

91-31-717

MOTC-IOT-IHMT-90-004

# 港灣構造物陰極防蝕準則訂定 (草案) 研究



交通部運輸研究所  
中華民國防蝕工程學會  
合作辦理

中華民國九十一年三月

91-31-717

MOTC-IOT-IHMT-90-004

# 港灣構造物陰極防蝕準則訂定 (草案) 研究

著者：陳桂清、饒 正、柯正龍、張道光、  
蔡文達、羅俊雄、翁榮洲

交通部運輸研究所  
中華民國防蝕工程學會  
合作辦理

中華民國九十一年三月

港灣構造物陰極防蝕準則訂定(草案)研究

著 者：陳桂清、饒 正、柯正龍、張道光、蔡文達、羅俊雄、  
翁榮洲

出版機關：交通部運輸研究所

地 址：台北市敦化北路 240 號

網 址：[www.iot.gov.tw](http://www.iot.gov.tw)

電 話：(02)23496789

出版年月：中華民國九十一年三月

印 刷 者：

版(刷)次冊數：初版一刷 150 冊

工 本 費： 200

展 售 處：

交通部運輸研究所港灣技術研究中心 電話：(04)26564216

三民書局：台北市重慶南路一段 61 號 2 樓 電話：(02)23617511

五南文化廣場：台中市中山路 2 號地下 1F 電話：(04)22260330

新進圖書廣場：彰化市光復路 177 號 電話：(04)7252792

青年書局：高雄市青年一路 141 號 電話：(07)3324910

GPN：1009100808

## 交通部運輸研究所合作研究計畫出版品摘要表

出版品名稱：港灣構造物陰極防蝕準則訂定(草案)研究			
國際標準書號（或叢刊號）	政府出版品統一編號 1009100808	運輸研究所出版品編號 91-31-717	
主辦單位：港灣技術研究中心 主管：邱永芳 計畫主持人：陳桂清 研究人員：陳桂清、饒 正 柯正龍、張道光  聯絡電話：(04)26564216 轉 415 傳真號碼：(04)26571329		合作研究單位：中華民國防蝕工程學會 計畫主持人：蔡文達 研究人員：羅俊雄、翁榮洲 地址：台北市基隆路一段 147 巷 14 號 1F 聯絡電話：(02)24567098	
		研究期間 自 90 年 4 月 至 90 年 11 月	
關鍵詞：鋼筋混凝土結構、陰極防蝕、準則手冊			
摘要：  <p style="text-align: center;">港灣鋼筋混凝土構造物常年置於海水中或受海風侵襲，極易發生腐蝕劣化，而陰極防蝕技術在鋼筋混凝土上的應用業已確認為最具效能的防蝕對策。本研究目的在研訂港灣鋼筋混凝土構造物的陰極防蝕準則草案，提供鋼筋混凝土陰極防蝕應用之依據。主要研究內容包括：蒐集整理國外陰極防蝕相關規範，列舉防蝕成功案例，並就陰極防蝕的規劃設計、施工程序、安裝及性能測試分析研討，並召開業界座談會研議適合國內需求條件，以利研定港灣鋼筋混凝土構造物陰極防蝕準則草案。</p>			
出版日期	頁數	工本費	本 出 版 品 取 得 方 式
91 年 3 月	186	200	凡屬機密性出版品均不對外公開。普通性出版品，公營、公益機關團體及學校可函洽本中心免費贈閱；私人及私營機關團體可按工本費價購。
機密等級： 限閱    密    機密    極機密    絕對機密 （解密【限】條件：    年    月    日解密，    公布後解密，    附件抽存後解密， 工作完成或會議終了時解密，    另行檢討後辦理解密）			
<input checked="" type="checkbox"/> 普通			
備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。			

PUBLICATION ABSTRACTS OF RESEARCH PROJECTS  
INSTITUTE OF TRANSPORTATION  
MINISTRY OF TRANSPORTATION AND COMMUNICATIONS

TITLE: Cathodic Protection for Reinforced Concrete Structures in Marine Environment			
ISBN(OR ISSN)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1009100808	IOT SERIAL NUMBER 91-31-717	
DIVISION: CENTER OF HARBOR & MARINE TECHNOLOGY DIVISION CHIEF: Yung-Fang Chiu PRINCIPAL INVESTIGATOR: Kuei-Ching Chen PROJECT STAFF: Cheng Rau, Jeng-Long Ko, Tao-Kuang Chang PHONE: 04-26564216 ext 415 FAX: 04-26571329		PROJECT PERIOD FROM April 2001 TO November 2001	
RESEARCH AGENCY: The Corrosion Engineering Association of the Republic of China PRINCIPAL INVESTIGATOR: W.T. Tsai PROJECT STAFF: J.S. Luo, J.C. Oung ADDRESS: 1F, 14, Lane 147, Keelung Rd., Sec. 1, Taipei, Taiwan, R.O.C. PHONE: (02) 27567098			
KEY WORDS: Reinforced Concrete Structures, Cathodic Protection, Guideline			
ABSTRACT:  <p style="text-indent: 40px;">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, the present study focuses on developing a guideline to perform the cathodic protection technique at reinforced concrete structures in marine environments. Research topics include 1) collection of cathodic protection-related documentation, 2) case study, 3) requirement for cathodic protection design, engineering work, operation, and evaluation, and 4) a suitable operation manual through engineering conferences.</p>			
DATE OF PUBLICATION Mar. 2002	NUMBER OF PAGES 186	PRICE 200	CLASSIFICATION SECRET CONFIDENTIAL <input checked="" type="checkbox"/> UNCLASSIFIED
The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.			

# 目錄

中文摘要	-----
英文摘要	-----
目錄	-----
表目錄	-----
圖目錄	----- XI
第一章 前言	----- 1
第二章 文獻收集及分析	----- 3
2.1 海洋環境	----- 3
2.2 鋼筋混凝土腐蝕劣化機理	----- 4
2.2.1 中性化(Carbonation)	----- 5
2.2.2 氯離子入侵(Chloride Attack)	----- 7
2.3 陰極防蝕	----- 9
2.3.1 陰極防蝕原理	----- 9
2.3.2 陰極防蝕方法	----- 10
2.4 鋼筋混凝土陰極防蝕規範文獻整理	----- 11
第三章 鋼筋混凝土陰極防蝕案例	----- 21
3.1 案例一：犧牲陽極式陰極保護－鋅網	----- 21
3.2 案例二：外加電流式陰極保護－鈦網陽極	----- 22
3.3 案例三：國內棧橋碼頭基樁陰極防蝕工程	----- 22
第四章 陰極防蝕系統選擇	----- 29

4.1 外加電流法-----	29
4.1.1 導電性塗料(Conductive Coating System) -----	29
4.1.2 導電性橡膠(Conductive Rubber Anode)-----	30
4.1.3 鈦網陽極–外覆混凝土(Titanium Mesh Anode Embedded in Gunite) -----	30
4.1.4 鈦網陽極–外覆鋼筋混凝土保護結構(Titanium Mesh Anode Encapsulated in Structural Jacket) -----	31
4.1.5 外加電流–外覆保護夾層系統(Impressed Current CP Pile Jacket System) -----	31
4.2 犧牲陽極法-----	32
4.2.1 鋅熔射方式(Sprayed Sacrificial Zinc Metalizing System) --	32
4.2.2 鋅板方式(Perforated Zinc Sheet System) -----	33
4.2.3 鋅網–外覆保護夾層方式(Sacrificial Cathodic Protection Pile Jacket, Lifejacket System)-----	33
4.2.4 鋅板導電凝膠(3M Zinc-Hydrogel Anode 4727)-----	34
4.3 港灣構造物陰極防蝕系統選擇-----	34
4.4 陰極防蝕系統使用材料及設備需求-----	35
4.4.1 陽極材料-----	35
4.4.2 參考電極-----	37
4.4.3 整流器-----	37
4.4.4 導線-----	38
4.4.5 混凝土修補填充材料-----	38
第 五 章 陰極防蝕安裝標準程序-----	47

5.1 設計前之檢測評估	47
5.1.1 結構物的安全	48
5.1.2 導電性考量	48
5.1.3 安裝前之調查工作	48
5.2 工程計算與設計	49
5.3 混凝土表面處理	49
5.4 負極排流點及工作電極之安裝	50
5.5 偵測電極(參考電極)安裝	51
5.6 鋼筋導電性改善	51
5.7 陽極安裝	51
5.7.1 鈦陽極之安裝	52
5.7.2 鋅熔射	52
5.7.3 鋅網 - 外覆保護夾層(FRP)之安裝	53
5.7.4 鋅板導電凝膠之安裝	54
5.8 混凝土灌漿施工	55
5.9 系統配線	55
5.10 監測控制系統安裝	56
第六章 港灣棧橋碼頭設計案例	59
6.1 陰極防蝕設計	59
6.2 保護電流計算	59
6.3 監測系統	61



6.4 施工儀器及使用材料規範-----	62
第七章 陰極防蝕驗收標準程序-----	67
7.1 陰極防蝕保護標準-----	67
7.2 保護效果檢測方法及要點-----	69
第八章 陰極防蝕操作-----	71
8.1 試車期限-----	71
8.2 試車操作項目-----	71
8.3 系統試車、操作步驟-----	71
第九章 防蝕系統維護管理手冊-----	75
9.1 系統維護說明-----	75
9.2 系統維護執执行程序-----	76
9.3 維護檢查項目及內容-----	77
9.3.1 系統保護狀態維護檢查-----	77
9.3.2 系統組件維護檢查-----	78
9.4 維護操作方法-----	79
9.4.1 監測控制-----	79
9.4.2 系統構件檢查-----	79
參考文獻-----	81
附錄一 相關文獻整理索引-----	附 1-1
附錄二 摘要報告-----	附 2-1
附錄三 簡報資料-----	附 3-1

附錄四 審查意見 ----- 附 4-1

附錄五 港灣構造物陰極防蝕準則(草案) ----- 附 5-1

## 表目錄

表 2.1 書籍類-----	12
表 2.2 研究報告類-----	13
表 2.3 規範準則類-----	14
表 2.4 論文類-----	16
表 4.1 FDOT 使用陰極防蝕法之研究成果-----	39
表 4.2 鋼筋混凝土結構在海洋環境中陰極防蝕系統選擇-----	40
表 6.1 保護電流計算-----	63
表 6.2 施工儀器及使用材料規範-----	65
表 6.3 鋅網規範: ASTM B6/B69-----	66

## 圖目錄

圖 2.1	碳鋼在海洋環境中腐蝕速率與曝露環境之關係	17
圖 2.2	鋼筋腐蝕機理示意圖	17
圖 2.3	鐵腐蝕區、鈍化區、免疫區分佈圖	18
圖 2.4	陰極保護極化示意圖	18
圖 2.5	外加電流式陰極保護	19
圖 2.6	犧牲陽極式陰極保護	19
圖 3.1	鋅網外加夾層之陰極保護系統	26
圖 3.2	BROWARD RIVER BRIDGE IN JACKSONVILLE, FL 基樁 鋼筋電位之時間序列圖	27
圖 4.1	導電性橡膠陰極防蝕	41
圖 4.2	鈦網極－外覆混凝土	41
圖 4.3	鈦網陽極－外覆鋼筋混凝土保護結構	42
圖 4.4	外加電流－外覆保護夾層	42
圖 4.5	鋅熔射方式陰極防蝕	43
圖 4.6	鋅板方式陰極防蝕	43
圖 4.7	鋅網－外覆保護夾層方式	44
圖 4.8	鋅板導電凝膠陰極防蝕	45
圖 5.1	陰極防蝕系統工作流程規劃	57
圖 5.2	工程計算與設計流程圖	58
圖 8.1	系統試車步驟之流程圖-1	72

圖 8.1 系統試車步驟之流程圖-2-----	73
-------------------------	----

# 第一章 前言

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

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

- 1.蒐集國外鋼筋混凝土陰極防蝕設計規範資料。
- 2.國內外鋼筋混凝土結構物陰極防蝕工程成功案例說明。

- 3.陰極防蝕之安裝系統選擇、使用材料規格、設備需求、工程經費估算。
- 4.陰極防蝕安裝之標準程序。
- 5.設計港灣棧橋碼頭陰極防蝕方案。
- 6.陰極防蝕效應之驗收標準程序。
- 7.訂定陰極防蝕操作、系統維護管理手冊。
- 8.召開座談會。
- 9.訂定港灣構造物陰極防蝕規劃設計準則草案。

## 第二章 文獻回顧

### 2.1 海洋環境

根據 Boyd etc.所著 Corrosion of Metals in Marine Environments<sup>[1]</sup>一文指出，海洋結構物的腐蝕速率依結構物接觸(曝露)海洋環境的不同，有明顯的差異；因此為方便區分與探討，將海洋環境區分成五個曝露區域，並將鋼材腐蝕速率與環境因子之關係，概述如下：

#### 1.海洋大氣帶(Atmospheric Zone)：

此區域範圍內結構物表面完全曝露接觸大氣中之各種介質，如氣體、日照 ...等，由於大氣中含有高濃度之海鹽粒子，加上大氣中日照、溫度變化，致使碳鋼材料結構體之外表極易受到侵蝕。

#### 2.飛沫帶(Splash Zone)：

此區域範圍自平均高潮位以上至海面大氣帶下端，鋼板樁曝露於此範圍內時，由於不斷地受到海浪的潑濺以及日曬乾燥，產生乾濕循環作用，致使附著鋼材表面之鹽份(氯離子)及氧氣濃度不斷增加，致使腐蝕更為嚴重。

#### 3.潮汐帶(Tidal Zone)：

此區域介於高低潮位之間，由於受到海水漲退潮的影響，鋼板(管)樁表面週期性的接觸海水浸泡及曝露於大氣中；在此區域內，由於空氣與海水波浪的交互作用，致使海水中溶氧濃度較高，因而在潮汐帶下方緊鄰海中帶的部份，恰可形成一個氧差電池之作用。在溶氧量較高之潮汐帶中的鋼板，可視為一陰極反應區域，腐蝕速率較低，而位於低潮位下約 1m 處(亦即海中帶部份)，因海水溶氧量較低，可視為一陽極反應部位，故腐蝕量較大。

#### 4.水下帶(Full Immersion Zone)：



此區域範圍自低潮位下端至海泥(床)帶間，在此曝露範圍內，整個結構體完全浸泡於海水中。此區域之上端邊緣，即與最低潮位緊接鄰的區域，因有氧差電池之作用，鋼板腐蝕速率較大；此外，海生物之附著問題，海流之沖擊、水溫及溶氧量等因素，均會影響海中帶鋼板(管)樁之腐蝕速率。

#### 5. 海泥帶(Mud Zone)：

在此暴露區域內，鋼板(管)樁等結構物均係埋入於海底土層中，與海水接觸較小，一般而言鋼材之腐蝕速率很小，然而在污染的海域中，如有硫化氫( $H_2S$ )或海泥中有硫酸還原菌存在的話，則鋼材的腐蝕性會增加，腐蝕速率變大。

根據美國腐蝕工程師協會(NACE International)技術報告#1G194 - Splash Zone Maintenance Systems for Marine Steel Structures<sup>[2]</sup>，碳鋼在海洋環境中腐蝕速率與環境因子之關係如圖 2-1 所示。圖中，位於潮汐帶與大氣帶間的碳鋼腐蝕速率最大。相同地，鋼筋混凝土(RC)港灣構造物在海洋環境中依其曝露、浸漬環境，亦可區分為：

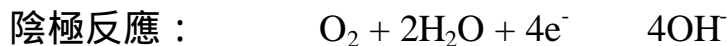
1. 大氣帶：結構物表面完全曝露接觸大氣中之各種介質，如氣體、日照...等；結構物多處於較乾燥的環境中。
2. 潮間帶：其範圍不僅包含高低潮位之間之潮汐帶，更包括平均高潮位以上至海面大氣帶下端之飛沫帶區域；結構物受乾濕循環交替作用。
3. 水下帶：此區域範圍自低潮位下端至海泥(床)帶間，在此曝露範圍內，整個結構體完全浸泡於海水中。

由於鋼筋混凝土結構物較少埋入於海底土層中，故海泥帶在本研究中暫不討論。

## 2.2 鋼筋混凝土腐蝕劣化機理

鋼筋在混凝土中發生腐蝕的行為為一電化學反應現象，在正常情

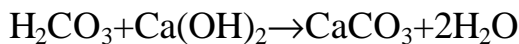
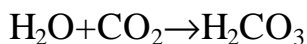
況下，混凝土因含有氫氧化鈣而為一鹼性環境，pH 值約在 12~13.5 之間，鋼筋在此鹼性環境下表面會產生保護性的鈍態膜，防止鋼筋腐蝕；然而隨著環境中(如海洋環境)氯離子入侵，或混凝土中性化的結果，鋼筋表面的鈍態膜會被破壞，導致鋼筋腐蝕，其機理如圖 2.2 所示。圖中，陽極反應為金屬(鋼筋)的溶解反應，而陰極反應為氧的還原反應，其基本反應過程如下：



而鋼筋在混凝土腐蝕劣化的機理如下：

### 2.2.1 中性化(Carbonation)<sup>[3]</sup>

當混凝土材料曝露於大氣中，含有二氧化碳或三氧化硫等酸性氣體，會使混凝土的 pH 值會由原先的 12~13.5 降至 8~9 左右，其反應過程為：



此由二氧化碳酸性氣體引起而使混凝土鹼性中含的作用，即稱為中性化。當 pH 值降低至 8~9，鋼筋表面的氧化膜(鈍態膜)將出現不穩定狀態，一旦混凝土孔隙中的氧氣與水份供給充裕，腐蝕將開始發生，此時釋放出的鐵離子會與混凝土孔隙中的氧及水反應，生成氧化鐵，而此氧化鐵的特性為鬆脆多孔且不具保護性。因此，鋼筋在中性化混凝土中的腐蝕反應為：



由於混凝土發生中性化時，是由最外層漸漸向內入侵，當中性化層到達鋼筋時，鋼筋開始銹蝕。因此，中性化的進行速度決定了鋼筋腐蝕發生的時間，而二氧化碳在混凝土中的反應與擴散速率，更是其

決定因素。中性化深度與時間的關係為：

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

式中，

D=中性化深度

K=中性化係數

t=時間

所以，保護層愈厚，鋼筋表面混凝土中性化愈慢，且當保護層每增加一倍，中性化速度延緩四倍。此外，中性化係數 K 值與二氧化碳的擴散速率及混凝土中之氫氧化鈣的含量有關，多量的水泥含有較多的氫氧化鈣，可以在二氧化碳滲透時，減少中性化的趨勢；而降低水灰比，減少混凝土孔隙度，亦可降低二氧化碳在混凝土中的擴散速率。綜合言之，影響混凝土中性化的因素為

#### 1.外在環境

二氧化碳在水中的擴散速度為空氣中之萬分之一，所以在水中的混凝土，其中性化的速度極慢，但在無水狀況下，中性化亦不會發生；僅有在高濕度的空氣中，中性化的速度較快。

#### 2.水泥成份

若水泥中的總鹼量高，可與  $\text{CO}_2$  中和，中性化的速度會減慢，然而添加煤灰的水泥，其含鹼量將會隨煤灰的添加而降低，無法減緩中性化程度。

#### 3.混凝土中的水泥含量

混凝土中波特蘭水泥用量較少時，混凝土的鹼含量較低，將致使中性化的速度加快。

#### 4.混凝土的滲透率<sup>[4]</sup>

混凝土為一多孔性材料，其孔隙與孔隙之間的接連性會影響  $\text{CO}_2$  和水在混凝土中的擴散。水灰比與養生條件將決定  $\text{CO}_2$  及水在混凝土的滲透率；水灰比低、養生久，則  $\text{CO}_2$  與水的滲透速率低，中性化的速度慢。

#### 5. 混凝土的緻密度

如果混凝土有蜂巢似的缺陷， $\text{CO}_2$  可直接深入混凝土，使鋼筋表面混凝土中性化發生的時間加速。

#### 6. 混凝土中的裂縫

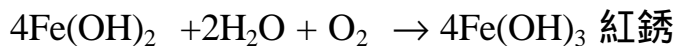
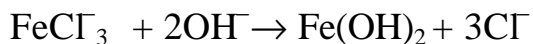
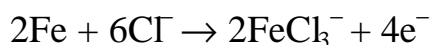
若混凝土主體有裂縫存在， $\text{CO}_2$  和水更容易接近鋼筋附近的混凝土，造成中性化。

#### 7. 保護層厚度

若混凝土無蜂巢似缺陷或裂縫，則鋼筋表面發生中性化的時間將隨保護層厚度增加而延長。

### 2.2.2 氯離子入侵(Chloride Attack)

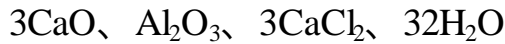
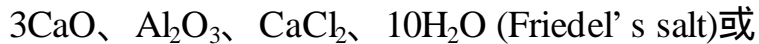
混凝土因外界鹽份入侵或使用含鹽材料<sup>[5]</sup>，促使鋼筋表面混凝土中的氯離子含量超過一臨界值時，鋼筋表面的鈍態膜會遭破壞，若再與混凝土孔隙中之氧氣、水份反應，則會產生腐蝕。其反應過程如下：



由於  $\text{Cl}^-$  在反應過程中可被釋出，進一步又與鐵反應，將加速鋼筋鐵離子的釋出，加速腐蝕反應。

氯離子在混凝土中可以兩種型態存在，一為游離態，另一為固定態。游離態的氯離子存在於混凝土的毛細孔中，遇水則溶解於水，而

固定態之氯離子則是與水泥反應，形成以下化合物。



由腐蝕的觀點而言，溶解於水的氯離子在腐蝕過程中常扮演一重要破壞的角色，而化合物中被水泥  $\text{C}_3\text{A}$  固著的氯離子因其不溶於水，故無侵蝕性；但若氯離子為混凝土生產製造時即加入的組成，如「海砂」，則 90% 的氯離子會形成上述之固定化合物，而剩餘之 10% 是以游離狀態存在，當混凝土中性化後，固定態的氯離子將被釋出，形成游離態氯離子，加速鋼筋腐蝕。此外，混凝土硬固後由外界滲透進入之氯離子(如海風、海洋環境中的潮汐區等)，其存在型態亦多以游離態存在。

根據英國建築研究所(BRE)之研究，鋼筋腐蝕與游離氯離子濃度間的關係為<sup>[6]</sup>：

$\text{Cl}^- > 1\% \text{ wt / cement}$	嚴重腐蝕
$0.4\% \leq \text{Cl}^- \leq 1\% \text{ wt / cement}$	中度腐蝕
$\text{Cl}^- < 0.4\% \text{ wt / cement}$	輕度腐蝕

綜合言之，影響混凝土氯離子含量之因素有：

### 1. 水泥成份

水泥中氯離子之固定能力決定於  $\text{C}_3\text{A}$  的含量， $\text{C}_3\text{A}$  量愈高，氯離子固定力愈強。Type I 水泥  $\text{C}_3\text{A}$  含量為 11.4% 左右，而 Type V 水泥中  $\text{C}_3\text{A}$  含量較少，不超過 5%。

### 2. 混凝土中水泥量

混凝土水泥量愈高，氯離子固定能力愈高。

### 3. 混凝土成份

混凝土成份中，水灰比與水泥種類決定了氯離子在混凝土中的滲透率；水灰比低，滲透率低。飛灰、高爐殘渣的添加雖會降低一些 pH 值，但飛灰與高爐殘渣可與氫氧化鈣形成緻密的 C-S-H 膠體，而降低孔隙率，進而降低氯離子的入侵速率。水泥中的鋁酸三鈣( $C_3A$ )含量與混凝土的抗硫酸鹽性能具高度相關性， $C_3A$  含量愈高，固定氯離子的能力愈強，但較不利於抵抗高硫酸鹽的侵害。波特蘭 Type V 水泥( $C_3A$  含量 5% 以下)，一般用於抵抗高硫酸鹽侵害之結構物。

#### 4. 混凝土的緻密度

蜂巢式的缺陷會縮短氯離子的擴散路徑，致使鋼筋表面氯離子含量增加。

#### 5. 混凝土中的裂縫

裂縫的存在，將增加氯離子的滲入速度。

#### 6. 外在環境

水為氯離子入侵的必要介質，而水在混凝土中的擴散則是藉虹吸管原理進行。這種擴散方式最常在乾濕交替的環境中發生，如在潮汐區，漲潮時海水滲入混凝土，退潮時海水藉虹吸管原理深入混凝土；若混凝土含鹽量增加，因滲透作用，將使混凝土不容易乾燥，以致鋼筋腐蝕速率增加。因此，鋼筋混凝土結構若處於乾濕交替的環境，則鋼筋腐蝕會較其他暴露區域(如大氣帶、水中帶)嚴重。

## 2.3 陰極防蝕

### 2.3.1 陰極防蝕原理

陰極防蝕的原理由熱力學的觀點來看，就是將被保護的金屬電位降低，使腐蝕不會產生。以鐵為例，在 Pourbaix diagram (E-pH diagram) 中，鐵與環境的作用型態可分為腐蝕區、鈍化區、及免疫區；在一定 pH 情況下，將腐蝕區鐵的電位降低，降至免疫區內，則鐵的腐蝕便不

會產生(圖 2.3)。而由電化學的觀點來看，一般腐蝕電池的產生，組成要件包括 1)陰極，2)陽極，3)電解液，以及 4)陰極與陽極間電子流通的線路。由於陰極與陽極本身結構性質與化學特性的不同，兩極間會有電位差產生，造成電流由陽極流向電解液。若利用外加電源的方法，使陰極電流流向金屬，可使金屬腐蝕的淨陽極電流減小，甚至趨近於零，以致腐蝕不會產生。因此陰極防蝕的基本原理為降低金屬的腐蝕電位，往負值的方向進行，達到金屬防蝕的目的。如圖 2.4 所示，金屬由自由腐蝕狀況(無外加電流的情況-condition 1)到完全被保護時(無淨陽極電流-condition 4)，可經由四個連續的陰極極化過程達成。也就是說，當金屬的電位被極化至陽極的開路電位(open circuit potential)時，金屬會被完全保護，不致有銹蝕情況產生。至於過保護(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。

### 2.3.2 陰極防蝕方法

陰極防蝕的方法有兩種，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，然後沿著鋼筋經導線，回到電源，如此鋼筋便受到保護(如圖 2.5)。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，以提供防蝕時所需之電流，然在較偏遠的地區，汽油或柴油發電機，甚至太陽能電池是為外加電流的來源。

犧牲陽極法主要是利用電位較負之金屬為陽極，與被保護金屬於介質(如土壤、水、混凝土等)中聯結，形成一電化學電池，以鋼筋混凝土為例，如圖 2.6 所示；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，而鈍性(noble)的鋼筋(陰極)會因此而被保護。

一般而言，外加電流系統較犧牲陽極系統複雜，且外加一直流電的費用也比安裝犧牲陽極的費用高。然前者可使用可變電源，來保護較大面積，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。兩者的特性比較如下：

<u>外加電流法</u>	<u>犧牲陽極法</u>
裝置複雜	裝置簡單
需要定期維護	維護需求少
可使用於低導電性環境	適用於導電性好之環境
初期成本較高	初期成本低
會造成以下若干問題：	
雜散電流腐蝕	
氫脆化	
塗層剝落	

## 2.4 鋼筋混凝土陰極防蝕規範文獻整理

鋼筋混凝土陰極防蝕規範資料蒐集包含國內、外相關的研究報告、論文、研討會資料、技術資料、及相關設計或施工規範等。資料蒐集後以分類方式整理，以期建立鋼筋混凝土陰極防蝕相關知識庫。文獻蒐集對象包括歐洲、英國、日本、美國、中國大陸及我國，相關文獻整理如表 2.1~2.4；部份文獻資料關鍵字詞與查詢索引如附錄一所示。



表 2.1 書籍類

序號	文獻名稱	出版單位	作者	發行國別	最後出版日期
1	海洋區域的土木結構物的腐蝕與其防銹防蝕	中華民國防蝕工程學會	蒔田實 陳文源	日本 中華民國	1985
2	混凝土和鋼筋混凝土的腐蝕及防護方法	化學工業出版社	倪繼森、黃炯邱譯	中國大陸	1988
3	海洋腐蝕與防護	科學出版社	侯保榮	中國大陸	1997
4	自然環境的腐蝕與防護（大氣、海水、土壤）	化學工業出版社	王光雍、王海江	中國大陸	1997
5	混凝土中鋼筋的腐蝕與保護	中國鐵道出版社	洪定海	中國大陸	1998
6	混凝土結構耐久性分析與設計	科學出版社	李田、劉西拉	中國大陸	1999
7	混凝土結構耐久性技術	台灣營建研究院	許鎧麟	中華民國	2000
8	Corrosion of Metals in Concrete	ACI	ACI	美國	1975
9	Galvanized Reinforcement for Concrete-II	International Lead Zinc Research Organization, Inc.	S. F. Radtke	美國	1981
10	Prediction of Concrete Durability	E & FN SPON An imprint of Chapman & Hall	J. Glanville and A. Neville	美國	1995
11	Mechanisms of Chemical Degradation of Cement-based Systems	E & FN SPON An imprint of Chapman & Hall	K.L. Scrivener J.F. Young	美國	1995
12	Durability Design of Concrete Structures	E & FN SPON An imprint of Chapman & Hall	A.Sarja and E.Vesikari	美國	1996
13	Corrosion of Steel in Concrete Understanding, investigation and repair	E & FN SPON An imprint of Chapman & Hall	John P. Broomfield	美國	1997
14	Cathodic Protection of Steel in Concrete	E & FN SPON An imprint of Chapman & Hall	Paul Chess, Gronvold and Karnov	美國	1998
15	Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Epoxy-Coated Reinforcing Steel Bars	Japan Society of Civil Engineers	Japan Society of Civil Engineers	日本	-

表 2.2 研究類報告

序號	文獻名稱	出版單位	作者	發行國別	最後出版日期
1	港灣混凝土構造物劣化防止、補修技術調查報告書 - 劣化防止補修手冊(案)	沿岸開發技術研究中心	-	日本	1987
2	鋼筋腐蝕混凝土構造物之補修技術-技術現狀	混凝土工學協會防蝕委員會	-	日本	1989
3	港灣鋼筋混凝土結構物耐久性研究	港灣技術研究中心	港灣技術研究中心	中華民國	1991
4	台灣海域之腐蝕特性、防蝕設計、材料之選用及開發研究	港灣技術研究中心	港灣技術研究中心	中華民國	1991
5	鋼筋混凝土結構物陰極防蝕技術研究報告	工業技術研究院工材料研究所	工研院工材所	中華民國	1995
6	興達煤場卸煤碼頭棧橋結構安全分析期末報告	工業技術研究院工材料研究所	工研院工材所	中華民國	1996
7	興達煤場卸煤碼頭棧橋陰極防蝕系統驗收報告	工業技術研究院工材料研究所	工研院工材所	中華民國	1997
8	興達煤場卸煤碼頭棧橋陰極防蝕系統保固期檢測驗收報告	工業技術研究院工材料研究所	工研院工材所	中華民國	1998
9	橋樑設計維修支援系統之建立 - 腐蝕、地震、河川沖蝕之前是分析及相關技術整合	中央大學橋樑研究中心	王仲宇	中華民國	1999
10	鋼筋混凝土結構物陰極防蝕技術合作開發期末報告	工業技術研究院工材料研究所	工研院工材所	中華民國	1999
11	橋樑設計維修支援系統之建立(II) - 國內現有自然災害危害評估及防治方法之整合研訂	交通部科技顧問室	-	中華民國	2000

表 2.3 規範準則類

序號	文獻名稱	出版單位	作者、規範編號	發行國別	最後出版日期
1	Cathodic Protection of Reinforced Concrete, Technical Report No.36	Concrete Society	Technical Report No.36	英國	1989
2	Model Specification for Cathodic Protection of Reinforced Concrete, Technical Report No.37	Concrete Society	Technical Report No.37	英國	1989
3	Cathodic Protection Part 1 Code for Practice for Land and Marine Application (formerly CP 1021)	British Standard Institution	BS7631 Part 1: 1991	英國	1991
4	Standard Recommended Practice for Inspection of Linings on Steel and Concrete	NACE International	NACE Standard RP0288-94	美國	1994
5	Standard Recommended Practice for Coatings for Concrete Surfaces in Non-Immersion and Atmospheric Service	NACE International	NACE Standard RP0591-96	美國	1996
6	Standard Recommended Practice for Corrosion Control of Reinforcing Steel in Concrete	NACE International	NACE Standard RP0187-96	美國	1996
7	Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures, Definitions, Requirements, Quality Control and Evaluation of Conformity Part 9, General Principles for the Use of Products and Systems	British Standard Institution	DD 1504-9:1997	英國	1997
8	Standard Recommended Practice for Maintenance and Rehabilitation Considerations for Corrosion Control of Atmospherically Exposed Existing Steel-Reinforced Concrete Structures	NACE International	NACE Standard RP0390-98	美國	1998
9	Standard Recommended Practice for Impressed Current Cathodic Protection of Reinforcing Steel in Atmospherically Exposed Concrete Structures	NACE International	NACE Standard RP0290-2000	美國	2000

