

中華民國第 52 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國中組 生活與應用科學科

030810

「砂」很大，「氯」離子趕快走，利用外加電場
進行海砂屋中海砂鹽分析去除防蝕之研究

學校名稱：基隆市立成功國民中學

作者： 國二 陳靖雯 國二 洪郁晶 國二 周旻萱	指導老師： 張正勤 梁世明
---	-----------------------------

關鍵詞：海砂屋、電化學、防蝕

『砂』很大，『氯』離子趕快走， 利用外加電場進行海砂屋中海砂鹽分去除防蝕之研究 摘要

海砂屋的危險是海水含有氯離子，若用海砂作為混凝土之拌合材料，將造成混凝土的氯含量過高，降低混凝土 PH 值，破壞混凝土鋼筋保護層，產生腐蝕，造成混凝土剝落，影響結構物安全。本研究是應用外加電場保護的原理來去除混凝土中的氯離子，希望藉由非破壞性的技術達到修補防護效果。

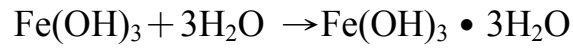
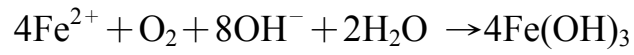
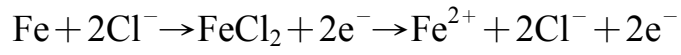
研究結果顯示，由化學分析發現，鹼性陽離子會根據外加電場擴散原理往鋼筋附近移動，而混凝土與鋼筋交界界面 pH 值上升，並隨著外加陰極電流密度及通電時間的增加，混凝土內剩餘氯離子含量會明顯下降；在腐蝕訊號量測方面，除鹽後之鋼筋腐蝕電位提昇，顯示鋼筋腐蝕情形獲得明顯的改善；在混凝土物理性質改變方面，除鹽後混凝土的吸水率及電阻係數值皆明顯提高。



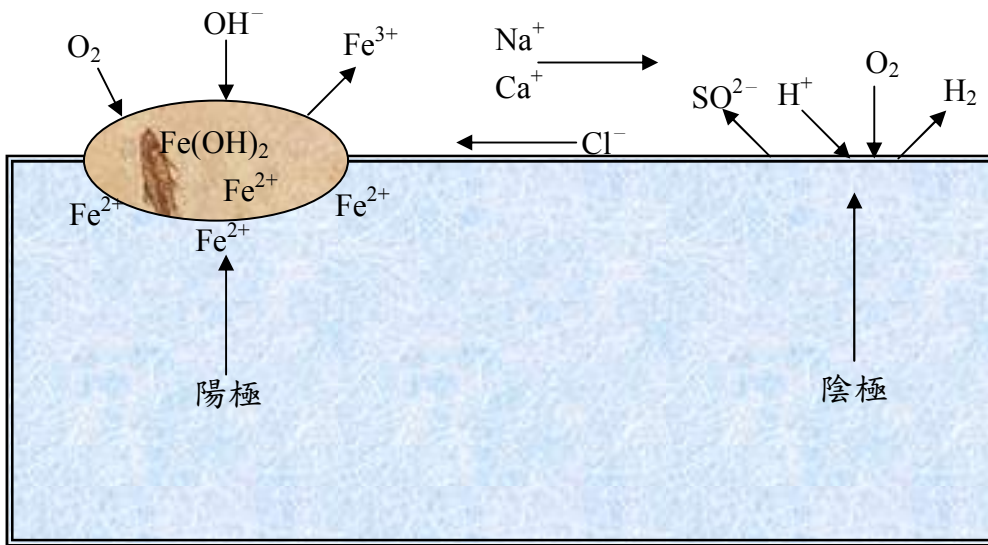
壹、研究動機

由於學校之前進行老舊校舍重建，看到新校舍曾無到有的完成。發現到混凝土為應用廣泛且使用量甚大的一種營建材料，係由水泥、砂子、石頭等顆粒材料加水拌合而成，其中砂子與石頭約佔混凝土中 70%~80%之體積。一向為價廉量多的天然材料，近年來，由於國內營造業之蓬勃發展以及環保意識與河川保護問題，來自河床之天然砂石開採供應日益困難，造成國內本島混凝土材料來源匱乏。根據統計研究資料統計，台灣地區目前砂石料每年需求量大約一億二千萬立方公尺(一億八千萬公噸)，相當龐大，百分之八十五來自河川砂石，而河川砂石大致可維持四年，屆時務必依賴陸地碎石、海砂利用或國外進口。

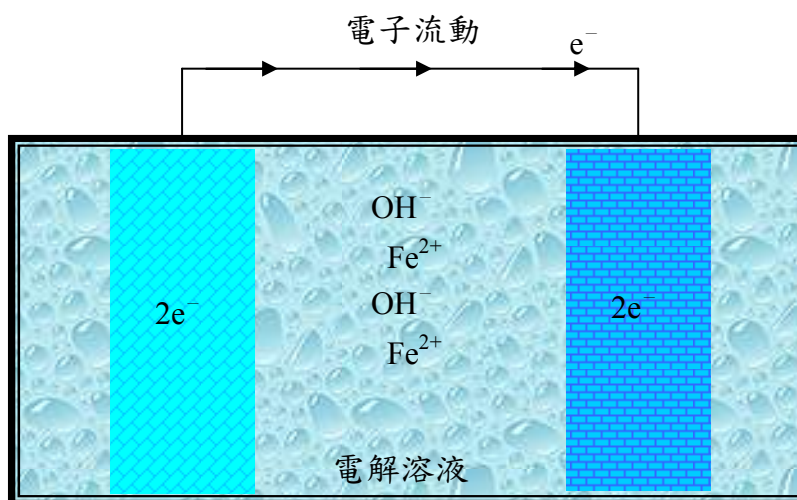
然而，離島地區河床砂石料源有限，且四周環海，飲用水取得不易，混凝土中摻用海域附近如河川出海口之砂石料、海砂、海水在所難免，由於海砂、海水中含大量鹽份，會造成日後鋼筋腐蝕問題，影響混凝土使用年限及增加長期性維修費用，既有的機能亦會有相當程度的破壞。因此，如何將混凝土中之氯離子驅離，保障混凝土建構物之安全，是一重要的課題。



* 氯離子與鋼筋之腐蝕化學方程式



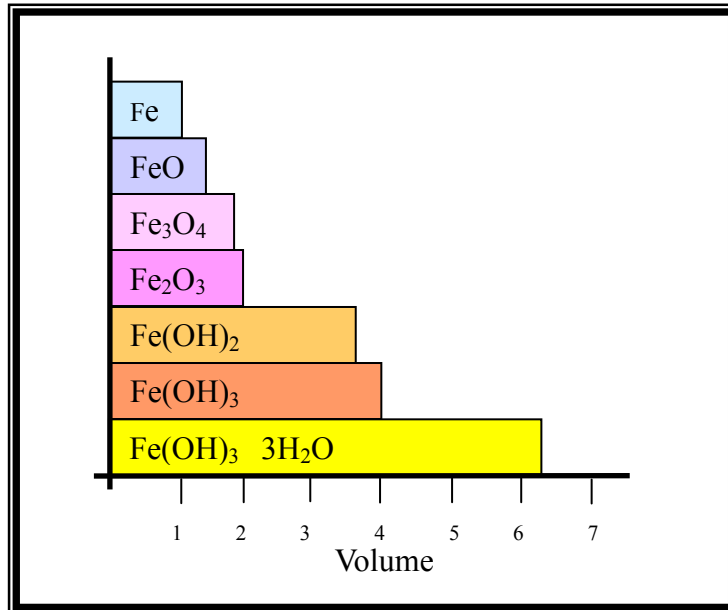
腐蝕電池示意圖



陽極(金屬氧化)

陰極(水的還原)

金屬腐蝕示意圖



鋼筋氧化後產物體積變化示意圖

貳、研究目的

本研究利用外加電場方式除鹽，希望可以有效地去除混凝土中的游離型氯離子，亦同時提升混凝土部分的鹼性。有鑑於混凝土因氯離子侵蝕所引發之鋼筋腐蝕問題，本研究旨在探討電化學除鹽技術對已遭受氯離子污染之混凝土(如海砂屋)，其驅離氯離子之成效，及除鹽後對於抑制鋼筋腐蝕作用的影響。研究範疇分成下列三部份：

1. 研究不同電場條件(外加電流密度及通電時間)及混凝土因素(保護層厚度、不同水灰比)下，對鋼筋混凝土施以電化學除鹽的成效。
2. 瞭解外加電場除鹽前後，鋼筋腐蝕電位之變化情形。
3. 探討外加電流密度大小與通電時間對除鹽後對混凝土物理性質之影響。

參、研究設備及器材

一、實驗材料

1. 水泥：亞洲水泥公司所生產的洋房牌波特蘭第 I 型水泥。
2. 細骨材：宜蘭南澳溪沿岸之河砂，並經由試驗分析。
3. 粗骨材：宜蘭縣蘭陽溪沿岸之碎石級配料，並經由試驗分析
4. 竹節鋼筋：為測定鋼筋在混凝土中之腐蝕行為，本研究以 #3 竹節鋼筋埋入混凝土內進行灌製除鹽試體。
5. NaOH 溶液：本研究中所使用之除鹽電解液，係以化學試藥級之 NaOH 乾燥試料加入蒸餾水調製而成 0.1M NaOH 水溶液。
6. 鈦網：由美國紐約腐蝕計量材料公司所生產，立偉防蝕公司代理。

