

TAICON混凝土腐蝕行爲及耐久性評估指標之研究

紀茂傑*、黃然*、楊仲家**

Study of Corrosion Behavior and Durability Index of TAICON

Jack M. Chi, Ran Huang*, Chung-Chia Yang***

摘 要

以往評定混凝土的品質常常以強度為依據，但是強度高並未必代表耐久性佳；混凝土的耐久性係指於使用年限內其物理特性與力學性質未發生嚴重劣化，並能維持結構物安全。本研究利用電化學之開路電位法、直流極化法及交流阻抗法探討TAICON混凝土中鋼筋的腐蝕行爲；此外並進行各項試驗其中包括抗壓強度、吸水率、快速氯離子滲透試驗(RCPT)、氯離子擴散試驗及混凝土電阻試驗等探討高性能混凝土的耐久性。結果顯示混凝土試體抗壓強度與快速氯離子滲透試驗之電流量無明顯關聯性；但利用快速氯離子滲透試驗(RCPT)、氯離子擴散試驗與鋼筋腐蝕試驗可評估其耐久性。

關鍵詞：電化學、高性能混凝土、耐久性、快速氯離子滲透試驗

Abstract

The object of this study is to investigate the corrosion behavior of high performance concrete (TAICON) and set up the durability criteria. Open-circuit potential method, DC polarization method and AC impedance were applied to measure rebar corrosion. In addition, the compressive strength, absorption rate, rapid chloride penetration test (RCPT) and chloride ion diffusion test were performed. Test results show that no significant relation exists between the concrete compressive strength and charge passed. RCPT and chloride ion diffusion test may be applied to assess the concrete durability besides rebar corrosion rate measurement.

keywords : electrochemical, high performance concrete, durability index

*國立台灣海洋大學河海工程系

Department of Harbor and River Engineering, National Taiwan Ocean University

**國立台灣海洋大學材料工程研究所

Institute of Materials Engineering, National Taiwan Ocean University

1、前言

近年來混凝土材料對構造物耐久性的影響日受重視，建立標準化規範，使材料達到使用性要求為當務之急。現今公共工程多缺少混凝土構造物的耐蝕設計且無保證混凝土構造物耐久性的明確規範或標準。多年來混凝土耐久性評估的基準大多利用不同的試驗方法決定混凝土之傳輸參數（如氯離子擴散係數、混凝土表面電阻、腐蝕速率及水滲透係數等），並配合適當的計算模式預測混凝土構造物殘餘壽命^[1]。近幾年來，國內外鋼筋混凝土構造物破壞事件頻傳，造成財物的損失及人員的傷亡，例如澎湖跨海大橋由於鹽份的侵蝕引起混凝土的剝落，以致縮短橋樑的使用年限^[2]；美國因腐蝕損壞對公路、橋樑、停車場與沿海結構物所做的修補費用達到10億美元^[3]。這些混凝土構造物問題的發生，皆在於設計之初對影響混凝土耐久性因素認知不足以及未能應用適當的材料知識去設計或建造構造物。

以往評定混凝土的品質常以強度為依據，但是强度高並不一定表示耐久性佳；混凝土的耐久性係指混凝土於使用年限內其物理特性與力學性質未發生嚴重劣化，以保障結構物安全。ACI Committee 201指出卜特蘭混凝土耐久性係指其抵抗風化作用、化學侵蝕、磨損及其他劣化過程的能力，亦即具耐久性之混凝土，在侵蝕的環境下仍能保持其原來的品質與服務性^[4]。結構設計的目的是使結構物能長期發揮其應有之功能。鋼筋混凝土構造物破壞的主要因素可以分為混凝土的劣化及鋼筋的腐蝕。當鋼筋混凝土構造物發生腐蝕破壞時，鋼筋的腐蝕生成物會使混凝土承受應力產生裂縫，縮短有害物質（如氯離子、水、氧氣等）到達鋼筋表面所需的時間，加速整個腐蝕反應的過程，造成結構物的損壞並縮短其使用年限，由於腐蝕損壞會造成構造物破壞甚且影響生命安全。故腐蝕對鋼筋混凝土耐久性之影響是工程界必須正視的問題。

