

陰極防蝕技術應用於含氯鋼筋混凝土之研究

曾文傑*¹、張建智²、葉為忠²

The Application of Cathodic Protection on the Chlorine Reinforced Concrete

Wern Jier Tseng*¹, Jiang Jhy Chang², W. C. Yeih²

摘要

在海洋環境下，鋼筋混凝土構造物受氯離子之侵蝕常會導致鋼筋的銹蝕，進而促使構造物崩裂毀壞。為使構造物之維護及使用年限得以延長，針對已遭受氯離子侵襲之鋼筋混凝土試體，應用陰極防蝕技術，依據鋼筋極化現象之量測及氯離子滴定的結果，探討含氯鋼筋混凝土構造物防蝕所需之最佳外加電流密度及所達成的去氯成效。試驗結果顯示：隨著外加電流密度的增加及通電時間的增長，鋼筋混凝土試體內剩餘之氯離子含量會明顯下降，下降量以在鋼筋附近最為顯著，惟最終的去氯成效仍有其一定的限度。此外，若試體之水灰比愈高，則其去氯成效愈佳。綜合評估可得：為防護鋼筋免於腐蝕發生，其所需施加之最佳電流密度應為 10 mA/m² ~ 20 mA/m²。

關鍵詞：鋼筋混凝土；陰極防蝕；氯離子。

ABSTRACT

Failure of reinforced concrete structures exposing to marine environments occur frequently due to steel corrosions induced by intrusion of chlorides. To find the physical solutions of protecting such kinds of structures from aggravation corrosions and extending its lifetime, specimens of reinforce concrete containing with chlorides are prepared and a series of laboratory experiments are performed in this study. Adopting the cathodic protection technique, both of the optimization density of the impressed current and effects of steel polarization are measured and chloride ion titrate, the de-chloride efficiency is evaluated as well. Tested results show that the residual content of chloride in specimens decreasing and converging to a certain limitation as increasing both of the impressed current density and the desalination time. The regions where appeared with the most significant de-chloride effects are found neighboring to the steel. Moreover, it is found that the higher ratio of water/cement in specimens, the better the de-chloride effects are. Synthetically speaking, for steel corrosion control the impressed optimum current density of about 10 mA/m² ~ 20 mA/m² is proposed.

Key words: Reinforced concrete; Cathodic protection; Chlorides.

1 交通部運輸研究所港研中心助理研究員

Assistant Researcher, Institute of Transportation

2 國立台灣海洋大學河海工程學系教授

Prof., Dept. of Habor and River Eng., National Taiwan Ocean University

* 連絡作者：jier@mail.ihmt.gov.tw

1. 前言

混凝土一直為應用廣泛且經濟、耐久性佳、使用量大、取得容易的營建材料，而混凝土組成中的砂石料(即粗細骨材)佔混凝土中約 70%~80% 之體積。由於台灣地區砂石的供應一直長期依賴各河川砂石^[1] (佔總供給量的80%以上)，造成混凝土中摻用海域附近之河川砂石料、海水、海砂在所難免，再加上混凝土是一多孔隙性之材料，極易受到外界有害物質的滲入侵襲，使結構物遭致破壞。

海洋環境下鋼筋混凝土結構物發生腐蝕導致結構體的破壞，主要係因結構物受到海水的浸泡或大氣中挾帶含鹽粒子(氯離子)的侵蝕，當濃度高的氯離子滲入鋼筋混凝土結構物(R.C.結構物)中，一旦累積濃度超過瓶頸濃度值(chreshold concentration)以上時，將局部性的破壞鋼筋表面鈍態保護膜(passive layer)，在氧氣及水份充足的條件下，將導致鋼筋發生腐蝕行為，由於體積的膨脹，終究造成R.C.結構物的開裂或剝落。因此若能有效的將混凝土中之氯離子加以驅離，以達到保障混凝土結構物之安全，必能增加混凝土使用年限及降低長期性維修費用。

腐蝕問題對於濱海的結構物或橋樑而言，是一普遍存在的現象，當然台灣也不例外。近年來隨著對混凝土品質要求不斷的提高及科技長足的進步，目前電化學的理論及技術，已陸續被應用於海洋環境下的 R.C. 結構物之修護與鋼筋腐蝕之防治方面，因此如何有效驅離或降低氯離子的存在，或阻止外界氯離子侵入結構物內部，以達到提昇鋼筋混凝土結構物之安全，為一刻不容緩的重要課題。