二、試驗設備

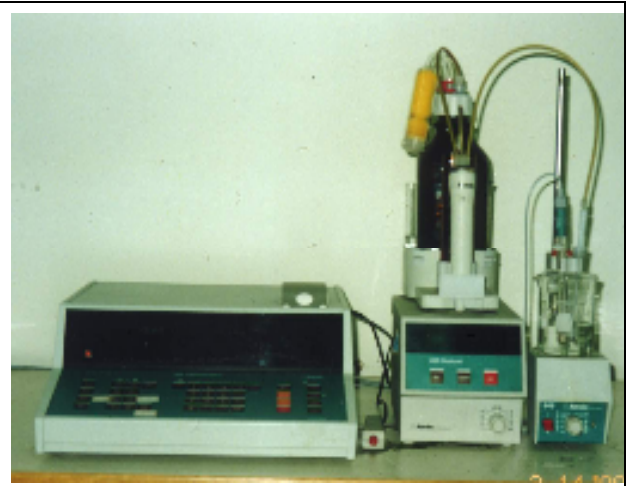
1. 直流電源供應器
2. 離子自動滴定儀
3. 恆電位恆電流儀

4.鋼筋腐蝕探測儀

5.混凝土電阻係數量測儀



直流電源供應器



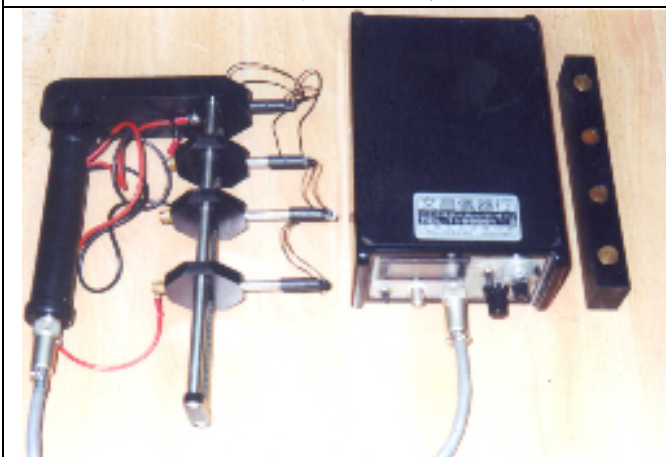
離子自動滴定量測儀



恆電位恆電流儀



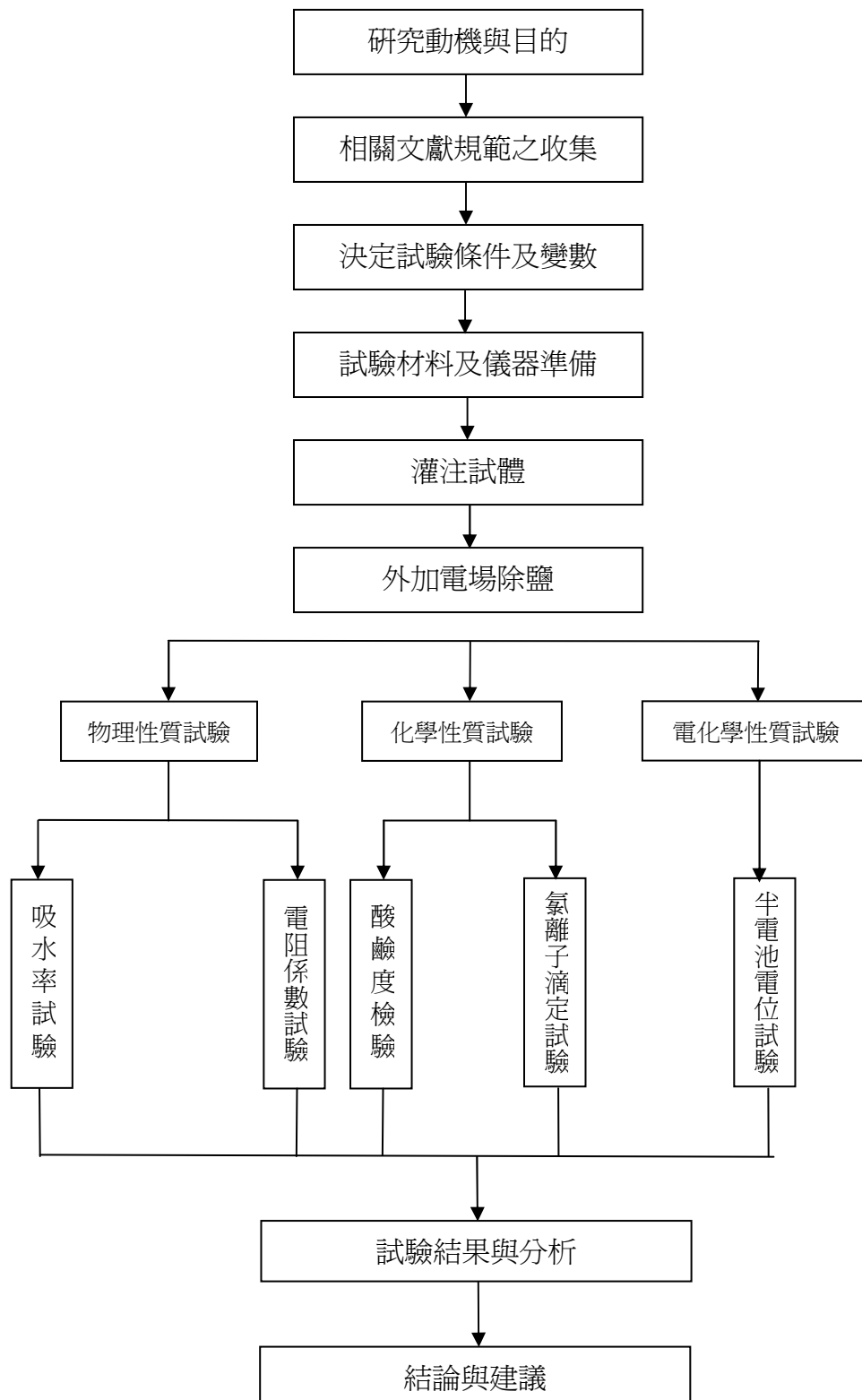
鋼筋腐蝕量測儀



四極式電阻量測儀

肆、研究過程或方法

本研究旨在探討不同水灰比、保護層厚度、外加電流密度、及除鹽時間對外加電場除鹽的影響暨混凝土除鹽後物理性質之變化，研究方法上係利用一外加電場強迫原來會發生陽極氧化反應之鋼筋往陰極方向極化，以降低其電化學腐蝕反應之速率，同時由外加陰極電流讓氯離子遠離鋼筋周遭，甚至脫離混凝土材料，進而達到防蝕之效果。研究流程圖如下圖所示。



研究流程圖

試驗變數及條件表

試驗變數及條件	範圍
水灰比	0.66、0.40(設計坍度 10cm)
電流密度	100、200、400、800 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$
保護層厚度	2.5cm、5.0cm
除鹽時間	1、2、3、4、5、6 週
NaCl 含量(相對水泥重量)	3%
電解液	NaOH (濃度 0.1 M)

試驗配比

混凝土試體配比係參照 ACI-221 配比設計法中相關規範規定設計而得，設計坍度約為 10cm，經由試拌修正後而得實驗之配比。其配比如下表所示。為研究除鹽成效，在欲進行除鹽之試體，另以 NaCl 加入拌合水中，其重量為 3%水泥重。

混凝土之配比

水灰比	水泥 (kg/m^3)	水 (kg/m^3)	NaCl (kg/m^3)	細骨材 (kg/m^3)	粗骨材 (kg/m^3)
0.66	295	181	8.85	719	1161
0.40	488	182	14.64	554	1161

試體製作與實驗裝置

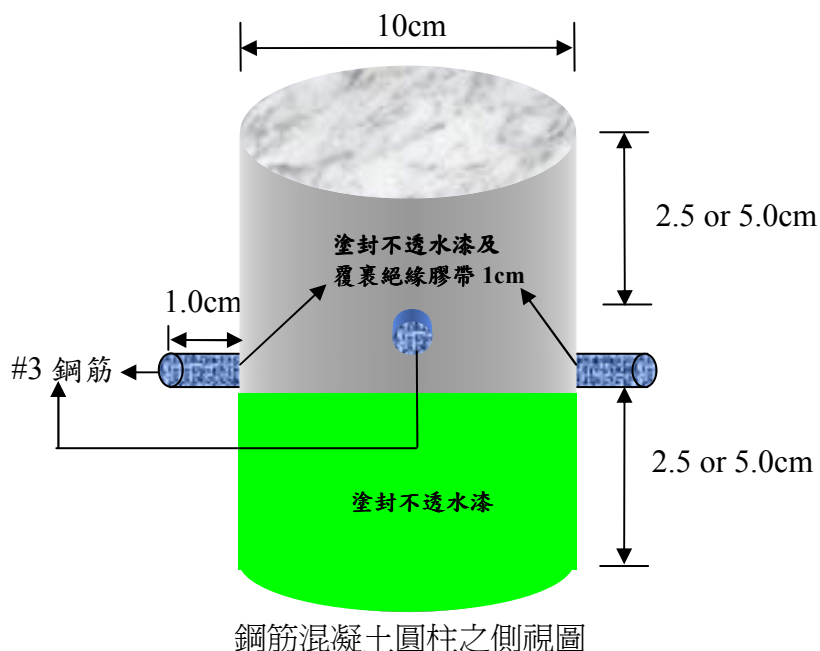
試體製作

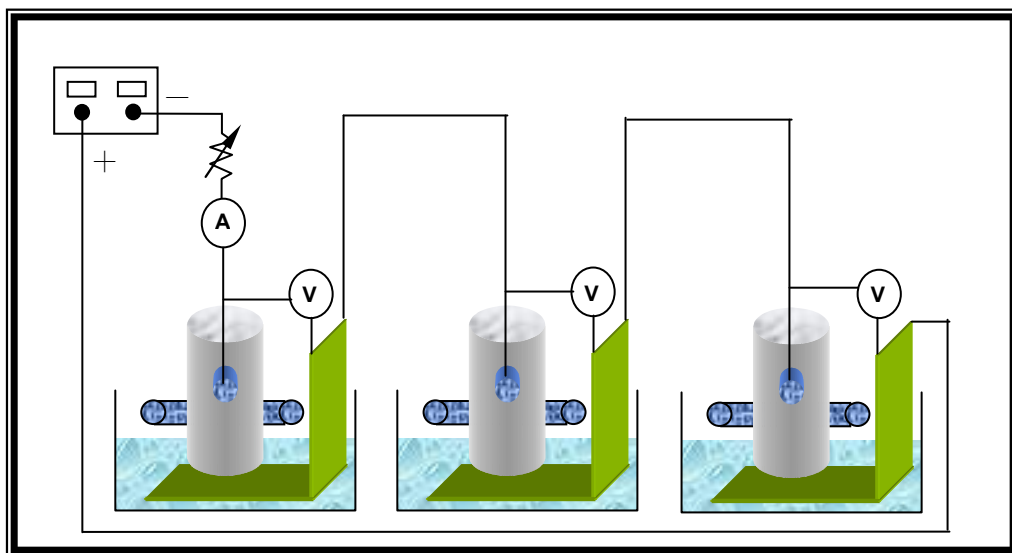
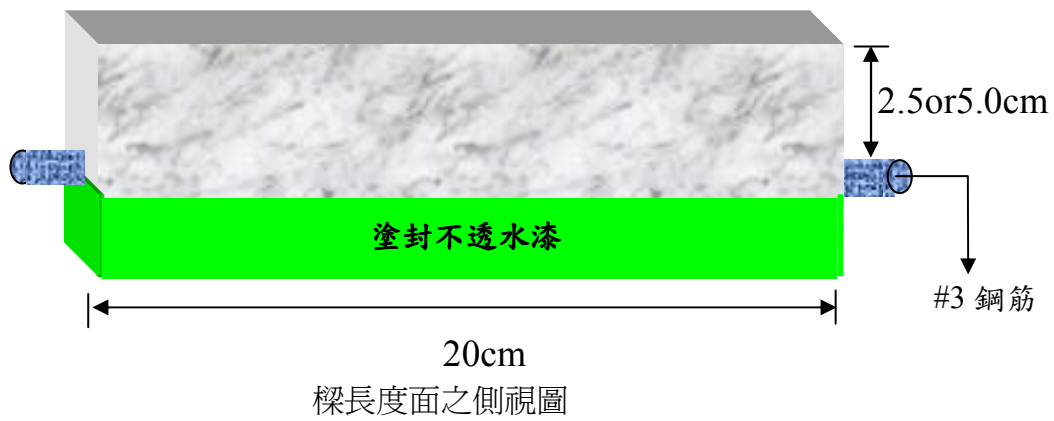
依照設計之混凝土配比製作保護層厚度 2.5cm 及 5.0cm 之圓柱狀除鹽試體，而通電用竹節鋼筋選用 3 號鋼筋。除鹽試體經過 24 小時後去模，隨即置入常溫下的飽和石灰水中養護 28 天，然後取出連接事先準備妥善之外加電場除鹽裝置，再持續對除鹽試體施加固定之定電流密度，分別於 1 週、2 週、3 週、4 週、5 週、6 週等通電週數後將除鹽試體取出，進行各項試驗，而在通電過程中，電解液 NaOH 應每天更換以確保氫離子能順利被移除。試體製作除鋼筋混凝土圓柱之外，另為量測表面電阻灌置縮小尺寸之樑。試體詳見下圖所示。

電化學除鹽裝置

本研究中所使用之電化學除鹽裝置可分成以下幾個小項，其中包含了：(1)直流電源供應器、(2)伏特計、(3)安培計、(4)可變電阻器、(5)試體部分。在實驗設計上係採用定電流密度除鹽裝置系統，定電流密度除鹽裝置方面分別設定為 100、200、400、800 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。

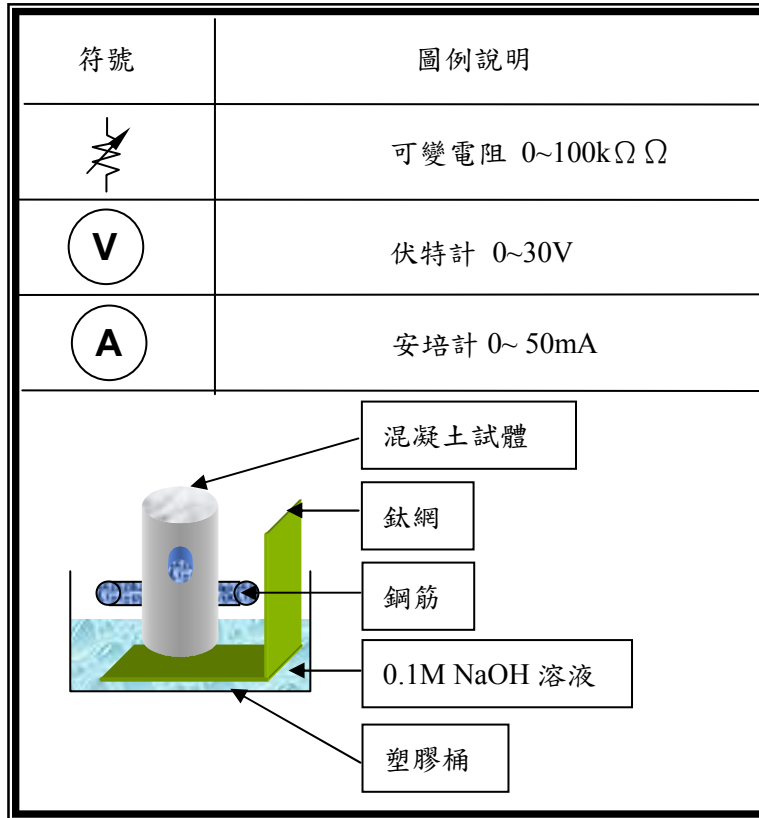
在除鹽電路之設計上，係採用串聯方式以穩定電流量，實際電路示意圖如下圖所示。在圖中，採用的是定電流密度之除鹽裝置，基本上，此處之可變電阻稱為分流電阻，用以控制流入試體之電流大小，而裝置電流錶的目的，是為能夠隨時觀察通過除鹽試體之電流，並據此於不同通電週期時，以通過電流是否穩定來做為對除鹽措施是否結束或繼續的一個指標。圖例說明如下：





定電流外加電場除鹽裝置圖

外加電場除鹽裝置圖圖例



伍、研究結果與討論

本研究之主要目的為探討含氯混凝土經由外加電場方式進行去鹽後，混凝土本體性質之變化，如化學性質、電化學性質、物理性質。期望能以此研究方式，進一步瞭解外加電場除鹽法對鋼筋混凝土之抑制腐蝕發生的效果，並建立一套高效率外加電場除鹽的最佳方式，以作為日後混凝土除鹽技術應用上之參考。

pH 值量測試驗

本研究中在酸鹼度檢測部分，主要是萃取鋼筋界面附近之混凝土粉末進行 pH 值分析，試驗結果如表 5-1 所示。由表中資料值可知隨著外加陰極電流密度的加大及通電時間增長，鋼筋界面處之混凝土的 pH 值有向上提昇的趨勢，顯示在電化學除鹽的過程當中，反應生成物能夠幫助鋼筋附近的鹼性上升。

一般而言，若外加電場的驅動力愈大時，離子在孔隙中的質傳能力愈強，由於外加電場

對鋼筋產生極化作用，促使混凝土孔隙中的 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^+ ...等溶解性陽離子往鋼筋界面處移動，使得鋼筋附近的鹼性離子濃度增加進而造成界面處混凝土之 pH 值上升，並且隨著外加電場及通電時間的加大，鈉、鉀離子的移動能力及數量會隨之增長。由此可知，pH 值的上升與鈉、鉀離子往鋼筋集中有關。