近年來，混凝土在強度的提昇上已有顯著的發展，混凝土研究者為增進工程品質與效益，於此方

面投注很大的心力。經多年的努力，研發出高強度、高耐磨性、高水密性、高體積穩定性及高流動性之高性能混凝土，並實際應用於工程上。歐、美、日各國使用高性能混凝土於各項土木、建築結構物上正方興未艾^[5,6]；我國也正積極推展高性能混凝土並應用於各項重大工程建設。高性能混凝土研究群基於過去五年的研究經驗並配合國家社會建設需要，提出臺灣高性能混凝土(TAICON)推廣計劃，利用三年時間分組進行組材料及硬固混凝土性質之研究並推廣TAICON 至全國各地。TAICON工作群提出TAICON免搗實混凝土的各項性質與配比所需條件必須符合抗壓強度在27.6 MPa至34.5 MPa（4000psi至5000psi）之間、初始坍度220mm±20mm，45分鐘後坍度不小於200mm、初始流度介於400mm至600mm，45分鐘後不小於400mm、每立方混凝土中水泥用量不大於300kg、水灰比不小於0.42、卜作嵐材料使用量不大於水泥重量的30%。

混凝土結構物的耐久性主要受到材料的品質、配比設計、製造、施工養護以及構造物本身所處的環境等因素影響。混凝土本身是一種孔隙性材料，當混凝土構造物長期暴露在大氣環境中，有害物質常以液體、氣體型態經由滲透、擴散、吸附的方式進入混凝土中，這些有害物質侵入混凝土中常常並非單一的傳輸型態，而可能是幾種的傳輸型態同時發生，因此要了解混凝土的耐久性，必須對這些傳輸機理有所了解。混凝土材料的品質及耐久性與滲透性有很大的關連；而混凝土的滲透性又取決於孔隙結構；孔隙結構特徵主要由總孔隙體積、孔隙連續性以及孔隙大小和分布型態來決定^[7]；降低混凝土的孔隙體積被認為是改善混凝土耐久性的最佳途徑。本研究利用電化學之開路電位法、直流極化法及交流阻抗法探討TAICON混凝土中鋼筋的腐蝕行為；此外並進行各項試驗其中包括抗壓強度、吸水率、快速氯離子滲透試驗（RCPT）、氯離子擴散試驗及混凝土電阻試驗等探討高性能混凝土的耐久性。

2、試驗計畫

2-1 試驗材料與配比設計

本研究計畫採用亞洲水泥公司所生產之洋房牌卜特蘭第一型水泥；深澳火力發電廠生產之飛灰（符合ASTM C618規定之F級）；矽灰係自挪威進口。粗骨材（最大粒徑為3/8英寸，比重2.64）與細骨材（細度模數3.1，比重2.62）均產自蘭陽溪，級配分布曲線皆符合ASTM C-33規定；鋼筋採用符合CNS規範之竹節鋼筋；強塑劑為Type G高性能減水劑（茶磺酸鹽甲醛縮合物）。本研究使用之配比係依據ACI 211.1規範加以設計調整，混凝土配比設計如表一所示；其中配比A符合TAICON混凝土的各項性質與配比所需條件；此外，為探討並比較TAICON混凝土與高性能混凝土中鋼筋的腐蝕行為及耐久性，另拌製配比B及配比C兩組高性能混凝土；為使全部試體符合高流動化混凝土拌製，其初始坍度與45分鐘後坍度必須大於 $220 \pm 20\text{mm}$ 、而初始流度與45分鐘後流度不小於400mm。

2-2 試驗方法

本研究坍度的測定是依據ASTM C143規定，坍流度係參考JSCE-F503之規定；混凝土壓力強度依據ASTM C39規定；吸水率試驗是參考ASTM C642-90硬固混凝土吸水率試驗法進行實驗。快速氯離子滲透試驗（rapid chloride penetration test；RCPT）參照ASTM C1202-97之規定^[8]；本試驗取直徑10cm厚度5cm之混凝土圓柱試片，先將試片進行抽真空處理後再將其浸置於水中16~20小時，取出試片，置於電滲槽中，在陽極的槽中置入0.3N的氫氧化鈉（NaOH）溶液，陰極的槽中置入3%的氯化鈉（NaCl）溶液，並完成電路。通以外加60V的直流電壓，便可以得到第一個電流值 I_0 並記錄。ASTM是建議每30分鐘紀錄其通過混凝土電流的大小，並利用梯形法則求出6小時內通過的總通電量，將電流值代入方程式 $Q=I \cdot t$ （庫倫=安培*秒）計算其電量，可

