

財團法人中華顧問工程司
104 年度

金門大橋橋梁工程監測計畫之
長期材料腐蝕試驗

成果報告



財團法人中華顧問工程司
CHINA ENGINEERING CONSULTANTS, INC.

中華民國 104 年 5 月 31 日

目錄

目錄.....	I
圖目錄.....	II
表目錄.....	III
第一章 計畫概述	4
1.1 計畫緣起與目的.....	4
1.2 工作項目	4
1.3 研究流程與進度.....	5
第二章 混凝土試體製作及新拌性質試驗.....	6
2.1 混凝土配比.....	6
2.2 新拌性質試驗方法	6
2.3 新拌性質試驗結果.....	9
2.4 混凝土試體製作.....	10
第三章 混凝土之力學性質試驗	12
3.1 力學性質試驗方法	12
3.2 力學性質試驗結果.....	12
第四章 混凝土之乾縮潛變試驗	14
4.1 乾縮潛變試驗方法	14
4.2 乾縮試驗結果.....	18
4.3 潛變試驗結果.....	20
第五章 混凝土之耐久性試驗	22
5.1 耐久性試驗方法.....	22
5.2 RCPT 試驗結果	29
5.3 ACMT 試驗結果.....	31
第六章 混凝土之水中磨耗試驗	35
6.1 水中磨耗試驗方法	35
6.2 水中磨耗試驗結果.....	35
第七章 結論	37
參考文獻.....	38

圖目錄

圖 2-1 坍流度試驗裝置圖	7
圖 2-2 自充填混凝土流下性試驗裝置圖	7
圖 2-3 自充填混凝土障礙通過性試驗裝置圖	8
圖 2-4 氯離子含量測定器	8
圖 2-5 混凝土坍度及坍流度試驗情形	10
圖 2-6 下構 350 SCC 配比箱型試驗及 V 漏斗試驗情形	10
圖 2-7 試體製作狀況	11
圖 3-1 混凝土抗壓強度發展狀況	13
圖 3-2 混凝土彈性模數發展狀況	13
圖 4-1 混凝土乾縮設備及量測示意圖	14
圖 4-2 ELE DEMEC 機械應變計	16
圖 4-3 手提式應變指示儀 TC-31K	16
圖 4-4 潛變定壓架	17
圖 4-5 潛變定壓架之組成構造	17
圖 4-6 上構 420 早強配比乾縮量發展情況	19
圖 4-7 上構 420 早強配比潛變係數發展情況	21
圖 5-1 試體切割機內部構造及切割情形	22
圖 5-2 RCPT 試體前處理抽真空設備	23
圖 5-3 RCPT 試驗裝置圖	23
圖 5-4 時間與電流變化關係曲線圖	24
圖 5-5 ACMT 試驗設備示意圖	25
圖 5-6 ACMT 儀器照片	25
圖 5-7 典型的氯離子傳輸歷程圖	26
圖 5-8 過渡時期階段之累積氯離子濃度曲線圖	28
圖 5-9 穩態階段之氯離子與時間關係圖	29
圖 5-10 齡期 56 天試體時間與電流變化關係曲線圖	30
圖 5-11 齡期 90 天試體時間與電流變化關係曲線圖	30
圖 5-12 典型氯離子濃度與時間關係圖	31
圖 5-13 上構 420 早強配比齡期 56 天氣離子濃度與時間關係圖	32
圖 5-14 下構 350 SCC 配比齡期 56 天氣離子濃度與時間關係圖	32
圖 5-15 上構 420 早強配比齡期 90 天氣離子濃度與時間關係圖	33
圖 5-16 下構 350 SCC 配比齡期 90 天氣離子濃度與時間關係圖	33
圖 6-1 水中磨損試驗測儀(ASTM C1138) [142]	35
圖 6-2 下構 350 SCC 配比混凝土磨耗時間與損失體積的關係	36

表目錄

表 2-1 混凝土配比總表.....	6
表 2-2 上構配比新拌性質彙整表.....	9
表 2-3 下構配比新拌性質彙整表.....	9
表 2-4 SCC 充填能力等級規定.....	9
表 2-5 混凝土試體製作規劃表.....	11
表 3-1 混凝土抗壓強度試驗結果(單位: kgf/cm ²).....	12
表 3-2 混凝土彈性模數試驗結果(單位: *10 ³ kgf/cm ²).....	12
表 4-1 上構 420 早強配比之乾縮試驗結果(單位: 10 ⁻⁶).....	18
表 4-2 上構 420 早強配比之潛變試驗結果.....	20
表 5-1 氯離子穿透性與 RCPT 總累積電量關係.....	24
表 5-2 混凝土 RCPT 總累積電荷量試驗結果(單位: coulombs).....	31
表 5-3 各組配比非穩定態傳輸係數 M_n (*10 ⁻¹² m ² /s).....	34
表 5-4 各組配比穩定態傳輸係數 M_s (*10 ⁻¹² m ² /s).....	34
表 6-1 下構 350 SCC 配比混凝土水中磨耗試驗結果.....	36

第一章 計畫概述

1.1 計畫緣起與目的

金門大橋為我國第一座長距離之現代跨海大橋，其所使用之混凝土性質有必要進行深入之探討，以瞭解其與橋梁行為相關之各項材料特性，同時在海域環境下，材料與結構體能具備所需之耐久性需求；並能提供足夠的相關資訊，作為未來橋管單位長期的維護管理決策所需之參考。

台灣過去跨海橋梁之工程案例不多，現有的濱海橋梁多數為跨度小、橋型一般之普通混凝土橋梁，同時，這類橋梁在規畫設計上，多數並沒有在海域環境特性上，針對混凝土橋梁的腐蝕與耐久性相關問題，特別予以考量，所以現存濱海混凝土橋梁的狀況多半不佳，以第一座澎湖跨海大橋為例，即因當時工程技術所限，未考量海洋腐蝕條件且施工品質不佳，而在短短十年內即嚴重腐蝕，隨後重建。因此，嚴格來說，我國跨橋梁構造之設計與施工經驗並不多。然而，隨著經濟與觀光發展，未來可能會有越來越多跨海橋梁新建的需求，因此，有關跨越海域環境的混凝土橋梁在混凝土材料上之相關重要議題，有必要進行探討。

本研究團隊曾於民國 100~101 年執行中華顧問工程司所委託之「跨海橋梁混凝土材料特性之探討」之計畫，分別採用福建省廈門、石井及寧夏等地區生產之粗細粒料，進行跨海大橋相關之混凝土材料特性探討，內容包括混凝土基本力學性質、施工性、耐久性、體積穩定性等議題之探討，進行各項材料性能之實驗研究，並提出材料建議配比、規格與預力混凝土設計參數，供國內跨海大橋的設計及施工之參考。研究成果顯示各地區之粒料有很明顯之差異，對於混凝土之新拌性質有所影響，尤其是自填充混凝土之施工性，因此需慎選所使用之粒料，至於混凝土之耐久性，則可透過配比設計及膠結材料之選擇，達到設計之需求。

本計畫之目的即為驗證金門大橋所使用之混凝土能達到預期之性能，預計進行之項目為以日後橋梁施工之承包廠商所確定使用之材料配比製作混凝土試體，進行相關力學試驗及室內加速試驗，確保承包廠商所使用之粒料及混凝土配比能符合設計之各項需求。

1.2 工作項目

本計畫將進行金門大橋主結構所使用混凝土之相關材料特性之探討，包括基本力學性質、耐久性、長期體積穩定性與抗磨損性質等，其中基本力學性質包含抗壓強度和彈性模數，耐久性包含 RCPT(混凝土抗氯離子穿透能力試驗法)和 ACMT(加速氯離子傳輸試驗)，體積穩定性係針對上構混凝土，包含乾縮試驗和潛變試驗，而抗磨損性質係針對下構混凝土，將進行水中磨耗試驗，完整之試驗規劃如表 1 所示。

本計畫之工作項目與進程序分列如下：

表 1-1 混凝土試驗規劃

項次	評估要點	試驗方法	齡期
1	試體製作		
2	基本力學性質	抗壓強度 彈性模數	14、28、56、90 天
3	耐久性	RCPT(混凝土抗氯離子穿透能力 試驗法) ACMT(加速氯離子傳輸試驗)	56、90 天
4	體積穩定性	乾縮試驗 潛變試驗	養護 14 天後進行 90 天試驗
5	抗磨損性質	水中磨耗試驗	56 天

1.3 研究流程與進度

本計畫預計執行進度如下表所示。

表 1-2 預定進度甘梯圖 (Gantt Chart)

工作項目	第 1 月		第 2 月		第 3 月		第 4 月		第 5 月		第 6 月		備註
	5	14	23	32	41	50	59	68	77	86	95	100	
1. 試體製作	■												
2. 基本力學性質			■										
3. 耐久性							■		■				
4. 體積穩定性			■										
5. 抗磨損性質							■						
6. 報告撰寫									■				
工作進度估計 百分比(累積數)	5	14	23	32	41	50	59	68	77	86	95	100	

第二章 混凝土試體製作及新拌性質試驗

2.1 混凝土配比

金門大橋確定使用之混凝土配比如表 2-1 所示，上部預力結構之混凝土為設計強度 $f_c'=420 \text{ kgf/cm}^2$ 的早強配比，設計坍度為 20 cm；下部結構則採用設計強度 $f_c'=350 \text{ kgf/cm}^2$ 的自充填混凝土(SCC)，設計坍流度為 60~70 cm，上述兩組配比均採用卜特蘭 II 型水泥。

表 2-1 混凝土配比總表

結構種類	配比編號	設計強度 (kgf/cm^2)	水膠比	配合使用量(kg/m^3)							
				II 型水泥	爐石	飛灰	水	粗粒料	細粒料	藥劑	總重
上部結構	T-420-25-20-1 (420 早強)	420	0.30	342	217	62	176	993	573	7.45	2370
下部結構	T-350-19-SR2-1 (350 SCC R2)	350	0.40	254	160	45	178	750	920	5.51	2313

2.2 新拌性質試驗方法

本案混凝土試體之拌合與澆置，皆在負責提供金門大橋工程所需混凝土之「大金端預拌廠」進行，而各項混凝土新拌性質試驗說明如下，其中下部結構混凝土為自充填混凝土，故另需符合自充填混凝土之相關規定。