表 5-1 除鹽後混凝土界面之 pH 值

電流密度	水灰比	保護層厚度	極化時間					
			1 週	2 週	3 週	4 週	5 週	6 週
$0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$	0.66	2.5cm	11.32					
		5.0cm	11.32					
	0.40	2.5cm	11.32					
		5.0cm	11.32					
$100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$	0.66	2.5cm	11.39	11.47	11.56	11.69	11.73	11.82
		5.0cm	11.37	11.44	11.50	11.61	11.66	11.77
	0.40	2.5cm	11.35	11.40	11.47	11.54	11.62	11.73
		5.0cm	11.33	11.38	11.41	11.48	11.56	11.67
$200 \mu\text{A}/\text{cm}^2$	0.66	2.5cm	11.46	11.68	11.80	11.86	11.92	12.09
		5.0cm	11.42	11.56	11.68	11.74	11.85	11.92
	0.40	2.5cm	11.38	11.49	11.69	11.75	11.84	11.90
		5.0cm	11.33	11.43	11.58	11.68	11.76	11.88
$400 \mu\text{A}/\text{cm}^2$	0.66	2.5cm	11.64	11.82	11.98	12.12	12.28	12.39
		5.0cm	11.52	11.68	11.88	11.98	12.14	12.28
	0.40	2.5cm	11.47	11.62	11.78	11.91	12.02	12.17
		5.0cm	11.42	11.56	11.72	11.84	11.90	12.05
$800 \mu\text{A}/\text{cm}^2$	0.66	2.5cm	11.78	11.92	12.12	12.24	12.32	12.45
		5.0cm	11.62	11.82	12.06	12.16	12.22	12.32
	0.40	2.5cm	11.60	11.82	12.01	12.16	12.24	12.40
		5.0cm	11.53	11.78	11.92	12.06	12.18	12.25

將表 5-1 整理成如圖 5-1、5-2、5-3 及 5-4 所示，可以明顯看出除鹽後界面處混凝土 pH 值與除鹽時間之關係，其中發現保護層大及水灰比低的混凝土其 pH 值之增加率明顯較小，

係由於混凝土中孔隙路徑及膠結材料緻密性的增加使得自由離子移動不易，才會導致如此的差異性，總體而言，材料參數的不同足以影響混凝土孔隙中鹼性離子的移動狀況，而導致鋼筋界面處混凝土 pH 值發生變化。

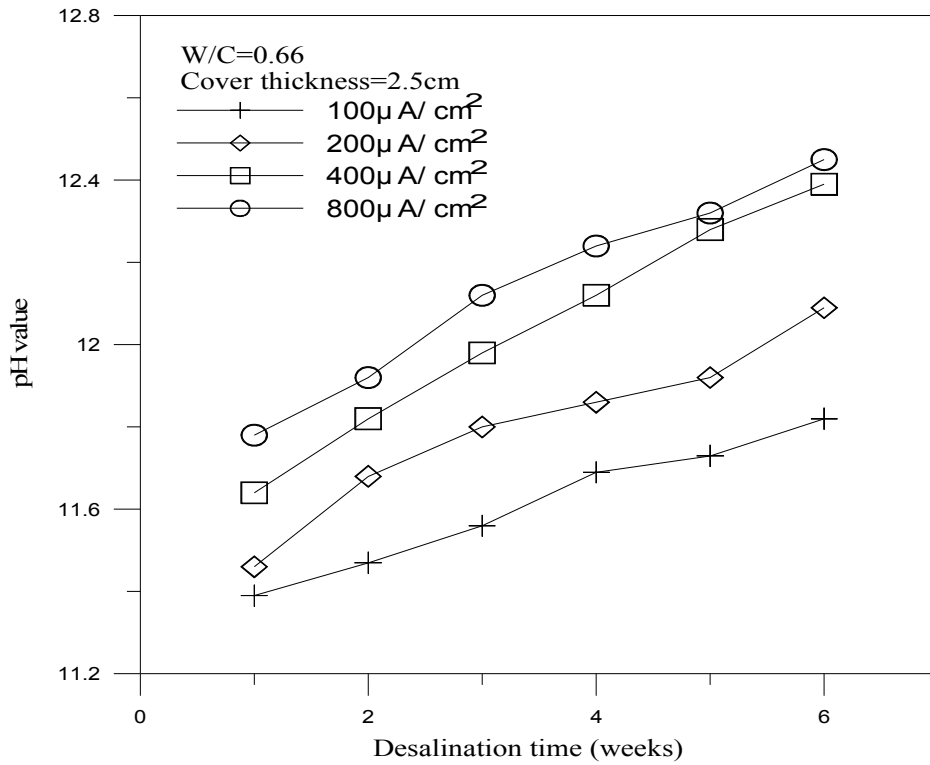


圖 5-1 w/c=0.66,t=2.5cm 除鹽後界面附近 pH-除鹽時間關係圖

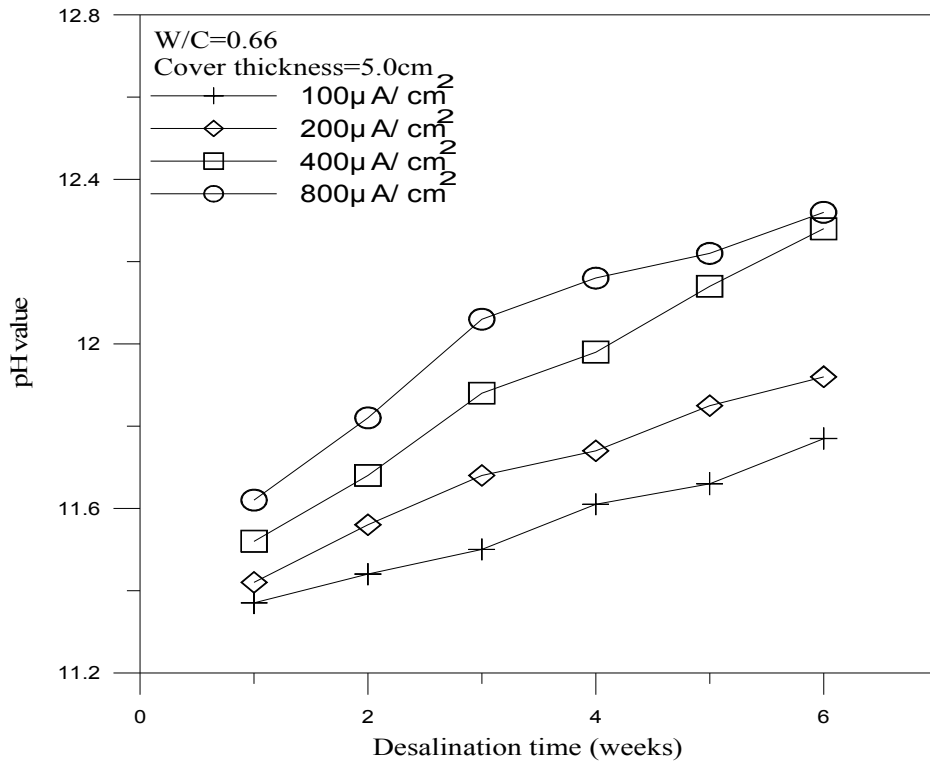


圖 5-2 w/c=0.66,t=5.0cm 除鹽後界面附近 pH-除鹽時間關係圖

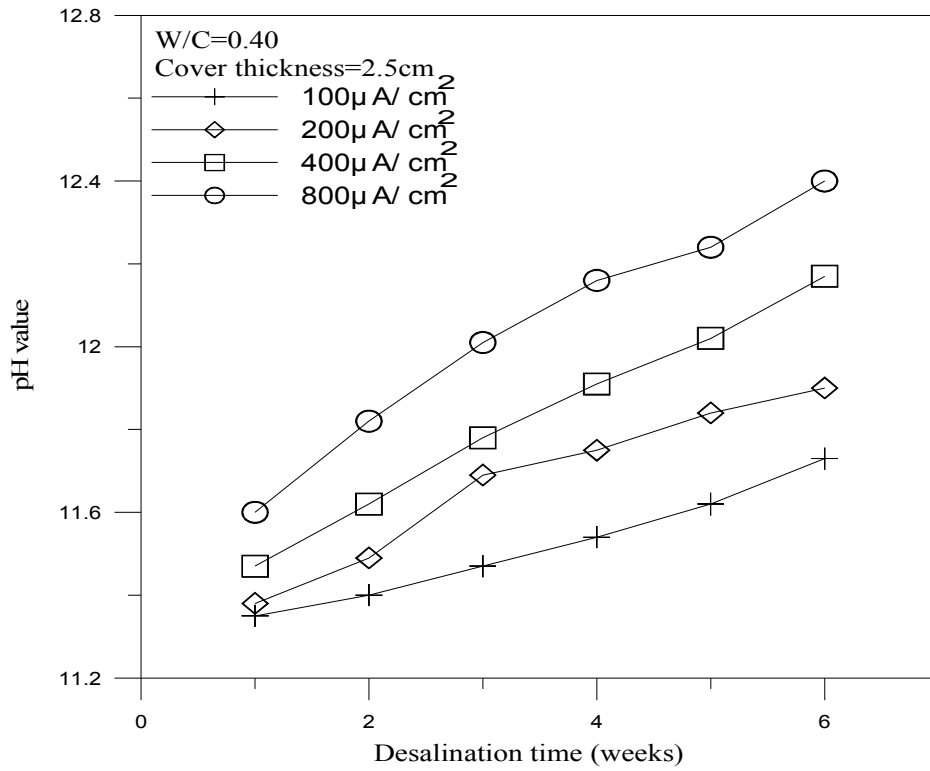


圖 5-3 w/c=0.40,t=2.5cm 除鹽後界面附近 pH-除鹽時間關係圖

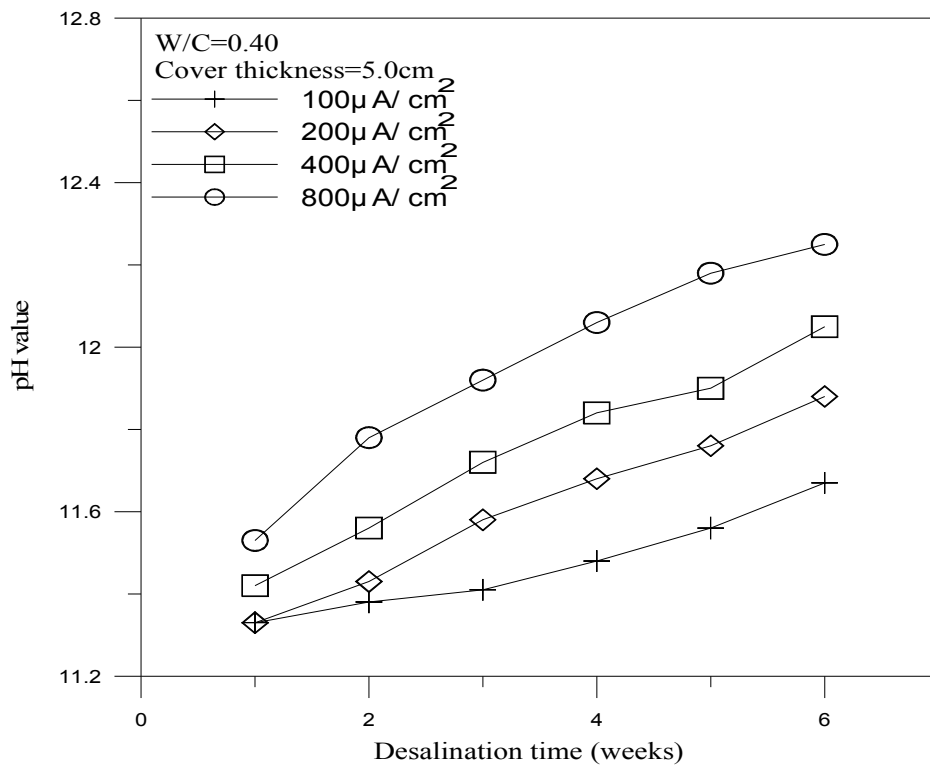


圖 5-4 w/c=0.40,t=5.0cm 除鹽後界面附近 pH-除鹽時間關係圖

氯離子含量

本試驗之目的，在於探討利用外加電場方法去除混凝土中有害氯離子的成效；是評估外加電場除鹽方法是否可行，最直接且最基本的檢驗，就是分析混凝土中的氯離子濃度。

將各組混凝土試體取樣利用化學滴定，試驗結果如表 5-2 所示。為進一步分析，將混凝土內氯離子剩餘量整理後對影響參數 $i_c \times t_p$ ($\mu A/cm^2 \times week$) 之關係圖，如圖 5-5、5-6、5-7 及 5-8 所示。由圖中可知，隨著影響參數 $i_c \times t_p$ ($\mu A/cm^2 \times week$) 的增加混凝土內氯離子的剩餘含量會跟著下降，不同水灰比試體皆有趨緩的趨勢。另由表中發現水灰比 0.66 的試體由近 2300ppm 下降至 350ppm 左右，而水灰比 0.40 的試體由近 4000ppm 下降至 600ppm 左右，並將氯離子含量轉換成相對水泥重來比較，發現兩組水灰比的試體皆由原先的 1.82% 降至約 0.3%，顯示在經過除鹽的過程後，約有 0.3% 相對水泥重的氯離子與水泥中的 C_3A 固結在一起，而無法達到完全去鹽的狀態，表示最終去鹽的成效有其一定的限度。

在外加電流密度對去鹽成效影響的部分，繪出如圖 5-9、5-10、5-11 及 5-12 所示，發現電流密度愈高者其早期氯離子去除的速率較快，而氯離子濃度就會越低，自然晚期的去除速率就會降低，這可能是因為氯離子的去除效果，與混凝土中氯離子的濃度有關，氯離子濃度越高者，理論上是越有利於游離性氯離子的移動，自然也就比較容易被去除，所以若採用相同的影響參數 $i_c \times t_p$ ($\mu A/cm^2 \times week$) 下，建議使用較小的電流密度，其對去鹽成效會有較佳的表現。

