

海洋環境下鋼筋混凝土與鋼材構造物
陰極防蝕技術與應用研討會
論文集



交通部運輸研究所
主辦單位：中華民國防蝕工程學會
台灣海洋工程學會

中華民國 九十三年 九月 十五~十六 日
交通部運輸研究所港灣技術研究中心
梧棲 台中

海洋環境下鋼筋混凝土與鋼材構造物 陰極防蝕技術與應用研討會 論文集

目 錄

構造物之腐蝕劣化檢測與防蝕維護策略.....	陳桂清.....	1-1
腐蝕與防蝕概論.....	翁榮洲.....	2-1
RC 構造物陰極防蝕設計與驗收.....	劉益雄.....	3-1
RC 構造物陰極防蝕準則(草案)介紹.....	羅俊雄、翁榮洲、陳桂清、饒正 ...	4-1
RC 構造物犧牲陽極式陰極防蝕案例介紹.....	陳哲生.....	5-1
外加電流式陰極防蝕在橋樑與碼頭案例介紹.....	李枝河.....	6-1
港灣鋼構碼頭腐蝕檢測與陰極防蝕成效探討.....	柯正龍.....	7-1
港灣(水下)構造物陰極防蝕準則(草案)介紹....	羅俊雄、翁榮洲、陳桂清、饒正	
		8-1

海洋環境下鋼筋混凝土與鋼材構造物
陰極防蝕技術與應用研討會論文集

交通部運輸研究所

『海洋環境下鋼筋混凝土與鋼材構造物陰極防蝕技術與應用』 研討會議程與內容

日期	時 間	講 題	主講人	主持人
九月十五日(星期三)	08:30-09:20	人員報到		
	09:20-09:30	開幕與貴賓致詞		
	09:30-10:20	構造物之腐蝕劣化檢測 與防蝕維護策略	陳桂清 博士 運研所港研中心	黃德治 所長 運輸研究所
	10:20-10:40	休息與茶敘		
	10:40-11:30	腐蝕與防蝕概論	翁榮洲 博士 工研院工材所	黃煌輝 理事長 台灣海洋工程學會
	11:30-12:20	RC 構造物陰極防蝕設計 與驗收	劉益雄 副研究員 工研院工材所	林仁益 校長 高雄應用科技大學
	12:20-13:30	午餐及休息		
	13:30-14:20	RC 構造物陰極防蝕準則 (草案)介紹	羅俊雄 博士 工研院工材所	陳讚立 理事長 中華民國防蝕工程學會
	14:20-14:40	休息與茶敘		
	14:40-15:30	RC 構造物犧牲陽極式陰極 防蝕案例介紹	陳哲生 博士 柏林公司	鄭添富 理事長 中華民國熱浸鍍鋅協會
	15:30-16:20	外加電流式陰極防蝕 在橋梁與碼頭案例介紹	李枝河 董事長 健峰工程顧問公司	陳一昌 組長 運輸研究所綜技組
九月十六日(星期四)	09:00-09:50	港灣鋼構碼頭腐蝕檢測 與陰極防蝕成效探討	柯正龍 副研究員 運研所港研中心	朱金元 科長 運研所港研中心
	09:50-10:10	休息與茶敘		
	10:10-11:00	港灣(水下)鋼構造物陰極 防蝕準則(草案)介紹	羅俊雄 博士 工研院工材所	蔡文達 教授 成功大學材料工程系
	11:00-11:40	綜合討論	邱永芳 主任 運研所港研中心	邱永芳 主任 運研所港研中心
	11:40-12:20	午餐(結束賦歸)		

構造物之腐蝕劣化檢測與防蝕維護策略

陳桂清*

摘 要

台灣為一海島，位處於亞熱帶地區，四面環海，海岸綿延長達一千多公里，終年高溫高濕，屬於海洋惡劣環境氣候。多年來，濱海地區之構造物諸如一般建物、橋樑或港灣設施之劣化、損壞、崩塌等案例層出不窮，對構造物之耐久性與安全疑慮，日增威脅。屏除不可抗拒之外力因素外，本文特從建造材料遭受侵襲(蝕)劣化之觀點，使用非破壞性檢測技術，剖析構造物劣化損壞之原因，並探討其維護策略與新建工程之走向，以提升構造物之使用年限。

Inspection of Deteriorated and Corroded Structures with their Anti-Corrosion Strategies

Kuei-Ching Chen

ABSTRACT

Taiwan is an island located at subtropical zone. The climate is much warm and humid all the years long. Lately, many civil infrastructures such as buildings, highway bridges, and port facilities were occurred as severely deteriorated, damaged, and collapsed situations at near seashore area. It threatened the structures durability and security. Exclusively inevitable natural forces ingression, structures constructing materials deteriorated and re-bar corrosion problems were under investigated through non-destructive testing in the field. Their corrosion prevention strategies for escalating durability and new constructions prerequisite in the future were also discussed.

* 交通部運輸研究所港灣技術研究中心 研究員

一、前言

土木工程設施種類繁雜，為簡化設施類型，如以主要使用大宗之建造材料來區分時，大致可分成鋼鐵(材)構造物與(鋼筋)混凝土構造物兩大類，台灣為一亞熱帶海島型氣候地區，海岸線長達一千多公里，由於地處環太平洋地震帶上，地震發生頻繁，每年颱風侵襲不斷，各類型構造物常年處於海洋惡劣環境下，極易發生腐蝕、劣化、損壞，對設施之耐久性與結構安全威脅甚巨。因此，如何提升構造物之使用壽命與安全，降低維護成本，乃為當務需求。

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(材)的腐蝕。鑑於工程設施是否安全堪用，日益受到關注且必須明確的瞭解，俾採必要之防範措施。由於土建設施繁雜，本文主要乃以港灣土木工程結構物為探討重點，以非破壞性檢測技術，從混凝土材料的劣化原因、鋼筋腐蝕、鋼樁腐蝕破損等狀況，分別剖析海洋環境下 R.C. 結構物及水下鋼構物(碼頭鋼版樁)之腐蝕劣化問題，並從防蝕策略與未來新建工程走向等方面，建立構造物之耐久性與需求，以提升結構物之耐久性與使用年限。

二、鋼筋混凝土構造物之腐蝕劣化

海洋環境下，通常鋼筋混凝土結構物之劣化損壞，大致上可分為外力作用之破壞與建造材料之劣化等兩大因素來探討。外力作用除了大自然不可抗拒之天災諸如(颱風、暴)風災、地震等力外，構造物不當使用諸如結構超負荷、碰撞或偷工減料、施工不當等，亦是造成鋼筋混凝土結構物劣化損壞之可能原因。由於外力破壞原因甚為複雜且不易釐清，本文僅單純從材料之腐蝕劣化角度切入探討。

2.1 鋼筋之腐蝕

鋼筋在品質良好的混凝土中是不會生鏽的，其原因乃混凝土之孔隙溶液(Pore Solution) 中，因含有鈉(Na)、鉀(K)等鹼性物質以及飽和的氫氧化鈣($\text{Ca}(\text{OH})_2$)溶液，致使混凝土漿體之 pH 值維持在 13 左右，鋼筋在此強鹼性環境下，表面自然產生一層厚約 20 - 60 Å 之鈍化氧化膜($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$)，此層氧化膜非常穩定且緊密附著於鋼筋表面，能有效阻隔水份與氧氣接觸鋼筋，對鋼筋形成保護作用。但是，混凝土對鋼筋的保護，仍須視混凝土之施工、品質、保護層厚度及受有害物質侵蝕程度而定。若混凝土因裂縫，使有害物質易於侵入，導致混凝土的鹼性降低，或鋼筋附近有過量氯離子(Cl^-)存在時，鋼筋

表面的鈍態氧化膜將會被破壞，形成許多小陽極區。陽極區上之鐵(Fe)因氧化作用而變成鐵離子(Fe^{+2})，存在於孔隙溶液中，而釋出之電(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發生時，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，則沈積在陰極與陽極間的鋼筋表面上。相關化學反應如下，反應機理與過程示意圖如圖 1^[12]。

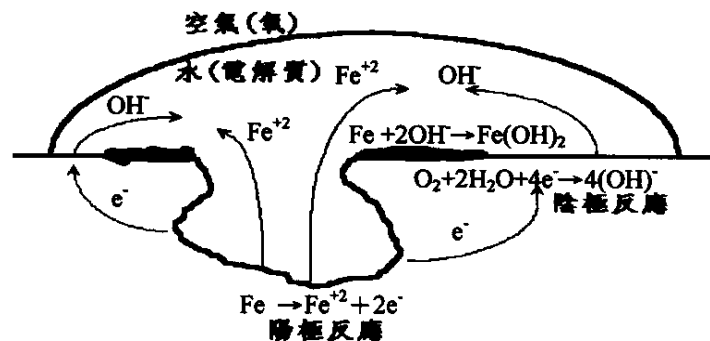
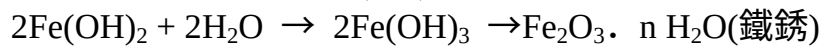
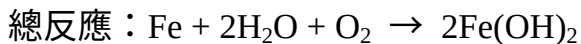
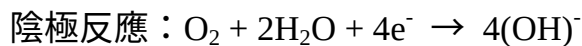
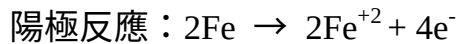


圖 1 鋼筋腐蝕機理與過程示意圖^[12]

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，將導致混凝土產生裂縫或崩裂與鋼筋保護層的剝落。

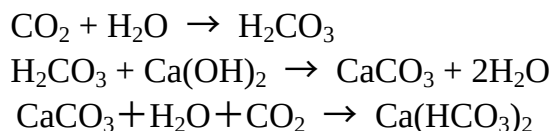
2.2 混凝土之劣化

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

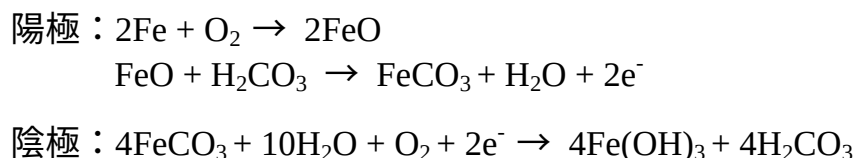
1. 混凝土之中性化

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，若混凝土產生裂縫或孔隙多滲透性大時，空氣中或溶在水中的二氧化碳(CO₂)，甚易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)發生作用，生成碳酸鈣(CaCO₃)化合物，由於碳酸鈣具微酸性，容易被析出形成白樺現象，若 CO₂ 氣體持續侵入，將造成混凝土的孔隙含量增加、強度遞減及鹼性環境降低，並使有害性物質更容易滲入混凝土。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^[1]。混凝土中性化導致鋼筋腐蝕之過程，其相關化學反應程序如下；

中性化過程：



鋼筋腐蝕過程：



通常在大氣環境下，混凝土之中性化速度相當緩慢，與混凝土之滲透性及環境因素諸如大氣中之 CO₂ 濃度、溫度、相對濕度及水份等之關係最為密切。如相對濕度在 50~85%，中性化速度較快，若相對濕度大於 85 %時，因孔隙中之水份會阻礙 CO₂ 之滲透，減緩了中性化速度(變為較慢)。混凝土中性化之速度，其關係如下式^[2]：

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

D：中性化深度(在 t 時間內)， k：中性化係數， t：曝放時間

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 值則與 CO₂ 滲透速度及混凝土內之氫氧化鈣含量有關係。

2. 氯離子之侵蝕

氯離子(Cl^-)為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 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ，同時再釋放出 Cl^- ，使得 Cl^- 反覆不斷地參與腐蝕反應。而 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 會進一步與氧氣、水份反應生成鐵銹。上述一連串的反應，鋼筋將不斷地產生腐蝕反應，使 Fe^{+2} 離開鋼筋表面，其侵蝕機理與過程如圖 2 所示。因此，一旦混凝土內之 Cl^- 含量達到足以產生鋼筋腐蝕的臨界值，則鋼筋腐蝕的狀況便很難再加以抑制。

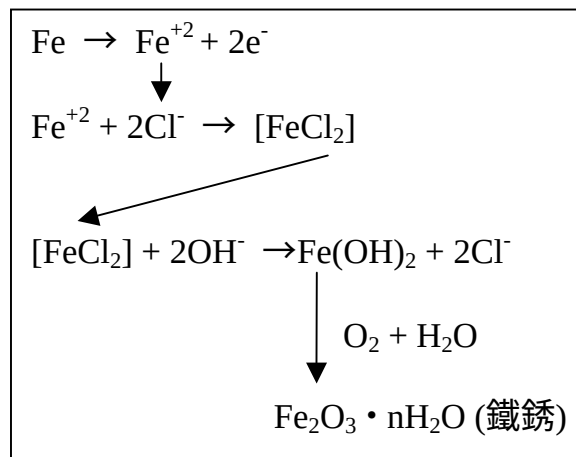


圖 2 氯離子侵蝕鋼筋之機理與過程

Cl^- 除了造成上述鋼筋的腐蝕反應之外，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漿體之電阻係數，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，還得考慮混凝土的品質，如果品質佳，外界之水份與氧氣不易滲入，鋼筋產生腐蝕的機率較小。此外，當混凝土內 pH 值較高時(高鹼性環境)，則產生氧化鐵保護膜的反應較強勢，可以忍受較高量 Cl^- 的存在而不致產生腐蝕。反之，若混凝土因中性化作用使其 pH 降低時，則 Cl^- 破壞氧化鐵保護膜的作用較為容易，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。

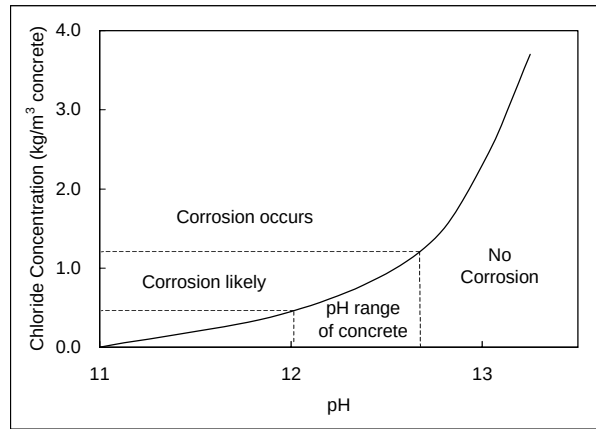


圖 3 混凝土 pH 值與 Cl⁻濃度對鋼筋腐蝕之關係

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, AAR)，乃水泥中之鹼金屬離子性如 Na⁺、K⁺等，與含活性之粒料發生化學作用，產生鹼-矽膠體，在有水的情況下，該鹼-矽膠體因吸收水份而膨脹，致使混凝土產生內壓、漿體龜裂，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。 鹼質與粒料反應之機理與過程簡示於圖 4^[13]。

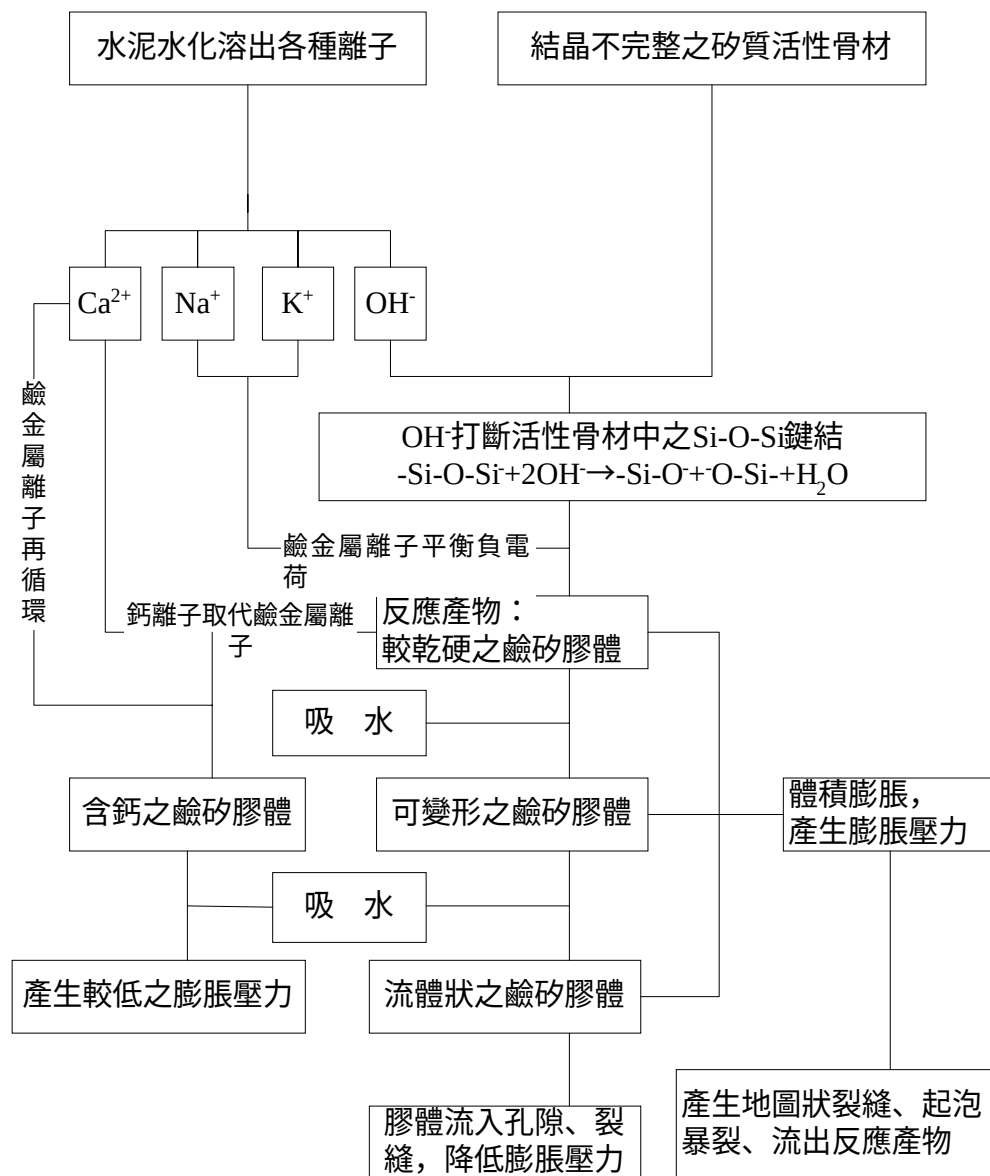


圖 4 鹼質與粒料之反應機理與過程^[13]

4. 結構物之龜裂

鋼筋混凝土結構物由於施工過程、材料之耐久性、載重狀況、結構基礎沉陷等原因，均會造成結構物之破裂(損)。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、水份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 至表 4 分別為美、日、歐等國家對裂縫寬度限制所定訂之規範。

表 2 ACI Committee 224 對裂縫寬度限制之建議

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

表 3 日本對海洋混凝土裂縫寬度之限制

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	0.15 mm
	潮汐帶、飛沫帶	0.15 mm
	上述以外部位	0.20 mm

表 4 歐洲地區混凝土結構物裂縫寬度之限制

設計規範	荷重及環境	結構體類型	最大容許寬度
BSI. GPl10	一般環境 及正常荷重	RC	0.33 mm
		PC	0.10 mm
	腐蝕性環境	RC PC	0.004 tc 0.10 mm
BSI. DD55	一般環境 及正常荷重	RC	0.3 mm
		RC	0.004 tc
		PC	0.10 mm
FIP	海洋結構	RC	0.30 mm
		PC	0.004 tc

註：tc(構件厚度)

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質是必要的。如使用活性粒料、含氯化物材料(諸如添加 CaCl_2 摻料，海砂等)、水泥中 C_3A (鋁酸三鈣)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質要求，亦是提升結構物耐久性重要因素。

2.3 腐蝕劣化之檢測方法^[3,20]

R.C.結構物腐蝕劣化過程中，通常結構物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，仍需進行一些非破壞性檢測試驗，才能綜以研判現況；

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，外界腐蝕因子隨即侵入，最後將造成混凝土保護層剝落。裂縫檢測除目視量測外，對裂縫之深度、位置等亦可藉其它儀器諸如超音波儀、敲擊回音儀等測得。

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，可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，其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、快捷，但對大面積範圍檢測時，則甚不經濟與耗時。目前，大多使用紅外線熱感應儀或雷達波儀檢測，檢測迅速效果很好。

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判別出鋼

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參考指標。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 5 為日本海洋混凝土結構物耐久性規範中之保護層厚度要求。

表 5 日本海洋混凝土結構物之保護層厚度要求

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 年)	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 年)	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，若表面呈無色，則表示混凝土已經中性化。中性化之深度亦可為鋼筋混凝土發生腐蝕損壞，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」之檢測

混凝土結構物一旦發生有「鹼質與粒料反應」之現象時，嚴重時將威脅結構物之耐久性(壽命)甚至崩毀，由於產生「鹼質與粒料反應」需要一段較長時間之發展，因此，實驗室進行鑑定試驗甚為耗時，約須數月至一年之久。中國國家標準規範(CNS)現已引用 ASTM C295(岩相分析)、ASTM C289(化學分析法)、ASTM C 227(水泥砂漿棒試驗法)等規範，訂定有相關檢測規範可供採用。但是，基於實務需求，國外專家較傾向於發展快速之檢測方法。目前，現地結構物檢測時，迄今已發展出下列兩種快速簡憶易之檢測方法，簡述於下：

(1)醋酸鈾螢光法^[4] (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 分鐘後，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^[4] (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 ASR(Alkali-Silicite Reaction) 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份的反應膠體。

6. 混凝土強度檢測^[3]

一般現地常使用檢測混凝土結構物強度之方法有下列數種；

(1) 試錘試驗法(Test Hammer Test)

為現地混凝土強度檢測時，最為簡單常用的方法。試驗時，利用試錘衝擊混凝土表面，由反彈數值可推估混凝土強度，檢測時選擇約 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，取平均值之。由於本檢測技術影響因素甚多，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，相互比較才能正確評估混凝土強度。表 6 為試錘反彈數值與強度估計值之關係表。

表 6 試錘反彈數值與強度估計值之關係表

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

(2) 貫入針試驗(Pin Penetration Resistance Test)

本法與試錘試驗相類似，均以混凝土表面抵抗衝擊之能力，推估混凝土強度。試驗過程可依 ASTM C-803 規範進行。

圖 5 為美國 James 儀器公司製造之 PPR-Meter^[5]，檢測前應先潔淨混凝土表面，再於其上繪製 5 - 7.5 cm 之方格，將貫入針置入儀器內部，彈簧旋緊後按下開關，鋼針即會衝擊混凝土表面並留下一針洞，清除針洞內粉末，以測微計量測貫入深度，每一方格應量測七點，剔除偏離

中間值較遠之二點，取另外五點之平均值，即為該方格之貫入深度，由貫入深度可推估混凝土強度。

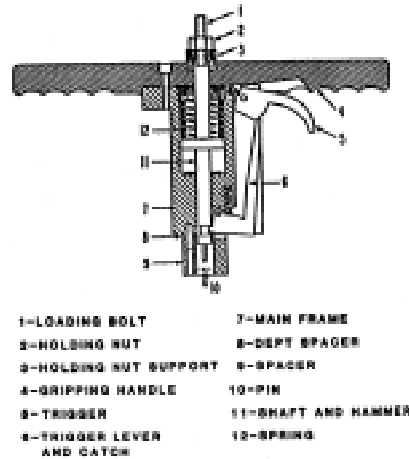


圖 5 貫入針試驗儀簡示圖^[5]

(3) 拉拔試驗法^[6](Pull-Out Test)

本試驗是以拉拔預先埋入混凝土或結構物中的金屬螺栓來測定強度。螺栓具有擴大的頭部，拉拔時使用千斤頂施以拉力，其反作用力由以螺栓為圓心的反作用力環施加於混凝土表面，施作拉拔過程如圖 6 所示。螺栓拔出時，略呈錐形的混凝土碎塊會隨之拔出，此碎塊較大一面的直徑由反作用力環的直徑計算之，較小一面之半徑，則以螺栓頂之直徑計算之。ASTM C-900 規定埋入深度和螺栓頭的直徑需相等，反作用力環內徑大小為插入螺栓頭直徑的 2.0 ~ 2.4 倍。

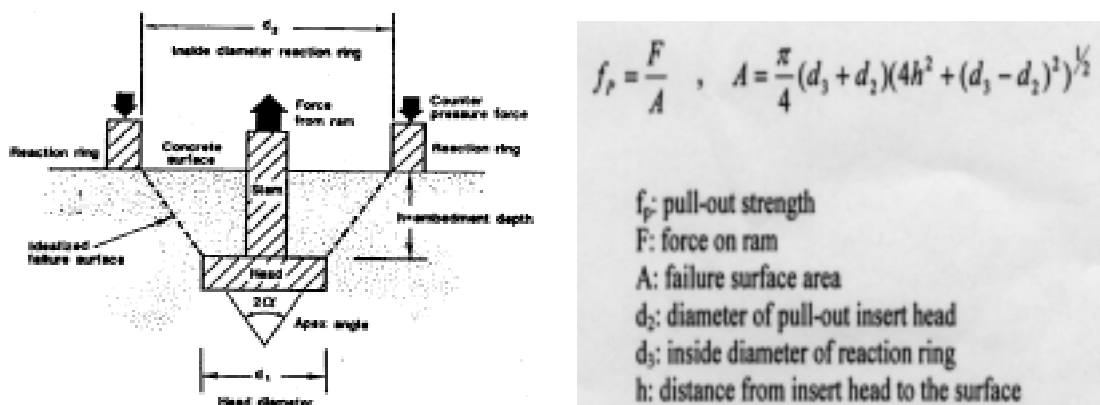


圖 6 拉拔試驗儀示意圖^[6]

(4)彎裂試驗法^[6](Break-Off Test)

彎裂試驗可為混凝土之品質控制檢測及保證，主要用於決定模板拆除及預力鋼鍵施力的時間，並可評估現有結構物之強度，其試驗規範如 ASTM C-1150。試驗儀器組合包括(1)載重計(2)壓力計(3)加壓幫浦(4)內徑約 55mm 之塑膠套筒(5)鑽頭(適用於硬固混凝土)。

新建結構物在澆置未硬固的混凝土中插入塑膠套筒，當需要測試現地強度時，將套筒移開，在平底擴孔內置入一個特殊手動的液壓千斤頂，力作用位置如圖 7 所示，施力一直到中心圓柱體斷裂，施加的液壓則由壓力計測得，稱為彎裂數值(Break-Off Number)，由制式之彎裂數值與強度關係表，可推估混凝土的強度。

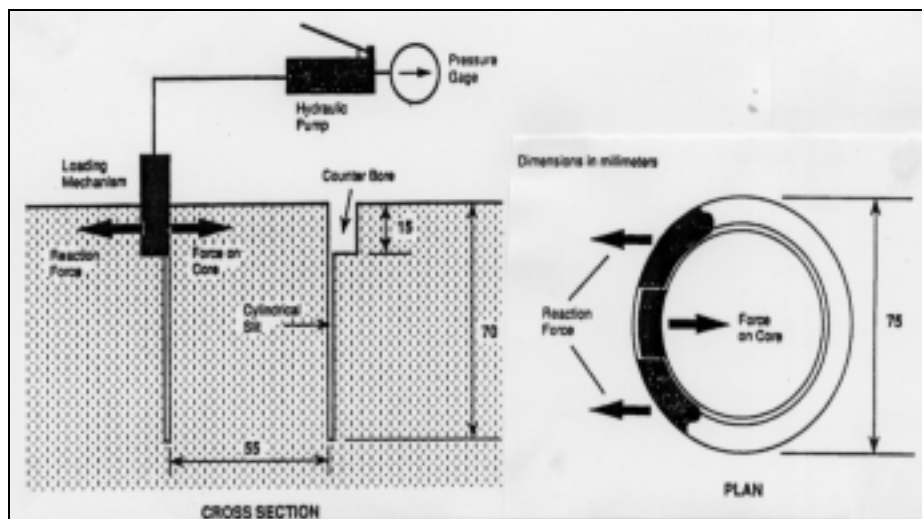


圖 7 彎裂試驗儀及力作用方向示意圖^[6]

7.CI含量分析

以電鑽機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 CI 含量分佈情形。CI 含量可依 CNS 12891 或參考 AASHTO T260 及 ASTM C-114 等規範來分析。表 7 為世界各國對鋼筋混凝土構造物氯化物含量之規定。

表 7 世界各國對鋼筋混凝土構造物氯化物含量之規定

國 家	規 範	構件型態及環境下	Cl ⁻ 重量 (kg/m ³ 混凝土)	Cl ⁻ , (%) (佔水泥用量)
美 國	ACI 318-89	1. R.C. 曝露於氯化物下 2. R.C. 在一般環境下 3. R.C. 在乾燥環境下 4. 預力混凝土	0.45 0.90 3.00 0.18	0.15 0.30 1.00 0.06
英 國	BS 1880 BS 8110-85	1. 一般 R.C. 結構物 2. 骨材 3. 骨材(含 CaCl ₂)	0.60 1.92 2.87	0.20 0.64 0.95
日 本	JASS 5 土木協會	1. 細骨材 (I 級) 2. 混凝土 3. 一般 R.C. 結構物	0.10 0.30 0.49	---- 0.10 0.16
中 國 (台 灣)	CNS 12891	硬固混凝土： 1. 預力混凝土 2. R.C. 結構物(需耐久性考慮者) 3. 一般 R.C. 結構物	0.15 0.30 0.60	
	CNS 3090	預拌混凝土： 1. 預力混凝土 2. R.C. 結構物(需耐久性考慮者) ^a 3. 一般 R.C. 結構物	0.15 0.30 0.60	
	CNS 1240	混凝土粒料(細)於： 預力混凝土中 其它混凝土中	0.012% ^b 0.024% ^b	

8. 超音波脈波速度量測^[3]

超音波脈波速度測定儀，儀器構件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 8 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，可初步判別之。表 8 為超音波脈波速度與混凝土品質之關係。圖 9 為超音波裂縫深度量測示意圖。

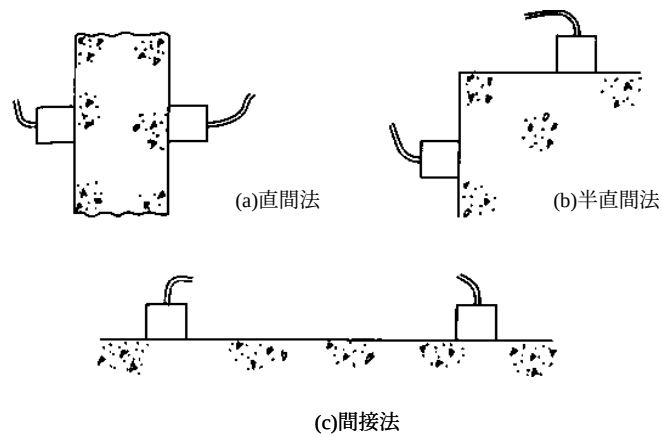
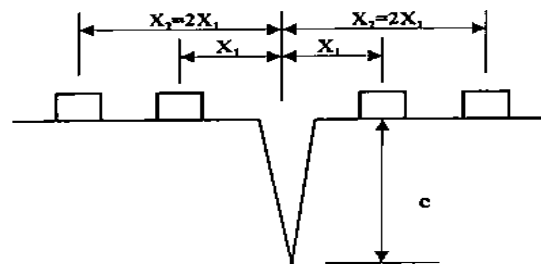


圖 8 超音波檢測法簡示圖^[3]

表 8 超音波脈波速度與混凝土品質之關係^[6]

脈波速度(m/sec)	混凝土品質等級
<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 9 超音波裂縫深度量測示意圖^[20]

9. 敲擊回音法

敲擊回音法可量測混凝土內部裂縫之位置及表面裂縫深度。儀器構件包含敲擊源、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產生擾動訊號，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 10 為敲擊回音法量測簡示圖^[3]。

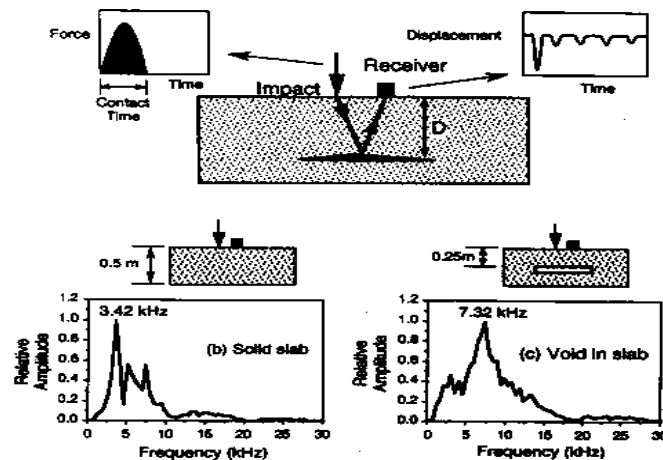


圖 10 敲擊回音法檢測示意圖^[3]

10. 透地雷達法^[8,21] (Ground Penetrating Radar, GPR)

以數百伏特電壓，產生 10 至 2000 MHz 頻率之雷達波，射入地下或結構體內，此入射波經地下具不同電磁性質的地層界面與埋藏體反射或地層內管線、空洞及結構體內鋼筋等繞射至地表，再由置放地表上之高靈敏度接收天線，以相等時距接收此訊號，其記錄時間長短(1 ~ 32767 ns)，視勘測目標深度及地層傳遞電磁波之速度而定，其現地量測方法如圖 11 所示。圖 12 為透地雷達檢測所得之雷達影像圖(剖面圖)，乃為由不同位置接收到各波抵達地表時間之關係圖。

雷達波訊號經過一般處理如振幅衰減補償、濾波，或再加一些特殊處理如速度分析、解迴旋、移位等，即可用來推測地層的起伏變化、描繪地下形貌及結構體之狀況例如碼頭面下級配厚度、地層分佈、級配流失、鋼筋、管線位置或空洞。

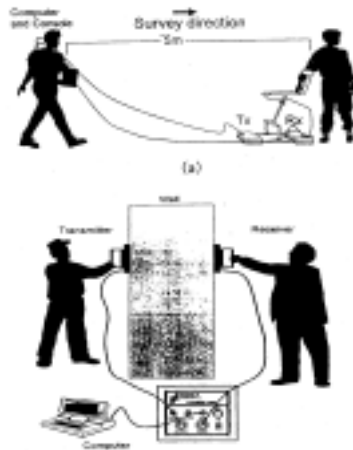


圖 11 透地雷達儀檢測示意圖^[21]

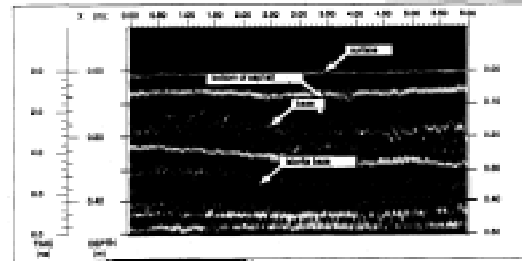


圖 12 透地雷達儀檢測結果圖^[21]

11.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，影響溫度變化之因素有混凝土內部空(孔)隙結構、表面條件及周圍環境。混凝土內如有熱流出入時，瑕疵(孔隙、洞穴)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。本檢測法大多可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，對大規模大面積之檢測，既快速且經濟。

12.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，由電阻係數變化，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。

如與鋼筋腐蝕電位併同考量時，當腐蝕電位值小於 -350mV (以 Cu/CuSO_4 電極)時，若混凝土電阻係數大於 $12\text{ k}\Omega\text{-cm}$ ，則鋼筋腐蝕速度很小。若電阻係數小於 $5\text{ k}\Omega\text{-cm}$ 時，則鋼筋腐蝕速度很大。此外，電阻係數亦可做為判定混凝土品質方法之一，例如電阻係數大者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 9 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 Cl^- 含量、孔隙大小、孔隙溶液、濕度、水份多寡、漿體成熟度等等。進行電阻係數量測時，應盡量避開或遠離鋼筋位置，避免造成量測誤差。圖 13 為四探針式之電阻係數量測示意圖^[3]。

表 9 電阻係數與鋼筋腐蝕速率之關係^[3]

電阻係數($\text{k}\Omega\text{-cm}$)	鋼筋腐蝕速率
< 5	非常高
5-10	高
10-20	較低
> 20	非常低

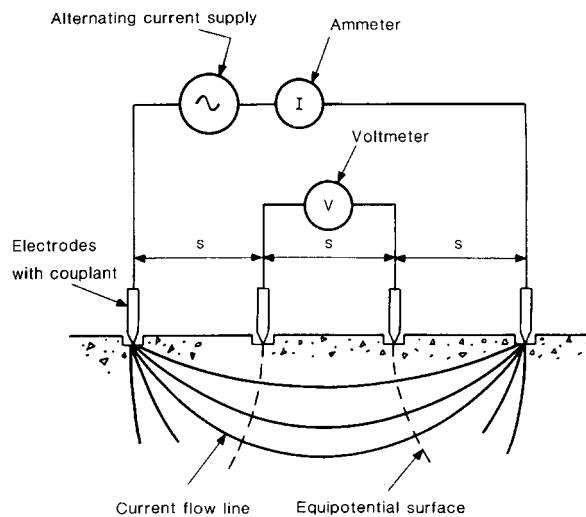


圖 13 四探針式之電阻係數量測示意圖^[3]

13. 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(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 14)，一端連接參考電極並置於潤濕之混凝土表面上，另一端則接觸鋼筋，形成一電化學電池迴路(將混凝土視為電解液)，即可量出鋼筋腐蝕電位值。表 10 為 ASTM C-876 規範說明鋼筋電位與腐蝕機率之關係，如鋼筋腐蝕電位

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%。

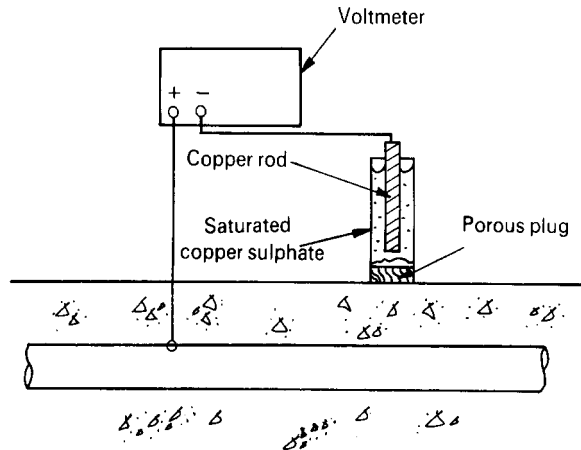


圖 14 鋼筋腐蝕電位值量測簡示圖^[3]

表 10 ASTM C-876 規範(鋼筋電位與腐蝕機率之關係)

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 %

14.鋼筋腐蝕速率(腐蝕電流)量測

鋼筋腐蝕是一種電化學反應, 由量測電化學反應速率之快慢即可知鋼筋的腐蝕速率。一般量測鋼筋腐蝕速率方法有下列數種; 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, 其量測技術及數據解析, 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，圖 15 為以混合電位理論繪製之極化曲線圖^[7]。依據 Stern and Gearey 公式推算腐蝕速率如下：

$$i_{\text{corr}} = \frac{\beta_a \beta_c}{2.3 \beta_a \beta_c} \times \frac{\Delta I}{\Delta E} = \frac{B}{R_p}$$

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。

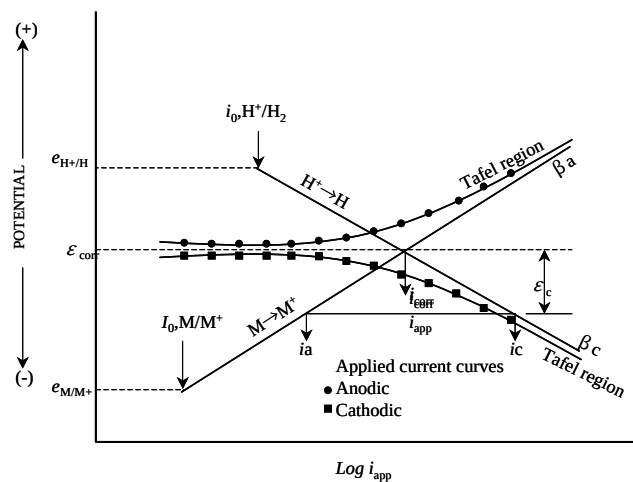


圖 15 混合電位理論之極化曲線圖^[7]

(2)交流阻抗法

此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, EIS)技術，由交流電之相角(Phase Angle)變化，可求得電容值(C)、電解液(混凝土)電阻(R_s)、鋼筋表面鈍化層之極化電阻(R_p)等數據。以前述所測得之相關數據繪製 Nyquist 及 Bode 圖形，如圖 16 所示，可解析混凝土與鋼筋界面間之腐蝕狀態，鋼筋之腐

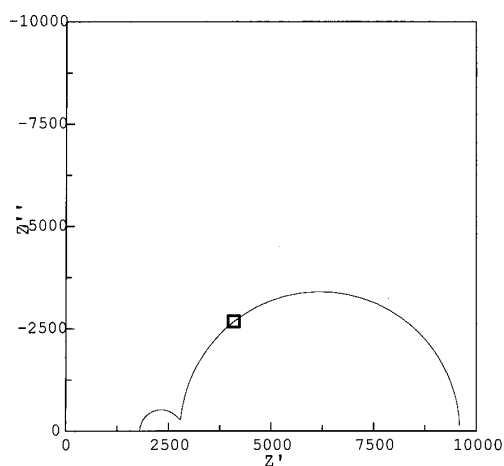
蝕速率計算公式與線性極化法相同。表 11 為腐蝕電流與鋼筋腐蝕狀態之關係^[1]，表 12 為腐蝕電流與鋼筋表面厚度損失速率之關係^[1]。

表 11 腐蝕電流與鋼筋腐蝕狀態之關係^[1]

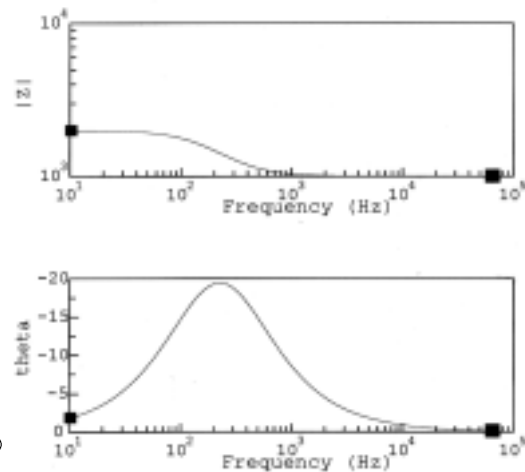
$I_{\text{corr}}(\mu\text{A}/\text{cm}^2)$	鋼筋腐蝕狀況	鋼筋銹蝕之時間
< 0.1	鈍化狀態	沒有腐蝕之預期
$0.1 \sim 0.5$	低~中等腐蝕	10~15 年內
$0.5 \sim 1.0$	中~高等腐蝕	2~10 年內
> 1.0	高度腐蝕	2 年內

表 12 腐蝕電流與鋼筋厚度損失速率之關係^[1]

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



(a) Nyquist 圖



(b) Bode 圖

圖 16 Nyquist 與 Bode 圖

15.鑽心取樣

混凝土材料之劣化相當嚴重時，或原因不顯明且無法於短期內釐清時，應另以鑽心機鑽取適量之試體一批，攜回試驗室進行較為詳細之分析與比對。

三、港灣鋼(材)構造物之腐蝕劣化^[14~19]

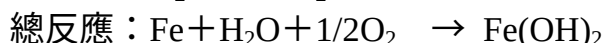
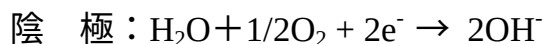
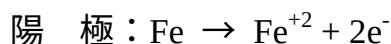
3.1 港灣鋼構物概述

海水對大多數金屬材料，為一極容易腐蝕的環境，港灣鋼構造物諸如鋼板(管)樁、海底管線、拉桿等構件，常年浸泡於海水環境下，甚難倖免於腐蝕損壞的威脅。由於檢測不易，常有發生嚴重破損而未能及時發現，影響構造物之耐久性與使用安全甚巨。台灣地區之鋼板(管)樁碼頭使用近 40 年了，從各港務局歷年之檢修記錄以及港研中心之調查，部份港口之鋼板樁碼頭在興建之初，未做防蝕保護措施，因此有些鋼板樁之腐蝕早已相當嚴重，年腐蝕率超過設計規範值(0.20mm/yr.)許多，並曾造成碼頭結構嚴重損壞。如民國 77 年間調查發現，基隆港西 15 號及東 2~東 4 號碼頭，壁面有海生物附著且有嚴重孔蝕現象，東 7 號、西 22 號、西 27 號之碼頭，其鋼板樁有嚴重破損、腐蝕穿孔之現象，導致部分碼頭壁後砂石掏空、岸肩沈陷，嚴重影響碼頭之結構安全。蘇澳港之駁船碼頭，未做防蝕處理前，鋼板樁腐蝕率曾超過 0.2mm/yr.，並有穿孔、破洞出現，屬於嚴重腐蝕等級。其它各港口亦多有類似現象，惟年腐蝕率較低。

近年來，新建之港灣設施如高雄港第五貨櫃中心碼頭、雲林麥寮工業港及台北港等之開發，均大量採用版(管)樁式碼頭之建造，加上各港區早期興建之版(管)樁式碼頭，數量相當龐大，為國內海港運輸極重要設施之一。

3.2 鋼材在海水之腐蝕機理

海水中之鋼材如鋼板樁之表面，因同時具有許多高活性區域(陽極)與鈍化區域(陰極)所形成之許多小腐蝕電池(corrosion cell)系統，導致鋼材發生表面腐蝕現象。鋼材在海水中發生腐蝕之電化學反應如下：

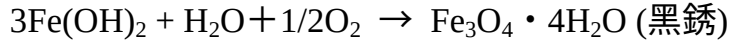


總反應式中之 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 繼續與水及氧分子反應，生成 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 或 Fe_3O_4 。

H₂O 產物，其化學反應式如下：



或



另一造成鋼板樁腐蝕的原因，為海生物的附著作用，此部分的影響是雙方面的：其一為海生物附著對構材造成腐蝕原因，可能為海生物排放黏液中，含有細菌分解出酸性物質，或海生物附著形成厭氧環境，其厭氧菌釋出酸性物質造成腐蝕。其二為海生物附著將增加構材之重量，在結構受力時其慣性載重相對增大，加上海生物所留滯的水量，亦增加結構負荷，以致整體結構安全因子相對降低，對構材之耐久性、安全性產生負面影響，不可忽略。

3.3 環境腐蝕因子

港灣周圍之海、氣象環境，如大氣之溫濕度、海風鹽份、雨量、酸雨，海水之水質(pH、水溫、氯離子、硫酸鹽類、溶氧量、導電阻)、流速、潮汐、海生物附著等變化，對鋼材之腐蝕造成相當影響。鋼構物曝露之區域影響亦為甚巨，從許多調查研究發現，海洋結構物曝露的部位與腐蝕速率有很明顯的差異，如圖 17 所示^[9]。由於曝露環境不同，其腐蝕形態亦不同，為方便區分與探討，將海洋環境區可分成五個曝露區域，分別簡述於下；

1.大氣帶

這區域之鋼結構物不接觸海水，表面完全接觸大氣中之各種介質，諸如氣體、日照……等大自然介質，由於海洋大氣中含有較高濃度之 Cl⁻，加上濕度、日照、溫度之變化，致使碳鋼材料外表很容易受到侵蝕，其腐蝕速率為一般內陸地區大氣腐蝕的 2~5 倍。

2.飛沫帶

此區域自平均高潮位以上至海面大氣帶下端，屬於海洋大氣與海水交界面，鋼板樁曝露於此範圍內，由於不斷反覆地受到海浪的潑濺與日曬乾燥之乾濕循環作用，致使附著鋼材表面之鹽份及氧氣濃度不斷增濃，因此，此部位鋼材之腐蝕最為嚴重，年腐蝕速率最大，為五個曝露區域中腐蝕最嚴重的部位。一般低碳鋼如沒有任何防蝕處理時，其腐蝕速率可達 0.5~1.0mm/yr.，約為海水全浸區(海中帶)的 5~10 倍。

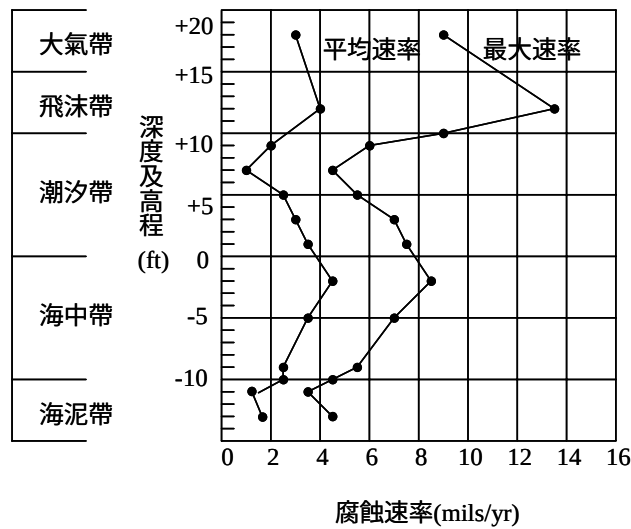


圖 17 曝露區域與鋼材腐蝕速率之關係^[9]

3. 潮汐帶

此區域介於高低潮位之間，由於受到海水漲退潮之變化，鋼板樁表面週期性的接觸海水浸泡及曝露於大氣中，猶如進行乾濕循環作用。由於空氣與海水波浪之交夾作用，致使海水中之溶氧濃度高，因而在潮汐帶下方緊鄰海中帶之部位，恰可形成一個氧氣濃淡電池作用之現象。溶氧量較高之潮汐帶中之鋼板，可視為一陰極反應區域，其鋼材之腐蝕速率低，而低潮位下約 1 米處(亦即海中帶部份)，因溶氧量低，故可將海中帶內之鋼板當成陽極反應部位，相對地其腐蝕量較大。由於受到氧氣濃淡電池作用，潮汐帶中之腐蝕速率為五個曝露區域中最低者。

4. 海中帶

自低潮位下端至海泥(床)帶間，在此範圍內，整個結構體完全浸泡於海水中。此區域之上端邊緣與最低潮位緊鄰的部位，因氧氣濃淡電池之作用，曝露於海中帶之鋼板可視為一陽極反應區域，因此，海中帶上端部位之鋼板腐蝕速率很大，極需做適當的防蝕保護措施。又在此區域範圍內，海生物之附著、海流之沖擊、水溫及溶氧量等因素，亦會影響對鋼材之腐蝕速率。通常一般海水中鋼鐵之腐蝕速率一般為 0.1~0.2mm/yr。

5. 海泥(床)帶

鋼板(管)樁埋入於海底土層之部份，由於與海水接觸面較小，鋼材之腐蝕速率相對很小。但是在污染的海域中，如有硫化氫(H_2S)或海泥中有硫酸還原菌存在時，則鋼材的腐蝕性會增加，腐蝕速率變大。

3.4 檢測方法

港灣碼頭鋼板(管)樁大部份浸入於海水下，甚易產生腐蝕損壞。由於海水下檢測不易，必需以潛水夫潛入水下，進行目視檢測與鋼板厚度量測，方能明確了解腐蝕狀況。調查及檢測過程簡述如下；

1.海水水質檢測

鋼板樁之腐蝕與海水水質之變化有密切關係，與海生物之附著、生長及其分泌物之成份，亦有一定程度之關連性。使用攜帶型現場水質檢測儀，分別在腐蝕嚴重與不嚴重之碼頭水域進行水質分析，記錄海水之水溫、pH 值、溶氧量、Cl⁻、電導度、濁度等數據，並取水樣攜回實驗室進行各項分析，諸如 COD(化學需氧量)、BOD(生物需氧量)、多種離子……等分析，以了解海水水質狀況。

2.鋼樁腐蝕檢測

- (1)目視檢測；在碼頭面上選定及編號檢測樁的位置，派遣潛水夫潛入海水下，先以目視檢視鋼板樁腐蝕狀況，並以攝影器材做全面攝影記錄。如發現異常或破洞處，通知岸上人員記錄位置，並丈量鋼板樁破洞的大小。
- (2)選定檢測點(包含水深與量測位置)；依鋼樁腐蝕狀況，選定檢測水深、位置、數量，以俾進行腐蝕現況檢測。
- (3)海生物敲除；在設定之水深測點，使用工具將鋼板樁上之附著海生物敲除，敲除面積約 10 x 10 平方公分，Z 型鋼板樁取凸、側、凹三面，直線型鋼板樁取一面，鋼管樁則在圓周取四點對稱面，將海生物敲除之。
- (4)厚度量測；使用超音波測厚儀，量測每個測點之鋼板樁厚度，精確度± 1.0mm，每測點量取 2 個數據，取平均值之。厚度可由下列公式求得：

$$S_i = V \times 1/2(t_{i+1} - t_i)$$

S_i ：現有鋼板樁厚度(mm)

V ：超音波在鋼板樁中之傳播速度(5920m/sec)

t_{i+1} ， t_i ：探頭接受回聲及初始傳播的時間

- (5)腐蝕速率計算；將實際測得之鋼(管)板厚度，與原始設計厚度比較之，即可計算出鋼板之腐蝕速率，公式如下；

$$\begin{aligned}\text{腐蝕速率} &= (\text{原始設計厚度} - \text{現有厚度}) / \text{使用年期} \\ &= \text{腐蝕量} / \text{使用年期}\end{aligned}$$

3.5 歷年檢測結果

港研中心自民國 77 年迄今，十數年間不遺餘力地，對國內五港區之碼頭鋼板(管)樁，進行腐蝕現況調查。歷年來各港區調查結果簡述如下：

◆基隆港

本港區之板(管)樁式碼頭大多興建於民國六七十年代期間，建造時無安裝防蝕保護措施。民國 77 年調查時，大部份之鋼板(管)樁已腐蝕非常嚴重，如東岸#2~#5 碼頭鋼板樁壁面有孔蝕、嚴重穿孔、破洞(損)等現象，導致碼頭壁後級配砂石流失、掏空、岸肩沉陷。西岸#20~#27 碼頭之腐蝕亦相當嚴重，腐蝕速率從 0.1mm/yr.至 0.2mm/yr.以上，部份區段板樁於潮間帶部位，曾發現十數支樁一字連續相接出現孔蝕、破洞等嚴重腐蝕狀況，對碼頭之結構安全影響甚巨。當時港務局特逐年編列預算，進行維修與全面安裝犧牲陽極塊，大幅改善腐蝕狀況，但潮間帶部位之防蝕效果並不理想。

民國 90 年間調查顯示，東#2~東#4 碼頭鋼板樁之防蝕電位均達小於 -850mV(對 Cu/CuSO₄ 電極)，板樁外觀亦無發現嚴重腐蝕穿孔、破洞之情形，腐蝕速率小於 0.1mm/yr.以下，腐蝕狀況較十年前有大幅改善，顯示陰極防蝕發生作用。東#5~東#7 碼頭現為軍方使用之碼頭，雖然亦有陰極防蝕措施，但是仍有部分鋼板樁現況相當不好，例如東#5~東#6 碼頭之板樁腐蝕數量甚多且位置相當密集，總計約有數十處出現嚴重穿孔、破洞之狀況，板樁背填土掏空之深度由數十公分至 1~2 米不等，內部形成甚多孔洞，東#7 碼頭板樁則有二處穿孔、破洞之狀況，破洞深度達 1 米左右。此三座碼頭整體腐蝕狀況較過去嚴重許多，對碼頭上裝卸承載之安全有威脅性。

另外，基港局於民國 89 年對第一突堤碼頭(西#24~西#26)鋼板樁現況進行調查，調查結果指出，西#24 碼頭發現 6 處鋼板樁破洞，破損位置多集中於突堤頂端轉角附近。西#25 碼頭板樁破洞數量有 6 處，均位於水面下，其中一處(從西#25 碼頭接頭端算起 245m，水深-12m 之位置，亦即靠近板樁底部)之破洞甚大，破洞大小為 2.5m(破洞高度) x 2.0m(破洞寬度) x 1.2m(破洞深度)，顯然板樁背填土應已嚴重流失掏空。西#26 碼頭之破洞數量亦有 4 處，都位於水面下，其中 2 處之破洞尺寸甚大且亦靠近板樁之底部，基礎流失堪慮，至於潮間帶鋼板之腐蝕速率約達 0.15mm/yr.，腐蝕狀況嚴重。

◆蘇澳港

駁船碼頭民國 67 年完工，建造時並未做防蝕保護。民國 79 年檢測時，鋼板樁腐蝕相當嚴重，腐蝕率超過 0.20mm/yr，潮間帶部位有嚴重孔蝕或穿孔、破洞等狀況。港務局於民國 82 年間隨即進行補修並加裝犧牲陽極塊等防蝕措施，於潮間帶再加貼防蝕帶及 FRP 夾克保護，爾後防蝕效果大幅改善。民國 89 年調查時，潮間帶之鋼板樁表面並未發現孔蝕或穿孔破洞之狀況，但部份區段於水深+0.0m 位置，腐蝕速率已大於 0.1mm/yr.，應持續監控注意，至於沒入水面下之鋼板樁之腐蝕速率仍然很小。

#6 與#7 碼頭為管樁橋墩式碼頭，民國 72 年興建時即安裝陰極防蝕措施，防蝕效果良好，近幾年來前後幾次調查之結果相近，腐蝕速率很小，鋼管樁現況良好。

◆台中港

民國 80 年時，港區內鋼板(管)樁建造之碼頭座數不多，僅#14 與#15 碼頭之護岸結構採用板樁式結構保護，#29 與#30 碼頭交接處為鋼管樁式結構，建造之初即採取塗覆與安裝犧牲陽極塊之保護措施。民國 82 年檢測時，並未發現有嚴重腐蝕狀況，鋼板樁之腐蝕速率甚小(約為 0.02mm/yr.)。民國 83 年以後，隨著政府推動發展亞太營運中心之政策，台中港開始急速擴建碼頭設施，鋼板(管)樁建造之碼頭座數逐漸增加中，如西#3 與西#4、#33、#34、#35、#99~#101 碼頭均為該類型結構，建造時即有安裝防蝕保護措施。

◆花蓮港

本港鋼板樁碼頭建造迄今已有三、四十年之久，主要範圍為#4 至 #9 碼頭及航道西側岸壁結構，民國 80~83 年調查時，鋼板樁腐蝕率約為 0.1mm/yr.，民國 88 年港務局例行檢視發現，航道岸壁之鋼板樁於飛沫帶有大面積之微小孔蝕現象，水面下之狀況不明。民國 89 年委託港研中心進行檢測，檢測結果發現，曝露大氣與飛沫區之鋼板樁(#4~#5 號碼頭)，過去曾做塗覆防蝕保護但已嚴重剝落，表面有明顯銹蝕斑點，腐蝕速率約為 0.02~0.05mm/yr.，潮汐帶之腐蝕速率為 0.07mm/yr.，水面下腐蝕速率小於 0.1mm/yr.。鑑於港區航道狹窄且長，其岸壁板樁結構之安全影響船舶進出，民國 91 年特詳細調查板樁之腐蝕狀況，發現#5 及#6 碼頭於海水面下之鋼板樁，有多處位於海床附近處，出現開裂及彎曲狀況，最大開裂寬度約為 15~25 公分，高度約 1~2 公尺，研判應為地震作用造成動土壓力推擠板樁，產生三角錐形之開裂及彎曲。又因強烈懷疑潮間帶鋼板陸側(接

處背填土面)之腐蝕狀況，特從陸上岸肩開挖檢測，開挖結果顯示潮間帶部位之鋼板(陸側面)已嚴重腐蝕，銹蝕層很厚且一敲即破，露出嚴重大範圍之穿孔、破洞狀況，滿潮時海水可直接流入掏(沖)刷內部填土，對碼頭設施之安全已甚為威脅。

整體上，全港區之腐蝕速率大多在 0.1mm/yr.以下，腐蝕速率雖未超過設計規範，但鋼板樁原設計年限為 20 年，如以 0.2 mm/yr.之腐蝕速率設計規範計算，鋼板樁最大允許腐蝕厚度為 4.0 mm。目前#4~#6 號之厚度減少量約 2-3 mm，#8 號之厚度減少量約 2.5-4.0 mm 不等，#9 號厚度之平均減少量約 2.0 mm、航道岸壁厚度減少量大多為 1-2 mm，距允許腐蝕厚度已相當接近。又#5 碼頭潮間帶鋼板之腐蝕已出現嚴重穿孔、破洞之現象，對鋼板樁結構承載已有疑慮，應儘速進行詳細評估，確保碼頭與航道安全。

◆高雄港

高雄港鋼板(管)樁碼頭數量很多，興建之初即已加裝陰極防蝕措施，因此腐蝕狀況甚為輕微。由於本港區鋼板(管)樁碼頭數量很多且每一座碼頭範圍很大，民國 80~83 年調查時，限於經費僅選擇數座不同區域之碼頭，如#39、#40、#58、#63、#69、#70 等進行調查，調查結果腐蝕速率均小於 0.1mm/yr.，腐蝕電位值均小於-850mV，屬於有效防蝕保護範圍。民國 89 年檢測第五貨櫃碼頭(#76~#81)時，鋼板樁之腐蝕電位值均達防蝕保護範圍。民國 93 年檢測 #69、#70 碼頭，腐蝕速率甚小，鋼樁保護電位值均達到有效防蝕保護範圍。

四、防蝕維護策略之探討

4.1 R.C.結構物之防蝕

1.陰極防蝕法

陰極防蝕理論應用於金屬腐蝕防治的技術，早於西元 1832 年英人 Humphery Davy 對軍方船艦外殼之防蝕開始，迄今有百餘年歷史，在處理水環境下之金屬腐蝕防治，相當容易且有效。但是，在鋼筋混凝土環境下，由於混凝土為一高電阻材料，應用上較為困難，因此發展緩慢至今研發應用成功乃是近三十幾年的事情，目前技術成熟，已被公認為解決鋼筋混凝土腐蝕唯一有效的方法。美、加、日、北歐等國家早已應用於各類結構物之防蝕，大幅提高結構物之耐久性與安全。陰極防蝕依電(荷)源供應方式之不同，可分為下列兩種方法；

(1)外加電流法

本法乃是以一外接直流電源供應器，提供陰極與陽極之間的電位差，陽極接於電源供應器之「+」端，被保護金屬接於電源供應器的「-」端。如以鋼筋混凝土建物為例，電荷(流)從電源供應器之「+」端流出經過介質(混凝土)到達鋼筋表面，供應防蝕電流給鋼筋，使鋼筋表面不會失去電子(亦即達到防蝕的目地)，然後，電荷(流)由鋼筋經導線回到電源供應器「-」端，形成一個電化學電池迴路系統，如此鋼筋便受到保護。一般陸上之 R.C.結構物多採用此法，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，又能使鋼筋表面再次產生鈍化保護層，因此，只要防蝕系統維護管理良好，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、北部濱海之台二線數座公路橋樑、台北世貿大樓地下停車場、嘉義布袋港跨海橋樑工程等等，防蝕成效相當良好。圖 18 為 R.C.結構物安裝陰極防蝕之示意圖。

