^+ 濃度降低所致，但如以化學機理而言 RCPT 試驗 6 小時期間，孔隙溶液能遷移多少氫氧離子到陽極，目前尚有疑問，若以 Rasanen and Penttala¹³ 所量測的孔隙溶液 pH 最大值接近 13.2，換算為氫氧離子的濃度是 0.1585 M (mole/L)，如以 1 mL (毫升) 孔隙溶液為計算基礎，其所攜帶電量為 15.29 庫侖，即 1 mL 孔隙溶液內的氫氧離子全部被遷移到陽極參與反應，所增加的電量僅為 15.29 庫侖，這電量尚需減去因孔隙連通性不佳及離子

¹³ V. Rasanen and V. Penttala, The pH measurement of concrete and smoothing mortar using a concrete powder suspension, *Cement and Concrete Research*, 34, 813–820 (2004).

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

遷移過程被吸附到孔隙內表面，而無法遷移到陽極的部分。所以這部份的問題仍待試驗過程分析尋找出真正原因。

飛灰與爐石粉為國內各種與民生相關產業所產出之事業廢棄物，其中飛灰為燃煤火力發電廠在燃煤發電的過程中所產生之煤灰。爐石為煉鋼廠煉鋼過程熔融礦渣經水淬冷卻後所得爐渣磨粉所得。兩者每年產出量甚大，在過去處置上均是事業單位與環保機關相當棘手問題，若處理不當，會造成環境生態負擔。但因這兩種材料具有卜作嵐(Pozzolanic)特性，可用以取代部分水泥。根據 1996 年以前統計，我國每年水泥使用量約在 2000 萬公噸。但在 2007 年統計，我國每年約使用 274 萬公噸爐石粉與 311 萬公噸飛灰，而我國於 2007 年以後每年水泥使用量則減至在 1400 萬至 1500 萬公噸之間，因此在 2007 以後，我國爐石與飛灰替代水泥量已超過總水泥用量的 25% 以上。未來這個數字可能會持續成長。因此建立適用於飛灰與爐石混凝土的 RCPT 法有其重要性。

第四節 國內外有關本案之研究情況

目前相關改良 RCPT 法的研究大多已降低電壓，並量測混凝土內部氯離子進入濃度為主。如 Detwiler¹⁴等改良發展出 Norwegian 試驗。Norwegian 試驗主要以 12 Volts 電壓加速氯離子通過。並量測所通過氯離子累積濃度代替 RCPT 電流的量測。但 Detwiler 指出試驗所需時間較長，而且因氯離子穿透混凝土濃度甚低，因此量測氯離子濃度的儀器需非常準確¹⁴。而國內亦有 Yang 等^{15,16}針對上述 RCPT 與貯鹽試驗優缺點，以 RCPT 架構發展出加速氯離子移動試驗 (accelerated chloride migration test, 簡稱 ACMT)。由於 ACMT 可以量測試驗

¹⁴ R. J. Detweiler and C. A. Fapohunda, "A comparison of two methods for measuring the chloride ion permeability of concrete", *Cement, Concrete, and Aggregate*, Vol. 15, pp.70-73 (1993).

¹⁵ C. C. Yang, S. W. Cho, and R. Huang, "The relationship between charge passed and the chloride-ion concentration in concrete using steady-state chloride migration test," *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, No. 2, pp. 217-222 (2002).

¹⁶ S. W. Cho, C. C. Yang, and R. Huang, "Influence of aggregate content on the transport properties of mortar using accelerated chloride migration test," *Concrete Science and Engineering*, Vol. 4, No.14, pp. 84-90 (2002).

期間氯離子濃度與電量變化，此方法以穩態期內氯離子濃度傳輸速率作為評估的氯離子穿透能力依據，且此試驗方法相較於 90 天貯鹽試驗而言，只需耗費 7~10 天即可完成。在非穩態試驗方面，亦有翁在龍等¹⁷將 RCPT 試驗後試體剖開，依縱向位置量取各點混凝土氯離子含量，並由 Fick 第二定律計算擴散速率。但上述相關研究之方法仍以 RCPT 電量表示耐久性的評估方法較為簡便。

第五節 研究主題範圍

本研究目的係探討快速氯離子穿透試驗法—RCPT 運用於添加飛灰或爐石混凝土耐久性評估時的改善方式。相關研究以不同水膠比、不同飛灰含量、與不同爐石含量混凝土配比進行相關研究。

第六節 報告內容說明

本研究內容共分為研究背景與目的、文獻蒐集、試驗設計、試體拌合養護、所有混凝土 RCPT 與抗壓強度試驗、混凝土 RCPT 後試體氯離子含量量測。計畫執行進度良好。表 1-1 將執行工作內容與報告進行對照，報告之主要內容係於第一章緒論介紹本研究之研究背景與目的。第二章文獻回顧針對 RCPT 試驗法、飛灰混凝土、以及爐石混凝土的過去相關研究進行文獻探討。第三章試驗變數及方法為本研究實驗變數設計、組成材料性質、配比設計、與試驗方法進行說明。第四章針對已進行的混凝土抗壓強度試驗結果、RCPT 結果、以及飛灰混凝土 RCPT 後試體氯離子含量量測試驗結果進行討論。第五章針對 RCPT 用於飛灰或爐石混凝土修正方法建立情形進行討論。第六章為 2 次專家會議辦理情形。第七章針對成果做結論與建議。並於附錄放置期初、期中、及期末審查會議委員意見與辦理

17翁在龍、卓世偉、楊仲家、黃然，“表層滲透劑對混凝土特性影響之研究”，防蝕工程, (accepted) (2002).

情形。

表 1-1 執行工作內容與期末報告對照表與完成率

工作分項	計畫執行迄今之工作內容	期中報告位置	完成率
研究背景與目的	計畫研究流程與相關背景說明和目的確認	第一章	100%
文獻蒐集	RCPT 試驗法、飛灰混凝土、以及爐石混凝土文獻整理。	第二章	100%
試驗研究	變數設計、組成材料性質、配比設計、與實驗方法介紹	第三章	100%
試驗研究	混凝土抗壓強度試驗結果	第四章	100%
試驗研究	RCPT 結果	第四章	100%
試驗研究	混凝土 RCPT 後試體氯離子含量量測	第四章	100%
成果分析	各試驗結果關係分析	第四章	100%
方法建立	RCPT 用於飛灰或爐石混凝土修正方法建立	第五章	100%
專家會議	2 次專家會議辦理情形	第六章	100%
結論與建議	研究成果結論與建議	第七章	100%

(資料來源：本研究自行整理)

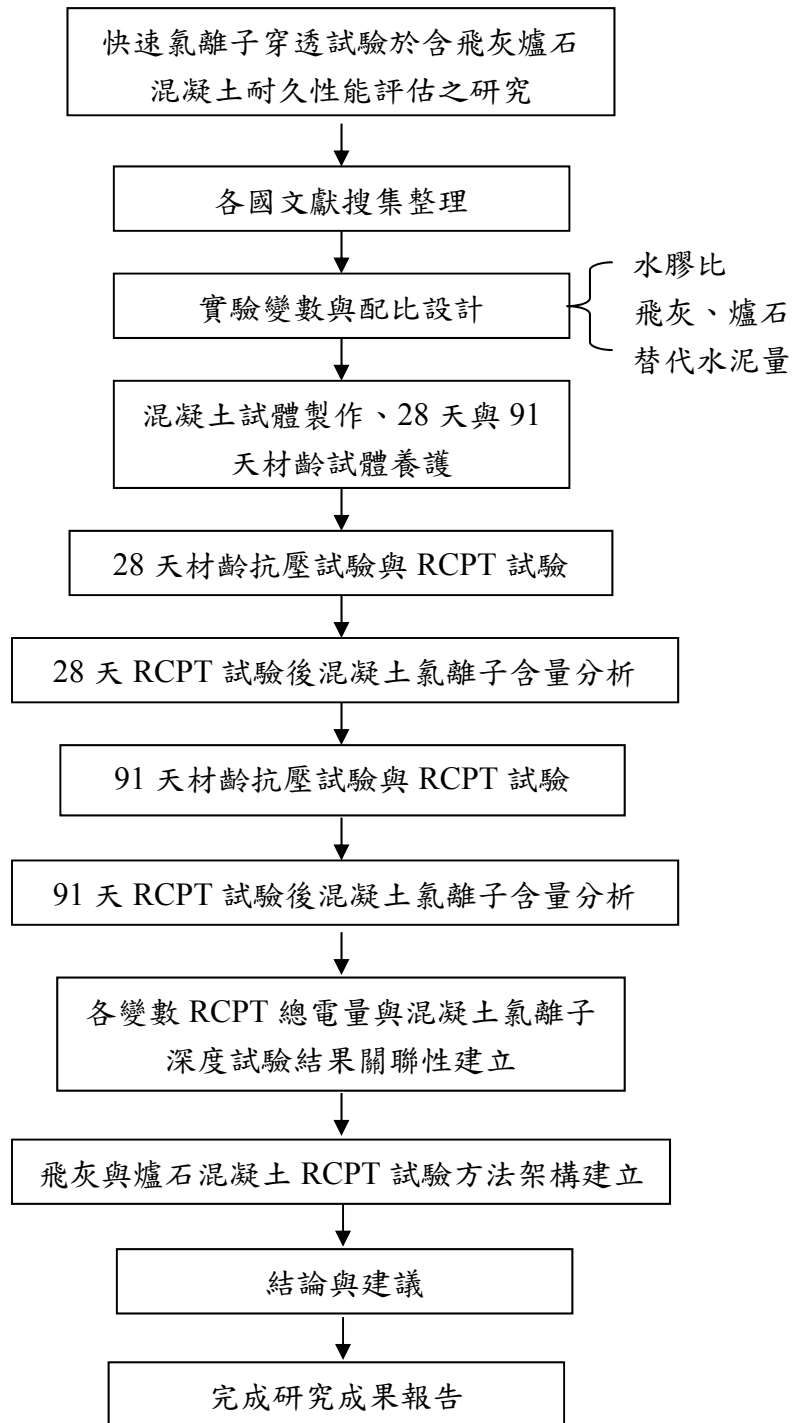


圖 1-1 本研究流程圖

(資料來源：本研究自行整理)

第二章 文獻回顧

第一節 RCPT 現行試驗標準說明

RCPT 現行試驗標準為 ASTM C1202、AASHTO T277、與我國 CNS 14795。其中美國 ASTM 最新版本為 2012 年版本。AASHTO 最新版本為 2007 年版本。而我國 CNS 最新版本為 2004 年版本，三者文字上並無明顯差異。RCPT 在 CNS 14795 標準適用範圍上即說明本試驗主要以混凝土導電性的決定做為評估混凝土抗氯離子入侵能力的快速指標。而表現混凝土導電性質的方式則利用外加的 60V 直流電壓使得氯離子快速進入混凝土材料中，藉由量測得到的電流值計算 6 小時內總通過電量 (total charge passed)，用以評估混凝土抵抗氯離子滲透的能力^{2,3,4}。由於這個方法具有耗時較短與量測方式精簡等優點，因此目前廣泛應用於評估混凝土耐久性試驗中，其試驗方法詳述於下。

試體試驗前處理

RCPT 所使用的試樣依評估混凝土材料特性或舊有結構體而有所不同。在評估材料特性上可於試驗混凝土版上或大直徑圓柱試體中鑽心取出直徑 102mm 試體。亦可直接製作達到養護材齡之圓柱試體（其標稱直徑為 102mm，但規範允許實際試體直徑可介於 95mm 至 102mm 之間）。若用於評估舊有結構體，則利用配置直徑 102mm 鑽石鑽頭的鑽孔設備進行鑽心。鑽心試體與位置選擇則需參照 ASTM C192 之規定。其後並使用水冷式鑽石鋸片或碳化矽鋸片由試體頂面平行方向自鑽心或圓柱試體的頂部切取一個厚度 51 ± 3 mm 試片。此試片即為 RCPT 試驗試體。且可使用帶磨機 (belt sander) 清除試體兩側鋸痕。若鑽心試體曾經表面處理過（例如使用養護劑，塗封劑、或其他表面處理材料等），且若試驗不考慮表面處理對氯離子入侵能力的影響時，則鑽心試體表面處理的部分需被移除，鄰接混凝土部分則切取厚度 51 ± 3 mm 試片進行試驗。

試體切割完後，需在室溫下氣乾 1 小時，並以快速凝結的環氧樹脂 (epoxy risen) 塗刷試片側面進行封層 (coating)。於試體封層硬化後，將試體放置在燒

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

杯中，試體的兩端面必須完全暴露，再將燒杯置入真空乾燥器內，密封並開啟真空泵浦，使真空乾燥器內壓力降低至 133 Pa (1mm Hg) 以下，且維持真空狀態三小時，真空設備如圖 2-1 所示。而於抽真空前需預先準備去氣水；係主要利用加熱器將存放於與真空乾燥器管路相連容器中的水加熱至滾沸，滾沸後密封並冷卻至室溫狀態。當真空狀態維持三小時後，將預先準備的去氣水抽入真空乾燥器內，使試體被水淹沒，並讓真空泵浦維持運轉 1 小時後關閉。真空泵浦關閉後將試體浸漬於燒杯的水中 18 ± 2 小時後始進行 RCPT 試驗。

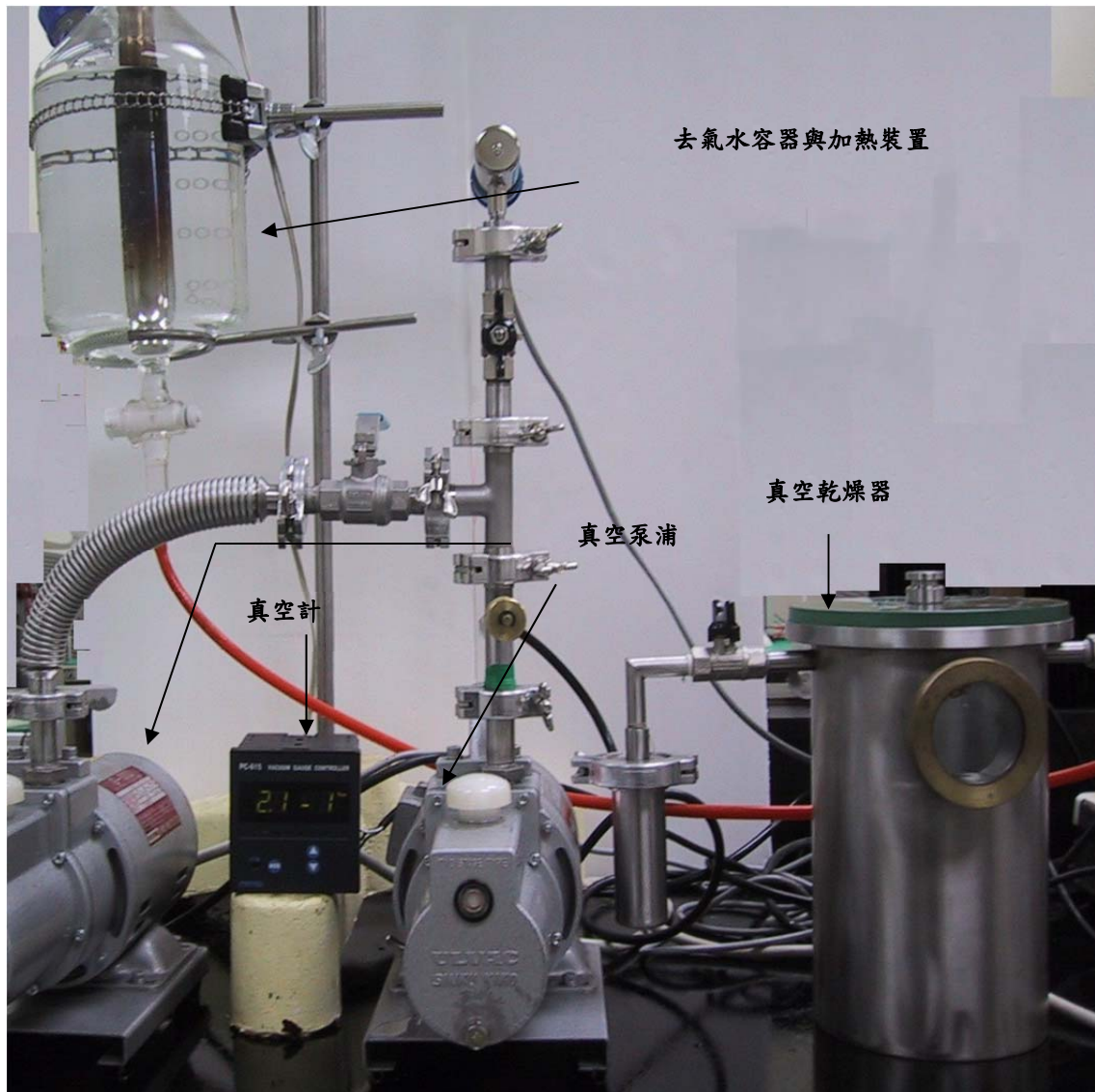


圖 2-1 RCPT 試體前處理抽真空設備

(資料來源：本研究自行整理)

試驗部分

將浸漬 18 ± 2 小時的試片取出，擦乾後將試片安裝於試驗系統上。試驗系統包含兩個施加電位容器（容積約為 220~250ml 之間），如圖 2-2 所示，係以壓克力為材料，分別安裝於試體的兩端。容器內並含有 1 個銅網電極（20 號篩徑），試體一側以 0.3N 氫氧化鈉（ $NaOH$ ）溶液填充，是為陽極。另一側則以 3% 氯化鈉（ $NaCl$ ）溶液填充，是為陰極。並在兩極之間施加 60 伏特直流電壓，以數據擷取器記錄 6 小時內電流之變化，並繪製其關係圖，電流與時間關係曲線下的面積即為 6 小時試驗期間所通過的總通過電量，單位為庫倫（coulombs, 安培-秒）；或每隔 30 分鐘記錄 1 次，一直到 6 小時為止，將所記錄的電流值代入下式（2-1）即可獲得累積電量。

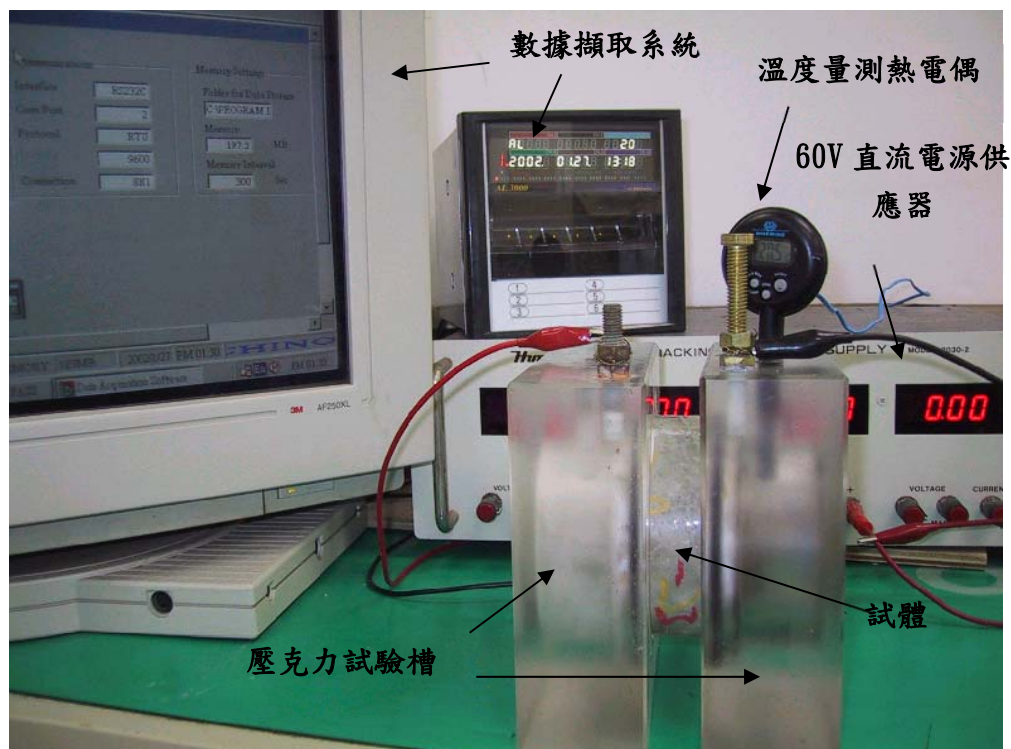
$$Q = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_t + \dots + 2I_{300} + I_{360}) \quad (2-1)$$

式中 Q 為總通過電量(coulombs)， I_0 為初始電流(amperes)， I_t 為在時間 t 時的電流(amperes)。若試體直徑不等於 95mm 時，由式（2-1）所獲致的總通過電量需加以修正。修正方式係將式（2-2）所計算的總通過電荷量乘上標準試體面積與實際試體斷面積的比值，亦即：

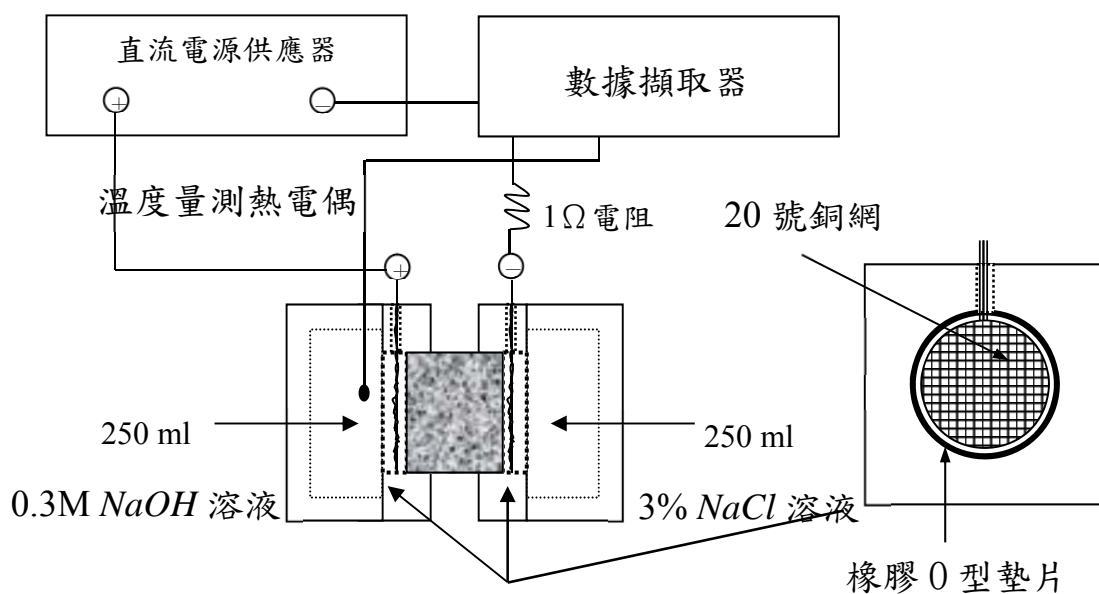
$$Q_s = Q_x \times \left(\frac{95}{x}\right)^2 \quad (2-2)$$

式中 Q_s = 通過直徑為 95mm 試體的總通過電量（庫倫）， Q_x = 通過直徑為 x mm 試體的總通過電量（庫倫）， x = 非標準試體直徑（mm）。而依 ASTM C1202 [8] 規範建議，通過試片的總電荷可以評估混凝土抗氯離子穿透能力定性，如表 2-1 所示。

而試驗過程中須同時記錄陽極試驗容器溶液溫度，若溫度超過 95°C 時，則整個 RCPT 系統視為試驗結束，並將此試體視為具有高氯離子穿透性之混凝土。



(a)



(b)

圖 2-2 (a)RCPT 試驗系統圖；(b) RCPT 試驗系統示意圖
(資料來源：本研究自行整理)

表 2-1 氯離子穿透性與 RCPT 總通過電量關係^{2,3,4}

RCPT 總通過電量 (coulombs)	氯離子穿透性
>4000	高
2000~4000	中
1000~2000	低
100~1000	極低
<100	可視為無

(資料來源：文獻 2、3、4)

第二節 飛灰混凝土

飛灰為煤燃燒廢氣經由過濾與靜電集塵器收集所得之無機物質。直徑大約分佈於 1 μm 至 100 μm 之間¹⁸。飛灰與爐石均是礦物摻料的一種，可以在有水份存在之條件下可與水泥水化生成物中的氫氧化鈣產生波索蘭反應 (pozzolanic reaction)，因此被稱為波索蘭材料¹⁹。其主要反應方程式如下：



式中 CH 為氫氧化鈣， S 為二氧化矽， H 為水。由於波索蘭材料含有數量頗多的非晶質矽氧化物 (amorphous silica)，因此在水泥水化過程中會與水化生成物中的 CH 晶體再反應形成緻密的 $C - S - H$ 膠體。對水泥漿體孔隙而言，毛細孔隙尺寸會縮小，孔隙率也因而降低²⁰。

又礦物摻料亦含有相當數量的鋁化合物，鋁化合物與氫氧化鈣(CH)晶體反應生成 $C - A - H$ (calcium aluminate hydrates) 反應物，如下式所述²¹：

¹⁸ Yan F. D., Ding J., and Beaudoin J. J., "Effect of different calcium aluminate hydrates on ettringite formation and expansion of high alumina cement-based expansive cement pastes," Cement and Concrete Research, Vol. 26, pp. 417-426, 1996.

¹⁹ Mehta P. K., and Monteiro P. J. M., "Concrete-Structure, Properties, and Materials," Prentice Hall, pp. 283, 1993.

²⁰ Collepardi M., Monosi S., and Piccioli P., "The influence of pozzolanic materials on the mechanical stability of cement," Cement and Concrete Research, Vol. 25, pp. 961-968, 1995.

²¹ Suryavanshi A. K., Scantlebury J. D., and Lyon S. B., "Mechanism of Friedel's salt formation in



式中 A 為鋁化合物。反應物 $C - A - H$ 可與硫化物再反應生成鈣鈣石。由於此種鈣鈣石是在水泥基複合材料硬固之後由硫化物侵入與 $C - A - H$ 反應之生成物，屬於 DEF (delay ettringite formation, 遲滯形成的鈣鈣石) 的一種，而 DEF 是在具穩定體積之硬固水泥基複合材料中形成，所以膨脹所產生的應力會造成水泥基複合材料裂縫的產生。因此當有硫化物侵蝕的疑慮時，必需考量礦物摻料鋁含量的最低限制²²。

鋁含量雖對水泥基複合材料抗硫化物侵蝕有不力的影響，但對氯離子傳輸而言，當孔隙水中氯離子與鋁化合物進行反應時，會形成穩定的法拉第鹽類 (Friedel's salt)，填充孔隙，減少氯離子擴散路徑^{23,24,25}。

目前我國 CNS 3036 及美國 ASTM C618 規範將飛灰分成兩類：C 級與 F 級飛灰。C 級飛灰是由燃燒褐煤或次煙煤所生成者 其成分中 $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ 至少含 50% 以上，F 級飛灰是由燃燒煙煤或無煙煤所生，而成分中 $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ 則至少 70% 以上²⁶，如表 2-2 所示。表 2-3 為各種飛灰的典型化學成分，其中以 SiO_2 含量最大，其次為 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 及 CaO ，此三種氧化物含量會因燃煤的不同而有所變動，如 F 級飛灰的 CaO 含量明顯偏低。台灣地區由於進口的煤礦大都為煙煤，飛灰的 CaO 含量甚低，多在 10% 以下，屬於 F 級，含有高量的二氧化矽 (SiO_2) 及氧化鋁 (Al_2O_3)，主要由鋁矽鹽酸玻璃組成。煤料在爐子裡燃燒時，由於已被熔融的大粒球體面上玻璃無法快速且均勻地冷卻，導致部分矽鋁晶體，如石英、 SiO_2 、 Al_2O_3 及 $2SiO_2 \cdot 3Al_2O_3$ 等針狀

cement rich in tri-calcium aluminate,” Cement and Concrete Research, Vol. 26, pp. 1673-1680, 1996.

²² Dhir R.K., El-Mohr M. A. K., and Dyer T. D., “Chloride binding in GGBS concrete,” Cement and Concrete Research, Vol. 26, pp. 1767-1773, 1996.

²³ Princed W., Perami R., and Espagne M., “Mechanisms involved in the accelerated test of chloride permeability,” Cement and Concrete Research, Vol. 29, No.2, pp.687-694, 1999.

²⁴ Zhang Y. M., Sun W. Y. and Han D., “Hydration of high-volume fly ash cement pastes,” Cement and Concrete Composites, Vol. 22, pp. 445-452, 2000. ,

²⁵ Nixon P. J., “The effect of pfa with a high total alkali content on pore solution composition and alkali-silica reaction,” Magazine of Concrete Research, Vol. 38, pp. 30-35, 1986.

²⁶ CNS 3036, “卜特蘭水泥混凝土用飛灰及天然或煨燒卜作嵐摻和物”, 中國國家標準, (2009).

形物質，會混雜在飛灰球體內，影響低鈣質 F 類飛灰之活性。

表 2-2 CNS 3036 規定之飛灰品質要求²⁶

	項目	限制標準	單位	C 類	F 類	
化學成分	$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$	最小值	%	50.0	70.0	
	三氧化硫 SO_3	最大值	%	5.0	5.0	
	燒失量(L.O.I)	最大值	%	6.0	6.0	
	含水率	最大值	%	3.0	3.0	
物理性質	細度 (停留在 No.325 篩量)	最大值	%	34.0	34.0	
	卜作嵐活性指數	最小值	%	75.0	75.0	
	高壓蒸鍋膨脹率或收縮率	最大值	%	0.8	0.8	
	與控制組之需水量比率	最大值	%	105	105	
	均質性規定：每個試樣比重及細度值與其 10 個試樣 (試樣不足 10 個時採全部試樣) 之試驗平均差異值：	細度；檢驗篩 45 μ m 篩餘量 (CNS 386)	最大值	%	5	5
		比重	最大值	%	5	5
其他規定	氧化鎂 (MgO)	最大值	%	5.0	5	
	有效鹼量(以 $Na_2O+0.658K_2O$)計算	最大值	%	1.5	1.5	
	複因數：燒失量與 45 μ m 篩餘量之乘積	最大值	%	-	255	
	水泥砂漿柱體乾縮率 (材齡 28 天)	最大值	%	0.03	0.03	
	與水泥含鹼成份之反應性：水泥砂漿柱體膨脹率 (材齡 14 天)	最大值	%	0.02	0.02	
	均質性規定：輸氣混凝土含氣量達水泥砂漿體積之 18%時，輸氣劑量與前十次試驗結果 (不足十次時，採全部試樣) 平均差異值	最大值	%	20	20	

(資料來源：文獻 26)

表 2-3 不同飛灰的典型化學成分²⁶

飛灰 種類	化學成分 (%)							
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	SO_3	MgO	燒失量	含水率
C 類	38.6	19.2	4.8	24.2	1.6	4.1	0.5	0.2
F 類	49.4	23.5	14.8	1.2	0.9	1.0	2.9	0.1

(資料來源：文獻 26)

飛灰的卜作嵐反應與混凝土孔隙水之酸鹼環境有關，相關文獻指出，F 級飛灰的卜作嵐反應需在混凝土孔隙水 pH 大於 13.2 時才會發生^{27,28}。所以飛灰的卜作嵐反應須在水泥水化反應數星期之後有足夠的鹼性氫氧化鈣生成時才會開始，因此飛灰加入混凝土後可以因延後反應而降低水化熱，可大量改善熱裂縫的產生。1993 年 Mehta²⁷ 曾針對 F 級飛灰替代水泥量多寡進行研究，指出飛灰對混凝土氯離子滲透率有正面之影響。Thomas 等²⁸ 針對養護材齡進行研究發現添加飛灰之混凝土在 28 天或早期材齡時的氯離子擴散改善不大，但在材齡 91 天之後的長期材齡卻有顯著的改善。此與卜作嵐反應較慢有關。亦有研究指出使用適量飛灰可以抑制混凝土因鹼骨材反應所造成的膨脹裂縫，減少氯離子傳輸途徑²⁷。對飛灰使用量而言，雖然對混凝土耐久性有相當助益，但替代水泥量過高會導致力學行為折減，因此一般均會考慮最大替代量。

第三節 爐石混凝土

在高爐煉鐵的過程中，為了降低生產溫度，添加石灰石作為助熔劑使氧化鐵還原，在 1500°C 高溫的作用下使石灰石與鐵礦中之礦物形成氧化物爐渣，由於爐渣較鐵水(融鐵)來的輕，因此浮在鐵水之上，分離萃取及冷卻處理後形成爐石，又稱高爐熟料。而每生產一噸生鐵伴隨著產生約 300 公斤的高爐石。依冷卻方式

²⁷Mehta P.K., and Monteiro, P.J.M., "Concrete-Structure, Properties, and Materials," Prentice Hall, pp. 281-282, 1993.

²⁸Thomas M.D.A., and Bamforth, P.B., "Modelling chloride diffusion in concrete effect of fly ash and slag," Cement and Concrete Research, Vol. 29, pp. 487-495, 1999.

區分為水淬爐石及氣冷爐石，爐石主要成分為 CaO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、與 MgO 等和水泥相似，其中以 CaO 含量較高，約為 40% 以上，在適當熱量、濕度與鹼性環境下，可以與水產生水化反應，具潛在膠結能力，因此被視為水泥質材料²⁹。而符合 CNS 12223³⁰ 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 12549³¹ 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。又依細度可分為 4000、6000、8000 三級，如表 2-4 所示，目前台灣市面上所使用之爐石粉為 80~100 級，細度為 4000 級。影響爐石粉的品質為細度、鹽基度、燒失量、玻璃質等等。一般而言鹽基度最好在 1.75 以上，玻璃質不得低於 95%，最好在 98% 以上，燒失量不得超過 1% (CNS 規定 3% 以內)，最好低於 0.3%。

表 2-4 高爐石粉之物理性質^{29,30}

試驗項目		規範
細度：(1)0.045mm CNS 386 濕篩後殘留量，最大值		20%
(2)比表面積[CNS 2924 卜特蘭水泥細度檢驗法(氣透儀法)]，最小值		330m ² /kg
水淬高爐石粉墾料之空氣含量，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：文獻 29、30)

²⁹ Osborne G.J., "Durability of Portland blast-furnace slag cement concrete," Cement and Concrete Composites, Vol. 21, pp. 11-21, 1999.

³⁰ CNS 12223, "水淬高爐爐渣", 中國國家標準, (2013).

³¹ CNS 12549, "混凝土及水泥砂漿用水淬高爐爐渣粉", 中國國家標準, (2009).

爐石取代水泥時，須仰賴水泥釋放鹼性離子溶液來提供相當之活性能，才能激發其潛在的膠結功能，當水泥水化作用產生出 C-S-H 膠體及 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 時，爐石便會與 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反應生成類似卜特蘭水泥之水合物 C-(S/A)-H 膠體，填充原本 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 所佔之空間，使得毛細孔隙直徑變得更小，使混凝土中孔隙減少，水密性較佳，外界有害性物質如氯離子、硫酸鹽類不易滲入，有助於抗海水及硫鹽侵蝕，並防止鋼筋腐蝕³¹。

Price³²指出，當混凝土的孔隙溶液中含有較少的氫氧根離子時，會導致外加電場電解池所量測到的電流較低；而爐石的化學反應行為會消耗掉孔隙溶液中的氫氧根離子，以致爐石取代部份水泥的混凝土量測到的電流值會較低。

由於爐石之顆粒較水泥顆粒細小，故將爐石適量摻用於混凝土中，可使其原有的顆粒堆積程度更加緻密化。一般水泥之細度約在 $2800 \text{ cm}^2/\text{g}$ 左右，而爐石依需要可提高研磨細度達 $5000 \text{ m}^2/\text{g}$ 或更高，因此添加爐石後之混凝土可以使混凝土孔隙尺寸變小，降低氯離子滲透性，提高抵抗硫化物侵蝕之能力³³。

爐石之比重略小於水泥(水泥比重約為3.15;爐石約為2.90;飛灰約為2.10)，且無飛灰燒失量之問題，故爐石以相等重量替代部份水泥時，膠結料總重量不變，但漿體實質佔有之體積會增加，亦即漿體對骨材之體積比會因而提高，改善了新拌混凝土工作性，又因爐石替代了部份水泥對混凝土的縮變行為亦有相當的改善^{34,35}。

混凝土中以爐石適量替代部分水泥後，因漿體微觀結構較緻密，增加了抵抗有害物質侵蝕、鹼骨材反應及鋼筋之銹蝕能力，使混凝土之耐久性提高。Hogan³⁶研究指出在第一型水泥中加入 50% (Al_2O_3 的含量約 12%) 爐石，與使用第五

³² Prince W. and Gagne, R., "The effects of types of solutions used in accelerated chloride migration tests for concrete," *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, No.4 pp.775-780, 2001.

³³ Hooton R.D., and Emery J.J., "Sulfate resistance of a Canadian slag cement", *ACI Materials Journal*, Vol. 87, pp. 547-555, 1990.

³⁴ 沈進發等，"公共工程高爐石混凝土使用手冊"，行政院公共工程委員會專案研究計劃，2003.

³⁵ Hogan F.J., and Meusel J.W., "Evaluation for Durability and Strength Development of a Ground Granulated Blast-Furnace Slag," *Cement, Concrete, and Aggregates*, V.3, No1, pp.40~52, summer, 1981.

型水泥所產生的抗硫酸鹽侵蝕能力相當。以同樣百分比的爐石替代第 II 型水泥，則效果更佳，這是因為用了爐石替代部分水泥使混凝土中 C_3A 及 C_3S 之含量降低，又因化學反應使 C-(S/A)-H 之膠體量增多所致。爐石之反應使混凝土中水泥漿體內之毛細孔隙直徑變小，微觀結構較緻密，因此增加混凝土之水密性，有效減少鹼骨材反應所引起的膨脹及抑制氯離子之滲入，減少鋼筋之銹蝕。又爐石取代的混凝土中，漿體內的 Ca^{2+} 、 Al^{3+} 、 $AlOH^{2+}$ 、 Si^{4+} 之總量比純水泥漿多，且濃度較高，而這些離子有較低的擴散能力，可以約束氯離子之移動³⁶且 C_3A ，可與氯離子反應生成法拉第鹽，來填充孔隙，減少擴散路徑。

³⁶ Princd W., Perami R., and Espagne M., "Mechanisms involved in the accelerated test of chloride permeability," Cement and Concrete Research, Vol. 29, No.2, pp.687-694, 1999.