表 5-2 除鹽後混凝土中之氯離子含量(ppm)

電流密度	水灰比	保護層厚度	極化時間					
			1 週	2 週	3 週	4 週	5 週	6 週
$0 \mu A/cm^2$	0.66	2.5cm	2271					
		5.0cm	2271					
	0.40	2.5cm	3702					
		5.0cm	3702					
$100 \mu A/cm^2$	0.66	2.5cm	2012	1893	1771	1632	1532	1297
		5.0cm	2152	2009	1905	1760	1588	1410
	0.40	2.5cm	3534	3413	3365	3318	3254	3109
		5.0cm	3582	3504	3432	3364	3291	3171
$200 \mu A/cm^2$	0.66	2.5cm	1888	1581	1268	944	687	470
		5.0cm	2089	1882	1580	1331	1084	815
	0.40	2.5cm	3450	3347	3176	3028	2768	2442
		5.0cm	3539	3452	3244	3086	2878	2631
$400 \mu A/cm^2$	0.66	2.5cm	1534	876	503	357	353	352
		5.0cm	1955	1396	938	660	362	358

800 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	0.40	2.5cm	3358	3058	2583	2088	1550	680
		5.0cm	3512	3107	2696	2299	1765	1158
	0.66	2.5cm	948	475	377	356	347	346
		5.0cm	1518	803	363	357	356	353
0.40	2.5cm	3096	2144	794	612	606	604	
	5.0cm	3175	2371	1214	755	613	608	