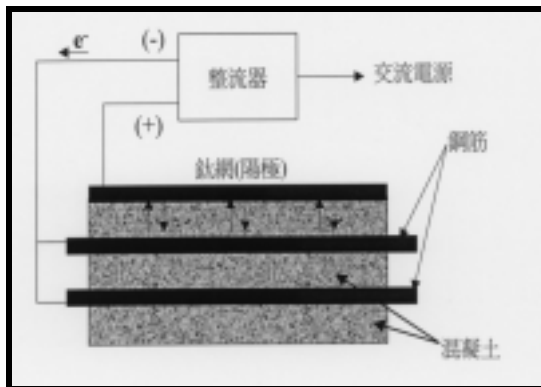


圖 18 R.C.結構物陰極防蝕示意圖

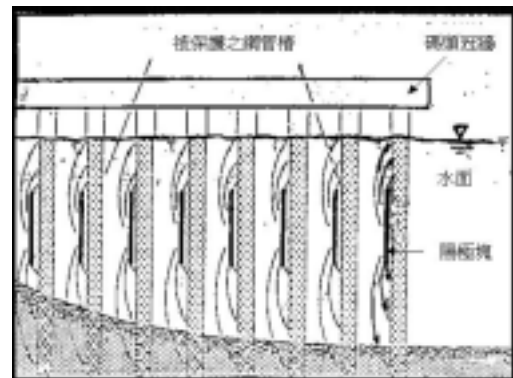


圖 19 碼頭鋼樁犧牲陽極防蝕示意圖

(2)犧牲陽極法

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，此法大都應用於水系環境下之金屬防蝕，諸如港灣碼頭鋼板樁、海水下基礎鋼構設施、管線(件)等之防蝕維護，圖 19 為港灣碼頭鋼管樁之犧牲陽極防蝕示意圖。近年來依使用陽極方式之不同，美國佛州交通局(FDOT)之研究指出，本法亦可再細分為諸如金屬熔射、鋅板、夾克套管、鋅膜導電膠等方式之防蝕^[18]，亦可應用於 R.C.結構物上。

a. 金屬熔射方式

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，一般常用壓克力樹脂施予封層處理。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，由於鋅與鋼筋電連通之傳導或以混凝土為介質，將鋅所釋放出之電荷傳遞供應給鋼筋，使鋼筋不發生腐蝕行為，達到陰極保護的目的。鋅塗層之噴塗厚度可依設計防蝕年限而定。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/m^3 ，以基樁為例鋅板可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；夾板的固定方式是利用 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

為鋅板系統之改良，為基樁 RC 結構於水下、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，置於低潮位線下 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，夾層與混凝土間之間距以砂漿水泥灌注填充。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簡單，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，因此僅能適用於乾燥的大氣環境下。

2. 電化學去鹽工法

去鹽處理基本上是一種電化學反應程序，主要乃應用電學之「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，形成一強制性電力場，藉著電荷相吸(斥)之電驅動力，將鋼筋附近之 Cl^- 驅離並逐出混凝土外，以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。本法萌芽於 1970 年代，於 1990 年代後期已商業化應用，去鹽之效應視施加電流之大小而異，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。一般情況下，去鹽效率可達到 60%，甚至高達 80~90%。

a. 去鹽系統

電化學去鹽系統迴路主要包括；於混凝土結構物表面鋪設一輔助陽極(槽)，槽內注滿電解質(溶液)，內含一充分浸沒之陽極金屬網(當作陽極)，陽極金屬網以導線連接至外部電源供應器之「+」端。混凝土內之鋼筋(當作陰極)，則與外部直流電源供應器之「-」端連接，其間具高電阻性質之混凝土可視為電解質，當電源供應器通電啟動時，即形成一完整之電化學電池迴路系統。圖 20 為電化學去鹽法之簡單示意圖^[20]。

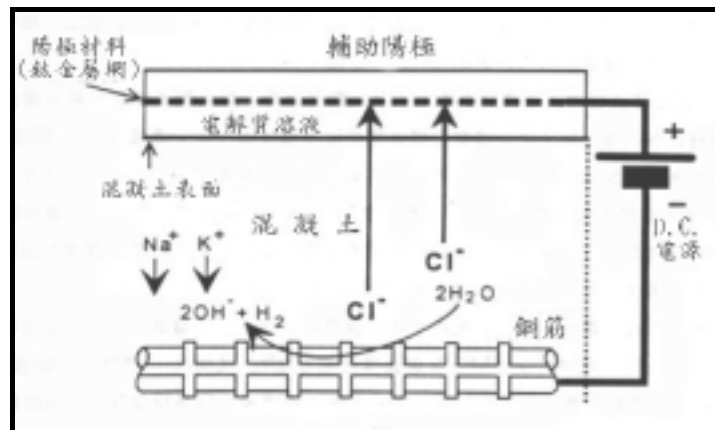
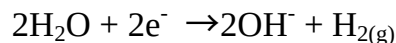
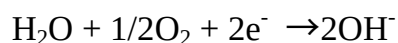


圖 20 電化學去鹽系統示意圖^[20]

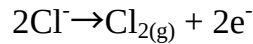
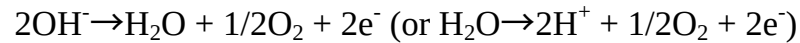
b. 去鹽之化學反應程序

去鹽過程中除了 Cl^- 之游動外，亦伴隨著孔隙溶液中其它離子之游動、擴散、輸送...等現象，如陽離子(Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{+2} 、 Mg^{+2} 、 H^+)向陰極(鋼筋)游動， OH^- 、 CO_3^{-2} 及鋼筋附近之 Cl^- 等陰離子則向混凝土外之陽極游動。如此一來，不但去除或降低 Cl^- 濃度，同時提升鋼筋附近之鹼性環境。去鹽過程中，孔隙溶液之離子游動及化學反應程序如下；

a) 陰極(混凝土內之鋼筋)；鋼筋周圍有 OH^- 與 H_2 形成，化學反應如下：



b)陽極(混凝土表面外之金屬網)；有 O_2 及 $Cl_{2(g)}$ 產生，化學反應如下：



其中，氯氣(Cl_2)與陽極槽內之電解液($NaOH$ 或 $Ca(OH)_2$)，發生化學反應，逐漸酸化電解液，其酸化反應如下；



c)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^-)向混凝土外之陽極游動。

3. 電化學還鹼法

基本上電化學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。處理過程中施加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粒料及在有水份的環境下，將增加發生「鹼質與粒料反應」的機率。

a. 還鹼系統

圖 21 為電化學還鹼法之簡示圖^[11]，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。

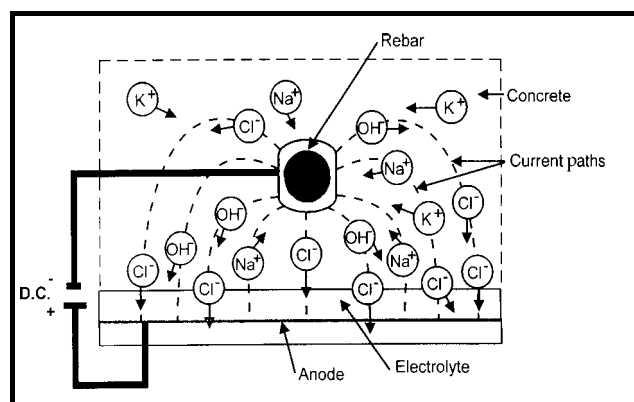
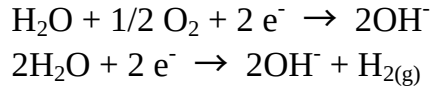


圖 21 電化學還鹼法之簡示圖^[11]

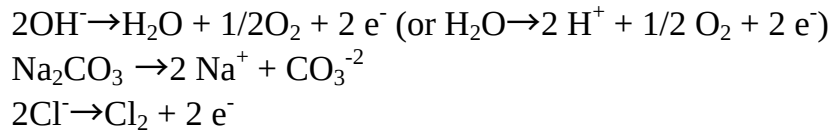
b.還鹼之化學反應程序

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：

a)陰極端(鋼筋)：產生 OH^- 與 H_2



b)陽極端：(混凝土外之鈦網陽極)



c)孔隙溶液

陰離子(OH^- 、 CO_3^{-2} 及 Cl^-)從鋼筋向混凝土外之輔助陽極游動，而陽離子(Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{+2})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。

4.2 港灣鋼構造物之防蝕

港灣鋼構物常年浸漬於海水中，受到海水中各種腐蝕因子之侵襲，鋼材極易發生腐蝕損壞，嚴重威脅結構物之安全與使用年限。由於鋼板(樁)處於不同海水深度(部位)，且損壞程度可能亦不同，因此，防蝕工法有所不同。下列簡述一般常用之防蝕方式：

1.陰極防蝕(犧牲陽極)

適合沒入海水中之鋼材防蝕，鋼管(版)樁碼頭通常多以安裝犧牲陽極塊方式處理，如圖 19 所示，防蝕設計年限可達 20 年，效果良好。

2.塗裝、覆襯或金屬熔射

適合曝露於大氣、飛沫及潮間帶鋼板(管)樁之防蝕，但是塗(覆)層較容易受外力碰撞而剝落，防蝕保護年限較短。

3.防蝕帶及加裝 FRP 夾克保護

適合於潮間帶鋼板(管)樁之防蝕，容易受外力碰撞而破裂，防蝕保護年限較短。

4.預留腐蝕厚度

增加鋼板原始設計厚度，藉此延長鋼板使用年限。

4.3 未來之策略

海洋環境下不論是浸泡於海水或濱海陸上之結構物，由於受到海水的浸泡或海風中挾帶高含量鹽份之侵入，鋼材構造物甚易發生銹蝕損壞，鋼筋混凝土構造物亦會造成腐蝕損毀。為降低海洋結構物之維護成本並提升其耐久性與使用效能，對於既有結構物應進行定期檢測與維護，對於未來新建工程，應採用適合海洋環境之設計規範，並使用新材料、新工法來建造及加強防蝕技術之應用，例如未來港灣之開發或擴建，在土建工程上，應大量使用高性能混凝土或添加波索蘭材料或採用 II 型水泥等材料建造，以提升結構物之耐久性。同時為監測結構物之現況，在建造時可埋設監測元件，隨時掌握結構物受外力衝擊或內部鋼筋腐蝕變化之情形，一旦發生狀況時，可立即搶修或防範未然。在 R.C.結構體或重要構件之鋼筋，應安裝陰極防蝕保護等措施，以降低或防止鋼筋受腐蝕之威脅，維持結構承载力。至於在鋼(材)構造物方面，板(管)樁式之碼頭應全面採取陰極防蝕措施，以提高鋼板樁之耐久性與碼頭結構之安全。

五、結 論

台灣地區為一海島氣候，海洋原本就是一個嚴酷的腐蝕環境，屏除外力侵襲因素外，土建各類型構造物甚難幸免於腐蝕之侵襲與損壞。基於耐久、經濟與安全性考量，現有結構物必須定期進行檢測與維護，明確掌握現況，俾採必要之防範措施，延長結構物使用年限。在濱海地區及港灣設施未來新建工程時，則必須採用適合海洋環境之規範，採用新工法、新材料，確實做好施工品質管控。此外，適當之維修機制(諸如工法、技術、材料、設備、監測等)之建立，則將更有助於降低維護成本及提高維修成效，增加使用壽命。

參考文獻

1. John P. Broomfield, Corrosion of Steel in Concrete, 1st Ed., E & FN Spon, London, 1997.
2. J. Kropp and H. K. Hilsdorf, Performance Criteria for Concrete Durability, 1st

- ed., E & FN Spon, London, 1995.
3. J. H. Bungey and S. G. Millard, Testing of Concrete in Structures, 3rd. Ed., Blackie Academic & Professional, Chapman & Hall, New York, 1996.
 4. D. Stark, "Handbook for the Identification of Alkali-Silica Reactivity in Highway Structures", National Research Council, Washington, U.S.A., 1991.
 5. James PPR Manual, James Instruments Inc., U.S.A.
 6. V. M. Malhotra and N. J. Carino, "Handbook on Nondestructive Testing of Concrete", CRC Press, Inc., U.S.A., 1991.
 7. Denny A. Jones, Principles and Prevention of Corrosion, Macmillan Publishing Company, New York, U.S.A., 1992.
 8. J. Glanville and A. Neville, Prediction of Concrete Durability, 1st ed., E & FN Spon, London, 1997.
 9. Edwards and E. Willard, "Marine Corrosion: Its Cause and Cure", Proceedings of the 8th Annual Appalachian Underground Short Course, Technical Bulletin No. 69, West Virginia University Bulletin, October 1963.
 10. Recommendation for Design and Construction of Electrochemical Corrosion Control Method., Concrete #107, Japan Society of Civil Engineers, Nov., 2001.
 11. P. M. Chess, Cathodic Protection of Steel in Concrete, E & FN Spon, London, 1998
 12. 李釗,「港灣混凝土結構物劣化探討(一)」,港灣構造物安全檢測與評估研習會,交通部運輸研究所,民國 90 年 7 月 4 日。
 13. 許書王,「台灣地區鹼質與粒料反應抑制策略之研究」,博士論文,國立中央大學土木工程研究所,民國 88 年 6 月。
 14. 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。
 15. 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。
 16. 碼頭鋼板樁現況調查與腐蝕防治研究(1/3), MOTC-IOT-IHMT-MA9011,交通部運輸研究所,民國 91 年 12 月。
 17. 港灣構造物檢測與耐久性試驗研究(2/3), MOTC-IOT-92-H1BA04,交通部運輸研究所,民國 92 年 6 月。
 18. 港灣構造物陰極防蝕準則訂定(草案)研究, MOTC-IOT-IHMT-90-004,交通部運輸研究所,民國 91 年 3 月。

19. 港灣構造物檢測與耐久性試驗研究，MOTC-IOT-91-HA04，交通部運輸研究所，民國 92 年 6 月。
20. 林宜清，「混凝土非破壞性檢測技術介紹」，海洋環境下工程品質與施工技术研討會，港灣技術研究所，1995.
21. 楊潔豪等，「透地雷達在橋樑檢測上的應用」，橋樑檢測與評估研討會，1997.

腐蝕與防蝕概論

翁榮洲*

摘 要

金屬腐蝕不但造成嚴重的財產損失，亦可能造成嚴重的人員傷亡。雖然腐蝕是眾人所熟悉的一種自然現象但確也是可以控制的。本文主要由熱力學及電化學觀點探討腐蝕現象，除了能了解腐蝕機理並找出控制腐蝕及預測腐蝕行為的方法。

Fundamental and Prevention of Corrosion

J. C. Oung*

ABSTRACT

The cost of corrosion of protection against corrosion is estimated extremely expensive. Corrosion also causes inconvenience to human beings, and sometimes even loss of life. Corrosion is a nature phenomenon, but it can be controlled. The thermodynamic and electrochemical aspects of corrosion are discussed in this paper. Understanding these principles of corrosion is indispensable, not only to reveal the mechanisms, but also to control corrosion, to designed appropriate means of corrosion protection, and to be able to predict the long-term corrosion behavior of metallic materials.

* 工業技術研究院工業材料研究所 正研究員兼副組長

一、前言

腐蝕是眾人所熟悉的一種自然現象，全世界每年由於銹蝕所造成之損失數以億計。根據 1975 年美國國家標準局及 Battelle Columbus 實驗室估計，全美每年腐蝕之損失大約為七佰億美金，佔總生產毛額之 4%，其中約有一百億可用目前之防蝕技術來避免。1998 年美國又進行了一次全國腐蝕損失調查結果顯示，全美每年腐蝕直接損失大約為二仟柒佰陸拾億美金，約佔當年總生產毛額 3.1%。台灣雖無這方面之估計，但相信每年由腐蝕所造成之損失亦不在少數。腐蝕不但造成財產損失、產品或環境污染，亦可能造成嚴重的人員傷亡。以最近日本美濱核能電廠蒸氣外洩造成四人死亡為例，事故原因主要是由於冷卻管路內部已腐蝕薄化至零點一五公分，而相關單位又未能即時檢查出所造成。在台灣我們也常接獲工業界委託之腐蝕破損分析調查案，每個案例其造成之直接間接損失從數萬至仟萬上億。為了要避免這些腐蝕損失，有必要了解腐蝕的基本現象，並提出適當之防蝕對策。

腐蝕是一種自然的現象，大部份的腐蝕都可視為一種電化學反應。雖然電化學理論吾人早已熟知，但應用於腐蝕現象之解釋，卻始於 1938 年 Wanger 與 Trand 二人所提出之合成電位理論 (mixed potential theory)，後經 Stern, Geary, Pourbaix, Uhlig 等人之研究探討，方使腐蝕之電化學理論更趨完整，並成功的應用於腐蝕之控制，諸如陰極保護法、陽極保護法、抑制劑使用、抗蝕合金設計、快速腐蝕速率測定等。本文擬介紹腐蝕之一般電化學原理及其應用，俾大眾對材料之腐蝕及防蝕有更深一層之了解。

二、腐蝕之熱力學觀點

就熱力學觀點—化學反應是否會自然發生在於此反應發生後系統之能量是否會減少。這可以由反應前後自由能 G 之變化來量度。若一反應之自由能變化 ΔG 為負，即反應後系統自由能降低，則此反應可以自然發生，反之 ΔG 為正，此反應無法自然發生。參見圖 1，一球自位置 1 移至位置 2，自由能減少(由於重力位能減少)，是此系統之自然反應方向(Spontaneous direction)。相反的，由位置 2 至位置 1，需要外加能量才能完成，故非自發反應。

以金屬為例，金屬多以礦石等自然態存在，當它們從礦石冶煉成金屬態時，必需吸收能量，因此金屬態的自由能比金屬礦的自由能高，也就是說金屬態在自然界是處於一種暫存的狀態，當金屬在使用時將與環境發生作用(即金屬腐蝕)並釋放自由能而回歸至礦石自然態，因此金屬腐蝕是一自然的趨勢與現象。典型的循環可以鐵為例，赤鐵礦(化學成份為 Fe_2O_3)是最常見

的鐵礦石，它是鐵的氧化物，鐵經腐蝕的生成物的組成也是 Fe_2O_3 。自鐵礦冶煉成鐵所需的能量，與後來再經由鐵的腐蝕而成與鐵礦相同組成的鐵銹時放出的能量相等，僅僅是能量變化的速率不同而已。

熱力學明確的告訴我們化學反應的發生是朝自由能降低的方向，卻不能決定反應速率(即腐蝕速率)的大小。以圖 2 為例，由位置 1 至位置 2，不論經由路徑 A 與路徑 B，最後的自由能改變 ΔG 都一樣，但顯然的經由路徑 B 反應，較經路徑 A 需要更多的時間，因此一個化學或腐蝕反應，只能藉 ΔG 之正負來預測此反應發生之方向，而不能藉其大小來預測其化學或腐蝕反應速率。

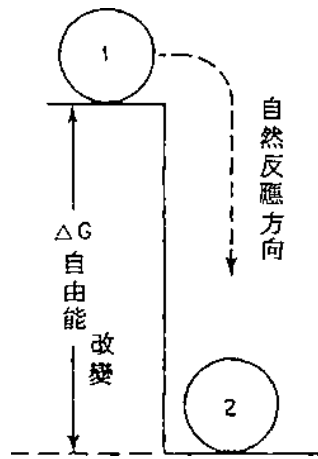


圖 1 化學反應自由能變化圖

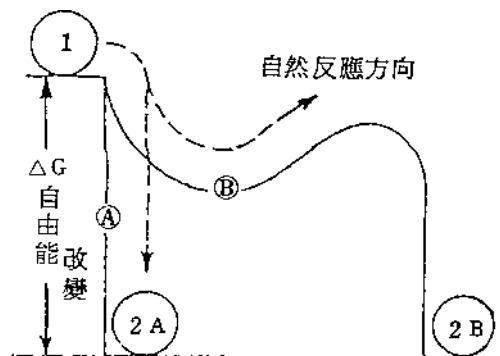


圖 2 反應路徑與反應速率的關係

腐蝕為一種電化學反應，而一個電化學反應之自由能改變量與電位之關係可以表示為：

$$\Delta G = -nFE \dots\dots\dots(1)$$

式中 n 是反應中轉移的電子數，F 是法拉第常數，E 是平衡電位。一電化學半電池反應之平衡電位 E，可以藉 Nernst 方程式來決定

$$E = E_0 + 2.3 \frac{RT}{nF} \log \frac{a_{\text{oxid}}}{a_{\text{red}}} \dots\dots\dots(2)$$

E_0 是標準狀態下(25°C, 1atm, 單位活度(activity))之平衡電位, R 為氣體常數, T 為絕對溫度, a_{oxid} , a_{red} 分別為氧化物質與還原物質之活度。經由適當的實驗可以求得各種金屬相對於以氫半電池電位則為零之標準電位序列示如表 1 所示。

表 1 標準電極電位序列

Au→Au ³⁺ +3e	1.42	鈍性端
Pt→Pt ²⁺ +2e	1.2	
O ₂ +4H ⁺ +4e→2H ₂ O	1.23	
Pd→Pd ²⁺ +2e	0.83	
Ag→Ag ⁺ +e	0.799	
2Hg→Hg ₂ ²⁺ +2e	0.798	基準
Fe ³⁺ +e→Fe ²⁺	0.771	
O ₂ +2H ₂ O+4e→4OH ⁻	0.401	
Cu→Cu ²⁺ +2e	0.34	
Sn ⁴⁺ +2e→Sn ²⁺	0.154	
2H ⁺ +2e→2H	0.000	
Pb→Pb ²⁺ +2e	-0.126	
Sn→Sn ²⁺ +2e	-0.140	
Ni→Ni ²⁺ +2e	-0.23	
Co→Co ²⁺ +2e	-0.27	
Cd→Cd ²⁺ +2e	-0.402	活性端
Fe→Fe ²⁺ +2e	-0.44	
Cr→Cr ³⁺ +3e	-0.71	
Zn→Zn ²⁺ +2e	-0.763	
Al→Al ³⁺ +3e	-1.66	
Mg→Mg ²⁺ +2e	-2.38	
Na→Na ⁺ +e	-2.71	
K→K ⁺ +e	-2.92	

資料來源：G. Kortum and J. O'M. Bockris. *Textbook of Electrochemistry*, Vol. 2, Elsevier, New York, 1951, pp.745-755, and W. M. Latimer, *Oxidation Potentials*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1952, p.39.

由表 1 可以得知金屬半電池電位若以氫半電池為參考有些金屬的電位較氫半電池電位為高，有些較氫半電池電位為低，在靠近金、銀的一端我們稱這些金屬較鈍性，亦即較不易與環境起作用，反之在另一端之金屬如鋁、鎂、鋅等則較活性。因此在腐蝕研究或工程中我們常需要量測金屬的電位，以預測金屬在該環境的腐蝕行為。

在許多環境中使用標準氫半電池來量測電位極為不便，此可以利用任何金屬與其含特定離子濃度的溶液所成的半電池來代替以測量電位，但是必須該半電池在與標準氫半電池結合時可重複讀出正確電壓數值者，如能符合此條件就可利用它來測量電位，再經簡單的算術運算換算成標準電位。

在腐蝕研究時常用為參考電極的半電池及它們與氫半電池之相對電位值列於表 2。

表 2 對應於氫標準電極之參考電極(半電池)的電位值半電池

半 電 池	電 位 · 伏
飽和甘汞	+0.2415
1 當量甘汞	+0.2800
1/10 當量甘汞	+0.3337
銀/氯化銀	+0.2222
銅/飽和硫酸銅	+0.3160
氫	0.0000

由(1)(2)及熱力學數據，吾人可以求得一腐蝕反應之 ΔG 值，以預測此反應是否會發生。但如前所述，熱力學最主要是用在於能夠指出，一反應之 ΔG 為正時，此反應絕對不可能發生，當 ΔG 為負時，雖然腐蝕反應可以發生，但若反應速率無限小時，仍可視為此反應不發生，亦即不發生腐蝕。

Pourbaix 首先運用熱力學來探討腐蝕反應，並根據 Nernst 方程式及溶解度積，導出了有名的 Pourbaix 圖，即 Potential-pH 圖。圖 3 為 Fe-H₂O 系統在 25°C 時之 Pourbaix 圖。圖上標明之化學物質，表示該物質在該區域於熱力學上是穩定的。在 Fe⁺⁺、Fe⁺⁺⁺ 和 FeO₂H⁻ 為安定之區域，金屬預期會腐蝕，然而在更活性電位區域，鐵呈安定狀態，此區域鐵對腐蝕具免疫性(immunity)。在腐蝕生成物 Fe₂O₃、Fe₃O₄ 呈安定狀態區域，金屬定會腐蝕。但若腐蝕生成物會吸附在金屬表面，或以某種方式企圖阻止底部之金屬繼續腐蝕，則此金屬處於被動態(passivation)腐蝕速率變得非常小。根據以上討論，吾人可將圖 3 之 Pourbaix 圖，簡化成圖 4 以腐蝕、免疫及被動態，來預測鐵在水中之電化學行為。

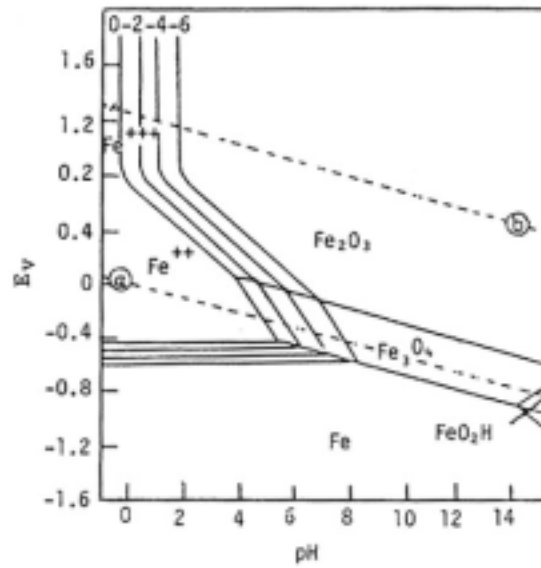


圖 3 Fe-H₂O 系統在 25°C 時之 Pourbaix 圖

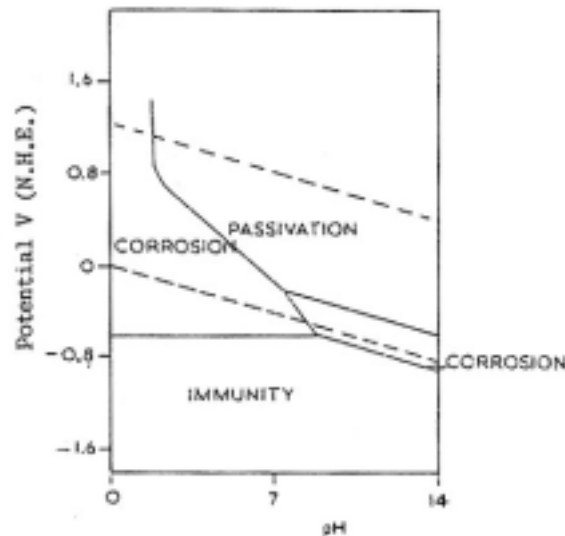


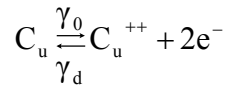
圖 4 簡單之 Fe-H₂O 系統，在 25°C 時之 Pourbaix 圖

Pourbaix 圖之最主要功用為，①預測反應之自然發生方向。②預估會發生腐蝕之 pH 值和電位區域。③預估腐蝕生成物之組成。④預測何種環境改變會降低或阻止腐蝕發生。然而使用此圖時，須特別注意下列限制，①不可用於預測腐蝕反應發生之速率，②未考慮其他額外離子如 Cl⁻、Br⁻等所造成之效應。

三、腐蝕之動力學觀點

1. 極化

設有一電化學系統，其離子活度為 1 之銅溶液，當此系統達到動態平衡時，其氧化速率 γ_o 等於還原速率 γ_d



此時系統之電位稱為平衡電位 E_0 。若有一淨電流流入，或自表面流出時，此系統將不再保持平衡，電位也不再保持在平衡電位。這種由於淨電流流入或流出電極，所造成之電位改變稱為極化。極化程度以過電壓 (overvoltage) η 表示之，其定義為電極電位與其平衡電位之差值，即 $\eta = E - E_0$ ，單位為伏特。當電極電位較平衡電位為正或貴重 (noble) 時，稱此電極於陽極極化狀態，反之電極電位為負或活潑 (active) 時，稱之為陰極極化。

於動態平衡時，電極之氧化反應速率 γ_o 等於還原反應速率 γ_d ，根據法拉第定律，此速率可以以電流密度來表示，亦即

$$\gamma_o = \gamma_d = \frac{i_0}{nF}$$

i_0 稱之為交換電流密度 (exchange current density)，為極反應本身特性，極之化學成份，表面粗糙度、離子活度及溫度之函數。一系統之交換電流密度，必須以實驗來決定。

電極之極化，包括活性極化 (activation polarization)，濃度極化 (concentration polarization)，及電阻極化 (resistance polarization) 三種，以下分別討論之：

- (1) 活化極化：活化極化是因電極與溶液界面間，電子轉化必需克服一活化障礙而引起，是由電化學反應中之速率決定步驟 (slow step in the reaction sequence) 來控制。任何電極之活性極化，均隨電流密度之增加而增加，其關係可由 Tafel 公式表示：

$$\eta_a = \pm \beta \log \frac{i}{i_0}$$

η_a 是活化過電壓， i_0 是交換電流密度， β 稱為 Tafel 常數或 β 斜率，其值約介於 0.05 伏特至 0.15 伏特之間。若以過電壓對電流的對數座標作圖，可得一線性關係。圖 5 為氫電極過電壓與電流之關係圖，這種曲線稱之為極化曲線。

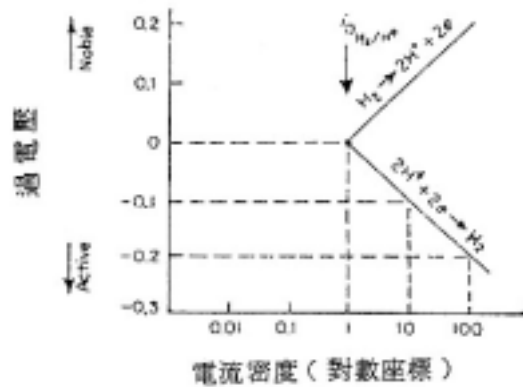


圖 5 氫電極化之活性極化曲線

(2)濃度極化：當一電化學反應進行時，由於質量輸送速率有限，產生濃度不均勻會造成另一種極化，稱之為濃度極化。在不考慮活化極化時，濃度極化可以下列表示；

$$\eta_0 = 2.3 \frac{RT}{nF} \log(1 - \frac{i}{i_L})$$

其中 η_0 為濃度過電壓， i_L 為極限擴散電流密度(limiting diffusion current density)，其大小為

$$i_L = \frac{DnFC_B}{x} \dots\dots\dots (3)$$

D 為反應離子之擴散係數， C_B 是溶液中反應離子濃度，x 是擴散層厚度。一般濃度過電壓與電流間之關係如圖 6 所示。由式(3)可知，當溶液攪拌或速度增加時，擴散層厚度減少，或溫度增加，D 值變大，或增加溶液濃度 C_B 時，均會使 i_L 值變大。

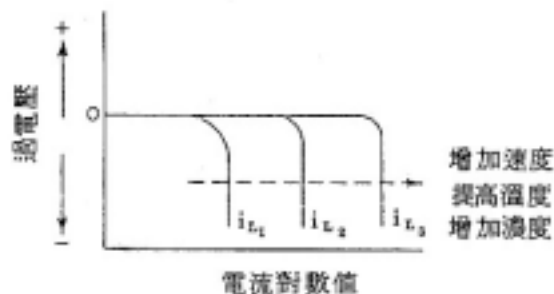


圖 6 濃度極化曲線及其影響因素

(3)電阻極化：由於溶液之電阻存在，當淨電流產生時會產生一額外之過電壓，此稱為電阻極化，即：

$$\eta_R = k \pm net$$

k 為溶液之有效電阻， η_R 為電阻過電壓。

由以上之討論得知，電極之極化實為三項過電壓，即活化過電壓 η_a ，濃度過電壓 η_c 和電阻過電壓 η_R 之和。

對於一電極反應，並非三種過電壓都同樣重要。在腐蝕系統中，對於金屬表面上之局部作用電池而言，陰極與陽極相互間非常接近，於是電阻極化與其他兩種極化因素相比較時，變成次要因素，可以忽略（但在實驗室作極化圖時，必需考慮電流在參考極與欲測電極間所造成之電阻極化）。陽極溶解反應中，由於金屬表面可溶解之原子，可以無限制供應，故可以不考慮由濃度差所造成之極化現象，因此陽極極化反應可由下式表示（不考慮活性—被動態(active-passive)行為，此行為於下文再討論）：

$$\eta_{diss} = \beta \log \frac{i}{i_0}$$

若還原反應為氧或氫之還原，則反應進行至某程度後，此還原物質便不能快速移動至陰極，於是反應速率便由擴散來控制，因此還原反應必須考慮兩種極化現象，即

$$\eta_{red} = -\beta \log \frac{i}{i_0} + 2.3 \frac{RT}{nF} \log \left(1 - \frac{i}{i_L} \right)$$

其極化曲線如圖 7 所示。

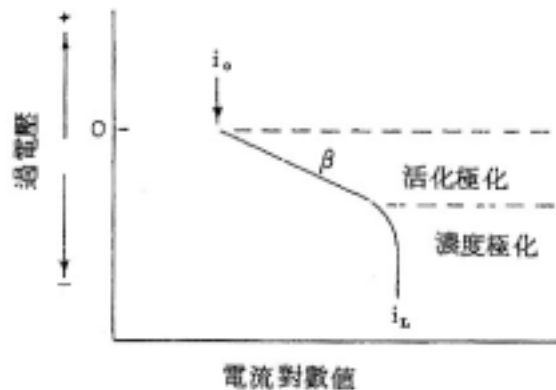


圖 7 受濃度極化及活化極化影響之極化曲線

2. 鈍化(passivity)

鈍化是指某些金屬如鐵、鎳、鉻等在一些環境中，由熱力學推算，該金屬應處於極不穩定狀態，腐蝕速率應相當高。然而在實際的情況下，金屬卻能保持穩定。例如鐵會溶解於稀硝酸中，但在濃硝酸中，鐵會形成一惰性保護膜，阻止鐵之溶解，吾人稱之為鐵處於鈍化狀態。鈍態膜之厚度大約為 $100 \text{ \AA}$ 或更薄。圖 8 為一活性-鈍態(active-passive)金屬之陽極極化曲線。起初，金屬溶解形式與活性金屬相似，在電位升高至某一電位之後，金屬表面生成一層鈍態膜，因而解速率突然下降，並續一段電位區域，這段區域稱之為鈍態區域。區域之寬度與合金及環境有關。電位繼續升高，電流又復升高，另一反應產生，而達過鈍化區(transpassive region)，另一反應可能是由於離子氧化到高原子價狀態，鈍態膜結構改變，離子之吸附破壞了鈍態膜，或由於氧氣的生成所造成。

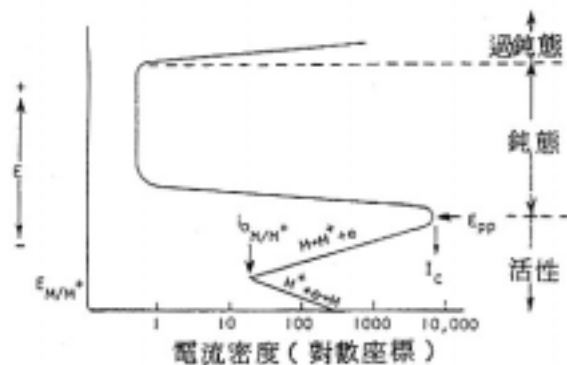


圖 8 活性-鈍態金屬之陽極極化曲線

由圖 8 可以定出兩個重要的電位參數(electrochemical parameter)：

- ① E_{pp} —臨界鈍化電位(critical passivation potential)，即達到鈍態所需之最低電位，當電位高於 E_{pp} 時才會有鈍態之可能性。
- ② I_e —臨界鈍化電流(critical passivation current)即導致鈍化所需之最小電流。

一活性-鈍態金屬之 E_{pp} 愈活性 I_e 值愈小，表示此金屬愈易形成鈍態膜

3. 合成電位理論(Mixed-potential theory)

合成電位理論之觀念，早於 1900 年前便已應用，但直至 1938 年 Wagner 及 Trand 才作有系統之歸納。它包括兩個簡單之基本假設；

- (1) 任何一個電化學反應，均可分成兩個或更多的氧化或還原半反應。

(2)在一個電化學反應中，電荷不減，亦即有一發生電子之反應，必隨伴一接受電子之反應。整個系統將保持電中性，不可能有淨電荷發生。亦即對一獨立的金屬腐蝕系統而言，此系統之總氧化速率和，將等於總還原速率和。

合成電位理論之應用，可由下面的電化學系統來說明：設金屬 M 在一含三價鐵鹽之酸性溶液中，此系統至少包含三個單獨的氧化還原反應，即金屬及其離子，氫離子及氫氣，亞鐵及鐵離子。應用合成電位理論，當系統達成平衡時，總氧化速率等於總還原速率。其中總氧化速率等於金屬溶解，氫氣氧化及亞鐵離子氧化三項之總和。總還原速率丟於鐵離子，氫離子及金屬離子還原之總和如圖 9 所示。據此，可由圖上總氧化速率曲線與總還原速率曲線之交點來，決定系統之腐蝕電位。由於整個金屬均處於腐蝕電位，以此電位劃一平線，可以決定各單獨反應之速率，參考圖 10 可以導出下式：

$$i_{\text{corr}} = i_{(\text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{Fe}^{2+})} + i_{(\text{H}^+ \rightarrow \text{H}_2)}$$

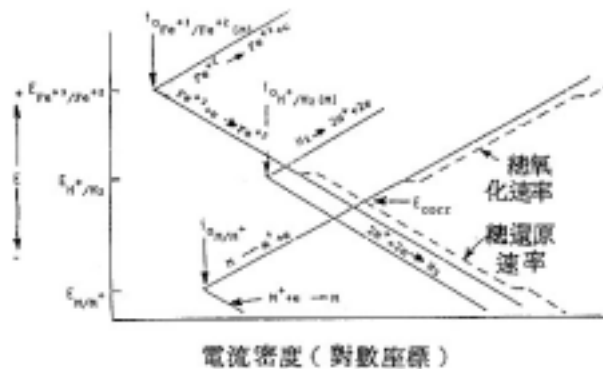


圖 9 金屬 M 在含三價鐵鹽之酸性溶液中的腐蝕行為—決定腐蝕電位

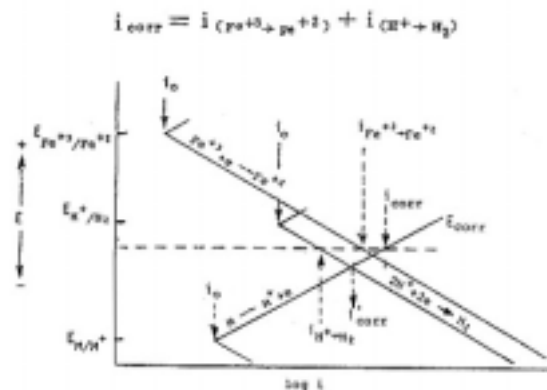


圖 10 金屬 M 在含三價鐵鹽之酸性溶液中的腐蝕行為—計算反應速率

其中 i_{corr} 為鐵之溶解速率， $i_{(\text{Fe}^{+3} \rightarrow \text{Fe}^{+2})}$ 為三價鐵離子之還原速率， $i_{(\text{H}^{+} \rightarrow \text{H}_2)}$ 為氫之產生速率。此式正符合合成電位理論之第二個假設。同圖中亦顯示當系統不含氧化劑(Fe^{+3})時，金屬 M 之腐蝕速率，決定於氫之還極化曲線與鐵溶解之極化曲線的交點，亦即 i'_{corr} 。因此當系統加入氧化劑，會使腐蝕速率由 i'_{corr} 昇至 i_{corr} 。

由以上討論可知，應用合成電位理論可以解釋許多腐蝕現象，以下將討論實際的應用例子。

1. 陽極防蝕法

利用外加電流，使活性—鈍態金屬，由活性態轉為鈍態，而達防蝕保護效果，稱為陽極防蝕。根據合成電位理論，外加陽極電流大小，等於總陽極反應速率與總陰極反應速率之差值，即

$$i_{\text{app(anode)}} = i_{\text{oxid}} - i_{\text{red}}$$

其中 $i_{\text{app(anode)}}$ 為外加陽極電流密度。參考圖 11，欲使系統之電位由腐蝕電位移至 E_1 、 E_2 、 E_3 、 E_4 ，並維持在該電位，所需之外加電流分別為 $990 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 、 $9999 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 、 $0.9 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 及 $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。系統之腐蝕電流在 E_4 電位時大約為 $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。因此在此系統中，只要剛開始時供給一超過 I_c 之電流，爾後只維持一極小之電流密度($1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$)，即可使腐蝕速率大為降低(由 $100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 降至 $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$)。

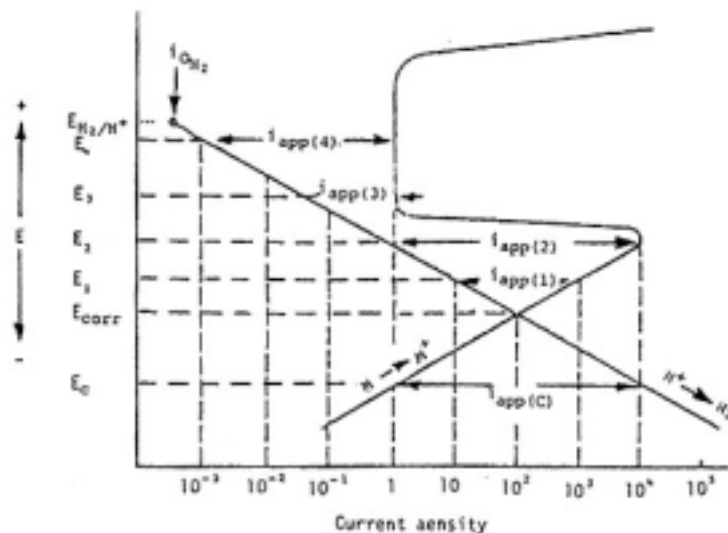


圖 11 外加陽極或陰極電流對活性鈍態金屬腐蝕行為之影響

陽極防蝕法首於 1954 年由 Edeleanu 建議使用。目前大都應用於盛裝化學容器之防蝕。圖 12 為實際使用之情形。本法之優點為用於保護所需之電流費用極小，缺點為只能適用於活性—鈍態金屬，且必須準確控制電位，過大或過小均會使材料本身較未保護前受到更嚴重之腐蝕。

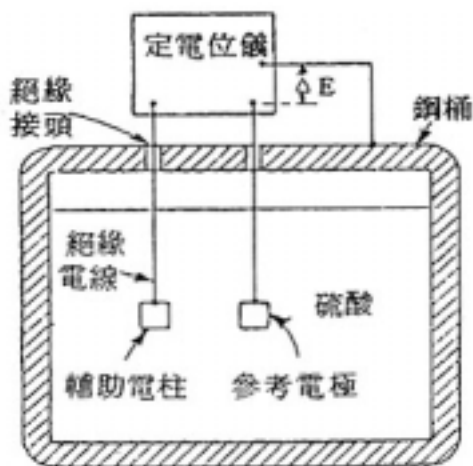


圖 12 盛裝硫酸桶之陽極保護裝置

2.陰極防蝕

藉外加陰極電流或偶合一犧牲陽極(Mg、Al、Zn 等)，使金屬變成陰極以減少表面腐蝕之方法，稱之為陰極防蝕法。圖 11 亦說明了陰極防蝕之原理。外加一陰極電流 $i_{app(cathode)}$ $10,000 \mu A/cm^2$ 能使金屬之電位移至 E_c ，此時腐蝕電流將由 $100 \mu A/cm^2$ 降至 $1 \mu A/cm^2$ 。陰極防蝕法使用範圍極廣，舉凡船舶外殼、地下管路、海底構造物等之防蝕均可使用。

3.Tafel 外推法測腐蝕速率

在實驗室中，以圖 13 所示之線路圖，可測得一試片之極化圖。將試片置於工作電極(W.E)，藉由輔助電極(Aux)(通常為白金電極)外加一電流，其大小可由安培計 A 來測量。工作電極之電位可由另一參考電極(Ref)來測試。試片由腐蝕電位開始逐漸改變電位，同時測量電流並轉換成對數單位，即可得到一外加電流極化曲線。圖 14 為此法所得之一陰極極化曲線。根據合成電位理論，在某一電位上之外加陰極電流，等於該電位上還原反應與氧化，反應之速率差。起初，在 E_{corr} 上，氧化與還原速率相等，外加電流為零，當電位離開 E_{corr} 約 50mv 左右，由於總陽極反應速率小至可忽略，外加電流接近總陰極反應速率，於是可得一活性線性關係，此線性區域稱

之為 Tafel 區域。由此區域外推至腐蝕電位，即可獲得腐蝕速率。此方法之優點為能在極短的時間內測得腐蝕速率，並可連續控制系統之腐蝕速率，且對於相當小之腐蝕速率亦可測得。但若系統之還原反應多於一個時，Tafel 線性區域可能扭曲，影響測量之準確度，因此應用此法時，Tafel 線性區域必須大於 1 次冪以上。

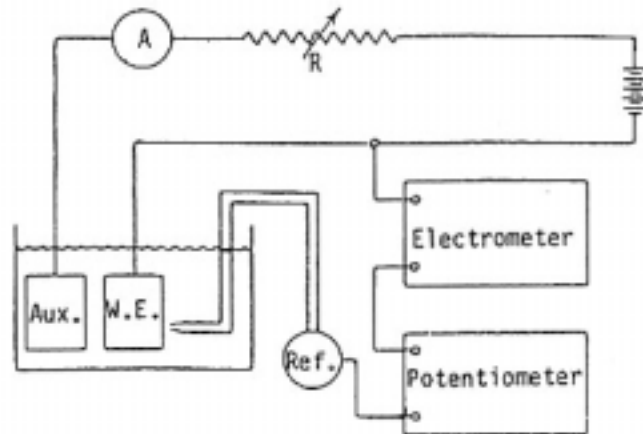


圖 13 外加電流極化曲線測定之線路圖

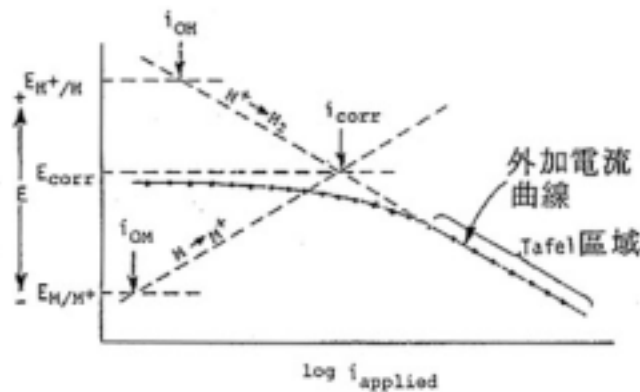


圖 14 外加電流陰極極化曲線顯示 Tafel 區域

4.線性極化測試腐蝕速率

以外加電流對電壓作圖時，通常在腐蝕電位附近正負 10mv 附近，可以得到近似直線之關係如圖 15 所示。直線之斜率由電化學原理推得：

$$\text{斜率} = \frac{\Delta E}{\Delta i_{app}} = \frac{\beta_a \beta_c}{2.3 i_{corr} (\beta_a + \beta_c)} \quad \dots\dots\dots (4)$$

β_a , β_c 分別為陽極與陰極反應之 Tafel 斜率, 若 β 值已知, 則腐蝕速率 i_{corr} 可知, 線性極化之斜率主要受腐蝕速率控制, 斜率愈大, 腐蝕速率愈小。 β 值對斜率之影響較小, 一般假設 $\beta_a = \beta_c = 0.12$ Volt 將(4)式改寫為

$$\frac{\Delta E}{\Delta i_{app}} = \frac{0.026}{i_{corr}}$$

Stern, Weisert 根據此式計算腐蝕速率, 其所得結果與真正腐蝕速率相較不會相差三倍。

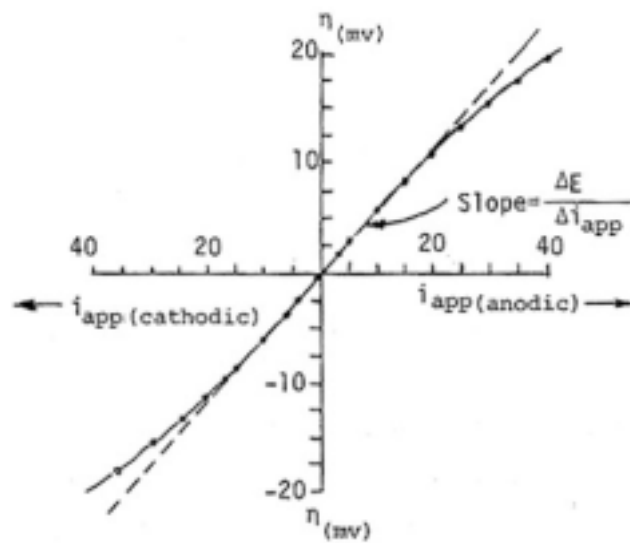


圖 15 線性極化曲線

四、結論

1. 電化學腐蝕理論與傳統的腐蝕理論, 最大的不同點乃在, 電化學以陰極及陽極分開的觀點來探討腐蝕行為, 這種方法不但簡單易了解, 且可觀察其反應機構。
2. 電化學腐蝕之主要基本原理為極化與合成電位理論, 利用此一觀念可以了解並解釋許多腐蝕現象。
3. 電化學理論已成功的應用於許多實際的例子, 諸如陽極防蝕、新的合金設計、腐蝕速率測定等。

參考文獻

1. Corrosion engineering, M.G Fontana, N.D. Greene, McGraw-Hill. Inc. 1967.
2. 電化學，萬其超，台灣商務印書館。
3. 腐蝕理論與實驗，鮮祺振，徐氏基金會。
4. Stern, M, and A.L. Geary, J. Electrochem. Soc. 104 56, (1957).
5. Ibid, J. Electrochem. Soc. 105, 638, (1958).

鋼筋混凝土構造物陰極防蝕設計與驗收

劉益雄*

摘 要

腐蝕問題，長久以來一直是世界各國所面臨的頭痛問題，台灣亦然，尤其濱海地區結構物，更是直接暴露於嚴苛的腐蝕環境中，面臨了耐久性上極大的挑戰。鋼筋混凝土陰極防蝕技術為目前被公認可長期有效使結構物達到防蝕效果，並獲得美國聯邦公路管理局(FHWA)推薦為"唯一能有效抵制混凝土中鋼筋受氯離子侵害之對策"。如何發揮陰極防蝕系統的工作效能，則初期之系統設計及完工後之效果驗證為重要環節，本文主要內容即介紹鋼筋混凝土構造物陰極防蝕設計與驗收之相關工作。陰極防蝕系統設計工作包括：保護電流需求及分布計算、系統構件規格要求及系統構件設置規劃、陽極區及偵測位置分佈、系統線路及監測系統規劃設計。防蝕效果驗收工作包括：系統外觀及軟硬體檢查、極化性能測試與防蝕效果驗收。

RC Structure Design and Acceptance of Cathodic Protection

Yi-Hsiung Liu

ABSTRACT

Corrosion, has been a major problem around the world, so does Taiwan, especially for those structure along seashore even exposed under more serious corrosive environment and face great challenge in durability. Reinforced Concrete Cathodic technology now is recognized which can be achieve long-term protection effectively and recommended by FHWA that it is the only policy to resist invasion of concrete of steel by chloride ion. The key point in how to act the efficacy of Cathodic protection system is based on initial systematic design and result testing. This content introduces the design and testing of Reinforced Concrete structure Cathodic protection. Cathodic

*工業技術研究院工業材料研究所 副研究員

Protection systematic design includes protect current demand and distribution calculation, systematic component custom request and placement planning, anode zone and detection location distribution, planning design of systematic circuit and observation system. Protection includes system appearance and hardware and software checking, polarization capability and protection testing.

一、前言

位在海洋環境下的鋼筋混凝土結構物完成後，可能因浪潮及海風帶來的鹽份，以及鹽份經由土壤、海水附著於混凝土表面，所附著之鹽份隨著時間進展逐漸擴散至混凝土內部，造成混凝土內部鋼材銹蝕膨脹，導致混凝土產生裂縫或剝離，更因混凝土裂縫及剝離，而加速鋼材腐蝕。特別是預力鋼材，因處於高張力狀態，若一旦發生腐蝕，其產生的影響程度更大。

防蝕基本原則在阻斷有利於鋼材腐蝕的有害物質，如水分、濕氣、氧氣、二氧化碳、硫酸根離子及鹽份等之侵入，或以電化學原理抑止鋼材腐蝕，鋼筋混凝土陰極防蝕技術為利用離子交換電化學反應原理，提供混凝土中鋼筋一個反方向的微量保護電流，阻礙鋼筋表面之腐蝕反應。為達到有效的防蝕效果，保護電流供應必須適當，保護電流太低將使鋼筋保護不足而持續腐蝕，然而過度保護(即將金屬之電位往更負的方向進行，使之超過金屬陽極的開路電位)，不僅需要額外的陰極保護電流，而且也會因氫氣的產生造成金屬脆化或是原有塗層的剝落，失去陰極保護防蝕之目的。由於混凝土結構物各區域腐蝕程度及分佈均不相同，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都各有不同，相對使結構物陰極防蝕保護電流的供應分佈及效能監測顯得極為重要。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保護需求，然後針對需求設計適當的供電、偵測設備及規劃配電分佈，為陰極防蝕之首要工作。

二、鋼筋混凝土陰極防蝕工法

陰極防蝕的基本原理即是藉外加電流或犧牲陽極強制使鋼筋形成陰極。陽極不斷的輸出電子使鋼筋週圍呈陰極反應，這樣鋼筋上之鐵離子就沒有機會釋出，因而得到保護。陰極防蝕系統主要包括外加陽極、電流設備、覆蓋層、陰極（鋼筋）及導電介質（含腐蝕因子的混凝土層）。

陰極防蝕技術應用在水下及地下如地下管線或碼頭的鋼板樁已經是成

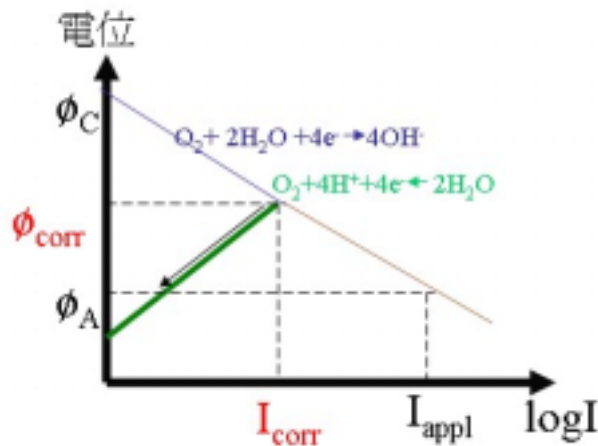
熟且習知的工程技術。地面上鋼筋混凝土陰極防蝕和水中及地下陰極防蝕的不同，主要是混凝土的高電阻使電流不容易很均勻的分佈在混凝土各個部位及鋼筋。然而經過多年研究，陰極防蝕法應用於地面上的鋼筋混凝土防蝕已經有 25 年以上歷史，也獲得美國聯邦公路管理局(FHWA)推薦為"唯一能有效抵制混凝土中鋼筋受氯離子侵害之對策"。在歐美日等國目前已經是廣被接受的技術。

鋼筋混凝土陰極防蝕方法有兩種，一為外加電流法，一為犧牲陽極法。外加電流式陰極防蝕系統主要是利用一外部電源來提供陰極與陽極之間的電位差。陽極必須接於電源之正端，而被保護金屬則接於電源的負端。以鋼筋混凝土為例，電流從陽極經過介質(混凝土)到達鋼筋表面，然後沿著鋼筋經由導線回到電源，如此鋼筋便受到保護，其原理如圖一所示。在電力容易獲得的地方，整流器通常被運用至將 AC 電流轉換成 DC 電流，以提供防蝕所需之電流，然而在較偏遠的地區，汽油或柴油發電機，甚至太陽能電池也可以為外加電流的來源。

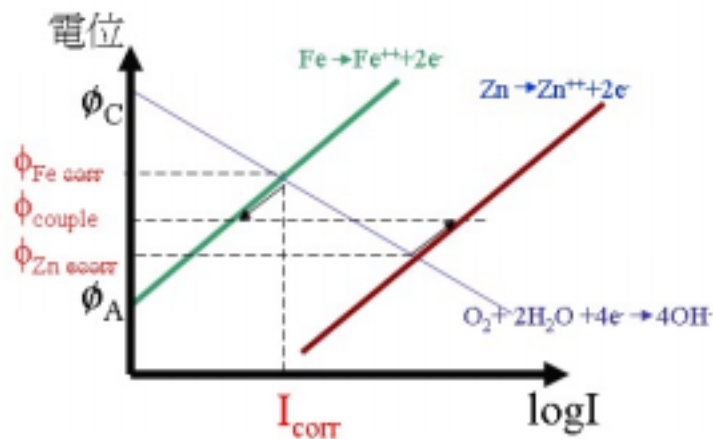
犧牲陽極法主要係使用相對於鋼材活性較高(易氧化)之金屬(例如鋅)作為犧牲陽極材料，與被保護金屬於介質(如土壤、水、混凝土等)中聯結，電位較負之金屬為陽極，形成一電化學電池，利用兩者之電位差產生防蝕電流，達到防蝕之目的。原理如圖二所示；由於異類金屬相接觸，活性(active)較大之金屬(陽極)會在反應中被消耗，而鈍性(noble)的鋼筋(陰極)會因此被保護。

一般而言，外加電流系統較犧牲陽極系統複雜，且外加直流電的費用也比安裝犧牲陽極的費用高。然前者運用可變電源，來保護較大面積之裸鋼或良好被覆的結構物，後者則可應用於結構物之保護電流量需求較少，或介質之比電阻較低的環境。

陰極防蝕在應用方面，地面上鋼筋混凝土構造之陰極防蝕常使用外加電流式陰極防蝕，而水面以下則常用犧牲陽極式陰極防蝕。但對於預力混凝土結構的陰極防蝕方法，如採用外加電流式陰極防蝕，根據 ACI 222.2R-01：“Corrosion of Prestressing Steels”所公佈的研究報告指出，外加電流如無法控制得當，或供電系統穩定度差、受環境氣候影響等，則鋼筋將會產生氫脆(Hydrogen embrittlement)的問題，如預力鋼腱套管亦有腐蝕之破孔，則電流亦將流向鋼腱，同樣產生氫脆問題。預力鋼腱腐蝕或氫脆問題，都是嚴重影響預力結構安全的問題，因此外加電流陰極防蝕法不適合使用於預力混凝土結構。



圖一 外加電流法陰極防蝕極化原理示意圖

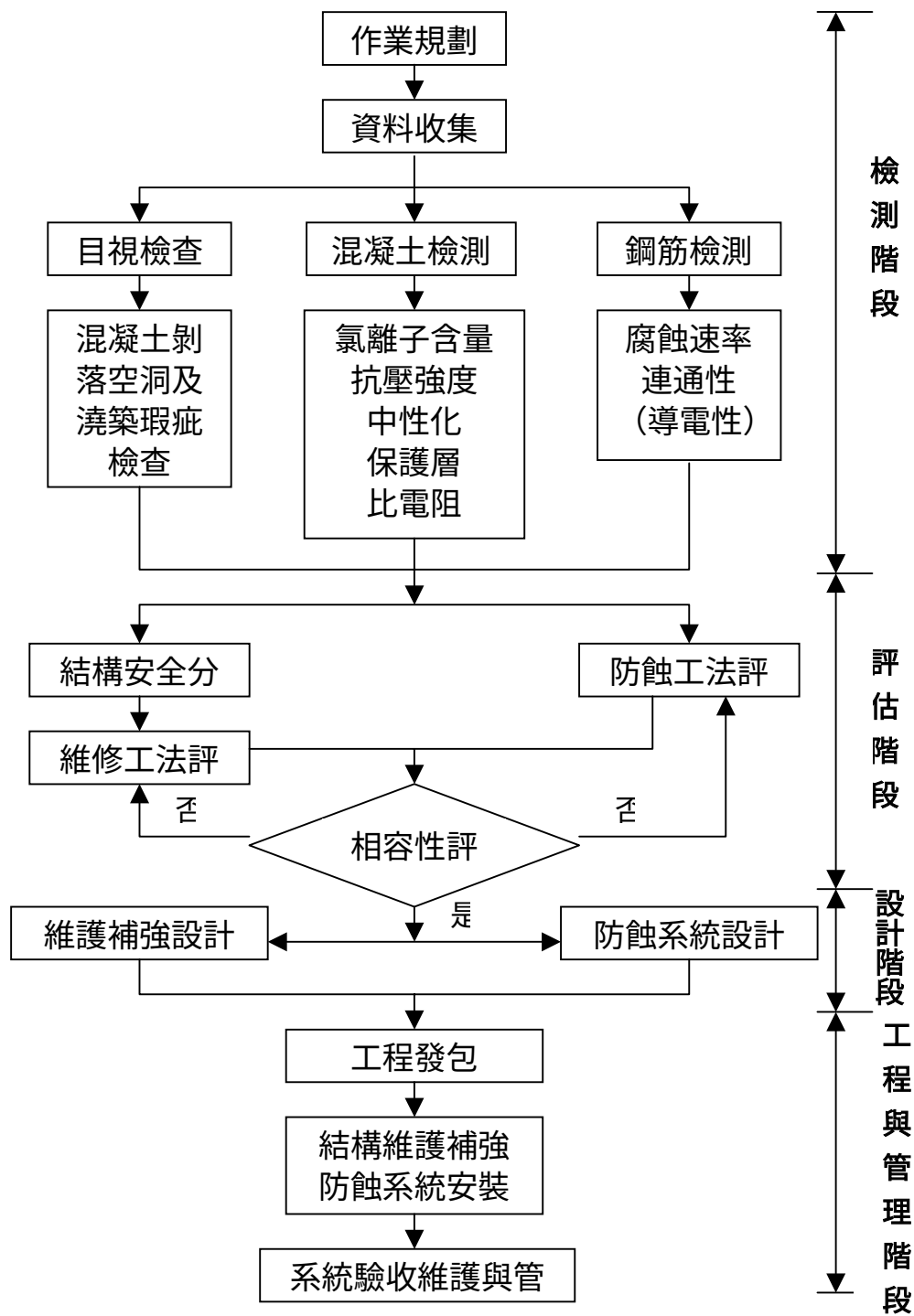


圖二 犧牲陽極法陰極防蝕極化原理示意圖

三、鋼筋混凝土陰極防蝕階段性工作

鋼筋混凝土陰極防蝕法係控制鹽害腐蝕唯一有效的方法，然而在建議或採用此方法前必須進行檢測評估工作，以了解結構體是否適合進行此一防蝕方法。並提供設計或施工時必須依循之必要規範，以期發揮陰極防蝕的最大效果。