第三章 試驗變數設計與方法

本研究以試驗研究與文獻蒐集，對 CNS14795 快速氯離子穿透試驗法—RCPT 進行增修建議，以建立適用於我國的快速混凝土耐久性評估試驗法方式。由於 RCPT 電量表示耐久性的評估方法仍較為簡便，因此修正相關試驗法將藉由 CNS14795 標準 3.3 節中依據 RCPT 試驗結果評估氯離子穿透性分類的基礎點進行思考，建立適用於飛灰與爐石混凝土的氯離子穿透性分類。因此會先進行各種變數飛灰或爐石混凝土（包含未添加的控制組配比）RCPT 試驗結果，並進行比對分析，由此配合相關文獻蒐集說明 RCPT 運用於飛灰或爐石混凝土可能產生的試驗結果誤差與 RCPT 相關試驗機理。其次將試驗後的試體利用全斷面磨粉與切片磨粉取樣方式，量測試體於試驗後各深度位置混凝土氯離子濃度變化情形進行分析。由控制組混凝土氯離子濃度進入深度與總通過電量之關係，比對飛灰或爐石混凝土氯離子濃度進入深度與總通過電量之關係，轉換成適用飛灰或爐石混凝土氯離子穿透性分類，藉以建立適用於我國的快速混凝土耐久性評估試驗法，相關方法說明如下。

第一節 變數設計

相關試驗變數將包含三大類，分別為水膠比、礦物摻料總類、與礦物摻料添加量。其中水膠比變數範圍為 0.35 至 0.65，此範圍可涵蓋目前業界混凝土產製的高中低設計強度。礦物摻料種類則為本研究主題之飛灰與爐石。飛灰將採用國內較常用的 F 級飛灰。爐石則使用國內較常用的 4000 級水焯高爐石粉。在礦物摻料添加量方面，其設定為替代水泥量的 0%~50%，此設定含括業界最常使用的 30%，以及未來再生綠建材認證的 50% 範圍。原試驗變數設計為 0%、20%、30%、50%，為使計畫研究更趨完整性增加 40% 變數組。試驗配比變數如表 3-1 所示。相關混凝土也從原計畫書設計 28 組配比增加至 36 組配比。每組配比至少製作 20 個試體以供試驗。試體均製作直徑 10 公分高度 20 公分圓柱試體。試體於硬固後進行水中養護，相關規劃養護材齡為 28 天與 91 天。並達規劃養護材齡後，

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

進行抗壓強度試驗、RCPT 試驗、與 RCPT 試驗後各深度混凝土氯離子濃度量測。

表 3-1 混凝土配比變數

配比變數	變數範圍
水膠比	0.35、0.45、0.55、0.65
礦物摻料種類	飛灰、爐石
礦物摻料添加量	0%、20%、30%、40%、50%

(資料來源：本研究自行整理)

第二節 混凝土組成材料性質

本研究所使用的混凝土組成材料包含水、水泥、F 級飛灰、4000 型水淬高爐石粉、粗骨材、與細骨材，其材料性質如下所述。

水

混凝土試體拌合所用的水為符合 CNS 13961 與 ASTM C94 規範所規定的混凝土拌合用水，一般常使用自來水，其相關性質如表 3-2 所示。

表 3-2 拌合水試驗結果(ppm)

試驗項目	含量
氯離子	0.33
硫酸根離子	0.20
鹼性物質 ($\text{Na}_2\text{O} + 0.66\text{K}_2\text{O}$)	0.29
總固體含量	0.01

(資料來源：本研究自行整理)

水泥

本研究試驗採用台灣水泥公司所生產的第一型水泥，比重為 3.15，表 3-3 為其物理性質與化學成分。

表 3-3 水泥之物理與化學性質

試驗項目	CNS 61-R2001	試驗值
細度：Fineness	Min: 2800 cm ² /g	3520 cm ² /g
健度：Soundness	Max: 0.80%	0.05%
7 天抗壓強度	Min: 197 kgf/cm ²	312 kgf/cm ²
28 天抗壓強度	Min: 281 kgf/cm ²	412 kgf/cm ²
初凝：Initial set	Min: 45 分鐘（維卡針法）	3 小時 10 分鐘
終凝：Final set	Max: 375 分鐘（維卡針法）	5 小時 30 分鐘
二氧化矽(SiO ₂)	---	20.89%
氧化鋁(Al ₂ O ₃)	---	5.61%
氧化鐵(Fe ₂ O ₃)	---	3.13%
氧化鈣(CaO)	---	63.87%
氧化鎂(MgO)	Max: 6.00%	2.93%
燒失量(L.O.I)	Max: 3.00%	0.73%
不溶殘渣(Ins. Res)	Max: 0.75%	---
矽酸三鈣(C ₃ S)	---	50.40%
矽酸二鈣(C ₂ S)	---	22.20%
鋁酸三鈣(C ₃ A)	---	9.57%
鋁鐵酸四鈣(C ₄ AF)	---	9.51%

（資料來源：台灣水泥股份有限公司）

飛灰

本研究所採用之飛灰取自台灣電力公司，依 CNS 3036 分類為 Class-F 等級的飛灰，比重為 2.26，其化學成分組成如表 3-4。

表 3-4 飛灰主要化學成分

化學組成	平均值(%)	試驗標準 (CNS 3036)
SiO ₂	50.00	三者合計大於 70%
Al ₂ O ₃	28.41	
Fe ₂ O ₃	6.98	
CaO	5.99	---
MgO	1.39	---
K ₂ O	0.13	---
Na ₂ O	0.09	---
SO ₃	0.47	小於 3%
燒失量	4.62	小於 6%
活性指數(7 天)	86.8	大於 75%
活性指數(28 天)	97.8	大於 75%

(資料來源：台灣電力公司)

爐石

本研究使用之爐石粉為中聯爐石股份有限公司所生產 4000 型，比重為 2.82，其化學成分組成如表 3-5。

表 3-5 爐石粉主要化學成分

化學組成	平均值(%)	試驗標準 (CNS 12223)
SiO ₂	34.28	38%以下
Al ₂ O ₃	13.52	16%以下
Fe ₂ O ₃	0.39	1%以下
CaO	42.39	37%以上
MgO	5.95	10%以下
SO ₃	0.52	3%以下
比表面積(cm ² /g)	4390	---
活性指數(7 天)	84.8	---
活性指數(28 天)	116.5	---

(資料來源：中聯爐石股份有限公司)

粗骨材

本研究混凝土所使用之粗骨材為三分碎石，其產地為我國宜蘭河域。其中比重(SSD)為 2.74，篩分析試驗結果如表 3-6，其粒徑級配分布圖如圖 3-1 所示。

表 3-6 篩分析試驗結果

篩 號	遺留重量%	累積重量%	通過重量%
1" (25.4 mm)	0.00	0.00	100.00
3/4" (19.05 mm)	1.40	1.40	98.60
1/2" (12.7 mm)	22.75	24.15	75.85
3/8" (9.5 mm)	15.00	39.15	60.85
NO.4 (4.75 mm)	48.00	87.15	12.85
底 盤	12.60	99.75	0.25

(資料來源：本研究自行整理)

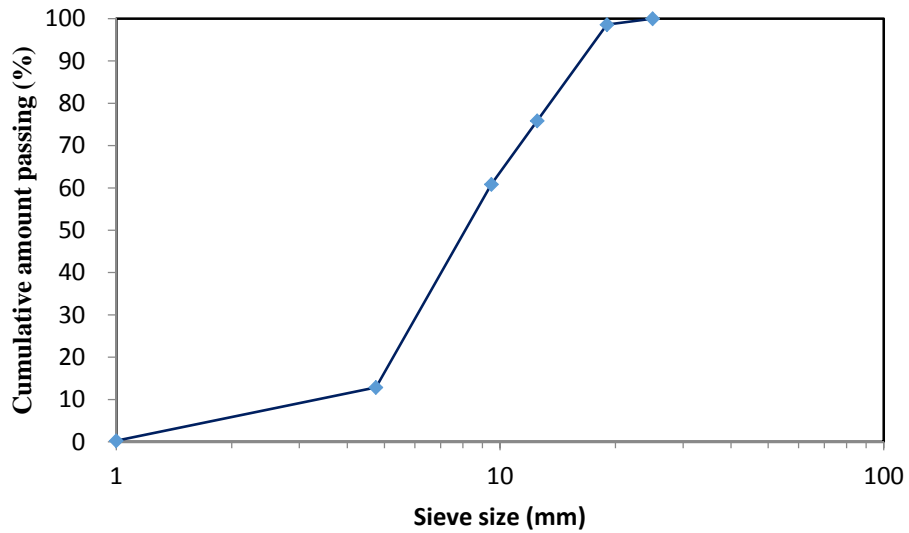


圖 3-1 三分碎石之級配級配分布圖

(資料來源：本研究自行整理)

細骨材

本研究所使用之細骨材為我國宜蘭河域所產之混凝土用粗砂級配。其比重(SSD)為 2.69，篩分析試驗結果如表 3-7 所示，其粒徑級配分布圖如圖 3-2 所示。

表 3-7 細骨材之篩分析試驗結果

篩 號	遺留重量%	累積重量%	通過重量%
3/8" (9.5mm)	0.00	0.00	100.00
NO.4 (4.75mm)	1.24	1.24	98.76
NO.8 (2.36mm)	18.00	19.24	80.76
NO.16 (1.18mm)	22.04	41.28	58.72
NO.30 (600 μ m)	14.20	55.48	44.52
NO.50 (300 μ m)	15.00	70.48	29.52
NO.100(150 μ m)	20.00	90.48	9.52
底盤	9.30	99.78	0.22

(資料來源：本研究自行整理)

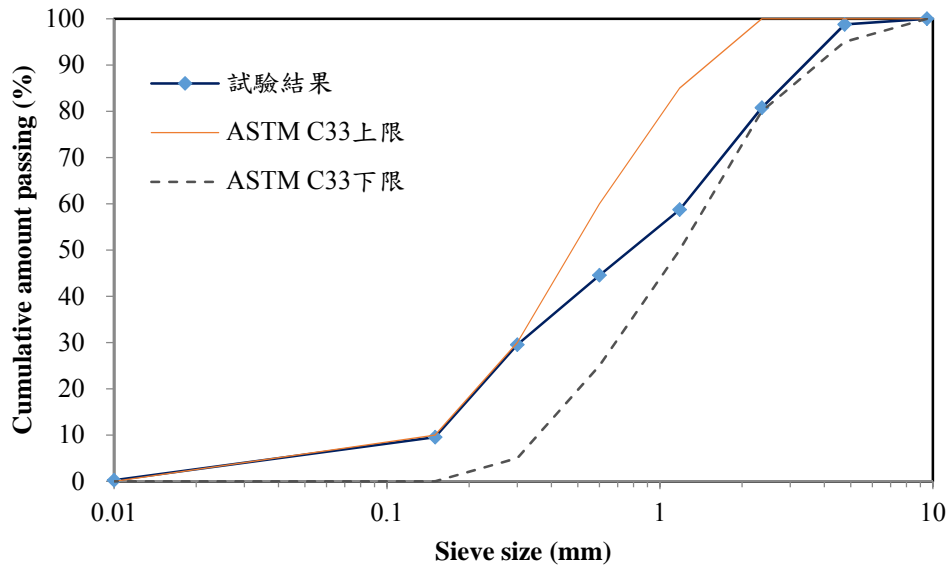


圖 3-2 粗砂之級配級配分布圖

(資料來源：本研究自行整理)

第三節 混凝土配比設計

本研究經第一節變數設計與第二節組成材料性質，進行配比設計。表 3-8 為本研究飛灰混凝土配比編號設計；表 3-9 為爐石混凝土配比編號設計。其中代號第一位以 F 為飛灰，S 為爐石，C 為控制組未添加飛灰與爐石的傳統混凝土。代號第二位與第三位以數字代表水膠比，如 35 為水膠比 0.35、65 為水膠比 0.65。最後一位數字代表飛灰或爐石替代量，如 0 為未添加飛灰或爐石、2 為替代量 20%、5 為替代量 50%。表 3-10 至表 3-11 為本研究混凝土配比設計。相關試體於製作硬固後，隨即放入水中養護 28 天後進行各項試驗。

表 3-8 本研究混凝土配比編號設計（飛灰混凝土）

變數類別	替代量 0%	替代量 20%	替代量 30%	替代量 40%	替代量 50%
水膠比 0.35	C350 (控制組)	F352	F353	F354	F355
水膠比 0.45	C450 (控制組)	F452	F453	F454	F455
水膠比 0.55	C550 (控制組)	F552	F553	F554	F555
水膠比 0.65	C650 (控制組)	F652	F653	F654	F655

(資料來源：本研究自行整理)

表 3-9 本研究混凝土配比編號設計（爐石混凝土）

變數類別	替代量 0%	替代量 20%	替代量 30%	替代量 40%	替代量 50%
水膠比 0.35	C350 (控制組)	S352	S353	S354	S355
水膠比 0.45	C450 (控制組)	S452	S453	S454	S455
水膠比 0.55	C550 (控制組)	S552	S553	S554	S555
水膠比 0.65	C650 (控制組)	S652	S653	S654	S655

(資料來源：本研究自行整理)

表 3-10 本研究飛灰混凝土配比設計

混凝土 配比編號	水 (kg/m ³)	水泥 (kg/m ³)	飛灰 (kg/m ³)	細骨材 (kg/m ³)	粗骨材 (kg/m ³)	強塑劑 (kg/m ³)
C350	160	457	0	956	856	3
F352	160	366	91	956	825	3
F353	160	320	137	956	809	3
F354	160	274	183	956	793	3
F355	160	229	229	956	777	3
C450	160	356	0	956	953	0
F452	160	284	71	956	928	0
F453	160	249	107	956	908	0
F454	160	213	142	956	896	0
F455	160	178	178	956	891	0
C550	160	291	0	956	1008	0
F552	160	233	58	956	987	0
F553	160	204	87	956	971	0
F554	160	175	116	956	961	0
F555	160	145	145	956	957	0
C650	160	246	0	956	1046	0
F652	160	197	49	956	1028	0
F653	160	172	74	956	1015	0
F654	160	148	98	956	1006	0
F655	160	123	123	956	1003	0

(資料來源：本研究自行整理)

表 3-11 本研究爐石混凝土配比設計

混凝土 配比編號	水 (kg/m ³)	水泥 (kg/m ³)	爐石 (kg/m ³)	細骨材 (kg/m ³)	粗骨材 (kg/m ³)	強塑劑 (kg/m ³)
C350	160	457	0	956	856	3
S352	160	366	91	941	854	3
S353	160	320	137	941	850	3
S354	160	274	183	941	846	3
S355	160	229	229	941	842	3
C450	160	356	0	956	953	0
S452	160	284	71	941	948	0
S453	160	249	107	941	945	0
S454	160	213	142	941	942	0
S455	160	178	178	941	939	0
C550	160	291	0	956	1008	0
S552	160	233	58	941	1004	0
S553	160	204	87	941	1001	0
S554	160	175	116	941	999	0
S555	160	145	145	941	996	0
C650	160	246	0	956	1046	0
S652	160	197	49	941	1042	0
S653	160	172	74	941	1040	0
S654	160	148	98	941	1038	0
S655	160	145	145	941	996	0

(資料來源：本研究自行整理)

第四節 試驗方法

試驗方法除依 CNS 1232 進行各材齡抗壓強度試驗外，其他試驗包含 2 部分，分別為 RCPT 試驗與 RCPT 試驗後各深度混凝土氯離子濃度量測。其中 RCPT 試驗法請參照第二章第一節。以下將就 RCPT 試驗後各深度混凝土氯離子濃度量測進行介紹。

RCPT 試驗後各深度混凝土氯離子濃度量測

本試驗係將試驗後試體放置於室溫下一天，使其水分揮發後，由陰極槽接觸面方向取得各深度逐層粉末，取樣方式分成由陰極槽接觸面至試體內 1cm 深度全斷面磨粉取樣，與試體深度 1 cm 至 5 cm 切片磨粉取樣兩種方式。相關說明如下。

1. 全斷面磨粉取樣:適用磨粉深度 0 至 1 cm 位置，即利用全斷面磨粉儀器取得各層粉末，磨粉裝置如圖 3-3 所示，研磨深度為每 0.1 cm 深度磨粉 1 次，以取得各深度粉末利用酸溶法量測氯離子含量。
2. 切片磨粉取樣：試體深度試體深度 1 cm 至 5 cm 位置則使用乾式鑽石切刀逐層將圓柱試體切成 1 cm 之試片，如圖 3-4 所示。將試片置於高速粉碎機磨為粉狀，取通過 50 號篩之混凝土粉末以利用酸溶法量測氯離子含量。

各深度混凝土氯離子濃度依據 CNS 14702 酸溶法步驟進行，並配合電位滴定儀與離子層析儀進行分析萃取溶液中氯離子濃度。



圖 3-3 混凝土全斷面磨粉儀器

(資料來源：本研究自行整理)

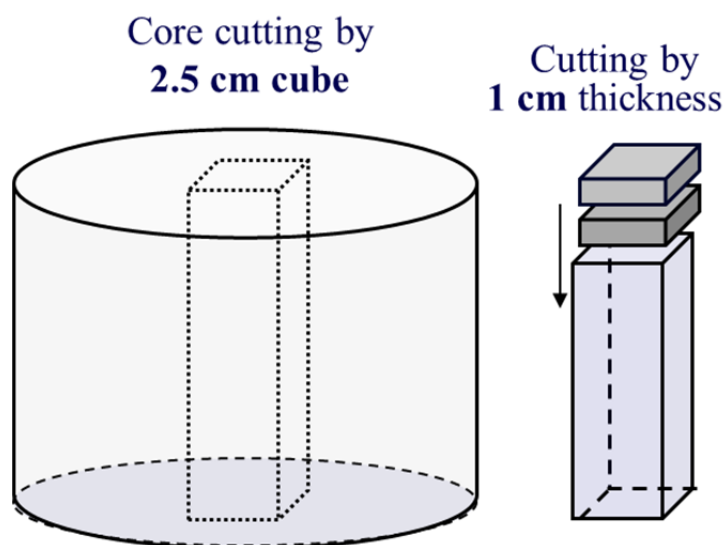


圖 3-4 穿透深度 1 cm 至 5 cm 切片磨粉取樣示意圖

(資料來源：本研究自行整理)

RCPT 試驗分析過程方面，由氯離子含量與各深度的相對位置，可以了解 6 小時 RCPT 試驗後混凝土內部氯離子含量變化情形。

氯離子含量分析方法

本研究所使用的氯離子含量分析方法為 CNS 14702 硬固混凝土酸溶法氯離子檢測法。下述為其分析方法簡介。

以酸溶法進行氯離子檢測，可了解被水化生成物吸附的氯離子與在孔隙結構中存在的自由氯離子含量，因此被視為硬固混凝土中氯離子的總量。相關步驟說明如下：

- (A) 其取樣過程係由試體上取得 10 g 以上具代表性的樣本。
- (B) 將樣本進行破碎與研磨。
- (C) 研磨後將粉末通過孔徑 850 μm 之 20 號篩 (AASHTO T260 為 50 號篩)，取通過試驗篩粉末約 10 g 進行氯離子萃取工作。
- (D) 萃取過程係依據 CNS 1078”水硬性水泥化學分析法”。將粉末進行秤重後放入 250 mL 燒杯中，加入 75 mL 去離子水使之分散，並加入 25 mL 稀硝酸 (1:1) 進行酸化過程。
- (E) 將燒杯覆蓋與加熱至沸騰
- (F) 放置室溫冷卻後，利用重力或抽氣方式將溶液以 9 cm 粗質濾紙 (AASHTO T260 為 Whatman 40 與 41 號濾紙) 過濾，已取得氯離子量測濾液。
- (G) 將濾液以硝酸銀配合電位滴定進行氯離子濃度量測。(相關電位滴定方式請參造下述說明)

電位滴定量測氯離子濃度

在萃取液中氯離子是以次氯酸根狀態存在於氫氧化鈉溶液中，所以樣本滴定前必須進行酸化處理，將次氯酸根還原成氯離子以供量測。所採用的方式則參考 ASTM D512 或 CNS 1078 規範中所規定之硝酸銀電位滴定法進行。主要利用 0.01 N 標準硝酸銀溶液滴定含有氯離子的溶液使其產生白色氯化銀沉澱，其方程式如下所示：



滴定進行時，首先需利用硝酸將樣本酸化。溶液酸化的原因有兩個，第一個

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

原因會把氫氧化鈉溶液中的次氯酸根還原成溶於水的氯離子，其方程式如下：



另一原因由於氫氧化鈉溶液屬於高鹼性，為避免硝酸銀與溶液中氫氧根結合產生 $AgOH$ ，造成誤判，因此需將存在於氫氧化鈉中的氯離子溶液酸化。下圖 3-5 為本研究所使用的 Metrohm 702 SM 型電位滴定儀，此儀器之量測精度可達 10 ppm，且可由電腦連線記錄試驗資料。參考電極為銀/氯化銀複合電極。主要藉由電極量測滴定過程中氯離子的氧化電位，當電位突然巨幅變化時，則是為滴定終點 (equivalence point, EP)，如圖 3-6 所示。

藉由滴定終點所得之硝酸銀溶液滴定量與已知濃度，可以計算滴定溶液中氯離子含量，其計算式如下：

$$N_{cl} = \frac{N_{AgNO_3} V_{AgNO_3}}{V_{cl}} \quad (3-3)$$

式中 N_{cl} 為氯離子濃度 (mole/L)； N_{AgNO_3} 為 0.01 N 標準硝酸銀溶液，由於硝酸銀溶液極易受光線干擾，因此試驗前需以標準 0.1 N 標準氯化鈉溶液標定； V_{AgNO_3} 為滴定終點硝酸銀溶液滴定量 (mL)； V_{cl} 為氯離子溶液滴定樣本數 (mL)。

上述滴定完畢後，各標準計算氯離子方式如下所述：

(A) 新拌混凝土氯離子含量

濾液滴定後依下列式(3-4)與式(3-5)計算新拌混凝土氯離子含量

$$\text{試樣濾液氯離子濃度 } C_w = \frac{(A-B) \times N \times 3.545}{S_w} (\%) \quad (3-4)$$

$$\text{新拌混凝土氯離子含量 } C_c = C_w \times W \times \frac{1}{100} (\text{kg/m}^3) \quad (3-5)$$

式中 A 為水樣硝酸銀滴定終點 (mL)；B 為空白試驗硝酸銀滴定終點 (mL)；N 為硝酸銀滴定溶液之當量濃度； S_w 為水樣容積 (mL)；W 為配比設計中所示之混凝土單位用水量 (kg/m^3)。

(B) 硬固混凝土氯離子含量

濾液滴定後依下列式(3-6)與式(3-7)計算硬固混凝土氯離子含量

$$\text{試樣濾液中氯離子濃度 } P_{cl^-} = \frac{(A-B) \times N \times 3.545}{S} (\%) \quad (3-6)$$

$$\text{硬固混凝土氯離子含量 } C_c = P_{cl^-} \times D \times \frac{1}{100} \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (3-7)$$

式中 S 為試樣體積 (g)；D 為混凝土烘乾密度或面乾內飽和密度 (kg/m³)，報告須註明採用的密度。

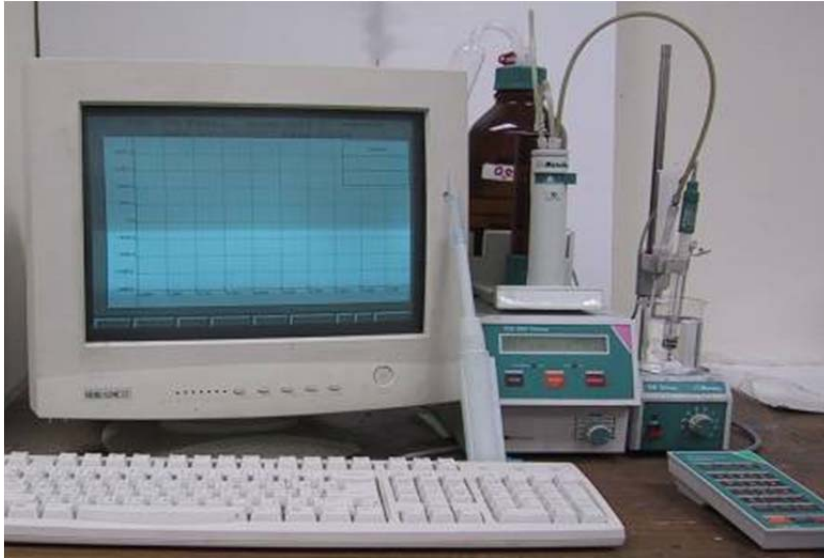


圖 3-5 Metrohm 702 SM 型電位滴定儀

(資料來源：本研究自行整理)

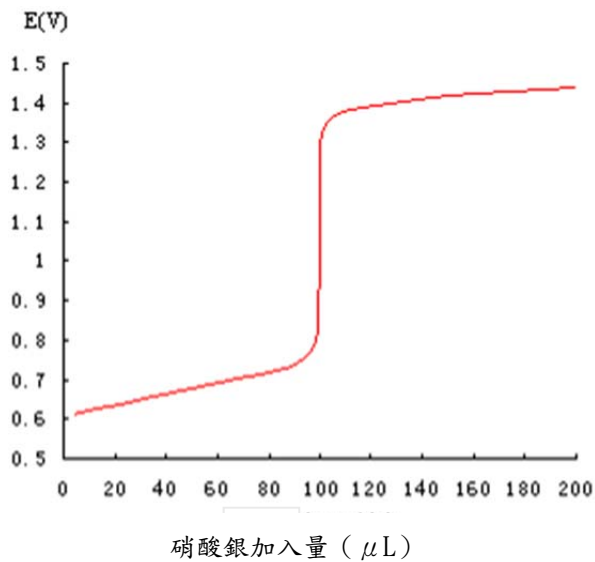


圖 3-6 滴定過程電位變化與硝酸銀加入量關係

(資料來源：本研究自行整理)

若氯離子濃度較低，本研究亦考量利用離子層析儀進行氯離子濃度量測工作，離子層析法使用物理吸附與沖提機制，較不受到干擾，且可量測至 ppb 級之濃度，因此本研究擬採用此法進行混凝土中氯離子的分析工作，但其缺點在於無法直接量測濃度高於 100 ppm 之樣品，以及受制於分離管柱使用次數與費用，因此單次試驗成本較高。

離子層析法主要參考規範為 CNS 14918，其原理是使待測溶液通過充填樹脂之分離管，離子與樹脂產生交換作用而吸附於樹脂交換基之上，此時加入流洗液沖提，使其脫離交換基，再度變成自由離子，再不斷重複此一吸附一沖提循環作用。由於溶液中離子電荷數，離子半徑及質量等因素，對樹脂之親和力會產生差異，親和力越大越容易吸附，且越難沖提，因此造成通過分離管所需之時間不同，並且各自形成離子群，此時再測量其溶液總導電率，並藉由軟體繪製時間與溶液總導電率之關係曲線，在藉由比對不同濃度標準溶液導電值所製成的檢量線，即可做材料加速劣化後化學成分的定性與定量分析，如圖 3-7 所示，為典型的離子層析試驗結果。本研究所使用的離子層析儀為 Metrohm MIC 模組式系列之離子層析儀。設備可同時量測陰陽離子濃度，並可自動連續量測多管試樣。本套設備照片如圖 3-8 所示。

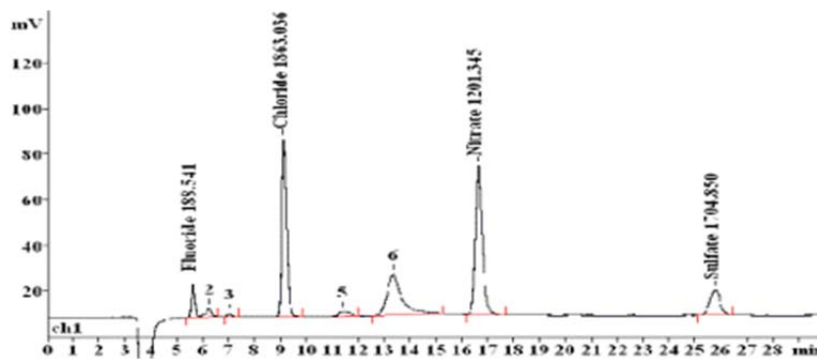


圖 3-7 典型的離子層析法試驗結果

(資料來源：本研究自行整理)



圖 3-8 Metrohm MIC 模組式離子層析儀

(資料來源：本研究自行整理)

第四章 研究成果

本研究依據研究規劃，將各種爐石與飛灰混凝土配比依 RCPT 標準方法進行試驗，並於試驗後實際量測氯離子進入試體的深度變化情形，藉此分析相關試驗結果，以對後續試驗標準之增修提供建議。目前已完成各組配比試體製作與抗壓強度試驗，並已完成飛灰組、爐石組混凝土配比的 RCPT 與氯離子進入試體的深度變化量測試驗。試驗進度良好並已全部依服務建議書進度完成。下述為其試驗研究結果之分析與討論。

第一節 抗壓強度試驗結果

所有配比於拌合後均取 3 只試體進行 28 天與 91 天抗壓強度試驗，以探討各種不同替代量之飛灰或爐石混凝土對抗壓強度的影響。表 4-1 至表 4-2 為飛灰混凝土 28 天與 91 天材齡養護完成後之抗壓強度試驗結果。表 4-3 至表 4-4 為 91 天養護完成後之爐石混凝土配比抗壓強度試驗表。為方便工程人員研讀，抗壓強度試驗結果平均值亦有轉換成英制 psi 欄位表示。

圖 4-1 與圖 4-2 分別為 28 天與 91 天材齡不同替代量的飛灰混凝土與抗壓強度之間的關係。由圖中可以發現 28 天飛灰混凝土除了水膠比 0.35 外，其餘水膠比均會隨著飛灰替代量的增加而有抗壓強度明顯下降之趨勢，若以替代量 50% 與各水膠比控制組相比較，水膠比 0.35，F355 較 C350 減少 1.9%、水膠比 0.45 減少 25.6%、水膠比 0.55 減少 42.9%、以及水膠比 0.65 減少 48.1% 抗壓強度，因此水膠比 0.45 至 0.65 減少幅度相當顯著。而到了 91 天材齡飛灰混凝土，則水膠比 0.35 與 0.45 有隨著飛灰替代量的增加而有抗壓強度上升之趨勢，上升幅度分別為 F355 較 C350 增加 24.6%、以及 F455 較 C450 增加 15.6% 抗壓強度。但是在水膠比 0.55 與 0.65，均在替代量 30% 時抗壓強度達到最高點，如 F553 較 C550 增加 7.7%、以及 F653 較 C650 增加 12.9% 抗壓強度。但替代量超過 30% 就有下降之情形，如 F555 較 C550 減少 7.7% 抗壓強度、F655 較 C650 減少 6.5% 抗壓強度，相較於 28 天已有下降趨緩之趨勢。

表 4-1 飛灰混凝土養護材齡 28 天抗壓強度試驗結果

配比編號	抗壓強度試驗結果(MPa)			平均值	
	試體 1	試體 2	試體 3	MPa	psi
C350	52	53	50	52	7570
C450	43	43	41	43	6208
C550	35	34	35	35	5060
C650	27	29	26	27	3970
F352	49	50	49	48	6987
F452	40	41	41	43	6298
F552	28	30	29	28	4123
F652	21	21	21	20	2979
F353	51	51	51	51	7460
F453	42	42	43	44	6359
F553	28	28	28	28	4070
F653	22	23	22	21	3061
F354	52	53	52	50	7357
F454	38	39	39	39	5678
F554	27	26	26	25	3670
F654	17	19	17	16	2393
F355	50	49	50	51	7371
F455	33	34	33	32	4706
F555	20	20	20	20	2870
F655	13	14	14	14	2039

(資料來源：本研究自行整理)

表 4-2 飛灰混凝土養護材齡 91 天抗壓強度試驗結果

配比編號	抗壓強度試驗結果(MPa)			平均值	
	試體 1	試體 2	試體 3	MPa	psi
C350	56	58	58	57	8384
C450	43	47	44	45	6526
C550	39	38	39	39	5643
C650	32	31	30	31	4462
F352	70	68	70	69	10113
F452	51	51	50	51	7433
F552	38	37	39	38	5524
F652	33	32	32	32	4721
F353	72	73	69	71	10423
F453	51	52	52	52	7547
F553	42	41	42	42	6065
F653	34	36	35	35	5109
F354	72	71	72	72	10439
F454	52	53	54	53	7754
F554	42	42	43	42	6172
F654	32	33	33	33	4768
F355	70	71	71	71	10283
F455	52	51	52	52	7568
F555	36	37	35	36	5278
F655	29	29	28	29	4218

(資料來源：本研究自行整理)

表 4-3 爐石混凝土養護材齡 28 天抗壓強度試驗結果

量測試驗	抗壓強度試驗結果(MPa)			平均值	
	試體 1	試體 2	試體 3	MPa	psi
C350	52	53	50	52	7570
C450	43	43	41	43	6208
C550	35	34	35	35	5060
C650	27	29	26	27	3970
S352	50	53	53	52	7589
S452	42	44	44	43	6332
S552	38	37	37	37	5422
S652	28	27	28	28	4040
S353	57	52	56	55	8022
S453	45	43	47	45	6545
S553	38	35	36	36	5303
S653	33	32	33	33	4759
S354	58	56	54	56	8171
S454	47	46	46	46	6747
S554	37	37	36	37	5333
S654	31	32	31	31	4562
S355	52	51	51	51	7503
S455	36	38	37	37	5379
S555	33	32	33	33	4762
S655	26	26	25	26	3737

(資料來源：本研究自行整理)

表 4-4 爐石混凝土養護材齡 91 天抗壓強度試驗結果

配比編號	抗壓強度試驗結果(MPa)			平均值	
	試體 1	試體 2	試體 3	MPa	psi
C350	56	58	58	57	8384
C450	43	47	44	45	6526
C550	39	38	39	39	5643
C650	32	31	30	31	4462
S352	58	57	58	58	8451
S452	48	45	44	46	6660
S552	41	42	41	41	6017
S652	31	31	31	31	4504
S353	60	58	58	59	8563
S453	49	48	50	49	7176
S553	42	42	43	42	6152
S653	35	33	36	35	5057
S354	64	61	58	61	8887
S454	50	52	50	51	7379
S554	46	44	44	45	6523
S654	37	38	34	36	5267
S355	56	55	55	55	8078
S455	42	39	41	41	5970
S555	36	35	36	36	5203
S655	28	28	25	27	3922

(資料來源：本研究自行整理)

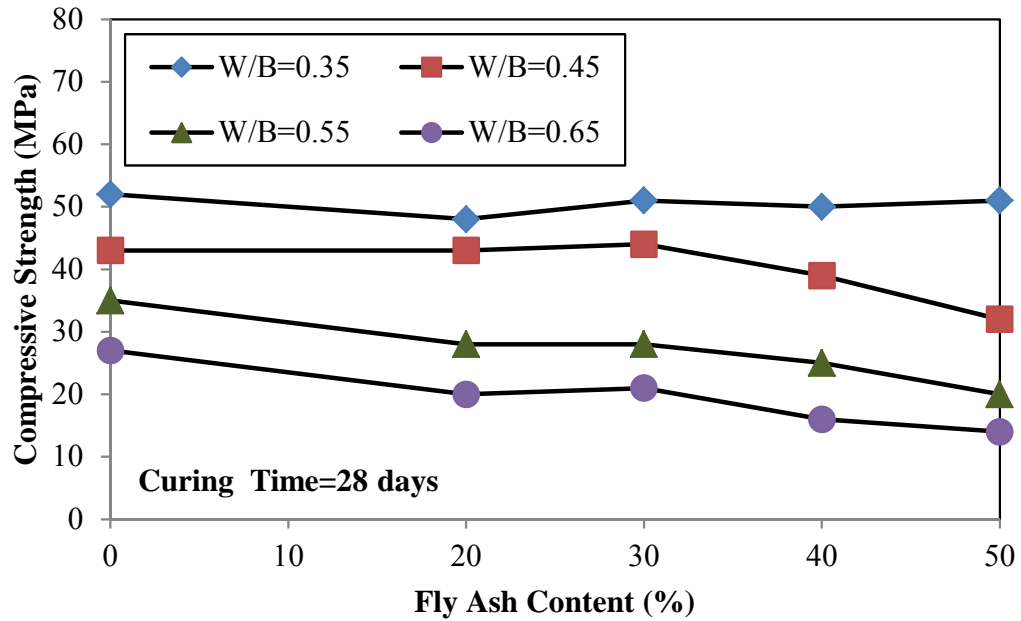


圖 4-1 不同水膠比飛灰混凝土替代量與抗壓強度之關係圖 (養護材齡 28 天)
(資料來源：本研究自行整理)

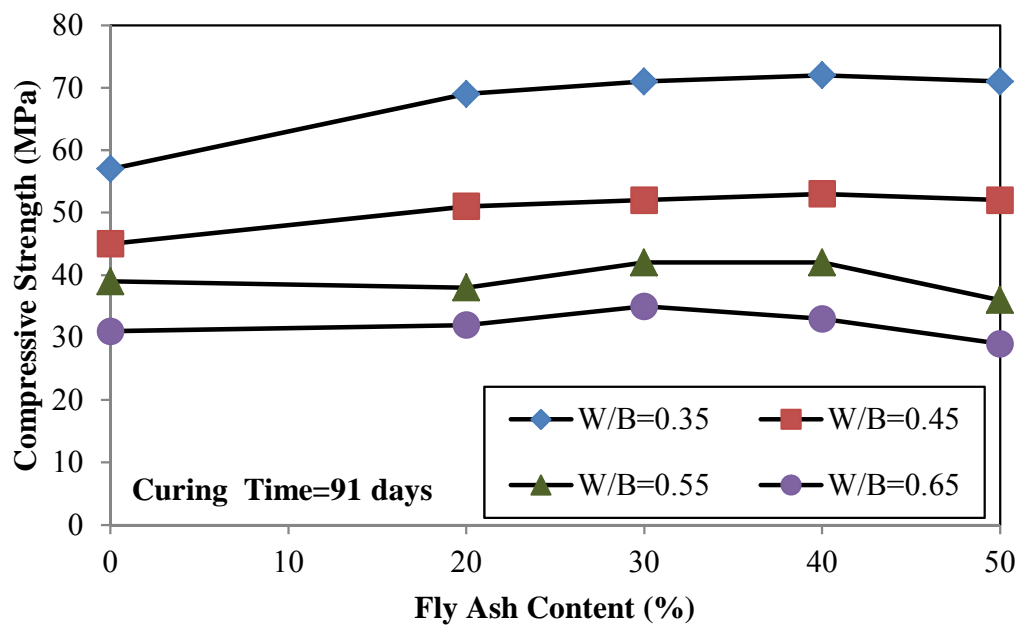


圖 4-2 不同水膠比飛灰混凝土替代量與抗壓強度之關係圖 (養護材齡 91 天)
(資料來源：本研究自行整理)

