

外加電流式之陰極防蝕於碼頭 R.C.面版防蝕 之應用

陳桂清、柯正龍*、張道光

Impressed Current Cathodic Protection Applied in Deteriorated Wharf Reinforced Concrete Decks

Kuei-Ching Chen, Jeng-Long Ko*, Tao-Kuang Chang

摘 要

港灣棧橋式碼頭之 R.C.面(底)版，長年遭受海水波浪之衝擊浸漬，海水中之氯離子甚易侵入底版，造成內部鋼筋之銹蝕、混凝土保護層剝落、鋼筋裸露斷裂，終致底版破裂、塌陷，嚴重危害碼頭結構物之安全。陰極防蝕技術公認為對鋼(鐵)材料最具防蝕效果，可有效防止海洋環境下 R.C.結構物之腐蝕劣化問題。近年來，國內濱海地區陸上公路橋樑、建物等多項新建或舊有工程，已採用陰極防蝕工法進行防蝕保護。但是，應用於港灣 R.C.結構物之防蝕案例，甚為鮮少。本文特以高雄、蘇澳港各擇一碼頭 R.C.底版，進行現地小面積之陰極防蝕試驗，評估其防蝕之可行性與效應。

關鍵詞：陰極防蝕；R.C.結構物；腐蝕。

ABSTRACT

Reinforced concrete decks of Trestle type wharf are confronted and soaked by waves surfing impaction. Chloride ion in seawater can easily intrude into decks, resulted in rebar corrosion, concrete covers spoiled, rebar exposedly broken, and finally harm the port facility seriously. Cathodic protection technique is acknowledged as the best effective method to prevent the reinforced concrete from corrosion deterioration under marine environment. Recently, several public transportation facilities are applied Impressed Current Cathodic Protection (ICCP) at near seashore concrete structures. Nevertheless, there are few cases using ICCP at port facilities. Therefore, in the paper, two-selected small deck areas at Kaoshuing and Su-Ao port were under experimented and evaluated.

Keyword: Cathodic protection; Reinforced concrete structure; Corrosion.

1. 前言

港灣棧橋式碼頭之 R.C.面(底)版，長期受到潮汐漲落之浸泡，以及海流、波浪拍打等外力衝擊之作用，海水甚易侵入 R.C.面版中，致使內部鋼筋嚴重腐蝕，造成混凝土保護層之剝落，終致鋼筋裸露與斷裂，嚴重影響碼頭結構之承載能力與安全。

國內五大國際商港設施，歷年調查結果顯示，1994年時，蘇澳港 #11 碼頭已有多處之 R.C.底面板，內部鋼筋腐蝕嚴重，銹水外滲，混凝土膨脹(裂)，保護層已出現大範圍之剝落^[1]。2002年調查時，同港區之 #13 碼頭(緊臨 #11 碼頭)，整座碼頭長達 300 公尺之 R.C.底面板，已全面劣化損壞，保護層完全剝落分離，內部鋼筋外露、腐蝕、斷裂。高雄港區棧橋碼頭 #48 ~ #53 等，其碼頭 R.C.底面板之損壞情形亦如蘇澳港之損壞狀況。

過去一二十年來，港務局對 R.C.底板及樑柱腐蝕損壞之修護，大多採取傳統工法處理，亦即將底板剝落處之混凝土或風化表面先行鑿除後，以高壓水柱去除浮鬆物質，鋼筋表面進行銹蝕除銹，將斷裂鋼筋處搭接後，再將 II 型水泥或含壓克力樹脂或樹脂石英砂及速凝劑等之混凝土材料，分 2 ~ 3 層噴漿覆蓋於修補之部位，此工法僅為治標，維修效果有限。因為，噴混凝土漿體並未能完全阻絕海水之滲入，底板內之鋼筋仍會接觸滲入之海水而銹蝕，隔一段時間後修補部位之混凝土會再度剝落，必需每隔 3 ~ 5 年再進行修護，如面版內之鋼筋已嚴重腐蝕、斷裂，結構安全有疑慮時，反復之修護將造成更惡(劣)化建材與結構承載，則必須將碼頭面板打掉，重新鋪設新的面板，如此一來，碼頭必需關閉，對港口之營運影響甚巨。