鋼筋混凝土結構物進行陰極防蝕時，必須規劃結構物檢查與補強修護作業流程約分為四個階段（圖三），主要工作（表一）與考量因素分述如下：



圖三 鋼筋混凝土陰極防蝕階段工作流程圖

表一 結構物陰極防蝕階段性工作項目

第一階段（檢測階段）			
工作項目	工作內容	方法及設備	產出資料
混凝土表面目視檢查	混凝土剝落、空洞及澆築瑕疵檢查	使用簡單敲擊器材輕敲混凝土表面找出瑕疵位置並拍照記錄	各構件混凝土破損分佈記錄
混凝土裂縫檢查	裂縫分佈狀況	使用Impact Echo進行裂縫探測	裂縫分佈圖
鋼筋密度分佈	計算各構件鋼筋密度	依據結構物配筋圖計算	各位置鋼筋密度分佈計算圖表
保護層厚度分佈	探測各構件混凝土保護層厚度分佈情形	使用鋼筋位置探測儀於混凝土表面進行探測	各檢測位置保護層厚度記錄圖表
混凝土電阻	探測各區域之混凝土比電阻值	使用混凝土比電阻測量儀器於表面進行測量。	各檢測位置混凝土比電阻測量記錄表
腐蝕電位與電流分佈	腐蝕電流分佈檢測位置每間隔1~2公尺測一點	使用ACM電化學分析儀器於混凝土表面進行測量。	各檢測位置腐蝕電流記錄圖表
鋼筋導電性	測量各電極之間電阻每10m ² 測一點	於各測試點接出工作電極後，以電阻計測量各位置之間電阻	各電極之間電阻值記錄表
設計前調查工作報告	1.測試資料整理 2.報告整合及撰寫	資料彙整	評估檢查總結報告
第二階段（評估階段）			
工作項目	工作內容	方法及設備	產出資料
結構安全分析	結構強度 耐震力分析	依原設計與檢測資料進行計算分析	結構安全評估報告
維修工法評估	資料收集綜合評估	依破損狀況進行適用工法評估	維修工法評估報告
防蝕工法評估	各種防蝕工法評估	依腐蝕情況與環境狀況進行適用工法評估	防蝕工法評估報告
第三階段（設計階段）			
工作項目	工作內容		產出資料
結構維護補強設計	依破損模式與選定適用工法進行結構維護補強計算與設計		結構維護補強設計報告
陰極防蝕系統設計	計算各構件鋼筋密度與需求電流進行防蝕系統設計		陰極防蝕系統設計報告
第四階段（工程與管理階段）			
工程發包	投開標工作		投開標相關文件
結構維護補強施工與防蝕系統安裝	按照設計書進行施工		各階段監工、測試資料
維護與管理	按照設計書規定定期維護管理		記錄資料

1.第一階段（檢測階段）

陰極防蝕系統安裝前執行鋼筋混凝土結構物狀況調查，以獲得充分數據作為安全分析與防蝕設計之依據，工作項目包括：

- (1)混凝土剝落、空洞及澆築瑕疵檢查（目視檢測）
- (2)混凝土裂縫分佈狀況、長、寬、深度檢查
- (3)混凝土保護層厚度
- (4)混凝土比電阻
- (5)鋼筋腐蝕電位
- (6)鋼筋腐蝕速率
- (7)鋼筋連通性（導電性）
- (8)結構安全評估

陰極防蝕工法與鋼筋混凝土導電性之考量：

鋼筋混凝土本身必須要能均勻分佈電流到各部份之鋼筋。因此下面幾項性質需要經過評估。

a.混凝土的比電阻

混凝土比電阻〔resistivity〕在 5,000~50,000 Ohm-cm 之間時，電流可以均勻分佈。然而，部份修補材料例如高分子添加的水泥砂漿其比電阻相當高，因此用高比電阻的修補材料修補過的結構物即要考慮修補材料的影響。

b.鋼筋之間電阻

使用熔接鋼絲網或用鐵絲搭接的鋼筋，只要電阻在容許值以下，即可保證良好的導電性質。但是，鋼筋生銹後，搭接用的鐵絲會銹斷，因此，鋼筋間之電阻高時則需進行補搭鋼筋以改善導電性。

c.局部漏電位置

混凝土澆置時所用的模版上面可能會使用一些金屬固定物，如金屬墊腳、版模固定釘等，電流會集中在這些金屬而短路回到系統上，造成大部份鋼筋沒有受到保護。另外，有些地方保護層太薄也會造成局部電流集中的現象。

2.第二階段（評估階段）

(1)結構物分析

依據結構物原設計資料與第一階段檢測數據進行分析，並進行補強工法評估，結構物若有安全上之考量，除非已做適當補強工作，否則不應該進行陰極防蝕。因為陰極防蝕處理只可以控制鋼筋不再減薄，但無法使已生銹的鋼筋回復其原來的強度。

(2)防蝕工法評估

依據第一階段檢測數據進行環境與適用工法評估。

3.第三階段（設計階段）

結構補強與防蝕系統之相關計算與設計。

4.第四階段（工程與管理階段）

工程發包、施工與驗收、維護管理。

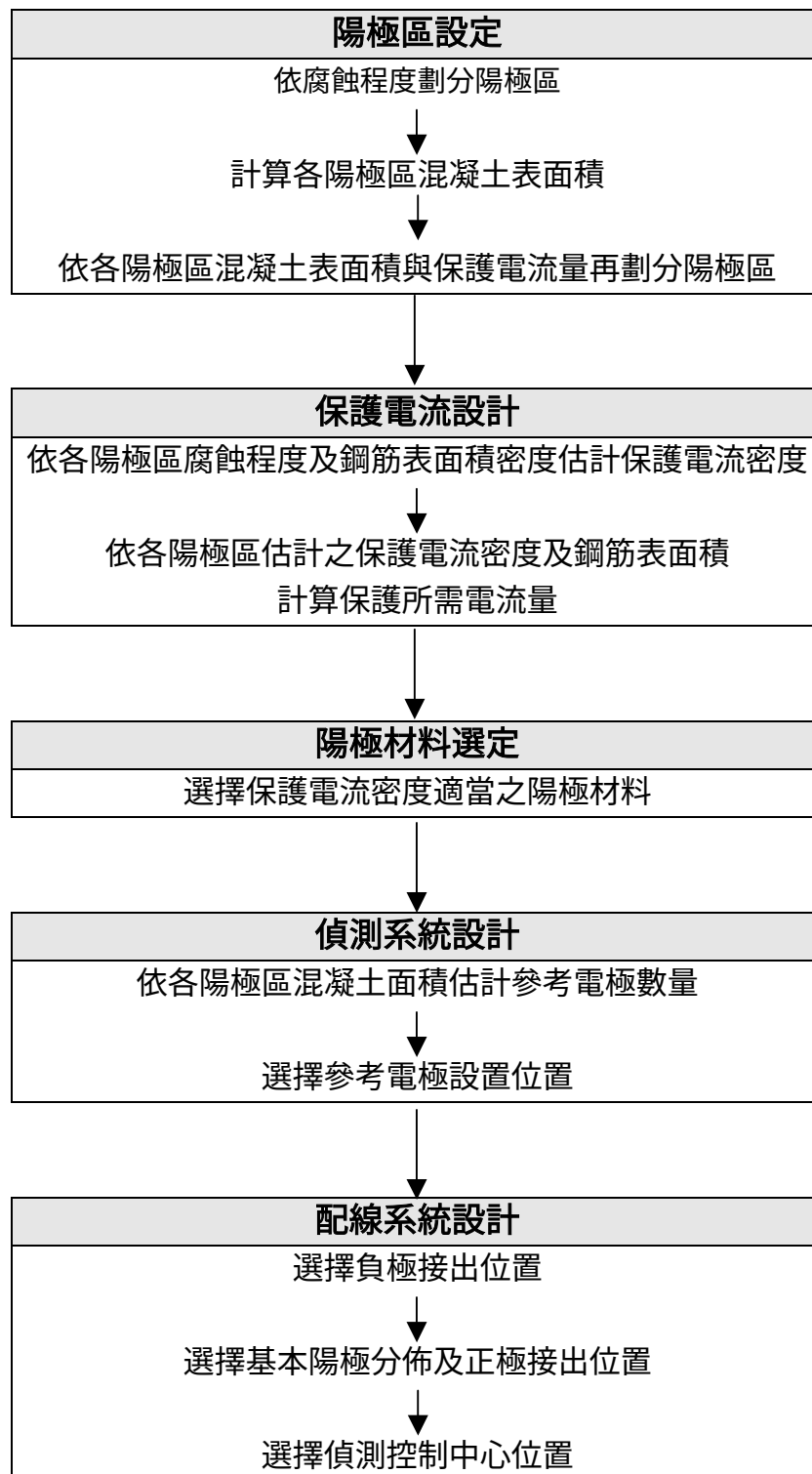
四、鋼筋混凝土陰極防蝕設計

陰極防蝕系統設計原則是必須要能供應充分的保護電流予每一區域需要保護的鋼筋，此一原則雖些簡單，但是應用在複雜的鋼筋混凝土結構中，並不是一件容易的事，必須在設計過程中檢討與考量相關因素，才能達到防蝕設計的目的。

陰極防蝕系統主要項目包括：

1. 陽極系統
2. 偵測系統
3. 配線系統

工程設計係依據設計前評估檢測所得數據與結構物工程配筋圖，進行鋼筋混凝土陰極防蝕單位面積需求電流計算及工程相關設計。設計流程如下圖。



圖四 鋼筋混凝土陰極防蝕系統設計流程圖

4.1 陽極系統

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一個或數個陽極分區方式進行保護。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。陽極區劃分之值主要考量因素為：

- 保護電流需求量
- 陽極區範圍面積
- 陽極電流供應限制
- 系統設備維護管理

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。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制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。而各區域所需保護的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。目前可利用電化學技術偵測到混凝土中鋼筋腐蝕速率，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。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依據。

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^{[1] [2]}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 2-5A 之間為限。

2. 估計保護所需電流

陰極防蝕系統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 $\bar{A}_R$ (m^2 鋼筋表面積 / 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^{[1] [2] [3]}建議，針對埋設或水中混凝土結構物，鋼筋表面積電流密度 i_R 為 5 mA/m^2 鋼筋表面積，而針對地上混凝土結構物則 i_R 為 $10\sim 20 \text{ mA/m}^2$ 鋼筋表面積。同時為了確保電流可以均勻分佈至結構內的鋼筋，從電源輸出點到距離電源最遠點

的陽極電壓降不能超過 300mV。

因此，各陽極區域鋼筋所需保護電流計算表示如下：

$$I_{cp} = (i_R \times \tilde{A}_R) \times A_c$$

I_{cp} ：保護所需電流 (A)

i_R ：鋼筋保護電流密度 (A/m² 鋼筋表面積)

$\tilde{A}_R$ ：鋼筋表面積密度 (m² 鋼筋表面積 / m² 混凝土表面積)

A_c ：混凝土表面積 (m²)

由上式可推算各陽極區每單位混凝土表面積（陽極材料覆蓋單位面積）之保護電流需求量，依該區混凝土表面積及保護電流密度計算，如下：

$$i_c = i_R \times \tilde{A}_R = I_{cp} / A_c$$

i_c ：混凝土單位面積保護電流密度 (A / m² 混凝土表面積)

3.陽極材料種類選擇

目前所開發之鋼筋混凝土陰極防蝕陽極系統材料種類甚多，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。鋼筋混凝土陰極防蝕之陽極材料是由基本陽極及二次陽極所組成，基本陽極的功能是傳送來自電流供應器的電流到二次陽極。二次陽極的作用則是將基本陽極上的電流均勻分佈到混凝土上。舉例說明，目前較普遍採用的外加電流式陰極防蝕的陽極材料有鈦網及導電性塗料陽極^[4]。鈦網陽極電流密度極限為 15-35mA/m² 混凝土表面積之間。導電性塗料陽極電流密度極限為 10-20mA/m² 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以加強保護。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。

鈦網系統的基本陽極材料使用鈦條，而二次陽極材料則採用表面塗佈含有氧化鈦及特殊氧化物的鈦網。表面塗佈氧化鈦及其他氧化物的鈦網有

下面幾項特色：第一是此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攻擊。第三是此種材料使用壽命較長。

4.選擇陽極正極及鋼筋負極接出位置

電流由供電器輸出至陽極區之基本陽極(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，可能因距離產生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二處以上。負極接出位置距離正極接出位置 > 30cm。

4.2 偵測系統

陰極防蝕系統中必須具備系統運轉偵測設備，以供檢查確認系統正確安裝、保護電流調整以及定期追蹤系統運轉狀況。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攜帶式參考電極由混凝土表面測量及預埋式參考電極測量或以上兩種方法混合使用。選擇以上任何一種偵測方法皆須於陰極防蝕系統設計時考量之項目為：

- 偵測位置設定
- 參考電極之選擇

1. 偵測位置設定

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

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，電位檢測必須利用預埋於混凝土中之參考電極或設置之 potential well 上執行，potential well 即是專為攜帶式參考電極所設置之測試區，此測試區必須對準所測試之鋼筋，測試面設置深度應大於陽極材料埋置之深度，並避開陽極材料，以避免陽極電場干擾。若採用預埋於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之鋼筋處。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，參考電極與

鋼筋間的設置距離應為 5~40 mm，工作電極接出之位置通常依參考電極或 potential well 位置埋設。所以各個偵測部位必須由參考電極或 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，以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。

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外，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。選用任何種類之參考電極，在執行電位偵測時務必記錄實際使用之種類；以便於電位換算。

3. 監測系統規劃

陰極防蝕監測網路之主要構件有：

- 保護電流電源網路
- 偵測訊號網路
- 監測控制中心

陰極防蝕監測系統分有傳統式現場監測系統及改良型遠端遙控監測

系統，由一控制中心集中對各個陽極區進行電流供應調整及保護效果偵測作業。改良型遠端遙控監測系統係針對簡化線路以及提高監測效率所設計，適合陽極區數量多且分佈疏散或陽極區範圍內區域分佈大之陰極防蝕系統。陽極區數量少或陽極區範圍內區域分佈小之陰極防蝕系統，一般仍然因考量經濟實惠性而選擇傳統式現場監測系統。兩種系統各別網路設計格式敘述如下：

(1) 傳統式現場監測型系統

A. 線路設計

保護電流電源網路所含線路包括：

- DC 電源供應器正極連接陽極區各基本陽極
- DC 電源供應器負極連接陽極區各分佈位置之鋼筋

偵測訊號網路所含線路包括：

- 偵測面板端子連接陽極區參考電極
- 偵測面板端子連接陽極區鋼筋工作電極

為加強保護電流均勻分佈，保護電流電源網路可採並聯環狀線路系統。DC 電源供應器正極以並聯方式連接陽極區各基本陽極，其正極引線必須連接陽極區範圍內各區域基本陽極。同樣的，DC 電源供應器負極以並聯方式連接陽極區各分佈位置之鋼筋。偵測訊號網路為每對由各個檢測位置接出之參考電極及工作電極訊號引線，直接連接監測控制中心偵測面板端子。

B. 監測控制設計

主要設計內容為

- 監測控制中心分佈
- 監測控制中心位置
- 設備裝置

陰極防蝕系統各陽極區保護電流電源網路及偵測訊號網路，可集中於一監偵控制中心執行 DC 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必要之監測作業。監測控制中心選設位置必須考量之因素包括：簡化配線網路、便利電源供應、便利監測控制作業、避免防礙週遭環境、避免裝置遭受污損等。因比，在一陰極防

蝕系統下，亦有一個以上監測控制中心之設計。

一般而言，監測控制中心選設位置以電源供應便利之位置為基礎。經過篩選並排除所有防礙監測控制作業、防礙週遭環境或裝置遭受污損可能之位置後，依配線網路負載量決定監測控制中心數量及分佈位置。

監測控制中心基本裝置包括 AC 電源、DC 電源供應器及電位偵測面板。下表為各別裝置主要設計項目及設計參考依據：

表二 陰極防蝕監測控制中心主要設計項目及設計參考依據

裝置	設計內容	主要參考
AC 電源	規格	DC 電源供應器
DC 電源供應器	數量	監測控制中心容納陽極區數量
電位偵測面板	偵測端子數目	監測控制中心容納陽極區偵測訊號線路數量
	偵測端子分佈	陽極區

(2)改良型遠端遙控監測型系統

改良型遠端遙控監測系統一般針對簡化線路以及提高監測效率進行改善而設計。因此，各種改良型系統之間都可能有完全不同之線路設計或監測控制操作方式。以下舉例一式遠端遙控式偵測系統^[5]為說明。

A.線路設計

遠端遙控式監測系統網路之特色在於將陰極防蝕系統各個區域劃分成陽極區，並設置一區域整流器。由各個區域所接出正極、負極引線及參考電極、工作電極訊號引線均直接連接其區域整流器。區域整流器之間僅需透過一對電纜線，以串聯方式連接至監測控制中心。此系統網路基本格式採並聯控制方式，對各區域陽極區進行保護，使保護電流均勻分佈。

採用此監測系統，必須於陰極防蝕系統設計時即規劃：

- 系統區域劃分
- 區域整流器規格選擇

系統區域劃分主要考量因素有陰極防蝕系統範圍內陽極區分佈及區域整流器規格。分佈位置接近且保護電流需求量一樣之區域，可組成一陽極區，採以一個區域整流器同步執行監偵測。

B. 監測控制設計

監偵測控制中心基本裝置包括電腦控制程式、介面卡、操縱 Master DC 電源供應器、電話線路及數據機。透過安裝電腦控制程式及介面卡之電腦，可由任何地點採數據機遙控操作，執行保護電流輸出調整控制、陰極防蝕系統運轉以及保護效果檢查等必要之監測作業。

監測控制中心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，監偵測控制中心選設位置以電源供應便利之位置為考慮基礎。經過篩選並排除有防礙監測控制作業、防礙週遭環境或裝置遭受污損可能之位置後，選定監測控制中心位置。

4.3 配線系統

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，針對各個陽極區進行電流供應調整及保護效果偵測作業。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。

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：

- 電位計負極端子連接陽極區參考電極
- 電位計正極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。

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，導線尺寸通常介於 $2.5\sim 16\text{ mm}^2$ ，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 材質包覆電纜，並以不同顏色 PVC 外覆區分。一般建議採用之顏色區分為：

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。為考量線路系統耐久使用，露出混凝土之線路可設計採穿線槽及接線盒保護。

五、陰極防蝕系統測試與驗收

5.1 系統測試

陰極防蝕系統於監測系統及各陽極區完成安裝，並在混凝土經過適當的養護期間 (至少 28 天) 後，應進行系統運轉測試，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；並檢測各迴路之電連通性。系統測試為確認各陽極區陰極防蝕系統達到正確運轉且運轉正常。系統測試測試項目^[6]包括：

1.自然電位測量

利用電位計測量各組工作電極和參考電極之間電位差。

2.啟動陰極防蝕系統

啟動陰極保護系統，使其形成陰極防蝕系統迴路。

3.系統保護電位極性檢查

為確保陰極防蝕系統各陽極區之陽極與負極正確連接區域監控器之電流輸出正負極，於電流調整初階段，輸出微量電流後檢查各陽極區參考電極所顯示鋼筋電位，確認鋼筋電位是極化現象(呈較負電位)證實陰極防蝕系統達到運轉功能，並正確運轉。

4. 系統保護電流檢查與調整

利用監控系統檢查並逐步調整保護電流量 (I) 至接近設計保護電流，同時量測鋼筋保護電位 (E)。參考 E-log I 曲線；如圖 3。估計保護所需電流量調整範圍，以適度降低輸出電流。

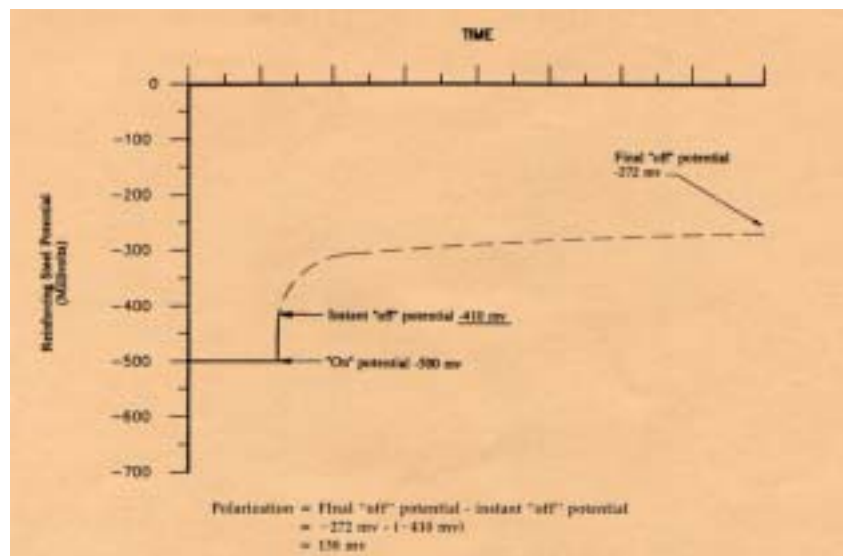
5. 保護電位去極化量測試

電流調整後，待鋼筋保護電位穩定，利用監控系統進行斷電並測量鋼筋電位隨時間之變化，斷電瞬間及等待回復自然穩定電位後之鋼筋電位差為電位去極化量。電位去極化量參考標準為 100mV，依此去極化量測量值分析各陽極區系統進一步電流調整或陽極系統調整之必需。

5.2 系統驗收

陰極防蝕系統完成保護電流調整並達到系統功能及試運轉要求後，系統應按此水準維持運轉至少 7 日以上，一般為 14~28 天，始進行防蝕效果測試。

鋼筋混凝土陰極防蝕效果之偵測方法，根據美國腐蝕工程師學會 (NACE) 的規範 NACE RP0290-00^[7] 及英國混凝土學會技術規範 Concrete Society Technical Report No. 37 建議採用斷電後鋼筋電位衰退量方法 (Potential Decay Method)。，以系統達到穩定保護電位時進行斷電，斷電瞬間電位記錄為 E1，斷電後等待至自然電位穩定時記錄電位為 E2，其電位差 (E2-E1) 需大於 100mV 為合格(圖五)。同時上述規範中亦建議陰極防蝕保護電位下限為 -1100mV (對 Ag/AgCl 參考電極)。



圖五 外加電流式防蝕系統驗收方法

5.3 書面資料

陰極防蝕系統驗收完成之後，必須製作保存設計、安裝、試運轉、操作、和維護手冊資料等相關紀錄和文件。並需包含以下資料：

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

六、結論

1. 鋼筋混凝土陰極防蝕方法分為外加電流式及犧牲陽極式二種，在應用方面，地面上 RC 結構物常使用外加電流式陰極防蝕系統，而水面以下則常用犧牲陽極式陰極防蝕系統。
2. 採用陰極防蝕工法前必須針對結構物進行檢測評估工作，以了解結構是否適合進行防蝕工程。檢測評估結果並可提供設計或施工之參考依據，以發揮陰極防蝕的最大效果。
3. 陰極防蝕系統設計項目包括陽極系統設計、偵測系統設計、線路系統設

計。

4. 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。
5. 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。
6. 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。線路集中接到監測系統之供電器及電位計, 由該監測系統執行電流輸出量控制、系統運轉檢查等監偵測作業。
7. 陰極防蝕監測系統可分為現場監測型及遠端遙控監測型。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。
8. 陰極防蝕系統於監測系統及各陽極區完成安裝, 並在混凝土經過適當的養護期間後, 應進行系統運轉測試, 以確保所有構件安裝、連結迴路均已正確。系統測試為確認各陽極區陰極防蝕系統達到正確運轉且運轉正常。
9. 鋼筋混凝土陰極防蝕效果之偵測採用系統斷電後鋼筋電位衰退量大於 100mV 判定為合格。

參考文獻

1. Model Specification for the Cathodic Protection of Reinforced Concrete, Concrete Society Technology Report No.36, The Concrete Society, 1991, U.K.
2. Model Specification for the Cathodic Protection of Reinforced Concrete, Concrete Society Technology Report No.37, The Concrete Society, 1991, U.K.
3. R.P.Brown, J.S.Tinnea, "Report on Design Problems For Cathodic Protection of Reinforced Concrete", Corrosion 91, The NACE Annual Conference and Corrosion Show, Paper Number 122.
4. B.S. Wyatt D.J.Irvine, Materials Performance, Dec,1989.12.
5. 林葆喜、施建志、劉益雄, "XXX 橋梁橋墩帽梁修復工程研究報告", 工研院, 1997.12。
6. L.Bertolini, F.Bolzoni, P.Pedefferri, "Cathodic Protection and Cathodic

Prevention in Concrete: Principles and Applications”, Journal of Applied Electrochemistry 28 (1992) 1321-1331.

7. RP0290-00, “Standard Recommended Practice for Cathodic Protection of Reinforcing Steel in Atmospherically Exposed Concrete Structures”, 2000, National Association of Corrosion Engineers, U.S.A.

【附錄】案例介紹—XX 公司鋼筋混凝土結構廠房陰極防蝕工程

一、背景介紹

XX 實業股份有限公司通霄廠鋼筋混凝土結構廠房，工廠緊鄰台灣西部海岸，屬於鹽害環境。儀器檢查中的鋼筋腐蝕電位顯示本建築物梁、柱構件均有腐蝕現象，且多數部位呈現嚴重腐蝕情況，目視結果發現混凝土大規模剝落，鋼筋腐蝕斷裂嚴重，混凝土中氯離子含量分析結果顯示係氯離子侵入混凝土中造成鋼筋腐蝕膨脹而將混凝土撐裂。

因為工廠生產過程引進海水且操作溫度為高溫，鹽水蒸發造成廠房內腐蝕環境嚴苛。經現場勘查發現梁、柱混凝土表面已經龜裂剝落且部份有銹斑，顯示鋼筋腐蝕機率相當高。由於鋼筋腐蝕是氯離子(鹽)所造成，根據美國 FHWA 建議：「鋼筋混凝土陰極防蝕法係控制鹽害腐蝕唯一有效的方法。」及本所實務經驗，採用陰極防蝕法為最佳解決方法。。

二、陰極防蝕系統設計

(一)陰極防蝕系統說明

1. 本計畫陰極防蝕施工範圍

- 範圍：通霄 XX 廠鋼筋混凝土廠房各梁、柱構件。
- 保護總面積：737m²。
- 陰極防蝕系統含五個獨立陽極區，各個陽極區含各別之陽極系統、陰極系統、偵測系統及配電系統。

2. 陽極區分佈

- 陽極區各別之保護範圍及預計保護電流需求量如下：

陽極區	保護範圍	保護面積 (m ² 混凝土表面積)	保護電流 (A)
陽極區 1	參照設計圖	152.28	1.36
陽極區 2	參照設計圖	81.81	0.95
陽極區 3	參照設計圖	140.13	1.24
陽極區 4	參照設計圖	108.54	1.04
陽極區 5	參照設計圖	254.24	1.83

- 陰極防蝕陽極區分佈位置，如設計圖圖號 1。

3. 陽極系統

- 各陽極區選用之陽極系統為鈦網陽極系統。
- 鈦網陽極系統組成構件為：
 - a.鈦網陽極
 - b.鈦條基本陽極
 - c.覆蓋層水泥
- 鈦網陽極規格為 E150(輸出範圍：0~16.5mA/m² 混凝土表面積)及 E300(輸出範圍：0~33mA/m² 混凝土表面積)，依各部位鋼筋密度及預計保護電流需求以單層或雙層分佈鋪置於混凝土表面。
- 鈦條基本陽極以 3~4m 間距平行橫置，點焊於鈦網陽極。
- 鈦網及鈦條覆蓋層水泥厚度範圍為 1.0~1.5cm 之間。
- 陰極防蝕保護電流由各鈦條基本陽極末端接出正極輸入。
- 分佈於各陽極區陽極系統位置之鈦條基本陽極及保護電流輸入正極之數量及編號如下：

陽極區		編 號												數量
陽極區 1	鈦條基本陽極	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J			10
	正極	A1	B1B2	C1	D1D2	E1E2	F1F2	G1	H1H2	I1	J1			15
陽極區 2	鈦條基本陽極	A	B	C	D	E	F	G	H					8
	正極	A1	B1B2	C1C2	D1D2	E1E2	F1F2	G1G2	H1					14
陽極區 3	鈦條基本陽極	A	B	C	D	E	F	G	H	I				9
	正極	A1	B1B2	C1C2	D1D2	E1E2	F1F2	G1	H1H2	I1				15
陽極區 4	鈦條基本陽極	A	B	C	D	E	F	G	H					8
	正極	A1	B1B2	C1C2	D1D2	E1E2	F1F2	G1G2	H1					14
陽極區 5	鈦條基本陽極	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	12
	正極	A1A2	B1B2	C1C2	D1D2	E1E2	F1F2	G1G2	H1H2	I1I2	J1J2	K1K2	L1L2	24

- 各陽極區之基本陽極分佈配置如設計圖圖號 2 所示。
- 各陽極區之鈦網陽極鋪設分佈如設計圖圖號 2-1 所示。

4. 陰極系統

- 各陽極區混凝土中鋼筋網為陰極系統。
- 各陰極系統位置之保護電流負極回路數量及編號如下：

陽極區		編 號					數量
陽極區 1	負極	Θ 1	Θ 2				2
陽極區 2	負極	Θ 3	Θ 4				2
陽極區 3	負極	Θ 5	Θ 6				2
陽極區 4	負極	Θ 7	Θ 8				2
陽極區 5	負極	Θ 9	Θ 10	Θ 11			3

- 各陽極區陰極系統之負極接出位置如設計圖圖號 3 所示。

5. 偵測系統

- 為系統保護監控及效果偵測，偵測電極採用 Ag/AgCl 參考電極預埋於混凝土中，並由該部位接出測量點之工作電極。
- 裝設於各個陽極區位置之參考電極(RE)與工作電極(WE)數量及編號如下：

陽極區	編 號						數量
陽極區 1	RE1WE1	RE2WE2	RE3WE3	RE4WE4			4
陽極區 2	RE5WE5	RE6WE6	RE7WE7	RE8WE8			4
陽極區 3	RE9WE9	RE10WE10	RE11WE11	RE12WE12			4
陽極區 4	RE13WE13	RE14WE14	RE15WE15	RE16WE16			4
陽極區 5	RE17WE17	RE18WE18	RE19WE19	RE20WE20	RE21WE21	RE22WE22	6

- 各陽極區偵測系統之參考電極及工作電極裝設位置如設計圖圖號 4 所示。

6. 配線系統

- 各陽極區配線項目
 - a. 陽極區正負極電路配線。
 - b. 陽極區偵測電極電路配線。

■ 配線系統組成構件

- a.正負極電路導線(2.0mm² 包覆材料 XLPE)。
- b.偵測電極訊號導線(2.0mm² 包覆材料 XLPE)。
- c.線管。
- d.接線盒。

■ 配線方式

- a.由陽極區各個位置接出之導線於覆蓋層下接至接線盒以執行續接。
- b.陽極區範圍內之續接導線覆於覆蓋層下接至陽極區範圍外, 導線末端以熱縮套管及線標誌註明, 再經由線管接至接線盒, 導線之續接或短路連接均於接線盒端子台完成。
- c.系統線路密閉於線管及接線盒達 IP55 標準。

■ 配線電路

- a.正極配電接至接線盒正極端子。
- b.負極配電接至接線盒負極端子。
- c.參考電極各別連接至接線盒偵測端子。
- d.工作電極由陽極區接出後即連接至負極線路。

■ 裝設於各個陽極區位置之接線盒(J/B)與電源供應器(LRU)數量及編號如下：

陽極區	接線盒										數量	電源供應器
陽極區 1	J/B1	J/B2	J/B3	J/B4	J/B5	J/B6	J/B7	J/B8	J/B9		9	LRU1
陽極區 2	J/B8	J/B9	J/B10	J/B11	J/B12	J/B13	J/B14	J/B15			8	LRU2
陽極區 3	J/B14	J/B15	J/B16	J/B17	J/B18	J/B19	J/B19-1	J/B20	J/B21	J/B22	10	LRU2
陽極區 4	J/B2	J/B3	J/B21	J/B22	J/B23	J/B24	J/B25	J/B26			9	LRU1
陽極區 5	J/B1	J/B5	J/B6	J/B10	J/B12	J/B16	J/B18	J/B19	J/B23	J/B25	10	LRU3

- 各陽極區之配線系統分佈如設計圖圖號 5 所示。
- 各接線盒(J/B)配置如設計圖圖號 6 所示。

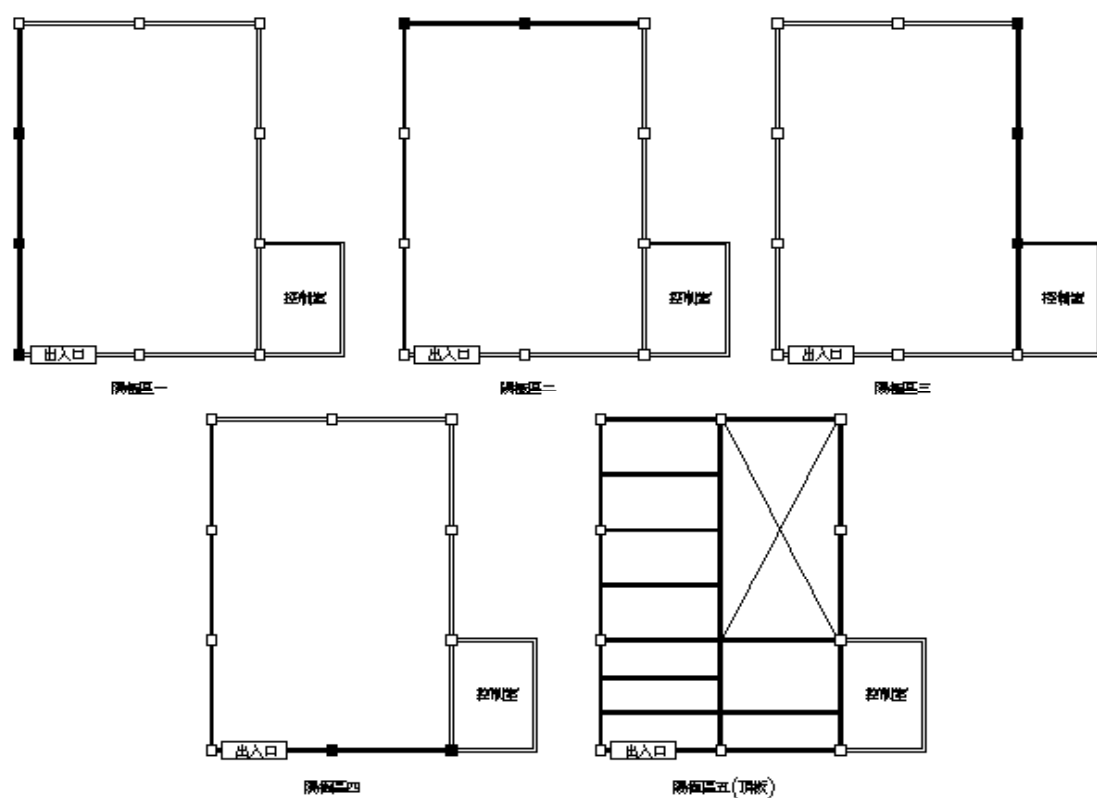
7. 監、偵測控制系統

- 本案陰極防蝕系統採用 Cyberdan Ferroeye 監、偵測控制系統。
- 各個陽極區保護電流供應及保護效果監偵測作業由一個監控中心集中操作。
- 各個陽極區連接各別之區域監控器(LRU)。
- 7.4 中心監控配備：
 - a. LRU master (監控器)一組
 - 連接各個 LRU 訊號至電腦系統
 - b. 系統控制軟體一組
 - 直接設定各個 LRU 輸出直流保護電流
 - 直接接收各個 LRU 傳訊偵測資料
 - 直接設定各個 LRU 監偵測操作程序
 - c. 配電電纜
 - 8mm² 電源線提供電流輸出
 - 0.75 mm² 訊號線提供訊號輸出
- 區域監控配備：

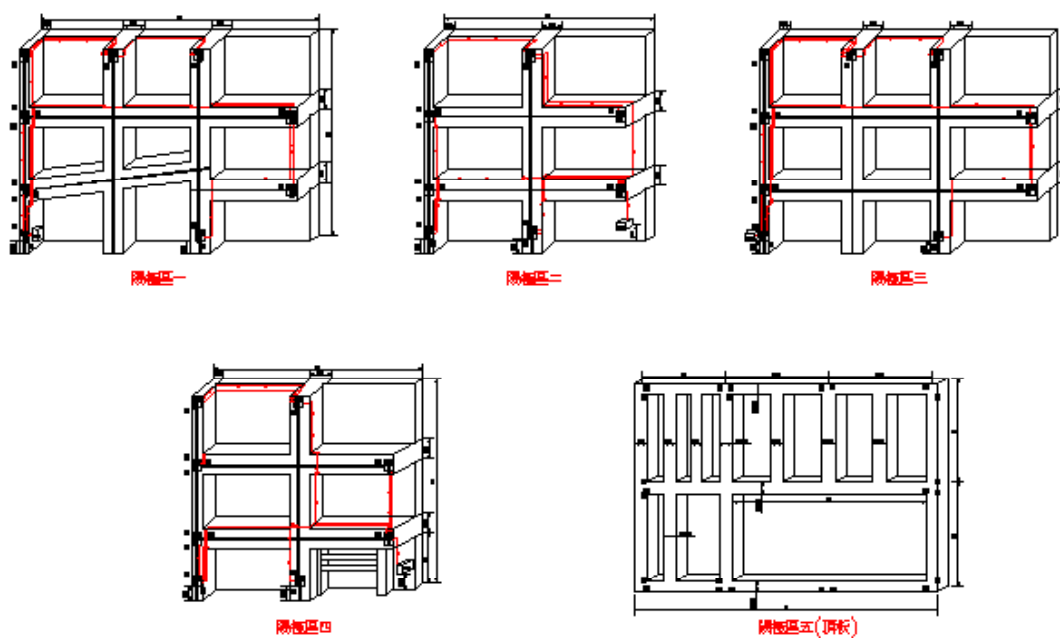
三組 LRU(區域監控)規格及應用區域：

LRU(區域整流器)		應用區域	保護電流 輸出(A)	電極訊號輸入
編號	規 格			
1	2output/8input 3A/20V	陽極區 5	1.83	RE17 RE18 RE19 RE20 RE21 RE22
2	2output/8input 3A/20V	陽極區 2	0.95	RE5 RE6 RE7 RE8
		陽極區 3	1.24	RE9 RE10 RE11 RE12
3	2output/8input 3A/20V	陽極區 1	1.36	RE1 RE2 RE3 RE4
		陽極區 4	1.04	RE13 RE14 RE15 RE16

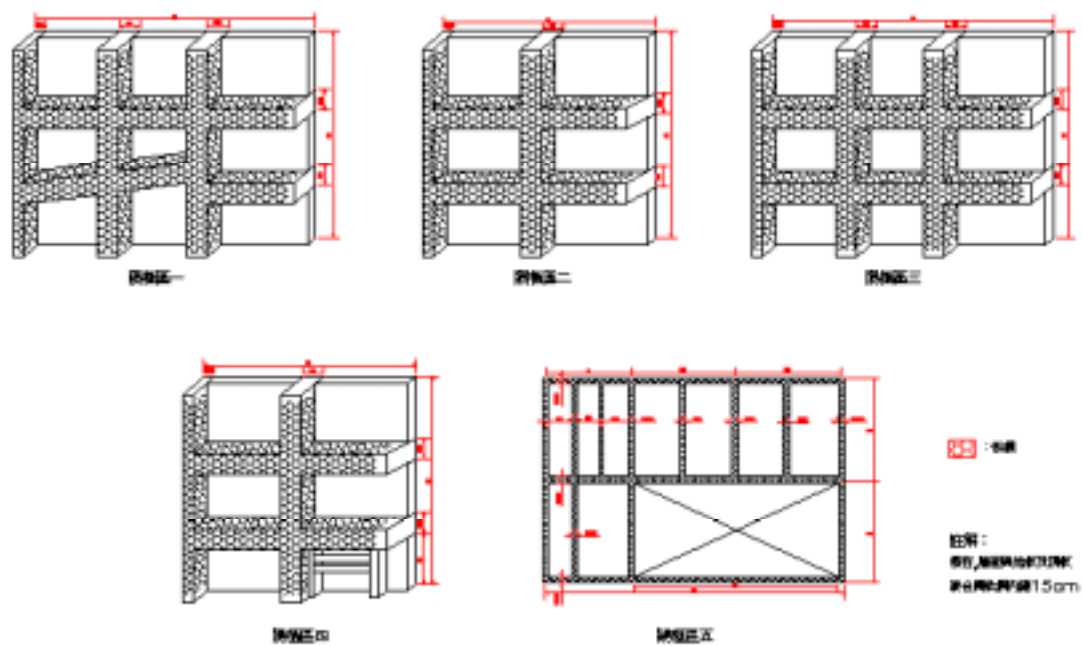
- 本工程陰極防蝕監偵測控制系統之分佈如設計圖圖號 7 所示。



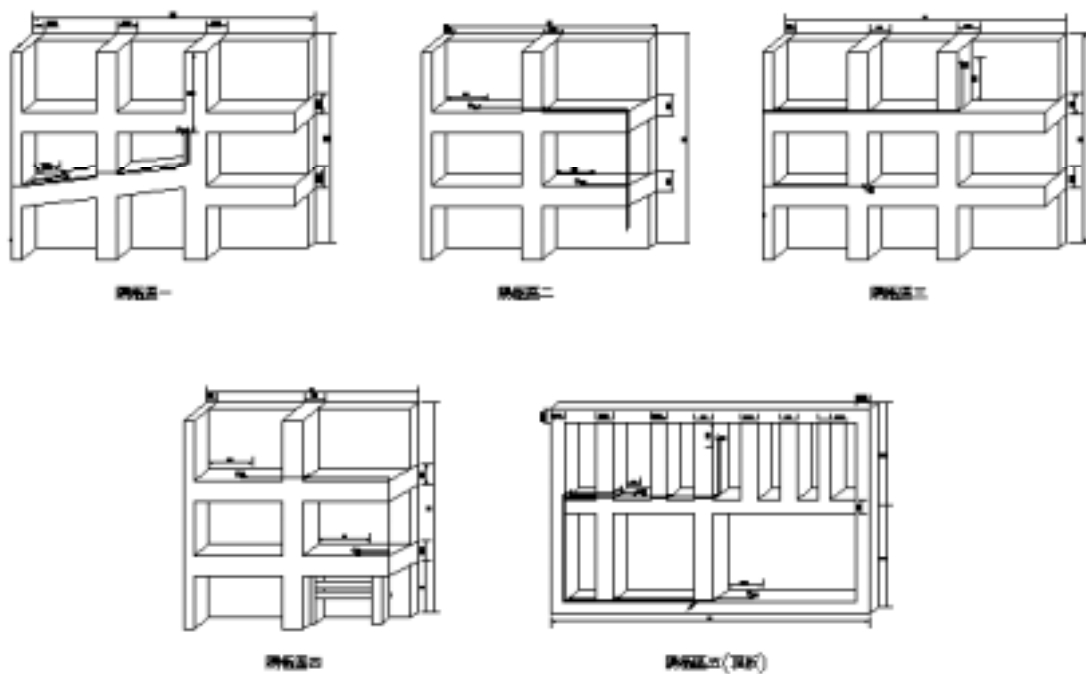
圖號 1 陰極防蝕陽極區分佈位置



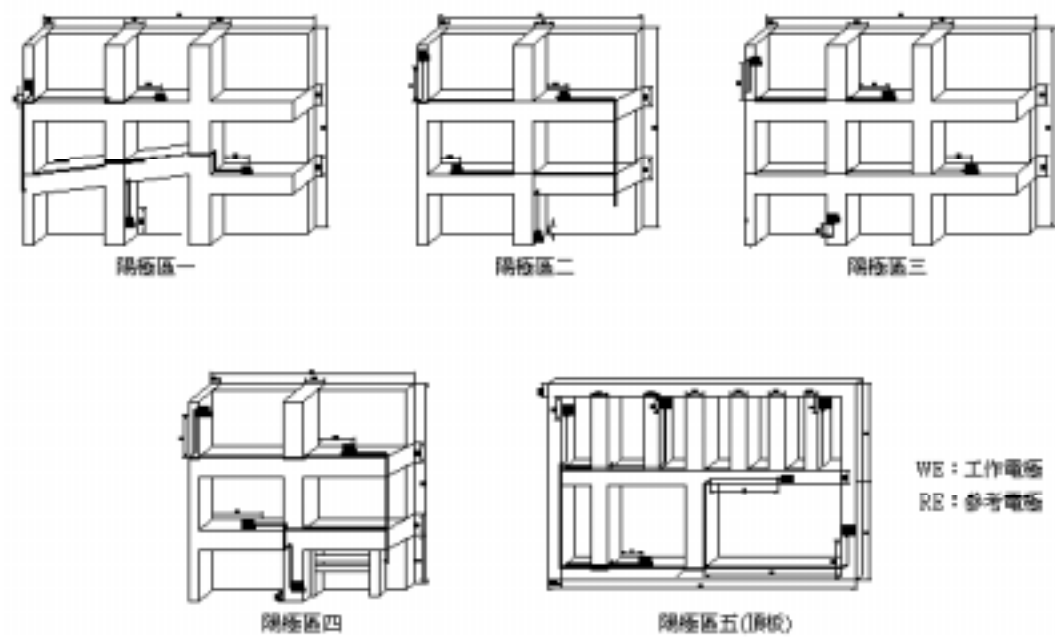
圖號 2 各陽極區之基本陽極分佈配置



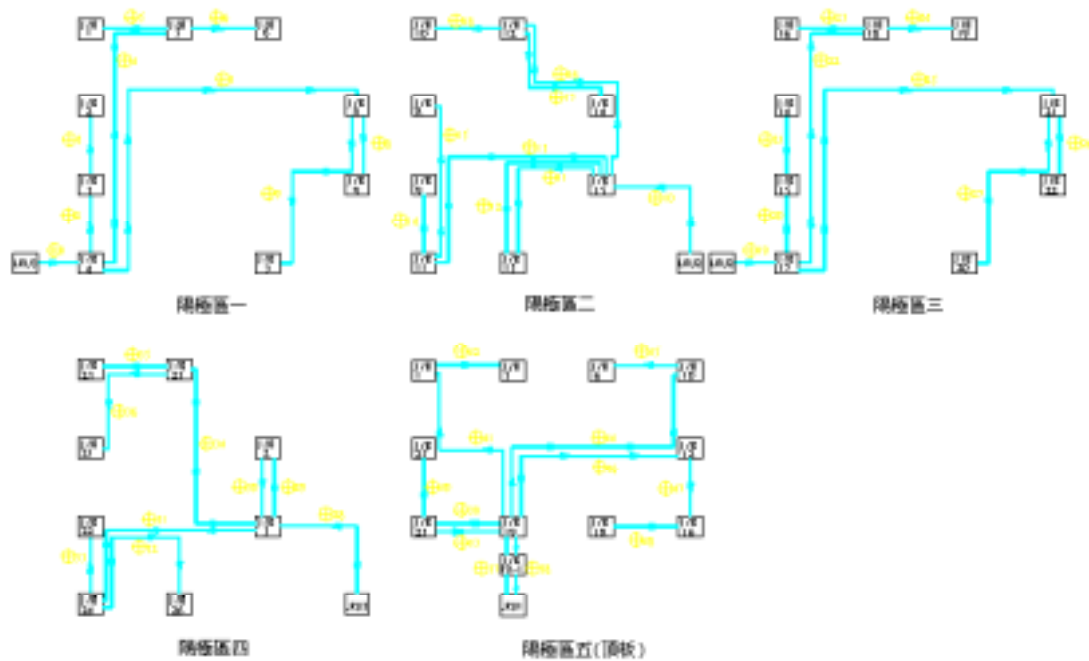
圖號 2-1 各陽極區之鈦網陽極鋪設分佈



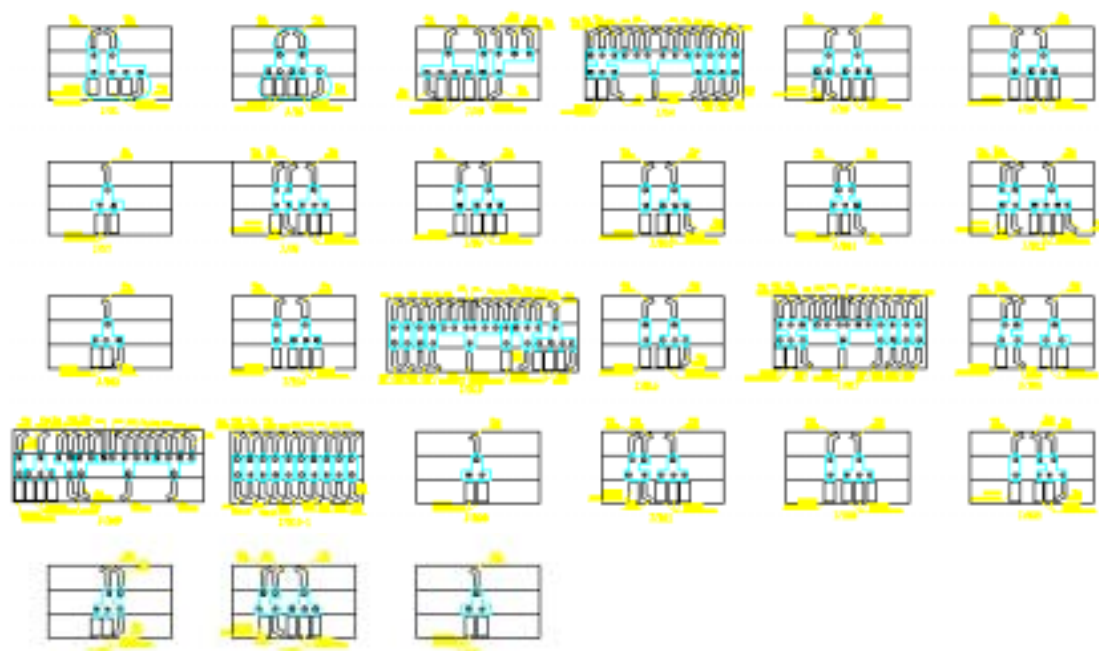
圖號 3 各陽極區陰極系統之負極接出位置



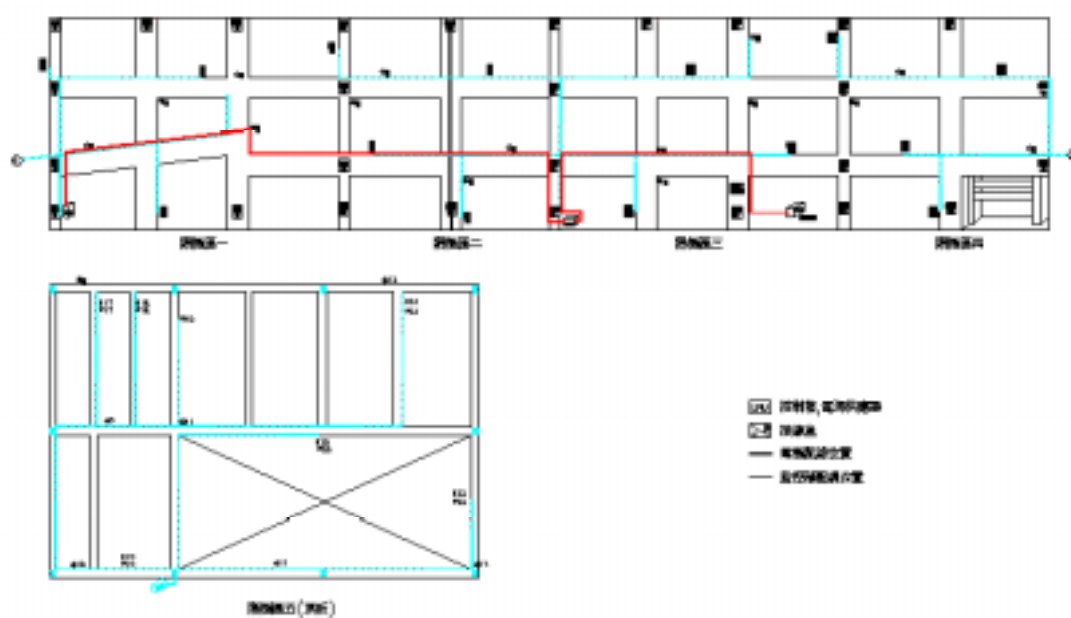
圖號 4 各陽極區偵測系統之參考電極及工作電極裝設位置



圖號 5 各陽極區之配線系統分佈



圖號 6 各接線盒(J/B)配置



圖號 7 陰極防蝕監測控制系統分佈

(二)陰極防蝕系統設計計算說明書

1.陰極防蝕範圍

本案陰極防蝕範圍包括廠房 1~4 樓周圍之梁及柱，系統保護範圍乃是依據現場檢測結果，分析顯示梁、柱部位有較嚴重之鋼筋腐蝕及混凝土剝落程度，而梁、柱為建築物之主要結構，關係建築物之安全，因而優先採取陰極防蝕法保護。

2.陽極區分佈

根據陰極防蝕系統相關之標準應用規範及技術報告(如 Concrete Society Technical Report No 37)建議，陽極區範圍可為 $200\text{m}^2 \sim 500\text{m}^2$ 之間或保護電流為 $2 \sim 5\text{A}$ 之間。又依鋼筋腐蝕程度差異及陽極電流供應限制、保護電流需求量差異及裝置設備易於維護等因素，陰極防蝕系統可進一步分區保護。本案分析鋼筋密度分佈，設計採用適當規格之鈦網，鋼筋保護電流範圍可規範於 $10 \sim 20\text{mA}/\text{m}^2$ 之間，本設計採用 $16\text{mA}/\text{m}^2$ 。因此，本案陰極防蝕系統以五個陽極區分別保護本建築物五個區域之混凝土中鋼筋(參考以下分析表格)。

3.保護電流及供應

本系統各陽極區預計所需保護電流量依各區域混凝土單位面積中鋼筋密度及鈦網輸出保護電流密度計算。實際所需保護電流量，將於系統完成安裝後試車期間鋼筋電位極化量及保護測試效果執行電流調整，系統並裝設有偵測電極，以供系統試車電流調整以及保固定期檢測使用，偵測電極裝設位置選擇於預期低保護電流區域、預期高保護電流區域、高鋼筋密度區域及配電距離遠端區域。各陽極區鋼筋密度分佈、鈦網陽極使用規格、保護電流量及監偵測電極分佈之設計計算分述於下表。

配筋分析(梁、柱編號參照 XX 公司提供結之構詳圖及配筋圖)

陽極區	構 件	編 號	配筋規格	鋼筋密度 $\tilde{A}_R$ (m ² /m ²)	合 計
陽極區 1	梁	2G6a	□#3@30	0.11	0.78
			4-#8	0.45	
			2-#8	0.22	
		2G7a	□#3@30	0.11	1.01
			3-#8	0.34	
			5-#8	0.56	
		2G8a	□#3@30	0.11	1.01
			3-#8	0.34	
			5-#8	0.56	
		3G4	□#3@30	0.11	0.65
			3-#7	0.31	
			2-#8	0.23	
		3G5	□#3@30	0.11	0.65
			3-#7	0.31	
			2-#8	0.23	
	柱	C12 1~3F	□#3@30	0.11	0.65
			4-#6	0.18	
			8-#7	0.36	
		C15 1F	□#3@30	0.11	0.79
			12-#8	0.68	
		C15 2~3F	□#3@30	0.11	0.65
			12-#6	0.54	
		C16 1F	□#3@30	0.11	0.90
			14-#8	0.79	
		C16 2~3F	□#3@30	0.11	0.73
			12-#7	0.62	
陽極區 2	梁	2B7	□#3@30	0.11	0.45
			3#8	0.34	
		3B7b	□#3@30	0.11	0.87
			3-#7	0.31	
			4-#8	0.45	

陽極區 2	柱	C7 1F	□ #3@30 6-#8 12-#10	0.11	0.88
				0.34	
				0.43	
	柱	C7 2F	□ #3@30 6-#8 16-#10	0.11	1.03
				0.34	
				0.58	
		C7 3F	□ #3@30 6-#8 24-#10	0.11	1.32
				0.34	
				0.87	
		C9 1F	□ #3@30 12-#8	0.11	0.45
				0.34	
		C9 2~3F	□ #3@30 4-#7 8-#8	0.11	1.23
				0.41	
				0.71	
陽極區 3	梁	2G4	□ #3@30 3-#8 4-#8	0.11	0.90
				0.34	
				0.45	
		2G5	□ #3@30 3-#8 4-#8	0.11	0.90
				0.34	
				0.45	
		3G4	□ #3@30 3-#7 2-#7	0.11	0.63
				0.31	
				0.21	
		3G5	□ #3@30 3-#7 2-#7	0.11	0.63
				0.31	
				0.21	
	柱	C5 1F	□ #3@30 10-#8 4-#10	0.11	0.68
				0.28	
				0.29	
		C5 2~3F	□ #3@30 12-#7	0.11	0.42
				0.31	
		C6 1F	□ #3@30 6-#7 8-#8	0.11	1.13
				0.31	
				0.71	

		C6 2~3F	□ #3@30 4-#6 8-#7	0.11	0.70
				0.18	
				0.41	
		C8 1F	□ #3@30 10-#8 4-#10	0.11	0.68
				0.28	
				0.29	
		C8 2~3F	□ #3@30 10-#7	0.11	0.37
				0.26	
陽極區 4	梁	2B7	□ #3@30 3-#8 4-#8	0.11	0.90
				0.34	
				0.45	
		2B7a	□ #3@30 3-#8 4-#8	0.11	0.90
				0.34	
				0.45	
		3B7a	□ #3@30 3-#7 4-#7	0.11	0.83
				0.31	
				0.41	
		3B7b	□ #3@30 3-#7 4-#8	0.11	0.87
				0.31	
				0.45	
	柱	C6 1F	□ #3@30 6-#7 8-#8	0.11	0.98
				0.16	
				0.71	
		C6 2~3F	□ #3@30 4-#6 8-#7	0.11	0.51
				0.18	
				0.22	
		C7 1F	□ #3@30 6-#8 12-#10	0.11	0.88
				0.34	
				0.43	
		C7 2F	□ #3@30 6-#8 16-#10	0.11	1.37
				0.68	
				0.58	

陽極區 5	梁	C7 3F	□ #3@30 6-#8 24-#10	0.11	1.66
				0.68	
				0.87	
		4G1	□ #3@30 3-#8 2-#8	0.11	0.95
				0.45	
				0.39	
		4G4	□ #3@30 3-#8 2-#8	0.11	0.68
				0.34	
				0.23	
		4G5	□ #3@30 3-#8 2-#7	0.11	0.66
				0.34	
				0.21	
		4B6	□ #3@30 2-#7	0.11	0.32
				0.21	
		4B6a	□ #3@30 3-#7 2-#7	0.11	0.63
				0.31	
				0.21	
		4B2	□ #3@30 4-#7 2-#7	0.11	0.73
				0.41	
				0.21	
		4B2a	□ #3@30 3-#7 2-#7	0.11	0.63
				0.31	
				0.21	
		4B3	□ #3@30 4-#7 2-#7	0.11	0.73
				0.41	
				0.21	
		4b1	□ #3@30 3-#7 2-#7	0.11	0.63
				0.31	
				0.21	
		4b4	□ #3@30 4-#8 2-#8	0.11	0.79
				0.45	
				0.23	
		4b4a	□ #3@30 4-#8 1-#7	0.11	0.66
				0.45	
				0.10	

b.鈦網陽極及保護電流量

陽極區	構件	編號	區域鋼筋 面積(m ²)	鈦 網			陽極區預計 保護電流量 Icp(A)	預定輸出 電流密度 i _c (mA/m ²)
				規格	面積Ac (m ² 混 凝土表面積)	最大輸出 (mA/m ²)		
陽極區 1	梁	2G6a	7.6	E300	9.8	33	1.36	12
		2G7a	9.9	E300	9.8	33		
		2G8a	9.9	E300	9.8	33		
		3G4	12.7	E300	19.6	33		
		3G5	6.4	E300	9.8	33		
	柱	C12 1~3F	11.7	E300	18	33		
		C15 1F	4.7	E300	6	33		
		C15 2~3F	7.8	E300	12	33		
		C16 1F	5.4	E300	6	33		
		C16 2~3F	8.8	E300	12	33		
		合計	84.9	-	112.8	3.7A	3.7>1.36 OK	12 <33 OK
陽極區 2	梁	2B7	7.6	E150	16.8	16.5	0.95	13.6
		3B7b	14.6	E150	16.8	16.5		
	柱	C7 1F	5.3	E150	6	16.5		
		C7 2F	6.2	E150	6	16.5		
		C7 F3	7.9	E150	6	16.5		
		C9 1F	2.7	E150	6	16.5		
		C9 2~3F	14.8	E150	12	16.5		
		合計	59.1		69.6	1.15A	1.15>0.95 OK	13.6<16.5 OK
陽極區 3	梁	2G4	17.6	E150	19.6	16.5	1.24	11
		2G5	8.8	E150	9.8	16.5		
		3G4	12.3	E150	19.6	16.5		
		3G5	6.2	E150	9.8	16.5		
	柱	C5 1F	4.1	E150	6	16.5		

		C5 2~3F	5.0	E150	12	16.5		
		C6 1F	6.8	E150	6	16.5		
		C6 2~3F	8.4	E150	12	16.5		
		C8 1F	4.1	E150	6	16.5		
		C8 2~3F	4.4	E150	12	16.5		
		合計	77.7		112.8	1.86A	1.86>1.24 OK	11<16.5 OK
陽極區 4	梁	2B7	7.6	E150	8.4	16.5	1.04	14.9
		2B7a	7.6	E150	8.4	16.5		
		3B7a	7.0	E150	8.4	16.5		
		3B7b	7.3	E150	8.4	16.5		
	柱	C6 1F	5.9	E150	6	16.5		
		C6 2~3F	6.1	E150	12	16.5		
		C7 1F	5.3	E150	6	16.5		
		C7 2F	8.2	E150	6	16.5		
		C7 3F	10.0	E150	6	16.5		
		合計	65		69.6	1.14A	1.14>1.04 OK	14.9<16.5 OK
陽極區 5	梁	4G1	39.9	E150	42	16.5	1.83	11.4
		4G4	15.2	E150	22.4	16.5		
		4G5	7.4	E150	11.2	16.5		
		4B6	5.4	E150	16.8	16.5		
		4B6a	3.5	E150	5.6	16.5		
		4B2	10.7	E150	14.7	16.5		
		4B2a	9.3	E150	14.7	16.5		
		4B3	7.7	E150	10.5	16.5		
		4b1	4.6	E150	7.35	16.5		
		4b4	5.8	E150	7.35	16.5		
		4b4a	4.9	E150	7.35	16.5		
		合計	114.4		160.0	2.64A	2.64>1.83 OK	11.4<16.5 OK

c. 監偵測電極

陽極區	構件	編號	區域鋼筋密度 (m^2/m^2)	鈦網預計輸出 (mA/m^2)	預計鋼筋保護 電流(mA/m^2 鋼 筋表面積)	參考電極	
						編號	備 註
陽極區 1	梁	2G6a	0.78	12	15.4	RE4	
		2G7a	1.01	12	11.9		
		2G8a	1.01	12	11.9		
		3G4	0.65	12	18.5	RE3	
		3G5	0.65	12	18.5		
	柱	C12 1~3F	0.65	12	18.5		
		C15 1F	0.79	12	15.2	RE2	
		C15 2~3F	0.65	12	18.5		
		C16 1F	0.90	12	13.3		
		C16 2~3F	0.73	12	16.4	RE1	
陽極區 2	梁	2B7	0.45	13.6	30.2	RE6	
		3B7b	0.87	13.6	15.6	RE8	
	柱	C7 1F	0.88	13.6	15.5	RE7	
		C7 2F	1.03	13.6	13.2		
		C7 F3	1.32	13.6	10.3		
		C9 1F	0.45	13.6	30.2		
		C9 2~3F	1.23	13.6	11.1	RE5	
陽極區 3	梁	2G4	0.90	11	12.2		
		2G5	0.90	11	12.2	RE12	
		3G4	0.63	11	17.5	RE11	
		3G5	0.63	11	17.5		
	柱	C5 1F	0.68	11	16.2	RE10	
		C5 2~3F	0.42	11	26.2		
		C6 1F	1.13	11	9.7		

