

鋼筋混凝土構造物防蝕技術與應用研討會

論 文 集



主辦單位：交通部運輸研究所

中華民國九十一年八月十五日

鋼筋混凝土構造物防蝕技術與應用研討會論文集

目 錄

港灣 R.C.構造物腐蝕檢測與防蝕原理.....	陳桂清	---1-1
港灣鋼筋混凝土陰極防蝕準則草案介紹.....	羅俊雄、翁榮洲、陳桂清、饒正	---2-1
鋼筋混凝土陰極防蝕設計基礎概念介紹	林葆喜	---3-1
陰極防蝕工法在台灣之施作案例介紹.....	李枝河、黃稚菱	---4-1
以去鹽工法處理鹽害 R.C.結構物之探討	陳桂清、簡坤葦、李釗	---5-1
金屬熔射工法應用於 R.C.結構物之防蝕探討	陳建州	---5-1

港灣 R.C.構造物腐蝕檢測與防蝕原理

陳桂清¹

摘要

濱海之土木工程與港灣設施之劣化、損壞、崩陷等案例層出不窮。排除不可抗拒之外力外，探究原因主要乃肇因於材料的劣化與鋼筋的腐蝕。鋼筋的腐蝕是評估 R.C.結構物耐久性之重要指標之一。構造物之安全檢測與維護是整體一致性的。本文乃從混凝土材料的劣化原因、鋼筋腐蝕、現地非破壞性檢測技術、檢測實例介紹以及防蝕原理與維護工法等方面探討，尋求解決鋼筋腐蝕之問題，以提升 R.C.構造物之耐久性與使用年限。

Field Survey on the Harbor Reinforced Concrete Structures and Its Corrosion Protection

Kuei-Ching Chen

ABSTRACT

Harbors facilities and concrete structures near seashore have recently been found deteriorated, damaged and collapsed oftenly. Excluded natural forces attacks, the main causes making reinforced concrete degradation are concrete deteriorations and rebar corrosion. Rebar corrosion situation is one of the major indexes to evaluate the durability of reinforced structures. Field investigations and maintaining strategies are consistent. Therefore, in the article, concrete material deleterious, in-site non-destructive test, anti-corrosion concepts and its rehabilitation methods were discussed. It is highly expected to work out the problems and elevate the structures durability.

¹交通部運輸研究所港研中心研究員

一、前言

鋼筋混凝土大量被使用於土木工程，尤其是交通建設方面，諸如橋樑、港灣..等之重要設施。鋼筋混凝土原本為一極具耐久之材料，因此，工程建造完工起用後，甚少需要維護。但是，受到環境、超載(不當使用)、施工品質等因素之影響，其材料、結構則可能受到劣化損壞，對整體耐久性與安全威脅甚鉅。台灣為一海島型氣候，終年高溫、高濕，每年常遭颱風侵襲，又因位處地震帶上，地震災損頻傳，於此惡劣環境下，港灣鋼筋混凝土甚易受到海水或海風中之氯離子之侵入，造成鋼筋發生銹蝕、斷裂、體積膨脹，導致混凝土的劣化、剝落、損壞。

近年來，國內許多濱海之土木工程與港灣設施之劣化、損壞、崩陷等案例層出不窮，除了外力不可抗拒因素外，探究原因主要乃肇因於材料的劣化與鋼筋的腐蝕。在 R.C.結構物之耐久性觀點上，除了混凝土材料本身材質劣化外，鋼筋的腐蝕是評估結構物耐久性之重要指標之一。鑑於工程設施是否安全堪用，日益受到關注且必需明確的瞭解，俾採必要之防範措施，基於此一理念，R.C.結構物之腐蝕檢測與維護必需落實。本文從混凝土材料的劣化原因、鋼筋腐蝕、現地非破壞性檢測技術、檢測實例介紹以及防蝕原理與維護工法等方面探討，尋求解決鋼筋腐蝕之問題，以提升構造物之耐久性與使用年限。

二、港灣構造物概述

港灣構造物依所處環境部位可分為：水下結構與岸上結構。水下結構主要包括有碼頭、防波堤等，岸上結構物主要為廠房、一般建物及機具設備。這些構造物使用的構材，主要有鋼構材料與鋼筋混凝土材料等。鋼構材料主要為鋼板樁、鋼管樁、固定結構之拉桿、鋼纜線以及排放流管線等，大部份使用於水面下。鋼筋混凝土材料則廣泛使用於碼頭結構體、防波堤、消波塊、沉箱結構、樁基式碼頭之 PC 樁、RC 樁等。由於港灣設施繁雜多樣為簡化種類，僅依建造使用材料，將港灣構造物分成下面兩大類；

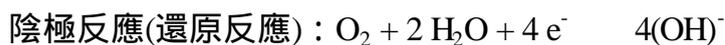
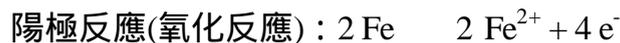
- 1.混凝土(鋼筋混凝土)構造物
- 2.鋼材構造物

由於造成港灣構造物破壞原因很多，損壞機制亦相當複雜，本文僅以 R.C.結構物之腐蝕劣化為探討重點。

三、鋼筋混凝土之腐蝕劣化探討

3.1 鋼筋之腐蝕機理

正常的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，鋼筋表面自然產生一層厚約 20 - 60 Å 之鈍化氧化膜 ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$)，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，從而避免腐蝕反應的產生。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，形成陽極區。陽極區上之鐵(Fe)因氧化而變成鐵離子(Fe^{2+})存在於孔隙溶液中，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($\text{Fe}(\text{OH})_2$)化合物，沈積在陰極與陽極間的鋼筋表面上。上述腐蝕過程其化學反應式如下：



鐵銹為鋼筋腐蝕之生成物，可分為氧化鐵類(如 FeO ， Fe_3O_4 ， Fe_2O_3)與氫氧化鐵類(如 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ， $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ， $\text{Fe}(\text{OH})_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$)等。這些腐蝕生成物之結構與鈍態之氧化鐵保護膜不同，無法緊密地與鋼筋表面結合，所以不會產生保護鋼筋的作用。同時，氫氧化鐵在經過不同程度的氧化後，將會轉換成帶有結晶水的氫氧化鐵或氧化鐵，其體積膨脹量為原來正常體積的 2-6 倍，如圖 1 所示，將導致混凝土之裂縫產生或崩裂，以及鋼筋保護層的剝落。

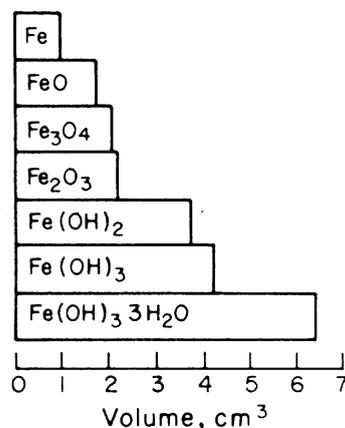


圖 1 鐵銹體積變化量

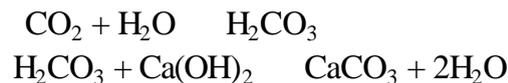
3.2 腐蝕劣化原因

鋼筋混凝土之腐蝕、劣化原因，除了混凝土材料本身因素外，所處環境、外力、施工品質等等均具影響，由於劣化原因非常複雜，僅將較具影響性之因子，簡述於下；

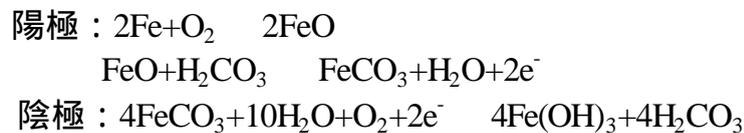
1. 混凝土之中性化

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。但是，當大氣中之二氧化碳(CO₂)滲入混凝土孔隙溶液中，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。混凝土中性化導致鋼筋腐蝕過程，其相關化學反應如下；

中性化過程：



鋼筋腐蝕過程：



混凝土中性化之環境因素，諸如大氣中之 CO₂ 濃度、溫度、濕度及水份等之接觸，其中性化之速度則與混凝土之滲透性及 CO₂ 濃度之關係最為密切。

中性化的速率可以下之關係式表之：

$$D = k\sqrt{t}$$

D：中性化深度， k：中性化係數， t：時間。

當保護層越厚時，混凝土中性化速度越慢，如保護層增加一倍時，中性化速度則延緩 4 倍。k 則和二氧化碳滲透速度及混凝土中之氫氧化鈣有關。

2. 氯離子之侵蝕

氯離子(Cl^-)為大家所公認會導致鋼筋發生腐蝕的主要有害物質，對鋼筋侵蝕的機理乃是 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(FeCl_2)錯合物。這種氯化鐵錯合物會溶解且離開鋼筋的表面，並擴散進入混凝土的孔隙溶液中，與氫氧根離子(OH^-)反應生成 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ，同時釋放出 Cl^- ， $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 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，使鐵元素離開鋼筋表面；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，其侵蝕機理與過程如圖 2。因此，一旦混凝土 Cl^- 含量達到足以產生鋼筋腐蝕的臨界值，則腐蝕的狀況便很難再加以抑制。

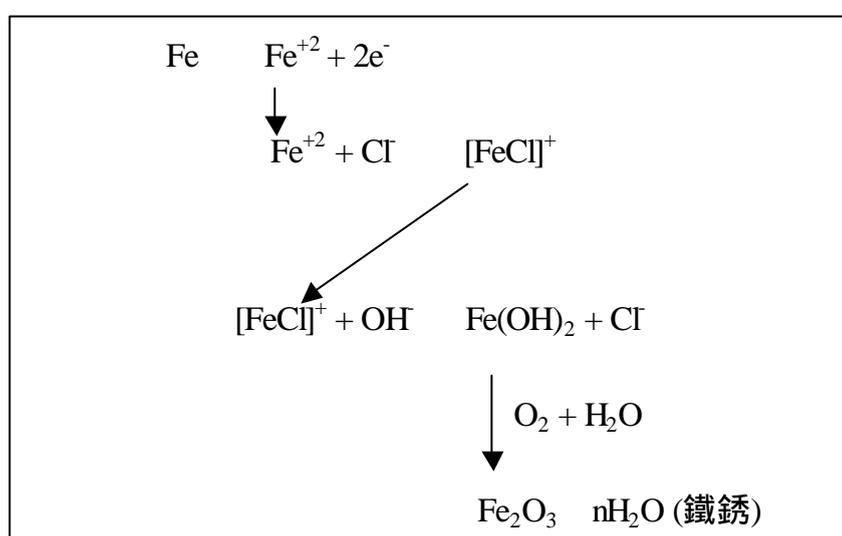


圖 2 氯離子侵蝕鋼筋之機理與過程

Cl^- 除了造成上述的腐蝕反應之外，其本身亦具有較高的導電性，因此，當混凝土中含有高量的 Cl^- 時，一方面可能降低混凝土之電阻係數，另一方面增強電荷在孔隙溶液中之流動能力，更增加鋼筋腐蝕反應的活性。

Cl^- 對鋼筋腐蝕的影響，亦需考慮混凝土的品質，如果品質佳，外界之水份與氧氣不易滲入，鋼筋發生腐蝕的機率較小。此外，當混凝土在 pH 值較高時(高鹼性環境)，則產生氧化鐵保護膜的反應較為優勢，亦忍受在較高量 Cl^- 存在下不易產生腐蝕。反之，若混凝土因中性化作用使其 pH 降低時，則 Cl^- 破壞氧化鐵保護膜較為容易，此時，低量的 Cl^- 便能導致鋼筋腐蝕。圖 3 為混凝土 pH 值與 Cl^- 濃度對鋼筋腐蝕之關係。表 1 為鋼筋腐蝕狀態與 Cl^- 含量之關係。

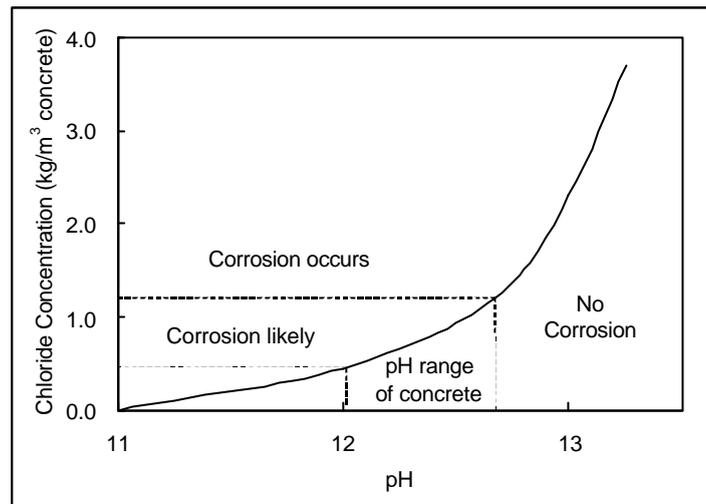


圖 3 混凝土 pH 值與 Cl 濃度對鋼筋腐蝕之關係

表 1 Cl 含量與鋼筋腐蝕狀態之關係

Cl 含量(佔水泥%)	鋼筋腐蝕狀態
< 0.4	忽略
0.4 - 1.0	可能腐蝕
1.0 - 2.0	或有腐蝕
> 2.0	一定腐蝕

3. 「鹼質與粒料」之反應

鹼質與粒料反應(Alkali Aggregate Reaction,)，乃水泥中之鹼金屬如 Na^+ 、 K^+ 等，與含活性之粒料發生化學作用，產生鹼-矽膠體，於有水的情況下，膠體因吸收水份而膨脹，致使混凝土產生內壓、龜裂，表面呈地圖狀之裂痕，最後造成混凝土強度降低而導致結構物崩毀。圖 4 為鹼質與粒料反應之機理與過程。

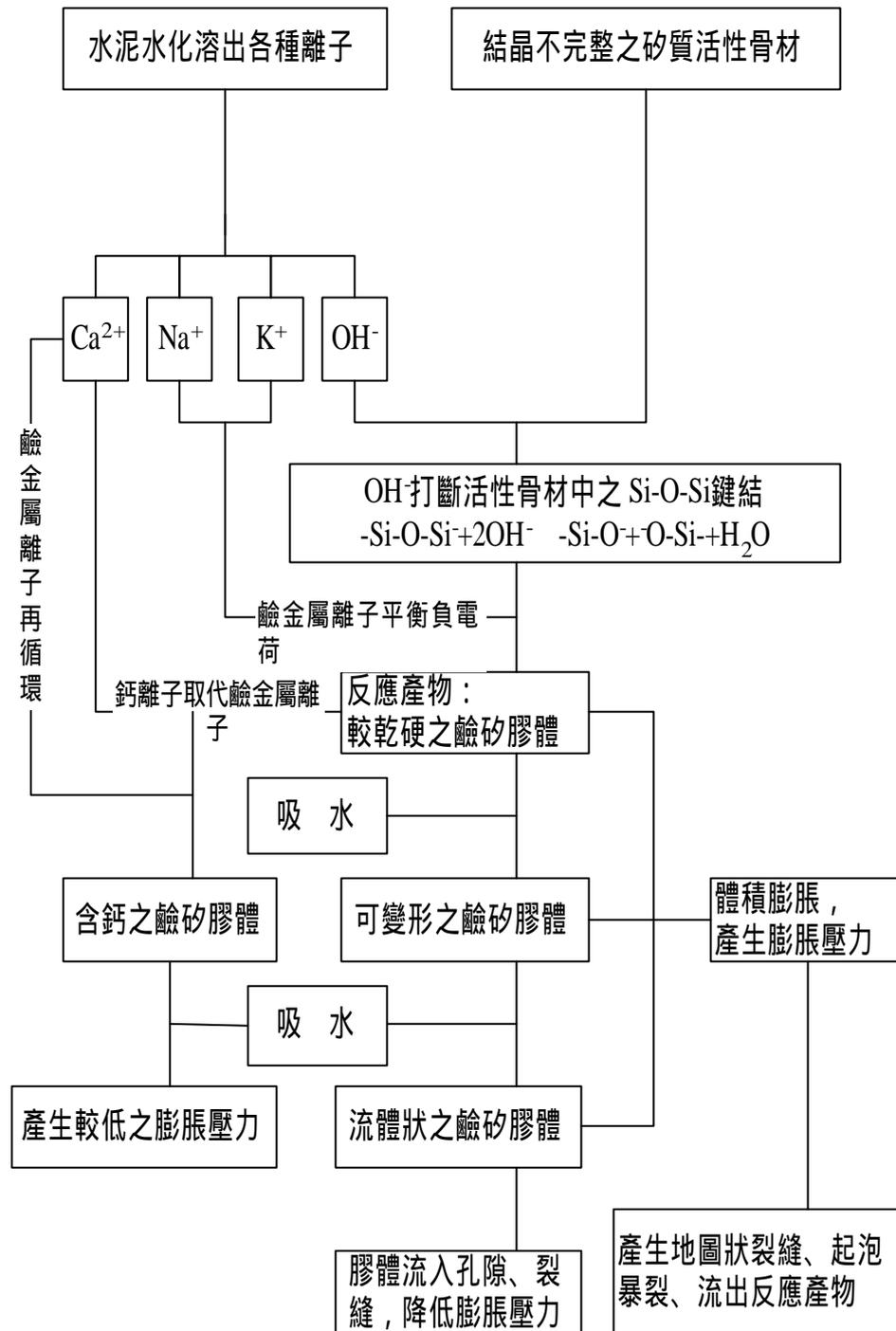


圖 4 鹼質與粒料反應之機理與過程

4. 結構物之龜裂

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。表 2 與表 3 分別為美國與日本對裂縫寬度限制所定訂之規範。

表 2 美國 ACI Committee 224 對裂縫寬度之限制

暴露環境	最大容許寬度
乾燥空氣或有薄膜保護層	0.4 mm
潮濕或含水份之土壤	0.3 mm
除冰之化學藥劑	0.18 mm
浸漬於海水或海水淺灘	0.15 mm
儲水結構體	0.10 mm

表 3 日本對海洋混凝土構造物裂縫寬度之限制

設計規範	曝露環境	最大容許寬度
海洋混凝土構造物 施工指針(1977)	大氣中、飛沫帶	0.15 mm
	海水中	0.20 mm
港灣設施之技術基 準及解說(1979)	海水接觸部位	0.15 mm
	潮汐帶、飛沫帶	0.15 mm
	其他部位	0.20 mm

5. 材料與施工品質

混凝土之品質與建造材料及施工作業有很大的關係，施工前對材料之檢測與品管是必要的。如使用活性骨材、含氯化物之材料(諸如添加 CaCl_2 摻料，海砂等)、水泥中 C_3A 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。除了上述材料因素造成劣化外，引用之設計規範及施工的過程與品管要求，亦是提升結構物耐久性重要因素。

3.3 腐蝕劣化檢測

R.C. 結構物腐蝕劣化過程中，通常外觀都有一些明顯徵候可尋。一般因

鋼筋腐蝕造成劣化損壞過程可分為三個階段。第一階段；混凝土外表出現局部明顯銹蝕斑點，第二階段；外表出現許多裂縫，第三階段；外表出現較大面積的剝落現象。上述現象除目視檢測外，對結構物實際狀況無法了解，仍需進行下列一些非破壞性檢測試驗，才能據以研判現況；

1.裂縫檢視與量測

以目視方式觀察結構物表面裂縫之大小、位置、數量，並以顯微裂縫寬度計或量尺記錄裂縫寬度。裂縫為鋼筋腐蝕因子侵入之捷徑，亦為因鋼筋腐蝕體積膨脹所造成的結果。若裂縫過大時(海洋飛沫區超過 0.15mm)，即應評估對鋼筋腐蝕之影響。如樑底沿拉力筋方向之水平裂縫，則可能為鋼筋腐蝕體積膨脹之徵兆，腐蝕因子隨即侵入，最後將造成鋼筋保護層剝落。裂縫檢測除目視量測外，對裂縫之深度、位置等亦可藉超音波儀測得。

2.混凝土剝離檢測

混凝土結構物因鋼筋腐蝕、體積膨脹，會造成混凝土表面之龜裂、剝離等情形發生。因此，由混凝土表面之檢視，如發現有膨脹、剝離現象時，使用鐵鎚敲擊混凝土表面，如聽到內部有異於一般正常之空洞聲，則可初判所敲擊位置處，內部鋼筋可能已嚴重腐蝕、體積膨脹造成空隙區域。敲擊檢測方式雖然簡單、方便，但對大面積範圍檢測時，則甚不經濟與時效。目前，大多使用紅外線熱感應法或雷達波法檢測，檢測效果很好。

3.保護層厚度量測

以 R-Meter 鋼筋探測儀產生之磁力作用，混凝土內部鋼筋會使磁場作用發生偏離，即可迅速測出鋼筋位置，同時由磁力的強弱可檢測出鋼筋混凝土之保護層厚度。對混凝土已中性化或鹽害之結構物，保護層厚度為鋼筋是否產生腐蝕之一重要指標。若保護層厚度超過中性化或鹽害深度，則鋼筋將較不易發生腐蝕行為。表 4 為日本海洋混凝土構造物耐久性規範中之保護層厚度要求。

表 4 日本海洋混凝土構造物之保護層厚度之要求

設計規範	曝露環境	保護層厚度
海洋混凝土構造物施工指針(1977)	大氣中	5 cm 以上
	飛沫帶	7 cm 以上
	海水中	5 cm 以上
港灣設施之技術基準及解說(1979)	大氣中	5 cm 以上
	飛沫帶	7 cm 以上
	海水中	5 cm 以上

4. 中性化深度量測

使用電鑽或鐵鎚敲取混凝土表面小塊試體，或鑽心取樣將試體劈裂，以化學試劑(酚酞指示劑)噴灑(刷)之，由指示劑顏色變化可測出混凝土中性化之深度。如混凝土表面呈粉紅色，表示混凝土尚未中性化，若混凝土表面呈無色，則表示混凝土已經中性化。中性化深度可為鋼筋混凝土腐蝕損壞與結構物耐久性評估的重要參考指標之一。

5. 「鹼質與粒料反應」之鑑定

現地結構物是否有發生「鹼質與粒料反應」之徵候，下列有兩種快速檢測方法，分別簡述於下：

(1) 醋酸鈾螢光法 (Uranyl Acetate Fluorescence Method)

以醋酸鈾[$\text{UO}_2(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_2$]溶液，噴灑於混凝土面，約 3 至 5 分後，以水清洗混凝土面，由於鈾化物(UO_2^{+2})會取代鹼-矽膠體中之鹼質，其生成物在波長 (254nm) 紫外光下，如有黃綠色的反應時，則混凝土可判定有鹼質與粒料反應現象。

(2) 雙染色法 (Dual Staining Method)

以亞硝酸鈷鈉 ($\text{Na}_3\text{Co}(\text{NO}_2)_6$) 及玫瑰紅顏料 B ($\text{C}_{28}\text{H}_{31}\text{N}_2\text{O}_3\text{Cl}$) 兩試液，分別噴灑於混凝土面，溶解的亞硝酸鈷鈉會與鹼-矽膠體中的 K^+ 反應，形成亞硝酸鈷鈉鉀 ($\text{K}_2\text{NaCo}(\text{NO}_2)_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) 黃色沈澱，而玫瑰紅顏料 B 則為鈣的染色劑，不會被 CSH 膠體吸收，但會被鈣、鉀含量少的鹼矽膠體吸收。不但可檢測鹼質與粒料反應的發生，更可以辨識出不同成分的反應膠體。

6. 混凝土強度檢測

試錘試驗為檢測混凝土強度時，最為簡單常用的方法之一。試驗時乃使用試錘衝擊混凝土表面，以 2 公尺 x 2 公尺之面積範圍，間距 20 公分繪一方格，每一方格內衝擊 10~12 次，由反彈數平均值可推估混凝土表面強度。由於影響因素甚多，不能明確推估混凝土內部的實際強度，故仍須另配合其它檢測方法，諸如鑽心取樣試體進行抗壓試驗，相互比較才能評估混凝土強度。表 5 為試錘反彈數與強度估計值之關係。

表 5 試錘反彈數與強度估計值之關係

反彈數	20	25	30	35	40	45	50
強度(kg/cm^2)	86	141	205	276	351	432	515

7. Cl⁻含量分析

以電鑽鑽取混凝土表面不等深度段之粉末，或將鑽心試體攜回試驗室，依試體不同深度切片，研磨成粉末後，分析各深度層 Cl⁻含量分佈情形。

8. 超音波脈波速度量測

超音波脈波速度測定儀，儀器主要包括時間顯示器及脈波發射探頭和接收探頭。其檢測原理為利用脈波發射探頭，將超音波脈波傳入混凝土中，再以接收探頭量測脈波在其內部之傳遞時間，依脈波的傳遞路徑(距離)與傳遞時間，可計算出脈波速度。檢測時依發射探頭與接收探頭位置之不同，可採用直接法，半直接法及間接法三種，如圖 5 所示，一般多採用直接法求出脈波速度後，配合混凝土試體密度及彈性模數，可判斷混凝土品質及均勻程度。

以超音波脈波速度評估混凝土強度時，其影響因素很多且超音波又有衰減現象，目前尚未能定出正確的波速範圍與強度間之關係。但對混凝土內部之缺陷(孔隙或裂縫)位置、深度、大小等，亦可初步判別之，如圖 6 所示。表 5 為超音波脈波速度與混凝土品質之關係。

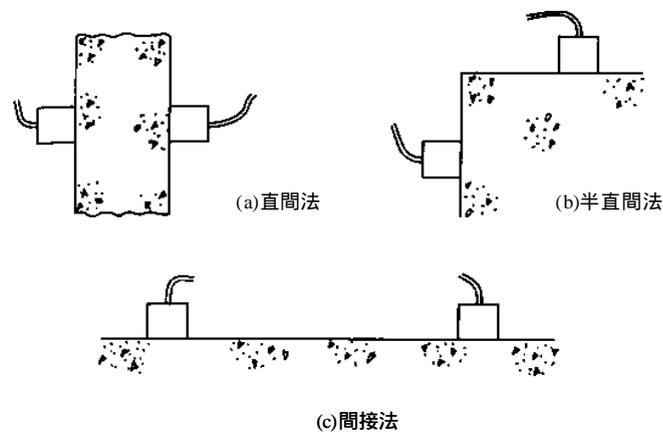
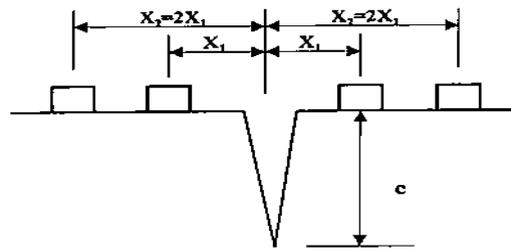


圖 5 超音波檢測法簡示圖

表 5 超音波脈波速度與混凝土品質之關係

脈波速度(m/sec)	混凝土品質
<2500	不良
2500~3000	中等
>3000	優良



裂縫深度：

$$C = X_1 \sqrt{\frac{4T_1^2 - T_2^2}{T_2^2 - T_1^2}}$$

說明：C=裂縫深度

X_1 =第一次量測時探頭與裂縫之距離(cm)

T_1 =第一次量測時超音波傳遞時間(sec)

X_2 =第二次量測時探頭與裂縫之距離(cm)

T_2 =第二次量測時超音波傳遞時間(sec)

圖 6 超音波裂縫深度量測示意圖

9. 敲擊回音法

敲擊回音法可量測混凝土內部裂縫位置及表面裂縫深度。儀器包含敲擊源、接收器及資料擷取系統。檢測原理乃利用敲擊方法將應力波引入受測物體內，應力波被物體內部之瑕疵反射或對物體表面所造成的位移擾動訊號，位移波形可決定縱波在敲擊面與反射波介質間往返一次所需時間，依此可推算波速或瑕疵位置（深度）。圖 7 為敲擊回音法量測簡示圖。

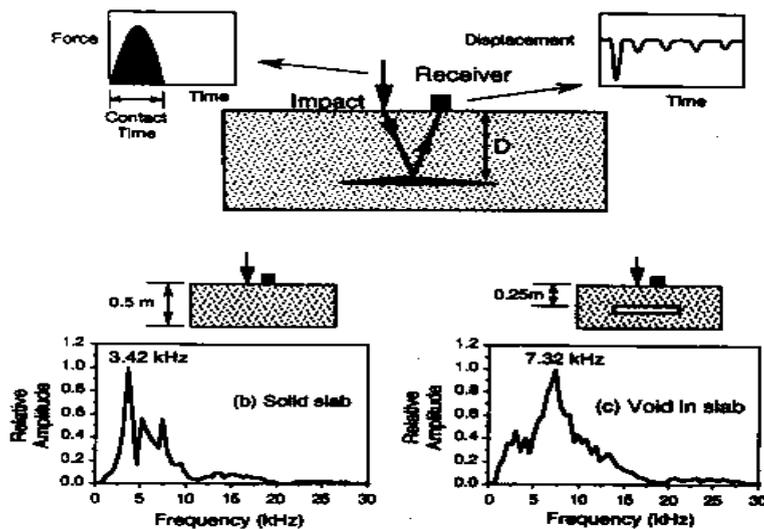


圖 7 敲擊回音法檢測示意圖

10.紅外線溫度感測法

紅外線溫度感測法為偵測混凝土表面溫度分佈，影響溫度分佈之因素有混凝土內部結構(諸如孔隙、洞穴)、表面條件及周圍環境。混凝土內如有熱流出入時，內部孔隙、洞穴等之瑕疵會影響熱傳導，造成混凝土表面溫度分佈不均勻。因此，由表面溫度之分佈，可找出混凝土可能已劣化之位置。本檢測法大多用於偵測混凝土橋面版因鋼筋腐蝕所產生之裂縫斷層位置與大小，適合對大規模大面積之檢測，既快速且經濟。

11.電阻係數量測

鋼筋的腐蝕是一種由陽極到陰極間之電荷轉移現象，當電(荷)在混凝土內移動時，受到混凝土介質之阻礙，產生了電荷通過之瓶頸現象，是謂混凝土電阻。電阻(係數)高則電荷不易通過混凝土介面，電阻係數低則電荷較易通過，對混凝土內鋼筋腐蝕威脅性高。因此，電阻係數變化，可評估腐蝕電流通過混凝土之一種能力指標，亦可輔助研判鋼筋腐蝕之難易。

如與腐蝕電位併同考量時，當腐蝕電位小於-350mV(Cu/CuSO₄)時，若混凝土電阻大於 12 k⁻cm，則鋼筋腐蝕速度很小。電阻小於 5 k⁻cm 時，鋼筋腐蝕速度很大。此外，電阻係數亦可為鑑定混凝土品質方法之一，例如電阻大表示混凝土之孔隙量少，相對滲透性亦小，腐蝕因子不易入侵，內部鋼筋不易腐蝕。表 6 為混凝土電阻係數與鋼筋腐蝕速率之關係。

電阻係數常受到許多因素的影響，諸如混凝土內部 CI 量、孔隙大小、孔隙溶液、濕度、水份多寡、漿體成熟度等等。進行電阻量測時，應盡量避開或遠離鋼筋位置，避免造成量測誤差。圖 8 為四探針式之電阻係數量測簡示圖。