圖 5-3 與圖 5-4 分別為 28 天與 91 天材齡不同替代量的爐石混凝土與抗壓強度之間的關係。由圖中可以發現無論 28 天或 91 天材齡爐石混凝土除了水膠比 0.65 28 天材齡結果外，其餘水膠比均在替代量 40% 可以達到抗壓強度達到最高點。其中以 91 天材齡爐石混凝土增加幅度較大。如 S454 可較 C450 增加 13.3%、S554 可較 C550 增加 15.4%、以及 S654 可較 C650 增加 16.1% 抗壓強度。而替代量 50% 爐石混凝土配比抗壓強度下降幅度均較飛灰來的低。如 28 天材齡 S355 較 C350 減少 1.9%、S455 較 C450 減少 14.0%、S555 較 C550 減少 5.7%、以及 S655 較 C650 減少 3.7% 抗壓強度，遠較 28 天材齡飛灰混凝土最高減少 48.1% 抗壓強度幅度來的小。

若比較相同水膠比與替代量飛灰與爐石混凝土對抗壓強度的表現，則如圖 4-5 與圖 4-6 所示。在 28 天材齡時，除了 F355 與 S355、以及 F452 與 S452 抗壓強度結果相同外，其餘配比爐石混凝土在水膠比與替代量相同下，抗壓強度均大於飛灰混凝土。但在 91 天材齡時，在水膠比 0.35 與 0.45，會有相反的結果，飛灰混凝土抗壓強度高於爐石混凝土；但在水膠比 0.55 與 0.65，則在替代量 30% 與 40% 上，爐石混凝土抗壓強度表現上會高於飛灰混凝土。

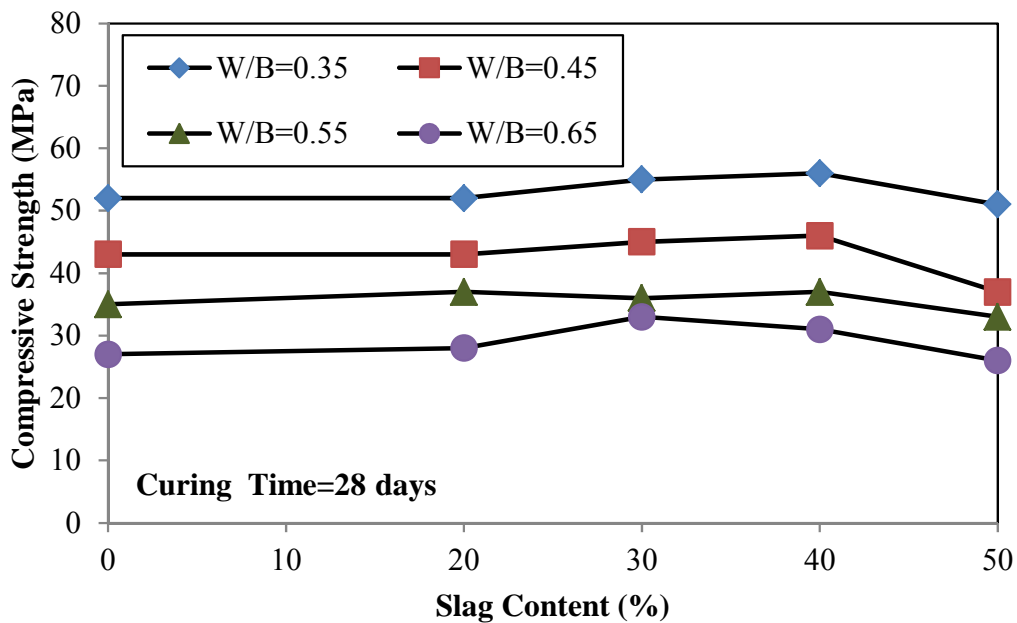


圖 4-3 不同水膠比爐石混凝土替代量與抗壓強度之關係圖（養護材齡 28 天）

(資料來源：本研究自行整理)

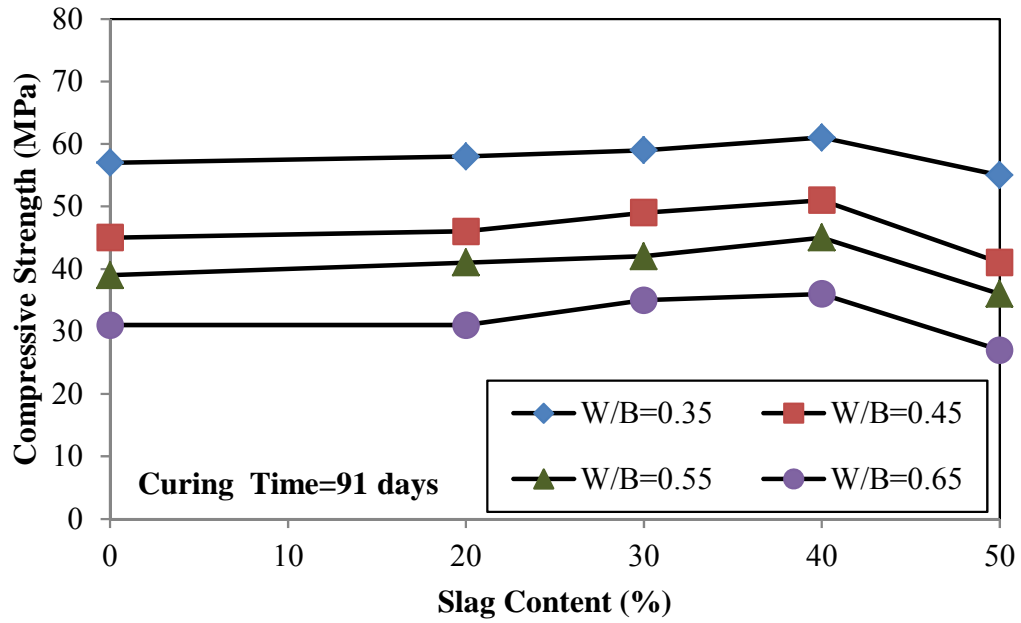


圖 4-4 不同水膠比爐石混凝土替代量與抗壓強度之關係圖 (養護材齡 91 天)
(資料來源：本研究自行整理)

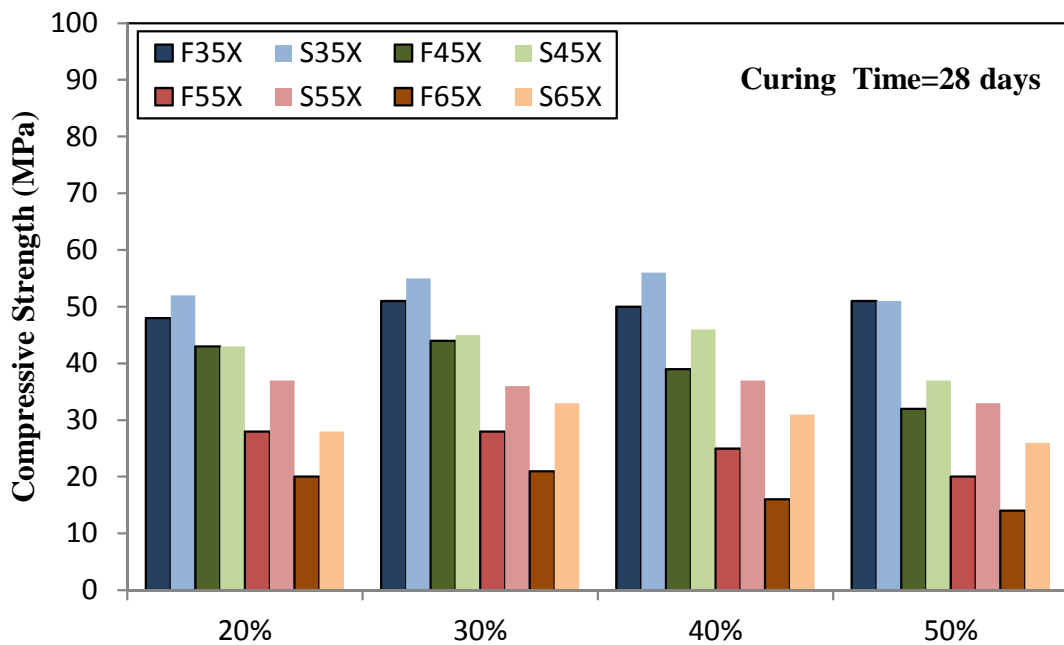


圖 4-5 不同替代量飛灰與爐石混凝土抗壓強度比較圖 (養護材齡 28 天)
(資料來源：本研究自行整理)

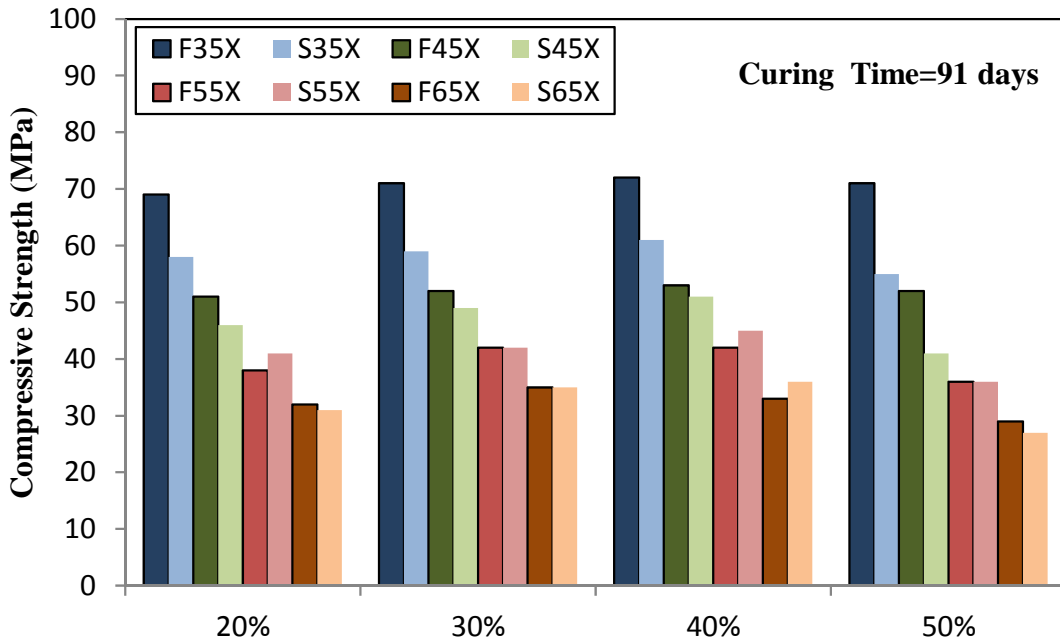


圖 4-6 不同替代量飛灰與爐石混凝土抗壓強度比較圖（養護材齡 91 天）

（資料來源：本研究自行整理）

圖 4-7 至圖 4-10 為飛灰混凝土 28 天材齡與 91 天材齡抗壓強度比較圖。圖中綠色虛線為以 28 天材齡強度為基準，91 天材齡混凝土抗壓強度的成長比率。圖中可以發現未添加飛灰或爐石的控制組混凝土 91 天材齡較 28 天材齡增加 4.7%至 14.8%抗壓強度。而在水膠比 0.35 時各替代量飛灰混凝土 91 天材齡較 28 天材齡增加 39.2%至 44.0%抗壓強度、水膠比 0.45 為 18.2%至 62.5%、水膠比 0.45 為 35.7%至 80.0%、以及水膠比 0.65 為 60.0%至 107.1%抗壓強度。圖 4-11 至圖 4-14 為爐石混凝土 28 天材齡與 91 天材齡抗壓強度比較圖。水膠比 0.35 為 7.8%至 11.5%、水膠比 0.45 為 7.0%至 10.8%、水膠比 0.55 為 9.1%至 21.6%、以及水膠比 0.65 為 3.8%至 16.1%抗壓強度。由兩種混凝土抗壓強度的成長比率可以發現爐石混凝土 91 天抗壓強度均成長在 20%以內。但飛灰混凝土甚至在替代量超過 40%時有超過 100%。表示飛灰的早期強度表現較差。這是未來在使用飛灰混凝土所必須注意的課題。

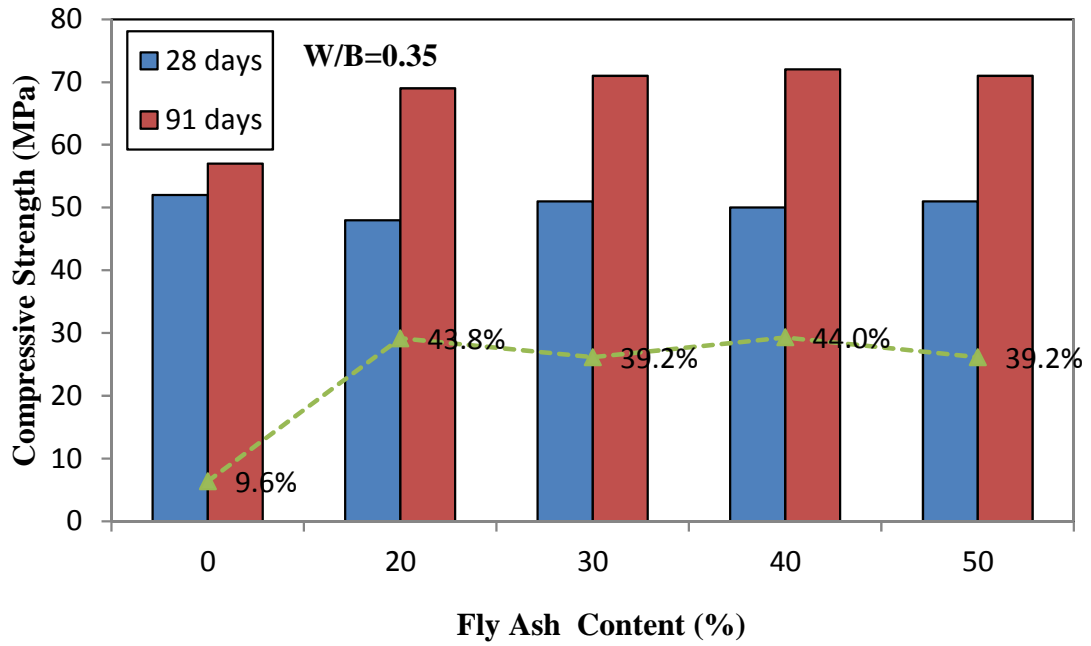


圖 4-7 不同替代量飛灰混凝土材齡與抗壓強度關係圖 (水膠比 0.35)

(資料來源：本研究自行整理)

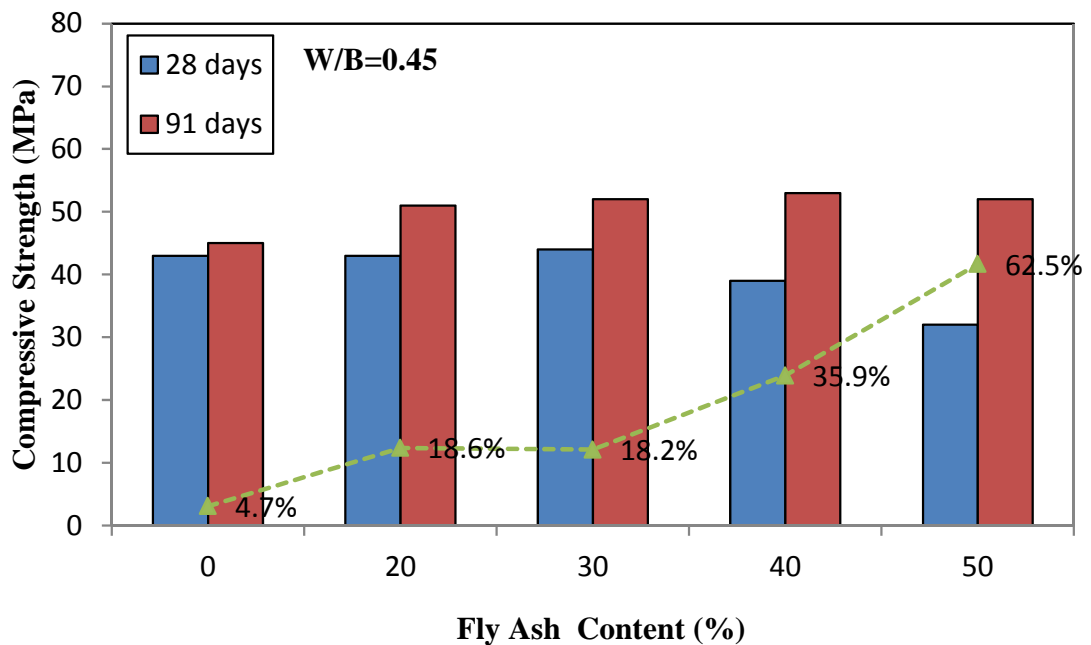


圖 4-8 不同替代量飛灰混凝土材齡與抗壓強度關係圖 (水膠比 0.45)

(資料來源：本研究自行整理)

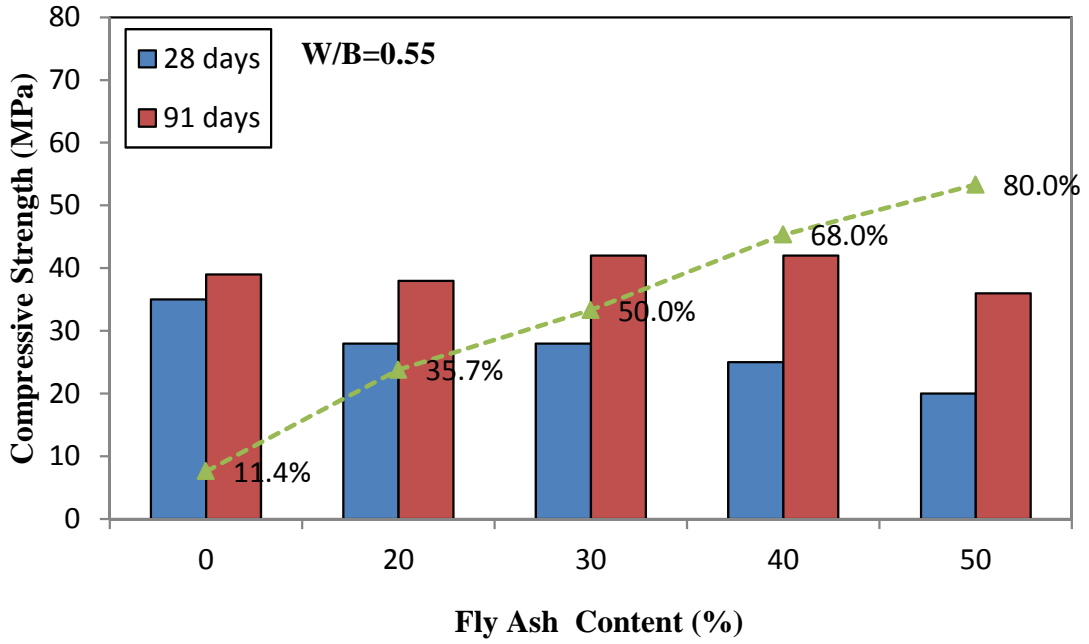


圖 4-9 不同替代量飛灰混凝土材齡與抗壓強度關係圖（水膠比 0.55）
 (資料來源：本研究自行整理)

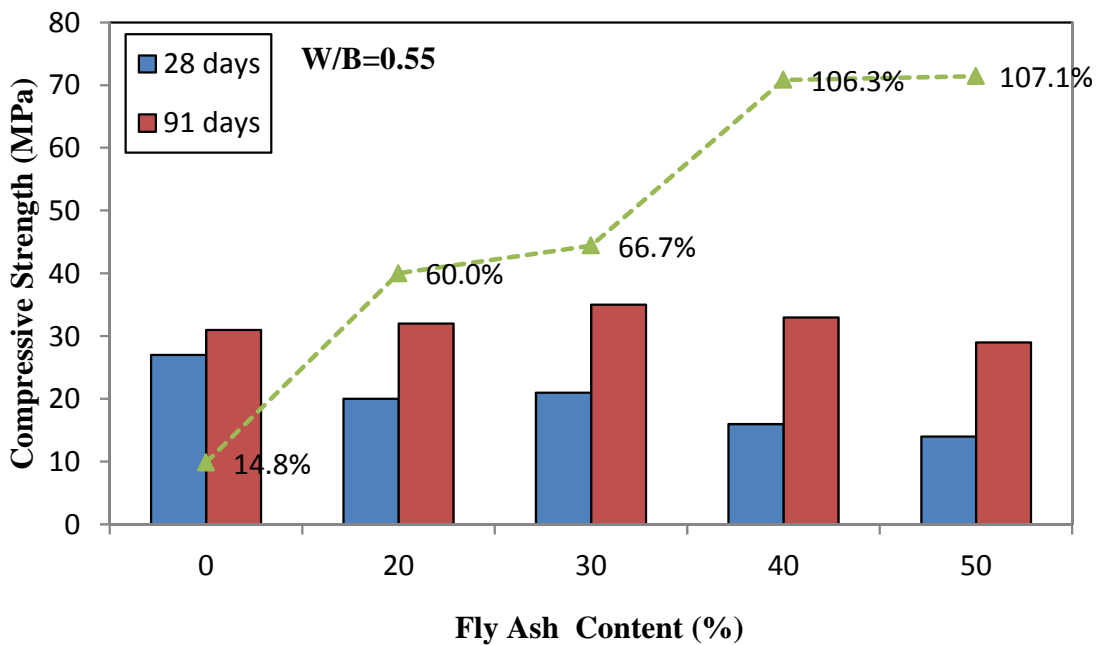


圖 4-10 不同替代量飛灰混凝土材齡與抗壓強度關係圖（水膠比 0.65）
 (資料來源：本研究自行整理)

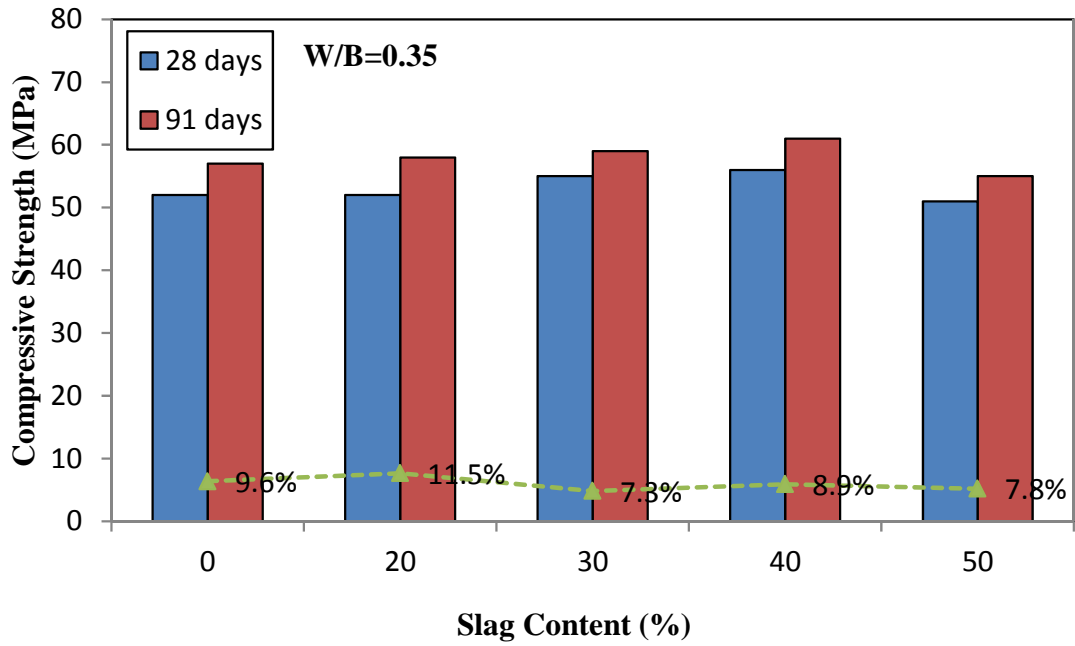


圖 4-11 不同替代量爐石混凝土材齡與抗壓強度關係圖（水膠比 0.35）

(資料來源：本研究自行整理)

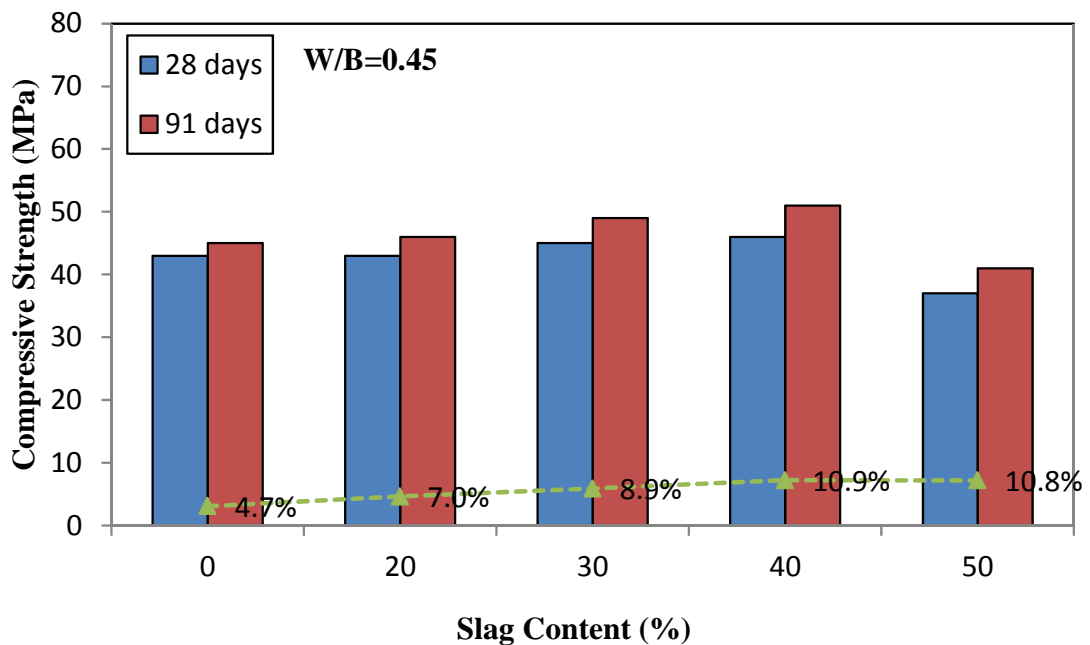


圖 4-12 不同替代量爐石混凝土材齡與抗壓強度關係圖（水膠比 0.45）

(資料來源：本研究自行整理)

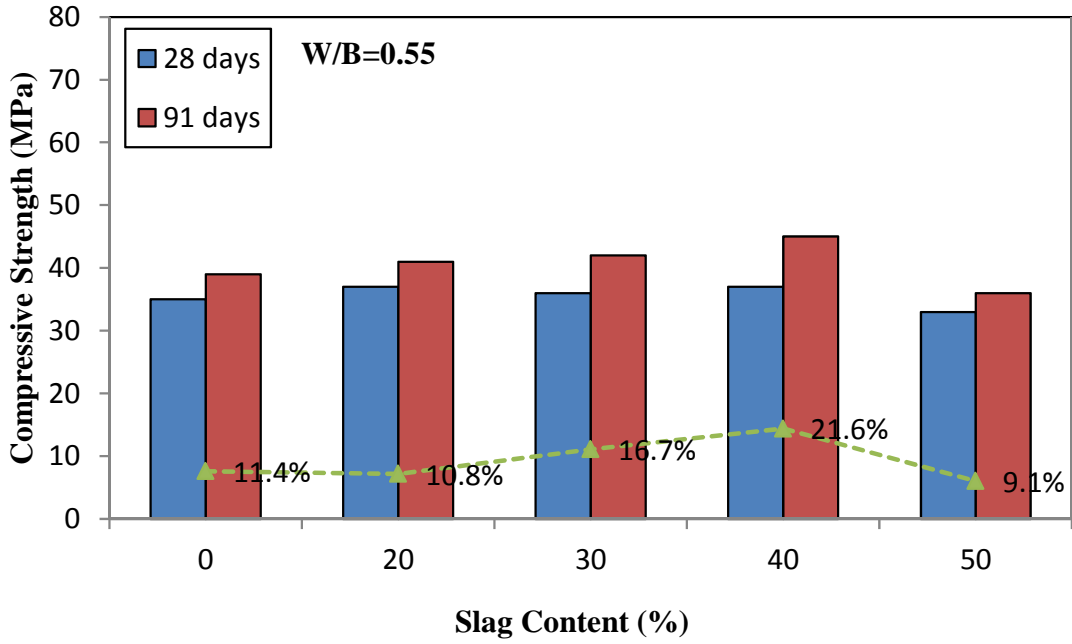


圖 4-13 不同替代量爐石混凝土材齡與抗壓強度關係圖（水膠比 0.55）

(資料來源：本研究自行整理)

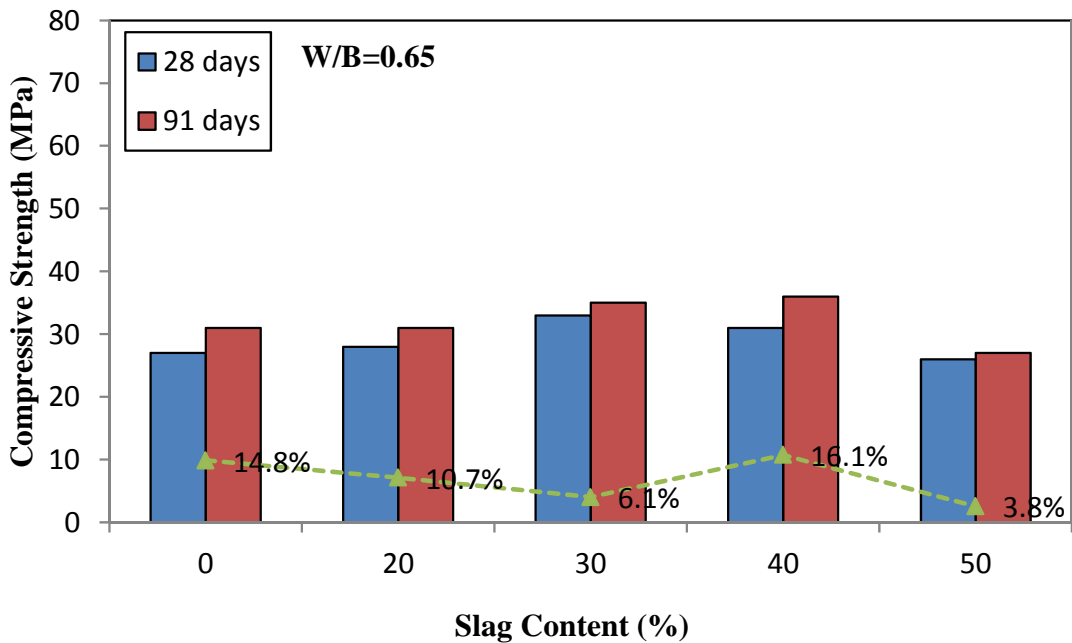


圖 4-14 不同替代量爐石混凝土材齡與抗壓強度關係圖（水膠比 0.65）

(資料來源：本研究自行整理)

第二節 RCPT 電量試驗結果

所有設計混凝土配比於試體到達養護材齡後依 CNS 14795 標準進行試體前處理過程與 RCPT 過程。表 4-5 與表 4-8 分別為飛灰混凝土爐石混凝土 28 天材齡及 91 天材齡 RCPT 總電量試驗結果。所有配比均以 3 個試體進行試驗，表中亦依據 CNS 14795 標準由平均值判斷氯離子穿透特性。若比較控制組配比，電量會隨著水膠比增加而有上升之趨勢，在 28 天材齡時，最低為水膠比 0.35 的 3698 庫倫，最高為水膠比 0.65 的 6937 庫倫。在 91 天材齡時，最低亦為水膠比 0.35 的 3145 庫倫，最高為水膠比 0.65 的 5733 庫倫。雖然控制組 91 天材齡可較 28 天材齡減少約 82%~85%電量值，但依據 CNS 14795 標準判斷僅有水膠比 0.35 屬於中度氯離子穿透特性的混凝土配比，其他水膠比，無論 28 天或 91 天材齡均屬於高度氯離子穿透特性，表示其耐久性較差。

但當加入了飛灰與爐石後，由表 4-5 至表 4-8 可以發現，並未有配比是屬於高度氯離子穿透特性。甚至有許多 91 天材齡的混凝土配比是屬於低於 1000 庫倫極低穿透特性的混凝土配比。

若比較飛灰混凝土替代量與總電荷量之間的關係，則如圖 4-15 與圖 4-16 所示。由圖中可以發現，無論 28 天或 91 天材齡均可以發現 RCPT 總電荷量均會隨著飛灰混凝土替代量增加而有下降之趨勢，其下降幅度極高，如水膠比 0.35 配比在 91 天材齡已經有從控制組 3000 庫倫總電荷量以上降到替代量 50% 飛灰混凝土 200 庫倫以下的情形。但在替代量 50% 的高水膠比如 0.55 與 0.65 的 F555 及 F655 配比，會較替代量 40% 的 F554 與 F654 配比電量結果高。而圖 4-17 與圖 4-18 為爐石混凝土替代量與總電荷量之間的關係圖。圖中所有配比無論 28 天與 91 天材齡 RCPT 總電荷量均隨著爐石替代量增加而有下降之趨勢，到了替代量 50% 爐石混凝土可以從控制組 3000 庫倫總電荷量以上降到 700 庫倫附近。

表 4-5 飛灰混凝土 RCPT 總電荷量試驗結果 (養護材齡 28 天)

配比編號	總電荷量(Coulomb)			平均總電荷量 (Coulomb)	氯離子 穿透性判斷
	試體 1	試體 2	試體 3		
C350	3743	3887	3462	3698	中
C450	5017	5069	4946	5010	高
C550	6359	6409	6263	6343	高
C650	6917	6998	6896	6937	高
F352	1039	1081	1066	1062	低
F452	1548	1559	1587	1564	低
F552	1854	1876	1901	1877	低
F652	2544	2588	2607	2580	中
F353	875	904	881	886	極低
F453	1104	1158	1149	1137	低
F553	1344	1356	1411	1370	低
F653	1838	1911	1873	1874	低
F354	624	645	696	655	極低
F454	821	833	893	849	極低
F554	1058	1062	1100	1074	低
F654	1329	1356	1411	1365	低
F355	526	540	566	544	極低
F455	793	811	851	818	極低
F555	1775	1782	1828	1795	低
F655	2366	2377	2404	2382	中

(資料來源：本研究自行整理)

表 4-6 飛灰混凝土 RCPT 總電荷量試驗結果 (養護材齡 91 天)

配比編號	總電荷量(Coulomb)			平均總電荷量 (Coulomb)	氯離子 穿透性判斷
	試體 1	試體 2	試體 3		
C350	2992	3046	3397	3145	中
C450	3962	4705	3864	4177	高
C550	4399	5169	4214	4594	高
C650	6002	6079	5118	5733	高
F352	322	334	362	339	極低
F452	532	541	566	546	極低
F552	689	693	711	698	極低
F652	907	921	955	928	極低
F353	208	209	211	209	極低
F453	308	321	311	313	極低
F553	404	411	425	413	極低
F653	546	551	553	550	極低
F354	150	149	151	150	極低
F454	221	221	225	222	極低
F554	268	266	274	269	極低
F654	330	342	344	339	極低
F355	139	141	146	142	極低
F455	208	211	216	212	極低
F555	415	417	423	418	極低
F655	647	649	644	646	極低

(資料來源：本研究自行整理)

表 4-7 爐石混凝土 RCPT 總電荷量試驗結果 (養護材齡 28 天)

配比編號	總電荷量(Coulomb)			平均總電荷量 (Coulomb)	氯離子 穿透性判斷
	試體 1	試體 2	試體 3		
C350	3743	3887	3462	3698	中
C450	5017	5069	4946	5010	高
C550	6359	6409	6263	6343	高
C650	6917	6998	6896	6937	高
S352	2198	2295	1990	2161	中
S452	2931	2939	2787	2886	中
S552	3002	2937	2924	2954	中
S652	3582	3773	3532	3629	中
S353	1614	1632	1513	1587	低
S453	1833	1851	1797	1827	低
S553	2186	2248	2037	2157	中
S653	2184	2397	2106	2229	中
S354	1376	1441	1362	1393	低
S454	1468	1487	1401	1452	低
S554	1630	1645	1529	1601	低
S654	1656	1699	1615	1656	低
S355	1054	1125	1003	1061	低
S455	1121	1175	1088	1128	低
S555	1175	1183	1088	1149	低
S655	1224	1293	1221	1246	低

(資料來源：本研究自行整理)

表 4-8 爐石混凝土 RCPT 總電荷量試驗結果 (養護材齡 91 天)

配比編號	總電荷量(Coulomb)			平均總電荷量 (Coulomb)	氯離子 穿透性判斷
	試體 1	試體 2	試體 3		
C350	2992	3046	3397	3145	中
C450	3962	4705	3864	4177	高
C550	4399	5169	4214	4594	高
C650	6002	6079	5118	5733	高
S352	1629	1702	1600	1644	低
S452	2078	2160	2038	2092	中
S552	2130	2300	1952	2127	中
S652	2481	2605	2450	2512	中
S353	1137	1145	1114	1132	低
S453	1176	1400	1174	1250	低
S553	1401	1422	1214	1346	低
S653	1354	1394	1303	1350	低
S354	936	944	848	909	極低
S454	854	882	837	858	極低
S554	1000	1017	966	1004	低
S654	1130	1191	1007	1110	低
S355	616	704	701	674	極低
S455	649	660	827	712	極低
S555	751	758	659	722	極低
S655	763	785	708	752	極低

(資料來源：本研究自行整理)

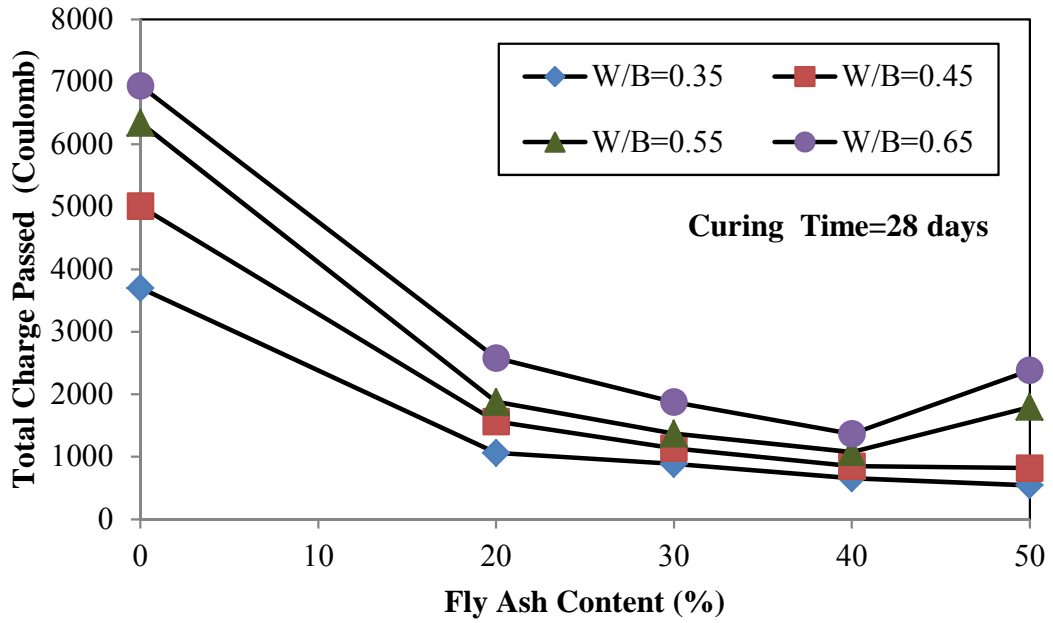


圖 4-15 飛灰混凝土替代量與總電荷量關係圖 (材齡 28 天)