本研究旨在利用陰極防蝕技術應用於受氯離子污染的 R.C. 構造物上，探討其對腐蝕控制及氯離子驅離之效果。

研究範疇分成下列四部份：

- (1) 不同水灰比、氯化鈉濃度對混凝土抗壓強度之探討。
- (2) 比較不同水灰比、氯化鈉濃度及電場條件(外加電流密度及通電時間)下，鋼筋開路電位變化情形。

- (3) 模擬海水腐蝕環境下，不同水灰比、氯化鈉濃度及電場條件下，試體斷電 24 小時後，鋼筋電位去極化量。
- (4) 探討試體經施加不同電流密度及通電時間後，氯離子驅離之成效。

2. 陰極保護原理與防蝕標準

陰極防蝕是以降低金屬之電位，來減緩金屬的溶解反應，進而達到降低或抑制腐蝕速率之目的。理論上把金屬的電位降低至其平衡電位，可以使腐蝕率降低至趨近於零。但由於周遭環境的因素，如金屬離子濃度、溫度等，造成平衡電位不易確定，又加上需耗費很大的外加電流，而顯得不經濟，所以實務上是鮮少進行的。

依據美國腐蝕工程師學會制定之 N.A.C.E. International RP290-2000^[2] 規範，建議當陰極防蝕系統已達穩定保護電位時，即進行斷電測試。量測瞬間斷電後的電位與瞬間斷電 4~24 小時(或更長)後的電位，兩者之間的電位差值必需大於 100 mV(即去極化量 ≥ 100 mV)，方能確定陰極防蝕已達到設計之預期效果。即

$$V_{\text{depole}} = |V_{\text{OFF, Final}} - V_{\text{OFF, instent}}| \geq 100 \text{ mV}$$

V_{depole} : 斷電後鋼筋電位之退極化量

$V_{\text{OFF, Final}}$: 瞬間斷電後最終的鋼筋電位(通常為瞬間斷電後 4~24 小時之電位)

$V_{\text{OFF, instant}}$: 瞬間斷電後的鋼筋電位

當電位控制超過 NACE 訂定防蝕電位之標準時，亦即將電位控制在更低(負)的電位時，不僅需使用更大的電力，造成成本增加外，尚有可能會產生一些不良之副作用，諸如氫脆現象。

3. 試驗方法

3.1 配比與試體製作

本研究混凝土試體配比係參照 ACI-221 配比設計法中相關規範設計而得。試體總共製作 112

個，分別為抗壓試驗 12 個，開路電位量測及 24 小時去極化量 60 個，氯離子滴定 40 個。

試體尺寸為 10 ϕ ×20 cm 之圓柱體，拌合時分別以 0.5% 及 1.0% 水泥用量之氯化鈉，加入拌合水中攪拌溶解之，使氯離子能均勻分佈於混凝土漿體中，模擬結構物受鹽害污染之狀況。

混凝土試體內埋入1根 16 cm 長的 #4 鋼筋，澆製前預先將木製壓條中心鑽孔，上下兩塊壓條以螺栓將竹枝固定鋼筋於中間，使鋼筋露出混凝土 4 cm，並以膠帶包紮露出的鋼筋，然後進行試體灌製，俟拆模後即置入養生室養治 28 天。

3.2 通電系統裝置

本研究試體施加電流密度時，先將圓柱試體浸泡於模擬的海水中約 19 cm 深，維持試體於通電過程中處於水飽和的狀態。在除鹽電路之設計上，係採用串聯方式以穩定電流量，如圖1所示。

3.3 抗壓試驗

本試驗製作 10 ϕ ×20 cm 之混凝土圓柱試體，取出經過養生室養治 28 天後的 12 個試體，並將試體放入烘箱中烘乾。俟試體烘乾後，置於磨平機上將試體磨平，進行抗壓強度試驗。

3.4 鑽心取樣

取出經過養生室養治 28 天後的試體，將不通電控制組8個試體放入烘箱中烘乾。俟試體烘乾後，由混凝土表面向鋼筋處分別鑽取 0 ~ 1.5 cm、1.5 ~ 3.0 cm、3.0 ~ 4.2 cm 處之鑽粉，每處鑽7孔約取8克重以上，共 24 包鑽粉。試體前面兩處鑽孔，應於分別完成鑽粉後，以空氣噴槍將孔內殘留粉末完全清除。其餘試體於完成設定之通電時間後即停止通電，依照前述方法，每個月將8個試體烘乾後鑽取 24 包粉末。

3.5 離子自動滴定分析

本研究以離子自動滴定儀對混凝土內氯離子進

行萃取。為求得鋼筋混凝土經過外加電流通電後，混凝土內部剩下的氯離子含量，依據 ASTM C-114 中之相關規定，以水溶法求得硬固混凝土中氯離子含量。詳細之萃取步驟如下：