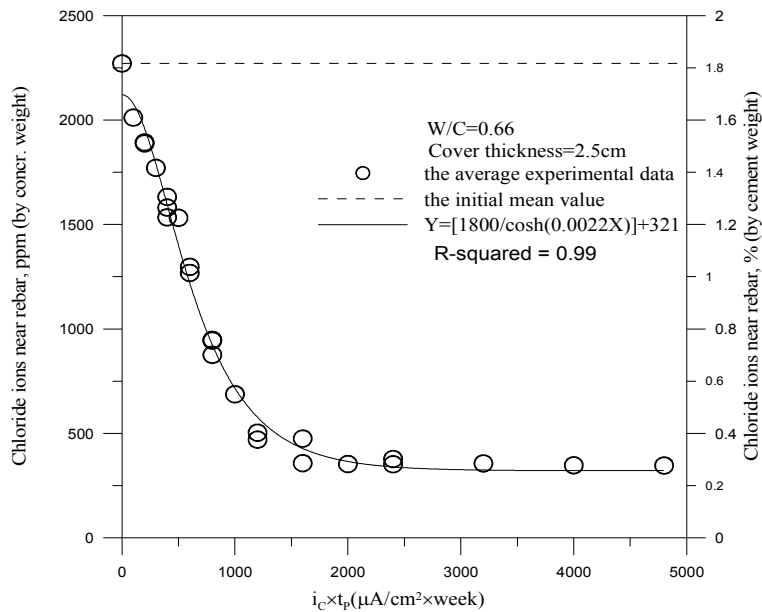


圖 5-5 w/c=0.66,t=2.5cm 混凝土氯離子剩餘量-影響參數關係圖

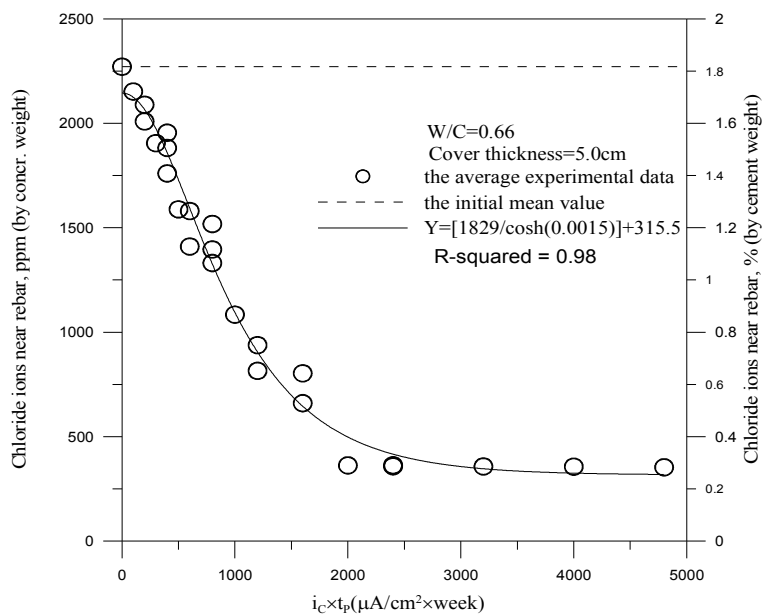


圖 5-6 w/c=0.66,t=5.0cm 混凝土氯離子剩餘量-影響參數關係圖

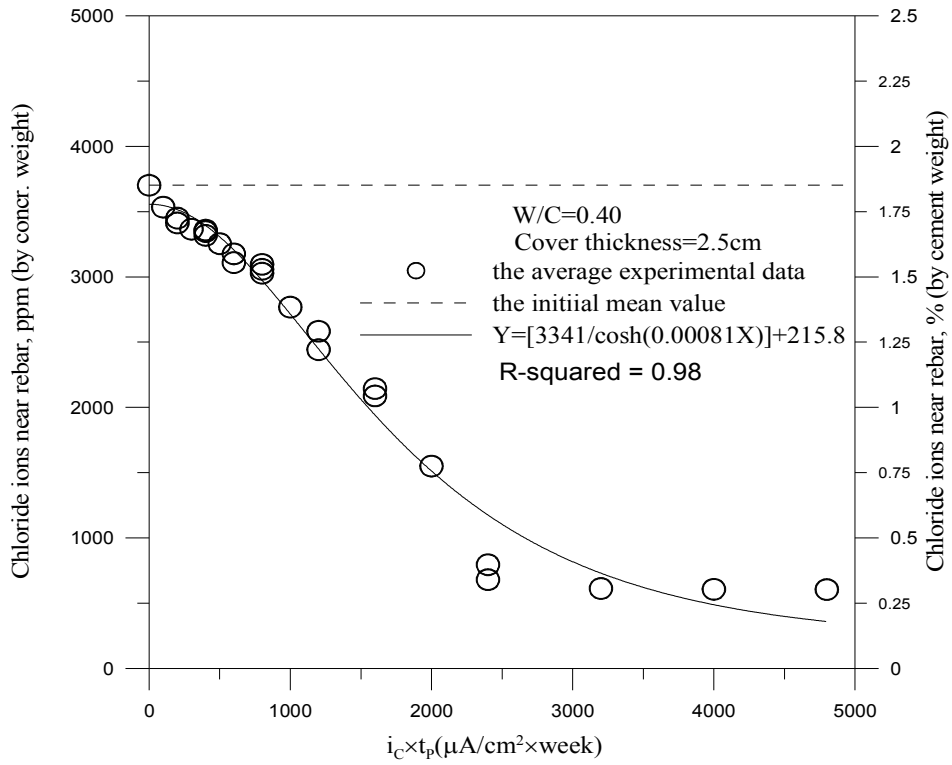


圖 5-7 w/c=0.40,t=2.5cm 混凝土氯離子剩餘量-影響參數關係圖

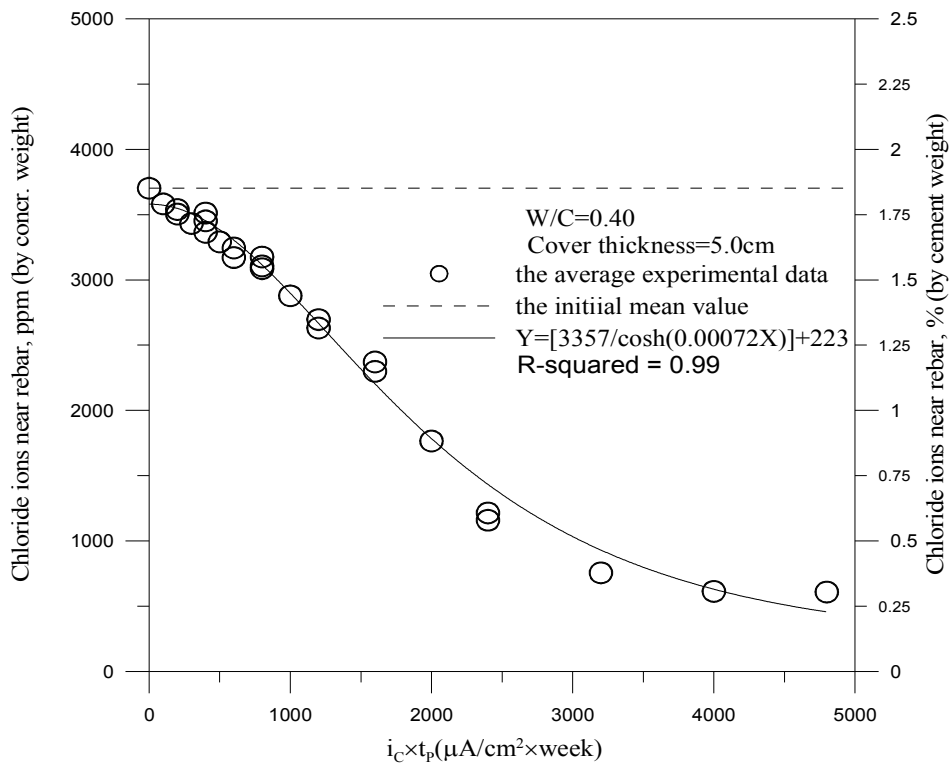


圖 5-8 w/c=0.40,t=5.0cm 混凝土氯離子剩餘量-影響參數關係圖

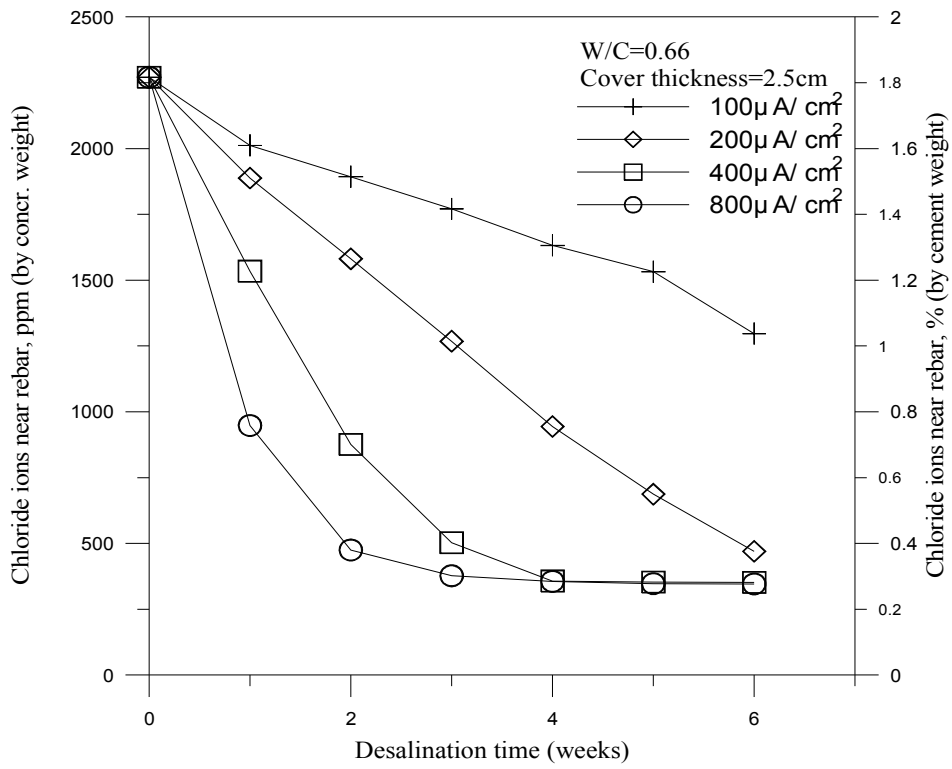


圖 5-9 w/c=0.66,t=2.5cm 混凝土氯離子剩餘量-除鹽時間關係圖

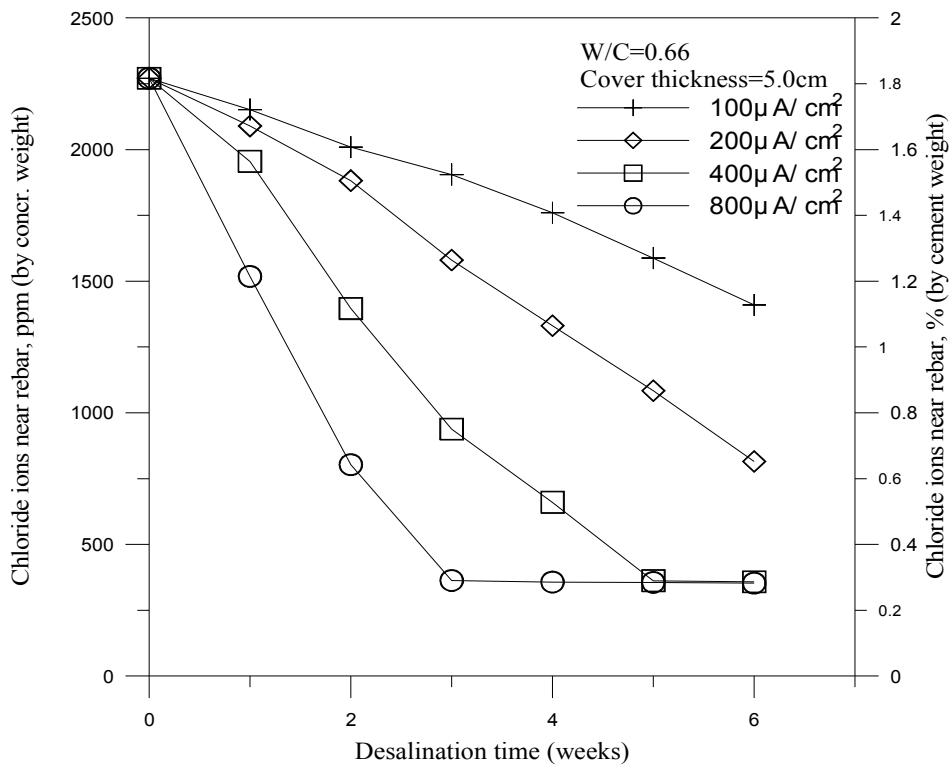


圖 5-10 w/c=0.66,t=5.0cm 混凝土氯離子剩餘量-除鹽時間關係圖

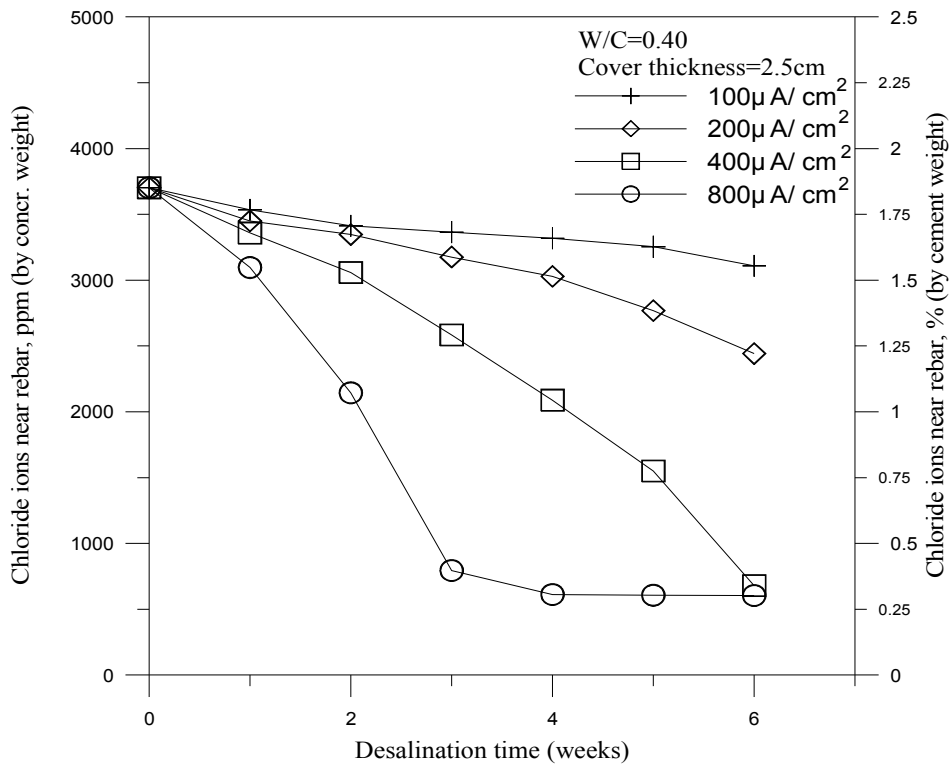


圖 5-11 w/c=0.40,t=2.5cm 混凝土氯離子剩餘量-除鹽時間關係圖

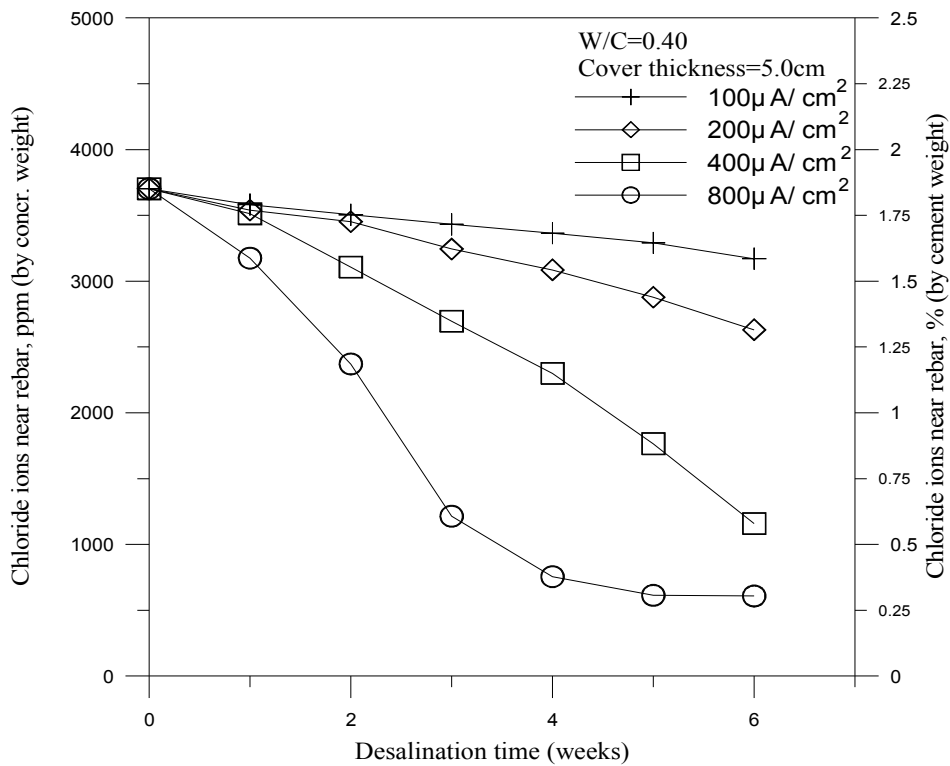


圖 5-12 w/c=0.40,t=5.0cm 混凝土氯離子剩餘量-除鹽時間關係圖

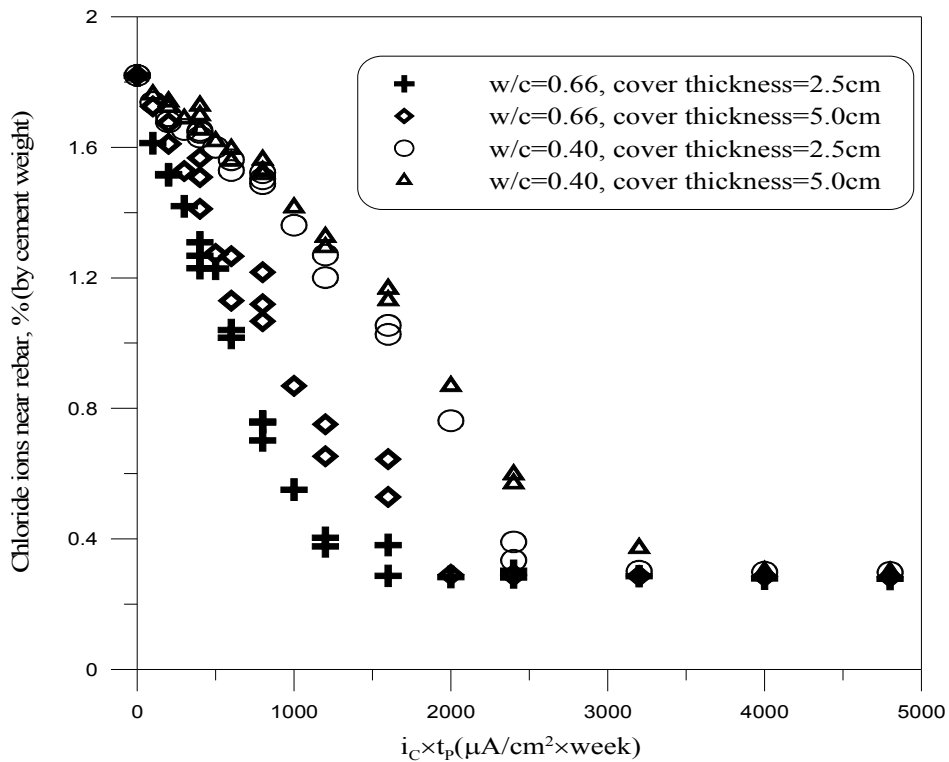


圖 5-13 不同材料參數之混凝土氯離子剩餘量-影響參數關係圖

鋼筋腐蝕電位量測

本研究於混凝土試體進行外加電流過程之前，依據 ASTM C-876 規範之方法，先量測鋼筋的腐蝕電位。試體通電前的鋼筋腐蝕電位約落在-350 mV~-500 mV 之間，處於嚴重腐蝕狀況。由於通電期間，鋼筋當作陰極處理，會產生極化作用，而影響鋼筋腐蝕電位的量測，而且若以高電流密度與通電時間進行處理的試驗組，其鋼筋極化現象更為顯著。然而，為了克服上述的極化現象，經過長時間量測的結果，任取一組通電一週之混凝土試體，分析停電後之鋼筋腐蝕電位變化情形，如圖 5-14 所示，發現鋼筋混凝土試體靜置於室溫環境下兩個月，普遍試體即可達到去極化後之穩定電位，進而量測出經過外加電流後較為精準之鋼筋腐蝕電位，用來推斷鋼筋在混凝土中腐蝕的趨勢。

試驗結果如表 5-3 所示，由數值上顯示，外加電場除鹽法確實能提高鋼筋半電池電位，使原本處於高度腐蝕狀態下的鋼筋，因為電化學反應改變混凝土環境，讓腐蝕風險降低並獲得保護鋼筋的目的。將腐蝕電位與影響參數 $i_c \times t_p$ ($\mu A/cm^2 \times week$) 關係整理如圖 5-15、5-16、5-17 及 5-18 所示。在各圖之迴歸曲線方程式中，若採用 ASTM C-876 規範中腐蝕機率小於 < 10% 之臨界腐蝕電位-200mV(CSE)，各組試體所需之影響參數如表 5-4 所示，發現外加電流較易改變高水灰比試體之混凝土環境，可做為外加電場除鹽效能之參考。

表 5-3 混凝土之腐蝕電位(mV)

電流密度	水灰比	保護層厚度	極化時間					
			1 週	2 週	3 週	4 週	5 週	6 週
0 $\mu A/cm^2$	0.66	2.5cm	-448					
		5.0cm	-407					
	0.40	2.5cm	-495					
		5.0cm	-451					
100 $\mu A/cm^2$	0.66	2.5cm	-193	-187	-160	-147	-130	-123
		5.0cm	-220	-197	-177	-160	-154	-145
	0.40	2.5cm	-313	-290	-276	-253	-237	-220
		5.0cm	-339	-321	-300	-279	-261	-256
200 $\mu A/cm^2$	0.66	2.5cm	-183	-154	-148	-130	-125	-124
		5.0cm	-195	-167	-158	-144	-135	-127
	0.40	2.5cm	-287	-273	-258	-234	-218	-205
		5.0cm	-304	-288	-269	-253	-237	-226
400 $\mu A/cm^2$	0.66	2.5cm	-179	-151	-142	-122	-121	-119
		5.0cm	-189	-164	-153	-140	-132	-124
	0.40	2.5cm	-265	-247	-223	-210	-198	-187
		5.0cm	-288	-270	-259	-245	-223	-207
800 $\mu A/cm^2$	0.66	2.5cm	-152	-141	-125	-120	-117	-118
		5.0cm	-173	-157	-141	-133	-130	-125
	0.40	2.5cm	-248	-239	-227	-209	-195	-185
		5.0cm	-270	-258	-237	-225	-215	-205

表 5-4 腐蝕電位 $y=-200mV$ 對應之影響參數($\mu A/cm^2 \times week$)

水灰比	保護層厚度	ASTM C-876 規範 Y=-200mV	所需之影響參數 $i_c \times t_p$ ($\mu A/cm^2 \times week$)
0.66	2.5cm	腐蝕機率小於 < 10%	118
	5.0cm		158
0.40	2.5cm		849
	5.0cm		2193