10	Standard Recommended Practice for Cathodic Protection of Prestressed Concrete Cylinder Pipelines	NACE International	NACE Standard RP0100-2000	美國	2000
11	General Principles of Cathodic Protection in Sea Water	British Standard Institution European Committee for Standardization	BS EN 12473:2000	英國	2000
12	Cathodic Protection of Steel in Concrete	British Standard Institution	BS EN 12696:2000	英國	2000
13	Cathodic Protection for Harbor Installations	British Standard Institution	BS EN 13174:2001	英國	2001
14	Corrosion Forms and Control for Infrastructure	ASTM	ASTM	美國	-
15	海洋混凝土構造物之防蝕指針(案)	混凝土工學協會	JCI-R1	日本	1990
16	陰極防蝕用鎂合金犧牲陽極	經濟部標準檢驗局	CNS-13518, H3163	中華民國	1995
17	陰極防蝕用鋅合金犧牲陽極	經濟部標準檢驗局	CNS-13519, H3164	中華民國	1995
18	陰極防蝕用鋁合金犧牲陽極	經濟部標準檢驗局	CNS-13520, H3165	中華民國	1995
19	陰極防蝕犧牲陽極性能檢驗法	經濟部標準檢驗局	CNS-13521, H2118	中華民國	1995
20	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	日本建築學會	-	日本	1997
21	混凝土標準示方書(維持管理編)【日文】	土木學會	土木學會	日本	2001
22	混凝土標準示方書(耐久性照查型)【日文】	土木學會	土木學會	日本	2001

表 2.4 論文類

序號	文獻名稱	出版單位	作者	發行國別	最後出版日期
1	Corrosion in civil engineering	Institution of civil engineers	Institution of civil engineers	美國	1979
2	Testing of Concrete in Structures	Blackie Academic & Professional	J.H. Bungey and S.G. Millard	美國	1996
3	A Pullout Test for Determining Interface Properties between Rebar and Concrete	-	-	-	1997
4	Corrosion Protection : Concrete Bridges	FHWA	FHWA	美國	1998
5	Service life prediction of reinforced concrete structures	Cement and Concrete research	Cement and Concrete research	美國	1999
6	Degradation of the Bond Strength between Rebar and Concrete due to the Impressed Cathodic Current	Journal of Marine Science and Technology	Journal of Marine Science and Technology	美國	1999
7	Use of Reference Electrodes for Atmospherically Exposed Reinforced Concrete Structures	NACE International	NACE Publication 11100	美國	2000
8	鋼筋混凝土結構物防蝕技術研討會論文集	中興大學 台灣省交通處港 灣技術研究所 國科會工程科技 推展中心	中興大學 台灣省交通處港 灣技術研究所 國科會工程科技推 展中心	中華民國	1989
9	工程構造物腐蝕與防治研討會論文集	中華民國防蝕工 程學會	-	中華民國	1995
10	台灣混凝土橋梁等結構物腐蝕之危機與防蝕技術	台灣公路工程	莊秋明	中華民國	1998
11	結構材料的腐蝕與防護 - 第二屆海峽兩岸材料腐蝕與防護研討會論文集	中華民國防蝕工 程學會	中華民國防蝕工程學 會	中華民國	2000
12	鋼筋混凝土結構中鋼筋腐蝕及其耐久性的統計分析	中興工程	梁明德、梁智信、 伍世恆	中華民國	-
13	關於海砂對鋼筋混凝土影響及鍍鋅鋼筋應用設計施工指針	-	邱榮欽、邱士娟	中華民國	-
14	海洋環境之鋼筋及預力混凝土防蝕系統探討	-	林維明	中華民國	-
15	鋼筋或預力混凝土橋梁等結構物鹽害之防治研究	-	莊秋明	中華民國	-
16	陰極防蝕在混凝土橋梁上之應用	-	林維明	中華民國	-

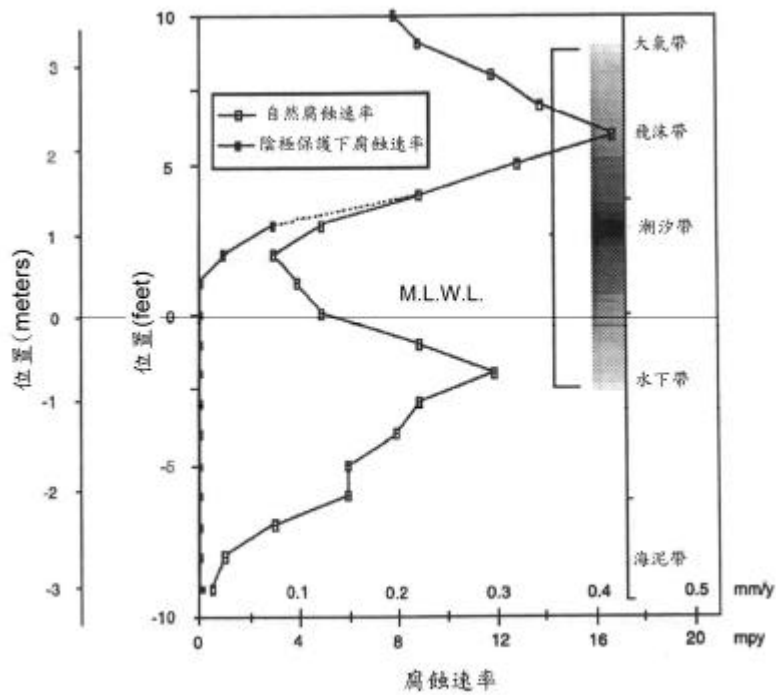


圖 2.1 碳鋼在海洋環境中腐蝕速率與曝露環境之關係  
(資料來源：NACE International Publication 1G194)

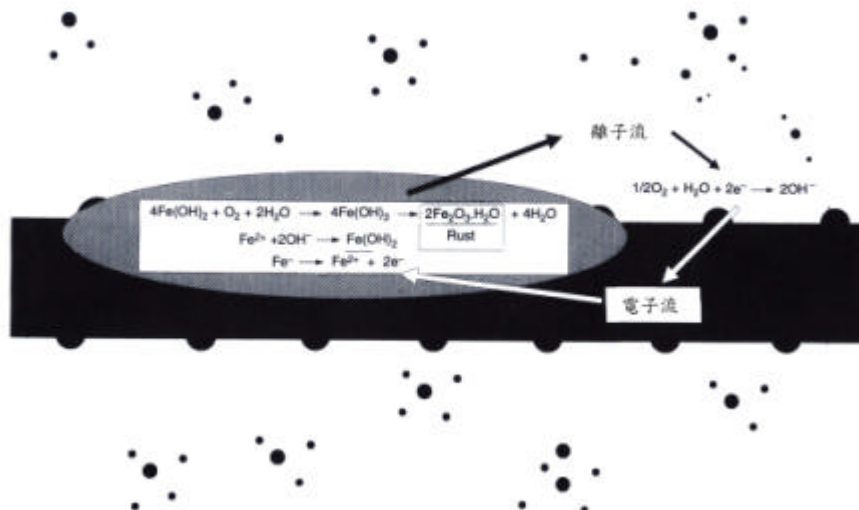


圖 2.2 鋼筋腐蝕機理示意圖

(資料來源：Corrosion of Steel in Concrete, E & FN SPON)

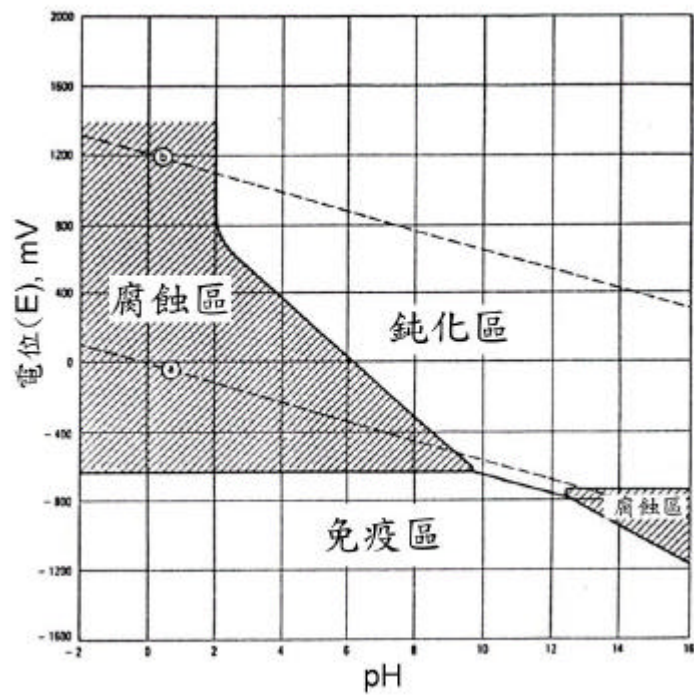


圖 2.3 鐵腐蝕區、鈍化區、免疫區分佈圖

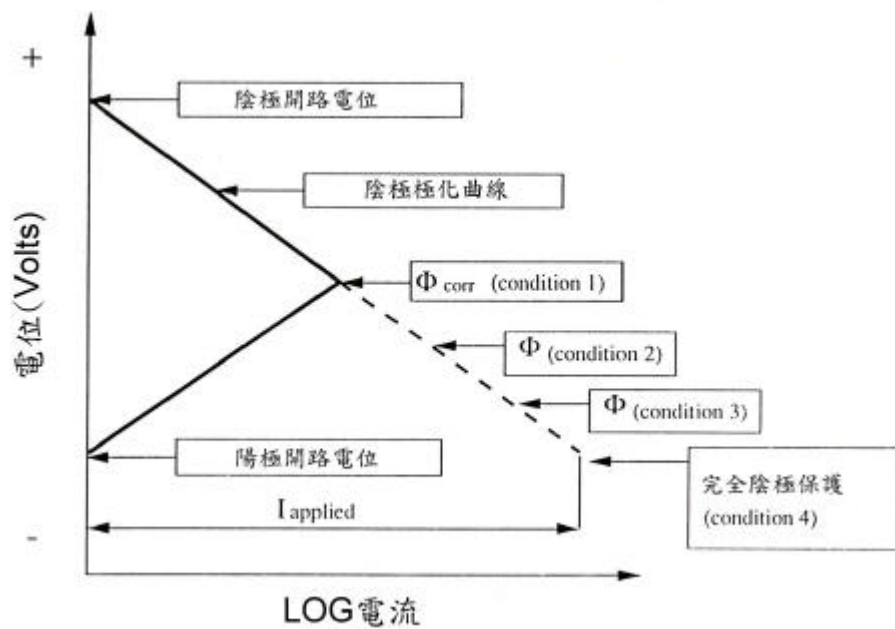


圖 2.4 陰極保護極化示意圖

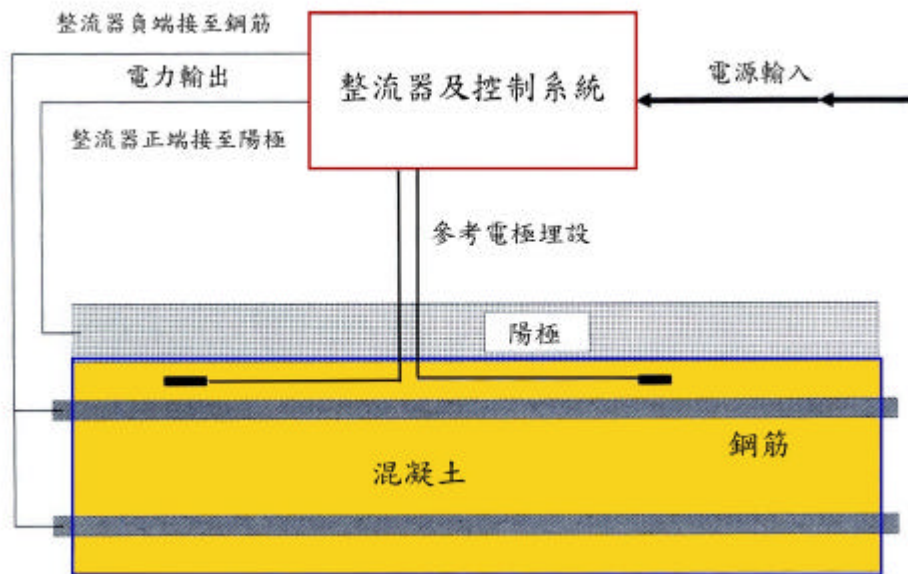


圖 2.5 外加電流式陰極保護

(資料來源：Corrosion of Steel in Concrete, E & FN SPON)

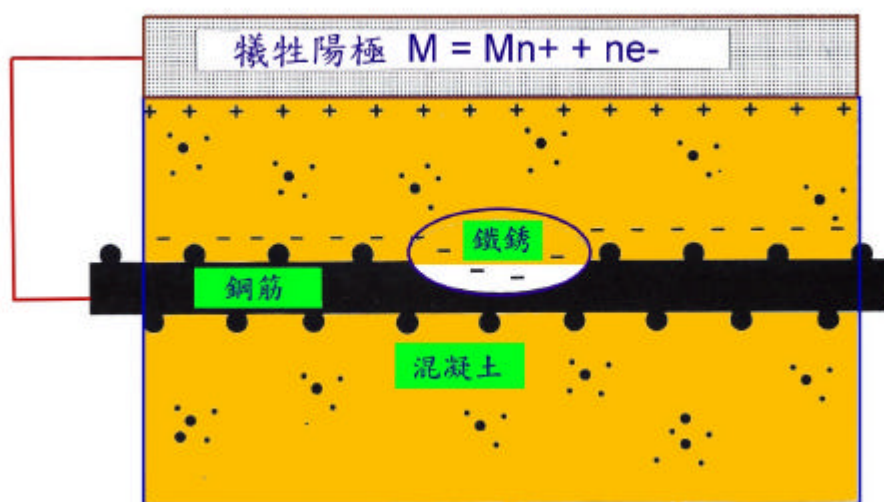


圖 2.6 犧牲陽極式陰極保護

(資料來源：Corrosion of Steel in Concrete, E & FN SPON)



### 第三章 鋼筋混凝土陰極防蝕案例

為瞭解國內外使用鋼筋混凝土陰極防蝕之成效，今蒐集若干案例加以討論並分述於下：

#### 3.1 案例一：犧牲陽極式陰極保護－鋅網<sup>[7]</sup>

美國佛羅里達交通局(Florida Dept. of Transportation, FDOT)於1998年於 Broward River Bridge in Jacksonville, FL 施作此工法，選擇橋墩的兩支基樁進行測試，該橋位處海洋環境，基樁下部浸漬於海水中。

該工法為 FDOT 發展出專為基樁 RC 結構於水下帶、潮間帶、飛沫帶之陰極防蝕使用。其工法為以鋅網為主要陽極，內置於玻璃纖維製成之基樁夾層(pile jacket)內，而另一鋅塊為輔助陽極，置於低潮線下 0.6 m 的海水中，利用銅線將陽極與鋼筋連接。施工時將兩片夾層包覆於混凝土表面，夾層與混凝土間間距 5.1 cm (2 in)，然後以砂漿水泥灌注至夾層中。安裝示意圖如圖 3.1 所示。

在高潮線附近，施作前基樁鋼筋的平均腐蝕電位為-305 mV(vs. Ag/AgCl)，系統安裝後，鋼筋電位為-408 mV(vs. Ag/AgCl)，平均供給電流為 124 mA；水下部份，施作前鋼筋電位為 -603 mV(vs. Cu/CuSO<sub>4</sub>)，系統安裝後電位下降至-688 mV(vs. Cu/CuSO<sub>4</sub>)。11 日後，鋅網供給電流為 52 mA，且鋼筋在高潮線附近的保護電位為-418 mV(vs. Ag/AgCl)，瞬間斷電電位為-407 mV(vs. Ag/AgCl)，極化量為 102 mV；而水下部份，鋼筋電位為-895 mV(vs. Cu/CuSO<sub>4</sub>)，瞬間斷電電位為-869 mV(vs. Cu/CuSO<sub>4</sub>)，極化量為 266 mV。此後，於高潮線附近，鋼筋的保護電位與鋅網的供給電流均維持在此陰極防蝕系統安裝後 11 日所量測到的數值，且水下部份，鋼筋電位在 300 日後下降至-981 mV(vs. Cu/CuSO<sub>4</sub>)。施作後 400 日，兩基樁在高潮線附近鋼筋的極化量分別為 118 mV 及 165mV，符合 NACE 100 mV 極化量之標準。基樁鋼筋電位之時間之序列圖如圖 3.2 所示。

### 3.2 案例二： 外加電流式陰極保護 – 鈦網陽極<sup>[8]</sup>

香港 Kwai Chung 貨櫃碼頭為棧橋式碼頭，興建已近 20 年。1991 年進行碼頭安全檢測時發現碼頭背面近海部份鋼筋銹蝕，且混凝土有剝落(delamination)的現象；其中，大樑部份，混凝土剝落面積達 50%。經判斷，鋼筋腐蝕的原因是因該處位處海洋環境中的飛沫帶，鋼筋混凝土結構受海水潑濺，氯離子大量入侵所致。美國 Corpro 公司於 1992 年使用鈦網陽極，以外加電流式之陰極保護系統進行碼頭大樑鋼筋混凝土修補。

該工程使用的鈦網陽極基材為 Titanium, Grade 1 per ASTM B265，外覆 Mixed Metal Oxide，但針對大樑的不同的部位，選擇不同尺寸的鈦網進行保護；一為網目較疏的鈦網，其最大輸出電流為  $24.4 \text{ mA/m}^2$ ，應用於大樑側面，一為網目較密的鈦網，最大輸出電流為  $37.8 \text{ mA/m}^2$ ，應用於大樑背端近海部份，至於碼頭與鋼管樁樁頭接頭部份之結構，則使用兩層鈦網進行保護。鋪設完成後利用噴漿混凝土(sand cement shotcrete layer)覆蓋鈦網，混凝土的厚度為 5.1 cm (2 in)以上，並設遠端監測系統(remote monitoring system)，監控鋼筋之極化電位。1992 年 Corpro 公司於該碼頭完成混凝土面積  $2508 \text{ m}^2$  之陰極保護，1993 年完成  $3438 \text{ m}^2$ ，1994 年完成  $10800 \text{ m}^2$ ，經過 3 年的追蹤，鋼筋之極化量均符合 NACE 100 mV 極化量之標準。

### 3.3 案例三： 國內棧橋碼頭基樁陰極防蝕工程<sup>[9]</sup>

該棧橋碼頭於 1996 年結構檢查時發現多處帽樑底部鋼筋腐蝕、混凝土剝落嚴重，氯離子含量偏高(最高達 CNC3090 容許值  $0.3\text{kg/m}^3$  的 25 倍)。依結構安全分析結果及建議，優先對橋墩帽樑的鋼筋混凝土進行陰極保護，以降低或抑制帽樑混凝土中鋼筋腐蝕。該碼頭連絡橋全程長度 1 公里，進行陰極防蝕的帽樑總數量為 23 座；本陰極防蝕系統為台灣第一座遠端遙控陰極防蝕系統，於 1997 年完工，至今仍正常運作中。其設計理念概述如下：

## 1.陽極系統選擇

各種陽極材料分別有其特質，適合不同條件上之使用。一般而言，選擇陽極系統之基本考量因素有：供電極限、耐暴露環境、施工便利、及經濟效益等。於陽極系統設計時，陽極材料選擇必須考慮其所能提供之陽極電流密度，以確保可達到陰極保護所需的總電流。鈦網陽極材料之電流密度為  $15\sim35\text{ mA/m}^2$ ，適合本工程設計所需電流密度，因此本工程選用之陽極為鈦網陽極材料。

## 2.偵測系統設計

鋼筋混凝土陰極防蝕之偵測系統使用參考電極需長期埋置於混凝土中，選用之參考電極必須符合高鹼性、乾燥環境及長期穩定等特質。埋置於混凝土中之參考電極一般選用凝膠態電解質，本工程使用 Ag/AgCl 膠態電解質參考電極。

## 3.配線系統設計

本工程採遙控式監偵測系統網路；特色在於將陰極防蝕系統各個區域劃分成陽極區，並設計一區域整流器。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偵測控制中心。此系統網路基本格式採並聯控制方式，對各陽極區進行保護；並使保護電流均勻分佈。

## 4.保護標準

鋼筋混凝土陰極防蝕效果之檢測，根據美國腐蝕工程師學會 NACE RP290-90、英國混凝土學會技術規範 Concrete Society Technical Report No. 37，建議採用「斷電後鋼筋電位去極化」之方式(Potential Decay Method)判斷，即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 小時後的電位，其差值必需在 100 mV 以上(即斷電 4 小時鋼筋電位去極化量 $>100\text{ mV}$ )，方能確定

陰極防蝕達到設計之預期效果；同時亦建議鋼筋陰極防蝕保護之電位下限為-1100 mV(vs. Ag/AgCl 參考電極)。

## 5. 維護管理

系統構件包括監偵測控制系統以及各陽極區之配線系統、陽極系統、參考電極和陰極系統。除了每年定期 2 次執行監偵測控制測試，瞭解其個別是否維持操作功能外，並於每年一次對硬體進行全面檢查，評估其個別構件外觀情況，建議是否需進行維修或更換消耗零組件。

成效說明：

### 1. 系統裝置

橋墩帽樑陰極防蝕系統共有 23 個陽極區，混凝土總保護面積為 1677m<sup>2</sup>。各帽樑有個別之陽極系統、陰極系統、偵測系統及配電系統，並統一由監偵測控制系統執行各帽樑保護電流供應之控制及保護效果偵測作業。

### 2. 監測控制

23 個陽極區均安裝偵測電極，並以獨立 DC 電流輸出保護電流。陽極區之陰極防蝕監偵測控制系統包括監控中心及區域監控兩段，區域監控具有偵測及供電之功能，而各區域監控之電流輸出及偵測訊號經由監控中心統一操作。

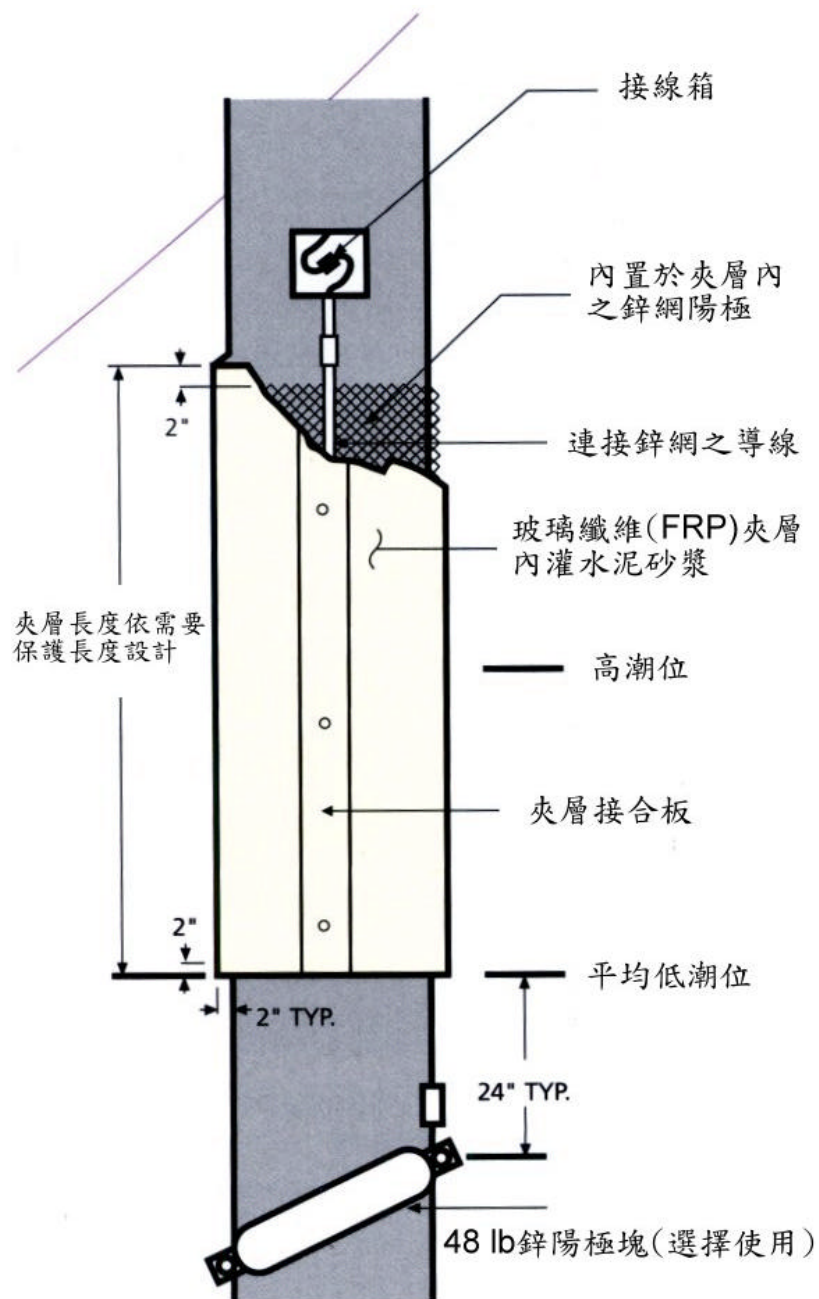
### 3. 陽極區保護電流

各陽極區選用之鈦網陽極系統系統組成構件為：鈦網陽極、鈦條陽極、.覆蓋層水泥。此外，為了進行系統保護效果偵測，於混凝土中預埋 Ag/AgCl 參考電極，並由該部位鋼筋接出測量點；偵測電極裝設位置包括低保護電流區域、高鋼筋密度區域、配電遠端區域，而實際所需保護電流量，則於系統完成安裝後測試鋼筋之極化量，再適度調整電流。

#### 4. 去極化量測試

利用監控系統進行斷電，量測鋼筋隨時間變化的電位值，計算鋼筋的去極化量(斷電瞬間與斷電後之鋼筋電位差)。電位去極化量之標準為 100mV，斷電時間為 4 小時。結果顯示，23 座橋墩中除 3 座帽樑需要多於 4 小時方能到達 100mV 的去極化量外，其他帽樑在 4 小時內均可達到 100mV 之去極化標準。由於在若干情形下，去極化量斷電時間允許超過 4 小時，且此 3 座帽樑的保護數據亦合乎規範要求，故 23 座橋墩帽樑可達到陰極保護標準。

運轉後追蹤結果顯示，該系統目前仍正常運行中，23 座橋墩帽樑陰極保護效果良好。



註：系統安裝前必須確保鋼筋之電連通性

圖 3.1 鋅網外加夾層之陰極保護系統

(資料來源：美國佛羅里達交通局，FDOT)

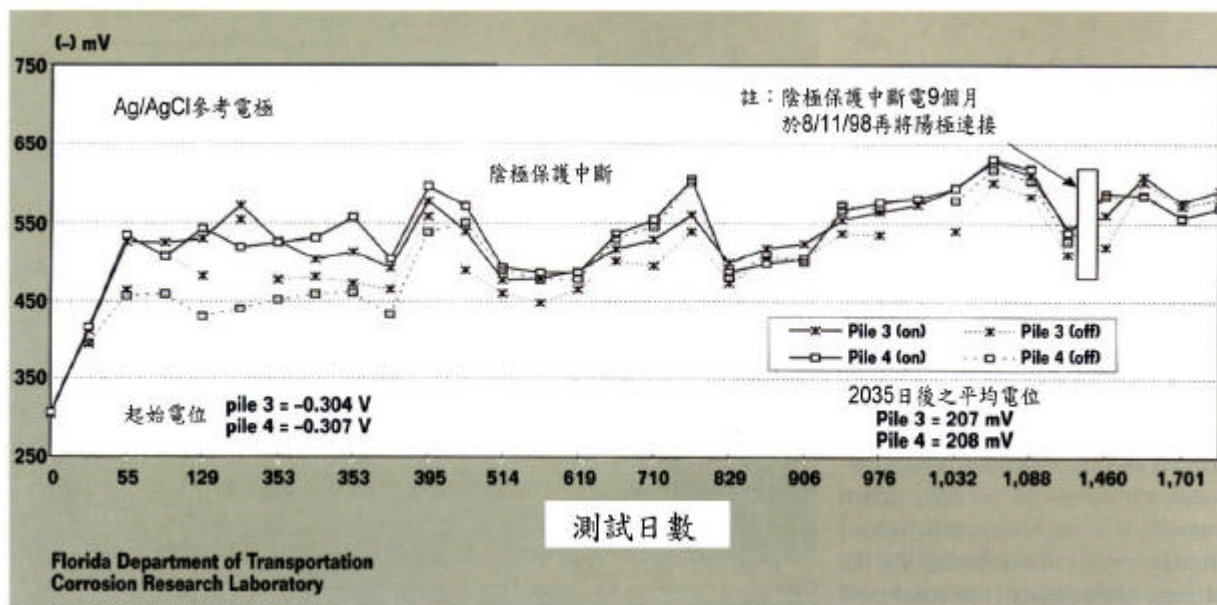


圖 3.2 Broward River Bridge in Jacksonville, FL 基樁鋼筋電位之時間序列圖

(資料來源：美國佛羅里達交通局，FDOT)

## 第四章 陰極防蝕系統選擇

鋼筋混凝土陰極防蝕技術在歐、美、日、加等國已使用多年，經驗指出，陰極防蝕法可有效抑制混凝土中鋼筋腐蝕。其方法為利用外加電流法或犧牲陽極法促使陽極放電，電流經混凝土介質而將鋼筋極化，最後使鋼筋受到保護。其中保護電流密度的決定主要是由混凝土中鋼筋表面積及鋼筋腐蝕程度兩大因素來決定；鋼筋腐蝕程度嚴重之區域，其鋼筋表面腐蝕電化學反應較為激烈，需要較高的保護電流密度；而保護電流密度的供應和陽極材料的種類有又相當大的關係。一般而言，鋼筋混凝土陰極防蝕之陽極材料是由主要陽極及次要陽極所組成。主要陽極主要功能是傳送來自電流供應器的電流到次要陽極。次要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。今將國外鋼筋混凝土陰極防蝕系統分述如後：

### 4.1 外加電流法

係利用外部直流電源裝置(定電流或定電壓)，以混凝土作為電解質，設置陽極提供防蝕電流給鋼筋，達到防蝕之目的。根據美國佛羅里達州交通局(Florida Department of Transportation, FDOT)之研究，外加電源法依照使用陽極之方式可再細分為下列五種方式：

#### 4.1.1 導電性塗料(Conductive Coating System)

導電性塗料為先在混凝土表面挖一細溝，埋入白金鈦線與導電性樹脂，作為導電用主要陽極，然後在混凝土面塗覆碳系(含 70% 以上碳素)顏料等導電性塗料作為次要陽極之裝設。

1984 年 FDOT 在佛州東岸兩座橋梁的基樁(pile)、橫樑(beam)、與橋面底部(underdeck)首次施行導電性塗料之陰極保護，由於當時並無鋼筋混凝土陰極防蝕的保護標準，因此參考鋼鐵在土壤或海水中的保護標準(NACE Standard RP-01-69-83)，即鋼鐵在陰極保護下極化後之電位



需負於-850 mV (vs.硫酸銅參考電極)。系統安裝後，暴露於大氣中之結構，如橫樑(beam) 橋面底部(underdeck)，鋼筋的電位均負於-850 mV (vs. 硫酸銅參考電極)，符合 NACE Standard RP-01-69-83 之要求；但位於潮間帶之基樁(pile)，由於潮位(水位)的變化，使導電塗料由混凝土表面剝離(disbanding)，造成保護電流分佈不均，鋼筋電位無法達到-850 mV (vs. 硫酸銅參考電極)或更負。因此，此陰極防蝕系統可適用於大氣中之鋼筋混凝土防蝕，但不適用於潮間帶與海水浸泡區域之 RC 結構。

#### **4.1.2 導電性橡膠(Conductive Rubber Anode)**

導電性橡膠系統為先在混凝土表面挖一細溝，埋入白金鈦線與導電性樹脂，作為導電用主要陽極，然後在混凝土面鋪設導電性橡膠為次要陽極之裝設。

此系統為導電性塗料系統之改良，適用於潮間帶區域之 RC 結構防蝕，1987 年 FDOT 於 B. B. McCormick Bridge in Jacksonville, FL 進行試驗，圖 4.1 所示。其材料為一片狀(mat)之橡膠，內含大量的碳，總體積比電阻(total volume resistivity)為 1.5 ohm-cm；與混凝土緊密接著的橡膠側有若干凹槽，該凹槽設計之目的為潮水漲落時，潮水可將累積於橡膠表面的海鹽沖洗乾淨，並維持一潮濕環境，有利橡膠與混凝土界面間之電連通。導電橡膠安裝後，於導電性橡膠外層需包覆矽膠橡皮墊(silicon rubber pad)與塑膠板(或玻璃纖維板)，作為防止碰撞之保護措施。根據 FDOT 之測試研究，該系統的服務年限為 5~17 年，端視結構物所在海象之嚴苛環境而定；此外，該系統之設置，建議應在混凝土樁初期發生裂縫或鋼筋之自然電位負於-350 mV(vs.硫酸銅參考電極)時裝設。

