

海洋環境下高性能混凝土之耐久性探討

張道光、饒 正、陳桂清、柯正龍

The Durability of High Performance Concrete under Marine Environment

T. K. Chang, Cliff Rau, K. C. Chen and C. L. Ko

摘 要

本文係探討高性能混凝土在海洋環境下之物理、化學及力學性質之行為，並評估其耐久性。計劃之初，規畫以高性能混凝土取代一般港灣設施所需求之中、低強度之傳統混凝土，於拌製過程中進行混凝土漿體之坍度、坍流度之量測，製作標準圓柱試體，進行各項基本性質試驗。為長期觀測其耐久性，製作大尺寸之鋼筋混凝土試驗牆曝放於大氣中，每日定時施以海水噴灑表面，進行乾濕循環加速試驗。牆內埋置有各種偵測元件，監測項目包括有漿體之電阻、溫度、濕度及鋼筋腐蝕電位、腐蝕電流密度等長期性之變化。初期試驗結果顯示，高性能混凝土具有甚佳之工作度、高強度、高電阻係數、低透水係數、低電滲量(小於1000庫倫)。試驗牆曝放一年六個月後，內部之鋼筋腐蝕電位仍處於-100 mV (Cu/ CuSO₄)，鋼筋腐蝕電流密度甚小，後續腐蝕變化仍持續監測中。

關鍵詞：高性能混凝土，耐久性，工作度，腐蝕電位，腐蝕電流密度

ABSTRACT

In the study, the behaviors of high performance concrete (HPC) on their physical, chemical and mechanic properties were under investigated; long term durable performance was also evaluated. At the first stage of the project, HPC was designed to instead of traditional ordinary Portland concrete (OPC) at medium to low compressed strengths required for marine concrete structures. At mixing concrete paste, the index of workability such as slump and flow test were measured and compared for both HPC and OPC. Standard cylindrical specimens were cast for further fundamental qualities analysis. Large scale of reinforced concrete walls of HPC and OPC were made and exposed at outdoors sprayed by seawater. Inside the concrete walls, there were sensors embedded for long-term monitoring on concrete resistance, temperature, moisture, rebar potential and corrosion current density. Test results depicted that HPC has very excellent workability, high compressive strength, high concrete resistance, low permeability, and low charge

* 交通部運輸研究所港灣技術研究中心
Center of Harbor and Marine Technology, Institute of Transportation

passed (less than 1000 coulombs). Rebar potentials of concrete walls were at -100mV (by Cu/CuSO₄), and their corrosion current densities were also low after one and half years exposed.

Keywords: high performance concrete, durability, workability, corrosion potential, corrosion current density

一、前言

高性能混凝土(High performance concrete, HPC)材料，為近年來國內、外營建工程界大力研發與應用之新建造材料。中華民國結構工程學會對高性能混凝土之定義為：抗壓強度大於560kgf/cm² (8000 psi)之混凝土，坍度為25±2cm，每立方公尺混凝土水泥用量小於450kg，水膠比(W/B)在0.2至0.45之間⁽²⁾。使用材料為水泥、水、粗細骨材、強塑劑及礦物摻料等。由於具有高流動性、高品質與高耐久性之特性，施工時不需搗實可自動澆置，又無骨材析離與泌水現象，對鋼筋密集之狹窄間距或斷面，均能流通過並達到充分填充效果。國外早已廣泛應用於高樓建物，海域平台、港灣設施等方面。但是在國內仍未普遍被採用，僅少數工程案例使用⁽³⁾，在港灣設施至今則尚未有使用之情形，至為可惜。