1. 坍度、坍流度試驗：所需之設備有坍流度錐及試驗用鋼板等，試驗過程符合 CNS 1176「混凝土坍度試驗法」[1]、CNS 14842「高流動性混凝土坍流度試驗法」[2]之規定，試驗設備如圖 2-1 所示。
2. 含氣量試驗：所需之儀器為含氣量試驗儀，試驗過程符合 CNS 9661「新拌混凝土空氣含量試驗法（壓力法）」[3]之規定。
3. 自充填混凝土流下性試驗法：此即俗稱之 V 漏斗試驗法，所需之儀器為 V 形流度錐，試驗過程符合 CNS 14841「自充填混凝土流下性試驗法（漏斗法）」[4]之規定，試驗設備如圖 2-2 所示。
4. 自充填混凝土障礙通過性試驗法：此即俗稱之箱型試驗法，所需之儀器為箱型試驗儀，試驗過程符合 CNS 14840「自充填混凝土障礙通過性試驗法（U 形或箱形法）」[5]之規定，試驗設備如圖 2-3 所示。
5. 氯離子含量測試：所需之儀器為氯離子含量測定器，試驗過程符合 CNS 13465「新拌混凝土中水溶性氯離子含量試驗法」[6]附錄 A 之簡易測定法的規定，試驗設備如圖 2-4 所示。

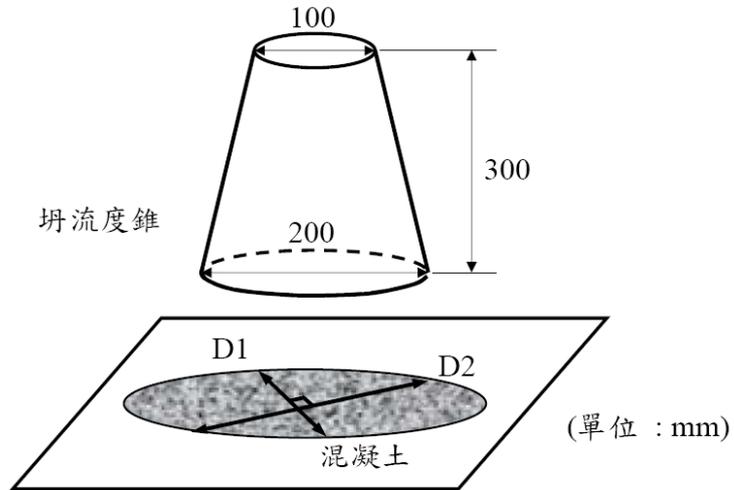


圖 2-1 坍流度試驗裝置圖

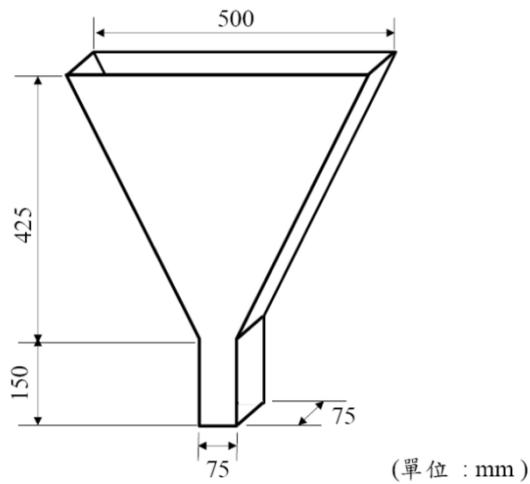


圖 2-2 自充填混凝土流下性試驗裝置圖

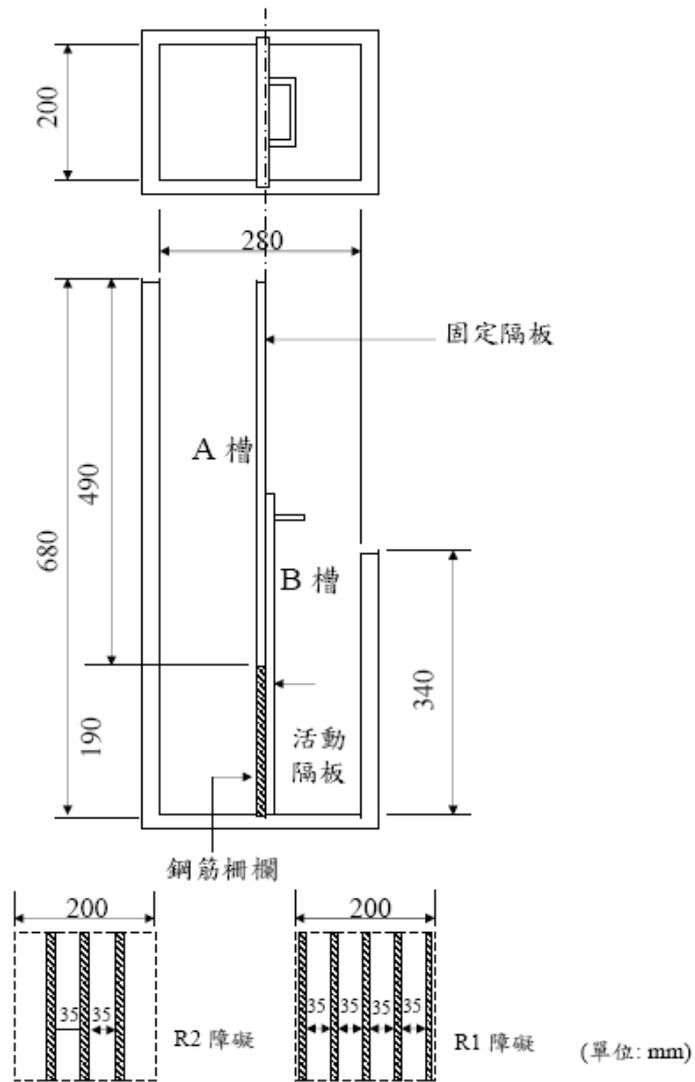


圖 2-3 自充填混凝土障礙通過性試驗裝置圖



圖 2-4 氯離子含量測定器

2.3 新拌性質試驗結果

上部結構配比新拌性質主要進行坍度、含氣量及氯離子含量試驗，試驗結果如表 2-2 所示；下部結構配比則進行坍流度、氯離子含量試驗，由於其為自充填混凝土，故需另外進行驗證其自充填性能之 V 漏斗試驗、箱型試驗(鋼筋障礙為 R2 等級)及記錄 T50 (50cm 坍流度達到之時間)，試驗結果如表 2-3 所示，關於 SCC 充填能力等級規定如表 2-4 所示。可發現 2 組配比之新拌性質均符合設計要求及相關規定。

表 2-2 上構配比新拌性質彙整表

配比	坍度 (cm)	含氣量 (%)	氯離子含量 (kg/m ³)	拌合溫度 (°C)
T-420-25-20-1 (420 早強)	22.5	1.4	0.009	17.8

表 2-3 下構配比新拌性質彙整表

配比	坍流度 (cm)	T50 (sec)	V 漏斗 (sec)	箱型試驗 (R2) (cm)	氯離子含量 (kg/m ³)	拌合溫度 (°C)
T-350-19-SR2-1 (350 SCC R2)	68 × 69	6.5	9.9	33.5	0.031	17.2

表 2-4 SCC 充填能力等級規定

SCC 充填能力等級		1	2	3
構造條件	鋼筋最小間距(cm)	3.5~6	6~20	20 以上
	鋼筋量(kg/m ³)	350 以上	100~350	100 以下
U 型或箱型試驗容器之充填高度(cm)		30 以上 (R1 障礙)	30 以上 (R2 障礙)	30 以上 (R3 障礙)
粗粒料之絕對體積(m ³ /m ³)		0.28~0.31	0.30~0.33	0.30~0.36
流動性	坍流度(cm)	65~75	60~70	50~65
黏稠性	V ₇₅ 漏斗流下時間(sec)	10~25	7~20	7~20
	50cm 坍流度到達時間(sec)	5~20	3~15	3~15



上構 420 早強配比



下構 350 SCC 配比

圖 2-5 混凝土坍度及坍流度試驗情形



圖 2-6 下構 350 SCC 配比箱型試驗及 V 漏斗試驗情形

2.4 混凝土試體製作

混凝土之拌合與試體製作，於 94 年 1 月 13 日在金門大橋混凝土供料之拌合廠進行，試體製作完成後 3 天的 1 月 16 日裝箱寄送回台灣大學材料試驗室，並於 1 月 19 日收到試體。此外，試體於金門 3 天期間並未拆模養護，主要目的為使試體連模一起運送，以避免試體在寄送過程中碰撞損毀，因此試體直至 1 月 19 日送達台灣後方才開始養護。各項試驗之試體種類與試體數量詳如表 2-5 所示，試體製作狀況如圖 2-7 所示。

表 2-5 混凝土試體製作規劃表

試驗項目	試體尺寸	每組配比 試體數量(個)	規範
抗壓試驗	Ø 10×20 cm	3 ×4(齡期)=12	CNS 1232[7]
彈性模數	Ø 10×20 cm	3 ×4(齡期)=12	ASTM C469[8]
RCPT	Ø 10×5 cm	3×2(齡期)=6	CNS 14795[9]
ACMT	Ø 10×5 cm	3×2(齡期)=6	-
乾縮試驗	7.5×7.5×28 cm	3	ASTM C596[10]
潛變試驗	Ø 10×30 cm	3	ASTM C512[11]
水中磨耗試驗	Ø 30×10 cm	2	ASTM C1138[12]



圖 2-7 試體製作狀況

第三章 混凝土之力學性質試驗

3.1 力學性質試驗方法

混凝土力學性質試驗包含抗壓強度及彈性模數，試驗之齡期為 7、28、56 及 90 天。所需之設備包含 MTS 萬能材料試驗機、電阻式變位計、多功能資料收集器等，試驗方法說明如下。

1. 抗壓強度試驗：依 CNS 1232 「混凝土圓柱試體抗壓強度檢驗法」[7]進行測試，試體採用 $\phi 10 \times 20$ cm 之圓柱試驗。
2. 彈性模數試驗：依 ASTM C469[8]以圓柱試體進行受載之變形歷程記錄，由載重及應變關係求得應力應變曲線。