作為評估氯離子滲透性的指標。氯離子擴散試驗係參考Andrade（1993）提出的試驗方法與計算公式^[9]；本試驗取2cm混凝土試片，置於擴散槽中間壓克力板的孔槽中，四周以防水材料塗封，使試片固定於壓克力板上且無滲水現象；試驗中以電場強度20V進行加速氯離子擴散試驗，每隔12小時取樣並利用氯離子滴定儀量測氯離子濃度；然後利用待測槽之氯離子濃度的累加圖，取穩定狀態下的數值做線性回歸，再經換算即可求得氯離子擴散係數。開路電位法係以標準甘汞電極為參考電極，在未外加電流、電壓狀態下量測鋼筋之電位，此電極電位即為腐蝕電位。根據美國材料試驗學會（ASTM C876-91）的建議^[10]，當混凝土中鋼筋的半電池電位高於 200mv Cu/CuSO_4 （ -120mv, SCE ），腐蝕機率低於10%。半電池電位低於 -350mv Cu/CuSO_4 （ -270mv, SCE ），腐蝕機率高於90%；而介於這兩者之間的腐蝕機率介於10%~90%。直流極化法乃利用一微小之過電壓（需小於10mv）進行擾動，而得一反應電流，此微小過電壓與反應電流會成一線性關係^[11]，其線性斜率為極化阻抗值；再代入Stern-Geary方程式可求得腐蝕電流密度，當腐蝕電流密度被求出後，再利用法拉第定律即可求得鋼筋之腐蝕速率。交流阻抗法係利用一微小之交流電荷與頻率對鋼筋腐蝕系統進行擾動，將反應所得之訊號經由電路解析技巧可量測鋼筋的極化阻抗 (R_p) ，再將極化阻抗 (R_p) 代入Stern-Geary方程式中計算鋼筋腐蝕速率。

3、結果與討論

3-1 抗壓強度試驗

抗壓強度是評估混凝土品質的重要指標。本研究拌製三種不同配比混凝土試體並於室溫下養護，分別在7天、14天、28天、56天及91天時各取三個試體進行混凝土抗壓強度試驗，結果如表二及圖一所示。混凝土28天之抗壓強度均符合實驗設計要求；

此外結果顯示，水膠比較低者抗壓強度較高且隨齡期的增加而增加，但在齡期56天後因水泥水化反應及卜作嵐效應已趨緩和，強度在齡期56天後增加速度已漸趨平緩。

3-2吸水率試驗

本實驗係依據ASTM C642規範進行試驗，結果顯示齡期91天時Mix A、Mix B及Mix C之吸水率分別為5.47%、3.77%與2.82%。一般混凝土的吸水率與表面孔隙率有關，且水灰比、齡期及早期養護溫度對硬固混凝土的總孔隙體積與孔隙連續性具有相當影響。Mix C試體的抗壓強度最大而吸水率試驗結果亦顯示Mix C試體的表面孔隙率應該較另外二種配比為低且較為緊密。

3-3快速氯離子滲透試驗 (RCPT)

快速氯離子滲透試驗，由於其方法簡單且能快速的比較混凝土中氯離子之滲透能力，因此被美國材料試驗學會 (ASTM) 採納，當作評估混凝土抵抗氯離子滲透能力的試驗方法；本研究試驗結果如表三及圖二所示，顯示混凝土通過的電量與混凝土的齡期、水膠比有關，會隨著齡期增加、水膠比減少而下降且混凝土的電量於齡期91天以後趨於穩定。其中Mix C的電滲量最低，表示其抵抗氯離子的滲透性為最好。此外混凝土中的孔隙率與水膠比有直接的關係，通常低水膠比之混凝土其孔隙結構較高水膠比之混凝土緻密；由於混凝土中的離子是利用孔隙結構進行傳輸，而混凝土中的電流傳導必須依賴孔隙結構的特性與孔隙溶液的成份來傳送，因此在低水膠比之混凝土中，由於孔隙的細緻化便降低了混凝土的滲透性，進而提升耐久性。

3-4氯離子擴散試驗

氯離子擴散試驗結果如圖三所示，氯離子需要較長的時間才能穿透Mix C混凝土試片，次為Mix B試片、最快為Mix A試片；由延遲的擴散時間可以

定性的判斷混凝土的緻密性以Mix C為佳、Mix B次之、Mix A最差；混凝土中氯離子擴散的機制相當複雜，依據以前的研究報告顯示氯離子的擴散速率與混凝土中孔隙、暴露的時間、溫度、水灰比、卜作嵐材料的添加量等有關^[12]。試驗結果如表四所示，顯示氯離子擴散係數隨水膠比的增加而增加；由氯離子擴散係數定量評估混凝土的抗氯離子滲透性依序為Mix C、Mix B、及Mix A。