#### **4.1.3 鈦網陽極-外覆混凝土(Titanium Mesh Anode Embedded in Gunite)**

此陰極保護方法係利用 mixed metal oxides(MMO)鈦網作為主要陽極，因電流分佈均勻，不需裝設次要陽極。即利用塑膠固定帶(plastic

fasteners)將鈦網直接鋪設於欲保護鋼筋之混凝土表面上，然後再用混凝土覆蓋鈦網，混凝土的厚度需在 5.1 cm (2 in)以上。

1988 年 FDOT 在 Howard Frankland Bridge in Tampa, FL 首次進行鈦網陽極外加電流式陰極保護工程，圖 4.2 所示；由於部份被保護結構物處於乾燥的大氣環境中，而部份處於乾濕交替的潮間帶或水下帶，所以施工當時於大氣帶、潮間帶、水下帶之混凝土中均埋設氯化銀參考電極，用以監測鋼筋電位。設計之初，採單一迴路之陰極保護系統。結果顯示，無陰極保護時，大氣帶、潮間帶、水下帶之鋼筋電位分別為 -290 mV，-441 mV，-464 mV；通電兩週後鋼筋之電位分別為 -460 mV，-629 mV，-680 mV；六個月後，利用四小時退極化之測試方法量得鋼筋之極化量在大氣帶為 132 mV，水下帶為 214 mV，陰極保護效果良好，但浸漬於潮間帶與水下帶的新覆混凝土有剝落現象，這是因新覆混凝土在潮濕環境中無法與舊有混凝土緊密結合(bonding)之結果。所以，該工法(外覆混凝土)適用於乾燥之大氣帶，而不適用於與海水直接接觸之潮間帶與水下帶。

#### **4.1.4 鈦網陽極–外覆鋼筋混凝土保護結構(Titanium Mesh Anode Encapsulated in Structural Jacket)**

此陰極保護方法亦利用 mixed metal oxides(MMO)鈦網作為主要陽極，為外覆混凝土工法之改良，其工法為在既有 RC 結構物外包覆新的鋼筋混凝土結構，且舊有結構物之鋼筋不得與新設鋼筋有電連通現象，再利用整流器提供不同的保護電流，分別保護舊有結構物之鋼筋與新設夾層之鋼筋。該工法不僅可對舊有結構物之鋼筋進行陰極保護，並有補強之功能 FDOT 於 Verle Allen Pope Bridge in Crescent Beach, FL 進行此工法研究，圖 4.3 所示，經過兩年的評估，該橋樁在陰極保護下，鋼筋無腐蝕劣化之趨勢。

#### **4.1.5 外加電流–外覆保護夾層系統(Impressed Current CP Pile Jacket System)**

該工法是針對基樁(pile)之陰極保護措施，即利用 mixed metal oxides (MMO)鈦網作為主要陽極，將陽極固定在玻璃纖維(fiberglass stay-in-place form)製成的夾層內；施工時將夾層包覆在舊有基樁上，而混凝土基樁與夾層間之間距固定為 7.6 cm (3 in)，內填波特蘭水泥砂漿 (Portland cement-sand mortar)。夾層裝置前舊有混凝土結構表面需先作清潔與修補的工作。FDOT 於 Ribault River Bridge in Jacksonville, FL 進行此工法施作，圖 4.4 所示，初期供應之保護電流在 9~22 mA/m<sup>2</sup> 之間，極化穩定後之供給電流為 6.4 mA/m<sup>2</sup>，鋼筋電位為 -780 ~ -990 mV (vs. 硫酸銅參考電極)，陰極防蝕效果良好。此系統已被 FDOT 制定為基樁陰極保護及修復之標準工法。

## 4.2 犧牲陽極法

犧牲陽極方式係使用相對於鋼材活性較高(易氧化)之金屬(例如鋅)等作為犧牲陽極，以導線連接鋼筋與陽極，利用兩者之電位差產生防蝕電流，達到防蝕之目的。根據美國佛羅里達州交通局(Florida Department of Transportation, FDOT)之研究，犧牲陽極法依照使用陽極之方式可再細分為下列四種方式：

### 4.2.1 鋅熔射方式(Sprayed Sacrificial Zinc Metalizing System)

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

1989 年 FDOT 於 Niles Channel Bridge in Key West, FL 進行此工法

施作，圖 4.5 所示。根據量測，由此系統產生的保護電流密度為  $0.5 \text{ A/cm}^2$ ，經過 5 年，保護效果良好。值得注意的是，此系統的服務壽命約為 7 至 8 年，超過年限則需再作噴塗，且無法使用在與水直接接觸的 RC 結構，因水會加速混凝土表層鋅陽極之消耗。

#### 4.2.2 鋅板方式(Perforated Zinc Sheet System)

鋅板採用 ASTM A-190, 99.9% 的純鋅製成，依基樁型式製成鋅板，直接包覆於混凝土表面，鋅板外層再利用 50% 塑膠(plastic)，50% 木質纖維(wood fiber)製成之夾板包覆，此夾板內側有凹槽，此凹槽可匯聚水氣以增加混凝土的導電性，並藉潮汐漲落可將鋅的氧化產物沖洗掉；而此夾板的固定方式則是利用 316 不銹鋼圈箍繫在舊有基樁結構上。鋅板與鋼筋間則利用銅線連接使之電連通。FDOT 首次於 B. B. McCormick Bridge in Jacksonville, FL 施作此工法，圖 4.6 所示，保護電流密度隨基樁之高程由大氣帶之  $8.6 \text{ mA/m}^2$  遞增至低潮線  $17.0 \text{ mA/m}^2$ ，且鋼筋之極化量在高潮位時為 300 至 430 mV，顯示陰極保護效果良好。由於此系統完工後不需特別維護，提供了外加電流陰極保護方式外之另一經濟有效的防蝕方法。

#### 4.2.3 鋅網-外覆保護夾層方式(Sacrificial Cathodic Protection Pile Jacket, Lifejacket System)

該工法為鋅板系統之改良，為 FDOT 發展出專為基樁 RC 結構於水下帶、潮間帶、飛沫帶之陰極防蝕使用。其工法為以鋅網為主要陽極，內置於玻璃纖維製成之基樁夾層(pile jacket)內，而另一鋅塊為輔助陽極，置於低潮線下 0.6 m 的海水中，利用銅線將陽極與鋼筋連接。施工時將兩片夾層包覆於混凝土表面，夾層與混凝土間間距 5.1 cm (2 in)，然後以砂漿水泥灌注至夾層中。FDOT 於 Broward River Bridge in Jacksonville, FL 施作此工法，如圖 4.7 所示。施作前鋼筋的腐蝕電位為 -305 mV (vs. Ag/AgCl)，施作後 410 日，進行退極化量測試，鋼筋的電位為 -590 mV，瞬間斷電電位為 -533 mV，71 小時後的退極化量為 118 mV，符合斷電後鋼筋電位去極化量  $>100 \text{ mV}$  之標準。由於此系統不需

外加電源且完工後僅需些許之維護，造價及施工均較外加電流式陰極保護系統經濟，已被 FDOT 廣為使用於 RC 基樁於水下帶、潮間帶(潮汐帶與飛沫帶)之陰極防蝕；根據 FDOT 之評估，該系統之服務壽命可達 45 年。

#### 4.2.4 鋅板導電凝膠(3M Zinc-Hydrogel Anode 4727)

鋅板導電凝膠為 3M 公司之專利產品，其組成為一厚 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，圖 4.8 所示。此工法發展至今約 5 年，經驗指出，導電膠在潮濕的環境中會失去黏著力而導致鋅膜脫落，造成電流分佈不均。因此此工法僅能適用於乾燥的大氣環境中。

綜合以上討論，表 4.1 為 FDOT 使用以上各種陰極防蝕方法之試驗結果。

### 4.3 港灣構造物陰極防蝕系統選擇

綜合以上討論，港灣鋼筋混凝土構造物依其暴露的海洋環境，如大氣帶、潮間帶(包含潮汐帶及飛沫帶)、水下帶，陰極防蝕系統的選擇可歸納如表 4.2。顯然的，在大氣帶之鋼筋混凝土結構，其陰極防蝕系統的選擇，若以外加電流式之鈦網陽極-外覆混凝土、犧牲陽極式之鋅熔射、鋅板導電凝膠工法，可獲得較佳的陰極保護效果；而在潮間帶與水下帶，使用外加電流式之鈦網陽極-外覆保護夾層與犧牲陽極式之鋅網-外覆保護夾層，可獲得較佳的陰極保護效果。

由於導電性塗料僅適用於乾燥的環境，但在陽光照射的大氣帶，塗料有劣化之虞；若使用在潮濕的環境，會因潮位(水位)的變化，使塗料由混凝土表面剝離(disbanding)，造成保護電流分佈不均。導電性橡膠需於混凝土樁初期發生裂縫或鋼筋之自然電位負於-350 mV(vs.硫酸銅參考電極)時裝設，有使用條件的限制。鈦網陽極-外覆混凝土的工法

在潮間帶與水下帶施作時，新覆混凝土會產生剝落現象，這是因新覆混凝土在潮濕環境中無法與舊有混凝土緊密結合(bonding)之故；相對而言，使用鈦網陽極-外覆保護夾層工法，可改善上述缺失。鋅熔射方式，僅能適用於乾燥的大氣帶，在潮濕的環境中，水會加速混凝土表層鋅陽極的消耗，故不適用於潮間帶與水下帶；鋅板導電凝膠工法所使用之特殊導電膠，在潮濕的環境中會失去黏著力，導致鋅板脫落，電流分佈不均，亦不適用於潮間帶與水下帶；然而鋅網-外覆保護夾層的保護方式，完工後僅需些許之維護，造價及施工均較外加電流式陰極保護系統經濟，已被 FDOT 廣為使用於 RC 基樁水下帶、潮間帶(潮汐帶與飛沫帶)陰極防蝕之主要工法。

#### 4.4 陰極防蝕系統使用材料及設備需求

陰極防蝕系統主要使用材料及設備包括陽極材料、參考電極、整流器、導線、混凝土修補填充料等，今概述如下：

##### 4.4.1 陽極材料

外加電流法與犧牲陽極法所使用的陽極材料有很大的區別。犧牲陽極必需在所使用的環境中對被保護的金屬而言為陽極，且不能鈍化。而外加電流法的陽極活性可較被保護的金屬低，但連接陰極防蝕系統時，消耗速率必需很低。目前鋼筋混凝土外加電流式陰極保護系統使用的陽極為以鈦為基材外覆金屬氧化物之鈦網或鈦條陽極(簡稱鈦陽極)，而犧牲陽極式則為以鋅為基材之鋅網、鋅板、或鋅熔射，概述如下：

##### 1. 鈦陽極

鈦陽極基材為 Titanium, Grade 1 per ASTM B 265, 外覆貴重金屬或其他金屬氧化物(Mixed Metal Oxide, MMO)，物理性質具延展性。其製成形狀有管狀、網狀、或條狀，對鋼筋混凝土而言，使用之陽極為網狀(鈦網)或條狀(鈦條)。鈦網網目在 30 x 70 mm 至 100 x 200 mm

之間，且根據實驗室的加速試驗，鈦網表面電流密度為  $200 \text{ mA/m}^2$  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  $110 \text{ mA/m}^2$  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

FDOT 建議使用鋅網材料成份為 ASTM B6/B69，即：

<u>Composition</u>	<u>Range (wt %)</u>
Cu	0.3 – 0.9
Pb	<0.005
Cd	<0.005
Fe	<0.01
Al	<0.001
Zn	Bal.

## 3. 鋅熔射

鋅熔射所使用的陽極材料為純鋅，依 ASTM B 8331 或 ANSI/AWS 5.33 之規定，鋅成分最少為 99.5%，鋅線之線徑最少為 4.8 mm。噴塗厚度依照 FDOT 建議為 0.38~0.5 mm，英國 Concrete Society 建議為 0.2 mm；陽極表面電流密度為  $2\text{-}20 \text{ mA/m}^2$ 。此系統的服務壽命約為 7 至 8 年，超過年限需再作噴塗。該材料工法無法使用在下列鋼

筋混凝土結構上：(1)潮濕的結構物，(2)結構物氯離子含量差異過大，或(3)孔隙率較大之混凝土結構物。

#### 4. 鋅板導電凝膠(3M Zinc-Hydrogel Anode 4727)

鋅板導電凝膠為 3M 公司之專利產品，以鋅板為基材，塗佈一層離子傳導性之感壓凝膠，此感壓凝膠必須貼合上聚乙烯之離型膜以保護感壓凝膠層，以避免污染。鋅板厚度為 0.010 in (0.25mm)，感壓凝膠(離子傳導性壓克力凝膠)厚度約 0.030 in (0.75mm)，高密度聚乙烯離型膜厚度為 0.004 in (0.10mm)。在潮濕的環境中，離子傳導性壓克力凝膠會失去黏著力而導致鋅板脫落，造成電流分佈不均。

#### 4.4.2 參考電極

參考電極係供鋼筋電位量測使用，可分為攜帶式參考電極與永久式參考電極。攜帶式參考電極可置於混凝土表面量測鋼筋電位，常使用的有銅/硫酸銅參考電極(Cu/CuSO<sub>4</sub>)與銀/氯化銀參考電極(Ag/AgCl)；永久式參考電極則是永久埋設於混凝土中，通常為銀/氯化銀參考電極(Ag/AgCl)。

#### 4.4.3 整流器

整流器通常具多組輸出端，各輸出端提供可調式直流電，控制方式為定電流或定電壓輸出。整流器輸出可從整流器的電壓穩壓率與漣波率來探討。所謂電壓穩壓率是指在改變負載情況下，電路恆定輸出電壓的能力，即

$$\text{電壓穩壓率(\%)} = [(V_n - V_f) / V_f] * 100$$

式中，

$V_n$ ：無負載時的輸出電壓

$V_f$ ：滿載時的輸出電壓

電壓穩壓率的百分比值愈小，表示整流器輸出電壓中變動的成份



愈少，因此整流器之穩壓率建議為 10%。

漣波率則是以”漣波百分比值”來表示，即將整流器輸出漣波電壓的 R.M.S 值(AC V 之均方根值)與全部直流輸出電壓的平均值 V (dc out) 相比，再乘以 100，即

$$\text{漣波率(\%)} = [V_{(ac\ rms)} / V_{(dc\ out)}] * 100$$

漣波百分比值愈小，表示整流器之輸出電壓中交流成份愈少，整流效果愈好，因此整流器之漣波率規格建議為 5 %。

一般而言，一個整流器需提供 100~1000 m<sup>2</sup> 鋼筋表面的保護，若以保護電流密度 20 mA/m<sup>2</sup> 來計算，整流器需供給電流 2~20 Amp，電壓 20~30 Volt 左右，則輸出功率約為 40~600 Watt。

#### 4.4.4 導線

根據英國 Concrete Society Technical Report 36, Cathodic Protection of Reinforced Concrete<sup>[10]</sup>，陰極防蝕使用的導線通常為橫截面積 4.0 mm 之一條多股絞合的銅線(如 AWG7)，外覆絕緣層。絕緣材料如 CSP、XLPE、HDPE 均可適用，但在噴漿混凝土上使用時，線路可能會與陽極表面接觸，此時必需選用 XLPE 或絕緣性、耐久性更佳之 PVDF。

#### 4.4.5 混凝土修補填充材料

針對陰極防蝕需求，混凝土修補材料必需具有導電性，並與原混凝土具相似的比電阻係數。一般而言<sup>[10]</sup>，修補混凝土的比電阻應小於 50000 ohm-cm，抗壓強度應大於 3000 psi；環氧樹脂或壓克力樹脂系統因具較高之比電阻係數，不可作為混凝土修補填充材料。

表 4.1 FDOT 使用陰極防蝕法之研究成果

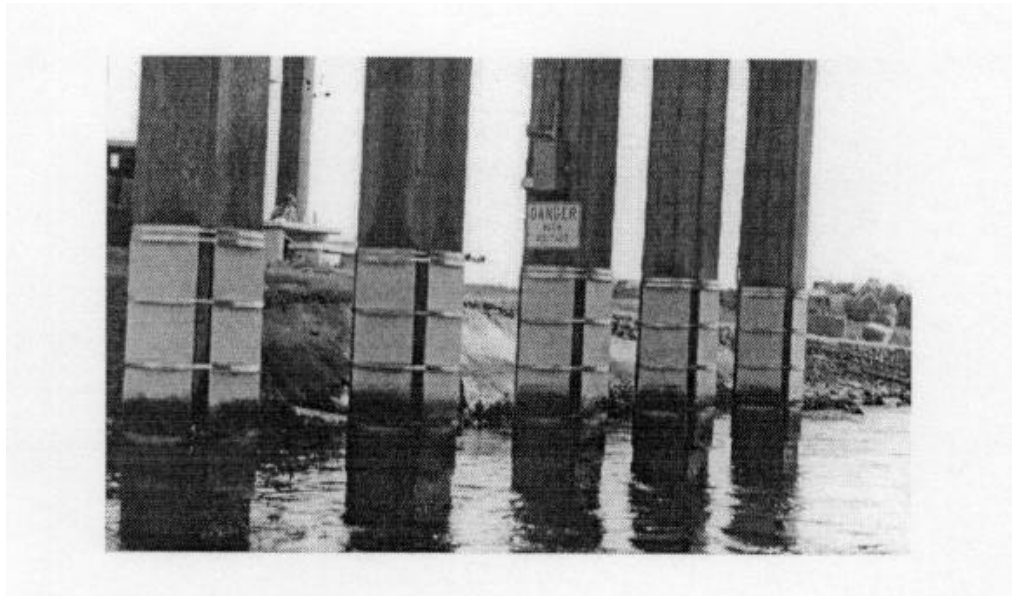
系統	試驗 時間 (月)	起始電流 密度 (mA/m <sup>2</sup> )	穩定供給 電流密度 (mA/m <sup>2</sup> )	起始 極化量 (mV)	長時間後 極化量 (mV)
導電性橡膠	60	58.1	10.7	130	425
鈦網陽極 - 外覆混凝土	48	21.5	13.9	81	380
鈦網陽極 - 外覆鋼筋混 凝土保護結 構	36	19.4	9.6	100	337
外加電流 - 外覆保護夾 層系統	48	15.5	6.0	150	305
鋅熔射方式	23	33.4	10.7	100	350
鋅板方式	12	29.9	12.9	114	385
鋅網 - 外覆 保護夾層方 式	34	15.1	9.7	90	228

(資料來源：美國佛羅里達交通局，FDOT)

表 4.2 鋼筋混凝土結構在海洋環境中陰極防蝕系統選擇

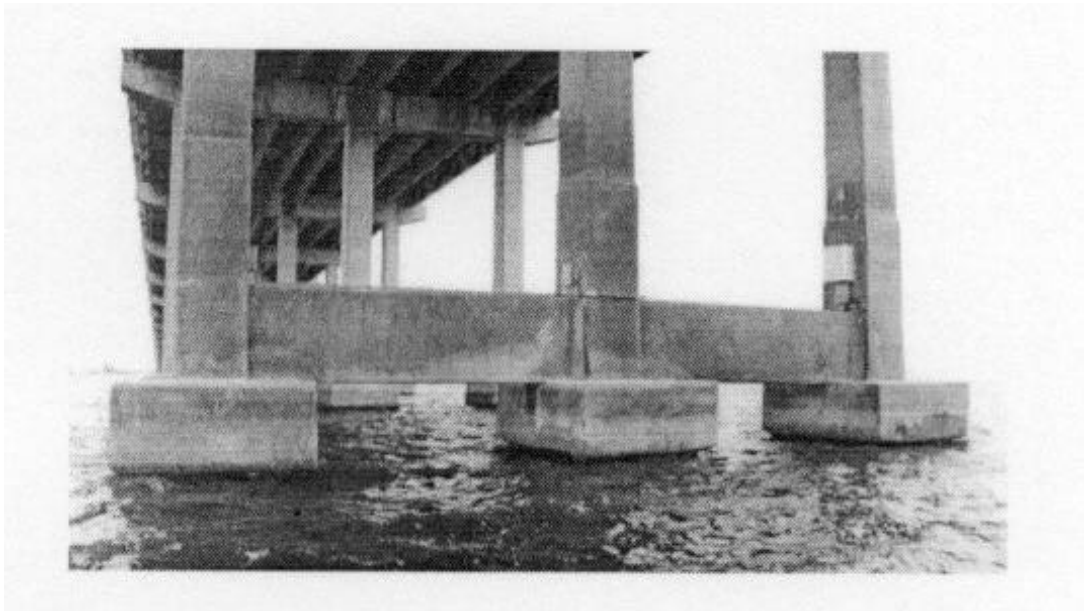
陰極防蝕系統 \ 暴露環境		大 氣 帶	潮 間 帶 (含飛沫帶)	水下帶
外加電流式	導電性塗料	○	△	△
	導電性橡膠	○	○	△
	鈦網陽極-外覆混凝土	⊙	○	○
	鈦網陽極-外覆保護夾層	○	⊙	⊙
犧牲陽極式	鋅熔射方式	⊙	△	△
	鋅網-外覆保護夾層方式	○	⊙	⊙
	鋅板導電凝膠	⊙	△	△

⊙ 防蝕效果理想      ○ 防蝕效果良好      △ 防蝕效果不佳



**圖 4.1 導電性橡膠陰極防蝕**

(資料來源：美國佛羅里達交通局，FDOT)



**圖 4.2 鈦網極—外覆混凝土**

(資料來源：美國佛羅里達交通局，FDOT)

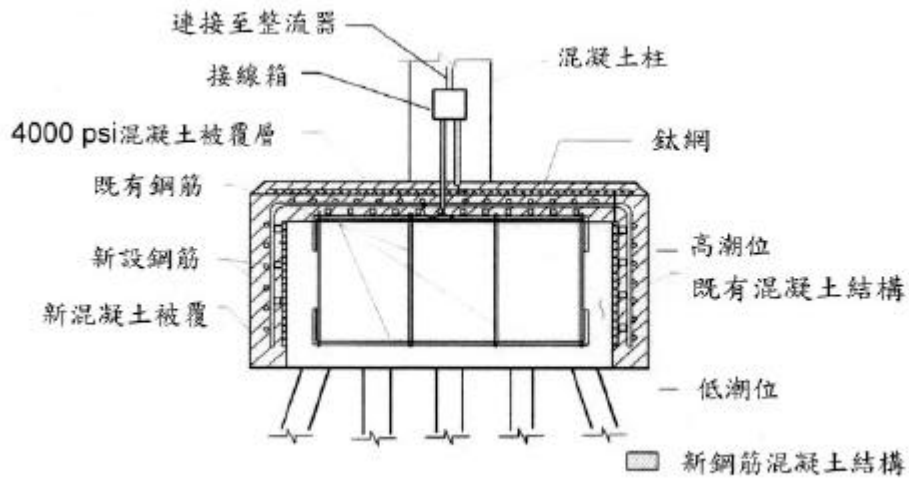


圖 4.3 鈦網陽極-外覆鋼筋混凝土保護結構

(資料來源：美國佛羅里達交通局，FDOT)

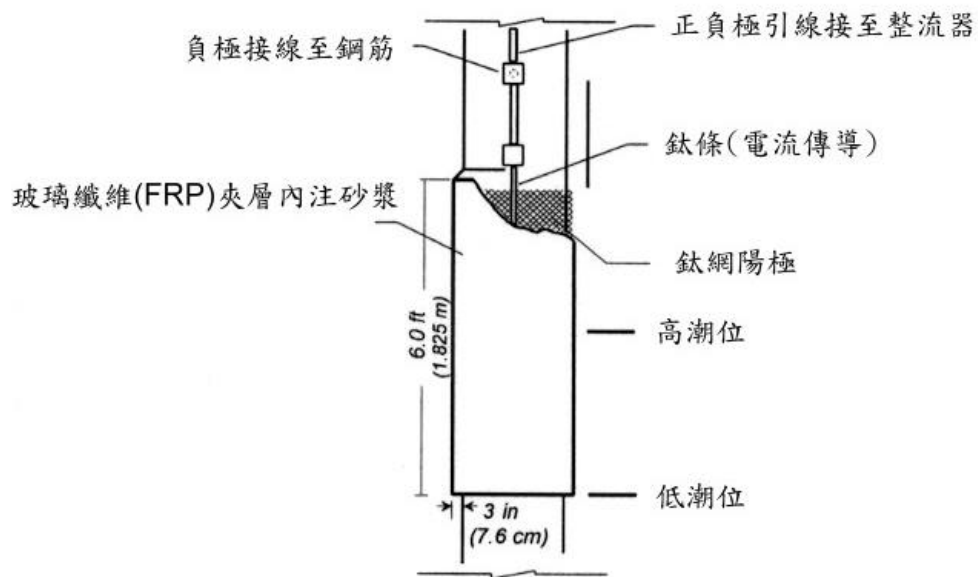


圖 4.4 外加電流-外覆保護夾層

(資料來源：美國佛羅里達交通局，FDOT)

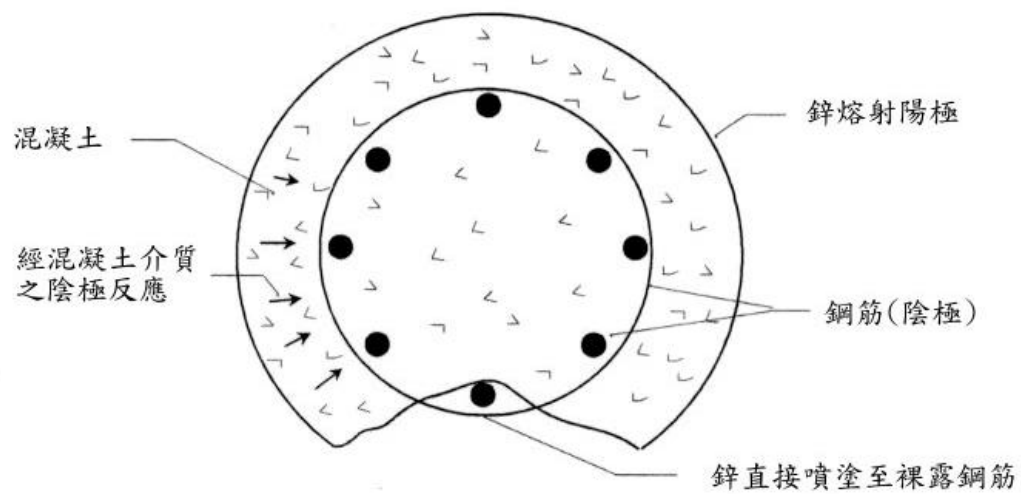


圖 4.5 鋅熔射方式陰極防蝕

(資料來源：美國佛羅里達交通局，FDOT)

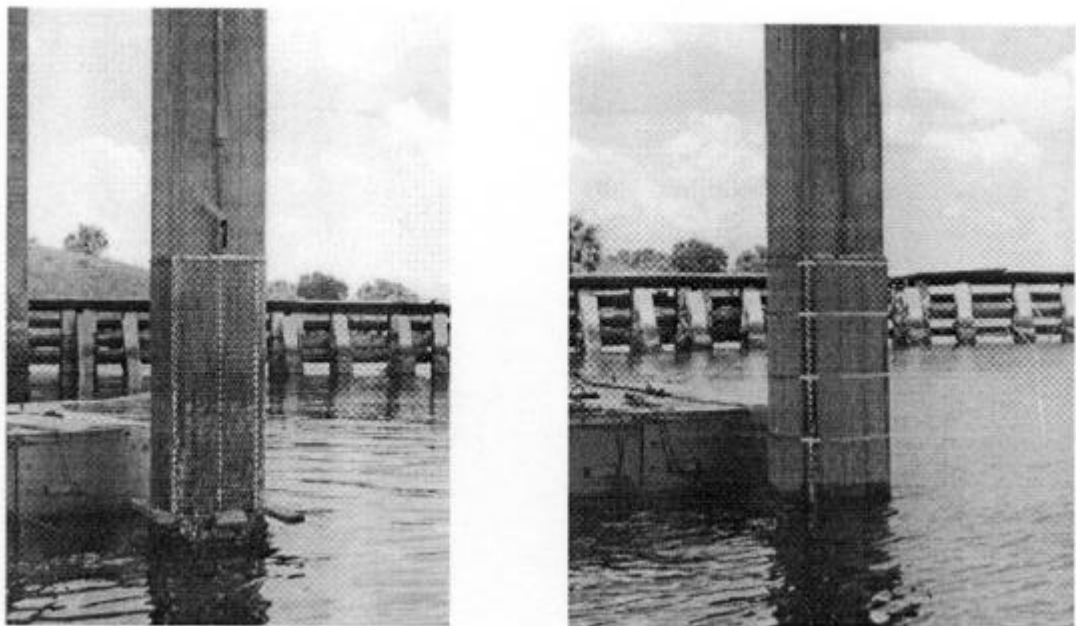
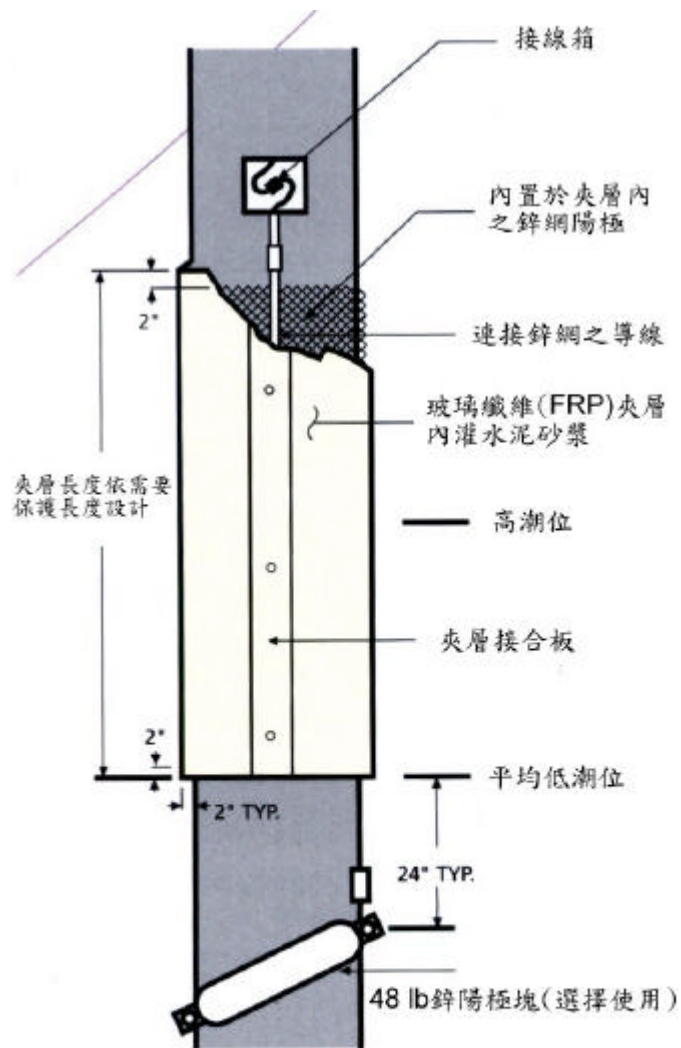


圖 4.6 鋅板方式陰極防蝕

(資料來源：美國佛羅里達交通局，FDOT)



註：系統安裝前必須確保鋼筋之電連通性

圖 4.7 鋅網-外覆保護夾層方式

(資料來源：美國佛羅里達交通局，FDOT)