- (1) 分別量秤鑽心取得的混凝土粉末3克重，於乾淨之燒杯中。
- (2) 加入 60 ~ 70 mL 的蒸餾水將粉末攪拌分散之。置於加熱器上加熱，攪拌至沸騰狀態後，以錶玻璃蓋住燒杯口持續5分鐘，隨後將燒杯移開加熱板，待溶液冷卻後，加以保鮮膜封存，靜置 24 小時。
- (3) 依正常過濾程序，將冷卻後的溶液過濾萃取之以去除殘渣，過濾時並以真空抽氣裝置加速過濾的速度。
- (4) 在空燒杯中，加入 100 mL 蒸餾水及添加 2 mL 之 0.05 N NaCl 標準溶液外，並將過濾萃取之濾液分別以分注器量取 1.0 mL 注入燒杯中。
- (5) 將燒杯置於電磁攪拌器上，放入攪拌磁石，插入電極，攪拌速度調整於5，緩慢攪拌濾液，以 0.1 N AgNO₃ 溶液滴定試樣。
- (6) 當電位變化差值最大時，表示待測試樣已達滴定終點，此時自動滴定儀會自動列印出 AgNO₃ 滴定消耗量。
- (7) 重覆進行萃取步驟，取得所有樣品之滴定。

3.6 開路電位量測

本研究之開路電位 (Open Circuit Potential, OCP) 的量測，依據 ASTM C876-91 利用半電池電極來量測鋼筋的腐蝕電位，以 Cu/CuSO₄ 電極為例，其量測的原理是利用銅離子流和銅電極本身所產生的半電池電位差，將半電池電極和鋼筋連結時，由電流所產生的電子和硫酸銅溶液中的銅離子，會因而行成一個電化學反應，而此種電化學反應可算是一種異金屬電池的效應。開路電位的量測依以下步驟進行：

- (1) 鋼筋混凝土試體待28天養治齡期到達後，先量測各組試體鋼筋的初使開路電位值。
- (2) 每隔一週同一時間，於斷電後，分別量測各組

試體的開路電位值，直到開路電位值呈現穩定即停止量測。

- (3) 隨後量測瞬間斷電前後的電位及分別經過 4、8、24 小時後的鋼筋電位值。

4. 試驗結果與分析

4.1 抗壓強度

本研究係以不同水灰比 (0.4、0.6) 配合不同氯化鈉添加量 (0.5%、1%) 灌製試體，並於養生試養治28天後，模擬鹽害結構物之狀況進行試驗。表1為試體經過28天養護齡期之抗壓強度表，由表中可知含氯試體最大抗壓強度為 430 kgf/cm²，最小抗壓強度為 305 kgf/cm²，而兩種不同水灰比的試體皆顯示，添加較少氯化鈉 (0.5%) 的試體呈現比添加較多氯化鈉 (1.0%) 的試體之抗壓强度高。且緻密性較高 (水灰比=0.4) 的試體亦明顯高於緻密性較低 (水灰比=0.6) 試體之抗壓強度。此結果與相關文獻^[3-4]中分別利用 3.5% 及 3.0% 水泥含量的氯化鈉所拌合之混凝土，其抗壓強度發展趨勢類似。

4.2 鋼筋開路電位

本研究各組試體之初始鋼筋開路電位值，如表2所示，混凝土試體於通電前所量測之鋼筋開路電位值均落於 -294 mV(CSE) 至 -346 mV(CSE) 之間。根據 ASTM C-876 通電前之鋼筋應處於可能發生腐蝕的狀態。

本研究試體施加不同電流密度分別為 1、10、20、100 mA/m²，並於每週固定時間，量測各組試體斷電後之開路電位值，結果如圖2 ~ 圖6所示。試體於通電的過程中，由於鋼筋被當作陰極防蝕處理而產生極化作用，進而影響鋼筋開路電位值的量測。圖2為控制組(不通電)試體所量測的鋼筋開路電位值停留在 -300 mV(CSE) 至 -500 mV(CSE) 之間；而圖3及圖4為試體施加電流密度分別為 1、10 mA/m²所量測的電位值停留在 -300 mV(CSE) 至 -500 mV(CSE) 之間，鋼筋並無明顯極化現象；圖5為試體施加電流密度為 20 mA/m²所量測的電位

值，其鋼筋已有明顯極化現象；圖6為施加電流密度為 100 mA/m² 之電位值，由於施加更高之電流密度，其鋼筋極化現象更為顯著。

上述結果可以證實，在陰極防蝕處理的過程中，鋼筋本身的開路電位值，幾乎隨著電流密度及時間的增加往負值方向在移動。

4.3 鋼筋電位去極化

目前全世界各地針對陰極防蝕保護已有一套標準，而根據美國腐蝕工程師學會制定之 N.A.C.E. International RP290-2000^[2] 規範，建議當陰極防蝕系統已達穩定保護電位時，即進行斷電測試。量測瞬間斷電後的電位與瞬間斷電 4 ~ 24 小時 (或更長)後的電位，兩者之間的電位差值必需大於 100 mV(即去極化量 ≥ 100 mV)，則顯示陰極防蝕已達到保護鋼筋的預期效果。