(資料來源：本研究自行整理)

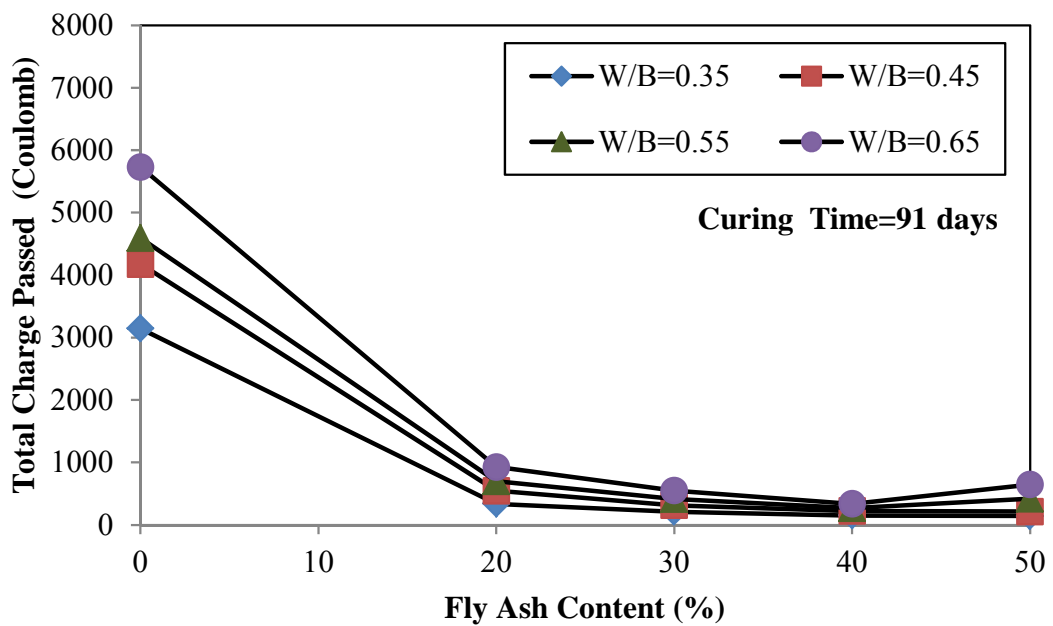


圖 4-16 飛灰混凝土替代量與總電荷量關係圖 (材齡 91 天)

(資料來源：本研究自行整理)

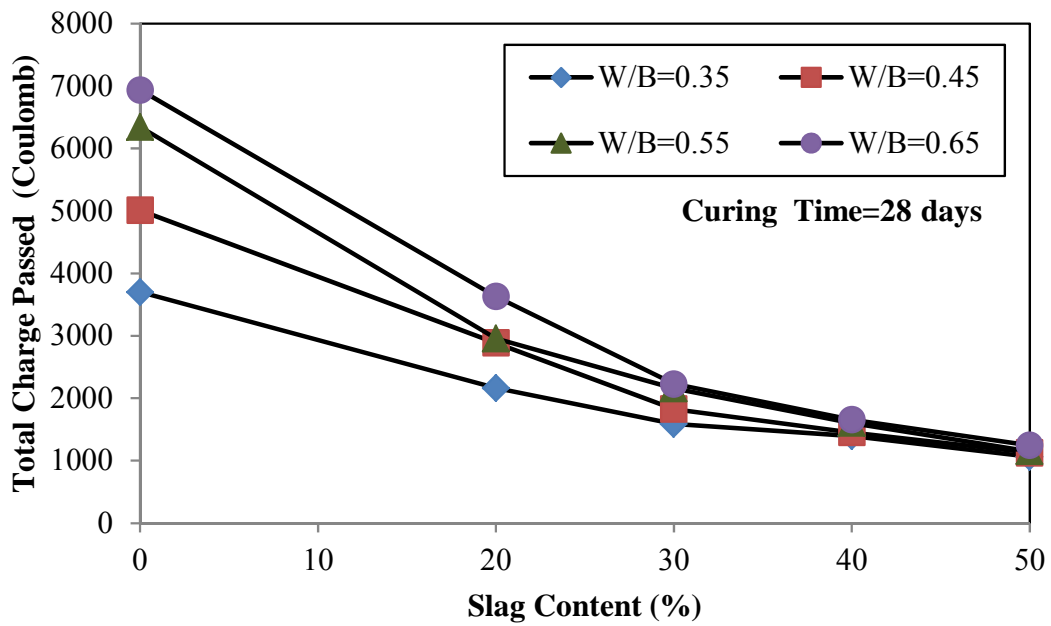


圖 4-17 爐石混凝土替代量與總電荷量關係圖 (材齡 28 天)

(資料來源：本研究自行整理)

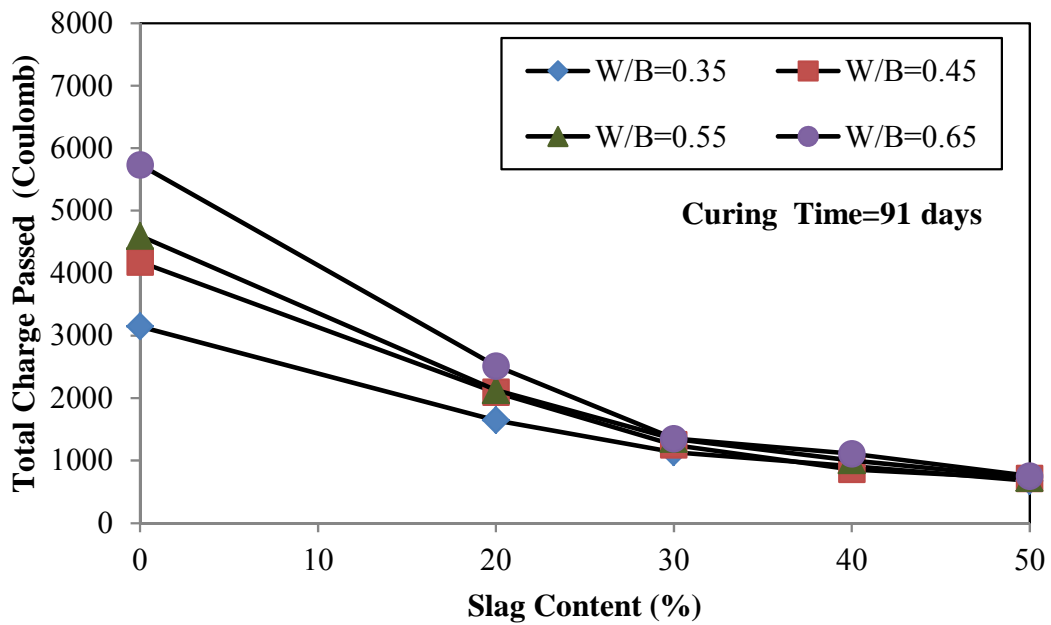


圖 4-18 爐石混凝土替代量與總電荷量關係圖 (材齡 91 天)

(資料來源：本研究自行整理)

比較相同材齡與替代量時飛灰混凝土及爐石混凝土的總電荷量，則如圖 4-19 與圖 4-20 所示。除了圖 4-19 飛灰替代量 50% 的 F655 混凝土配比 28 天 RCPT 總電荷量大於同變數條件的 S655 爐石混凝土配比外，其餘 15 組飛灰混凝土配比電量均小於同變數條件的爐石混凝土配比，由此顯現飛灰可也效降低 RCPT 總電荷量。若比較第一節抗壓強度結果，F655 配比 28 天材齡抗壓強度僅為 S655 配比 0.54 倍，因此可能係抗壓強度影響其總電荷量所致。

比較飛灰混凝土 28 天與 91 天材齡 RCPT 總電荷量變化的關係，如圖 4-21 至圖 4-24 所示。圖 4-25 與圖 4-28 為爐石混凝土比較圖。圖中虛線所連接各點為以 28 天材齡 RCPT 總電荷量為基準，91 天材齡 RCPT 總電荷量的變化幅度值。由圖中可以發現所有配比 91 天材齡 RCPT 總電荷量均會低於 28 天材齡。且降低幅度變化並不大，並不會因為替代量增加而有降低幅度顯著增加的情形，如飛灰混凝土 91 天材齡會較 28 天降低 62.8%~76.4% 總電荷量。爐石混凝土 91 天材齡會較 28 天降低 23.9%~40.9% 總電荷量。控制組混凝土 91 天材齡會較 28 天降低 15.0%~27.6% 總電荷量。當比較 3 種混凝土，飛灰混凝土受到材齡的影響最大。

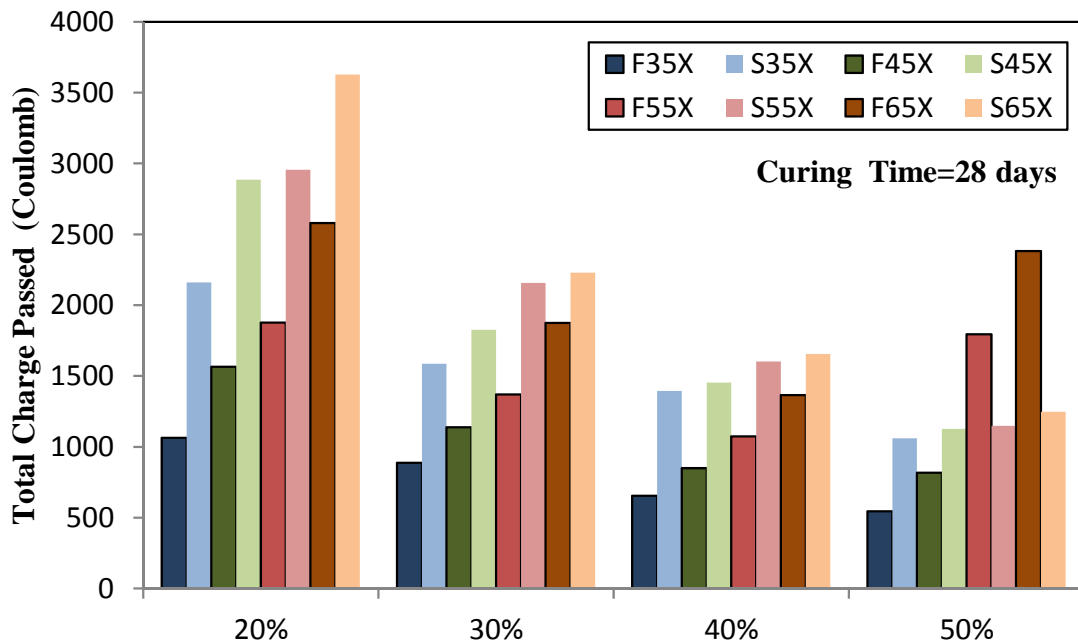


圖 4-19 不同替代量飛灰與爐石混凝土 RCPT 總電荷量比較圖(養護材齡 28 天)

(資料來源：本研究自行整理)

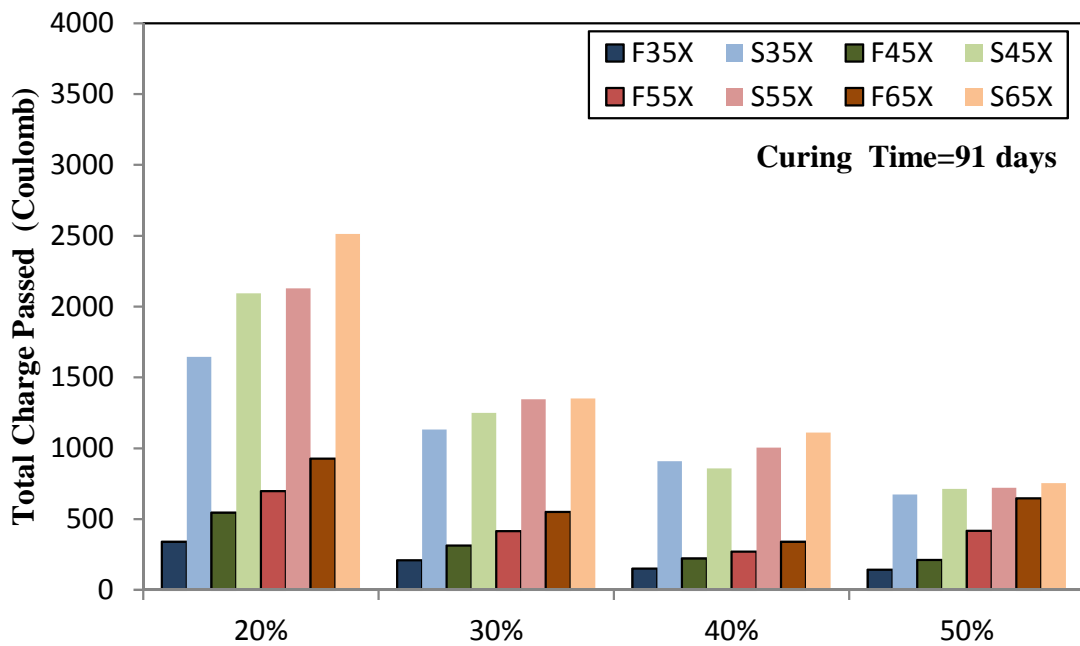


圖 4-20 不同替代量飛灰與爐石混凝土 RCPT 總電荷量比較圖(養護材齡 91 天)
(資料來源：本研究自行整理)

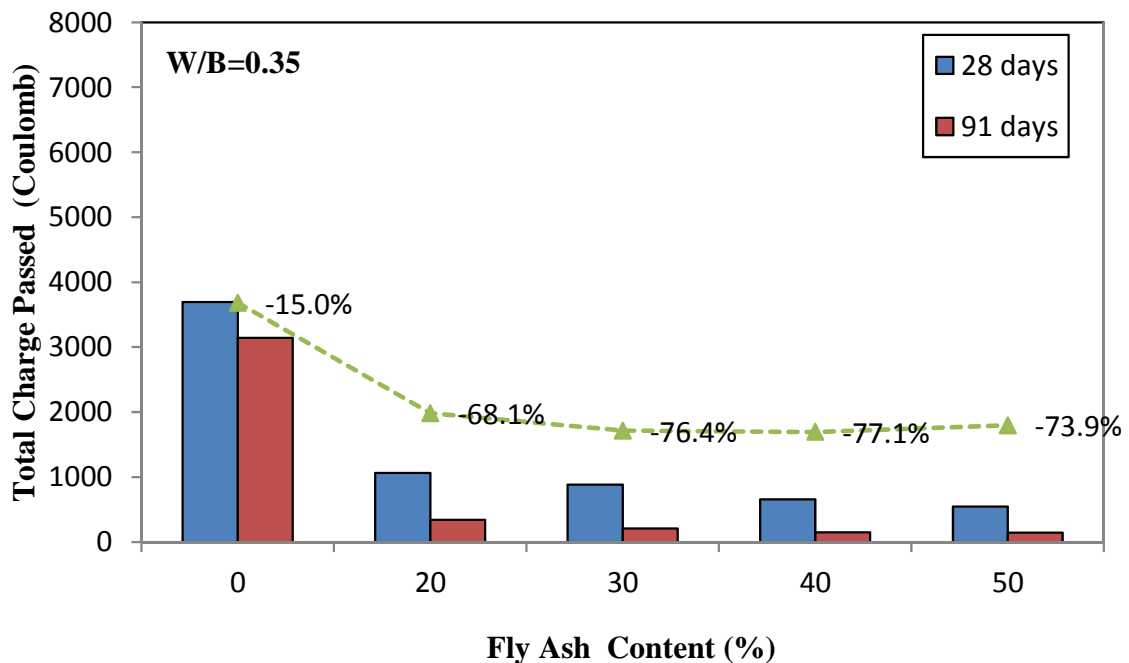


圖 4-21 不同替代量飛灰混凝土材齡與 RCPT 總電荷量關係圖 (水膠比 0.35)
(資料來源：本研究自行整理)

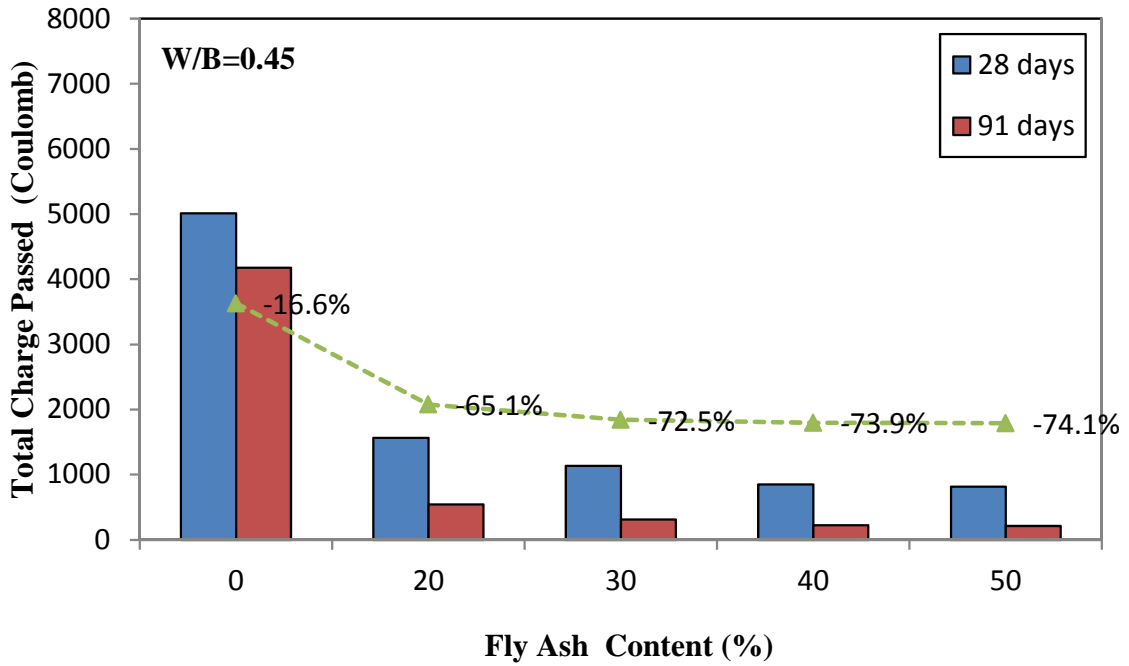


圖 4-22 不同替代量飛灰混凝土材齡與 RCPT 總電荷量關係圖 (水膠比 0.45)
(資料來源：本研究自行整理)

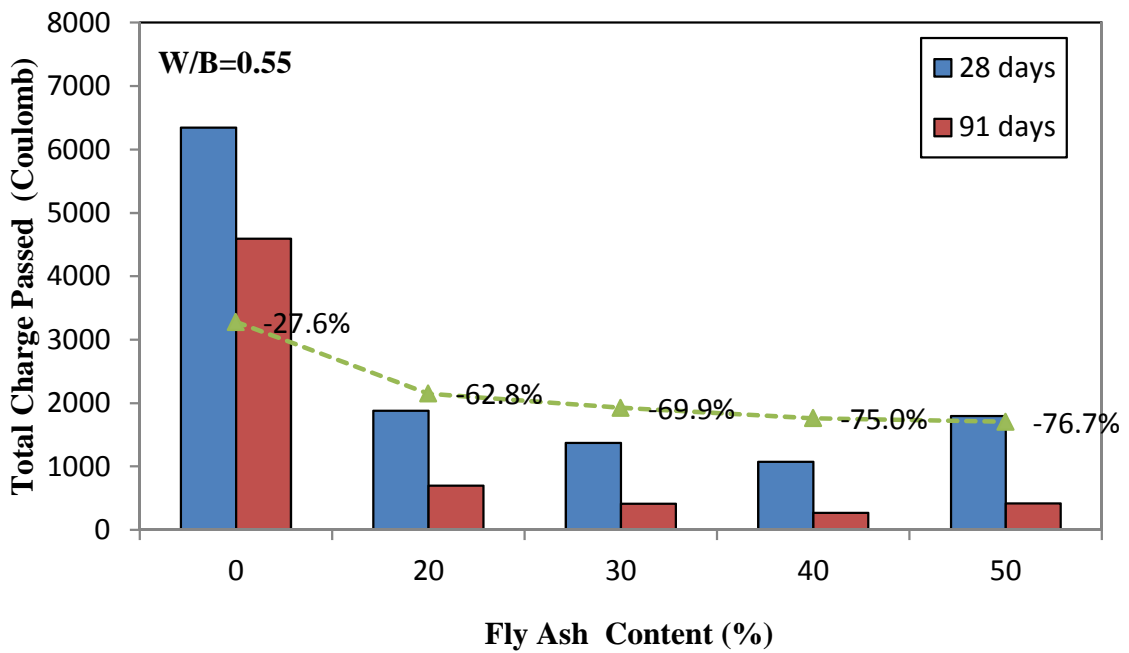


圖 4-23 不同替代量飛灰混凝土材齡與 RCPT 總電荷量關係圖 (水膠比 0.55)
(資料來源：本研究自行整理)

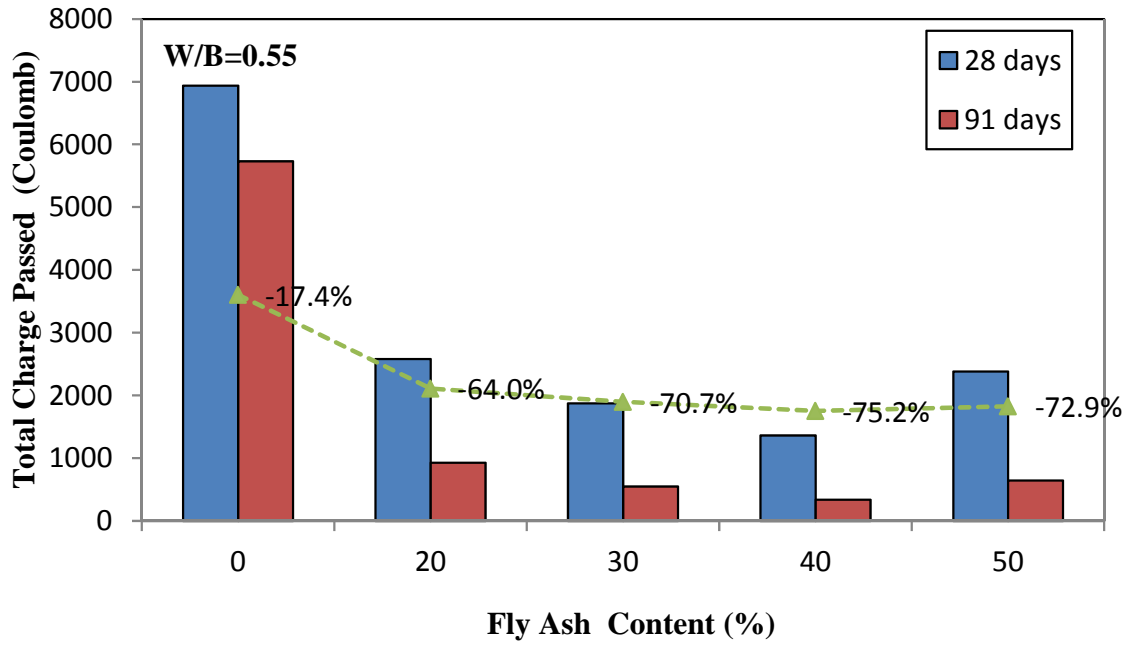


圖 4-24 不同替代量飛灰混凝土材齡與 RCPT 總電荷量關係圖 (水膠比 0.65)
(資料來源：本研究自行整理)

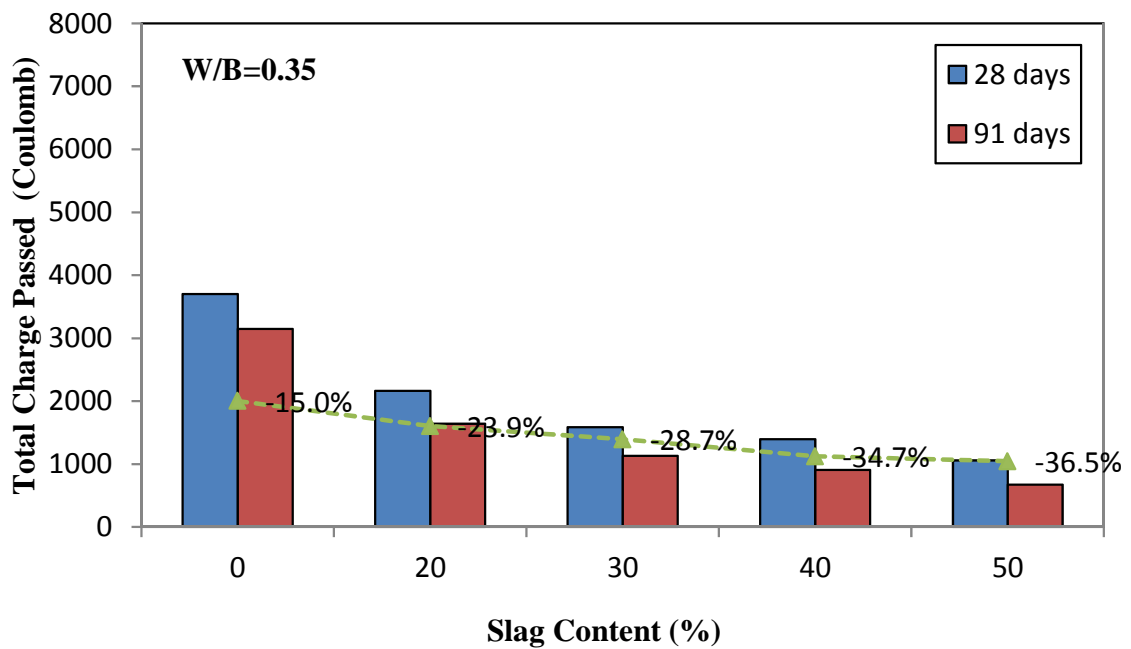


圖 4-25 不同替代量飛灰混凝土材齡與 RCPT 總電荷量關係圖 (水膠比 0.35)
(資料來源：本研究自行整理)

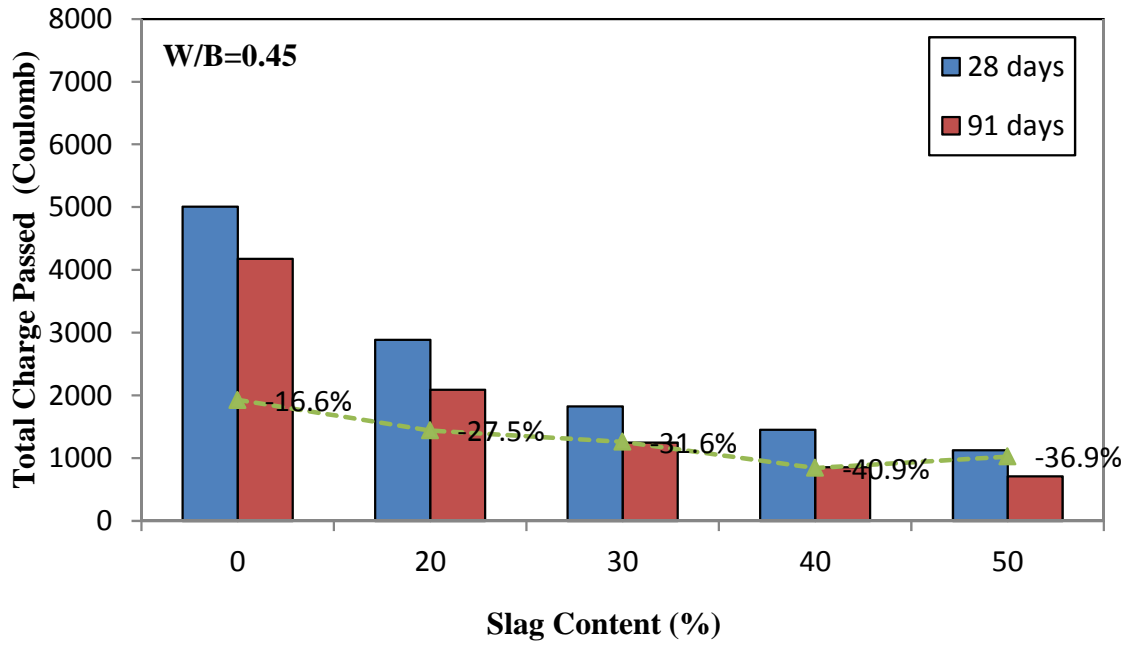


圖 4-26 不同替代量飛灰混凝土材齡與 RCPT 總電荷量關係圖 (水膠比 0.45)
(資料來源：本研究自行整理)

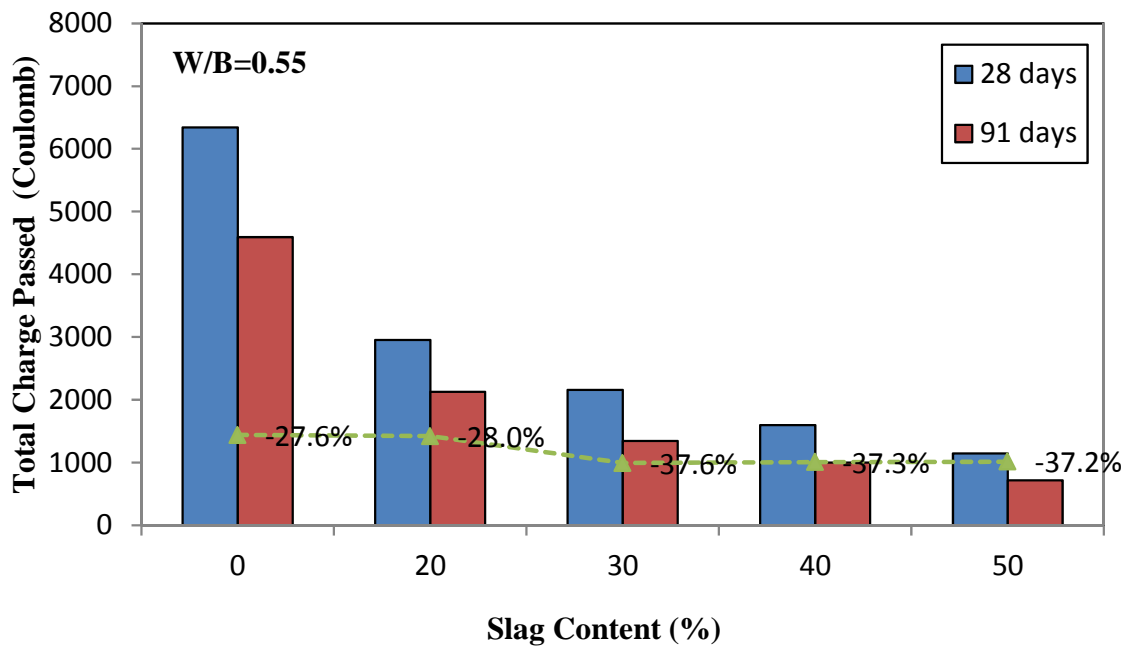


圖 4-27 不同替代量飛灰混凝土材齡與 RCPT 總電荷量關係圖 (水膠比 0.55)
(資料來源：本研究自行整理)

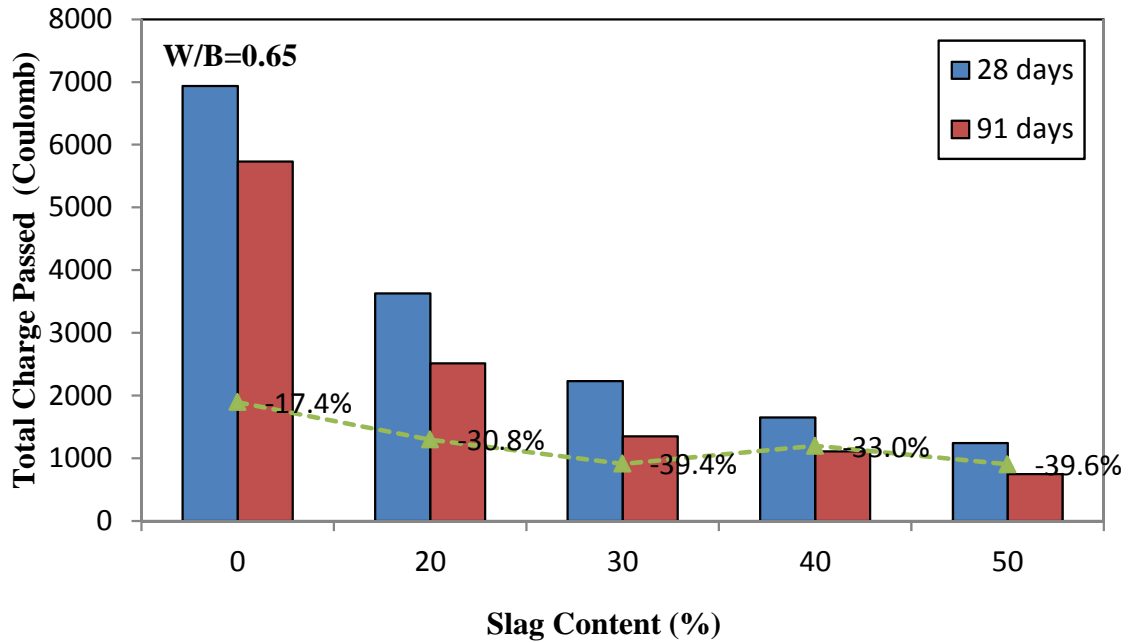


圖 4-28 不同替代量飛灰混凝土材齡與 RCPT 總電荷量關係圖 (水膠比 0.65)
(資料來源：本研究自行整理)

第三節 RCPT 試驗後內部氯離子含量試驗結果

由於 RCPT 判斷氯離子穿透特性係以總通過電荷量進行分類。而總通過電荷量即 RCPT 系統陰極槽溶液試驗期間經 DC60V 電壓趨動力通過混凝土孔隙鹽橋電荷所帶的電流量，所以藉由此反應混凝土耐久性重要因子孔隙率。然而因為陰極槽溶液並不只由單一離子所組成，所以部分學者對試驗結果產生疑慮。有鑑於此，本研究直接於 RCPT 試驗後量測試體內部氯離子濃度變化情形。試驗方式係於 RCPT 試驗結束後，將試體取出並放置於室溫下一天，放置原因是為了使試體表層與內部的水分揮發，以避免磨粉時粉末與水分同時濺出之情況發生，再依照第三章第五節之取樣方法取得逐層粉末，取樣時係將貼近陰極槽端視為表面，貼近陽極槽端為底部，由表面往內部取得逐層粉末，最後利用 CNS 14702 酸溶法萃取氯離子濃度，並且測量各深度與總氯離子含量。

圖 4-29 至圖 4-33 分別為飛灰混凝土 28 天材齡 RCPT 後量測之深度與氯離子濃度之關係圖，圖 4-34 至圖 4-37 為爐石混凝土 28 天材齡 RCPT 後量測之深度與氯離子濃度之關係圖。而圖上各線段係依 FICK 第二擴散定律進行迴歸曲線，以供後續分析使用。圖 4-29 為控制組試驗結果，由圖中可以發現水膠比 0.55 的 C550 與水膠比 0.65 的 C650 配比，六小時 RCPT 過程結束後，於試體 5cm 處仍有跟表面氯離子濃度相當的濃度，表示氯離子已經穿透試體進入陽極槽內。圖 4-30 為替代量 20% 之飛灰混凝土配比，由圖中可以發現所有水膠比變數的配比 RCPT 後量測之氯離子濃度於 4.5 cm 均已接近背景值，表示氯離子於試驗過程中並未穿透試體進入陽極槽內。圖 4-34 為替代量 20% 之爐石混凝土配比，也有相同情形。其他爐石會飛灰混凝土配比替代量 30%、40%、與 50% 的關係圖亦為相同狀況。

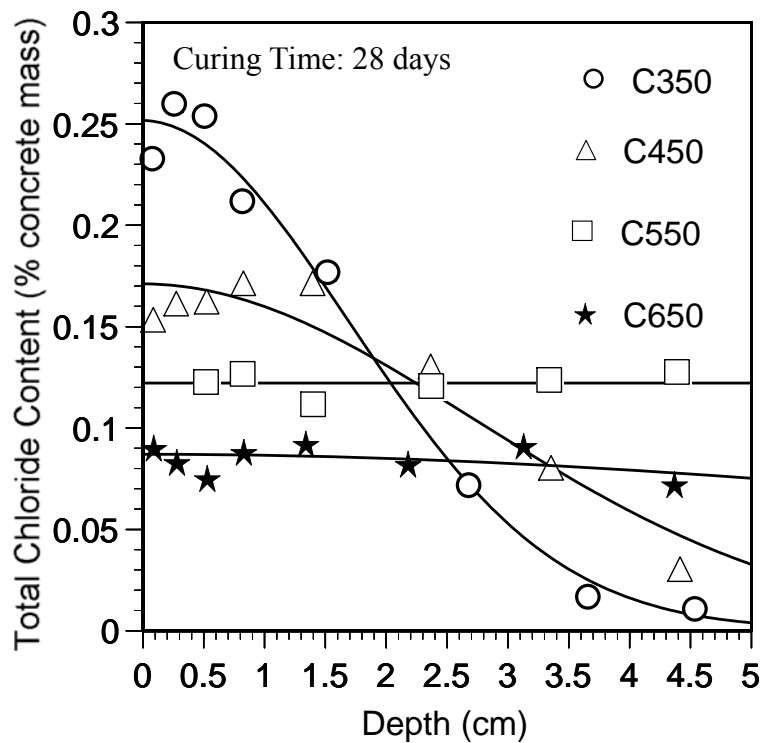


圖 4-29 控制組混凝土試體氯離子深度與含量關係圖 (28 天材齡)

(資料來源：本研究自行整理)