3.2 力學性質試驗結果

混凝土抗壓強度及彈性模數試驗結果分別如表 3-1 及表 3-2 所示，抗壓強度及彈性模數隨齡期之發展狀況分別如圖 3-1 及圖 3-2 所示。上構 420 早強配比及下構 350 SCC 配比齡期 28 天抗壓強度分別為 644 及 516 kgf/cm^2 ，符合設計強度 420 及 350 kgf/cm^2 ，亦符合需求強度 483 及 403 kgf/cm^2 之規定。因試體直到齡期第 6 天由金門運送回台灣試驗室才開始拆模養護，故推估其力學試驗結果可能較正常養護的試體偏低。

表 3-1 混凝土抗壓強度試驗結果(單位： kgf/cm^2)

齡期 配比	7 天	28 天	56 天	90 天
T-420-25-20-1	347	644	669	695
T-350-19-SR2-1	293	516	557	586

表 3-2 混凝土彈性模數試驗結果(單位： $*10^3 \text{ kgf/cm}^2$)

齡期 配比	7 天	28 天	56 天	90 天
T-420-25-20-1	232	321	333	343
T-350-19-SR2-1	196	284	296	310

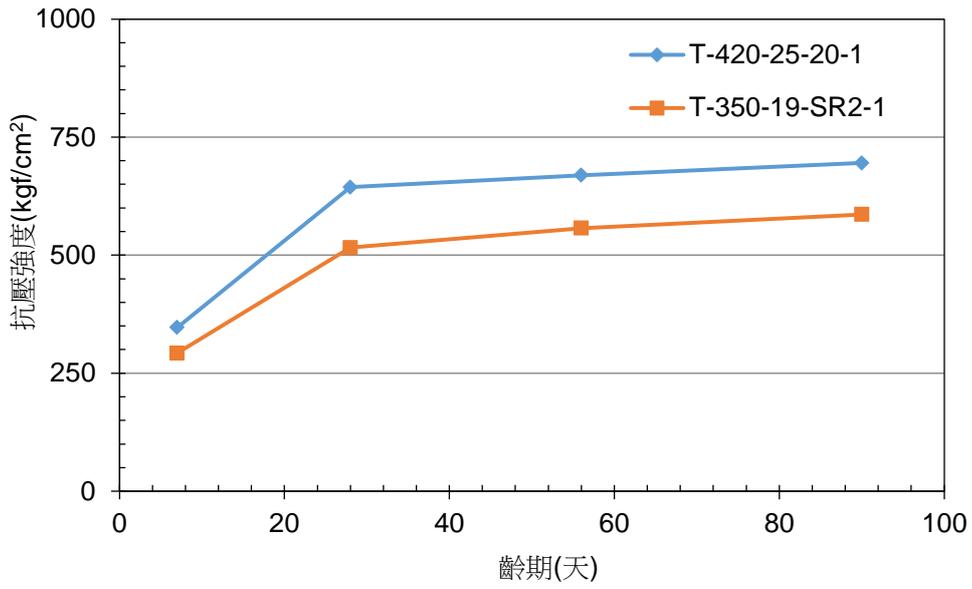


圖 3-1 混凝土抗壓強度發展狀況

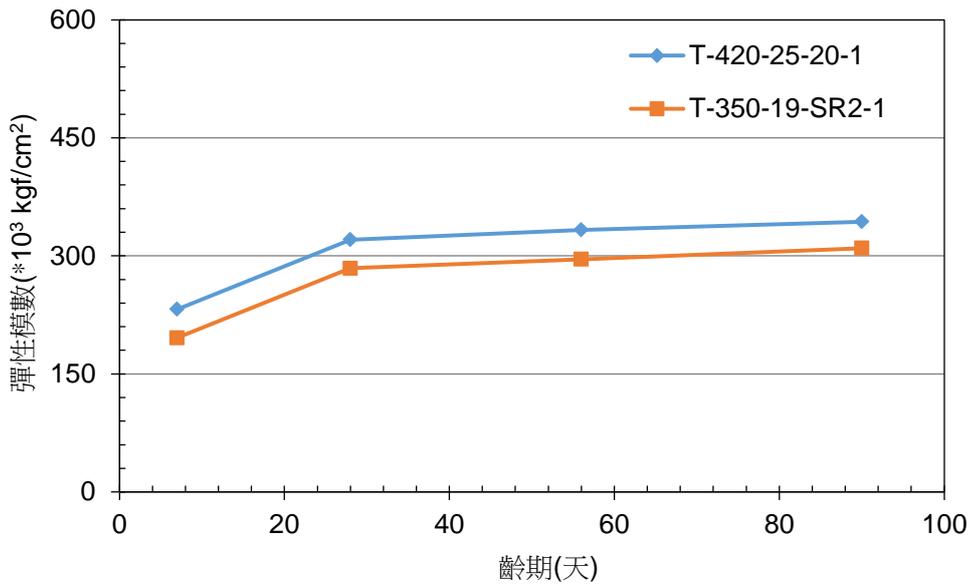


圖 3-2 混凝土彈性模數發展狀況

第四章 混凝土之乾縮潛變試驗

4.1 乾縮潛變試驗方法

一、乾燥收縮試驗

所謂乾燥收縮係指混凝土在乾燥的環境中，由於內部的水蒸氣逐漸向外擴散，導致混凝土內部的相對溼度逐漸降低，而當毛細孔隙中的相對溼度降低，蒸氣壓下降，隨即誘導孔隙周圍膠體表面的吸附水及膠體薄片間的層間水蒸發到乾燥的毛細孔隙中，使得膠體薄片彼此相互靠近，造成混凝土的收縮變形。

本實驗係依據 ASTM C596[10]規範之規定，測試混凝土於不同齡期時其體積變化之趨勢。試驗時於試體養護完成後取出擦乾後量測，所量測之長度作為體積變化量之基準長度；完成量測之試體置於溫度 $23 \pm 1^{\circ}\text{C}$ 、相對濕度 50 % 條件下之恆溫恆濕箱中；一般而言，第一週應每天進行一次量測，爾後固定每 7 天量測一次至第一個月，此後則每個月進行一次量測直至試驗需求齡期，以建立其乾燥收縮之趨勢。



圖 4-1 混凝土乾縮設備及量測示意圖

二、潛變試驗

一般所稱的潛變即為總潛變，所謂總潛變係指混凝土在常溫下，試體內部與外界環境有溼度交換的情況下，混凝土本身承受荷重而隨著時間所產生的體積變形。試驗時於試體養護完成後取出擦乾後，再將試體移置於 ASTM 標準乾燥室 (23°C ，R.H.50%) 內上潛變架，來模擬試體內部與外界環境有溫溼度交換的情況，並以機械式應變計(如圖 4-2)依照時間表按時量取試體之變形量。

本計畫潛變試驗係參考 ASTM C512 “Standard Test Method for Creep of Concrete in Compression” [11]之規定方法進行：

- (1) 試體達養護齡期時，將試體兩端以試體端末研磨機磨平後，安置於潛變架上。
- (2) 將 3 個相同齡期的試體直立重疊，而為求試體受壓均勻，於試體上下兩端各加一混凝土墊塊及一鐵墊塊，且試體與試體、試體與墊塊及墊塊與鐵墊塊間均以石膏(抗壓強度可達 420 kgf/cm^2)黏接。
- (3) 在上面鐵墊塊與上承壓板間置入荷重計與萬向接頭，在下面鐵墊塊與下承壓板間亦置入萬向接頭，其目的在使試體僅受軸向荷重，避免引進彎矩。
- (4) 將千斤頂置於上頂版與上承壓板間，鎖緊上頂版上下螺帽，放鬆上承壓板下螺帽。
- (5) 連接荷重計與手提式應變指示儀 TC-31K(如圖 4-3)，須要先行校正，從 TC-31K 量測數值可以換算施加了多少應力。
- (6) 以機械式應變計讀取校正用標準測棒讀值後，量測混凝土試體六組測距數據並記錄為初始值。
- (7) 操作千斤頂施加荷重，當 TC-31K 顯示荷重達 1 公噸時停止施壓，再讀取六組測距數據並記錄之。查核六組數據相對於起始值之增量，同一試體兩側相對兩組數據之增量應相近，如果太懸殊則應解壓調整千斤頂位置後再加载至 1 公噸、再量測，反覆調整至同一試體兩側相對兩組數據之增量相近，如此可避免偏心載重。
- (8) 加壓至預定荷重(預定荷重為 $1/3 \sim 1/4$ 之混凝土抗壓強度)，加载荷重時應使其略高於預定荷重值，立即鎖緊上承壓板上螺帽並解除千斤頂荷重，此時因螺帽及上承壓板受力變形，荷重會略微下降，核對 TC-31K 顯示之荷重計指示值(換算後)是否在預定荷重值 $\pm 2\%$ 之內，否則需重複上述步驟，反覆調整至符合上述要求。最後讀取六組測距數據並記錄之，由此數據與上項 1 公噸時量測之數據，可求得混凝土潛變試體之彈性模數。
- (9) 依據時間表定期量測數據，每次讀取數據時，同時讀取荷重計讀數，若其值與預定荷重值相差達 2% 以上時，則需補加壓力，以保持一定的壓力值。



圖 4-2 ELE Demec 機械應變計



圖 4-3 手提式應變指示儀 TC-31K



圖 4-4 潛變定壓架

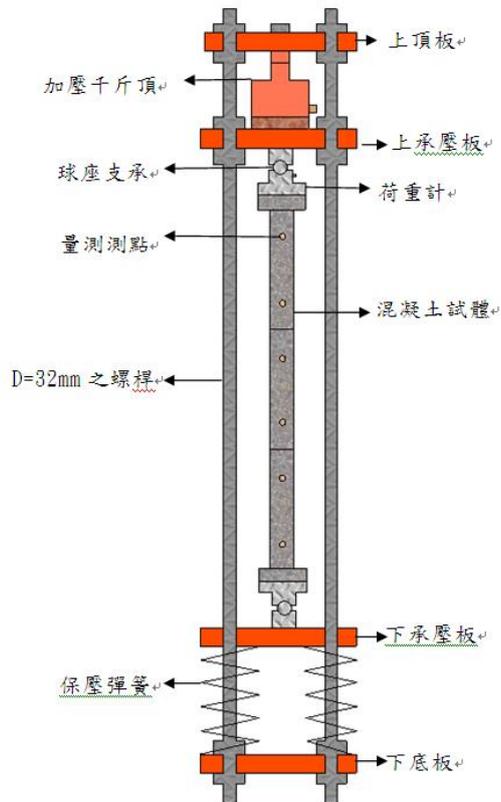


圖 4-5 潛變定壓架之組成構造

4.2 乾縮試驗結果

本試驗於齡期 7 天時，將上構 420 早強配比之試體移置於 ASTM 標準乾燥室 (23°C, R.H.50%) 內進行乾縮量測。試驗結果如表 4-1 所示，乾縮應變量隨齡期發展情況如圖 4-6 所示，可發現齡期 90 天時的乾縮應變量為 672 μ 。