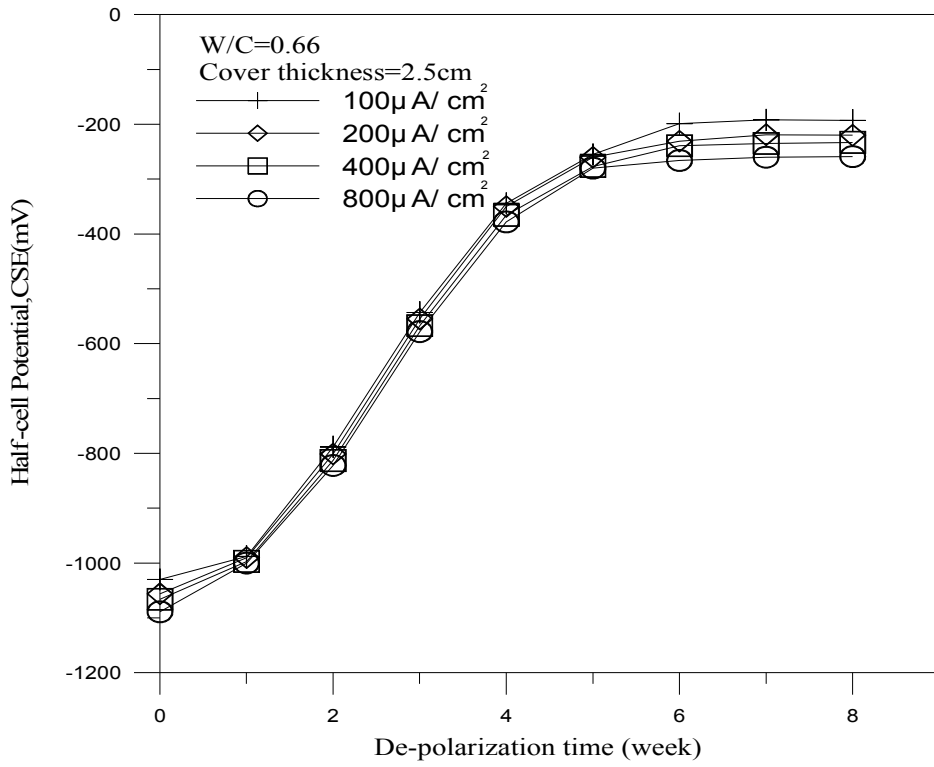


圖 5-14 混凝土試體停電後之鋼筋腐蝕電位變化圖

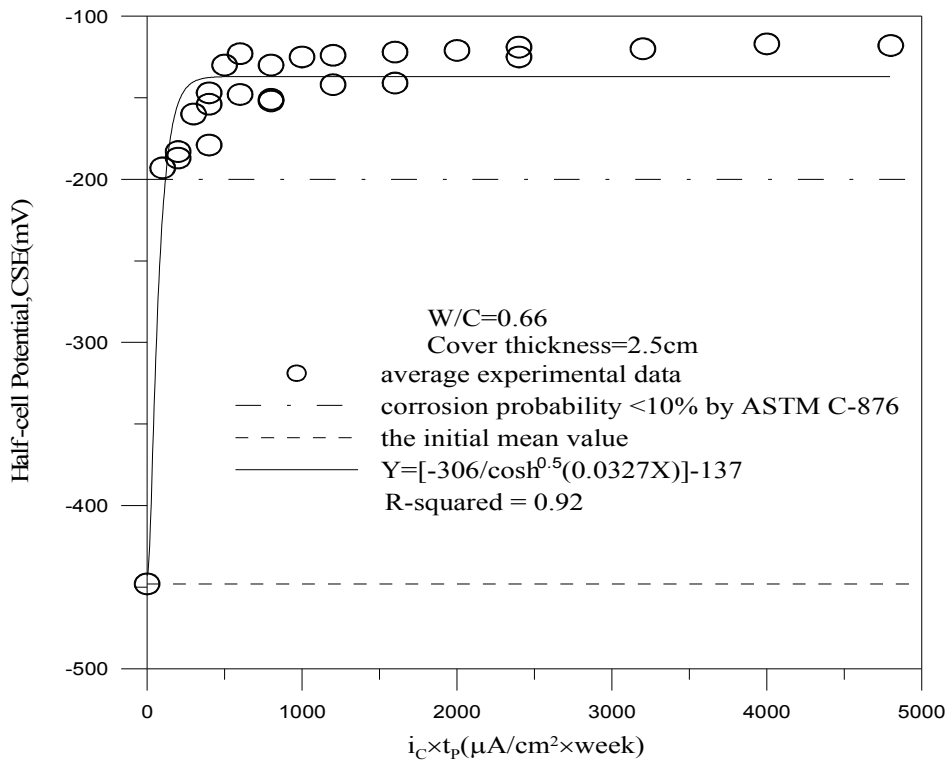


圖 5-15 w/c=0.66,t=2.5cm 半電池電位與影響參數之關係圖

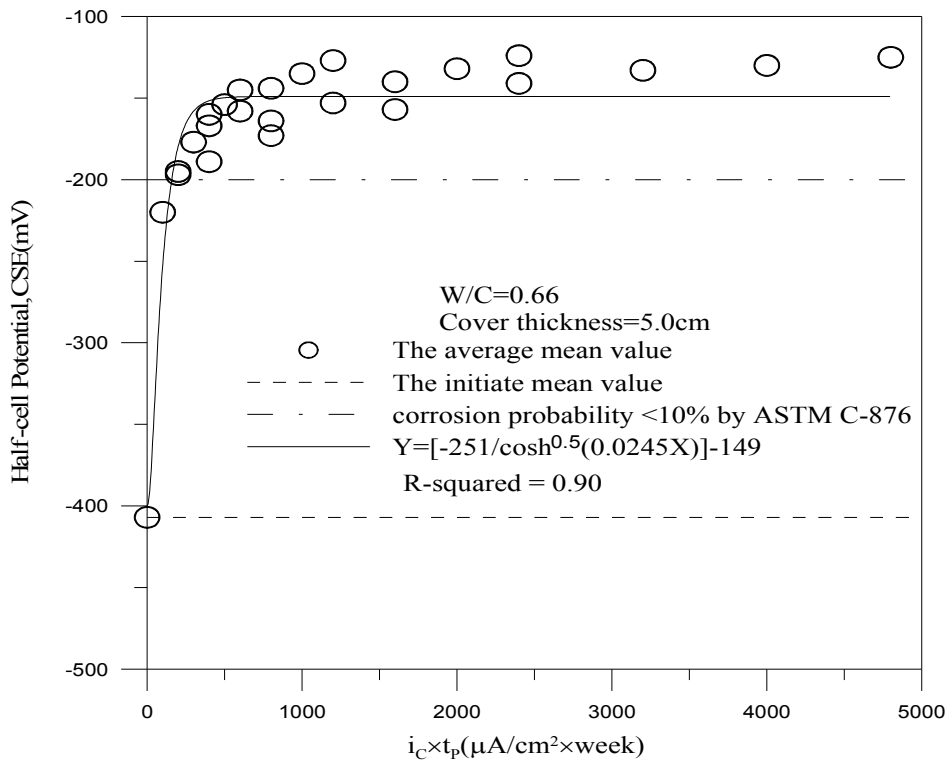


圖 5-16 w/c=0.66,t=5.0cm 半電池電位與影響參數之關係圖

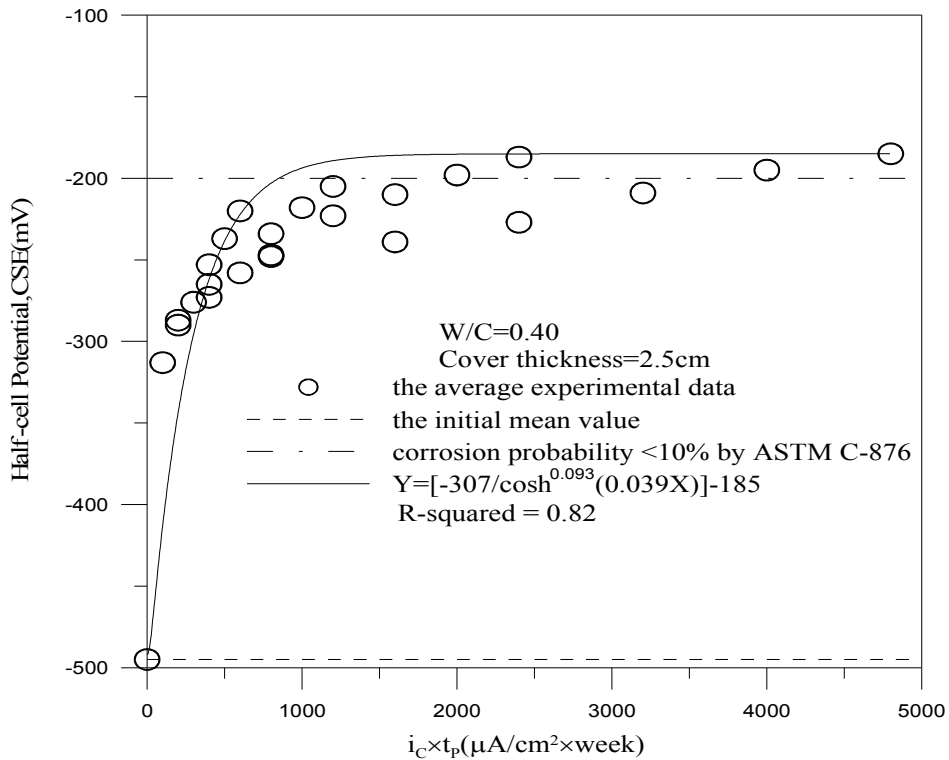


圖 5-17 w/c=0.40,t=2.5cm 半電池電位與影響參數之關係圖

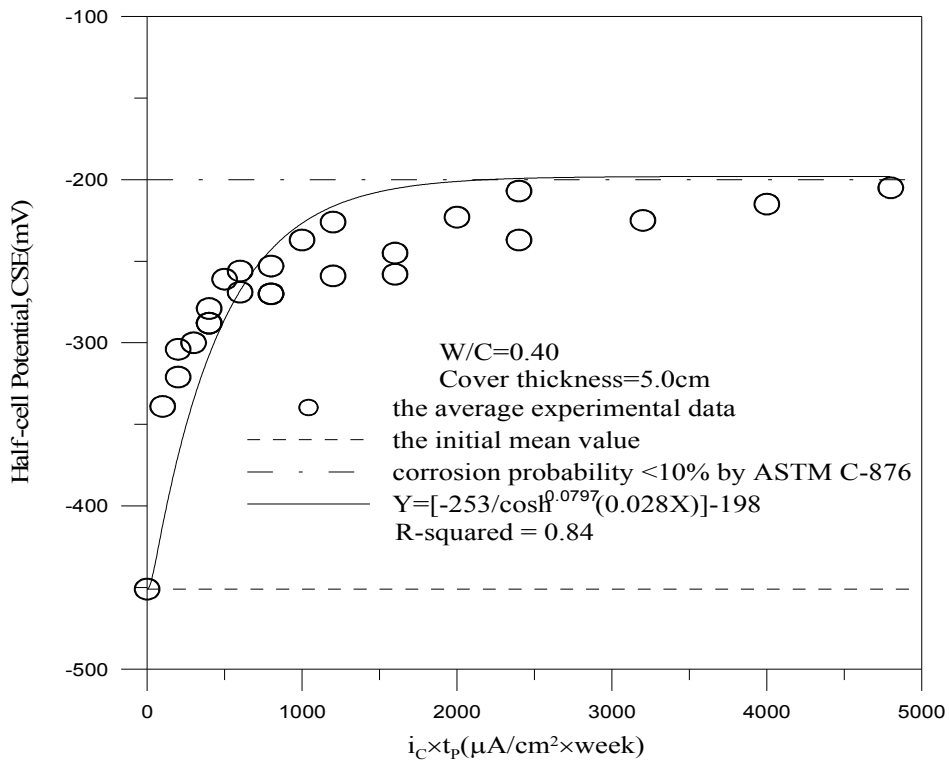


圖 5-18 w/c=0.40,t=5.0cm 半電池電位與影響參數之關係圖

吸水率試驗

吸水率的主要目的是評估外界水分子進入混凝土試體的能力，本試驗採 BS 1881 : 122 之方法量測烘乾試體浸泡於水中 30 分鐘的重量變化，試驗結果如表 5-5 所示，各組經由外加電場除鹽後，初期吸水量明顯的提高，顯示因電化學除鹽的影響改變混凝土內部的孔隙結構，使其表面孔隙率上升，造成混凝土吸水量的增加。

表 5-5 混凝土試體之吸水率(%)

電流密度	水灰比	保護層厚度	極化時間					
			1 週	2 週	3 週	4 週	5 週	6 週
$0 \mu A/cm^2$	0.66	2.5cm	2.30					
		5.0cm	2.40					
	0.40	2.5cm	1.81					
		5.0cm	2.06					
$100 \mu A/cm^2$	0.66	2.5cm	2.41	2.52	2.47	2.35	2.41	2.34
		5.0cm	2.64	2.61	2.69	2.54	2.63	2.59
	0.40	2.5cm	1.90	1.93	1.89	1.85	1.81	1.77
		5.0cm	2.20	2.22	2.18	2.15	2.14	2.10
$200 \mu A/cm^2$	0.66	2.5cm	2.47	2.51	2.45	2.33	2.41	2.33
		5.0cm	2.72	2.67	2.69	2.58	2.55	2.56
	0.40	2.5cm	2.01	2.03	2.00	1.95	1.93	1.98

		5.0cm	2.28	2.38	2.41	2.44	2.40	2.38
$400 \mu A/cm^2$	0.66	2.5cm	2.60	2.54	2.46	2.32	2.40	2.49
		5.0cm	2.81	2.79	2.73	2.59	2.60	2.67
	0.40	2.5cm	2.14	2.18	2.10	2.08	2.08	2.05
		5.0cm	2.40	2.48	2.44	2.39	2.40	2.38
$800 \mu A/cm^2$	0.66	2.5cm	2.63	2.57	2.53	2.40	2.40	2.40
		5.0cm	2.92	2.83	2.76	2.72	2.62	2.62
	0.40	2.5cm	2.25	2.15	2.11	2.14	2.14	2.12
		5.0cm	2.55	2.58	2.55	2.53	2.48	2.49

將上述資料整理成吸水率對除鹽時間關係如圖 5-19、5-20、5-21 及 5-22 所示，通電一、二及三週後混凝土試體吸水率隨著電流密度的增大而上升，而後期卻呈現下降且持平的趨勢，主要是由於進行電化學除鹽過程中， Ca^{2+} 往鋼筋集中與部分的 OH^- 結合成 $Ca(OH)_2$ ，此氫氧化物並無法完全溶解於水中，進而阻塞混凝土孔隙影響其吸水率狀況。