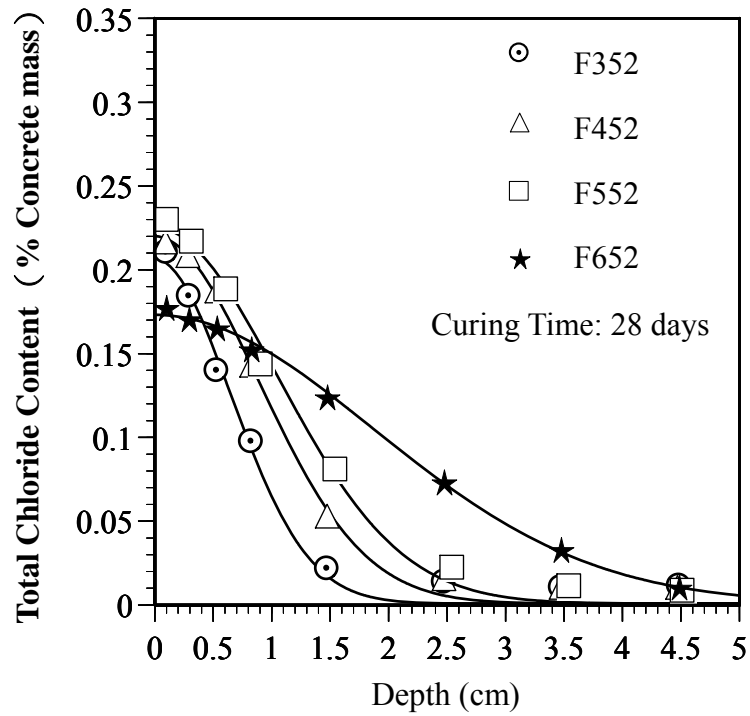


圖 4-30 替代量 20% 飛灰混凝土試體氯離子深度與含量關係圖 (28 天材齡)
(資料來源：本研究自行整理)

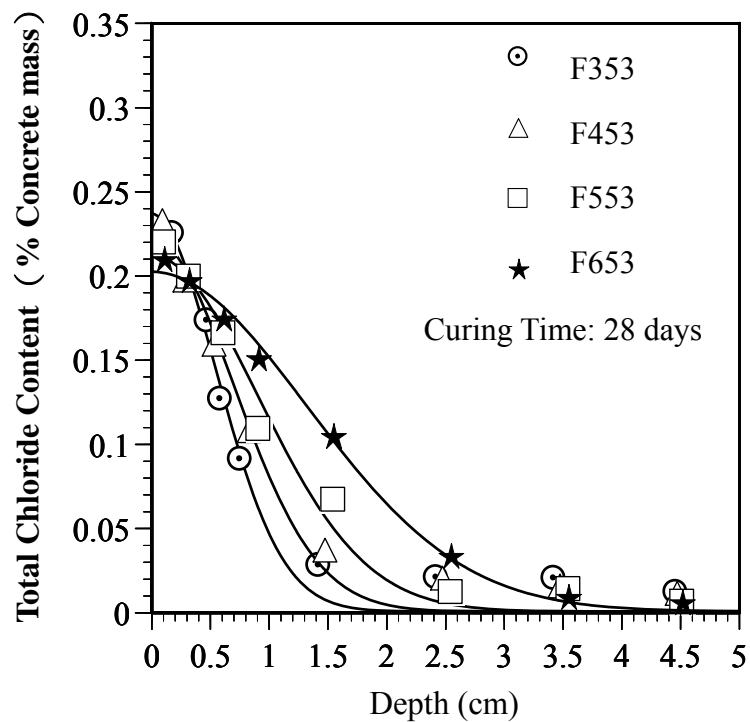


圖 4-31 替代量 30% 飛灰混凝土試體氯離子深度與含量關係圖 (28 天材齡)
(資料來源：本研究自行整理)

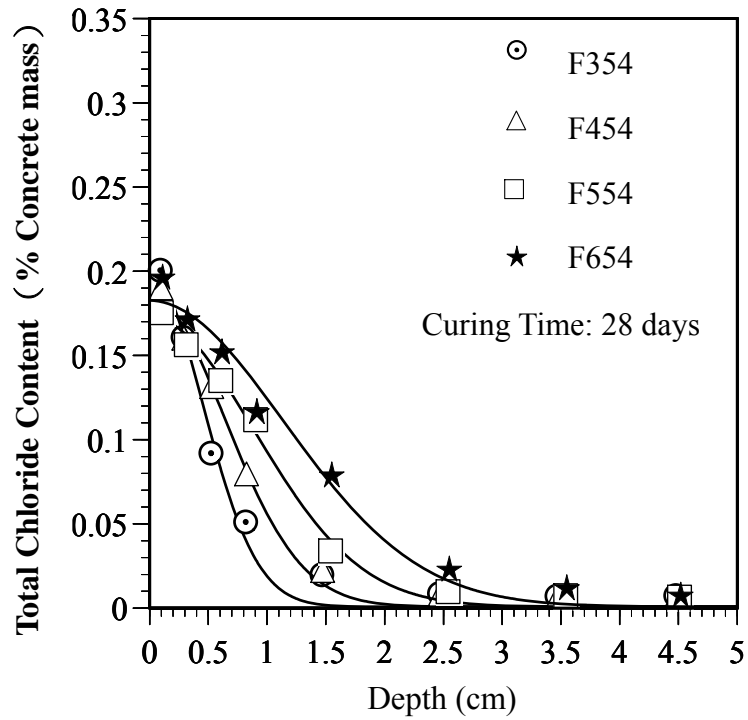


圖 4-32 替代量 40% 飛灰混凝土試體氯離子深度與含量關係圖 (28 天材齡)
(資料來源：本研究自行整理)

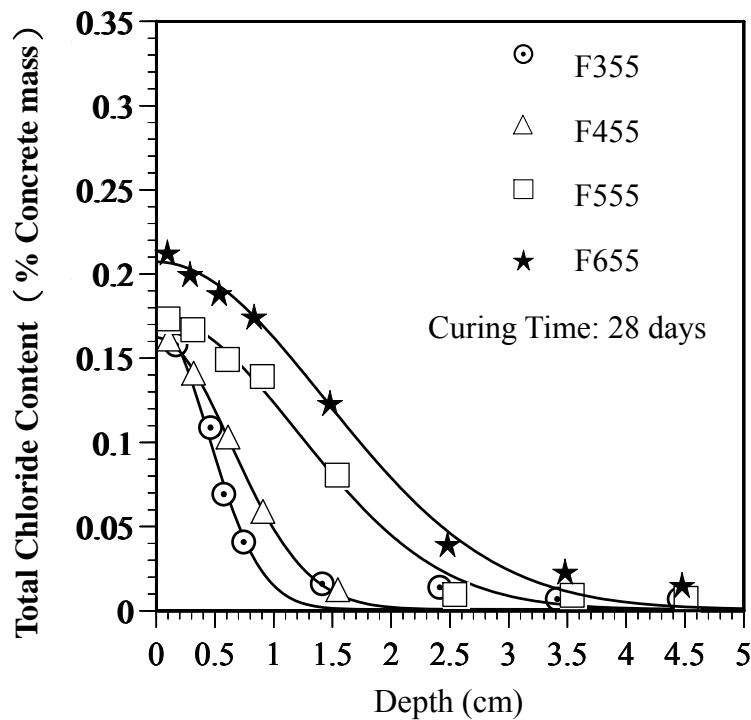


圖 4-33 替代量 50% 飛灰混凝土試體氯離子深度與含量關係圖 (28 天材齡)
(資料來源：本研究自行整理)

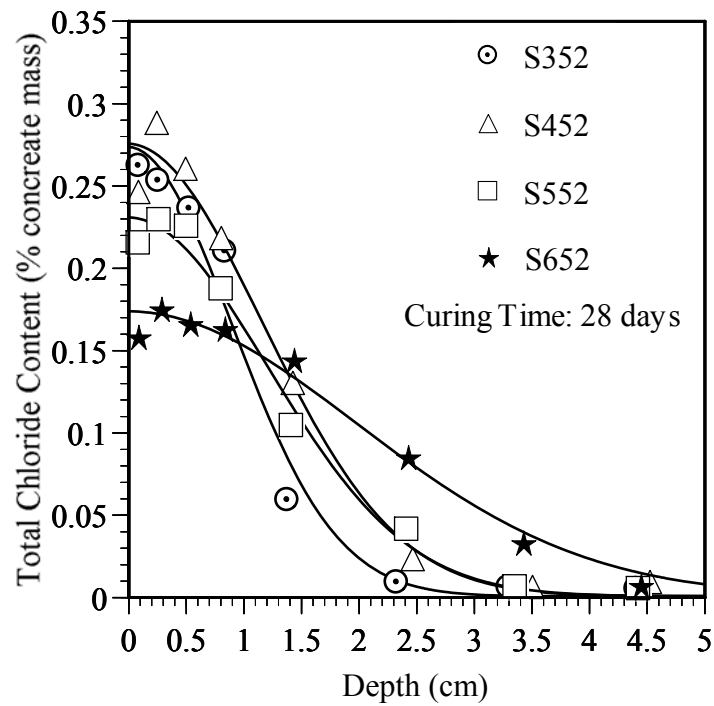


圖 4-34 替代量 20% 爐石混凝土試體氯離子深度與含量關係圖 (28 天材齡)

(資料來源：本研究自行整理)

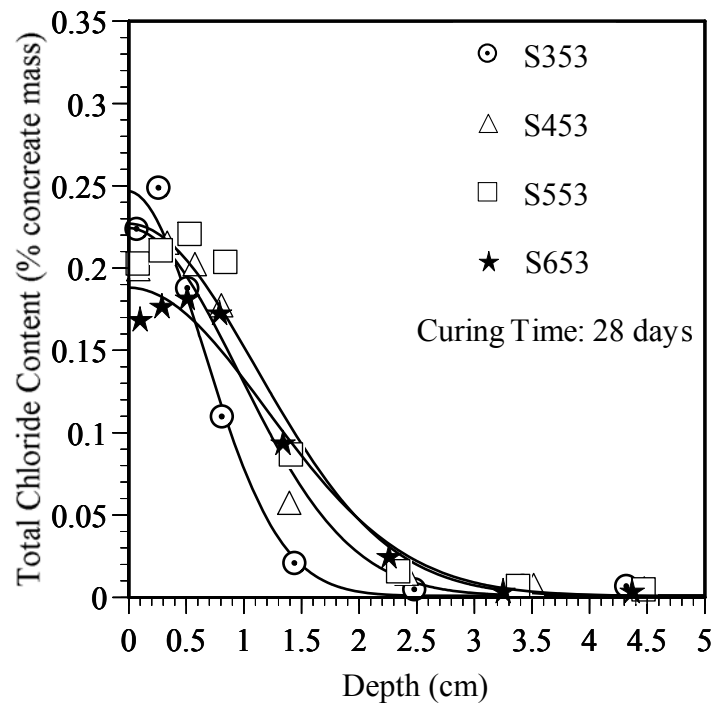


圖 4-35 替代量 30% 爐石混凝土試體氯離子深度與含量關係圖 (28 天材齡)

(資料來源：本研究自行整理)

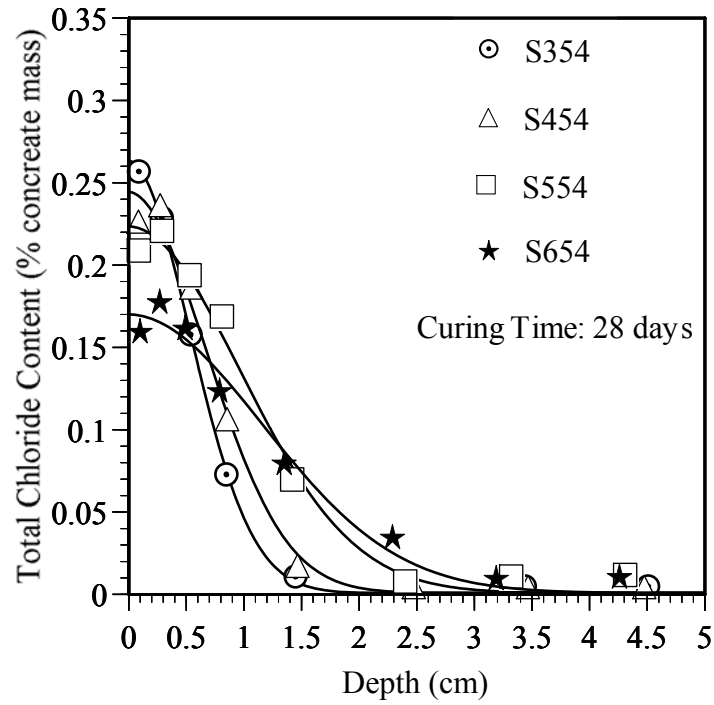


圖 4-36 替代量 40% 爐石混凝土試體氯離子深度與含量關係圖 (28 天材齡)
(資料來源：本研究自行整理)

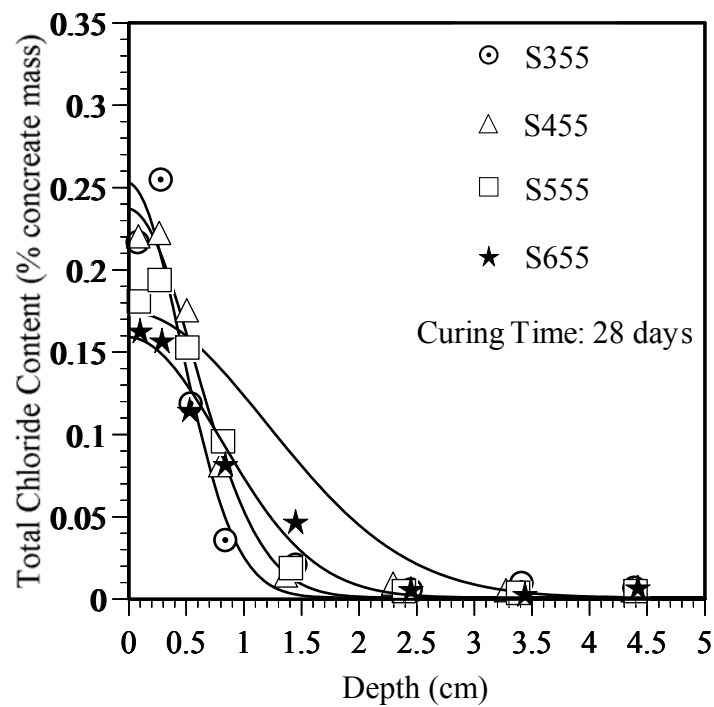


圖 4-37 替代量 50% 爐石混凝土試體氯離子深度與含量關係圖 (28 天材齡)
(資料來源：本研究自行整理)

圖 4-38 至圖 4-42 為 91 天材齡飛灰混凝土 RCPT 後量測之深度與氯離子濃度之關係圖。圖 4-43 至圖 4-46 為 91 天材齡爐石混凝土 RCPT 後量測之深度與氯離子濃度之關係圖。圖 4-38 為控制組試驗結果，由圖中可以發現水膠比 0.65 的 C650 配比，六小時 RCPT 過程結束後，於試體 5cm 處仍有跟表面氯離子濃度相當的濃度，表示氯離子已經穿透試體進入陽極槽內，此與 28 天試驗結果相同。而水膠比 0.55 的 C550 配比則在 91 天材齡試體試驗結果與 C350 和 C450 配比相同，RCPT 後量測之氯離子濃度於 4.5 cm 均已接近背景值，表示氯離子於試驗過程中並未穿透試體進入陽極槽內。替代量 20%、30%、40%、與 50% 的爐石與飛灰混凝土關係圖亦為相同狀況，但 91 天材齡大致在 2.5 cm 時就已接近背景值，表示飛灰與爐石混凝土在 28 天材齡後，混凝土內部的孔隙結構也會因為波索蘭效應的關係而有所改善與變緻密。

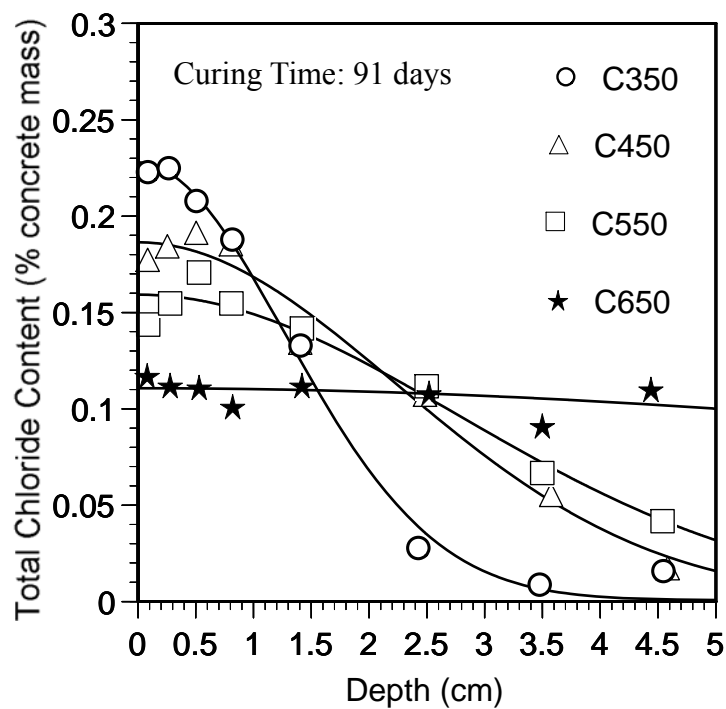


圖 4-38 控制組混凝土試體氯離子深度與含量關係圖 (91 天材齡)

(資料來源：本研究自行整理)

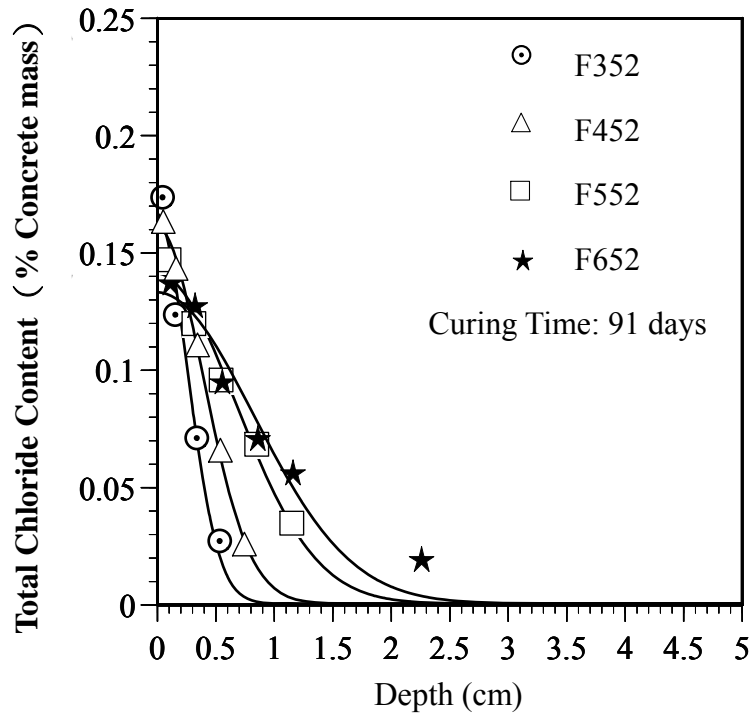


圖 4-39 替代量 20% 飛灰混凝土試體氯離子深度與含量關係圖 (91 天材齡)
(資料來源：本研究自行整理)

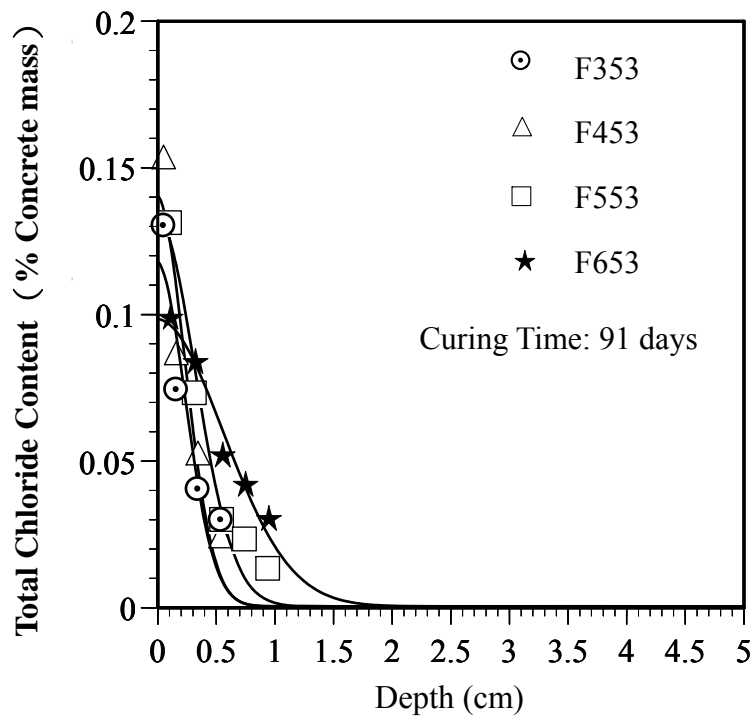


圖 4-40 替代量 30% 飛灰混凝土試體氯離子深度與含量關係圖 (91 天材齡)
(資料來源：本研究自行整理)

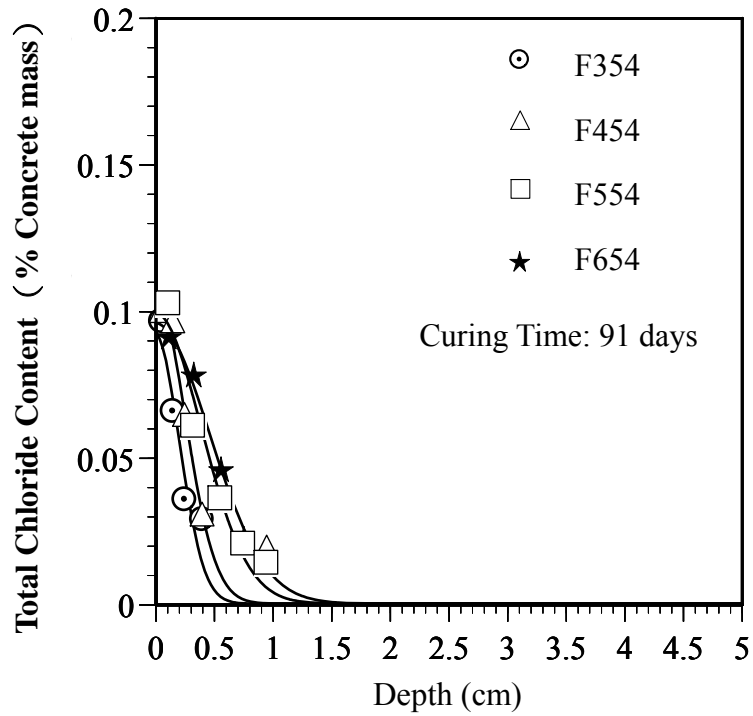


圖 4-41 替代量 40%飛灰混凝土試體氯離子深度與含量關係圖 (91 天材齡)

(資料來源：本研究自行整理)

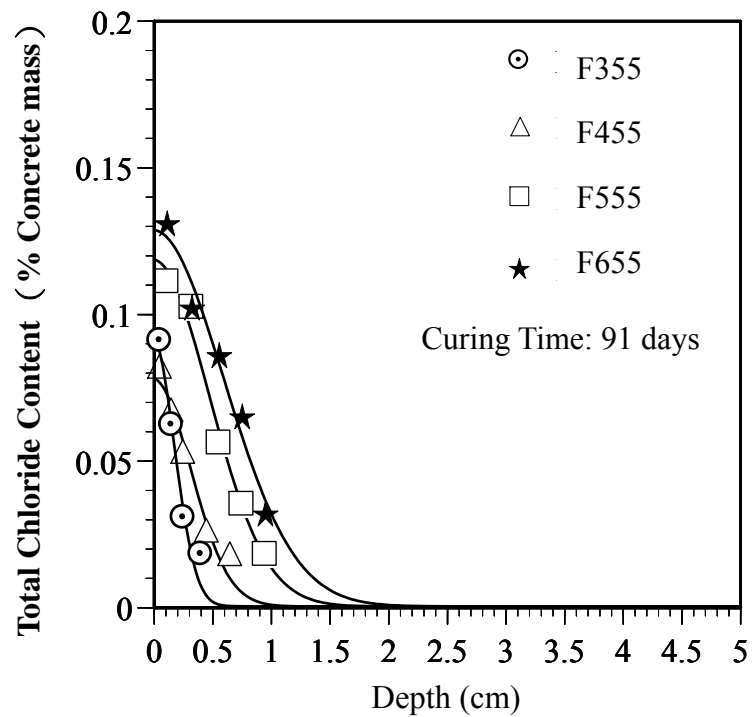


圖 4-42 替代量 50%飛灰混凝土試體氯離子深度與含量關係圖 (91 天材齡)

(資料來源：本研究自行整理)

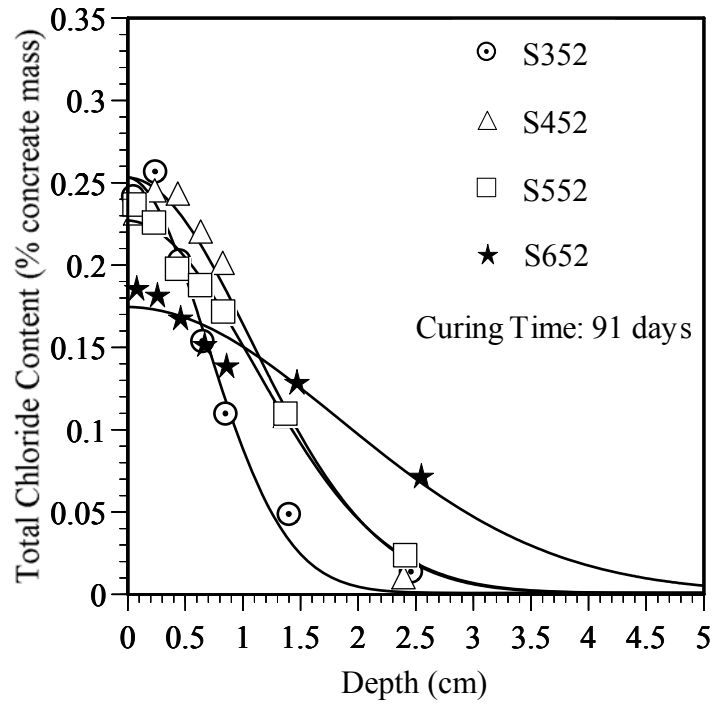


圖 4-43 替代量 20% 爐石混凝土試體氯離子深度與含量關係圖 (91 天材齡)
 (資料來源：本研究自行整理)

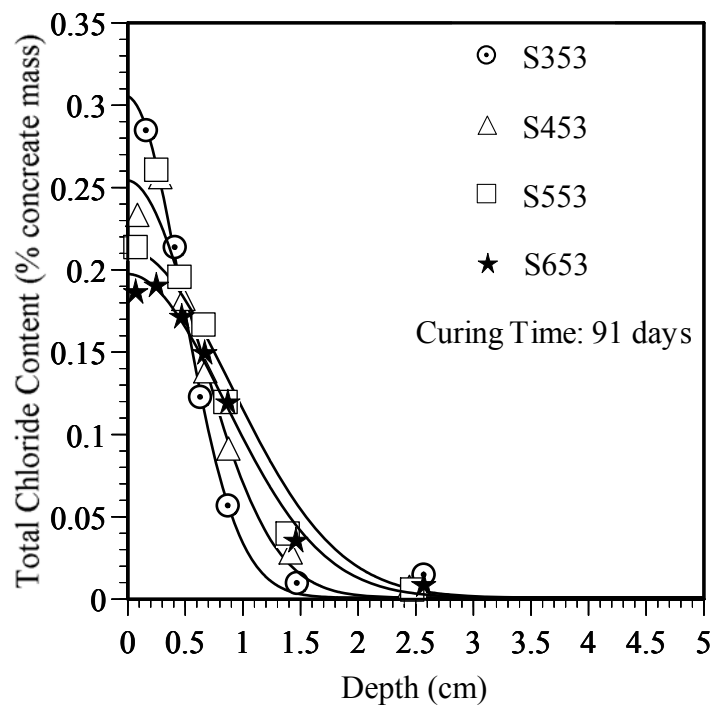


圖 4-44 替代量 30% 爐石混凝土試體氯離子深度與含量關係圖 (91 天材齡)
 (資料來源：本研究自行整理)

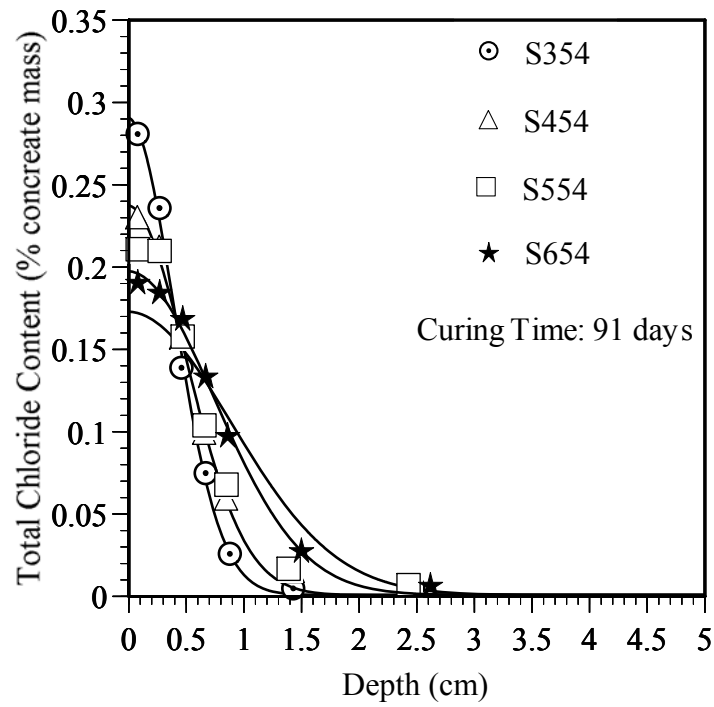


圖 4-45 替代量 40% 爐石混凝土試體氯離子深度與含量關係圖 (91 天材齡)
(資料來源：本研究自行整理)

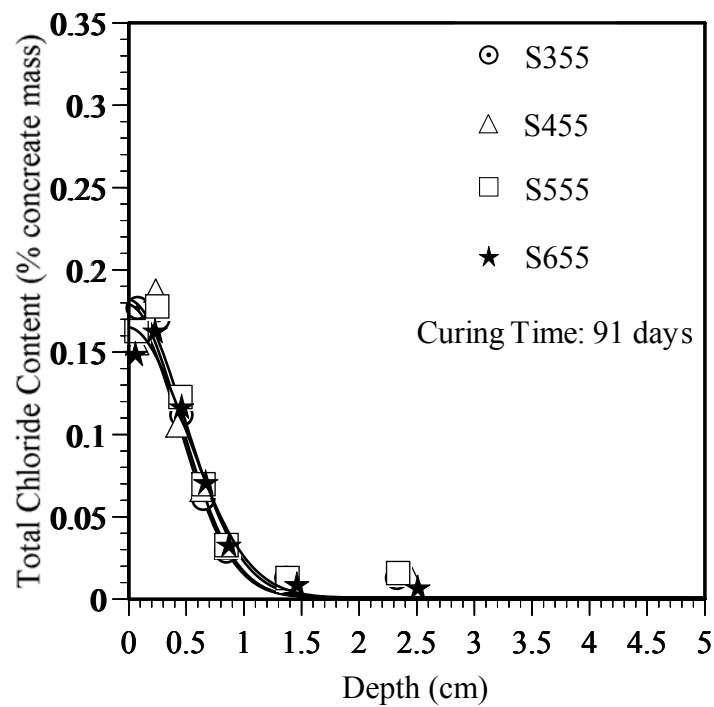


圖 4-46 替代量 50% 爐石混凝土試體氯離子深度與含量關係圖 (91 天材齡)
(資料來源：本研究自行整理)

藉由上述粉末之取得與酸溶法萃取氯離子等試驗，可得到不同深度中的氯離子的濃度，由迴歸的方法獲得各深度下氯離子含量曲線圖。若對上述各關係圖加以分析，可藉由氯離子含量曲線所得到的總氯離子含量與穿透深度進行分析。運用迴歸曲線圖，即可定義氯離子在試體內部總含量以及穿透的深度，總氯離子含量的定義為迴歸曲線下的面積；而穿透深度則是先定義一個氯離子的背景濃度(0.02%)，將此背景濃度與迴歸曲線之交點定義為該試體的穿透深度，其示意圖如 4-47、4-48 所示。

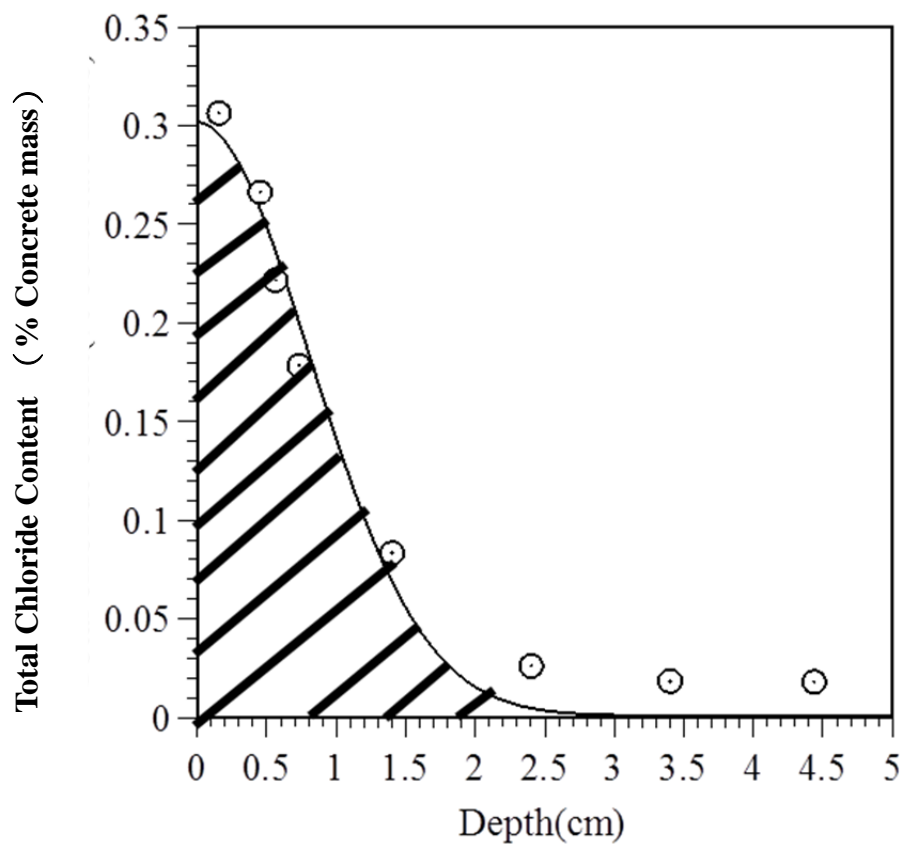


圖 4-47 總氯離子含量定義圖

(資料來源：本研究自行整理)

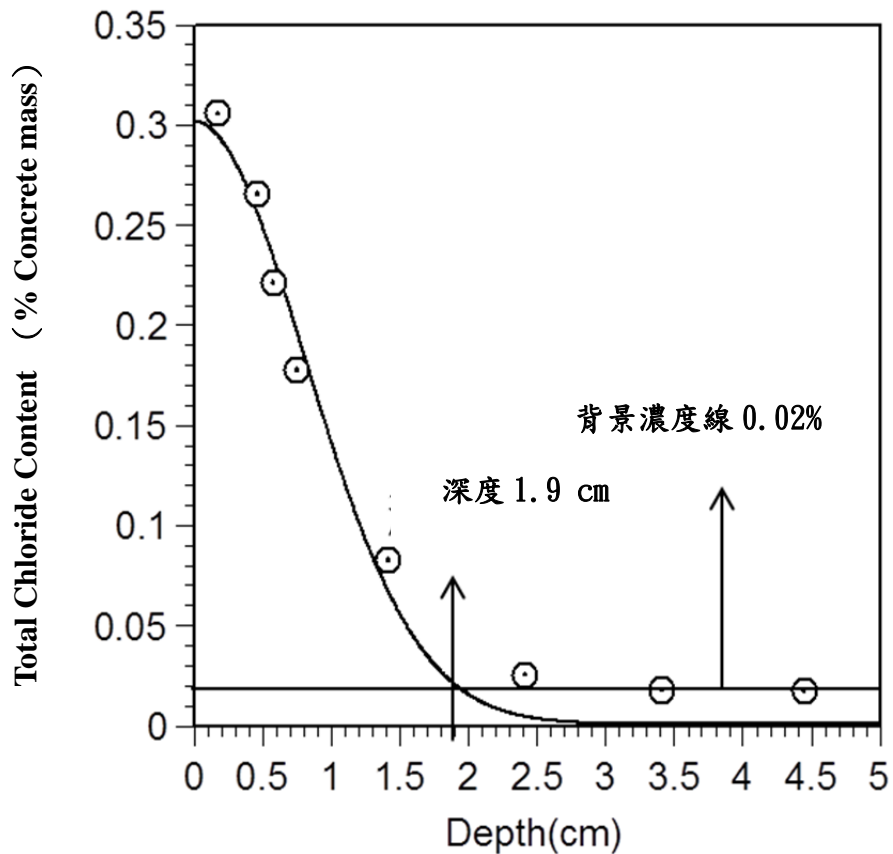


圖 4-48 穿透深度定義圖

(資料來源：本研究自行整理)

由上述氯離子深度與含量關係圖，可獲得各配比下的總氯離子含量與穿透深度。並將各配比在 28 天與 91 天養護材齡下的總氯離子含量與穿透深度紀錄於表 4-9 與表 4-10 中。表中穿透深度係指由陰極槽端接觸面起算的試體深度，而穿透深度 5 cm 表示陰極槽氯離子已於 6 個小時 RCPT 試驗過程中已穿透 5 cm 試體進入陽極槽。總氯離子含量的單位定義為重量百分比(每 g 混凝土試體內部的氯離子 g 數含量)與試體厚度的乘積，即為(mass%×cm)，而以下將該單位簡寫成(% cm)，而穿透深度單位則為 cm。若由表 4-9 與表 4-10 可以發現總氯離子含量和穿透深度都會隨著水膠比的上升而增加。而養護材齡對總氯離子含量和穿透深度的影響則如圖 4-49 至圖 4-57 所示。

表 4-9 各飛灰混凝土配比 RCPT 後試體內部總氯離子含量與穿透深度

配比編號	28 天材齡		91 天材齡	
	總氯離子含量 mass%×cm	穿透深度(cm)	總氯離子含量 mass%×cm	穿透深度(cm)
C350	0.361	2.30	0.222	1.50
F352	0.171	1.40	0.055	0.50
F353	0.166	1.20	0.036	0.41
F354	0.116	1.10	0.024	0.35
F355	0.098	1.00	0.020	0.36
C450	0.482	3.10	0.280	2.40
F452	0.247	1.90	0.081	0.80
F453	0.197	1.52	0.042	0.60
F454	0.149	1.32	0.034	0.48
F455	0.131	1.22	0.031	0.52
C550	0.566	5.00	0.420	3.90
F552	0.298	2.30	0.120	1.32
F553	0.240	2.00	0.055	0.85
F554	0.194	1.85	0.049	0.72
F555	0.265	2.50	0.072	1.00
C650	0.631	5.00	0.620	5.00
F652	0.402	3.80	0.139	1.60
F653	0.331	3.00	0.071	1.10
F654	0.262	2.35	0.056	0.88
F655	0.373	3.12	0.097	1.36