表 4-1 上構 420 早強配比之乾縮試驗結果(單位：10⁻⁶)

t-t'(天)	T-420-25-20-1
0.01	0
0.05	0
0.1	6
0.15	27
1	78
2	114
3	141
4	211
5	225
6	267
7	280
10	329
14	376
18	413
21	448
28	487
35	515
42	560
56	623
70	666
90	672

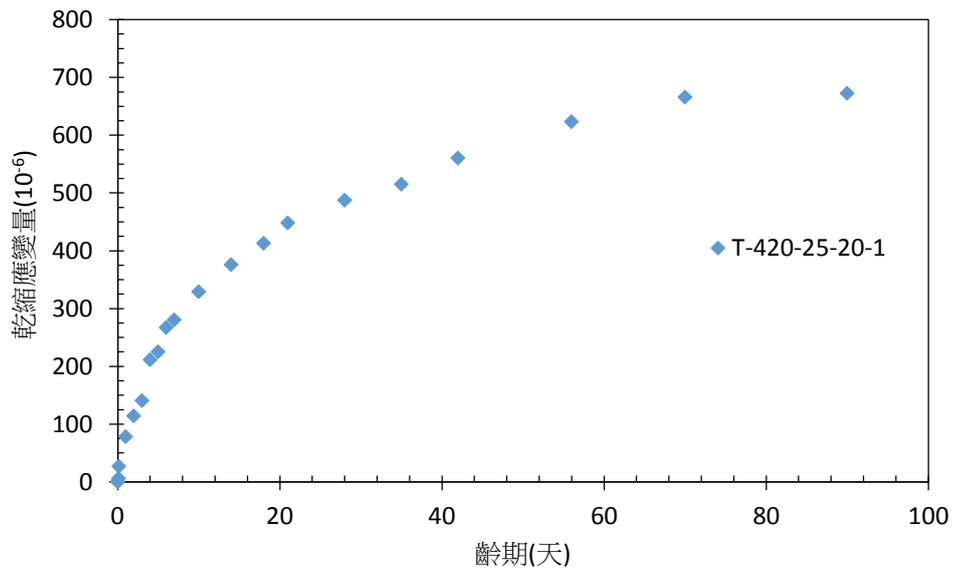


圖 4-6 上構 420 早強配比乾縮量發展情況

4.3 潛變試驗結果

本試驗於齡期 7 天時，將上構 420 早強配比之試體移置於 ASTM 標準乾燥室(23 °C，R.H.50%)內上潛變架，此時量取試體之變形量可得混凝土之總潛變。此外，一般在表示總潛變時，較少直接使用應變量為單位，因潛變量的大小和應力有絕對的關係，若加載應力不同時，便不能直接比較混凝土材料的潛變性質，因此一般都用潛變係數 (creep coefficient)來表示，其為總潛變應變與瞬時彈性應變之比。試驗結果如表 4-2 所示，潛變係數隨齡期發展情況如圖 4-7 所示，可發現齡期 90 天時的總潛變為 124.1 μ /MPa，潛變係數為 2.64。

表 4-2 上構 420 早強配比之潛變試驗結果

t- t'(天)	總潛變 (10 ⁻⁶ /MPa)	潛變係數
0.01	46.3	1.00
0.05	52.6	1.14
0.1	60.9	1.32
0.15	74.8	1.62
1	84.4	1.82
2	85.5	1.85
3	87.1	1.88
4	90.4	1.95
5	91.7	1.98
6	94.4	2.04
7	95.9	2.07
10	98.4	2.13
14	102.7	2.22
18	106.9	2.31
21	108.6	2.35
28	110.1	2.38
35	113.5	2.45
42	116.3	2.52
56	119.2	2.58
70	122.3	2.64
90	124.1	2.68

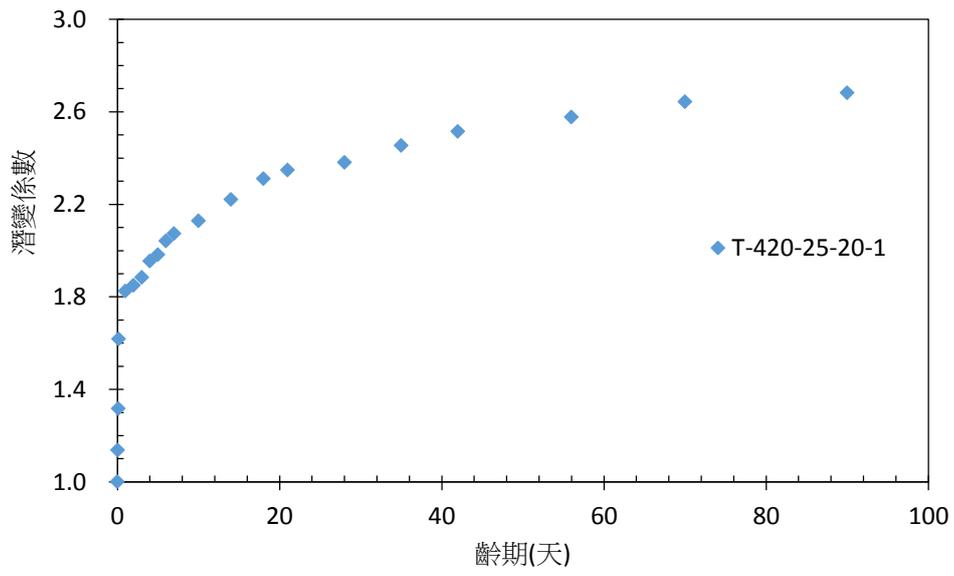


圖 4-7 上構 420 早強配比潛變係數發展情況

第五章 混凝土之耐久性試驗

5.1 耐久性試驗方法

耐久性試驗包含 RCPT(混凝土抗氯離子穿透能力試驗)及 ACMT(加速氯離子傳輸試驗)2種，各項試驗方法說明如下。

一、RCPT 試驗

RCPT 試驗依據 CNS 14795 「混凝土抗氯離子穿透能力試驗法—通過電荷量表示法」[9]之規定進行，試驗方法主要分為試體之前處理與 RCPT 試驗兩部分，試驗方法詳述如下。

1. 試體前處理

使用水冷式鑽石鋸將混凝土試體由中心部份切取 $\varnothing 10\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ 試樣，圖 5-1 為試體切割機內部構造及切割情形。將該試樣放置空氣中至少 1 h，待表面乾燥後以環氧樹脂塗封其側面。圖 5-2 為真空設備圖，為使各試樣孔隙中的含水達飽和狀態，將試體放入真空系統設備的真空容器內進行如下真空處理。



圖 5-1 試體切割機內部構造及切割情形

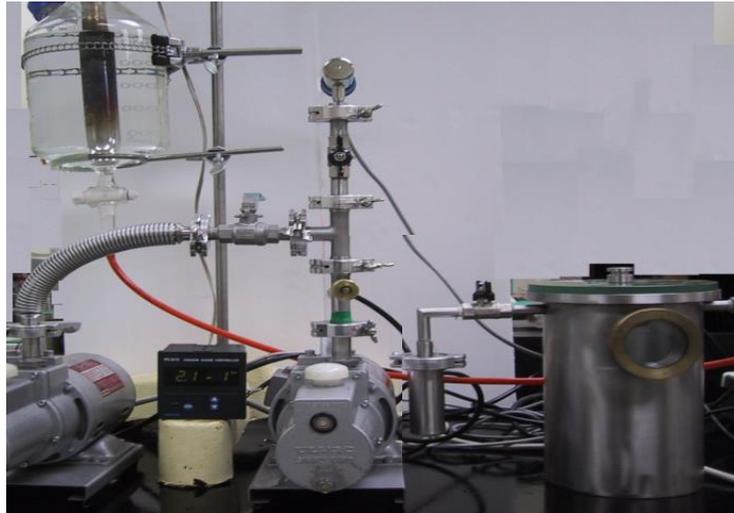


圖 5-2 RCPT 試體前處理抽真空設備

2. 進行 RCPT 試驗

將前處理後之試體依 CNS 14795[9]之試驗設備，如圖 5-3 所示，置於 2 個約 250 ml 的 PVC 槽之間，每槽內置一片 20 號銅網作為電極。其中一槽內放入 3% 濃度氯化鈉溶液並與電源供應器陰極相接，另一槽內放入 0.3 N 濃度氫氧化鈉溶液並與電源供應器陽極相接。並在兩電極間通上 60 Volts 直流電，以數據擷取器記錄 6 小時內電流之變化。