表 6 電阻係數與鋼筋腐蝕速率之關係

電阻係數(k ⁻ cm)	鋼筋腐蝕速率
< 5	非常高
5-10	高
10-20	較低
> 20	非常低

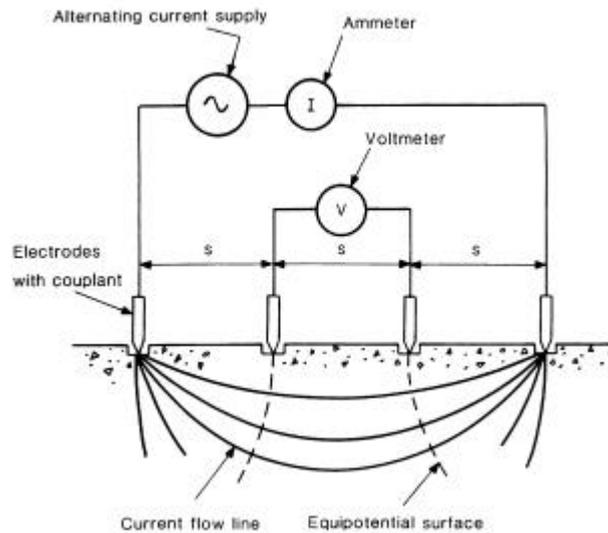


圖 8 四探針式之電阻係數量測簡示圖

12. 鋼筋腐蝕電位量測

腐蝕是一種電化學反應，在鋼筋表面會形成許多陰極(鈍態)和陽極(正腐蝕中)之小電池(cell)區域，在不同位置有不同的電位和電流產生。利用此理論，可檢測某一範圍之電位分佈狀況，以評估鋼筋表面發生腐蝕的可能程度與範圍。現場檢測以半電池式之腐蝕電位儀(如圖 9)，一端接參考電極(Cu/CuSO₄)，另一端接鋼筋，即可量出鋼筋腐蝕電位值。依據 ASTM C-876 規範，鋼筋腐蝕電位大於-200mV(以 Cu/CuSO₄ 電極量測)，腐蝕機率小於 5%，電位在-200mV 至-350mV 間，腐蝕機率大於 50%，電位若小於-350mV 時，腐蝕機率則提高至大於 90%。表 7 為鋼筋電位值與腐蝕機率之關係。

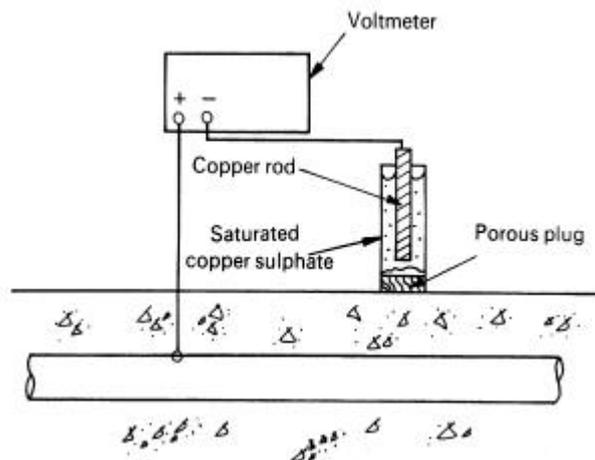


圖 9 鋼筋腐蝕電位值量測簡示圖

表 7 鋼筋電位與腐蝕機率之關係(ASTM C-876 規範)

鋼筋電位值	腐蝕機率
-200 mV < 大於	小於 5%
-350 mV ~ -200 mV	50 ~ 90%
小於 < -350 mV	大於 90 %

13.鋼筋腐蝕速率(電流)量測

鋼筋腐蝕是一種電化學反應，量測電化學反應速率即可知鋼筋的腐蝕速率。一般量測鋼筋腐蝕速率之方法包含；線性極化法(linear polarization method, 簡稱 DC 法)、交流阻抗法(alternative current impedance method, 簡稱 AC 法)與調合分析法(harmonic analysis method)。前述兩法較為常用，其量測技術簡述於下；

(1)線性極化法

線性極化法為包含工作電極、參考電極、輔助電極之三極式的量測裝置，在極化過程中，於自然腐蝕電位 E_{corr} 附近(亦即電位在 $\pm 10\text{mV}$ 範圍之間)，其極化曲線約呈直線關係，換言之，外加電流(ΔI)與極化電位變化量(ΔE)是直線關係。因此， $\Delta I/\Delta E$ 即為直線之斜率，由 I/E 之關係可求出 R_p (極化電阻)，是謂線性極化(電阻)法。依據 Stern and Gearey 公式推算腐蝕速率如下：

$$i_{corr} = \frac{b_a b_c}{2.3 b_a b_c} \times \Delta I / \Delta E = \frac{B}{R_p}$$

i_{corr} ：鋼筋腐蝕電流

ΔE ：極化電位變化量

ΔI ：電流變化量

β_a ：陽極 tafel 曲線之斜率

β_c ：陰極 tafel 曲線之斜率

R_p ：極化電阻

B：為一常數($B = \beta_a \times \beta_c / 2.3 (\beta_a + \beta_c) = 0.026$)，在混凝土環境下鋼筋極化曲線圖中之 β_a 、 β_c 值為 0.12。

(2)交流阻抗法

為一擾動式之量測技術，於腐蝕界面施予小幅度之電壓(正弦波之干擾信號)，以定電位或定電流法將極化曲線重疊於一點，其外加電壓與電流變化呈線性關係。藉助電化學阻抗頻譜分析(electrochemical impedance spectroscopy)技術，由交流電之相角(phase angle)變化，可求得電容值(C)、混凝土電阻(R_s)、鋼筋表面鈍化層之極化電阻(R_p)等數據。藉由 Nyquist Plot 之圖形如圖 10 所示，可解析混凝土與鋼筋界面間之腐蝕狀態，腐

蝕速率計算公式與線性極化法相同。表 8 為腐蝕電流與鋼筋腐蝕狀態之關係，表 9 為腐蝕電流與鋼筋表面厚度損失及銹層成長速率之關係。

表 8 腐蝕電流與鋼筋腐蝕狀態之關係

$I_{corr}(\mu A/cm^2)$	腐蝕狀況
< 0.1	鈍化狀態
0.1~0.5	低~中等腐蝕
0.5~1.0	中~高等腐蝕
> 1.0	高度腐蝕

表 9 腐蝕電流與鋼筋厚度損失速率之關係

$I_{corr}(\mu A/cm^2)$	厚度損失($\mu m/yr.$)	銹層成長($\mu m/yr.$)
0.1	1.1	3
1.0	11.5	34
5.0	57.5	173
10	115	345

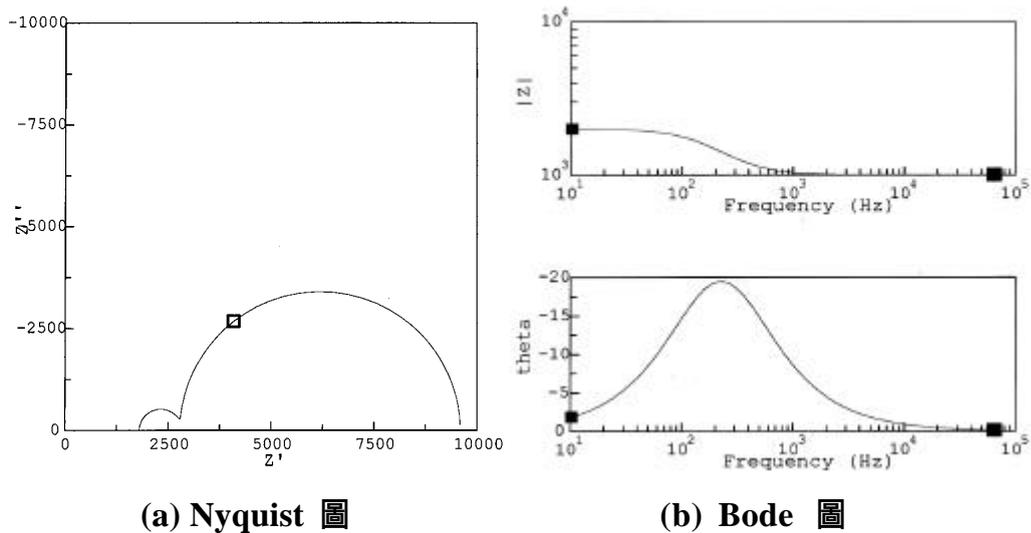


圖 10 Nyquist 與 Bode 圖

四、檢測實例分析

調查案例：蘇澳港11號棧橋式碼頭，調查時間為民國82~83年。

1. 結構物概要

碼頭結構為棧橋式，民國六十六年完工，全長 175 公尺。下部結構浸泡於海水中，底面板、橫樑受海水之潑濺，橫樑計三十餘支，每支橫樑有七根 R.C. 樁基支撐，形成一個七跨度之連續樑。由於碼頭長達數百公尺，為瞭解結構物現況，特選擇第 10 支樑做詳細檢測，在樑之側面及底面，繪製每間隔 20 公分之方格，做為爾後各項試驗之檢測區域，其它底樑則選擇跨度較外(海)測之區域檢測。

2. 檢測方法

由於檢測面位於碼頭面板底面，距低潮位很近，可工作空間很小，人員、儀器均不易進入。檢測前於碼頭面板下搭設工作架，研究人員再利用低潮時段，儘速進行檢測工作。檢測項目包括：

- (1) 目視檢測
- (2) 試錘試驗
- (3) 超音波速度量測
- (4) 腐蝕電位量測
- (5) 電阻係數量測
- (6) Cl 含量分析
- (7) 保護層厚度量測

3. 檢測結果

(1) 目視檢測

10 號樑之 10-1、10-2 跨度，表面除有不少裂縫分佈外，外側拉力筋位置部位亦有水平裂縫。10-3 跨度區僅有一些微小裂縫，應為混凝土乾縮形成，短時間對耐久性影響不大，其它跨度區域由於更靠近拋石堤，可工作空間甚小，損壞情形無法檢視。

其它有較大裂縫者之底樑編號為 1-1、1-3、12-1、26-1 號之跨度(較靠近海測之第一跨度區域)，在拉力筋部位均有水平裂縫，部份裂縫並有銹水滲出，依經驗判斷內部鋼筋已發生嚴重腐蝕現象。部份碼頭面板底面之混凝土已剝落，內部鋼筋外露、嚴重腐蝕，保護層厚度不足。

(2) 試錘試驗

試錘反彈數值大多在 30 以上，換算凝土強度約為 210kg/cm^2 以上，顯示檢測範圍之凝土強度仍符合當初之設計要求。

(3) 超音波脈波速度試驗

超音波脈波速度約介於 1500 ~ 4000 m/s 之間，變化差異性較大，顯示檢測區域內，部份凝土之品質不均勻。

(4) 鋼筋腐蝕電位量測

以 Cu/CuSO_4 參考電極量測，鋼筋腐蝕電位大部份約在 -300 ~ -400mV 之間，研判鋼筋發生腐蝕機率應在 50 ~ 90% 之間。

(5) 電阻係數量測

碼頭之底面板、樑等凝土構件，經常接觸海水之潑濺、滲入，因此，檢測底樑凝土之電阻係數較低，約在 5 ~ 10 $\text{k}\Omega\text{-cm}$ 之間，顯示凝土含水份甚高，內部電荷游動甚易，鋼筋甚易發生腐蝕行為。

(6) Cl^- 濃度分析

由於碼頭面板、底樑受潮汐、海水潑濺等浸漬、乾濕作用影響， Cl^- 濃度長年累月沉澱累積於凝土表層，隨著時間經由裂縫侵入並擴散於孔隙溶液中，將使鋼筋之鈍化膜受到破壞，對鋼筋甚具腐蝕威脅。本碼頭完工起用近 17 年， Cl^- 濃度檢測結果大部份在 0.5% 以上，部份試體 Cl^- 濃度高達 1~2 %，有部份鋼筋腐蝕，在此狀況下應特別注意凝土保護層是否剝落及裂縫之發展控制。

(7) 保護層厚度量測

以 R-Meter 鋼筋探儀檢測，凝土保護層約為 5~7 公分，小於海洋結構物規範要求(10 公分)，內部鋼筋甚易受到侵蝕。

綜合各項檢測結果，碼頭底面板凝土表面有剝落現象，內部鋼筋已開始腐蝕生銹，如圖 11 所示，應儘速採取防蝕改善措施，以防止鋼筋繼續腐蝕惡化，影響結構物之安全。



圖 11 碼頭 R.C.面版，底面混凝土剝落、鋼筋外露及嚴重腐蝕之情形

五、防蝕原理與維護工法

5.1 金屬之腐蝕

5.1.1 腐蝕的定義

腐蝕原為破壞之意，是金屬與周圍環境起(電)化學反應，造成破壞性的結果，它為一自然反應。大多數的金屬礦物在自然條件下均以氧化物狀態存在(穩定化合物)，從礦物冶煉出來之金屬(為不穩定狀態)，當曝露在自然環境下，受到環境因素之影響，這些金屬由不穩定之狀態，逐漸回歸於原來穩定之氧化物狀態，這種材料性質改變的過程即為腐蝕之行為。

5.1.2 金屬腐蝕之電位差與 pH 關係

從熱力學平衡之觀點而論，金屬在水溶液中之腐蝕反應主要涉及電位(E)差異及 pH 值之變化，E-pH 圖(Pourbaix 圖)可簡明表示腐蝕反應之完整熱力學關係。其中 E(電位)主控金屬與離子間的平衡溶解度，pH 值控制陰極反應並決定鈍態膜的穩定性。以鐵在水系統的 Pourbaix 圖為例說明，鐵與外界環境的作用型態，可分為腐蝕區、鈍化區、及免疫區等三個區域，如圖 12 所示。自然狀況下鐵的電位處於腐蝕區中，亦即腐蝕屬自發反應。熱力學理論上，金屬之腐蝕電位與 pH 值之關係，可由下列公式表示：

$$E = E^0 + (2.303 RT / n F) \ln [(A)^a / (B)^b]$$

E、E⁰:電位能，A、B:溶液之活度，F:法拉第常數，n:當量數(轉移電子數)，a、b:平衡係數，R:氣體常數，T:溶液溫度。

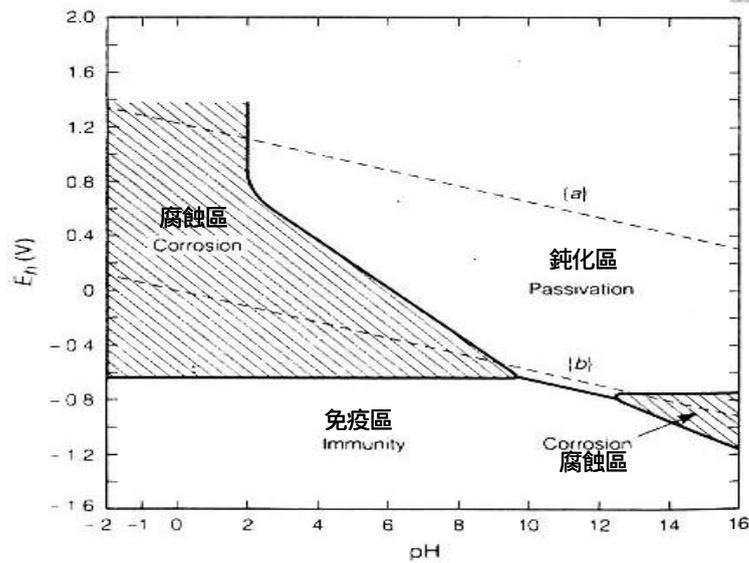
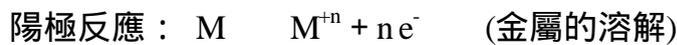


圖 12 鐵在水系統之腐蝕區、鈍化區、及免疫區域

5.1.3 腐蝕之基本要件

金屬材料發生腐蝕行為，必須具有五大基本要件；(1)陽極反應(2)陰極反應(3)電荷轉移路徑(4)電解液(5)腐蝕電流，以形成一封閉的導電迴路。其陰、陽兩極之化學反應程序如下：



混凝土內鋼筋之腐蝕與一般金屬的腐蝕，除了環境因素不同外，其它所必需具備之條件均與金屬材料相同。圖 13 為混凝土中鋼筋腐蝕之簡單示意圖。

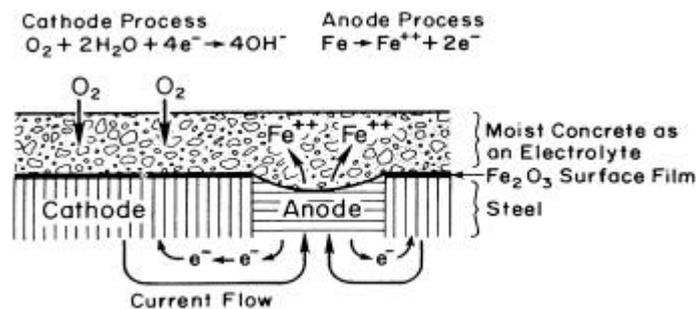


圖 13 混凝土中鋼筋腐蝕之簡示圖

5.2 防蝕原理

從金屬電位與腐蝕之關係明確指出，如果欲阻止腐蝕之發生，除了隔離腐蝕環境外，通常在水溶液系一定 pH 值之環境下，則必需設法將電位降至免疫區內，金屬便不會產生腐蝕反應，另一方式為將腐蝕電位提昇至鈍化區內，亦可達到不起腐蝕作用。提高溶液之 pH 值或鹼性溶液，金屬(鐵)亦可形成一層鈍態保護膜，可降低腐蝕作用。基於上述之論點，電化學技術如陰極防蝕(乃藉由外界供應電流將腐蝕區中之金屬的電位降低至免疫區內)，恰可輕易達成中止金屬發生腐蝕行為的任務。

5.3 維護工法

鋼筋混凝土之腐蝕、劣化，對結構體之耐久性影響甚鉅，許多濱(近)海地區之 R.C. 結構物，均有嚴重的鋼筋腐蝕劣化情形。為有效改善鋼筋腐蝕之問題，對重要結構物或新建結構物，若能建立一套適當的監測與檢測系統，便能即時了解鋼筋之腐蝕狀況，在造成嚴重劣化腐蝕前，適時予於防治及修護，便可提升結構物之耐久性。有鑑於此，各種腐蝕監測元件及技術不斷地被開發，電化學防蝕理論與觀念，亦廣泛被應用於鋼筋之腐蝕防治。目前適用於濱海地區及港灣 R.C. 結構物之腐蝕防治工法，計有(1)陰極防蝕法(2)電化學去鹽法(3)電化學還鹼法等。

5.3.1 腐蝕監測系統

近年來，基於電子資訊科技之進步與市場需求，歐美先進國家已陸續成功開發出數種鋼筋腐蝕之即時監測元件與系統，監測效果相當良好，可隨時掌握結構物之動態。Anode-Ladder System 為腐蝕監測元件之一，如圖 14 所示，整個元件包含；(1)陽極梯(Anode Ladder)；內含 6 根獨立的陽極元件及溫度偵測器(2)陰極導桿(Cathode Bar-C)；為一塗上白金的鈦金屬桿。藉由電纜線之連接，將感應偵測器(元件)與訊號接收之終端盒連接，訊號即可進入數據擷取系統，完成線上監測與記錄工作。

Anode Ladder System 監測之原理，乃是將監測元件(陽極梯)埋置於混凝土內，陽極梯上每一根陽極距離混凝土面有不同之深度，每一根陽極與在其附近之陰極桿形成一個通路。當 Cl^- 、 CO_2 及 O_2 由混凝土表面的滲入時，只要 Cl^- 滲入到某一深度時(接觸陽極梯第一根陽極的表面)，即有電流被偵測出。隨著時間的增長，其它深度的陽極也開始受到 Cl^- 之滲入而腐蝕，藉由各深度層陽極之連續的量測電流，可測得臨界 Cl^- 含量或 CO_2 侵蝕的深度與時間的關係。有了這些實測數據後，鋼筋的腐蝕時間是可以被預估的。本系

統可監測各陽極間與陰極之電位、電流、電阻及混凝土溫度變化，隨時掌控內部鋼筋之腐蝕狀況。

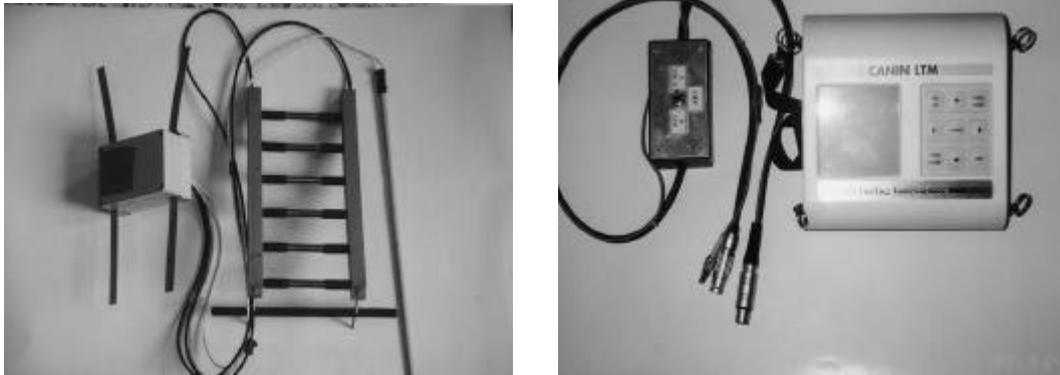


圖 14 Anode-Ladder System 監測元件

5.3.2 電化學防蝕工法

1. 陰極防蝕法

陰極防蝕應用於鋼筋混凝土結構物之防蝕，至今已有三十幾年的歷史了，公認為解決鋼筋混凝土腐蝕唯一有效的方法。美、加、日本、北歐等國家早已使用於各類結構物之防蝕，防蝕成效佳，大幅提高結構物之耐久性與安全。陰極防蝕可分為下列有兩種方式；

(1) 外加電流法

此法乃於鋼筋(陰極)與混凝土外之輔助陽極(一般使用鈦金屬)間，施加一直流電源，供應防蝕電流給鋼筋，使鋼筋表面不會失去電子，以達到防蝕的目地，一般陸上之 R.C. 結構物多採用此法。外加電流方式之陰極防蝕，為一長期持續性之防蝕工法。R.C. 結構物施作後，可長期使鋼筋維持於防蝕保護電位內，同時 OH 離子在鋼筋周圍產生，不但提升混凝土之鹼性環境，又能使鋼筋再次產生鈍化保護層，因此，只要後續之防蝕系統維護良好，可謂一勞永逸。目前國內已有多件工程案例，已採用外加電流式之陰極防蝕保護，諸如台北捷運工程、鐵路局基隆橋樑工程、嘉義布袋港跨海橋樑工程等等，防蝕成效良好。圖 15 為 R.C. 結構物之陰極防蝕簡示圖。

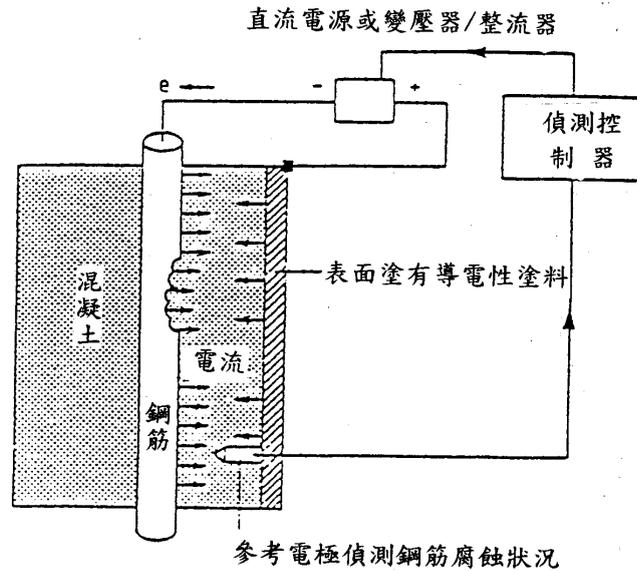


圖 15 鋼筋混凝土結構物陰極防蝕示意圖

(2)犧牲陽極法

此法乃利用自然電位較低之金屬(如 Mg、Al、Zn)做為陽極，與被保護之金屬體偶合在一起，當陽極放出防蝕電流後，使被保護之金屬體的自然電位下降，當電位下降至防蝕電位時，則被保護體就不再發生腐蝕行為。根據美國佛州交通局(Florida Department of Transportation, FDOT)之研究，依使用陽極之方式不同，犧牲陽極法可再細分為下列四種方式：

a. 鋅熔射方式

使用熔射鋅層被覆作為陽極，為防止高溫、高溼等嚴苛環境之破壞作用，一般常於壓克力樹脂施予封孔處理。施工時需先清除剝落的混凝土並噴砂處理至裸露的鋼筋表面，再將鋅熔射噴塗至混凝土及裸露的鋼筋表面，藉由鋅與鋼筋電連通之傳導或經由混凝土為介質，達到陰極保護的目的。鋅塗層之噴塗厚度為 0.38~0.5 mm (15~20 mils)，鋅與混凝土之結合力為 1034 kPa (150 psi)。若鋅塗層未直接噴塗於舊有鋼筋表面，亦可使用外加電流的方式進行陰極保護。

b. 鋅板方式

鋅板採用 ASTM A 190 的 99.9%純鋅製成，密度為 0.02 kg/m³，以基樁為例製成鋅板，直接包覆於混凝土表面，鋅板外層再利用 50%塑膠與 50%木質纖維製成之夾板包覆，夾板內側有凹槽可匯聚水氣以增加混

凝土的導電性，並藉潮汐漲落可將鋅的氧化產物沖洗掉；而此夾板的固定方式則是利用 316 不銹鋼圈箍繫在舊有基樁結構上。鋅板與鋼筋間則利用銅線連接使之電連通。

c.犧牲式陰極保護基樁夾層

此法為鋅板系統之改良，為基樁 RC 結構於水下帶、潮間帶、飛沫帶之陰極防蝕使用。工法中以鋅網為主要陽極，內置於玻璃纖維製成之基樁夾層內，而另一鋅塊為輔助陽極，置於低潮線下 0.6 m 的海水中，利用銅線將陽極與鋼筋連接。施工時將兩片夾層包覆於混凝土表面，夾層與混凝土間間距 5 cm，然後以砂漿水泥灌注夾層。此系統不需外加電源且完工後甚少需維護，造價及施工均較外加電流式陰極保護系統經濟，已被 FDOT 廣為使用於海水環境下之陰極防蝕。

d.鋅膜導電膠

鋅板導電膠為一厚 0.254 mm 的鋅膜及一層離子導電膠。施工時將導電膠塗佈於混凝土上，而導電膠之另外一側上覆鋅膜，利用銅線將鋅膜與鋼筋電連通，以達到陰極保護的效果。本工法在潮濕的環境中，導電膠會失去黏著力而導致鋅膜脫落，造成防蝕電流分佈不均。因此，工法僅能適用於乾燥的大氣環境下。

2.電化學去鹽法

電化學去鹽法乃針對已受鹽害之鋼筋混凝土結構物，將其內部之 Cl^- 驅出混凝土外，以降低或阻止鋼筋繼續腐蝕。去鹽法技術乃是應用電化學之同性電荷相斥異性電荷相吸之原理，於鋼筋與混凝土外之輔助陽極之間，外加一直流電源，形成一電力場，藉電場作用力將孔隙溶液中之 Cl^- 驅除，使內部鋼筋不再受 Cl^- 侵蝕。本工法於 1970 年代開始萌芽，歷經二十幾年之研發，1990 年代初期技術已開始商業化。此工法視通電電流密度之大小，處理時間約需 2~10 週不等，經處理後鋼筋周圍之 Cl^- 明顯下降，在一般情況下，去鹽效應可達到 60%，甚至高達 80~90%。圖 16 為電化學去鹽法之簡單示意圖。

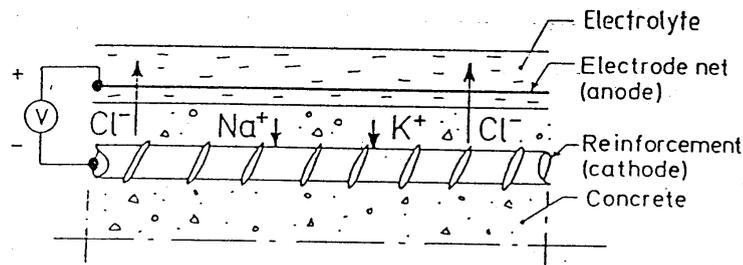
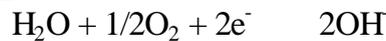


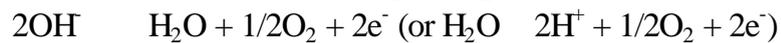
圖 16 電化學去鹽法示意圖

去鹽系統所發生之化學反應與孔隙溶液之離子游動情形，簡述如下；

陰極端：(鋼筋)周圍有 OH 與 H₂ 產生



陽極端：(混凝土外之鈦網陽極)有 O₂ 及 Cl₂ 產生



孔隙溶液：

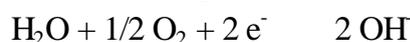
陽離子(諸如 Na⁺、K⁺、Ca⁺²、H⁺等)向陰極端游動，鋼筋附近之陰離子(OH⁻ 及 Cl⁻)，則向混凝土外之輔助陽極網游動。

3.電化學還鹼法

基本上還鹼法與去鹽法是一體兩面，採用之原理相同。還鹼法乃是將已中性化之混凝土恢復至高鹼性環境，鋼筋表面再度生成鈍化保護膜，使鋼筋得以被保護。處理過程中應注意通電之電流密度不能太大，否則可能產生孔隙溶液中鹼金屬離子的增加，若混凝土本身含有活性骨材及在有水份的環境下，將增加發生鹼質與粒料反應的機率。

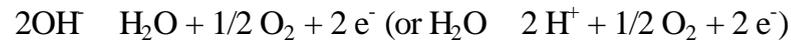
圖 17 為電化學還鹼法之簡示圖，在鋼筋與混凝土外之輔助陽極間，引進一直流電源，經由電滲流(electro-osmotic flow)、擴散(diffusion)、毛細吸附(capillary absorption)及電解作用(electrolysis)，將外界之鹼性電解液大量輸入孔隙溶液中，除提升孔隙溶液之鹼性環境外，另一方面鹼性電解液中之 Na⁺、K⁺等離子，游向陰極(鋼筋)，致使鋼筋再處於鈍態狀況。還鹼法之電化學反應式及孔隙溶液之離子移動之情形，簡述如下：

陰極端(鋼筋)：產生 OH 與 H₂





陽極端：(混凝土外之鈦網陽極)



孔隙溶液：

陰離子(OH⁻、CO₃²⁻及Cl⁻)從鋼筋向混凝土外之輔助陽極游動，而陽離子(Na⁺、K⁺、Ca²⁺)從外面陽極槽電解液中，滲入混凝土孔隙溶液，游向鋼筋表面。

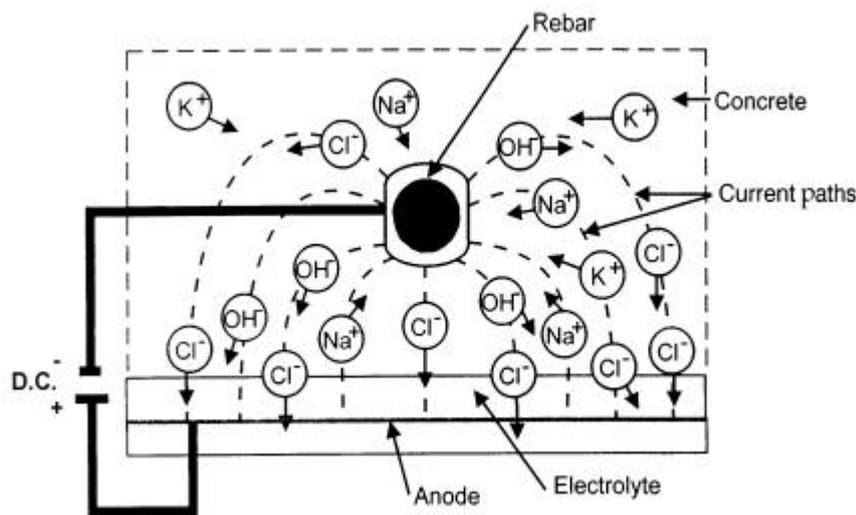


圖 17 電化學還鹼法之簡示圖

六、結語

台灣為一海島型地區，地小人稠，對外經貿運輸主要以海運為主，因此港灣工程設施之建造、維護與安全極為重要。港灣構造物長年處於惡劣腐蝕之海洋環境下，為維護港口營運正常，港區內之結構物必需定期檢測與修復。維修時需採用適當之工法，不但可以節省公帑又可延長結構物使用年限。未來新建工程時，則必需採用適合海洋結構物之規範，確實做好施工品質控制，將可降低維修機率與成本。此外，進行新建工程設計時，若能同時考慮未來的維修機制(方法、技術、材料、設備、監測等)，則將更有助於維修成效的提高，進而增加構造物的使用壽命。

參考文獻

1. Richard T. L. Allen, Concrete in Coastal Structure, Thomas Telford Ltd., 1st ed., Heron Quay, London, 1998.
2. J. Glanville and A. Neville, Prediction of Concrete Durability, 1st ed., E & FN Spon, London, 1997.
3. P. M. Chess, Cathodic Protection of Steel in Concrete, 1st ed., E & FN Spon, London, 1998.
4. J. Kropp and H. K. Hilsdorf, Performance Criteria for Concrete Durability, 1st ed., E & FN Spon, London, 1995.
5. John P. Broomfield, Corrosion of Steel in Concrete, 1st Ed., E & FN Spon, London, 1997.
6. J. H. Bungey and S. G. Millard, Testing of Concrete in Structures, 3^d Ed., Blackie Academic & Professional, Chapman & Hall, New York, 1996.
7. P. M. Chess, Cathodic Protection of Steel in Concrete, E & FN Spon, London, 1998
8. A. Sarja and E. Vesikari, Durability Design of Cathodic Structures, RILEM Report 14, E & FN Spon, 1st Ed., London, 1996.
9. 饒正、陳桂清等，港灣 R.C. 結構物修理系統之評估研究報告(83 研 11)，交通處港灣技術研究所，民國 83 年 6 月。
10. 混凝土結構物耐久性技術研討會(論文集)，台灣營建研究院，民國 89 年 4 月 20~21 日。
11. 陳桂清、柯正龍等，現有結構物安全評估及維護研究(88-研 12-1,2,3)，交通處港灣技術研究所，民國 88 年 6 月。
12. 陳桂清、柯正龍等，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，民國 91 年 3 月。
13. 蔣元駒，韓素芳，混凝土工程病害與修補加固，海洋出版社，北京，1996.
14. 喬生祥，黃華平，水工混凝土缺陷檢測和處理，中國水利水電出版社，北京，1997.
15. 李賢華等，港灣構造物安全檢測與評估之研究(第二年報告)，交通部科技顧問室委託計畫，民國 90 年 9 月。

港灣鋼筋混凝土陰極防蝕準則草案介紹

羅俊雄¹ 翁榮洲² 陳桂清³ 饒正⁴

摘要

港灣鋼筋混凝土構造物常年置於海水中或受海風侵襲，極易發生腐蝕劣化，而陰極防蝕技術在鋼筋混凝土上的應用業已確認為最具效能的防蝕對策。本文將介紹港灣鋼筋混凝土構造物的陰極防蝕準則草案，作為爾後陰極防蝕工法在鋼筋混凝土結構上應用之參考依據。

Guideline of Cathodic Protection for Reinforced Concrete Structures in Marine Environments

J. S. Luo¹ J. C. Oung² K. C. Chen³ C. Rai⁴

ABSTRACT

Corrosion of reinforced concrete structures in marine environment is apparent. Cathodic protection has been confirmed to be the most efficient method to prevent steel corrosion in concrete. Therefore, guideline to perform the cathodic protection technique at reinforced concrete structures in marine environments is introduced. It is highly expected that the accomplishments would afford adequate cathodic protection technique to harbor authorities.