台灣四面環海地處環太平洋地震帶上，地震發生頻繁每年颱風不斷，港灣R.C.構造物處於此外力衝擊與海水鹽份侵入之惡劣環境下，混凝土甚易劣化、強度損失以及內部鋼筋腐蝕、斷裂等之破壞現象，對構造物之耐久性與安全威脅甚大。由於對外經貿主要以海運為主，因此港灣工程之建造、維護與安全極為重要。基於上述之事實，未來港灣之建設，應大量使用高性能混凝土材料建造，以提升結構物之耐久性。同時為監測結構物之現況，在建造時可埋設監測元件，隨時掌握結構物受外力衝擊或內部鋼筋腐蝕變化之情形，一旦發生狀況時，可立即維護或防範未然⁽⁴⁾。

本研究特以本土自產之飛灰、爐石之波索蘭材料與強塑劑等之摻料混拌，製作一般港灣設施需求之中、低強度之高性能混凝土與普通混凝土(OPC)，曝放於海水(洋)環境下，進行基本性質與耐

久性相關試驗，期待HPC大量使用於港灣工程建設上。

二、試體製作與試驗方法

1. 試驗材料

水泥：I型波特蘭水泥

水：一般自來水

粗細骨材：河川砂石，符合HPC製作需求

強塑劑：Type F

波索蘭材料：飛灰、爐石

2. 配比與試體製作

(1) 配比設計

高性能混凝土配比，設計強度分別3000 psi W/B=0.35，4000 psi W/B= 0.31，5000 psi W/B=0.27。

(2) 試體製作

a. 圓柱試體：15×30 cm與10×20 cm 兩種

b. 大型RC試驗牆：製作30×200×150 cm尺寸之試驗牆6座，設計強度分別為HPC:3000 psi、4000 psi、5000 psi及OPC 4000 psi

c. 鋼筋配置：一般省產# 4號鋼筋，配置間距20 cm，保護層厚度7cm

3. 腐蝕監測元件

採用德國製之Anode-Ladder System腐蝕監測元件，系統包含6根獨立的陽極棒及溫度、電阻、濕度感應等偵測器。

4. 試驗方法

(1) 基本性質試驗

混凝土漿體試驗包括下列項目；工作度、強度試驗、透水試驗、電滲量試驗、超音波速度量測等。

(2) 耐久性試驗

試驗牆之耐久性試驗監測項目如下；混凝土電阻係數、溫度變化、鋼筋腐蝕電位以及鋼筋腐蝕電流密度等。

5. 試體養護與曝露環境

圓柱試體置於 $23 \pm 0.7^{\circ}\text{C}$ 養治室下養護，R.C. 試體牆灌製拆模後，在大氣下以濕麻布覆蓋濕治14天，模擬一般工地實際之養護方式。試體於養治28天後曝放於大氣中，施以海水噴灑，試體或試驗牆單面每小時噴灑海水15分鐘，模擬實際之海洋曝露環境。

三、結果與討論

1. 混凝土基本性質試驗

(1) 工作性

圖1與圖2分別為強度4000 psi之HPC與OPC之坍度與坍流度之量測結果。兩圖中明顯指出，HPC之坍度與坍流度均比OPC高出甚多，如HPC之坍度輕易可達26 cm，坍流度大於50 cm以上。分析原因乃是一般OPC配比採用美國混凝土學會(ACI)之坍度設計，此法拌製之混凝土漿體常導致施工不易，工作性相對不佳。而HPC所使用之波索蘭材料，其顆粒粒徑小又呈球狀甚易拌合、流動，又添加之強塑劑可延緩漿體之初凝時間，防止坍度損失，所以工作性甚佳。

(2) 強度發展

圖3與圖4分別為設計強度4000 psi之HPC與OPC試體之強度實際發展情形。在養治28天階段兩種混

凝土強度皆可達到設計之要求，且隨養治齡期之增加持續成長，但是OPC試體於齡期90天後，其強度發展已趨於緩和，而HPC試體之中、晚期強度仍持續大幅增加，高出OPC甚多。本試驗其它不同配比之試體之比較結果亦復如此。探討原因HPC所添加之飛灰或爐石與水泥水化物產生波索蘭反應效應，致使漿體之微細孔隙結構更加緻密，大大提升晚期強度。又HPC在不同曝露環境下，其強度發展有一趨勢即在養生室環境 > 海水曝露環境 > 大氣環境下。