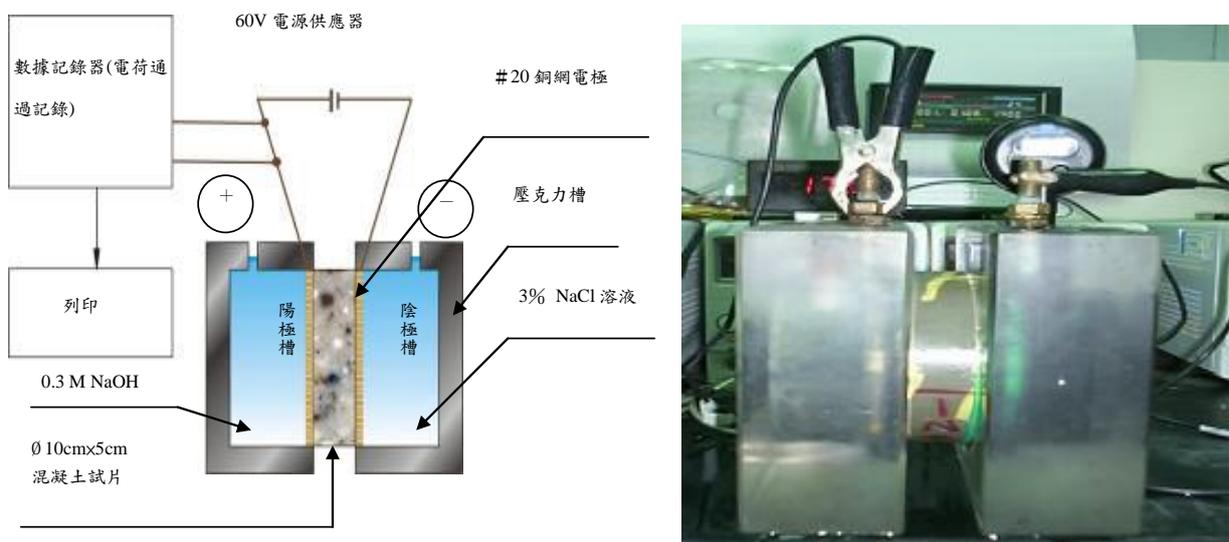


圖 5-3 RCPT 試驗裝置圖

RCPT 試驗主要以試驗期間所通過之總電荷量評估混凝土抵抗氯離子之能力。量測時間與電流變化關係曲線圖如圖 5-4 所示，曲線下之面積即為 6 小時試驗期間所通過之總電荷量，其單位為庫倫(coulombs, 安培-秒)；或每隔 30 分鐘記錄 1 次電流值，直到 6 小時為止，再將所記錄的電流值代入下式，可獲得累積之總電荷量，RCPT 之試驗結果以電荷量依據表 5-1 評估混凝土抵抗氯離子之能力。

$$Q = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + 2I_{90} + \dots + I_{360}) \dots\dots\dots (5-1)$$

上式中， Q ：總電荷量(庫倫)

I_0 ：初始電流(安培)

I_t ：在時間 t (分)的電流(安培)

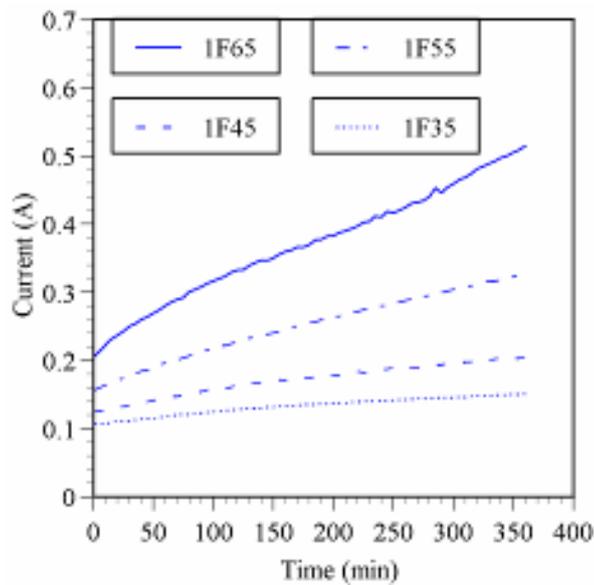


圖 5-4 時間與電流變化關係曲線圖

表 5-1 氯離子穿透性與 RCPT 總累積電量關係

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

二、ACMT 試驗

ACMT（加速氯離子傳輸試驗）之試驗過程分為試體前處理與試驗過程兩部分。試體前處理部分與 RCPT 相同，下述說明試驗過程。

經前處理後之試體置在兩個壓克力槽之間，每個槽內均放置一片 20 號篩徑的銅網做為電極。陽極的試驗槽內置入 0.3N 氫氧化鈉溶液，另一側試驗槽為 3% 氯化鈉溶液做為負極。與 RCPT 不同處在於試驗槽容積與外加電壓伏特數，其中試驗槽溶液由 250 mL 放大為 4,500 mL，試驗槽容積的增大可避免試驗期間溫度所引起的熱焦耳效應，並可同時量測氯離子穿過混凝土到陽極試驗槽中的氯離子濃度，以計算氯離子擴散係數。而為避免長期施加高伏特電壓下對試體孔隙結構破壞與改變，將 RCPT 之外加電壓由 60 V 降至 ACMT 使用之外加電壓 24 V。其試驗設備示意圖，如圖 5-5 所示，相關照片如圖 5-6 所示。所需試驗時間依混凝土之緻密性而定，約為 7~15 天。試驗期間於每 5 分鐘以數據擷取器記錄通過試體之間的電流與氫氧化鈉溶液的溫度。陽極試驗槽中的氯離子濃度約每 8 小時量測 1 次，並利用電位滴定法以 0.01N 標準硝酸銀溶液進行濃度滴定。

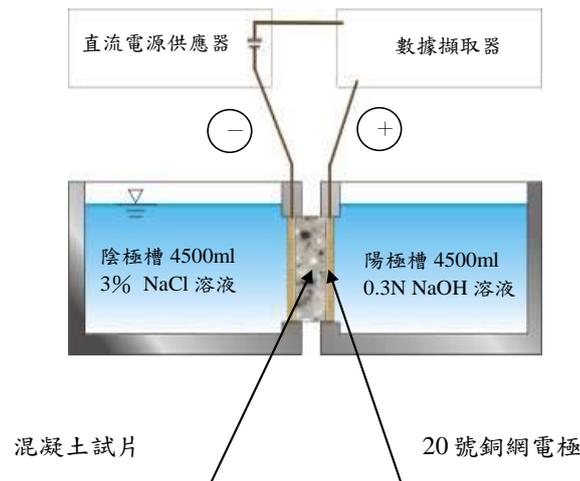


圖 5-5 ACMT 試驗設備示意圖

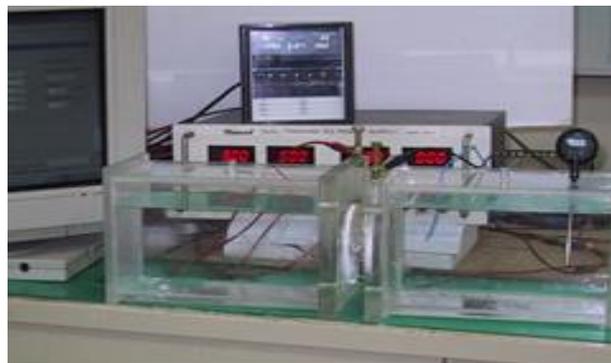


圖 5-6 ACMT 儀器照片

ACMT 試驗於試驗期間由於電場作用的影響，氯離子由陰極槽傳輸至陽極槽，而陽極槽內氯離子濃度與時間的變化為主要量測數據。本研究擬藉由實驗結果，探討氯離子於混凝土中之傳輸行為。圖 5-7 為典型的氯離子傳輸歷程圖，試驗時間為 X 軸，Y 軸為陽極槽累積氯離子濃度。氯離子傳輸歷程依序分成三個階段，分別是非穩態階段、過渡時期階段、穩態階段。非穩態階段氯離子從陰極槽往陽極槽移動，此階段氯離子進入混凝土試片內尚未通過混凝土試片到達陽極槽溶液，陽極槽尚未量測到氯離子濃度。過渡時期階段為氯離子剛通過混凝土試片到達陽極槽，此階段的氯離子濃度不高，且氯離子的流通量呈非線性傳輸。試驗過程中不易分辨氯離子濃度到達穩態階段時之初始濃度。本研究將氯離子流通量呈穩定傳輸之階段即穿透速率 K 為常數，定義為穩態階段。

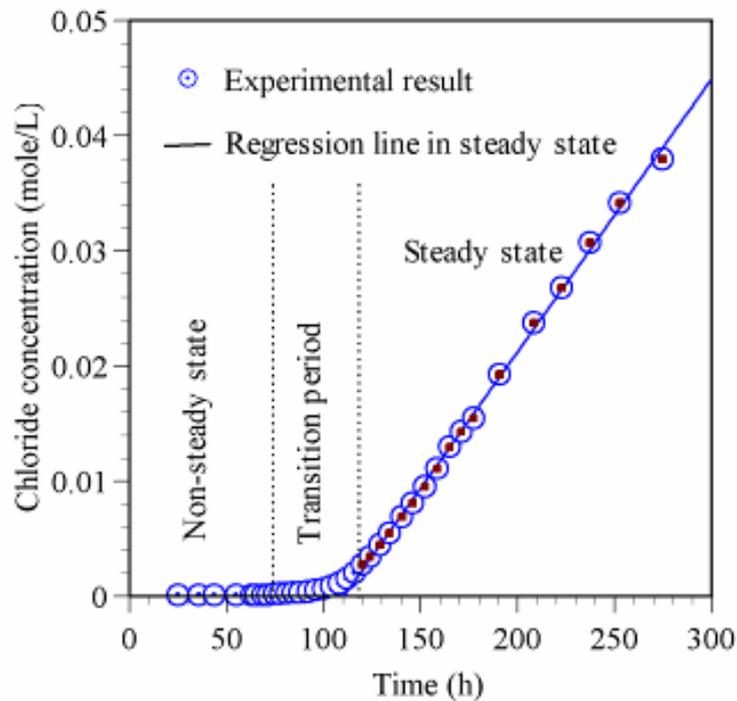


圖 5-7 典型的氯離子傳輸歷程圖

ACMT 之分析將採非穩態傳輸係數及穩態傳輸係數兩種方式分別探討混凝土之耐久性，分別敘述如下：

1. 非穩態傳輸係數 M_{nc}

離子在電位作用下，穿透混凝土表面進入混凝土內部，此藉著電位作用使離子遷移之性質稱為傳輸，由電位所產生的梯度，當做在單位體積溶液下推動離子前進的一個力量，假如在一電場作用下，推動離子前進之力的表示方式如式(5-2)所示：

$$f = -RT \frac{dc}{dx} + zFE \cdot c \dots\dots\dots (5-2)$$

R ：氣體常數 ($R=8.314 \text{ J/m} \times \text{s}^{-1}$)；
 T ：絕對溫度 (K)；
 c ：於 x 距離時之離子濃度 (mole/L)；
 z ：離子價數；
 F ：法拉第常數 ($F=96500 \text{ J/V} \times \text{mole}^{-1}$)