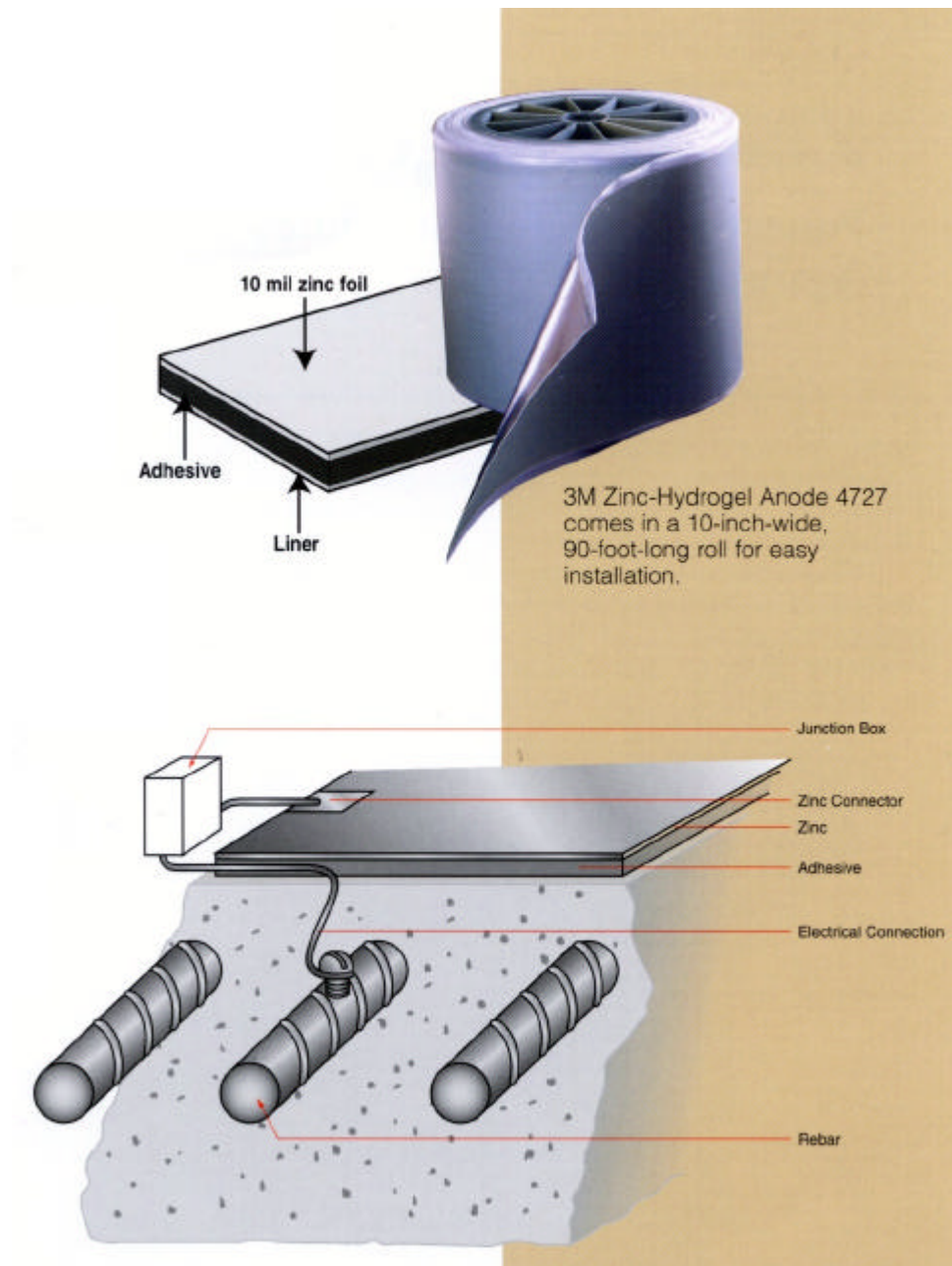


圖 4.8 鋅板導電凝膠陰極防蝕

(資料來源：3M 公司)



## 第五章 陰極防蝕安裝標準程序

港灣鋼筋混凝土構造物陰極防蝕系統的設計與施工，在工法選定之初即需加以規劃，對於新設與既有結構物，設計理念相同，差異僅在陽極系統、配線系統的安裝有所差異：新設結構物是採先工法，而既有結構物是採後工法。先工法為針對新設結構物，將陽極與配線在混凝土灌漿前即配合鋼筋所在的位置組裝，之後，再進行灌漿；而後工法則為結構工程完成後(如既有結構物)再進行防蝕施工；兩者之優缺點比較如下：。

	優 點	缺 點
先 工 法	1. 施工條件易控制 2. 價格便宜	1. 若施工周延性不足，責任歸屬不明 2. 修補造成預期耐用年限折損
後 工 法	1. 施工品質與責任歸屬一致	1. 工程較複雜、單價高 2. 水上與水中作業為專門性之技術，作業專職技術人力應納入考量

不論是採用外加電流式或是犧牲陽極式的陰極防蝕系統，設計前對既有結構物的檢測評估、工程計算與設計，施工時混凝土表層的處理、負極排流點的安裝、偵測電極(永久式參考電極)的設置、鋼筋導電性的改善、配線系統、以及監控系統的安裝，執行的方法步驟均相同，唯一差異僅在陽極系統的安裝會因使用陽極的不同而有所區別。今將陰極防蝕系統安裝之各工作要項，說明如後，工作流程規劃如圖 5.1。

### 5.1 設計前之檢測評估

### 5.1.1 結構物的安全

若結構物已被評估為危險或不安全，除非已完成適當補強工作，否則不應進行陰極防蝕。因為陰極防蝕處理僅可以控制鋼筋不再銹蝕，但無法使已生銹的鋼筋回復其原來的強度。

### 5.1.2 導電性考量

為使陰極防蝕的保護電流均勻分佈到各部份之鋼筋，鋼筋間的電連通性與局部漏電位置必需瞭解。

#### 1. 鋼筋間的電連通性

使用熔接鋼絲網或鐵絲搭接的鋼筋，只要電阻在容許值以下，即可保證導電性質良好。但是，鋼筋生銹後，搭接用的鐵絲亦會銹斷，所以當鋼筋間電阻值變高時應補搭鋼筋，以改善鋼筋之導電性。

#### 2. 局部漏電位置

澆置混凝土時所用的模板可能會使用一些金屬固定物，如金屬墊腳、板模固定釘等，當電流集中在這些金屬而短路回到系統時，會使大部份鋼筋未受到保護。此外，保護層較薄的地方也會造成局部電流集中的現象。

### 5.1.3 安裝前之調查工作

換句話說，陰極防蝕系統安裝前之調查工作應包括：

#### 1. 混凝土保護層厚度

鋼筋位置可用鋼筋位置探測儀於混凝土表面進行探測，藉以瞭解混凝土保護層厚度分佈情形。

#### 2. 鋼筋腐蝕電位(流)

混凝土中鋼筋腐蝕電位的測量工具為 Ag/AgCl 參考電極及高阻抗電位計；於鋼筋接出工作電極後，將參考電極置於混凝土表面進行測

量。電位測量前應先確定鋼筋的導電性，再以電化學交流電阻抗方法進行鋼筋腐蝕電流檢測。

### 3.鋼筋間的電連通性

鋼筋的連續性檢查可由遠端兩方的接點阻抗來判斷，最大阻抗不得超過 1 ohm，且每一個區域最少需做 1 次測試(一般 10 m<sup>2</sup> 測一次)。若鋼筋電阻值超過 1 ohm，應補搭鋼筋改善其導電性。陰極防蝕系統之負極排流點與工作電極於鋼筋上接續後，需以電阻計測量各位置間的電阻，確保系統電連通。

### 4.混凝土保護層剝落面積檢查

要實施陰極防蝕的區域均需進行剝離層測定，檢查混凝土因鋼筋腐蝕而剝落之狀況。檢查方法為使用鐵鎚敲擊混凝土表面之澆築瑕疵位置或因腐蝕剝落及裂縫位置，判斷是否出現空洞回聲。

### 5.混凝土比電阻量測

混凝土比電阻使用 Wenner Probe 四電極法測量，電極間距應在石子大小和混凝土厚度之間(一般為 1~7 cm)。一般而言，混凝土比電阻介於 5,000~50,000 ohm-cm 之間，且混凝土比電阻之均勻性為陰極防蝕系統的必要條件。

## 5.2 工程計算與設計

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。設計流程如圖 5.2。

## 5.3 混凝土表面處理

1.陽極區混凝土表面之油漬、塗漆、雜質、高電阻質修補材料、金屬物或剝落層等，會影響到陽極電流分佈之物質，皆必需完全清除。

2. 混凝土表層埋置之金屬物與鋼筋連接時必須挖除，以避免陰極防蝕電流集中或造成系統短路。
3. 裸露之鋼筋必需加以除銹，混凝土可鑿除至鋼筋背後以促進修復水泥與鋼筋之握裹情況。
4. 因鋼筋腐蝕或澆築瑕疵剝落之混凝土必須清除修復。
5. 混凝土鑿除部位以無收縮式修復水泥填補，修復水泥比電阻需在 50,000 ohm-cm 以下，且必需為適合陰極防蝕系統使用。
6. 混凝土表面使用水刀打毛，使表面均勻且略微粗糙以促進陽極灌漿水泥之附著。
7. 混凝土表層處理完成後，需再作檢視，若發現施工不符預期要求，應立即更正。

#### 5.4 負極排流點及工作電極之安裝

1. 負極排流點及工作電極安裝位置應依設計圖安裝。
2. 以鋼筋探測器尋出鋼筋位置後鑿出約可容納接點之孔洞，且避免在同一支鋼筋上安裝工作電極及負極排流點。
3. 負極排流點及之工作電極接出方法可使用螺絲固定法、短截鋼筋電焊熔接法、或導線熱熔接法。螺絲固定法是以自攻螺絲將已接好端子之導線鎖於鋼筋上；短截鋼筋電焊熔接法是將導線焊接於短截鋼筋上，再將短截鋼筋電焊至混凝土之鋼筋；導線熱熔接法則是將導線直焊接於混凝土鋼筋上。接出後，需用電阻計量測鋼筋與導線間之電阻，若電阻值趨近於零則表示之間接著良好，否則需檢查原因(鋼筋之間導電性不佳或接著不良)並予排除。接線確定無誤後以樹脂將接著處密封。
4. 樹脂乾燥後以修補水泥加以覆蓋，之後，再以電表量測各電極之間的電阻值，若電阻值異常或超過 1 ohm 則須重新安裝。

- 5.負極排流點之導線依施工工程圖接至陽極區配電盒位置，各導線兩端須預留一段(約 30 cm)，並覆以黑色熱縮套管及線標誌註明。
- 6.陽極範圍之引線以塑膠固定釘和束線帶依設計位置沿混凝土表面平貼固定，不可脫落。
- 7.負極排流點及工作電極安裝完成後，需檢查確認無誤後方可進行下一步驟之施工。

### 5.5 偵測電極(參考電極)安裝

- 1.參考電極位置安裝依設計圖安裝。
- 2.先以鋼筋探測器尋找橫向及縱向鋼筋，並鑿出面積約可容納參考電極之孔洞。
- 3.參考電極之安裝為將參考電極以塑膠紮線帶固定於垂直方向之鋼筋上，參考電極之探頭朝橫向鋼筋距離約 1 cm。
- 4.參考電極依施工工程圖接至配電盒位置，各導線續接部份需以覆熱縮套管(約 10 cm，參考電極為黃色，工作電極為藍色)及線標誌註明。
- 5.參考電極安裝需檢查確認無誤後方可進行下一步驟之施工。

### 5.6 鋼筋導電性改善

- 1.鋼筋銹斷處將會影響鋼筋的導電性，故將銹斷位置找出後將混凝土鑿除至鋼筋背後，以增加修復水泥與鋼筋間之握裹情況。
- 2.鋼筋進行除銹，並以焊接方式修補。

### 5.7 陽極安裝

陽極系統的安裝會因使用陽極的不同而有所區別。今將鈦陽極、鋅網-外覆保護夾層、與鋅板導電凝膠之安裝方式及建議注意事項，概

述如後：

### 5.7.1 鈦陽極之安裝

- 1.鈦陽極安裝包括鈦網陽極及鈦條基本陽極的安裝，安裝位置依設計圖。
- 2.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。
- 3.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。
- 4.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。
- 5.鈦條基本陽極需直接接到正極接出位置，不可中途續接。
- 6.鈦條基本陽極末端需預留 10 cm 以上之長度，以做接線用；接續的導線為陽極導線，需於配線盒內續接。
- 7.正極導線依設計圖接至陽極區配線盒內，各導線兩端預留 30 cm 並覆以 10 cm 紅色熱縮套管和標誌說明。
- 8.陽極導線以塑膠固定釘和束線帶依設計位置沿混凝土表面平貼固定。
- 9.陽極安裝完成後，需檢查確認無誤後方可進行下一步驟之施工。

### 5.7.2 鋅熔射

- 1.使用外加電流式陰極防蝕系統時，鋅熔射陽極必需與鋼筋完全隔離，不可使熔射陽極和鋼筋間產生短路。但使用犧牲陽極式陰極防蝕系統時，則須確保鋅熔射陽極與鋼筋相連，形成迴路。
- 2.混凝土需經過表面處理後方能進行鋅熔射，處理方式依 ASTM D 4285，清潔混凝土表面的油污與少數金屬。裸露鋼筋處理後鋼筋表面要接近金屬白色(SSPC-SP-10)。

3. 使用常溫電弧型熔射設備，熔射時堅硬而分裂的粉塵在空中累積後會爆炸，故熔射時在工作現場應保持良好的通風，且熔射槍的位置與熔射電源設備相隔須至少 30 m (100 ft.)。由於熔射可產生高溫，熔射槍必須由有經驗者操作，更須遠離任何易燃物品(如紙張、木材、油漆、清潔劑等)。
4. 混凝土在完成表面處理噴砂後 16 小時內須進行金屬熔射施工。熔射槍盡可能以直角接近噴塗物，即在直角  $\pm 45^\circ$  內施工。熔射厚度依保護鋼筋總表面積及欲保護年限設計計算，FDOT 建議為 0.38~0.5 mm，英國 Concrete Society 建議為 0.2 mm。
5. 熔射層厚度量測可依 ASTM E 367 以磁性測定法測量。檢測時應 50 平方公尺取 25 點作厚度量測，每點量測 5 次，取其平均值判定是否合乎標準。若不合格，需將該批次熔射部分刮除，並按表面處理方式處理後再予熔射。
6. 熔射層附著強度亦應依 ASTM D 445-85 規定之儀器及方式測定。

### 5.7.3 鋅網 - 外覆保護夾層(FRP)之安裝

1. 鋅網陽極安裝位置依設計圖安裝之。
2. FRP 保護夾層每組為兩片式，鋅網陽極鋪設並固定於 FRP 夾層內側，施工時將保護夾層直接包覆於基樁外圍並固定鎖緊。
3. FRP 夾層固定完成後，需確定夾層底部與外部隔絕(海水不會滲入)，並將夾層內部殘餘積水抽出，保持內部乾燥。
4. 由鋅網接出正極導線至接線盒，導線並覆以 10 cm 紅色熱縮套管和標誌說明。
5. 陽極區範圍之導線以塑膠固定釘和束線帶或固定夾依設計位置沿混凝土表面平貼固定。

6.陽極、保護夾層安裝完成後，需檢查確認無誤後方可進行下一步驟之施工。

#### 5.7.4 鋅板導電凝膠之安裝

- 1.安裝前確認混凝土表面之雜物已清除乾淨，並無任何導電性凸出物，若有，建議至少相距 2.5 cm 以上。
- 2.依照設計之施工圖裁切正確之鋅板陽極尺寸及數量。
- 3.以最長的混凝土覆蓋表面為鋅板陽極導電膠帶之尺寸，以降低鋅板連接數目。
- 4.貼覆時可順著邊緣或接縫線黏貼，以確認貼直。並以刮板或滾輪做感壓動作，以確認鋅板陽極導電膠貼覆牢固。
- 5.可先撕開離型膜約 30 cm，對好位置後再對露出導電凝膠之部分以手施壓固定於混凝土表面，隨後邊撕邊貼覆，並以刮板或滾輪感壓之。
- 6.每條鋅板之間隙可允許 0~12.7 cm 之距離，但避免重疊。
- 7.用 2.5 cm 直徑之圓形沖鑿器挖出一圓，露出混凝土表面，以利去極化時之電位量測，建議每個安裝至少有兩個量測點。
- 8.鋅板陽極垂直邊緣之上端，必須以 PU 填縫劑填補，以防止濕氣或雨水之侵入，破壞黏貼性。
- 9.貼覆完成後再用塑膠釘固定每一條鋅板陽極的兩端，塑膠釘之間距建議約 2.4 m，兩支同位置的塑膠釘可距約 15~30 cm。
- 10.所有鋅板陽極導電凝膠貼好後，必須用鋅板連接相鄰的兩條鋅板陽極（如 3M 4728），此鋅板厚度為 0.010 in (0.25mm)，寬度 2 in (5.0 cm)，長度 2~7 in (5.0~17.8 cm)，連接位置為鄰近鋅板陽極的兩端。
- 11.連接時先以 50/50 之助焊劑塗在欲連接處，再將連接用鋅條以焊接器焊上，焊接溫度範圍為 232~260 。



- 12.以 # 14 AWG 標準銅線焊在鋅板陽極上，且在每一個鋼筋混凝土結構體範圍至少兩個陽極連接點，焊接之連接線約 1.5 in (3.8 cm)長，焊接處以 100% 環氧樹脂覆蓋處理之。
- 13.所有鋅板陽極貼覆與連接完成後，亦可在其上做表面塗佈處理；處理前先用乾淨之布沾軟性之醇類溶劑擦拭乾淨，待乾燥後，再依塗料之施工法塗佈。

## 5.8 混凝土灌漿施工

- 1.施工前，混凝土表面的油漬、灰塵或其他雜物必須清除乾淨。
- 2.覆蓋施工之混凝土表層必須使水份飽和，面乾後即行施工。
- 3.對鈦陽極而言，覆蓋材料施工厚度約為 1.0~1.5 cm，並需完全覆蓋鈦網陽極，緊密附著於混凝土表面；而對鋅網-外覆保護夾層(FRP)之施工，灌漿材料必須填滿夾層內部，並完全覆蓋鋅網陽極，緊密附著於混凝土表面。

## 5.9 系統配線

- 1.配電盒的安裝位置依設計圖安裝。
- 2.將由陽極覆蓋層中接出之各電極導線、鈦條及續接導線接入配電盒中；配電盒內的導孔及任何隙縫需以矽膠密封。
- 3.以塑膠釘固定配電盒。
- 4.陽極引線、負極導線、工作電極導線、及考電極導線需於配電盒中端子台進行短路或續接，不可中途續接。
- 5.所有接至端子台之導線，末端需以熱縮套管(負極黑色、正極紅色、工作電極藍色、參考電極黃色)及線標誌註明。

## **5.10 監測控制系統安裝**

1. 監測控制系統之區域監控及中心監控位置依設計圖安裝。
2. 由中心監控箱接出之電源線及訊號線經線管接至各區域監控系統時，電源線及訊號線必需於配線盒端子台續接，不可中途續接。

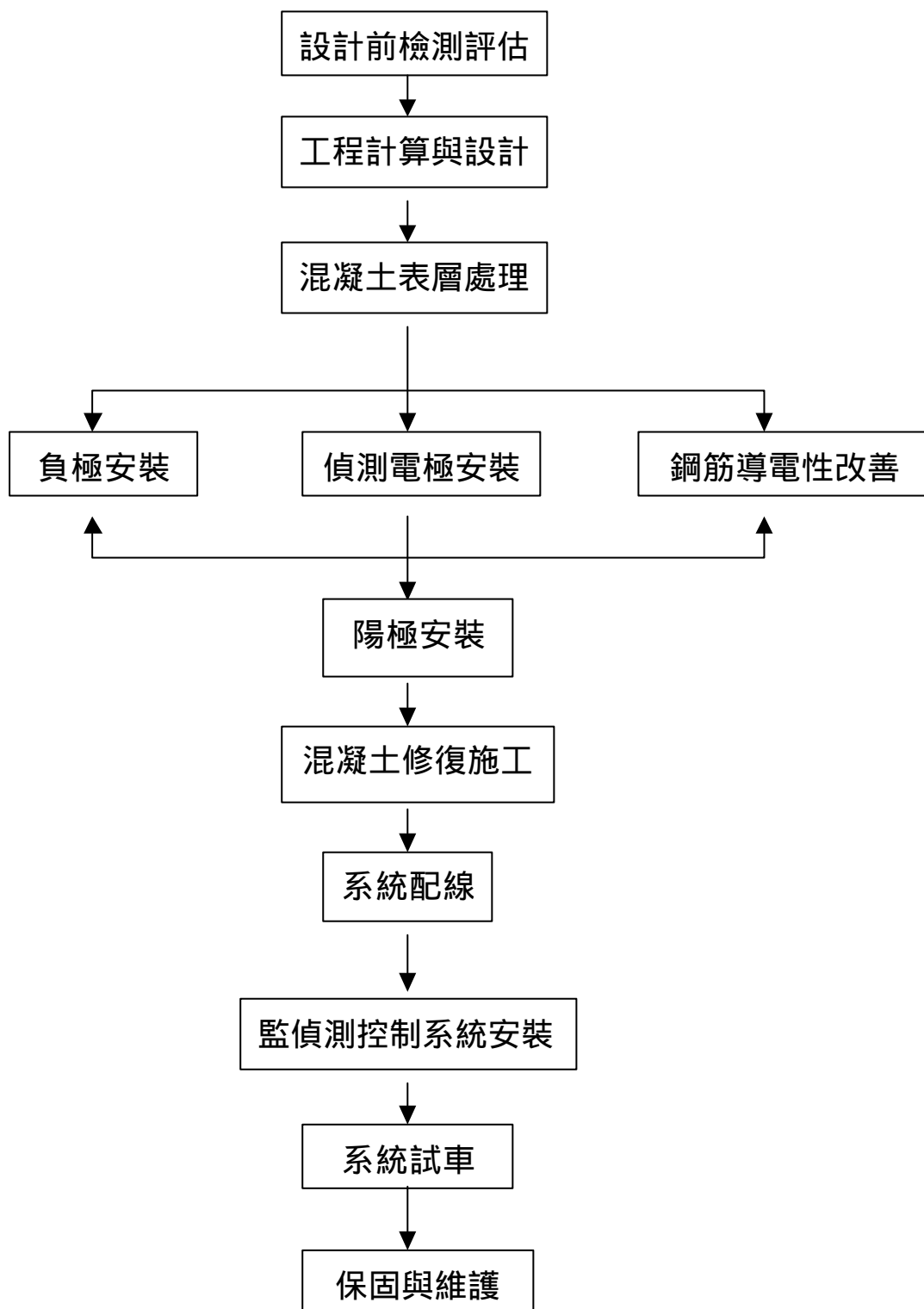


圖 5.1 陰極防蝕系統工作流程規劃

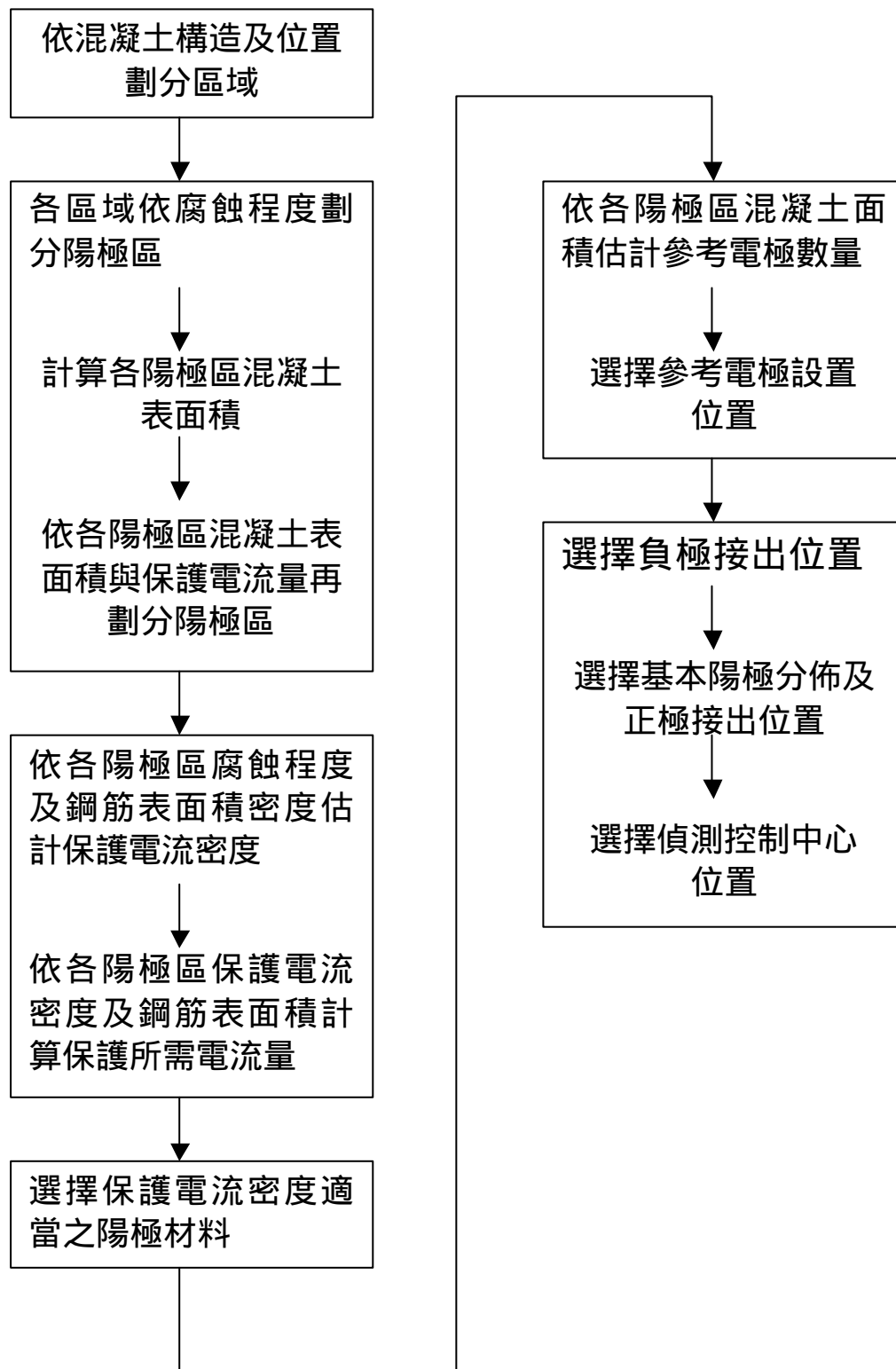


圖 5.2 工程計算與設計流程圖

## 第六章 港灣棧橋碼頭設計案例

國內某棧橋碼頭，其基樁多處發生混凝土龜裂及剝落現象，研判是因內部鋼筋及箍筋受氯離子侵害，產生嚴重腐蝕所致；因此工業技術研究院工業材料研究所執行此棧橋碼頭基樁防蝕及補強修復工程。目標為針對目前腐蝕嚴重之基樁，施予陰極防蝕保護，降低或抑制基樁混凝土中鋼筋持續遭受濱海鹽害腐蝕，並安裝偵測系統，持續追蹤其成效。

### 6.1 陰極防蝕設計

棧橋及碼頭平台共計 47 支預力基樁，低水位以上混凝土表面保護面積計  $437 \text{ m}^2$ ，低水位以下共  $689 \text{ m}^2$ 。陰極防蝕設計是採犧牲陽極式保護，依基樁暴露的環境，如大氣帶、潮間帶(含潮汐區與飛沫帶)、水下帶，選擇不同的犧牲陽極材料。高水位上方的大氣帶，無需補強的基樁是採用鋅板陽極並加上導電凝膠，需要補強的基樁則是使鋅網陽極並添加助導劑，再包覆 FRP 夾層；基樁低水位上方的潮間帶採用鋅網陽極並包覆 FRP 夾層；水下部分則是使用鋅塊陽極。

### 6.2 保護電流計算

參考挪威(Det Norske Veritas, DNV)實驗室以及英國 Concrete Society 的技術報告，鋼筋混凝土結構在水中及水下進行陰極保護時，所需的保護電流密度如下，

	文獻資料來源	鋼筋需求電流密度
水下 RC 結構	Det Norske Veritas Industri Norge AS, "Recommended Practice RP B401 Cathodic Protection Design", 1993	3.2 mA/m <sup>2</sup>
水面上部 RC 結構	Concrete Society Technical Report No. 37 "Model Specification for Cathodic Protection of Reinforced Concrete", 1991	10~20 mA/ m <sup>2</sup>

以及本案使用陽極系統供應電流之參考數據，

	文獻資料	工研院工材所 研究資料	備註
鋅板陽極系統	資料來源：供應 商提供  供應電流密度 =10 mA/m <sup>2</sup> 混凝土表 面積	資料來源：工研院 77 館實驗樑測試結果  電流輸出=36 mA 混凝表面積=4 m <sup>2</sup> 供應電流密度 =9mA/m <sup>2</sup> 混凝土表面積	
鋅網陽極系統		資料來源:大林 B4 基 樁測試結果  電流輸出=59 mA 陽極界面混凝表面積 =8.48 m <sup>2</sup> 基樁保護面積=7.54 m <sup>2</sup> 供應電流密度 =7.83mA/m <sup>2</sup> 基樁保護面積	陽極系統電流輸出 量直接受陽極面 積、填充灌漿水泥 等因素所影響。 本案所採用系統與 大林 B4 基樁相同。
水下鋅塊	資料來源： <u>Corrosion 96</u> <u>paper No.327</u> 35 mA		鋅塊重量=21.8 Kg 消耗率=10.9 Kg /amp.yr 陽極放電效率= 80%

配合各預力基樁陽極區鋼筋密度分佈，

配筋名稱	配筋規格	鋼筋密度( $\text{m}^2/\text{m}^2$ )	平均鋼筋密度( $\text{m}^2/\text{m}^2$ )
預力鋼棒	9.2mm	0.217	0.485
螺旋筋	16mm	0.253	
箍筋	9.5mm	0.015	

計算出所需保護電流，如表 6.1 所示。

## 6.3 監測系統

### 1. 偵測電極(永久式參考電極)

陰極防蝕系統裝設偵測電極(永久式參考電極)以供系統試車、效果測試及保固定期檢測使用。參考電極位置選擇裝設於水位上方混凝土比電阻較高區域，及水下混凝土比電阻較低區域兩處，以測量該環境下保護電位。

### 2. 配電線路

系統配線必需考量電流分佈均勻及避免迴路中斷。本系統各陽極區之陽極系統由鋅塊、鋅網及鋅塊組成，陰極系統則是由預力鋼棒與各區接出之工作電極連結而成，正負極由導線拉至橋面控制箱，在測試面板連接使其形成迴路。為進行本系統之監測工作，各陽極區裝設之參考電極及由鋼棒或螺旋筋接出之工作電極需由導線拉至橋上的控制箱內，並接到測試面板上。

由於本陰極防蝕系統位於濱海環境，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需經線管接至接線盒及控制設備中，導線之續接或短路均於接線盒內完成。系統配線之線管及接線盒密閉性應符合 IP66 規格，以達防水與防塵的要求。

### 3. 監測控制

正式運轉時，在控制箱面板必須將鋅板、鋅網及鋅塊等正極與負極導通，使系統形成迴路以進行系統監測。系統以埋置在預力基樁中的 2 支參考電極進行鋼棒及螺旋筋之保護電位量測；防蝕效果可依 NACE 100 mV 退極化，E-decay 法(電位衰退法)檢測，亦即當系統達到穩定保護電位時進行斷電，記錄斷電瞬間電位與回到自然穩定電位時之電位差。

#### 6.4 施工儀器及使用材料規範

施工儀器及使用材料規範如表 6.2 及表 6.3 所示。



表 6.1 保護電流計算

橋墩 編號	基樁 編號	區域鋼 筋密度 (m <sup>2</sup> / m <sup>2</sup> )	鋅板陽極			鋅網陽極			鋅塊陽極		
			基樁保護面 積 (m <sup>2</sup> 混凝土表面積)	陽極 供應電 流 (mA)	平均 需求電 流 (mA)	基樁保護面 積 (m <sup>2</sup> 混凝土表面積)	陽極 供應電 流 (mA)	平均 需求電 流 (mA)	基樁保護面 積 (m <sup>2</sup> 混凝土表面積)	陽極 供應電 流 (mA)	平均 需求電 流 (mA)
B	1	0.485	-			7.54	59	36.5	8.42	35	13.47
C	2	0.485	-			7.54	59	36.5	8.42	35	13.47
C	3	0.485	-			7.54	59	36.5	8.42	35	13.47
C	4	0.485	-			7.54	59	36.5	8.42	35	13.47
C	6	0.485	-			7.54	59	36.5	8.42	35	13.47
D	3	0.485	-			7.54	59	36.5	9.50	35	15.20
D	4	0.485	-			7.54	59	36.5	9.50	35	15.20
D	5	0.485	-			7.54	59	36.5	9.50	35	15.20
D	8	0.485	-			7.54	59	36.5	9.50	35	15.20
F	1	0.485	-			7.54	59	36.5	12.86	35	20.58
F	2	0.485	-			7.54	59	36.5	12.86	35	20.58
F	3	0.485	-			7.54	59	36.5	12.86	35	20.58
F	4	0.485	-			7.54	59	36.5	12.86	35	20.58
F	7	0.485	-			7.54	59	36.5	12.86	35	20.58
F	8	0.485	-			7.54	59	36.5	12.86	35	20.58
G	3	0.485	-			7.54	59	36.5	12.74	35	20.38
H	1	0.485	-		18.25	7.54	59	36.5	13.56	35	21.71
H	3	0.485	-		18.25	7.54	59	36.5	13.56	35	21.71
H	5	0.485	-		18.25	7.54	59	36.5	13.56	35	21.71
H	6	0.485	-		18.25	7.54	59	36.5	13.56	35	21.71
I	1	0.485	-		18.25	7.54	59	36.5	14.52	35	23.24
I	2	0.485	-		18.25	7.54	59	36.5	14.52	35	23.24
I	4	0.485	-		18.25	7.54	59	36.5	14.52	35	23.24
I	5	0.485	-		18.25	7.54	59	36.5	14.52	35	23.24
J	2	0.485	-		18.25	7.54	59	36.5	15.47	35	24.77
J	7	0.485	-		18.25	7.54	59	36.5	15.47	35	24.77
J	8	0.485	-		18.25	7.54	59	36.5	15.47	35	24.77
K	2	0.485	-		18.25	7.54	59	36.5	16.88	35	27.02
L	1	0.485	-		18.25	7.54	59	36.5	18.01	35	28.83
L	3	0.485	-		18.25	7.54	59	36.5	18.01	35	28.83
L	5	0.485	-		18.25	7.54	59	36.5	18.01	35	28.83
L	7	0.485	-		18.25	7.54	59	36.5	18.01	35	28.83
M	2	0.485	-		18.25	7.54	59	36.5	16.83	35	26.94
M	6	0.485	-		18.25	7.54	59	36.5	16.83	35	26.94
N	3	0.485			18.25	7.54	59	36.5	16.83	35	26.94
平台 編號	基樁 編號		鋅板陽極			鋅網陽極			鋅塊陽極		
1	4	0.485	7.53	102	54.7	7.54	59	36.5	20.10	35	32.16

2	1	0.485	7.53	102	54.7	7.54	59	36.5	20.10	35	32.16
3	6	0.485	7.53	102	54.7	7.54	59	36.5	20.10	35	32.16
4	1	0.485	-			15.07	118	36.5	20.10	35	32.16
4	5	0.485	7.53	102	54.7	7.54	59	36.5	20.10	35	32.16
4	7	0.485	7.53	102	54.7	7.54	59	36.5	20.10	35	32.16
5	3	0.485	-			15.07	118	72.9	20.10	35	32.16
5	4	0.485	-			15.07	118	72.9	20.10	35	32.16
7	2	0.485	7.53	102	54.7	7.54	59	36.5	20.10	35	32.16
7	3	0.485	7.53	102	54.7	7.54	59	36.5	20.10	35	32.16
8	2	0.485				15.07	118	72.9	20.10	35	32.16

表 6.2 施工儀器及使用材料規範

項次	工作階段	工作項目	要求	依據規範
1	調查及評估	鋼筋腐蝕速率檢查	運用交流阻抗或線性極化曲線等電化學方法進行	
2		混凝土比電阻測量	運用 four probe Wenner method	
3	設計	防蝕設計	說明參考電極擺設位置和電流需求大小以及理論設計壽命	
4		補強設計		
5	材料	防蝕用鋅網	組成：見下表	ASTM B6/B69
6		防蝕用鋅塊	組成： Al<0.005%,Cd<.003%,Fe<.0014%,Zn: balance	ASTM B418-80 type
7		套管	組成:FRP 抗張強度: 大於 9,000psi	ASTM D638
			FLEXURAL STRENGTH: 大於 16,000psi	
			FLEXURAL MOUDULUS: 大於 700,000psi	
8		補強用碳纖維	抗拉強度: 380 Kg/cm <sup>2</sup> 以上 Barcol 硬度: 35 以上	CNS13555 ASTM D2583
9		修補用混凝土	混凝土比電阻:小於 50,000 ohms-cm	
			抗壓強度: 大於 5000psi	
10		灌漿用混凝土	抗壓強度: 大於 5000psi	
			混凝土比電阻:小於 50,000 ohms-cm	
			組成:不含環氧樹脂及飛灰	
11	配線	導線	材質為 XLPE	
		配線盒	合乎 IP66	

**表 6.3 鋅網規範: ASTM B6/B69**

Composition	Range (wt %)
Cu	0.3 – 0.9
Pb	<0.005
Cd	<0.005
Fe	<0.01
Al	<0.001
Zn	Bal.