(資料來源：本研究自行整理)

表 4-10 各爐石混凝土配比 RCPT 後試體內部總氯離子含量與穿透深度

配比編號	28 天材齡		91 天材齡	
	總氯離子含量 mass%×cm	穿透深度(cm)	總氯離子含量 mass%×cm	穿透深度(cm)
C350	0.361	2.30	0.222	1.50
S352	0.311	2.30	0.242	1.87
S353	0.218	1.72	0.159	1.14
S354	0.189	1.43	0.143	1.06
S355	0.151	1.18	0.096	0.89
C450	0.482	3.10	0.280	2.40
S452	0.400	3.12	0.351	2.78
S453	0.269	2.42	0.210	1.75
S454	0.210	1.71	0.152	1.24
S455	0.181	1.53	0.119	1.11
C550	0.566	5.00	0.420	3.90
S552	0.359	3.24	0.319	2.93
S553	0.321	2.99	0.261	2.13
S554	0.268	2.36	0.163	1.52
S555	0.182	1.85	0.098	1.10
C650	0.631	5.00	0.620	5.00
S652	0.432	4.76	0.389	4.18
S653	0.291	3.11	0.223	2.32
S654	0.259	2.95	0.179	1.78
S655	0.162	1.89	0.108	1.22

(資料來源：本研究自行整理)

圖 4-49 為未添加飛灰控制組關係圖，由圖中可看出，在水膠比 0.35 與 0.45 時，養護 28 天與養護 91 天下總氯離子含量下降量大約在 0.01~0.03 (mass% cm)，而水膠比從 0.55 與 0.65 開始，由於漿體的致密性較低，在 RCPT 試驗後，氯離子會穿透試體到達 OH 槽，由上述氯離子濃度與穿透深度的圖形中即可觀察到，該些圖型近似固定濃度的曲線圖，因此在總氯離子含量上該些配比會集中在一固定範圍內，可視為該些試體的飽和氯離子濃度，當養護達 91 天時與 28 天做比較，總含量下降有些微提高的趨勢，推估是養護時間較長的緣故。

在飛灰混凝土中，如圖 4-50 至圖 4-53 總氯離子含量和穿透深度除了會受到水膠比的影響外，飛灰取代量也會影響試體的緻密性。當飛灰取代水泥達 20% 時，如圖 4-50 所示，總氯離子含量與穿透深度下降的比例有明顯的改變趨勢，由圖中可看出，在養護達 91 天時，下降的比例會明顯的增加，水膠比越高所降低的比例越多，而在穿透深度上大約都下降了 0.6cm，而水膠比在 0.65 時，下降的比例最大，整體下降了 1.8cm。當飛灰替代量達 30%~40% 時，總氯離子含與穿透深度的下降趨勢與飛灰 20% 相同，當養護達 91 天時，總氯離子含量下降的比例約在 0.02~0.1 (mass% cm)，而穿透深度下降量約在 0.17~0.6cm，下降量都有減低的趨勢。當飛灰取代水泥達 50% 時，與上述飛灰取代 20%~40% 下降趨勢相同，當養護達 91 天時，總氯離子含量下降的比例約減低到 0.3(mass% cm)，穿透深度下降量也減少到 0.25cm 之間；反觀在水膠比 0.55~0.65 的試體上，由於 RCPT 電量上原本就有偏高趨勢，因此總氯離子含量與穿透深度都會較高，但依然保有飛灰組下降趨勢的特性，當養護達 91 天時，總氯離子含量的下降的比例約減低到 0.09(mass% cm)，穿透深度下降量也減少到 0.6 cm 之間。由圖 4-50 到 4-53 中可看出，在水膠比 0.35 與 0.45 最低點出現在飛灰取代量 50% 時，而在水膠比 0.55 與 0.65 最低點則是出現在取代量 40% 時；但與穿透深度的結果不同，由圖中可看出除了養護 28 天以外，飛灰取代量 40%，在各水膠比中穿透深度皆為最低，原因可能是在 91 天養護後，飛灰取代量(40%、50%)之試體，其穿透深度都是小

於 1cm，在判斷穿透深度時，骨材的大小和分佈的位置皆可能會導致穿透深度有些微的誤判。

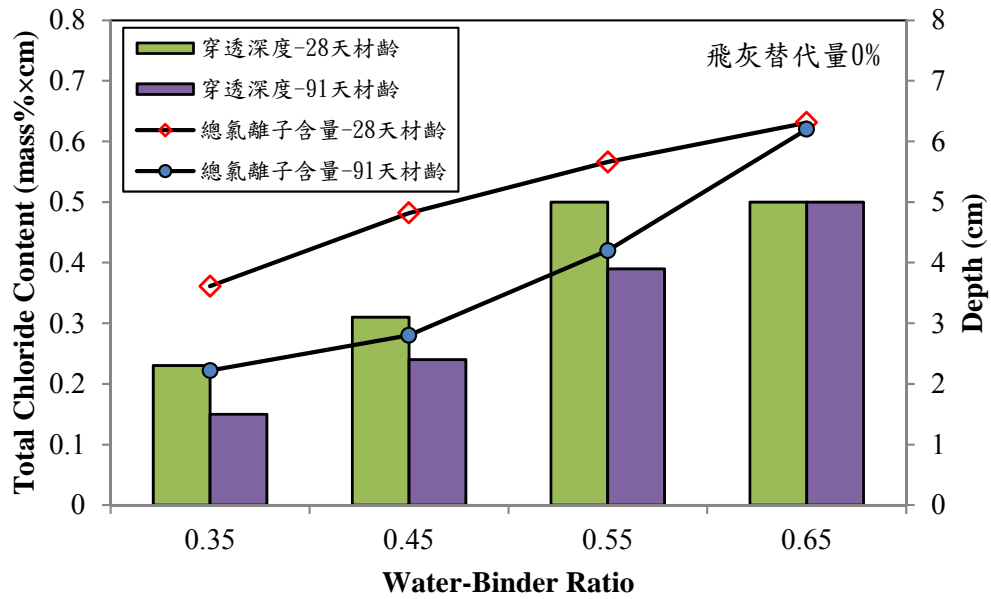


圖 4-49 不同水膠比總氯離子含量、穿透深度關係圖（飛灰替代量 0%）

(資料來源：本研究自行整理)

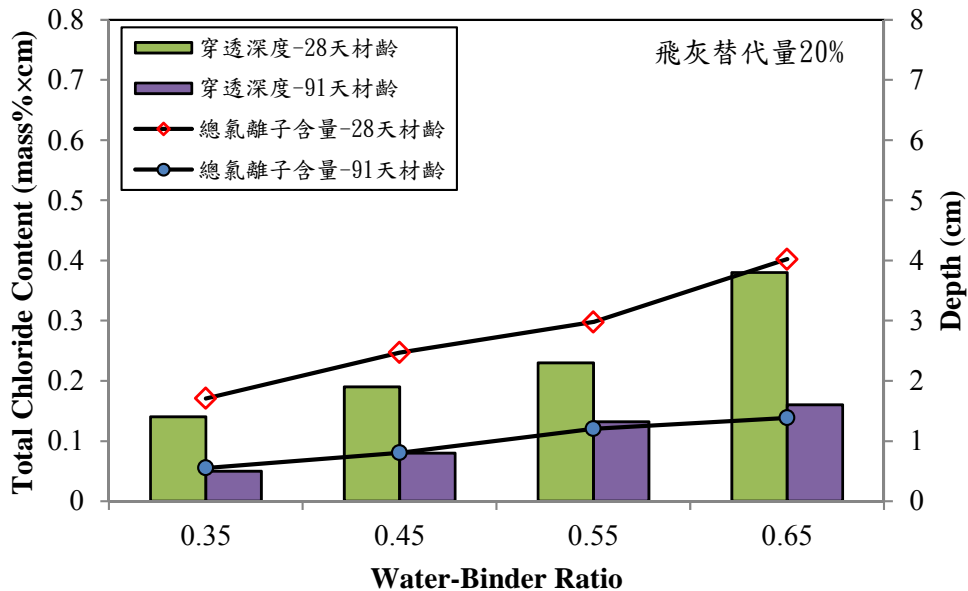


圖 4-50 不同水膠比總氯離子含量、穿透深度關係圖（飛灰替代量 20%）

(資料來源：本研究自行整理)

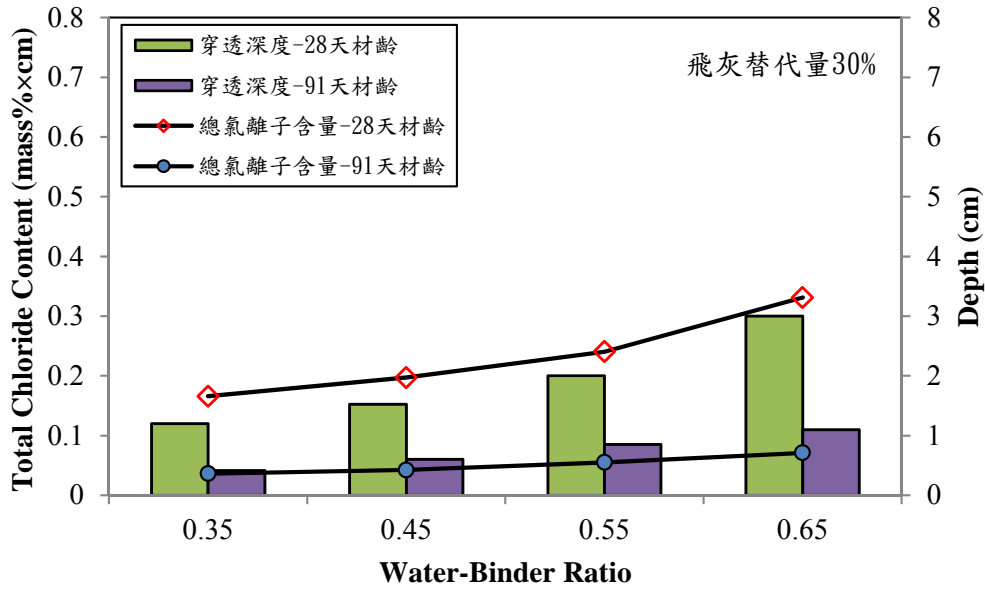


圖 4-51 不同水膠比總氯離子含量、穿透深度關係圖（飛灰替代量 30%）

（資料來源：本研究自行整理）

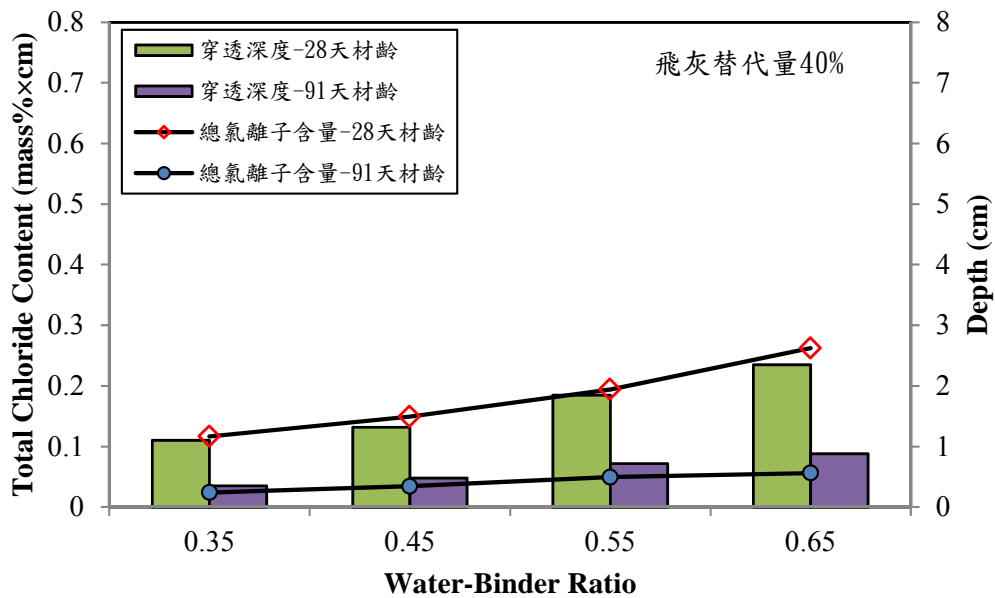


圖 4-52 不同水膠比總氯離子含量、穿透深度關係圖（飛灰替代量 40%）

（資料來源：本研究自行整理）

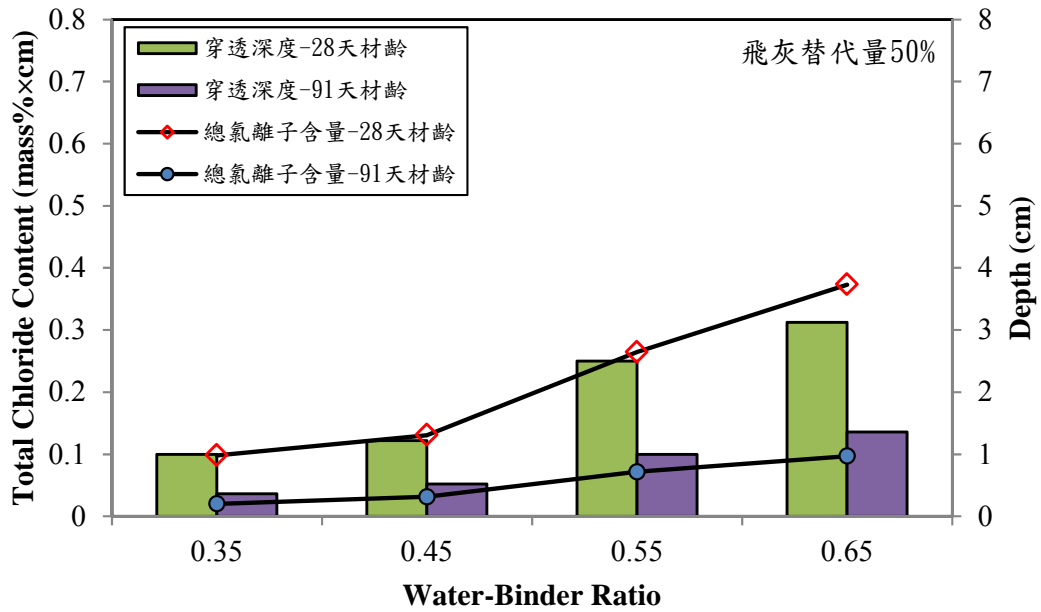


圖 4-53 不同水膠比總氯離子含量、穿透深度關係圖（飛灰替代量 50%）

（資料來源：本研究自行整理）

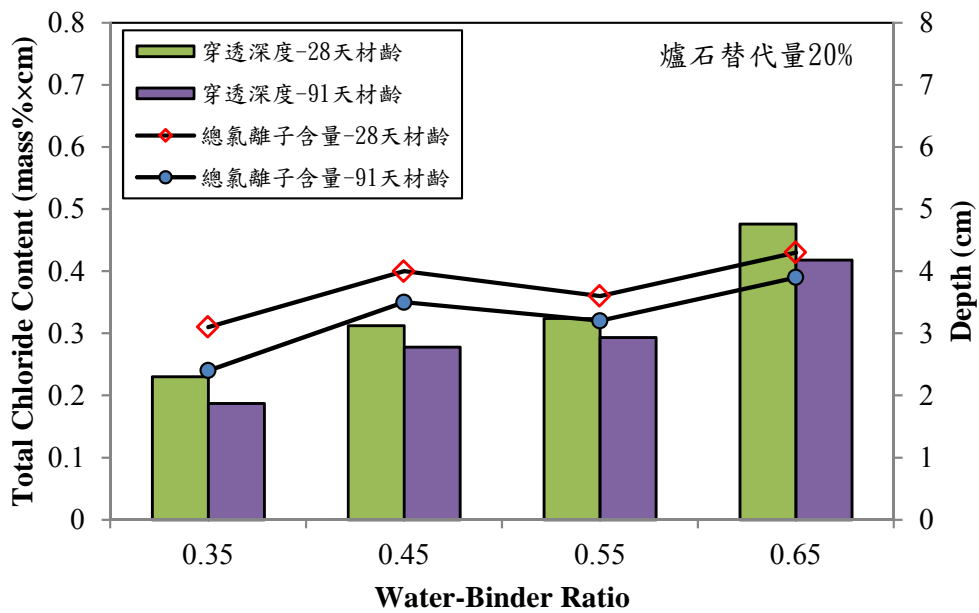


圖 4-54 不同水膠比總氯離子含量、穿透深度關係圖（爐石替代量 20%）

（資料來源：本研究自行整理）

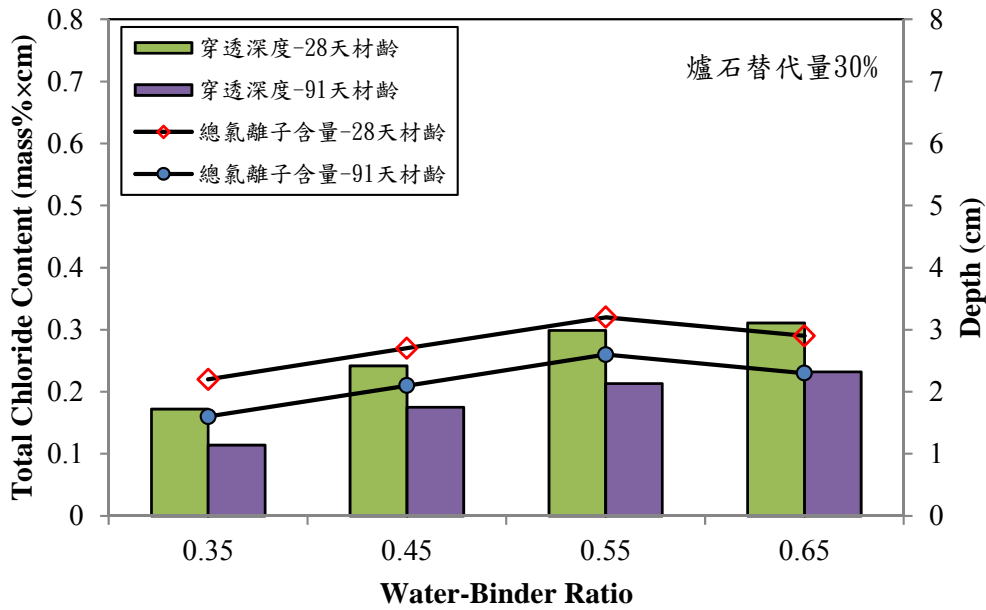


圖 4-55 不同水膠比總氯離子含量、穿透深度關係圖（爐石替代量 30%）

（資料來源：本研究自行整理）

在爐石混凝土部分，如圖 4-54 至圖 4-57 所示。爐石組養護材齡 28 天時，添加 20% 爐石以後，各組滲透深度下降，甚至連水膠比 0.65 的滲透深度也降至 4.77cm，儘管兩顆試體中另一顆已經穿過，但也證明添加爐石大幅改善了氯離子穿過試題的問題。當爐石取代量到達 30% 時，各組試體滲透深度也有下降，可是下降比例不高，滲透深度依然保持在 1.72~3.11cm 左右，唯獨水膠比 0.65 試體滲透深度大幅下降，已從 4.77 cm 降至 3.11 cm。當爐石取代量上升至 40%，各水膠比的滲透深度已經降至 1.43~2.95cm，當爐石添加量上升至 50% 後，各組配比的滲透深度為 1.18~1.89 cm。養護材齡 91 時，相較於 28 天各配比滲透深度皆有下降，爐石取代量 20% 時各組滲透深度為 1.87~4.18 cm，爐石取代量 30% 時各組滲透深度為 1.14~2.32 cm，爐石取代量 40% 時各組滲透深度為 1.06~1.78 cm，爐石取代量 50% 時各組滲透深度為 0.89~1.22cm。由圖中可見，當爐石取代量每增加百分之十，各配比的滲透深度亦會隨之下降，當取代量到達 50% 後，各組滲透深度皆為 1cm 左右，這個深度是非常低的，這表示，即使是高水膠比

的試體，其滲透深度卻與低水膠比的試體相差不大，所以決定滲透深度的主要因素已經不再是水膠比。

而氯離子總含量皆較未添加爐石之控制組低，養護材齡 28 天時，添加爐石 20%後，平均氯離子總含量為 0.31~0.43(mass% cm)，添加爐石 30%後，平均氯離子總含量為 0.22~0.32 (mass% cm)，添加爐石 40%後，平均氯離子總含量為 0.19~0.27 (mass% cm)，添加爐石 50%後，平均氯離子總含量為 0.15~0.18(mass% cm)。養護材齡 91 天時，添加爐石 20%後，平均氯離子總含量為 0.24~0.3(mass% cm)，添加爐石 30%後，平均氯離子總含量為 0.16~0.26 (mass% cm)，添加爐石 40%後，平均氯離子總含量為 0.14~0.18 (mass% cm)，添加爐石 50%後，平均氯離子總含量為 0.1~0.12 (mass% cm)。綜合分析來看，爐石混凝土各配比與控制組皆有相同的趨勢，即氯離子總含量隨著水膠比的提升而增加，亦會隨著試驗材齡的增加而降低。滲透深度相同，添加爐石以後使得試體對於抵抗氯離子能力增強了，養護材齡 28 天與 91 天的趨勢也大致相同。當爐石增加到 30%，從原本的逐漸上升趨勢轉為逐漸平緩。當取代量增加到 40%，上升趨勢比 30%更加平緩。而取代量上升至 50%後，各配比氯離子總含量皆降至 0.2 (mass,%×cm)以下，平緩的趨勢更加明顯，這也說明著，如同滲透深度的趨勢一般，當高爐石取代量時，各配比間水膠比的高低已較無影響力。

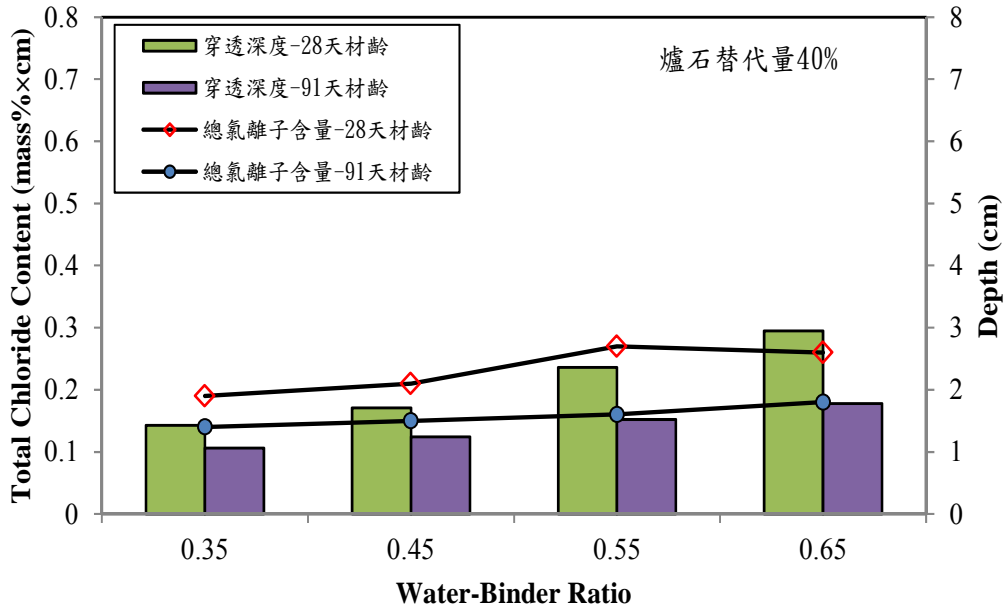


圖 4-56 不同水膠比總氯離子含量、穿透深度關係圖（爐石替代量 40%）

（資料來源：本研究自行整理）

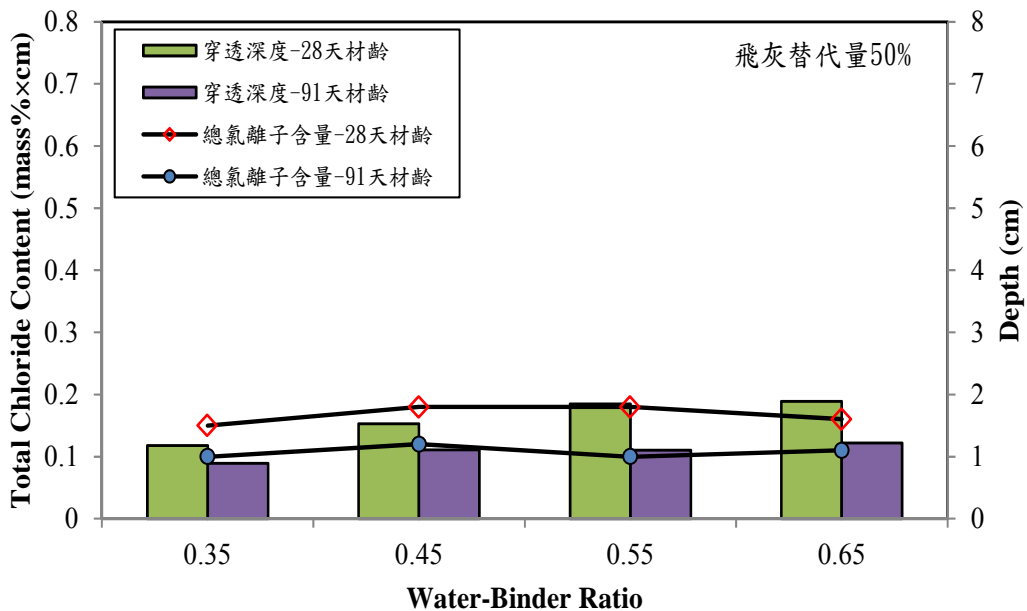


圖 4-57 不同水膠比總氯離子含量、穿透深度關係圖（爐石替代量 50%）

（資料來源：本研究自行整理）

第四節 研究成果綜合分析

若比對控制組水膠比 0.35 之 C350 配比與替代量 50% 飛灰水膠比 0.65 的 F655 配比試驗結果，則如圖 4-58 所示。由圖中可以發現未添加飛灰的 C350 配比 28 天材齡抗壓強度可高達 50 MPa 以上，而替代量 50% 飛灰 F655 配比卻僅只有 14 MPa，然而 RCPT 總通過電荷量，未添加飛灰的 C350 配比高於替代量 50% 飛灰 F655 配比 1316 庫倫。比較 91 天材齡抗壓強度，未添加飛灰的 C350 配比是替代量 50% 飛灰 F655 配比約 1.97 倍，而 RCPT 總通過電荷量 F655 配比已屬於低穿透力的 646 庫倫，C350 配比還是屬於中度穿透力的 3145 庫倫是 F655 配比的 5.29 倍。對比替代量 50% 爐石的 S655 混凝土配比，S655 的 91 天抗壓強度與 RCPT 電量均略低於 F655 配比，因此其趨勢與前述 F655 配比相同。由此可以發現飛灰與爐石混凝土以 RCPT 評估抗氯離子穿透力會有低估的疑慮。

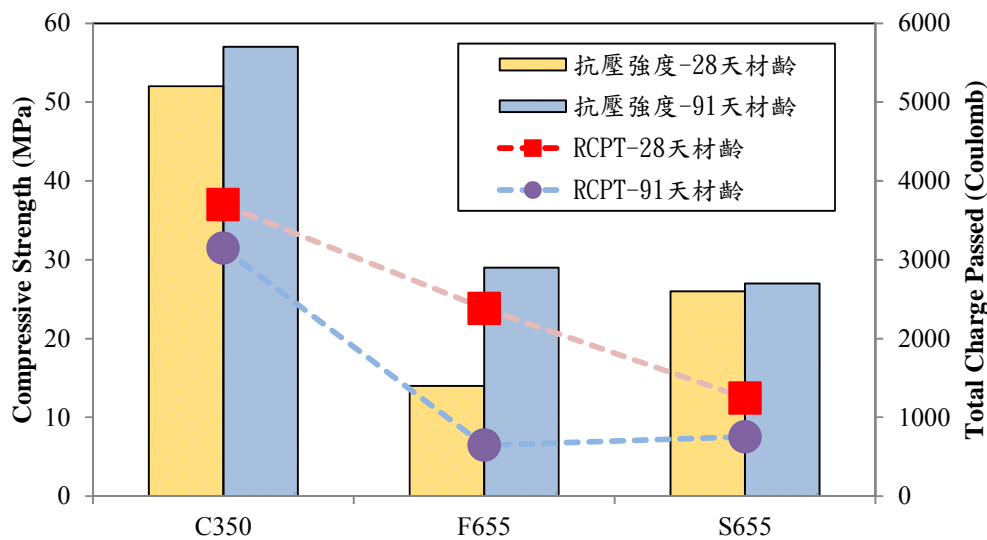


圖 4-58 C350、F655、與 S655 配比抗壓強度、RCPT 結果比較圖

(資料來源：本研究自行整理)

圖 4-59 為所有混凝土試體 RCPT 總氯離子含量與總電荷量關係圖，圖 4-60 為所有混凝土試體 RCPT 氯離子穿透深度與總電荷量關係圖。圖中若不考量 28 天或 91 天材齡與混凝土是否添加飛灰或爐石時，可以發現無論總氯離子含量或氯離子穿透深度均與 RCPT 電量是無良好相關性。然而氯離子係由六小時 RCPT 過程中 60V 直流電壓驅動進入，兩者應有關聯性存在，但圖 4-59 與圖 4-60 卻出

現不同結果。

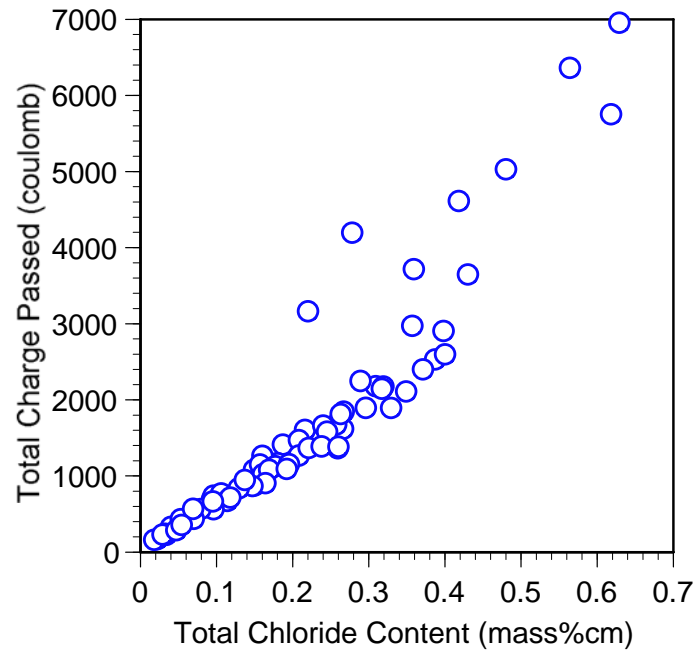


圖 4-59 所有試體 RCPT 總氯離子含量與總電荷量關係圖

(資料來源：本研究自行整理)

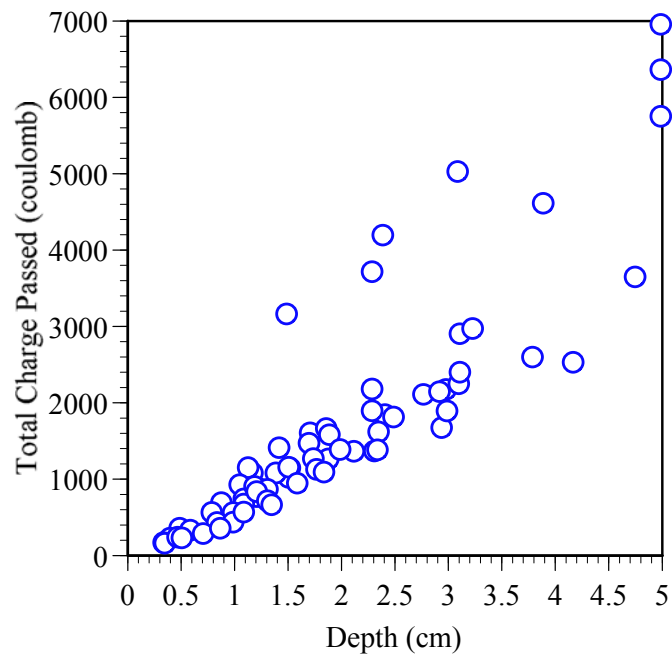


圖 4-60 所有試體 RCPT 氯離子穿透深度與總電荷量關係圖

(資料來源：本研究自行整理)

但若將控制組 RCPT 試驗結果與添加礦物摻料的飛灰或爐石混凝土分開繪製關係圖，則如圖 4-61 與圖 4-62 所示。若不管養護材齡的差別，由圖中可以發現無論總氯離子含量與總電荷量關係圖或氯離子穿透深度與總電荷量關係圖，均可以發現添加礦物摻料的飛灰或爐石混凝土試驗數據點數集中在 1 個區域；未添加礦物摻料的控制組混凝土試驗數據點數集中在另 1 個區域。由此可以發現飛灰或爐石對 RCPT 的電化學機制具有一定的影響，導致當與控制組試驗結果一起探討時呈現關係性不好的情形。

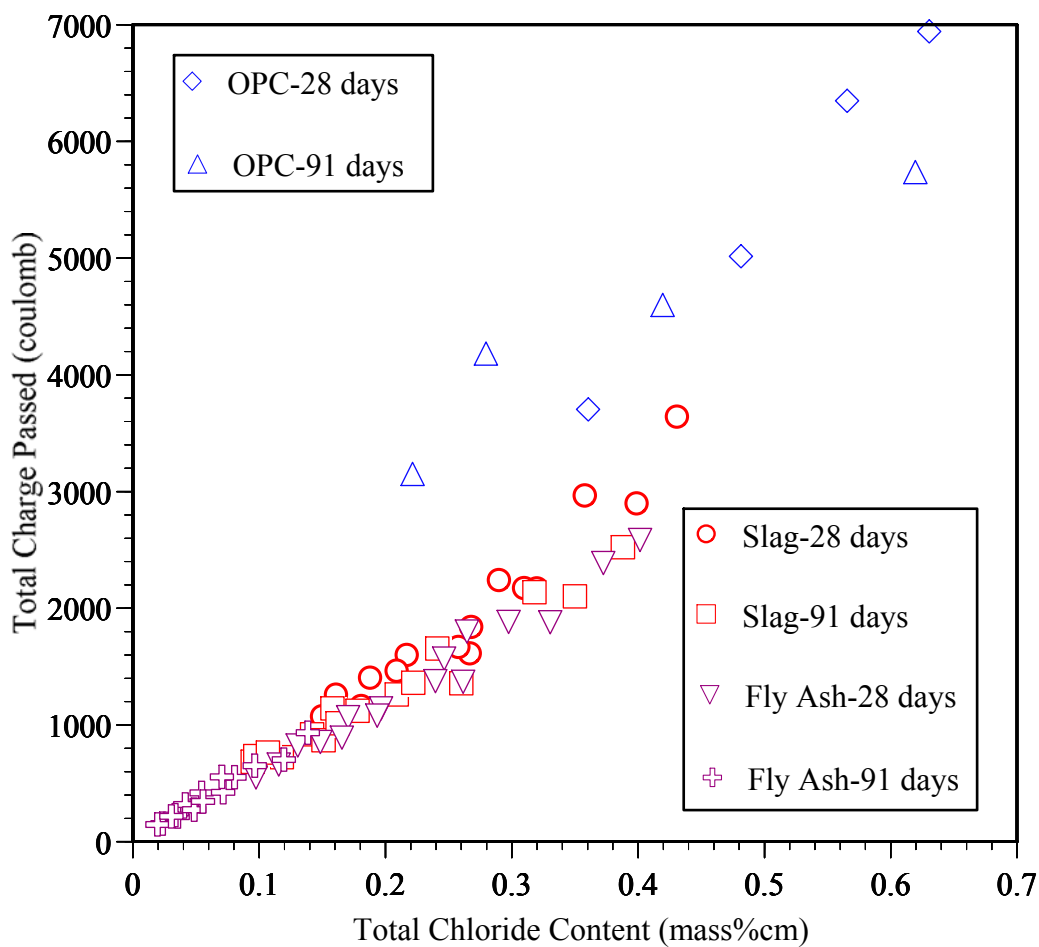


圖 4-61 添加礦物摻料混凝土與控制組 RCPT 總氯離子含量與總電荷量關係圖
(資料來源：本研究自行整理)

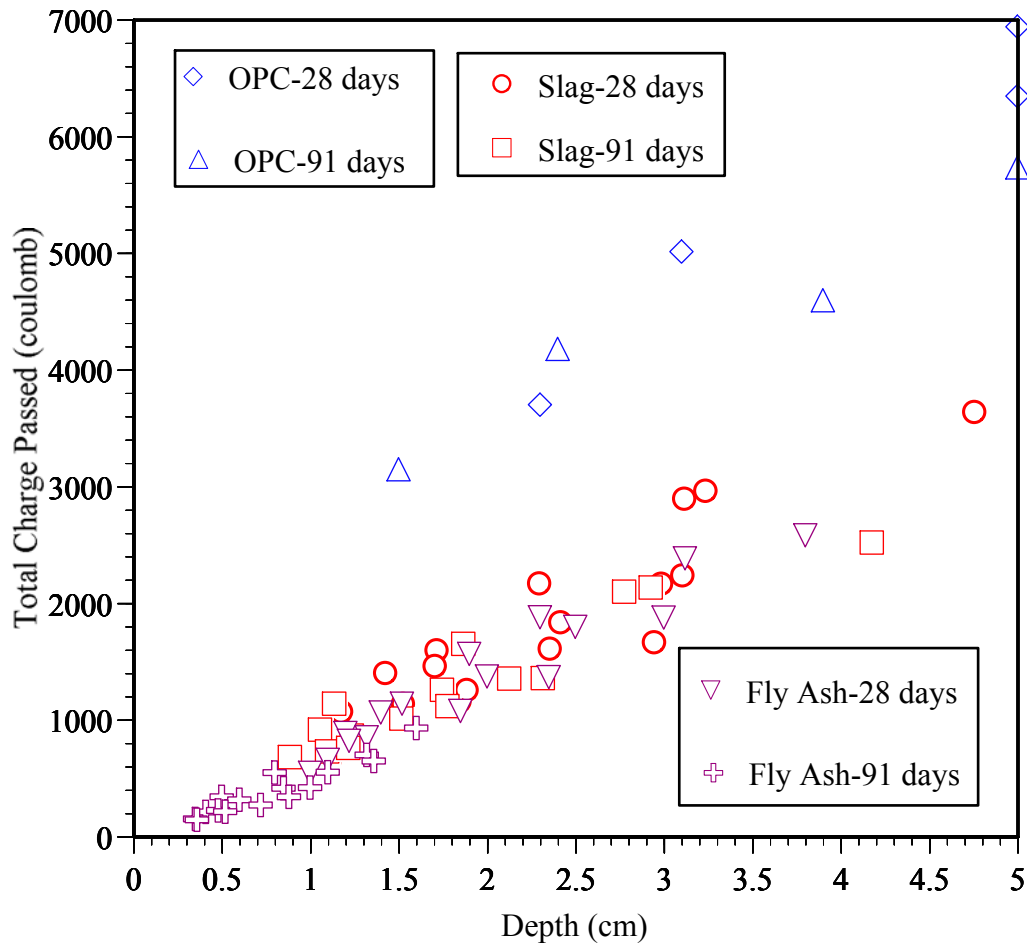


圖 4-62 添加礦物摻料混凝土與控制組 RCPT 氯離子穿透深度與總電荷量關係圖
(資料來源：本研究自行整理)