		C6 2~3F	0.70	11	15.7	RE9	
		C8 1F	0.68	11	16.2		
		C8 2~3F	0.37	11	29.7		
陽極區 4	梁	2B7	0.90	14.9	16.6	RE14	
		2B7a	0.90	14.9	16.6		
		3B7a	0.83	14.9	18.0	RE16	
		3B7b	0.87	14.9	17.1		
	柱	C6 1F	0.98	14.9	15.2		
		C6 2~3F	0.51	14.9	29.2	RE13	
		C7 1F	0.88	14.9	16.9	RE15	
		C7 2F	1.37	14.9	10.9		
		C7 3F	1.66	14.9	9.0		
陽極區 5	梁	4G1	0.95	11.4	12.0	RE20	
		4G4	0.68	11.4	16.8		
		4G5	0.66	11.4	17.3	RE19	
		4B6	0.32	11.4	35.6	RE17	
		4B6a	0.63	11.4	18.1	RE22	
		4B2	0.73	11.4	15.6		
		4B2a	0.63	11.4	18.1		
		4B3	0.73	11.4	15.6		
		4b1	0.63	11.4	18.1	RE21	
		4b4	0.79	11.4	14.4		
		4b4a	0.66	11.4	17.3	RE18	

4.配電線路

根據陰極防蝕系統相關之標準規範及技術報告(如 Concrete Society Technical Reports 36/37)建議，系統配線必需考量促進電流分佈及避免迴路中斷。本系統各陽極區正負電路採用網狀系統，陽極系統由數條鈦條基本陽極分佈電流至鈦網陽極，陰極系統則由各陽極區鋼筋接出之工

作電極及負極連結而成，正負極由導線拉至控制箱連接使其形成電路迴路。

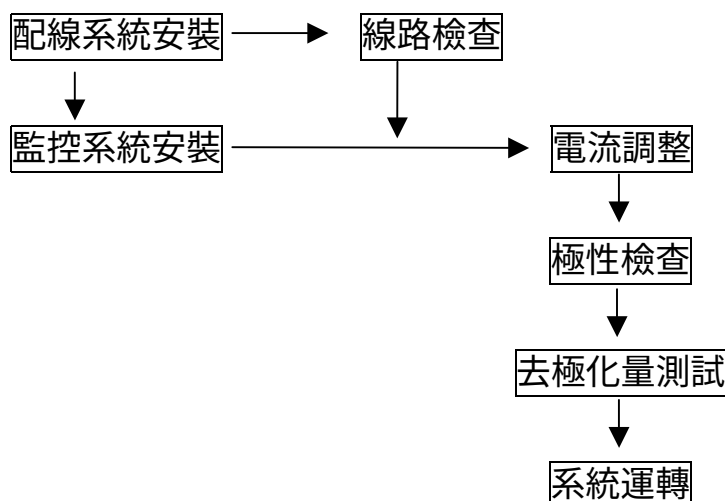
本案陰極防蝕系統位於高鹽害環境曝露場所，考量配電系統之耐蝕防護，由各陽極區接出之正極、負極及偵測電極之導線均經由線管接至控制設備中，導線之續接或短路均於接線盒完成，系統配線之線管及接線盒密閉性應符合 IP55 規格，以達防塵與防強力水注使水份滲入的保護措施。正負極導線及訊號導線選擇使用 $3.5\text{mm}^2/5.2\ \Omega/\text{km}$ 軟銅絞線，導線被覆採用耐磨損及絕緣性佳之 XLPE 材質，以適合安裝於陽極系統噴漿施工環境以及於線管集中配線。

5. 監偵測控制

本設計陰極防蝕系統共含五個陽極區，各個陽極區含 4~6 個偵測電極及 1 個 DC 電流輸出。Cyberdan Ferroeye 監偵測控制系統適合此類多陽極區之陰極防蝕系統所使用。其系統分成監控中心及區域監控兩段。區域監控 LRU 器具有偵測及供電之功能，各區域監控之電流輸出以及偵測訊號經由監控中心集中操作。監控中心含 1 個電源供應器 (PSU)，1 組監控器 (LRU Master)，1 組電腦系統，經 1 支電源線及 1 支訊號線連接各個區域監控。其線路簡單，可降低配線成本。此系統同時可使五組陽極區監偵測控制作業一次完成，使維護檢測便利及降低檢測成本。

三、陰極防蝕系統性能測試與效果驗收

1. 作業流程



2.測試項目及方法

■ 線路檢查

於各陽極區配線系統安裝完成後，以電阻計逐一測量由各電極接出電纜之線路，以確認依正確線路接到區域監控器。

■ 電流調整

利用監控系統逐步調整保護電流量(I)至接近設計保護電流，同時測量鋼筋保護電位(E)。參考 E-log I 曲線，估計保護所需電流量調整範圍，以適度降低輸出電流。

■ 電位極性確認

為確保陰極防蝕系統各陽極區之陽極及負極正確連接區域監控器之電流輸出正負極，於電流調整初階段，輸出微量電流後檢查各陽極區參考電極所顯示鋼筋電位，確認鋼筋電位是極化現象(呈較負電位)，證實陰極防蝕系統達到運轉功能，並正確運轉。

■ 去極化量測試

電流調整後，待鋼筋保護電位穩定，利用監控系統進行斷電並測量隨時間變化之鋼筋電位。斷電瞬間及斷電後之鋼筋電位差為電位去極化量，電位去極化需大於 100mV。依此去極化量測量值分析各陽極區進一步電流調整或陽極系統調整之必要。

3.試車測試結果

■ 線路檢查

各陽極區配線系統含正極線路、負極線路、參考電極(RE)線路。線路檢查結果如下：

陽極區	正極	負極	RE1	RE2	RE3	RE4	-	-
1	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-
陽極區	正極	負極	RE5	RE6	RE7	RE8	-	-
2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-
陽極區	正極	負極	RE9	RE10	RE11	RE12	-	-
3	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-
陽極區	正極	負極	RE13	RE14	RE15	RE16	-	-
4	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-
陽極區	正極	負極	RE17	RE18	RE19	RE20	RE21	RE22
5	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

備註：線路正常：✓

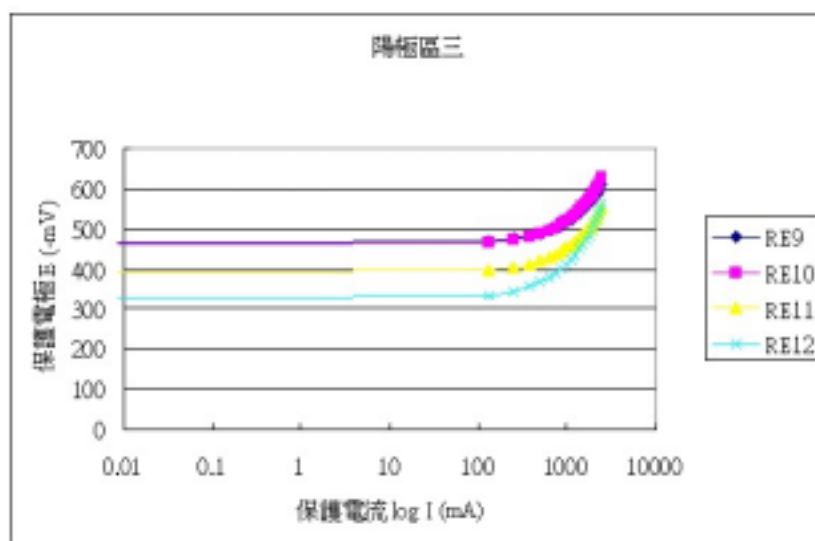
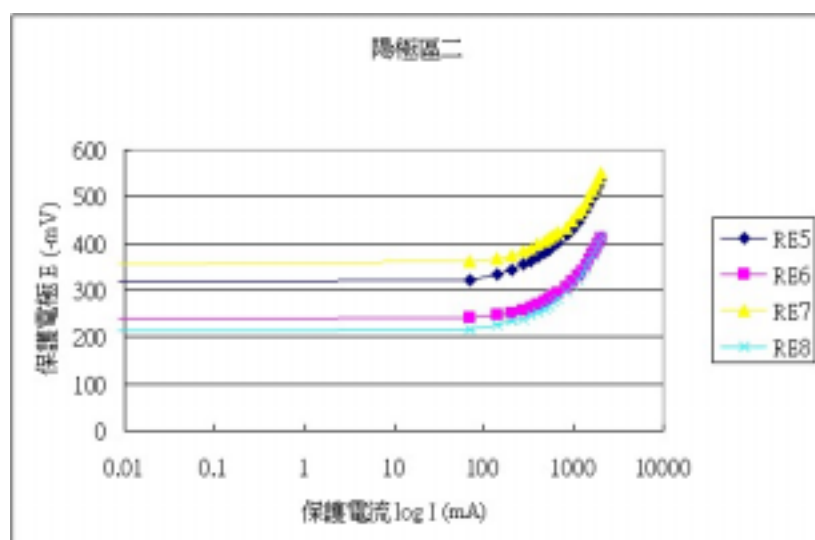
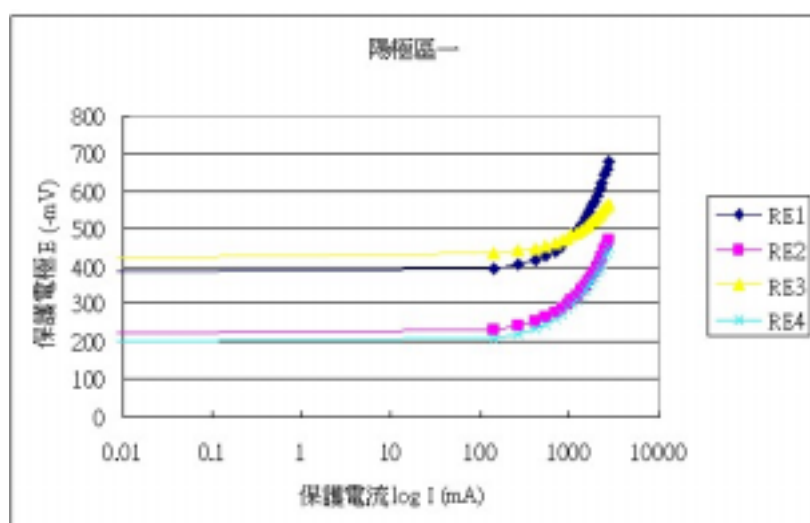
■電流調整及極性確認

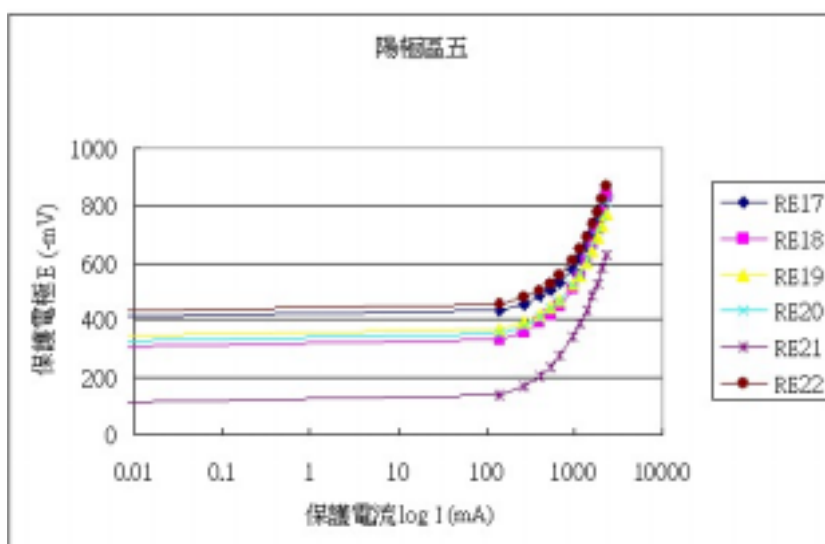
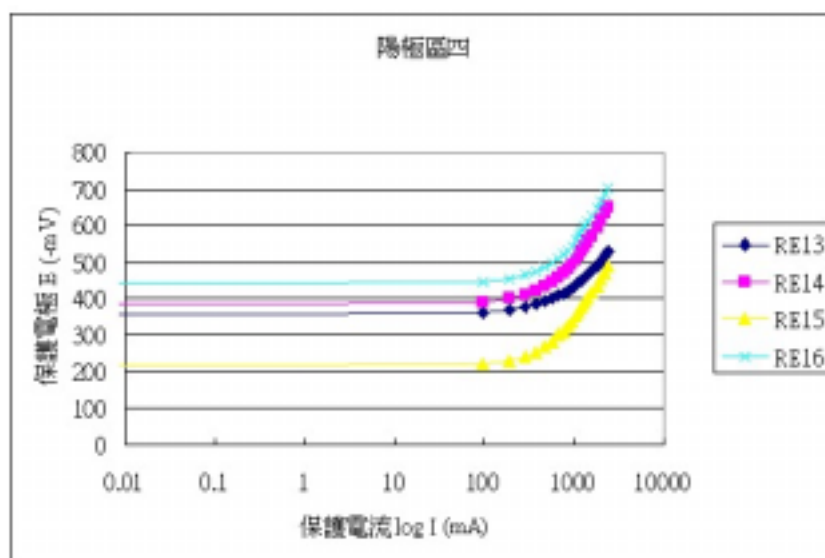
各陽極區參考電極(RE)顯示進行電流調整時，鋼筋電位呈極化現象檢查結果如下：

陽極區	RE1	RE2	RE3	RE4	-	-
1	✓	✓	✓	✓	-	-
陽極區	RE5	RE6	RE7	RE8	-	-
2	✓	✓	✓	✓	-	-
陽極區	RE9	RE10	RE11	RE12	-	-
3	✓	✓	✓	✓	-	-
陽極區	RE13	RE14	RE15	RE16	-	-
4	✓	✓	✓	✓	-	-
陽極區	RE17	RE18	RE19	RE20	RE21	RE22
5	✓	✓	✓	✓	✓	✓

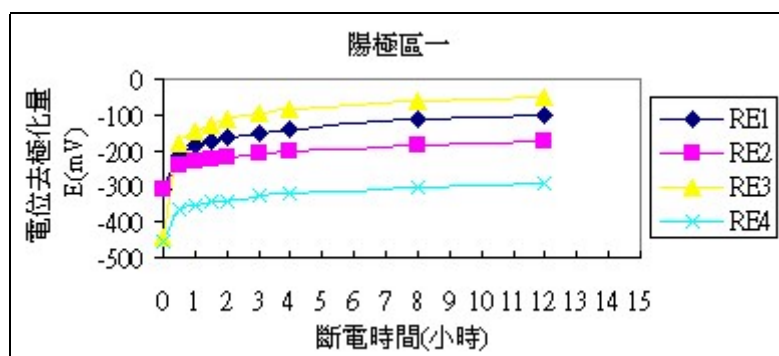
備註：1.呈極化電位：✓

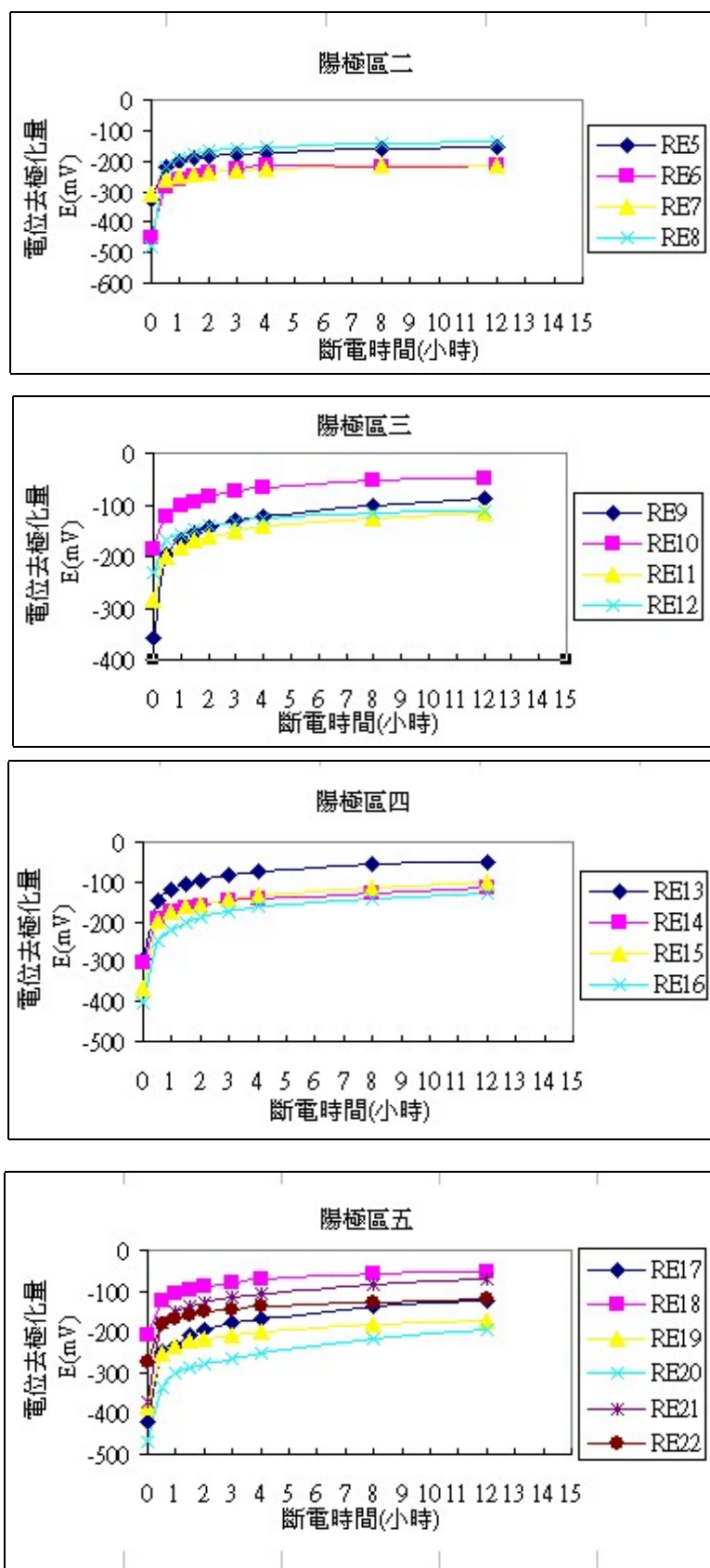
2.各陽極區電流調整 E-log I 曲線如下圖





■ 去極化量測試記錄





由以上測試結果顯示，XX 公司鋼筋混凝土廠房結構陰極防蝕系統已達到正確運轉功能，並且有效保護鋼筋混凝土結構。

RC 構造物陰極防蝕準則草案介紹

羅俊雄¹ 翁榮洲² 陳桂清³ 饒 正³

摘 要

海洋環境下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. Rau³

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.

¹ 工業技術研究院工業材料研究所 研究員，中華民國防蝕工程學會 秘書長

² 工業技術研究院工業材料研究所 正研究員兼副組長

³ 交通部運輸研究所港灣技術研究中心 研究員

一、前言

鋼筋混凝土(reinforced concrete, RC)、預力混凝土(prestressed concrete, PC)、及鋼材(如鋼板(管)樁)為港灣結構的主要組成，常年於海洋環境的侵襲下，鋼筋混凝土結構會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；而鋼板(管)樁亦會產生腐蝕，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。因此，瞭解鋼筋在混凝土、預力混凝土及鋼板(管)樁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。

陰極防蝕(cathodic protection, CP)技術應用於金屬及鋼筋混凝土結構之腐蝕防蝕，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；然因國內外環境條件的差異，亟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、施工及維修時之參考依據。因此，交通部運輸研究所於民國 90 年委託中華民國防蝕工程學會研訂「港灣構造物陰極防蝕準則草案」，但工作內容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則未含括在內。

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 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、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。

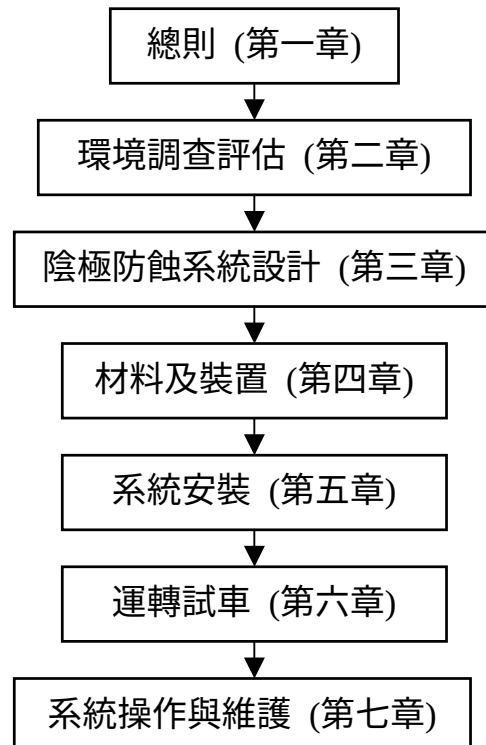


圖 1.1 鋼筋混凝土結構之陰極防蝕工程執行流程圖

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) RP0290-00, “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(適用於潮濕環境) 3. 鋅板導電凝膠(適用於乾燥環境)
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. 鋅熔射(僅適用於飛沫帶) 3. 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 RP0290-00)。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 m² 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. 鏟抹砂漿及膠結砂漿

噴塗材料、現場澆注混凝土、及鏟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 $30 \times 70 \text{ mm}$ 至 $100 \times 200 \text{ mm}$ 之間，且根據實驗室的加速試驗，鈦網表面電流密度為 200 mA/m^2 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/m^2 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 $10\text{-}50 \text{ mA/m}^2$ 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 ANSI/AWS C2.18-93 之規定。噴塗厚度依照 Florida Department of Transportation, 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 $2.5 \sim 16 \text{ mm}^2$ ，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 mm^2 ，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。

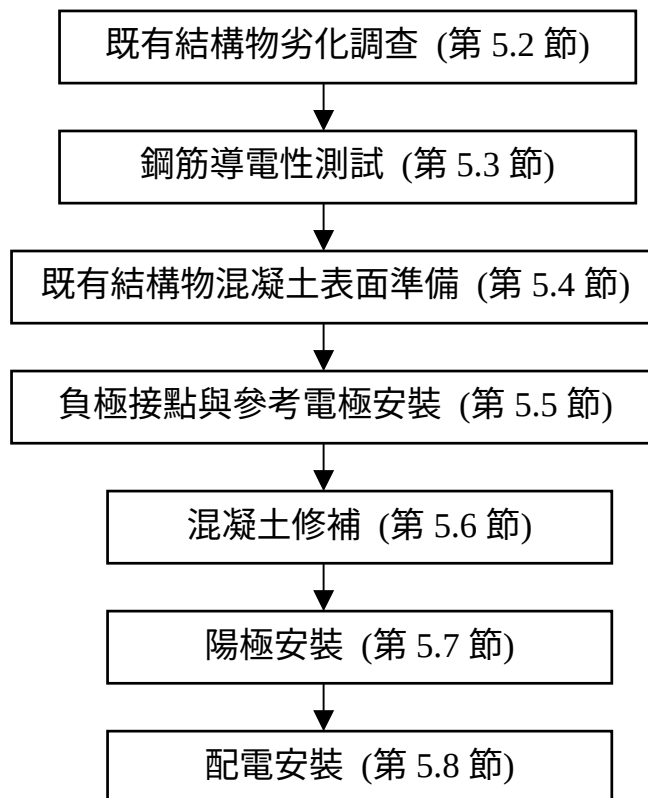


圖 5.1 既有結構物之系統安裝工作流程

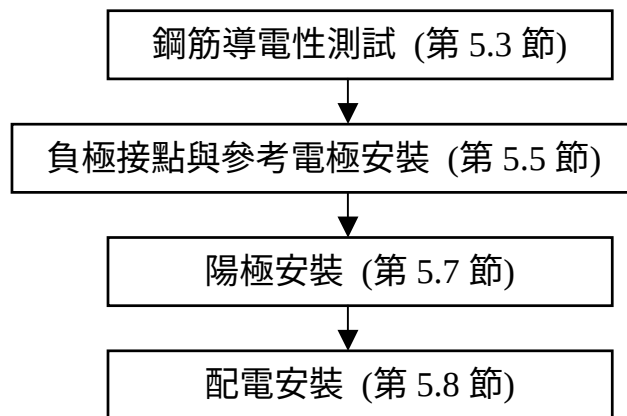


圖 5.2 新建結構物之系統安裝工作流程

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。熔射層厚度量測是以 3 m^2 為單位，每 3 m^2 內任何一處之 10 cm^2 範圍量取 5 個數值，將其平均並記錄之；膜厚計的使用是依據 ASTM D1186，於基材上進行非破壞性厚度量測。

3. 鈦網陽極

鈦網陽極安裝時必須清除混凝土表面殘餘汙漬或雜物，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；並檢測各迴路之電連通性。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。

An Overview of Sacrificial Cathodic Protection of Reinforced Concrete Structure via Thermal Spray

Peter Chen PhD*

ABSTRACT

This paper discusses the solution of metallized sacrificial cathodic protection (SCP) to protect reinforced concrete structure from corrosion. Solutions incorporating zinc are only regarded as effective in certain environment and this is proven in the experiment on Su-Ao Harbor. Its enormous consumption has raised an issue concerning natural resource depletion. Consequently, researchers have been engineering a better alloy for corrosion protection to in all environments.

According to studies, utilizing the newly developed Aluminum-Zinc alloy for cathodic protection of reinforced concrete is proven to be very effective. Cathodic protection is available in the forms of ICCP (Impressed Current Cathodic Protection) or SCP (Sacrificial Cathodic Protection). Both are based on different but similar principles to control corrosion. While both practices are equally practical, the adoption of SCP is more common mainly because its application is more simple and economical.

To ensure an adequate level of moisture for a continuous conductive electrolyte to flow between the anode and cathode, Zinc Hydrogel and Aluminum-Zinc-Indium (Al-Zn-In) alloy are introduced along with experiments to further testify improved superiority. Since no applications of Al-Zn-In have been conducted in Taiwan, the experiment conducted on the Bryant Patton Bridge in America is examined for our reference.

The results from the experiment of Bryant Patton Bridge demonstrates that for structures cathodically protected by Zn and Al-Zn-In alloys under the same temperature and relative humidity, the current density generated by Al-Zn-In alloy is approximately 4 times greater than that of Zn, or 4 times more protective.

* Berlin Co., Ltd. Kaohsiung, Taiwan, R.O.C

RC 構造物犧牲陽極式陰極防蝕案例介紹

陳哲生

摘 要

本文談論保護鋼筋混凝土結構物免受腐蝕的金屬化犧牲陰極(SCP)防蝕方案。合併鋅之方案只在某些環境有效，我們由蘇澳港的實驗得到證明。鋅之龐大消耗量引起自然資源耗盡之相關議題。因此，研究員已設計出更有效之合金去控制所有環境中之腐蝕。

根據研究報告，最新開發鋁鋅合金應用在鋼筋混凝土之陰極防蝕、被證實是非常有效的。陰極防蝕是可透過 ICCP (外加陰極防蝕) 或 SCP (犧牲陰極防蝕) 方式。兩種方式根據不同但相似的原理去控制腐蝕。雖然兩種方式實用性都是一樣的，而 SCP 之應用是比較普遍，主要因為它的應用是比較簡單和經濟。

為確保充分濕氣去使連續導電性電解質在陽極和負極之間流動，鋅水凝膠和鋁鋅銦 (Al- Zn- In) 合金的實驗被介紹以得更進一步的優勢改善證實。因為 Al-Zn-In 尚未有實績在臺灣，在美國 Bryant ·Patton 大橋之實績將作為我們的參考資料。

Bryant ·Patton 大橋實驗顯示出結果，由 Zn 和 Al- Zn-In 合金陰極防蝕之結構物在同樣溫度和相對濕度之下，Al-Zn-In 合金引起電流密度是大約 Zn 的 4 倍，即是 4 倍大之防蝕效力。

1. INTRODUCTION

The practices of corrosion control have persisted worldwide. Studies have demonstrated that coating, metalization and galvanizing all have similar life expectancy (Figure1 and Figure 2). Thus, it is considered that when conducting implementing corrosion control, the “material” not the “method” should be elected. The material Zn is currently regarded as the standard and the paradigm. Its loading is the key in determining the service life of the coating.

Taiwan, an island locating at the subtropics is well acknowledged for its high humidity and temperature. Combining with the presence of chlorides comprised in the seawater surrounding the island, it presents a severe environment for corrosion to occur up on steel structures (Figure 3). The corrosion in Taiwan is very severe that the quantity of zinc required for corrosion control in Taiwan exceeds 10 times to that of US. To solve the problem of zinc depletion in corrosion control, Zn-Al alloy is utilized.

Among the diverse effective solutions to control corrosion of reinforced concrete structure- coating is the predominant practice. On the other hand, the majority selects various ineffective solutions based on their simplicity and inexpensiveness involved with applications to control the corrosion of reinforced concrete structures- thus no standard solution for reinforced structure is established at present.

However, studies have indicated that to mitigate the corrosion of reinforced concrete structures, cathodic protection (CP) is the most efficient corrosion control technique. Two forms of CP system are accessible for different requirements in applications: Impressed current cathodic protection (ICCP) and sacrificial cathodic protection (SCP).

The performance of adopting Zn in SCP for reinforced concrete structures via thermal spay in the case of Su-Ao Harbor was proven to be effective. One of the results observed during the experiment was that galvanic current density varies with relative humidity (RH). Evidence of this was also found in another experiment- Bryant Patton Bridge. It indicated that Al-Zn-In alloy performs more effectively than zinc under the same conditions- temperature and RH.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 Zinc

To determine the quantity of Zn required for corrosion control of RC structures, the information provided ANSI/AWS is recommended. However, the life expectancy of Zn in Taiwan is relatively shorter than US.

In U.S., zinc coating with the thickness of 75um is reported to sustain approximately 10 years in heavy industrial areas (Figure 4). Compared to the U.S, with the corrosion rate in Taiwan, zinc coating with the thickness of 75um is incapable of withstanding its ambient conditions for 2 years in coastal and industrial areas as indicated in table 2, where a 41.6um thickness of zinc layer depletes in 1.6 year in Mai-Liao (Coastal area, Industrial area). The corrosion in Taiwan is very severe. It is considered to be more than 10 times worse than that of the category C5 of ISO 12944-2 by published study as shown in table 3.

According to US Geological Survey (USGS), the world production and apparent consumption have increased at an appreciable rate since 1960's (Figure 5). To cope with the problem of zinc depletion for corrosion control, a recently improved alloy- Zn-Al is utilized.

2.2 Aluminum - Zinc

The adoption of Al-Zn alloy is capable of alleviating the depletion of Zn resource and performing more efficaciously for corrosion protection. According to the test conducted (Figure 6), the performance of aluminum and zinc are distinguished as the data demonstrates that the two alloys of Zn and Al-Galvalume (55%Al) and Gafan (Al5%) produces 3 times and 8 times, respectively, higher performance of the anti-corrosion than zinc, because it takes a longer period for corrosion to occur upon on Galvalume and Gafan applied structures than that of Zn.

Several Zn-Al coatings have been researched and developed contemporarily, in particular "Wellzinc 850" series; a Zn-Al coating researched and developed conjointly by Berlin Company with well-known research institutes.

The uniqueness of Wellzinc 850 is characterized by its uncomplicated application, glossy appearance and single-coat system.

The comparison of Wellzinc 850-series's performance with other products is illustrated in figure 4 showing that after 4700 hours, the corrosion of structures protected by other products commence, however, no optical symptom of

corrosion is apparent for the structures protected by Wellzinc 850-series (Figure 7).

2.3 Cathodic Protection

Several methods have been utilized to mitigate the rebar concrete structure corrosion, such as waterproof membranes and sealants, which even though justified to inhibit corrosion occurring in low chloride contaminated rebar concrete structures. However, as for higher level of chloride contaminated rebar concrete structures no evidence of corrosion protection is yet been collected.

“The only rehabilitation technique that has proven to stop corrosion in salt-contaminated bridge decks regardless of the chloride content in the concrete is cathodic protection.” (Barnhart, R.A., FWHA Position on Cathodic Protection, Internal Memorandum, April 23, 1982).

Since 1973, when the first installation of CP on a chloride contaminated concrete bridge deck in Sly Park, California, more than 1.9 million m² of rebar concrete structures have been cathodically protected globally. Even until today no sign of physical decay of such deck can be visually discovered.

There are two types of Cathodic Protection systems available: Impressed current cathodic protection system, and galvanic or sacrificial anode cathodic protection system. Both of them have been adopted to control corrosion of rebar concrete structures.

2.3.1 Impressed Current Cathodic Protection System- Zn and Ti

An impressed current cathodic protection employs an external power source to provide the current discharged by external anode onto the cathode- the cathodically protected metal. Two types of materials are commonly utilized as the external anodes: Titanium and Zinc. The benefits and cautions for the two materials are demonstrated in table 4 and table 5, respectively.

The benefits of utilizing Ti mesh for ICCP are as reported: The honeycomb-like pattern of the mesh provides increased bonding and a uniform

distribution of current across the structure as well as low circuit resistance. Its prolonged service life of 60~90 years, is considered to be longer than other anodes.

In contrast, the benefits of Zn for ICCP are as reported: 20 years of successful applications in US and European countries, cost-effective (2000~5000NYO/m²), excellent plasticity, double layers of protection (Thermal spray and Zn) and uncomplicated for maintenance.

On the other hand, the cautions for the application of ICCP via Zn are: the currently recommended 375um thickness of Zn layer is insufficient for Taiwan's corrosive environment, thicker Zn coatings require more surface preparation to avoid the falling spots and Zn anode is not permanent as it is consumable.

Similar to Zn anode, cautions are required for Ti anode: the numerous shorts escaping the inspection and imprecise installation of rebar can induce the failure of the entire CP system, the service life of rectifier is shorter than expected, scarcity of engineering know-how, and installation of anode often cause several undetected air pockets to render the failure of the anode.

2.3.2 Sacrificial Cathodic Protection System- Zn and Al-Zn

Galvanic Anode Systems are based on the principle of dissimilar metal corrosion and the relative positions of specific metals in the galvanic series. Zinc, aluminums and magnesium-based alloys are commonly utilized as galvanic anodes. The metal- such as Zn with higher potential is sacrificed by releasing its anode to protect the cathode- substrate with lower potential, thus cathodic protection is formed.

The type of cathodic protection system to be employed depends on the structures being protected and its environments. However, the benefits and cautions for both systems are reviewed here.

2.3.3 Benefits and Cautions for ICCP and SCP Systems

The comparison between ICCP and SCP is summarized in table 6 and figure 8. According to the summary, ICCP is adopted for providing complete protection

of corrosion. Its application is relatively more complicated as it requires installation of external equipments, such as an external source of power, a rectifier and reference electrodes.

In contrast, SCP mitigates the corrosion instead of terminating it. It requires no rectifiers whose service life is generally shorter than expected. The application of such system is less complicated, unlike ICCP, whose complex system and installations usually induce the entire CP system to fail. A successful application of SCP requires thermal spray and it is competitive in cost.

2.4 Humitant

For conventional CP systems (SCP or ICCP) to function properly, it requires the presence of a continuous conductive electrolyte between the anode and the cathode. Namely, both systems should be installed in moisturized concrete structures in order to conduct sufficient electrolytes to form a closed circuit. When electrical discontinuity occurs, reinforcing steel would not be cathodically protected. Thus, the existence of adequate moisture in the rebar concrete structure is an issue highly regarded

One of the recent innovations to solve the problem of electrolyte discontinuity is the self-adhesive and conductive zinc-hydrogel anode that provides continuous electrolyte to be conducted between the anode (Zn) and the Cathode (rebar) embedded in the concrete structure. Electrolytes are capable of conducting from the anode to the cathode through the zinc foil coated with an ionically conductive hydrogel pressure-sensitive adhesive (Figure 9). The hydrogel is covered with a liner to assist in avoiding contamination. During the installation, the protective liner is removed from the hydrogel manually, and the zinc-hydrogel anode is adhered to the previously treated concrete surface.

This zinc foil anode coated with hydrogel is provided in roll form for coverage to protect the concrete surface. The ionically conductive hydrogel provides two functions:

1. To enable the anode securely adhered to the exterior surface of the concrete structure.

2. Acting as a continuous conductive electrolyte between the anode and the concrete structure.

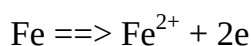
2.4.1 How does Zn Hydrogel work?

As shown in Figure 9, the zinc foil is applied to the surface of concrete structure. The pressure sensitive adhesive (conductive hydrogel) connects the zinc anode (foil) and the concrete surface to allow continuous electrolytes flowing from the anode (foil) to the cathode (rebar).

The zinc foil must be electrically connected to the rebar by wires for electrons to flow through the wire from zinc (anode) to rebar (cathode). Conventional current conducts in the opposite direction of electrons, for instance, conducting from cathode to anode. Ionic current is transferred by Cl^- , Na^+ , OH^- , Ca^{2+} etc. across the electrolyte (concrete + hydrogel). Cathodic protection is indicated by the potential of rebar and the current conducting between the zinc foil and the rebar

2.4.2 Why does Zn Hydrogel work?

The oxidation reaction involved in corrosion of rebar is represented by the following formula:



When a neutral iron atom discharges 2 electrons it becomes a proton. Metals discharging electrons is considered as the tendency for metal corrosion.

When zinc foil is electrically connected to the rebar, electrons are conducted from zinc foil to rebar, therefore, the steel's tendency to lose electrons is reduced and the rate of corrosion (oxidation) too. Because zinc is more reactive than steel, it has a much greater tendency to lose electrons than steel. As electrons carry negative charges, the accumulation of electrons in rebar causes the steel to be more negatively charged inducing cathodic polarization or cathodic protection. (Figure 10)

2.4.3 Zinc Hydrogel in Practice

Theoretically, Zinc Hydrogel, the humitant appear to be the ideal solution to control the corrosion of rebar concrete. However, in reality, as according to the inventor of Zn Hydrogel, this may not be the case.

According to the inventor of Zn Hydrogel in the NACE conference, failures of such protection system occurred after two or three years. The two main causes inducing the failure are:

1. The penetration of moisture into the hydrogel, cause it to swell and lose its bonding strength.
2. A corrosive exterior environment induces zinc consumption to occur.

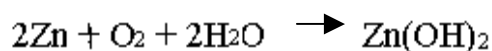
Despite coatings are applied on the exposed surfaces, the protection system still failed (Figure 11).

2.5 Zn Coating via SCP thermal spray

The technique of Zn coating via SCP thermal spray is reported to be very effective. The benefits and cautions of Zn anode are restated in table 7. To illustrate the feasibility of Zn coating via SCP thermal spray, the case of Su-Ao Harbor is studied in this paper.

In September 2002, a thermal sprayed zinc coating SCP was applied to the underside of the deck to mitigate the corrosion of reinforced concrete. One span of the #13 wharf deck was tested. The test result obtained, following 270 days of monitoring, is promising:

1. Observation made on Day 180 showed that few white particles appeared on the topcoat. It was presumed that the white particles were Zn (OH)₂ and/or ZnO precipitated through the topcoat after the oxidation of zinc anode. The consumable zinc anode reaction is:



Under drying conditions dehydration of the zinc hydroxide may occur:



2. The depolarization potential meets the National Association of Corrosion Engineers International (NACE) 100 mV criteria- indeed, 170mV with galvanic protection current density ranging from 7.8 to 16.7mA/m².
3. Galvanic current density generated in the Zn SCP, varies with the level of humidity. An increase in humidity induces an increase in the galvanic current density generated, thus the degree of protection increases.

2.6 Installation of Zn Galvanic Anode System

2.6.1 Requirements for successful application

In order for the sacrificial cathodic protection system via Zn anode to be successful, the following factors require concerning:

1. Surface Preparation: Abrasive blasting equipment should be utilized to ensure adequate bonding between concrete and thermally sprayed anode. All repairs need to be completed prior to the preparation of concrete surfaces. When the ambient temperature is under 5°C, concrete surfaces should not be sprayed. To ensure proper operation, guidelines for surface preparation.
2. Electrical Continuity of the reinforcing steel: Due to the redundancy which significant structures, such bridges and wharves, possess, electrical discontinuity of the reinforced steel is usually not a problem. However, continuity still requires checking during the repair stage at a minimum of 5 locations per 100m² and between all steels under exposure. A DC Millivolt drop method, which consists of a standard DC voltmeter, test leads and wire reel, is utilized to test discontinuity.
3. Availability of Moisture: As aforementioned, the level of moisture determines the galvanic current density generated. Thus, candidate structures for galvanic thermal spray systems should be located in environments where the relative

humidity on average exceeds 40% throughout the majority of the year.

4. Experience of thermal spray operator: The thermal spray operator must possess adequate technical experience and qualification to apply the anode coating on concrete surfaces competently.

2.6.2 Thermal spray application

The arc spray application is regarded as the most effective method for achieving high productivity, good mechanical bond and a cohesive uniform coating. The electric arc spray simultaneously feeds two Zn wires at a constant speed through the spray gun. The Zn wires melt and the molten Zn metal is applied onto the concrete surfaces via pneumatic air pressure to form Zn metallized coating (Figure 12). A minimum thickness of 300 microns (12mils) of Zn anode should be applied onto the surface. For additional redundancy, anode connector plates are installed (Figure 13). Usually one conductive plate is sufficient for 100m² of concrete surface area

2.6.3 Quality control.

To ensure an adequate quality for the application, the following criteria should be met:

1. Reference Sample: the reference samples are used as benchmark for concrete profile, adhesion and appearance throughout the project.
2. Thickness Measurements: At least 300 microns (12 mils) thickness of Zn is essential for long-term performance of the SCP.
3. Adhesion Testing: It is essential for the adhesion strength to achieve a minimum of 100psi
4. Monitor coverage: The estimated coverage for Zn at 300 microns thickness is 1.0kg/m².
5. Visual Inspection.

2.7 Zn Performance in Taiwan

Data recorded from 25 weather stations throughout Taiwan indicates that during the period from 1971~2000, the average temperature and relative humidity were 21.3°C and 80.68, respectively. According to the results from the experiment conducted by Federal Highway Administration (FHWA), the probability for Zn CP to succeed in Taiwan environment is approximately 50%, or half of the Zn cathodically protected reinforced structures are not generating sufficient protective current to mitigate corrosion (Figure 14).

2.8 Al-Zn-In

2.8.1 Temperature Humidity Chamber

Under the intensive research and development funded by Federal Highway Administration (FHWA) in 1994 to develop new sacrificial anode materials for cathodic protection of rebar concrete, Aluminum-Zinc-Indium based alloy was developed to provide a more advanced cathodic protection to solve the problem of electrolyte discontinuity.

With the incorporation of Indium into the original Al-Zn based alloy for cathodic protection, the new alloy now enables rebar to be cathodically protected successfully even in drier less humid areas. This is evident in the experiment conducted in laboratory testing by FWHA.

During the test, the alloy with 80 percent Aluminum, 20 percent Zinc and 0.2 percent Indium, was compared with pure zinc, where both materials were adopted for cathodic protection under the same conditions- temperatures ranging from 4°C to 32°C and relative humidity from 40% to 90%.

The results generated from the test proved that the Al-Zn-In based alloy performs more superiorly than the pure Zn in terms of the current produced as illustrated in figure 15. The Figures show that at 21°C and 70% relative humidity, both alloys produced the highest current density with Zn of 6mA/m² and Al-Zn-In of 23 mA/m².

The protective current generated by Al-Zn-In CP demonstrates its feasibility in Taiwan. It is presumed that the sufficient current generated by Al-Zn-In CP enables the probability for this CP system to succeed is 100% (Figure 16).

2.8.2 Case Study: Bryant Patton Bridge

As part of the study for FHWA, Bryant Patton Bridge in Florida was experimented with anodes- Aluminum-Zn-Indium and Zn. They were applied on to the rebar concrete structures via thermal spray. The results recorded over a four-year period still demonstrated the superiority of Al-Zn-In over Zn alloy. Although the current varied throughout the period with the change in moisture, the average anode current density of the new Al-Zn-In alloy are higher or 4 times greater than that of Zn (Figure 17).

2.8.3 Other installations

Several installations were completed in both marine and northern deicing salt environments, whose thermal spray contractors noticed a production rate of 10-15m² per hour. High bond strength was demonstrated and the protection level of the rebar surpassed the 100-mV polarization development criterion cathodic protection of steel-in concrete.

As the anode is a galvanic system, it is unnecessary to monitor or maintain. The anode coating appears to have a gray-silver color resembling concrete. According to the predicted consumption rates, the aluminum-based alloy should provide a life expectancy of 10-15 years before the next application required.

Other sounding results produced by the comparison table of the aluminum alloy and the zinc is displayed in table 4. The most prominent results demonstrated from the table are the current density of Al-Zn-In compared with Zn in FHWA Temperature/Humidity Chamber at 21 °C and 70% relative humidity, in which Al-Zn-In's current density is 15 times more than that of Zn.

3. CONCLUSION

1. The depletion of Zn resource should be highly regarded.
2. ICCP via Zn is more preferable than Ti, based on the relatively less complexity of Zn.
3. SCP via Al-Zn Alloy for controlling corrosion of reinforced concrete structure is the most economical and effective solution available in Taiwan.
4. To ensure the electrolyte continuity between the anode and cathode during the cathodic protection of reinforced concrete structure, the humitant- Zinc Hydrogel is recommended.
5. With the adoption of electric arc spray, Al-Zn-In is capable of achieving the best performance even in cooler less humid areas.

REFERENCES

1. J.S. Luo, J.C. Oung and L.Pan “ Galvanic Cathodic Protection of Reinforced Concrete Using Metallized Zinc Anodes”, Proc. Opf 13th Asian Pacific Corrosion Conference, Paper No.R-10, (2003).
2. S. F. Daily and W. K. Green “ Galvanic Cathodic Protection of Reinforced and Prestressed Concrete Structures using CORRSPRAY™ - a Thermally Sprayed Aluminum Alloy”, Corpro Companies, Inc. Paper No. 51 (2000).
3. M.Funahashi and W.T. Young, “ Development of a New Saxrificial Cathodic Protection System for Steel Embedded in Concrete,” FWHA Report FHWA-RD-96-171, June 1997.
4. J.H.Qiu “Innovative Cathodic Protection Systems for Concrete Repair and Rehabilitation”, The Corrosion Journal for the Online Community, 2002.

Table 1 Mean Relative Humidity (RH) and Temperature (Temp) in Taiwan, 1971~2000

Station	RH % Mean	Temp. °C Mean	Duration
Alishan	86	10.8	1971-2000
Anpu	90	16.7	1971-2000
Chengkung	80	23.7	1971-2000
Chiayi	82	22.8	1971-2000
Chutzeu	86	18.5	1971-2000
Hengchun	76	25	1971-2000
Hsinchu	78	22.2	1991-2000
Hualien	78	23.3	1971-2000
Ilan	84	22.3	1971-2000
Jihyuehtan	82	19.2	1971-2000
Kaohsiung	77	24.7	1971-2000
Keelung	80	22.4	1971-2000
Lanyu	90	22.6	1971-2000
Pengchiayu	83	21.8	1971-2000
Penghu	82	23.4	1971-2000
Suao	81	22.4	1981-2000
Taichung	77	23	1971-2000
Tainan	78	24.1	1971-2000
Taipei	78	22.6	1971-2000
Taitung	75	24.3	1971-2000
Tanshui	80	22.1	1971-2000
Tawu	75	24.8	1971-2000
Tungchitao	84	23.4	1971-2000
Wuchi	78	22.8	1976-2000
Yushan	77	3.9	1971-2000
Taiwan	80.68	21.3	1971-2000

Table 2 Zinc Corrosion Experiment in Taiwan

Locations		Atmosphere	Zn Corrosion rate (mm/yr)	Service yrs. (90%)	Service yrs. (50%)
01	Chutung	Rural	3.1	21.9	12.2
02	Yancheng Harbor	Marine	5.4	12.4	6.9
04	Kaohsiung	Industrial	4.2	16.0	8.9
05	Hsindar	Marine , Industrial	4.3	15.6	8.6
06	Mt. YangMing	Sulfurous Rural	11.9	5.7	3.2
07	Shulin	Industrial, Urban	3.2	20.9	11.6
08	Tucherng	Industrial	3.5	19.2	10.7
09	HsiaoGang	Industrial	3.1	21.8	12.1
10	Jia-Lo-Sui	Rural , Marine	30.2	2.2	1.2
11	Torcherng	Rural , Marine	3.3	20.3	11.3
12	Mailiao	Marine	26.0	2.6	1.4
13	Hsinchu	Urban	3.7	18.2	10.1
14	Fongshan	Rural , Marine	2.4	28.1	15.6
15	Doounan	Rural	3.2	21.4	11.9
16	Keelung	Urban , Marine	3.1	21.5	12.0
17	Hualien	Marine	20.4	3.3	1.8
18	Taitung	Marine , Urban	6.7	10.1	5.6
19	Tawu	Marine , Rural	7.3	9.3	5.2
20	Hsinying	Urban	6.9	9.8	5.5
21	Hwushi	Marine	13.3	5.1	2.8
22	CSC	Urban , Industrial	3.2	21.1	11.7
23	NSYSU	Urban	4.5	15.0	8.3
24	NTUH	Urban	3.1	21.8	12.1
25	Linko	Marine , Industrial	34.1	2.0	1.1
26	Mailiao	Marine , Industrial	41.6	1.6	0.9

Table 3 ISO 12944-2 Corrosion Environment Category

Corrosion Environment	Unit-Surface mass/thickness loss				Cases
	Low-carbon steel		Zn		
	Mass Loss	g/m ²	Thickness Loss	μ m	
C1	≤10	≤1.3	≤0.7	≤0.1	—
Very low	>10-200	>1.3-25	>0.7-5	>0.1-0.7	Low air pollution (Rural)
C2	>200-400	>25-50	>5-15	>0.7-2.1	Urban, industrial atmosphere, moderate carbon dioxide pollution, low salinity seashore
low	>400-650	>50-80	>15-30	>2.1-4.2	Industrial area, moderate salinity seashore area
C3	>650-1500	>80-200	>30-60	>4.2-8.4	Industrial area of high humidity and corrosive atmosphere

Table 4 Zinc vs. Titanium

Impressed Current Cathodic Protection	
Titanium	Zinc
Longer Service life than other anodes 60-90 years.	For thickness of 300~400μm, the estimated service life is 20 years.
Honeycomb-like pattern of the mesh would allow for increased bonding to the concrete	20 years of Successful application in US and European countries.
Low circuit resistance	Relatively more cost-effective: approx. 2000!~5000NTO/m ² .
A uniform distribution of current across the structure	High Plasticity- able to be applied to structures of different age and forms.
Efficient anodes for use in the cathodic protection of concrete bridge decks	Double Portection: Thermal Sprayed layers insulate the factors for corrosion and Zn provides protection for RC corrosion.
	ICCP or SCP via Zn thermal spray protects RC corrosion effectively.
	Appearance: similar to the color of concrete.
	Maintenance: Application at any time with uncomplicated maintence.

Table 5 Cautions for ICCPSystem

Titanium	Zinc
Lots of shorts can escape inspection inducing the entire CP system to fail.	Taiwan is very corrosive so Zn must be thick, the current advised 375 um may not be sufficient.
The installation of Rebar is often imprecise and well connected, causing the system to fail.	A thicker coating requires more surface preparation as it may be the falling spot.
The service life of the rectifier is shorter than expected.	The anode is not permanent as it is consumable.
Installation of anodes often leaves many air pockets undetected rendering the anode to fail.	
Lack of Engineering know-how.	

Table 6. ICCP vs. SCP

ICCP	SCP
➤ Confirm complete insulation between Zn thermal sprayed anode and the rebar, do not allow short circuit to occur between Zn thermal sprayed anode and the rebar. ➤ Provides complete corrosion protection. ➤ The method is similar to protection via Ti, and is more complicated than SCP. ➤ Electricity conductive cement, reference electrode and rectifiers must be installed. ➤ The cost, excluding repairs for rebar and concrete, NT 3000~5000/m², 20 years guarantee. ➤ Power source must be installed at places where power sources are supplied.	➤ Confirm the connection between Zn thermal sprayed anode and the rebar to form a circuit. ➤ Simple application, thermal spray only. ➤ The cost, excluding repairs for rebar and concrete, NT 2000~3000/m², 20 years guarantee. ➤ Regular maintenance inspection. ➤ RC Zinc thermal spray: US ANSI /AWS C2.20 Specification.

Table 7. The introduction of Zn SCP.

Benefits	Cautions
For thickness of 300~400µm, the estimated service life is 20 years.	Taiwan is very corrosive so Zn must be thick; the current advised 375 um might be insufficient.
20 years of Successful application in US and European countries.	A thicker coating requires more surface preparation as it may be the falling spot.
Relatively more cost-effective: approx. 2000~5000NTO/m ² .	The anode is not permanent as it is consumable.
High Plasticity- able to be applied to structures of different age and forms.	
Double Protection: Thermal Sprayed layers insulate the RC factors for corrosion and Zn provides protection RC corrosion.	
ICCP or SCP via Zn thermal spray protects RC corrosion effectively.	
Appearance: similar to the color of concrete.	
Maintenance: Application at any time with uncomplicated maintenance.	
For thickness of 300~400µm, the estimated service life is 20 years.	