## 第七章 陰極防蝕驗收標準程序

### 7.1 陰極防蝕保護標準

1983 年，美國腐蝕工程師協會(NACE International)制訂鋼鐵材料在土壤或海水中的陰極保護的標準(Standard RP-01-69-83)：

- 1.對鋼鐵而言，利用飽和硫酸銅參考電極量測之電位必需小於-850 mV。相對的，對飽和氯化銀參考電極(Ag/AgCl)則需小於-780 mV，對高純度鋅參考電極(99.99%)需大於 250 mV。
- 2.施加陰極防蝕後，結構物之量測電位需比原腐蝕電位更負(active) 300 mV 以上。
- 3.結構物施行陰極防蝕措施後將其斷電，量測斷電瞬間的電位，其電位需比原腐蝕電位更負(active) 100 mV 以上。
- 4.陰極極化量需至電位到達極化曲線斜率為定值之區域。
- 5.量測由介質流入結構物表面之保護電流。

針對 Standard RP-01-69-83 的比較，其中第一項標準只適用於鋼鐵材料在土壤或海水中；若溫度升高或缺氧狀況，電位標準需更負。第二項標準因包含了 IR Drop(由介值或塗層產生之電壓降)的變化，又 IR Drop 在結構物表面並非定值，故不適用於有雜散電流存在之區域。標準三在施行時必需關掉電源以測量出極化量，當電源關閉時 IR 降會立即消失，然再打開電源時結構物又需一段時間來達到完全極化，其程度可能未及關掉電源前之情況。標準四因介值或塗層產生電壓降之影響，於電壓 vs. LOG 電流(E-logI)的極化圖中，極化曲線斜率為定值之範圍難尋。第五項量測保護電流的技術，由於不容易測定既存之陽極區域，在實際工程上有施行之困難。

早期鋼筋混凝土陰極防蝕並無防蝕保護標準，在 1990 年以前，防蝕設計與驗收標準均參考鋼鐵在土壤或海水中的保護標準(Standard

RP-01-69-83)，1990 年以後，NACE International 針對大氣環境中的鋼筋混凝土制訂陰極防蝕規範 NACE RP290-90，主要參考項目為：

- 1.保護電位低於-780 mV (vs. Ag/AgCl)。
- 2.保護電位低於-850 mV (vs. Cu/CuSO<sub>4</sub>)。
- 3.結構物施行陰極防蝕措施後將其斷電，量測瞬間斷電時的電位與斷電 4 小時後的電位，其差值需在 100 mV 以上。
- 4.施加陰極防蝕後，結構物之量測電位需比原腐蝕電位更負(active) 300 mV 以上。
- 5.利用極化曲線圖(E-logi)判斷到達陰極保護電位時所需之保護電流密度。

第 1、2 項保護電位的量測是利用電位計直接量測鋼筋對氯化銀參考電極的保護電位，根據研究資料顯示，使用上述第 1、2 項防蝕標準時，混凝土中的鋼筋會承受過多的電流而造成過保護；第 3 項 100 mV 電位差 是指陰極防蝕運轉一段時間，當系統到達穩定保護電位後進行斷電，量測瞬間斷電時的電位與斷電 4 小時後的電位，其差值需在 100 mV 以上，此時鋼筋受到保護；第 4 項 300 mV 電位變化 是指陰極防蝕運轉前及運轉後所量測到的鋼筋電位，其差值要大於 300 mV；第 5 項 E-logi 判斷 為藉供給電流與量測電壓的關係，找出陰極極化曲線中的轉折點，由轉折點的電流推算鋼筋所需的保護電流，於設計時提供較大的電流(大於所需保護電流)，則系統達到保護標準。

由於 E-logi 技術主要應用於系統開始運轉時決定鋼筋極化最初所需的保護電流密度；故美國腐蝕工程師學會 NACE RP290-90 與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退極化之方式(Potential Decay Method)作為判斷陰極保護的標準，即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瞬間斷電 4 小時後的電位，其差值必需在 100 mV 以上(即斷電 4 小時鋼筋電位去極化量>100 mV)，方能確定陰極防蝕達

到設計之預期效果；同時為避免供電過多以致造成鋼筋氫脆之疑慮，亦建議鋼筋陰極防蝕保護之瞬間斷電電位(極化電位)下限為-1100mV(對 Ag/AgCl 參考電極)。

## 7.2 保護效果檢測方法及要點

根據 Concrete Society Technical Report No. 37，保護效果可依達成「斷電 4 小時鋼筋電位去極化量>100 mV」標準為驗收評估之依據，其檢測內容及要點如下：

內 容	檢測項目及方法	要 點
斷電前 電位量測	記錄電源供應器輸出電壓及電流值 使用電位記錄器連續記錄各陽極區每組參考電極顯示之電位	使用內電阻>100 Mohm之電位記錄器
瞬間斷電 電位量測	電位記錄器連續記錄電位時將電源供應器切斷供電	斷電前後電位記錄器之 sampling rate < 3 秒/次
斷電後 電位量測	斷電後 4 小時內持續以電位記錄器記錄電位	斷電後 4 小時內之 sampling rate 可隨意選擇 斷電 4 小時鋼筋電位去極化量>100 mV 表示該陽極區系統達保護標準

## 第八章 陰極防蝕操作

陰極防蝕系統安裝完成後必需進行試車，目的為及時更正任合安裝時的缺失、確認系統可以正常運轉、且運轉正確。

### 8.1 試車期限

陽極系統養護期(約 28 日)後，一個月內執行試車檢測。

### 8.2 試車操作項目

- 1.系統電路測試
- 2.鋼筋電位檢測
- 3.電流輸出調整
- 4.保護效果檢測

### 8.3 系統試車、操作步驟

系統試車、操作步驟之流程與方法如圖 8.1 所示。



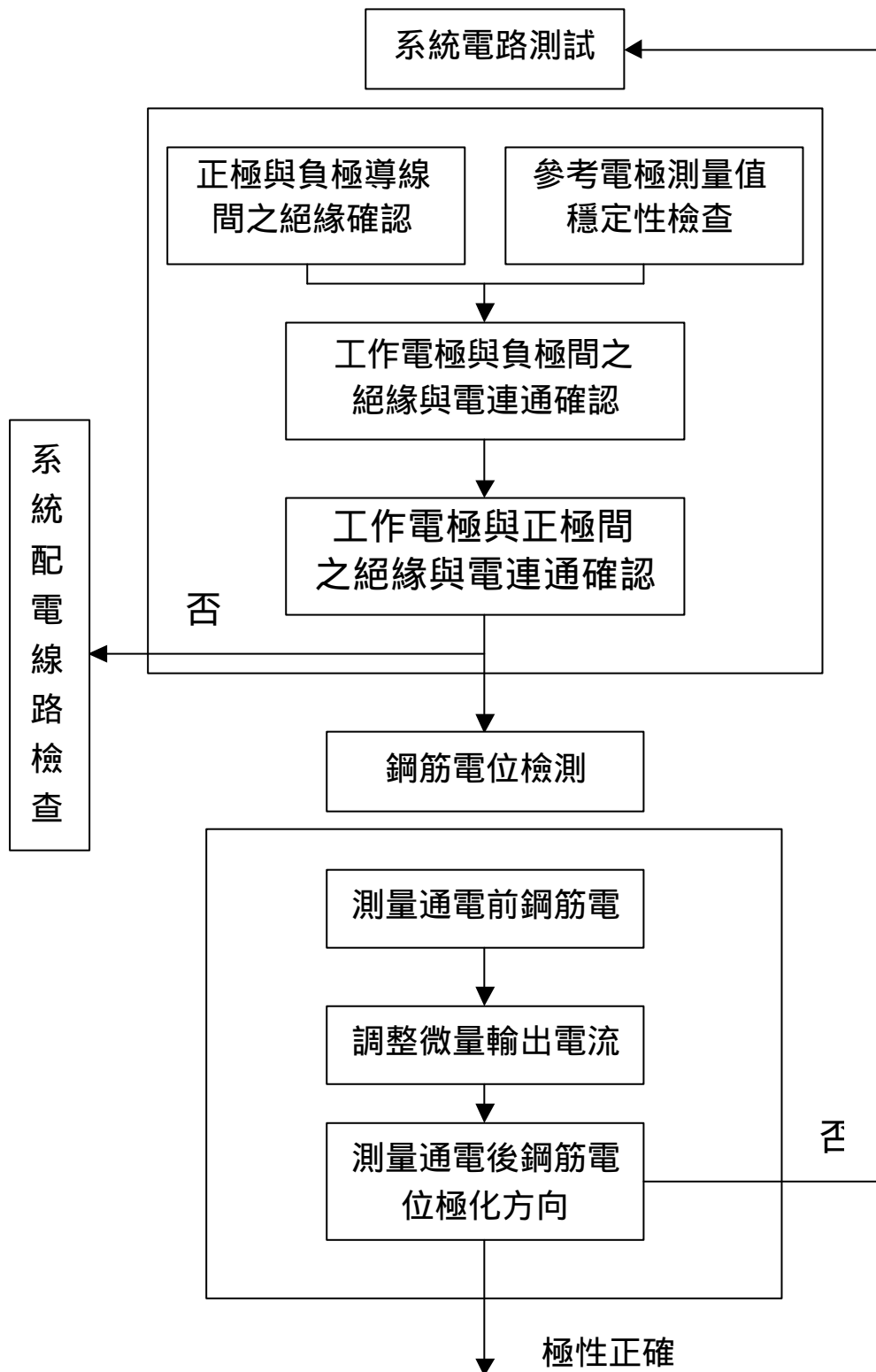


圖 8.1 系統試車步驟之流程圖-1

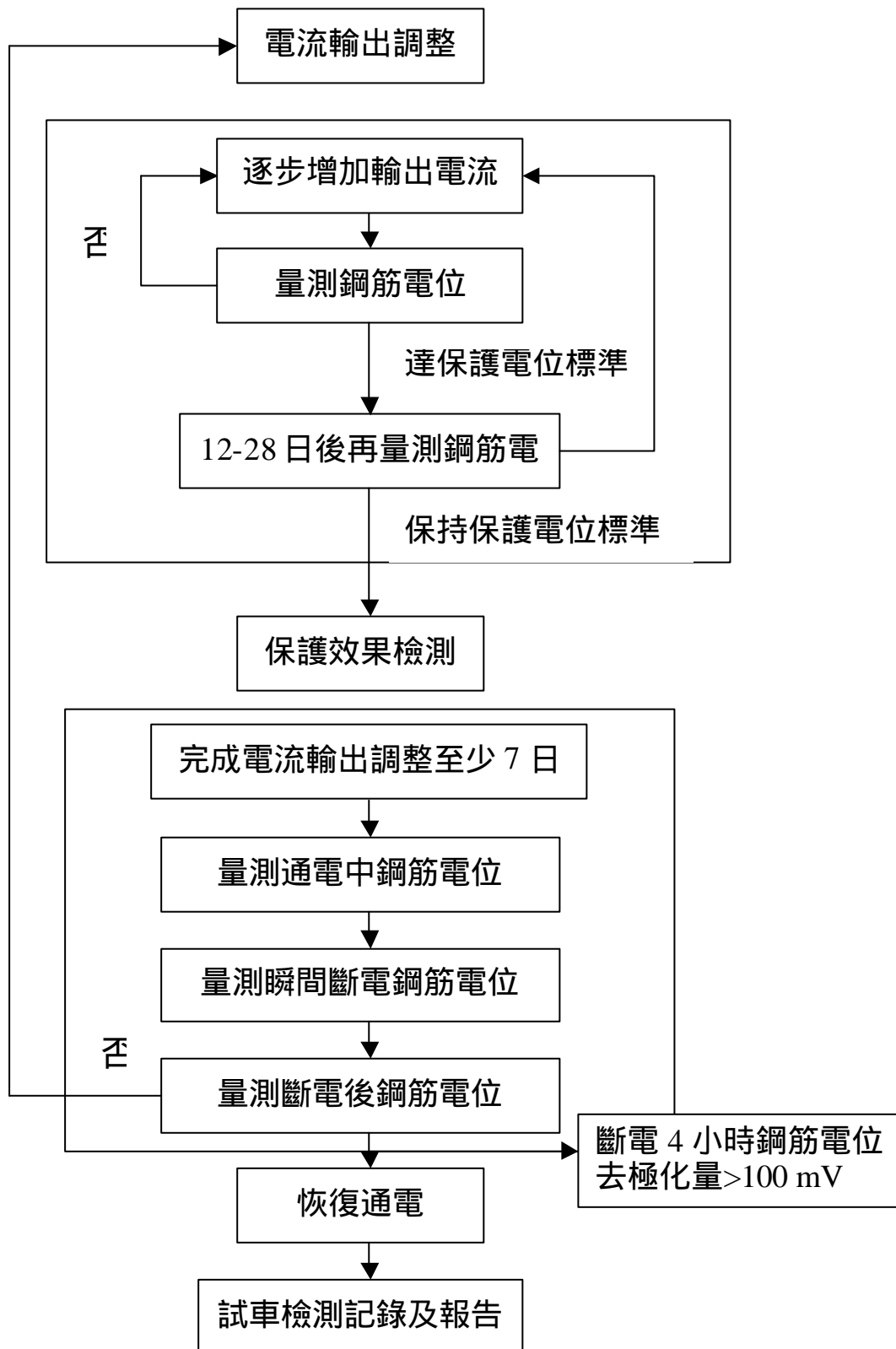


圖 8.1 系統試車步驟之流程圖-2

## 第九章 防蝕系統維護管理手冊

鋼筋混凝土陰極防蝕系統經試車測試及調整後，於運轉期間務必執行系統保護狀態檢查及系統構件維護。本手冊為內容包括：

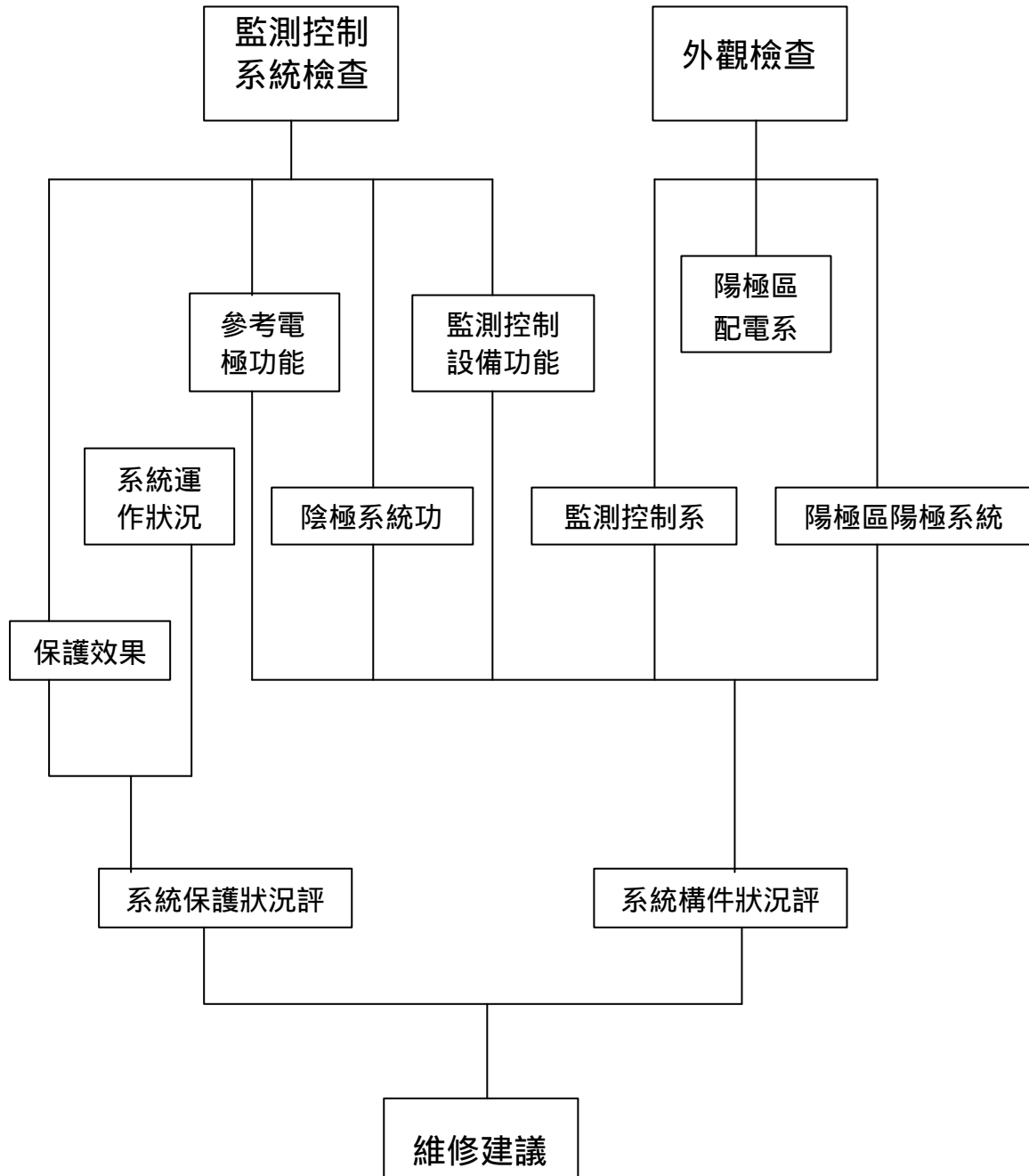
- 1.系統維護說明。
- 2.系統維護執执行程序。
- 3.維護檢查項目及內容。
- 4.維護操作方法。

### 9.1 系統維護說明

在陰極防蝕運轉的情況下，系統監控量測在裝設後前兩年應每季執行一次，爾後應每半年執行一次，評估系統保護狀態並進行保護電流調整。

系統構件包含陰極系統、陽極系統、配線系統、參考電極、和監測控制系統。除了裝設後前兩年應每季，爾後每半年執行監測控制量測以瞭解其操作功能外，每年亦應對硬體全面檢查一次，評估其個別構件外觀情況，並建議是否需要進行維修或更換消耗零組件。

## 9.2 系統維護執行情序



### 9.3 維護檢查項目及內容

#### 9.3.1 系統保護狀態維護檢查

項次	檢查項目	檢查內容	檢查要點	建議檢查時程
1.	系統運作情況	1.保護電流輸出檢查	電流輸出如設定值	裝設後前兩年應每季執行一次，爾後每半年執行一次
		2.系統電壓檢查	系統電壓保持穩定並且在預定範圍內	
		3.保護電位檢查	各參考電極位置之鋼筋保護電位呈極化現象	
2.	保護效果	去極化量檢測	斷電後陽極區各參考電極測得鋼筋保護電位去極化量可達 100mV	

### 9.3.2 系統組件維護檢查

項次	檢查項目	檢查內容	檢查要點	建議檢查時程
1.	監測控制系統	1.監測控制設備功能檢查	電腦操控系統訊號輸出輸入正常	裝設後前兩年應每季執行一次，爾後每半年執行一次
		2.監測控制線路外觀檢查	各區域監控器之間線路及管路保持密閉連接且無破損，維持 IP66 規格	每年一次
		3.接線情況檢查	電路零件及端子台導線無銹蝕或破損現象，接線導電良好(電阻<1ohm)	
2.	各陽極區之配線系統	1.線路外觀檢查	接線盒之間線路和管路保持密閉連接且無破損，維持 IP66 規格	
		2.接線情況檢查	接線盒端子台及導線無銹蝕和破損現象，接線導電良好(電阻 1ohm)	
3.	各陽極區之陽極系統、參考電極及陰極系統檢檢查	1.陽極系統外觀檢查	覆蓋層無剝落、破損、雜物污染等存在	裝設後前兩年應每季執行一次，爾後每半年執行一次
		2.參考電極功能檢查	各參考電極所量測的電位訊號呈穩定正常現象	
		3.陰極系統功能檢查	各參考電極所量測的電位訊號呈穩定正常現象	

## 9.4 維護操作方法

### 9.4.1 監測控制

1.陰極防蝕系統監測控制主要執行項目為：

- (1)保護電流設定
- (2)輸出電流測量
- (3)系統電壓測量
- (4)鋼筋電位測量
- (5)去極化量測量

2.監偵測控制測量記錄必須包括：

(1)電流調整測量記錄

記錄項目含設定電流、輸出電流、系統電壓、保護電位、測量者、設定日期與設定時間、及測量日期與測量時間。

(2)去極化量測量記錄

記錄項目含設定電流、輸出電流、系統電壓、保護電位、斷電電位（瞬間、1/2 時、1 小時、2 小時、3 小時、4 小時...）、電位去極化量、測量者、及日期。

(3)評估結果記錄

評估項目含系統運轉狀況評估、保護效果評估、參考電極功能評估、陰極系統功能評估、監測控制設備功能評估、評估單位及日期。

### 9.4.2 系統構件檢查

系統構件檢查主要目的為確認各個系統構件是否保持良好狀況，以提出修復需求。

## 1.檢查方法

- (1)系統構件外觀檢查以目視檢查執行。
- (2)系統接線情況檢查以電阻計測量線路之導電性。

## 2.檢查記錄

系統構件外觀檢查記錄必須包括：

### (1)目視檢查記錄

檢查記錄項目包括：監偵測控制系統線路及接線情況檢查結果，各陽極區配線系統線路及接線情況檢查結果，各陽極區陽極系統外觀檢查結果。

### (2)測量檢查記錄：測量記錄項目含各陽極區配線系統線路量測結果。

### (3)評估結果記錄

評估項目包括監測控制系統線路及設備線路狀況評估，以及各陽極區配線系統狀況評估。



## 參考文獻

- [1]F. W. Fink and W. K. Boyd, “The Corrosion of Metals in Marine Environment”, DMIC Report 245, 1970.
- [2]“Splash Zone Maintenance Systems for Marine Steel Structures “, NACE International Task Group T-1G-27, 1994.
- [3]John P. Broomfield, ”CORROSION OF STEEL IN CONCRETE, Understanding, Investigation and Repair” E & FN SPON An imprint of Chapman & Hall, 1997
- [4]Rasheeduzzafar, S. S. F. H. Dakhil, A. S. Al-Gahtani. “Effect of Cement Composition on Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete”, 1990.
- [5]Bazant Z. P. ”Physical Model for Steel Corrosion in Concrete Sea Structure-Theory and Application”, Journal of the Structural Division, Proceeding of ASCE, 1979, Vol. 105, No.ST6.
- [6]BRE Digest, ”The Durability of Steel in Concrete “part 2, Building Research Establishment, England, 1982.
- [7]R. J. Kessler, R. G. Powers, and I. R. Lasa, “Zinc Mesh Anodes Cast into Concrete Pile Jackets”, Paper No. 327, Corrosion/96, NACE International, Houston, TX, 1996.
- [8]Kwai Chung 貨櫃碼頭陰極防蝕 , Corrpro 施工說明 , 1992。
- [9]棧橋碼頭基樁陰極防蝕工程 , 工業技術研究院工業材料研究所研究報告 , 1997。
- [10]Cathodic Protection of Reinforced Concrete, Concrete Society Technical Report No.36, UK, 1989.
- [11]Model Specification for Cathodic Protection of Reinforced Concrete, Concrete Society Technical Report No.37, UK, 1989.

- [12]General Principles of Cathodic Protection in Sea Water, British Standard Institution & European Committee for Standardization, BS EN 12473:2000, UK, 2000.
- [13]Cathodic Protection for Harbor Installations, British Standard Institution, BS EN 13174:2001, UK, 2001.
- [14]Cathodic Protection of Steel in Concrete, British Standard Institution, BS EN 12696:2000, UK, 2000.
- [15]Cathodic Protection Part 1 Code for Practice for Land and Marine Application (formerly CP 1021), British Standard Institution, BS7631 Part 1: 1991, UK, 1991.
- [16]Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures, Definitions, Requirements, Quality Control and Evaluation of Conformity Part 9, General Principles for the Use of Products and Systems, British Standard Institution, DD 1504-9:1997, UK, 1997.
- [17]混凝土標準示方書（維持管理編），日本土木學會，2001。
- [18]混凝土標準示方書（耐久性照查型），日本土木學會，2001。
- [19]海洋混凝土構造物之防蝕指針(案)，日本凝土工學協會 JCI-R1，1990。
- [20]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，日本建築學會，1997。
- [21]陰極防蝕用鎂合金犧牲陽極，CNS-13518, H3163，經濟部標準檢驗局，1995。
- [22]陰極防蝕用鋅合金犧牲陽極，CNS-13519, H3164，經濟部標準檢驗局，1995。
- [23]陰極防蝕用鋁合金犧牲陽極，CNS-13520, H3165，經濟部標準檢驗局，1995。

- [24]陰極防蝕犧牲陽極性能檢驗法，CNS-13521, H2118，經濟部標準檢驗局，1995。
- [25]Corrosion Forms and Control for Infrastructure, ASTM, PA.
- [26]Standard Recommended Practice for Impressed Current Cathodic Protection of Reinforcing Steel in Atmospherically Exposed Concrete Structures, NACE Standard RP0290-2000, NACE International, Houston, TX, 2000.
- [27]Standard Recommended Practice for Corrosion Control of Reinforcing Steel in Concrete, NACE Standard RP0187-96, NACE Standard RP0290-2000, NACE International, Houston, TX, 1996.
- [28]Standard Recommended Practice for Maintenance and Rehabilitation Considerations for Corrosion Control of Atmospherically Exposed Existing Steel-Reinforced Concrete Structures, NACE Standard RP0390-98, NACE International, Houston, TX, 1998.
- [29]Standard Recommended Practice for Cathodic Protection of Prestressed Concrete Cylinder Pipelines, NACE Standard RP0100-2000, NACE International, Houston, TX, 2000.
- [30]Standard Recommended Practice for Inspection of Linings on Steel and Concrete, NACE Standard RP0288-94, NACE International, Houston, TX, 1994.
- [31]Standard Recommended Practice for Coatings for Concrete Surfaces in Non-Immersion and Atmospheric Service, NACE Standard RP0591-96, NACE International, Houston, TX, 1996.