(3) 超音波波速試驗⁽⁶⁾

超音波脈波速度量測為混凝土非破壞性檢測技術之一，如配合混凝土試體密度及彈性模數之試驗，可快速評估混凝土之品質及其均勻程度。圖5與圖6分別為4000 psi之HPC與OPC試體之超音波速度量測之結果。圖中在水化硬固初期(28天齡期)時，HPC及OPC之波速分別為4099m/sec與3943m/sec，到一年六個月時變為4300 m/sec與4050m/sec，亦即HPC試體約比OPC試體從初期快3 ~ 5% 提高至後期約為快7~ 8%，顯示HPC之品質較OPC為佳且持續在提升中。

(4) 電滲量試驗

表1為各配比試體之電滲量試驗結果。表中HPC試體之電滲量均比OPC小甚多，且均低於1000庫倫以下，如以4000psi試體為例，HPC之電滲量為807庫倫(噴灑海水)與460庫倫(曝放於大氣)，OPC之電滲量則相對為1933庫倫(噴灑海水)與1813庫倫(曝放於大氣)。依據ASTM C1202⁽⁷⁾電滲量試驗規範解析，低於1000庫倫之試體，其氯離子滲透性非常低，顯示混凝土漿體之緻密性很高。因此，電滲量可為混凝土耐久性之參考指標，亦為驗收HPC品質標準之一⁽⁵⁾。

(5) 透水係數

圖7為各種配比試體之透水係數與齡期之關係圖。圖中明顯區分HPC試體之透水係數較OPC低甚多，主要原因可能為HPC添加波索蘭材料，致使漿

體孔隙更為緻密，如4000 psi HPC試體之透水係數約比OPC試體低7倍。透水係數之分佈除了可了解混凝土材質內部之緻密性與品質之良窳外，亦可間接輔助評估試體內部鋼筋腐蝕之風險與可能發生腐蝕之時間。

2. 試驗牆之耐久性監測

(1) 鋼筋腐蝕現況解析⁽¹⁾

圖8為試驗牆曝放於不同環境下，試體內部鋼筋以各型參考電極量測電位結果之分佈情形。圖中不同參考電極所測得之鋼筋腐蝕電位值似有明顯差距，如以氫電極做為基準零值電位換算時，則各型參考電極所測得之電位值都應是一致的。圖中MnO₂與AgCl電極之電位值差固定於-100 mV ~ -150 mV之間，顯是此兩種參考電極品質相當穩定，恰可相互對照校正腐蝕電位是否正確。圖中另一電位值為Gecore儀器(使用Cu/CuSO₄電極)所測得之結果，亦可當做參考比較用。

基本上HPC與OPC試驗牆內之鋼筋，在灌製至漿體完成水化硬固階段(初期0~30天之間)，電位變化最為激烈，主要受到漿體水分消長的影響，爾後隨著漿體持續水化、硬固與鹼性環境的上升，鋼筋之腐蝕電位趨於穩定(-100 mV ~ -200 mV，Cu/CuSO₄電極)，於曝露1.5年期間腐蝕電位仍為-100 mV左右，鋼筋持續處於鈍化狀態。由於保護層有7.0 cm，試驗牆曝露之時間尚短，內部鋼筋腐蝕狀態應持續監測之。

(2) 監測元件(Anode Ladder System)之量測

a. 鋼筋腐蝕電位

圖9為以埋置於HPC及OPC試驗牆內之偵測元件(Anode Ladder System)所量測到不同保護層厚度處之陽極(Anode Ladder System之鋼筋)，對陰極電位與時間之變化趨勢圖。整體而言，圖8與圖9之曲線分佈趨勢相似，僅採用之參考電極不同而已。圖9明顯表現出在各種試驗牆灌製後30天內，鋼筋腐蝕變化較為激烈且受到保護層厚度之影響，但是在100天