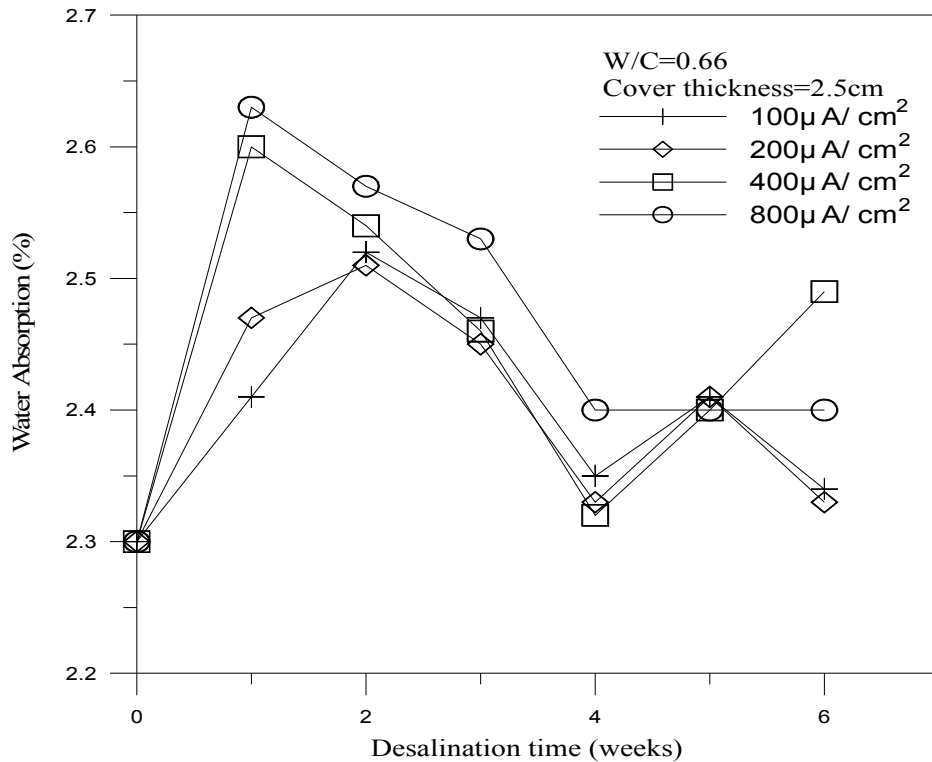


圖 5-19 w/c= 0.66,t=2.5cm 之吸水率-除鹽時間關係圖

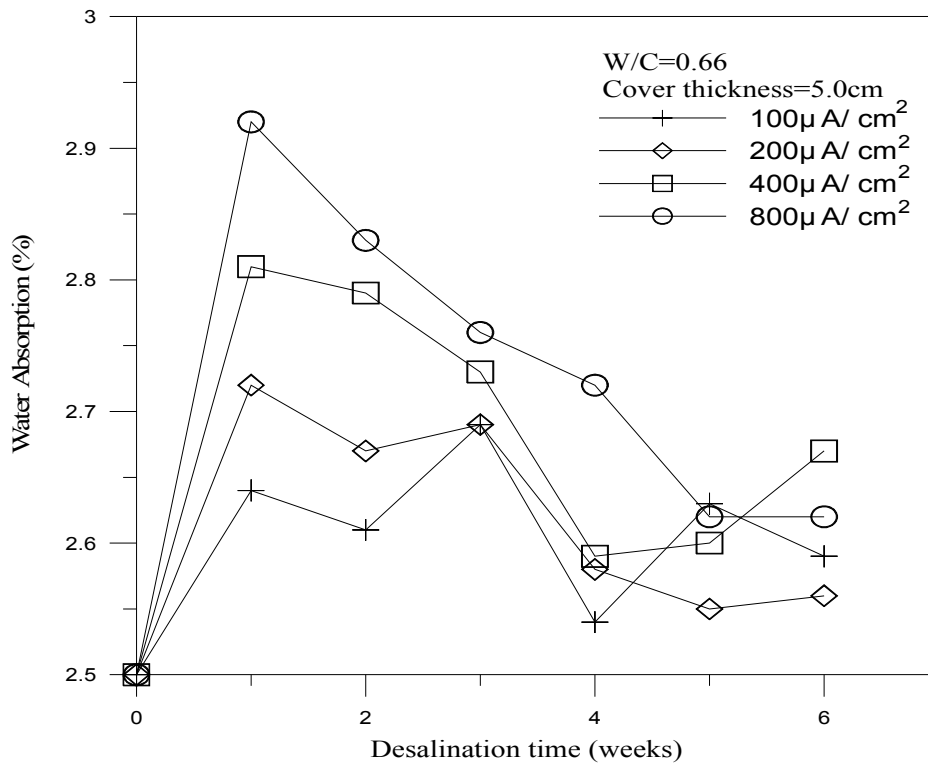


圖 5-20 w/c= 0.66,t=5.0cm 之吸水率-除鹽時間關係圖

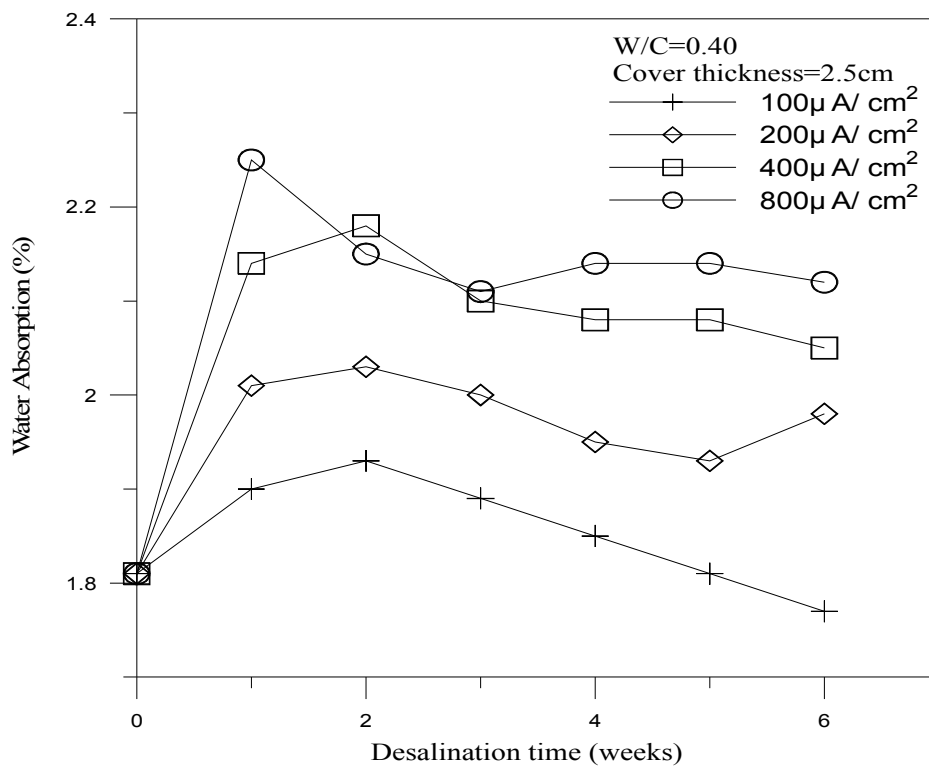


圖 5-21 w/c= 0.40,t=2.5cm 之吸水率-除鹽時間關係圖

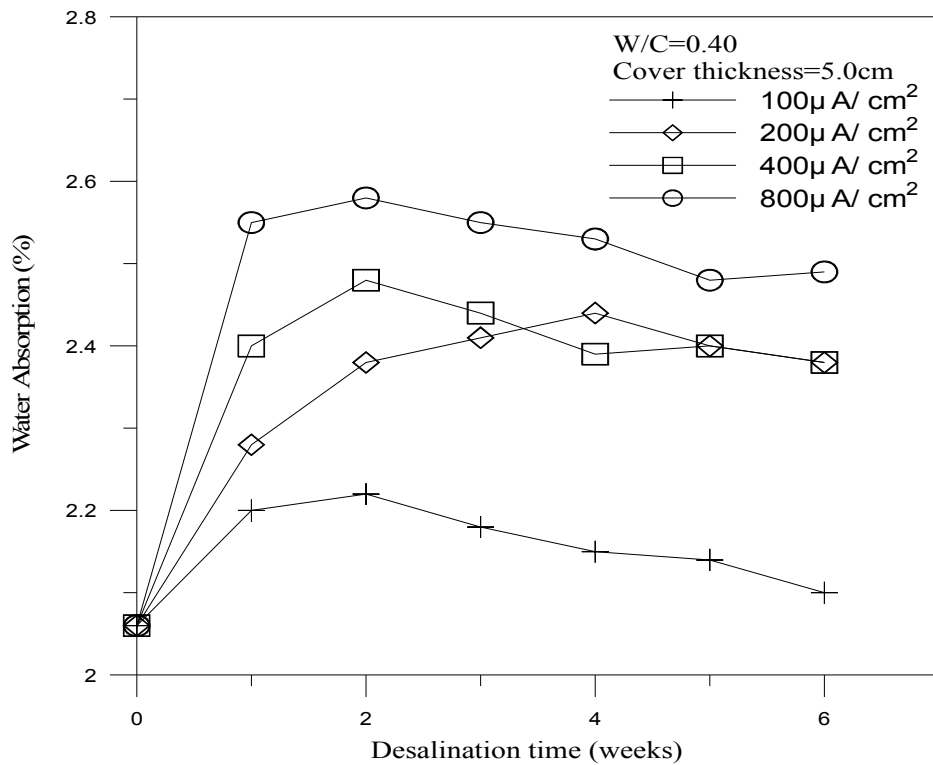


圖 5-22 w/c= 0.40,t=5.0cm 之吸水率-除鹽時間關係圖

混凝土電阻係數

本研究之電阻係數測量係採用 Wenner 四極式測法，由於混凝土的電阻係數會隨著試體本身含水率的不同而改變，因此進行試驗時，為較精確比較不同試體間的差異，有必要依照一相同含水率條件，本研究係採面乾內飽和的狀態，實驗結果如表 5-6 所示。

表 5-6 混凝土之電阻係數(k Ω -cm)

電流密度	水灰比	保護層厚度	極化時間					
			1 週	2 週	3 週	4 週	5 週	6 週
0 $\mu A/cm^2$	0.66	2.5cm	6.3					
		5.0cm	7.1					
	0.40	2.5cm	9.6					
		5.0cm	10.7					
100 $\mu A/cm^2$	0.66	2.5cm	7.7	8.0	8.8	9.5	9.6	9.9
		5.0cm	7.5	7.9	8.4	9.2	10.1	10.4
	0.40	2.5cm	9.9	10.3	11.5	12.5	13.3	13.6
		5.0cm	11.0	11.3	11.9	12.6	13.1	13.6
200 $\mu A/cm^2$	0.66	2.5cm	8.3	8.9	9.4	9.7	10.7	11.8
		5.0cm	8.1	8.6	9.1	9.5	10.3	11.4
	0.40	2.5cm	10.5	11.1	12.4	13.0	13.7	13.8

		5.0cm	11.4	11.9	12.5	13.0	13.6	14.0
400 $\mu A/cm^2$	0.66	2.5cm	9.9	10.9	11.2	11.5	12.9	13.0
		5.0cm	9.5	10.4	11.0	11.5	12.2	12.7
	0.40	2.5cm	11.7	12.1	13.2	13.5	13.9	14.5
		5.0cm	12.3	12.5	13.3	13.5	13.7	14.3
800 $\mu A/cm^2$	0.66	2.5cm	11.1	11.4	11.8	12.7	12.8	13.2
		5.0cm	10.8	11.2	11.5	11.9	12.5	12.6
	0.40	2.5cm	12.2	12.8	13.6	14.1	14.9	15.4
		5.0cm	12.7	13.1	13.4	13.9	14.3	14.5

由上述資料可以發現，試體之水灰比愈高其混凝土電阻係數較低，而保護層厚度 5.0cm 的試體會略高於 2.5cm，係由於強度高之混凝土孔隙結構較為緻密，且保護層厚度大的試體在量測電阻係數時會增大電流的傳導路徑，而導致電阻係數略高於保護層厚度小的試體；並且隨著電流密度及通電時間的增加混凝土電阻係數呈現上揚的趨勢，主要是因為溶解於混凝土孔隙中的自由氯離子被逐漸的移除，使得混凝土孔隙水溶液內離子交換率降低，混凝土傳導率下降，導致通過陽極面及陰極面之電流變小所造成的現象。

混凝土電阻係數在不同狀態下其變化範圍為 $1\sim 10^4 k\Omega\cdot cm$ ，與試體所處的環境及材料的組成息息相關，而結構物的混凝土電阻係數若太低，代表其抵抗氯離子的能力較差，容易造成混凝土中鋼筋受到破壞，而提高鋼筋腐蝕的風險。研究指出在 $20^\circ C$ 下，普通混凝土電阻係數若低於 $10 k\Omega\cdot cm$ 鋼筋腐蝕的機率很高，在此將此值訂為鋼筋腐蝕之臨界值。

將表 5-6 整理成圖 5-23、5-24、5-25 及 5-26，可以明顯看出不同水灰比及保護層厚度的影響參數 $i_{cxt}(\mu A/cm^2 \times week)$ 對混凝土電阻係數的關係，在經濟、效率及能源使用的考慮下，採取一組影響參數 $1500(\mu A/cm^2 \times week)$ 的作用，四組混凝土電阻係數均可躍過鋼筋腐蝕之臨界值如表 5-8。

由表 5-7 中發現，保護層厚度 2.5cm 的混凝土其電阻係數增加率約為 5.0cm 的 1.5 倍，並且隨著水灰比的下降而呈現下降的趨勢；所以在相同的影響參數下，顯示保護層厚度小及水灰比高的混凝土其電阻係數之瞬時增加速率較快，意謂著保護層厚度大及水灰比低的混凝土受外加陰極電流的極化效應較差，進而降低去鹽成效。