## 附錄一 相關文獻整理索引

# 「港灣結構物陰極防蝕準則訂定（草案）研究」計畫

## 相關文獻整理索引-1

序 號	01	文 獻 編 碼		文 獻 名 稱	Cathodic Protection of Reinforced Concrete (Technical Report No.36)				
文 獻 類 別	技 術 報 告	發 行 國 別	英 國	文 獻 特 性	出 版 單 位	Concrete Society	出 版 日 期	1989	作 者  The joint Committee of Concrete Society and Corrosion Engineering Association Working Party
關 鍵 字	鋼筋混凝土 / Reinforced Concrete ; 陰極防蝕 / Cathodic Protection								
摘 要	本報告係由英國混凝土學會與防蝕工程協會聯合工作小組共同研究之成果，其目的在提供有關陰極防蝕方面的最新和優良之技術資料。以協助土木和結構工程師及其他負責設計與施工者，作為判定陰極防蝕是否適用於鋼筋混凝土腐蝕問題之補修策略，並提供鋼筋混凝土陰極防蝕規格方面上之準則。								
重 要 內 容 簡 述	本報告內容主要提供鋼筋混凝土陰極防蝕方面較為客觀及簡明之技術指導，包括其優點及可能存在之缺點，而主要是針對地上的 RC 結構物。至於地下或水面下結構物的基礎則僅供參考之用。本技術報告（編號 No.36）應與工作小組所出版的另一本報告（編號 No.37）「鋼筋混凝土陰極防蝕之示範規格 (Model Specification for the Cathodic Protection of Reinforced Concrete)」配合研讀，則將具有足夠之資料以供擬定發包用陰極防蝕之規範。由於 RC 結構物之陰極防蝕正處於顯著的商業成長和技術發展階段。因此建議在此成長與發展期間，為確保 RC 結構物的劣化診斷和檢查工作，評估與設計、修補、安裝試車與監測維護等整套之作業系統的完整性，所有可能的陰極防蝕技術使用者應交由合格的結構或陰極防蝕顧問工程師和專業承包商負責執行。由於有些結構物的環境條件可能限制使用陰極防蝕的實用性，故各結構物之劣化情況需詳加評估，以決定最適當可行之補修措施。陰極防蝕可能並非最經濟及唯一修補策略，設計者必須依環境條								

件與使用功能需求作最佳的判斷。

地上 RC 結構物使用陰極防蝕為阻抗氯離子侵蝕的最佳策略，可替代結構物重建、大規模之混凝土處理或連續之補修作業。陰極防蝕應用前必須採取之前置作業，包括：確認鋼筋之連續性以及防止陽極 / 陰極短路。陽極被覆在使用時的特殊性質係維持系統運作之主要條件。由於陽極系統包括陽極被覆的追蹤紀錄資料相當有限，因此迄今其使用壽命很難評估。自 1975 年起陽極材料和地面上 RC 結構物設計有極大之改進。自 1980 年起，陽極系統應用已證實不僅可應用在橋樑，且可在建築及港灣結構物上使用，並且已證實其效用，且現有技術已確認各種最有效及適合實際現場使用的防蝕效果檢測及評估方法。

腐蝕電位量測之標準可使用 ASTM C 876-80 及其修訂版 C 876-87，但必須注意在水飽和或有氧氣通路受阻之情況下，依 ASTM 標準指出有明顯的腐蝕現象，但事實上並未發生明顯的腐蝕跡象。因此除量測腐蝕電位值外，必須加測電位梯度(potential gradients)。根據 BRE 所作診斷評估資料顯示氯離子含量佔單位水泥重 0.4% 以下，則腐蝕風險低，而在 0.4~1.0% 之間為中等，超過 1% 則具高風險性。但需注意根據英國 BS 1881:1988 規範所述，混凝土水泥含量測定方法量測之結果準確度為  $\pm 20\%$ 。本報告內容包括 RC 腐蝕之補救措施；陰極防蝕發展之演進；腐蝕機理；陰極防蝕在結構物上之應用；診斷檢查與混凝土補修；陽極系統在 RC 結構物上之應用；電源供應器、裝置、測試和維護；設計與防蝕之使用規範、並在附錄中列出目前市面上最普遍使用的陽極系統及其基本陽極材料和系統之回顧，其中包括導電性瀝青、導電漆塗層、合金噴塗層、嵌入膠結被覆層的導電性高分子線狀陽極、及鈦網等，以及 1989 年以前有關 RC 陰極防蝕之參考文獻。報告內並附有術語索引。

# 「港灣結構物陰極防蝕準則訂定（草案）研究」計畫

## 相關文獻整理索引-2

序號	02	文獻編碼		文獻名稱	Model Specification for the Cathodic Protection of Reinforced Concrete Based on the ICE Conditions of Contract (Technical Report No.37)					
文獻類別	技術報告	發行國別	英國	文獻特性	出版單位	Concrete Society	出版日期	1989	作者	The joint Committee of Concrete Society and Corrosion Engineering Association Working Party
關鍵字	示範規範 / Model Specification ; 鋼筋混凝土 / Reinforced Concrete ; 陰極防蝕 / Cathodic Protection									
摘要	<p>本報告係由英國混凝土學會與防蝕工程協會聯合工作小組制定的。其目的為提供非腐蝕專業工程師具有足夠的資料，以利擬定陰極防蝕相關之修補、裝設、委託代測和維護之規範。本示範規範係依據英國土木工程師學會契約條件之規定，由於陰極防蝕和混凝土修補需具有陰極防蝕設計按裝和監控等方面之專業素養，因此報告中建議所有陰極防蝕工程應由業主、工程顧問公司及承包商的專業工程師進行詳細設計與評估。</p>									
重要內容簡述	<p>本報告內容包括工程發包時必須規範的施工性質和範圍；RC 結構物劣化調查與評估，陽極系統需求，材料與裝置裝設過程；委託代測；操作和維護及包含在陰極防蝕工程數量估價單內之代表性項目等。</p> <p>本規範僅適用於地上 RC 結構物，至於地下或水面下之基礎結構則需參考英國 CP 1021:1991 規範，在使用本示範規格前，務必詳閱另一份技術報告 No.36 鋼筋混凝土陰極防蝕取得相關的資訊。</p> <p>本示範規格僅提供一主要架構。使用者可隨時加入適當的條文或數據，且刪除不適當的條文，其中所附代表性數量計算表僅提供參考用而已。本示範規格提供一綜合條文，令想要擬定工程契約文件的工程師們，能夠據以擬定陰極防蝕系統設計、按裝、委託、操作和維護之詳細規格。本報告中指出使用者不必逐字逐句的</p>									

	<p>抄襲本示範規格，例如有些條文與契約無關，或需具有特定參數以適合特殊陰極防蝕系統之要求。其中規範中出現不同之參數可能系電壓、陽極電流強度、監控頻率等。此外例如混凝土補修材料，本示範規格顯示替代條文，訂規格者需選擇較佳的修補技術及陽極型式等之適當條文。為協助擬定規範，條文相關之附註係以斜體字出現在條文之右邊，其中含變數之條文、附註提供訂規格者可插入數值或資料來源之指示，以利使用者擬定規範工作。例如在本示範規格中有下列之附註說明：</p> <p>有經驗和合格的土木或結構工程師應先鑑定結構物老化狀況及建議修補方案，以確保滿意的結構結合性及達到預期之使用性能。陽極系統內置鋪面，其額外重量應列入鑑定考量。修補過程中可能需移除混凝土，則在結構鑑定中應考量移除程度和修補計劃，以及應進行調查工作，以確認老化原因，個別局部缺陷程度和位置等。</p> <p>外加電流陰極防蝕通常應可提供鋼筋表面積防蝕電流 <math>10\sim 20\text{ mA/m}^2</math>，將傳導足夠電流使結構物能得到滿意的極化。此時除應符合 <math>100\text{mV}</math> 電位衰減準則外，測量點之選擇亦相當重要，在報告中亦有詳述。</p> <p>陽極系統應裝設成許多獨立之陽極區域（面積約為 <math>200\sim 500\text{ m}^2</math>），工程師選定並在圖面上顯示，若由承包商選定，則應說明修改及訂定最大及最小之極限值，每一陽極區應由獨立控制之變壓整流器輸出，提供統一之電流（約 <math>2\sim 5</math> 安培）分佈至鋼筋以獲得對應區域內之陰極防蝕效果。所有活性陽極材料配置需與外露金屬元件保持最小距離為 <math>50\sim 100\text{ mm}</math>，最大距離為 <math>100\sim 150\text{ mm}</math>，整流器和線路電流容量應依鋼筋面積和電流密度需求評估決定、整流器輸出容量應有 <math>20\%</math> 之備用容量。陽極系統之使用壽命係依陽極系統類型而定，預定使用和操作環境條件不當將縮短使用壽命。</p>
--	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------



# 「港灣結構物陰極防蝕準則訂定（草案）研究」計畫

## 相關文獻整理索引-3

序 號	03	文 獻 編 碼		文 獻 名 稱	General Principles of Cathodic Protection in Sea Water (BS EN 12473:2000)				
文 獻 類 別	規 範	發 行 國 別	英 國	文 獻 特 性	出 版 單 位	British Standard Institution	出 版 日 期	May, 2000	作 者  European Committee for Standardization British Standard Institution
關 鍵 字	陰極防蝕 / Cathodic Protection ; 海水 / Sea Water ; 腐蝕 / Corrosion								
摘 要	本規範為歐洲規範之英文版。主要介紹鋼材或其他金屬材料在海水中使用陰極防蝕之基本原理。包含在海水環境下鋼材進行陰極防蝕保護之標準。環境與設計上之考慮要項及可能產生的一些副作用，以期設計者對於這方面之理論與實務技術具有充分的瞭解。								
重 要 內 容 簡 述	<p>本規範於 1999 年 12 月 3 日由歐洲標準(The European Standard)核准。歐洲規範 (EN)具有英語、法語及德語三種官方標準版本，本資料為歐洲標準委員會 (European Committee for Standard,簡稱 CEN)中之委員負責翻譯為其自己的語言而經認可，亦為英國標準編號為 BS EN 12473:2000，制定歐洲標準者包括奧地利、比利時、捷克、丹麥、芬蘭、法國、德國、希臘、冰島、愛爾蘭、義大利、盧森堡、荷蘭、挪威、波蘭、西班牙、瑞典、瑞士及英國等國參與，本規範為提供陰極防蝕理論與實務應用之關連性，另下列相關規範可供參考：</p> <p>prEN 12474-1997 Cathodic Protection for Submarine Pipelines</p> <p>EN 12495-2000 Cathodic Protection for Fixed Steel Offshore Structures</p> <p>prEN 12496:1997 Galvanic Anodes for Cathodic Protection in Seawater and Saline Mud</p> <p>prEN 13173-1998 Cathodic Protection for Steel Offshore Floating Structures.</p>								

本規範未含浸於水中或在大氣中之混凝土內部鋼筋之陰極防蝕。這方面之技術包含在 prEN 12696-1:1997 及 prEN 12696-2 中。

本規範之內容包含一些術語之定義；金屬腐蝕特性及極化之腐蝕原理；陰極防蝕原理；犧牲陽極、外加電流及混合系統之陰極防蝕原理；決定陰極防蝕之程度，包括量測參考電極電位及腐蝕電位量測；鋼材或其他金屬材料，例如鋁合金、不銹鋼、銅合金及鎳合金等在海水中防蝕之準則。設計要點包含技術與操作數據、安裝上考慮及需求之電流等；以及影響所需電流之環境因素，包括溶氧量、海流、鈣質沉積物、水溫、含鹽量、pH 值、海生物污著、水深、暴風浪及季節性變化等；陰極防蝕之副作用包含鹼性、氫脆、腐蝕疲勞、迷失電流、及氯氣之形成等；與表面安裝有關之陰極防蝕使用，例如對塗料之選擇及劣化，並在附錄中附有參考電極之相關資訊。

本規範對於非從事腐蝕與防蝕之工程師而言，在進行陰極防蝕設計上可以說是一個相當入門的基本背景資料。可由本規範中認知陰極防蝕之基本原理及在調查、設計上應注意之事項。並可比較犧牲陽極和外加電流法在環境、安裝、電源、陽極材料、電流控制、與鄰近結構物之互制、維修及損害等各方面之優缺點。各種金屬在海水中之陰極防蝕電位；例如鋼材在銀 / 氯化銀參考電極下，在好氧環境下為-0.8 ~ -1.1 伏特，而在厭氧環境下則為-0.9 ~ -1.1 伏特。在設計上必須依結構物之形態，複雜性及操作參數以利設計一完整之陰極防蝕系統，因此必須具有預定設計的結構物之技術與操作數據及現有之需求之完整資訊。這些建議事項都在規範中有詳細的說明。

# 「港灣結構物陰極防蝕準則訂定（草案）研究」計畫

## 相關文獻整理索引-4

序 號	04	文 獻 編 碼		文 獻 名 稱	Cathodic Protection for Harbor Installations (BS EN 13174:2001)				
文 獻 類 別	規 範	發 行 國 別	英 國	文 獻 特 性	出 版 單 位	British Standard Institution	出 版 日 期	Jan. 2001	作 者  European Committee for Standardization & British Standard Institution
關 鍵 字	陰極防蝕 / Cathodic Protection ; 港灣安裝 / Harbor Installation ; 鋼材 / Steel								
摘 要	<p>本規範主要目的在規定鋼材及金屬附件在港灣環境下安裝，由於受海水或含鹽之泥土下所造成腐蝕，通常使用陰極防蝕和塗裝或油漆保護裝備中之外表面應注意事項。陰極防蝕為提供足夠之電流於結構物之外表面，以利鋼材之電位維持在腐蝕電位以下，規範中探討陰極防蝕系統，外加電流及犧牲陽極之設計上考慮要項、偵測系統及相關之保存記錄資訊等相關事宜以供設計者參照。並列有港灣裝備作陰極防蝕處理所需之電流準則，陽極材料阻抗及使用壽命之決定及外加電流法之陽極材料之代表性電化學特性等各方面之資訊可供港灣結構物安裝陰極防蝕工程設計之參考。</p>								
重 要 內 容 簡 述	<p>本規範包含固定及浮體結構物之陰極防蝕。這些結構物含突堤碼頭、防波堤、橋柱、繫船樁及靠船樁、鋼板樁及鋼管樁、浮橋、浮筒及浮體式碼頭、船塢和閘門、結構物之金屬附件，例如連接於結構物上之繫鏈浸泡於海水中者，而未含固定式或浮體式的外海結構物、海底管線及船舶。或鋼板樁之背填土側。以及浮體結構物或壓艙槽之任何元件的內部結構之防蝕作業。而所處理之材質為裸鋼或塗裝之碳鋼材，而不包括混凝土結構物。而在環境上為所有港灣固定或浮體結構物浸泡在海水之大氣區、潮汐潑濺區、海中區及海床區等。對於交替浸泡海水（潮汐區）之結構體表面使用陰極防蝕僅在浸泡的時間足以使鋼材產生極化之情況下才能</p>								

	<p>見效。</p> <p>陰極防蝕系統之目的在傳遞足夠之電流至結構體及其附件中之任何部位，因此使其腐蝕電位能在防蝕保護之標準範圍內。通常配合塗裝系統使用，但是應注意在基樁打設過程中將造成埋入土中段之塗裝系統受到損傷而產生局部電池並影響防蝕效果。為減少局部過度保護(over- protection)的風險，因此建議陽極應連結介電屏(dielectric shield)材料。陰極防蝕系統設計必須易於使用潛水人員操作更換，使結構物儘可能達到在使用期限內能免維修之效果。陰極防蝕之標準在 EN 12473 規範中有詳述。為達到足夠之陰極防蝕程度，鋼結構物必須具有合乎防蝕之電位。在具有足夠溶氧的海水情況下，鋼材之防蝕電位為相對於銀 / 氯化銀 / 海水參考電極為其極化電位較低於-0.8 伏特。而在厭氧條件下因為可能有微生物引起之腐蝕，則一般建議採用之電位可能為比-0.9 伏特( Ag/AgCl/海水參考電極 ) 更低點，而對塗裝結構物則其極限為-1.1 伏特，而在有可能發生腐蝕疲勞之情況下，則其極化電位需較提高些。</p> <p>犧牲陽極當其直接接於鋼結構物上時將發生腐蝕而提供電流給鋼材以保護鋼材。在結構物之各種使用條件下，其表面使用陰極防蝕系統預期之使用壽命，必須先決定犧牲陽極之大小、數量及安裝位置以利具有足夠之防蝕電位。陰極防蝕系統必須經常偵測保護電位，對犧牲陽極系統並非必要使用固定式之偵測系統，然而對外加電流系統則是必要的。為證實陰極防蝕系統的效能，在結構物之使用期限內應定期量測鋼材之腐蝕電位，可使用可提式裝備作檢查，證實永久性參考電極及臨界區域之電位，陰極防蝕系統之電位偵測必須能遵循及可能控制該系統之操作參數及效能。</p> <p>必須記錄與陰極防蝕相關的所有資料、數據及結果。此包括所有與陰極防蝕系統有關的設計、製作、安裝、使用、操作、維修及效益等資料。所有數據必須供作檢核設計規範，此方面主要顧及裝備位置與水線之偏離情況，此將改變受保護地區。結構物使用期間之電位量測結果，將可證實陰極防蝕系統可滿足設計規範及有效地操作及顯示可達到完全的保護。</p>
--	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

# 「港灣結構物陰極防蝕準則訂定（草案）研究」計畫

## 相關文獻整理索引-5

序號	05	文獻編碼		文獻名稱	Cathodic Protection of Steel in Concrete (BS EN 12696:2000)					
文獻類別	規範	發行國別	英國	文獻特性	出版單位	British Standard Institution	出版日期	March 2000	作者	European Committee for Standardization ; British Standard Institution
關鍵字	陰極防蝕 / Cathodic Protection ; 鋼材 / Steel ; 混凝土 / Concrete									
摘要	本規範為規定曝露在大氣中的既有或新建的鋼筋混凝土結構物，鋼筋之陰極防蝕之實際執行需求，而非設計規範。它包括鋼筋混凝土及預力混凝土建築物和土木工程結構物的大氣曝露部位。本規範可應用於裸鋼或有機塗裝之鋼筋，但本規範不適用於建築物或土木結構物埋於土中或浸於水中部位之構件。鋼筋混凝土陰極防蝕為提供長期腐蝕控制的經濟有效且適當策略，為能成功地實現，必須具有特殊的設計計算和定義標準的安裝程序與技術。因此為配合本規範之執行，必須具有材料安裝、調查評估及操作之細部設計與規範之認知。在細部設計上至少應有詳細計算、安裝圖、材料與裝備規範、安裝、測試、調查評估及操作等各方面之詳細方法敘述及規範等資訊。									
重要內容簡述	所有安裝在曝露於大氣中之混凝土結構物的陰極防蝕系統，各單元件之設計、安裝、調查評估、長期使用及維護之紀錄，必須遵照 ISO 9001 適當品質管理系統標準而完整的保存，以供設計校核及性能檢核，所有測試儀器必須經過校正檢核。在整個品管系統中均需合適的專家及具有經驗或受訓練的人員之監督，尤其從事鋼筋混凝土之陰極防蝕技術之專業人員必須具有電化學、混凝土技術、土木及結構工程和陰極防蝕等多方面知識之訓練者。結構物評估包括其材料條件、結構完整性及是否需修復和如何修理，可參照 ENV 1504-9 規範進行。這方面之評估通常為決定使用陰極防蝕之前必須執行的工作。一旦決定使用陰極防蝕為維修									

及保護方法，則必須進行下列調查工作以證實陰極防蝕之合適性及提供系統設計之基本輸入資料；調查工作包括結構物之工程背景及環境資料，目視檢測混凝土是否發生龜裂、蜂窩、不良施工接頭等，混凝土中氯化物含量、中性化深度、鋼筋混凝土保護層厚度及鋼筋位置、鋼筋電氣連續性、鋼筋／混凝土電位，混凝土電阻，而在修理方面應參照 ENV 1504-9 規範，受氯化物污染或產生中性化之混凝土必須敲除，暴露鋼筋之鐵銹必須清洗，以利鋼筋與修理材料具有良好之握裹力，但不可使用塗裝或絕緣／耐握裹劑，以免造成局部電池，鋼筋表面必須具有足夠之保護層厚度，因此可使用水泥質材料修補，但不可含金屬，不論是纖維或是粉末狀，修補材料之電阻特性及力學性質必須與原混凝土相似。在陽極安裝於修理區域之前絕對不能使用各種專利的養生膜。修補混凝土材料之電阻必須為原混凝土電阻之 50~200% 範圍內，現有混凝土與修補區之握裹強度必須大於  $1.5 \text{ N/mm}^2$ ，至少應大於  $1.0 \text{ N/mm}^2$ ，陰極（鋼筋）與陽極系統間之電阻必須檢測以防止短路，養生膜必須去除以避免對陰極防蝕系統之性能造成影響，所選用之材料、厚度及安裝方法必須能相容且與陽極材料具相容性。

陰極防蝕系統包括一套可將陰極防蝕電流分佈於混凝土中鋼筋各部位之陽極系統，而在陽極材料與鋼筋之間用直流電連接，並由電源供應電力，參考電極及感應器構成陰極防蝕系統之作業偵測系統，整個系統必須在預期結構物之使用壽命，及其所處之環境下設計、安裝及測試，本規範之陽極系統包括導電性塗裝、有機及金屬塗料鈦金屬網。在偵測感應器方面，供偵測鋼筋／混凝土之電位必須相當的健全及可永久性暴露在高鹼性條件下，電纜及其連接器亦同，亦應具有耐酸性能。在安裝程序上，必須保持電力之連續性，若使用導電性塗料陽極系統時，必須特別注意混凝土表面鋼材之位置，去除或絕緣，在此情況下，鋼筋與陽極系統容易發生短路現象。在每一區域，必須安裝電位衰減偵測器 (potential decay probes) 以利偵測電位之衰減、鋼筋之陽極或陰極電流密度，或評估腐蝕速率及陰極防蝕之程度，這方面之資料收集可由人工或電腦系統收集及電腦網路傳遞，這些性能測試可供評估腐蝕或保護之風險機率大小，另外操作及維修手冊之製訂，至少 12 個月內定期作檢查，及完成系統檢查資料收集，對任何陰極防蝕系統之修正都是相當的重要。

# 「港灣結構物陰極防蝕準則訂定（草案）研究」計畫

## 相關文獻整理索引-6

序 號	06	文 獻 編 碼		文 獻 名 稱	Cathodic Protection Part 1 Code for Practice for Land and Marine Application (formerly CP 1021) (BS7631 part 1: 1991)				
文 獻 類 別	規 範	發 行 國 別	英 國	文 獻 特 性	出 版 單 位	British Standard Institution	出 版 日 期	1991	作 者  European Committee for Standardization & British Standard Institution
關 鍵 字	陰極防蝕 / Cathodic Protection ; 實務 / Practice ; 地上 / Land ; 海洋 / Marine ; 規範 / Code								
摘 要	<p>本規範處理埋於土壤中或浸泡於水中的金屬物之防蝕，以及裝液體之貯槽之內面保護等使用陰極防蝕之原則，但不包括外海結構物（在另一本規範 part 2 中說明）。因此包含之內容有術語定義，一般原則及應用性，埋設結構物、鋼筋混凝土、船舶、水中結構物等各種結構體之防蝕，工廠貯槽之內面保護、對鄰近結構物防治腐蝕之措施、電氣量測、測試、操作與維修及安全性等均有所規定。規範指出在一般情況下，應用陰極防蝕似乎是一種較為經濟之策略。然而並不能據以推論在任何地方應用均具有優越性。除非與其他方法比較，作過詳細的評估測試以及在設計安裝注意應避免之細節，這些都在本規範中詳述。</p>								
重 要 內 容 簡 述	<p>陰極防蝕僅能應用於鋼筋與混凝土電解質是連續的，而不適用於龜裂或剝離之 RC 部位。防水膜、柏油鋪面或磨損面等將阻礙電解質之通路，在應用時應加以評估。通常應用在已受氯化物侵蝕之結構物，而若一新結構物決定採用陰極防蝕，則較易施工且可顯著地降低費用，擴張有效電流分佈範圍，偵測與控制亦較容易。而在已腐蝕之 RC 結構物採用陰極防蝕措施時，必須在安裝前先清除已劣化區域之材料，由於犧牲陽極所具驅動電壓太低，因此僅適用在浸泡於海水部位之結構物。適合使用陰極防蝕之結構體為易受到氯化物侵蝕之橋面版、支撐梁、柱、基樁、管子和涵洞、貯槽壁及建物之構架等橋樑、涵洞及建物之部位上。即使已使用陰極防蝕，但可能仍存在鋼筋腐蝕區及可能造成保護層龜裂之現象出</p>								

現，因此在設計時可能需預期在保護系統應用之早期階段，有一段時間鋼筋混凝土劣化可能會持續一段時間，並適時作補修工作。

調查工作主要是在陰極防蝕應用前，先確定 RC 結構物中劣化之程度及劣化原因。測量數據亦可用於決定那個部位最容易腐蝕，該區域即為最需要採用陰極防蝕之處。鋼筋位置與深度之量測有助於陽極位置之安裝設計。由鋼筋混凝土中之鋼筋電位分佈圖推測腐蝕機率值，若電位相對於銅 / 硫酸銅參考電位小於-350 mV，則腐蝕機率 95%，而在-200 ~-350 mV 及 < -200 mV 之機率分別為 50% 及 5%。混凝土中氯化物含量 0.3% 為臨界值，可由鑽心取樣在實驗室分析求得。使用酚酞指示液可判別 pH 值在 9~10 以下為無色，而 10 以上之高鹼性區為紅色 / 粉紅色，而判定是否有中性化。使用保護層厚度儀量測鋼筋位置及使用超音波共振錘，紅外線熱差儀及雷達頻率波儀等研判混凝土是否有龜裂。

陰極防蝕系統所供應之鋼筋表面電流必須為  $5\sim 20\text{ mA/m}^2$ ，曝露在大氣區之結構體，其陽極材料安裝之間距最大為 20 公分，表面陽極系統必須與混凝土結構物緊密地接觸。一般而言，陽極系統之使用壽命並非取決於主要陽極材料之材質特性，而是由陽極材料與混凝土材料界面之黏著性和保存的效率大小所控制。為避免陽極材料提早劣化，因此電流宜限制在  $10\text{ mA/m}^2$  以下。選用陰極防蝕必須考慮下列各項因子，以利達到預期之實效：(1)必須清理表面劣化之鋼筋及混凝土以確保電解質通路順暢；(2)結構本身修理及外觀美觀之維護，所採用之陰極防蝕安裝及維修費必須比該受損之構件進行替換或修理之費用更低廉；(3)必須維護陰極防蝕系統，以確保可持續地操作及達到保護之電位；(4)受保護的結構體外觀必須被認可為滿意的；(5)鋼筋必須具電氣連續性，以避免電流無法通過而無法達到防蝕效果；(6)RC 結構物不可含有鹼性骨材，及(7)充份了解極化衰減 (polarization decay) 標準，必須安裝使用參考電極。



# 「港灣結構物陰極防蝕準則訂定（草案）研究」計畫

## 相關文獻整理索引-7

序 號	07	文 獻 編 碼		文 獻 名 稱	Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures, Definitions, Requirements, Quality Control and Evaluation of Conformity Part 9, General Principles for the Use of Products and Systems (DD 1504-9:1997)					
文 獻 類 別	規 範	發 行 國 別	英 國	文 獻 特 性	出 版 單 位	British Standard Institution	出 版 日 期	July, 1997	作 者	European Committee for Standardization & British Standard Institution
關 鍵 字	混凝土結構物 / Concrete Structures ; 保護 / Protection ; 修理 / Repairs ; 保護產品 / Protective Products ; 品質 / Quality ; 一致性測試 / Conformity tests ; 利用 / Utilization ; 通則 / Generalities									
摘 要	<p>鋼筋混凝土結構物防蝕與修理需複雜之設計工作。本預備規範(Prestandard)定義 RC 結構物已遭受或可能會遭受損壞及劣化的保護和修理原則，而且提供選擇防蝕材料及系統之建議，以利使用者作適當的選擇。本預備規範認定修理程序的主要階段為評估結構物條件；認明劣化之原因；決定保護與修理之目的；選用適當的保護及修理系統之主要原則；方法選用；定義產品及系統之性質，規範維護之需求。此預備規範為先期試用，經過修正後，最後將變為正式之歐洲規範(EN)，同時本預備規範中亦有附錄為提供本預備規範之指南及背景資料，其內容主題亦與本預備規範相同。</p>									
重 要 內 容 簡 述	<p>本預備規範包含下列內容：</p> <p>(1)在修理前、中及後所需進行之檢查、測試及評估工作。</p> <p>(2)在歐洲規範 EN 206 混凝土性能、生產及相合性(Concrete-Performance, Production and Conformity)所定義之環境影響或其他化學物所造成之 RC 結構物之缺陷之修理與保護。</p> <p>(3)RC 結構物因機械損傷、差異沉陷、地震及衝擊負載、生物侵襲、施工不良或使用不當之材料等所造成之損害的修理。</p>									

	<p>(4)為減少鹼 矽反應進行所進行之保護及修理。</p> <p>(5)更換銹蝕鋼筋或新埋設鋼筋或填充構件中之孔隙，以確保結構連續性等之修理策略。</p> <p>(6)替換或填加混凝土使 RC 結構物具有所需之功能。</p> <p>(7)防水以利保護與修理。</p> <p>(8)道路鋪面、跑道、堅硬的平台或地板等之保護與修理。</p> <p>(9)保護與修理方法包括：1.處理龜裂；2.鋼筋回復鈍態；3.限制濕氣含量以降低鋼筋腐蝕速率；4.用電化學方法以減少鋼筋之腐蝕速率；5.利用塗裝控制鋼筋之腐蝕；6.對道路之鋪面、跑道、堅硬平台或地板等之維修等。</p> <p>在混凝土劣化相關之處理原則包括減少及防止有害物(如水、液體、氣體、化學物及生物等)之侵入；調整及維持混凝土中之濕氣含量在一特定值以內；以水泥砂漿或混凝土填補龜裂或剝落部位，結構物補強，利用塗裝覆面或注膠法防止化學性及物理性侵害。而有關這些原則之應用方法均在本預備規範中詳述。</p> <p>而在鋼筋之防蝕原則上可採行增加鋼筋保護層或去鹽法、再鹼性化等使鋼筋恢復鈍態；利用表面處理、塗裝增加混凝土電阻，在陰極區限制氧氣含量，而令鋼筋不易發生陽極反應之陰極控制法；應用電位差原理之陰極防蝕；及使用環氧樹脂鋼筋或混凝土加腐蝕抑制劑等對鋼筋的陽極區域作控制，使其不易發生腐蝕等方法及原理。在完成防蝕或修理工作後，必須要提供已經完成的維修工作記錄及未來設計年限內，混凝土修理部份所應進行的檢查及維護說明。混凝土結構物在其設計年限內所準備的維修材料及系統等之規範必須遵守相關的健康、安全、環保及防火規定。若有衝突，則必須使用替代性之修理原理或方法執行。在本預備規範中並列出一份表格，可應用相關之規範檢核上述修理之原則及所使用之材料與系統之性質。</p>
--	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

## 附錄二 摘要報告

# 港灣構造物陰極防蝕準則訂定（草案）研究

## 摘要報告

### 第一章 前言

陰極防蝕(cathodic protection, CP)應用於金屬及鋼筋混凝土結構之防蝕技術，經歐、美、加、日等國多年的使用經驗及研究成果，業已肯定為防蝕效能極佳的工法。近十年來，國內雖已開始進行研究與施作，但尚未制定相關規範，設計時多引用國外經驗與規範；然因國內外適用條件的差異，急需研擬一套符合國內環境需求的陰極防蝕規範或準則，以供日後新建工程或既有結構物陰極防蝕設計、施工及維修時的參考依據。本計畫中僅針對鋼筋混凝土結構進行研究(預力混凝土結構與金屬結構物之陰極防蝕並未含括在內)。

### 第二章 鋼筋混凝土陰極防蝕案例

#### 案例一：犧牲陽極式陰極保護－鋅網

美國佛羅里達交通局(Florida Dept. of Transportation, FDOT)於1998年於 Broward River Bridge in Jacksonville, FL 施作此工法，選擇橋墩的兩支基樁進行測試，該橋位處海洋環境，基樁下部浸漬於海水中。

該工法為 FDOT 發展出專為基樁 RC 結構於水下帶、潮間帶、飛沫帶之陰極防蝕使用。其工法為以鋅網為主要陽極，內置於玻璃纖維製成之基樁夾層(pile jacket)內，而另一鋅塊為輔助陽極，置於低潮線下 0.6 m 的海水中，利用銅線將陽極與鋼筋連接。施工時將兩片夾層包覆於混凝土表面，夾層與混凝土間間距 5.1 cm (2 in)，然後以砂漿水泥灌注至夾層中。

## 案例二：外加電流式陰極保護－鈦網陽極

香港 Kwai Chung 貨櫃碼頭為棧橋式碼頭，興建已近 20 年。1991 年進行碼頭安全檢測時發現碼頭背面近海部份鋼筋銹蝕，且混凝土有剝落(delamination)的現象；其中大樑部份，混凝土剝落面積達 50%。經判斷，鋼筋腐蝕的原因是因該處位處海洋環境中的飛沫帶，鋼筋混凝土結構受海水潑濺，氯離子大量入侵所致。美國 Corrpro 公司於 1992 年使用鈦網陽極，以外加電流式之陰極保護系統進行碼頭大樑鋼筋混凝土修補。

## 案例三：國內棧橋碼頭基樁陰極防蝕工程

該棧橋碼頭於 1996 年結構檢查時發現多處帽樑底部鋼筋腐蝕、混凝土剝落嚴重，氯離子含量偏高。依結構安全分析結果及建議，優先對橋墩帽樑的鋼筋混凝土進行陰極保護，以降低或抑制帽樑混凝土中鋼筋腐蝕。碼頭連絡橋全長 1 公里，進行陰極防蝕的帽樑總數量為 23 座，為台灣第一座遠端遙控陰極防蝕系統，於 1997 年完工，至今仍正常運作中。