齡期後，鋼筋之腐蝕電位均趨於平穩且此時保護層厚度對其影響已不大。基本上HPC與OPC試驗牆內之鋼筋電位變化並無很大差異，保護層厚度之影響亦不大，與預期的發展略有差別，探究原因或許試驗牆之曝放時間僅1年半左右，內部鋼筋尚處於腐蝕萌芽階段，尚未形成促進腐蝕作用機制，如持續長期觀測後，內部之鋼筋電位變化應有明顯差異。

b. 鋼筋腐蝕電流密度⁽⁸⁾

圖10為以HPC及OPC試驗牆內之偵測元件，所測得之各陽極對陰極之電流密度與時間之關係。鋼筋腐蝕電流密度之分佈理論上應與腐蝕電位分佈有一定之關係。事實上圖10之變化應與圖8圖9之變化有一定之相關性。由於量測時間僅為1年半，尚無法有效測得實際之腐蝕電流密度分佈，後續應長期持續觀測之。

c. 混凝土之電阻係數⁽⁶⁾

混凝土電阻係數在腐蝕觀念中，可用來評估腐蝕電流通過混凝土介面的一種能力指標，電阻係數高表示電荷不易通過混凝土介面，電阻係數低則電荷較易流通，對混凝土內鋼筋腐蝕威脅性高。

圖11為HPC與OPC試驗牆之混凝土電阻變化情形。圖中HPC試驗牆之電阻均高於OPC試驗牆，以強度4000psi之試驗牆(如圖中之小圖(b)(c)(d))為例分析，HPC試驗牆之每一深度之電阻均比OPC試驗牆(分圖(c)(d))高出約有50%左右，分圖(c)(d)同為相同材質僅曝露條件不同之試驗牆，兩者電阻係數差異很小。圖11中亦顯示各試驗牆混凝土漿體在初期階段(齡期150天左右)，其電阻係數與時間均呈直線關係，於200至300天階段電阻係數達到最高點，爾後反轉呈下降走勢，長期間後應趨於平穩狀況。又試驗牆之保護層厚度亦影響電阻係數之大小，主要原因乃是愈接近表面之漿體受到外界干擾因子較多(例如水分子、Cl⁻等滲入)，故其電阻係數較小，保護層愈厚亦即愈接近試驗牆之中心處，外界因子不易到達，漿體之電阻係數則相對為高。

四、結論

本研究探討之混凝土品質與耐久性試驗，經過一年半之曝放與監測，初步獲得結論如下：

1. 拌製之HPC其工作性非常良好，坍度可達26 cm，坍流度大於50 cm以上，均能符合一般HPC之要求，澆置時無須搗實與振動且流動性甚佳。
2. HPC之微結構甚為緻密，其透水係數較一般之OPC為低甚多，晚期強度則較OPC高出甚多。
3. HPC與OPC之超音波速度從凝結至硬固階段，隨齡期之增長有持續增快之情形，於100天後趨於穩定。整體上，HPC之波速較OPC快出7~8%，顯示HPC之品質仍然高於OPC。
4. HPC之電滲量甚小(小於1000庫倫以下)，顯示氯離子在漿體內之滲透性非常低。
5. HPC試驗牆內之鋼筋腐蝕電位穩定，腐蝕電流密度甚小，混凝土之電阻係數高，鋼筋應處於鈍化狀態。
6. Anode Ladder System之監測系統顯示，試驗牆內部鋼筋之腐蝕電位與電流密度之變化呈一定之關連性，亦即腐蝕電位於不易腐蝕區域範圍時，其腐蝕電流密度相對較小。
7. HPC各方面之表現均較OPC為佳，但仍需長期監測以作為HPC耐久性能之評估。