由式(5-2)得到 modified Fick's second law，如式(5-3)所示：

$$\frac{dc}{dt} = \frac{dJ}{dx} = M_{nc} \left(\frac{d^2c}{dx^2} - \frac{zFE}{RT} \cdot \frac{dc}{dx} \right) \dots\dots\dots (5-3)$$

假設於一半無窮域區間，
 邊界條件： $c=c_0, x=0, t>0$ ；
 起始條件： $c=0, x>0, t=0$ ；
 無窮點條件： $c=0, x \rightarrow \infty, t=t_M$ 。

式中 c_0 為混凝土試體表面氯離子濃度， t_M 為氯離子到達無窮域的時間，式(5-3)之解如式(5-4)所示：

$$c = \frac{c_0}{2} \left[e^{\alpha x} \operatorname{erfc} \left(\frac{x + \alpha M_{nc} t}{2\sqrt{M_{nc} t}} \right) + \operatorname{erfc} \left(\frac{x - \alpha M_{nc} t}{2\sqrt{M_{nc} t}} \right) \right] \dots\dots\dots (5-4)$$

$\alpha = \frac{zFE}{RT}$ ；
 $\operatorname{erfc} = (1 - \operatorname{erf})$ ；
 c_0 = 陰極槽初始氯離子濃度 (mole/L)

將式(5-4)簡化，非穩態傳輸係數之計算採用下式：

$$M_{nc} = \frac{RTL}{zFE} \cdot \frac{x_d - \alpha \sqrt{x_d}}{t} \dots\dots\dots (5-5)$$

$$\alpha = 2\sqrt{\frac{RTL}{zFE}} \cdot \operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{2c_d}{c_0} \right)$$

將取樣所得之陽極槽氯離子溶液進行分析，得到累積氯離子濃度與時間的點位，由於不連續的取樣，進行回歸如圖 5-8。ACMT 試驗累積氯離子濃度在過渡時期階段之傳輸速率並非定值，本研究將採氯離子通過混凝土試片到達陽極槽之累積氯離子濃

度 0.000261 mole/L ($C/C_0 = 0.05\%$) 至氯離子穿透速率與時間呈非線性速率傳輸之階段為氯離子的過渡時期階段，其中 C 為氯離子剛通過混凝土試片到達陽極槽時之濃度， C_0 為陰極槽之氯離子濃度，根據回歸結果，求得氯離子穿透混凝土試片的穿透時間，再代入 Modified Fick's second law 式(5-5)求得非穩態傳輸係數。

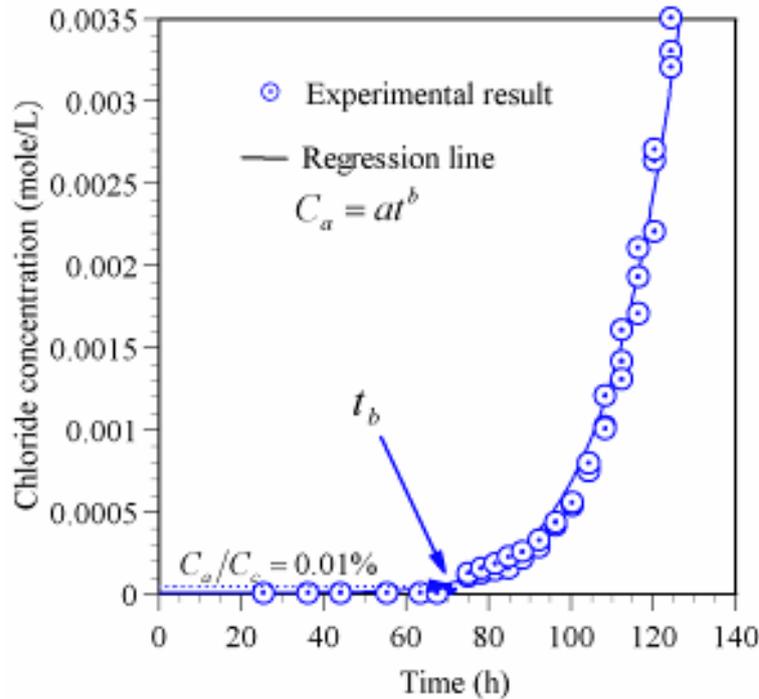


圖 5-8 過渡時期階段之累積氯離子濃度曲線圖

2. 穩態傳輸係數 M_s

離子受外加電場作用下，離子於水泥基複合材料內部充滿孔隙水的狀況下移動，影響整體材料的傳輸機制有濃度梯度、電位梯度、與對流效應。圖 5-9 為穩態階段之累積氯離子濃度與時間之關係曲線圖，累積氯離子濃度到達穩態階段，濃度與時間呈線性關係。由其斜率可計算穩態傳輸係數(M_s)，其方程式如式(5-6)：

$$M_s = \frac{RTL}{zFE_0} \frac{KV}{A} \dots\dots\dots (5-6)$$

M_s =穩態傳輸係數 (m^2/s)；

E =外加電壓 (24 V)；

L =試片厚度 (m)；

c_0 =陰極槽初始氯離子濃度 (mole/L)；

V =擴散槽之體積 (m^3)；

A =試體的表面積 (m^2)。

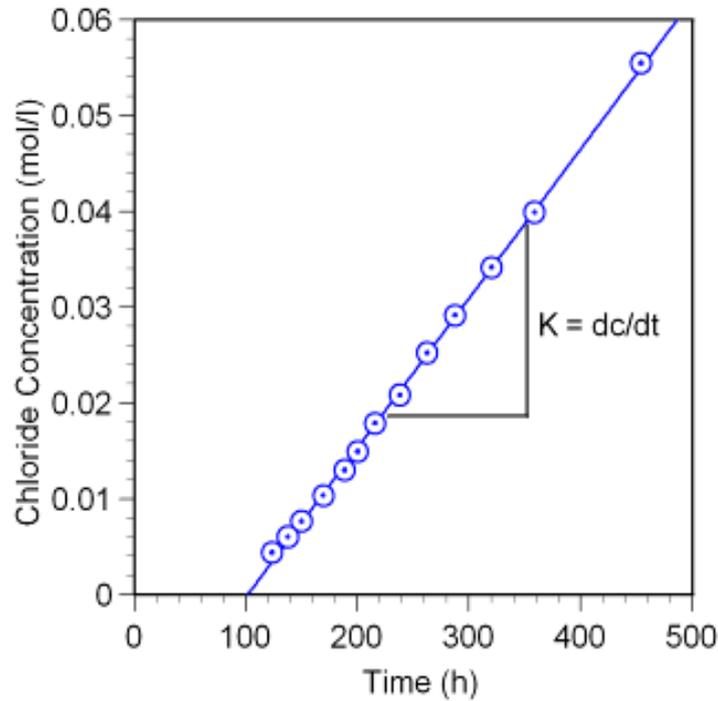


圖 5-9 穩態階段之氯離子與時間關係圖

5.2 RCPT 試驗結果

本計畫之 RCPT 試驗係以齡期達 56 天及 90 天的 2 組配比試體進行，齡期 56 天及 90 天試體其試驗量測時間與電流變化關係曲線圖分別如圖 5-10 及圖 5-11 所示，圖中曲線下之面積即為 6 小時試驗期間所通過之總電荷量 (Coulombs)，RCPT 總累積電荷量試驗結果如表 5-2 所示，且根據表 5-1 對抗氯離子能力的分類方式，依照各組配比之試驗結果註明其氯離子穿透性係屬何種等級。可發現 2 組配比齡期 56 天及 90 天的試驗結果均低於設計要求的 2000 Coulombs，其等級分類均屬於低；此外，隨著水化反應更趨完全，齡期 90 天的試驗結果均低於齡期 56 天。

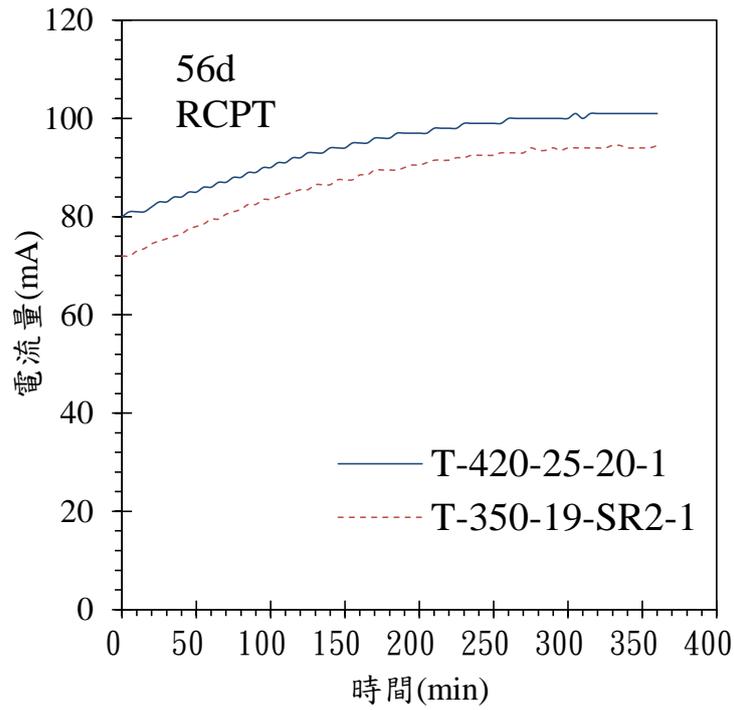


圖 5-10 齡期 56 天試體時間與電流變化關係曲線圖

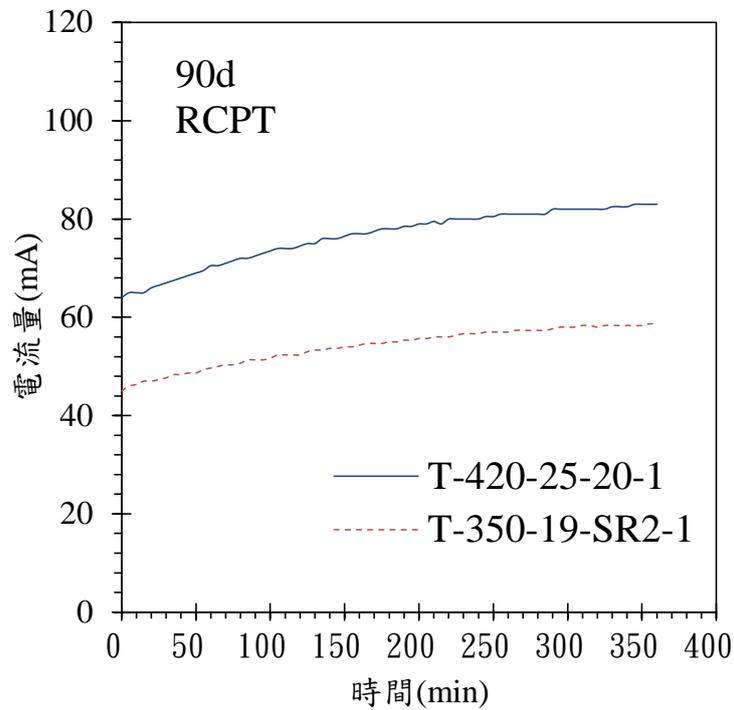


圖 5-11 齡期 90 天試體時間與電流變化關係曲線圖

表 5-2 混凝土 RCPT 總累積電荷量試驗結果(單位：Coulombs)