一、前言

碼頭及防波堤為港灣構造物中之主要部份，碼頭為船舶停靠、裝卸物資時的繫靠設備，而防波堤則是屬於港灣構造中之外廓工程。碼頭依其材料及

¹ 中華民國防蝕工程學會 秘書長，工業技術研究院工業材料研究所 研究員

² 中華民國防蝕工程學會 後補理事，工業技術研究院工業材料研究所 正研究員

³ 交通部運研所港灣技術研究中心 研究員

⁴ 交通部運研所港灣技術研究中心 研究員

構造型式可分為：重力式、板樁式、樁基擁壁式、棧橋式、沈箱式碼頭；而防波堤則包括有直立堤、混成堤、拋石堤、消波塊堤等。鋼材(如鋼板(管)樁)、鋼筋混凝土(reinforced concrete, RC)、及預力混凝土(prestressed concrete, PC)為港灣結構的主要組成，常年於海洋環境的侵襲下，鋼板(管)樁會產生腐蝕現象，造成構材斷面縮小、性質改變、整體結構變化，以致於最終強度損失，無法承擔外力作用；而鋼筋混凝土結構，因海水中或大氣中的氯離子入侵，促使鋼筋銹蝕劣化，造成混凝土膨脹裂開，表面剝落，強度降低，甚至破壞整個結構物。因此，瞭解鋼板(管)樁、鋼筋在混凝土、預力混凝土在海洋環境中的腐蝕行為並選擇有效的防蝕方法，以確保結構物之耐久與安全，有其重要與必要性。

再者，陰極防蝕(cathodic protection, CP)應用於金屬及鋼筋混凝土結構之防蝕技術，經歐、美、加、日等國多年的使用經驗及研究成果，業已肯定為防蝕效能極佳的工法。近十年來，國內雖已開始進行研究與施作，但尚未制定相關規範，設計時多引用國外經驗與規範；然因國內外適用條件的差異，急需研擬一套符合國內環境需求的陰極防蝕規範或準則，以供日後新建工程或既有結構物陰極防蝕設計、施工及維修時的參考依據。有鑑於此，交通部運輸研究所港灣技術研究中心特委託中華民國防蝕工程學會共同研訂港灣構造物之陰極防蝕準則草案，但工作範圍僅針對鋼筋混凝土結構進行研究，預力混凝土結構與金屬結構物之陰極防蝕並未含括在內。

二、港灣鋼筋混凝土陰極防蝕準則草案

港灣鋼筋混凝土陰極防蝕準則草案適用於鋼筋混凝土結構之陰極防蝕工程設計、安裝、驗收、系統操作、與維護管理。全文共分為七章：

- 第一章 港灣構造物陰極防蝕總則
- 第二章 陰極防蝕設計前之調查評估
- 第三章 陰極防蝕系統設計需求
- 第四章 材料及裝置
- 第五章 系統安裝
- 第六章 試車運轉及驗收
- 第七章 系統操作與維護

今將準則本文內容敘述如下：

第一章 港灣構造物陰極防蝕準則總則

1.1 適用範圍

本準則僅適用於鋼筋混凝土結構需陰極保護者，不包括預力混凝土結構及金屬結構物。本準則適用於鋼筋混凝土結構之陰極防蝕工程設計、安裝、驗收、系統操作、與維護管理。

1.2 內容概要

本準則提供執行鋼筋混凝土結構陰極防蝕工程所需之各項要求及必要遵守規定。

解說：本章根據圖 1.1 執行一般鋼筋混凝土結構之陰極防蝕工程，主要工作項目包括環境調查評估(第二章)、陰極防蝕系統設計(第三章)、材料及裝置(第四章)、系統安裝(第五章)、運轉試車(第六章)、及系統操作與維護(第七章)等。

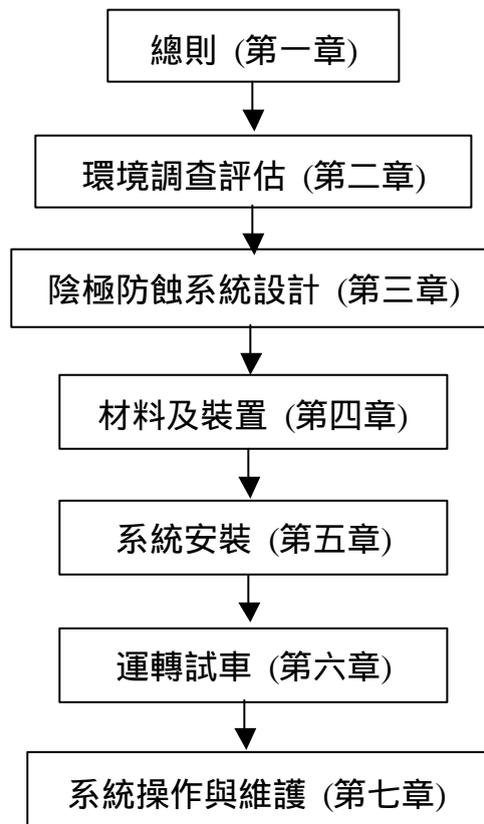


圖 1.1 鋼筋混凝土結構之陰極防蝕工程執行流程圖

1.3 參考規範

本準則所參考之相關規範及標準包括

- (1)“陰極防蝕用鎂合金犧牲陽極”，CNS-13518，H3163，1995/4，
中華民國/經濟部標準檢驗局
- (2)“陰極防蝕用鋅合金犧牲陽極”，CNS-13519，H3164，1995/4，
中華民國/經濟部標準檢驗局
- (3)“陰極防蝕用鋁合金犧牲陽極”，CNS-13520，H3165，1995/4，
中華民國/經濟部標準檢驗局
- (4)“陰極防蝕犧牲陽極性能檢驗法”，CNS-13521，H2118，
1995/4，中華民國/經濟部標準檢驗局
- (5)“海洋混凝土構造物之防蝕指針(案)”，1990/3，日本/日本混凝土
工學協會
- (6)“鋼筋混凝土建築物之耐久性調查診斷及補修指針(案)、同解
說”，1997，日本/日本建築學會
- (7)RP0290-90, “Standard Recommended Practice for Cathodic
Protection of Reinforcing Steel in Atmospherically Exposed
Concrete Structures”, 1990, National Association of Corrosion
Engineers, U.S.A.
- (8)Model Specification for the Cathodic Protection of Reinforced
Concrete, Concrete Society Technology Report No.37, The
Concrete Society, 1991, U.K.

第二章 陰極防蝕設計前之調查評估

2.1 前言

鋼筋混凝土結構物若使用陰極防蝕技術作為保固方法，應進行下列調查。

2.2 結構物背景資料收集

應收集並詳閱所有圖面、規格、和測試結果，以評估鋼筋的位置、數量、和電連通性，以及混凝土的品質、成份。現有資料的蒐集和確認應執行現地和實驗室檢測。

2.3 目視檢測

應進行目測資料收集，以確定缺陷的類型和程度，以及任何將影響陰極防蝕應用的特點。先前修補的區域亦應查明。混凝土裂縫若非鋼筋腐蝕所造成的，則應確定其發生原因。若結構損壞徵兆明顯，應進行結構安全性評估。

2.4 保護層測量

混凝土保護層和鋼筋位置應加以測定或確認，以評估厚度不同保護層內鋼筋流過電流的大小。若鋼筋外側有陰極保護系之統網狀或板狀陽極，陽極與鋼筋間可能出現的短路情形應先查明。

2.5 剝落層位置調查

需進行陰極保護的區域，應檢查混凝土保護層剝落的情況。

解說：保護層的厚度可以磁漏法探測，剝落狀況以目視或敲槌回音方式調查；若剝落層較厚，則利用超音波或溫度紀錄法定位尋找。

2.6 鋼筋電連通性測試

先檢查鋼筋配置圖，確認鋼筋間的電連通性，然後再量測構造物鋼筋間的電阻以驗證。建議每一區域應執行數次鋼筋電連通性測試，且所有必須修補的暴露鋼筋，應檢查彼此和其他測試位置間的電連通性。

解說：測試所需的次數與構造物的大小和複雜性有關，且在現場測試前很

難決定。建議每 10 m² 混凝土表面應進行一次測試，且每一結構物至少須 4 次鋼筋電連通性測試，以確認鋼筋間的電阻值低於 1 ohm

2.7 腐蝕電位量測

使用參考電極及高阻抗電位計來進行鋼筋電位量測，並將鋼筋可能腐蝕的區域紀錄於工程圖上。量測時使用的參考電極應為穩定、泛用、且方便取得之電極，而電位計應為高阻抗之儀器。電位量測時參考電極與混凝土間的接觸必須良好，任何塗膜或表面沈積物必須清除，並取適當距離量測一電位值，並利用電位資料繪出等電位圖。

解說：一般而言，鋼筋腐蝕電位量測時使用的參考電極為銀/氯化銀參考電極，而使用的電位計阻抗則須高於 100 Mega-ohm。電位量測間隔距離為 1~2 m。腐蝕電位量測時必須注意剝落層區域的量測值，因剝落層區域的鋼筋電位較負，與其它區域鋼筋的腐蝕電位有顯著差別。

2.8 混凝土電阻係數

混凝土電阻係數量測是利用 Wenner 四極法於現場量測。

解說：測量電極的間隔通常為 10~75 mm，而一般混凝土電阻係數通常介於 5,000~50,000 ohm-cm。任何修補區域的電阻係數應接近於原來混凝土的電阻係數。

2.9 報告

上述所有測試結果均應詳細記錄，並轉送工程設計師參考。

第三章 陰極防蝕系統設計需求

3.1 陰極防蝕系統選擇

系統設計時應依結構物所處環境，選擇適當之陰極防蝕系統。

解說：港灣結構物所處海洋環境極複雜，相關材料的使用會影響陰極防蝕系統功能。常使用之陰極防蝕系統如表 3.1 所示。

表 3.1 鋼筋混凝土陰極防蝕系統選擇

環境	環境分析	陰極防蝕系統選擇
大氣帶	結構物完全曝露於大氣中之各種介質，如氣體、日照 ... 等；結構物多處於較乾燥的環境中	1. 鈦網陽極-外覆混凝土 2. 鋅熔射 3. 鋅板導電凝膠
潮間帶	範圍不僅包含高、低潮位間的潮汐帶，更包括平均高潮位以上至海面大氣帶下端之飛沫帶區域；結構物受乾濕循環交替作用	1. 鈦網陽極-外覆保護夾層 2. 鋅網-外覆保護夾層方式
水下帶	混凝土結構物長期浸泡在海水中	1. 鋅、鋁塊犧牲陽極式防蝕系統 2. 鈦網陽極-外覆保護夾層 3. 鋅網-外覆保護夾層

3.2 陰極防蝕系統功能需求

陰極防蝕系統除特別要求外，應可提供鋼筋單位表面積所需的防蝕電流密度 $10\sim 20 \text{ mA/m}^2$ ，並提供足夠之電流量使被保護之結構物滿足「100 mV 電位衰減量」準則。

解說：防蝕電流密度需求視結構物之特性與腐蝕性質而定。針對埋設或水中結構物，鋼筋表面積電流密度為 5 mA/m^2 ，而針對地上結構物則為 $10\sim 20 \text{ mA/m}^2$ 。「100 mV 電位衰減量」為當陰極防蝕系統到達穩定保護電位時進行斷電，量測瞬間斷電後的電位與斷電 4~24 小時後的電位，其差值必需在 100 mV 以上(即斷電 4 至 24 小時鋼筋電

位去極化量 >100 mV)，方可確定陰極防蝕已達設計預期效果(參考 NACE Standard RP290-90)。但某些陰極防蝕系統之 100 mV 電位衰減量必須數天甚至數月始可達到，如已受防蝕保護達數月之久(或呈水飽和狀態)之結構物，電位衰減測量期間應超過 24 小時以上。

3.3 電流分佈原則

外加電流式陰極防蝕系統電流分佈，依下列準則以確保電流分佈均勻。

1. 陽極系統應區分為若干個獨立的陽極區，且每一陽極區應有個別控的變壓整流器輸出供電。每一陽極區的陽極應提供均勻的電流分佈，使此區域的鋼筋獲得適當的陰極保護。

2. 陽極應裝設如下

- (1)陽極不得與混凝土結構內或結構表面之任何金屬元件接觸(包括鋼筋和非接受陰極保護的金屬元件)，以防止系統短路。
- (2)陽極與所有金屬元件必須保持適當距離，且每一陽極區域必須相互獨立。

解說：陽極材料安裝時需與任何金屬元件保持至少 15 mm 以上的距離。而陽極區域的劃分是以混凝土面積 1000 m^2 或總供給電流量 2~5 Amp 來劃分。

3.4 陰極防蝕系統之餘裕度

1. 外加電流式陰極保護系統的整流器和線路的電流容量，應依據鋼筋面積和所需保護電流密度來決定。整流器的輸出容量應高於原設計輸出值。
2. 構造物的每區域必須有數個適當負極接點，並應平均分佈於區域內。

解說：通常整流器輸出容量應至少為原設計輸出值的 150%。負極接點數為 3 點，其中兩點作為負極排流點，一點作為電位測量點。

3.5 陰極防蝕系統監測

系統監測應使用預埋式參考電極或攜帶式參考電極進行，並記錄整流器的輸出電壓與電流值，瞭解系統運轉狀況。

第四章 材料及裝置

4.1 混凝土修補及鋪面材料

4.1.1 材料類型

材料應配合陰極防蝕需要，並驗證其適用性。修補和鋪面使用材料應使用膠結材料，但若膠結材料主要成份為樹脂，如環氧樹脂、聚酯、或亞克力樹脂等，則此膠結材料不得使用。

針對本節的用途，修補及鋪面材料可分為三類：

1. 噴塗材料
2. 現場澆注混凝土
3. 鏝抹砂漿及膠結砂漿

噴塗材料、現場澆注混凝土、及鏝抹式砂漿等均可於現場拌合。若使用具專屬權的材料系統，施工單位必須嚴格遵照合約指示使用。

4.1.2 材料性質

修補材料必須採用適當的施工方法，不得因熱效應或收縮效應而造成過度裂縫。

解說：修補材料須注意其與原混凝土間可能產生的收縮問題，若因熱或收縮效應產生過度裂縫，則過度裂縫之定義為裂縫寬度超過 0.3 mm 者。修補材料的電阻特性必須相容於原混凝土並適合陰極防蝕系統要求。

4.1.3 構成材料選用

混凝土修補及鋪面使用材料，如水泥種類、水泥替代物、骨材、填隙料、摻料、水灰比，與混凝土中的氯離子含量、鹼性離子含量及硫含量等的檢測，均應符合中華民國國家標準；若無國家標準規定，則參考 ASTM, NACE Standard, British Standard 之規範。

4.1.4 測試

修補或鋪面材料應滿足前節所述之多項要求，並提出測試報告。

解說：修補或鋪面材料的抗壓強度於 28 日後應為 40 N/mm^2 左右。修補或鋪

面材料與原混凝土間的結合強度將會影響陰極防蝕效果，故建議使用適當試驗方法(如拉拔試驗等)，進行新舊混凝土間結合強度評估。

4.2 陽極材料

陽極材料種類甚多，不論是外加電流式或犧牲陽極式的陰極保護系統，均有不同陽極材料可以選用。陽極材料的選擇應考慮結構物的特性、環境的適用性、與所需使用壽命等因素，以期達到預期保護之功能。

解說：

1. 鈦網陽極

鈦陽極基材為 Titanium, Grade 1 per ASTM B265，外覆貴重金屬或其他金屬氧化物(Mixed Metal Oxide, MMO)，物理性質具延展性。其製成形狀有管狀、網狀、或條狀，對鋼筋混凝土而言，使用之陽極為網狀(鈦網)或條狀(鈦條)。鈦網網目在 30 x 70 mm 至 100 x 200 mm 之間，且根據實驗室的加速試驗，鈦網表面電流密度為 200 mA/m² 時，鈦網陽極壽命約為 10-50 年，壽命的長短由金屬氧化物被覆層之厚度與消耗率而定。換句話說，陽極系統實際的壽命，取決於陽極與混凝土界面間的劣化程度，而此劣化現象的產生，是因陽極過度放電時產生的酸性產物與混凝土反應，促使混凝土劣化。因此，美國聯邦高速公路局(FHWA)及英國 Concrete Society 建議，陽極的最大電流密度應在 110 mA/m² 以下。再者，鈦網的型式與尺寸會影響鈦網陽極提供電流密度的大小，其值約在 10-50 mA/m² 之間。鈦陽極的安裝是以塑膠釘固定陽極於混凝土表面，且為了防止電流供應不均，鈦陽極上方需噴塗 10-15 mm 以上的保護層(混凝土)。

2. 鋅網

使用鋅網材料成份為 ASTM B6/B69。

3. 鋅熔射

鋅熔射所使用的陽極材料為純鋅，依 ASTM B8331 或 ANSI/AWS 5.33 之規定，鋅成分最少為 99.5%。噴塗厚度依照 FDOT 建議為 0.38~0.5 mm，英國 Concrete Society 建議為 0.2 mm。

4. 其他陽極材料系統

使用他種類陽極材料或新開發之陽極材料前，材料供應商應提供實驗室和現場試驗數據予工程師參考，業主並可針對新型陽極的使用，考量現場小型結構物試驗。

4.3 交流電源

採用外加電流式陰極保護系統時，現場若有 AC 供電電源，則應提供單相 110/220 volt 或三相 220/480 volt 的電壓，且交流頻率為 60 Hz。交流電源線路應符合配電規則。

解說：有關電源供應的責任範圍與線路配置，應符合國內電力相關法規規定。交流電源之相位和電壓等條件，應視電源取得之方便性、安全性、與可靠性而定。

4.4 整流器

4.4.1 概要

整流器的總輸出電流值和電壓量應滿足陰極防蝕系統所需的電流量；且整流器運轉時，必須可在最大輸出的情況下持續操作。

解說：電流容量為所需的電流量加上 20%~50%的餘裕度；而電壓量則由傳導導線尺寸大小與陽極類型而定，一般為 5~48 Volts。

4.4.2 電氣箱

整流器應裝設在可耐天候的電氣箱內，以防止灰塵、水分、及鹽分入侵。電氣箱應設於安全地方，並配置輕便鎖。所有整流器電氣箱可共用一鑰匙開啟。

4.4.3 控制和連接

每一台整流器的輸出應包括下列元件：

- 1.輸出控制分設 AC 側開關及 DC 側開關，且設置 AC 電源供應“on”指示燈、DC 電力輸出“on”指示燈。
- 2.主電源應配置適當的漏電斷路器，以提供短路和過熱保護。
- 3.每一輸入和輸出單應元配置電流表和電壓表，並裝設熔絲斷路器保護。各熔絲應標明電路名稱與額定容量，並貼上標籤。

解說：有鑑於陰極防蝕系統接線錯誤將會造成鋼筋的嚴重腐蝕，因此，整流器正負端應指定並採用不同尺寸的接線端子，以防止接線錯誤。端子應清晰標示“+ 陽極”和“- 鋼筋”。

4.4.4 電子元件

所有電子元件均應鍍錫或在試車後以防水矽膠包覆。整流器在滿載情況下須可連續操作。整流器之 AC 側須加裝避雷保護裝置，而 DC 側則須加裝漣波濾波器。

4.4.5 整流器檢測

整流器的各項要求於出廠前必須依照合約規定，在滿載狀況下進行測試，並於現場裝設後檢測其漣波率，以驗證整流器功能符合要求。

4.5 導線

4.5.1 概要

所有導線應為銅導體，蕊線以絕緣包覆，並以顏色和編號區別。

4.5.2 DC 導線

DC 導線為整流器正端至陽極與整流器負端至鋼筋間的導線。視通過電流大小，選用適當截面積的銅導線；不論導線為單蕊或多蕊，均須絕緣，並以顏色區分正電導線和負電導線。

解說：導線尺寸通常介於 2.5~16 mm²，其絕緣包覆為 PVC、HDPE、XLPE 或其他材質。

4.5.3 參考電極導線

連接至參考電極的導線應符合第 4.5.1 節和第 4.5.2 節的規定，且導線顏色應與正負導線顏色不同。

解說：參考電極用的銅導線通常為 2.5 mm²，在某些情況則可使用較粗的導線。若有受電磁干擾的可能，如高電壓 AC 電纜，則應使用隔離線路。

4.5.4 導線保護

非埋設的導線應裝設於導管內，或採取其他適當的保護措施。導管採用 PVC 管或金屬管。進出導管的線路最終需由接線箱連接。

4.6 數位伏特計

陰極保護系統之防蝕效果需使用數位伏特計與參考電極來量測鋼筋電位。

解說：使用的數位伏特計(DVM)，輸入阻抗值至少為 100 Mega-ohm，解析度至少為 1 mV。

4.7 參考電極

4.7.1 概要

參考電極應具有出廠證明，詳列參考電極類型、理論電位、和相對於其它標準電極之測試電位。

4.7.2 預埋式參考電極

預埋式參考電極的數量和位置必須考慮測試環境的代表性，並採特別設計，使其適於長期埋設在混凝土中。埋設參考電極之導線應依照第 4.5.3 節的規定，並具足夠長度以延伸至接線箱，接線箱外不得有導線續接的情況。

解說：預埋式參考電極常採用銀/氯化銀參考電極。埋設位置距離混凝土修補區域大約 0.5~1.0 m。

4.7.3 攜帶式參考電極

攜帶式參考電極用於混凝土表面鋼筋電位量測。量測時使用潮濕海棉置於混凝土上，再將參考電極置於海棉上，以量測鋼筋電位。

解說：攜帶式參考電極通常採用銀/氯化銀參考電極，但其他類型之參考電極如銅/硫酸銅參考電極亦可使用。

第五章 系統安裝

5.1 系統安裝總則

陰極防蝕系統的施工根據結構物特性區分為既有結構物與新建結構物二種工作流程。

解說：既有結構物陰極防蝕系統安裝工作流程如圖 5.1 所示，包括：既有結構物劣化調查(第 5.2 節)、鋼筋導電性測試(第 5.3 節)、既有結構物混凝土表面準備(第 5.4 節)、負極接點與參考電極安裝(第 5.5 節)、混凝土修補(第 5.6 節)、陽極安裝(第 5.7 節)、及配電安裝(第 5.8 節)等。新建結構物陰極防蝕系統之安裝工作流程如圖 5.2 所示，包括：鋼筋導電性測試(第 5.3 節)、負極接點與參考電極安裝(第 5.5 節)、陽極安裝(第 5.7 節)、及配電安裝(第 5.8 節)等。

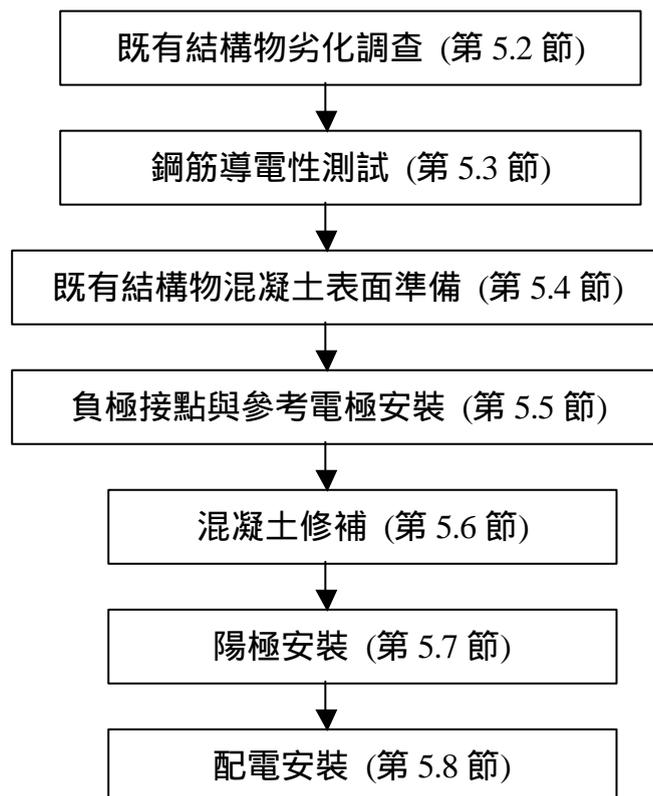


圖 5.1 既有結構物之系統安裝工作流程

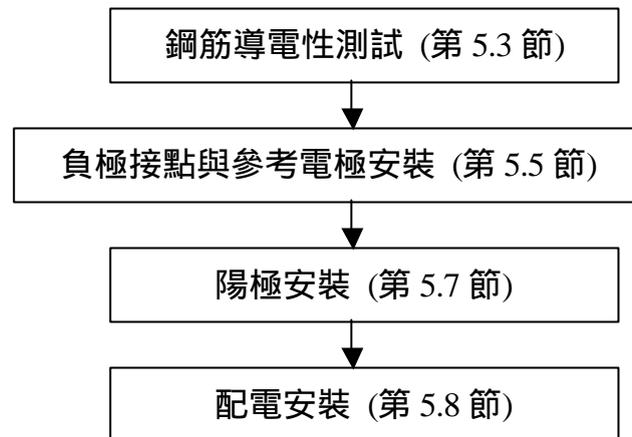


圖 5.2 新建結構物之系統安裝工作流程

5.2 既有結構物劣化調查

結構物的表面應進行目測或回音等適當的測試方法調查，以確定剝落層、蜂巢腐蝕位置、與先前修補的區域。混凝土剝落層區域應予敲開鑿除，以評估鋼筋斷面損失量及剝落層的厚度；此外，先前修補區域和此區域內的鋼筋斷面損失，亦應詳細記錄。

5.3 鋼筋電連通性測試

陰極防蝕施工前需先確認結構物鋼筋的電連通性。檢測鋼筋電連通性不良的區域，並進行鋼筋間電阻量測，以確保鋼筋之電連通性。若發現電連通性不良的地方，應予改善。

解說：鋼筋間電連通性的確認為量測鋼筋間的電阻，且電阻值不得超過 1 ohm。

5.4 既有結構物混凝土表面準備

剝落層或蜂巢狀混凝土，以及電阻係數過高的修補材料應予敲開、清除。若蜂巢狀混凝土深入範圍超越主鋼筋，則鑿除深度應至主鋼筋後之適當距離。此外，應以敲錘回音測試法或其他方法來確保所有剝落層均已清除。若修補至結構物底層，或修補區域過大，則必須檢測新舊混凝土間的接合性。混凝土表面若有與鋼筋接觸的任何繫網、釘子或其他鐵製元件，應予切開，並與鋼筋保持一定距離。

解說：鑿除深度不應超過主鋼筋後 30 mm。若需修補至結構件底層，修補區域約 10%的面積應切開，並鑿至鋼筋後 15 mm 深度。若混凝土表面出現可能與鋼筋接觸的繫網、釘子或其他鐵製元件，應予切開，並與鋼筋保持至少 10 mm 的距離。

5.5 負極接點與參考電極的安裝

5.5.1 負極接點的安裝

鋼筋接點安裝前，應先將接點處之鋼筋完全除銹；安裝後，接點處與其附近的鋼筋應以非導電性環氧樹脂塗敷，待環氧樹脂硬化後，方可進行後續工作。每一陽極區，鋼筋的負極排流點不得少於兩個。負極(鋼筋)接點的安裝可採用下列其中一種方法：

1. 鑽攻(drilling and tapping)
2. 壓接(clamping)
3. 熱劑銲(thermit welding)
4. 銷硬銲(pin brazing)(亦即拉弧硬銲 drawn arc brazing)
5. 銲接(welding)
6. 硬銲(brazing)

5.5.2 金屬固定件

混凝土內的任何金屬固定件應與鋼筋電連通。若使用導線(cables)提供電連通，應符合第 4.5.2 節之要求，並採黑色包覆。

5.5.3 參考電極安裝

參考電極應按圖示位置安裝。若參考電極設置區域需作混凝土修補，參考電極可在修補前安裝，此時參考電極應使用適當的塑膠夾具固定並與鋼筋平行，但不相接觸。參考電極位置距鋼筋應不超過某一特定距離。

若參考電極所在位置不需任何修補，參考電極的裝設應開挖一孔洞，然後將參考電極置於孔洞內，與鋼筋相距適當距離；完成後該孔洞應利用水泥拌漿填補。若安裝供性能評估和驗收試驗的參考電極，其距修補區域通常不低於某一距離。

解說：混凝土修補區域參考電極的安裝，參考電極與鋼筋間的距離應小於 40 mm。若參考電極所處位置不需任何修補，參考電極與鋼筋間的距離通常為 5~40 mm。此外，為提供性能評估與驗收試驗，則參考電極的安裝應距修補區域 500~1000 mm。

參考電極安裝時應注意防止電極周圍形成氣袋，且參考電極應儘量靠近混凝土內的鋼筋。

5.6 混凝土修補

原修補區域的混凝土電阻係數應先利用 Wenner 四極法或類似裝置於現場量測。欲修補的混凝土表面，則使用壓縮空氣或其他適當方法(如噴砂方式)清除灰塵及附著於混凝土表面之碎物和污染物質(如油污、髒物)。壓縮空氣不得含有油污、可溶性鹽份或其他有害物質。鬆落骨材亦應清除，清除後混凝土表面以水清洗，乾燥後方可進行修補作業。混凝土修補後需要足夠的保護層厚度以防止陽極安裝時與鋼筋接觸，造成短路。