參考文獻

1. 陳桂清，「電化學技術應用於鹽害R.C.結構物之去鹽成效與鋼筋腐蝕行為研究」(1999)。
2. 陳振川，「高性能混凝土研發及推廣研討論會文輯」，台灣工業技術學院，P.2，民國86年6月。
3. 黃兆龍「由高雄85層T&C Tower論HPC材料選擇及性能」，高性能混凝土(HPC)研發及應用研討論會論文集，P83~109，(1994)。
4. 林維明、饒正、張道光「港灣環境下高性能結

構體之性質研究(一)」P4~6(1998)。

5. 陳建成、黃兆龍，「海洋混凝土構造物耐久性之考量」，海洋工程品質與施工技術研討論會論文集，港灣技術研究所，民國84年4月。
6. J.H.Bungey and S.G. Millard, Testing of Concrete in Structures, 3rd. Ed., Blackie Academic & Professional, London, UK, 1996.
7. ASTM C1202, Annual book of ASTM Standards, Vol. 04.02, 1999.
8. J. P. Broomfield, Corrosion of Steel in Concrete, E & FN SPON, London, UK, 1997.



圖1 HPC-4000psi之坍度及坍流度



圖2 OPC-4000psi之坍度及坍流度

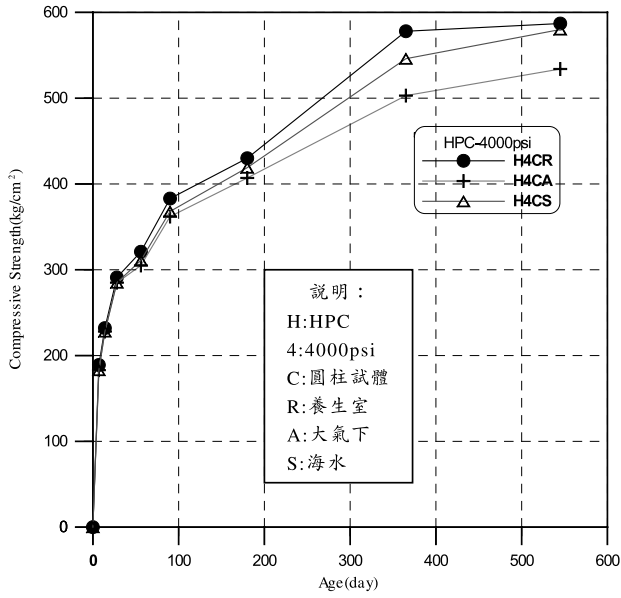


圖3 HPC-4000psi(280kg/cm²)之強度發展

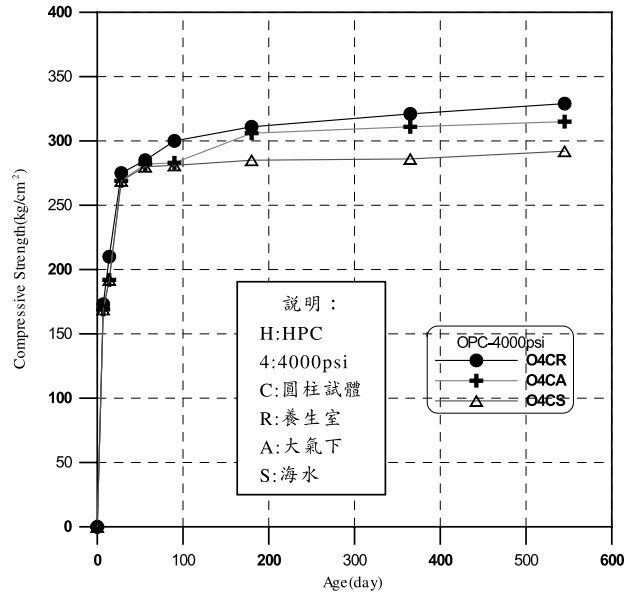


圖5 HPC-4000psi之超音波速與齡期關係圖

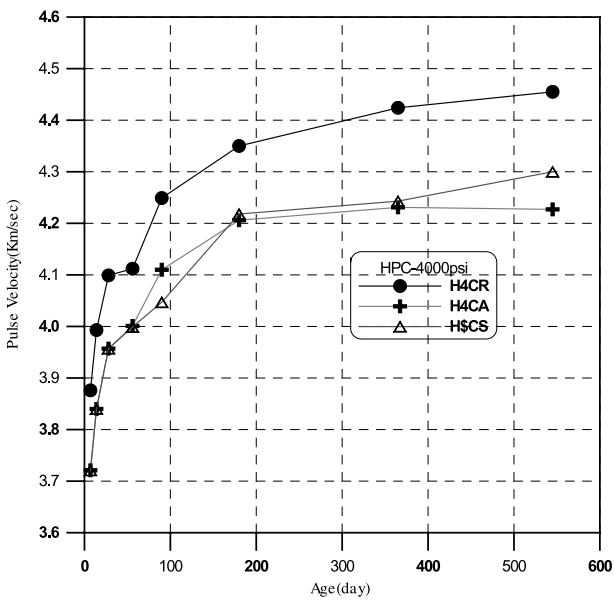


圖4 OPC-4000psi(280kg/cm²)之強度發展

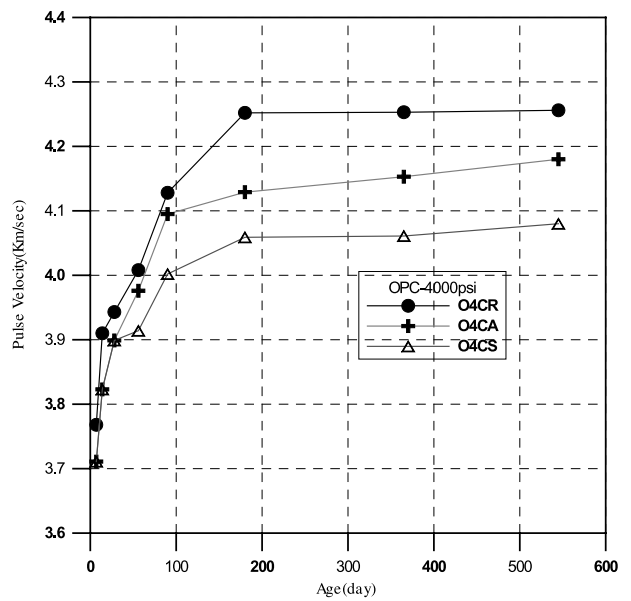


圖6 OPC-4000psi之超音波速與齡期關係圖

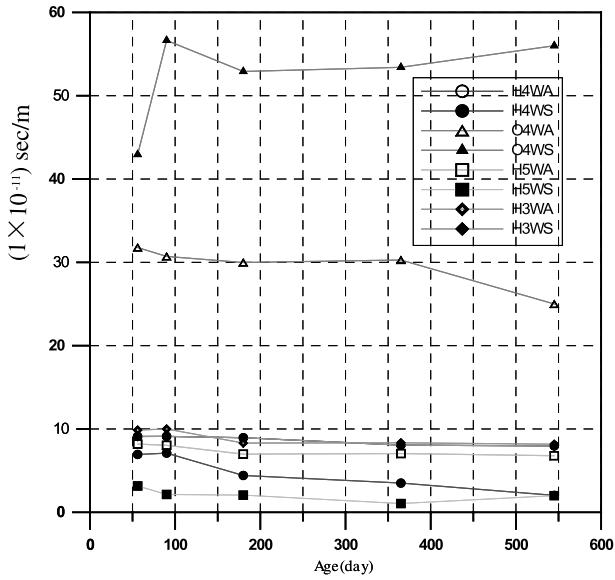


圖7 各配比試體之透水係數與齡期之關係圖

圖8 各配比試驗牆之腐蝕電位與齡期關係圖

表1 電滲量試驗結果

配比	4000psi (HPC)	4000psi (OPC)	5000psi (HPC)	3000psi (HPC)
曝放環境	460 庫倫	1813 庫倫	421 庫倫	899 庫倫
海水噴灑	807 庫倫	1933 庫倫	756 庫倫	536 庫倫