本研究各組試體於通電七週後，量測瞬間斷電前後之鋼筋電位值，隨後分別量測瞬間斷電後 4、8、24 小時之鋼筋電位值。表3為鋼筋瞬間斷電 24 小時後電位衰退量，由表中可知各組試體瞬間斷電後 4、8、24 小時之電位均呈現隨著斷電時間的增長而電位越大(往正值方向移動)；而比較各組試體瞬間斷電後的電位與瞬間斷電24小時後的電位衰退量，結果顯示施加電流密度為 1 mA/m²之試體，其鋼筋電位 24 小時的衰退量最大僅為 23 mV，由於衰退量太小，顯然保護效果較差；但反觀施加電流密度為 10 mA/m²之試體，其鋼筋電位24小時的衰退量已有半數大於 100 mV，顯示鋼筋可能已接近達到保護的電流密度；而施加電流密度 20與 100 mA/m²，全數試體 24 小時之電位衰退量皆已在 100 mV 以上，顯示已達到保護鋼筋的預期效果。根據陰極防蝕系統相關之標準應用規範及技術報告^[5]建議，混凝土中鋼筋一般所需保護電流密度約為 10 ~ 20 mA/m²，與本研究結果大致相符。

4.4 去氯成效評估

4.4.1 水灰比與氯化鈉含量

本研究探討不同的水灰比及不同的氯化鈉含量

之試驗組合，評估其對電化學去氯效率之影響。表4為通電後混凝土試體之氯離子去除率(%)，觀察表中可知通電後所有試體氯離子去除率，幾乎皆呈現隨著水灰比之增加而提高，但並未隨著氯化鈉含量的增加而提高。

4.4.2 通電之電流密度

觀察電流密度為10與 50 mA/m²時，發現幾乎所有試體隨著電流密度的增加，其氯離子去除率亦隨之提高，而試體經過3個月之通電時間處理後，試體內的氯離子已大部份被驅除，若再增長通電時間所能驅離的數量已不多。如圖7所示。

4.4.3 通電時間

圖8為通電時間與氯離子去除率之關係。由圖中可知氯離子去除率均呈現隨著通電時間之增長而越大。而施加較高電流密度 (50 mA/m²) 者，其初期(通電1個月後)氯離子去除率有明顯較大的跡象。本研究在同一電流密度下，初期(通電1、2、3個月後)的去除率會隨通電時間之增加而提高，但由於氯離子與水泥中的 C₃A 固結在一起，並無法達到完全去氯的狀態，所於最終去除率會轉趨於平緩，不會再有大量的氯離子被移除至電解液中，這表示最終去氯的成效有其一定的限度。

4.4.4 電化學去鹽作用範圍

由圖9及圖10中可知在離試體外緣深度為 3.5 cm 處，其氯離子去除率明顯較大，亦即在鋼筋附近的氯離子被驅離最多。

5. 結論

1. 所有試體均隨著水灰比的增大及氯化鈉的增加，其抗壓強度明顯下降。
2. 試體於通電前所量測到鋼筋開路電位值處於可能發生腐蝕的狀態。
3. 斷電後鋼筋電位去極化量與通電時間的長短，試體的含水狀況及去極化時間有關。就去極化時間

而言，試體在飽和的狀況下，隨著斷電時間的增加而電位越往正值方向移動，相對地去極化量也增大，當保護電流密度為1 mA/m²時，斷電24小時的鋼筋去極化量小於100 mV之保護標準，而電流密度在20 mA/m²與100 mA/m²時，則鋼筋去極化量大於100 mV，符合設計保護標準。

4. 對於通電處理後試體，欲利用開路電位法觀察鋼筋的腐蝕趨勢，其去極化時間必需足夠，否則會有判讀上的誤差。
5. 電化學去氯後鋼筋附近之去氯成效最為明顯，且其氯離子剩餘含量與去氯時間及電流密度大小成反比。
6. 為防護鋼筋免於發生腐蝕，其所需施加之最佳電流密度應為 10 mA/m² ~ 20 mA/m²。