解說：修補材料的電阻係數應低於 20,000 ohm，或與現有混凝土的電阻係數相當。

5.7 陽極安裝

所有陽極系統的安裝工作必須符合各陽極系統之特定規格要求。

解說：陽極系統安裝時，導電性塗料或被覆(overlay)必須無污染與雜質。若使用導電性塗料，陽極及混凝土表面須要乾燥；若使用被覆水泥，混凝土表面的粗糙度和潮溼程度，將視使用的被覆材料而定。

1. 導電性塗料

結構物表面應以噴砂或其它適當方法處理，除去油污、油脂、污物、水氣、和粗糙的聚集物；噴砂後混凝土表面應保持乾燥，避免後續污染。鋼筋與導電性塗料間的接觸，將會導致系統短路、失效，或造成混凝土內其他部位鋼筋的局部腐蝕。

2. 常溫電弧鋅熔射

常溫電弧鋅熔射必須以適當的工法施工，平均膜厚需達適當要求，並應採用核准程序量測。熔射層厚度量測可依 ASTM E367 以磁性測定法測量。檢測時應 50 平方公尺取 25 點作厚度量測，每點量測 5 次，取其平均值判定是否合乎標準。

3. 鈦網陽極

鈦網陽極安裝時必須清除混凝土表面殘餘汗漬或雜物，且鈦網必須完全平貼固定於乾淨混凝土表面。鈦網安裝之方法為混凝土鑽孔後，以適當的塑膠釘固定之。塑膠釘間距約為 30 cm，以鈦網完全平貼於混凝土表面為原則。鈦網搭接方式為以長 10 cm 之鈦條，於鈦網上每隔 30 cm 位置，點焊搭接，每股鈦網至少需點焊三點。鈦條基本陽極需直接接至整流器正極接出位置，不可中途續接。

5.8 配電安裝

5.8.1 導線安裝

所有導線包括 AC 電源線、DC 電源線、參考電極導線等，應置於導管內，且導線接續僅限於接線箱內接續，線路長度須適當配置。若發現導線絕緣損壞或線路打結，應立即更換。陰極防蝕系統測試前，所有 DC 線路和儀錶線路應進行電連通和極性(polarity)測試，避免線路接錯或短路。配線施工應依照國內電工法規規定和標準裝設。

5.8.2 整流器安裝

整流器應裝設於圖示位置的電氣箱內。整流器的所有金屬零件，應使用連接器(connector)與現有接地系統相連接，或依照國內電工法規規定和標準，設計獨立的接地系統。

第六章 試車運轉及驗收

6.1 運轉前系統確認與測試

系統運轉前應先進行測試，以確保所有構件安裝、連結迴路均已正確的配線、連接、和標示；並檢測各迴路之電流通性。在外加電流式陰極防蝕系統中，設定整流器輸出值為設計保護電流量之 20%，使用適當的伏特計和參考電極，量測鋼筋電位變化方向，以確定 DC 輸出的正確極性。

6.2 系統試運轉

完成第 6.1 節程序，並且陽極系統滿足最低養護期後，陰極防蝕系統方可通電。即犧牲陽極系統進行正、負極導線連接，而外加電流系統則進行整流器輸出調整。其通電程序應針對各陽極區域分別執行，使用每一陽極區域中預埋的參考電極或攜帶式的參考電極，量測鋼筋保護電位。外加電流系統採電流逐漸增加方式，使鋼筋保護電位達 -750 mV (相對於銀/氯化銀參考電極)，或電位變化量達 300 mV 以上。到達保護標準後，系統應按此輸出維持運轉一段時間；若無法維持此防蝕電位，則須再調整整流器輸出，以達保護電位標準。值得注意的，於電位量測前 24 小時內，不得進行整流器輸出調整。

解說：鋼筋電位到達保護標準後，系統應按此水準維持運轉至少 7 日以上，一般為 14~28 天。若進行系統性能測試如「100 mV 電位衰減量」，則在前次電流調整後 7 天進行。

6.3 性能驗收

陰極防蝕系統完成第 6.2 節之試運轉要求，並達到第 3.2 節所述之系統功能後，於一定時間內必須進行性能驗收。驗收時必須使用核准且經校正過的儀器，量測記錄整流器的輸出電流、輸出電壓，鋼筋的保護電位等。

解說：外加電流式陰極防蝕系統之性能驗收通常為系統完成試運轉後 7~10 天期間進行，而犧牲陽極式陰極防蝕系統的性能驗收時間，則可能在系統完成試運轉數個月之後。

6.4 書面資料

陰極防蝕系統驗收完成之後，必須保存設計、安裝、試運轉、操作、和維護手冊資料等相關紀錄和文件。

解說：本準則建議系統設計、安裝、試運轉、操作、和維護手冊需包含以下資料。

1.設計和安裝

- 參考電極的位置、方位與可能偵測深度
- 監測設備
- 陽極材料和被覆種類
- 陽極區域/陽極安裝
- 陽極和負極連接系統
- 導線、導管與接線箱
- 鋼筋的電連通性測試
- 鋼筋電通性與連接方法
- 陽極安裝前混凝土的表面準備，包括殘留金屬或外露金屬的處理
- 電源、接地、與固定方式
- 陽極系統、被覆厚度、電阻、強度、黏性試驗結果
- 施工日期和時間(說明安裝問題和解決方法)
- 整流器之電壓與電流的最大容許值

2.系統試運轉

- 程序說明
- 校正、驗證試驗的程序和結果
- 極化前狀況
- 電位量測結果，含讀取時間和天候條件，包括：
 - 極化前狀況
 - 「通電」電位
 - 瞬間「斷電」電位
 - 4 小時極化衰減量
 - 24 小時極化衰減量
- 結果分析、操作功能調整(即電力輸出與保護電位達成)

3.操作和維護手冊

手冊應包含系統操作所需的資料。包括：詳細圖說、電路圖、使用材料性能資料、試驗結果數據、與操作程序等：

A 節 - 操作系統說明、裝設時間、作用原理

- 電源系統之詳細資料、額定值、固定構件、保護系統、接地、控制等
- 系統操作方法、調整時機、控制功能、操作限度、關閉和重新通電程序
- 監控 - 執行量測的步驟、位置、接點、監測結果之判斷依樣
- 系統監控 - 建議試驗方案、完成標準試驗之步驟檢查表、需保存之記錄清單

B 節 - 維護

- 所有設備安裝的技術資料
- 日常維護和操作的指引，包括故障檢查步驟、診斷、整流指引和接線圖
- 製造商詳細資料和備用品清單
- 陽極維護和局部修補指引
- 陽極更新程序，包括使用材料與工具資料

第七章 系統操作與維護

7.1 檢測項目

系統應進行的項檢測工作包括：運轉中檢查、性能檢測、及系統再確認。在系統供電運轉時，至少每月進行一次檢查。而性能檢測之頻率則為前兩年每季一次，之後，每半年進行一次檢查；檢測範圍包括所有陰極保護設備與紀錄量測結果。系統再確認之執行頻率為每年至少一次，確認項目包括系統設備的再校準，資料的再確認，以及系統未來運轉建議。

7.2 系統運轉中檢查

運轉中之檢查為電源於「開啟」的狀態下，紀錄量測每一陽極區域的 DC 供電電流和鋼筋的保護電壓。若系統運轉出現問題，如供電不良等，則須立即改善修護。

7.3 性能檢測

性能檢測項目包括：防蝕構件的目視檢查、陽極系統檢查、裝設線路、電源、性能量測等。

7.3.1 防蝕構件的目視檢查

利用近距離目視檢查，注意結構物是否有任何損壞、腐蝕或變化的位置及其程度。

7.3.2 陽極系統檢查

所有陽極區域均須進行全面目視檢查，且根據不同陽極系統的特性，選用適當的方法進行檢查。

7.3.3 裝設線路

目視檢查所有外露線路(即陽極供電、鋼筋接線和監測設備)的固定與絕緣狀況。

7.3.4 電源

進行電源供電情況檢查，注意所有輸入和輸出電線的完整性，以及所有控制系統的設定和運作。

7.3.5 性能量測

應量測記錄下列性能數據：每一陽極區域的整流器 DC 輸出電壓值、輸出電流值、及鋼筋保護電位值。

量測鋼筋保護電位時，應使用第 4.7 節指定之預埋式參考電極或攜帶式參考電極，在下列條件下進行：

- (1)陰極防蝕電流在通電狀況；
- (2)陰極防蝕電流在瞬間斷電狀況；
- (3)切斷陰極防蝕電流，量測去極化 4 至 24 小時後之電位。

解說：量測瞬間斷電電位和去極化電位時，必須中斷整流器之 DC 輸出迴路。即當陰極防蝕系統到達穩定保護電位時進行斷電，量測鋼筋瞬間斷電後的電位與斷電 4~24 小時後的電位，其差值必需在 100 mV 以上(即斷電 4 至 24 小時鋼筋電位去極化量 >100 mV)，方可確定陰極防蝕已達設計預期效果。

7.4 系統再確認

系統再確認項目應包括：第 7.3 節所述性能監測之全部項目、預埋式參考電極功能試驗、操作資料/建議確認等。

7.4.1 再確認第 7.3 節所述之性能監測所有項目。

7.4.2 預埋式參考電極功能試驗

於陰極防蝕系統為關閉狀態下，進行所有預埋式參考電極應與外接標準參考電極之比較，量測並記錄電位，以確認所有預埋式參考電極的準確性。

7.4.3 操作資料之建議與確認

檢查操作資料，確認系統性能評估、防蝕可能效益、與系統未來運轉的建議。

建議事項包括下列：系統維護或改良的要求，系統操作和監測準則，監測的頻率與範圍。

7.5 書面資料

運轉檢查、性能監測和系統確認等應建立書面資料，並作為更新操作和維護手冊(第 6.4 節)的一部份。

鋼筋混凝土陰極防蝕設計基礎概念介紹

林葆喜¹

摘要

為確保混凝土結構物長期有效達到陰極防蝕效果，混凝土結構陰極防蝕系統之安裝首先必須了解混凝土結構各部位需求，然後針對設計使用適當的供電和偵測設施，以及規劃配電分佈。鋼筋混凝土陰極防蝕設計工作內容主要包括：保護電流需求及分佈估計、系統構件規格選擇及系統構件設置規劃，以達到陽極分佈、偵測位置、系統線路及監偵測系統之設計。

Design Considerations for Cathodic Protection System of Reinforced Concrete Structure

P. Y. Lim¹

ABSTRACT

The performance of a cathodic protection system relies on a proper system layout design based on the condition at the various parts of the reinforced concrete structure. Suitable anode materials and power supply should be selected to provide sufficient protection current to the reinforcement. Test equipment and electrodes embedded sites to enable regular operation checks and maintenance of the system should also be considered in the system design.

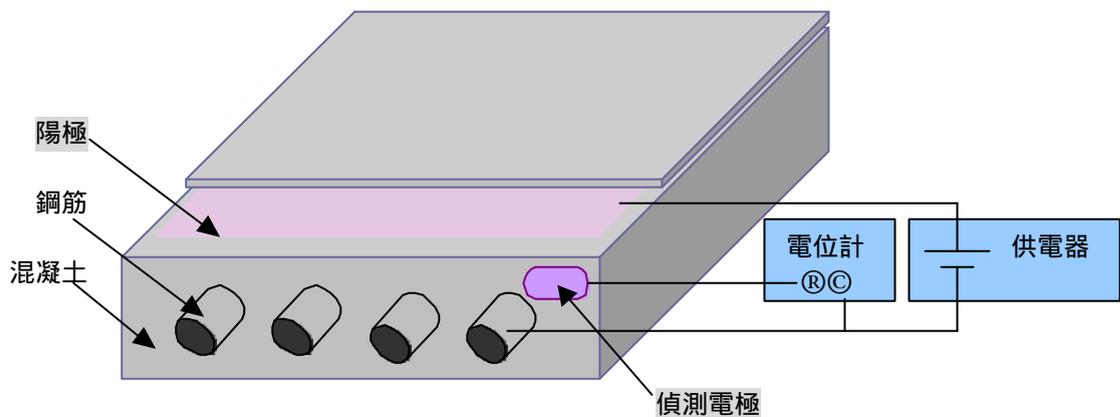
一、前言

混凝土結構陰極防蝕技術功能為阻止鹽害腐蝕侵害混凝土中鋼筋或預力結構，避免結構強度持續受損而危害安全或造成社會資源嚴重損失。在台灣地區，該技術之需求領域就在我們的生活環境當中，舉例如：濱海混凝土結構物，包括重要公共建設例如道路橋樑、港灣碼頭；民間建築物，尤其

¹工業技術研究院工業材料研究所 研究員

因地區河川砂石短缺，加上工程尖峰期供不應求，民宅及建築發生以海砂取代，引發鹽害腐蝕問題之海砂屋；工業建築物，例如食鹽製造廠房、電鍍酸洗廠房等，製程產生的腐蝕環境使建築物長期遭受腐蝕侵害，廠房使用壽命大大減少。混凝土結構陰極防蝕技術之原理機制為利用腐蝕為電離子交換電化學反應原理，提供混凝土中鋼筋一個微量的反方向保護電流，阻礙鋼筋表面之腐蝕反應。為達到有效的防蝕效果，保護電流的供應必須洽好。太低的保護電流使鋼筋保護不足而仍然持續腐蝕，然而過高的電流則不但造成不必要的能源浪費，甚至使鋼筋表面達到氫氣產生陰極電位而遭受氫脆威脅。由於各別混凝土結構物之腐蝕程度及分佈都不同，加上混凝土為低導電材質，又在乾濕區域有極大的導電性差異，而且鋼筋密度及保護層厚度在各結構部位如樑、柱、板都各有不同，使結構物陰極防蝕保護電流的供應分佈及監測極為重要。為確保長期有效達到防蝕效果，混凝土結構陰極防蝕系統之安裝首先必須了解混凝土結構各部位需求，然後針對設計使用適當的供電以及偵測設備，以及規劃配電分佈，成為必要之工作。

二、陰極防蝕系統設計工作項目



一個最簡單的系統如上圖所示，除了鋼筋和混凝土，其中的主要組成包括：

1. 陽極
2. 偵測電極
3. 電位計
4. 供電器

然而，在一個實際鋼筋混凝土結構物中，各區域腐蝕程度也許不同，在

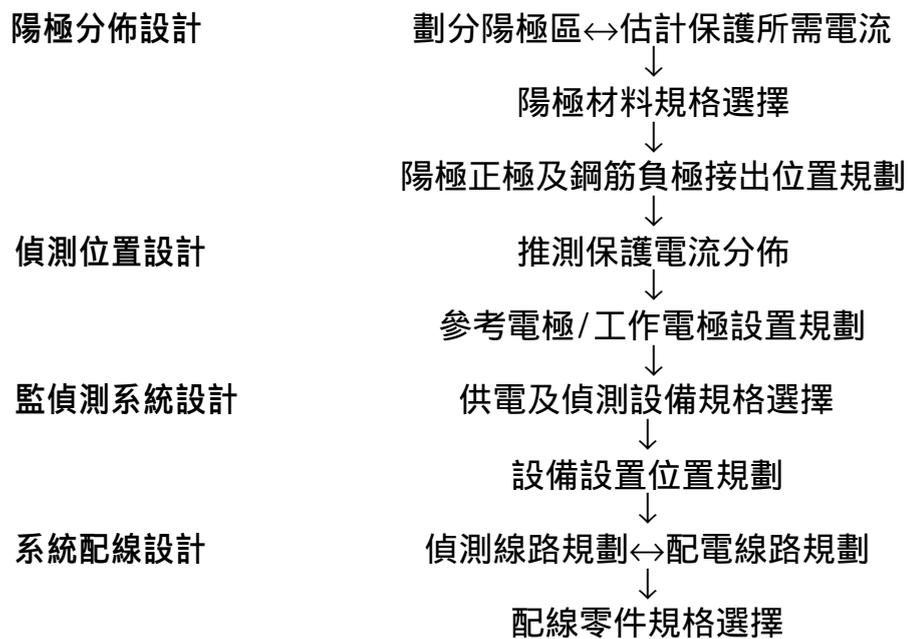
乾濕區域有極大的導電性差異，而且鋼筋密度及保護層厚度在各結構部位如樑、柱、板都有所差異。因此，必須依各部位條件劃分成數個基本系統，分別提供陰極防蝕保護。陰極防蝕系統設計即為多個基本系統的組合和整合，必須進行的工作內容主要包括：

1. 保護電流需求及分佈估計
2. 系統構件規格選擇
3. 系統構件設置規劃

經過以上進行的工作，陰極防蝕系統設計項目包括：

4. 陽極分佈
5. 偵測位置
6. 線路系統
7. 監偵測系統

設計工作的執行流程概述如下：



三、陽極分佈設計

3.1 陽極區設定

在各個結構物陰極防蝕範圍內，陰極防蝕系統可透過單一陽極區進行保護或以數個陽極區以分區方式進行保護。

由於供電器輸出規格之限制，各個陽極區有可能再進一步切割，分別供應保護電流。或者，在供電器輸出規格之範圍內，亦可能以共同供電器供應保護電流給條件和需求一致的不同陽極區。

各陽極區範圍內，所需保護電流密度必須一致，以達到均勻保護之效果。而各區域所需保護電流密度主要受到該區域混凝土中鋼筋表面積及鋼筋腐蝕程度兩大因素之影響。目前技術，有電化學技術可偵測得混凝土中鋼筋腐蝕速率¹，因此結構物腐蝕程度可依據鋼筋混凝土腐蝕速率偵測結果獲得判斷。結構物腐蝕程度可分成 4 個等級如下：

<u>腐蝕電流密度</u> ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	<u>腐蝕程度</u>
< 0.1	無腐蝕
0.1~0.5	輕微腐蝕
0.5~5.0	中度腐蝕
> 5.0	嚴重腐蝕

依據經驗，腐蝕程度呈中度腐蝕或中度腐蝕以下之區域通常歸納為同一陽極區；而嚴重腐蝕之區域通常各別劃分成獨立之陽極區，以便予於加強保護。

各區域所需保護電流密度同時又受到該區域混凝土中鋼筋表面積密度之影響。鋼筋表面積密度愈大，所需保護電流密度則愈大。因此，陽極區又以鋼筋層數、鋼筋直徑及鋼筋間距一致之區域為劃分。

為使保護電流均勻分佈，混凝土中鋼筋獲得均勻保護，較小之陽極區範圍比較容易達到控制效果。根據陰極防蝕系統相關之標準應用規範及技術報告(參考文獻(2~3))建議，一般陽極區以範圍在 200m^2 - 500m^2 混凝土表面積之間為限，或以各陽極區以保護電流在 2-5 A 之間為限。各陽極區保護電流需求量之計算將於下一節中說明。

3.2 估計保護所需電流

各陽極區每混凝土表面積單位，保護電流需求量依該區混凝土表面積及保護電流密度計算，如下：

$$I_{cp} = i_c \times A_c$$

I_{cp} : 保護所需電流 (A)
 A_c : 混凝土表面積 (m^2)
 i_c : 保護電流密度 (A/m^2 混凝土表面積)

上節中說到保護所需電流密度主要受到該區域混凝土中鋼筋表面積密度 \tilde{A}_R (m_2 鋼筋表面積密度/ m^2 混凝土表面積)及鋼筋腐蝕程度兩大因素之影響。根據陰極防蝕系統相關之標準應用規範及技術報告(參考文獻(2~3))建議,混凝土中鋼筋一般所需保護電流密度 i_c 約為 $10\sim 20 \text{ mA/m}^2$ 鋼筋表面積。因此,各區域混凝土表面積單位保護所需電流計算式亦等於:

$$\begin{aligned} I_{cp} &= i_c \times A_C \\ &= (i_R \times \tilde{A}_R) \times A_C \end{aligned}$$

3.3 陽極材料種類選擇

市面上陸續推出不同種類之鋼筋混凝土陰極防蝕陽極系統材料。各種陽極材料分別有其特質,適合不同條件上之需求。但一般而言,選擇陽極系統之最基本考量因素有:供電極限、耐曝露環境、施工便利、經濟效益等。於陽極系統設計時,陽極材料選擇必須優先考量其陽極電流密度極限,以確認可達到陽極區保護需求電流密度。舉例說明,目前較普遍採用之陽極材料有鈦網陽極及導電性塗料陽極⁴。鈦網陽極電流密度極限為 $15\sim 35 \text{ mA/m}^2$ 混凝土表面積 之間。導電性塗料陽極電流密度極限為 $10\sim 20 \text{ mA/m}^2$ 混凝土表面積 之間。嚴重腐蝕之區域通常選擇採用電流密度極限較大之鈦網陽極予於加強保護。對於腐蝕程度呈中度腐蝕或中度腐蝕以下之鋼筋混凝土結構,視陽極系統施工及維護上之便利以及經濟上之考量,可選擇採用導電性塗料陽極。然而導電性塗料陽極壽命較容易受到曝露環境之影響,採用前尤其務必先了解使用環境是否有潮濕、風化、磨耗等因素之影響。

3.4 選擇陽極正極及鋼筋負極接出位置

一般而言,電流由供電器輸出至陽極區上基本陽極(primary anode),再分佈至二次陽極(secondary anode)。鈦網陽極系統一般採用鈦條基本陽極,導電性塗料陽極系統則可採用鍍 NiNb 銅線、Pt 線鈍態金屬或導電碳纖維帶等基本陽極。由二次陽極輸出至鋼筋之保護電流分佈,可因距離供電輸入端產生的壓降而造成梯度。為加強保護電流均勻分佈,建議基本陽極間距必須在 3m 左右採並聯通電。

各陽極區範圍內,必須設計由鋼筋接出負極 2 處以上。負極接出位置距離正極接出位置 $>30\text{cm}$ 。

四、偵測位置設計

陰極防蝕系統中必須具備偵測系統，以供系統正確安裝檢查、保護電流調整以及定期追蹤系統運轉狀況。為陰極防蝕系統之偵測，一般採用以參考電極測量之電位偵測法。電位偵測之方法分別有以參考電極由混凝土表面測量、以預埋混凝土中之參考電極測量及以上兩種方法混合使用。

4.1 電極設置規劃

陰極防蝕系統運轉狀況電位偵測，建議每 250m² 範圍內必須執行至少有一個點位置之偵測。

由混凝土表面執行電位測量時，為避免陽極電場干擾測量電位值，電位檢測必須於預埋於混凝土中之 potential well 上執行。若採用預埋混凝土中之參考電極執行電位測量，參考電極則預先直接設置於混凝土中鋼筋旁側。採用任何一種方法進行電位測量，均需要由該區域之鋼筋接出工作電極。偵測位置參考電極與工作電極之間距離，建議保持 < 300 mm。因此，工作電極接出之位置通常依參考電極或 potential well 位置埋置。所以各個偵測部位必須由參考電極及或 potential well 以及工作電極所組成。

Potential well 或參考電極預埋於混凝土中之位置必須能具有系統運轉監偵測之代表性，俾達成系統正確安裝檢查、保護電流調整以及系統運轉狀況追蹤。依據經驗，在同一陽極區範圍內，以相等之保護電流，可能產生保護效果分佈上的差異。其主要之可能原因包括電流分佈因距離供電輸入端而產生梯度、混凝土導電效果較佳之區域(比如混凝土潮濕、保護層較薄等)有較高之電流分佈、腐蝕電流密度較高之區域電位極化量較低等。陰極防蝕保護應避免過度保護或保護不足之情形，因此建議電位偵測位置設定時優先考量以上情形可能產生之位置。

4.2 參考電極之選擇

若採用預埋混凝土中之參考電極執行電位測量，由於參考電極有長期埋置於混凝土中之必要，選用之參考電極則必須符合高鹼性、乾燥環境使用及長期性穩定等之基本規格。埋置於混凝土環境使用之參考電極一般選用凝膠態電解質參考電極。凝膠態電解質參考電極有其預定之壽命年限，於系統設計時依材料供應聲明之使用壽命建議參考電極更新期限。

由混凝土表面執行電位測量時，參考電極感應端必須垂直緊貼混凝土表面。參考電極可能有傾斜於各種角度測量之必要，因此選用之參考電極務必

適合偵測執行角度使用。液態電解質參考電極除朝下直立方向之測量，其他角度因電解液水平線之影響通常容易產生測量誤差。凝膠態電解質稠度較高容易充滿參考電極，因此較適合各種角度傾斜測量使用。

常於鹼性混凝土環境使用的參考電極種類為 $Ag/AgCl$ 。選用任何種參考電極，在執行電位偵測時務必記錄實際使用之種類。

五、系統配線設計

對各個陽極區進行電流供應調整及保護效果偵測作業，陰極防蝕系統之主要線路有保護電流供電線路及偵測訊號線路。線路集中接到監偵測系統之供電器及電位計，由該監偵測系統執行電流輸出量控制、系統運轉檢查等必要之監偵測作業。

5.1 線路設計

各陽極區保護電流供電線路包括：

- 供電器正極連接陽極區各基本陽極
- 供電器負極連接陽極區各分佈位置之鋼筋

偵測訊號線路包括：

- 電位計端子連接陽極區參考電極
- 電位計端子連接陽極區鋼筋工作電極

為加強保護電流均勻分佈，保護電流供電線路可設計採陽極區各基本陽極以並聯方式連接，然後再接上監偵測系統之供電器正極，陽極區各分佈位置之鋼筋以並聯方式連接然後再接上監偵測系統之供電器負極。為降低偵測訊號受干擾，偵測訊號線路每對由各對由偵測位置接出之參考電極及工作電極訊號引線，可設計採專線式直接連接監偵測系統之電位計。線路設計上必須依現場格局設計線路走向，以及註明穿線槽和接線盒設置位置。

5.2 配線材料選擇

系統配線採用元件都必須符合國家電氣安全規範。埋置於混凝土之線路引線(保護電流供電及偵測訊號線路)建議採用 XLPE 材質 覆電纜，並以不同顏色 PCV 外覆區分。一般採用之顏色區分為：

- 正極引線：紅色
- 負極引線：黑色

參考電極引線：黃色

工作電極引線：藍色

電纜尺寸規格必須達到線路負載需求並符合安全規範。為線路系統耐久使用，露出混凝土之線路可設計採穿線槽及接線盒保護。

六、監偵測系統設計

陰極防蝕監偵測系統可分為現場監偵測型及遠端遙控監偵測型。陽極區數少(如 1 或 2 個陽極區)之陰極防蝕系統，一般在考量經濟實惠性下，會選擇現場監偵測系統。遠端遙控監偵測型系統一般針對簡化線路以及提高監偵測效率設計，較適合陽極區數量多或陽極分佈疏散之陰極防蝕系統。兩種系統的設計內容及線路分述如下：

6.1 現場監偵測型系統

現場監偵測型系統裝備包含符合國家電氣安全規範之 AC 電源、DC 供電器及電位計，集中置於一監偵測控制站執行保護電流供應、電流輸出量調整控制、陰極防蝕系統運轉以及保護效果檢查等之監偵測作業。

監偵測控制站選設位置必須考量之因素包括：配線簡化、電源供應便利、作業便利、避免防礙週遭環境、避免裝置遭受污損等。一般而言，監偵測控制站選設位置以電源供應便利之位置為首要考量。

在一個陰極防蝕系統下，可有一個以上監偵測控制站之設計。經過篩選並排除所有防礙監偵測控制作業、防礙週遭環境或裝置遭受污損可能之位置後，依配線電負載量決定監偵測控制站數量及分佈位置。

6.2 遠端遙控監偵測型系統

各種遠端遙控監偵測型系統都可能有完全不同之線路設計或採用不同輸送媒介。以下舉例某一式遠端遙控監偵測型系統作為參考。

此式遠端遙控監偵測型系統之現場裝備包含程式化區域整流器、主控整流器和數據機，遠端遙控裝備包含操控電腦及數據機。現場陰極防蝕系統每個陽極區設置一區域整流器。該陽極區所接出正極、負極引線及參考電極、工作電極訊號引線均連接其區域整流器。各陽極區之區域整流器透過一對電纜線，以串聯方式連接至一主控整流器。主控整流器透過兩端數據機與遠端遙控操控電腦訊號往來。

現場區域整流器和主控整流器選設位置必須考量之因素包括：便利電源

供應、避免防礙週遭環境、避免裝置遭受污損等。一般而言，選設位置以電源供應便利之位置為首要考量。

七、結論

- 1.陰極防蝕系統設計項目包括陽極分佈設計、偵測位置設計、線路系統設計、監偵測系統設計。
- 2.陽極區劃分依各區域所需保護電流密度，而各區域所需保護電流密度主要受到該區域混凝土中鋼筋表面積密度及鋼筋腐蝕程度之影響。
- 3.陰極防蝕系統之偵測，一般採用以參考電極測量之電位偵測法。電位偵測之方法分別有以參考電極由混凝土表面測量、以預埋混凝土中之參考電極測量及以上兩種方法混合使用。
- 4.陰極防蝕系統之主要線路有保護電流供電線路及偵測訊號線路。線路集中接到監偵測系統之供電器及電位計，由該監偵測系統執行電流輸出量控制、系統運轉檢查等監偵測作業。
- 5.陰極防蝕監偵測系統可分為現場監偵測型及遠端遙控監偵測型。現場監偵測系統適合陽極區數少之陰極防蝕系統，遠端遙控監偵測型系統較適合陽極區數量多或陽極分佈疏散之陰極防蝕系統。

參考文獻

- 1.P.Y.Lim, C.C. Shih, MRL Bull. Res. Dev, Vol. 6. NO. 2 (1992), pp 3-78.
- 2.Concrete Society Technical Report No 36
- 3.Concrete Society Technical Report No 37
- 4.B.S. Wyatt and D.J. Irvine, Materials Performance,Dec. 1989,12.

陰極防蝕工法在台灣之施作案例介紹

李枝河¹ 黃稚菱²

摘要

台灣屬島嶼型氣候，終日溫暖潮溼，加上四面環海，構造物遭海水中氯離子侵襲，使得鋼材極易腐蝕；在 RC 構件中，鋼筋為主要受拉材料，一旦鋼筋腐蝕造成斷面積減少，將大幅降低構件強度，為解決此問題，養護單位往往須投入大筆經費及人力來進行鋼筋腐蝕後之修補作業，而其成效往往不彰，因此鋼筋腐蝕問題近年來逐漸受到工程界及學術界重視，各種防蝕方法因應而生，目前已應用於工程中之鋼筋防蝕方法相當多，而本文旨在介紹美國及歐洲已行之有年之陰極防蝕工法，在本公司引進台灣後，已有多件新舊構造物採用陰極防蝕工法，在以下案例介紹中，除可進一步瞭解陰極防蝕工法之施作情形，尚可由完工後之量測成果看出陰極防蝕工法之功效。

Cathodic Protection Cases in Taiwan

J. H. Li¹ and J. L. Huang²

ABSTRACT

The weather in Taiwan is always warm and moisture because of its island feature which also leads to the steel corrosion, owing to chloride in sea, in structures. In reinforced concrete structures, steel is the primary tensile material, so long as corrosion occurs, the strength of elements decrease due to the reduction in tensile areas. In order to solve this difficulty, relative administrations always spend a large amount of money and people in repairs, but gain limitedly. So many methods appeared to prevent the situation nowadays due to the emphasis. In this article, we will introduce the Cathodic Protection widely used in

¹ 健峰工程顧問股份有限公司 董事長

² 健峰工程顧問股份有限公司 工程師

America and Europe for a long while. It has also been used in many old and new structures after our import into Taiwan. In the follow cases, we'll not only show the installation of CP system, but also learn the effect of it.