3-5電化學腐蝕試驗

半電池電位法

圖四為Mix A、Mix B及Mix C之三組試驗結果。依據ASTM C876-91規範規定可知，Mix A在通以定電流密度(0.5mA/cm²)加速腐蝕，混凝土中的鋼筋在加速24小時後腐蝕機率大於10%，當繼續加速至216~264小時後迅速造成鋼筋的鏽水逸出，此時表示混凝土已破壞；Mix B在加速72小時後其鋼筋的腐蝕機率才大於10%，當繼續加速至312~336小時後混凝土才破壞；Mix C在加速168~192小時後其鋼筋的腐蝕機率才大於10%，當繼續加速至384~432小時後混凝土才破壞，當混凝土中鋼筋加速腐蝕後其到達腐蝕機率大於10%之時間長久，以Mix C最久、其次Mix B而Mix A最早達到。故由上述結果可知開路電位法係以腐蝕機率來判定鋼筋腐蝕的可能性，並無法以量化的方式來表示鋼筋的腐蝕程度，因此本試驗利用開路電位做定性的判斷鋼筋的腐蝕。

直流極化法

本實驗以外加0.5mA/cm²電流密度加速鋼筋腐蝕，以縮短試驗時間得試驗結果。圖五所示為Mix A、Mix B及Mix C之試驗結果。Mix A在通以定電流24小時後均開始產生腐蝕，其混凝土中鋼筋之腐蝕速率隨著通電時間而產生腐蝕，腐蝕速率有遞增的趨勢，Mix B在通以定電流48~72小時後才量測得腐蝕速率，而Mix C在通以定電流168~192小時後才量測得腐蝕速率。因此，腐蝕速率趨勢為Mix A > Mix B > Mix C與混凝土中延遲鋼筋發生腐蝕時間為Mix C

最久其次為 Mix B 與 Mix A，故以定性評估混凝土的品質應為 Mix C 其次為 Mix B 與 Mix A。

交流阻抗法

圖六所示為 Mix A、Mix B 及 Mix C 之試驗結果。Mix A 在通以定電流 24 小時後均開始產生腐蝕，混凝土中鋼筋之腐蝕速率隨著通電時間而有遞增的趨勢，Mix B 在通以定電流 48~72 小時後才量測得腐蝕速率，而 Mix C 在通以定電流 168~192 小時後才量測得腐蝕速率。因此，腐蝕速率趨勢為 Mix A > Mix B > Mix C 與混凝土中延遲鋼筋發生腐蝕時間為 Mix C 最久其次為 Mix B 與 Mix A，故以定性評估混凝土的品質應為 Mix C 其次為 Mix B 與 Mix A。

3-6 抗壓強度與 RCPT (電滲法) 之電量關係

圖七為抗壓強度與 RCPT (電滲法) 之電量關係，結果顯示兩者並無明顯關係存在。

3-7 電量與 RCPT (濃度法) 之氯離子濃度之關係

圖八為混凝土齡期 91 天時，電量與氯離子濃度之關係，結果顯示電量庫侖隨氯離子擴散係數及氯離子累積濃度增加而有增加的趨勢；表示混凝土中的孔隙結構與孔隙溶液成份與氯離子快速滲透法 (RCPT) 有著密切的關係。由於混凝土中的離子是利用孔隙結構進行傳輸，而混凝土中的電流傳導必須依賴孔隙結構的特性與孔隙溶液的成份來傳送，因此電量與 RCPT (濃度法) 之氯離子濃度之關係主要還是與混凝土中的連續通路孔隙與孔隙溶液的成份有關。

4、結論

台灣高性能混凝土 (TAICON) 考慮的重點包括安全、經濟、工作、生態及耐久性等性能，尤其是耐

久性之考量是許多混凝土研究者一直努力的課題。研究結果顯示混凝土試體抗壓強度與 RCPT (電滲法) 之電滲量無明顯關係；利用快速氯離子滲透試驗 (RCPT)、氯離子擴散試驗及鋼筋腐蝕試驗等方法可快速的評估其耐久性。