Table 8. Comparison of Properties, Zn vs. Al-Zn-In

	Zinc	Al-Zn-In	Comments
Theoretical Energy Capacity	370 (Amp-hr/lb.)	760-1,090 (Amp-hr/lb.)	Al-Zn-In 2-3x energy capacity of zinc
Consumption Rate at Bryant Patton Bridge, Florida	Nil	12microns/yr. (0.5mils/yr.)	10-15 year life expectancy for Al-Zn-In in Florida
Current Density at Bryant Patton Bridge after 5 years	11.54mA/m ² (0.05mA/ft ²)	5.11mA/m ² (0.47mA/ft ²)	Al-Zn-In 9x current density vs. zinc
Actual Output at Queen Isabella Causeway, Texas (05/10/00)	0.374Amps (0.28mA/ft ²)	1.308Amps (0.98mA/ft ²)	Al-Zn-In 9x current density vs. zinc
Current Density in FHWA Temperature/Humidity Chamber@21°C &70%RH	0.43mA/m ² (0.114mA/ft ²)	6.56mA/m ² (0.61mA/ft ²)	Al-Zn-In 9x current density vs. zinc
Average Anode Open Circuit Potential in Marine Environment	-751mV (CSE)	-1055mV (CSE)	Al-Zn-In 9x current density vs. zinc
Average adhesion test results	1.9-2.4Mpa (270-350psi)	1.7-2.4Mpa (250-350psi)	Similar adhesion strength vs. zinc

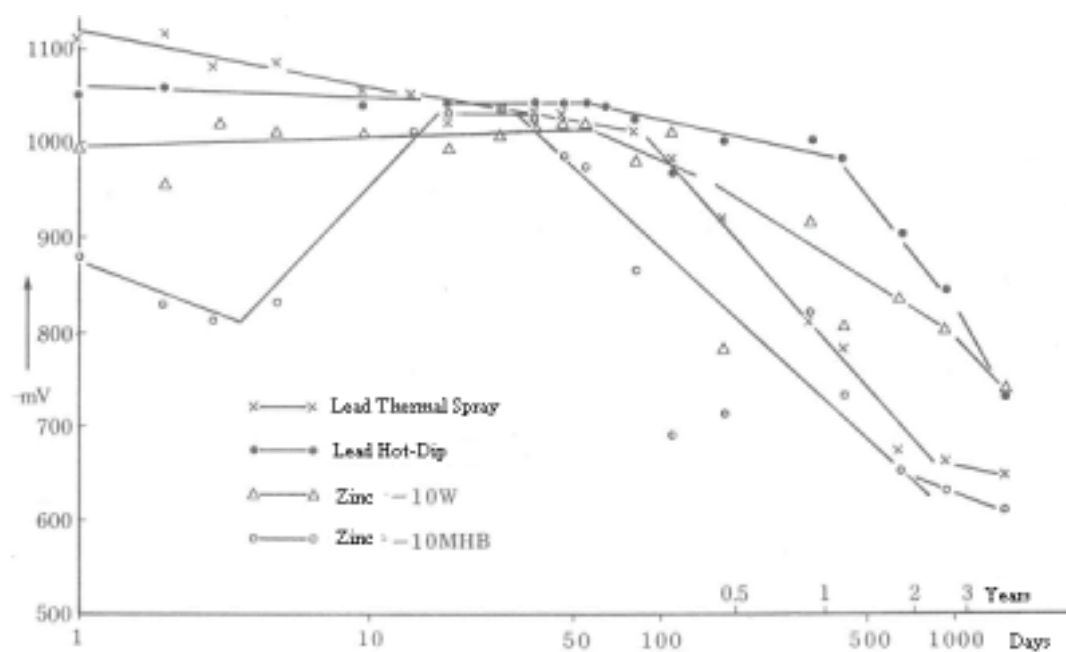


Figure1 The potential generated in 3% saline

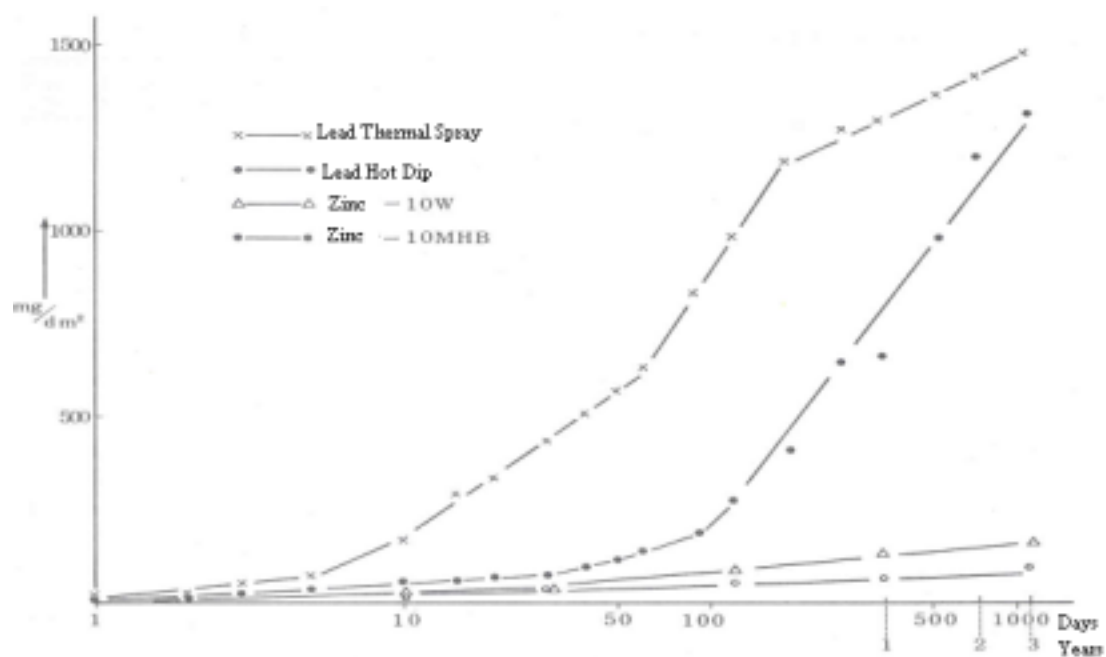


Figure 2 The amount of Lead dissolved in 3% saline

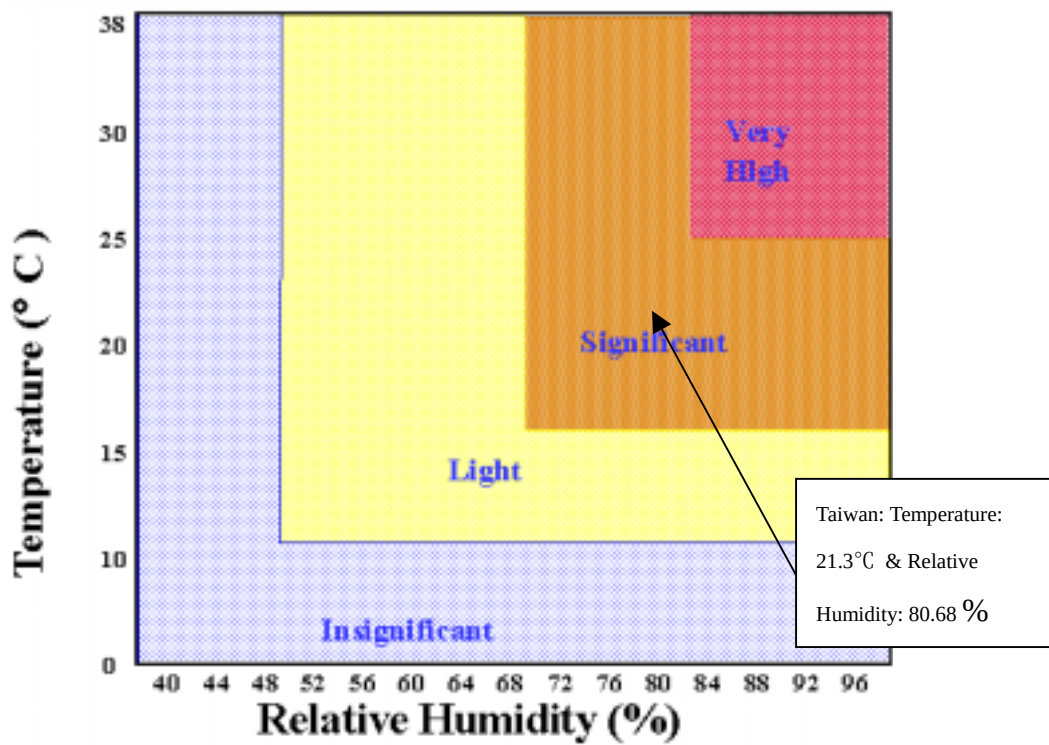


Figure 3 Taiwan Rebar Corrosion Rate

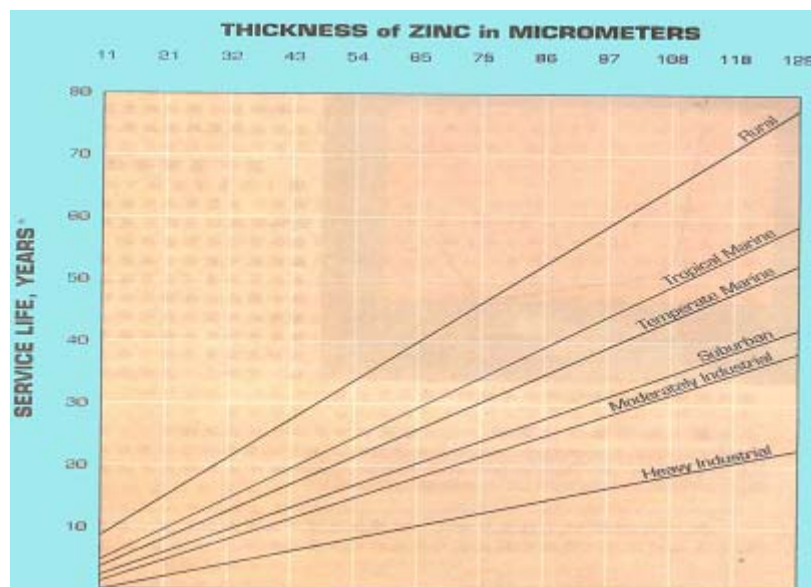


Figure 4 Estimated life of Zinc in US

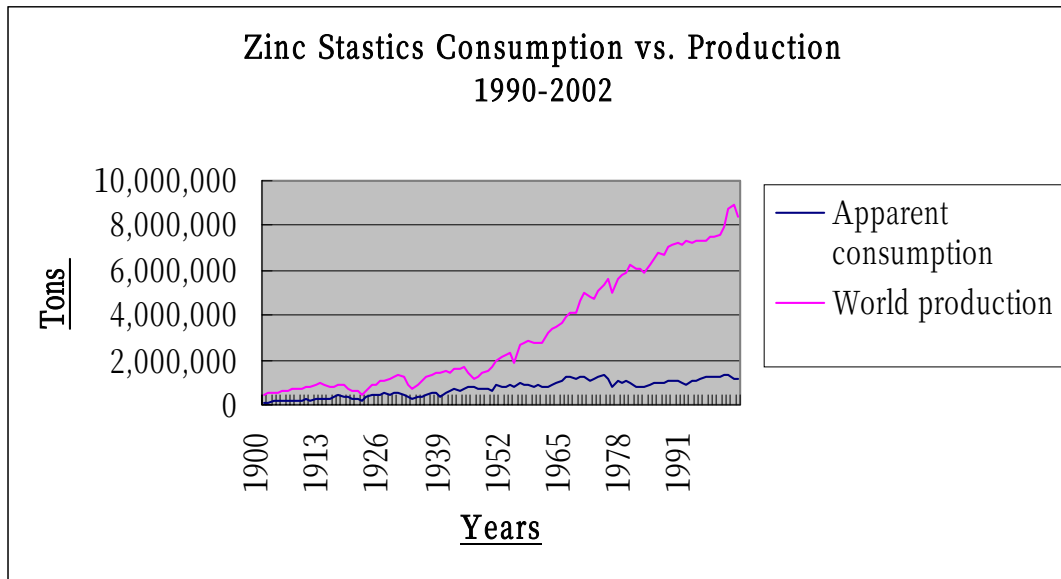


Figure 5 Zinc Consumption vs. World Production 1990~2002

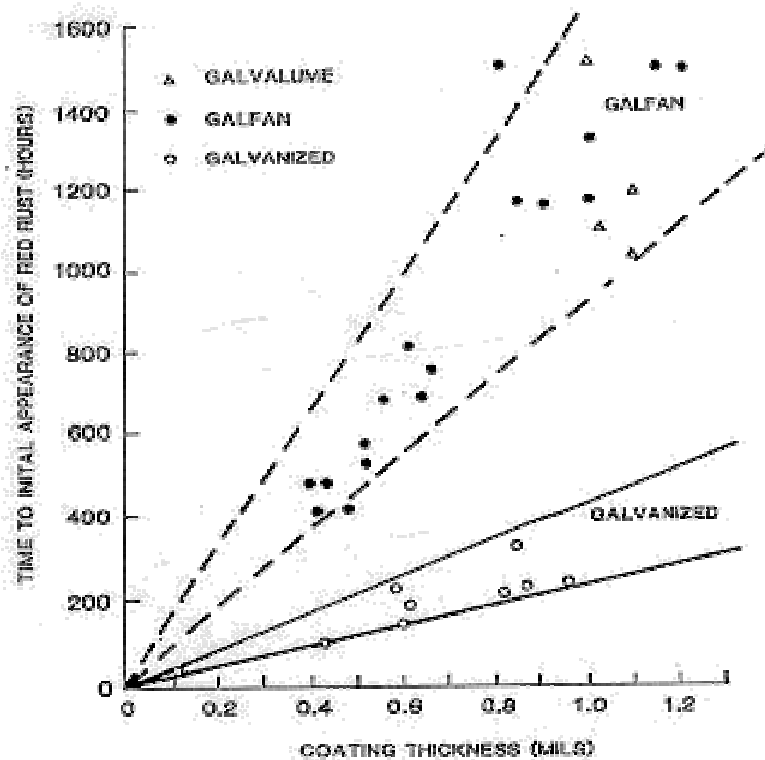


Figure 6 Comparison in Performance of Galvalume, Galfan and Galvanized

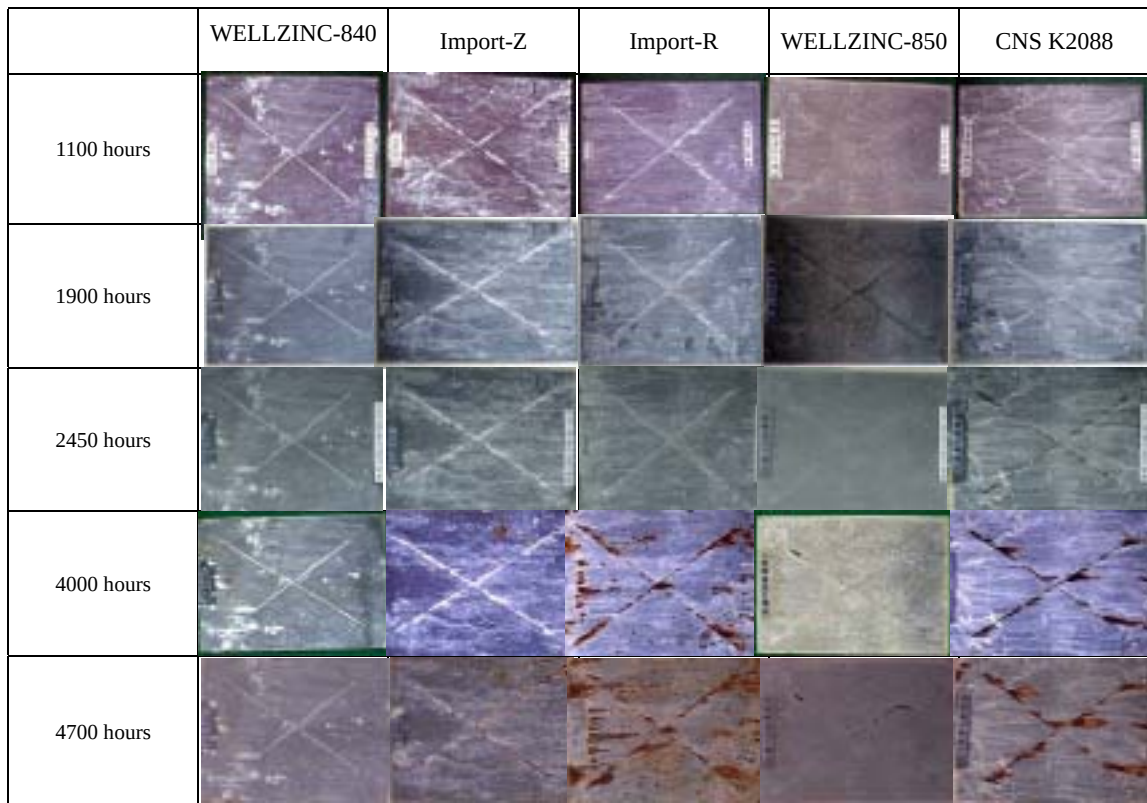


Figure 7 The Comparison between WellZinc and other competing products

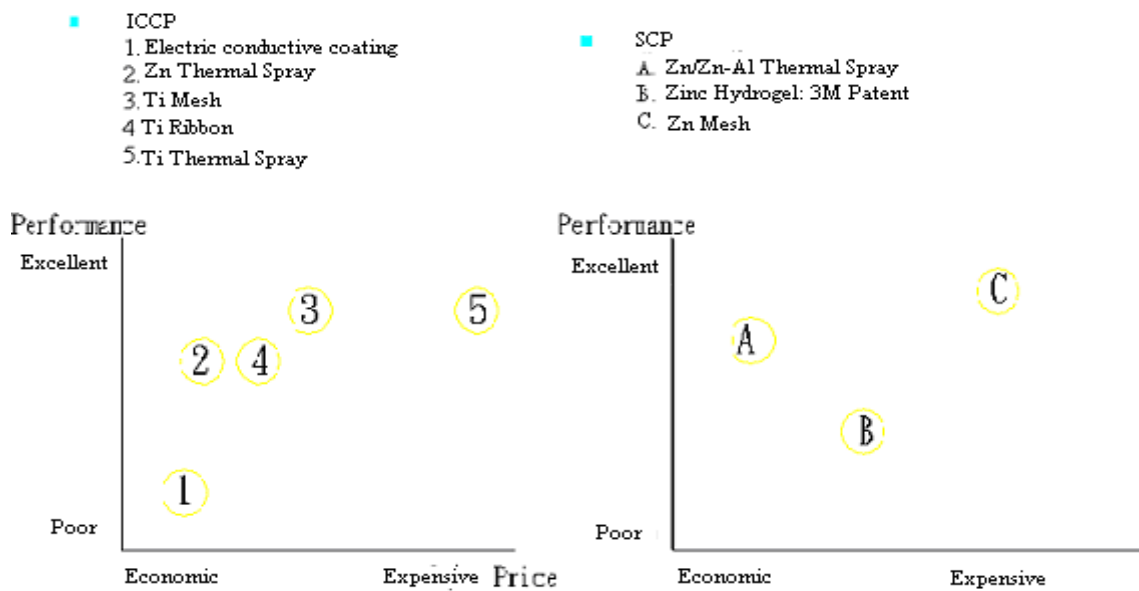


Figure 8 CP Applications for RC Structures



Figure 9 Zinc Hydrogel Anode

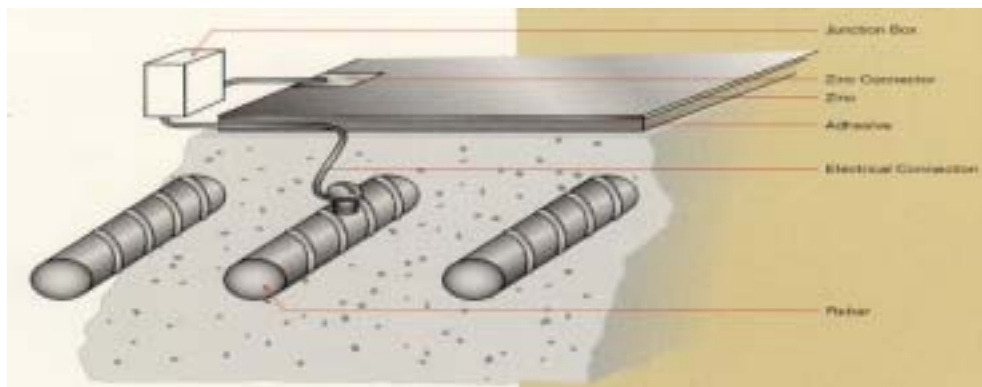


Figure 10 How Zinc Hydrogel works



Figure 11 Zinc Hydrogel in Peoria, Illinois

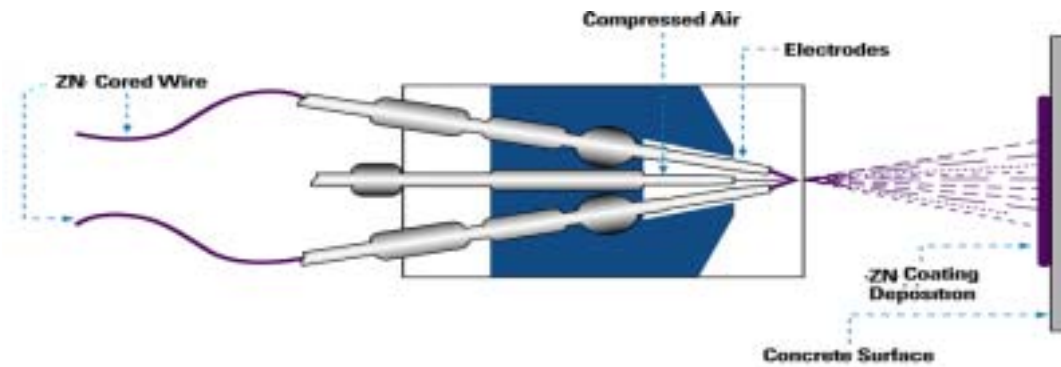


Figure 12 Electric Arc Spray Process



Figure 13 Anode Connector Plate

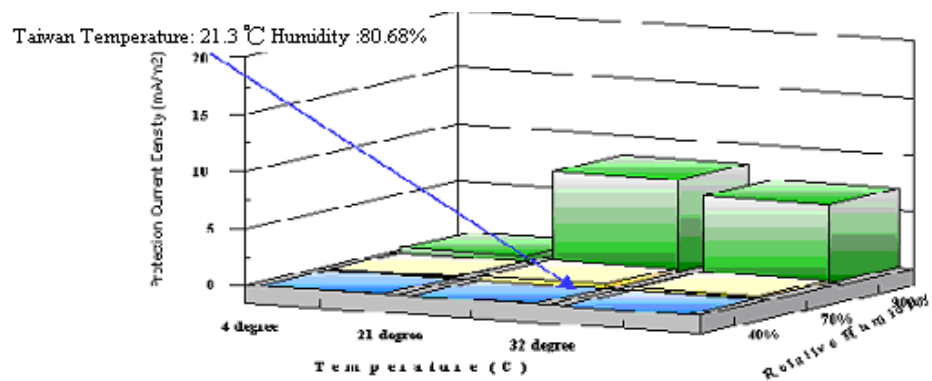


Figure14 Temperature Humidity Chamber, Performance of Thermally Sprayed Zinc

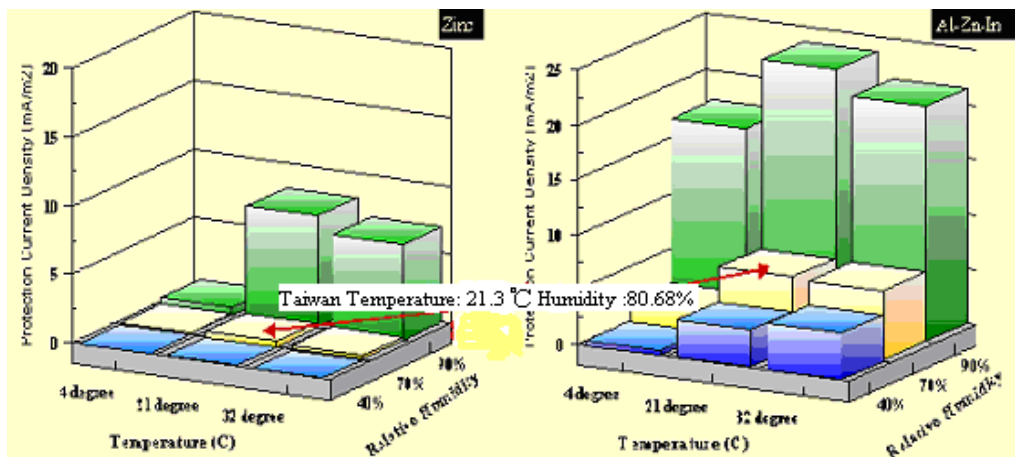


Figure 15 Current Density, Al-Zn-In vs. Zn

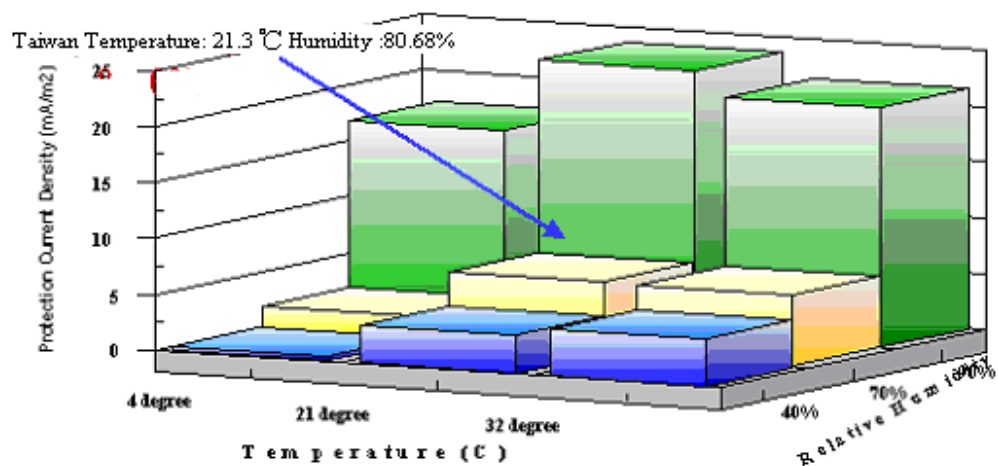


Figure 16 Temperature Humidity Chamber, Performance of Al-Zn-In

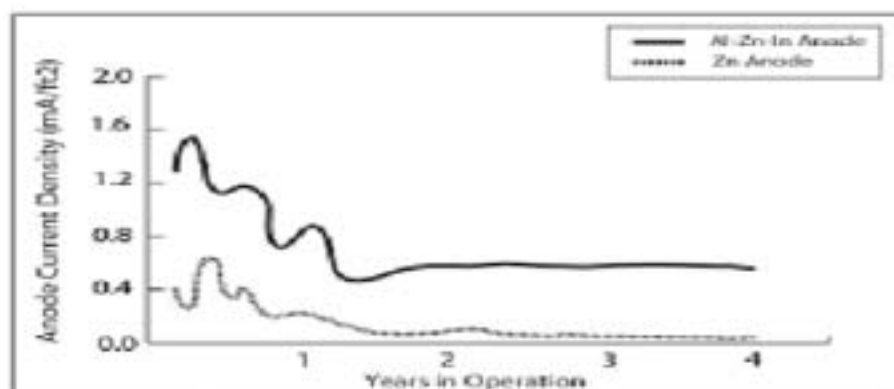


Figure 17 Bryant Patton Bridge, Florida. Performance of Al-Zn-In and Zinc after 4 years.

外加電流式陰極防蝕在橋梁與碼頭案例介紹

李枝河*

摘 要

混凝土中的鋼筋如受到鹽害侵蝕會造成鋼筋腐蝕，鋼筋斷面減少，致使構件強度降低，初期如未發現即時做防蝕處理，最後必須花費昂貴的修復費用或拆除重建，陰極防蝕工法在歐美各國已商業運轉且為認可的技術。在國內已有數個工程案例引用此法，本文將以公路總局北部濱海公路台二線之安和橋、蘇澳港 13 號碼頭及西濱快速道路南勢溪橋的陰極防蝕設計、施工作為案例介紹。

Impressed Current Cathodic Protection Applied to Highway Bridges and Wharf Decks

J. H. Li*

ABSTRACT

Chloride penetrated into reinforced concrete inducing re-bars severe corrosion, reducing section thickness of re-bar and strength of concrete element. Impressed current cathodic protection (ICCP) technique is successfully approved to stop re-bar corrosion in reinforced concrete and it is commercially applied in western countries for many years. In the paper, three cases of applying ICCP lately in Taiwan were introduced and discussed. Two of them were applied to highway bridges and the other one was applied to wharf decks.

* 立偉防蝕工程股份有限公司 董事長

一、前言

鋼筋混凝土為土木工程的重要材料之一，工程設計技術進步雖然有很多橋梁及建築物為了抗震體積減少及重量減輕紛紛以鋼構來取代，但之中還是少不了鋼筋混凝土材料，因為腐蝕的問題產生而使鋼筋混凝土的使用年限縮短，全世界所有國家每年耗在因腐蝕損失的金錢均非常龐大。台灣屬亞熱帶的環境，四面環海高溫潮濕的氣候，更是鋼筋腐蝕的溫床，我們從沿海橋樑及碼頭的調查，可見因鋼筋腐蝕造成混凝土爆裂之嚴重是不容輕忽。不管是沿海或內陸發現的鋼筋腐蝕，其來源均受氯離子含量的影響造成鋼筋氧化還原，從調查發現所有的腐蝕和施工過程均有密切關係，而腐蝕可分為兩種，一種為外在因素，另一種為施工中加入高含氯量細骨材或水，在沿海的橋梁、房屋均因常年受海風夾帶高量氯離子乾溼循環侵蝕，讓鋼筋產生腐蝕、混凝土爆裂，內陸的橋梁房屋多半因國內砂石短缺，少數無知的砂石商以岸邊砂或河口砂取代，使混凝土中氯離子超過規定的臨界值，而 RC 構造物因混凝土的虹吸原理提供鋼筋腐蝕的介質水氣、氧氣，當鋼筋從腐蝕的誘發期進到腐蝕階段，也就是腐蝕生成物的形成使鋼筋握裹力降低，鋼筋腐蝕體積膨脹，鋼筋保護層產生裂縫剝落，同時鋼筋的有效斷面積減少並影響結構物的使用安全，因此工程在設計規劃中必需考量往後的使用維護之便利性與安全性，不應只考量短期施工的成本，雖然國內外均耗費龐大經費以各種不同的方法來研究腐蝕的控制，但不同的環境就應考量不同的方法，才能得到最好的結果及效益。

二、結構物腐蝕行為

結構物腐蝕是一種漸進式的行為，因此建築物橋梁碼頭的劣化均是經年累月侵蝕不被注意，這也是所有主管單位在管理上所面臨的難題。在國內氯離子侵蝕最為嚴重的應屬棧橋式碼頭及公路主管單位的沿海橋梁，為了防止碼頭及橋梁因腐蝕的損失，各單位無不投入大量的經費人力來探討腐蝕成因及對策，在國內交通部運輸研究所港灣技術研究中心為了維護橋梁碼頭的安全營運，並確保運輸系統的暢通，曾委託中華民國防蝕工程學會制定了台灣第一部「港灣結構物陰極防蝕準則（草案）」[1]，可提供未來國內較易受氯含量侵蝕的結構物之設計參考。鋼筋混凝土陰極防蝕工法可分為兩種型態：一為新結構物陰極防蝕，另一為舊有結構物修復。新結構物陰極防蝕是在結構物設計時即將陽極系統設計於施工時安裝於結構體內，它的好處是結構體尚未被氯離子污染前就能使結構物以極小的電流即可維持鋼筋的鈍化狀態，也就是將侵蝕的氯離子隔離在外不會到達鋼筋，使鋼筋免於腐蝕；已

遭受腐蝕的結構物在處理上程序較為繁鎖，費用也較為昂貴，但處理後效果也同樣可保持良好，可見事前的防護可比事後修補節省大筆經費，陰極防蝕最大的優點能使結構物延長設計使用年限及減少大量的修復費用。

2.1 腐蝕與陰極防蝕的原理

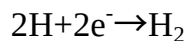
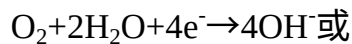
我們知道鐵的腐蝕因氧化還原原理，鐵的腐蝕區域是在孔蝕區或是腐蝕區，而鐵的電位是落在鐵免疫區的上方，如果鐵的電位可以由落在腐蝕區的地方下降到免疫區的話，則鋼筋就不會腐蝕，即使混凝土中性化或含有氯離子，然而大自然中鋼筋的電位是不會自動到免疫區，因此必須借用外力才有辦法使鐵落在免疫區，因此從鐵的電化學反應過程可以清楚說明。

鋼筋腐蝕是一種電化學反應，為了形成電化學反應系統，在鋼筋表面必須要同時有兩種反應。一是放電子的反應，另一是吸電子的反應。

1. 放出電子的反應就是鋼筋中的鐵放出電子，形成鐵離子：



2. 吸收電子的反應，可以是氧還原為氫氧根離子或氫還原：



而這二種反應的快慢（用電流來代表）和鋼筋表面的電位有關係。

2.2 鋼筋混凝土陰極防蝕系統

鋼筋混凝土的陰極防蝕方法分為外加電流及犧牲陽極法兩種：

1. 外加電流方式可分為噴鈦、鈦網、導電塗料及導電性水泥四種，雖然於過去曾發展出導電塗料系統，但混凝土阻抗較大系統通電啟動後在很短的時間內塗料開始劣化，因此不建議採導電塗料系統，陰極防蝕的電源可運用太陽能或電池、也可用台電 AC 電源，可依環境場地做選擇。
2. 犧牲陽極方式可分為噴鋁、噴鋅、鋅網或鋅塊或融射，犧牲陽極法的好處是不必依賴電源，萬一有施工錯誤對結構體不會造成影響，缺點是壽命較短到期必須重安裝或噴塗。

2.2.1. 外加電流法

外加電流法和犧牲陽極法不同，外加電流法的電流不是來自陽極腐蝕而

是交流電流整流成的直流電流而來，電流經由直流電源供應器透過陽極而到達鋼筋的表面（如圖 1、圖 2）。地下或水中鋼鐵或混凝土的結構物，如碼頭的鋼版樁防蝕，由於其環境電阻較小，所以犧牲陽極也可以使用。但是在地面以上的鋼筋混凝土陰極防蝕就必須使用外加電流法。

1. 為了使保護電流由直流電源供應器供應到鋼筋表面，系統要如圖(1)方式安排。圖(1)中顯示電流由直流電源供應器的正極,通過導線到達陽極，再由陽極透過混凝土到達鋼筋，而由鋼筋匯集經過導線回到電源供應器的負極，如此形成一個迴路，保護電流就可以供應到鋼筋表面了。由圖(1)可知陰極防蝕系統至少有以下幾種組件：

- (1)直流電源供應器
- (2)陽極
- (3)導電介質(混凝土)
- (4)鋼筋
- (5)電線
- (6)控制系統(偵測系統)

2. 陽極種類：

混凝土的高電阻使得電源供應器傳送到一般陽極的電流無法很均勻的分佈在混凝土各部份，再傳到鋼筋。因此，鋼筋混凝土陰極防蝕必須要使用較特殊的材料。自從 1973 年以來，已有多種陽極材料開發出來及成功運用。這些材料包括：

- (1)鈦網
- (2)導電性塗料
- (3)導電性水泥
- (4)導電橡膠
- (5)其他

為了改善混凝土的導電性，這些系統的陽極材料都有第一次陽極和第二次陽極，第一次陽極主要功能是傳送來自電源供應器的電流到第二次陽極。第二次陽極的作用則是將第一次陽極上的電流均勻分佈到混凝土上。

3. 鈦網系統：

鈦網系統的第一次陽極材料使用鈦條，而第二次陽極材料則採用表面塗佈

含有氧化鈦的鈦網。表面塗佈氧化鈦和其他氧化物的鈦網有下面幾項特色：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攻擊。第三是此一材料使用壽命相當長。在實驗室的加速試驗數據顯示此一材料可使用 $7500\text{A}\cdot\text{hr}/\text{m}^2$ ，若以設計電流 $10\sim 100\text{mA}/\text{m}^2$ 計算可使用大約 $68200\sim 750000$ 小時，換算成 $8\sim 85$ 年之間。此種陽極材料安裝方式是用塑膠釘固定鈦網於混凝土表面，為了防止電流供應不均勻，至少要有 10mm 的保護層，最好是 15mm 以上的保護層。鈦網固定好之後，在鈦網上方再噴上或塗佈一層 10mm 左右的覆蓋層。

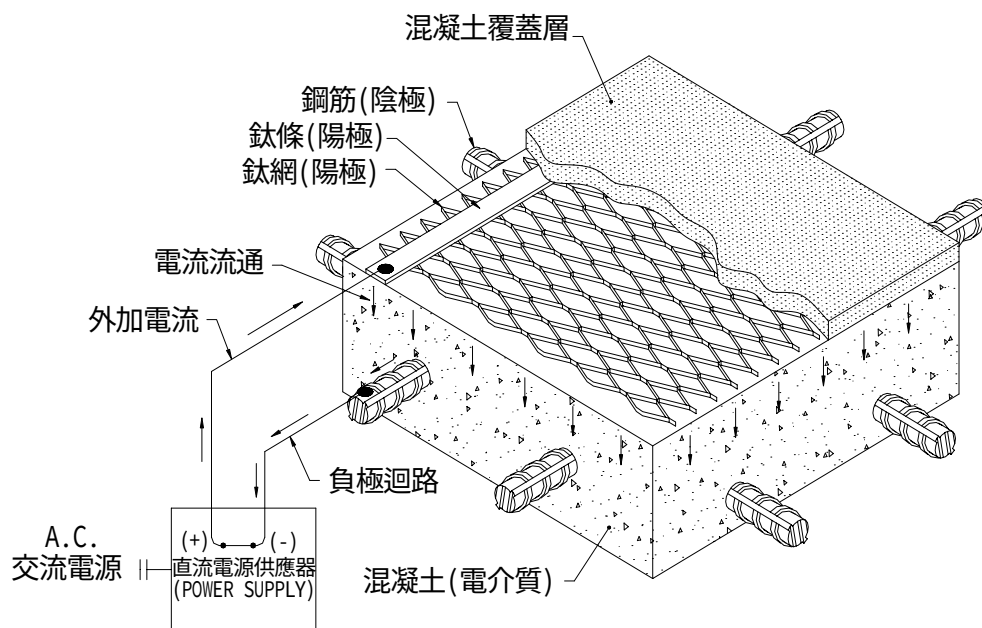


圖 1 陰極防蝕原理示意圖（外加電流網狀鈦網）

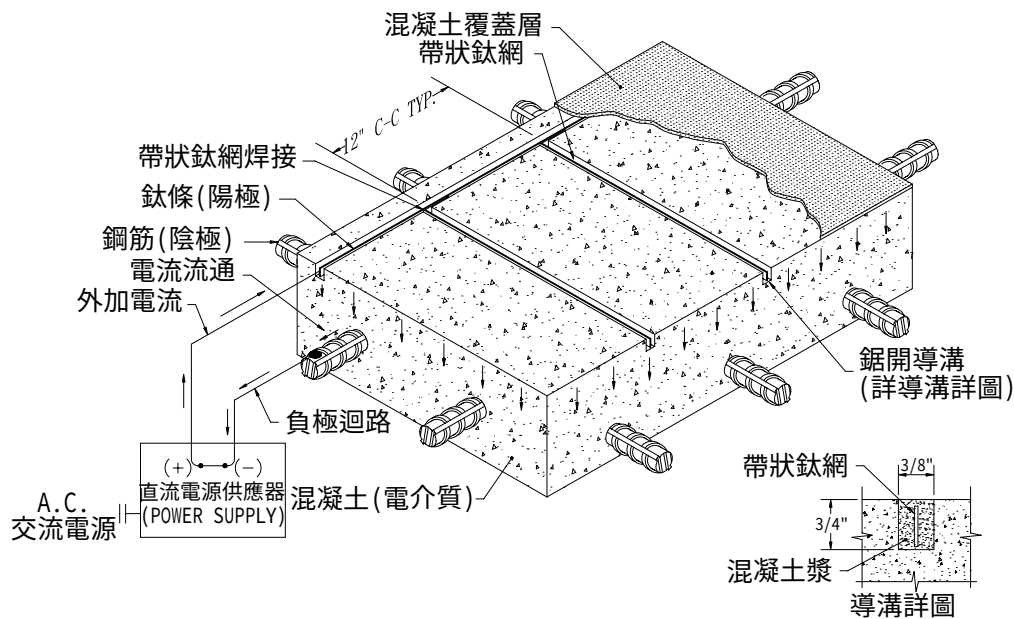


圖 2 陰極防蝕原理示意圖（外加電流帶狀鈦網）

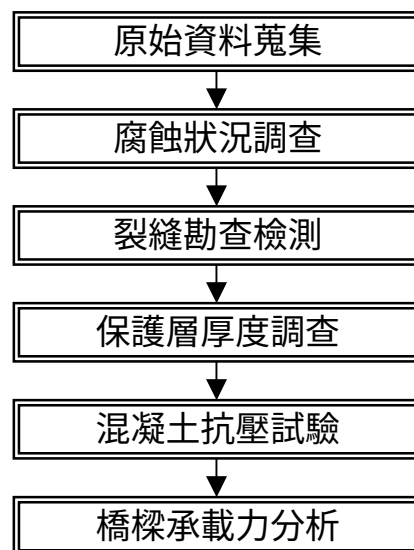
三、陰極防蝕工法的應用

本次的陰極防蝕工法介紹分為應用於新結構物和舊結構物兩種，此兩種的設計和考量有所不同，保護電流設計也有不同，舊結構物必須詳加檢測評估，新結構物只要就所處環境及原設計鋼筋量考量即可。

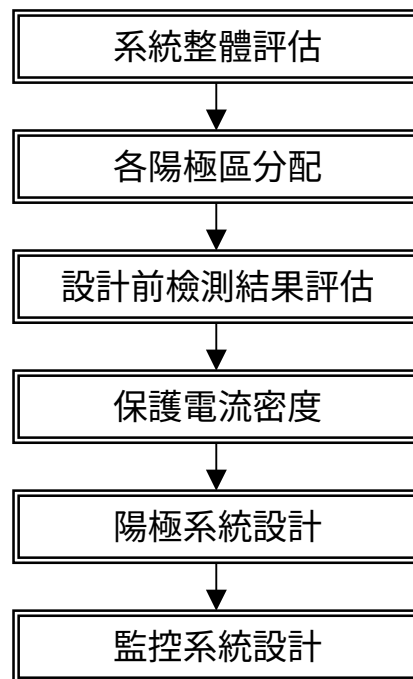
3.1 舊結構物陰極防蝕

陰極防蝕系統能否成功在每個介面必須環環相扣

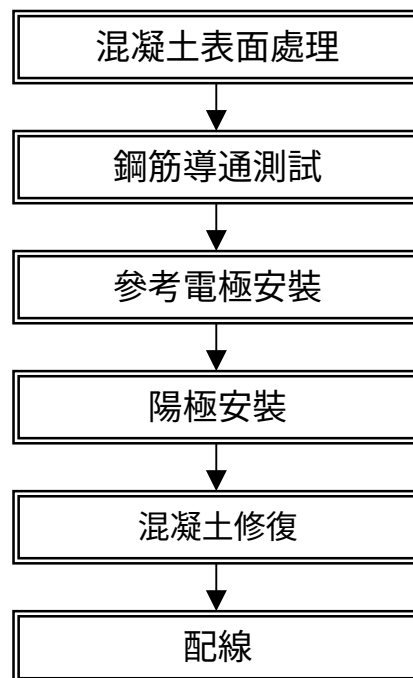
1. 現場調查：



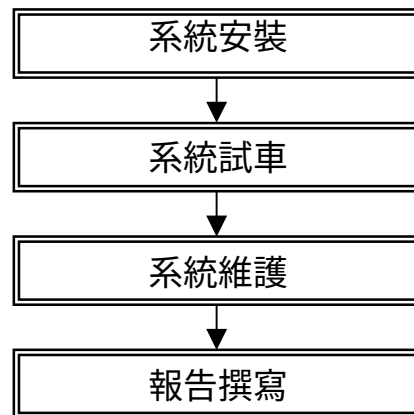
2. 陰極防蝕設計：



3. 陽極系統施工：



4. 陰極防蝕系統檢查：



5. 材料規格標準

陰極防蝕的材料選擇相當重要，材料的規格、品質與整個陰極防蝕系統的運作與成效息息相關，建議根據以下列的規格做為設計規範：

表 1 網狀鈦網

項 目	規 格
110mA/m ² 之電流率	18.8mA/m ² 以上
使用壽命 (依據美國國家防蝕工程協會 NACE TM0294-94 標準測試)	陽極在最大電流量下使用年限 75 年以上
混凝土介面陽極最大電流密度	長期電流電流限制：110 mA/m ² 瞬間最大電流限制：220 mA/m ²
寬度	1.14m 以上
厚度	1.415mm 以上
菱形網股尺寸	34mm× 76mm× 0.64mm 以下
每 M ² 陽極實際表面積	0.17m ² /m ² 以上
陽極電阻	0.39ohm/m 以下
陽極表層觸媒劑	銱(Iridium)(混合金屬氧化物)
陽極成分	鈦，ASTM B265 級數 1
熱膨脹係數	8.7× 10 ⁻⁵ /°k (0.0000048/in/in/°k)以下
20°C 時之熱導電率	15.6W/m ² -°k (9.0 BTU/hr/ft ² /°F/ft)以上
電阻	0.000056 ohm-cm (0.000022 ohm-in)以下
彈性係數	105GPa (14,900,000 PSI)以上
抗拉拔力	245MPa (35,000 PSI)以上
抗拉降伏	175Mpa (25,000 PSI)以上
伸長量	24%以上

表 2 帶狀鈦網

項 目	規 格
110mA/m ² (10mA/ft ²)之電流率	3.5mA/m (1.05mA/ft)以上
使用壽命 (依據美國國家防蝕工程協會 NACE TM0294-94 標準測試)	陽極在最大電流量下使用年限 75 年以上
混凝土介面陽極最大電流密度	長期電流電流限制：110 mA/m ² (10mA/ft ²) 瞬間最大電流限制：220 mA/m ² (20mA/ft ²)
寬度	13mm 以上
厚度	1.3mm 以上
菱形網股尺寸	2.5mm× 4.6mm× 0.6mm 以下
陽極每 M 長度之實際面積	0.032m ² /m (0.105ft ² /ft)以上
陽極電阻	0.39ohm/m 以下
陽極表層觸媒劑	銱(Iridium)(混合金屬氧化物)
陽極成分	鈦，ASTM B265 級數 1
熱膨脹係數	8.7× 10 ⁻⁵ / 0 k (0.0000048/in/in/ 0 k)以下
200C 時之熱導電率	15.6W/m ² -0 k (9.0 BTU/hr/ft ² / 0 F/ft)以上
電阻	0.000056 ohm-cm (0.000022 ohm-in)以下
彈性係數	105GPa (14,900,000 PSI)以上
抗拉拔力	245MPa (35,000 PSI)以上
抗拉降伏	175Mpa (25,000 PSI)以上
伸長量	24%以上

表 3 鈦條

項 目	規 格
寬度	12.5mm 以上
厚度	0.9mm 以上
陽極基材	Grade 1 Titanium
電阻值	0.05ohm/m 以下

註：製造廠商必須提供相關文件證明。

表 4 修補水泥

項 目	規 格
水泥成分	不得有絕緣及金屬之材質
骨材粒徑	1.一般修補及鈦網覆蓋層之水泥：最大骨材粒徑不得超過 3mm。 2.帶狀鈦網所使用之修補水泥：最大骨材粒徑應小於 1mm。
抗壓強度	28 天的抗壓強度大於 450KG/cm ² ASTM C109 試體尺寸 2"x2"x2"
抗彎強度	28 天的抗壓強度大於 800 psi
電阻值	10 kohm/cm 以下

註：1.修補水泥之製造廠商必須提供相關文件證明。

2.抗壓及抗彎強度試驗須由現場直接取樣，於合格實驗室試壓。

3.2 新建結構物陰極防蝕

新建鋼筋混凝土結構陰極防蝕系統材料包括陽極系統、鈦條、參考電極、電纜線、導管、電源供應器等，不需像舊結構物陰極防蝕系統做施工前置作業如現場檢測評估、鑿除修補或植筋等繁瑣工作（如圖 3），費用相對為節省。陰極防蝕原理是藉由陽極提供以低伏的直流電流到鋼筋，以防止鋼筋腐蝕。

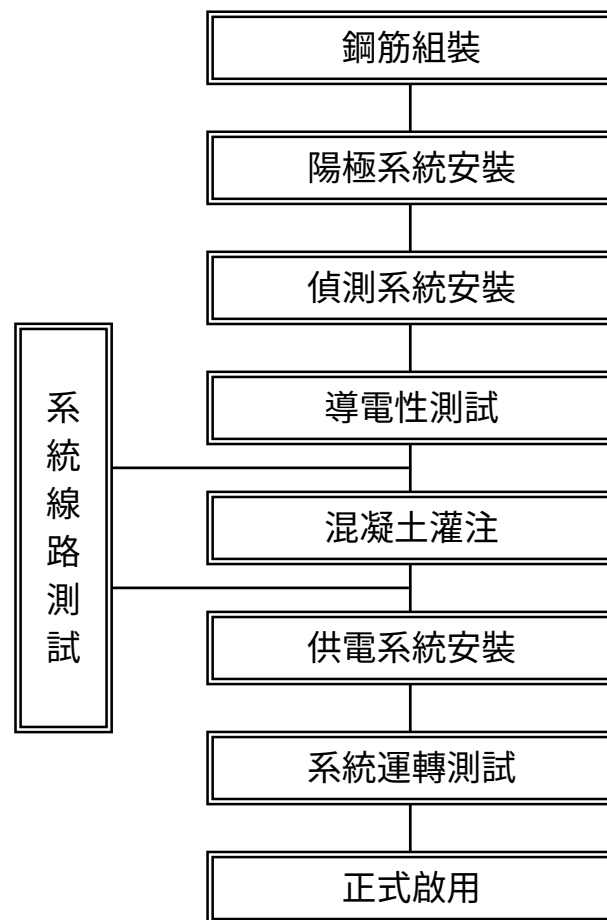


圖 3 新建結構物陰極防蝕系統施工流程

1. 陽極系統安裝

陽極系統包含帶狀鈦網及網狀鈦網，帶狀鈦網安裝必須注意不得與鋼筋接觸，並且根據施工說明安裝。帶狀鈦網與鋼筋間的間隔最少必須大於 10mm，以避免與鋼筋產生接觸，帶狀鈦網必須用鋼筋固定夾及紮線帶牢固的固定在鋼筋上，灌漿時才不會造成陽極移動或接觸到結構鋼筋配置的任何一個部位（如圖 7）。鈦條是提供電流給帶狀鈦網陽極，使電導通。

2. 偵測系統安裝

偵測系統包含參考電極、工作電極及正極負極。參考電極為固態銀/氯化銀(Ag/AgCl)參考電極，可做電位之量測藉以了解保護之效果（如圖 8、圖 9）。

3. 導電性測試

為確保陰極防蝕系統的操作成功，安裝人員必須確定陽極區內所有的鋼筋是互相導通的。

4. 混凝土灌注前後系統線路測試

(1)陰極防蝕系統負極及工作電極測試：

在負極及工作電極安裝後應實施導電性測試，在同一區內系統負極及工作電極之間測試程序要依「鋼筋導電性測試」之建議來做測試。

(2)檢查與測試參考電極：

為確保數據的準確性，參考電極在安裝之前必須先行校正。在參考電極安裝完成及灌漿後每一參考電極的電位都必須要量測及記錄。

(3)陽極與鋼筋絕緣測試：

在每一區陽極安裝完後，必須做絕緣測試以確保陽極與鋼筋沒有接觸。

5. 供電系統安裝

供電系統安裝工程包含了導管、接線盒及電源供應器的安裝

(1)導管與接線盒:導管與接線盒須使用非金屬材質，曝露的導管必須用非金屬的掛勾或吊環固定。

(2)電源供應器(整流器)：電源供應器是用來轉換交流電成為直流電的一種設備。在陰極防蝕系統中，用來控制每一區的電壓或電流。電源供應器必須安裝在適當的位置，若電源供應器裝在混凝土的基座，必須依據設計工程師的建議指示安裝。

6. 系統運轉測試

在混凝土經過適當的養護期間後 (至少 28 天)，才能進行陰極防蝕系統運轉測試，運轉測試必須由陰極防蝕工程師依下列的測試來啟動。

(1)藉由埋藏在結構物的參考電極量測並記錄鋼筋與混凝土之間的原始電位。

(2)微量增加保護電流的輸出，觀察鋼筋電位極化方向是否正確。

(3)在陰極防蝕系統尚未啟動前依序開啟每一區的電源供應器並依照下列步驟進行測試。

- (4)調整電源供應器之電流量，直到能給每一陽極區域平均電密度達到 1 mA/m^2 為止。
- (5)通電後觀察記錄鋼筋的電位變化，若鋼筋電位上升不足 100 至 200mv，必須再調整增加足夠的保護電流。
- (6)所有的陽極區域依照上述步驟開啟電源供應器後，陰極防蝕工程師必需完成所有的相關測試。
- (7)當上述要求均已達到標準並作成記錄後，則這個系統可以開始正常運轉。
- (8)再經過 28 天運轉後，重新量測鋼筋電位及瞬間斷電電位，最後再作四小時去極化試驗來確定保護效果。
- (9)根據 NACE 的去極化測試標準^[2]，每一系統至少必須有 100mv 以上的變化才算具有足夠的保護。
- (10)若未達去極化測試標準時，則必須在增加電流輸出，並且重覆上述的去極化測試，直到通過為止。

四、陰極防蝕工法的案例介紹

陰極防蝕工法應用於新舊結構物之案例，在台灣已有相當多件，本節將以國內北部安和橋、蘇澳港 13 碼頭及西濱南勢溪橋為實例，來分析陰極防蝕系統的運作與成效，分述如下。

4.1 安和橋陰極防蝕安裝介紹

安和橋位於台二線濱海公路 87 公里處是政府當年十大建設所興建，曾於民國 82 年 8 月再次擴建為雙向各含二個車道之 RC 橋，為北部濱海公路基隆通往宜蘭主要橋梁之一，公路局為解決濱海橋梁嚴重腐蝕問題，特委外施做防蝕處理的個案，本公司受託後針對該橋進行檢測，發現氯離子含量高達 9kg/m^3 ，且鋼筋腐蝕速率檢測呈現中度及高度腐蝕。從檢測報告中可知其氯離子含量已相當高，且腐蝕速率檢測結果顯示，混凝土中鋼筋已產生中度或高度腐蝕反應現象。陰極防蝕法為抑制鋼筋混凝土腐蝕之有效方法，本橋樑之防蝕對策即選用陰極防蝕技術來抑制鋼筋混凝土進一步惡化。

由於本橋梁為舊橋擴建之橋梁，陰極防蝕設計範圍為靠海側之舊橋，本案參考「台二線安和橋銹蝕檢測工程報告」^[3]之檢測結果加以評估防蝕需求，以下就各檢測評估結果分述如下：

1. 混凝土中鋼筋腐蝕速率偵測結果評估腐蝕程度顯示，未剝落處靠海側之橋面版、主樑及橋墩、橋台之腐蝕速率比另一側來得高，由檢測結果可得之。這顯示被海風侵蝕環境下的鋼筋正快速腐蝕，必需抑制。因此本設計案之陰極防蝕範圍為靠海側原橋結構部份之橋面版、主梁、橫隔梁及地面以上之橋墩、橋台。
2. 安和橋所需陰極防蝕保護之混凝土總表面積約 388M^2 。考量各部位之鋼筋表面積密度不一致，亦考量保護電流需求量及裝置設備易於維護等因素，陰極防蝕系統採用分區保護，共分成四個陽極區，陽極採網狀鈦網系統（如照片一、照片二）。



照片一 重新植筋



照片二 陽極安裝

3. 運轉數據分析

本案自 86 年 9 月正式啟動運轉，經過六年的運轉及維護，從歷年的電位紀錄表（如表 5），便可得知陰極防蝕系統在安和橋上的運作成效及保護效果良好。

表 5 安和橋 CP 完工後之電位量測紀錄

日期	陽極分區 保護電位單位：mV								
	一區 R1	一區 R2	一區 R3	二區 R1	二區 R2	三區 R1	三區 R2	四區 R1	四區 R2
86.09.07 原始電位	-115	-113	-67	-171	-124	-130	-141	-261	-211
86.09.17	-455	-356	-381	-316	-432	-434	-212	-608	-863
90.12.17	-502	-312	-519	-483	-559	-488	-420	-633	-571
91.06.14	-568	-311	-745	-501	-617	-506	-505	-588	-698
91.12.17	-598	-331	-735	-524	-624	-527	-519	-593	-675
92.06.24	-589	-317	-685	-458	-330	-630	-391	-499	-638
92.12.01	-520	-331	-532	-434	-324	-587	-419	-490	-595

4.2 蘇澳港 13 號碼頭面版陰極防蝕安裝介紹

蘇澳港是政府為促進東部經濟繁榮，減少基隆港船隻壅塞，並節省東部運輸成本而開闢，也是當初十大建設考量的一大因素，十三號碼頭經年使用，整個棧橋底板經氯離子侵蝕，造成混凝土內鋼筋嚴重腐蝕（如照片三），從腐蝕的現況我們應可以發現，蘇澳港在設計時，並未將鋼筋腐蝕混凝土劣化當成嚴重的課題來設計，以致今天養護單位必須花費龐大的維修費用做維修，新建或養護單位都知道碼頭在服務期間為達成安全使用之目標必須符合四個重點：

- (1) 規劃設計安全、經濟達到使用需求
- (2) 施工應達到規定之品質
- (3) 使用載重應符合規定

(4) 平常應有良好之維修

雖然設計、施工及養護單位均了解以上各階段的重要性，但碼頭完工開放營運，要進行維修有他的困難度。



照片三 鋼筋腐蝕，混凝土剝離

4.2.1 工作範圍及內容

本案的工作範圍為蘇澳港十三號碼頭 0K+14~0K+155 間兩個區塊進行檢測和陰極防蝕施工（如圖 4），全部工程包含：

1. 碼頭設計、竣工圖及結構計算書蒐集
2. 使用材料選擇
3. 全面目視檢測
4. 混凝土鑽心取樣、氯含量檢測
5. 承載能力評估
6. 陰極防蝕設計、安裝

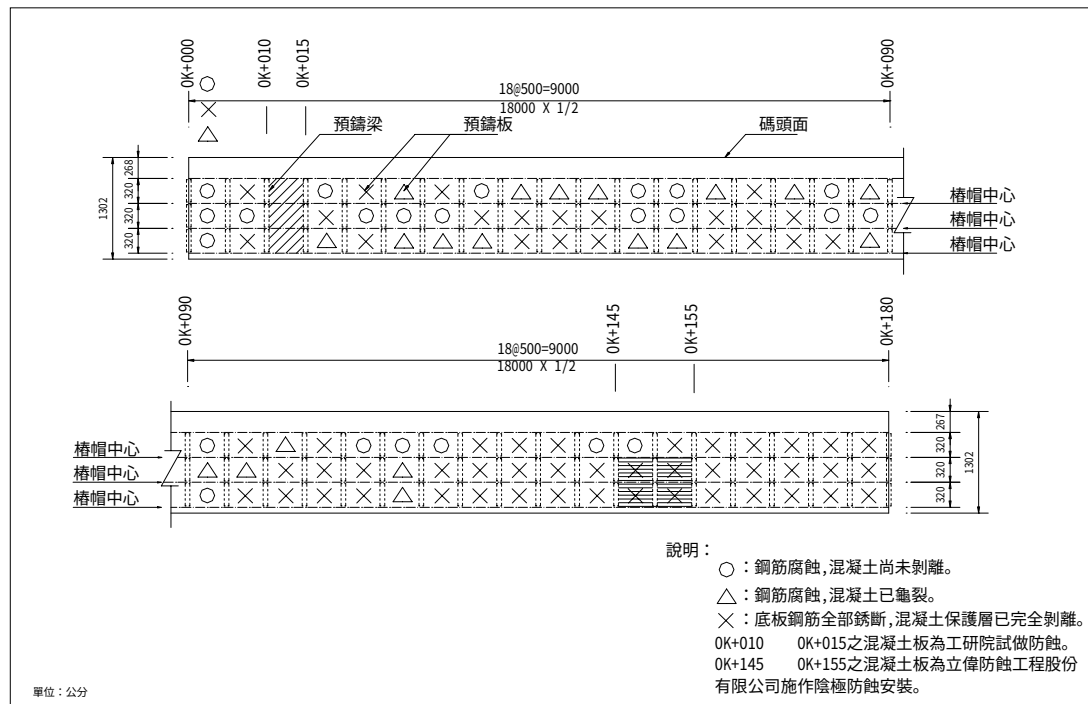


圖 4 碼頭陰極防蝕系統安裝的位置示意圖

4.2.2 原始資料蒐集

蘇澳港完工年代已久，只能從竣工報告找到結構圖，結構計算書、設計資料，施工檔案已無法找到。

4.2.3 使用材料

本案為棧橋式碼頭的鋼筋混凝土陰極防蝕修復，為了使電流均勻分布及耐久性考量，我們選擇帶狀鈦網當陽極（如照片四），偵測系統以固態銀/氯化銀當偵測電極。

4.2.4 施工前全面目視檢測

陰極防蝕施工前對結構物檢測，是必須進行的重要步驟，十三號碼頭施工位置是碼頭底板，因此必須搭架才能進行檢測施工（如照片五、照片六），而在海上搭架必須不影響船隻靠岸運作，更要考量潮差的運行，從檢測照片中可看到底版下層鋼筋已完全腐蝕銹斷（如照片七）。



照片四 陽極帶狀鈦網照片



照片五 搭架(1)



照片六 搭架(2)



照片七 鋼筋腐蝕銹斷

4.2.5 混凝土鑽心取樣

混凝土鑽心取樣是為了解當混凝土受氯離子侵蝕中性化後，混凝土的抗壓強度，並可借此了解當初的設計強度，如果混凝土本身抗壓強度太低進行修復並沒有實質意義，氯含量檢測是要了解氯離子侵蝕深度，含量及分布情形，混凝土中性化，也可稱為碳化（如照片八、照片九及表 6、表 7）。



照片八 鑽心取樣照片



照片九 鑽心試體照片

表 6 混凝土氯含量

取樣深度 cm	濃度 kg/m^3	備 註
0.0~1.5	7.13	假設混凝土單位重 2350 kg/m^3
1.5~3.0	11.11	
3.0~4.0	8.50	
4.0~6.0	0.69	
6.0~7.0	2.14	

表 7 取樣試體強度

試樣編號	試體直徑 (cm)	荷重 (KN)	抗壓強度 (kg/cm ²)
01-1	5.5	84	361
01-2	5.5	78	335
02	5.5	52	223
03-1	5.5	85.6	368
03-2	5.5	89.6	385

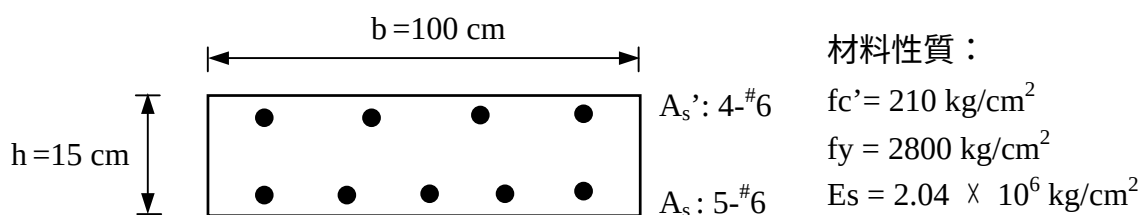
4.2.6 承載能力

從目視檢測中，碼頭面版底層鋼筋已嚴重銹蝕，完全沒有握裹能力，因此特別對兩塊施工面版分別計算跨徑中央當底層剩餘鋼筋量為原鋼筋量的 20% 及 0% 時，對應之剩餘彎矩強度。

經分析後可知，當面版底層鋼筋銹蝕至原有鋼筋量的 20% 時，其彎矩強度降低至原彎矩強度的 28%，若底層鋼筋腐蝕至斷裂時，分析時將不考慮底層鋼筋量，其彎矩強度僅由混凝土及頂層鋼筋(原壓力鋼筋)來提供，其大小為原彎矩強度的 10%。

因此，為恢復構件原有強度，在進行陰極防蝕系統安裝前，將先進行植筋作業，植筋數量以恢復面版底層原有鋼筋量為目標。

(一)原有彎矩強度計算



(1)求 a

$$C_c = 0.85 f_c' b a = 17850 a \text{ kg}$$

$$T_c = A_s' f_s = 4 \times 2.865 \times \left(\frac{\frac{a}{0.85} - 2.5}{\frac{a}{0.85}} \cdot 0.003 \cdot 2.04 \times 10^6 \right)$$

$$= 70135 \frac{a - 2.125}{a} \text{ kg}$$

$$T_s = A_s f_y = 5 \times 2.865 \times 2800 = 40110 \text{ kg}$$

$$\Sigma F = 0 \rightarrow C_c + T_c = T_s$$

$$17850a + 70135 \frac{a - 2.125}{a} = 40110$$

$$a = 2.17 \text{ cm}$$

(2)檢核拉力筋是否降伏

$$x = \frac{a}{0.85} = 2.55 \text{ cm}$$

$$\varepsilon_s = \frac{d - x}{x} 0.003 = \frac{15 - 2.5 - 2.55}{2.55} 0.003 = 0.012 > \frac{f_y}{E_s} = 0.0014$$

→O.K. !