配比 齡期	T-420-25-20-1	T-350-19-SR2-1
56 天	1858	1724
氯離子穿透性	低	低
90 天	1666	1179
氯離子穿透性	低	低

5.3 ACMT 試驗結果

本計畫之加速氯離子傳輸試驗(ACMT)係以齡期分別達 56 天及 90 天的 2 組配比試體進行。圖 5-12 為 ACMT 試驗結果中典型之氯離子濃度與時間關係圖，試驗初期正極槽 (NaOH 槽) 內量測不到氯離子，此階段中氯離子於混凝土試體內傳輸，尚未穿過混凝土試體，此階段稱之非穩態 (Non-Steady State)；當試驗期增長，穿過混凝土之累積氯離子濃度隨時間的增加而增加，達到每單位時間穿過混凝土之氯離子為定值時，此階段稱之穩態 (Steady-State)。

圖 5-13~圖 5-16 分別為 2 組配比齡期 56 天及 90 天之 ACMT 試驗結果，代表正極試驗槽之氯離子濃度與時間關係圖。

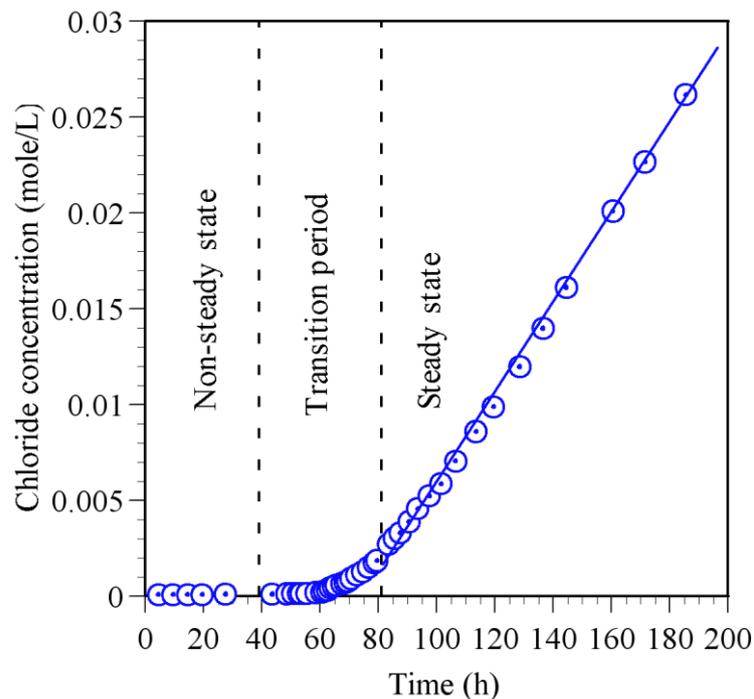


圖 5-12 典型氯離子濃度與時間關係圖

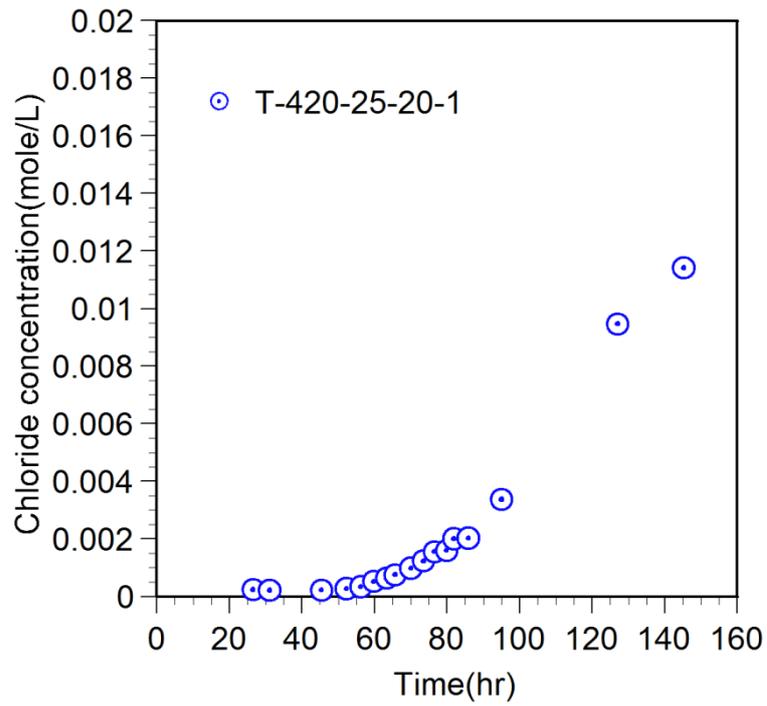


圖 5-13 上構 420 早強配比齡期 56 天氣離子濃度與時間關係圖

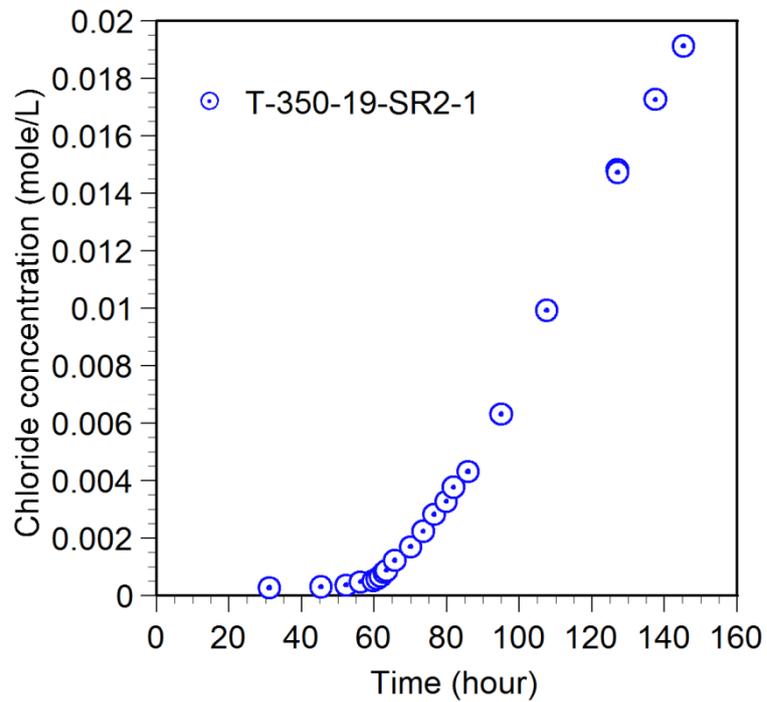


圖 5-14 下構 350 SCC 配比齡期 56 天氣離子濃度與時間關係圖

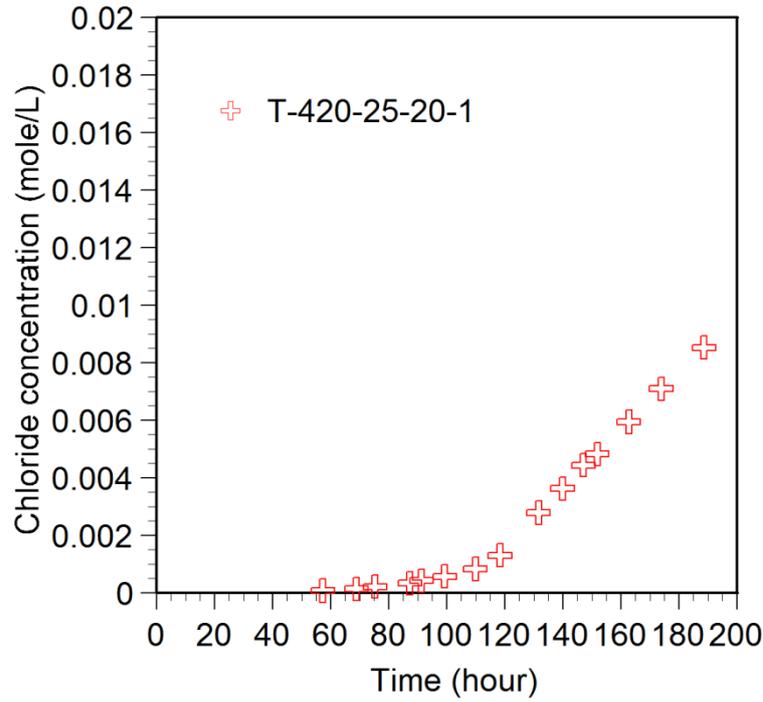


圖 5-15 上構 420 早強配比齡期 90 天氣離子濃度與時間關係圖

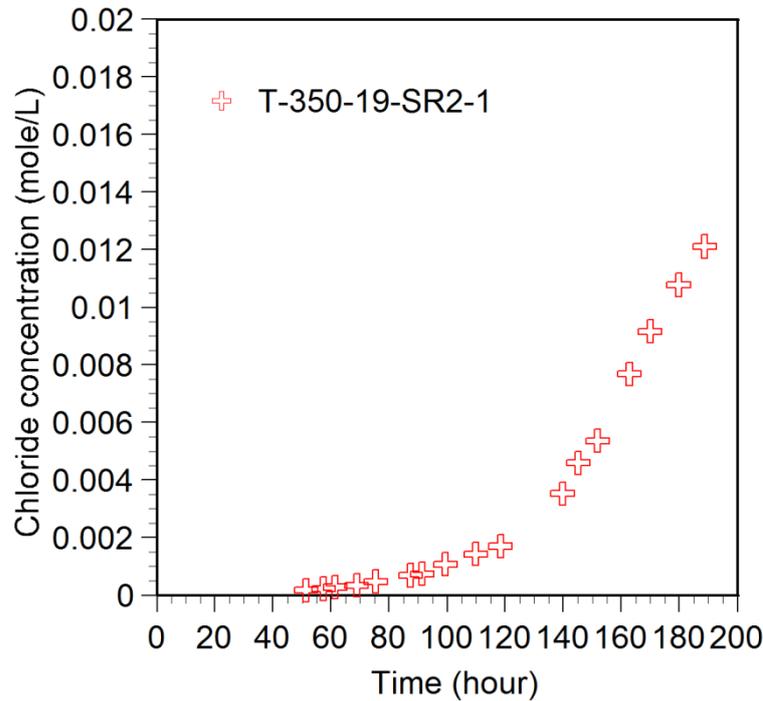


圖 5-16 下構 350 SCC 配比齡期 90 天氣離子濃度與時間關係圖

ACMT 透過量測正極試驗槽的氯離子濃度，利用單位時間氯離子穿過試體之濃度及氯離子穿過試體之時間可分別計算各組配比混凝土之非穩定態傳輸係數及穩定態傳輸係數，其結果分別如表 5-3 及表 5-4 所示。

表 5-3 各組配比非穩定態傳輸係數 M_n ($*10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)

齡期 \ 配比	T-420-25-20-1	T-350-19-SR2-1
56 天	4.41	4.43
90 天	2.6	2.97

表 5-4 各組配比穩定態傳輸係數 M_s ($*10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)

齡期 \ 配比	T-420-25-20-1	T-350-19-SR2-1
56 天	1.63	2.28
90 天	1.29	1.83

第六章 混凝土之水中磨耗試驗

6.1 水中磨耗試驗方法

本試驗依據 ASTM C1138[12]水中磨耗試驗法進行，試驗設備如圖 6-1 所示，主要為模擬水中懸浮顆粒對於混凝土的磨損。每組混凝土配比均以 2 個試體於齡期 56 天時進行水中磨耗試驗，每 12 小時量測試體受磨耗所損失的體積，直至試驗滿 72 小時為止，各組數據為 2 個試體試驗值的平均。

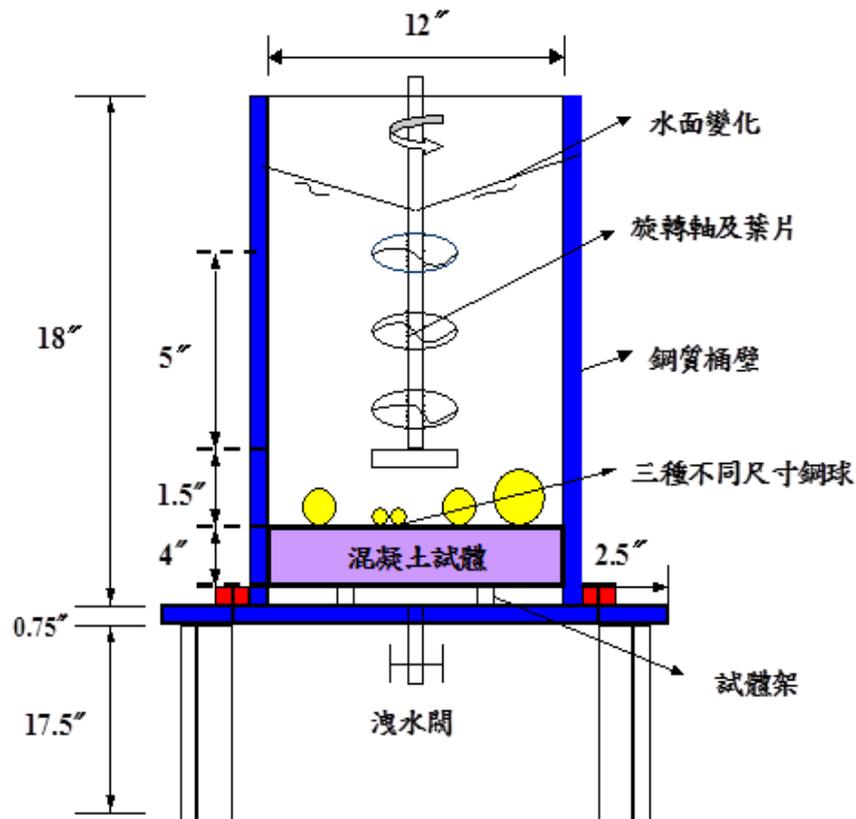


圖 6-1 水中磨損試驗測儀(ASTM C1138) [12]

6.2 水中磨耗試驗結果

本試驗於齡期 56 天時，將下構 350 SCC 配比試驗結果如表 6-1 所示，磨耗時間與損失體積的關係如圖 6-2，下構 350 SCC 配比每 12 小時損失體積介於 27~40 cm³，72 小時累積損失體積為 201 cm³。