陰極防蝕技術公認為最具防蝕效果，可有效改善與防止海洋環境下 R.C.結構物之腐蝕劣化問題。近年來，國內濱海地區陸上公路橋樑、建物等多項新建或舊有工程，已採用陰極防蝕工法進行保護，但是，應用於港灣 R.C.結構物之防蝕案例，甚為鮮少。本文特以高雄港 #52 號及蘇澳港 #13 號碼頭之新鋪與舊有 R.C.(面)底板，選擇小面積範圍，進行現地之陰極防蝕維護試驗，評估並探討其防蝕之效應。

2. 碼頭 R.C.面版之劣化損壞原因

碼頭 R.C.面版劣化損壞可能原因，可分為外力作用之破壞與建造材料之劣化等兩大因素來探討。

2.1 外力作用之破壞

港灣及海域中構造物經常遭受外力之襲擊而造成劣化損壞，除了大自然不可抗拒之天災諸如(颶、暴)風災、地震等外力，最主要之外力作用應是來自海(波)浪之衝擊。而船舶靠岸之碰撞、裝卸作業不當或基樁不均勻沉陷等因素，亦是造成港灣構造物損壞之原因^[2,3]。由於受到外力破壞之原因甚為複雜且不易釐清，本文僅單純從建造材料之劣化損壞探討之。

2.2. 建造材料之劣化

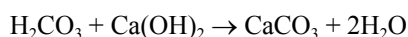
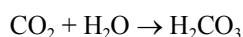
棧橋碼頭 R.C.面版主要構材為混凝土與鋼筋，其材料劣化可能之原因如下^[4]：

2.2.1 混凝土之劣化

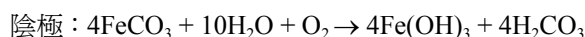
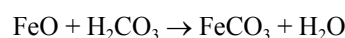
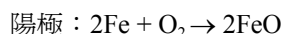
(1) 混凝土之中性化

混凝土因水泥水化作用具強鹼性質，在此環境下，鋼筋表面形成一層具有保護作用之鈍態氧化膜。當大氣中之二氧化碳(CO₂)滲入混凝土之孔隙溶液中，會與鹼性之水泥水化產物(氫氧化鈣，Ca(OH)₂)發生作用，生成碳酸鈣(CaCO₃)化合物，由於碳酸鈣具微酸性，容易析出形成白樺現象，並降低混凝土鹼性環境。當混凝土漿體之 pH 值降到 9 以下，鋼筋表面之鈍態膜將失去對鋼筋保護的作用，鋼筋甚易發生腐蝕行為。混凝土因中性化導致鋼筋腐蝕，其化學反應過程可分為下列二階段完成：

a. 中性化過程：



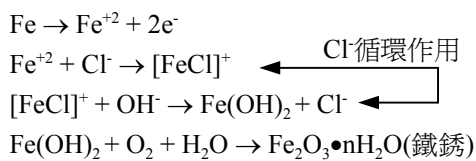
b. 鋼筋腐蝕過程：



(2) 氯離子之侵蝕

氯離子(Cl⁻)對鋼筋之侵蝕乃是 Cl⁻會破壞鋼筋表面的鈍態保護膜，造成鐵離子(Fe⁺²)的溶出，並生成

水溶性的氯化鐵(FeCl₂)錯合物。氯化鐵錯合物會溶解且離開鋼筋的表面，擴散進入混凝土的孔隙溶液中，與氫氧根離子(OH⁻)反應生成 Fe(OH)₂，同時釋放出 Cl⁻，Fe(OH)₂會進一步與氧、水反應生成鐵銹。上述一連串的反應，鋼筋將不斷地產生腐蝕反應，使鐵離子溶出離開鋼筋表面，且由於反應中會再度釋放出 Cl⁻，使得 Cl⁻可以反覆不斷地參與腐蝕反應，其侵蝕機理與反覆過程如下^[4]：



(3) 混凝土之龜裂

鋼筋混凝土結構物由於施工過程、材料耐久性、載重狀況、基礎沉陷等原因，均會造成結構物之破裂。這些破裂前所產生之裂縫的形狀、方向及大小對鋼筋腐蝕有相當程度的影響。混凝土一旦破裂，外界之濕氣或氯化物將直接侵入與鋼筋接觸，造成鋼筋快速腐蝕，當裂縫的寬度愈大時，腐蝕將會加速。