一、前言

鋼筋混凝土為一般橋梁中最常被使用的材料，但其中的鋼筋腐蝕問題卻往往降低了此種材料的使用性及耐久性，據統計全世界每年因腐蝕而浪費的鋼材有數億噸之多，澳大利亞每年因鋼筋腐蝕就要消耗 4.2%GDP，美國約為 4%GDP，英國每年要花費 50 億英磅來修復已腐蝕鋼材，中國大陸每年則因腐蝕要消耗一千萬噸的鋼材。而台灣屬亞熱帶環境，氣候高溫潮溼，更是腐蝕的溫床，因此鋼筋腐蝕問題之嚴重性不可輕忽。

混凝土中鋼筋的氧化還原行為受氯離子含量影響頗大，一般而言，混凝土中氯離子來源主要有兩類，一為混凝土內部原料成份，另一則為外在環境；當混凝土中氯離子含量超過臨界值時，只要持續提供鋼筋腐蝕所需的水及氧氣，鋼筋就極易發生嚴重腐蝕現象，當鋼筋開始腐蝕後，腐蝕生成物就會形成，該生成物會造成混凝土與鋼筋間握裹力降低，且由於生成物體積較原物質大，因而使混凝土保護層產生裂縫甚至剝落，同時鋼筋有效斷面積亦減少，直接影響到構造物的安全性及使用性。因此目前國內外工程界均耗費相當大的心力在腐蝕控制研究上，也不斷由過去失敗案例得到寶貴經驗進而修正各種防蝕工法，然防蝕工程應就不同的案例並同時考量未來維修管理之便利性，提供最適切的工法，方可在有限成本內發揮最大的效益。

橋梁劣化腐蝕是世界各國在公路管理上所面臨的難題之一，為了解決此問題，各單位無不投入大量人力及資源來探討腐蝕成因及因應對策；在國內交通部為維護鐵路橋梁之安全，以確保運輸系統暢通，曾邀請眾多專家學者，進行國內外橋梁劣化腐蝕相關技術規範及研究資料之蒐集與彙整，而後召開橋梁腐蝕防制研討會，公佈四種 RC 構造之鋼筋腐蝕防制方法為：1.鋼筋表面披覆(熱浸鍍鋅、環氧樹脂鋼筋等)，2.混凝土表面披覆(表層防水塗膜)，3.混凝土添加腐蝕抑制劑，4.鋼筋陰極防蝕。在鋼構造之鋼材防蝕部份，同樣提供四種方法：1.使用耐候性鋼材或合金。2.添加腐蝕抑制劑。3.電氣防蝕法。4.批覆遮斷法。以上各方法僅為設計時參考用，並非設計規範所規定，在進行設計時，可依現場實際狀況作適當選擇。土結構物是最近幾年才開始。在混凝土被尚未被氯離子污染前，只需要極小的電流即可維持鋼筋的鈍化層，同時也可讓氯離子無法接近鋼筋，使鋼筋免於腐蝕。將陰極防蝕系

統直接安裝在新建結構中已經成為最有效率的防蝕方法，因為是新建結構物，所以鋼筋尚未腐蝕相對的材料也節省許多，而陰極防蝕工程和傳統的防蝕工法相比，陰極防蝕法有兩個相當大的優點：

- 1.防蝕效果可以由測試效果測試後可以再調整其電流大小，來達到最佳的保護效果。得知，且保護電流強弱可以調整，因此每次保護。
- 2.陰極防蝕系統安裝在新建結構物中使用年限非常的長可達 75 年之久，也就是說防蝕系統將可以保護結構物到期使用年限。

二、沿海構造物劣化原因探討

鋼筋混凝土構造物最常見的劣化現象為鋼筋腐蝕，而鋼筋腐蝕原因主要分為內在因素與外在因素兩種，內在因素為混凝土材料中使用含有氯化物之骨材，而外在因素則為外在環境之高氯含量，漸進侵入混凝土中。民國六十年代政府開始推動十大建設，使得設計及施工技術大幅提昇，施工機具也日新月異；然而在材料品質控制上，卻未得到重視，因而成為現今最大問題之一。另外，台灣河流短小湍急，泥砂運移問題嚴重，然為了工業發展及民生用水，大都需在河川上游興建水庫，造成砂石無法到達下游，加上基於橋梁安全之考量，法律明訂禁止採砂，因此河川砂石來源短缺，大量的海砂被使用於混凝土中，造成混凝土中之高氯含量，進而使構造物在竣工後不久即發生腐蝕問題，此為一般常見造成腐蝕之內在因素。台灣屬亞熱帶環境，氣候高溫潮濕，加上東北季風強盛，夾帶大量鹽霧，造成乾濕循環，因此成為腐蝕的溫床，以過去經驗判斷，台灣沿海五公里內之構造物多為離子侵蝕之對象；在國外腐蝕原因則大都為灑鹽造成氯離子侵入混凝土，因此腐蝕現象常見於伸縮縫附近橋面版及大梁、帽梁與橋墩等，是為造成腐蝕之外在因素。過去設計者在設計時較偏重構造物的安全性，也就是考量其強度是否足夠，而耐久性卻往往被忽略，使得構造物劣化問題普遍發生於沿海構造物上，造成管理單位之困擾。

三、混凝土中鋼筋腐蝕機理與過程

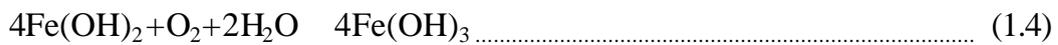
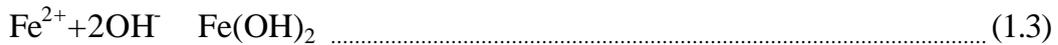
3.1 混凝土中鋼筋腐蝕機理

自然界中的金屬，多數以氧化物的穩定型態存在，因此，鋼筋腐蝕完全是一種自然反應，混凝土內鋼筋的腐蝕機理，除了環境因素的不同外，基本上需具有陽極、陰極、導電通路、電流及電解液等五大項。

1.陽極：產生氧化反應的地方，其反應式如(1.1)所示。



2.陰極：產生水的還原反應，使水與空氣中的氧(O₂)與電子結合，形成氫氧根離子(OH⁻)，其反應式如(1.2)式，一旦氫氧根離子產生，就會與鐵離子有機會結合而形成沈澱物，進而氧化生成鐵銹(Fe(OH)₃)，其電化學反應式如(1.3)、(1.4)式所示。



3.導電通路：氧化還原作用時均須有電子的轉移，在良好的導電通路下，腐蝕作用才能順利進行。

4.電流：腐蝕的產生必須有足夠的電動勢才可使電子流動，讓電化學反應順利進行。

5.解電溶液：鋼筋在混凝土的高鹼性環境(pH=12.5~13.2)中，表面會產生鈍態保護膜，由鐵的 Pourbaix Diagram pH 與電動勢能之關係圖(如圖一)可看出，除非 pH 值降至 9.0 以下，或昇至 14.0 以上，否則腐蝕將不易產生。

控制這五項電化學反應的要素，即可防止或減緩混凝土中鋼筋的腐蝕。造成混凝土中鋼筋腐蝕的主要成因有：(1)混凝土品質；(2)混凝土的裂縫；(3)混凝土的中性化程度；(4)氧化物的入侵等因素，使得鋼筋混凝土結構物在潮濕的環境下，更容易進行電化學反應。

3.2 氯化物侵蝕

混凝土中氯化物來源可概略歸類為兩項，一來自混凝土內部原料成份，一來自外在環境之侵入。氯離子首先在鋼筋表層吸附，然後通過鈍化保護膜的表面缺陷穿透到膜中，在鈍化保護膜內層(鐵/氧化物界面)形成 FeCl₂，進而使鈍化保護膜局部腐蝕現象。氯離子不構成腐蝕產物，在腐蝕中也無法消耗，但是只作為促進腐蝕的中間產物，會給腐蝕起催化作用，是極強的陽極活化劑。其反應式如(2.1)、(2.2)式所示。



當大面積的鋼筋表面上具有高濃度的氯離子，則氯化物所引起的腐蝕可能是均勻腐蝕 (Uniform Corrosion)，但在不均質的混凝土中首先是在很小的鋼筋表面上，混凝土孔隙水溶液具有較高的氯離子濃度，鈍化保護膜會形成局部性破壞，成為小陽極，此時鋼筋表面的大部分能具有鈍化保護膜，成為大陰極，由此大陰極供氧充足，使小陽極上鐵迅速溶解產生孔洞，小陽極區局部酸化；同時由於大陰極區的陰極反應，生成氫氧根離子(OH)，導致 pH 值增高；氯化物提高了混凝土吸濕性，使陽極與陰極間孔洞中的電阻降低，使局部腐蝕可以自發地以局部深入型式繼續進行，這種局部腐蝕稱為孔蝕 (Pitting Corrosion)，如圖二所示為氯化物引起鋼筋腐蝕示意圖。混凝土中鋼筋的氧化與還原的行為主要受混凝土中氯離子含量的影響。當氯離子含量超過氯離子臨界濃度時，只要持續提供鋼筋腐蝕所需的水與氧氣，就會產生嚴重性腐蝕。根據 Hausmann 學者所提出，當 $[Cl^-]/[OH^-]$ 值小於 0.6 時，則鋼筋就不會產生氧化現象。

3.3 鋼筋腐蝕過程

依據 Tuutti model，鋼筋腐蝕開始於發展期，腐蝕過程起始於氯離子擴散到鋼筋保護層深度、或二氧化碳進入混凝土內部降低孔隙水溶液 pH 值或兩者皆有。圖三為鋼筋混凝土腐蝕過程示意圖，其過程可分成兩階段 (initiation)：一為二氧化碳進入混凝土內部至鋼筋處或氯化物侵入混凝土，使鋼筋喪失鈍態保護膜為止，這段時間稱之為 t_0 ；一為發展期階段 (propagation)，為鋼筋開始腐蝕發展到嚴重腐蝕階段，以至結構破壞到不能再安全使用為止，在這個階段中又可細分為下列三個時期：

1. 中期：以鋼筋開始腐蝕發展到混凝土表面因鋼筋腐蝕膨脹而出現破壞現象（如順向鋼筋脹裂、保護層開裂或混凝土剝落）。這段時間以 t_1 來表示。
2. 後期：以混凝土表面因鋼筋腐蝕開始膨脹發展到混凝土普遍出現嚴重脹裂、剝落破壞，以達到不可容忍程度，必須全面性維修之階段。這段時間以 t_2 來表示。
3. 晚期：鋼筋腐蝕已擴大到使結構區域性破壞，致使結構到不能安全使用為止。這段時間以 t_3 來表示。

3.4 鋼筋腐蝕對鋼筋混凝土結構物之影響

混凝土與鋼筋的結合，兩者之間須有良好的握裹力才能發揮作用。提供混凝土與鋼筋間握裹力 (bond force) 來源大致上有三種：(1) 鋼筋表面與

混凝土之間的摩擦力 (friction) ; (2) 鋼筋與水泥砂漿的化學粘結力 (chemical adhesion) ; (3) 鋼筋竹節 (rib) 與混凝土之間的卡榫力 (interlock) 。當鋼筋開始腐蝕後，腐蝕生成物體積會膨脹，導致混凝土與鋼筋之間兩者的握裹力下降，保護鋼筋的混凝土保護層產生裂縫、剝落；同時鋼筋的有效斷面積亦減少，直接影響到鋼筋混凝土結構物的安全性與使用年限。根據中國大陸冶金建築研究所總院惠雲玲 (1996)，以及近年來英國、義大利、日本等的大量試驗研究發現，對於表面只有浮銹的鋼筋，當其斷面積損失小於 1 % 時，鋼筋的應力 - 應變曲線及鋼筋抗拉強度、降伏強度與未生銹前相同，對於結構物功能基本上無影響。對於斷面積損失小於 5 % 且均勻、輕微腐蝕的鋼筋及熱軋鋼筋，其應力 - 應變曲線仍具有明顯的降伏點，對結構物的影響不大。而斷面積損失介於 5 % ~10 % 的鋼筋，由於腐蝕不均勻，鋼筋降伏強度、抗拉強度及延伸率開始下降。當斷面積損失大於 10 % ，但小於 60 % 的嚴重腐蝕的鋼筋，其各項力學性能嚴重下降。若鋼筋腐蝕損失大於 60 % 時，則構件承載能力降低至與未配筋之鋼筋相同。

四、舊有構造物之陰極防蝕工法

犧牲陽極式的陰極防蝕原理是在 1824 年由 Humphrey Davy 所發現的，他的理論在接下來的一世紀被用來保護船體沒入水中的金屬部份以避免其腐蝕；在 20 年代初期，此種技術開始被用在地下管線上，在使用時發現土壤電阻值相當高，為了達到防蝕的效果，外加電流式陰極防蝕法就因此產生。

鋼筋腐蝕可視為一種電化學反應，混凝土中的鋼筋表面會出現鐵放出電子形成鐵離子，這種反應和鋼筋與周圍物質間的電位差有關，反應電流越大，銹蝕速率越快；反應中鐵的電位將會由其起始電位逐漸靠近腐蝕電位，由外界提供一電流強迫鋼筋電位由腐蝕區降到免疫區，這就是陰極防蝕的作法。

陰極防蝕工法主要可分為犧牲陽極法及外加電流法兩種，犧牲陽極是使用鋁、鋅等腐蝕電位較高的金屬釋放電子以保護鋼筋；另一種外加電流法，電流由直流電源供應器透過陽極到達鋼筋，達到保護鋼筋的效果。鋼筋混凝土結構物的陰極防蝕以外加電流法為主，因其適用於任何環境及建築物，且能隨不同的腐蝕環境調整電流大小，更具有較長的壽命能確保新建結構物能達到其設計使用年限，這些都不是犧牲陽極所能比擬的。

陰極系統發展至今使用最廣泛的陽極材料為鈦金屬，鈦陽極的一次陽極材料為鈦條，而二次陽極材料則採用表面塗有混和金屬氧化物的鈦網或帶狀

鈦網。鈦網陽極或帶狀鈦網陽極有下列幾項特色：第一是這種陽極材料本身相當穩定，不會因電流通過而受損，第二是在此種陽極表面的反應會傾向促進氧還原而不是氯氣產生，因此，不會造成陽極材料表面混凝土被氯氣及酸侵蝕。第三是此一種材料相當耐久，使用壽命很長，依據 N.A.C.E. 的規範 (STANDARD 0294-94) 顯示此一材料在正常的使用下，可以達到 75 年以上的使用壽命。

4.1 陰極防蝕應用於舊有構造物之施作案例說明

陰極防蝕工法應用於舊有構造物之案例在台灣已有相當多件(見表一)，本節主要介紹位於台灣東北角台二線 86K+692 的安和橋。受海洋潮汐作用及氣候的影響，該橋下部結構的保護層混凝土皆已剝落(肇因為鋼筋銹蝕)。本公司於民國 85 年接受公路局委託，就該橋結構(橋台、墩體及大梁等)的鋼筋混凝土部分進行陰極防蝕修護工程。

該橋梁施作陰極防蝕工程之總工程面積為 437 平方公尺，採用外加電流方式對該橋的下部結構進行保護。針對各構件鋼筋密度不同，共將其規劃為四個陽極區，再依各區域鋼筋腐蝕嚴重情況，提供不同大小的保護電流進行保護。

在進行陰極防蝕系統設計前需先對該橋進行相關檢測(混凝土強度、氯離子含量及鋼筋腐蝕速率等檢測)，其後再依據陰極防蝕施工規範及相關材料規範進行對該橋梁的修復工程。施工中並於該橋梁不同區域預埋數個偵測系統(參考電極及工作電極)，以利於完工後對該橋梁進行定期監測工作。

該橋梁陰極防蝕修護工程於 86 年 9 月完工，經過試車測試及相關監測數據量測後正式通電，進行保護的工作。本公司並定期對該橋梁進行相關的監測及測試。

表一所列檢測數據中為完工後所測得之電位為自然電位(鋼筋在混凝土中的電位)，經由直流電流慢慢調整，達到設計電流量後，其電位有漸漸偏向負值方向(此過程需將直流電流依據設計電流的比例調整)的趨勢，表示該區域的鋼筋已經受到陽極保護電流的保護。

在這期間必須注意所提供的保護電流可能會因為環境改變及鋼筋受保護已達飽和狀態，而須調降，例如陽極四區 R 2 保護電位往負值方向改變的趨勢過大，此時就需調降電流量，避免該區過度保護，而得到反效果。所以到保固期結束該電位就逐漸往正值方向改變。

五、新建構造物之陰極防蝕工法[1]

5.1 基本概念

陰極防蝕用在舊有構造物上作為修補工法之歷史已有二十餘年，但使用於新建構造物來作為預防鋼筋腐蝕的方法卻是一門新的技術。根據過去經驗顯示，在氯離子尚未侵蝕至混凝土前，陰極防蝕工法僅需相當小的電流量來保護鋼筋表面之鈍化層，並使得氯離子趨向陽極。因此比起其它傳統防蝕工法，在新建構造物上採用陰極防蝕系統較節省初期成本，且有較可觀的長期效益。在構造物興建時即將帶狀鈦網這種陽極材料安裝在混凝土構件中，可在構造物的使用年限裡發揮有效的腐蝕控制成果。

阿拉伯海灣沿海地區對 RC 構造物來說是最易腐蝕的地區之一，一項針對當地 100 棟鋼筋混凝土結構的調查顯示，構造物的平均服務年限僅為 10-20 年，較原設計年限的 50 年少得相當多。在 Yucatan Peninsula，由於使用粗糙尖銳的骨材，加上水灰比過高等原因，許多腐蝕是因為混凝土的高滲透性所造成。香港 Kanmon 隧道的設計年限雖有 120 年，但使用 4 年後，壁面漏水情況惡化，為了進行修復工程，使得營運不得不暫時中斷。

為使構造物發揮其設計使用年限，材料劣化問題實不可輕忽。在惡劣環境中傳統防蝕工法無法提供鋼筋完整的保護效果以使構造物達到設計使用年限，這時候，建議採用陰極防蝕系統，可在使用年限中提供有效的腐蝕控制。新建構造物採用陰極防蝕工法的優點在於降低氯離子移向鋼筋的趨勢，陰極防蝕系統中之鋼筋為負極，帶負電之氯離子將遠離鋼筋。氫氧根的產生將維持混凝土的鹼性並保護鋼筋表面的鈍化層，因此適當的設計及應用陰極防蝕將避免鋼筋腐蝕，而因腐蝕所產生的劣化問題也就不會產生。綜上所言，建議新建構造物採用陰極防蝕之理由如下：

1. 在高溫、高氯含量環境下的 RC 構造物極易因鋼腐蝕造成材料提早劣化。
2. 傳統防蝕工法在惡劣環境中無法提供有效腐蝕控制效果以符合設計使用年限。
3. 新建構造物採用陰極防蝕工法具有長期的經濟效益，採用陰極防蝕工法配合其它傳統防蝕工法或單獨使用在興建初期僅需增加少許費用。
4. 在新建構造物中採用帶狀鈦網這種陽極材料可在構造物的設計使用年限 (>75 年) 中提供良好的腐蝕控制效果。
5. 新建構造物之陰極防蝕系統僅需極少量的電流即足夠保護鋼筋表面鈍化層並驅使氯離子移動至陽極。

5.2 鈦陽極設計與安裝基本考量

第一個採用鈦網作為陽極材料的案例是在 1985 年加拿大 Ontario 的一座大橋，之後便陸續在世界各地被採用，至今總施作混凝土面積已超過一萬平方公尺。採用此種陽極材料的優點在於可透過加速試驗來決定其使用年限，根據 N.A.C.E 標準 TM0294-94 試驗程序進行試驗，結果顯示此種催化鈦的使用年限超過 75 年。

催化鈦陽極可被製造成不同的形式，針對混凝土構造物的陰極防蝕工程，可採用鈦網或是帶狀鈦網。在新建構造物中採用帶狀鈦網是較適當的選擇，根據 FHWA 的規定，為避免鈦陽極附近水泥砂漿成為陽極反應生成物，鈦陽極表面的電流密度不得超過 108-mA/m^2 ，但根據多項研究顯示，鈦陽極可在電流密度高達 400-mA/m^2 的情況下運作，在有限的時間內並不會對陽極材料本身或是周遭混凝土造成損壞。

設計陽極系統之基本考量有下列幾項：

1. 根據構造物的幾何形狀、結構形式、局部環境影響及易於控制等因素進行陽極分區。
2. 計算陰極防蝕系統影響範圍內之鋼筋表面積。
3. 計算陰極防蝕系統需求的電流密度。

5.3 經濟效益

在新建構造物上安裝陰極防蝕系統的最大好處為系統可於混凝土發生劣化再啟動系統運作，於興建時安裝陰極防蝕系統會較事後安裝便宜許多，其成本減少之主要原因有以下三項：

1. 在新建混凝土構造物中，由於氯離子尚未侵入其中，且鋼筋尚未腐蝕，因此比起需抑制鋼筋腐蝕並重建鈍化層的電流量，維持鋼筋表面鈍化層的電流量僅為其 1/10。
2. 不需負擔修復已腐蝕鋼筋的昂貴費用。
3. 陰極防蝕系統的安裝可與構造物興建施工同時進行，可節省費用。

進一步來說，當採用陰極防蝕來作為控制腐蝕的主要手段時，則不再需要採取其它像是環氧樹脂鋼筋、特殊的摻料或防水系統等工法來增加混凝土的耐用性。所節省的經費通常等於甚至超過陰極防蝕的費用。陰極防蝕工法

對構造物來說不但可有效抑制鋼筋腐蝕產生，在構造物服務年限中，更可節省相當多的維護費用。

5.4 鋼筋混凝土氯離子侵蝕深度量測

氯離子對鋼筋的威脅在於氯含量若達到臨界值，會破壞鋼筋表面鈍化層，進而使鋼筋腐蝕，另外，氧氣含量、溼度及溫度也會影響鋼筋腐蝕速率。品質佳的混凝土提供鋼筋良好的環境，當混凝土 PH 值高時，當中鋼筋會在其表面形成保護的氧化層，該氧化層會使鋼筋成鈍化狀態，因而避免腐蝕產生。當氯離子侵入破壞該保護層後，鋼筋即開始腐蝕。腐蝕生成物體積會較原鋼筋體積膨脹數倍，使得鋼筋周圍混凝土承受極大張應力，當此張應力超過混凝土容許張應力時，裂縫就因此產生，而裂縫一旦產生，更多的氯離子就開始侵入，加速整個腐蝕過程。

氯離子侵蝕深度量測儀可偵測氯離子侵蝕深度是否已到達鋼筋表面，裝設之陰極防蝕系統可在氯離子侵蝕至鋼筋表面時，再予以啟動來保護鋼筋。腐蝕會降低結構物強度，且使混凝土產生裂縫、龜裂甚至剝落。在混凝土構造物中，在不同深度安裝感應器，除可用來評估氯離子入侵及碳化的深度，也可量測鋼筋瞬間腐蝕速率。

複合深度感應器具有四組由溫合鋼及不銹鋼所組成之參考電極，分別放置在具混凝土表面不同深度之位置，其中最深的參考電極放置在鋼筋表面處。零電阻電流表(ZRA)是用來量測兩參考電極間的電流量，當電流量增加時，表示該參考電極處氯含量增加，同時腐蝕機率也增加。複合深度感應器一般多放置在構造物中最易發生腐蝕的地方，接近鋼筋且在氯化物及濕氣最先侵襲的位置，如此便可在腐蝕發生前採取適當的預防措施。

5.5 陰極防蝕應用於新建構造物之施作案例說明

陰極防蝕工法應用於新建構造物之案例在台灣已有相當多件(見表一)，本節主要介紹台鐵西部幹線的二重橋，因原結構(橋面版)受損，本公司於民國 89 年，就該橋新建工程進行陰極防蝕設計及施工。

該橋梁施作陰極防蝕工程之總工程面積為 100 平方公尺，採用外加電流方式對該橋的橋面版進行鋼筋混凝土的保護措施。

本工程先對該橋進行瞭解(鋼筋量、保護電流及保護面及等)及評估，再依據陰極防蝕施工規範及相關材料規範進行對陰極防蝕設計及施工。施工

中並於該橋梁規劃之不同區域預埋偵測系統（參考電極及工作電極），以利於完工後對該橋梁進行保護效果監測。

該工程於 90 年 9 月完工，經過試車測試及量測相關監測數據後正式通電，進行保護的工作。本公司並定期對該橋梁進行相關的監測及測試。

表一所列檢測數據為工程完工後所測得之電位為自然電位（鋼筋在混凝土中的電位），經由直流電流慢慢調整，達到設計電流量後，其電位有漸漸偏向負值方向（此過程需將直流電流依據設計電流的比例調整）的趨勢，表示該區域的鋼筋已經受到陽極保護電流的保護。另外，在維護期間所提供的保護電流可能會因為環境改變及鋼筋受保護電流已達飽和狀態，而須適度調整。

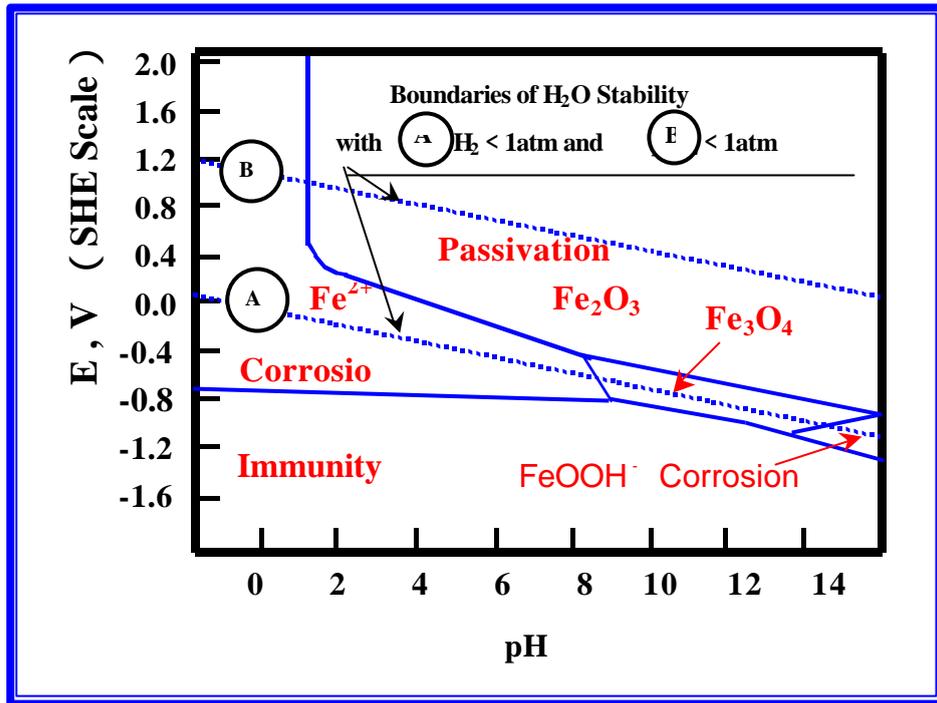
六、結論

由過去實際施作經驗顯示，陰極防蝕工法確實能達到長時間防止鋼筋腐蝕的目標，尤其是在鹽害嚴重地區，陰極防蝕工法更能發揮其卓越的功效；此外，陰極防蝕工法是目前美國聯邦高速公路交通管理局(F H W A)頒佈唯一能有效抑制混凝土橋面版腐蝕的工法，而美國防蝕工程協會(N.A.C.E.)及英國的 RCCP 也訂定了陰極防蝕的標準，均証實了陰極防蝕系統對抑制鋼筋腐蝕的有效性。目前在台灣已有相當多的新舊構造物採用此工法，由系統安裝完成後定期的量測結果顯示鋼筋確實受到良好的保護，因此，陰極防蝕工法未來在台灣仍舊具有相當好的發展性。

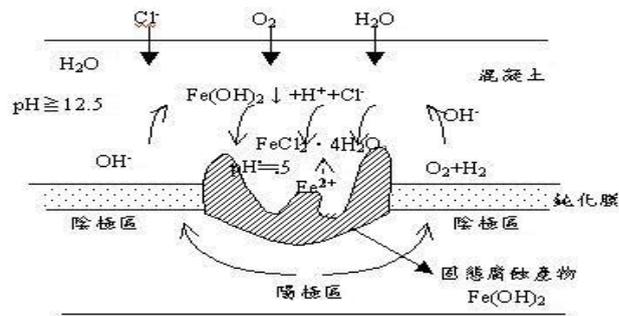
參考文獻

- 1.Steven F.Daily, Kevin Kendell, "Cathodic Protection of New Reinforced Concrete Structure in Aggressive Environments", Material Performance, 2. NACE, Vol.37, No.10, pp19-25, (Oct.1998).
- 2.Pourbaix, M "Lecture on Electrochemical Corrosion" Plenum Press, New York, (1973).
- 3.John P. Broomfield, "Corrosion of Steel in Concrete," E & FN SPON, UK, (1997).
- 4.A.Bentur, S.Diamond and NS.Berke, "Steel Corrosion in Concrete," E & FN SPON, UK, (1997).

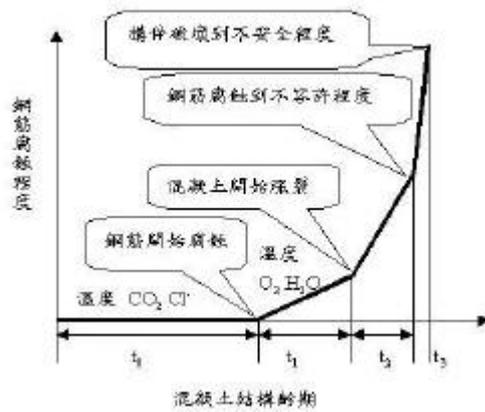
- 5.P.M. Chess,"Cathodic Protection of Steel in Concrete," E & FN SPON,UK,(1998).
- 6.洪定海，混凝土中鋼筋的腐蝕與保護，中國鐵道出版社，北京(1998)。
- 7.張炳坤，RC 結構物防蝕策略研究，防蝕工程第十二卷第三期。
- 8.施建志，最新鋼筋混凝土防蝕與修補技術，混凝土結構耐久性技術論文集 (民國 89 年 4 月)。
- 9.柯賢文，腐蝕及其防劑，全華科技圖書(股)公司(民國 83 年)。
- 10.徐耀賜，公路橋梁之養護與維修，大學圖書供應社(民國 85 年)。



圖一 Purbaix Diagram[2]



圖二 氯化物引起鋼筋點腐蝕示意圖



圖三 混凝土中鋼筋腐蝕過程示意圖

表一 陰極防蝕工法應用於舊有構造物之案例統計

編號	工程名稱(位置)	業主	服務項目	施作面積 (m ²)
1	台二線安和橋	公路局	設計施工	650
2	台二線 31 號橋	公路局	設計施工	810
3	內壢祥龍居	威帝建設	設計施工	300
4	銘傳國小活動中心	台北市政府	設計施工	1260
5	中正文化中心地下停車場	文建會	設計施工	480
6	新上公園大廈	新上大廈管委會	設計施工	240
7	明志國小	台北縣政府	設計	426
8	台北世貿地下停車場	經濟部	設計監造	5000
9	八里污水處理廠	營建署	設計施工	240

表二 安和橋 CP 完工後之電位量測紀錄

	日期	原始電位	日期	保護電位	日期	保護電位	日期	保護電位
陽極一區 R1	86.9.7	-115	86.9.17	-455	90.12.17	-502	91.6.14	-502
陽極一區 R2	86.9.7	-113	86.9.17	-356	90.12.17	-512	91.6.14	-512
陽極一區 R3	86.9.7	-67	86.9.17	-381	90.12.17	-519	91.6.14	-519
陽極二區 R1	86.9.7	-171	86.9.17	-316	90.12.17	-483	91.6.14	-483
陽極二區 R2	86.9.7	-124	86.9.17	-3432	90.12.17	-559	91.6.14	-559
陽極三區 R1	86.9.7	-130	86.9.17	-434	90.12.17	-488	91.6.14	-488
陽極三區 R2	86.9.7	-141	86.9.17	-212	90.12.17	-420	91.6.14	-420
陽極四區 R1	86.9.7	-261	86.9.17	-608	90.12.17	-633	91.6.14	-633
陽極四區 R2	86.9.7	-211	86.9.17	-863	90.12.17	-571	91.6.14	-571

表三 陰極防蝕工法應用於新建構造物之案例統計

編號	工程名稱(位置)	業主	服務項目	施作面積 (m ²)
1	嘉義福德橋	嘉義縣政府	設計施工	1600
2	鐵路局二重橋	鐵路局	設計施工	54
3	基隆市光華停車場連續壁	基隆市政府	設計施工	2600
4	基隆市東岸停車場連續壁	基隆市政府	設計施工	3000
5	基隆市田寮河自由橋	基隆市政府	設計施工	110
6	基隆市田寮河崇仁橋	基隆市政府	設計施工	110
7	基隆市田寮河博愛橋	基隆市政府	設計施工	110
8	台二線 29 號橋	公路局	設計施工	910
9	台二線和美二號橋	公路局	設計施工	790
10	嘉義贊貓溝溪橋	嘉義縣政府	設計施工	2560

表四 二重橋 CP 完工後之電位量測紀錄

	日期	原始電位	日期	保護電位	日期	保護電位
陽極一區 R1	90.9.17	-115	91.3.25	-467	91.6.21	-459
陽極一區 R2	90.9.17	-171	91.3.25	-371	91.6.21	-362

以去鹽工法處理鹽害 R.C. 結構物之探討

陳桂清¹ 簡坤葦² 李 釗³

摘 要

氯離子誘發鋼筋腐蝕生銹，導致 R.C. 結構物損壞崩塌，是公認的事實。鋼筋的腐蝕是評估結構物耐久性之重要指標之一。因此，如何減少或去除混凝土內之氯離子，是降低或防止鋼筋繼續發生銹蝕的可行方式。研究文獻指出，以去鹽工法處理對遭受氯鹽侵襲結構物之腐蝕改善及防治有正面的評價。本文從影響去鹽效應之因子、混凝土品質之變化、電解液之變化及鋼筋腐蝕狀況之改善等四方面進行探討。試驗結果顯示，去鹽工法為一簡單、有效且可行之方法，可去除 80% 鹽量，顯著降低鋼筋腐蝕速率，並大幅提升 R.C. 結構物之耐久性。

The Study on Chloride Contaminated Reinforced Concrete by Electrochemical Desalinization Treatment

K. C. Chen¹, K. W. Chien² and Chau Lee³

ABSTRACT

Chloride-induced corrosion of steel reinforced concrete structures is generally acknowledged. Rebar corrosion could be considered as one of the major indexes in assessing its durability. Therefore, reducing and eliminating chlorides in concrete should be a feasible way to prevent the rebar from further corrosion. Recent studies indicated that electrochemical desalinization treatment appears to be the newest, simplest and a very promising rehabilitation technique for improving and preventing the corrosion in chloride contaminated reinforced.