表 5-7 影響參數 $x=1500(\mu A/cm^2 \times week)$ 對應之電阻係數

水灰比	保護層厚度	初始電阻係數 A	極化後電阻係數 B	電阻係數增加率 $\frac{(B-A)}{A} \times 100\%$
0.66	2.5cm	6.3kΩ-cm	11.8kΩ-cm	87%
	5.0cm	7.1kΩ-cm	11.5kΩ-cm	62%
0.40	2.5cm	9.6kΩ-cm	13.8kΩ-cm	44%
	5.0cm	10.7kΩ-cm	13.7kΩ-cm	28%

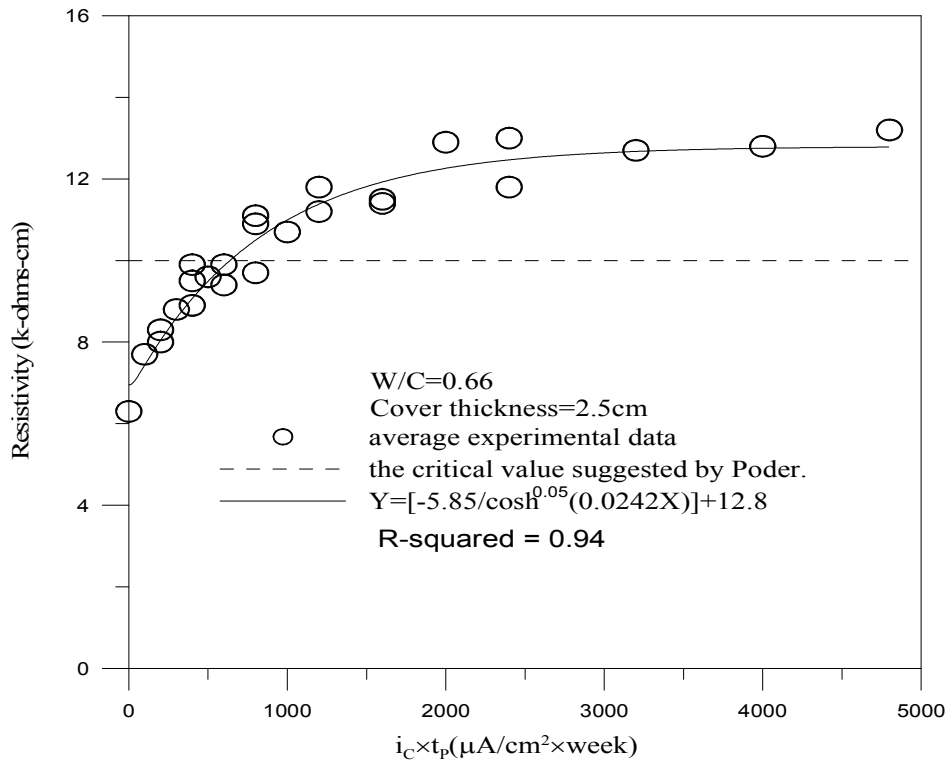


圖 5-23 w/c=0.66,t=2.5cm 電阻係數與影響參數之關係圖

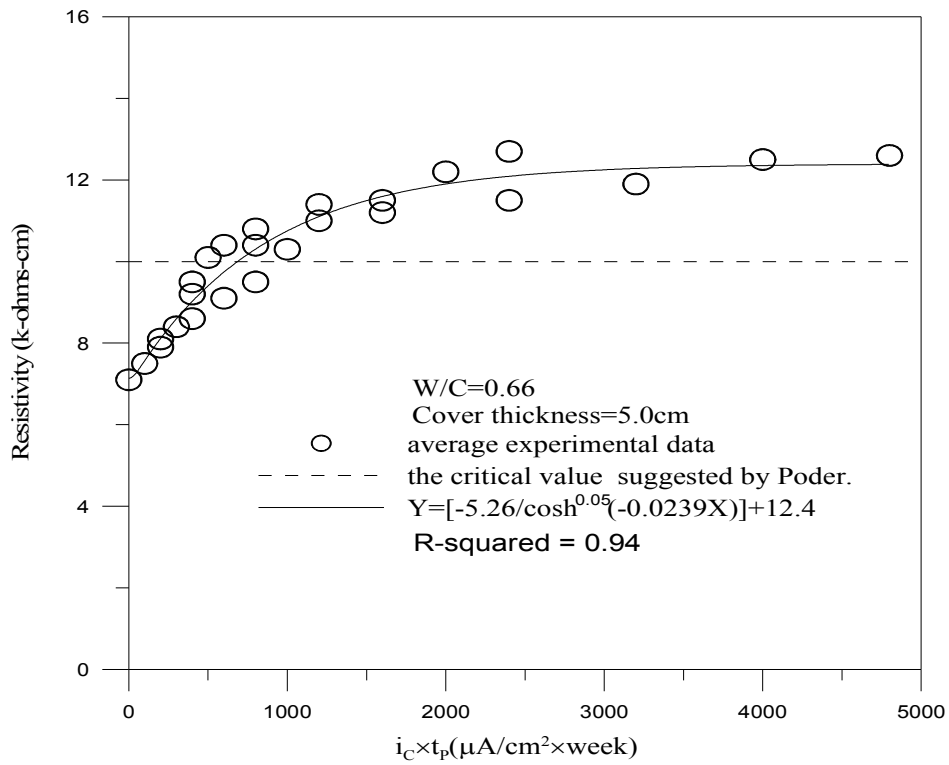


圖 5-24 w/c=0.66,t=5.0cm 電阻係數與影響參數之關係圖

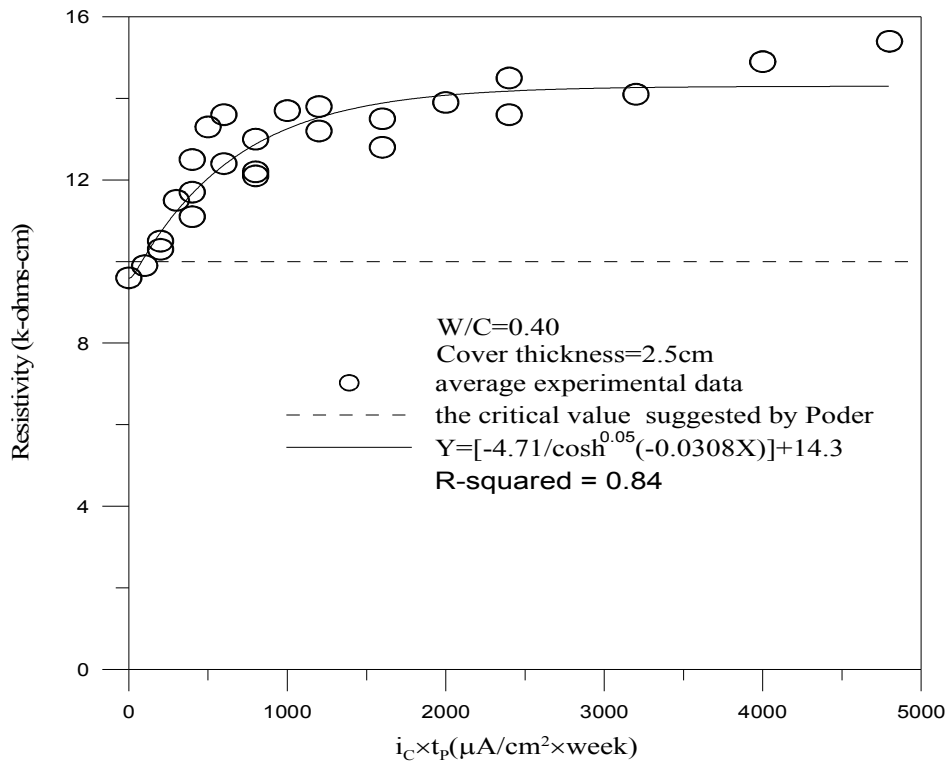


圖 5-25 w/c=0.40,t=2.5cm 電阻係數與影響參數之關係圖

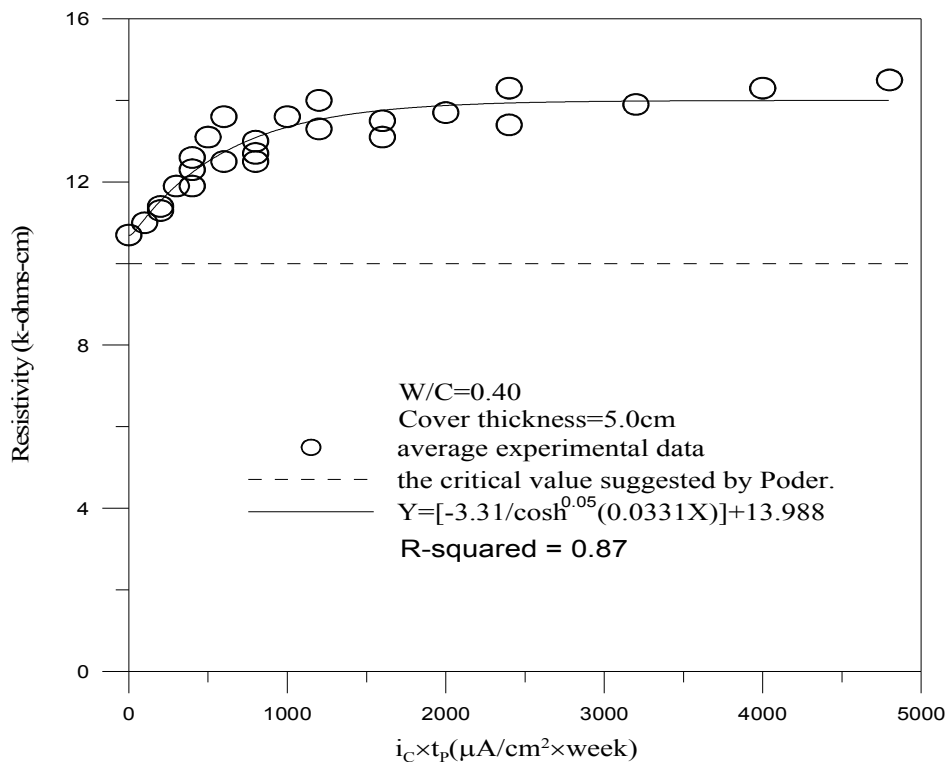


圖 5-26 w/c=0.40,t=5.0cm 電阻係數與影響參數之關係圖

陸、結論與建議

一、結論

化學分析

1. 外加電場除鹽後界面處之 pH 值與除鹽時間及外加電流密度大小成正比，其原因與鹼性離子往鋼筋附近移動有關。
2. 外加電場除鹽後界面附近之氯離子剩餘含量與除鹽時間及外加電流密度大小成反比，並隨著混凝土保護層愈低及水灰比愈高其除鹽效果越佳。

電化學性質

1. 外加電場除鹽後所量測到鋼筋半電池電位值會很小，此乃外加電流對鋼筋產生極化作用所致，在經過兩個月時間的去極化作用，可以準確的量測到鋼筋腐蝕電位，透過定性分析電化學除鹽確實可以提高鋼筋之半電池電位，改變鋼筋所存在的腐蝕環境，達到緩和鋼筋之腐蝕風險。

物理性質

1. 吸水率試驗顯示外加電場除鹽後混凝土接受外界水份能力升高，而且外加電流密度愈大，其吸水率越高。
2. 混凝土電阻係數經過外加電場除鹽後呈現上揚的趨勢，保護層厚度愈低及水灰比愈高其電阻係數瞬時增加速率越快。

二、建議

1. 由本研究之結果，顯示外加電場確實具有除鹽的效能，電流密度愈大早期的除鹽效能愈佳，但是若採用相同的影響參數 $i_c \times t_p$ ($\mu A/cm^2 \times week$)，發現無論是在除鹽的效能或是抗蝕

的行爲上，低電流密度反而有較佳的表現，而且對混凝土本身的物理性質影響較低，相對副作用會較少；因此，在實務的應用上，建議使用低電流密度並延長通電時間來進行除鹽。

2. 由於外加電場除鹽而造成混凝土吸水率及吸水速率的增加，顯示其孔隙結構已明顯發生變化，因此有關外加電場除鹽後混凝土力學性質方面的研究，宜進一步深入加以探討，來尋求能夠兼顧除鹽效果及可接受的力學性質改變範圍之最佳通電成本(影響參數 $i_c \times t_p, \mu A/cm^2 \times week$)。
3. 外加電場除鹽法之優劣比較：

優點	一、 確實能有效的去除混凝土中的氯離子 二、 增加鋼筋附近的 pH 值，阻止腐蝕的持續發生 三、 能提高半電池電位值，降低腐蝕機率
缺點	一、 通電時間較久時，會造成能源的浪費 二、 上下兩層鋼筋網間混凝土中之氯離子較不易驅除 三、 外加電場若太大會降低鋼筋混凝土界面處之握裹力

柒、參考資料及其他

- 一、國中自然與生活科學課本
- 二、施建志，“濕性腐蝕的一般型態及其有關原理”，材料科學第十二卷，pp. 54-63，1992。
- 三、鮮祺振，“腐蝕控制”，財團法人徐氏基金會出版，1998.02.01初版。
- 四、林維明，“鋼筋混凝土腐蝕要因及對策之探討”，港灣技術研究所，1998.12。
- 五、黃兆龍，“混凝土摻用海砂之策略及檢測技術研討會論文輯”，財團法人台灣營建研究中心，1994。
- 六、黃兆龍，“混凝土中氯離子檢測分析方法”，海砂與土木建築結構物可靠度關係研習會，1994。

【評語】 030810

1. 本作品主旨在於應用外加電場去除混凝土中海砂鹽中的氯離子，以期修補防護受污染鋼筋之效果。
2. 針對研究作品中數據結果的理解，應可更熟稔，以了解通盤的研究全貌。