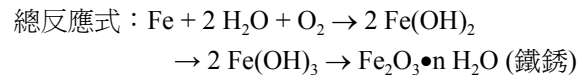
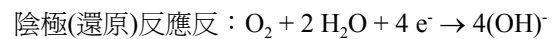
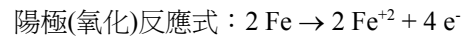
(4) 材料與施工品質

混凝土之品質與建造材料及施工作业有很大的關係，施工前對材料之檢測與品質是必要的。如使用活性骨材、含氯化物之材料(諸如添加 CaCl₂ 摻料，海砂等)、水泥中 C₃A 或鹼含量過高時，均可能造成鋼筋混凝土結構物嚴重劣化、腐蝕。

2.2.2 鋼筋之腐蝕

混凝土在水泥水化過程中，孔隙溶液因含有鈉(Na)、鉀(K)等鹼性物質以及飽和的氫氧化鈣溶液，致使混凝土漿體之 pH 值維持在 13 左右。在此強鹼性環境下，鋼筋表面產生一層鈍化氧化膜(γ-Fe₂O₃)，此氧化膜非常穩定且緊密附著於鋼筋表面，能有效的阻隔水份與氧氣接觸鋼筋，阻止鋼筋發生腐蝕。但是，若混凝土內存有過量的氯離子，則其鈍態保護膜將被破壞，鋼筋表面形成陽極區。陽極區上之鐵(Fe)因氧化而變成鐵離子(Fe⁺²)溶出於孔隙溶液中，而電(荷)子則經由鋼筋傳導至含有水份和氧氣的區域(陰極區)，產生陰極反應。當陽極與陰極反應同時產生時，便會產生腐蝕電流，使得孔隙溶液中的 Fe⁺² 向陰極移動，而帶負電荷的 OH⁻ 則向陽極移動，

兩者結合成不溶於水之氫氧化鐵(Fe(OH)₂)化合物，沈積在陰極與陽極間的鋼筋表面上。鋼筋腐蝕之化學反應式如下：



3. 試驗規畫

3.1 碼頭 R.C.構件現況調查

本文調查之同類型碼頭總計四座，各碼頭之範圍相當廣闊且長，除目視檢測項目外，無法對整座碼頭做全面之調查檢測，每座碼頭僅選取 1~2 跨距(約 10 m 長×10 m 寬)之範圍內之面版及大樑，進行非破壞性檢測試驗，試驗項目包括：外觀目視檢測、試錘試驗(混凝土強度)、混凝土之電阻係數、混凝土之超音波脈波速率、混凝土之保護層厚度、鑽心取樣、鋼筋腐蝕電位、氯離子濃度(含量)等，以評估 R.C.構件現況。

外觀目視檢測主要乃僱請潛水人員潛入碼頭底板下，以肉眼目視並輔以攝影器材拍照方式，快速檢視與記錄整座碼頭 R.C.底面版及橫樑等構件之外觀損壞狀況。

3.2 陰極防蝕施作之工址

(1) 蘇澳港 #13 號碼頭

蘇澳港 #13 號碼頭，總長 180 公尺，寬 13.6 公尺，每 5 公尺長度為一跨距，共畫分成 36 跨距，選擇施作陰極防蝕之位置，位於本碼頭起點編號為第 30、31 跨距，如圖 1 所示。每一跨距(區塊)面版之面積為 10 m × 5 m，兩跨距面版實際施作面積總計約 90 m²。基於監測與控制系統檢修之單純化，每一跨距面版單獨設置一電化學電池迴路系統，於面版前、後兩區域間，分別埋置一支氯化銀(Ag/AgCl)參考電極，進行鋼筋電位變化之監測。

(2) 高雄港#52 號碼頭

碼頭全長 200 公尺、寬 12 公尺，防蝕施作之位置為 #51 與 #52 碼頭交接處，如圖 2 所示，碼頭面版為新建造之面版，施工範圍約 200 m²面積(約佔整座碼頭之 1/12)，畫分成為 57 m²(鋼筋保護面積為