將圖 4-61 控制組混凝土、爐石混凝土、與飛灰混凝土試驗結果進行線性迴歸，如圖 4-63 所示。由圖中可以發現 RCPT 總電荷量可以與總氯離子含量關係呈現良好的線性關係，其中控制組混凝土 R^2 為 0.874；飛灰混凝土 R^2 為 0.923；爐石混凝土 R^2 為 0.983，均屬於良好的線性關係。由此更可以驗證飛灰與爐石對 RCPT 的電化學機制具有不一樣的影響，導致當與控制組試驗結果一起探討時會呈現關係性不好的情形。圖 4-64 為利用圖 4-62 將控制組混凝土、爐石混凝土、與飛灰混凝土試驗結果進行線性迴歸，亦發現與圖 4-63 一樣，具有良好線性關係。其控制組混凝土 R^2 為 0.877；飛灰混凝土 R^2 為 0.857；爐石混凝土 R^2 為 0.926。

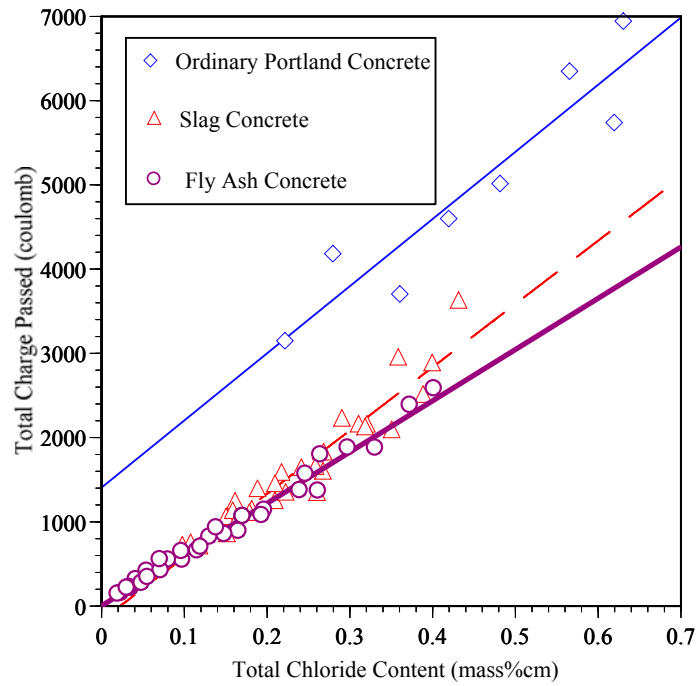


圖 4-63 添加礦物摻料混凝土與控制組總氯離子含量與總電荷量迴歸關係圖
(資料來源：本研究自行整理)

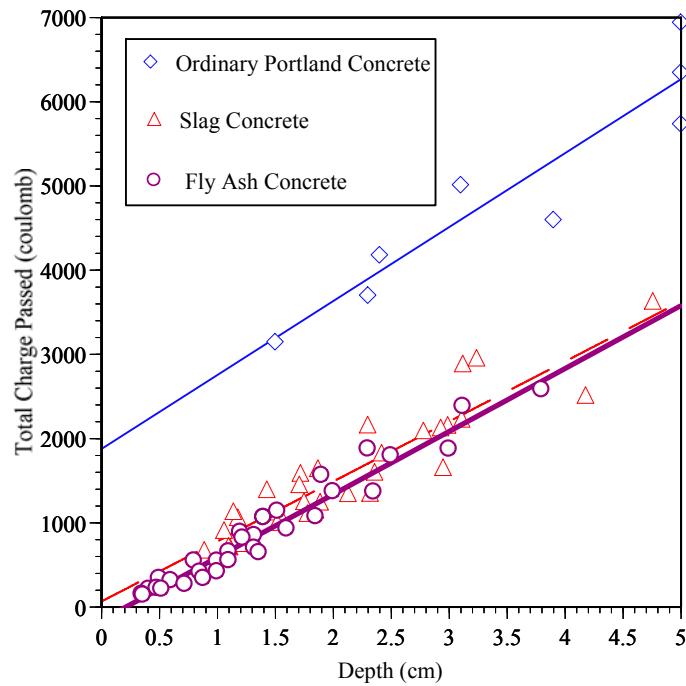


圖 4-64 添加礦物摻料混凝土與控制組氯離子穿透深度與總電荷量迴歸關係圖
(資料來源：本研究自行整理)

由前述圖 4-63 與圖 4-64 可以發現添加礦物摻料混凝土與控制組混凝土在 RCPT 試驗下的反應情形並不一樣。若詳細分析 RCPT 後試體內部氯離子濃度，以 C350 與替代飛灰量 F352 於 91 天材齡試驗結果加以分析，如圖 4-65 所示。

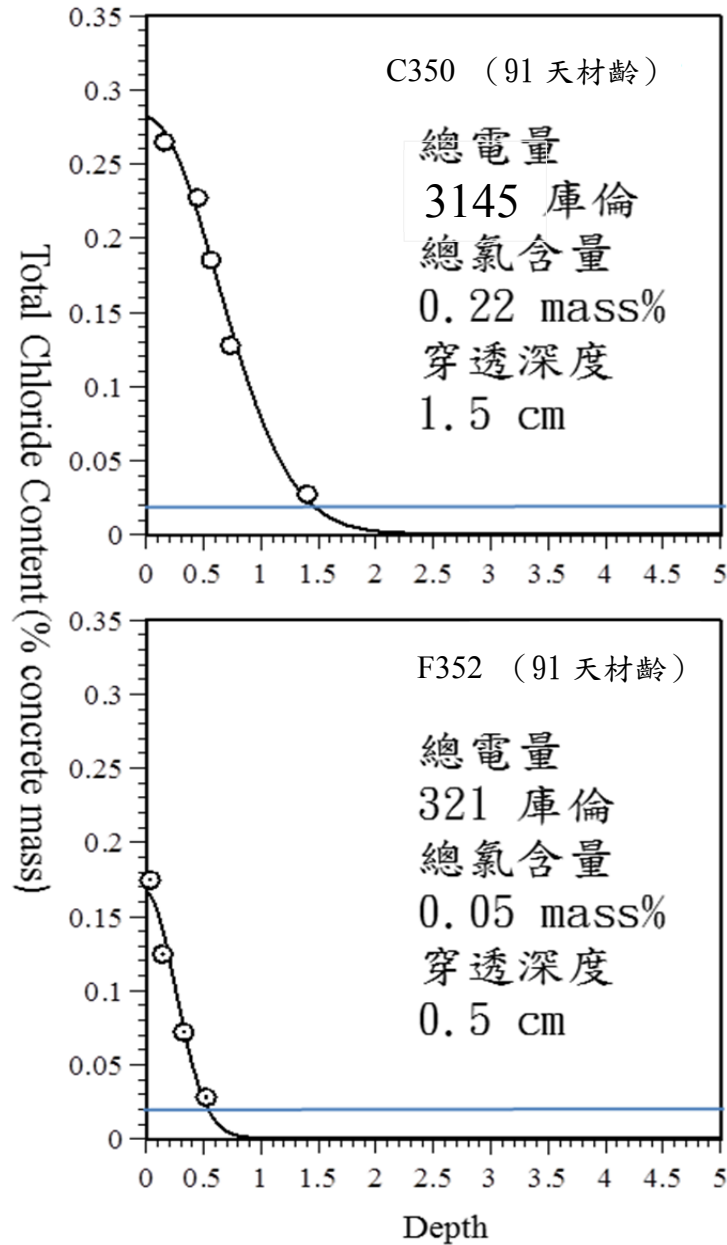


圖 4-65 飛灰混凝土 F352 與控制組 C350 配比 RCPT 氯離子穿透深度關係圖

(資料來源：本研究自行整理)

若由抗壓強度而言，91 天材齡 C350 平均值為 57 MPa，F352 平均值為 69 MPa，而由總通過電荷量觀察 F352 為 C350 配比 0.102 倍，因此可以明顯發現飛灰對混

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

凝土內部孔隙確有減少或孔徑縮小的正面效益。由圖 4-51 中氯離子迴歸曲線可以發現與深度 0cm 的交點 C350 為 $0.272 \text{ mass\%} \times \text{cm}$ ，而 F352 為 $0.175 \text{ mass\%} \times \text{cm}$ 。由於 RCPT 係以 60V 直流電壓驅動氯離子進入混凝土內，一般而言骨材的緻密性遠大於漿體，故被視為氯離子無法進入的材料，所以氯離子會在漿體與界面過渡區所結成的連通路徑中通過，因此所量測到的氯離子除了漿體背景值外，大部分是反應孔隙內部試驗後所殘留的氯離子濃度。由於關文獻研究均可以得知屬於礦物摻料的飛灰或爐石取代水泥拌入混凝土試體時，會改變原有的孔隙結構，當孔隙結構縮小時，也可以反應進入氯離子濃度會較少，所以表面濃度會降低，同樣的穿透深度與穿透量會降低，此也間接說明圖 4-61 與圖 4-64 所發現添加礦物摻料混凝土與控制組混凝土在 RCPT 試驗下的反應情形不一樣的狀況。

圖 4-66 與圖 4-67 將相同水膠比飛灰混凝土電量除以未添加飛灰的控制組混凝土電量，同樣的亦將相同水膠比飛灰混凝土氯離子穿透深度除以未添加飛灰的控制組氯離子穿透深度結果，即將試驗結果正規化的比值。圖 4-66 為 28 天材齡，由於 C550 與 C650 配比於 RCPT 試驗過程氯離子以穿透試體進入陽極槽內，所以水膠比 0.55 與 0.65 的試驗結果不列入比較；圖 4-67 為 91 天材齡，同樣的由於 C650 配比於 RCPT 試驗過程氯離子以穿透試體進入陽極槽內，因此水膠比 0.65 的試驗結果不列入比較。由圖中可以發現無論 28 天或 91 天材齡，所有添加飛灰混凝土 RCPT 總通過電荷量正規化比值均小於氯離子穿透深度。圖 4-68 為 28 天材齡爐石混凝土 RCPT 試驗結果正規化比值比較圖；圖 4-69 為 91 天材齡爐石混凝土試驗結果。由圖中也可以發現與飛灰混凝土相同趨勢，表示氯離子穿透深度實際說明氯離子於 RCPT 六小時加速電壓過程中進入混凝土內部的深度，因此亦可說明以飛灰或爐石混凝土進行 RCPT 時總通過電荷量會被低估。所以後續將嘗試由穿透深度與電量之關係探討標準方法計算總電量修正之可行方式。

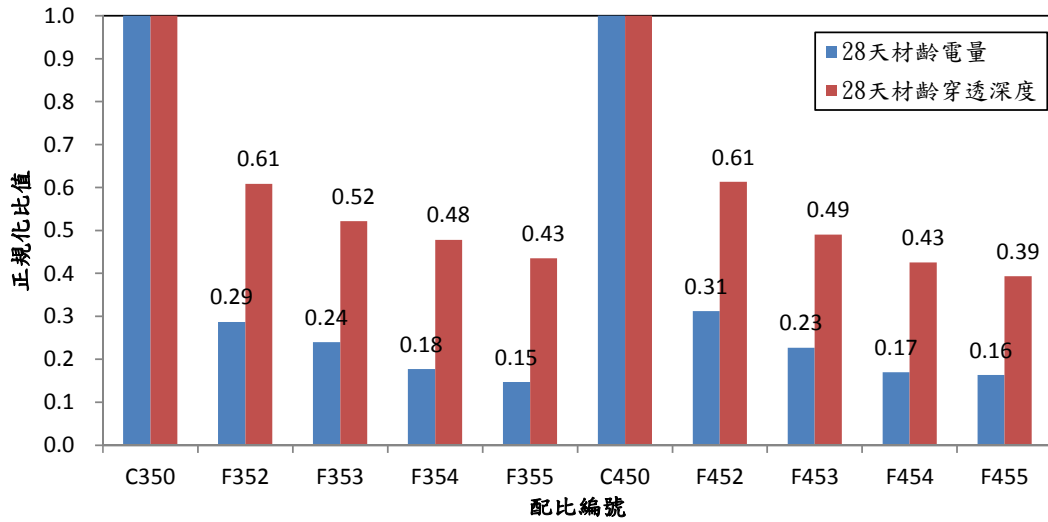


圖 4-66 飛灰混凝土與控制組 28 天材齡 RCPT 試驗結果正規化比值比較圖

(資料來源：本研究自行整理)

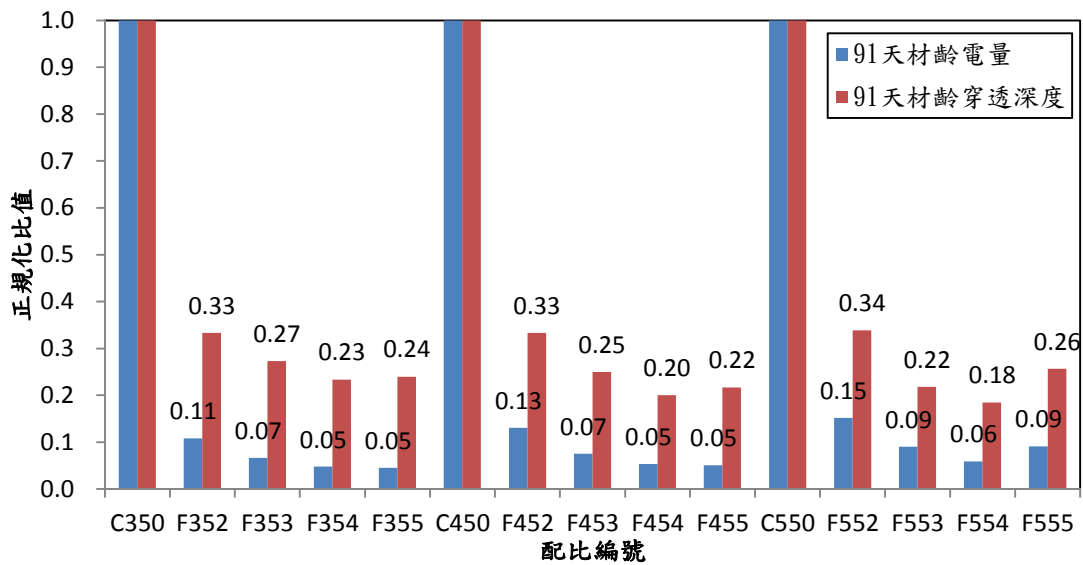


圖 4-67 飛灰混凝土與控制組 91 天材齡 RCPT 試驗結果正規化比值比較圖

(資料來源：本研究自行整理)

快速氣離子穿透試驗於含飛灰爐石混凝土耐久性能評估之研究

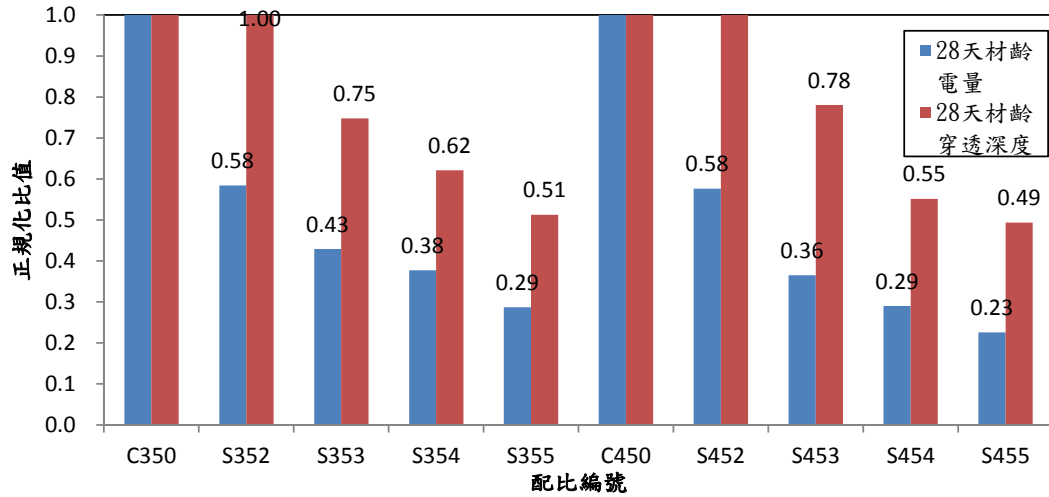


圖 4-68 爐石混凝土與控制組 28 天材齡 RCPT 試驗結果正規化比值比較圖

(資料來源：本研究自行整理)

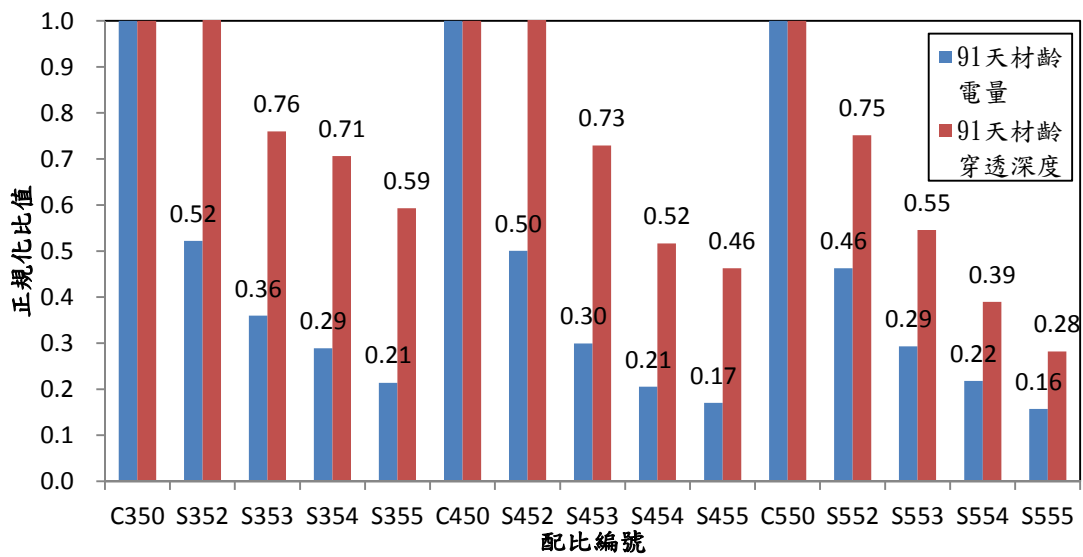


圖 4-69 爐石混凝土與控制組 91 天材齡 RCPT 試驗結果正規化比值比較圖

(資料來源：本研究自行整理)

第五章 評估添加礦物摻料混凝土 RCPT 總電荷量改善方法

第一節 改善方法建立

若將第四章第四節圖 4-64 穿透深度與電量之關係加以分析，圖 5-1 為爐石混凝土 RCPT 電量與氯離子穿透深度關係圖。圖 5-2 飛灰混凝土關係圖。並將其線性迴歸方程式說明於圖內。ASTM C1202 或 CNS 14795 標準中對於混凝土抗氯離子穿透特性有一重要分類，即利用 6 小時總通過電量區分成 5 個級距，分別為混凝土試驗結果大於 4000 coulomb 屬於高度氯離子穿透特性；2000 至 4000 coulomb 屬於中度氯離子穿透特性；1000 至 2000 coulomb 屬於低度氯離子穿透特性；100 至 1000 coulomb 屬於極低度氯離子穿透特性；小於 100 coulomb 屬於可視為氯離子無法穿透之混凝土。若以圖 4-70 與圖 4-71 中傳統混凝土（即 OPC 控制組）而言，其總電量與氯離子穿透深度的線性迴歸方程式為 $Q_c = 877.9x + 1860.2$ ，所以高度氯離子穿透特性 4000 coulomb 其對應的氯離子穿透深度在為 2.44 cm。因此當直接套用於圖 5-1 與圖 5-2 飛灰與爐石混凝土迴歸方程式中時，分別可以得到飛灰混凝土為 1668 庫倫與爐石混凝土 1806 庫倫，對試驗標準而言均屬於低度氯離子穿透特性混凝土。因此添加礦物摻料混凝土若單以 RCPT 電量來判斷其氯離子穿透特性，可能會有誤差疑慮產生。因此本研究目的為建立當添加飛灰混凝土或爐石混凝土時的修正電量方式。

前述由圖 5-1 與圖 5-2 中均可以發現一般混凝土與飛灰混凝土或爐石混凝土均有獨立且良好的線性關係式。若將其線性關係方程式加以整理，則以式 4-1 代表一般混凝土線性關係方程式；式 4-2 代表添加礦物摻料混凝土線性關係方程式。將式 5-1 與式 5-2 相對應比較，則可以由式 4-3 說明飛灰混凝土氯離子侵入深度相對於一般混凝土相同深度之電量。

$$Q_c = a_c x + b_c \quad (\text{式 5-1})$$

$$Q_p = a_p x + b_p \quad (\text{式 5-2})$$

$$Q_{RP} = \frac{a_c}{a_p} Q_p + \frac{a_p b_c - a_c b_p}{a_p} \quad (\text{式 5-3})$$

式 5-1 中 Q_c 為傳統混凝土 RCPT 總電量 (單位: coulomb), a_c 與 b_c 為傳統混凝土迴歸方程式常數, x 為 RCPT 氯離子穿透深度 (單位: cm)。式 5-2 中 Q_p 為添加礦物摻料混凝土 RCPT 總電量 (單位: coulomb), a_p 與 b_p 為添加礦物摻料混凝土線性迴歸方程式常數。式 5-3 中 Q_{RP} 為使用礦物摻料混凝土進行 RCPT 試驗後的調整電量 (單位: coulomb), 如果是飛灰混凝土為 Q_{Rf} , 如果是爐石混凝土為 Q_{RS} 。

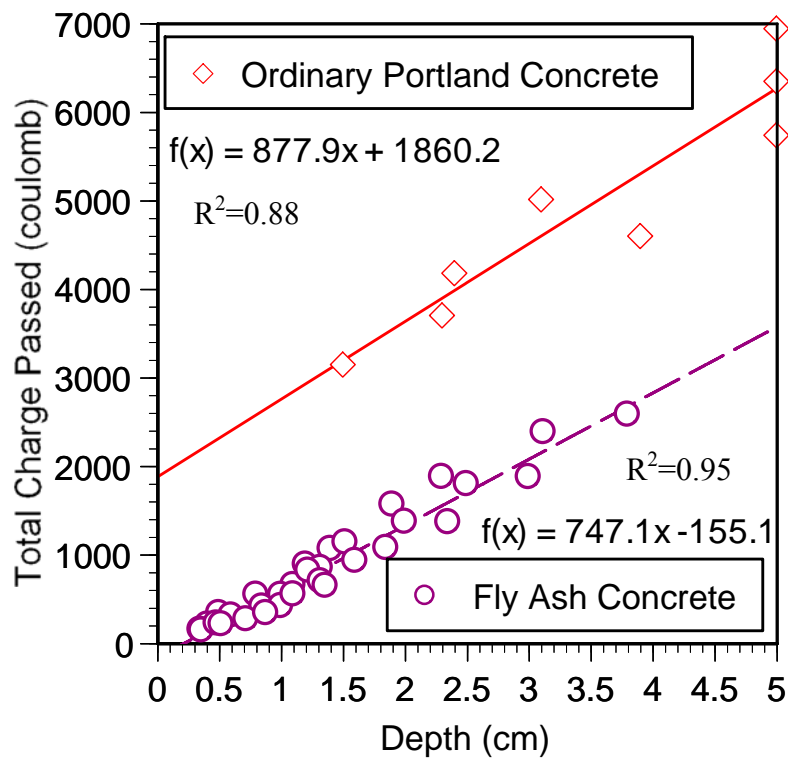


圖 5-1 飛灰混凝土與控制組混凝土 RCPT 穿透深度與電量之關係圖

(資料來源: 本研究自行整理)

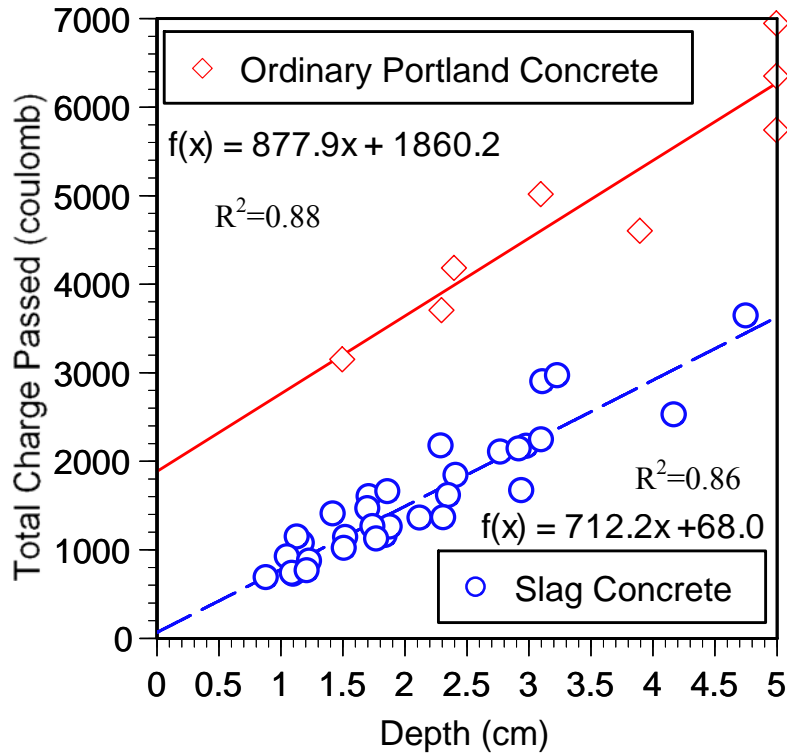


圖 5-2 爐石混凝土與控制組混凝土 RCPT 穿透深度與電量之關係圖

(資料來源：本研究自行整理)

因此將圖 5-1 與圖 5-2 線性迴歸曲線方程式的係數代入式 5-3，可以得到飛灰混凝土與爐石混凝土之 RCPT 電量修正式，如下式 5-4 與式 5-5 所述。

飛灰混凝土 RCPT 電量修正式

$$Q_{Rf} = 1.18Q_f + 2042 \quad (\text{式 5-4})$$

爐石混凝土 RCPT 電量修正式

$$Q_{Rs} = 1.23Q_s + 1776 \quad (\text{式 5-5})$$

式中 Q_{Rs} 與 Q_{Rf} 為經由式 5-4 與式 5-5 修正後之電量值， Q_f 與 Q_s 為原始 RCPT 後之總通過電荷量。所以可以將混凝土 RCPT 試驗結果依其混凝土配比是否使用飛灰與爐石分別套入式 5-4 與式 5-5 中進行修正，再依 CNS 14795 原先分類混凝土抗氯離子穿透特性之電量標準進行判斷。圖 5-3 為利用式 5-4 繪製飛灰混凝土

電量修正式與原始 RCPT 總通過電量之關係圖。圖 5-4 為利用式 5-5 繪製爐石混凝土電量修正式與原始 RCPT 總通過電量之關係圖。表 5-1 為其對照表。

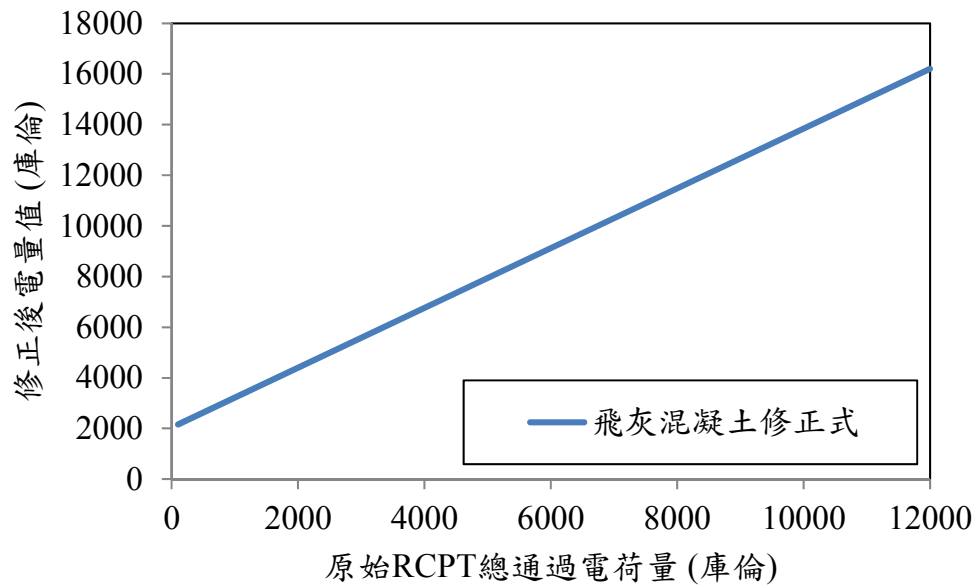


圖 5-3 飛灰混凝土電量修正式與原始 RCPT 總通過電量之關係圖

(資料來源：本研究自行整理)

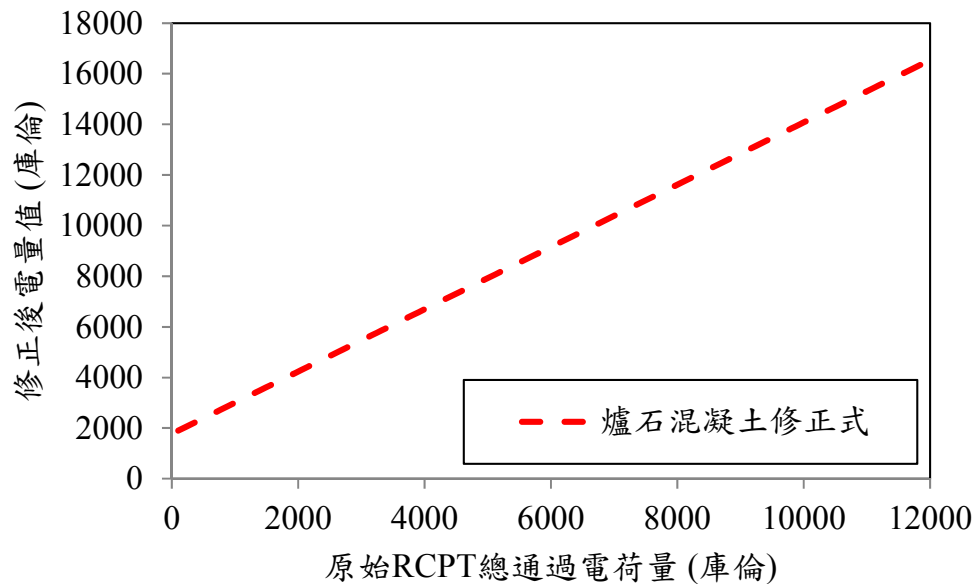


圖 5-4 爐石混凝土電量修正式與原始 RCPT 總通過電量之關係圖

(資料來源：本研究自行整理)

表 5-1 氯離子穿透性與修正後 RCPT 總通過電量關係對照表

原始 RCPT 總通過電量 (coulombs)	飛灰混凝土 修正後電量 (coulombs)	爐石混凝土 修正後電量 (coulombs)	氯離子穿透性
>4000	>6762	>6696	高
2000~4000	4402~6762	4236~6696	中
1000~2000	3222~4402	3006~4236	低
100~1000	2160~3222	1899~3006	極低
<100	<2160	<1899	可視為無

(資料來源：本研究自行整理)

第二節 CNS 14795 標準增修建議

依據第一節建議之成果，擬針對 CNS 14795 標準 1.適用範圍中 1.1 小節進行增修，以及於 10.結果計算與解釋中加入 10.4 小節進行說明當混凝土中加入飛灰與爐石時的修正方法。其建議增修方式如下。

一、適用範圍增修方向

原條文如下：

ICS 91.100.20		- 1 -	
中華民國國家標準	混凝土抗氯離子穿透能力試驗法 —通過電荷量表示法	總號	14795
CNS		類號	A3395
Method of test for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration			
1. 適用範圍			
1.1 本標準規定混凝土導電性之測定，作為評估混凝土抗氯離子入侵能力之快速指標。			
備考：本試驗法與長期氯離子浸泡試驗法（例如 AASHTO T259 [混凝土抗氯離子擴散試驗法]）有相當的關聯性，可適用於各類型混凝土。			

建議於 1.1 節的備考進行增修如下：

1. 適用範圍

1.1 本標準規定混凝土導電性之測定，作為評估混凝土抗氯離子入侵能力之快速指標。

備考：本試驗法與長期氯離子浸泡試驗（例如 AASHTO T259 [混凝土抗氯離子擴散試驗法]）有相當的關連性，可適用於各類型混凝土。當混凝土使用礦物摻料如飛灰或爐石時，依 10.3 節進行總電荷量修正。

二、於結果計算與解釋 10.3 小節中增修，說明總電荷量修正計算方向

原條文如下：

10. 結果計算與解釋
10.1 繪製電流（安培）與時間（秒）關係圖，以平滑曲線連接各數據點並對曲線

CNS 14795, A 3395 - 6 -

下的面積進行積分⁽¹⁾，以獲得 6 小時試驗期間所通過的電荷（庫倫，或安培-秒）。另外，亦可使用自動資料處理系統在試驗進行中或試驗後進行積分並顯示庫倫值，而總通過電荷量係混凝土於試驗過程中電導性的量測結果。

註⁽¹⁾ 計算範例：當電流為每 30 分鐘記錄一次時，可採用梯形法利用下列公式以電子計算機完成積分。

$$Q=900(I_0+2I_{30}+2I_{60}+\dots\dots\dots+2I_{300}+2I_{330}+I_{360})$$

式中：Q=通過電荷量（庫倫）
 I_0 =開始施加電位時所顯示的電流（安培）
 I_t =施加電位後第 t 分鐘的電流（安培）

10.2 當試體直徑不等於 95mm 時，由第 10.1 節所計算獲致的總通過電荷量須加以修正。修正方式係將第 10.1 節所計算的通過電荷量乘上標準試體面積與實際非標準試體斷面積的比值，亦即：

$$Q_z = Q_x \times \left(\frac{95}{x}\right)^2$$

式中：Q_z=通過直徑為 95mm 試體的通過電荷量（庫倫）
 Q_x =通過直徑為 x mm 試體的通過電荷量（庫倫）
x=非標準試體直徑（mm）

10.3 參照表 1 進行評估試驗結果

表 1 資料係於試驗室中拌製不同種類混凝土版，並自版中心鑽心切片取樣試驗所獲致之結果。

影響氯離子穿透性因素包括水灰比、聚合物摻料、試體齡期、氣孔與孔隙結構、粒料種類、搗實度與養護方式等。

建議於 10.3 節的參照表 1 進行評估試驗結果增修如下：

10.3 參照表 1 進行評估試驗結果

表 1 資料係於試驗室中拌製不同種類混凝土版，並自版中心鑽心切片取樣試驗所獲致之結果。

影響氯離子穿透性因素包括水灰比、聚合物摻料、試體材齡、氣孔與孔隙結構、粒料總類、搗實度與養護方式等。若混凝土使用礦物摻料如飛灰或爐石時，需依下列公式對試驗總電荷量結果進行修正。再由修正之總電荷量值參照表 1 進行評估。並於報告需加註其修正值與原始試驗結果。

混凝土中加入飛灰之 RCPT 總電荷量修正式

$$Q_{Rf} = 1.18Q_f + 2042$$

混凝土中加入爐石之 RCPT 總電荷量修正式

$$Q_{RS} = 1.23Q_S + 1776$$

快速氣離子穿透試驗於含飛灰爐石混凝土耐久性能評估之研究

式中與 Q_{Rf} 為混凝土中加入飛灰之 RCPT 總電荷量修正值。 Q_f 為混凝土中加入飛灰之 RCPT 總電荷量試驗結果。 Q_{Rs} 為混凝土中加入飛灰之 RCPT 總電荷量修正值。 Q_s 為混凝土中加入爐石之 RCPT 總電荷量試驗結果。

第六章 專家諮詢會議

本研究於執行期間須進行 2 次專家諮詢會議。下述為其會議進行情形。第一次諮詢會議在 5 月 30 日下午 2 時於所內簡報室舉行完畢。會中除研究參與人員外，共有 7 位產官學界專家委員出席，會議共計進行 2 個小時，如圖 6-1 所示。會議中由研究協同主持人楊仲家教授進行 30 分鐘簡報後，主要簡報內容針對飛灰混凝土試驗結果進行分析說明。專家委員則針對目前試驗成果提供許多豐碩建言，而本研究亦有初步回應討論，如附錄二會議紀錄與出席表。



圖 6-1 第一次專家諮詢會議

(資料來源：本研究自行整理)

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

第二次諮詢會議於 10 月 9 日下午 2 時於所內材料實驗中心 4 樓會議室舉行完畢。會中除研究參與人員外，共有 6 位產官學界專家委員出席，會議於下午 4 時結束，共計進行 2 個小時，如圖 6-2 所示。會中由研究協同主持人楊仲家教授針對爐石混凝土與飛灰混凝土 RCPT 試驗結果進行 30 分鐘簡報後，6 位專家委員則針對試驗成果提供許多豐碩建言，而本研究亦有回應討論，如附錄三會議紀錄與出席表。



圖 6-2 第二次專家諮詢會議

(資料來源：本研究自行整理)

第七章 研究結論與發現

本研究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除依服務建議書所規劃的配比設計，並增加 2 組飛灰與爐石含量變數(8 組配比)，以期完整探討建立飛灰與爐石對混凝土耐久性能的影響，並可對快速氯離子穿透試驗的建議增修有更多的試驗資料可供分析，研究範圍包含三大類，分別為水膠比、礦物摻料總類、與礦物摻料添加量。其中水膠比研究範圍為 0.35 至 0.65；礦物摻料種類則為飛灰（F 級飛灰）與爐石（4000 型高爐爐渣粉）。礦物摻料添加量方面，其研究範圍為替代水泥量的 0%~50%。相關試驗結論與建議如下。

第一節 結論

1. 由抗壓強度上，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，反觀水膠比在 0.55~0.65 時，到養護達 91 天時只有飛灰取代量 30%、40%有略高於對照組的情況，表示隨著水膠比的增加，飛灰取代量對抗壓強度的影響則會隨之降低，且飛灰取代水泥的效益需要達到一定的養護時間才會表現出來，取代量越多，所需的養護時間相對越長。於爐石混凝土方面對照組與爐石組皆隨著水膠比的增加逐漸降低，隨著養護材齡的增加強度增加 5.1~22.3%，而相較於對照組，添加爐石後，抗壓強度隨著爐石添加量增加而增加，爐石組 28 天增加了 0.2~19.9%，91 天增加了 0.8~18%，當爐石添加量到達 50%，抗壓強度有不升反降的趨勢。
2. 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。而進行 RCPT 後，一般混凝土之表面氯離子，高於飛灰混凝土之表面氯離子。