5、參考文獻

1. Kropp, J. and Hilsdorf, H.K., Performance Criteria for Concrete Durability, 1995.
2. 李定湘, 李定宇, 王維寧, 「港灣防蝕」, 港灣工程, No.22 pp. 37-39, 1992
3. Dry, C.M., and Corsaw, M.J.T., "A Time-Release Technique For Corrosion Prevention", Cement and Concrete Research, Vol. 28, No. 8, pp.1133-1140. 1998.
4. ACI Committee 201.2R, "Guide to Durable Concrete," ACI Manual of Concrete Practice, Proc., Vol. 74, 1992, pp.573-609.
5. Daksh Baweja, Harold Roper, Vute Sirivivatnanon, " Relationships Between Anodic Polarization and Corrosion of Steel in Concrete", Cement and Concrete Research, Vol.23, USA, 1993, pp.1418-1430.
6. Clifton James R., " Predicting the Service Life of Concrete ", ACI Material Journal, Vol. 90, No.5, Nov.-Dec., 1993, pp.611-617.
7. Jawed, I., J. Skalny and J. F. Yang, "Hydration of Portland Cement", P. Barnes Maryland, 1987.
8. ASTM C1202-97, Test Method for Electrical Indication of Concrete Ability to Resist Chloride Ion Penetration, ASTM, PA, 1997.
9. Andrade, C., "Calculation of Chloride Diffusion Coefficients in Concrete from Ionic Migration Measurement", Cement and Concrete Research, Vol.23, No.43, 1993, pp.724-742.

10. ASTM C876-91, Standard Test Method for Half-Cell Potential of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, ASTM, PA, 1991.
11. ASTM G59-78 (Reapproved), Standard Practice for Conduction Potential Dynamic Polarization Resistance Measurement.
12. Nagesh, B., and Bhattacharjee, B., "Modeling of Chloride Diffusion in Concrete and Determination of Diffusion Coefficients", ACI Material, Vol. 95, No. 2, pp. 113-120, 1998.

表一 混凝土配比表(m³)

Table 1 Concrete mixe

Mix no.	水膠比 (W/B)	水泥 (kg)	水 (kg)	飛灰 (kg)	爐石 (kg)	矽灰 (kg)	細骨材 (kg)	粗骨材 (kg)	強塑劑 (kg)	設計強度 (MPa)
A	0.49	280	195	80	40	—	771	942	4.5	27.6
B	0.35	380	175	100	—	20	742	954	12	48.3
C	0.27	520	160	25	—	55	748	943	14	69.0

Mix A、Mix B、Mix C 其初始坍度與45分鐘後坍度必須不小於220±20 mm、而初始流度與45分鐘後流度不小於400 mm。

表二 不同齡期混凝土抗壓強度(MPa)

Table 2 Concrete compressive strength

age (day) mix	7	14	28	56	91	150
A	21.04	24.33	30.45	35.61	39.21	42.34
B	34.23	38.92	49.6	57.27	60.76	63.67
C	54.86	65.89	70.49	78.49	81.44	84.42

表三 不同齡期混凝土進行RCPT之電量(coulombs)

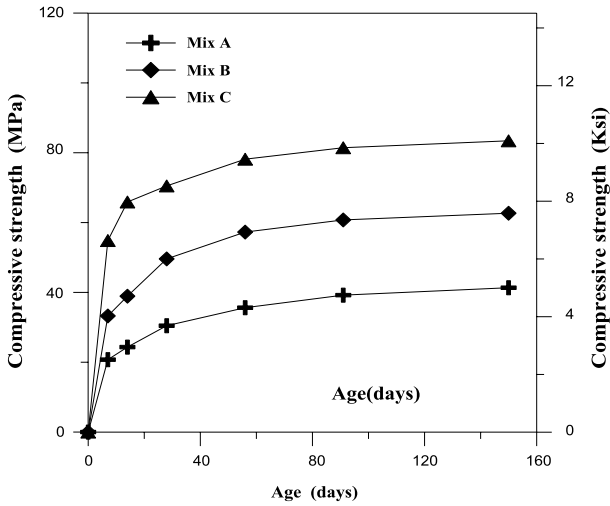
Table 3 Total charged passed at various age

age (days) mix	7	28	56	91	150
A	5138	2921	2499	1616	1466
B	3785	1448	912	800	623
C	2578	950	770	465	385