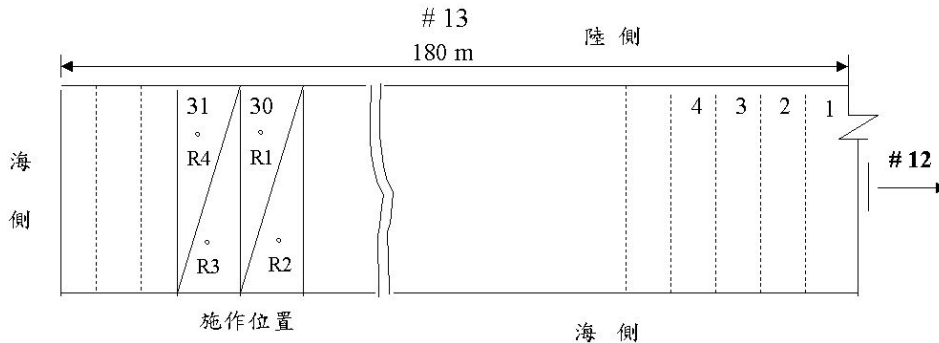


圖 1 蘇澳港#13 碼頭 R.C.面版陰極防蝕施作位置圖。

Figure 1 Location of decks applied cathodic protection at Su-Ao port.

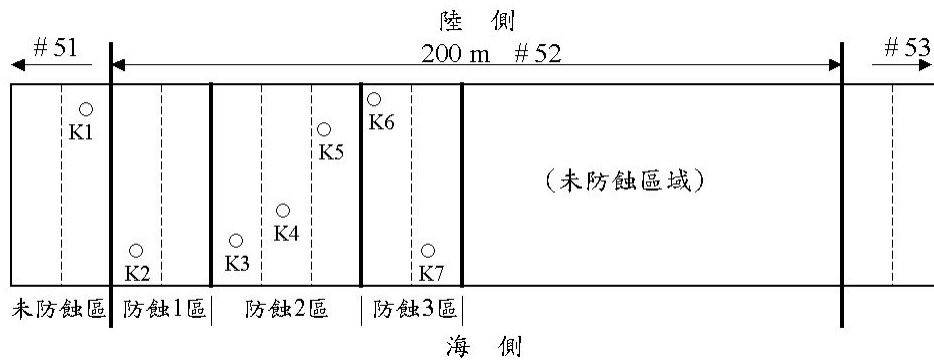


圖 2 高雄港#52 碼頭 R.C.面版陰極防蝕施作位置圖。

Figure 2 Location of decks applied cathodic protection at Kaoshuing port.

159.6 m²)、57 m²(鋼筋保護面積為 159.6 m²)及 86 m²(鋼筋保護面積為 240.8 m²) 區域，分別形成三個獨立之防蝕單元區，每一區塊內埋置 2 支氯化銀參考電極(Ag/AgCl)，另一支參考電極則埋置於無陰極防蝕區域，做為無防蝕保護下，實際鋼筋之腐蝕電位參考值用。

3.3 外加電流式之陰極防蝕工法^[5]

碼頭 R.C.面版以外加電流式之陰極防蝕工法，進行鋼筋防蝕保護，此法乃是以一外接直流電源供應器，提供陰極(鋼筋)與陽極(鈦網陽極)之間的電位差，陽極接於電源供應器之「+」端，鋼筋(被保護金屬)接於電源供應器的「-」端，電流從「+」端流出經過介質(混凝土)到達鋼筋表面，供應防蝕電流給鋼筋，使鋼筋表面不會失去電子(達到防蝕的目地)，然後再由鋼筋經導線回到電源供應器「-」端，形成

一個電化學電池迴路，如此鋼筋便受到保護。圖 3 為 R.C.結構物進行外加電流式陰極防蝕之示意圖。

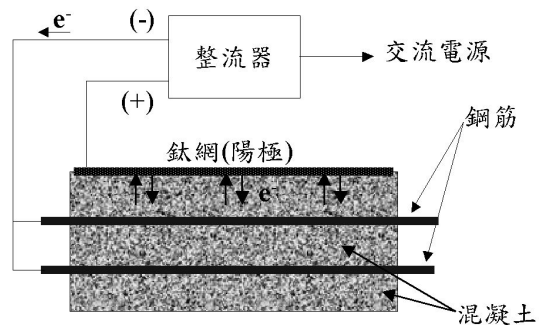


圖 3 鋼筋混凝土安裝陰極防蝕示意圖。

Figure 3 Cathodic protection of reinforced concrete structures.