# 第三章 陰極防蝕系統選擇

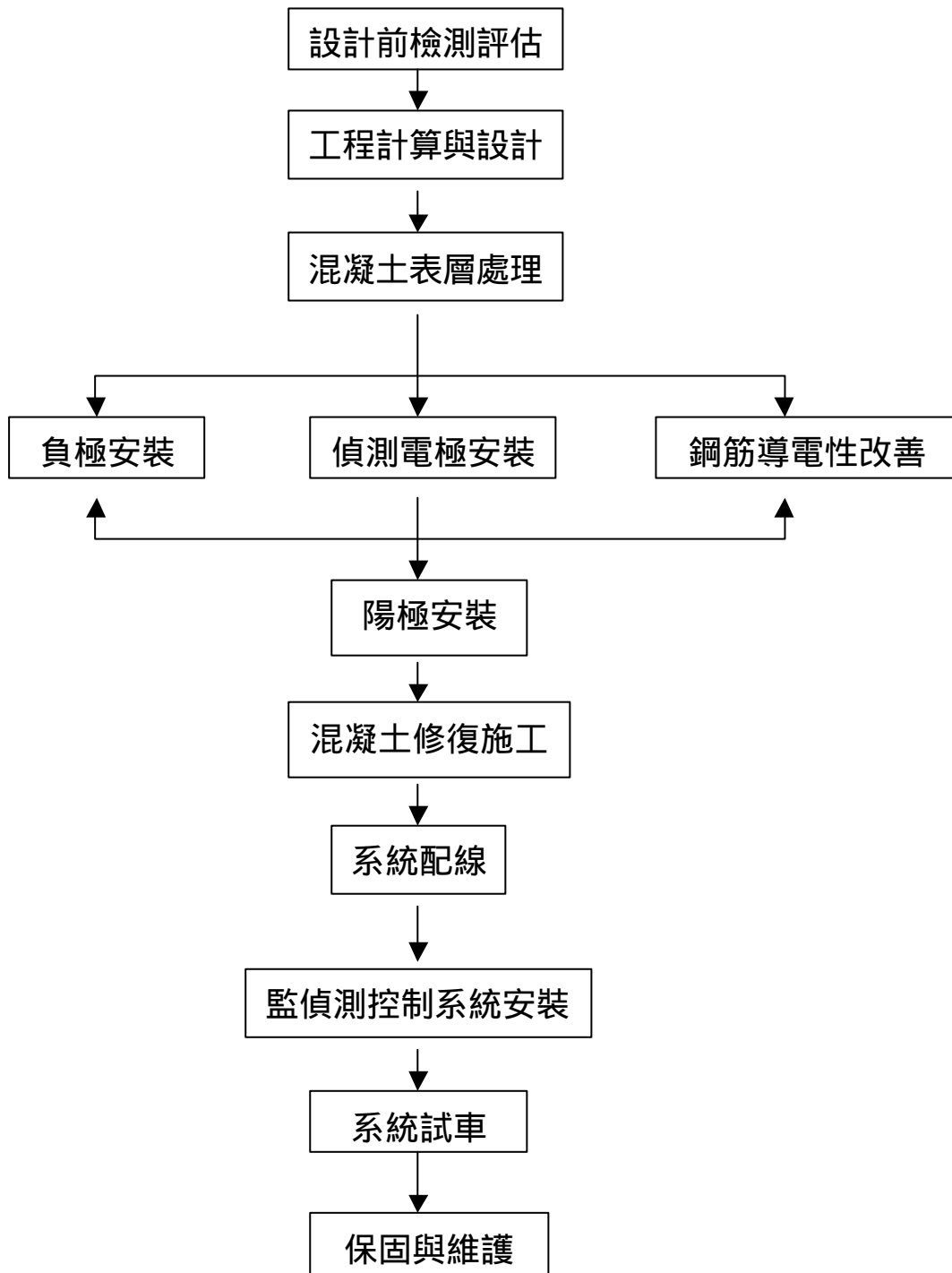
## 3.1 外加電流法

係利用外部直流電源裝置(定電流或定電壓)，以混凝土作為電解質，設置陽極提供防蝕電流給鋼筋，達到防蝕之目的。

## 3.2 犧牲陽極法

使用相對於鋼材活性較高之金屬(如鋅)等作為犧牲陽極，以導線連接鋼筋與陽極，利用兩者之電位差產生防蝕電流，達到防蝕之目的。

## 第四章 陰極防蝕安裝標準程序



陰極防蝕系統安裝標準程序圖

## 第五章 港灣棧橋碼頭設計案例

國內某棧橋碼頭，基樁多處發生混凝土龜裂及剝落，研判是因內部鋼筋及箍筋受氯離子侵害，產生嚴重腐蝕所致。棧橋及碼頭平台共計 47 支預力基樁，低水位以上混凝土表面保護面積計 437 m<sup>2</sup>，低水位以下共 689 m<sup>2</sup>。陰極防蝕設計是採犧牲陽極式保護，依基樁暴露的環境，如大氣帶、潮間帶(含潮汐區與飛沫帶)、水下帶，選擇不同的犧牲陽極材料。高水位上方的大氣帶，無需補強的基樁是採用鋅板陽極並加上導電凝膠，需要補強的基樁則是使鋅網陽極並添加助導劑，再包覆 FRP 夾層；基樁低水位上方的潮間帶採用鋅網陽極並包覆 FRP 夾層；水下部分則是使用鋅塊陽極。目前該座棧橋運作正常，防蝕效果良好。

## 第六章 陰極防蝕驗收標準程序

### 6.1 陰極防蝕保護標準

早期鋼筋混凝土陰極防蝕並無防蝕保護標準，在 1990 年以前，防蝕設計與驗收標準均參考鋼鐵在土壤或海水中的保護標準(Standard RP-01-69-83)，1990 年以後，NACE International 針對大氣環境中的鋼筋混凝土制訂陰極防蝕規範 NACE RP290-90，主要參考項目為：

1. 保護電位低於 -780 mV (vs. Ag/AgCl)。
2. 保護電位低於 -850 mV (vs. Cu/CuSO<sub>4</sub>)。
3. 結構物施行陰極防蝕措施後將其斷電，量測瞬間斷電時的電位與斷電 4 小時後的電位，其差值需在 100 mV 以上。
4. 施加陰極防蝕後，結構物之量測電位需比原腐蝕電位更負(active) 300 mV 以上。

- 5.利用極化曲線圖(E-log i)判斷到達陰極保護電位時所需之保護電流密度。

## **第七章 陰極防蝕操作**

陰極防蝕系統安裝完成後必需進行試車，目的為及時更正任合安裝時的缺失、確認系統可以正常運轉、且運轉正確。

### **7.1 試車期限**

陽極系統養護期(約 28 日)後，一個月內執行試車檢測。

### **7.2 試車操作項目**

- 1.系統電路測試
- 2.鋼筋電位檢測
- 3.電流輸出調整
- 4.保護效果檢測

## **第八章 防蝕系統維護管理手冊**

鋼筋混凝土陰極防蝕系統經試車測試及調整後，於運轉期間務必執行系統保護狀態檢查及系統構件維護。維護手冊為內容包括：

- 1.系統維護說明。
- 2.系統維護執执行程序。
- 3.維護檢查項目及內容。
- 4.維護操作方法。



## 附錄三 簡報資料



交通部運輸研究所港灣技術研究中心



中華民國防蝕工程學會

# 港灣構造物陰極防蝕準則訂定(草案)研究

計畫編號：MOTC-IOT-IHMT-90-004

中華民國九十年十一月

# 港灣構造物陰極防蝕準則草案

- 第一章、港灣構造物陰極防蝕準則總則
- 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

# 鋼筋混凝土陰極防蝕工程

## 施工程序介紹

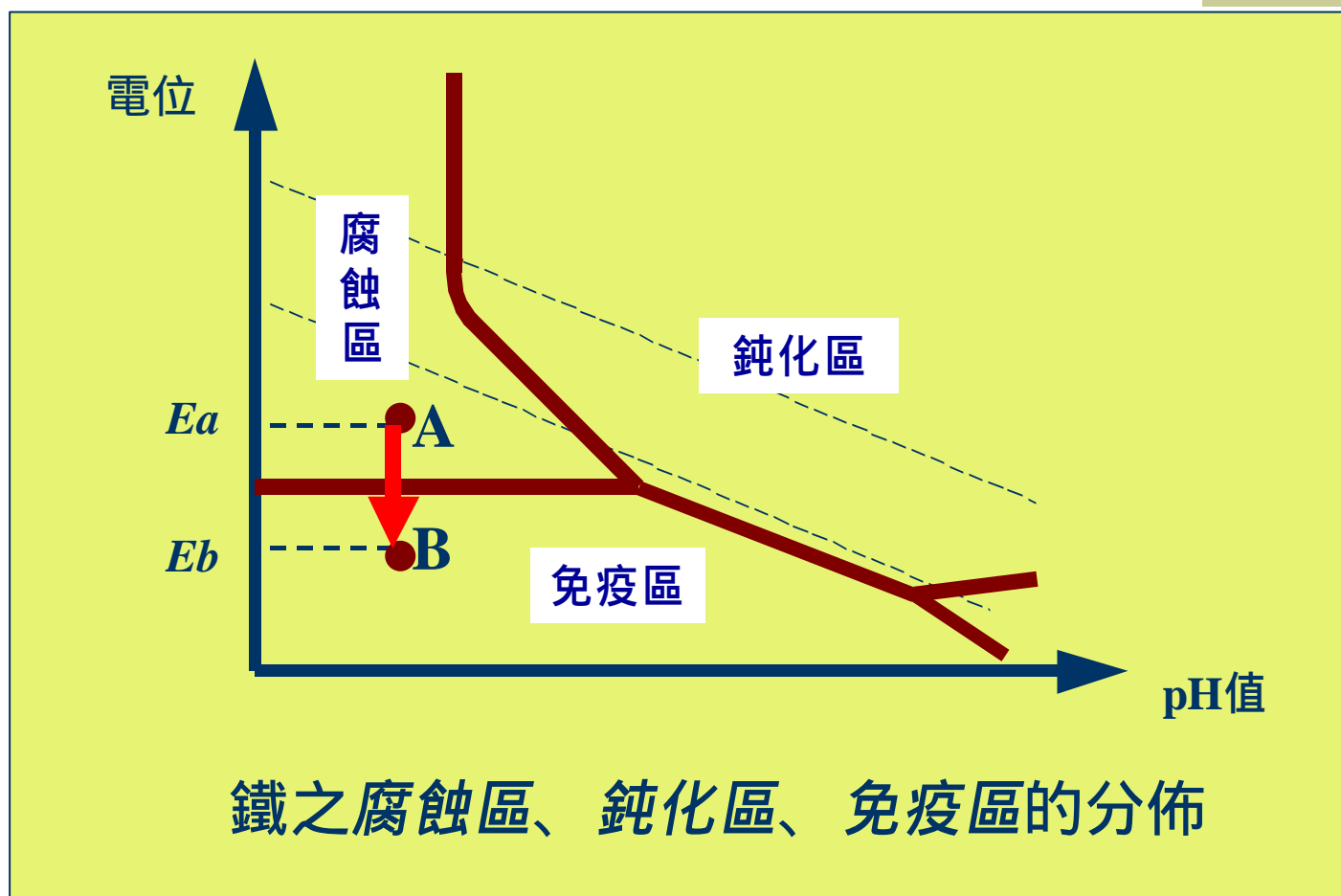


# 前言





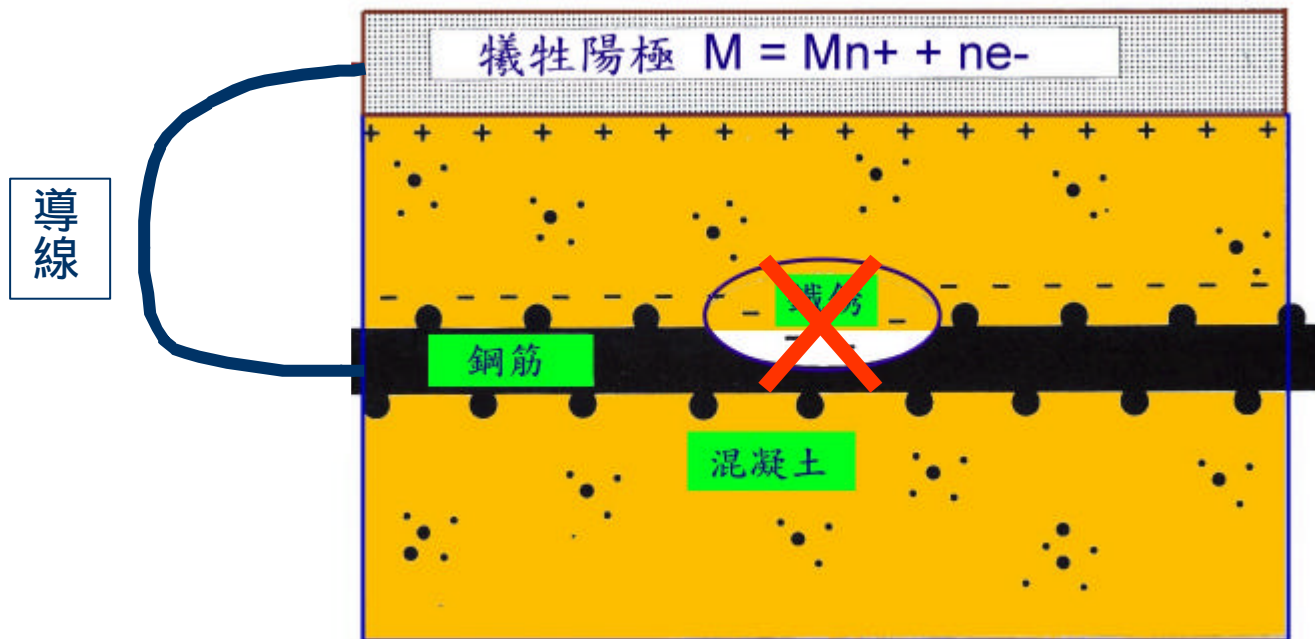
# 陰極防蝕原理



# 陰極防蝕的方法

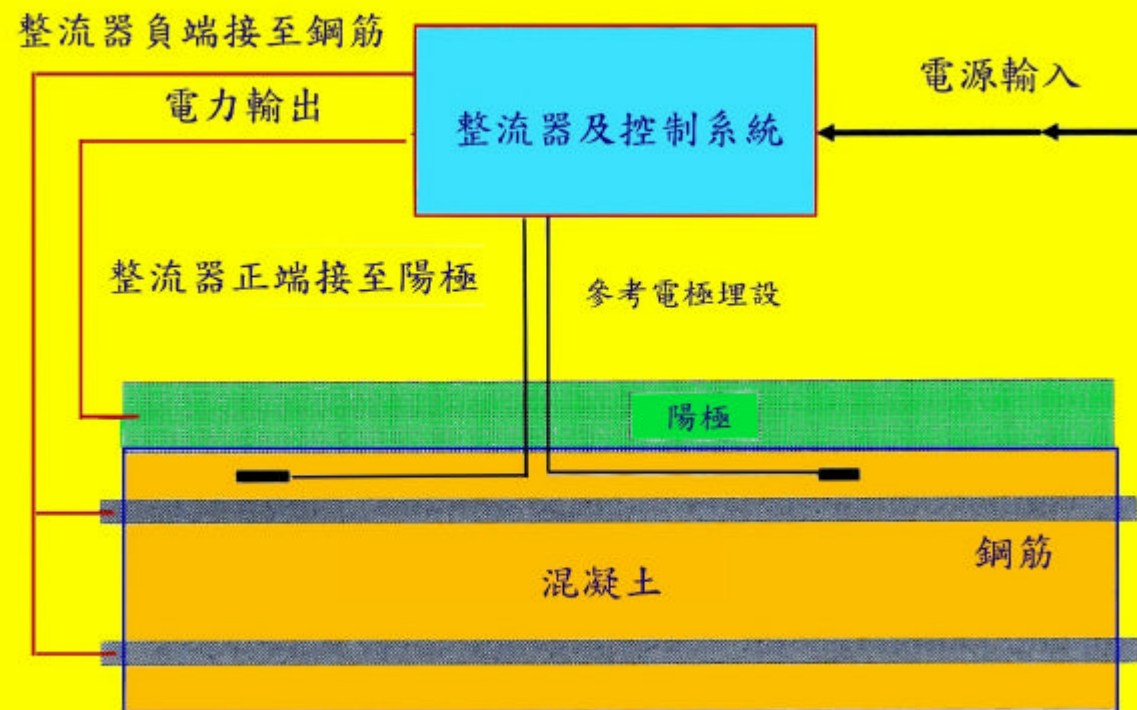
- ◆ 犧牲陽極法(Sacrificial anode)  
驅動力(Driving force)：不同金屬間的電位差  
陽極材料：活性較大的金屬，如鋅等。
- ◆ 外加電流法(Imposed current)  
驅動力(Driving force)：外加電源整流器  
陽極材料：消耗率小之金屬，如鈦等。