表 6-1 下構 350 SCC 配比混凝土水中磨耗試驗結果

時間(hr)	每次損失體積 (cm ³)	累積損失體積 (cm ³)
12	28	28
24	27	55
36	34	89
48	32	121
60	40	161
72	40	201

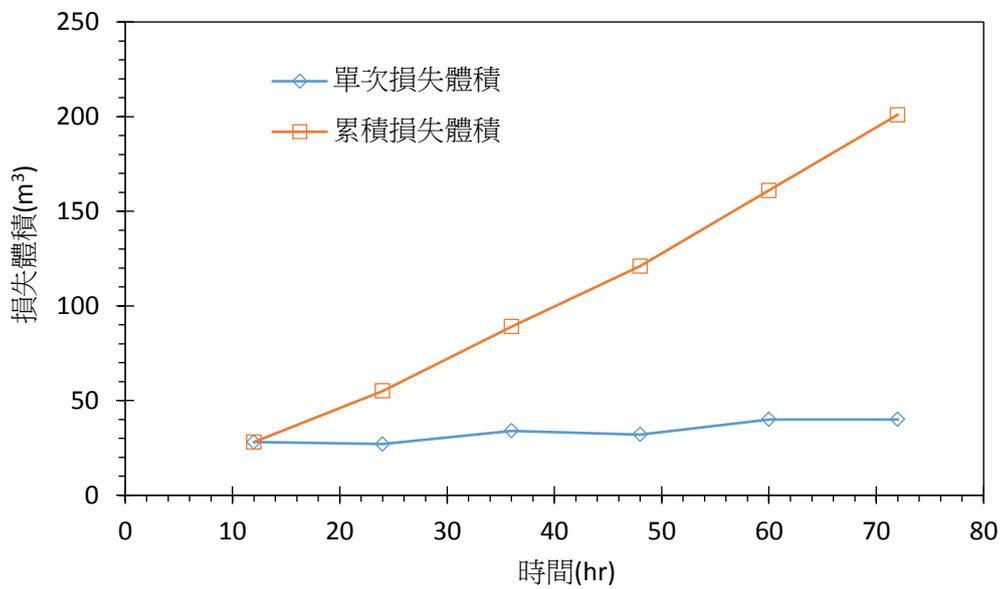


圖 6-2 下構 350 SCC 配比混凝土磨耗時間與損失體積的關係

第七章 結論

1. 由新拌性質試驗及力學性質試驗結果可知，2 組配比之新拌性質及抗壓強度均符合設計要求及相關規定。因試體直到齡期第 6 天由金門運送回台灣試驗室才開始拆模養護，故推估其力學試驗結果可能較正常養護的試體偏低。
2. 由乾縮及潛變試驗結果可知，上構 420 早強配比齡期 90 天時的乾縮應變量為 672μ ，總潛變為 $124.1 \mu/\text{MPa}$ ，潛變係數為 2.64。
3. 由耐久性試驗結果可知，隨著齡期增加水化反應更趨完全，RCPT 及 ACMT 齡期 90 天的試驗結果均較齡期 56 天低。其中 RCPT 方面，2 組配比之齡期 56 天及 90 天的試驗結果均低於設計要求的 2000 Coulombs，其分類均屬於低的等級。
4. 由水中磨耗試驗結果可知，下構 350 SCC 配比 72 小時累積損失體積為 201 cm^3 。

參考文獻

1. CNS 1176, 「混凝土坍度試驗法」, 中國國家標準, 民國 92 年。
2. CNS 14842, 「高流動性混凝土坍流度試驗法」, 中國國家標準, 民國 93 年。
3. CNS 9661, 「新拌混凝土空氣含量試驗法(壓力法)」, 中國國家標準, 民國 76 年。
4. CNS 14841, 「自充填混凝土流下性試驗法(漏斗法)」, 中國國家標準, 民國 97 年。
5. CNS 14840, 「自充填混凝土障礙通過性試驗法(U形或箱形法)」, 中國國家標準, 民國 93 年。
6. CNS 13465, 「新拌混凝土中水溶性氯離子含量試驗法」, 中國國家標準, 民國 103 年。
7. CNS 1232, 「混凝土圓柱試體抗壓強度檢驗法」, 中國國家標準, 民國 91 年。
8. ASTM C469, “Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poissons Ratio of Concrete in Compression”, American Society for Testing and Materials ,2002.
9. CNS 14795, 「混凝土抗氯離子穿透能力試驗法—通過電荷量表示法」, 中國國家標準, 民國 93 年。
10. ASTM C596, “Standard Test Method for Drying Shrinkage of Mortar Containing Hydraulic Cement”, American Society for Testing and Materials ,2009.
11. ASTM C512, “Standard Test Method for Creep of Concrete in Compression”, American Society for Testing and Materials ,2002.
12. ASTM C1138, “Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete (Underwater Method)”, American Society for Testing and Materials ,1997.