誌謝

本研究承蒙運輸研究所港研中心陳桂清博士及中華民國防蝕工程學會秘書長羅俊雄博士，提供寶貴的建議和指正，使本研究內容更臻完善，特此致謝。

參考文獻

1. 陳家榮，「台灣地區未來砂石供需展望與政策研擬」，財團法人國家政策研究基金會，國政分析，民國91年1月25日。
2. "Impressed Current Cathodic Protection of Reinforcing Steel in Atmospherically Exposed Concrete Structures", NACE Standard RP0290-2000, NACE international, Houston, TX, 2000.
3. 游政憶，「電化學除鹽對含氯混凝土中鋼筋腐蝕行為及握裹性質影響之研究」，國立台灣海洋大學河海工程研究所碩士論文，八十九年六月。
4. A. M. Neville, "Properties of Concrete", Pitman Pub. London, (1995) pp. 144-145.
5. U. K. Slough, "Model specification for cathodic

protection of reinforced concrete", Concrete
Society Technical Report No 37 (1991).

收到日期：2004 年 7 月 31 日

修訂日期：2005 年 2 月 17 日

接受日期：2005 年 7 月 1 日

表1. 28天齡期之抗壓強度。
Table 1 Compressive strength after 28 days.

試體編號	水灰比(w/c)	氯化鈉(%)	荷重(KN)	抗壓強度(kgf/cm ²)	平均抗壓強度(kgf/cm ²)
45	0.4	0.5%	331.5	430	430
			328.3	426	
			334.8	435	
41	0.4	1.0%	317.8	413	402
			306.5	398	
			304.2	395	
65	0.6	0.5%	251.4	327	326
			253.6	328	
			249.2	324	
61	0.6	1.0%	235.7	306	305
			232.3	301	
			237.9	309	

表2. 鋼筋之初始開路電位值。
Table 2 Open circuit potential of rebar at initial stages.

試體編號	水灰比(w/c)	氯化鈉(%)	開路電位(mV)	
45	0.4	0.5	-294	
			-301	
			-298	
			-301	
			-300	
41		1.0	-327	
			-326	
			-329	
			-325	
65		0.6	0.5	-329
	-315			
	-317			
	-319			
61	1.0		1.0	-311
				-324
				-346
				-342
				-345
				-346
			-343	

表3. 鋼筋瞬間斷電24小時後電位衰退量。
Table 3 Potential decay after 24 hours.

電流密度 (mA/m ²)	試體編號	通電電位 (mV)	CP OFF 瞬時電位 (mV)	CP OFF 4小時電位 (mV)	CP OFF 8小時電位 (mV)	CP OFF 24小時電位 (mV)	24小時電位 衰退量 (mV)
1	45	-351	-347	-327	-325	-324	23
	41	-368	-360	-348	-347	-341	19
	65	-362	-357	-356	-351	-350	7
	61	-392	-383	-372	-371	-368	15
10	45	-482	-463	-444	-429	-401	62
	41	-500	-487	-420	-412	-381	106
	65	-454	-439	-392	-391	-372	67
	61	-512	-489	-479	-441	-386	103
20	45	-835	-811	-699	-694	-669	142
	41	-799	-764	-701	-659	-651	113
	65	-780	-778	-669	-663	-640	138
	61	-769	-754	-688	-683	-652	102
100	45	-879	-844	-739	-716	-693	151
	41	-858	-848	-706	-701	-684	164
	65	-850	-818	-695	-688	-679	139
	61	-832	-817	-715	-714	-705	112

表4. 通電後混凝土試體之氯離子去除率(%)。
Table 4 Removing rate of chlorides (%).

電流密度 (mA/m ²)	水灰比 (w/c)	氯化鈉 (%)	距離試體外緣 深度(cm)	通電時間(月)			
				1	2	3	4
10	0.4	0.5	0.7	20	28	39	45
			2.1	21	26	37	43
			3.5	23	32	46	47
		1.0	0.7	15	31	33	37
			2.1	21	29	37	41
			3.5	24	34	44	49
	0.6	0.5	0.7	19	29	39	41
			2.1	24	28	38	43
			3.5	25	36	46	49
		1.0	0.7	22	32	38	45
			2.1	19	32	40	41
			3.5	25	36	46	48
50	0.4	0.5	0.7	23	30	40	46
			2.1	22	29	45	44
			3.5	26	35	47	48
		1.0	0.7	21	32	41	41
			2.1	21	31	40	43
			3.5	26	37	48	51
	0.6	0.5	0.7	27	30	41	47
			2.1	28	33	43	47
			3.5	29	38	48	50
		1.0	0.7	24	33	41	42
			2.1	21	35	43	46
			3.5	27	38	50	54