表四 不同配比在齡期91天之擴散係數

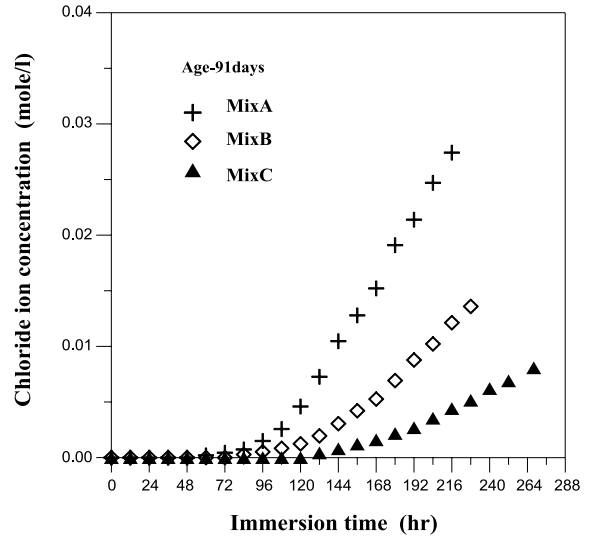
Table 4 Diffusion coefficient for each mix

mix	試體	擴散係數 (10 ⁻¹² m ² /sec)	average (10 ⁻¹² m ² /sec)
A	A1	1.81	2.04
	A2	2.27	
B	B1	1.04	0.98
	B2	0.92	
C	C1	0.55	0.56
	C2	0.57	

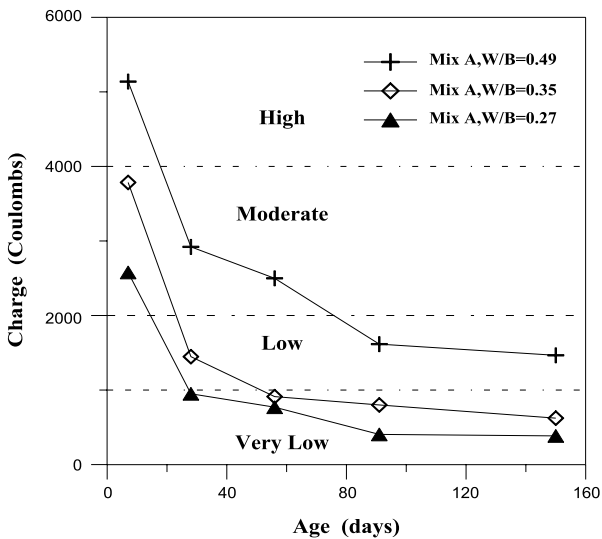


圖一 抗壓強度發展圖

Fig.1 compressive strength development

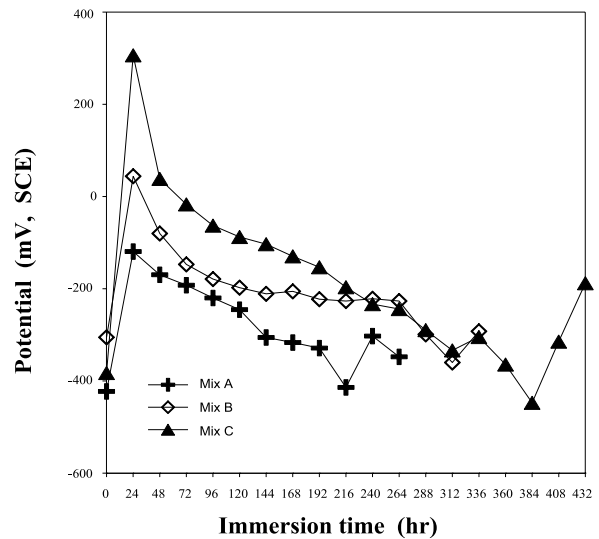


圖三 不同配比累積氯離子濃度與浸漬時間之關係
Fig.3 accumulated concentration of chloride ions vs immersion time