4. 結果與討論

4.1 碼頭 R.C.構件損壞之狀況

4.1.1 碼頭建造基本資料

本試驗碼頭，其原始設計建造基本資料及用途如表 1 所示。表中四座同類型碼頭啓用迄今僅 20 ~ 30 餘年，均未達設計使用年限，即出現嚴重劣化損壞現象。

4.1.2 R.C.構件外觀狀況

調查顯示，碼頭 R.C.面版及部份橫樑外觀已呈現嚴重劣化，如大樑表面有許多微裂縫出現，部份裂縫寬度達 2 ~ 3 mm、銹水滲出顯著，R.C.底面板保護層大多已剝落、內部鋼筋外露、嚴重腐蝕斷裂，如圖 4 所示。表層清除後，面版殘留之鋼筋幾乎為無，已無承載拉力之作用。混凝土之品質已嚴重劣化，歷年之調查試驗結果，彙整簡列於表 2。

綜觀分析，此四座棧橋式碼頭劣化損壞如此嚴重，除受外力作用外，主要可能原因乃樑版構件長年曝露於潮汐與海水潑濺之處，混凝土遭受乾濕循環作用造成裂縫生成，海水由裂縫處滲入更加速內部鋼筋之腐蝕，終致混凝土保護層之剝落及鋼筋腐蝕外露且銹斷。

4.2 R.C.面版承載力評估與陰極防蝕安裝

4.2.1 蘇澳港#13 號碼頭^[6](屬於舊有結構物之防蝕維護)

本碼頭並未拆除重建，屬於舊有劣化 R.C.面版之防蝕，鑑於結構安全考量，必須先行評估 R.C.面版之鋼筋銹蝕程度是否影響結構承載，換言之，於結構安全無疑慮下，進行防蝕維護方有意義，如構件已損壞無法承載時，則必須拆除重建後，再進行防蝕維護措施。

表 1. 試驗碼頭之基本背景資料。

Table 1 Fundamental design data of trestle type wharves.

碼頭名稱	構造型式	水深	長度	用途	設計強度	建造日期	完工日期
蘇澳 # 11	預力直樑 棧橋式	-9 m	175 m	散雜貨	基樁 350 kg/cm ² 面板 210 kg/cm ²	民國 64.10.01	民國 66.06.30
蘇澳 # 13	預力直樑 棧橋式	-9 m	180 m	散雜貨	基樁 350 kg/cm ² 面板 210 kg/cm ²	民國 68.03.15	民國 70.07.31
高雄 # 51	預力直樑 棧橋式	-10.5 m	200 m	大宗及 散雜貨	基樁 350 kg/cm ² 面板 210 kg/cm ²	民國 62.05	民國 64.05
高雄 # 52	預力直樑 棧橋式	-10.5 m	200 m	大宗及 散雜貨	基樁 350 kg/cm ² 面板 210 kg/cm ²	民國 62.05	民國 64.05

表 2. 碼頭 R.C.構件劣化損壞調查試驗結果。

Table 2 Field NDT results of deteriorated wharf decks.

碼頭名稱	構件外觀檢視		試錘試驗 (kg/cm ²)	超音波脈波 速率試驗 (m/sec)	混凝土電阻 係數試驗 (k ohm-cm)	鋼筋電位 (-mV)	Cl ⁻ 濃度 (%)	保護層厚度 (cm)
	大樑	面版						
蘇澳 # 11	裂縫 剝落/銹水/ 鋼筋腐蝕/外露	裂縫 剝落/銹水/ 鋼筋腐蝕/外露	210 ~ 280	1500 ~ 4000	5 ~ 10 k	300 ~ 400	0.5 ~ 2.0	5 ~ 7 (大樑)
蘇澳 # 13	裂縫 剝落/銹水/ 鋼筋腐蝕/外露	裂縫 剝落/銹水/ 鋼筋腐蝕/外露	330 ~ 360	2000 ~ 3800	5 ~ 10 k	ND	0.4	5 ~ 7 (大樑)
高雄 # 51	裂縫 剝落/銹水/ 鋼筋腐蝕/外露	裂縫 剝落/銹水/ 鋼筋腐蝕/外露	350 ~ 430	4300	15 ~ 25 k	ND	0.07 ~ 0.15	4 ~ 6 (大樑)
高雄 # 52	損壞狀況如同#51 碼頭 (調查時已拆除，各項試驗結果參照 #51 碼頭)							