¹ 交通部運輸研究所港灣技術研究中心 研究員

² 國立中央大學土木工程研究所 碩士

³ 國立中央大學土木工程研究所 教授

In the study, four topics were conducted. They were included factors affecting chloride removal, concrete properties variation, electrolyte variation, and rebar anti-corrosion improvements. The test results showed that electrochemical technique is a simple, effective and feasible method to remove chloride from concrete. It could reach up to 80% chloride off. And rebar corrosion rate is significantly reduced. The durability of reinforced concrete structures is improved.

一、前言

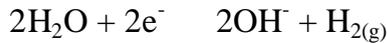
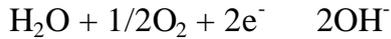
混凝土在正常環境下，長久以來一直被公認為一最經濟、取得最易且耐久性極佳的營建材料。然而混凝土是一多孔隙性之材料，受到所處環境之影響，例如於海洋環境下或濱海地區，甚易受到海水或海風挾帶高量鹽份之侵入，造成構造物中之鋼筋發生腐蝕、體積膨脹，導致混凝土的崩裂、剝落、終致損壞。

氯離子(Cl^-)誘發鋼筋發生腐蝕生銹，導致 R.C. 結構物損壞崩塌，是公認的事實。在某些觀點上，鋼筋的腐蝕生銹是評估結構物的耐久性及持續使(適)用之重要指標之一。因此，如何減少或去除混凝土內之氯離子，是降低或防止鋼筋繼續發生腐蝕生銹的可行方式之一。近年來，相關研究文獻指出，以去鹽工法處理結構物遭受氯鹽侵襲之鋼筋腐蝕改善及防治有正面的評價。雖然去鹽工法可行、成效可期，但在實務應用上仍有待深入探討。本文乃以電化學之觀點，探討可能影響去鹽成效之因素，並對混凝土相關性質變化進行研析(諸如內部孔隙結構、離子游動分佈、微觀結構...等)，同時對鋼筋腐蝕狀態之改善成效更為探討重點。

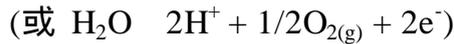
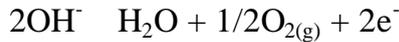
二、去鹽工法之機理

去鹽工法基本上它是屬於一種電化學反應程序，主要乃利用同性電荷相斥、異性電荷相吸之原理，於鋼筋(陰極)與混凝土表面外之金屬網(陽極)間，外加一直流電源供應系統，於通電狀況下藉著電荷相吸(斥)之電驅力，把鋼筋附近之 Cl^- 驅離並逐出混凝土外，降低鋼筋附近或混凝土內之 Cl^- 濃度，致使鋼筋不易或減低受到 Cl^- 之腐蝕侵襲。去鹽過程中牽引孔隙溶液(pore solutions)中離子之游動、擴散、輸送..等現象，如陽離子(Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{+2} 、 H^+)向陰極(鋼筋)游動，而鋼筋附近之陰離子(Cl^-)則向混凝土外之陽極游動。如此一來，不但可去除或降低 Cl^- 濃度，同時又可提升鋼筋附近之鹼性環境。去鹽過程中相關之化學反應如下：

陰極端(鋼筋)；鋼筋附近有 OH⁻及 H_{2(g)}生成



陽極端(混凝土外之鈦金屬網)；有 O_{2(g)}及 Cl_{2(g)}生成



孔隙溶液；

孔隙溶液中之陽離子諸如 Na⁺、K⁺、Ca⁺²、H⁺等向陰極端游動，鋼筋附近之陰離子(OH⁻ 及 Cl⁻)則向混凝土外之輔助陽極網游動。

三、試驗規劃與研究方法

3.1 試驗材料

- 1.水泥：台灣水泥公司生產之波特蘭 I 型水泥。
- 2.粒料：粗細骨材來源均為大甲溪砂石，粗骨材最大粒徑 20mm。
- 3.鋼筋：為低碳類鋼材(省產# 3 號鋼筋)，直徑為 10 mm。
- 4.氯化鈉：台灣製鹽總廠生產之一般食用細鹽。
- 5.電解液：氫氧化鈉(NaOH)。
- 6.輔助陽極：美國 Eltech 公司出品之鈦網(coated titanium mesh)。

3.2 試體製作

混凝土試體配比如表 1 所示，拌合時以 3%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，模擬鹽害結構物之狀況。

表 1 混凝土試體配比設計表

最大粒徑 (mm)	坍度 (cm)	水灰比 (%)	S/a (%)	每立方混凝土 (kg/m ³)			
				水泥	水	細砂	粗骨材
20	10	53	45.6	380	201	800	954

試體尺寸為 30cm x 30cm x 10cm 之立方體，試體內埋置 # 3 鋼筋，澆置前預先加以焊鑄成田字型之鋼筋網，並焊接一導線自鋼筋接出試體模外，做為接電導線，然後將田字型鋼筋網置於木製試體模內，進行試體灌製。鋼筋保護層厚度為 4 公分（縱向），其配置如圖 1 所示。試體澆置完成後，第二天進行拆模作業，將試體置於 100% 相對溼度的養治室中養治 28 天。試體內氯離子初始濃度為 6.86 kg/m^3 。

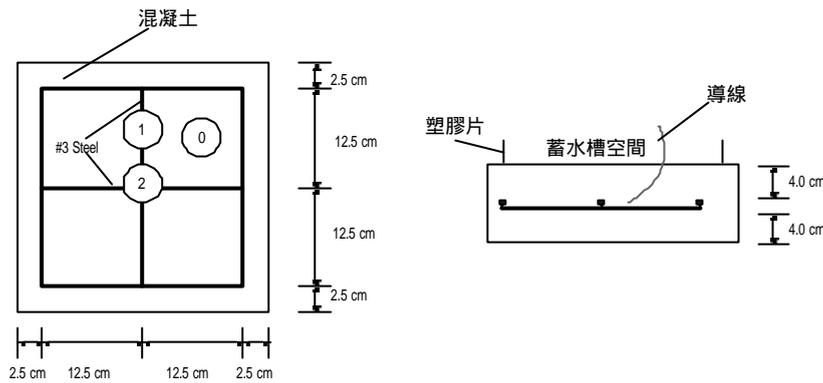


圖 1 混凝土試體與鋼筋配置圖

3.3 去鹽系統裝置

將混凝土試體、陽極鈦網與電解液安置於壓克力槽中，並以膠布與防水矽膠將試體與壓克力槽間之縫隙填滿，避免陽極槽內之電解液在通電過程中，因為生熱蒸發等作用而產生濃度的變化。去鹽系統裝置如圖 2 所示。

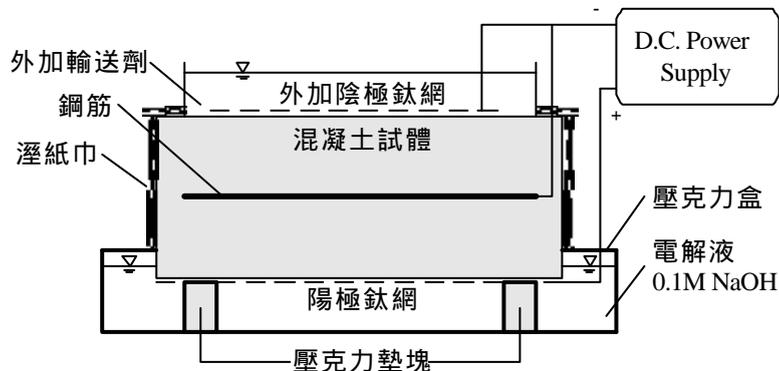


圖 2 電化學去鹽系統裝置

3.4 試驗參數

- 1.通電電流密度與通電時間搭配組合如表 2。
- 2.陽極槽電解液：0.1 M NaOH 溶液(相當於 Na⁺初始濃度為 2300 ppm)。

表 2 試驗參數組合

電流密度(A/m ²)	通電時間(天)
1	9、18、36
3	6、9、12、18
6	3、6、9、18
9	2、4、9、18

3.5 研究方法

鹽害試體在經過電化學去鹽工法處理後，其去鹽效果如何?混凝土品質是否受到影響?都必需深入瞭解並做適當的因應，避免產生負面作用。相關試驗方法簡述於下；

3.5.1 非破壞性檢測試驗

- 1.試錘試驗；依據 ASTM C-805 規範，使用試錘衝擊混凝土表面，可簡單快速推估混凝土之強度變化。
- 2.貫入試驗；依據 ASTM C-803 規範，使用高強度的強化鋼針，再以較高的固定動能衝擊混凝土表面，以測微計量測貫入深度，由貫入深度可推算混凝土強度。
- 3.超音波脈波速率試驗；為非破壞性檢測試驗中最常用方法之一，試驗時不需破壞試體，可初步評估混凝土之品質狀況，其關係如表 3 所示。本試驗依據 ASTM C597 規範進行，於發射端施以 500 V 之能量，54 kHz 頻率，音波通過已知試體長度(距離)至接收端，可測得所需之傳遞時間。藉由下列公式，求得脈波速率；

$$v = L/t$$

；超音波脈波速率， L：試體長度(兩探頭間距離)， t：音波傳遞時間

表 3 超音波脈波速率與混凝土品質之關係

脈波速率(m/sec)	混凝土品質
<2500	不良
2500~3000	中等
>3000	優良

4. 電阻係數量測試驗；鋼筋的腐蝕是一種由陽極到陰極間之電荷轉移，當電荷在混凝土內流動時則受到混凝土介質之阻礙。因此，藉由電阻係數之變化，可知腐蝕電流通過之難易，相對地即可了解鋼筋腐蝕之狀態。表 4 為混凝土電阻係數與鋼筋腐蝕速率之關係。

表 4 混凝土電阻係數與鋼筋腐蝕速率之關係

電阻係數(k Ω -cm)	鋼筋腐蝕速率
< 5	非常高
5-10	高
10-20	較低
> 20	非常低

5. 鋼筋腐蝕電位量測；試體進行通電處理前，依據 ASTM C-876 規範，以參考電極 Ag/AgCl 或 Cu/CuSO₄，先行量測鋼筋的腐蝕電位值。俟完成去鹽處理後，再次量測鋼筋之腐蝕電位值，以評估去鹽工法處理後對鋼筋腐蝕改善之情形。鋼筋腐蝕電位值與腐蝕機率之關係如表 5。

表 5 ASTM C-876 鋼筋電位值與腐蝕機率之關係

電位值範圍	鋼筋腐蝕狀態
-200 mV < 電位值	90 % 機率不腐蝕
-350 mV < 電位值 < -200 mV	腐蝕可能發生
電位值 < -350 mV	90 % 機率發生腐蝕

6. 鋼筋腐蝕速率量測；採用交流阻抗法(AC 法)，量測鋼筋腐蝕電流密度。量測時以 50 mV 電位施加於鋼筋，掃描頻率從 20k 至 0.1 Hz，可得一極化

電阻(R_p)值，藉由 Stern-Gear 關係式可計算出鋼筋腐蝕電流密度(亦即鋼筋腐蝕速率)。表 6 為腐蝕電流密度與鋼筋腐蝕狀態之關係。

表 6 腐蝕電流密度與鋼筋腐蝕狀態之關係

腐蝕電流密度($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	鋼筋腐蝕狀況
< 0.1	鈍化狀態
0.1~0.5	低~中等腐蝕
0.5~1.0	中~高等腐蝕
> 1.0	高腐蝕

3.5.2 鑽心取樣與分析

- 1.離子濃度分析；包含混凝土與陽極槽電解液之 Cl^- 及其它離子(諸如 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 Ca^{+2} 、 K^+ 等)濃度之變化。
2. pH 值量測；經去鹽工法處理後，混凝土之鹼性環境可能改變，同時陽極槽內電解液之 pH 值變化亦可能影響後續去鹽效應。
- 3.孔隙結構分析；以壓汞式孔隙分析儀，進行漿體結構之孔徑分析，了解漿體間的孔隙結構變化情形。一些研究文獻指出，經通電處理之試體，其混凝土電阻係數有上升的趨勢，推測其電阻係數之變化與孔隙結構有密切之關連性。
4. X-光繞射分析；本項分析主要瞭解經過去鹽處理後，水泥漿體水化產物之消長，特別是鋼筋附近漿體之變化。

四、去鹽成效分析

4.1 影響去鹽效率因子

1.通電之電流密度

試體經 9 天與 18 天通電處理後，其電流密度與氯離子去除率之關係如圖 3。圖中顯示，在任一相同通電時間下，氯離子之去除率隨電流密度之增大而遞增，但是，在電流密度較大的條件下，通電 9 天與 18 天的氯離子去除率相差甚小。推測原因乃氯離子的去除效應，與混凝土中氯離子的濃度有關，氯離子濃度越高者越有利於游離性氯離子的移動，自然也就比較容易被去除。所以電流密度較大時，其早期階段對氯離子去除的速率較快，當混凝土內之氯離子濃度降低時，晚期階段的去除速率則自然會降低。

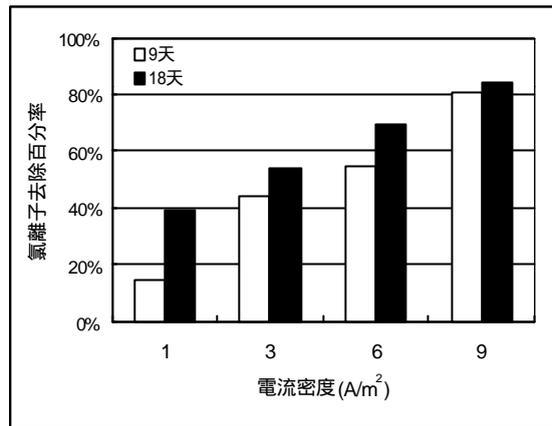


圖 3 通電 9 及 18 天，電流密度與 Cl⁻ 去除率之關係

圖 4 為不同電流密度下通電處理 18 天，混凝土內之氯離子濃度分佈狀況。圖中氯離子濃度降低之區域主要分佈在深度 5~10cm 處，為鋼筋至混凝土外之陽極鈦網間，亦是電荷移動主要路徑，且氯離子去除量隨著電流密度的增大，呈現遞增的趨勢。深度 0~5cm 為未直接受到電力場作用的區域，去除氯離子之效應不顯著，但在鋼筋附近的氯離子濃度則有降低的傾向，主要原因乃是受到相同電荷排斥的效應(鋼筋為陰極帶負電荷，鋼筋周圍的氯離子亦帶負電荷)，而被驅離向外游動。相較於圖 6(無鋼筋通過之鑽心試體)，在 4~5 cm 處(為鋼筋埋置的深度)，其氯離子濃度並無減少的現象便可獲得佐證。

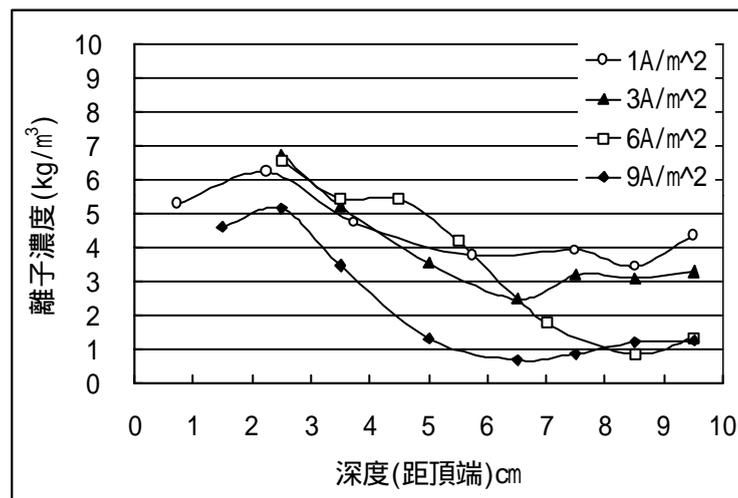


圖 4 通電 18 天，Cl⁻ 在各深度層之濃度分佈

2.通電時間

圖 5 為不同電流密度下，氯離子之去除率均隨著通電時間之增長而增加。初期通電階段，以高電流密度(9 A/m^2)之去除率較大，於第 5 天時已可去除 53%，於第 10 天達 82%，爾後轉趨於平緩不再增加。電流密度 1 A/m^2 時，初期去除率應較小，如於第 9 天時僅達 17%，持續通電至 36 天時去除率亦可達 60%左右，去鹽效果尚可。

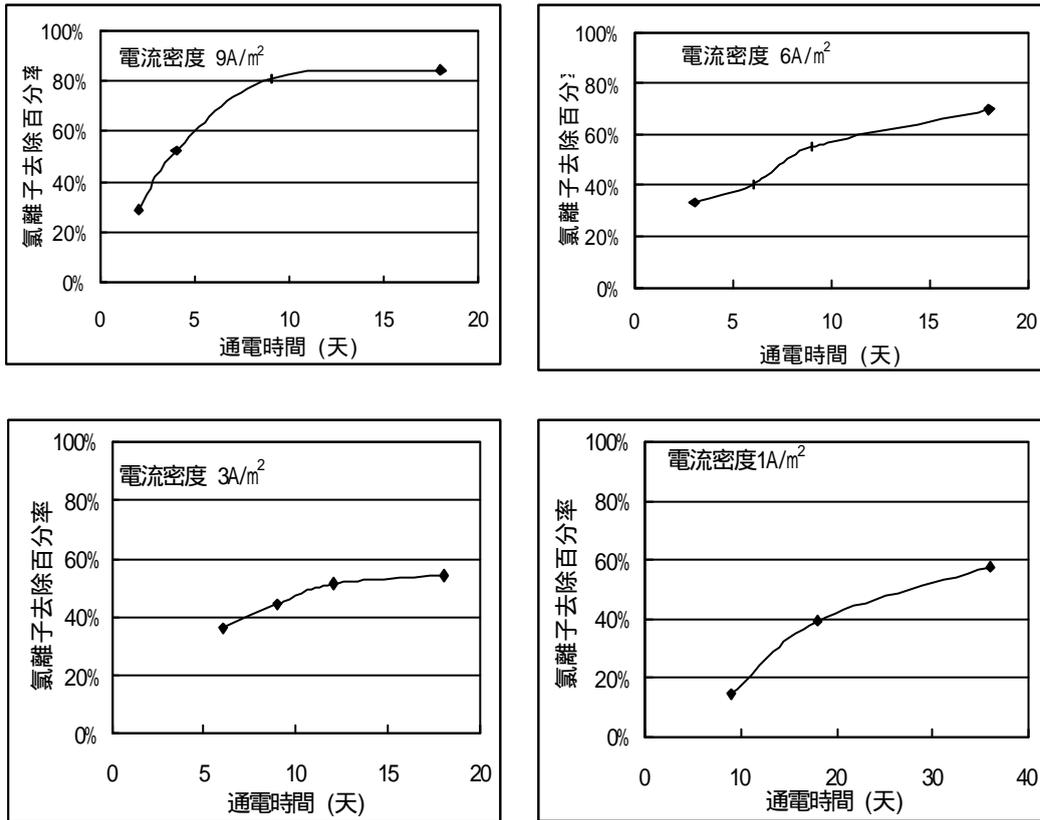


圖 5 不同電流密度下， Cl^- 去除率與通電時間之關係

3.電荷移動路徑(作用區域)

去鹽過程中，電荷移動之有效路徑是在陰、陽兩極之間，它不但能影響反應的難易與速率，更是構成電化學反應必備條件之一。圖 4 已明顯指出，電荷直線通過的區域(深度 5 ~ 10cm)，其 Cl^- 去除量隨著電流密度的增高呈遞增的趨勢。電荷未直接通過的區域(深度 0 ~ 5cm)，其 Cl^- 去除之效應則不顯著，其間 Cl^- 濃度之消長，完全受到濃度差之自然擴散效應所主控。

4.鋼筋分佈(數量)

鋼筋密度(分佈、數量)是影響電化學去鹽效率的重要因子之一，單位面積的鋼筋密度愈高者，其去鹽的成效理應較佳。圖 6 為電流密度 $9A/m^2$ 通電 18 天，鋼筋數量與氯離子濃度在各深度層之變化情形，出現氯離子濃度較低之區域為深度 5~10cm。鑽心試體內如含有十字鋼筋(呈十字交叉)者，其內部氯離子殘留濃度最低，亦即去除量較大。有一根鋼筋通過之試體其氯離子濃度次之，無鋼筋通過之試體其氯離子濃度最高。顯然鋼筋之數量對去除氯離子的量影響很大。

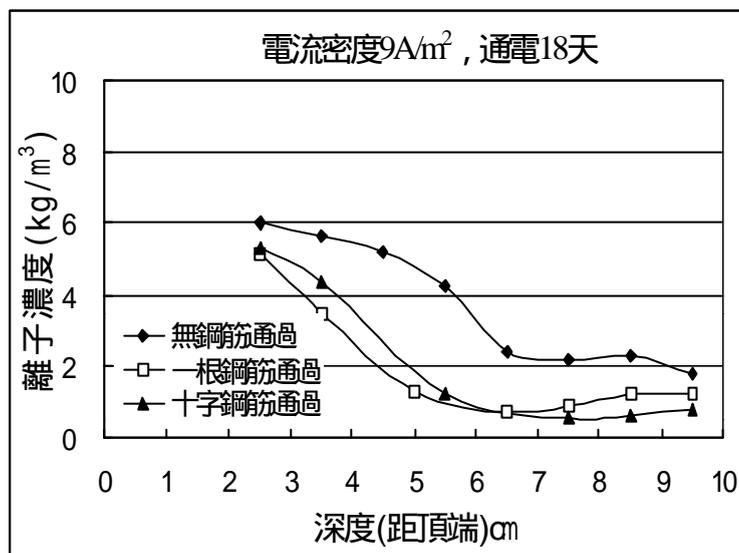


圖 6 鋼筋分佈(數量)與氯離子濃度分佈之情形

五、混凝土品質變化之探討

5.1 化學性質之變化

1.表面滲出物

經通電處理，浸漬於陽極槽內之試體底表面，有白色滲出物附著於上。經 X-光繞射分析，主要成份為碳酸鈣($CaCO_3$)，如圖 7 所示。由於最初陽極槽電解液並無鈣離子的成份，因此，應是試體在通電處理下，混凝土中之氫氧化鈣($Ca(OH)_2$)被解離析出，再與空氣中之 CO_2 接觸，最後生成白色碳酸鈣沉澱物。

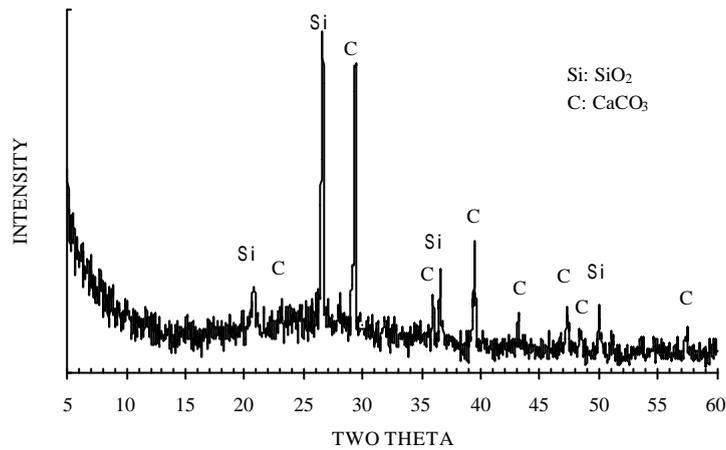


圖 7 滲出物之 X 光繞射分析結果

2.離子濃度分佈

除了氯離子外，孔隙溶液中其它離子之消長亦是探討之重點。圖 8 為通電 18 天，混凝土孔隙溶液之陽離子濃度分佈情形。在鋼筋附近(深度 5cm 處)，鈉離子有明顯增加的趨勢，尤其在高電流密度下更顯凸出。此現象可使鋼筋附近混凝土之鹼性環境提升，致使鋼筋表層再形成鈍化狀態。

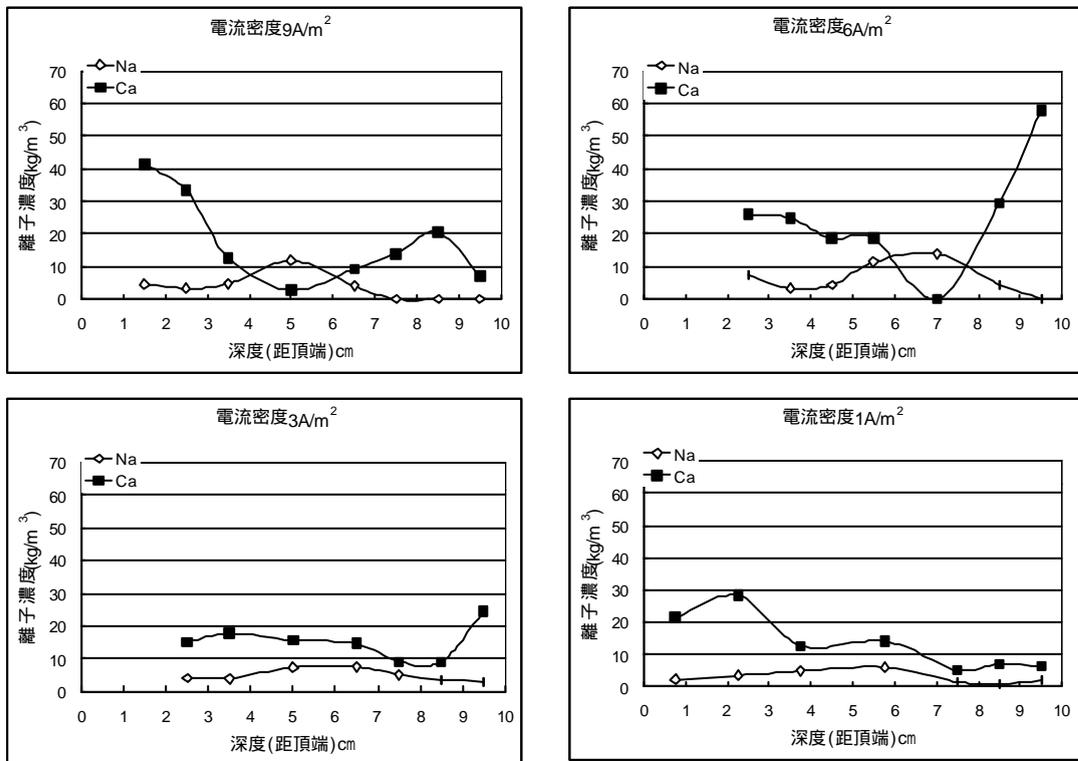


圖 8 通電 18 天，混凝土孔隙溶液之陽離子分佈狀況

另一方面，鈣離子的濃度變化則較不一致。在電流密度(9、6 A/m²)通電下的試體而言，鈣離子的濃度與鈉離子的濃度曲線呈現相反的走勢，尤其在鋼筋的附近，鈣離子的濃度偏低。上述現象乃是孔隙溶液中，當鈉離子的濃度增高時，可能會抑制漿體中鈣離子的溶出。所以在鋼筋附近的鈉離子濃度相對較高時，鈣離子的濃度則遭到抑制。至於低電流密度(3、1 A/m²)下的試體，其鈣離子的濃度，並未因電化學的作用，而產生特殊的變化。至於鉀離子(K⁺)，原本水泥中含量很少，分析中並未檢測出，對整體孔隙溶液化性影響甚微。

圖 9 為試體通電 18 天後，混凝土漿體內水溶性硫酸根離子的平均濃度變化情形。電流密度較高的試驗組，硫酸根離子(SO₄⁻²)的濃度有偏高的趨勢。由於水泥中原含有 5% 之石膏(C_aSO₄2H₂O) 成份，在水泥水化過程中，石膏幾乎全部與鋁酸三鈣(tricalcium aluminate, C₃A)完全反應生成鈣鈣石(ettringite)之水化產物。顯然在通電過程中，有部份之鈣鈣石受到破壞解離成 SO₄⁻²。

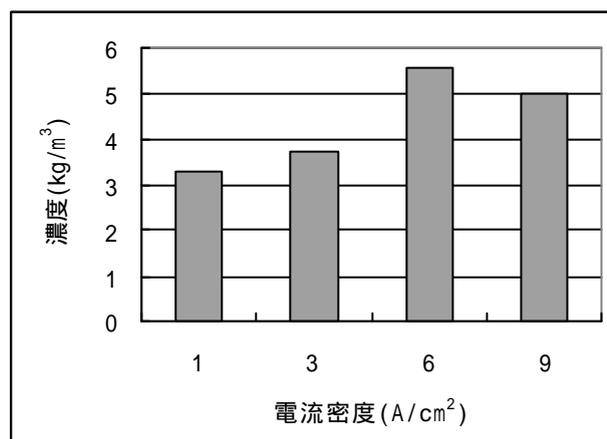


圖 9 通電 18 天，孔隙溶液中 SO₄⁻² 的平均濃度

3.pH 值變化

圖 10 為混凝土內各深度層之 pH 值變化。在鋼筋附近的 pH 值較其它深度處為高，主要原因乃鋼筋附近已釋出 OH⁻離子(陰極生成物)，致使鋼筋附近的鹼性環境上升，且隨著電流密度之增大有上升的趨勢。