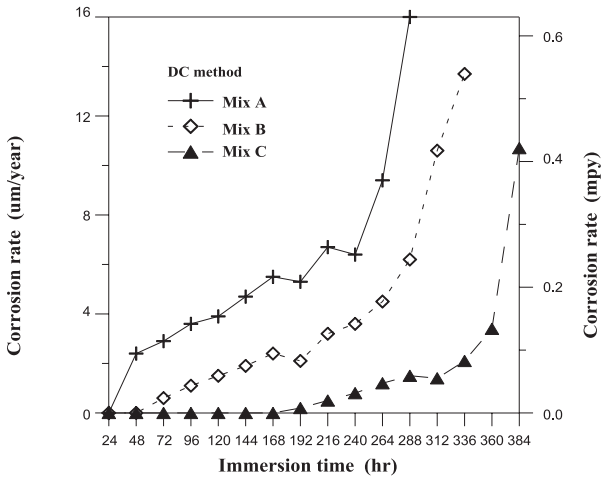
圖二 不同配比在不同齡期通過混凝土的電量

Fig.2 total charge passed vs ages

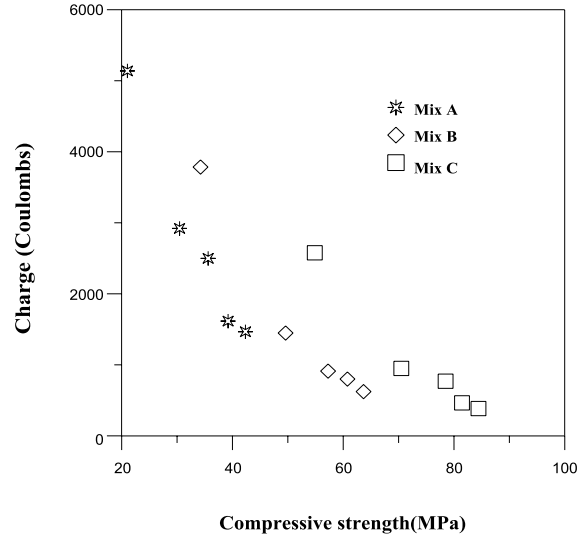


圖四 開路電位與浸漬時間之關係

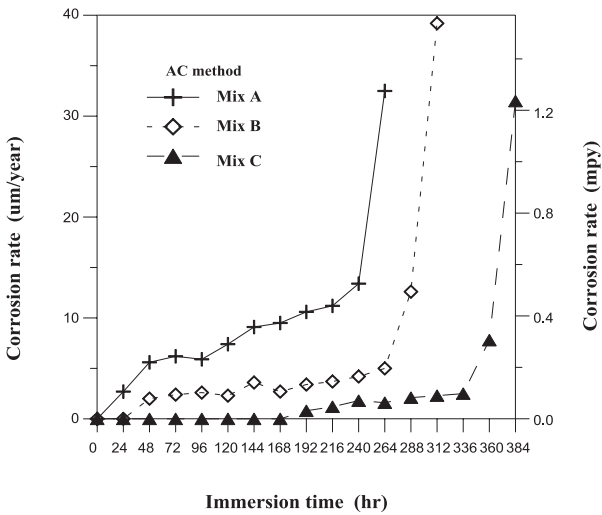
Fig.4 open circuit potential vs immersion time



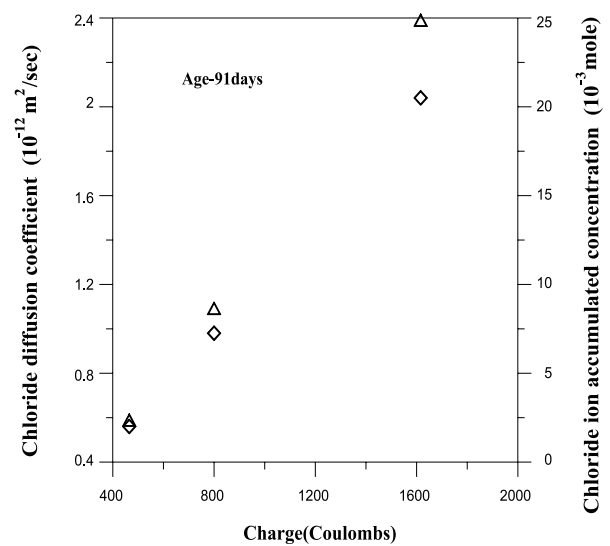
圖五 腐蝕速率與浸漬時間之關係 (DC method)
Fig.5 corrosion rate vs immersion (DC method)



圖七 抗壓強度與電量庫侖之關係
Fig.7 compressive strength vs charge passed



圖六 腐蝕速率與浸漬時間之關係 (AC method)
Fig.6 corrosion rate vs immersion time (AC method)



圖八 電量庫侖與氯離子擴散係數、累積濃度之關係
Fig.8 charge passed vs chloride ion diffusion coefficient and chloride ion accumulated concentration