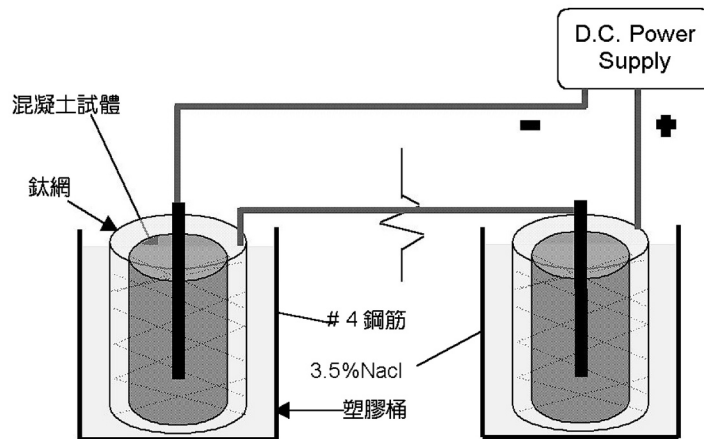


圖1 外加電流陰極保護設置。
Figure 1 Apparatus for impressed current cathodic protection(ICCP) system.

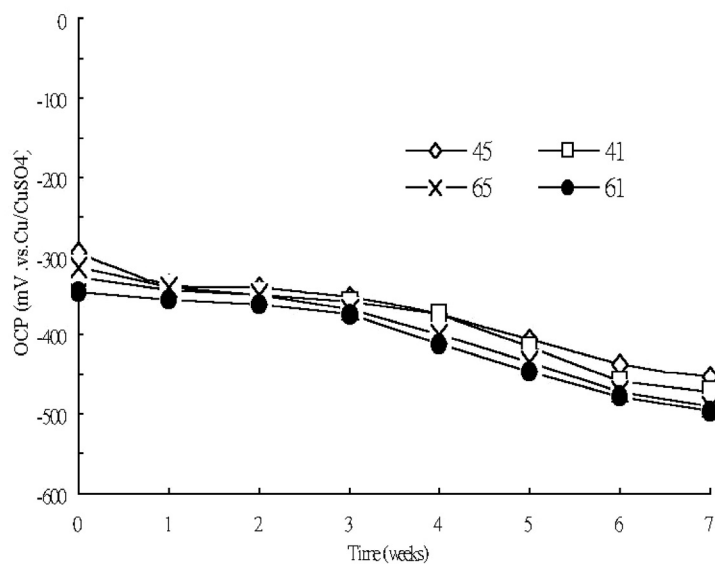


圖2 控制組 (不通電) 試體之鋼筋開路電位變化。
Figure 2 Changes of the rebar potential. (Impressed current density is 0 mA/m²)

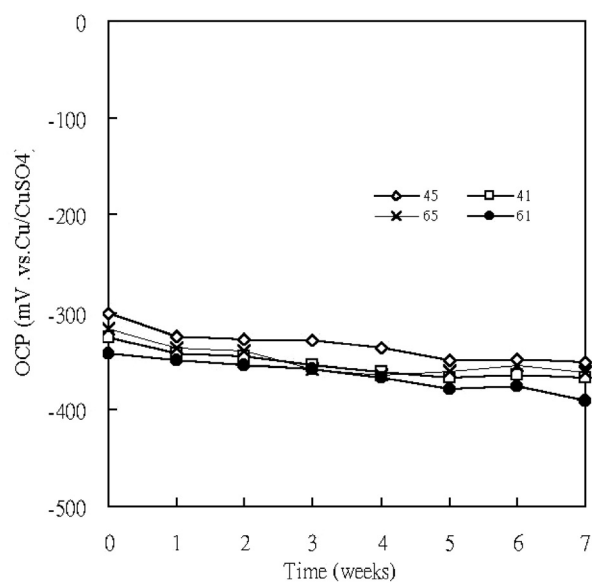


圖3 電流密度 1 mA/m² 斷電後試體之鋼筋開路電位變化。
Figure 3 Changes of the rebar potential. (Impressed current density is 1 mA/m²)

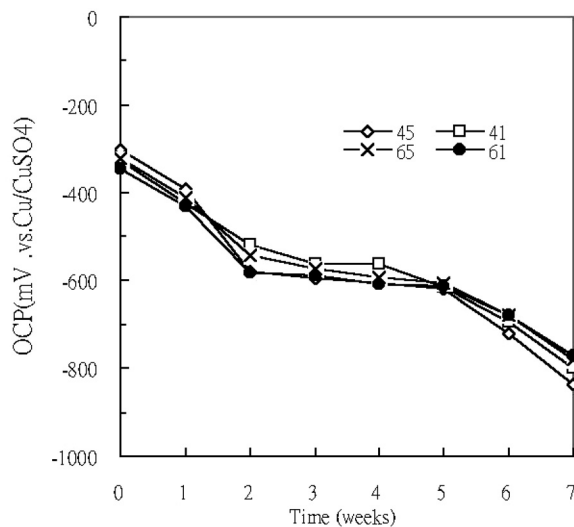


圖4 電流密度 10 mA/m² 斷電後之鋼筋開路電位變化。
Figure 4 Changes of rebar potential. (Impressed current density is 10 mA/m²)