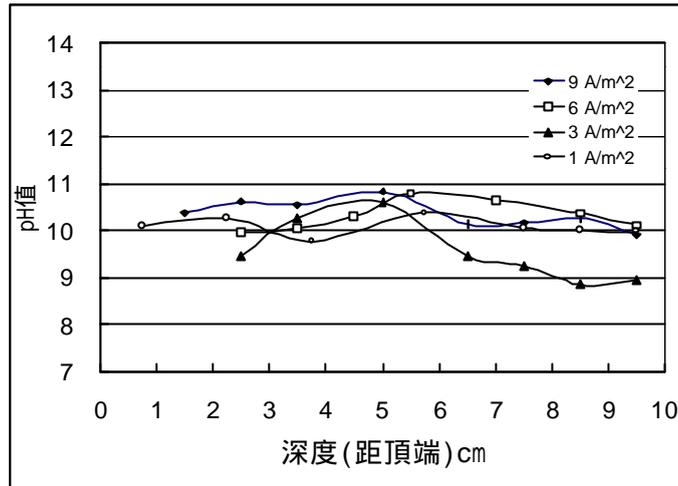


圖 10 混凝土內各深度之 pH 值變化

4. 漿體化合物分析

圖 11 為試體在電流密度 9A/m^2 下通電 18 天，頂部(深度 0~1cm)、鋼筋附近以及試體底部(深度 9~10cm)之漿體，進行 X-光繞射分析之結果。鋼筋附近之 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量(圖中以 CH 標示)較其它部位為高，底部之 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 則有減少的趨勢。顯然通電處理後，鋼筋附近有 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反應物產生，主要是由孔隙溶液中之 Ca^{+2} 與鋼筋附近解離之 OH^- 結合而成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 。至於與陽極電解液接觸的試體底部，其 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 成份則會因為陽極電解液的酸化，而逐漸地被溶解析出，因此 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 之 X-光繞射波峰值(表示強度或含量)有下降的趨勢。

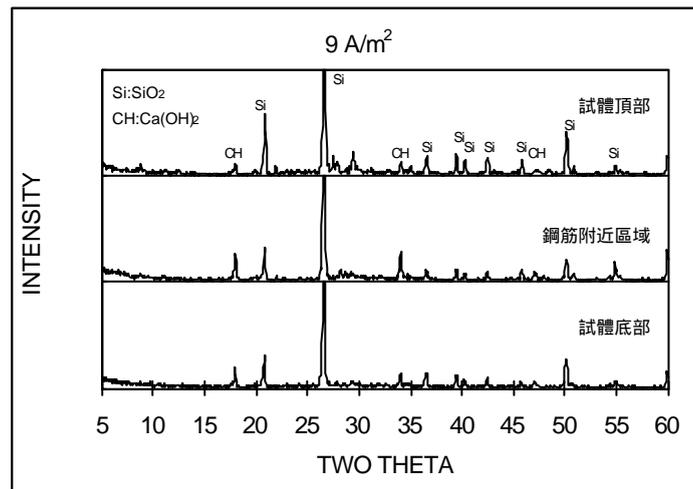
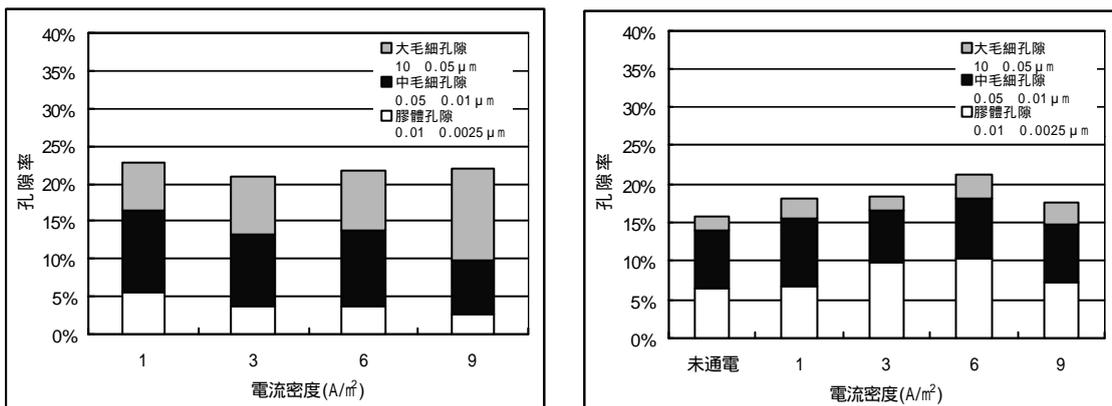


圖 11 通電 18 天，試體頂部、鋼筋處與底部之 X-光繞射分析結果

5.2 物理性質變化

1. 孔隙(徑)結構

圖 12(a)為鋼筋附近混凝土之孔隙含量分析結果，以毛細孔隙所佔的比例最多，分別約佔 18~20% 不等，且隨著電流密度的增大有增加的趨勢，而膠體孔隙的比例僅佔 3~6%，呈相反走勢。圖 12(b)為試體底部漿體之孔隙含量，由於底部浸漬於呈酸化侵蝕之陽極電解液中，同時受到電化學作用的影響，因此膠體孔隙約為 7~10%，明顯比鋼筋附近者高出約 1 倍，大毛細孔隙的含量也明顯減少，整體的孔隙率仍較鋼筋附近者為低。推究其原因乃是鋼筋附近的混凝土漿體，在進行電化學去鹽時，鋼筋本身會產生高熱以及釋出氫氣等現象，混凝土漿體受熱膨脹，致使孔隙結構產生明顯的變化。對於較遠處漿體之孔隙結構的影響並不顯著。又毛細孔隙對於混凝土的抗壓強度和透水性有較大的影響，膠體孔隙則對乾縮與潛變有較大影響。



(a) 鋼筋附近之孔隙率

(b) 試體底部之孔隙率

圖 12 通電去鹽 18 天，混凝土內部之孔隙率變化

2. 強度變化

表 7 為通電後試體所測得之試錘試驗讀數，換算強度約介於 270~320 kg/cm² 之間，與控制組強度(296kg/cm²)相近。貫入試驗測得表面貫入之深度約為 2.30~2.81mm，表面硬度約為 280~297 kg/cm²，比控制組(294 kg/cm²)略為降低，但是與試錘試驗結果相近，顯然通電去鹽處理對混凝土品質並無劣化影響。

表 7 試錘試驗與貫入試驗結果

試體 編號	試錘平均 讀數	表面強度 kg/cm ²	貫入深度 (mm)	表面硬度 kg/cm ²
No.1	38.2	322	2.81	275
No.2	34.6	270	2.69	282
No.3	34.7	271	2.76	280
No.4	35.5	283	2.30	297
No.5	35.4	282	2.54	288
No.6	35.7	286	2.63	284
No.7	34.7	271	2.71	281
No.8	37.0	306	2.36	295
No.9	34.5	268	2.77	279
控制組	36.4	296	2.38	294

3. 超音波脈波速率

試體通電前，各試體之超音波脈波速率約為 3.8~4.3 km/s，通電完成後其速率分別下降 0.05 ~0.14 km/s 不等，如表 8 所示。依據表 3 之關係解讀，對混凝土品質之影響微小至無，品質仍屬於良好範圍內。

表 8 超音波脈波速率量測結果

試體 編號	通電前 脈波速率 (km/s)	通電後 脈波速率 (km/s)	變化量 (km/s)	混凝土 品質
No.1	4.26	4.18	-0.08	正常 範圍 內
No.2	4.22	4.08	-0.14	
No.3	4.22	4.17	-0.05	
No.4	4.15	4.05	-0.10	
No.5	4.35	4.26	-0.09	
No.6	3.98	3.86	-0.12	
No.7	3.58	3.52	-0.06	
No.8	3.89	3.91	+0.02	
No.9	3.78	3.70	-0.08	
控制組	4.23	-	-	

六、陽極槽電解液變化之分析

6.1 離子濃度變化

1. 陽離子濃度

圖 13 為不同電流密度下通電 18 至 20 天後，陽極槽電解液陽離子濃度之變化情形。圖中 Na^+ 濃度隨通電時間增加而遞減，且隨電流密度增大，遞減速度愈快。以 9、6 A/m^2 兩組為例，分別在通電 4 天與 6 天後， Na^+ 濃度即趨近於 0。相對於 1 A/m^2 之試驗組， Na^+ 濃度尚有 1500 ppm，顯然遞減的趨勢較為緩和。亦即在高電流密度下，較易將 Na^+ 驅入混凝土內。

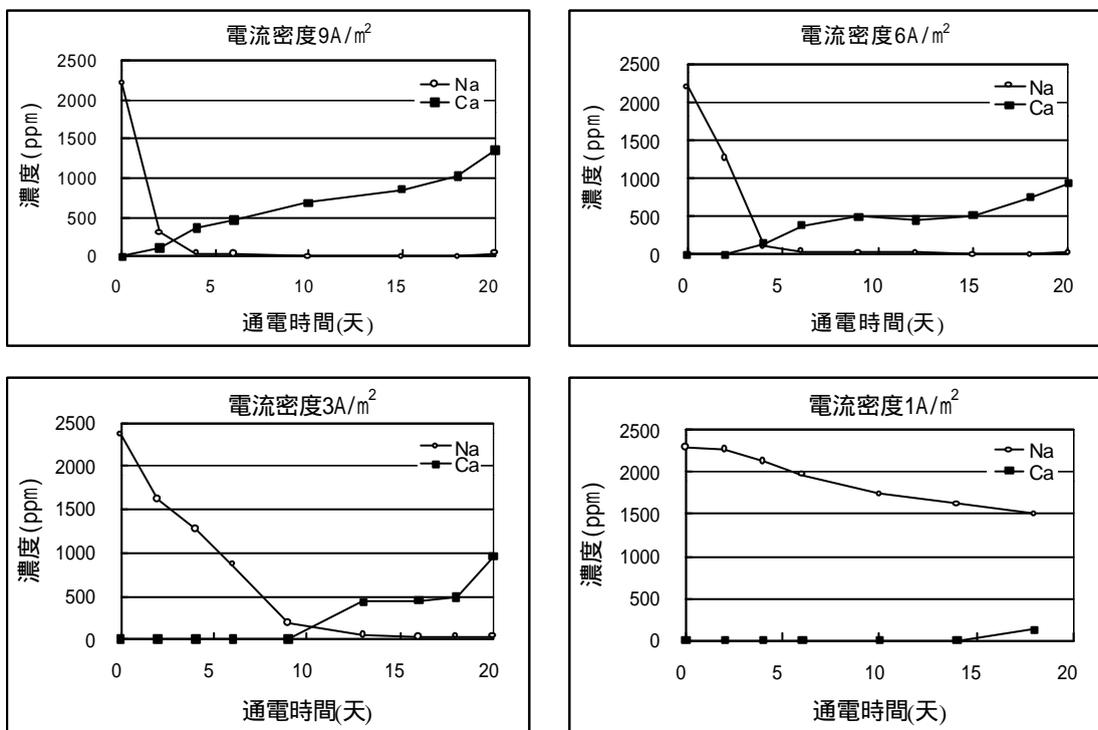


圖 13 陽極槽電解液之陽離子濃度變化

而 Ca^{2+} 濃度則依不同的電流密度，於不同的時間點出現，爾後逐漸增加。各試驗組中 Ca^{2+} 出現的時間，與溶液中 Na^+ 消失的時間相當接近，亦即 Na^+ 的消失，可能會幫助 Ca^{2+} 的解離。由於電解液原本並無 Ca^{2+} 的成份，唯一可能產生 Ca^{2+} 的來源，即是從混凝土中而來。因此當電解液中 Na^+ 消失時，混凝土內之 Ca^{2+} 隨之被析出。

從上述觀察中發現，陽極電解液內的 Na^+ 逐漸減少，而 Ca^{2+} 則逐漸析出，表示在通電處理之後，電解液已經變質，勢必會影響到整個通電去鹽的成效。在電流密度越高下，電解液變質的速率越快，對通電去鹽效果的

影響自然也越大。同時各試驗組的去鹽速率，會隨著時間的遞增而日趨緩和，其中以高電流密度下的試驗組最為明顯，應該都與陽極槽內電解液的變質有關係。

2.陰離子濃度

圖 14 為電流密度 9A/m^2 下，電解液中之 Cl^- 與 SO_4^{2-} 濃度變化情形。 Cl^- 濃度並未隨通電時間的增加而增加，且在通電初期(約 3~5 天)即出現高濃度值。此外， SO_4^{2-} 濃度變化，則與圖 13 中之 Ca^{+2} 濃度變化曲線類似，亦即當 Ca^{+2} 自混凝土中析出時， SO_4^{2-} 亦一同溶出，顯然兩者的溶出呈現相互對應的關係。

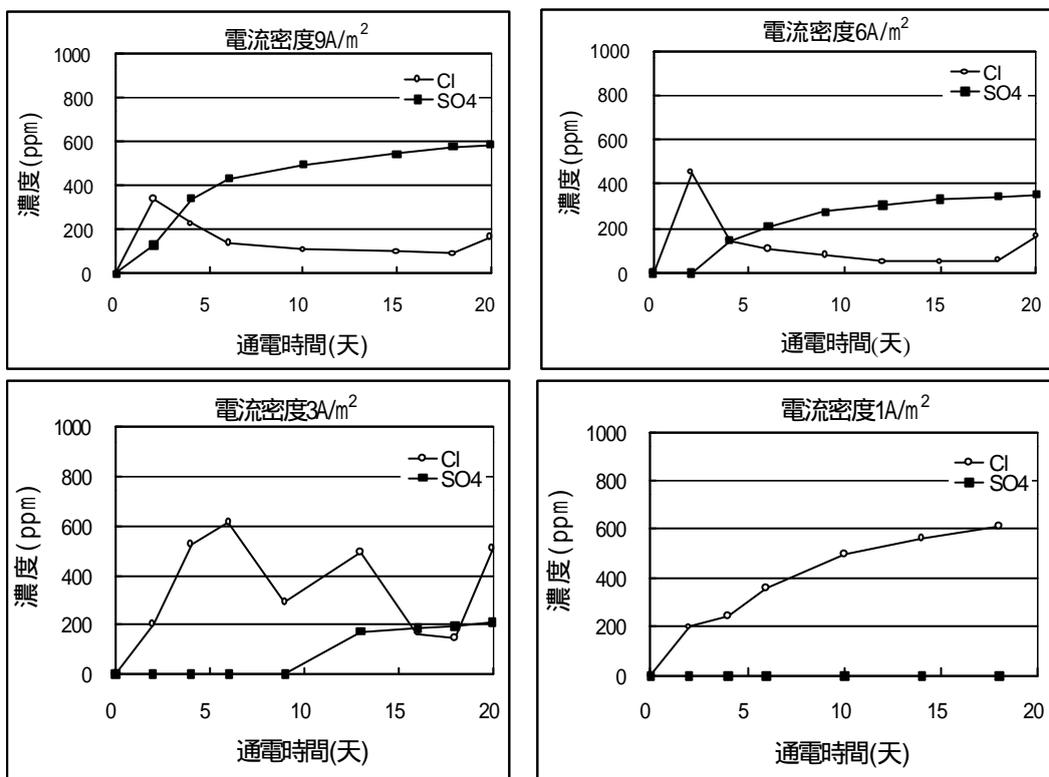


圖 14 陽極槽電解液之陰離子濃度變化

6.2 電解液 pH 變化

圖 15 為電解液之 pH 值隨通電時間之變化情形，pH 值降低的速率與通電電流密度成正比，電流密度越高者，電解液 pH 值下降的速率也越快。電流密度為 9、6、3 A/m^2 ，通電時間分別於 2、4 與 9 天時，其電解液 pH 值均下降至 3.5 附近。其酸化的時間與圖 13 中， Na^+ 自電解液中消失的時間以及 Ca^{+2} 與 SO_4^{2-} 開始溶出的時間相當接近。陽極槽內電解液酸化的原因，除了與 Na^+ 的消失有關外，電解液的酸化更促使試體底部混凝土中之 Ca^{+2} 以及 SO_4^{2-} 的解離。

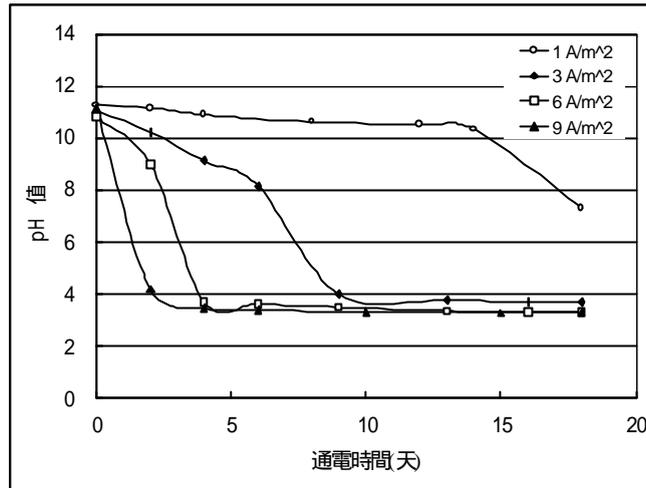


圖 15 陽極槽內電解液之 pH 值變化情形

隨著電解液的酸化，電解液中 Cl^- 的濃度也隨之降低，此乃是電解液 (NaOH 溶液) 吸收槽內之氯氣，生成 NaCl 與 NaOCl (次氯酸鈉) 等，此兩種生成物均屬易溶的化合物，整個電解液酸化之化學反應式如下：



當電解液之鹼性足夠時 (pH 大於 10)，上述的反應得以進行，溶液中的氯離子濃度將會隨時間的增加而遞增，如圖 14 中電流密度為 1 A/m^2 的試驗組。反之，由於 NaOCl 具強酸性，會使得溶液的 pH 值隨著通電時間的增長而逐漸降低。一旦降低至無法維持上述反應時，即影響通電之能力與去鹽效率。

此外，由圖中亦發現，電流密度為 9、6 與 3 A/m^2 的試驗組中，pH 值下降的極限約為 3.5。之所以會有一個下限值，一方面是電解液中的 Na^+ 已經全部消失，另一方面具有酸性的次氯酸根離子也不再產生，所以 pH 值的降低，會有一個下限值。

七、鋼筋腐蝕狀態之探討

7.1 腐蝕電位變化

圖 16 為分別以 3 及 6 A/m^2 之電流密度通電處理後，鋼筋腐蝕電位值變化結果。通電前試體內之鋼筋腐蝕電位約介於 -350 至 -400mV (v.s. CuSO_4 參考電極)，鋼筋處於腐蝕狀態。經通電去鹽處理後，鋼筋之腐蝕電位明顯往正值方向移動，最終達 $\pm 50\text{mV}$ 之間。試體內之鋼筋為陰極，在通電處理過程中鋼筋猶如受到陰極防蝕保護之效應，加上鋼筋被極化的作用，前述之現

象意謂鋼筋已由腐蝕狀態變為再鈍化狀態階段。另從鑽心試體中取出的鋼筋，表面有黑色的鈍態氧化鐵保護膜生成且無明顯的銹斑存在，證實去鹽過程中，鋼筋本身的腐蝕狀態，可獲得大幅度的改善。由於去鹽工法，本身即是一個高電流密度的陰極防蝕措施，鋼筋不易發生腐蝕行為。而在停電之後，由於鋼筋附近混凝土中氯離子濃度降低，再加上鹼性上升，以及鋼筋本身在通電後的極化作用等因素影響，可以讓鋼筋於停電之後，長時間維持在一個相對不腐蝕的狀態。

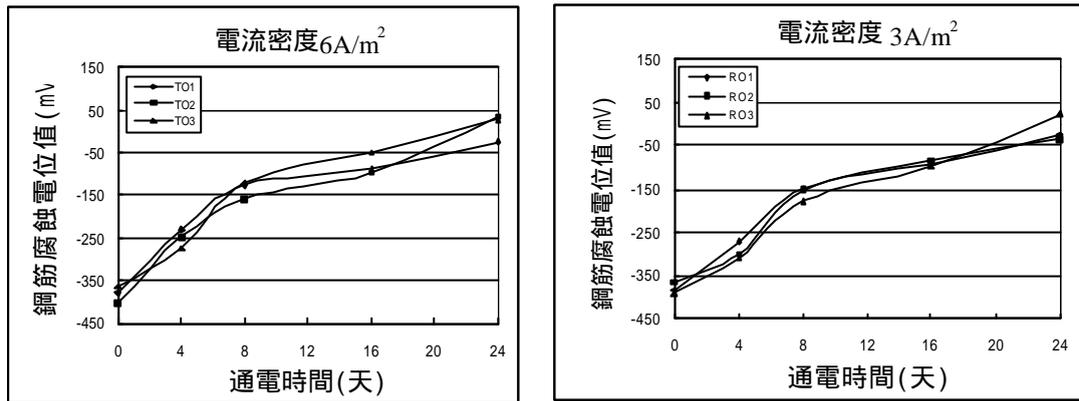


圖 16 去鹽處理後鋼筋之腐蝕電位變化情形

7.2 腐蝕電流密度變化

圖 17 為經去鹽工法處理後試體內鋼筋腐蝕速率之變化情形。圖中腐蝕電流密度，分別自 2.5~3.0 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 大幅降至 0.8 至 0.6 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 之間。顯然去鹽處理，不但可降低或去除混凝土內有害之氯離子，提升鋼筋附近之鹼性環境，同時亦可降低鋼筋之腐蝕速率。

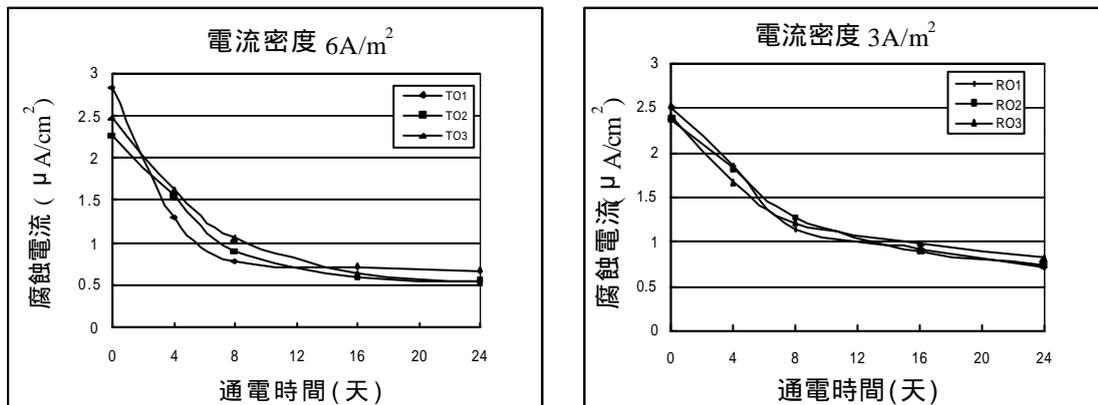


圖 17 去鹽處理後試體內鋼筋腐蝕速率變化

八、結論

鹽害 R.C. 結構物經電化學去鹽工法處理後，獲得下列初步結論；

1. 電化學去鹽工法是一簡單、可行且為有效去除氯離子之方法。
2. 最有效去鹽之範圍，為電流直接通過之區域，亦即鋼筋(陰極)與試體外之輔助陽極之間。
3. 高電流密度下可迅速達到去鹽的效果，但後續去鹽速率則隨著通電時間的增加而遞減。在相同的通電量下，較低的電流密度似乎有較佳的去鹽效果。
4. 鋼筋分佈之位置與數量，對於去鹽效果有明顯的影響。越接近鋼筋附近的區域，其去鹽的效果越佳。鋼筋數量愈多者其去鹽的效果也越佳。
5. 陽極槽電解液於通電過程中，逐漸產生酸化、質變的情形，降低了電化學反應之活性，致使後續去鹽的速率趨緩。
6. 鋼筋周圍之混凝土鹼性環境有上升之趨勢。
7. 鋼筋附近之混凝土其總孔隙率、毛細孔隙率，均明顯增加，毛細孔隙率隨電流密度增高而遞增，其它部位之孔隙變化則尚不顯著。
8. 鋼筋腐蝕電位值由-350~-400mV，往正電位值方向移動至-50 ~ +50 mV 之間，鋼筋趨於再鈍化狀態。
9. 鋼筋腐蝕速率(腐蝕電流密度)由 2.5 至 3.0 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 大幅降至 0.8 至 0.6 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 之間，鋼筋的腐蝕狀況已獲良好的改善。

參考文獻

1. Mindess, S. and J. F. Young, Concrete, Prentice-Hall, N.J., U.S.A., (1981).
2. Mehta, P. K., Concrete, Prentice-Hall, N.J., U.S.A., (1986).
3. Enevoldsen, J. N. and C. M. Hansson, "Binding of Chloride in Mortar Containing Admixed or Penetrated Chlorides," The International Journal of Cement and Concrete Research, Vol.24, No.8, pp.1525-1533 (1994).
4. Arya, C., N. R., Buenfeld and J. B. Newman, "Factors Influencing Chloride-Binding," The International Journal of Cement and Concrete Research, Vol.20, No.2, pp.291-300 (1990).

5. Arya, C. and Q. Sa' id-Shawqi, "Factors Influencing Electrochemical Removal of Chloride from Concrete," The International Journal of Cement and Concrete Research, Vol.26, No.6, pp.851-860(1996).
6. Tritthart, J., "Electrochemical Removal of Chloride from Hardened Cement Paste," The International Journal of Cement and Concrete Research, Vol.23, pp.1095-1104(1993).
7. Chatterji, S., "Simultaneous Chloride Removal and Realkalinization of Old Concrete Structures," The International Journal of Cement and Concrete Research, Vol.24, No.6, pp.1051-1054(1994).
8. Bennett, J. E. and T. J. Schue, "Electrochemical Chloride Removal from Concrete: A SHRP Contract Status Report," Corrosion 316, April 1990.
9. Kennedy, D., "Review of Chloride Extraction and Re-alkalisation of Reinforced Concrete"
10. Hansson, I. L. H. "Electrochemical Extraction of Chlorides from Concrete Part I - A Qualitative Model of the Process," The International Journal of Cement and Concrete Research, Vol.23, pp.1141-1152(1993).
11. "Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete", ASTM C876-91(1996).
12. 簡坤葦, 「利用電化學方法去除混凝土中氯離子成效之研究」, 國立中央大學土木工程研究所, 碩士論文, 中壢, 民國 87 年 6 月。
13. 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」, 國立中央大學土木工程研究所, 博士論文, 中壢, 民國 88 年 6 月。

金屬熔射工法應用於 RC 結構物之防蝕探討

陳建州*

摘 要

金屬熔射的發展歷史並不算短，應用於金屬表面防蝕方面已相當廣泛，而且也經由時間及試驗證實是相當良好的防蝕工法，然而熔射應用於鋼筋混凝土結構物方面目前最主要還是保護鋼筋銹蝕，因為鋼筋銹蝕後體積膨脹相當大，為避免鋼筋銹蝕嚴重進而破壞混凝土結構，造成危害。因此特結合金屬特性之線材技術，配合金屬熔射工法應用於鋼筋混凝土結構物上作為防蝕。

本文最主要為探討金屬熔射應用於鋼筋混凝土結構物之防蝕，係採用陰極防蝕的方式將金屬熔射應用於鋼筋及混凝土表面，不只鋼筋受到保護，包含混凝土本身也受到金屬熔射塗層的保護以延長鋼筋混凝土維修及使用年限。

The Study on Metal Thermal Spraying Technique application of Reinforced Concrete Construction anticorrosion

Eddie Chen

ABSTRACT

History of metal thermal spraying is long time ago . Metal thermal spray is very extensive use to metal surface for corrosion . It could prove to anticorrosion what could reinforced concrete construction for main of steel anticorrosion . Because reinforcing bar is use steel bar rolling to contracted to reinforced bar , So when physical dilatation what would done damage to the concrete construction . We combinative metal characteristic of wire technique with thermal spraying by reinforced concrete construction anticorrosion .

* 穩發實業有限公司 董事長

Now to study anticorrosion use metal thermal spraying to concrete construction . It is include reinforced bar and concrete construction surface could to protect and extension .