(3)求 M_u

$$M_u = C_c \cdot (d - \frac{a}{2}) + T_s \cdot (d - d')$$

$$= 17850 \cdot 2.17 \cdot (12.5 - \frac{2.17}{2}) + 70135 \cdot \frac{2.17 - 2.125}{2.125} \cdot (12.5 - 2.5)$$

$$= 456698 \text{ kg-m}$$

$$= 4.57 \text{ t-m}$$

(二)底層鋼筋腐蝕至原有鋼筋 20%之彎矩強度計算

(1)求 a

$$C_c = 0.85 f_c' b a = 17850a \text{ kg}$$

$$T_c = A_s' f_s = 4 \times 2.865 \times (\frac{\frac{a}{0.85} - 2.5}{\frac{a}{0.85}} \cdot 0.003 \cdot 2.04 \times 10^6)$$

$$= 70135 \frac{a - 2.125}{a} \text{ kg}$$

$$T_s = A_s f_y = 0.2 \times 5 \times 2.865 \times 2800 = 8022 \text{ kg}$$

$$\Sigma F = 0 \rightarrow C_c + T_c = T_s$$

$$17850a + 70135 \frac{a - 2.125}{a} = 8022$$

$$a = 1.63 \text{ cm} \quad \leftarrow \text{原壓力筋受拉}$$

(2)求 M_u

$$\begin{aligned}M_u &= T_s \cdot \left(d - \frac{a}{2}\right) + T_c \cdot \left(d' - \frac{a}{2}\right) \\&= 8022 \cdot \left(12.5 - \frac{1.63}{2}\right) + 70135 \cdot \frac{2.15 - 1.63}{1.63} \cdot \left(2.5 - \frac{1.63}{2}\right) \\&= 129625 \text{ kg-m} \\&= 1.3 \text{ t-m}\end{aligned}$$

為原有彎矩強度的 28%

(三)底層鋼筋腐蝕至原有鋼筋 0%(不考慮底層鋼筋)之彎矩強度計算

(1) 求 a

$$\begin{aligned}C_c &= 0.85 f'_c b a = 17850 a \text{ kg} \\T_c &= A_s' f_s = 4 \times 2.865 \times \left(\frac{2.5 - \frac{a}{0.85}}{0.85} \cdot 0.003 \cdot 2.04 \times 10^6\right) \\&= 70135 \frac{2.125 - a}{a} \text{ kg} \quad \leftarrow \text{原壓力筋受拉} \\\Sigma F &= 0 \rightarrow C_c = T_c \\17850 a &= 70135 \frac{a - 2.125}{a} \\a &= 1.53 \text{ cm} \quad \leftarrow \text{原壓力筋受拉}\end{aligned}$$

(2) 求 M_u

$$\begin{aligned}M_u &= T_c \cdot \left(d' - \frac{a}{2}\right) \\&= 17850 \cdot 1.53 \cdot \left(2.5 - \frac{1.53}{2}\right) \\&= 47384 \text{ kg-m} \\&= 0.47 \text{ t-m}\end{aligned}$$

為原有彎矩強度的 10%

4.2.7 設計安裝

本案原規劃以網狀陽極施工，因剝離混凝土鑿除後（如照片十），發現下層鋼筋已完全銹蝕，須全面重新植筋（如照片十一、十二、十三及十四），將陽極變更改為帶狀陽極，陰極防蝕設計會因不同環境有所調整，鋼筋混凝土陰極防蝕工法在國外已進行將近二十年，在國內也有十年的歷史，已邁向

商業成長和技術發展階段，而且 NACE 及國內港灣研究中心都已制定準則，所有的設計、檢查修復安裝、試車、運轉均有一套標準。



照片十 混凝土鑿除



照片十一 鋼筋重新植筋



照片十二 鋼筋植筋原設計鋼筋回復



照片十三 噴漿



照片十四 噴漿完成

4.3 南勢溪新建工程陰極防蝕設計介紹

西部濱海快速公路中部路段 WH33-3 標工程，於 STA.126K+129 126K+759 段（如圖 5），橋梁跨越通霄溪（南勢溪），經規劃設計為大跨徑之預力混凝土箱型梁橋，橋梁所在位置為苗栗起伏丘陵台地邊緣濱海平原沖積層之河川地，橋位於南勢溪出海口，屬於潮汐變化之感潮河段。茲考量橋梁之墩柱結構位於感潮河域，受潮汐水位影響，鋼筋混凝土結構因海水乾、濕循環作用，長期可能發生結構腐蝕，決定採陰極防蝕工法，以確保墩柱結構物之耐久與安全。陰極防蝕應用於鋼筋混凝土橋梁結構之防蝕技術，經歐美、加、日等國家多年的採用經驗及研究成果，業已肯定為防蝕效能極佳之工法，近十年來，國內雖已開始進行研究與施作，但因完工年代尚短，且國內尚未制定標準規範，目前只有港研中心的準則可參考，設計施工大多引用國外經驗與規範；基於本工程為公路總局首次在濱海公路新建橋梁採用陰極防蝕工法，而工程師對於本工法之了解與認知不多，為增進工程人員對本工法之了解，特別建議以本工程為案例，針對鋼筋混凝土結構物陰極防蝕工法之設計（如圖 6、7、8、9）、施工、操作、維護等要項，提供技術移轉及教育訓練，以便落實本工法，並加速推展及研究。

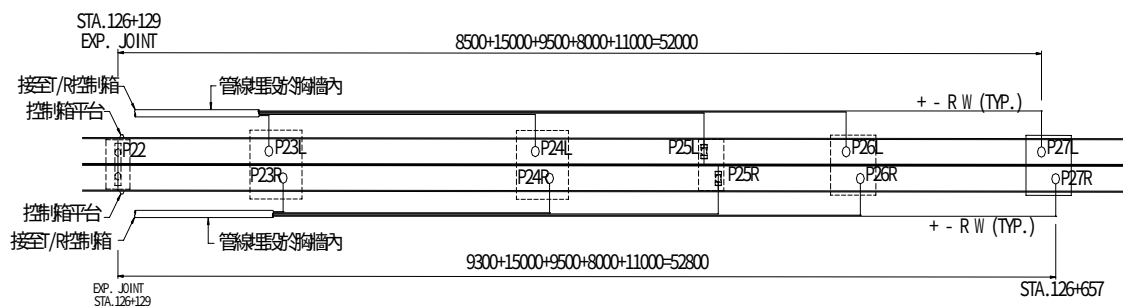
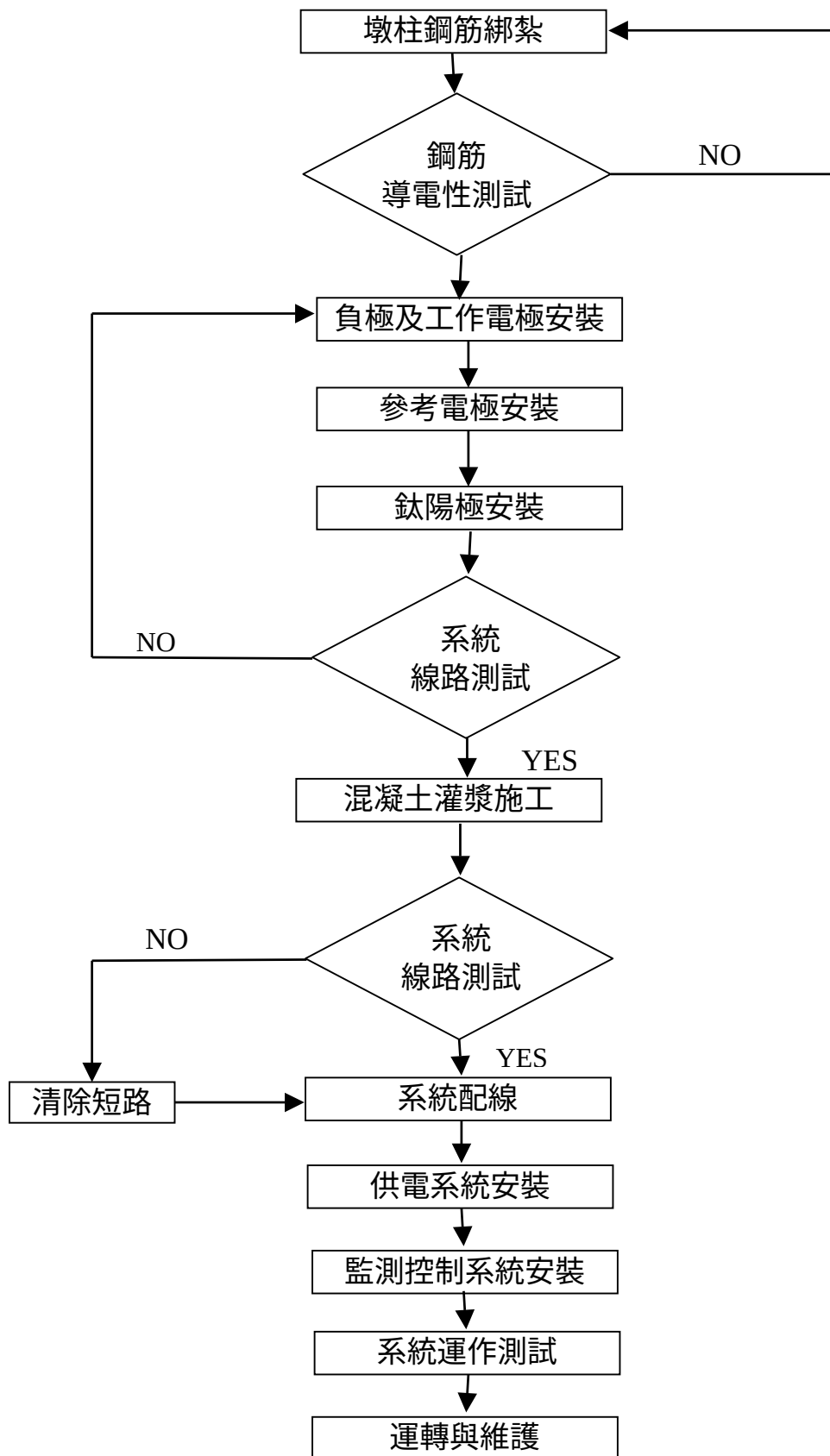


圖 5 南勢溪陰極防蝕線路配置平面示意圖

4.3.1 施工作業流程

本陰極防蝕設計之施工需配合墩柱鋼筋混凝土之施作一併作業，其作業流程如下：



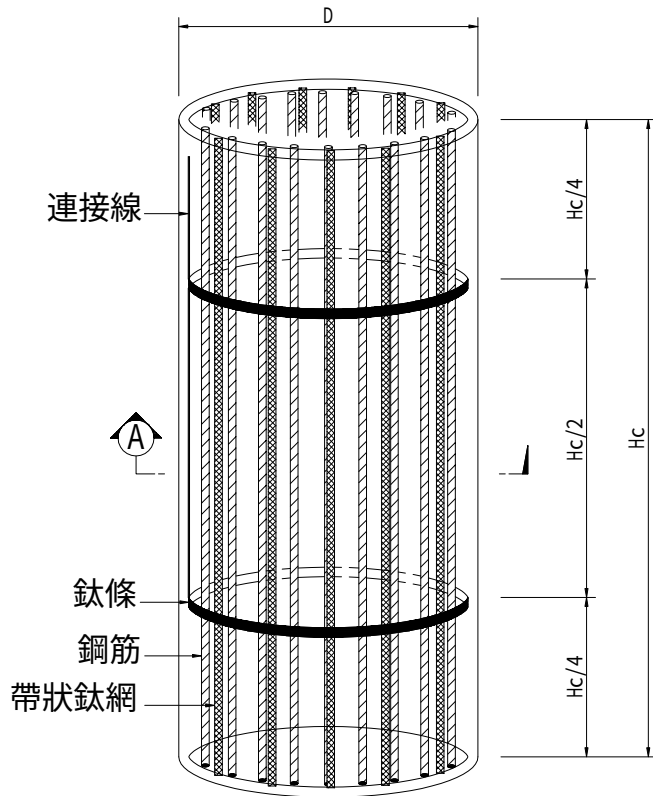


圖 6 南勢溪橋墩柱陽極安裝配置示意圖

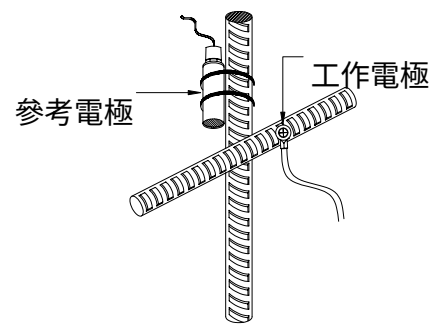


圖 8 偵測系統安裝示意圖

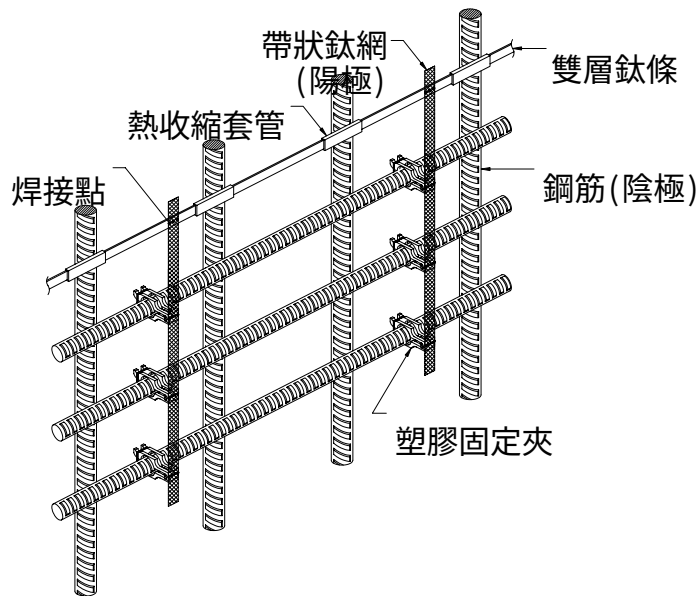


圖 7 陽極安裝示意圖

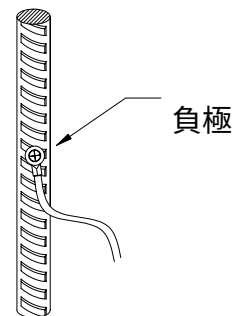


圖 9 負極安裝示意圖

4.3.2 嘉義縣政府贊貓溝溪橋陰極防蝕施工案例（如照片十五、十六、十七、十八）：



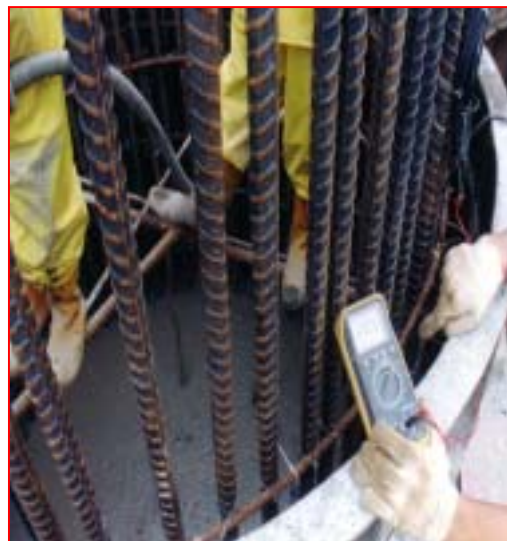
照片十五 帶狀鈦網以鋼筋固定夾安裝



照片十六 參考電極及工作電極安裝



照片十七 鈦條焊接

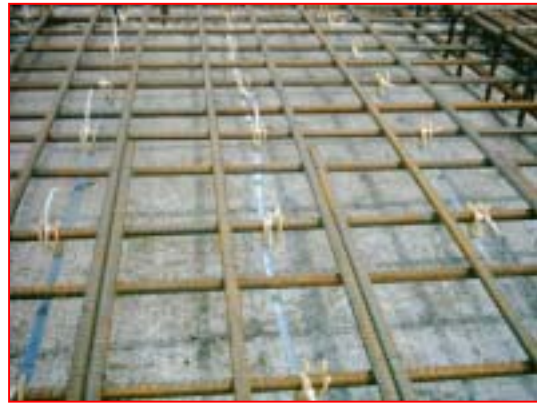


照片十八 灌漿中絕緣測試

4.3.3 高雄港 52 號碼頭陰極防蝕施工案例 (如照片十九、二十、二一、二二)：



照片十九 帶狀鈦網安裝



照片二十 帶狀鈦網安裝完成



照片二一 參考電極及工作電極安裝



照片二二 灌漿

五、結論

鋼筋混凝土陰極防蝕技術在台灣尚屬萌芽階段，陰極防蝕技術在國外已成熟商業運轉，在台灣橋梁及建築物也已有十年歷史，雖然有十年歷史，對部份土木工程師而言似乎還沒有辦法完全接受，有待同業進一步努力推展，陰極防蝕工法抑制鹽害侵蝕是經美國聯邦公路管理局.F.H.W.A 證實能有效抑制橋面版鋼筋腐蝕的方法，其耐久性也比其他工法耐用年限長，我們在十年之中設計完成三十個個案，已完工的有二十四個案例約 24000m²，經多年的維護持續觀察結果，均能達到設計要求，也希望在產官學界的督促下，能訂定標準作業流程及規範，以利工法順利推展，保護沿海的構造物不再受損。

參考文獻

1. 交通部運輸研究所港灣技術研究中心，「港灣結構物陰極防蝕準則（草案）」研究期末報告，民國 90 年。
2. NACE Standard PR0290-2000, Item No. 21043, NACE International.
3. 交通處公路局第一工程處，「台二線安和橋銹蝕檢測工程報告」，立偉防蝕工程股份有限公司，民國 85 年。

港灣鋼構碼頭腐蝕檢測與陰極防蝕成效探討

柯正龍*

摘 要

鋼板（管）樁被廣泛應用於港灣碼頭工程，但因容易發生腐蝕，必須採取適當防蝕措施，方能確保碼頭營運安全及延長構造物使用年限，本文將以國內主要商港之鋼構碼頭之檢測結果為例，探討鋼樁碼頭腐蝕檢測與陰極防蝕成效。

The Investigation of Corrosion Situations and Performance of Cathodic Protection for Wharf Steel Piles

Jeng-Long Ko*

ABSTRACT

Steel piles were extended applied at harbor wharfs engineering, but they were easily corroded and must use anti-corrosion methods to protect steel structures and assured operation safety and extending the life of facilities. In the study, steel piles of wharf at commercial ports were under surveyed through field investigations and their cathodic protections performance were also evaluated.

*交通部運輸研究所港灣技術研究中心 副研究員

一、前言

港灣鋼構碼頭建造材料主要有鋼板樁及鋼管樁兩種，其適用碼頭型式及地質條件如表 1 所示。由於鋼板（管）樁碼頭具有施工設備簡單、施工期短，工程費用少、結構體較富彈性、耐震性強、不需要水下基礎工程…等優點，在港灣工程中廣受應用，然而其最大的缺點為容易發生腐蝕。

腐蝕為鐵回歸其自然氧化狀態的過程，金屬元素大多數以礦石（氧化物）等自然狀態存在，經冶煉而成為金屬，僅為一暫存態，發生腐蝕回歸至氧化狀態為自然之趨勢。鋼樁之腐蝕為一自然的電化學反應，其發生與海洋環境有關，因浸泡於不同的海域，受海水中的氯離子、pH（酸鹼值）、溶氧量、導電度、溫度、流速、海中生物和細菌的附著…等因素影響，會產生不同的腐蝕現象；由於腐蝕發生原因十分複雜，設計鋼構碼頭前，應先行瞭解構造物所處之海洋環境特性。

表 1 鋼構適用之碼頭型式及地質條件

碼頭型式	說明	適用條件
板樁式碼頭 ●自立式 ●錨碇式 ●井筒式	依斷面形狀可為 U 形 Z 形箱形或圓形	適用於基礎較好之處，硬質基礎，衝打版樁困難，基礎軟弱時，版樁對土壓之抵抗力不夠，均不能採用。
棧橋式碼頭	用樁或各種形狀的柱體支持碼頭面，稱為棧橋或橫棧橋	適用於軟弱地盤。

港灣構造物依曝露環境之不同，其腐蝕部位及速率會有明顯差異，腐蝕形態亦不同。一般將海洋環境分成大氣帶、飛沫帶、潮汐帶、海中帶及海泥(床)帶等五大區域。位於大氣帶之構造物，由於其表面完全曝露於大氣中，易使鋼材表面受到水氣、高濃度鹽份與日照造成溫度強烈變化等侵蝕，在陽光照不到及風雨可及之處更易發生腐蝕。飛沫帶之鋼板樁，由於海浪潑濺及日曬乾燥產生之乾濕循環作用，鋼材表面附著之氯離子及氧氣濃度將持續累積，其腐蝕為五大區域中最為嚴重之部位。

潮汐帶界於高低潮位之間，因空氣與海水波浪之交互作用，海水中之溶氧濃度增加，潮汐帶下方緊臨海中帶之部份，將形成氧氣濃度差電池作用，位於此區域之鋼材可視為一陰極反應區，其腐蝕速率低。但低潮位下約 1 公尺處(海中帶部份)因溶氧量低，鋼材變成陽極反應部位，腐蝕量較大；鋼材如位於海中帶，因完全浸泡於海水中，其上端緊臨低潮位區域，因氧氣濃度差電池作用，加上海生物附著和海流海浪衝擊關係，腐蝕速率較高。深海處之鋼材由於溶氧量低，腐蝕速率相對降低。海泥(床)帶區域內如海底土壤無存在硫化氫或硫酸還原菌，鋼材腐蝕速率很小。此外海水特性，如海水之氯離子濃度、酸鹼值、鹽度、電導度、流速...等，亦為影響鋼材腐蝕速率之重要因素之一。

國內鋼樁之腐蝕速率，早期多沿襲日本之設計準則，每年允許之最大腐蝕量（減少厚度）為 0.20 mm，由於不同海域環境，其腐蝕速率亦有差異，使用上述之準則設計是否合適，值得研究。調查資料顯示，國內五大港口部份港區碼頭之鋼板(管)樁腐蝕問題嚴重，不僅腐蝕速率大於允許設計值，並發生穿孔、破洞等情形，甚至曾發生碼頭岸壁後方級配砂石流失、掏空、岸肩沉陷或靠海床處鋼板發生開裂及彎曲等重大損壞^{[1]~[8]}。為確保碼頭作業安全，如何進行鋼板(管)樁腐蝕檢測及採取適當之防蝕措施，實為一重要課題。

二、 研究規劃

2.1 規劃流程

本研究參考國內外相關文獻與調查報告後，依實際需求擬訂適當之調查方法與試驗項目，調查規劃流程如圖 2 所示。

2.2 資料蒐集與分析

蒐集鋼構碼頭建造之原始資料，包括碼頭結構設計、鋼樁型式、防蝕處理方法、使用年限、施工條件、維護管理資料...等，以及國內外鋼樁腐蝕檢測及防治相關文獻。

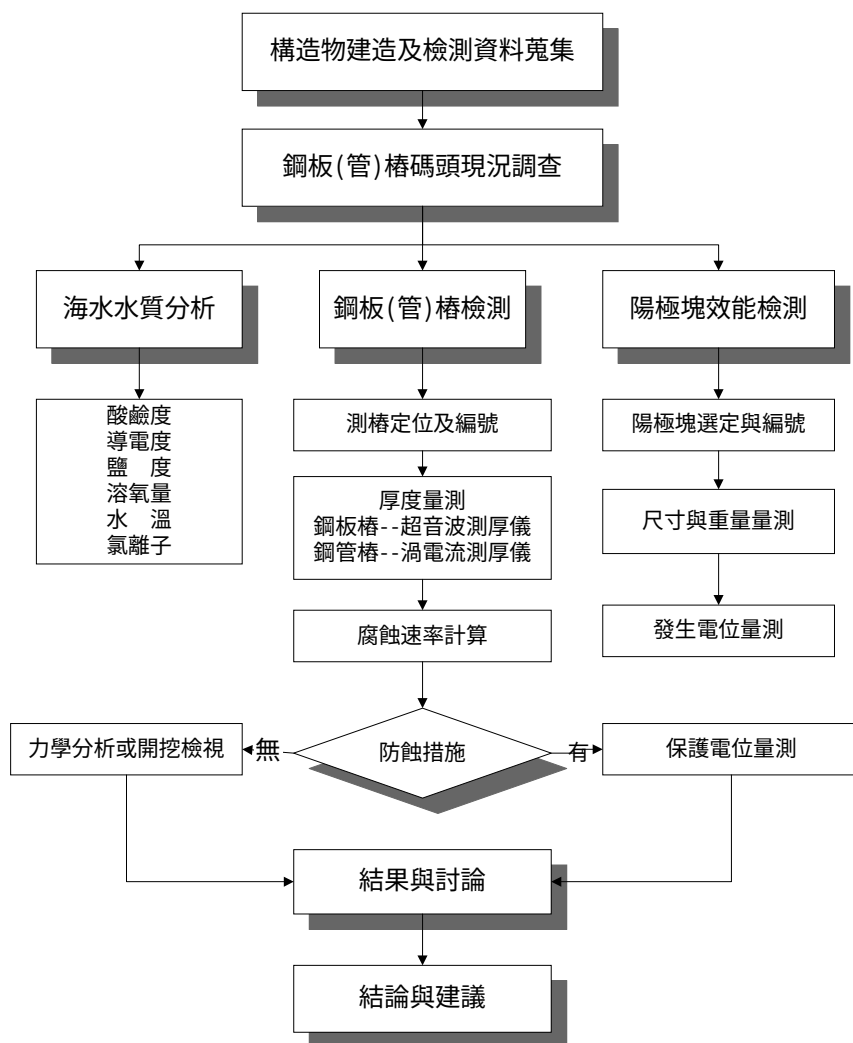


圖 2 調查規劃流程圖

2.3 檢測範圍

檢測範圍以國內主要商港及其分港之鋼構碼頭為主，包含東部之花蓮港 5 號、6 號碼頭，北部之基隆港西 21 號、西 22 號碼頭及其分港蘇澳港駁船碼頭、7 號碼頭，台北港東 1 至東 3 碼頭，中部之台中港 30 號及 99 號碼頭，南部為安平港 3 號、4 號碼頭及高雄港 69 號 70 號碼頭。

2.4 海水水質檢測

使用德國 WTW 水質測儀，檢測每一碼頭水域不同水深處之氯離子濃度、水溫、溶氧量、酸鹼度等變化。

2.5 鋼板樁檢測

2.5.1 目視檢測

由潛水人員潛入水下，近距離以目視檢測鋼樁表面腐蝕情況，如發現有破洞或變形則應先標定位置，丈量或記錄破洞大小，再檢查鋼樁後方級配是否有流失、淘空等現象，最後以照相或攝影存證。

2.5.2 厚度量測

1. 選定檢測樁

2. 選定水深與量測位置

依各港碼頭構造物腐蝕可能狀況，每支鋼樁選定五至九點水深作為量測點，每支測樁之測點在潮汐帶至少一點，海中帶至少兩點為原則。Z 型鋼板樁檢測凸面、側面與凹面之厚度，U 型鋼板樁檢測凸面或凹面之厚度，鋼管樁則依圓周四等分取三或四點量測其厚度。檢測水深以平均海平面為基準，標示方式如圖 3 所示。

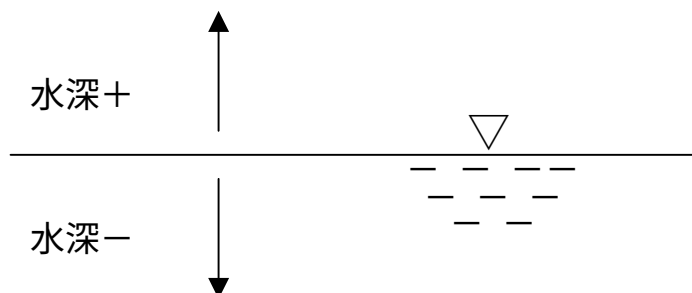


圖 3 檢測水深標示方式

3. 厚度量測方法與步驟

(1) 超音波測厚法

a. 測厚原理

超音波厚度儀係利用脈衝原理，由於音波在鋼材之傳播速率為一定值，因此，由探頭傳送出一彈性波，經鋼材表面至內壁之傳播時間，即可算出波通過路徑之距離(鋼材厚度)，精準度可達 ± 0.1 mm，可由接收器直接讀取厚度，其原理簡示於圖 4。

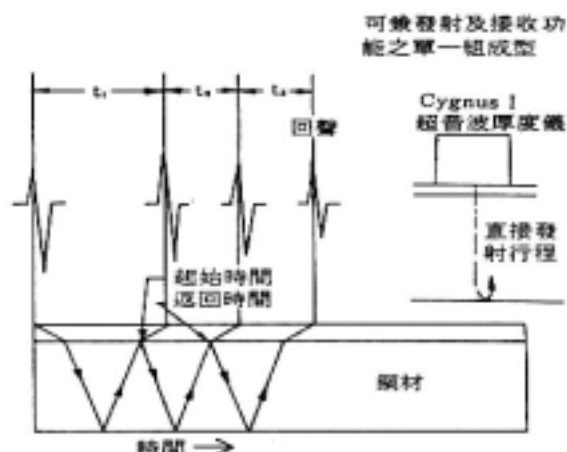


圖 4 超音波厚度量測原理

厚度計算由下列數學式求得：

$$S_i = V \times 1/2 (t_{i+1} - t_i) \dots\dots\dots(1)$$

式中 V：超音波在鋼材中之傳播速度（5920 m/sec）

S_i ：鋼材厚度(mm)

t_{i+1} ， t_i ：探頭接受回聲及初始傳播的時間

b.海生物敲除

使用工具敲除鋼板樁表面上附著之海生物體及鐵銹，敲除面積約 10 cm ×10 cm 左右。

c.厚度量測

以超音波厚度儀之探頭，接觸已敲除清理乾淨之鋼材表面，即可讀取鋼材厚度。每一水深測點量取兩次鋼板樁厚度，平均後即為其現有厚度。

(2)渦電流檢測法

a.檢測設備

檢測設備包括筆記型電腦、訊號處理器、探頭及電池等四個元件。探頭激發和接收渦電流訊號後，透過訊號處理器平衡、放大等過程，在筆記型電腦上得一時間訊號曲線，利用時間訊號曲線之轉折點，判斷鋼材平均腐蝕情況。如使用經特殊處理之防水探頭，可直接穿透厚度小於 50 mm 之被覆物質。以渦電流量測厚度，可不需先清除鋼材表面之覆著海生物。

b. 檢測原理

渦電流檢測係應用電磁感應原理，於鋼材內部產生感應渦電流。渦電流會因鋼材內部之瑕疵或物理差異而有所改變，藉此改變測知其缺陷，達到檢測目的。除可檢測圓柱、管件、薄板等表面及近表面之缺陷外，並可檢測受測材料之材質特性，如塗膜厚度、導電率、導磁率及電阻等，惟僅適用於導電材料。檢測鋼材時，因鋼材厚度及形狀之限制，其內部缺陷不易測出且訊號判定困難，需賴具豐富經驗之檢測者實施。

渦電流檢測與渦電流產生位置及時間有關。產生渦電流感應之落後時間與其受測材料之穿透深度有關，距離越遠其落後時間越久。可利用時間差的變化推估受測物質之狀況。一般藉由時間訊號曲線之轉折點，可評估檢測物之腐蝕情況。

渦電流檢測時所得到之時間訊號曲線，經由統計理論作迴歸分析，計算判定係數而推估鋼材現有厚度。判定係數正確與否直接影響檢測結果，因此，檢測前需先設定參數，如鋼材最大厚度、附著物包覆厚度、環境溫度範圍等，方能得到最佳訊號曲線，提高檢測之準確性。

4. 腐蝕速率計算

將各測點所測得之厚度數據平均之，可得鋼樁現有厚度。以鋼樁原有厚度減去現有厚度，得出鋼樁實際減少之厚度(即腐蝕厚度)。減少之厚度除以鋼樁使用之年期，即為其實際腐蝕速率。其計算公式如下：

$$\text{腐蝕速率} = \frac{\text{原有厚度} - \text{現有厚度}}{\text{使用年期}} \dots\dots\dots(2)$$

碼頭鋼樁初期如未採用任何防蝕措施，使用一段期間後再安裝犧牲陽極作為防蝕時，其腐蝕速率可分為未作防蝕措施前與採用防蝕措施後之腐蝕速率兩種，計算公式如下：

$$V_C = \frac{C}{Y_C + (1-P)Y_P} \dots\dots\dots(3)$$

$$V_P = \frac{C - V_C \times Y_C}{Y_P} \dots\dots\dots(4)$$

式中 V_C = 無防蝕措施之腐蝕速率 (mm/yr.)

V_P = 有防蝕措施之腐蝕速率 (mm/yr.)

Y_C = 無防蝕措施之年期 (yr.)

Y_P = 有防蝕措施之年期 (yr.)

C = 腐蝕量 (mm)

P = 防蝕率

2.4.3 鋼樁之保護電位量測

以 Cu/CuSO_4 參考電極, 量測時以高阻抗電位計或電錶之一端搭接於與鋼板樁連結之不銹鋼電位測試棒上, 另一端則置於欲量測之鋼樁旁。

防蝕電位的判斷標準如表 2 所示, 若鋼鐵結構物之保護電位值較標準防蝕電位值為"負"時, 鋼鐵結構物是為保護狀態, 若電位值比標準防蝕電位值"正"時, 則表示保護不足或防蝕效果不佳。以飽和硫酸銅參考電極為例, 若鋼鐵結構物之電位值較 -850 mV 為"小", 鋼鐵結構物為保護狀態, 但若值較 -800 mV 為"大", 則表示保護不足或防蝕效果不佳, 如圖 5 所示。

表 2 海水中鋼材之防蝕保護電位標準

防蝕電位	量測之參考電極
-780 mV	飽和甘汞電極 (SCE)
-800 mV	海水氯化銀電極 ($\text{Ag}/\text{AgCl}/\text{seawater}$)
-750 mV	飽和氯化銀電極 ($\text{Ag}/\text{AgCl}/\text{sat'd KCl}$)
-850 mV	飽和硫酸銅電極 (Cu/CuSO_4)

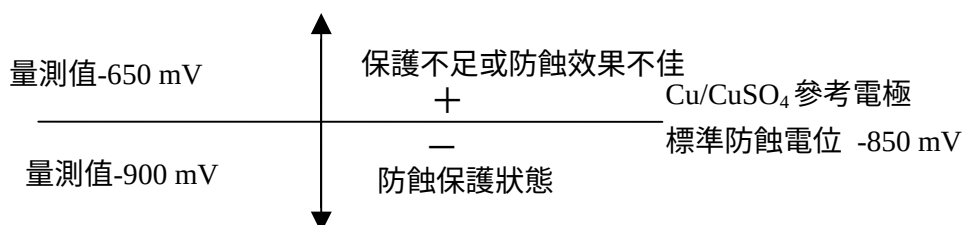


圖 5 陰極防蝕效果判定

3.2.5 陽極塊調查

1. 選定陽極塊

陽極塊調查之目的在確認陰極防蝕是否符合實際需求與預估其殘存使用年限，調查時先檢視陽極塊現況，每一碼頭檢測數量至少 15 支為原則。

2. 陽極塊發生電位之量測

- (1) 潛水人員以飽和硫酸銅電極，置放於陽極塊之上、中、下三處，間隔約 30 公分，岸上人員於三用電錶上讀出電位值。
- (2) 潛水人員將陽極塊附著之海生物去除後，再以上述方法量測電位一次。

2.5.3 陽極塊外觀檢查

陽極塊切割後將陽極塊吊至岸上，先將附著之海生物去除後，觀察記錄其外觀及消耗情況，並量測陽極塊兩端距端點 10 公分處及中間之現有尺寸，量測位置如圖 6 所示。

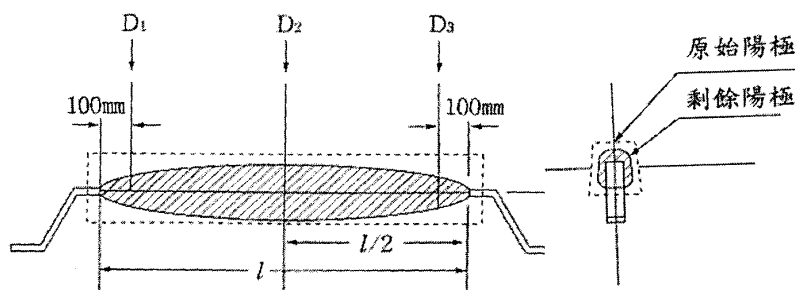


圖 6 陽極塊尺寸量測位置

2.5.4 陽極塊消耗量量測及殘存年限推估

陽極塊完成外觀檢查記錄後，再將其稱重之（最小讀數至 0.1 公斤，陽極塊實際重量應另扣除鐵蕊之重量）。完成殘留重量之量測後，切下之陽極塊必需再焊接回原來之鋼樁上，切割前後與焊接後均須拍照記錄。

陽極塊殘存年限由現有重量及消耗速率推估，及計算式如下：

$$\text{陽極塊消耗速率} = \frac{(\text{陽極塊原始重量} - \text{陽極塊現有重量})}{\text{使用年數}} \dots\dots\dots(5)$$

$$\text{殘存年限} = \frac{\text{陽極塊現有重量}}{\text{陽極塊消耗速率}} \dots\dots\dots(6)$$

2.5.5 陽極塊發生電流量測

量測時，由潛水人員以電流計之感應環，套於陽極塊上方或下方鐵蕊，再由岸上人員直接於電流計讀取電流值。電流計及感應環元件如圖 7(a)，量測方式如圖 7(b)^[15]。

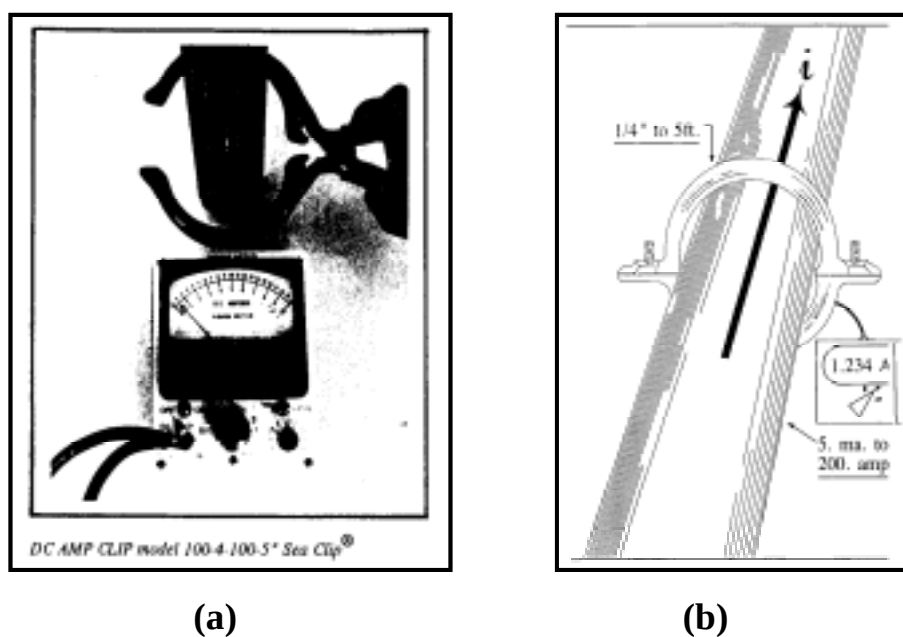


圖 7 電流計、感應環元件及量測方式^[15]

三、結果與討論

3.1 基本資料分析

表 3 為調查碼頭之相關基本資料， 範圍包括五大商港及其附屬港口。

表 3 調查碼頭之相關基本資料

碼頭名稱	長度 (m)	水深 (m)	鋼樁型式	原始厚度 (mm)	完工日期(年)	防蝕處理
花蓮港 5 號	260	-9.5	Belvol-Z 板樁	凸凹：15.2 側：10.2	50	無
花蓮港 6 號	150	-8.5	Z-25 板樁	凸凹：13.0 側：9.6	60	無
基隆港西 21 號	236	-10.0	Z-38 板樁	凸凹：17.2 側：11.4	50	犧牲陽極法
基隆港西 22 號	190	-11.0	Z-38 板樁	凸凹：17.2 側：11.4	50	犧牲陽極法
蘇澳港駁船	338	-4.5	Z-14 板樁	凸凹：9.4 側：8.2	67	犧牲陽極法
蘇澳港 7 號	236	-13.0	SS41 管樁	12.0	72	犧牲陽極法
台北港東 1、2 號	170	-6.0	PU32 板樁	19.5	83	犧牲陽極法
台北港東 3 號	170	-7.5	Larssen 6-131 U 型板樁	25.4	90	犧牲陽極法
台中港 30 號	320	-13.0	SS41 管樁	12.0	84	犧牲陽極法
台中港 99 號	250	-12.0	SS41 管樁	12.0	84	犧牲陽極法
安平港 3 號	160	-9.0	PU32 板樁	19.5	80	犧牲陽極法
安平港 4 號	160	-9.0	PU32 板樁	19.5	80	犧牲陽極法
高雄港 69 號	320	-14.0	FSP 6L 板樁	27.6	67	犧牲陽極法
高雄港 70 號	320	-14.0	FSP 6L 板樁	27.6	67	犧牲陽極法

3.2 海水水質

各港口碼頭水域之海水水質差異不大，鹽度介於 30.9 ~ 34.7 ‰ 間，電導度值介於 43.2 ~ 52.7 mmho/cm，比電阻值 19.0 ~ 23.2 Ω /cm，溶氧量介於 5.2 ~ 8.3 mg/L，氯離子平均濃度在 16,500~24,000 ppm，酸鹼度介於 7.8 ~ 8.3。

3.3 鋼板（管）樁現況

3.3.1 花蓮港 5 號及 6 號碼頭

花蓮港 5 號及 6 號碼頭結構斷面示如圖 8，Z 型鋼板樁斷面型式如圖 9。5 號碼頭在高潮位線以上，仍有一段鋼板樁（約 80~120 公分），全年裸露於大氣中，與其它港區鋼板樁完全浸入海水中略有不同。

1. 目視檢測

5 號碼頭鋼板樁未採取任何防蝕措施。碼頭岸壁下方 (+3.5m) 至潮汐帶上方之鋼板樁，鋼板樁表面每年均定期以防蝕塗料塗覆保護，因此外觀無嚴重腐蝕現象，但整座碼頭之鋼板樁表面均有明顯銹蝕斑點及凹凸不平現象，顯示潮汐帶之鋼板樁呈現不均勻腐蝕，另從海側近距離目視觀察亦未發現有穿孔或破洞等狀況。水下部分亦未發現有孔蝕或穿孔破洞等情形，但是距碼頭起點 55.4 公尺、66.2 公尺、81.8 公尺處凹面及 121.5 公尺處凸面之鋼板樁，於海床處則有開裂及彎曲現象，開裂最大寬度從 15 至 25 公分，高度約 1 至 2 公尺（示意圖如圖 10 所示），研判應為地震作用導致動土壓力推擠鋼板樁，致發生三角錐形開裂並使部分開裂處鋼板彎曲，與鋼板樁腐蝕行為應無直接關係。

由於 4 號碼頭於民國 89 年維修地下管線，曾發現鋼板樁陸側部分有明顯銹蝕及穿孔破洞。且 4 號、5 號碼頭啟用已超過 30 年，本研究特選定 5 號碼頭終點處岸肩進行開挖。開挖結果顯示，鋼板樁陸側表面有一層厚重鐵銹，敲除後有多處破洞，破洞尺寸最大長約 5 公分，寬約 3 公分（如圖 11 所示），顯示背填土對腐蝕影響程度應予重視。

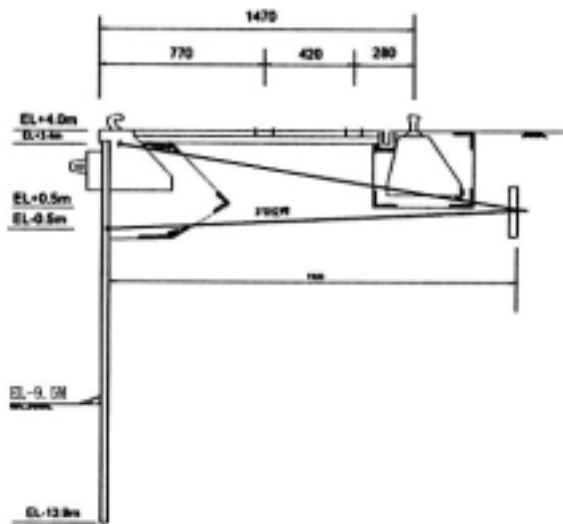


圖 8 花蓮港 5、6 號碼頭結構斷面

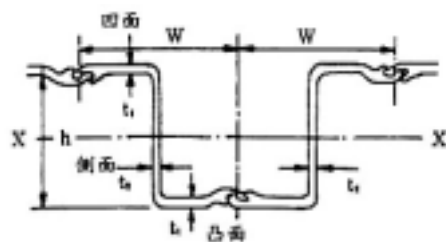


圖 9 Z 型鋼板樁型式

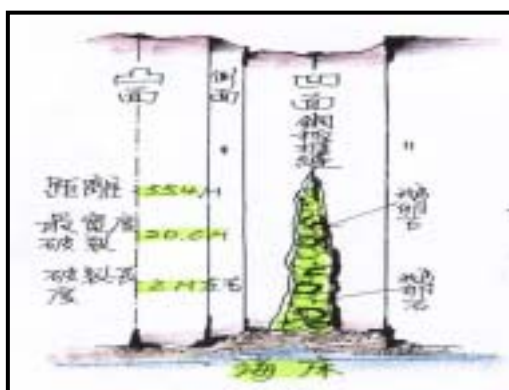


圖10 花蓮港5號碼頭鋼板樁彎曲
開裂示意圖



圖 11 花蓮港 5 號碼頭鋼板樁陸側
破洞之情形

6 號碼頭於距起點 112 公尺處，鋼樁凸面發現有一寬約 25 公分，高約 2 公尺呈三角錐形之開裂，研判應為地震作用產生動土壓力推擠鋼板樁所致。港務局已採鋼板焊接方式補強修護，其餘鋼板樁外觀並未發現孔蝕或穿孔破洞等現象。

2.鋼板樁之腐蝕速率

腐蝕速率檢測結果如表 4 及圖 12 至圖 13，位於潮汐帶，在水深為+0.50 m 處鋼樁之凸面、凹面、側面之腐蝕速率均為 0.08 mm/yr.，大於其他水深測點，惟部份測樁之凸、凹、側面減少厚度大於 3.0 mm，超過原有厚度 20 % 以上，為避免鋼樁現有之斷面係數可能不足，無法抵抗土壓力或彎矩，應增加定期檢測次數或建立維護措施。

表 3 花蓮港 5 號、6 號碼頭鋼板樁之腐蝕速率

水 深(m)											
碼頭編號		+3.3	+2.6	+1.8	+0.5	-1.0	-1.5	-2.0	-2.5	-3.0	-3.5
5 號	凸面	0.04	0.04	0.04	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
	側面	0.05	0.05	0.05	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
	凹面	0.05	0.05	0.05	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
水 深(m)											
碼頭編號		-0.2	-0.4	-0.6	-0.8	-1.0	-1.5	-2.0	-2.5	-3.0	-3.5
6 號	凸面	0.06	0.05	0.05	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03
	側面	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06	0.07
	凹面	0.05	0.06	0.04	0.04	0.04	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03

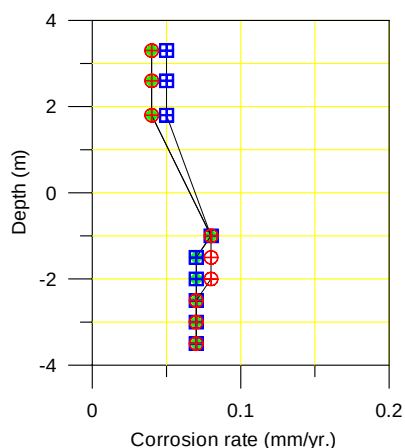


圖 12 5 號碼頭鋼板樁之腐蝕速率

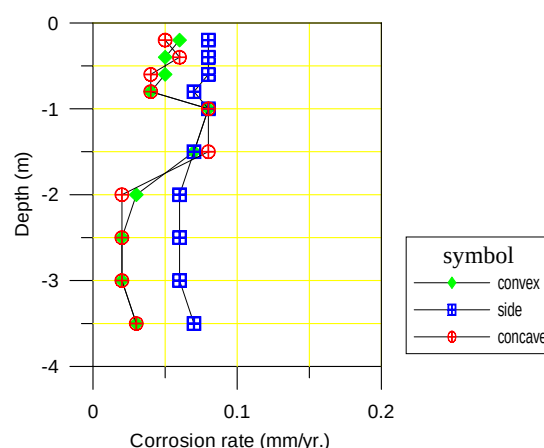


圖 13 6 號碼頭鋼板樁之腐蝕速率

3.3.2 基隆港西 21 號、西 22 號碼頭

兩座碼頭結構斷面示如圖 14 及圖 15，鋼板樁斷面為 Z-38 型，至民國 81 年始於水深-2.0m 及-5.0m 處安裝犧牲陽極作為防蝕措施。

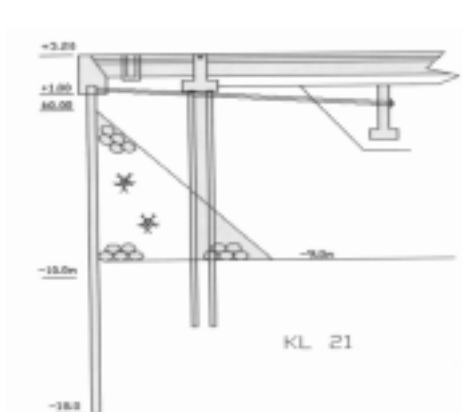


圖 14 基隆港西 21 號碼頭斷面

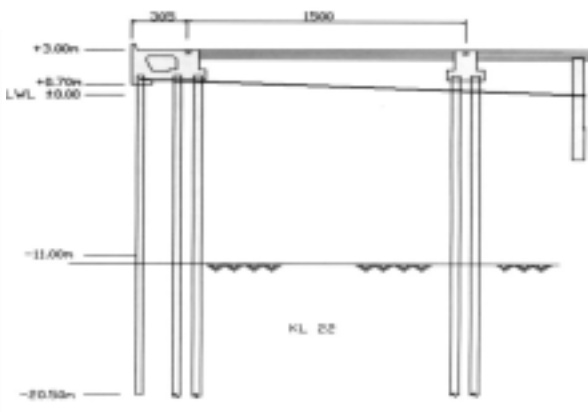


圖 15 基隆港西 22 號碼頭斷面

1. 目視檢測

兩座碼頭鋼板樁外觀均未發現有孔蝕或穿孔破洞等現象，但潮汐帶部份鋼樁有以鋼板焊補之痕跡。

2. 鋼板樁之腐蝕速率

腐蝕速率檢測結果示如表 5 及圖 16 與圖 17。在潮汐帶水深為 +0.20 m -0.30 m 處之腐蝕速率最大，其值介於 0.04 -0.11 mm/yr.之間，在水深+0.70m、+0.20 m 及-0.30 m 處發現部分測點之減少厚度較大，必須多加注意。

最大腐蝕速率西 21 號碼頭為 0.23 mm/yr. (水深為 +0.20 m 凸面處), 西 22 號碼頭為 0.18 mm/yr. (水深 +0.20 m、-0.30 m 處之凸面)。兩座碼頭減少厚度均以凸面最大分別為 3.68 mm、2.71 mm, 凹面 1.90 mm、1.68 mm 及側 (1.39 mm、1.58 mm 次之, 腐蝕情況雖非全區都很嚴重, 惟鋼樁在潮汐帶附近之減少厚度部分高達 5.40 ~ 7.40 mm (西 21 號碼頭凸面), 超過原有厚度之 20%, 雖平均腐蝕速率雖未超過允許值, 但仍需多加注意。

整體而言, 西 21、西 22 號碼頭本次調查之腐蝕速率已低於民國 81 年之調查結果⁽¹⁾, 顯示採用之陰極防蝕工法已達到預期效益。

3. 鋼板樁之保護電位

兩座碼頭鋼板樁之保護電位量測結果: 最大值為 -924 mV, 最小值為 -1209 mV, 均小於 -850 mV, 已達保護鋼板樁免於腐蝕之目的。

表 5 基隆港西 21、西 22 號碼頭鋼板樁之腐蝕速率

水 深 (m)		+0.7	+0.2	-0.3	-4.3	-5.3
碼頭編號						
西 21 號	凸面	0.07	0.11	0.07	0.06	0.05
	側面	0.04	0.06	0.05	0.04	0.03
	凹面	0.04	0.04	0.05	0.04	0.03
西 22 號	凸面	0.06	0.10	0.09	0.06	0.06
	側面	0.04	0.06	0.06	0.05	0.05
	凹面	0.05	0.06	0.05	0.04	0.04

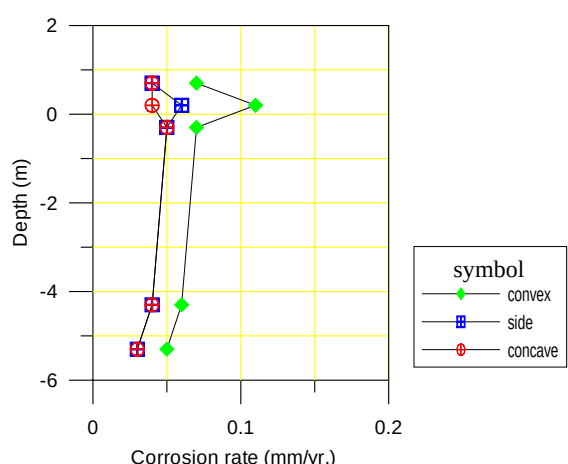


圖 16 基隆港西 21 號碼頭鋼板樁之腐蝕速率

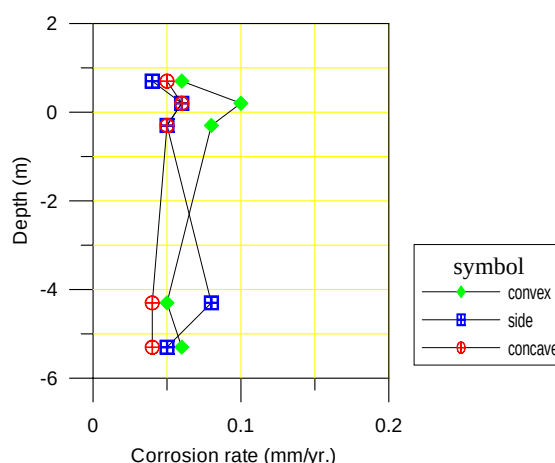


圖 17 基隆港西 22 號碼頭鋼板樁之腐蝕速率

3.3.3 蘇澳港駁船碼頭及 7 號碼頭

兩座碼頭結構斷面及陽極塊安裝示意如圖 18 與圖 19。

1. 目視檢測

兩座碼頭之鋼板（管）樁外觀均未發現腐蝕穿孔或破洞現象。

2. 鋼樁之腐蝕速率

腐蝕速率檢測結果如表 6 及圖 20 與圖 21。駁船碼頭 A、B 兩段範圍之鋼板樁在潮汐帶水深-1.00 m 處之腐蝕速率最大，其值為 0.09 mm/yr。鋼板樁凹、凸面最大減少厚度約 2 mm，側面約 2.2 mm，已接近原有厚度之 20%。

7 號碼頭各檢測樁之最大腐蝕速率為 0.11 mm/yr，平均腐蝕速率為 0.05 ~ 0.07 mm/yr。

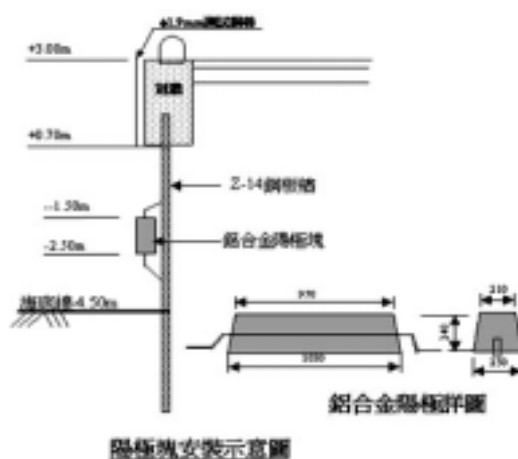


圖 18 駁船碼頭結構斷面及犧牲陽極安裝示意圖

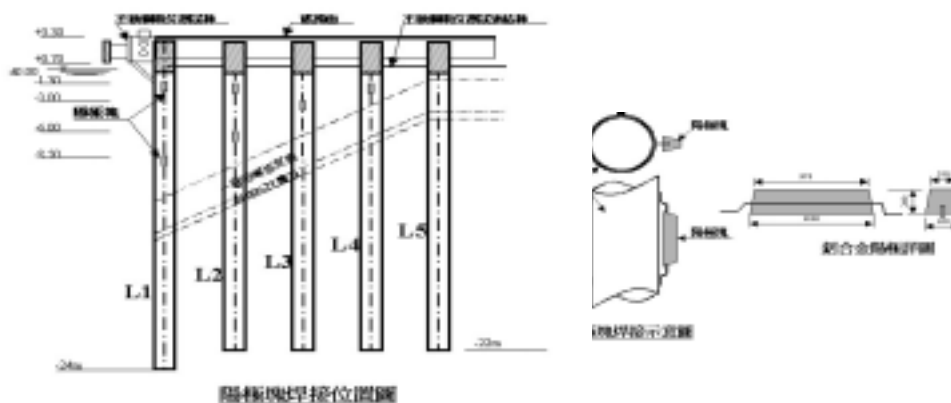


圖 19 7 號碼頭結構斷面及犧牲陽極安裝示意圖

表 6 蘇澳港駁船碼頭及 7 號碼頭鋼樁之腐蝕速率

水 深(m)						
碼頭編號		-1.0	-1.7	-3.2		
駁船碼頭 A 段	凸面	0.07	0.06	0.02		
	側面	0.07	0.07	0.04		
	凹面	0.05	0.05	0.02		
駁船碼頭 B 段	凸面	0.07	0.05	0.04		
	側面	0.09	0.06	0.05		
	凹面	0.05	0.04	0.03		
備 註	A、B 兩段各 17 支測樁，共計 306 個量測點					
水 深(m)						
碼頭編號		+0.7	+0.2	-0.3	-1.7	-5.7
7 號碼頭		0.05	0.06	0.0	0.07	0.07

3. 鋼板（管）樁保護電位量測

駁船碼頭鋼板樁之保護電位最大值為 -1047 mV，最小值為 -1083 mV，7 號碼頭鋼管樁之保護電位最大值為 -913 mV，最小值為 -1051 mV，均小於 -850 mV，已達保護鋼樁免於腐蝕之目的。

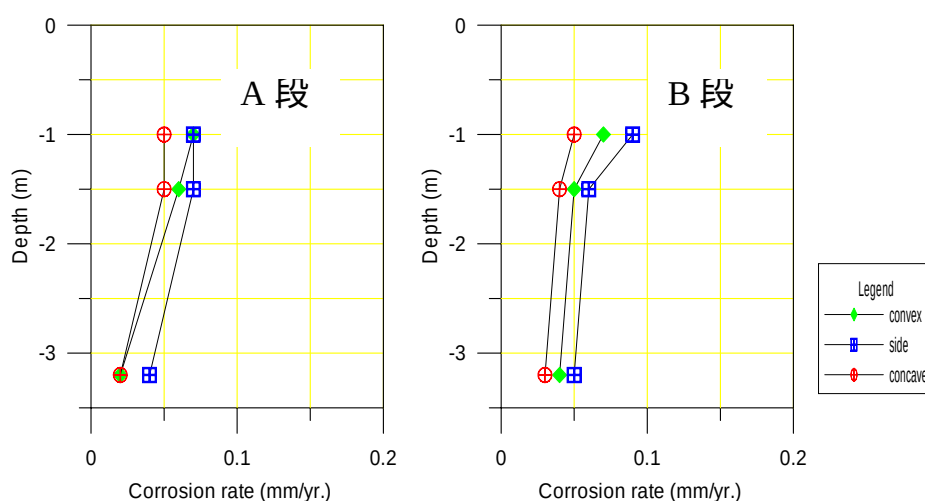


圖 20 蘇澳港駁船碼頭（A、B 段）鋼板樁之腐蝕速率

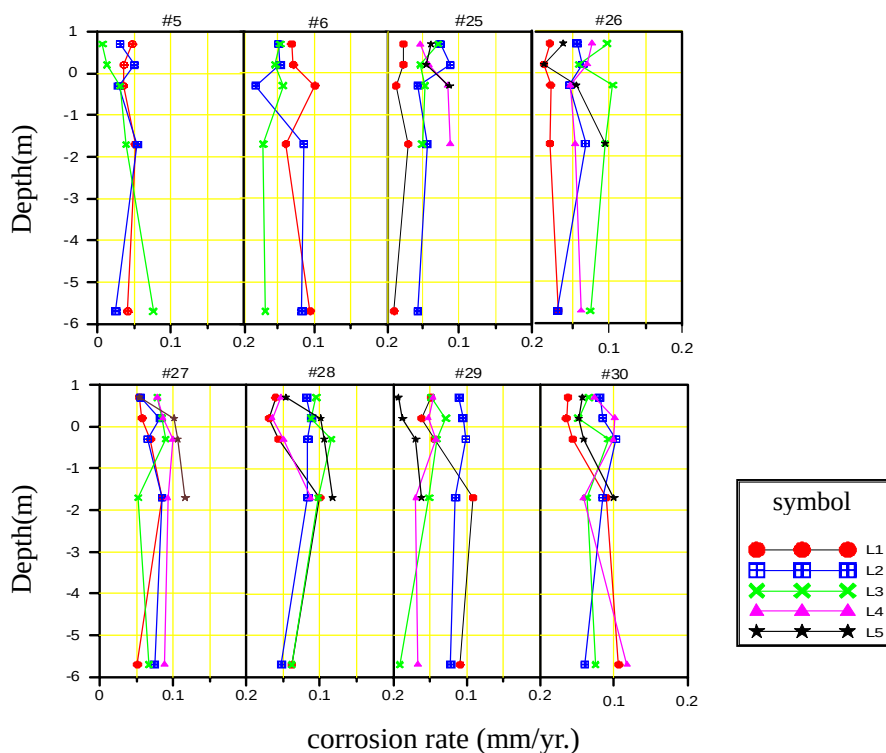


圖 21 蘇澳港 7 號碼頭各檢測樁之腐蝕速率

3.3.4 台北港東 2 及東 3 碼頭

台北港東 2 及東 3 碼頭結構斷面示如圖 22 及圖 23，分別採用 PU32 及 Larssen 6-131 U 型鋼板樁，防蝕措施採用犧牲陽極法（東 2 碼頭安裝於水深 -2.0、-5.0m，東 3 碼頭安裝於水深 -2.0、-3.5、-5.0、-6.5m 處）。

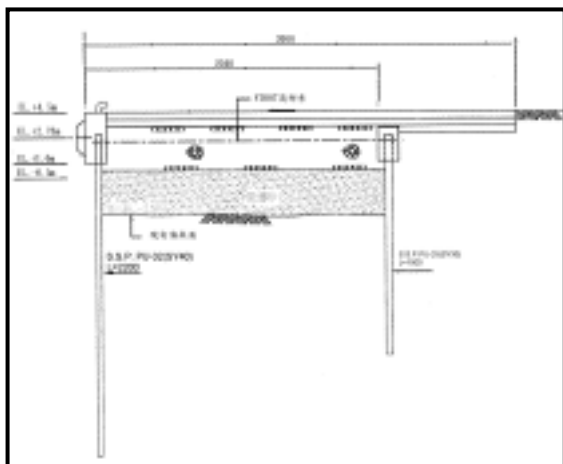


圖 22 台北港東 2 號碼頭結構斷面

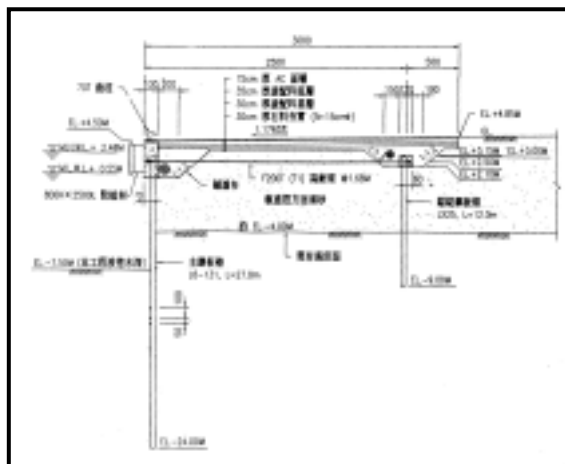


圖 23 台北港東 3 號碼頭結構斷面

1. 目視檢測

兩座碼頭鋼板樁之外觀均未發現有孔蝕或穿孔破洞等嚴重腐蝕現象，但東 2 碼頭水域之海水較為混濁，海床亦發現砂石淤積，將位於水深 -5.0 m 處之陽極塊底部埋沒，使其僅餘部份露出於海床面上，位於水深 -2.0 m 處之陽極塊部份因外力撞擊脫落。

2. 鋼板樁之腐蝕速率

鋼板樁之腐蝕速率檢測結果如表 7 及圖 24 與圖 25。東 2 碼頭腐蝕速率在 0.05 至 0.07 mm/yr. 之間，各檢測樁在潮汐帶之腐蝕速率有多處大於 0.10 mm/yr.，大於使用相同型式鋼樁之安平港碼頭（見 3.3.6 節），可能為其防蝕措施（陽極塊）受到外力撞擊脫落或遭砂石埋沒，無法提供鋼樁充分之防蝕保護效用。

東 3 號碼頭各檢測水深鋼板樁之腐蝕速率均為 0.14 mm/yr.，減少厚度介於 0.02 ~ 0.03 mm 之間，調查時東 3 碼頭使用時間僅約二年，雖腐蝕速率較大於東 2 碼頭，但實際腐蝕情況尚屬輕微。

3. 鋼板樁之保護電位

東 2 號碼頭鋼板樁之保護電位最大值為 -585 mV，最小值為 -899 mV。除東 2 號碼頭距起點 120 公尺處，保護電位接近 -850 mV 之有效防蝕電位外，量測值多介於 -600 ~ -800 mV，明顯未達保護狀態。東 3 號碼之保護電位則均小於 -850 mV，已達保護鋼板樁防蝕之目的。

表 7 台北港東 2 至東 3 碼頭鋼板樁之腐蝕速率

碼頭編號 \ 水深 (m)	+0.3	± 0.0	-1.0	-2.0	-3.0	-4.0	-5.0	-6.0	-7.0
東 2	0.09	0.09	0.09	0.10	0.11	0.10	0.10	0.11	0.10
東 3	---	---	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	---
備註	1.東 2 號碼頭自起點 0 m、80 m、120 m 等 3 處各連續 6 支、14 支、29 支共 49 支測樁 269 個檢測點。 2.東 3 號碼頭自起點 0 m 處起共 105 支，檢測水深為 -1.0 m、-2.0 m、-3.0 m、-4.0 m -5.0 m 及 -6.0 m 等六個水深測點，共計 630 個檢測點。								

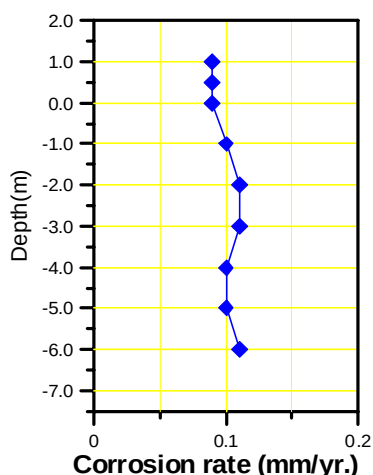


圖 24 台北港東 2 號碼頭鋼板樁之腐蝕速率

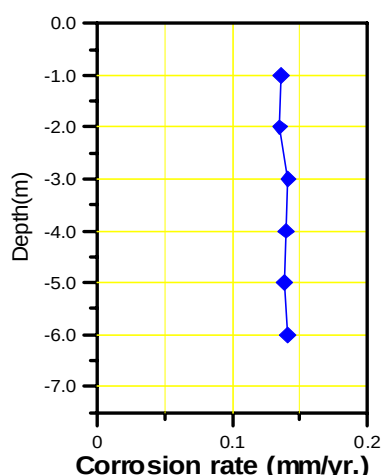


圖 25 台北港東 3 號碼頭鋼板樁之腐蝕速率

3.3.5 台中港 30 號及 99 號碼頭

兩座碼頭均採鋼管樁橋墩式結構建造，鋼管樁管壁厚度均為 12 mm，碼頭結構斷面如圖 26。港區因潮汐落差高達 4.5 公尺左右，碼頭建造時，鋼管樁在混凝土面版下方 0.3m 至 5.2 m 之部位，除以防蝕膏作為防蝕措施外，並以 PE 及 PVC 和固定箍保護，每支鋼管樁在水深 -2.0m（或 -3.0m）和海底處，共安裝 2 支犧牲陽極塊防蝕。