圖 4 蘇澳港#13 號碼頭 R.C.面版鋼筋腐蝕損壞之情形。

Figure 4 R.C. decks corrosion deteriorated situation at Su-Ao port.

4.2.1.1 R.C.面版承載力評估

蘇澳港 #13 號碼頭面版原始設計之彎矩強度(承載力)為 4.57 t-m,由於底層鋼筋嚴重銹蝕、斷裂,致使兩跨距之面版其殘餘(留)鋼筋量分別僅約為原來鋼筋量之 20%及 0%,兩面版彎矩強度亦分別下降至 1.3 t-m 與 0.47 t-m,約為原有設計承載力之 28%與 10%,已嚴重威脅碼頭結構安全。因此,為補強 R.C.面版構件承載力不足,必需進行面版植筋,以提升面版承載能力,方進行陰極防蝕安裝保護。

4.2.1.2 施工(植筋)過程與防蝕安裝

(1) 混凝土保護層表面清除

將剝落之混凝土及殘存之銹蝕鋼筋,清(鑿)除乾淨,並將混凝土表層鑿深且粗糙化,以利噴漿混凝土進行覆層保護,且提升混凝土新舊界面間之附著黏固。

(2) 面版之植筋與線路安裝

本碼頭面版鋼筋嚴重銹蝕、斷裂(落),幾乎可視為已無鋼筋存在之面版。因此,依原設計圖以 #4、#6 新品鋼筋雙向交叉,於 90 m² 兩個跨距面版之待修護面積內,縱、橫方向每 20 cm 各植入一根鋼筋,總計植入#4 鋼筋 44 支、#6 鋼筋 96 支,新植入鋼筋總表面積為 55.2 m²,亦即每一跨距面版內植入之鋼筋,其表面積為 27.6 m²。植入鋼筋必須確定全體(部)鋼筋之連通性(亦即鋼筋之導電性),同時,進行陰、陽極線路及參考電極之安裝。

(3) 表面覆層(保護層)

完成面版植筋工程後,以高強度、高導電性及具高結合力之水泥砂漿材料,分數次噴漿(或覆層)被覆,完成混凝土保護層之施工。

(4) 鋼筋保護電流密度之選擇

一般而言,新建 R.C.結構物之陰極防蝕,所須保護電流(密度)較小,通常可選擇 5~10 mA/cm² (鋼筋保護面積) 之間,舊有結構物所須之保護電流密度,通常可設計為 10~20 mA/cm² (鋼筋保護面積) 之間^[7],但是,如鋼筋腐蝕嚴重以及結構物所處之環境甚為惡劣時,鋼筋所須之保護電流密度仍應做適當之調整,以達保護須求。本碼頭面版並非新鋪設之面版,但是,面版植入之鋼筋全為新品,並以新拌混凝土進行覆層保護,可視為新造構造物來處理,因此,保護電流密度亦可選擇 5~10 mA/cm² (鋼筋保護面積) 來施加。

4.2.2 高雄港#52 號碼頭案例^[8](屬於新造結構物之防蝕維護)

本碼頭 R.C.面版為一拆除重新鋪設之面版,R.C.面版進行陰極防蝕處理上,較蘇澳港舊有 R.C.面版來得簡易且不同,可省略對舊有結構物之清除前處理過程,況且又無 R.C.面版受力承載不足之疑慮,因此,防蝕施工容易、省時且處理費用較為低廉。

本碼頭於 R.C.面版重新鋪設時,即依據防蝕規範草案^[9]規定,先行安裝防蝕系統之線路、輔助陽極、參考電極等相關工作,於面版灌漿鋪設完工後約 1 個月後,進行系統通電試車,鋼筋防蝕之保護電流密度採用 10 mA/cm² (鋼筋保護面積)。