一、前言

鋼筋混凝土結構為一種非常特殊的複合材料，其組合為水、水泥、骨材、鋼筋等四種以上性質完全不同的材料所組成。鋼筋混凝土結構物中的鋼筋為重要的結構構件，因此如何保護鋼筋不被銹蝕為一重要課題。金屬熔射工法在目前確實為取代鍍鋅並逐漸廣為使用，且熔射具有高度的施工方便性及環保性可以使用在講求環境保護的現代。

二、金屬熔射的發展與應用

1909 年瑞士 Schoop 發明熔射技術主要用於工藝品。

1921 年成功的發展出電弧式金屬熔射。

1930 年金屬熔射開發應用在防蝕上。

1962 年日本導入 Plasma 熔射。

1970 年北美多座橋樑使用鋅鋁熔射塗裝。

1967 年美國陸軍和國家標準局 (NBS)，針對 H-型鋼板裝採用鋁熔射防蝕技術，進行現場作業評估，經十年後熔射塗層仍然良好。

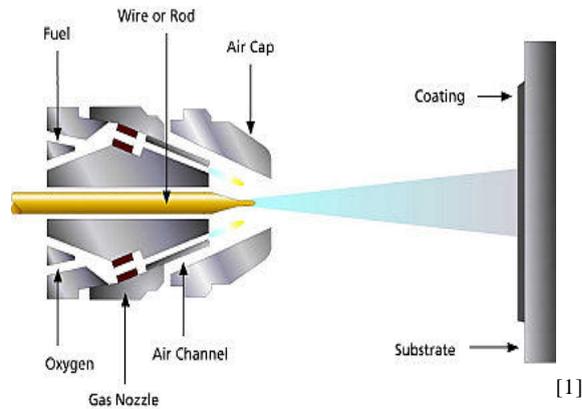
1974 年英國鋼鐵公司 (British Steel Corp.) 曾分別完成 10 年期鋁熔射鋼材試片之現場作業評估，顯示鋁塗層具有犧牲陽極型陰極防蝕，並達到陰極防蝕之成效。

1977 年英國標準局依熔射塗層在 19 種環境中，利 20 年之試驗評估結果，而將鋅鋁熔設技術列入該局實用檔案資料(British Standard Institute Code of Practice)。

1979 年 B. Raclot 在法國境內多處海域，進行鋅鋁熔射鋼材試件之浸泡與塗層電位變化追蹤評估，證明鋁塗層仍具犧牲陽極型陰極防蝕效果。

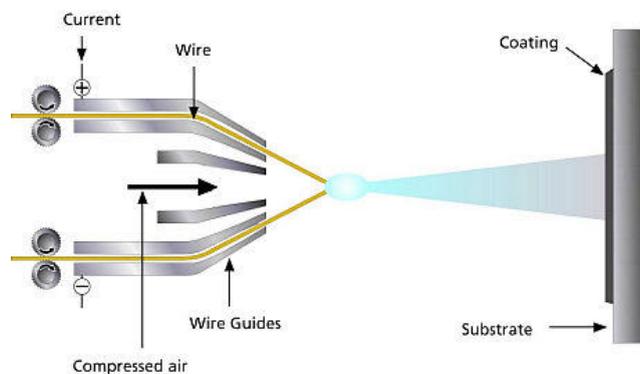
三、金屬熔射之分類

3.1 Flame 熔射



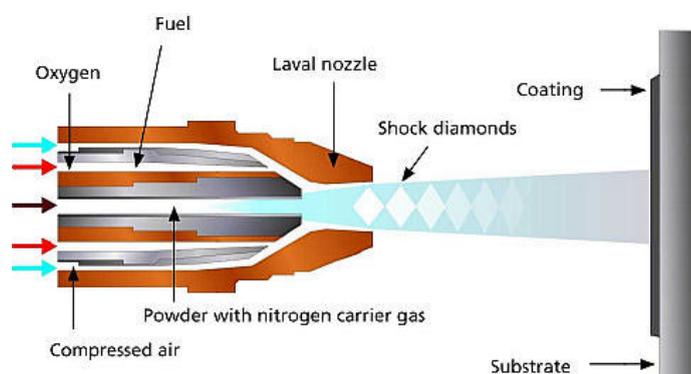
Flame 熔射係利用燃料與氧氣混合燃燒反應所產生之熱量作為熔融噴覆物之熱源，技術之優點為：投資經費低，儀器設備易於攜帶及操作。缺點則為：噴覆物與基材間之鍵結強度較低、孔性較多，會有較高熱量轉移至基材表面之情形產生^[2]。

3.2 ARC 熔射



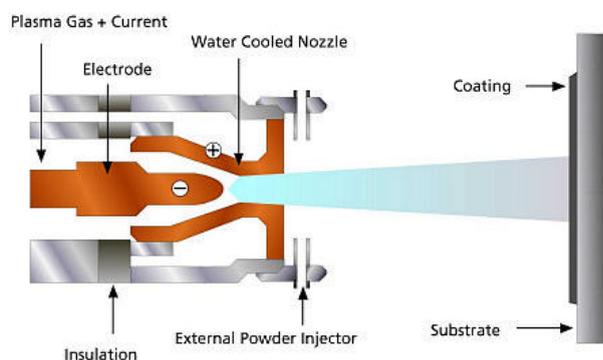
ARC 熔射法並不需要燃燒氣體之供應，但須以壓縮空氣作為熔融噴覆材之吹送使用，電弧熔射適用於現場作業，由於使用電弧作為熱源，因此具有超高熱量，此種超熱作用，會使噴覆物與基材間增強附著力。

3.3 HVOF 熔射 (High Velocity Oxygen Fuel)



HVOF 熔射技術係 1955 年由美國聯碳公司所建立，其原理係利用氧氣混合比例增大時之非穩定燃燒，由所形成之前端震波（可達音速 3~10 倍）將熔融之粉末噴覆物傳送至基材表面而形成噴覆塗層。本項熔射可以產生極大之壓力，故可形成高緻密度，高鍵結力之優良塗層。

3.4 Plasma 熔射



Plasma 熔射法係利用電漿作為熱源，以熔融粉末狀噴覆材，此種方法可精確地溫控，使溫度恰好在固體粉末噴覆材熔點之上。設計上電漿之產生係採用具不同高壓之電極以形成電弧區，在由此電弧將通過該區之惰性氣體予以離子化後形成電漿，然後再將噴覆材進料後，在此電漿之高溫下熔融，並藉氣體隻吹送而噴覆於基材表面。

四、鋼筋混凝土結構物之腐蝕原因

鋼筋混凝土結構物雖然在學理上因水泥之鹼性（PH 值在 12.5~13.2 之間）使埋設在內部之鋼筋產生鈍態之 α - Fe_2O_3 保護膜及混凝土保護層可保護鋼筋之腐蝕，但是實際運用上由於混凝土本身難以避免之龜裂特性，孔隙之存

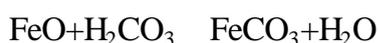
在，吸水性及毛細管之作用，再長期暴露天候使用情形下一使外面之水分或水氣入侵內部。鋼筋混凝土施工中難以 100%品質控制，保護層厚度不易維持一定標準及施工時搗實不均造成蜂窩加速混凝土鹼性 PH 值之降低，導致混凝土之中性化，氯化物入侵造成鋼筋加速腐蝕造成鋼筋混凝土結構物破壞^[3]。表 1 為標準卜特蘭水泥型別及用途^[4]。

表 1 標準卜特蘭水泥型別及用途

型別	使用範圍	常用用途
TYPE I	適合各種用途，不具備有其他型別水泥的特殊性質。通常使用在不特別暴露的環境中，即沒有土壤或水中硫酸鹽侵蝕，或是沒有因水化作用產生大量熱量導致品質劣化問題之處。	鋪面及人行道、鋼筋混凝土建築物、橋樑、鐵路結構、水槽及蓄水池、管線、水管及污工單元。
TYPE II	使用在必須抵抗中等硫酸鹽侵蝕的地方，如排水結構中可能硫酸鹽集中在地下水內，其濃度比一般高，但並不是很嚴重。TYPE II 水泥通常會產生比 TYPE I 水泥較慢且較少的熱量，此種中度熱量的水化使 TYPE II 水泥能使用在相當大的巨積結構。它的使用能減低溫度的上升，特別是在溫暖天氣狀況下澆置的混凝土。	大的橋墩、重力式橋台及重力式檔土牆。
TYPE III	高強度卜特蘭水泥，能在早期提供強度，通常是一週內或更短。	一般使用在必須儘快拆除模板或結構體必須儘快使用時。冷天時，可允許減少所需控制的養護時間。雖然富配比的 TYPE III 亦能獲得高早期強度，但 TYPE II 高早強的卜特蘭水泥可以提供更令人滿意及更經濟的效果。
TYPE IV	低水化熱水泥，使用在必須減少水化熱的地方，其強度發展速率比 TYPE I 水泥慢。	應用於巨積混凝土結構中，如大型重力，當其產生的熱量會使溫度上升，是一個危險的因子。
TYPE V	抗硫水泥，只使用在混凝土暴露在嚴重硫酸鹽侵蝕作用的地區，主要在於土壤中或地下水具高硫酸鹽含量處。	硫磺礦區附近，溫泉區域之建築物。

4.1 混凝土中性化與鋼筋生銹之關係^[5]：

混凝土 PH 值保持在 12 以上時，因鹼性強，鋼筋表面產生 α Fe_2O_3 氧化膜為一種鈍態保護膜致鋼筋受保護而不易腐蝕，但因受空氣中之 CO_2 反應，PH 值逐漸降低，上述功能亦隨著退失。埋設於混凝土內之鋼筋則由於 H_2O ， O_2 ， CO_2 或 Cl_2 之入侵，破壞該項氧化膜而發生腐蝕電位差產生下列反應式致生銹：



生銹之鋼筋體積變為原有之二倍以上，致將其周圍之混凝土保護層脹裂而發生龜裂，該項龜裂將沿著鋼筋擴展。水氣及二氧化碳或氯離子及由裂縫入侵，增加中性化 1 為鋼筋混凝土因鋼筋銹蝕而產生混凝土結構物爆裂、剝落。



1 鋼筋混凝土結構物因鋼筋銹蝕而造成結構物爆裂、剝落

鋼筋之生銹與未銹蝕部份因發生電位差至產生局部電流電池作用。在水氣媒介下，以電化學之原理使整個連接一體之鋼筋銹蝕。鋼筋銹蝕部分 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 從鋼筋本體剝落致鋼筋越來越細，終致鋼筋銹斷，鋼筋混凝土結構物因此而崩潰。

使用鹼性強之水泥且在水密性高之混凝土，上述之中性化反應甚為緩慢，水灰比大之混凝土其水分乾燥後遺留甚多毛細孔 (Macro pore) 此種孔細率大之混凝土易滲透水氣。如乾縮導致龜裂時，上述現象更快發生。因此為防止混凝土中性化，除應採用水灰比低、水密性高之混凝土外並應採用水化作用時能多產生 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 以提高 PH 值之水泥而避免使用混合 pozzolana

材料之混合水泥，如矽灰水泥、爐渣水泥或飛灰水泥等。據日本混凝土專家何野俊夫先生長期研究實驗證實使用高爐水泥、飛灰水泥及矽灰水泥均較普通波特蘭水泥(TYPE I)中性化速度快且深，如表 2，使用的混凝土水灰比越大時中性化越嚴重，如表 3。

表 2 水泥種類與混凝土之中性化速度

水泥之種類	試 驗 條 件		
	CO ₂ (加速) 5 個月	大氣曝露 5 年	室內保存 5 年
普通卜特蘭水泥 (TYPE I)	10 (1)	2.6 (1)	6.9 (1)
早強卜特蘭水泥 (TYPE III)	4 (0.4)	1.5 (0.6)	4.6 (0.7)
高爐水泥 (爐渣 含量 30%)	11 (1.1)	2.9 (1.1)	8.7 (1.3)
矽灰水泥	12.5 (1.3)	3.4 (1.3)	9.9 (1.4)

註：中性化深度 mm, () 為對卜特蘭水泥值之比例

表 3 影響混凝土中性化速度之水灰比

混凝土種類		以 CO ₂ 加速		大氣曝露	
W/C	混合物	6 個月	1 年	1 年	6 年
0.69	無	20 (1.3)	25 (1.4)	4 (2.0)	7.5 (2.5)
0.60	無	15 (1)	18 (1)	2 (1)	3 (1)
0.50	無	10 (0.7)	12 (0.7)	1 (0.5)	1.5 (0.5)
0.55	無	10 (0.7)	12 (0.7)	1.5 (0.8)	1.8 (0.6)

註：中性化深度 mm, () 為對 W/C0.6 時之比例

4.2 化學侵蝕作用

自從 1938 年兩位專家 Stanton 及 Meder 先生明白指出混凝土之抗硫酸鹽侵襲與水泥內含有 C₃A 成分有極密切關係。

A.C.I.有明文規定硫酸鹽 SO₄ 含量在 150~1500ppm 時應採用 Type II 水

泥，在海水中、潮汐帶、飛沫帶及 200m 以內之地域應採用 Type V 水泥。在海邊不直接受海水飛沫影響之陸地構造物，距海 200~1000m 及海邊風大之地域距海 10000m 以內之構造物應採用 Type II 水泥。表 4 為混凝土應用於防阻鹽害建議表。

表 4 混凝土材料應用於防阻鹽害建議表

暴露情況	土中水溶性硫酸鹽 (SO ₄) %	水中硫酸鹽 p.p.m	水泥
輕度	0.00-0.10	0.00-150	-
中度	0.10-0.20	150-1500	Type II
嚴苛	0.20-2.00	1500-10000	Type V
極嚴苛	2.00 以上	10000 以上	Type V+波索蘭物質

4.3 鹼質骨材反應

混凝土之化學分解最常見者為水泥中之鹼質骨材反應，骨材因含有酸性的矽酸鹽及鋁酸鹽，或鹼性的碳酸鈣或碳酸鎂，如果受到水泥中或混凝土中之強鹼，如氫氧化鈣、氫氧化鈉或氫氧化鉀的接觸，將產生中和作用，或堆積沉澱作用，而發生鹼骨材反應，因為這種反應產生有害之膨脹作用，使骨材分解。其反應式如下：



並非只有矽酸類的骨材材會發生鹼骨材反應，如果骨材為含白雲時的石灰岩質 (MgCO₃/CaCO₃)，又含少量黏土，一般此類岩石礦物之白雲石顆粒非常細小，多量細粒方鎂石 (MgO)，含介入黏土包含均佈之白雲石及方鎂石下，則很可能有下列鹼骨材反應發生：



4.4 鋼筋混凝土內之鋼筋腐蝕

鋼筋混凝土結構物對埋置於內部之鋼筋具有防蝕作用主要為鋼筋在混凝土中陽極化後在鋼筋表面形成鈍態之 α -Fe₂O₃ 保護膜所致。但當混凝土被碳化 PH 值在 10 以下並經水氣及氯離子侵入鋼筋表面時上述鈍態而具有抗蝕性之保護膜則亦或即被破壞導致產生腐蝕電位差而銹蝕。

4.5 鋼筋混凝土腐蝕的電化學反應^[6]

陰極防蝕是目前廣泛使用的金屬防蝕方法之一，其源於 1824 年 H.Davy 利用鐵和鋅來保護木製船的銅質配件。1920 年代，美國更廣泛的運用此技術保護墨西哥灣油田附近的地下油管。延溯至今，陰極防蝕技術已發展成為可為鋼筋混凝土作為一種有效的防蝕工程技術。陰極防蝕的基本原理為降低金屬電位，往負值的方向進行，達到金屬防蝕的目的。

鋼筋混凝土中鋼筋的腐蝕為一電化學反應，在混凝土中產生電化學電位，使電流從金屬的表面流出，經由導電的溶液，進入另一個區域，期間牽涉到電子的轉移，構成氧化和還原反應的條件，其基本要項有陽極、陰極、導電通路電流及電解液五種，這五種條件分述如下：

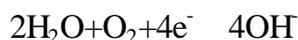
(1)陽極(Anode)：

陽極為氧化反應，鐵釋放電子而形成鐵離子，反應化學式為：



(2)陰極(cathode)

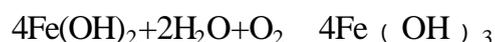
陰極發生水的還原反應，水與空氣中的氧吸收電子而形成氫氧根離子，反應化學式為：



待氫氧根離子產生之後，鐵離子會與之結合形成沉澱，進而氧化產生鐵銹。沉澱作用之反應化學式為：



氧化作用之反應化學式為：



(3)導電通路(conducting path)：

氧化還原反應均需有電子轉移才會發生，所以有良好的導電線路，腐蝕作用才能順利進行。

(4)電流(corrosion current)：

要產生腐蝕必須有足夠的電子數，才可以使離子化反應順利進行。也就是要有足夠的電動勢才可驅動電子的流動。

(5)電解液 (electrolyte)：

電化腐蝕需在有水分或潮濕狀態下才會發生，因離子在電解液蝕移動速度較快，而易導致腐蝕。

五、金屬熔射塗層之特性及使用之材料

目前應應用於金屬熔射的材料大致有不銹鋼、鎳、銅、鋅、鋁、鋅鋁合金、鋅銅合金.....等等。

5.1 金屬熔射塗層之特性：

金屬熔射技術通常具有下列諸項優點：

- (1)金屬熔射噴塗的物件尺寸與形狀並無特別限制。
- (2)金屬熔射的施工作業可以在工廠或現場執行較具方便性。
- (3)噴塗相同尺寸之物件施作可採用自動化作業以節省成本。
- (4)金屬熔射塗層之膜厚可視保護程度予以控制，增加陰極防蝕的效果。
- (5)金屬熔射施工迅速簡單。
- (6)金屬熔射層與基材有比較佳之附著力。

表 5 為熔射種類、操作溫度及熔射塗層特性^[7]

表 5 熔射種類、操作溫度及熔射塗層特性

熔射種類	溫度 ()	孔隙率	結合強度 (psi)
Plasma 熔射	12000	>5%	5000-10000
	16000		
ARC 熔射	NA	>5%	2000-5000
Flame Powder 熔射	2800	>5%	1000-7000
	3000		
Flame Wire 熔射	2800	>10%	1000-5000
	3000		
HVOF 熔射	2000	1~5%	7000-12000
	3000		

5-2 金屬熔射使用之材料

金屬熔射材料最常用者為鋅與鋁，鋅和鋁均較鋼鐵材質具有活性電位，但腐蝕率卻較鋼鐵材質為低，鋅、鋁及鐵材之相關電位及性質電位如表 6。鋅材標準電位-0.76V (SCE) 雖較鋁材-1.66V (SCE) 為鈍性，但在鋼鐵材質表面形成熔射塗層後，因塗層之組成發生改變，使得鋅塗層之電位-1.07V(SCE)反而較鋁塗層-0.87V (SCE) 為活性，因此鋅塗層可作為鋁材之保護作用^[8]。

表 6 鋅、鋁及鐵材之相關電位及性質

金屬	密度 (g/cm ³)	電位 (V) (SCE)		安定範圍之 PH 值	大氣中典型腐蝕生成物
		標準	塗層		
Zn	7.14	-0.76	-1.07	6~12	2ZnCO ₃ · 3Zn (OH) ₂ ; ZnO
Al	2.72	-1.66	-0.87	4~8	Al ₂ O ₃ · 3H ₂ O ; AlO (OH) ; Al (OH) ₃
Fe	7.87	-0.44	0.045	無	FeOOH; Fe ₂ O ₃ · XH ₂ O

鋅或鋁熔射塗層均可適用於海洋性及工業性大氣環境中，鋅熔射塗層在 PH=5~12 範圍之腐蝕速率較低，因此鋅熔射塗層較適用於為鹼性環境中，鋁熔射塗層在 PH=4~8 範圍之腐蝕速率較低，故微酸性環境中，則以鋁熔射較適宜。鋅熔射具有較強之電化學活性，能夠產生伽凡尼(Galvanic action)作用以提供較多之犧牲陽極型陰極防蝕功能。

六、國內環境金屬熔射應用之探討

台灣大氣環境除溼度、鹽分高外，工業污染濃度亦高，且經過環保署委託國立台灣大學環工研究所鄭福田教授主持為期四年之台灣全省酸雨調查研究 (79~82 年)，在全省 10 處測試站所收集之雨水酸性質 (PH 值) 60% 在 5.6 以下，亦即為酸雨，台北市最嚴重為 4.15，即使是最鄉村型態之台東大馬里，雨水 PH 值亦為 4.83，調查結果亦顯示冬天最為嚴重，夏天較好。

由此報告凸顯出台灣環境對鋼筋混凝土的破壞程度是相當深且遠，金屬熔射工法應用於鋼筋混凝土結構物在國外已行之有年，國內雖然陸續有鋼構造物使用金屬熔射工法作為防蝕塗裝，但畢竟少之又少。因此為提升國內防蝕塗裝技術再精進，希望以鋼筋混凝土構造物之金屬熔射藉以達成陰極防蝕。

鋼筋混凝土內鋼筋之銹蝕，目前各先進國家已傾向於陰極防蝕法辦理，國內的對策應該在修復構造物及新建建物前提出合適的方式，設計者對於電解條件及腐蝕電池之產生環境或因素先加以改善消除始可收效。

6.1 鋼筋混凝土應用金屬熔射之陰極防蝕

整體來說最有效的鋼筋混凝土防蝕是採用陰極防蝕方法，目前國外文獻及實例中已有貼覆鋅片而達到陰極防蝕的效果。國內也有相關的研究報告。若能將貼覆鋅片以熔射工法取代相信效果一定能超出貼覆鋅片。由於混凝土表面有一定的粗糙度對熔射來說是一個相當好的披覆面。鋼筋混凝土的腐蝕速率和水灰比的大小有關，當減少水灰比可以降低腐蝕量。在固定氯離子濃度下，改變不同的水灰比，較高的水灰比必須使用較多量的鋅來進行防蝕，而金屬熔射正可以提供此一方式。

6.2 鋼筋混凝土結構物金屬熔射施工流程

混凝土結構物金屬熔射施工流程：

6.2.1 修補作業流程：

1. 舊有銹蝕鋼筋混凝土表面敲除。
2. 銹蝕鋼筋噴砂處理。
3. 混凝土乾燥處理。
4. 鋼筋金屬熔射。
5. 批覆導電性水泥保護鋼筋。
6. 待混凝土乾燥後再噴塗金屬熔射。
7. 封孔。
8. 完成。

6.2.2 新施作之鋼筋混凝土流程：

1. 鋼筋彎紮噴砂除銹。
2. 金屬熔射層處理。
3. 澆置混凝土。
4. 拆模乾燥。
5. 底板噴塗金屬熔射。
6. 封孔。
7. 完成。

表 7 為鋅鋁熔射腐蝕速率表

環境	腐蝕速率 ($\mu\text{m}/\text{年}$)	耐用年限	膜厚
田園山區鄉村	0.35	100 以上	80
都市工業地帶	0.7	100	80
沿海地帶	1.1	100	110
海水損害地帶	1.7	100	(1) 150+塗裝 (2) 170

註：1.本表係依據日本現採用之不同地區腐蝕環境熱浸鍍鋅最高腐蝕速率計算而成。

2.經過噴鹽霧試驗 Zn-Al 熔射之耐蝕性約為熱浸鍍鋅之四倍壽命。

6.3 實驗室加速腐蝕試驗：

為了解金屬熔射防蝕工法之可行性可於實驗室做加速腐蝕試驗。

6.3.1 鋼筋混凝土試體

以乾濕浸泡試驗，比較鋅熔射與鋅鋁熔射(95% Zn, 5% Al)之陰極防蝕效果，並選擇導電性水泥，瞭解其對常溫金屬熔射防蝕之助益。試體包括：

- 1.鋅熔射 + 導電性水泥。
- 2.鋅熔射 + 一般砂漿水泥。
- 3.鋅鋁熔射 + 導電性水泥。
- 4.鋅鋁熔射 + 一般砂漿水泥。

6.3.2 鋼筋混凝土試體

以乾濕浸泡試驗，瞭解常溫金屬熔射層消耗後，腐蝕產物對混凝土間鍵結(Bonding)能力之影響，取樣檢驗時程為乾濕浸泡第 0、30、60、90 日，試體包括：

- 1.導電性水泥 + 鋅熔射 + 一般砂漿水泥。
- 2.導電性水泥 + 鋅鋁熔射(95% Zn, 5% Al) + 一般砂漿水泥。

6.3.3 鋼鐵試體

以鹽霧試驗(CNS 8886-Z8026, ASTM B117)，瞭解常溫金屬熔射在不同

pH 值環境中(如濱海大氣、工業區大氣、混凝土結構中)之耐蝕性。鹽霧試驗 3600 小時，試驗條件如下：

1. 鋅鋁熔射(80% Zn, 20% Al) , 鹽霧試驗 pH=7。
2. 鋅鋁熔射(65% Zn, 35% Al) , 鹽霧試驗 pH=4。
3. 鋅熔射 , 鹽霧試驗 pH=13。

表 8 為金屬熔射處理後之防蝕年限 (摘錄自 BS 5493)

表 8 金屬熔射處理後之防蝕年限 (摘錄自 BS 5493)

使用之環境	最初修補之年數	熔射處理之種類及厚度 (ì m)							
		Al 熔射	Zn 熔射	Al 熔射+封孔	Zn 熔射+封孔	Al 熔射+塗裝	Zn 熔射+塗裝	Al 熔射+封孔+塗裝	Zn 熔射+封孔+塗裝
無污染內陸地區之外部構造物	20 年以上 10~20 年	150 100	150 100	100	150 100	30-50	30-100		
有污染內陸地區之外部構造物	20 年以上 10~20 年 5~10 年	150 100	250 150 100	150 100	150 100			60-100	60-100
有污染海岸地區之外部構造物	20 年以上 10~20 年 5~10 年	150	250 150 100	150 100					
乾燥之內部構造物	20 年以上 10~20 年	100	100			30-100	30-100		
潮濕之內部構造物	20 年以上 10~20 年	150 100	150 100	100	100			30-100	30-100
淡水中之構造物	20 年以上 10~20 年	150	150	100	150			30-100	30-100
海水潑濺區之構造物	20 年以上 10~20 年 5~10 年 5 年以下		250 150 100	150 100	250 175 150	60-100	60-100		
海水浸泡中之構造物	20 年以上 10~20 年		250	150	250 150	60-100	60-100		

6.4 陰極防蝕保護標準

根據美國腐蝕工程師協會制定之 Standard RP-01-69，陰極保護驗證的方法最常採用的是 4 小時電位衰退量，為了確認陰極防蝕的效果，可以在穩定後進行斷電測試。瞬間斷電會獲得一瞬間電位，之後電位會逐漸往未實施陰極防蝕的電位方向移動。經過 4 小時後紀錄鋼筋的電位再求瞬間電位及斷電 4 小時後的電位之間的差值，此值稱之為 4 小時電位衰退量，如果 4 小時電位衰退量大於 100mV 則顯示陰極防蝕工法已達到保護鋼筋的效果。

6.5 鋼筋腐蝕檢測

鋼筋的腐蝕性或物理性質的檢測是判斷鋼筋腐蝕的最直接的方法。但是由於鋼筋混凝土是一複雜的材料，測量鋼筋的腐蝕速率或腐蝕量並不是容易，以下介紹目前常用的方法。

1. 腐蝕電位圖

使用一個高輸入阻抗的電位計，一端接一參考電極，另一端接鋼筋，就可以測得鋼筋的腐蝕電位。依據 ASTM C876-85 標準，腐蝕電位在 -350mV (Cu/CuSO₄) 以下時有 95% 的可能發生腐蝕。腐蝕電位在 -200mV (Cu/CuSO₄) 以上時，腐蝕發生機率在 5% 以下。雖然此一方法相當簡便，但是得出的數據只能指出鋼筋是否發生腐蝕的可能性，卻無法告知鋼筋的腐蝕速度。

2. DC 線性極化法

DC 線性極化法的偵測必須利用三極式 (工作電極、參考電極、輔助電極) 才能求得極化圖之斜率，以求得腐蝕狀況。基於 Stern-Gearey 理論推算腐蝕速率如下：

$$\text{腐蝕電流密度} = \frac{\hat{a}\hat{c}}{2.3(\hat{a} + \hat{c})} * (\Delta I / \Delta E) = B / R_p$$

式中 \hat{a} = 陽極 Tafel Slope

\hat{c} = 陰極 Tafel Slope

ΔI = 電流

ΔE = 電位變化

B = Stern-Gearey 常數

R_p = 極化電阻

DC 線性極化點的優點，包括可以很快的求得腐蝕速率；但由於混凝土多孔性，極混凝土的組隔會造成參考電極和工作電極之間的電阻過大，而造成偏差。

3.AC 交流阻抗法

當利用線性極化法測量腐蝕速率時，鋼鐵介面腐蝕機構並無法確切得知，若電解液的導電度不夠，會因 IR Drop 過大而扭曲測試結果。交流阻抗法是藉由小的交流訊號輸入（一般為 10mV 的正弦波），如此可以在雜訊中得到準確的金屬表面資訊，所以 AC 交流阻抗法，不但能克服導電度過小的問題，更能由量測結果推斷腐蝕機構、極化電阻等。AC 交流阻抗法可測得混凝土比電阻或溶液電阻（ R_s ）、鋼筋表面極化電阻（ R_p ）極電容值（ C_p ），所得結果以 Nyquist Plot 表示。Nyquist Plot 圖形可分析其等效電路，並得以了解鋼筋於混凝土內的腐蝕機構。腐蝕速率可依據極化電阻（ R_p ）來推斷。基於各種實際情形所影響，往往會出現扭曲的圖形，因此須配合不同型態的圖做合理的判斷。腐蝕速率再由下式求出：

$$R_{ct}=R_p-R_s$$

$$I=(B/R_{ct}*A)*1000$$

式中 R_{ct} =電荷轉換電阻（charge transfer resistance），ohms

R_p =極化電阻（polarisation resistance），ohms

R_s =溶液電阻（solution resistance），ohms

A =輔助電極所涵蓋鋼筋表面積， cm^2

I =腐蝕電流密度（單位： $\mu A/cm^2$ ）

B =Stern Gearey Constant（mV）

一般而言 B 值在鋼筋腐蝕狀況下，通常取 26mV。

4.腐蝕電位和混凝土電阻同時測量^[8]

測量混凝土電阻可以使用測量電阻的 Wenner Method。利用數學模式腐蝕電位和混凝土電阻可以用來預測亦可以進一步來輔助腐蝕電位來判斷腐蝕速度的大小。當腐蝕電位在 -350mV（Cu/CuSO₄）以下時，若混凝土電阻大於 12KΩ/cm，則腐蝕速度很小，但如果混凝土電阻小於 5KΩ/cm 時，則腐蝕速度會很大^[3]。

5.其他檢測技術

近年來，非破壞檢測，簡稱 NDT，已慢慢運用到各項工程上，而在腐蝕檢測上也已漸漸運用上，常用的有超音波檢測等。

6.6 鋼筋腐蝕量計算公式

由於鋼筋腐蝕後會造成鋼筋截面積的減少，我們可以以下面的公式算出鋼筋腐蝕後的斷面積：

根據 Faraday 公式：

$$\Delta w = AIt / ZF$$

其中 Δw = 鋼筋腐蝕所損失的重量

A = 鐵的原子量 56g

I = 腐蝕電流 (amp)

t = 腐蝕時間 (sec)

Z = 電子轉移量

F = Faraday 常數 (96500amp sec)

鋼筋腐蝕所造成的損失重量，可表示為：

$$\Delta w = a \rho \Delta a$$

其中 a = 在腐蝕前的鋼筋表面積

Δa = 減薄厚度

ρ = 鐵的密度 (7.86g/cm³)

腐蝕電流又可以表示為：

$$I = ia$$

其中 i = 腐蝕電流密度

將 $\Delta w = a \rho \Delta a$ 及 $I = ia$ 帶入 $\Delta w = AIt / ZF$ 式中可得鋼筋腐蝕後減薄厚度：

$$\Delta a = Ait / \rho a ZF$$

6.7 鋼筋混凝土結構的壽命預測模式

檢測鋼筋或混凝土不外乎要能預測此結構物的殘留壽命，以便採取正確和經濟的防蝕或保護措施。一個受腐蝕影響的鋼筋混凝土結構物的壽命決定

於兩個階段的時間長短。第一階段是從混凝土變質到鋼筋開始腐蝕，這段期間可訂為 t_0 。 t_0 的大小和碳化速度及氯離子滲入速度有關係。目前已有數學模式可以用來預測不同材質環境下的 t_0 大小。

第二階段是從鋼筋開始腐蝕到結構承受力因腐蝕而低於其使用要求時為止。這段期間長為 t_1 。 t_1 的大小和腐蝕速度有關。因為腐蝕會造成鋼筋截面積減少，降低鋼筋的承受強度，造成混凝土剝落，影響其支撐力量，所以腐蝕速度決定鋼筋結面減小的速度及 Bending Moment 損失速度。使用上述各種技術可產生有關腐蝕速度，腐蝕生成量的定量資料再配合結構性安全性分析應該可以預測 t_1 的大小。整個結構物的壽命為 t ， $t=t_0+t_1$ ，由於 t_0 可以預測， t_1 可以在測量後預測，因此結構物的壽命可以推算出來。

七、結論及建議

本工法中鋼筋混凝土結構物所補強的工法是運用金屬熔射的應用及工法，譬如很高的強度/重量比值、抗腐蝕性等優點；而防蝕工法則是用陰極防蝕法中的犧牲陽極法，採用的陽極是鋅所作成的。然而要將補強與防蝕技術同時進行時，必須加以設計考慮，由於金屬熔射附著於鋼筋及混凝土的表面上，因此能在防蝕及補強上找到一平衡點。

在防蝕技術上，金屬熔射的確是可以達到防蝕效果，使用上也很方便，工法較傳統及加入外加電流之方法較為簡便；因此金屬熔射防蝕工法與其他防蝕工法相互比較是一種較為簡單且方便的方式。

在一些文獻的實驗中可以發現在較低水灰比的混凝土中所需的鋅的量遠較高水灰比的混凝土來的少，因此在較低水灰比的混凝土補強上所受到的限制將較小，而高水灰比的混凝土由於所需的鋅含量較多，金屬熔射塗層也可以將熔射膜加厚用以提供所需犧牲之電極。

本工法中，主要將金屬熔射完全附著於鋼筋混凝土上，因此鋼筋混凝土上之效果能達到陰極防蝕之作用。

由於氯離子的存在會造成鋼筋的孔蝕現象 (pitting corrosion)，往往不易偵測，真正腐蝕的面積非常小，但其破壞往往是非常嚴重的，並不可輕忽之。

金屬熔射系統應用的範圍確實是非常的廣泛，除了陰極防蝕外，在藝術工藝上也有其一片天地。國內營建業長期以來構件都使用鍍鋅，但在環任意識抬頭的今日，有必要再重新作思考。金屬熔射是兼具環保的施工方式，

並不像熱浸鍍鋅需酸洗造成水質污染。因此希望未來幾年國內工程技術能再向上提升，達到與先進國家同樣的水準或者更好，讓我們的下一代有幸福美滿的將來。

參考文獻

1. Plasma & Thermal Coating Applied Surface Technology LTD.
2. 林義宗，台灣港灣及濱海結構鋼材使用金屬熔射之可行性，*港灣技術*，第九期，中華民國 83 年 6 月，第 1~14 頁。
3. 莊秋明，台灣混凝土橋樑等結構物腐蝕之危機與其防蝕技術，*台灣公路工程*，第二十四卷第九期，中華民國 87 年 3 月，第 17~38 頁。
4. 黃兆龍，*混凝土性質與行為*，詹氏書局，中華民國 89 年 3 月。
5. 莊秋明，台灣混凝土橋樑等結構物腐蝕之危機與其防蝕技術探討，*結構工程*，第十一卷第三期，中華民國 85 年 9 月，第 111~130 頁。
6. 胡志超，*鋼筋混凝土樑結合補強及防蝕技術之開發*碩士論文，中華民國 89 年 7 月。
7. 酈唯誠、李裕文、張為傑，奈米材料之熔射技術與應用，*工業材料*，第 153 期，中華民國 88 年 9 月，第 124~129 頁。
8. 施建志，鋼筋混凝土結構物的檢測，*材料與社會*，第 75 期，中華民國 82 年 3 月，第 83~85 頁。