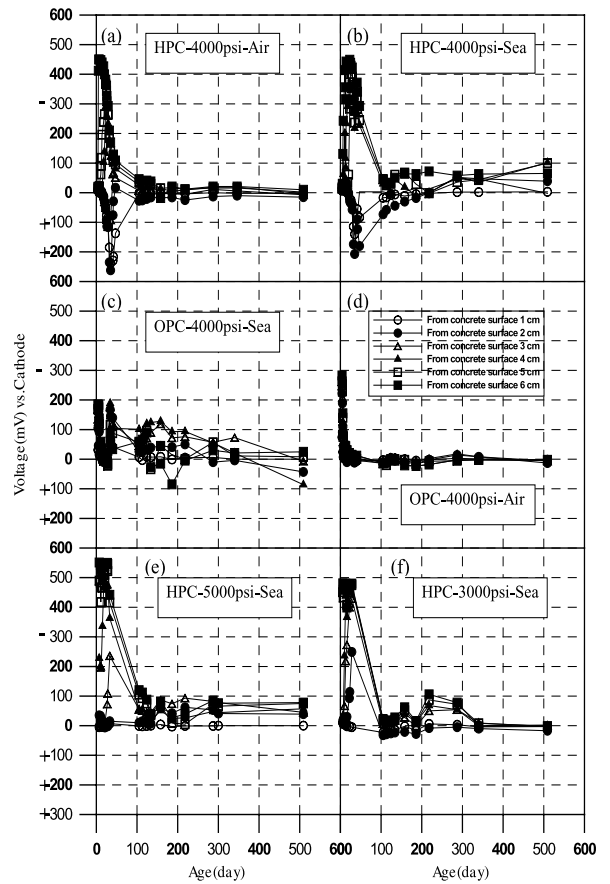
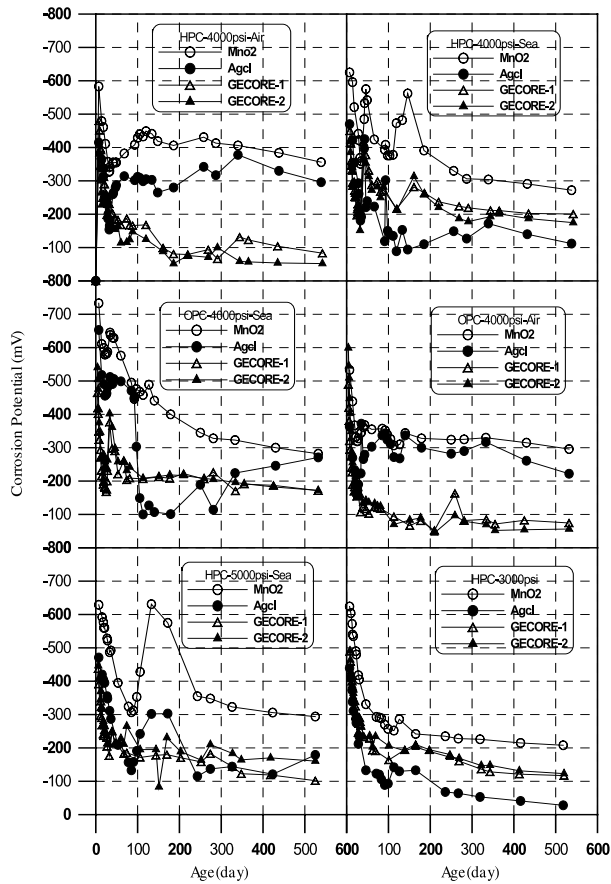