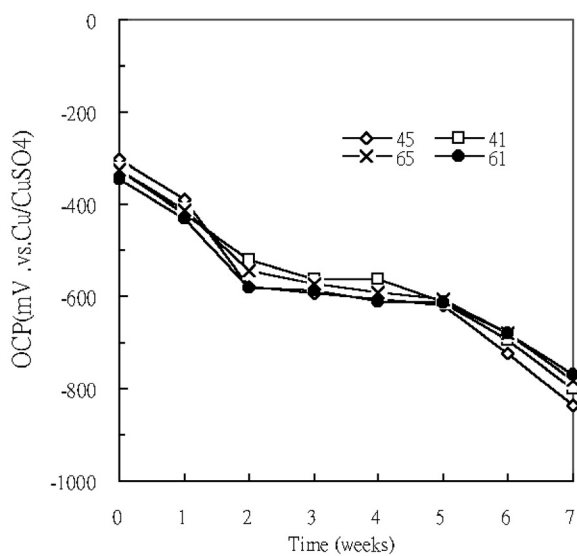


圖5 電流密度 20 mA/m² 斷電後之鋼筋開路電位變化。
Figure 5 Changes of rebar potential. (Impressed current density is 20 mA/m²)

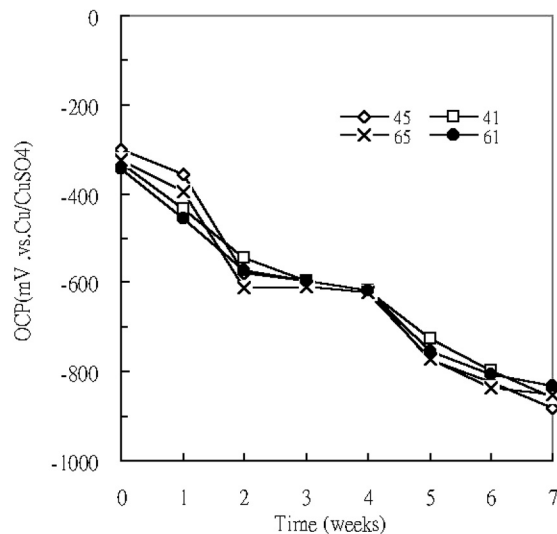


圖6 電流密度 100 mA/m² 斷電後之鋼筋開路電位變化。
 Figure 6 Changes of rebar potential. (Impressed current density is 100 mA/m²)

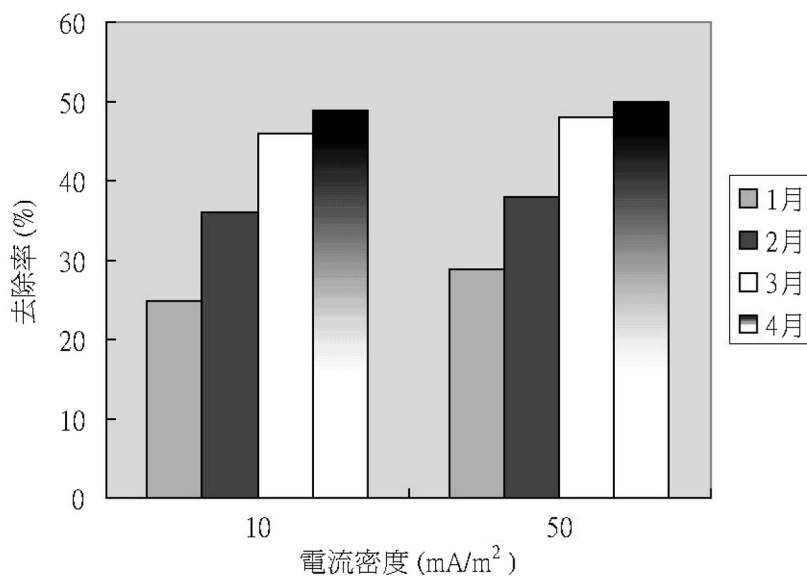


圖7 電流密度與 Cl⁻ 去除率之關係 (2.8 ~ 4.2 cm處, w/c = 0.6, NaCl = 0.5%)。
 Figure 7 Impressed current density vs removing rate of chloride plots. (at 2.8 ~ 4.2 cm, w/c = 0.6, NaCl = 0.5%)