3. RCPT 後無論飛灰混凝土或爐石混凝土的總通過電量與總氯離子含量之間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。控制組混凝土亦呈現好的線性關係。但飛灰混凝土、爐石混凝土與控制組混凝土線性關係為三條不同的關係方程式，表示其 RCPT 在 2 種混凝土的傳輸機制明顯不同。
4. 在 RCPT 試驗後，總電量和總氯離子含量差異不大，但穿透深度卻有明顯的差異，由孔隙結構的觀點來解釋其含意，表示兩試體內部所停留的氯離子量相同，但穿透深度與表面濃度則會因為水膠比與飛灰取代量不同而有所改變。
5. 添加礦物摻料混凝土電量調整可依據下列方程式進行。

混凝土中加入飛灰之 RCPT 總電荷量修正式

$$Q_{Rf} = 1.18Q_f + 2042$$

混凝土中加入爐石之 RCPT 總電荷量修正式

$$Q_{Rs} = 1.23Q_s + 1776$$

相關試驗結果並於 CNS 14795 中所對應的條文加上建議增修之文字說明，以供後續研究可有所參考。並可由此架構進行更深入的驗證研究。

第二節 建議

建議一

進行爐石與飛灰混合使用混凝土電量調整公式相關研究：立即可行之建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：無

本計畫研究水膠比範圍為 0.35 至 0.65，礦物摻料種類為飛灰（F 級飛灰）與爐石（4000 型高爐爐渣粉），在礦物摻料添加量方面，其設定為替代水泥量的 0%~50%，由試驗分析結果分別獲得飛灰混凝土與爐石混凝土電量調整式。

建議未來可在此研究範圍外進行其他種變數組合 RCPT 試驗，然後依循本計畫模式進行分析，擴充本研究飛灰混凝土與爐石混凝土電量調整式的限制範圍，使對未來 CNS 14795 條文增修可更完整。

建議二

擴大或改變參數設定探討對電量及耐久性之影響：立即可行之建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：無

進行各種通電模式、試驗溶液改變、試體內部孔隙飽和溶液改變對電量的探討。RCPT 是標準電解電池的一種類型，因此試驗過程中對氧化還原反應影響的參數建議在未來研究中加以釐清。各種試驗環境下陰陽離子對活化能或電化學各種參數的影響。可對 RCPT 於試驗法上的影響機理更加清楚，並對未來若發展更迅速量測混凝土抗氯離子傳輸特性方法時有所幫助。

由於飛灰與爐石會降低混凝土的酸鹼度，而飛灰與爐石的混合方式，建議可為未來研究的方向，且擴大水膠比與礦物摻料替代量、與齡期相對關係的研究可了解長期混凝土耐久性的影響。

建議三

CNS 14795 條文增修建議—長期性建議

主辦機關：經濟部標準局

協辦機關：內政部建築研究所

由於影響氯離子穿透性因素包括水灰比、聚合物摻料、試體材齡、氣孔與孔隙結構、粒料總類、搗實度與養護方式等，若混凝土使用礦物摻料如飛灰或爐石

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

時，需依對試驗總電荷量結果進行修正。

建議可整理相關研究資料，並參考本研究第六章內容，對 CNS 14795 條文 10.3 節的參照表 1 進行評估試驗結果之增修，提供 RCPT 使用於飛灰或爐石混凝土抗氯離子傳輸特性時的判斷方式。

參考書目

1. D. Whiting, "Rapid measurement of the chloride permeability of concrete", *Public Roads*, Vol. 45, pp. 101-112 (1981).
2. AASHTO T277-07, "Electrical Indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration", Standard specification for transportation materials and methods of sampling and testing (2007).
3. ASTM C1202-12, "Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration", American Society for Testing and Materials (2012).
4. CNS 14795, "以總通過電荷量表示混凝土抗氯離子穿透能力之標準試驗方法", 中國國家標準, (2004).
5. T. H. Wee, A. K. Suryavanshi, and S. S. Tin, "Evaluation of rapid chloride permeability test (RCPT) results for concrete containing mineral admixture", *ACI Materials Journal*, Vol. 97, No. 2, pp.221-232 (2000).
6. D. W. Pfeifer, "Coulombs passed and chloride intrusion: Is it a numbers game?", *ASCENT Magazine*, Precast / Prestressed Concrete Institute, p.35 (1993).
7. C. Shi, J. A. Stegemann, and R. J. Caldwell, "Effect of supplementary cementing materials on the specific conductivity of pore solution and its implications on the rapid chloride permeability test (AASHTO T277 and ASTM C1202) results", *ACI Materials Journal*, Vol. 95, No.4, pp.387-394 (1998).
8. Byfors, K., "Pore solution expression as a method to determine the influence of mineral additives on chloride binding", *Cement and Concrete Research*, Vol. 16, pp.760-770 (1986).
9. C. Andrade, "Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements", *Cement and Concrete Research*, Vol.23, pp.724-742 (1993).
10. M. H. Zhang, and O. E. Gjrv, "Permeability of high-strength lightweight concrete", *ACI Materials Journal*, Vol. 88, No. 5, pp.463-469 (1991).
11. C. L. Page, ψ . Vennesland, "Pore solution composition and chloride binding capacity of silica-fume cement pastes", *Materials and Structures*, Vol.16, pp.19-25 (1983).
12. M. Castellote, C. Andrade, and C. Alonso, "Electrochemical Chloride Extraction: Influence of Testing Conditions and Mathematical Modelling", *Advanced in*

- Cement Research, Vopl.11, pp.63-80 (1999)
13. V. Rasanen and V. Penttala, The pH measurement of concrete and smoothing mortar using a concrete powder suspension, *Cement and Concrete Research*, 34, 813–820 (2004).
 14. R. J. Detweiler and C. A. Fapohunda, “A comparison of two methods for measuring the chloride ion permeability of concrete”, *Cement, Concrete, and Aggregate*, Vol. 15, pp.70-73 (1993).
 15. C. C. Yang, S. W. Cho, and R. Huang, "The relationship between charge passed and the chloride-ion concentration in concrete using steady-state chloride migration test," *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, No. 2, pp. 217-222 (2002).
 16. S. W. Cho, C. C. Yang, and R. Huang, "Influence of aggregate content on the transport properties of mortar using accelerated chloride migration test," *Concrete Science and Engineering*, Vol. 4, No.14, pp. 84-90 (2002).
 17. 翁在龍、卓世偉、楊仲家、黃然, “表層滲透劑對混凝土特性影響之研究“, *防蝕工程*, (accepted) (2002).
 18. Yan F. D., Ding J., and Beaudoin J. J., “Effect of different calcium aluminate hydrates on ettringite formation and expansion of high alumina cement-based expansive cement pastes,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 26, pp. 417-426 (1996).
 19. Mehta P. K., and Monteiro P. J. M., “Concrete-Structure, Properties, and Materials,” Prentice Hall, pp. 283 (1993).
 20. Collepardi M., Monosi S., and Piccioli P., “The influence of pozzolanic materials on the mechanical stability of cement,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, pp. 961-968 (1995).
 21. Suryavanshi A. K., Scantlebury J. D., and Lyon S. B., “Mechanism of Friedel’s salt formation in cement rich in tri-calcium aluminate,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 26, pp. 1673-1680 (1996).
 22. Dhir R.K., El-Mohr M. A. K., and Dyer T. D., “Chloride binding in GGBS concrete,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 26, pp. 1767-1773 (1996).
 23. Princed W., Perami R., and Espagne M., “Mechanisms involved in the accelerated test of chloride permeability,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, No.2, pp.687-694 (1999).

24. Zhang Y. M., Sun W. Y. and Han D., "Hydration of high-volume fly ash cement pastes," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 22, pp. 445-452 (2000).
25. Nixon P. J., "The effect of pfa with a high total alkali content on pore solution composition and alkali-silica reaction," *Magazine of Concrete Research*, Vol. 38, pp. 30-35 (1986).
26. CNS 3036, "卜特蘭水泥混凝土用飛灰及天然或煨燒卜作嵐摻和物", 中國國家標準 (2009).
27. Mehta P.K., and Monteiro, P.J.M., "Concrete-Structure, Properties, and Materials," Prentice Hall, pp. 281-282 (1993).
28. Thomas M.D.A., and Bamforth, P.B., "Modelling chloride diffusion in concrete effect of fly ash and slag," *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, pp. 487-495 (1999).
29. Osborne G.J., "Durability of Portland blast-furnace slag cement concrete," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 21, pp. 11-21 (1999).
30. CNS 12223, "水淬高爐爐渣", 中國國家標準 (2013).
31. CNS 12549, "混凝土及水泥砂漿用水淬高爐爐渣粉", 中國國家標準, (2009).
32. Prince W. and Gagne, R., "The effects of types of solutions used in accelerated chloride migration tests for concrete," *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, No.4 pp.775-780 (2001).
33. Hooton R.D., and Emery J.J., "Sulfate resistance of a Canadian slag cement", *ACI Materials Journal*, Vol. 87, pp. 547-555 (1990).
34. 沈進發等, "公共工程高爐石混凝土使用手冊", 行政院公共工程委員會專案研究計畫 (2003).
35. Hogan F.J., and Meusel J.W., "Evaluation for Durability and Strength Development of a Ground Granulated Blast-Furnace Slag," *Cement, Concrete, and Aggregates*, V.3, No1, pp.40~52, summer (1981).
36. Princed W., Perami R., and Espagne M., "Mechanisms involved in the accelerated test of chloride permeability," *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, No.2, pp.687-694 (1999).

附錄一-期初審查意見與回應

內政部建築研究所 103 年度建築先進技術創新開發與推廣應用計畫協同研究計畫(三)協同研究計畫第 1 案「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」

評選委員發單及回應情形一覽表

項次	評選意見	回應情形
林炳昌委員		
1	RCPT 試驗過程中，本研究僅量測最後試驗電量的結果與氯離子之影響，但是電量之產生並非只有氯離子影響，若未能以化學之方法區分試體中氯離子含量之比率，如何說明試驗結果與氯離子之間之絕對關係。	RCPT 試驗後，氯離子侵入混凝土之總量及深度可用來評估。如期中報告第四章第三節。
王勇智委員		
1	所添加之飛灰與爐石，是否也需檢測化學成份或說明來源等？	使用之飛灰與爐石將會說明來源及成份。如期中報告第三章第三節。
2	RCPT 僅適用於硬固混凝土之標準實驗法。	RCPT 僅適用於硬固混凝土之標準實驗法。如期中報告第二章第一節所述。
3	請說明現行氯離子檢測方法與	RCPT 用以推估應估混凝土之耐久性，並非用來檢測氯離子含量之方

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

	RCPT 之差異，尤其在檢測費方面？	法。如期中報告第二章第一節所述。
孫元明委員		
1	實驗設計、方法步驟都之確立，是否有其他實驗方法與步驟可供實驗結果比較。	本研究將利用 RCPT 試驗後之氯離子侵入深度試驗進行結果比較。如期中報告第四章第三節所述。
2	試驗材料變數以水灰比，建議是否以混凝土強度來說明較為清楚	混凝土抗壓強度不易掌控，後續將依參考委員建議將進行抗壓強度試驗。如期中報告第四章第一節。
厲妮妮委員		
1	本案規劃試體養護材齡有二。請說明為何規劃養護材齡為 91 天？	因飛灰及爐石混凝土水化過程所需反應時間較長。如期中報告第四章所述。
2	依服務建議書第 13 頁第三點所述：「由於本研究需考量材齡影響……」，惟本案實驗設計之養護材齡僅為二種，是否足以反應材齡之影響？	僅需考量材齡 91 天足以反應結果。如期中報告第四章所述。
鄒本駒委員		
1	本研究結果可提供 CNS14795 修正建議有其意義。	本研究將持續依計畫內容進行。
2	除不同的礦物摻料種類、水膠比及電流量之關聯性外，如何正確反應與耐久性的評估之關聯性，也應列為重點	本研究依委員意見將不同礦物摻料種類、水膠比及電流量之關聯性將列入比較重點。如期中報告第三章第一節所述。

3	歷年相關研究發現 RCPT 試驗有低估飛灰穿透性且高估爐石穿透性，問題之解決請納入研究參考。	本研究依委員意見將過去相關研究成果整理納入考量。如期中報告第二章第一節所述。
4	服務建議書第 19 頁之經費欄，研究費有字誤(月支酬金數字多一個零)，請修正。	本研究依委員意見進行修正，詳如合約書。
陳建忠召集人		
1	服務建議書並未表達所悉之氯離子耐久性試驗方法，請於前段研究時期廣為收集。	本研究依委員意見蒐集整理各國相關試驗方法文獻。如期中報告第二章第一節所述。
2	混凝土摻料甚多，如果只有對飛灰與高爐爐渣，是否妥適？對於新拌混凝土，取樣時機為何？試驗時間多長是否能符合施工之需要。	新拌混凝土係於取樣後製作試體於規定材齡養護後進行試驗。此法試驗所需時間約 1 天半，因此為快速氯離子試驗。如期中報告第二章第一節所述。
3	在既有建築物中取樣，要掌握原有飛灰、高爐石等成分及配比，宜先掌握，才能量測出有意義分析。	目前硬固混凝土中膠結材用量之試驗結果，誤差極大，難以正確評估。

附錄二-第一次專家諮詢會議紀錄

內政部建築研究所

103 年度建築先進技術創新開發與推廣應用計畫協同研究計畫「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」專家諮詢會議紀錄

一、時間：103 年 5 月 30 日（星期五）下午 2:00

二、地點：內政部建築研究所 13 樓簡報室（新北市新店區北新路三段 200 號 13 樓）

三、主席：陳組長建忠

紀錄：卓世偉

四、出席及請假專家委員：（如簽到單）

出席：李委員釗、詹委員穎雯、廖委員文正、王委員韡蓁、陳委員式毅、
陳委員育聖、鄭委員瑞濱

請假：梁委員智信

五、列席：計畫參與人員（如簽到單）

六、主持人報告：本案為本所建築先進技術創新開發與推廣應用計畫協同研究計畫，協同主持人為國立台灣海洋大學楊仲家教授。本次為期中前第 1 次專家諮詢會議，目前已有初步研究成果，請各位專家委員對本案提供建議或未來研究方向，以供後續計畫執行參考。

七、本研究報告：詳如簡報資料。

八、專家委員發言重點

1. 詹委員穎雯

- A. 目前相關研究方法與研究成果均具有系統與相當豐碩，且相關試驗結果亦進行了入滲曲線的研究。建議可將成果回饋並簡化與明確評估的指標。
- B. 入滲曲線表面氯離子濃度的意義如何？因從結果觀察使用飛灰配比的表面氯離子濃度變化並不大。
- C. 報告資料 P.33 圖，一般氯離子濃度的曲線要從原點開始，比較符合物理現象。但飛灰混凝土所顯示的成果並不一樣，建議加以探討。
- D. 報告資料 P.35 圖，當 91 天材齡時，每組數值所增加的幅度較為大些，大概顯示添加飛灰對滲透的抑制行為顯現，尤其是似乎只要替代量 20%就有明顯提高耐久性成效。

- E. 建議後續可探討入滲曲線與電量之間的關係，並找找出工程應用上的意義。
- 2. 陳委員式毅
 - A. 由報告資料 P.33 圖看出相關係數高，可探討是否是獨立變數或相依變數。
 - B. 電流與氯離子通過的多寡關係似乎是必然的，建議可否後續進行貯鹽試驗來進行比對。
 - C. 建議探討飛灰加入混凝土會不會對試驗過程產生干擾。
 - D. 若試驗法系自行研發，無國外相關標準可依循時，建議可參考農委會所頒布的試驗法相關標準訂定程序。
 - 3. 鄭委員瑞濱
 - A. 建議除飛灰或爐石加入混凝土的相關研究，可考慮未來規劃爐灰混凝土的研究。
 - B. 添加飛灰或爐石會使得混凝土鹼度下降，導致行為下降。建議是否可以由 28 天與 91 天氣離子入滲曲線所得到的各項性質進行分析。
 - C. 鹼度增減是否與電量有關，建議進行探討。
 - 4. 李委員釗
 - A. 建議後續若有延續計畫時，可不要侷限於標準方法上的試驗步驟規定，如試驗只有 6 小時，前處理可稍微做改變，如一直通電到氯離子通過試體達到穩態階段後，再繼續進行電流量測過程，藉以評估是否可避免飛灰或爐石使得試驗所造成的誤差。
 - B. 或將前處理的蒸餾水改為飽和氯化鈉溶液，讓試體於試驗前內部充滿氯化鈉後再通電，藉以消除試體內部孔隙水成分的影響後進行探討，
 - 5. 廖委員文正
 - A. 建議後續研究可以從試驗前後陰極槽或陽極槽濃度變化情形尋找相關性。
 - B. 若排除 28 天或 91 天材齡的關係，此計畫可訂定合理的上限值與截距值。
 - 6. 陳委員育聖
 - A. 有關報告資料 P.30 圖正規化將所有點放在一起迴歸，建議依配比設計變數特性分開分析進行比較。
 - B. 於試驗架構是否加入飛灰 10% 替代量的相關研究，因為業界亦有相關配比使用。

7. 王委員韡蒨
 - A. 飛灰混凝土 RCPT 深度與累積電量比較如何在實務成果運用是一個有趣課題。建議後續研究如果可取得現有老劣化建築物混凝土電量測量測值與配比資料，會使此方法更加完善。
 - B. RCPT 試驗結果於不同條件所建議的指標建議不依定建立在電量，錯許可對應一個物理性探討會更好。
8. 陶主任其駿
 - A. 此修訂的試驗法未來如何推廣讓業界知道是很重要的。如將原則性成果放在施工規範或 CNS 標準方法裡。而細部的成果可以放在手冊上。
 - B. 探討 28 天與 91 天材齡相關修正方式均為線性，實際運用時如何克服材齡也是值得後續探討。

九、本研究初步回應

1. 有關詹委員所提的表面氯離子濃度問題，推測係因為表面孔隙比內部孔隙鬆散，而飛灰加入改善表面孔隙，導致表面氯離子濃度降低。
2. 而 P.33 圖截距推測係因為一般混凝土氫氧根濃度較高，初期通過的電流量是氫氧根濃度造成，導致截距。
3. 用氯離子進入濃度深度關係曲線作為判斷可能較不合一般工程使用的習慣性與方便性，但我們會加以分析後進行考量。另有關貯鹽試驗的對照分析，由於貯鹽試驗耗時需 3 個月以上，因此會視本年度研究進度選擇數個配比進行。
4. 有關 28 天與 91 天材齡試驗後的氯離子進入濃度深度關係曲線，本研究也會嘗試分析，以說明其差異性。
5. 李委員建議之試驗方法前處理過程的改變方式，我們在未來延續研究會加以考量。
6. 另有關 10% 飛灰含量的試驗，我們會依委員的建議加入本年度研究中。
7. 並感謝各位委員意見，部分意見我們均會詳細審視後加入今年度研究成果，部分亦會列入未來研究參考。

十、討論事項：無

十一、 臨時動議：無

十二、 會議結論：感謝各位委員參加本次專家諮詢會議，請本研究參考各位專家建議，納入後續計畫執行參考。

十三、 散會：下午 4:00

內政部建築研究所

103 年度建築先進技術創新開發與推廣應用計畫協同研究計畫「快速氣離子穿透試驗於含飛灰爐石混凝土耐久性能評估之研究」
專家諮詢會議簽到簿

時間：103 年 5 月 30 日（星期五）下午 2 時 0 分			
地點：內政部建築研究所（新北市新店區北新路三段 200 號 13 樓）			
主席：陳建忠		記錄：吳世偉	
出席人員	簽到處	代理人	
		職稱	簽到處
專家委員			
李釗 委員	李釗		
詹穎雯 委員	詹穎雯		
廖文正 委員	廖文正		
王韡蓀 委員	王韡蓀		
陳式毅 委員	陳式毅		
鄭瑞濱 委員	鄭瑞濱		
梁智信 委員			
陳育聖 委員	陳育聖		
內政部建築研究所			
鄭元良 主任秘書			
陳建忠 組長	陳建忠		
陶其駿 主任	陶其駿		
	楊仲榮		

附錄三-期中審查意見與回應

內政部建築研究所103年度建築先進技術創新開發與推廣應用計畫
 畫協同研究計畫(三)協同研究計畫第1案「快速氣離子穿透試驗
 於含飛灰爐石混凝土耐久性能評估之研究」

期中審查委員發言單及回應一覽表

項次	審查意見	本研究回應
宋永鑾委員		
1	研究成果與一般觀念有一致性。	感謝委員意見，將依服務建議書進度持續辦理。
2	研究成果可簡易評估硬固混凝土是添加飛灰與爐石值得肯定。	感謝委員意見，將依服務建議書進度持續辦理。
3	本研究提出飛灰混凝土電量調整之建議值得肯定。	感謝委員意見，將依服務建議書進度持續辦理。
王和源委員		
1	本研究對於飛灰與爐石混凝土耐久性能評估具有重要之指標。	感謝委員意見，將依服務建議書進度持續辦理。
2	本期中報告中對「材齡」或「齡期」可一致更佳。	將依委員意見一致為「材齡」。如期末報告第三章、與第四章第一節至第四節所述。
3	本期中報告之圖表目錄建議以主變數為主詞。	依委員意見辦理。如期末報告第四章各圖所述。
4	本期中報告第48頁中圖5-1之第28天與第91天之顏色表示有差異更佳。	因紙本印刷關係，因此差異不大。但依委員意見於電子檔加以顏色區

		分，如期末報告第四章第一節
5	本期中報告第 80 頁中圖 4-49 與 4-50 一樣，請再確認是否誤植？	相關重覆情形已改正，如期末報告第四章第四節。
6	本期中報告中文獻第 19 項與第 27 項相同，第 23 項與第 26 項同，第 7 項與第 11 項相同，請再確認	相關重覆情形已改正，如期末報告第一章第一節的 P.3。
7	本研究未來可考慮飛灰與爐石同時添加之性能評估。	飛灰與爐石同時添加之性能評估，因並非本研究計畫範圍，後續將建議未來相關研究可進行。
吳志興委員		
1	本期中報告第 11 頁、第 13 頁及第 14 頁方程式之式中敘述不需空格，符號之敘述要一致。	依委員意見加以修正，如期末報告第二章第一節 P.11、第二章第二節 P.13、第二章第二節 P.14。
2	本期中報告第 14 頁中第 13 行及第 14 行， $\text{SiO}_2+\text{SiO}_2+\text{SiO}_2$ 有誤，應修正為 $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ 。	依委員意見加以修正，如期末報告第二章第二節 P.14。
3	本期中報告第 18 頁中第 9 行文字應緊接於第 8 行。	依委員意見辦理以修正，如期末報告第二章第三節 P.18。
4	本期中報告第 23 頁中表 3-3 之成分建議加列單位。	依委員意見加列單位，如期末報告第三章第三節 P.23。
5	本期中報告第 39 頁中第 10 行混凝土配比是否為「爐石混凝土」。	配比為「爐石混凝土」，以加列文字說明，如期末報告第四章第一節 P.39。
6	本期中報告第 31 頁提及使用酸溶法量測氯離子，請說明原因。	因水溶法無法量測到礦物摻料所固結的氯離子，故採酸溶法。
7	本期中報告第 53 頁中表 4-5 之組別 F655 之氯離子穿透性判斷為何為	係依 CNS 14795 標準表 1 判斷。

	是「中」。	
8	本期中報告第 64 頁中陰極槽是否改為「陽極槽」。	係為誤植已加以修正，如期末報告第四章第三節 P.64。
陳水龍委員		
1	研究成果、進度及結果佳。	感謝委員意見，將依服務建議書進度持續辦理。
2	現地混凝土不易判定是否有添加爐石或飛灰，該如何先行判別？才適用建議之調整公式。	目前 RCPT 常用於混凝土廠拌驗證其配比設計耐久性使用，因此於廠拌階段便可由書面配比資料或新拌時觀察是否使用飛灰與爐石摻料。另由於飛灰與爐石混凝土為近 20 年開始頻繁使用之材料。建議可由原建築結構原始竣工資料得知配比是否使用爐石或飛灰。
李釗委員		
1	本期中報告內容符合計畫要求。	本研究將持續依計畫內容進行。
2	<p>1. 因在混凝土中使用飛灰或水淬爐石粉等礦物摻料，可能會改變混凝土中電解質含量，而造成與未添加礦物摻料的混凝土有不同的氯離子傳輸行為。建議在本年度計畫中做初步評估下列建議的可行性，若可行待下年度再另案執行研究：</p> <p>(1) 依目前通電模式先傳輸氯離子，至穩態階段，再進行量測氯離子穿透的電量。</p> <p>(2) 依目前通電模式先傳輸其他陰離子，如氫氧根離子等，待進入穩態階段後，再</p>	感謝委員意見，由於受限研究期程僅 10.5 個月，無法進行太多研究，將會列於建議供後人參考。

	改通氯離子，量測氯離子的傳輸行為。	
趙文成委員		
1	本期中報告第 14 頁中 $\text{SiO}_2 + \text{SiO}_2 + \text{SiO}_2$ 應係 $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ 。	依委員意見加以修正，如期末報告第二章第二節 P.14。
2	本期中報告第 22 頁中拌合水宜自行測試，而非由自來水公司提供。	依委員意見以改由自行測試，如期末報告第三章第二節 P.22。
3	本期中報告第 31 頁最後 1 行，文字「梨子」應修正為「離子」。	依委員意見加以修正，如期末報告第三章第四節 P.31。
4	本期中報告第 33 頁中方程式 3-1， $\text{Ag}^{++} + \text{Cl}^- \rightarrow \text{AgC}$ 應為 AgCl 。	依委員意見加以修正，如期末報告第三章第四節 P.33。
5	本期中報告第 34 頁中方成式 3-2， $\text{ClO}^- + \text{Cl}^- + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{AgC}$ 應為 AgCl	依委員意見加以修正，第三章第四節 P.34。
6	本期中報告第 65 頁圖 4-29，當 w/c 越小，RCPT 值越小，宜參考文獻及自行分析其原因，對本研究之價值將大幅提昇。	因 w/c 越小混凝土內部孔隙結構越緻密，導致 RCPT 值越小。
陳建忠組長		
1	本期中報告中第 2 章 RCPT 現行試驗標準說明，請補充是哪一種標準。	RCPT 現行試驗標準，目前有美國 ASTM C1202、AASHTO T277、與我國 CNS 14795 可供參考，以補充說明如期末報告第二章第一節。P.9

附錄四-第二次專家諮詢會議紀錄

內政部建築研究所

103 年度建築先進技術創新開發與推廣應用計畫協同研究計畫「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」第二次專家諮詢會議紀錄

一、時間：103 年 10 月 9 日（星期四）下午 2:00

二、地點：內政部建築研究所材料實驗中心 4 樓簡報室（台北市文山區景福街 102 號 4 樓）

三、主席：楊協同主持人仲家

紀錄：卓世偉

四、出席及請假專家委員：（如簽到單）

出席：李委員釗、詹委員穎雯、廖委員文正、王委員韡蓁、陳委員育聖、鄭委員瑞濱

五、列席：本研究參與人員（如簽到單）

六、主持人報告：本案為本所建築先進技術創新開發與推廣應用計畫協同研究計畫。本次為期末報告前第 2 次專家諮詢會議，目前已完成服務計畫書所有研究內容，並有相關研究成果，請各位專家委員對本研究提供相關意見。

七、本研究報告：詳如簡報資料。

八、專家委員發言重點

1. 詹委員穎雯

- A. 報告資料 P.5 圖，飛灰混凝土在替代量 50%時，抗壓強度有反轉之情形，建議加以探討其原因。
- B. 在 RCPT 總電荷量與氯離子深度之間的關係圖，飛灰與爐石混凝土迴歸線均從原點開始。而一般混凝土的迴歸線並未從原點開始，與其他混凝土所顯示的成果並不一樣，建議加以探討。

2. 李委員釗

- A. 仍與第一次專家會議一樣，建議後續若有延續研究時，可不要侷限於標準方法上的試驗步驟規定，如試驗只有 6 小時，前處理可稍微做改變，如一直通電到氯離子通過試體達到穩態階段後，再繼續進行電流量測過程，藉以評估是否可避免飛灰或爐石使得試驗所造成的誤差。

或將前處理的蒸餾水改為飽和氯化鈉溶液，讓試體於試驗前內部充滿氯化鈉後再通電，藉以消除試體內部孔隙水成分的影響後進行探討。

B. RCPT 試驗電極網是否有貼在試體上需要加以說明，因為貼在試體上可能會導致氯離子貼近在試體表面上，造成量測上的誤差。

3. 廖委員文正

A. 本次研究所才採用的混凝土內氯離子濃度量測是採用酸溶法或水溶法，兩者差異性或選擇方式對此次研究意義。

B. 由研究發現試體內部的氫氧根濃度有可能會影響 RCPT 試驗結果，但會不會僅限定幾個替代量的配比。

C. 若依據研究成果水灰比 0.3 未添加礦物摻料的配比其 RCPT 分類是中度抗氯離子傳輸特性。如果依分類來看要達到極低氯離子傳輸特性，是不是沒有任何 OPC 配比可以達到。

4. 陳委員育聖

A. 一般 OPC 配比 RCPT 總電荷量與氯離子深度之間關係圖的迴歸曲線最後三點數據差異頗大是否有忽略掉。

B. 氯離子深度定義點是否取較大一點值，這樣在一些穿透試體的配比也可以有相關深度數據可供比較。

5. 王委員韡蓓

A. 建議後續研究可進行爐灰混凝土相關研究與取得現有老劣化建築物混凝土電量量測值與配比資料，會使此方法更加完善。

B. RCPT 試驗結果電荷量與真正混凝土耐久性對應是否有定性的數據描述，或者可由 7 天 RCPT 試驗結果可驗證長期混凝土耐久性的方法。

6. 鄭委員瑞濱

A. RCPT 總電荷量 2000 庫倫與 4000 庫倫是不是可以反應混凝土不同年份的耐久性。

B. RCPT 試驗是否有考量混凝土與地下水長期接觸對混凝土耐久性的影響。

7. 陶主任其駿

- A. 迴歸方程式常數項小數點是否有物理上之意義。
- B. 目前各配比 28 天與 91 天材齡相關修正方式均為線性，過去是否有相關文獻與試驗標準有相同關係式建立。

九、本研究回應

1. 有關飛灰混凝土在替代量 50%時，強度有反轉現象，係因為飛灰替代量在超過 40%以上時，內部孔隙結構並不會因為飛灰替代量增加而有大幅改善，導致產生反轉現象。
2. OPC 混凝土截距推測係因為一般混凝土相較於添加礦物摻料混凝土配比內部孔隙水氫氧根濃度較高，使得初期通過的電流量是氫氧根濃度造成並不是氯離子移動的情形，因此導致有氯離子深度為零，而有截距產生。
3. RCPT 試驗電極網並非貼在試體表面，而是接近試體。
4. 本次試驗係採用酸溶法，因為酸溶法可以反應所有固結與游離性氯離子濃度，而本研究探討係 RCPT 電量與進入氯離子濃度並不是評估鋼筋是否腐蝕的臨界濃度，所以採用酸溶法。且水溶法與酸溶法根據我們過去的研究，兩者之間具有一定之關聯性。
5. 根據文獻與我們的經驗，未添加礦物摻料的混凝土配比需要以注膠高分子或加入矽灰才可能達到極低或可忽略（小於 100 庫倫）氯離子傳輸特性的分類。
6. 有關 OPC 配比 RCPT 總電荷量與氯離子深度之間關係圖的迴歸曲線最後三點數據差異頗大係因為氯離子以穿透試體。另氯離子深度定義點是否取較大一點值方向值得後續研究進行討論，未來後續研究我們也會朝向這個意見進行。
7. 電荷量與氯離子進入深度之關係迴歸線已將所有 28 天與 91 天試體試驗結果納入。
8. 目前試驗標準並未將混凝土與地下水長期接觸對混凝土耐久性的影響列入考量。
9. 有關迴歸方程式常數項小數點將依濤主任意見修正。
10. 目前的線性迴歸方程式的建立為本研究之重要發現，過去並無相關文獻提到此發現。

十、討論事項：無

十一、臨時動議：無

附錄五-期末審查意見與回應

內政部建築研究所103年度建築先進技術創新開發與推廣應用計畫
 畫協同研究計畫(三)協同研究計畫第1案「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」

期末審查委員發言單及回應一覽表

項次	審查意見	本研究回應
吳志興委員		
1	<p>期末報告第 90 頁，若混凝土中無其他離子，則總電量應完全來自 Cl⁻，控制組之迴歸線應通過圖 4-63 之原點。但如今圖 4-63 所顯示，控制組之迴歸線未通過原點，反而添加飛灰、爐石之迴歸線通過原點。為何如此？請說明。</p>	<p>控制組 OPC 迴歸線並沒有通過原點，主要係 RCPT 開始時電流量受到氫氧根濃度的影響，並非是氯離子。</p>
2	<p>期末報告圖 4-65 之計算結果，飛灰混凝土 F352 之總通過電荷為控制組 C350 之 0.189 倍，然而圖 4-67 卻顯示為 0.11 倍，是否有誤？請詳查。</p>	<p>委員所提之控制組 C350 電荷量係為誤植，已進行更正，如 P.93 圖 4-65。</p>
3	<p>期末報告圖 5-1、圖 5-2 之迴歸曲線，建請加註 R²。</p>	<p>感謝委員意見，P.98 圖 5-1 與 P.99 圖 5-2 已加註 R²。</p>
4	<p>建請加列依式 5-4 及式 5-5 修正後之電量圖。</p>	<p>感謝委員意見，已加列電量圖，如 P.100 圖 5-3 與圖 5-4。</p>
5	<p>各圖符號之選用，建請考慮採黑白</p>	<p>感謝委員意見，已考慮採黑白輸出亦</p>

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

	輸出亦能辨識之符號。	能辨識之符號。
詹穎雯委員		
1	本研究頗為詳實，試驗結果之整理非常完整深入。	感謝委員意見。
2	認同本研究結論所提出之含飛灰或爐石混凝土之電滲量修正公式，惟本文之修正公式應僅適用本研究案所使用的飛灰、爐石材料，而非所有的飛灰及爐石。	將依委員意見於結論說明強調僅適用本研究案所使用的飛灰、爐石材料，而非所有的飛灰及爐石，如成果報告 P.107 第七章所示。
陳豪吉委員		
1	本研究成果極為豐碩，具學術參考價值。	感謝委員意見。
2	摘要中部分數據有誤，請修正。	依委員意見加以修正，如成果報告摘要。
3	氯離子侵入深度與其含量是相隨的變化，本文以氯離子含量 0.01% 定義其侵入深度，若以不同氯離子含量定義其侵入深度時，結果是否會改變？請說明。	氯離子含量 0.01% 定義其侵入深度，係為 Error function 迴歸曲線定義為 2 個反曲點底部所致。
林增吉委員		
1	本研究案標題「飛灰爐石混凝土」，是指「飛灰混凝土」及「爐石粉混凝土」，建議於前言中明	感謝委員意見，將於成果報告 P.7 第一章第五節由研究範圍中說明強調，以避免誤會為「飛灰並加爐石粉」

	示，以避免誤會為「飛灰並加爐石粉」之混凝土。	之混凝土。
2	建議將結果整理成簡易參考表，以利實務業界參考使用	感謝委員意見，已加列簡易參考表，如 P101 第五章表 5-1 所示。
張奇偉委員		
1	電量調整公式是否適用於目前所使用的飛灰與爐石材料？請說明。	感謝委員意見，將於結論說明強調僅適用本研究案所使用的飛灰、爐石材料，而非所有的飛灰及爐石，如成果報告 P.107 第七章所示。
鄭瑞濱委員		
1	本研究案內容豐碩且詳實。	感謝委員意見。
2	本研究案之試驗變數以「水泥+爐石」、「水泥+飛灰」為主要內容。建議未來可規劃研究「水泥+爐石+飛灰」，以貼近實務現況。	感謝委員意見，將於成果報告 P.108 第七章第二節建議說明。
3	不同齡期氯離子滲入的曲線間，是否可能存在與耐久行為之關聯性，值得進一步研究。	感謝委員意見，將於成果報告 P.108 第七章第二節建議說明。
4	OH ⁻ 的效應會影響電量的判定。故礦物摻料置入混凝土中造成鹼度的影響，應可加以探討。	感謝委員意見，將於成果報告 P.108 第七章第二節建議說明。
5	本研究案成果，具參考的價值。	感謝委員意見。
鄭安委員		
1	研究方法與過程嚴謹，研究成果符合預期成果需求。	感謝委員意見。

快速氣離子穿透試驗於含飛灰爐石混凝土耐久性能評估之研究

2	<p>期末報告摘要之第 2 段「研究由今年 2 月底開始至今共歷經 4 個月」有誤，請修正。</p>	<p>感謝委員意見，已於摘要中加以修正。</p>
3	<p>期末報告第 97 頁，「.....在依 CNS 14795.....」請修正為「.....再依 CNS 14795.....」</p>	<p>感謝委員意見，已於 P.99 文字中加以修正。</p>
4	<p>研究成果提出飛灰及爐石粉混凝土 RCPT 試驗之修正值，對於設計實務具實質貢獻。建議日後可依循此研究方法，對於常用之礦物摻料混凝土耐久性進行有系統之研究。</p>	<p>感謝委員意見，將於成果報告 P.108 第七章第二節建議說明。</p>
<p>陳建忠組長</p>		
1	<p>期末報告第 98 頁起，已有修訂 CNS 14795 條文草案，宜於最後一章提出建議，請經濟部標準檢驗局（列為主辦機關）循標準之作業程序修訂。</p>	<p>感謝委員意見，將於成果報告 P.108 第七章第二節建議說明。</p>
<p>鄭主任秘書元良</p>		
1	<p>本案研究成果提出兩個方程式供 RCPT 試驗運用時修正，而這兩個方程式是否有條件限制？建議於結論建議中說明。未來對 CNS 14795 標準增修時也應對這兩個方程式適用範圍加以限制，使其更為嚴謹。</p>	<p>感謝委員意見，將於成果報告 P.107 第七章中說明。</p>

快速氣離子穿透試驗於含飛灰爐石混凝土耐久性能評估之研究

快速氣離子穿透試驗於含飛灰爐石混凝土耐久性能評估之研究

出版機關：內政部建築研究所

電話：(02) 89127890

地址：新北市新店區北新路3段200號13樓

網址：<http://www.abri.gov.tw>

編者：鄭元良、楊仲家、卓世偉、林志彥、鄒思宇、厲妮妮、周楷峻、江慶堂、
高淑文

出版年月：103年12月

版次：第1版

ISBN 978-986-04-2810-0 (平裝)