圖9 各配比試驗牆內，Ladder System各陽極對陰

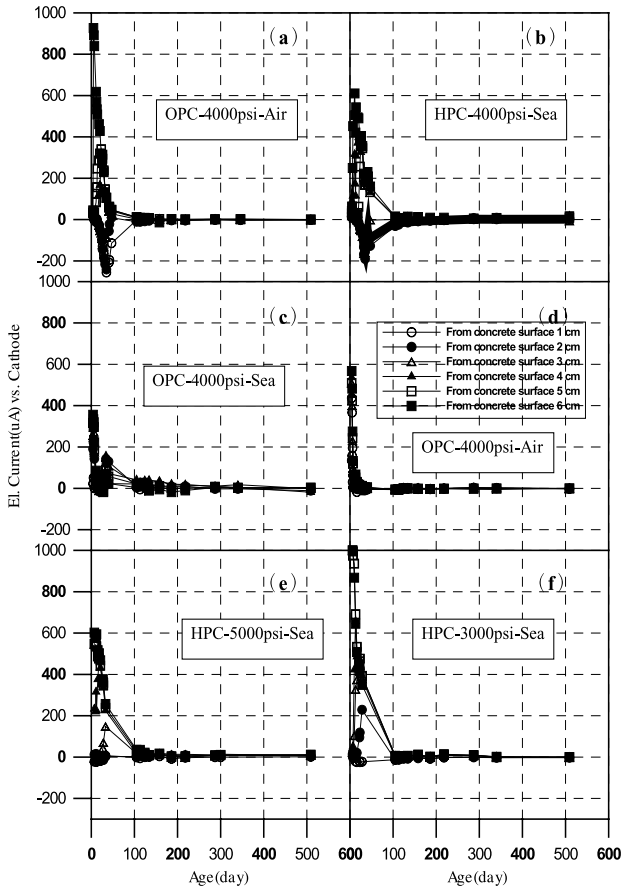


圖10 各配比混凝土內，Ladder System各陽極對陰極之電流密度與齡期關係圖

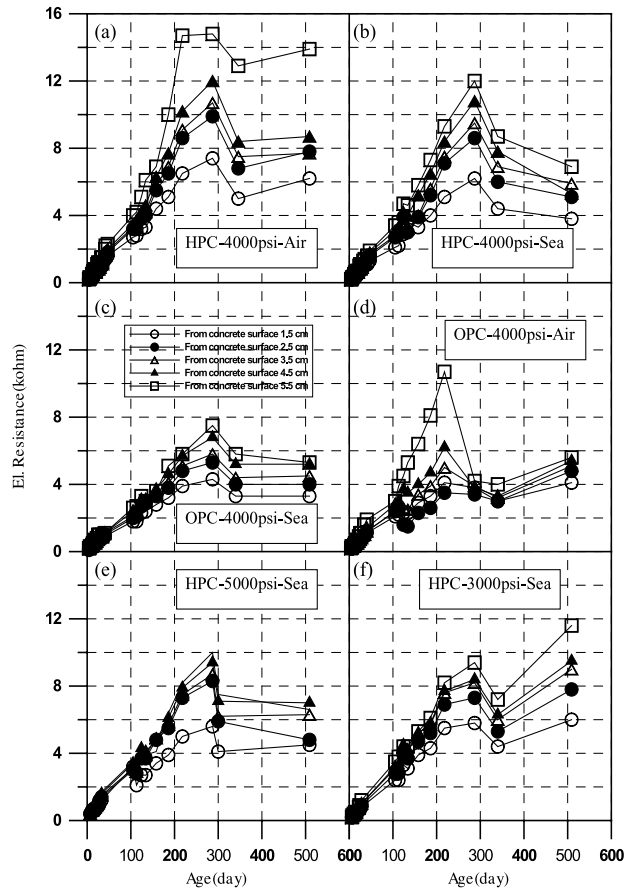


圖11 各配比混凝土內，Ladder System各陽極對陰極之電阻與齡期關係圖