1. 目視檢測

兩座碼頭鋼管樁均無發現孔蝕或破洞等嚴重之腐蝕現象，但 99 號碼頭在潮汐帶位於水下之保護措施發現部份固定箍發生鬆脫現象。

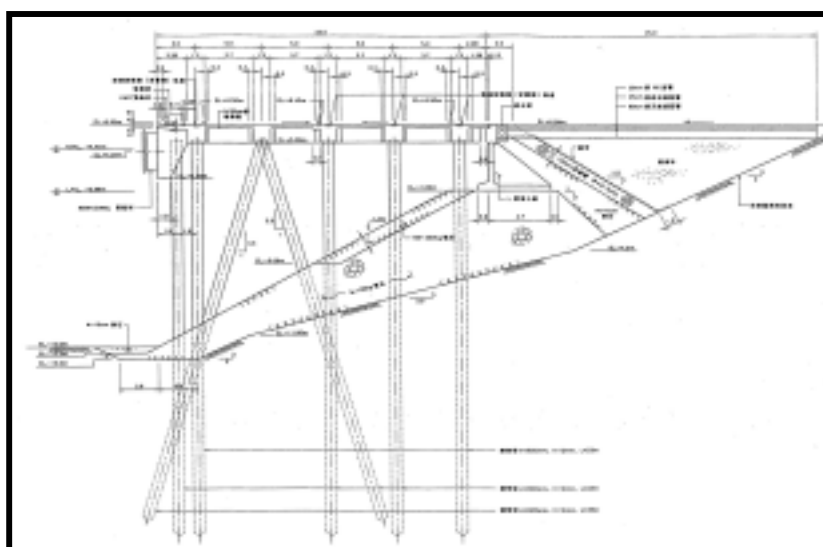


圖 26 台中港 30 號、99 號碼頭結構斷面

2. 鋼管樁之腐蝕速率

鋼管樁之腐蝕速率量測結果如表 8，各水深測點之平均腐蝕速率均低於 0.10 mm/yr。兩座碼頭各測樁之腐蝕速率如圖 27 與圖 28。除少數測點大於或接近 0.14 mm/yr.外，多介於 0.01 ~ 0.09 mm/yr.間。但 99 號碼頭第三排第二列之檢測樁，各水深測點腐蝕速率接近 0.20mm/yr.，值得注意。

3. 鋼管樁之保護電位

兩座碼頭鋼管樁之保護電位最大值 - 981mV，最小值為 - 1100 mV，均小於 - 850 mV (以 Cu/CuSO₄ 電極量測)，已達保護鋼樁免於腐蝕之目的。

表 8 台中港 30 號及 99 號碼頭鋼管樁之平均腐蝕速率

碼頭編號 \ 水深 (m)	+4.5	+3.0	+1.0	-1.0	-3.0	-7.0
30 號	0.06	0.07	0.07	0.09	0.08	0.08
99 號	0.06	0.06	0.06	0.05	0.06	0.07
備 註	1.以渦電流檢測儀量測 2.30 號碼頭檢測位置：自起點第 5、7、9、11、13、14 排樁 3.99 號碼頭檢測位置：自起點第 6、7、8、33、34、35 排樁					

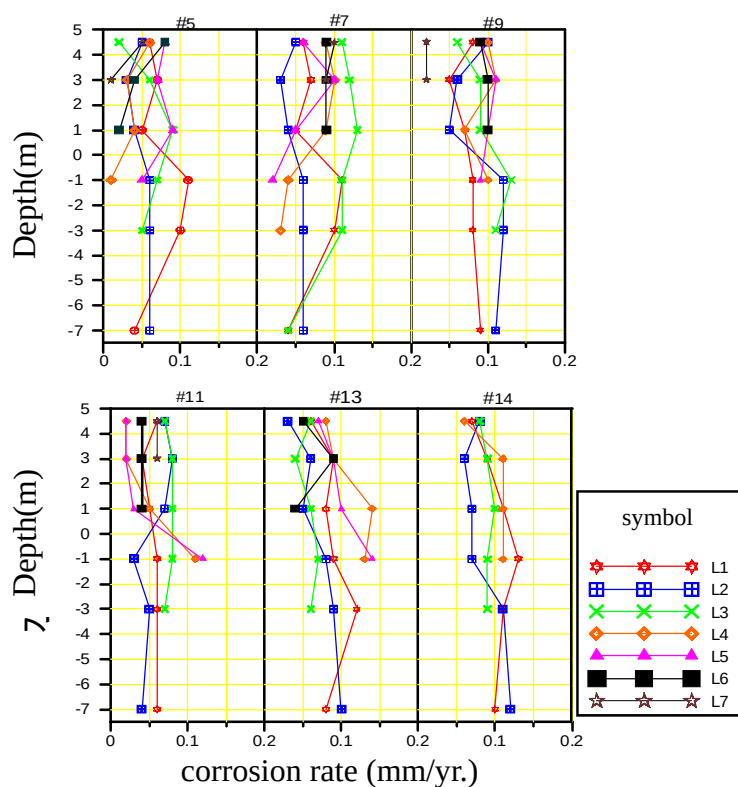


圖 27 台中港 30 號碼頭各檢測樁之腐蝕速率

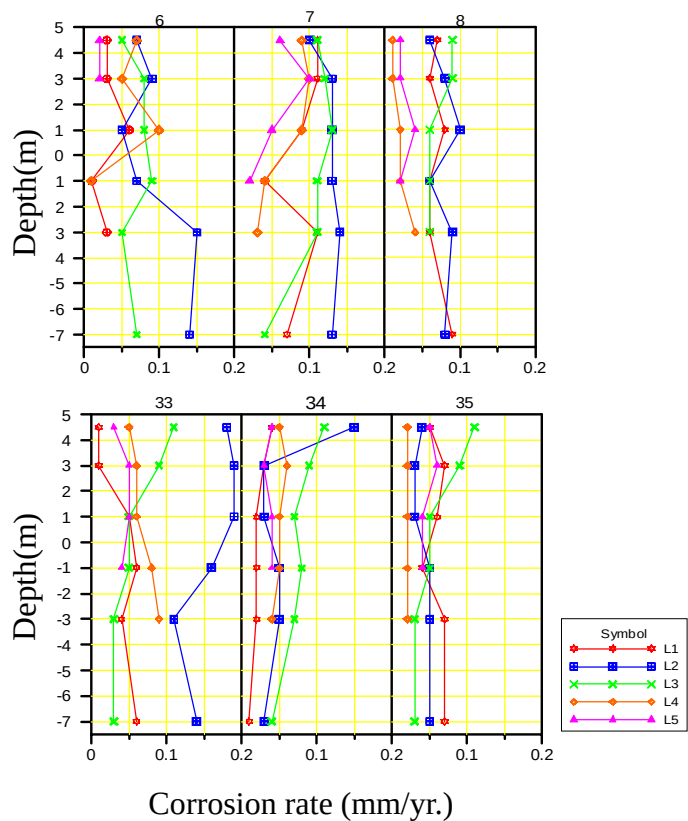


圖 28 台中港 99 號碼頭各檢測樁之腐蝕速率

3.3.6 安平港 3 號及 4 號碼頭

3 號及 4 號碼頭結構斷面示如圖 29，使用 PU32 之 U 型鋼板樁，於水深-2.0m 及-5.0m 處安裝犧牲陽極作為防蝕措施。

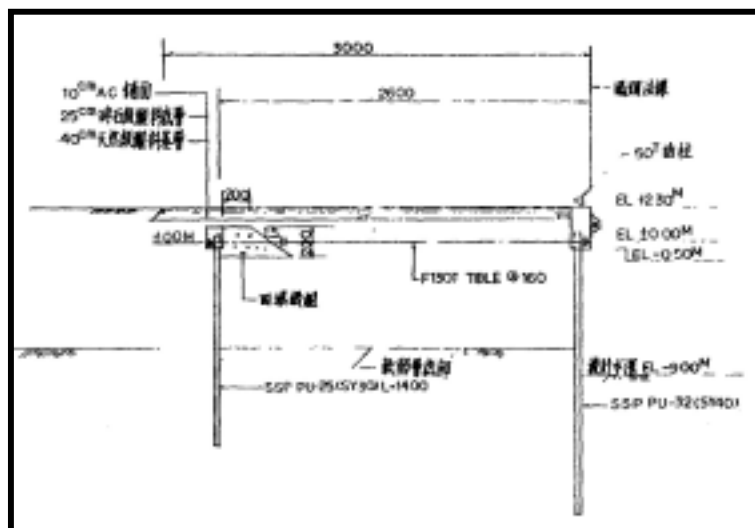


圖 29 安平港 3 號、4 號碼頭結構斷面

1. 目視檢測

兩座碼頭鋼板樁外觀均未發現有孔蝕或穿孔破洞等嚴重腐蝕現象。

2. 鋼板樁之腐蝕速率

腐蝕速率量測結果如表 9 及圖 30 與圖 31。各檢測樁之腐蝕速率介於 0.03 ~ 0.06 mm/yr.之間，腐蝕狀況輕微，顯示防蝕措施可提供有效保護。

表 9 安平港 3 號及 4 號碼頭鋼板樁之腐蝕速率

水 深 (m)	+0.3	0.0	-1.0	-2.0	-3.0	-4.0	-5.0	-6.0	-7.0
碼頭編號									
3 號	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06
4 號	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05

3. 鋼板樁之保護電位

鋼板樁之保護電位 3 號碼頭最大值為 -928 mV，最小值為 -1025 mV，4 號碼頭最大值為 -942 mV，最小值為 -1068 mV，均小於 -850 mV (以 Cu/CuSO₄ 電極量測)，已達保護鋼樁免於腐蝕之目的。

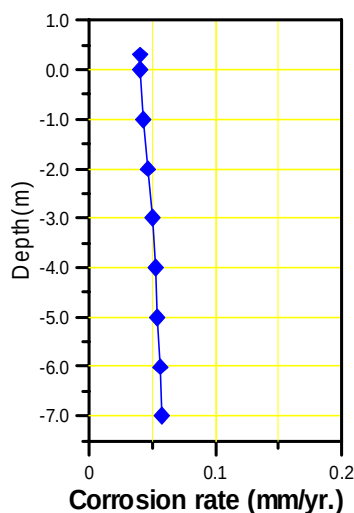


圖 30 安平港 3 號碼頭鋼板
樁之腐蝕速率

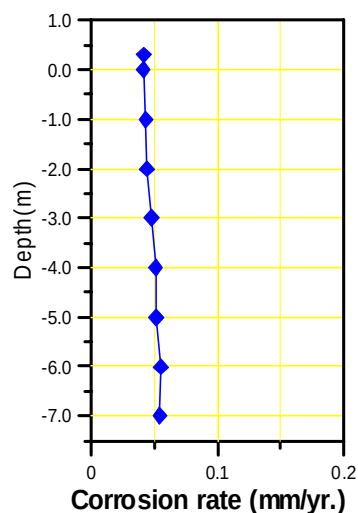


圖 31 安平港 4 號碼頭鋼板
樁之腐蝕速率

3.3.7 高雄港 69 號及 70 號碼頭

高雄港 69 號及 70 號碼頭結構斷面類似基隆港西 22 號碼頭，但鋼板樁斷面為 FSP 6L U 型，碼頭建造初期即採用犧牲陽極法保護鋼板樁，陽極塊安裝在水深為 -2.0m、-5.5m、-9.0 m、-12.5 m 等處，民國 83 年更換新陽極塊。

1. 目視檢測

兩座碼頭之鋼板樁外觀均未發現有孔蝕或穿孔破洞等嚴重腐蝕現象。

2. 鋼板樁之腐蝕速率

鋼板樁之腐蝕速率量測結果如表 9 及圖 30 與圖 31。腐蝕速率最大僅 0.02 ~ 0.03 mm/yr.，腐蝕狀況屬輕微，顯示防蝕措施可提供有效保護。

3. 鋼板樁之保護電位

鋼板樁之保護電位 69 號碼頭最大值 - 956mV，最小值為 - 1030 mV，70 號碼頭最大值 - 892mV，最小值為 - 993 mV，均小於 - 850 mV (以 Cu/CuSO₄ 電極量測)，已達保護鋼板樁免於腐蝕之目的。

表 10 高雄港 69 號及 70 號碼頭鋼板樁之腐蝕速率

水深(m) 碼頭編號	+0.1	-1.0	-2.0	-3.0	-4.0	-6.0	-8.0	-10.0	-11.0	-12.0
69 號	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
70 號	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02

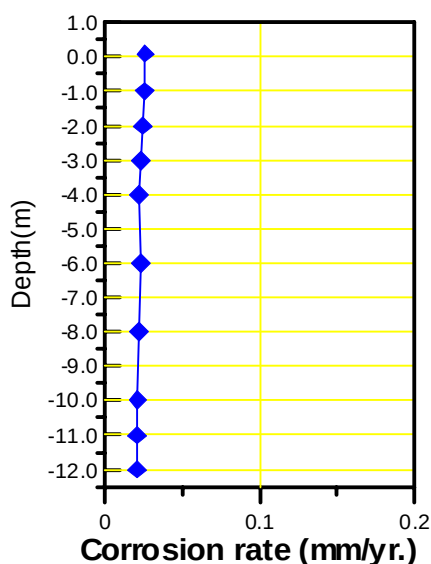


圖 32 高雄港 69 號碼頭鋼板樁之腐蝕速率

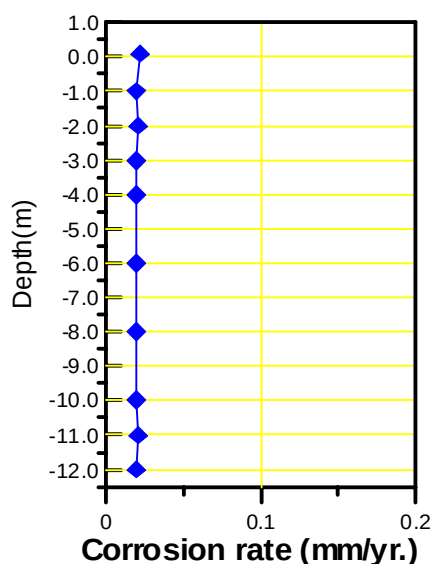


圖 33 高雄港 70 號碼頭鋼板樁之腐蝕速率

3.4 陽極塊調查

3.4.1 陽極塊發生電位

表 11 為陽極塊發生電位量測結果，最大值為 -967 mV ，最小值為 -1155 mV ，由各檢測碼頭鋼樁之保護電位量測結果顯示，陽極塊能提供鋼樁足夠之保護電位。

表 11 陽極塊發生電位量測結果 (單位：mV)

碼頭編號	陽極塊發生電位(mV) vs.Cu/CuSO ₄		碼頭編號	陽極塊發生電位(mV) vs.Cu/CuSO ₄	
基隆港西 21 號	-1016	-1089	台中港 30 號	-1036	-1118
基隆港西 22 號	-967	-1047	台中港 99 號	-1008	-1073
蘇澳港駁船	-990	-1036	安平港 3 號	-1058	-1073
蘇澳港 7 號	-1084	-1155	安平港 4 號	-1012	-1063
台北港東 2 號	-882	-886	高雄港 69 號	-1016	-1065
台北港東 3 號	-1012	-1063	高雄港 70 號	-1078	-1103

註：台北港東 2 號陽極塊因受損或脫落，僅量測 1 支。

3.4.2 陽極塊發生電流

表 12 為陽極塊發生電流量測結果，陽極塊表面附著海生物清除後，陽極塊發生電流值增大，海生物附著程度會影響陽極塊發生電流之輸出。海生物清除前後，陽極塊發生電流分別為 0.10 0.60 安培及 0.15 之 0.80 安培之間。

表 12 陽極塊發生電流量測結果 (單位：安培, A)

碼頭編號	海生物清除前			海生物清除後		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
台北港東 2 號	0.10	0.10	0.10	0.30	0.30	0.30
台北港東 3 號	0.60	0.10	0.14	0.70	0.18	0.37
台中港 99 號	0.50	0.10	0.25	0.80	0.30	0.46
安平港 3 號	0.40	0.10	0.23	0.50	0.25	0.45
安平港 4 號	0.30	0.10	0.21	0.80	0.25	0.46
高雄港 69 號	0.52	0.17	0.35	0.53	0.20	0.36
高雄港 70 號	0.26	0.13	0.18	0.30	0.15	0.22

註：台北港東 2 號陽極塊因受損或脫落，僅量測 1 支。

3.4.3 陽極塊外觀檢查及重量量測

表 13 為各檢測碼頭之陽極塊重量量測及殘存年限推估。陽極塊表面均附著許多海生物，外觀仍然十分完整。除去附著海生物後，其表面反應產物明顯增多，反應產物主要為白色之氫氧化鋁 (Al (OH)₃)。除去反應產物

後，有多處表面出現孔洞，形狀類似孔蝕。陽極塊現有尺寸與原有尺寸相較變化不大，除去附著海生物後之剩餘重量仍達原有重量之 70%以上，一般而言，陽極塊之設計使用年限為 20 年，以目前消耗情形推估，除台北港東 2 號碼頭及安平港 3 號、4 號部份，殘存年限為 15 年及 5 至 8 年外（調查時兩港口之陽極塊已各使用 10 年及 13 年，均達到設計年限 20 年之要求），其餘各碼頭殘存年限均大於 20 年以上。

表 13 陽極塊重量量測及殘存年限推估

碼頭編號	平均周長 (cm)	原有重量 (kg)	剩餘重量 (kg)	消耗重量 (kg)	消耗速率 (kg/yr.)	殘存年限 (year)
基隆港西 21 號	86.3 96.3	149.6	96.3 119.8	13.3 37.0	1.3 3.7	>20
基隆港西 22 號	86.0 90.0	149.6	114 121	28.2 35.1	2.8 3.5	>20
蘇澳港駁船	88.3 92.0	149.6	133 137	12.1 16.8	1.2 1.7	>20
蘇澳港 7 號	91.3 97.0	149.6	119.5 146	3.9 30.1	0.4 3.0	>20
台北港東 2 號*	61 73	149.6	80.8	54.2	6.0	15
台北港東 3 號	>90	110.2	102 109	1.2 8.1	0.5 3.2	>20
台中港 30 號 (a)	72 81	137.6	119.5 122.6	8.1 15	1.8 2.6	>20
台中港 30 號 (b)	88 96	110.5	92.5 98.4	12.1 18	1.4 2.1	>20
台中港 99 號	>90	110.5	84.4 97.4	3.7 11.7	0.4 3.5	>20
安平港 3 號	31 63	134.98**	25.6 71.2	63.8 109.4	4.9 8.4	5 8
安平港 4 號	37 75	134.98**	36.6 66.3	68.6 98.4	5.3 7.6	7 8
高雄港 69 號	85 96	134.98**	95.8 121.6	13.4 39.2	1.3 4.0	>20
高雄港 70 號	84 95	134.98**	96.3 119.8	15.2 38.7	1.5 3.9	>20
備註：* 台北港東 2 號陽極塊因受損或脫落，僅量測 1 支。 **不含鐵蕊淨重。						

四、結論與建議

4.1 結論

1. 各檢測碼頭除花蓮港 5 號碼頭陸側背後鋼板樁有穿孔、破洞外，潮汐帶及海中帶之鋼樁表面外觀未發現腐蝕嚴重狀況。
2. 花蓮港 5 號碼頭在海床附近部位，發現數處鋼板樁有開裂及彎曲現象，飛沫帶部位之鋼板樁於陸側（接觸背填土）面，鋼板樁表面銹蝕嚴重，導致多點位置有穿孔、破洞等情形。

3. 花蓮港鋼樁未採取防蝕措施，部份鋼板樁之厚度損失已接近 4.0 mm（最大損失允許值），未來趨勢必須慎重關注。
4. 採用犧牲陽極法作為防蝕措施保護之碼頭，鋼樁之保護電位均小於 -850mV（vs.Cu/CuSO₄ 參考電極），處於防蝕保護狀態。
- 5 鋼樁碼頭建造初期即採防蝕措施保護之鋼樁（例如高雄港 69 號碼頭），其腐蝕速率明顯小於未採保護者（例如基隆港西 21 號碼頭）。
6. 海中帶之鋼樁以犧牲陽極法作為防蝕措施，可達保護鋼樁成效。

4.2 建議

1. 國內商港之鋼樁碼頭部份建造使用時間已超過三、四十年，為確保碼頭結構安全與正常運作，應增加定期檢測次數與建立維護措施。對發生穿孔、破洞或彎曲開裂之鋼板樁，應儘速修護並採適當之防蝕措施，以免損害擴大。
2. 未採防蝕措施之鋼樁碼頭，應全面施加防蝕保護措施。

參考文獻

- 1.林維明、饒正，「基隆港碼頭鋼板樁腐蝕調查研究」，港灣技術研究所，港灣技術研究所專刊第 59 號，1990。
- 2.陳桂清、饒正、柯正龍等，「港灣鋼構造物耐久性研究第三年報告」，港灣技術研究所，81 研(十二)，1992。
- 3.陳桂清、饒正、柯正龍等，「港灣鋼構造物耐久性研究第五年報告」，港灣技術研究所，81 研(十二)，1994。
- 4.饒正、陳桂清、柯正龍，「基隆港碼頭鋼板樁檢測及其維護改善方案研究」，港灣技術研究所，港灣技術研究所專刊第 81 號，1993。
5. 工業技術研究院工業材料研究所，「基隆港碼頭鋼板（管）樁腐蝕調查」（2002）
6. 陳桂清、饒正、柯正龍，「花蓮港外港防波堤及碼頭鋼板樁監測—碼頭鋼板樁岸壁調查檢測」，交通部運輸研究所，CHMT-9101，2002。
7. 陳桂清、饒正、柯正龍，「港灣構造物檢測與耐久性試驗研究」，交通部運輸研究所，2002。

8. 陳桂清、饒正、柯正龍，「港灣構造物檢測與耐久性試驗研究（2/3）」，交通部運輸研究所，2004
- 9.日本運輸省港灣技術研究所，「港灣構造物腐蝕評價手法」，港灣技術資料， No.501， p11， 1984。
- 10.交通部運輸研究所，「港灣構造物設計基準研究-碼頭設計基準研訂及說明草案」， p3-14， 1997。
- 11.石黑健、白石基雄、海輪博之，"鋼矢板工法"，日本，山海堂，1982。
- 12.Mars G. Fontana, "Corrosion Engineering", 3rd ed , McGraw-Hill Book company, U.S.A., 1986.
- 13.F. P Ijsseling, " General Guideline for Corrosion Testing of Materials for Marine Application ", Report of the Europea, Federation of Corrosion Working Party on Marine Corrosion Br. Corros J, Vol.24, Nol, pp.55-78 , 1989.
- 14.Francis, L. LAQUE, "Marine Corrosion Cause and Prevention , pp95-163.", Joho Wiley and Sons, INC.,U.S.A.1975.
- 15.“Swain Meter”, William H. Swain Co., 1989.
- 16.Lg. Hlasamichi Kowara , "Metal Corrosion Damage and Protection Technology", Allerton Press INC., 1989.

港灣(水下)鋼構造物陰極防蝕準則草案介紹

羅俊雄¹ 翁榮洲² 陳桂清³ 饒正³

摘要

港灣鋼構造物常年浸漬於海水或埋在海泥中，極易發生銹蝕破壞現象，而陰極防蝕技術應用於水下鋼構造物上，經歐、美、日等國多年之研究及使用經驗，業已被肯定為防蝕效能極佳的工法。本文將介紹港灣(水下)鋼構造物之陰極防蝕準則草案，作為日後陰極防蝕工法設計與應用時之參考依據。

Guideline of Cathodic Protection for Harbor Steel Structures

J. S. Luo¹ J. C. Oung² K. C. Chen³ C. Rau³

ABSTRACT

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

¹ 工業技術研究院工業材料研究所 研究員，中華民國防蝕工程學會 秘書長

² 工業技術研究院工業材料研究所 研究員 中華民國防蝕工程學會 後補理事

³ 交通部運輸研究所港灣技術研究中心 研究員

一、前言

碼頭依其材料及構造型式可分為：重力式、板樁式、樁基擁壁式、腳柱式與浮式碼頭。重力式(gravity type)碼頭是利用鋼筋混凝土構造之沉箱、混凝土構造之空心塊、方塊或 L 型塊，或使用鋼板樁圍成圓筒狀之井筒，築成壁體，以本身的重量承受碼頭上的載重負荷，並抵抗背後的土壓力以及正面的水壓力與船舶的衝擊力；板樁式(sheet pile type)碼頭則是用板樁深入土中，築成直立岸壁，板樁由拉桿錨碇及板樁前方被動土壓支持以抵抗外力，而板樁的斷面形狀可為 U 型、Z 型、箱型或圓型，材料為鋼材，若岸壁前水深較淺時，亦可利用混凝土製作板樁；樁基擁壁式(quay on pile type)碼頭是上部使用擁壁，下部使用樁基支持的型式，碼頭面板類似橋台為鋼筋混凝土構造，基樁則以鋼筋混凝土、預力混凝土或鋼管樁作為碼頭岸壁之支撐；腳柱式(pier or pile type)則包括棧橋式(landing pier type)碼頭及繫船台(dolphin)，棧橋式碼頭是用樁或各種型式的柱體支持碼頭面，成為與海岸線垂直或平行的半座橋梁結構，而繫船台則是利用樁或柱體築成孤立於海中或連接於碼頭的簡單繫船設備，碼頭面板為鋼筋混凝土構造，基樁則以鋼筋混凝土、預力混凝土或鋼管樁作為碼頭岸壁之支撐；浮式(floating type)碼頭則是用中空的浮箱在海面與陸地相連，以利靠船與裝卸。

由於港灣構造物使用的材料主要為鋼鐵材料(如碳鋼鋼板(管)樁)、鋼筋混凝土(reinforced concrete, RC)及其他相關材料，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；而鋼筋混凝土構造物，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。因此，瞭解鋼板(管)樁、鋼筋混凝土構造物在海洋環境中的腐蝕行為並選擇有效的防蝕方法，以確保構造物之耐久與安全，有其重要與必要性。

陰極防蝕技術應用於港灣構造物上，經歐、美、日等國多年之研究及使用經驗，業已被肯定為防蝕效能極佳之工法。1973 年美國聯邦州公路運輸署(FHWA)，公開宣佈陰極防蝕法為唯一有效解決鋼筋混凝土構造物(橋樑)腐蝕的方法；而針對鋼構造物在海水浸漬的環境中，陰極防蝕技術更公認為有效的防蝕工法，且國外亦有百年使用的經驗。近十年來，國內雖然已開始進行研究與施作，但尚未訂定相關之規範，設計時大都引用國外各種不同規範，然因其適用條件存在差異性，亟需研擬一套符合國內環境需求之港灣構造物陰極防蝕準則或規範，以供日後現有或新建工程陰極防蝕設計、施工及維修時之參考依據。有鑑於此，交通部運輸研究所於民國 90 年完成「港灣

構造物陰極防蝕準則草案訂定（鋼筋混凝土部份）」，但水下鋼構造物部份仍未制訂。為求陰極防蝕規範的完整性，交通部運輸研究所於 92 年再度委託中華民國防蝕工程學會研訂「港灣構造物陰極防蝕準則草案-(鋼構造物部份)」，針對港灣鋼構造物之陰極防蝕技術，彙整國內學者專家、業界與港務局等單位的相關經驗，制訂準則草案，以利日後港灣構造物之維護、管理或新建工程之防蝕設計依據。

二、港灣鋼構造物陰極防蝕準則草案

港灣鋼構造物陰極防蝕準則草案適用於港灣鋼構造物在海水中與海底土中之陰極防蝕工程之設計、安裝、驗收、系統操作與維護管理。全文共分為七章：

第一章 總則

第二章 基本原則

第三章 陰極防蝕系統設計

第四章 材料及裝置

第五章 系統安裝

第六章 系統驗收

第七章 系統維護與管理

今將準則本文內容敘述如下：

第一章 總則

1.1 適用範圍

本準則適用於港灣鋼構造物在海水中與海底土中之陰極防蝕工程之設計、安裝、驗收、系統操作與維護管理。

解說：

- 1.“海水中”係指平均低潮位以下至海床間的區域。
- 2.鋼構造物在水下進行陰極防蝕保護時，亦可參考本準則之規定。
- 3.本準則與陸上鋼構造物之陰極防蝕設計、安裝、驗收、系統操作與維護管理不同，使用時必須注意。

1.2 內容概要

本準則提供執行港灣鋼構造物陰極防蝕工程所須之各項要求及必要遵守規定。

解說：本準則根據圖 1.1 執行一般港灣鋼構造物之陰極防蝕工程，主要工作項目包括總則(第一章)、基本原則(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)、系統驗收(第六章)及系統維護與管理(第七章)等。

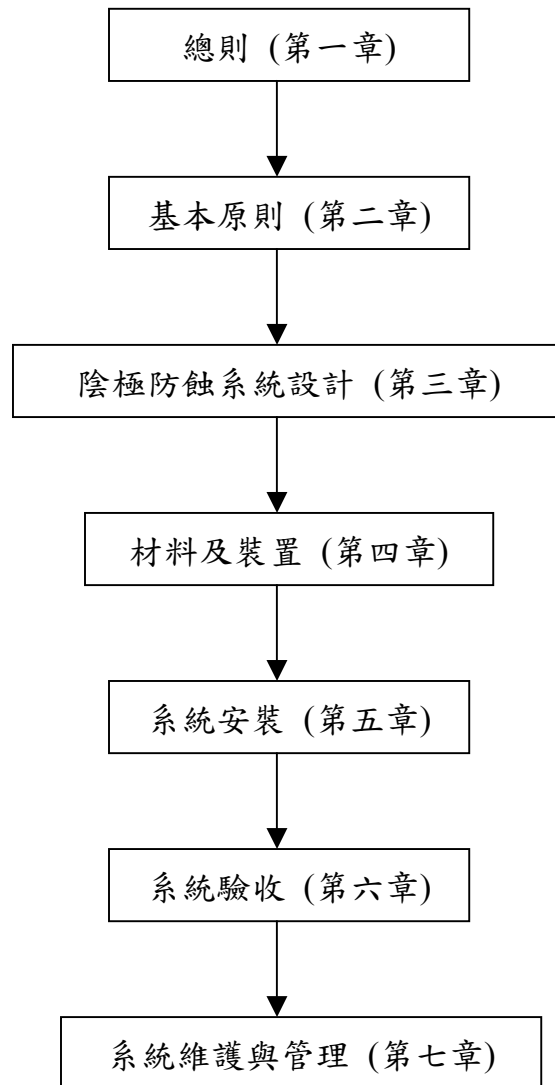


圖 1.1 港灣鋼構造物陰極防蝕工程準則內容

第二章 基本原則

2.1 一般

陰極防蝕工法使用時不限於新建或既有構造物，對於海水中及海底土中的港灣鋼構造物皆有良好的防蝕效果。

2.2 陰極防蝕工法種類

- (1) 犧牲陽極法。
- (2) 外加電流法。

解說：

1. 犧牲陽極法主要是利用電位較負的金屬(如鎂、鋁、鋅等合金)為陽極，與被保護鋼構造物(陰極)在介質(如海水、海底土等)中形成一電化學電池；由於異類金屬相接觸，活性較大(active)之金屬(陽極)會在反應中被消耗，而活性較小(noble)的鋼鐵(陰極)則會被保護。以碼頭鋼板(管)樁之防蝕為例，如圖 2.2.1 所示。
2. 外加電流式陰極防蝕系統主要是利用一外部直流電源供應器來提供陰極與陽極間的電位差。陽極必須接於直流供應器之「+」端，而被保護金屬則接於直流供應器的「-」端。以碼頭鋼板(管)樁為例，電流從陽極經過海水或海底土到達鋼板(管)樁表面，然後經導線回到電源，如此鋼板(管)樁便受到保護，如圖 2.2.2 所示。

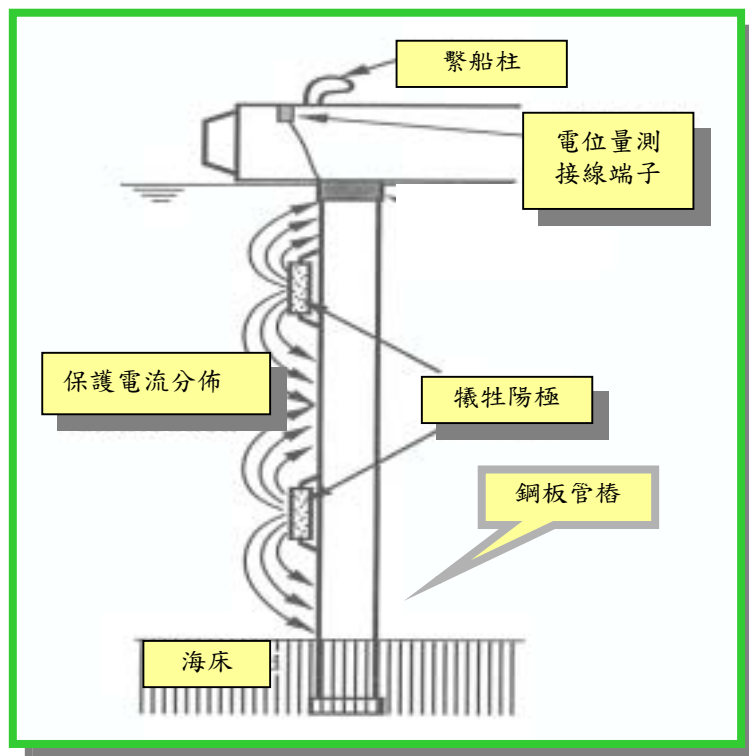


圖 2.2.1 碼頭鋼板(管)樁犧牲陽極法示意圖

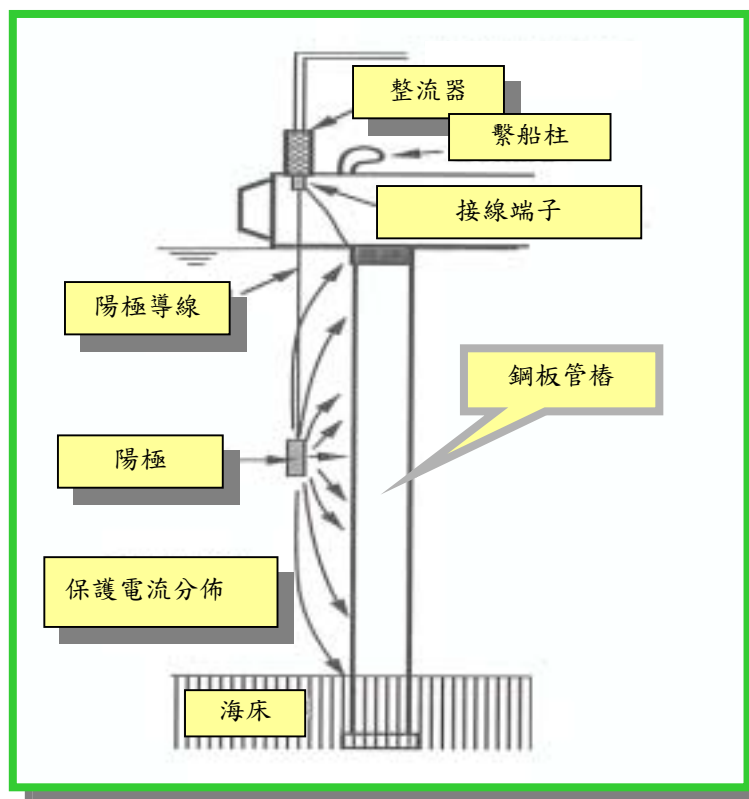


圖 2.2.2 碼頭鋼板(管)樁外加電流法示意圖

3. 犧牲陽極式與外加電流式陰極保護的特性比較如表 2.2.1 所示。

表 2.2.1 犧牲陽極式與外加電流式陰極保護的特性比較

方 式	優 點	缺 點
犧牲陽極方式	1. 裝置簡單、維護需求少。 2. 長期運轉成本較低。 3. 陽極壽命可依防蝕設計決定。 4. 適合小規模獨立性之構造物。 5. 適合於無電源的場所。	1. 提供之驅動電壓及保護電流有限。
外加電流方式	1. 輸出電壓可自由調節。 2. 在河海水交會處或水流速度較大的環境，可有效提供防蝕電流。 3. 適用於比電阻較高的環境。	1. 可能會造成雜散電流腐蝕。

2.3 陰極防蝕系統選擇

陰極防蝕系統的選用，須考慮下列因素：

- (1)保護系統的可靠性。
- (2)對相鄰構造物的影響(雜散電流)。
- (3)保護電流需求量。
- (4)構造物結構的複雜性。
- (5)環境條件。

解說：陰極防蝕系統選定須考慮被保護構造物的尺寸、結構與環境。對於港口碼頭設施，過去多採用外加電流式的陰極保護，但 1980 年代至今，因犧牲陽極材料不斷開發且防蝕性能提高，目前多採用犧牲陽極式陰極保護；但在水質變化較大的河口或是流速較大的區域，外加電流式的陰極保護系統宜併入考慮。

2.4 防蝕電位

港灣鋼構造物陰極防蝕電位之標準值，以海水氯化銀 (Ag/AgCl/seawater) 參考電極量測時，為 -800 mV 或更”負”。

解說：

1. 在陰極保護下，海水中鋼構造物的電位值會隨保護電流的流入而往負值方向移動，與其自然電位值相比較，其值較負。若鋼鐵腐蝕反應停止，則此時之電位稱之為防蝕電位。
2. 氯化銀 (Ag/AgCl) 參考電極有兩種，若電極中的電解液為海水，是為海水氯化銀 (Ag/AgCl/seawater) 參考電極；若電解液為飽和 KCl 溶液，則為飽和氯化銀 (Ag/AgCl/sat'd KCl) 參考電極。
3. 在含氧(aerobic)的環境中，浸漬於海水中鋼構造物的防蝕電位，以海水氯化銀參考電極 (Ag/AgCl/seawater) 量測，電位值須達到 -800 mV 以下，方被判定達到陰極保護標準。在厭氧(anaerobic)環境中(如海底泥中)，鋼構造物的防蝕電位應達到 -900 mV 以下 (vs. Ag/AgCl/seawater)。但最大防蝕電位不宜超過 -1100 mV (vs. Ag/AgCl/seawater)，如表 2.4.1 所示。

表 2.4.1 含氧環境與厭氧環境之防蝕電位標準

鋼鐵材料	最小防蝕電位 mV vs. Ag/AgCl/seawater	最大防蝕電位 mV vs. Ag/AgCl/seawater
含氧環境	-800	-1100
厭氧環境	-900	-1100

4. 參考電極的選用應選擇在環境變化的情況下亦能維持穩定量測狀態的電極。海水中使用的參考電極為海水氯化銀電極 (Ag/AgCl/seawater) 與飽和甘汞電極 (SCE)，而土壤或氯離子含量較低的混凝土中，則多採用飽和硫酸銅電極 (Cu/CuSO₄)。防蝕電位值依量測時使用的參考電極而異，表 2.4.2 為鋼構造物在海水中利用不同參考電極量測時之標準防蝕電位。各種參考電極的電位換算如表 2.4.3 所示。

表 2.4.2 海水中鋼構造物之防蝕保護電位標準

防蝕電位	參考電極
-780 mV vs. SCE	飽和甘汞電極
-800 mV vs. Ag/AgCl/seawater	海水氯化銀電極
-750 mV vs. Ag/AgCl/sat'd KCl	飽和氯化銀電極
-850 mV vs. Cu/CuSO ₄	飽和硫酸銅電極

表 2.4.3 參考電極電位換算

參考電極種類	E ₂₅ (mV vs. S.H.E., at 25°C) 溫度係數		標準防 蝕電位 (mV)	對硫酸銅電 極基準的換 算法
海水氯化銀電極 Ag/AgCl	250	-	-800	加-50 mV
飽和甘汞電極 Hg/Hg ₂ Cl ₂	241	-0.76 mV/°C	-780	加-70 mV
飽和硫酸銅電極 Cu/CuSO ₄	316	+0.90mV/°C	-850	
鋅電極 Zn	約-800	-	+250	加-1100 mV

5. 陰極防蝕效果判定的標準如表 2.4.2 所示，若鋼構造物之電位值較標準防蝕電位值為”負”時，鋼構造物是為保護狀態，若電位值比標準防蝕電位值”正”時，則表示保護不足或防蝕效果不佳。以海水氯化銀參考電極為例，若鋼構造物之電位值較-800 mV 為”負”，鋼構造物為保護狀態，但若值較-800 mV 為”正”，則表示保護不足或防蝕效果不佳，判定案例如圖 2.4.1 所示。

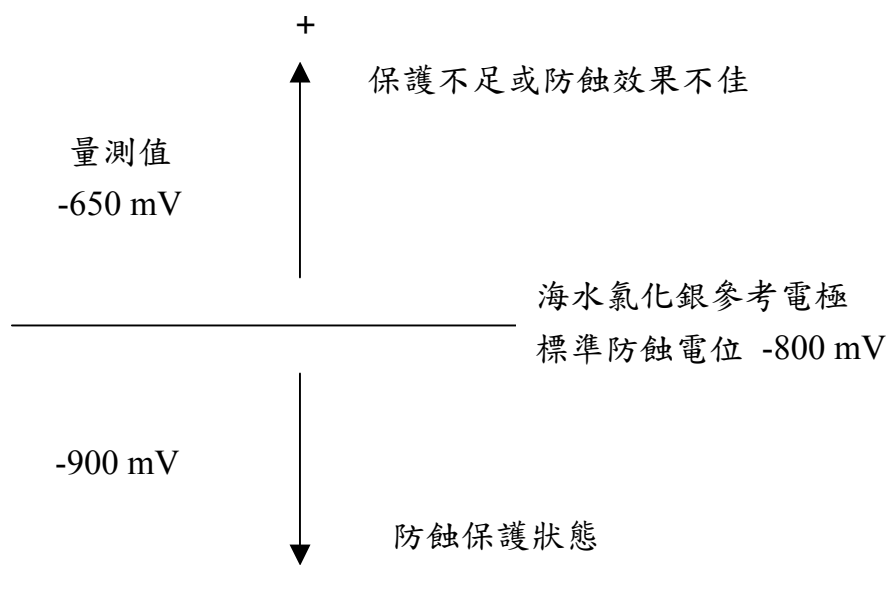


圖 2.4.1 陰極防蝕效果判定

2.5 塗裝被覆鋼構造物防蝕電位

塗裝被覆鋼構造物的防蝕電位應控制在-800 mV ~ -1100 mV (vs. Ag/AgCl/seawater)。

解說：港灣鋼構造物若採用塗裝與陰極防蝕並用的防蝕工法，為防止過大的保護電流導致塗膜劣化或剝離，防蝕電位應控制在-800 ~ -1100 mV (vs. Ag/AgCl/seawater)之間，並選用具有耐陰極剝離及耐久性的塗裝系統。

2.6 裸鋼防蝕電流密度

裸鋼防蝕電流密度的選用因鋼構造物所處的環境而異。

解說：

1. 裸鋼陰極防蝕電流密度的選用宜參考下列標準。

環 境			陰極防蝕
			初期防蝕電流密度(mA/m ²)
一般海域	港灣	海水中	100
		石礫中	50
		海底土中	20
	外海	海水中	150
		石礫中	75
		海底土中	30
特殊海域	污染	海水中	150
		石礫中	75
		海底土中	30
	流速	1 m/s	160
		2 m/s	230
		3 m/s	270

- 2.防蝕電流密度為鋼構造物達到防蝕電位標準或電位更”負”時，每單位面積所需的保護電流。
- 3.防蝕電流密度的選用因鋼構造物所處環境的不同而有所差異；根據海象調查結果及海域腐蝕因子分析來決定防蝕電流密度，進而計算出犧牲陽極的放電量與整流器的容量。影響鋼材腐蝕特性的環境因子有波浪、潮汐、海流、海水比電阻、pH 值、水溫、溶氧量、含鹽量(氯離子濃度)、懸浮泥沙、海生物與污染程度等。
- 4.海水的化學成份、溶氧量或 pH 值會受到河川或其他排水之影響。因此，在水質變化較大或硫化物濃度較高的海域，使用陰極防蝕工法須注意防蝕電流密度選用、保護電流分布與陽極配置。在厭氧性硫酸還原菌存在的環境裏，因硫化物的影響，鋼構造物會產生局部腐蝕，在此條件下，須增加防蝕電流密度。
- 5.污染海域係指河川或各種排水流入海水處。參考日本建設省土木研究所「海域中土木鋼構造物之電氣防蝕設計指針(案)·同解說」，以 $[\text{NH}_4^+]$ (ppm)

+ 1/Cl⁻(%)]之計算值為污染指標，當污染指標值大於 0.8 時為污染海域。

- 6.海水中，鋼構造物所需的防蝕電流密度隨海水流速及溶氧量增加而增大。陰極防蝕初期電流密度依 2.6 節選用。
- 7.石礫堆積的狀況對防蝕效果及陽極壽命有很大的影響。在大石塊堆積的地方，間隙大，須要較大的防蝕電流密度。
- 8.海水中，裸鋼鋼構造物在陰極保護下所需的防蝕電流密度隨時間的增加而下降，最終趨於一定值，此時之電流密度稱為穩定電流密度。主要是因在海水中進行陰極保護時，鋼鐵與海水界面間海水的 pH 值會上升，以致構造物表面有碳酸鈣與氫氧化鎂的沉積物產生，此沉積物稱為鈣質沉積 (calcareous deposits)。鈣質沉積可形成擴散障礙，阻止海水中的溶氧進入金屬表面，降低陰極保護所需之防蝕電流密度。穩定的防蝕電流密度約為初期防蝕電流密度之 50 %。

2.7 塗裝被覆鋼構造物防蝕電流密度

塗裝被覆鋼構造物陰極防蝕初期防蝕電流密度的選用，應考慮塗裝被覆的破損率，標準如下：

$$\text{塗裝} = 20 + i \times B \quad \text{mA/m}^2$$

$$\text{混凝土} = 10 + i \times B \quad \text{mA/m}^2$$

$$\text{有機被覆} = i \times B \quad \text{mA/m}^2$$

i ：防蝕電流密度值，依 2.6 節裸鋼鋼構造物所在環境選用

$$B : \text{破損率} = \frac{\text{塗裝或被覆破損面積}}{\text{全部面積}}$$

解說：用於塗裝被覆鋼構造物之電流密度須考慮被覆層之破損面積；被覆層破損的原因可能為塗膜的劣化或外力的破壞。

2.8 參考規範與標準

本準則參考之相關標準及規範包括：

- (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)“港灣設施之技術基準·同解說(改訂版)”，日本運輸省港灣局監
修，日本港灣協會，1989/2。
- (6)“海域中土木鋼構造物之電氣防蝕設計指針(案)·同解說”，日本
建設省土木研究所，1991/3。
- (7)“Cathodic Protection Design”，DNV RP-B401，Det norske
Veritas，1993。
- (8)“Cathodic Protection, Part1. Code of Practice for Land and Marine
Applications”，BSI-BS 7361，British Standard，1991。
- (9)“Corrosion Control of Steel Fixed Offshore Platforms Associated
with Petroleum Production”，NACE- RP0176，NACE
International，1994。
- (10)陰極防蝕工程手冊，化學工業出版社，中國大陸，1998。

解說：國外陰極防蝕相關規範之比較如下。

名 稱 (制定機關)	運輸省港灣局監修 港灣設施之技術基準・同解說 (改訂版) (1989.2) ((社)日本港灣協會)	海域中土木鋼構造物之電氣防 蝕設計指針(案)・同解說 (1991.3) (日本建設省土木研究所)	RP B401 (1993) Cathodic Protection Design (DNV)	BS 7361 Part 1: 1991 Cathodic Protection (BSI)	RP0176-94(Rev'd Mar. 1994) Corrosion Control of Steel Fixed Offshore Platforms Associated with Petroleum Production (NACE Int'l)																																																																																																																			
防蝕電位	參考電極防蝕電位(單位: mV) 飽和甘汞電極 (SCE) -770 海水氯化銀參考電極 (Ag/AgCl [sw]) -780 飽和硫酸銅參考電極 (Cu/CuSO ₄) -850	環境防蝕電位(SCE) 單位: mV 清淨海域 -770 污染海域 -900 高流速海域 -770 與塗裝並用之防蝕電位(SCE) -770 ~ -1050	環境防蝕電位(Ag/AgCl[sw]) 單位: V 含氧性環境 -0.80 以下 厭氧性環境 -0.90 以下	環境參考電極防蝕電位 單位: V 含氧性環境 Cu/CuSO ₄ -0.80 以下 Ag/AgCl [sw] -0.80 以下 Ag/AgCl [sat'd KCl] -0.75 以下 Zn +0.25 以下 厭氧性環境 Cu/CuSO ₄ -0.95 以下 Ag/AgCl [sw] -0.90 以下 Ag/AgCl [sat'd KCl] -0.85 以下 Zn +0.15 以下	防蝕基準(Ag/AgCl [sw]) 防蝕電位 -0.80 V 以下 與自然腐蝕電位相較, 往負 的方向位移 300 mV 以上 參考電極防蝕電位(單位: V) Cu/CuSO ₄ -0.85 以下 SCE -0.78 以下 Zn +0.25 以下 Ag/AgCl [sat'd KCl] -0.75 以下																																																																																																																			
防蝕電流密度	裸鋼初期防蝕電流密度 海水中 100 mA/m ² 石礫中 50 mA/m ² 海底土中 20 mA/m ² 陸土中 10 mA/m ² 包覆塗裝初期防蝕電流密度 塗裝 20+100S mA/m ² 混凝土 10+100S mA/m ² 有機被覆 100S mA/m ² S:破損率= $\frac{\text{塗裝或被覆破損面積}}{\text{全部面積}}$	防蝕電流密度(mA/m ²) <table><tr><th colspan="3" rowspan="2">環 境</th><th colspan="2">陰極防蝕</th><th>複合陰極防蝕</th></tr><tr><th>初期電流密度</th><th>穩定電流密度</th><th>防蝕電流密度</th></tr><tr><td rowspan="2">一 般</td><td rowspan="2">港 灣</td><td>海水中</td><td>100</td><td>50</td><td rowspan="10">為左邊之值乘 以 P, P 為塗膜 破損或劣化時 之裸鋼露出 率, 約為 0.1 ~ 0.25</td></tr><tr><td>海底土中</td><td>20</td><td>10</td></tr><tr><td rowspan="2">海 域</td><td rowspan="2">外 海</td><td>海水中</td><td>100 x F</td><td>50 x F</td></tr><tr><td>海底土中</td><td>20 x F</td><td>10 x F</td></tr><tr><td rowspan="2">特 殊</td><td rowspan="2">污 染</td><td>海水中</td><td>100 x K</td><td>50 x K</td></tr><tr><td>海底土中</td><td>20 x K</td><td>10 x K</td></tr><tr><td rowspan="3">海 域</td><td rowspan="3">流 速</td><td>1 m/s</td><td>160</td><td>80</td></tr><tr><td>2 m/s</td><td>230</td><td>115</td></tr><tr><td>3 m/s</td><td>270</td><td>135</td></tr></table> F 為波浪海流影響因素, 約為 1.0 ~ 1.5 K 為污染程度, 約為 1.2 ~ 1.5		環 境			陰極防蝕		複合陰極防蝕	初期電流密度	穩定電流密度	防蝕電流密度	一 般	港 灣	海水中	100	50	為左邊之值乘 以 P, P 為塗膜 破損或劣化時 之裸鋼露出 率, 約為 0.1 ~ 0.25	海底土中	20	10	海 域	外 海	海水中	100 x F	50 x F	海底土中	20 x F	10 x F	特 殊	污 染	海水中	100 x K	50 x K	海底土中	20 x K	10 x K	海 域	流 速	1 m/s	160	80	2 m/s	230	115	3 m/s	270	135	典型海域的設計基準 <table><tr><th rowspan="2">海域</th><th rowspan="2">比電阻 (Ω.cm)</th><th rowspan="2">溫度 (oC)</th><th colspan="3">防蝕電流密度 (mA/m²)</th></tr><tr><th>初期</th><th>平均</th><th>穩定</th></tr><tr><td>墨西哥灣</td><td>20</td><td>22</td><td>110</td><td>55</td><td>75</td></tr><tr><td>美國西岸</td><td>24</td><td>15</td><td>150</td><td>90</td><td>100</td></tr><tr><td>庫克灣</td><td>50</td><td>2</td><td>430</td><td>380</td><td>380</td></tr><tr><td>北海北部</td><td>26 ~ 33</td><td>0~ 12</td><td>180</td><td>90</td><td>120</td></tr><tr><td>北海南部</td><td>26 ~ 33</td><td>0~ 12</td><td>150</td><td>90</td><td>100</td></tr><tr><td>秘魯灣</td><td>15</td><td>30</td><td>130</td><td>65</td><td>90</td></tr><tr><td>澳洲</td><td>23 ~ 30</td><td>12~ 18</td><td>130</td><td>90</td><td>90</td></tr><tr><td>巴西</td><td>20</td><td>15~ 20</td><td>180</td><td>65</td><td>90</td></tr><tr><td>非洲西岸</td><td>20 ~ 30</td><td>5~ 21</td><td>130</td><td>65</td><td>90</td></tr><tr><td>印尼</td><td>19</td><td>24</td><td>110</td><td>55</td><td>75</td></tr></table>			海域	比電阻 (Ω.cm)	溫度 (oC)	防蝕電流密度 (mA/m ²)			初期	平均	穩定	墨西哥灣	20	22	110	55	75	美國西岸	24	15	150	90	100	庫克灣	50	2	430	380	380	北海北部	26 ~ 33	0~ 12	180	90	120	北海南部	26 ~ 33	0~ 12	150	90	100	秘魯灣	15	30	130	65	90	澳洲	23 ~ 30	12~ 18	130	90	90	巴西	20	15~ 20	180	65	90	非洲西岸	20 ~ 30	5~ 21	130	65	90	印尼	19	24	110	55	75
	環 境						陰極防蝕		複合陰極防蝕																																																																																																															
初期電流密度				穩定電流密度	防蝕電流密度																																																																																																																			
一 般	港 灣	海水中	100	50	為左邊之值乘 以 P, P 為塗膜 破損或劣化時 之裸鋼露出 率, 約為 0.1 ~ 0.25																																																																																																																			
		海底土中	20	10																																																																																																																				
海 域	外 海	海水中	100 x F	50 x F																																																																																																																				
		海底土中	20 x F	10 x F																																																																																																																				
特 殊	污 染	海水中	100 x K	50 x K																																																																																																																				
		海底土中	20 x K	10 x K																																																																																																																				
海 域	流 速	1 m/s	160	80																																																																																																																				
		2 m/s	230	115																																																																																																																				
		3 m/s	270	135																																																																																																																				
海域	比電阻 (Ω.cm)	溫度 (oC)	防蝕電流密度 (mA/m ²)																																																																																																																					
			初期	平均	穩定																																																																																																																			
墨西哥灣	20	22	110	55	75																																																																																																																			
美國西岸	24	15	150	90	100																																																																																																																			
庫克灣	50	2	430	380	380																																																																																																																			
北海北部	26 ~ 33	0~ 12	180	90	120																																																																																																																			
北海南部	26 ~ 33	0~ 12	150	90	100																																																																																																																			
秘魯灣	15	30	130	65	90																																																																																																																			
澳洲	23 ~ 30	12~ 18	130	90	90																																																																																																																			
巴西	20	15~ 20	180	65	90																																																																																																																			
非洲西岸	20 ~ 30	5~ 21	130	65	90																																																																																																																			
印尼	19	24	110	55	75																																																																																																																			

名 稱 (制定機關)	運輸省港灣局監修 港灣設施之技術基準・同解説 (改訂版) (1989.2) ((社)日本港灣協會)	海域中土木鋼構造物之電氣防 蝕設計指針(案)・同解説 (1991.3) (日本建設省土木研究所)	RP B401 (1993) Cathodic Protection Design (DNV)	BS 7361 Part 1: 1991 Cathodic Protection (BSI)	RP0176-94(Rev'd Mar. 1994) Corrosion Control of Steel Fixed Offshore Platforms Associated with Petroleum Production (NACE Int'l)																																																																												
防蝕電流密度		<table><tr><td rowspan="2">水深 (m)</td><td colspan="5">防蝕電流密度(A/m²)</td></tr><tr><td></td><td>熱帶 (>20℃)</td><td>亞熱帶 (12~20℃)</td><td>溫帶 (7~12℃)</td><td>北極 (<7℃)</td></tr><tr><td rowspan="3">0~30</td><td>初期</td><td>0.15</td><td>0.17</td><td>0.20</td><td>0.25</td></tr><tr><td>平均</td><td>0.07</td><td>0.08</td><td>0.10</td><td>0.12</td></tr><tr><td>穩定</td><td>0.09</td><td>0.11</td><td>0.13</td><td>0.17</td></tr><tr><td rowspan="3">> 30</td><td>初期</td><td>0.13</td><td>0.15</td><td>0.18</td><td>0.22</td></tr><tr><td>平均</td><td>0.06</td><td>0.07</td><td>0.08</td><td>0.10</td></tr><tr><td>穩定</td><td>0.08</td><td>0.09</td><td>0.11</td><td>0.13</td></tr></table> 溫度為年平均之水表面溫度 塗膜損壞率 fc [損壞係數 x 100 (%)] fc (平均)= K1 + K2 x 設計耐用年數/2 fc (最終)= K1 + K2 x 設計耐用年數 塗膜損壞係數 <table><tr><td rowspan="2">分類 水深 (m)</td><td rowspan="2"></td><td colspan="4">塗裝種類</td></tr><tr><td>I</td><td>II</td><td>III</td><td>IV</td></tr><tr><td></td><td></td><td>Primer 1 層 DFT= 50 μm</td><td>Primer 1 層+ 至少 中/上塗 1 層 DFT min.= 150~250μm</td><td>Primer 1 層+ 至少 2 層中/上塗 DFT min.= 300μm</td><td>Primer 1 層+ 至少 中/上塗 3 層 DFT min.= 450μm</td></tr><tr><td></td><td>K1</td><td>0.10</td><td>0.05</td><td>0.02</td><td>0.02</td></tr><tr><td>0~30</td><td>K2</td><td>0.10</td><td>0.03</td><td>0.015</td><td>0.012</td></tr><tr><td>> 30</td><td>K3</td><td>0.05</td><td>0.02</td><td>0.012</td><td>0.012</td></tr></table> DFT:乾膜厚度	水深 (m)	防蝕電流密度(A/m ²)						熱帶 (>20℃)	亞熱帶 (12~20℃)	溫帶 (7~12℃)	北極 (<7℃)	0~30	初期	0.15	0.17	0.20	0.25	平均	0.07	0.08	0.10	0.12	穩定	0.09	0.11	0.13	0.17	> 30	初期	0.13	0.15	0.18	0.22	平均	0.06	0.07	0.08	0.10	穩定	0.08	0.09	0.11	0.13	分類 水深 (m)		塗裝種類				I	II	III	IV			Primer 1 層 DFT= 50 μm	Primer 1 層+ 至少 中/上塗 1 層 DFT min.= 150~250μm	Primer 1 層+ 至少 2 層中/上塗 DFT min.= 300μm	Primer 1 層+ 至少 中/上塗 3 層 DFT min.= 450μm		K1	0.10	0.05	0.02	0.02	0~30	K2	0.10	0.03	0.015	0.012	> 30	K3	0.05	0.02	0.012	0.012	防蝕電流密度 <u>海水中</u> (25Ω.cm) 初期= 100 mA/m ² 穩定=30 ~ 70 mA/m ² <u>海底土中</u> 10 ~ 30 mA/m ² <u>塗裝初期</u> (如 tar epoxy,厚度 =0.2 mm) 5 mA/m ²	
水深 (m)	防蝕電流密度(A/m ²)																																																																																
		熱帶 (>20℃)	亞熱帶 (12~20℃)	溫帶 (7~12℃)	北極 (<7℃)																																																																												
0~30	初期	0.15	0.17	0.20	0.25																																																																												
	平均	0.07	0.08	0.10	0.12																																																																												
	穩定	0.09	0.11	0.13	0.17																																																																												
> 30	初期	0.13	0.15	0.18	0.22																																																																												
	平均	0.06	0.07	0.08	0.10																																																																												
	穩定	0.08	0.09	0.11	0.13																																																																												
分類 水深 (m)		塗裝種類																																																																															
		I	II	III	IV																																																																												
		Primer 1 層 DFT= 50 μm	Primer 1 層+ 至少 中/上塗 1 層 DFT min.= 150~250μm	Primer 1 層+ 至少 2 層中/上塗 DFT min.= 300μm	Primer 1 層+ 至少 中/上塗 3 層 DFT min.= 450μm																																																																												
	K1	0.10	0.05	0.02	0.02																																																																												
0~30	K2	0.10	0.03	0.015	0.012																																																																												
> 30	K3	0.05	0.02	0.012	0.012																																																																												