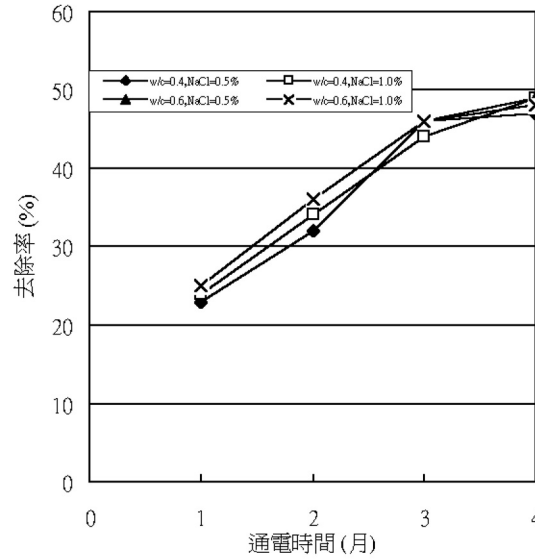


圖8 電流密度 50mA/m^2 ，其通電時間與 Cl^- 去除率之關係(距離試體外緣 2.8~4.2 cm)。

Figure 8 ICCP conducting time vs the removing rate of chloride (at 2.8~4.2 cm). (Impressed current density is 50mA/m^2)

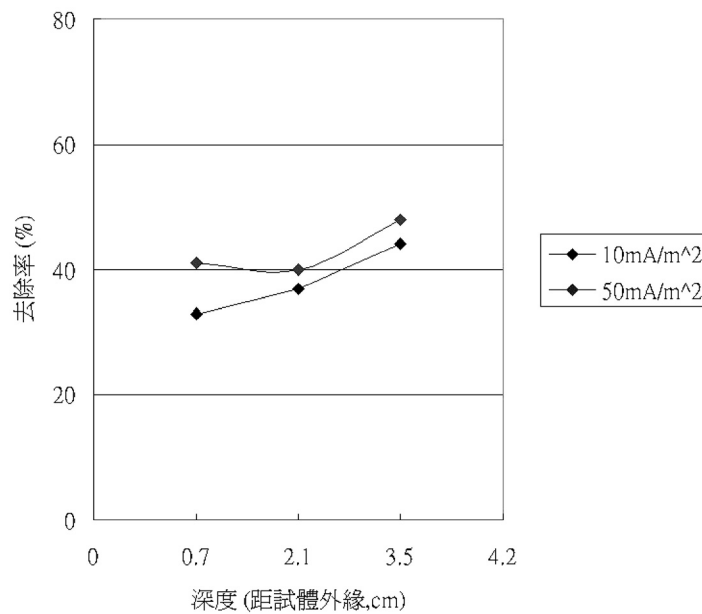


圖9 通電3個月，深度與 Cl^- 去除率之關係 ($w/c = 0.4$ ， $\text{NaCl} = 1.0\%$)。

Figure 9 ICCP for 3 months, at different depths vs the removing rate of chloride. ($w/c = 0.4$, $\text{NaCl} = 1.0\%$)

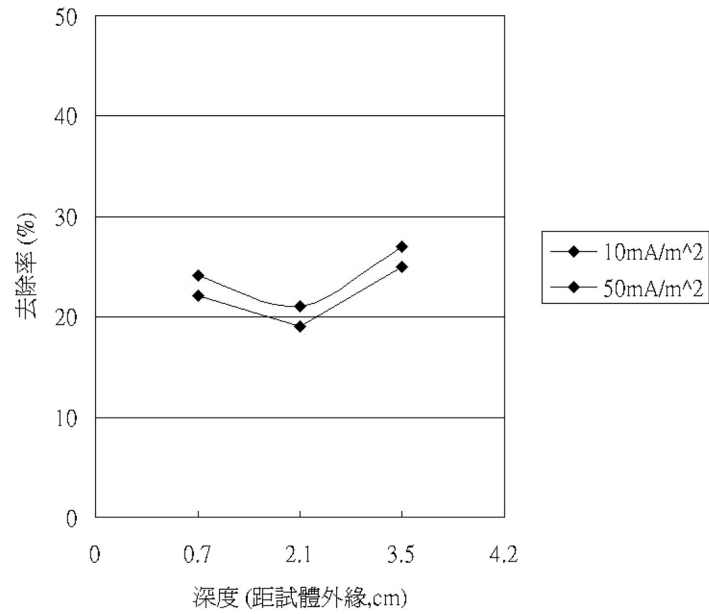


圖10 通電1個月，深度與 Cl⁻ 去除率之關係 (w/c = 0.6，NaCl = 1.0%)。
Figure 10 ICCP for 1 months, at different depths vs the removing rate of chloride. (w/c = 0.6, NaCl = 1.0%)