4.3 防蝕成效評估

依據 NACE International RP0290-2000^[10]規範,防蝕系統斷電後鋼筋電位之退極化量,是判斷鋼筋是否達到陰極保護的標準。換言之,剛完成安裝之陰極防蝕系統於通電一段時間後,當鋼筋到達穩定保護電位時進行斷電,量測瞬間斷電後的電位與瞬間斷電 4~24 小時後的電位,其差值必需在 100 mV 以上,亦即斷電後鋼筋電位去極化量 ≥ 100 mV,方能確定陰極防蝕達到設計之預期保護效果。

4.3.1 蘇澳港#13 號碼頭之防蝕成效

蘇澳港 #13 號碼頭試驗面版，於 2003 年 6 月完成陰極防蝕系安裝維護後，由於本案例為舊有結構物之防蝕，在工程施工及技術層面有較多的問題必須克服，因此防蝕系統之操作與運轉可能須較長時間才能趨於穩定。本防蝕系統啟動初期(6 個月內)甚為不穩(佳)，主要原因可能為條狀鈦金屬陽極(表層含有銮(Ir)氧化膜)，釋放之防蝕電流不如以網狀鈦金屬陽極(表層含有銮(Ir)氧化膜)來得均勻分佈，歷經一年期間之運轉、測試與調整，鋼筋趨於穩定電位後乃進行斷電測試，其鋼筋瞬間斷電退極化電位變化如表 3 所示。

表 3 顯示，四支參考電極之鋼筋退極化量在斷電 24 小時內，仍未達到 100 mV 之標準。但是，NACE RP0290-2000 規範曾說明，如受到環境之溫度、濕度或新拌混凝土漿體水化程度之不同，鋼筋可能不易達到退極化量之標準，或可能須數日或更長時間方能達到。參考電極 R1 與 R4 位於面版內側，其鋼筋瞬間斷電之壓降(IR drop)較 R2 與 R3 部位為小，推測原因可能 R1 與 R4 部位之混凝土，受到船隻泊碇碼頭或進出港域所湧起之波浪所拍擊到，致使混

凝土較為潮濕，內部呈水份飽和狀態。綜合各項因素研判，72 小時後之退極化電位已接近 100 mV，碼頭 R.C.面版之防蝕保護應已逐漸趨向穩定。

4.3.2 高雄港#52 號碼頭之防蝕成效

高雄港 #52 號碼頭面版，於拆除重新鋪造時即規劃一小區域，進行安裝陰極防蝕保護系統試驗，屬於新建結構物之防蝕，此系統於 2003 年 8 月開始通電運轉測試，迄今約一年期間，新造 R.C.結構物之陰極防蝕，在理論與操作實務技術上均較舊有結構物為容易達到陰極防蝕之標準；但是，實際上仍是初期運轉不佳，須經過一段時間不斷地調整，方能達到穩定。

表 4 為系統運轉 300 日後，鋼筋進行退極化電位測試的結果，表中顯示，大部份區域內(如參考電極 K3 ~ K6)之鋼筋退極化電位量，於斷電 4 小時已達到 70 ~ 90 mV，24 小時後達到或超過 100 mV，顯示此區域內之鋼筋已達成防蝕保護之效應，但是，K2 及 K7 參考電極區域之鋼筋，其 4 ~ 24 小時之退極化量分別僅達 11 ~ 17 mV 及 1 ~ 3 mV，退極化量

表 3. 蘇澳港 #13 號碼頭陰極防蝕運轉 300 日鋼筋電位變化。

Table 3 Potential decayed distribution after 300 days of C.P. at Su-Ao port.

參考電極	通電時之電位 (-mV _{Ag/AgCl})	瞬間斷電時之電位 (-mV _{Ag/AgCl})	IR 降 (mV)	退極化最終電位(-mV _{Ag/AgCl})			退極化量 (mV)
				24 hr	48 hr	72 hr	
R1	302	298	4	239	237	232	59 ~ 66
R2	371	350	21	272	270	266	78 ~ 84
R3	467	450	17	406	391	366	44 ~ 84
R4	313	305	8	224	218	214	81 ~ 91

註：鋼筋保護電流密度 10 mA/m²(鋼筋表面積)

表 4. 高雄港 #52 號碼頭陰極防蝕運轉 300 日鋼筋電位變化。

Table 4 Potential decayed distribution after 300 days of C.P. at Kaoshuing port.