名 稱 (制定機關)		運輸省港灣局監修 港灣設施之技術基準・同解説 (改訂版) (1989.2) ((社)日本港灣協會)			海域中土木鋼構造物之電氣防 蝕設計指針(案)・同解説 (1991.3) (日本建設省土木研究所)			RP B401 (1993) Cathodic Protection Design (DNV)			BS 7361 Part 1: 1991 Cathodic Protection (BSI)			RP0176-94(Rev'd Mar. 1994) Corrosion Control of Steel Fixed Offshore Platforms Associated with Petroleum Production (NACE Int'l)																																																																																																																																																																																																																																																																																			
犧牲陽極	電位、有效電流量及消耗量	<table><tr><th colspan="2">特 性</th><th colspan="2">Al-Zn-In</th><th>純鋅、鋅合金</th></tr><tr><td colspan="2">比重</td><td colspan="2">2.6 ~ 2.8</td><td>7.14</td></tr><tr><td colspan="2">開路陽極電位 (V vs. SCE)</td><td colspan="2">1.08</td><td>1.03</td></tr><tr><td colspan="2">對鐵的有效電位 (V)</td><td colspan="2">0.25</td><td>0.20</td></tr><tr><td colspan="2">理論發生電量 (A·h/g)</td><td colspan="2">2.87</td><td>0.82</td></tr><tr><td rowspan="3">海水中 1 mA/cm²</td><td>電流效率 (%)</td><td>80</td><td>90</td><td>95</td></tr><tr><td>實際發生電量 (A·h/g)</td><td>2.30</td><td>2.60</td><td>0.78</td></tr><tr><td>消耗量 (kg/A·yr)</td><td>3.8</td><td>3.4</td><td>11.8</td></tr><tr><td rowspan="2">土中 0.03 mA/cm²</td><td>電流效率 (%)</td><td colspan="2">65*</td><td>65</td></tr><tr><td>實際發生電量 (A·h/g)</td><td colspan="2">1.86*</td><td>0.53</td></tr></table> * 依陽極組成成份而有所變異					特 性		Al-Zn-In		純鋅、鋅合金	比重		2.6 ~ 2.8		7.14	開路陽極電位 (V vs. SCE)		1.08		1.03	對鐵的有效電位 (V)		0.25		0.20	理論發生電量 (A·h/g)		2.87		0.82	海水中 1 mA/cm ²	電流效率 (%)	80	90	95	實際發生電量 (A·h/g)	2.30	2.60	0.78	消耗量 (kg/A·yr)	3.8	3.4	11.8	土中 0.03 mA/cm ²	電流效率 (%)	65*		65	實際發生電量 (A·h/g)	1.86*		0.53	<table><tr><th colspan="2">特 性</th><th colspan="2">純鎂、Mg-Mn</th><th>Mg-6Al-3Zn</th></tr><tr><td colspan="2">比重</td><td colspan="2">1.74</td><td>1.77</td></tr><tr><td colspan="2">開路陽極電位 (V vs. SCE)</td><td colspan="2">1.56</td><td>1.48</td></tr><tr><td colspan="2">對鐵的有效電位 (V)</td><td colspan="2">0.75</td><td>0.65</td></tr><tr><td colspan="2">理論發生電量 (A·h/g)</td><td colspan="2">2.20</td><td>2.21</td></tr><tr><td rowspan="3">海水中 1 mA/cm²</td><td>電流效率 (%)</td><td colspan="2">50</td><td>55</td></tr><tr><td>實際發生電量 (A·h/g)</td><td colspan="2">1.10</td><td>1.22</td></tr><tr><td>消耗量 (kg/A·yr)</td><td colspan="2">8.0</td><td>7.2</td></tr><tr><td rowspan="2">土中 0.03 mA/cm²</td><td>電流效率 (%)</td><td colspan="2">40</td><td>50</td></tr><tr><td>實際發生電量 (A·h/g)</td><td colspan="2">0.88</td><td>1.11</td></tr></table>					特 性		純鎂、Mg-Mn		Mg-6Al-3Zn	比重		1.74		1.77	開路陽極電位 (V vs. SCE)		1.56		1.48	對鐵的有效電位 (V)		0.75		0.65	理論發生電量 (A·h/g)		2.20		2.21	海水中 1 mA/cm ²	電流效率 (%)	50		55	實際發生電量 (A·h/g)	1.10		1.22	消耗量 (kg/A·yr)	8.0		7.2	土中 0.03 mA/cm ²	電流效率 (%)	40		50	實際發生電量 (A·h/g)	0.88		1.11	<table><tr><th colspan="2">特 性</th><th>鋁合金</th><th>鋅合金</th><th>Mg 合金</th></tr><tr><td colspan="2">開路電位 (V vs. SCE)</td><td>-1.08 ~ -1.15</td><td>-1.10</td><td>-1.50</td></tr><tr><td colspan="2">陽極效率 (%)</td><td>80 ~ 95</td><td>95</td><td>50</td></tr><tr><td colspan="2">發生電量 (A·h/kg)</td><td>2300 ~ 2750</td><td>780</td><td>1100</td></tr></table>					特 性		鋁合金	鋅合金	Mg 合金	開路電位 (V vs. SCE)		-1.08 ~ -1.15	-1.10	-1.50	陽極效率 (%)		80 ~ 95	95	50	發生電量 (A·h/kg)		2300 ~ 2750	780	1100	<table><tr><th colspan="2">陽極形狀</th><th colspan="2">陽極利用率</th></tr><tr><td colspan="2">Long slender Stand-off</td><td colspan="2">0.90</td></tr><tr><td colspan="2">Long¹ flush-mounted</td><td colspan="2">0.85</td></tr><tr><td colspan="2">Short² flush-mounted</td><td colspan="2">0.80</td></tr><tr><td colspan="2">Bracelet half-shell type</td><td colspan="2">0.80</td></tr><tr><td colspan="2">Bracelet Segmented type</td><td colspan="2">0.75</td></tr></table> 1)陽極長度≥ 4 x 厚度 2)陽極長度< 4 x 厚度					陽極形狀		陽極利用率		Long slender Stand-off		0.90		Long ¹ flush-mounted		0.85		Short ² flush-mounted		0.80		Bracelet half-shell type		0.80		Bracelet Segmented type		0.75		<table><tr><th colspan="2">陽極材料</th><th>陽極電位 (V)</th><th>有效電量 (A·h/kg)</th></tr><tr><td colspan="2">Al-Base</td><td>-1.05</td><td>2000 2500 max.</td></tr><tr><td colspan="2">Zn-Base</td><td>-1.00</td><td>700 750 max.</td></tr></table> 陽極電位 (vs. Ag/AgCl [sw]) 海底土中 <table><tr><th colspan="2">陽極材料</th><th>陽極電位 (V)</th><th>有效電量 (A·h/kg)</th></tr><tr><td colspan="2">Al-Base</td><td>-0.95</td><td rowspan="2">無規定</td></tr><tr><td colspan="2">Zn-Base</td><td>-0.95</td></tr></table> 陽極設計利用率 <table><tr><th colspan="2">陽極形狀</th><th colspan="2">陽極利用率</th></tr><tr><td colspan="2">Long slender Stand-off</td><td colspan="2">0.90</td></tr><tr><td colspan="2">Long¹ flush-mounted</td><td colspan="2">0.85</td></tr><tr><td colspan="2">Short² flush-mounted</td><td colspan="2">0.80</td></tr><tr><td colspan="2">Bracelet half-shell type</td><td colspan="2">0.80</td></tr><tr><td colspan="2">Bracelet Segmented type</td><td colspan="2">0.75</td></tr></table> 1)陽極長度≥ 4 x 厚度 2)陽極長度< 4 x 厚度					陽極材料		陽極電位 (V)	有效電量 (A·h/kg)	Al-Base		-1.05	2000 2500 max.	Zn-Base		-1.00	700 750 max.	陽極材料		陽極電位 (V)	有效電量 (A·h/kg)	Al-Base		-0.95	無規定	Zn-Base		-0.95	陽極形狀		陽極利用率		Long slender Stand-off		0.90		Long ¹ flush-mounted		0.85		Short ² flush-mounted		0.80		Bracelet half-shell type		0.80		Bracelet Segmented type		0.75		<table><tr><th colspan="2">陽極材料</th><th>陽極電位 Volts</th><th>消耗量 kg/A·yr</th></tr><tr><td colspan="2">Mg-Al-Zn</td><td>-1.5 ~ -1.7</td><td>8</td></tr><tr><td colspan="2">Zn-Al-Cd</td><td>-1.05</td><td>12</td></tr><tr><td colspan="2">Zn-Hg</td><td>-1.05</td><td>12</td></tr><tr><td colspan="2">Al-Zn</td><td>-0.97</td><td>4 ~ 8</td></tr><tr><td colspan="2">Al-Zn-Sn</td><td>-1.1 ~ -1.15</td><td>4 ~ 9</td></tr><tr><td colspan="2">Al-Zn-Hg</td><td>-1.05</td><td>約 3.5</td></tr></table> 電位 (vs. Ag/AgCl [sw])					陽極材料		陽極電位 Volts	消耗量 kg/A·yr	Mg-Al-Zn		-1.5 ~ -1.7	8	Zn-Al-Cd		-1.05	12	Zn-Hg		-1.05	12	Al-Zn		-0.97	4 ~ 8	Al-Zn-Sn		-1.1 ~ -1.15	4 ~ 9	Al-Zn-Hg		-1.05	約 3.5	<table><tr><th colspan="2">陽極材料</th><th>陽極電位 Volts</th><th>有效電量 A·h/kg</th><th>消耗量 kg/A·yr</th></tr><tr><td colspan="2">Al-Zn-Hg</td><td>-1.0 ~ ~</td><td>2760 ~ 2840</td><td>3.2 ~ 3.1</td></tr><tr><td colspan="2">Al-Zn-In</td><td>-1.05 ~ -1.05</td><td>2290 ~ 2600</td><td>3.8 ~ 3.4</td></tr><tr><td colspan="2">Al-Zn-Sn</td><td>~ ~</td><td>930 ~ 2600</td><td>9.5 ~ 3.4</td></tr><tr><td colspan="2">Zn(MIL-A -1800lj)</td><td>-1.0 ~ ~</td><td>770 ~ 820</td><td>11.2 ~ 10.7</td></tr><tr><td colspan="2">Mg(H-l Alloy)</td><td>-1.05 ~ -1.05</td><td>1100 ~ ~</td><td>8.0 ~ ~</td></tr><tr><td colspan="2"></td><td>-1.05 ~ -1.4</td><td></td><td></td></tr><tr><td colspan="2"></td><td>~ -1.6</td><td></td><td></td></tr></table>					陽極材料		陽極電位 Volts	有效電量 A·h/kg	消耗量 kg/A·yr	Al-Zn-Hg		-1.0 ~ ~	2760 ~ 2840	3.2 ~ 3.1	Al-Zn-In		-1.05 ~ -1.05	2290 ~ 2600	3.8 ~ 3.4	Al-Zn-Sn		~ ~	930 ~ 2600	9.5 ~ 3.4	Zn(MIL-A -1800lj)		-1.0 ~ ~	770 ~ 820	11.2 ~ 10.7	Mg(H-l Alloy)		-1.05 ~ -1.05	1100 ~ ~	8.0 ~ ~			-1.05 ~ -1.4					~ -1.6		
		特 性		Al-Zn-In		純鋅、鋅合金																																																																																																																																																																																																																																																																																											
		比重		2.6 ~ 2.8		7.14																																																																																																																																																																																																																																																																																											
		開路陽極電位 (V vs. SCE)		1.08		1.03																																																																																																																																																																																																																																																																																											
		對鐵的有效電位 (V)		0.25		0.20																																																																																																																																																																																																																																																																																											
		理論發生電量 (A·h/g)		2.87		0.82																																																																																																																																																																																																																																																																																											
		海水中 1 mA/cm ²	電流效率 (%)	80	90	95																																																																																																																																																																																																																																																																																											
			實際發生電量 (A·h/g)	2.30	2.60	0.78																																																																																																																																																																																																																																																																																											
			消耗量 (kg/A·yr)	3.8	3.4	11.8																																																																																																																																																																																																																																																																																											
		土中 0.03 mA/cm ²	電流效率 (%)	65*		65																																																																																																																																																																																																																																																																																											
實際發生電量 (A·h/g)	1.86*		0.53																																																																																																																																																																																																																																																																																														
特 性		純鎂、Mg-Mn		Mg-6Al-3Zn																																																																																																																																																																																																																																																																																													
比重		1.74		1.77																																																																																																																																																																																																																																																																																													
開路陽極電位 (V vs. SCE)		1.56		1.48																																																																																																																																																																																																																																																																																													
對鐵的有效電位 (V)		0.75		0.65																																																																																																																																																																																																																																																																																													
理論發生電量 (A·h/g)		2.20		2.21																																																																																																																																																																																																																																																																																													
海水中 1 mA/cm ²	電流效率 (%)	50		55																																																																																																																																																																																																																																																																																													
	實際發生電量 (A·h/g)	1.10		1.22																																																																																																																																																																																																																																																																																													
	消耗量 (kg/A·yr)	8.0		7.2																																																																																																																																																																																																																																																																																													
土中 0.03 mA/cm ²	電流效率 (%)	40		50																																																																																																																																																																																																																																																																																													
	實際發生電量 (A·h/g)	0.88		1.11																																																																																																																																																																																																																																																																																													
特 性		鋁合金	鋅合金	Mg 合金																																																																																																																																																																																																																																																																																													
開路電位 (V vs. SCE)		-1.08 ~ -1.15	-1.10	-1.50																																																																																																																																																																																																																																																																																													
陽極效率 (%)		80 ~ 95	95	50																																																																																																																																																																																																																																																																																													
發生電量 (A·h/kg)		2300 ~ 2750	780	1100																																																																																																																																																																																																																																																																																													
陽極形狀		陽極利用率																																																																																																																																																																																																																																																																																															
Long slender Stand-off		0.90																																																																																																																																																																																																																																																																																															
Long ¹ flush-mounted		0.85																																																																																																																																																																																																																																																																																															
Short ² flush-mounted		0.80																																																																																																																																																																																																																																																																																															
Bracelet half-shell type		0.80																																																																																																																																																																																																																																																																																															
Bracelet Segmented type		0.75																																																																																																																																																																																																																																																																																															
陽極材料		陽極電位 (V)	有效電量 (A·h/kg)																																																																																																																																																																																																																																																																																														
Al-Base		-1.05	2000 2500 max.																																																																																																																																																																																																																																																																																														
Zn-Base		-1.00	700 750 max.																																																																																																																																																																																																																																																																																														
陽極材料		陽極電位 (V)	有效電量 (A·h/kg)																																																																																																																																																																																																																																																																																														
Al-Base		-0.95	無規定																																																																																																																																																																																																																																																																																														
Zn-Base		-0.95																																																																																																																																																																																																																																																																																															
陽極形狀		陽極利用率																																																																																																																																																																																																																																																																																															
Long slender Stand-off		0.90																																																																																																																																																																																																																																																																																															
Long ¹ flush-mounted		0.85																																																																																																																																																																																																																																																																																															
Short ² flush-mounted		0.80																																																																																																																																																																																																																																																																																															
Bracelet half-shell type		0.80																																																																																																																																																																																																																																																																																															
Bracelet Segmented type		0.75																																																																																																																																																																																																																																																																																															
陽極材料		陽極電位 Volts	消耗量 kg/A·yr																																																																																																																																																																																																																																																																																														
Mg-Al-Zn		-1.5 ~ -1.7	8																																																																																																																																																																																																																																																																																														
Zn-Al-Cd		-1.05	12																																																																																																																																																																																																																																																																																														
Zn-Hg		-1.05	12																																																																																																																																																																																																																																																																																														
Al-Zn		-0.97	4 ~ 8																																																																																																																																																																																																																																																																																														
Al-Zn-Sn		-1.1 ~ -1.15	4 ~ 9																																																																																																																																																																																																																																																																																														
Al-Zn-Hg		-1.05	約 3.5																																																																																																																																																																																																																																																																																														
陽極材料		陽極電位 Volts	有效電量 A·h/kg	消耗量 kg/A·yr																																																																																																																																																																																																																																																																																													
Al-Zn-Hg		-1.0 ~ ~	2760 ~ 2840	3.2 ~ 3.1																																																																																																																																																																																																																																																																																													
Al-Zn-In		-1.05 ~ -1.05	2290 ~ 2600	3.8 ~ 3.4																																																																																																																																																																																																																																																																																													
Al-Zn-Sn		~ ~	930 ~ 2600	9.5 ~ 3.4																																																																																																																																																																																																																																																																																													
Zn(MIL-A -1800lj)		-1.0 ~ ~	770 ~ 820	11.2 ~ 10.7																																																																																																																																																																																																																																																																																													
Mg(H-l Alloy)		-1.05 ~ -1.05	1100 ~ ~	8.0 ~ ~																																																																																																																																																																																																																																																																																													
		-1.05 ~ -1.4																																																																																																																																																																																																																																																																																															
		~ -1.6																																																																																																																																																																																																																																																																																															

第三章 陰極防蝕系統設計

3.1 陰極防蝕系統選擇

陰極防蝕工法有犧牲陽極式與外加電流式。針對防蝕效果考量，只要維持防蝕電位，任何一種工法皆可採用。

解說：

1. 港灣鋼構造物陰極防蝕工法多採用犧牲陽極方式，但在河川或各種排水流入海水或是流速較大的環境，宜考慮使用外加電流方式。
2. 陰極防蝕系統選擇流程如圖 3.1.1 所示。

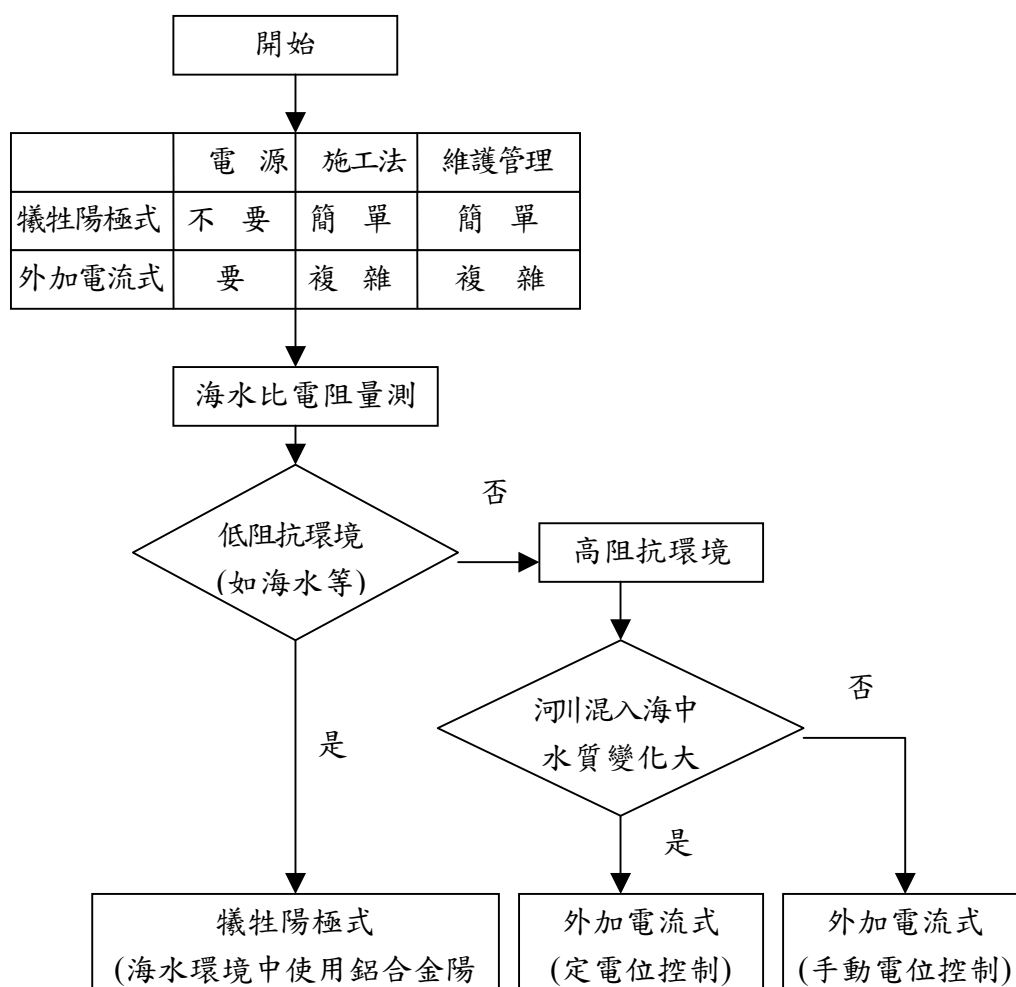


圖 3.1.1 陰極防蝕系統選擇流程圖

3.2 犧牲陽極式

3.2.1 設計基本方針

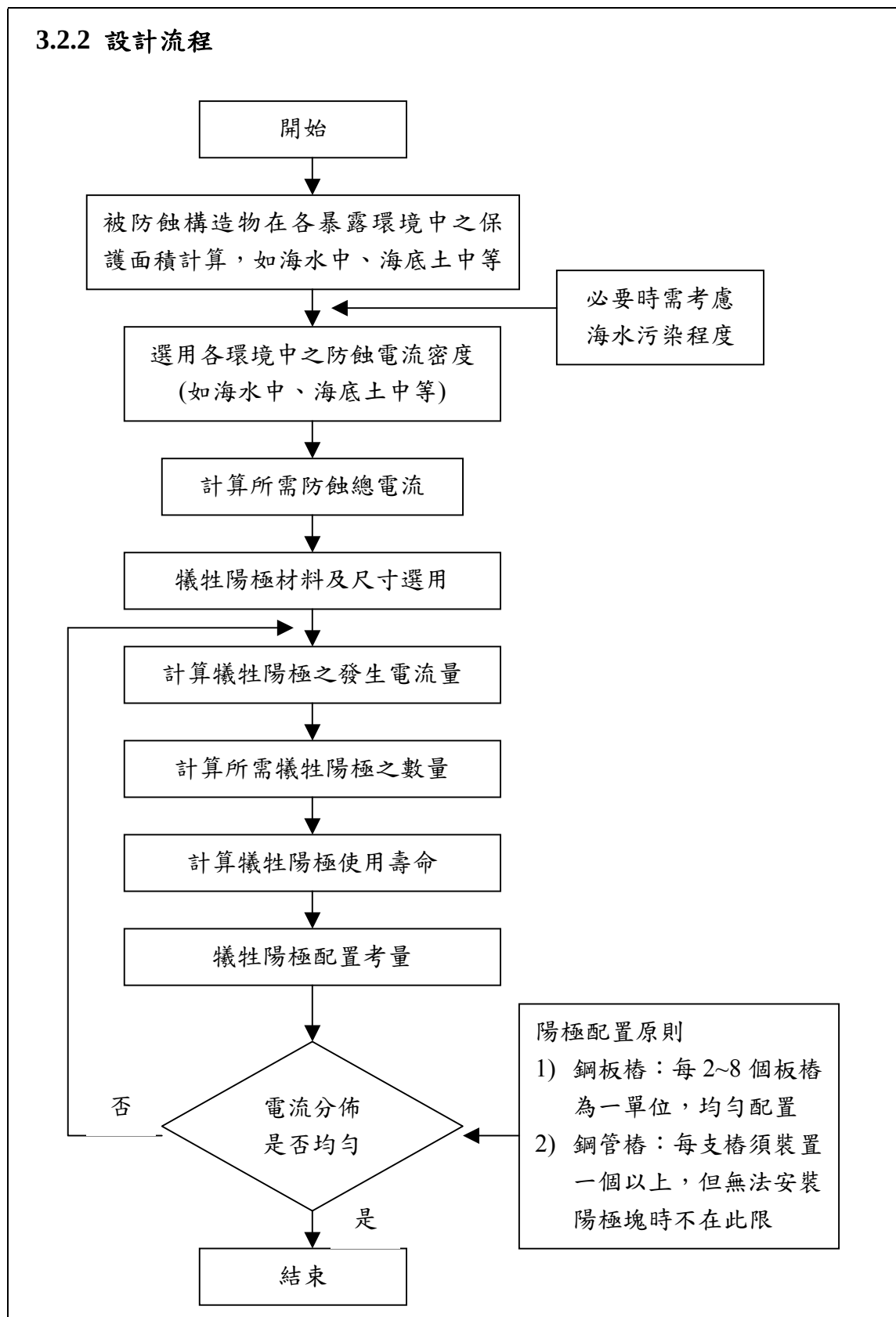
設計時須考慮下列事項，以確保防蝕電位。

- (1)環境條件、被保護構造物表面狀態及防蝕電流密度。
- (2)調查被保護構造物所在環境的海水比電阻值。
- (3)陽極材料與性能。
- (4)陽極配置。
- (5)維護管理。

解說：

1. 防蝕電流密度的選定須考慮被保護構造物所處環境並依據 2.6 節與 2.7 節決定之。海水比電阻將會影響犧牲陽極的放電量，設計前必須進行現地調查。
2. 犧牲陽極材料有鋁合金、鋅合金、鎂合金等陽極材料，選用標準以陽極特性及適合環境考慮。鋁合金陽極單位質量的發生電量大，有優越的經濟性，適用於海水、海底土中。鋅合金陽極，電流效率高、消耗率低，適用於溫水及海水等環境。鎂合金陽極適用於高阻抗的環境，在海水中消耗速率快，若需使用，須特別考慮陽極使用年限。
3. 犧牲陽極應均勻的佈置於被保護結構設施上，且第一塊犧牲陽極頂端應低於平均低潮位下 30 cm。對鋼板樁而言，原則上以每 2~8 支板樁為一單位，配置在鋼板樁凸部；若不得已需安裝在凹部，則電位分布不均的問題宜加注意。對鋼管樁而言，每支樁須裝置一塊以上；但無法安裝陽極塊時不在此限，在此條件下，各鋼管樁之間須使用適當尺寸的鋼條或導線相連接，使被保護體電連通。
4. 鋼板樁間的縫隙，不須使用導線使之電連通，因縫隙間的海水會使陰極防蝕迴路導通。犧牲陽極式的陰極保護，驅動電壓低，迴路電阻大(鋼板樁與鋼管樁間接觸不完全)，以致迴路之電流小，無雜散電流腐蝕之虞。
5. 固定位置之電位測試端子配置，以 50 m ~ 100 m 間隔為原則。若鋼管樁相互間無電連通，則固定位置電位端子所測得之電位，為端子焊接之單樁電位。

3.2.2 設計流程



3.2.3 保護面積計算

港灣設施保護面積包括海水中面積與海底土中面積。

解說：

1. 浸漬於海水中鋼構造物的長度原則上是以平均低潮位(M.L.W.L.)以下至海床間的區域計算。但若考慮水深測量的誤差，必要時可以平均潮位(M.W.L.)以下至海底土間的區域計算。示意圖如圖 3.2.3.1 所示。

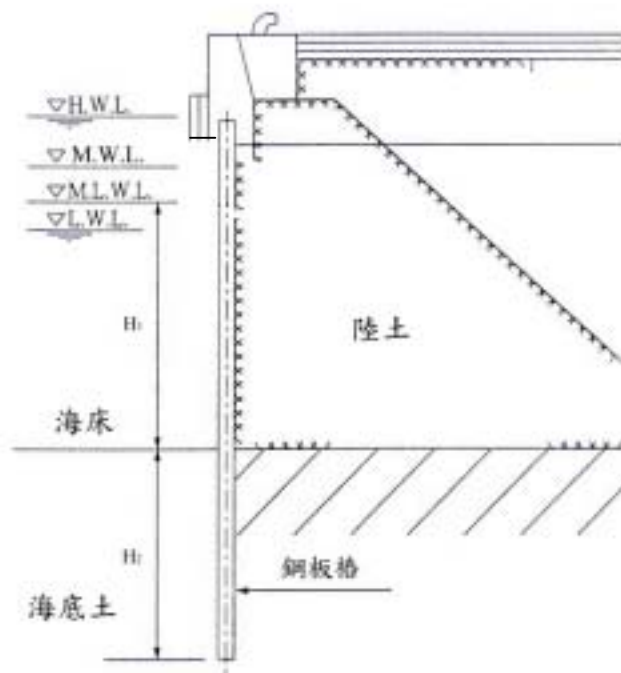


圖 3.2.3.1 海水中鋼板樁長度計算示意圖

2. 依鋼樁的型式，計算保護面積：

(1)鋼板樁

$$\text{海水中面積 } A_{s1} = n \times L \times H_1$$

式中， A_{s1} =鋼板樁海水中面積， m^2

L =鋼板樁岸壁長度， m

H_1 =海水中長度， m

n =鋼板樁周邊係數(依鋼板樁型式而異，如表 3.2.3.1 所示)

$$\text{海底土中面積 } A_{s2} = n \times L \times H_2$$

式中， A_{s2} =鋼板樁海土中面積， m^2

L =鋼板樁岸壁長度， m

H_2 =海底土中長度， m

n =鋼板樁周邊係數

(2) 鋼管樁

$$\text{海水中面積 } A_{p1} = \pi D \times H_1 \times N$$

式中， A_{p1} =鋼板管海水中面積， m^2

D =鋼管樁直徑， m

H_1 =海水中長度， m

N =鋼管樁支數

$$\text{海底土中面積 } A_{p2} = \pi D \times H_2 \times N$$

式中， A_{p2} =鋼板樁海土中面積， m^2

D =鋼管樁直徑， m

H_2 =海底土中長度， m

N =鋼管樁支數

表 3.2.3.1 日本各類鋼板樁周邊係數(依鋼板樁型式而異)

種 類				係數	種 類				係數
C 型鋼板樁	YSP-I		I	1.25	N 型鋼板樁	YSPZ-14	Z14		1.6
	YSP-II	NKSP-II	II	1.35		YSPZ-25	FSPZ-25	Z25	1.8
	YSP-III	NKSP-III	III	1.45		NKSPZ-25	KSPZ-25		
	YSP-IV	NKSP-IV	IV	1.6		YSPZ-32	FSPZ-32	Z32	1.85
	YSP-V		V	1.65		NKSPZ-32	KSPZ-32		
	YSP-U ₅	NKSP- U ₅	U ₅	1.3		YSPZ-38	FSPZ-38	Z38	1.9
	YSP-U ₉	NKSP- U ₉	U ₉	1.4		NKSPZ-38	KSPZ-38		
	YSP-U ₁₅	NKSP- U ₁₅	U ₁₅	1.55		YSPZ-45	FSPZ-45	Z45	1.95
	YSP-U ₂₃	NKSP- U ₂₃	U ₂₃	1.7		NKSPZ-45	KSPZ-45		
C 型鋼板樁	FSP-II	NKSP-II _(L)	II	1.55	H 型鋼板樁	YSP-B66			1.2
	KSP-II	SKSP-II				YSP-B74			
						KSP-H			
	FSP-III	NKSP-III _(L)	III	1.65	直線型鋼板樁	YSP-F	FSP-F		1.1
	KSP-III	SKSP-III				KSP-F			
	FSP-IV	NKSP-IV _(L)	IV	1.85		YSP-F _A	FSP- F _A	F _A	1.1
	KSP-IV	SKSP- IV				KSP- F _A			
	FSP-I _A	NKSP- I _A	I _A	1.4	鋼管板	YSP- F _x	KSP- F _x	F _x	1.1
	KSP- I _A	SKSP- I _A							
	FSP-II _A	NKSP-II _A	II _A	1.6					1.57
	KSP-II _A	SKSP-II _A							
	FSP-III _A	NKSP-III _A	IV _A	1.7					
	KSP-III _A	SKSP-III _A							
	FSP-IV _A	NKSP-IV _A	IV _A	1.8					
	KSP- IV _A	SKSP- IV _A							
	FSP-V _L	NKSP-V _L	V _L	1.7					
	KSP-V _L	SKSP-V _L							
	FSP-VI _L	NKSP-VI _L	VI _L	1.75					
	KSP-VI _L	SKSP-VI _L							

資料來源：「海域中土木鋼構造物之電氣防蝕設計指針(案)·同解說」，日本建設省土木研究所，1991。

3.2.4 防蝕電流計算

$$I = \sum_i i_i \times A_i$$

式中，I=所需防蝕總電流，mA

i_i =各環境採用之防蝕電流密度(初期防蝕電流密度)，mA/m²

A_i =海水中與海底土中之保護構造物面積，m²

解說：

1. 防蝕電流密度的選用因構造物所在的環境而不同，依據 2.6 節與 2.7 節決定。

(1) 裸鋼

環 境			陰極防蝕
			初期防蝕電流密度(mA/m ²)
一般海域	港灣	海水中	100
		石礫中	50
		海底土中	20
	外海	海水中	150
		石礫中	75
		海底土中	30
特殊海域	污染	海水中	150
		石礫中	75
		海底土中	30
	流速	1 m/s	160
		2 m/s	230
		3 m/s	270

(2) 塗裝被覆鋼構造物

$$\text{塗裝} = 20 + i \times B \quad \text{mA/m}^2$$

$$\text{混凝土} = 10 + i \times B \quad \text{mA/m}^2$$

$$\text{有機被覆} = i \times B \quad \text{mA/m}^2$$

i ：防蝕電流密度值，依 2.6 節裸鋼鋼構造物所在環境選用

$$B: \text{破損率} = \frac{\text{塗裝或被覆破損面積}}{\text{全部面積}}$$

3.2.5 犧牲陽極發生電流量計算

為確保選用之犧牲陽極可有效供給陰極防蝕所需之保護電流，犧牲陽極之發生電流量必須計算。

$$I_s = \frac{E}{R_a} \times 100$$

式中， I_s =每塊犧牲陽極的發生電流，mA

E =有效電位差(驅動電壓)，V，鋅合金陽極為 0.2 V，鋁合金陽極為 0.25 V

R_a =犧牲陽極對海水的電阻， Ω

解說：犧牲陽極對海水電阻之計算，依犧牲陽極的形狀，如下：

(1)長條棒狀陽極^[1](與被保護構造物表面距離 ≥ 30 cm，且 $L \geq 4r$)

$$R_a = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{r} - 1 \right)$$

式中， R_a =犧牲陽極對海水的電阻， Ω

ρ =海水比電阻， $\Omega \cdot \text{cm}$ ，視海域而定

L =陽極長度，cm

r =陽極半徑(或陽極等效半徑)，cm

若陽極非圓柱體，則陽極等效半徑 r

$$r = \sqrt{\frac{C}{\pi}}$$

C =陽極的斷面面積， cm^2

(2)長條棒狀陽極^[2](與被保護構造物表面距離 ≥ 30 cm，且 $L < 4r$)

$$R_a = \frac{\rho}{2 \times L} \left\{ \ln \left[\frac{2L}{r} \left(1 + \sqrt{1 + \left(\frac{r}{2L} \right)^2} \right) \right] + \frac{r}{2L} - \sqrt{1 + \left(\frac{r}{2L} \right)^2} \right\}$$

式中， R_a =犧牲陽極對海水的電阻， Ω

ρ =海水比電阻， $\Omega\cdot\text{cm}$

L =陽極長度， cm

r =陽極半徑(或陽極等效半徑)， cm

若陽極非圓柱體，則陽極等效半徑 r

$$r = \sqrt{\frac{C}{\pi}}$$

C =陽極斷面面積， cm^2

(3) 板狀陽極^[2]

$$R_a = \frac{\rho}{2S}$$

式中， R_a =犧牲陽極對海水的電阻， Ω

ρ =海水比電阻， $\Omega\cdot\text{cm}$

S =陽極長度與寬度的平均值， cm

(4) 其他形狀之陽極^[2]

$$R_a = \frac{0.315\rho}{\sqrt{A}}$$

式中， R_a =犧牲陽極對海水的電阻， Ω

ρ =海水比電阻， $\Omega\cdot\text{cm}$

A =陽極的表面積， cm^2

註：

- [1] Dwight, H.B., "Calculation of Resistance to Ground", Electrical Engineering 55, 12 (1936): pp. 1319-1328.
- [2] McCoy, J.E., "Corrosion Control by Cathodic Protection", Transactions of the Institute of Marine Engineering, 82, No. 6, June, 1970, pp. 82-86.

3.2.6 犧牲陽極用量計算

浸入海水中(或海土中)所需犧牲陽極的塊數

$$N_i = \frac{i_i \times A_i}{I_g}$$

式中， N_i =浸入海水中(或海土中)被保護部位所需犧牲陽極的塊數

i_i =各環境採用之防蝕電流密度(初始極化防蝕電流密度)，mA/m²

A_i =海水中(或海土中)之保護構造物面積，m²

I_g =每塊犧牲陽極的發生電流，mA

所需犧牲陽極總塊數

$$N = (\sum N_i) \times (1 + \text{餘裕係數})$$

解說：餘裕係數為 10% ~ 20%。

3.2.7 陽極壽命計算

$$L = \frac{N \times W \times u}{Q \times I_{\text{avg}}}$$

式中， L =陽極使用壽命，year (yr)

N =被保護設施所需陽極總塊數

W =每塊陽極原始重量，kg

Q =陽極消耗量，kg/A·yr

I_{avg} =構造物在保護期間內之平均保護電流，A；通常約為極化保護電流密度計算出總電流之 0.5 ~ 0.55 倍，在污染海域中約為 0.67 倍

u =陽極利用率，長條棒狀陽極為 0.90 ~ 0.95，鐲式(Bracelet)陽極為 0.75 ~ 0.80，其他形狀為 0.75 ~ 0.90

3.2.8 犧牲陽極配置考量

犧牲陽極應均勻的佈置於被保護結構設施上，且第一塊犧牲陽極頂端應低於平均低潮位下 30 cm。對鋼板樁而言，原則上以每 2~8 支板樁為一單位，配置均勻。對鋼管樁而言，每支樁須裝置一塊以上；但無法安裝陽極塊時不在此限，在此條件下，各鋼管樁之間須使用適當尺寸的鋼條或導線相連接，使被保護體電連通。

3.3 外加電流式

3.3.1 設計基本方針

設計時須考慮下列事項，以確保防蝕電位。

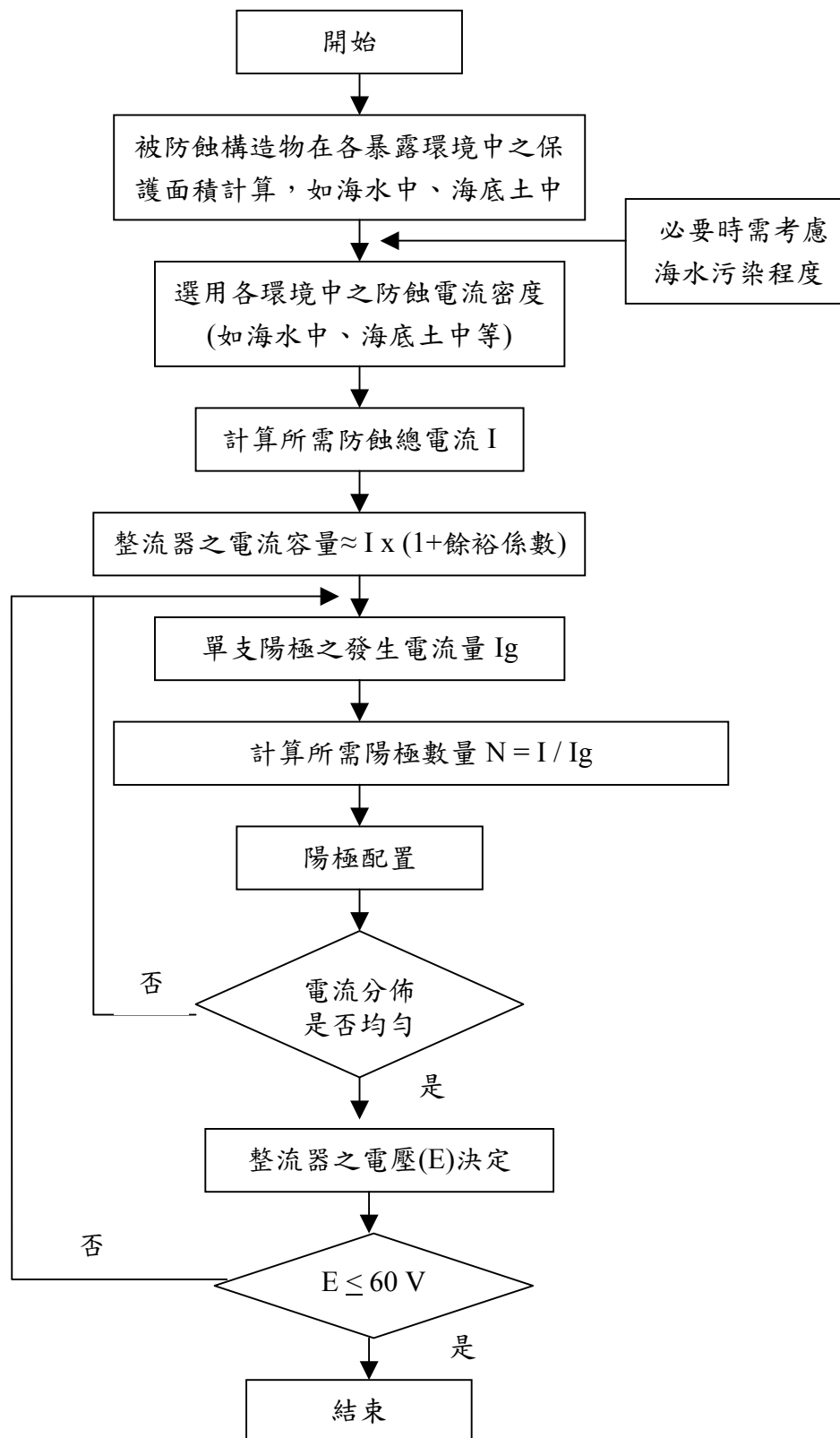
- (1) 環境條件、被保護構造物表面狀態及防蝕電流密度。
- (2) 陽極材料與性能。
- (3) 陽極配置。
- (4) 配線安裝須符合國內電力相關法規。
- (5) 電源電壓。
- (6) 被保護構造物的電連通性。
- (7) 雜散電流腐蝕之影響。

解說：

1. 防蝕電流密度的選用須考慮被保護構造物所處環境並依據 2.6 節與 2.7 節決定。
2. 外加電流式陰極保護所使用的陽極材料與犧牲陽極式不同，多採用不溶性或消耗率低的合金金屬。在海水中，使用鈦鍍白金(platinized titanium)或鈦基材外覆金屬氧化物(titanium coated with the mixture of noble and non-noble metal oxides)等陽極。
3. 陽極配置間隔以被保護構造物能獲得均等電位分布為原則。
4. 直流電源之電源電壓應在 60 V 以下。使用設備若有 CNS 規範者必須符合 CNS 規範性能。

5. 雜散電流是指電流流動路徑並非原先規劃的電路迴路。假若陽極與被防護構造物間有其他金屬結構時，電流將沿該金屬傳遞，當電流離開金屬再度進入海水中時，在電流離開的金屬表面會有局部腐蝕產生，這現象稱為雜散電流腐蝕。在外加電流式陰極保護下，電路迴路的電流較犧牲陽極式大且迴路電壓高，在鋼板樁或鋼管樁間接觸不完全的狀態下，可能會發生雜散電流腐蝕。為防止雜散電流腐蝕，鋼板樁或鋼管樁間須使用適當尺寸的鋼條或導線相連接，使被保護體電連通。
6. 固定位置之電位測試端子配置，以 50 m ~ 100 m 間隔為原則，並考慮維護管理之便易性。

3.3.2 設計流程



3.3.3 保護面積計算

港灣設施保護面積包括海水中面積與海底土中面積。

解說：與 3.2.3 節相同。

3.3.4 防蝕電流計算

$$I = \sum_i i_i \times A_i$$

式中，I=所需防蝕總電流，mA

i_i =各環境採用之防蝕電流密度(初始防蝕電流密度)，mA/m²

A_i =海水與或海土中之保護構造物面積，m²

解說：與 3.2.4 節相同。

3.3.5 整流器之電流容量

整流器之電流容量=I x (1+餘裕係數)。

解說：餘裕係數為 10%~20%。

3.3.6 陽極之發生電流量

參考由原廠提出之陽極性能技術資料。

3.3.7 單一整流器設計輸出電壓計算

$$E = E_a + E_c + E_w + e \leq 60$$

式中， E =單一整流器輸出最低電壓，V

E_a =陽極對海水電阻產生之電壓降(=所需防蝕總電流 x 陽極對海水電阻)，V

E_c =被保護構造物電壓降，V，(在海水中 $E_c=0$)

E_w =迴路導線之電壓降，V

e =水的分解電壓，V，(在海水中 $e = 2.0$ V)

3.3.8 整流器之電壓容量

$$E_{out} = E \times (1 + \text{餘裕係數})$$

式中， E_{out} =單一整流器設計輸出電壓，V

E =單一整流器輸出最低電壓，V

x =餘裕係數

解說：餘裕係數為 10% ~ 20%。

第四章 材料及裝置

4.1 犧牲陽極式

4.1.1 陽極材料要求

- (1) 具有相當的活性，且穩定之金屬材料。
- (2) 放電時陽極極化小，鈍化不會產生；溶解均勻，反應產物易脫落。
- (3) 必須具有較高的電流效率，即實際發生電量與理論發生電量的百分比數要大。
- (4) 電化學當量高，即單位重量的放電量大。
- (5) 腐蝕產物無毒性，不污染環境。

解說：國外犧牲陽極使用材料，如 2.8 節解說所示。

4.1.2 陽極性能檢驗

依據 CNS 13521「陰極防蝕用犧牲陽極性能檢驗法」之步驟，採集工程現址的水表海水，進行犧牲陽極性能檢驗，項目包括：

- (1) 實際發生電量(A·h/kg)
- (2) 電流效率(%)
- (3) 消耗率(kg/A·yr)
- (4) 陽極開路與閉路電位

解說：犧牲陽極的防蝕性能(依陽極材料組成成份而異)，取決於陽極自身的發生電量(A·h/kg)，而發生電量又可分為理論與實際發生電量，當實際發生電量與理論發生電量的百分比數大時，表示電流效率良好。依據 CNS 13521，檢驗項目：

$$1. \text{ 實際發生電量 (A.h/kg)} = \frac{\text{電量計所得之電量 (A.h)}}{\text{陽極減少之重量 (g)}} \times 1000$$

2. 電流效率 (%) = $\frac{\text{電量計所得之電量 (A.h)} \times 100\%}{\text{陽極減少之重量 (g)} \times \text{理論發生電量 (A.h/kg)}}$
3. 消耗率 (kg/A.yr) = $\frac{1}{\text{實際發生電量 (A.h/kg)}} \times 365 \times 24(\text{h/yr})$
4. 陽極開路電位即犧牲陽極在電解液中之自然腐蝕電位。閉路電位亦稱為工作電位，為犧牲陽極在電解液中與金屬構造物聯結時之犧牲陽極電位。

4.1.3 陽極電流效率

依據 CNS 13521 檢驗，鋁合金之犧牲陽極電流效率至少須達到 90% 之標準。

解說：鋁合金陽極塊之陽極性能宜參考下列標準。

項 目	標 準
陽極開路電位(-V)	(S.C.E.) ≥ 1.10 Cu/CuSO ₄ ≥ 1.15 Ag/AgCl/Seawater ≥ 1.10
有效電壓 (V)	≥ 0.25
理論發生電量 (A.h/kg)	2900 $\pm$ 2%
電流效率 (%)	> 90
有效電量 (A.h/kg)	> 2600
消耗率 (kg/A.yr)	< 3.40

4.2 外加電流式

4.2.1 陽極材料

應選擇消耗率低且具耐久性之合金金屬。

解說：外加電流式陽極材料之消耗率與工作電流密度依材料組成而異，摘錄日本「港灣鋼構造物防蝕、補修手冊(改訂版)」所列，如表 4.2.1 所示。

表 4.2.1 外加電流式陽極材料性能

種 類	消耗率 kg/A·yr	工作電流密度 mA/m ²		
		海 水	淡 水	土 壤
高矽鐵(Fe-14.5% Si)	0.25 ~ 1.0	-	26	11
高矽鉻鐵(Fe-14.5% Si-4.5% Cr)	0.25 ~ 1.0	26	26	11
鉛合金(Pb-2% Ag)	0.01	500	不適	不適
鉛合金(Pb-6% Sb-1% Ag)	0.09	200	不適	不適
鍍鈦白金(Pt coated Ti)	1.0 E-6	400		
鍍鈮白金(Pt coated Nb)	1.0 E-6	400		80
鍍鉭白金(Pt coated Ta)	1.0 E-6	400		
黑鉛	0.1 ~ 1.0	10 ~ 30	8	8 ~ 11
氧化鐵	0.005 ~ 0.06	< 120	< 120	< 60
碳鋼	5.8 ~ 9.1	無限制	無限制	5
鈦為基材外覆金屬氧化物	0.06	600		

料來源：日本「港灣鋼構造物防蝕、補修手冊(改訂版)」，1997

4.2.2 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。

4.2.3 整流器

採用外加電流式陰極保護系統時，整流器的總輸出電流值和電壓量應滿足陰極防蝕系統所須的電流量；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：

1. 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。

2. 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) 每一輸入和輸出單元應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。

有鑑於陰極防蝕系統接線錯誤將會造成鋼構造物的嚴重腐蝕，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“-鋼構造物”。

3. 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. 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。

4.2.4 導線

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。

解說：

1. DC 導線

DC 導線為整流器正端至陽極與整流器負端至鋼構造物間的導線。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。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。

2. 參考電極導線

參考電極使用的導線應符合第 4.2.4 節的規定。

3. 導線保護

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 管或鋼套管。進出導管的線路最終須由接線箱連接。

4.3 數位伏特計

陰極保護系統之防蝕效果須使用數位伏特計與參考電極來量測鋼構造物電位。

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

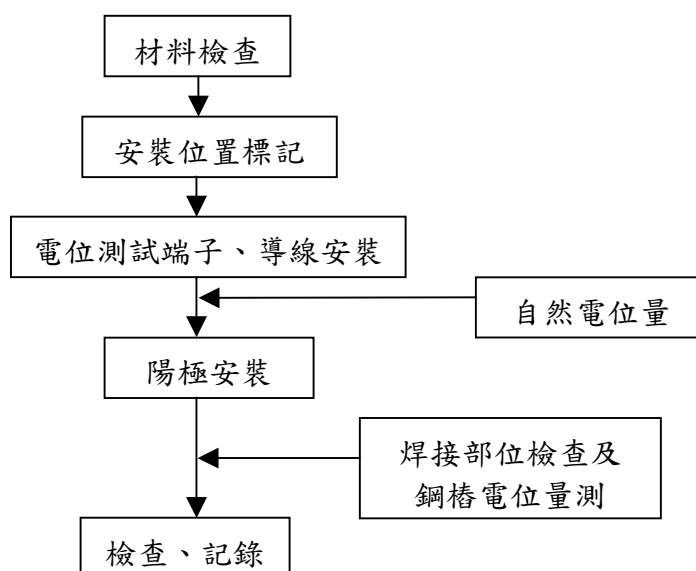
4.4 參考電極

參考電極通常採用海水氯化銀(Ag/AgCl/seawater)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。

第五章 系統安裝

5.1 犧牲陽極式

犧牲陽極可採用水中焊接法或螺栓固定法安裝。施工步驟如下：



5.1.1 材料檢查

施工前須進行材料數量確認，尺寸、質量之抽樣檢查。

解說：施工前進行之檢查作業包括材料數量確認，尺寸、質量抽樣檢查；各陽極的形狀尺寸容許範圍在 $\pm 5\%$ 以內、質量容許範圍在 2%以內。抽檢數量宜為 50%。

5.1.2 安裝位置標記

依照圖面設計，於鋼構造物上標示陽極與電位測試端子安裝位置。

解說：

1. 犧牲陽極應均勻的佈置於被保護結構設施上，且第一塊犧牲陽極頂端應低於平均低潮位下 30 cm。對鋼板樁而言，原則上以每 2~8 支板樁為一單位，配置在鋼板樁凸部；若不得已需安裝在凹部，則電位分布不均的

問題應加注意。對鋼管樁而言，每支樁須裝置一塊以上；但無法安裝陽極塊時不在此限，在此條件下，各鋼管樁之間須使用適當尺寸的鋼條或導線相連接，使被保護體電連通。

2. 固定位置電位測試端子配置，以 50 m ~ 100 m 間隔為原則。

5.1.3 電位測試導線安裝

將導線焊接至鋼構造物上，並在焊接處加以密封防水。

5.1.4 陽極安裝

在標示的位置安裝陽極。安裝時，以起重機或人力方式將犧牲陽極吊至設計水深，以水中焊接或螺栓固定方式將陽極固定於鋼構造物上。焊接前須將焊接處表面的海生物與浮鏽去除，焊接後須將殘渣去除，目視檢查焊接狀況並照相確認之。

5.1.5 電位量測

將鋼構造物的電位測試導線接於電位計“+”端，海水氯化銀 (Ag/AgCl/seawater) 參考電極接於電位計“-”端，量測電位。

解說：如圖 5.1.5 所示。

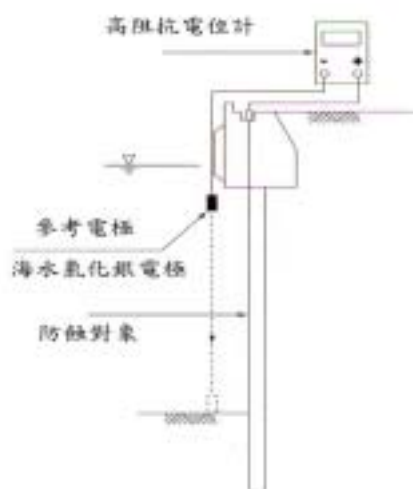
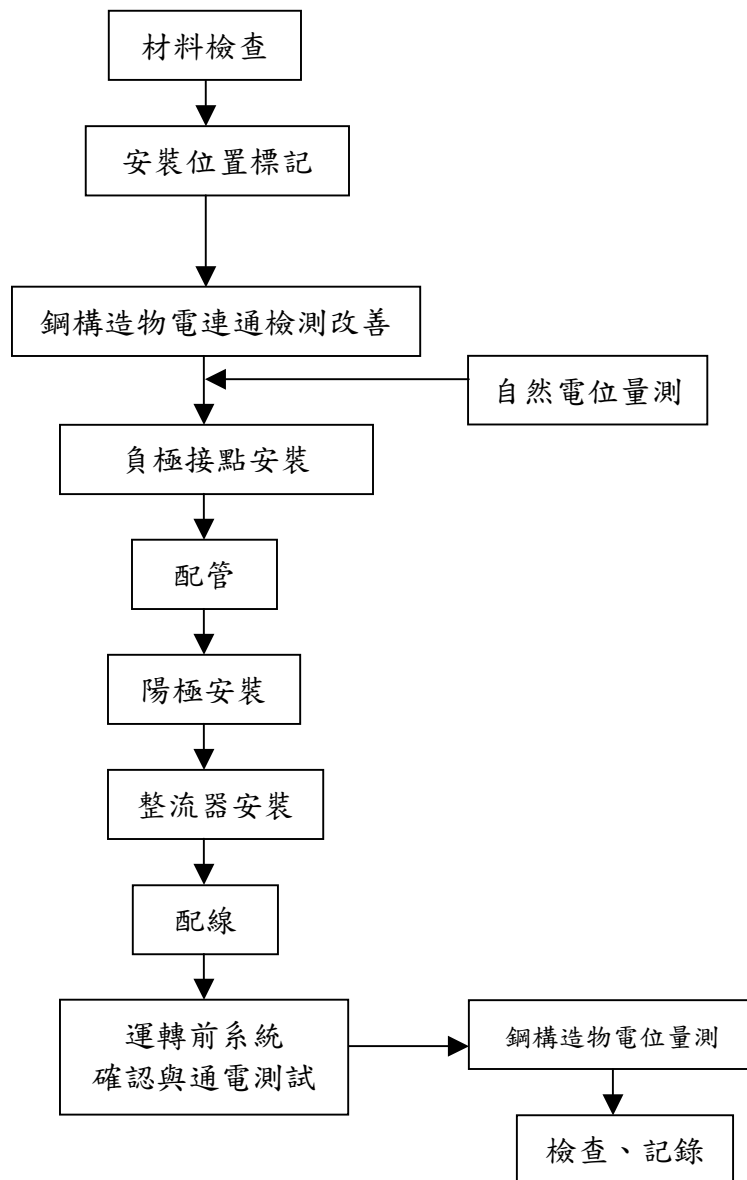


圖 5.1.5 電位量測示意圖

5.2 外加電流式

5.2.1 施工步驟：



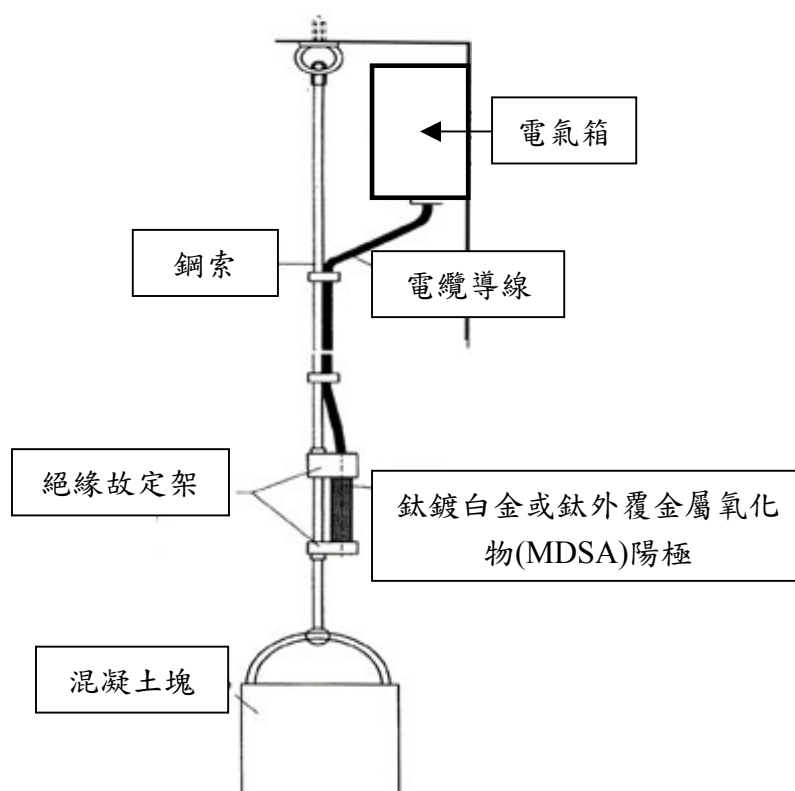
5.2.2 材料檢查

施工前須進行材料數量確認，尺寸、質量之抽樣檢查。

5.2.3 鋼構造物電連通改善

鋼板樁或鋼管樁間須使用適當尺寸的鋼條或導線相連接，使被保護體電連通，即電阻值低於 1 ohm。

5.2.4 陽極安裝



解說：陽極與被保護構造物間距離至少相距 1.5 m 以上；當其間距離增加，雖然保護電位可均勻分布，但亦會造成電纜壓降的增加，且容易對相鄰構造物產生雜散電流干擾。

5.2.5 負極排流及電位測試導線安裝

依照圖面設計位置，將負極排流及電位測試導線焊接於鋼構造物上，並在焊接處加以密封防水。

5.2.6 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。

5.2.7 導線安裝

所有導線包括 AC 電源線、DC 電源線等，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。

5.2.8 運轉前系統確認與通電測試

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；並檢測各迴路之電連通性。通電測試應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，量測鋼構造物電位變化方向，以確定 DC 輸出的正確極性。

5.3 完工檢查

完工時，除了對工程紀錄照片等進行檢查外，亦須進行構造物的防蝕電位量測。

解說：

1. 確認是否依據設計圖施工。
2. 確認被保護構造物防蝕電位值是否為-800 mV (vs. Ag/AgCl/seawater)或更”負”。

第六章 系統驗收

6.1 防蝕性能驗收

被保護構造物之防蝕電位值，須達到 -800 mV (vs. Ag/AgCl/seawater) 或更”負”之標準。

6.2 書面資料

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

6.2.1 犧牲陽極式

犧牲陽極式陰極防蝕系統驗收完成後，須保存相關紀錄和文件。

解說：本準則建議系統設計、安裝、操作、和維護手冊需包含以下資料。

1. 設計和安裝

- 陽極材料
- 陽極安裝
- 導線、導管
- 被保護構造物電通性與連接方法
- 犧牲陽極塊、負極接點與電位量測端子位置
- 施工日期和時間(說明安裝問題和解決方法)

2. 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、使用材料性能資料、檢測結果數據等：

A 節—操作

- 系統說明、裝設時間、作用原理

- 防蝕電位標準
- 執行檢測的步驟、位置、接點、監測結果之判斷
- 系統監控－檢測步驟之檢查表與保存之記錄清單

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，包括檢查步驟、診斷與接線圖
- 陽極製造商詳細資料和備用品清單
- 陽極更新程序，包括使用材料與工具資料

6.2.2 外加電流式

外加電流式陰極防蝕系統驗收完成後，須保存相關紀錄和文件。

解說：本準則建議系統設計、安裝、操作、和維護手冊需包含以下資料。

1. 設計和安裝

- 陽極材料
- 陽極安裝
- 導線、導管與接線箱
- 被保護構造物電通性與連接方法
- 負極接點與電位量測端子位置
- 電源、接地、與固定方式
- 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. 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
- 防蝕電位標準
- 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
- 執行量測的步驟、位置、接點、監測結果之判斷
- 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
- 陽極更新程序，包括使用材料與工具資料

第七章系統維護及管理

7.1 一般

陰極防蝕的維護管理應依據維護管理計畫確實執行。

7.2 檢查頻率

維護管理分為一般檢查與詳細檢查。一般檢查的項目為電位量測；詳細檢查為目視檢測、電位量測與陽極調查。一般檢查之頻率為完工驗收後第一年每季一次，之後，每年進行一次檢查；詳細檢查為每五年一次。

解說：依檢查頻率進行維護管理，但當一般檢查發生問題時須立即進行詳細檢查。

7.3 一般檢查

7.3.1 電位量測

一般檢查的電位量測為沿碼頭法線方向，以 50 m ~ 100 m 間隔，使用海水氯化銀參考電極與電位計，沿構造物深度方向以 1 m 或適當的間隔進行電位量測。若碼頭上已設置固定電位測試端子，則於端子位置進行量測。

7.4 詳細檢查

7.4.1 目視檢測

派遣潛水夫於水下進行近距離目視檢查，注意構造物與犧牲陽極塊是否有任何損壞、腐蝕或變化的位置及其程度。

7.4.2 電位量測

以檢測率 20% 以上為目標，沿碼頭法線方向每 3 m ~ 5 m 進行被保護構造物之電位量測，在棧橋式碼頭之鋼管樁則以前列樁為檢測對象。構造物深度方向，以 1 m 或適當的間隔進行電位量測。

7.4.3 犧牲陽極調查

犧牲陽極調查是針對陽極安裝情形與陽極消耗量等相關事項進行調查。陽極安裝情形係指陽極安裝數量的確認，陽極消耗量則是選擇陽極數量之 5 % ~ 10 % 進行調查，由潛水夫水下量測陽極尺寸，或切斷陽極蕊心移至陸地上秤重，計算陽極消耗量及剩餘使用年限。秤重完成後，再將陽極安裝回原位置。

解說：陽極尺寸與陽極秤重時，陽極表面附著的海生物與腐蝕產物須先清除，陽極消耗量及壽命之計算如下。

1. 依據剩餘陽極形狀尺寸(如圖 7.4.3.1 所示)之計算法：

$$\text{陽極剩餘重量} = [(D/4)^2 \cdot l - \text{蕊心體積}] \times \text{陽極密度}$$

式中，

D ：平均周長 $= (D_1 + D_2 + D_3) / 3$

D_1, D_3 ：距離蕊心端約 10 cm 之剩餘陽極周長

D_2 ：剩餘陽極中央周長

l ：剩餘陽極長度

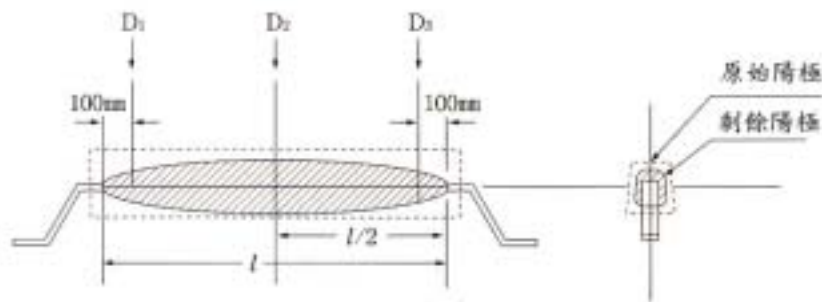


圖 7.4.3.1 剩餘陽極形狀尺寸計算

2. 陽極秤重：切斷蕊心焊接處並打撈至陸地上後秤量，扣除陽極內蕊心金屬的重量，即得陽極剩餘重量。
3. 陽極壽命計算

$$\text{陽極年平均消耗量} = \frac{\text{陽極初期重量} - \text{陽極剩餘重量}}{\text{經過年數}}$$

$$\text{推估剩餘使用年限} = \frac{\text{陽極剩餘重量}}{\text{陽極年平均消耗量}}$$

7.5 防蝕性能標準

被保護構造物之防蝕電位值，至少須達到 -800 mV (vs. Ag/AgCl/seawater) 之標準。

7.6 防蝕效能評估

依據電位量測及陽極調查結果進行陰極防蝕效能評估。

解說：電位測定結果如在防蝕保護電位 -800 mV (vs. Ag/AgCl/seawater) 以下或更“負”，則被保護構造物維持防蝕狀況；若電位在 -800 mV 以上或更“正”時，則其部份保護不足，須做詳細檢查。可參考前次檢查結果探究原因，制訂對策與未來運轉建議。

7.7 書面資料

設計、安裝、操作、和維護手冊資料等相關紀錄和文件依 6.2.1 與 6.2.2 節建立、記錄，並妥善保管。