參考電極	系統通電時之電位 (-mV _{Ag/AgCl})	系統瞬間斷電時之電位 (-mV _{Ag/AgCl})	IR 降 (mV)	退極化最終電位 (-mV _{Ag/AgCl})		退極化量 (mV)
				4 hr	24 hr	
K1	237	-	-	-	-	-
K2	196	187	9	176	170	11 ~ 17
K3	357	338	19	268	255	70 ~ 83
K4	343	318	25	236	213	82 ~ 105
K5	320	309	11	213	206	96 ~ 103
K6	368	352	16	293	268	59 ~ 84
K7	209	205	4	204	202	1 ~ 3

註：鋼筋保護電流密度 10 mA/m²(鋼筋表面積)，K1 為埋於無陰極防蝕區域之電極。

甚小。如以系統通電時之鋼筋電位來分析，K2 及 K7 之電位值約為-200 mV 與 K3 ~ K6 之電位值相差達 120 ~ 160 mV 之多，但是，卻與未施加陰極防蝕區域之 K1(-237 mV)電位相近，顯然，防蝕系統所施加之防蝕電流不足夠，或可能線路(接點)鬆脫造成短路，防蝕電流未能通達 K2 及 K7 區域內，致使該區域內之鋼筋呈無防蝕保護作用。

5. 結論

1. 港灣棧橋式碼頭 R.C.面版等構件，長期受到海水波濺或浸泡，致使內部鋼筋腐蝕而裂，嚴重危害碼頭結構安全。
 2. 外加電流式之陰極防蝕工法，可適用於濱海及港灣 R.C.結構物之鋼筋腐蝕防治。
 3. 蘇澳港 #13 號碼頭 R.C.面版之鋼筋電位退極化量，於斷電 72 小時達 90 mV(接近 100 mV 之標準)，鋼筋應已達防蝕保護。
 4. 高雄港#52 碼頭大部份區域內之 R.C.面版，均達到陰極防蝕保護，較遠端處(如 K2 及 K7 部位)之鋼筋電位變化很小甚至無變化，顯示部份區域之防蝕系統可能失效。
 5. R.C.面版保護不足或疑似失效之區域，應檢修防蝕系統(線路)並改善之。
3. 陳桂清、柯正龍、張道光等，「現有結構物安全評估及維護研究」，MOTC-IOT-IHMT-MB9012，交通部運輸研究所，2002。
 4. 陳桂清，「海洋環境下 R.C.結構物之腐蝕劣化與防蝕策略探討」，土木工程技術，第六卷，第三期，2002 年，第 37 ~ 61 頁。
 5. 陳桂清、饒正、柯正龍等，「港灣構造物陰極防蝕準則訂定(草案)研究」，MOTC-IOT-IHMT-90-004，交通部運輸研究所，2002。
 6. 交通部運輸研究所，「蘇澳港 13 號碼頭面板調查及陰極防蝕安裝測試竣工報告」，2003。
 7. "Cathodic Protection of Concrete Bridges: A Manual of Practice", SHRP Report, SHRP-S-372, pp. 57~59, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington D.C., 1993.
 8. 交通部高雄港務局，「高雄港 52 號棧橋式碼頭面版鋼筋混凝土陰極防蝕竣工報告」，2003。
 9. 交通部運輸研究所，「港灣構造物陰極防蝕準則(草案)」，MOTC-IOT-92-H1BB02-2，2004。
 10. NACE Standard RP0290-2000, "Impressed Current Cathodic Protection of Reinforcing Steel in Atmospherically Exposed Concrete Structures", Item No. 21043, NACE International.

參考文獻

1. 港灣技術研究所，「港灣 R.C.結構物修理系統之評估研究」，基本研究報告(83)-研(11)，1994。
2. 陳桂清，「港灣構造物現況探討」，八十九年度研究成果發表會論文集，MOTC-IOT-IHMT-HD9001，運輸研究所港灣技術研究中心，2001。

收到日期：2004 年 7 月 31 日

修訂日期：2005 年 3 月 10 日

接受日期：2006 年 2 月 13 日