# 鋼筋混凝土之犧牲陽極法





# 鋼筋混凝土之外加電流法





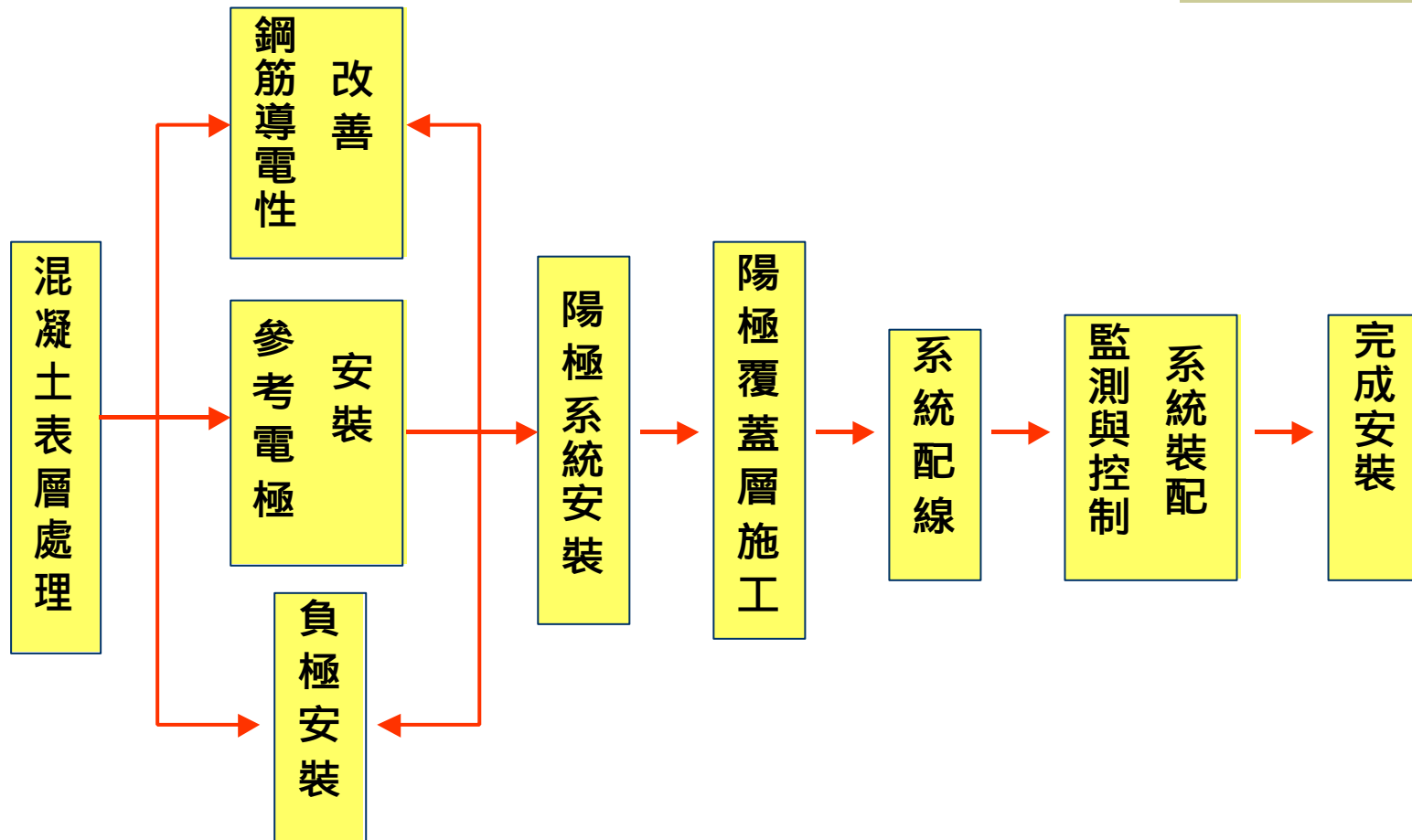
# 鋼筋混凝土結構物 陰極防蝕工程



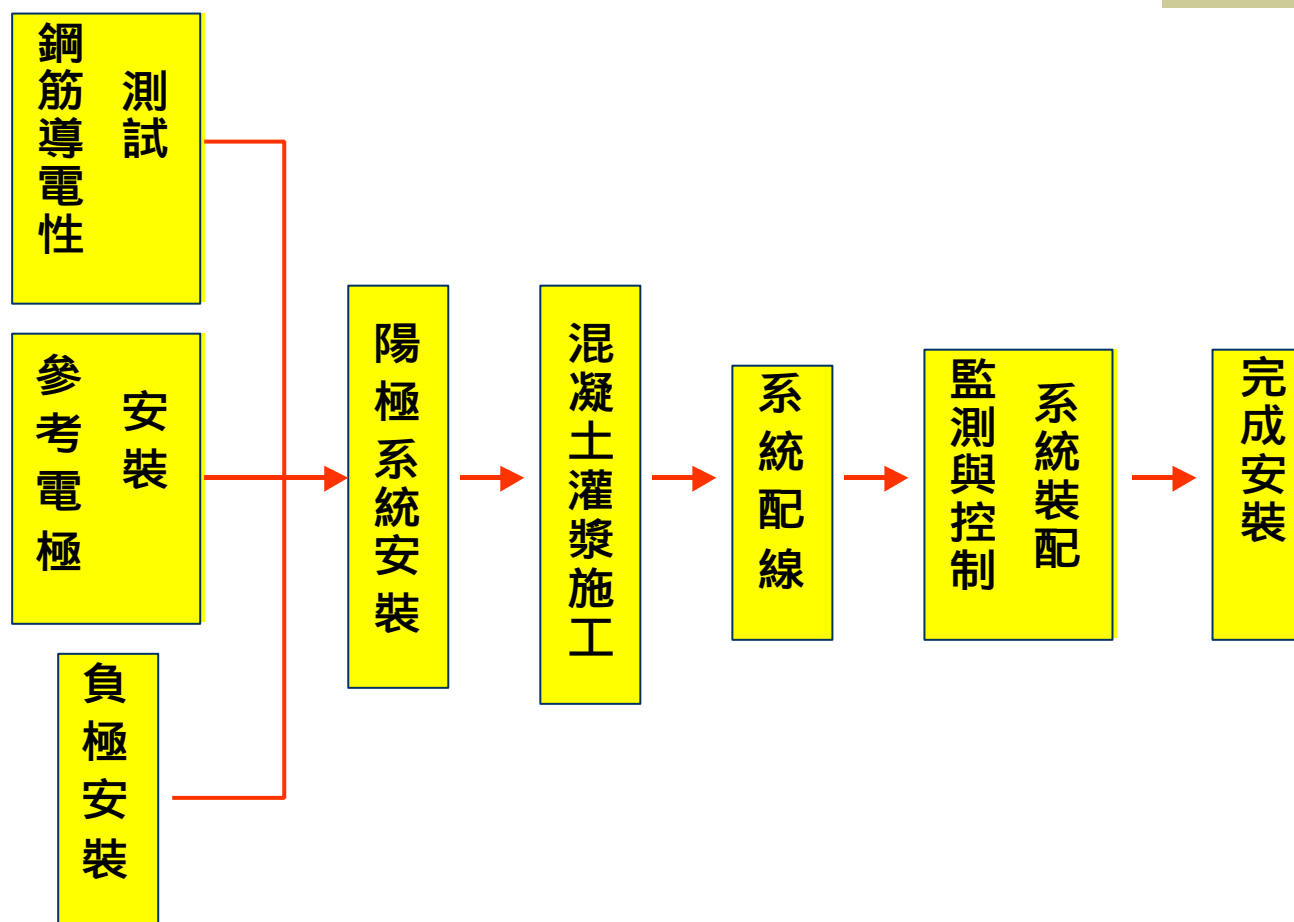
結構物陰極防蝕工程分為：

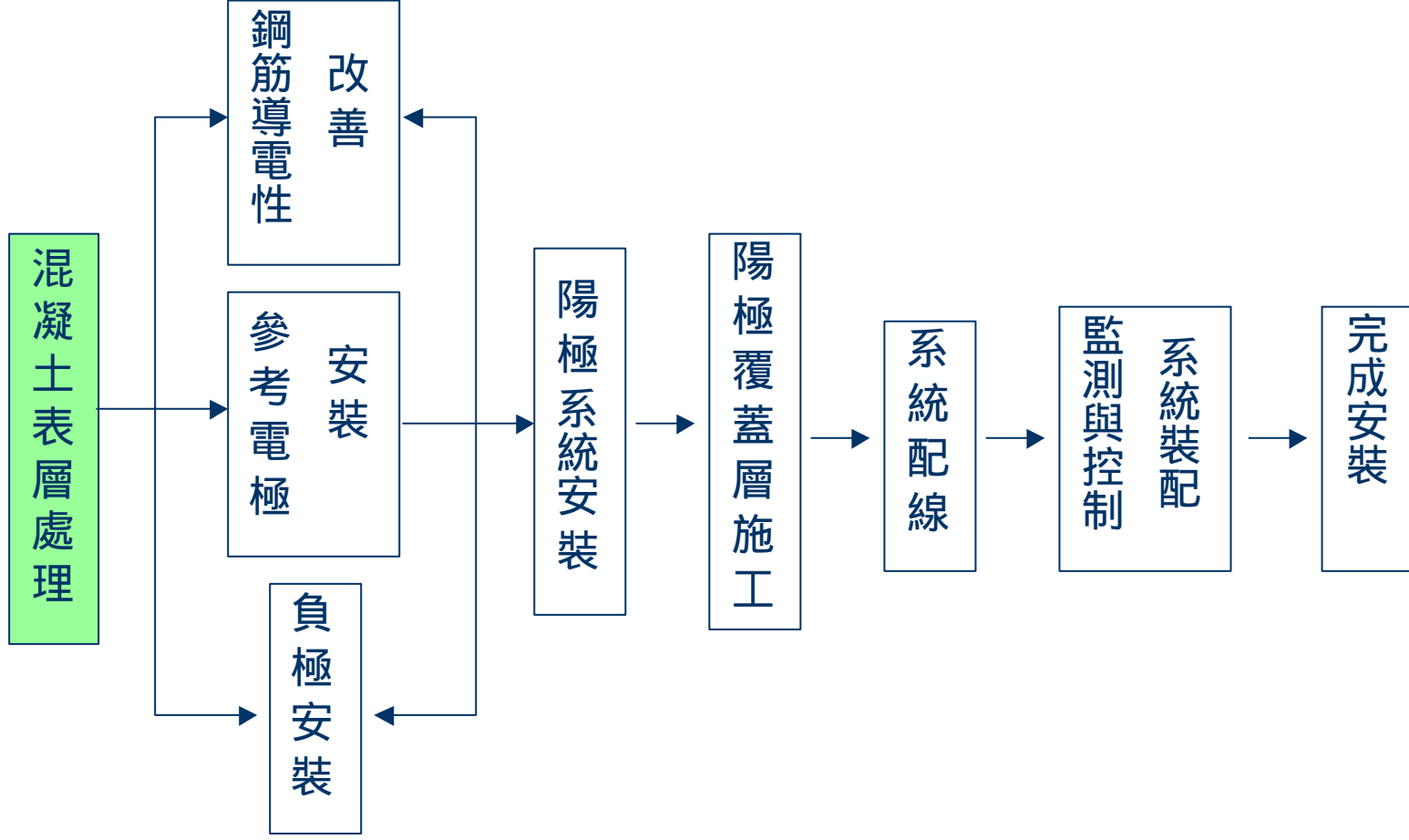
- ◆既有結構物陰極防蝕
- ◆新建結構物陰極防蝕

# 既有鋼筋混凝土結構物 陰極防蝕施工流程



# 新建鋼筋混凝土結構物 陰極防蝕施工流程





# 混凝土表層處理（一）



混凝土剝落層與  
個別金屬元件鑿除



# 混凝土表層處理（二）

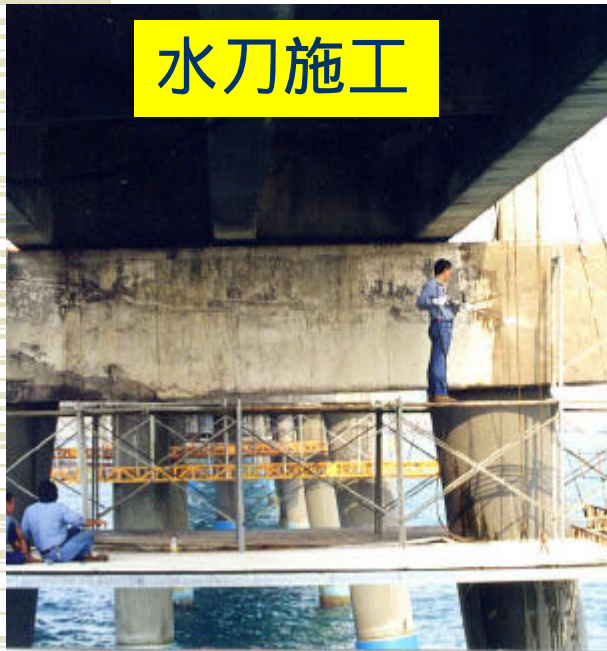
## 水刀施工





## 混凝土表層處理（二）

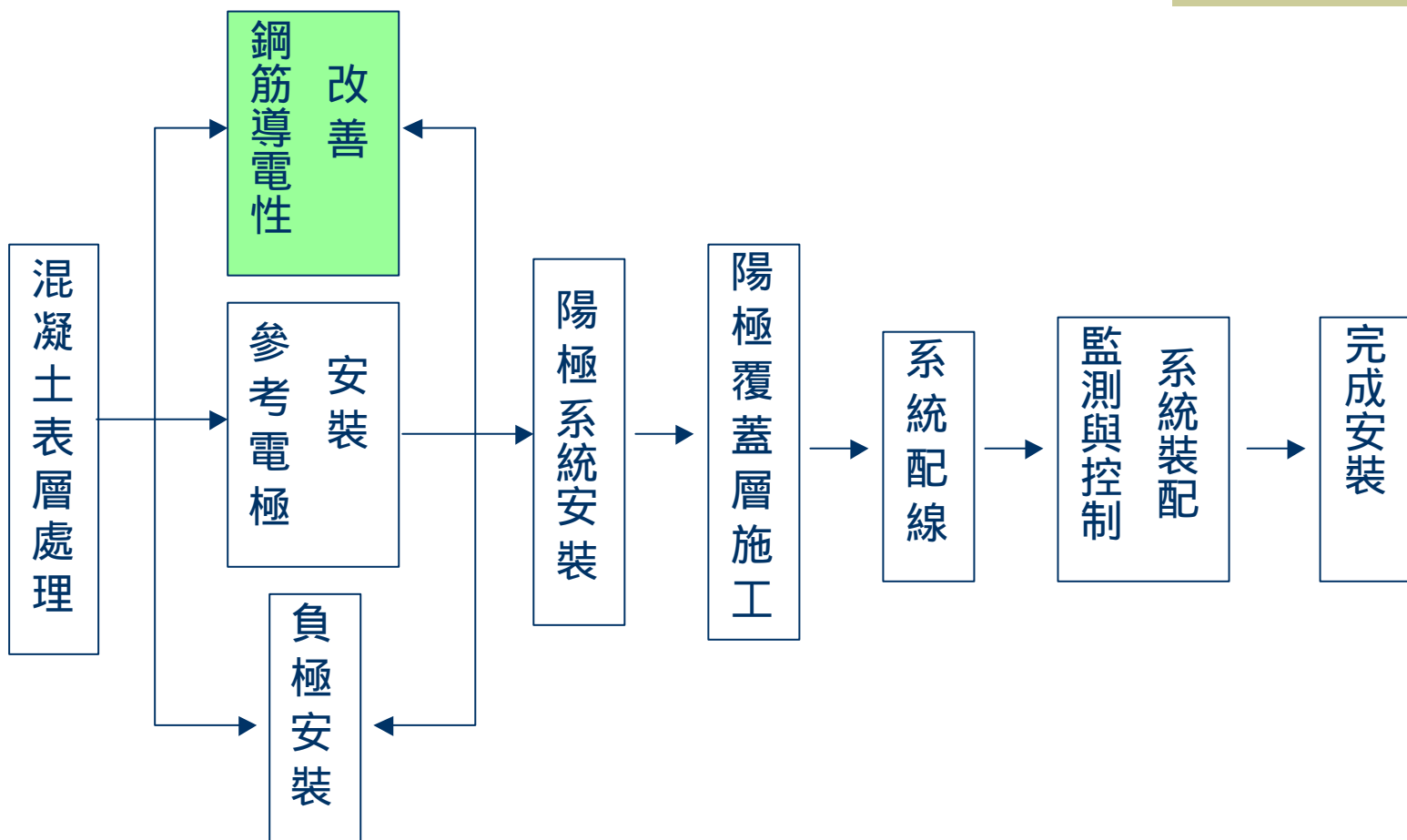
水刀施工



水刀處理完成面







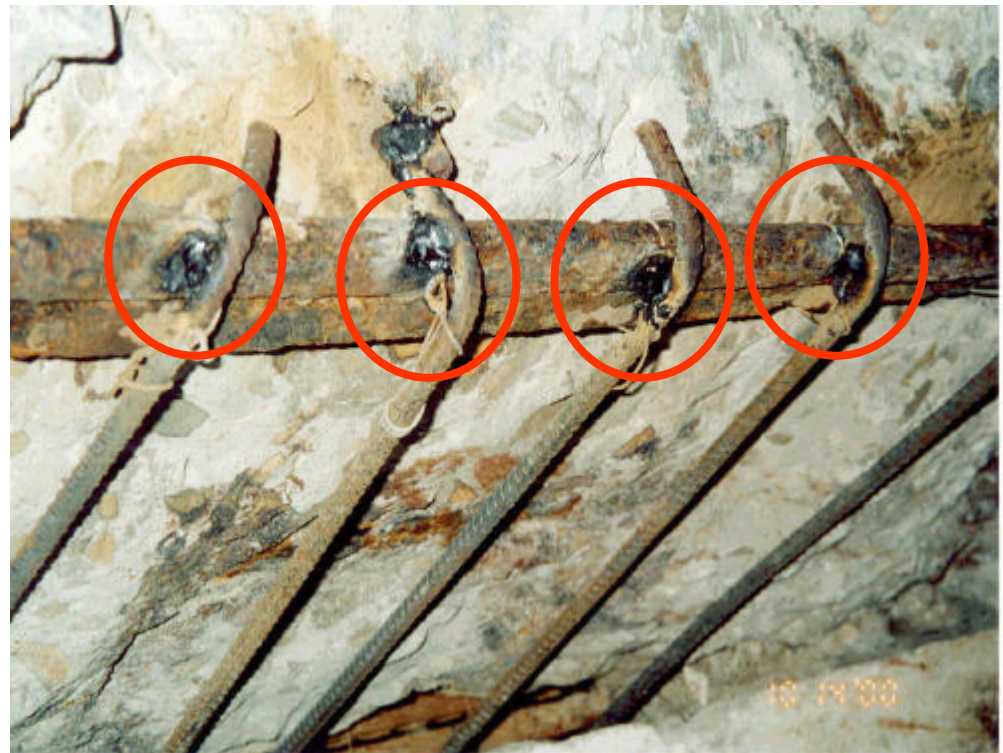
# 鋼筋導電性改善

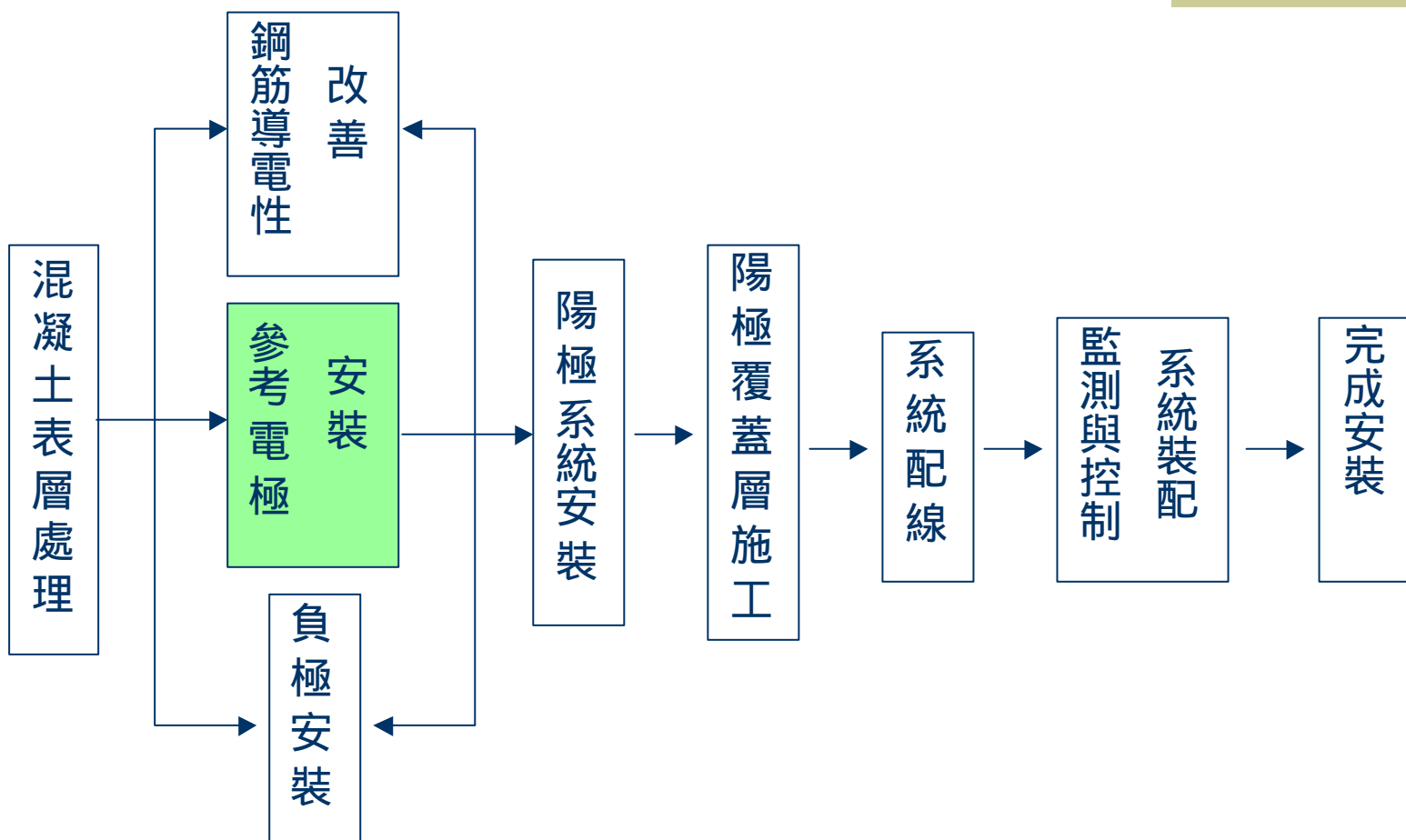
- ◆ 搭接不良
- ◆ 已成銹斷狀況



# 鋼筋導電性測試

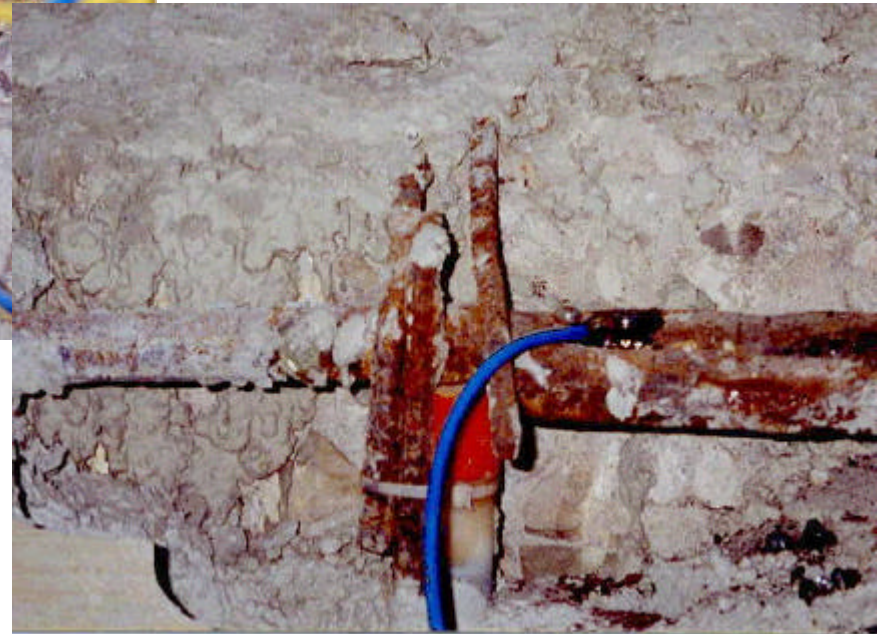
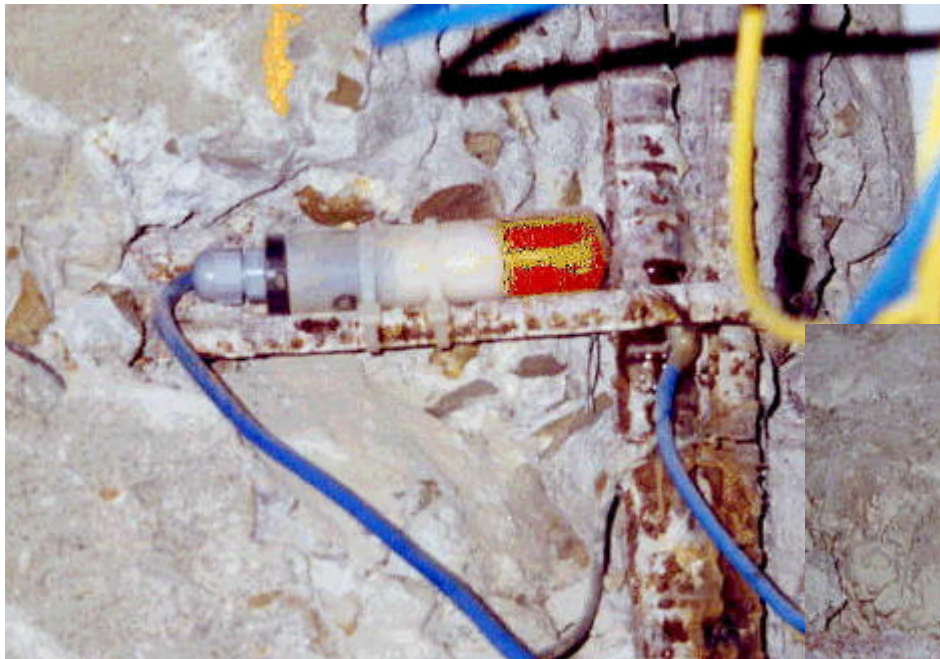
- ◆ 建議每10平方公尺  
進行一次測試
- ◆ 確認鋼筋間的電阻  
小於1歐姆

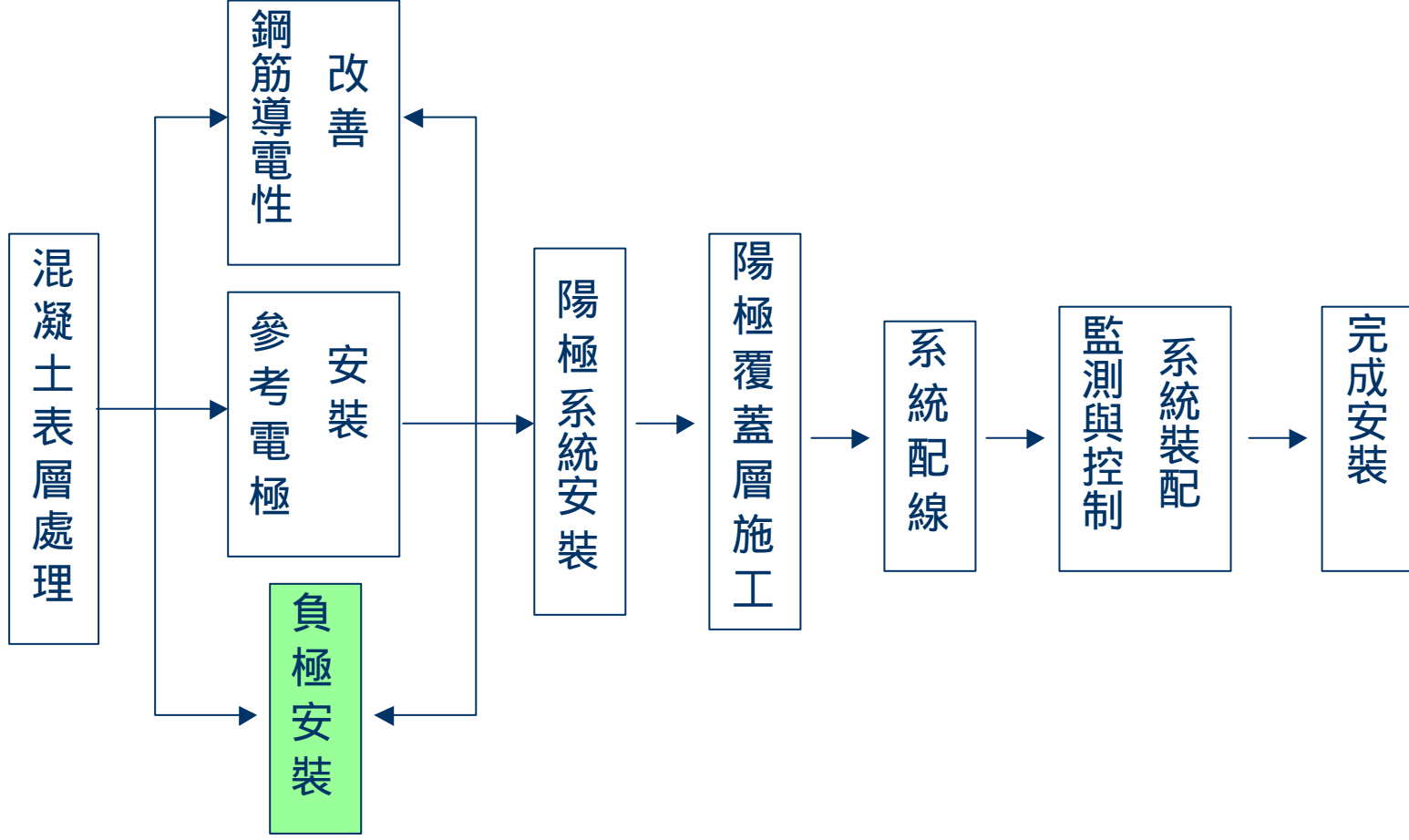




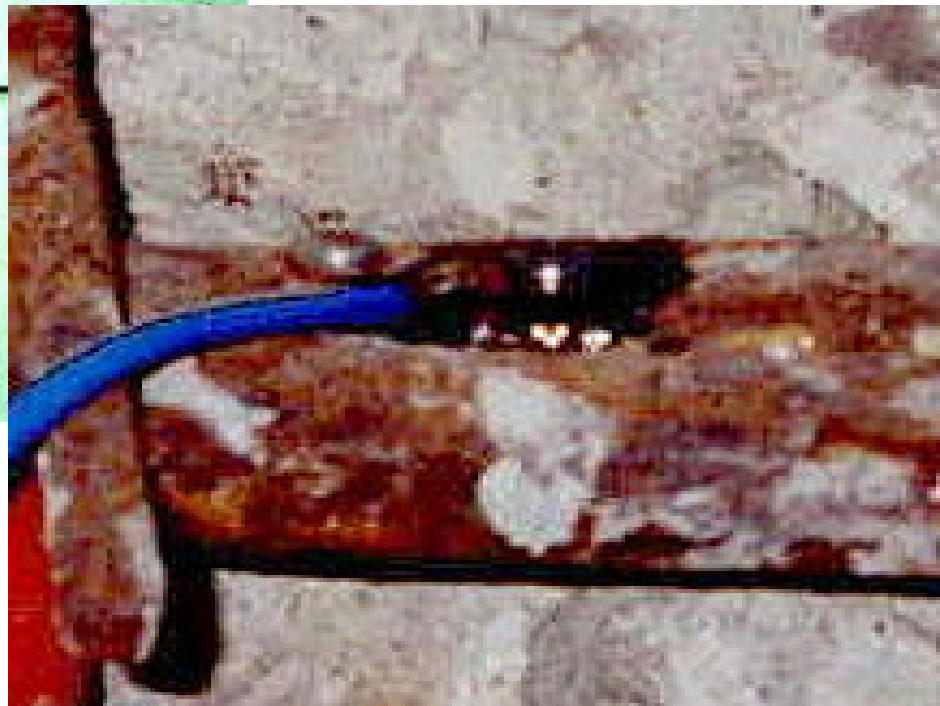


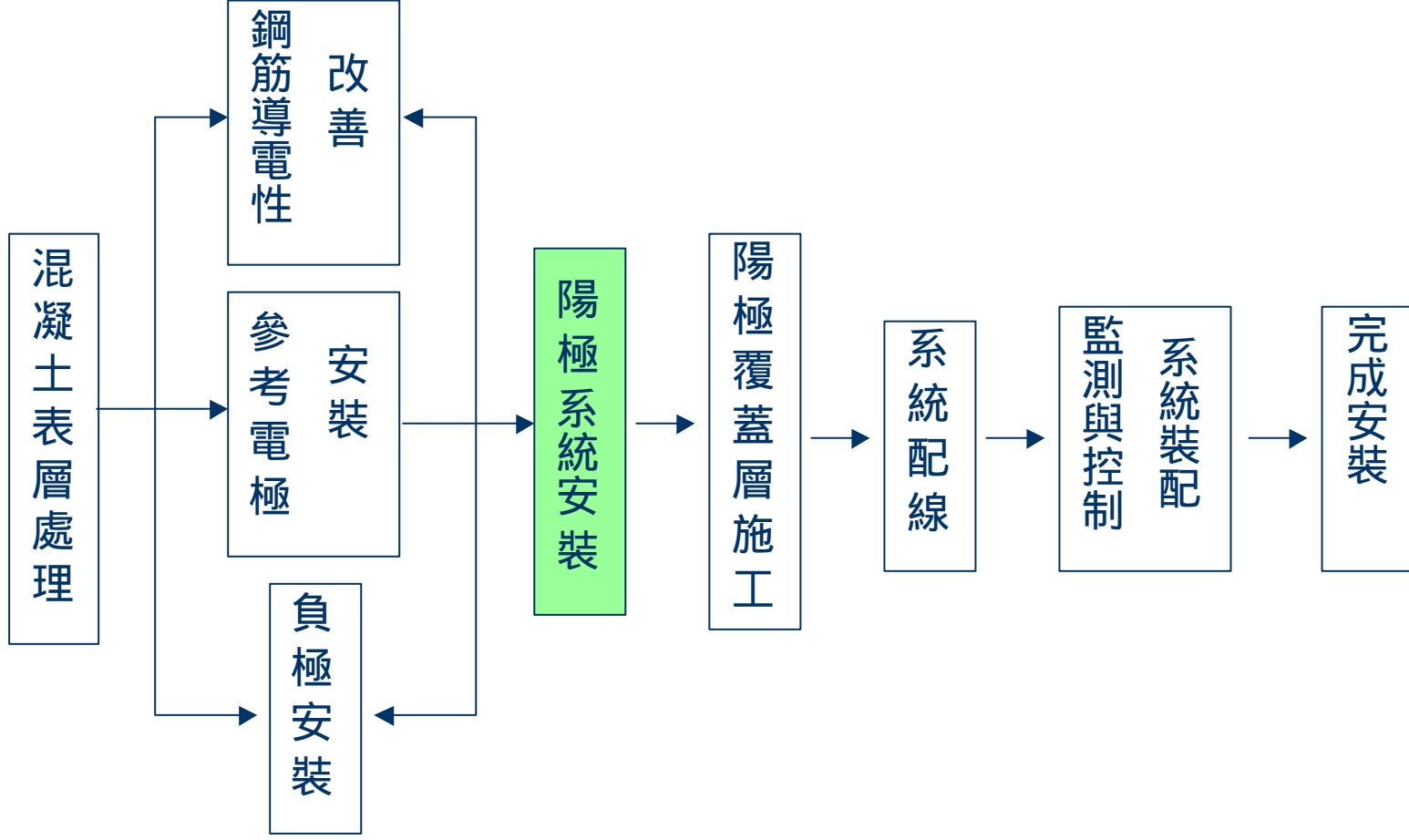
# 參考電極安裝





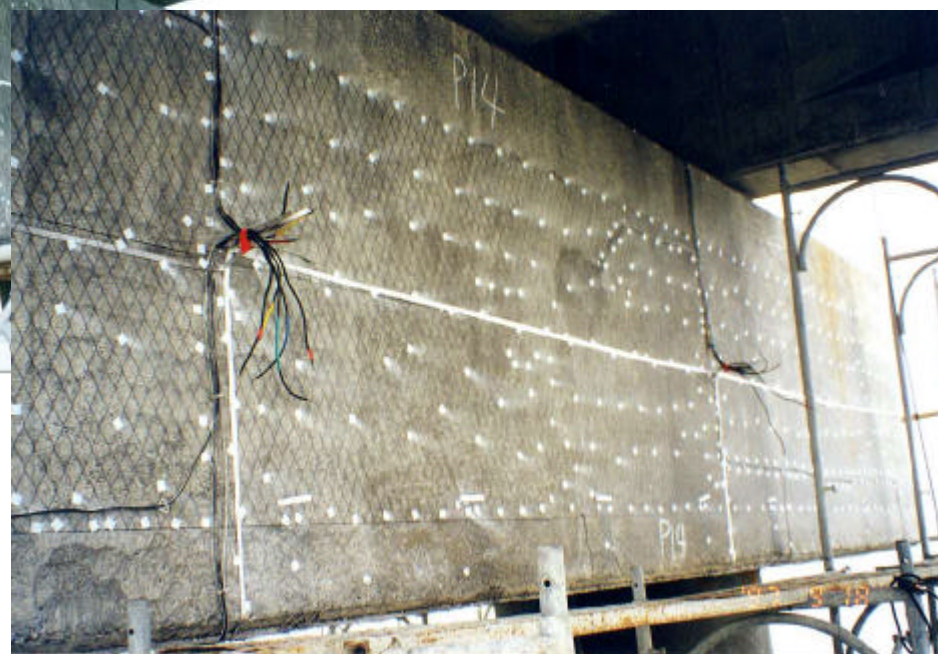
# 負極安裝





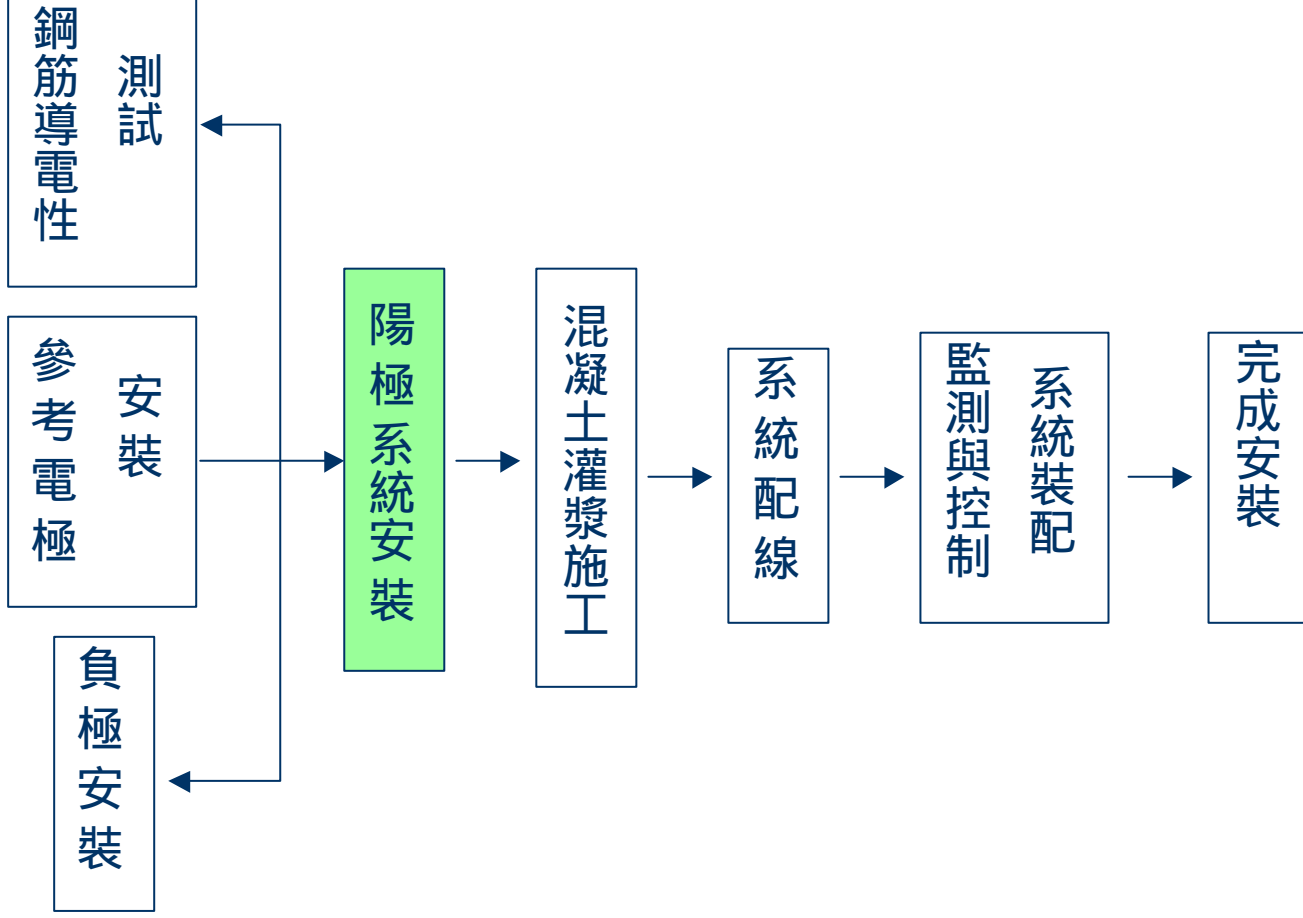


# 既有結構物之外加電流 鈦網陽極系統安裝



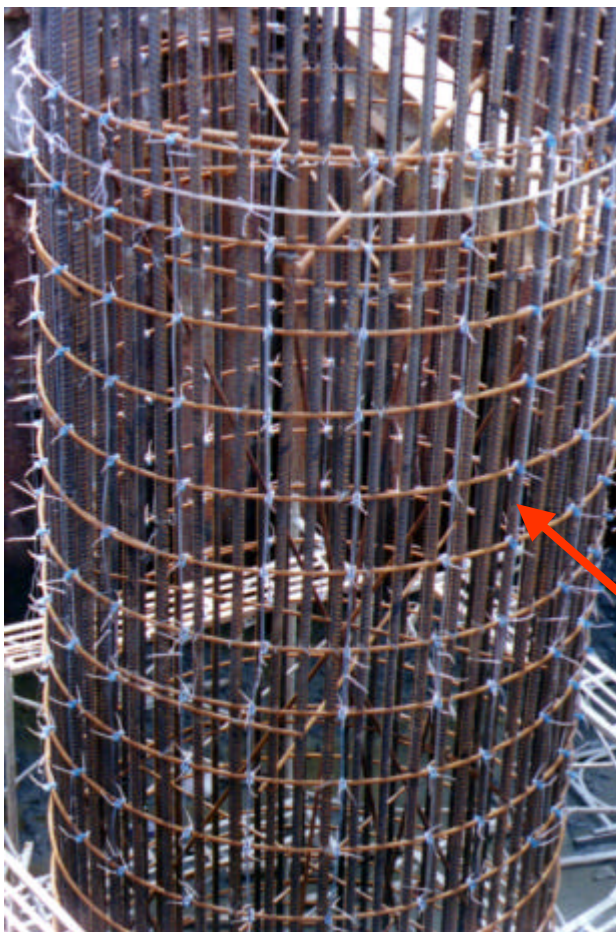
# 既有結構物犧牲陽極 鋅網陽極系統安裝



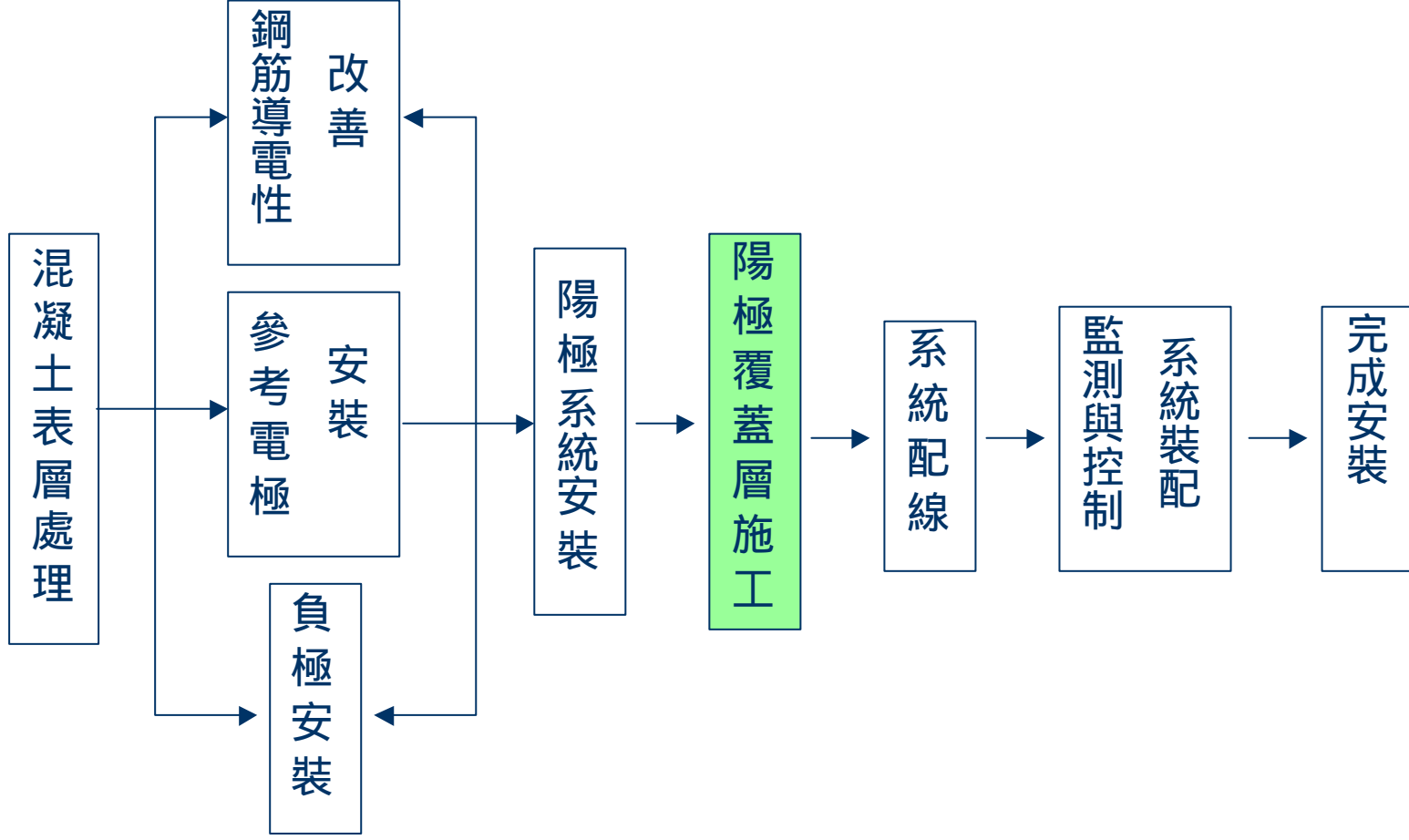




# 新建結構物外加電流 鈦網陽極系統安裝



帶狀鈦網陽極



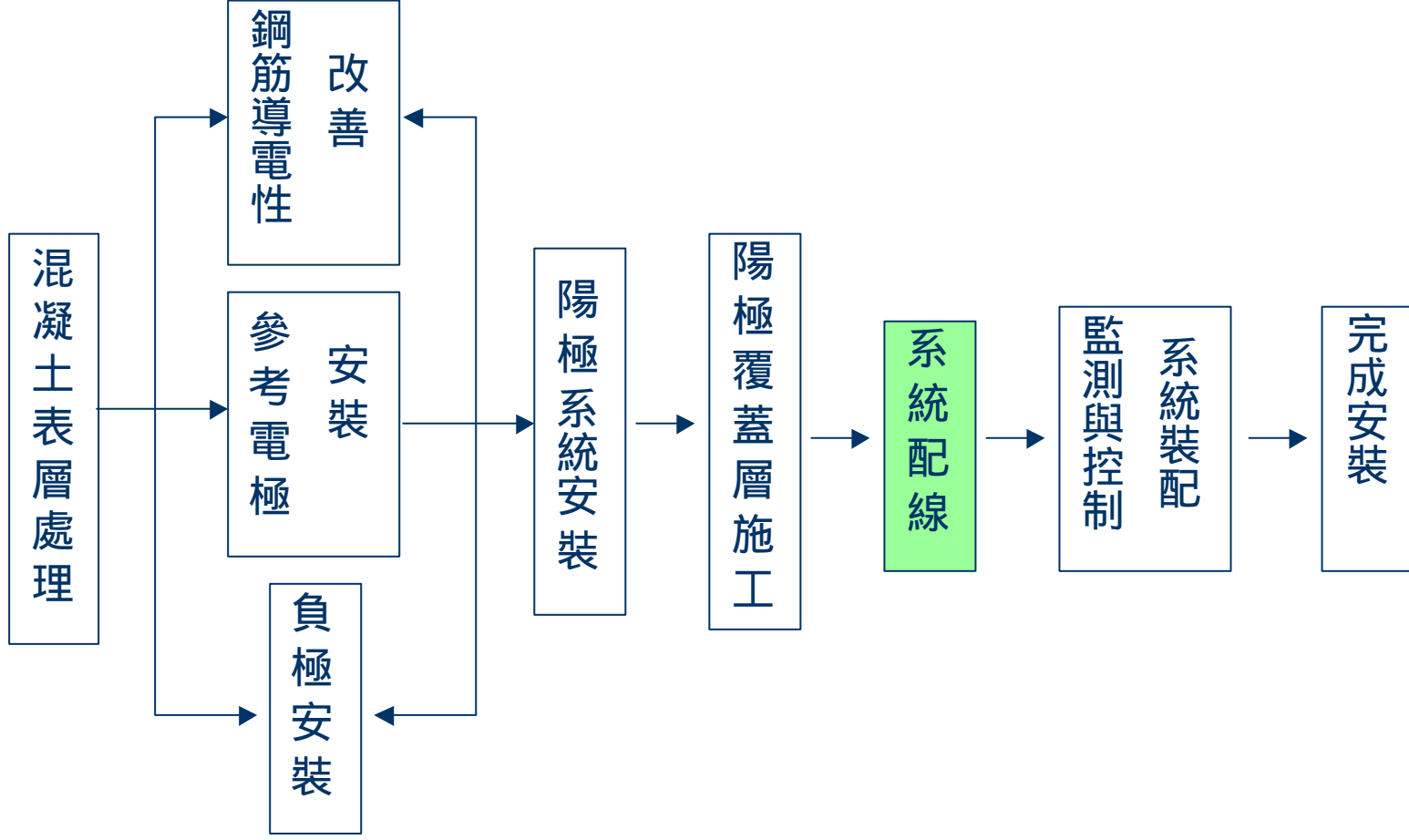
# 陽極覆蓋層施工

混凝土攪拌



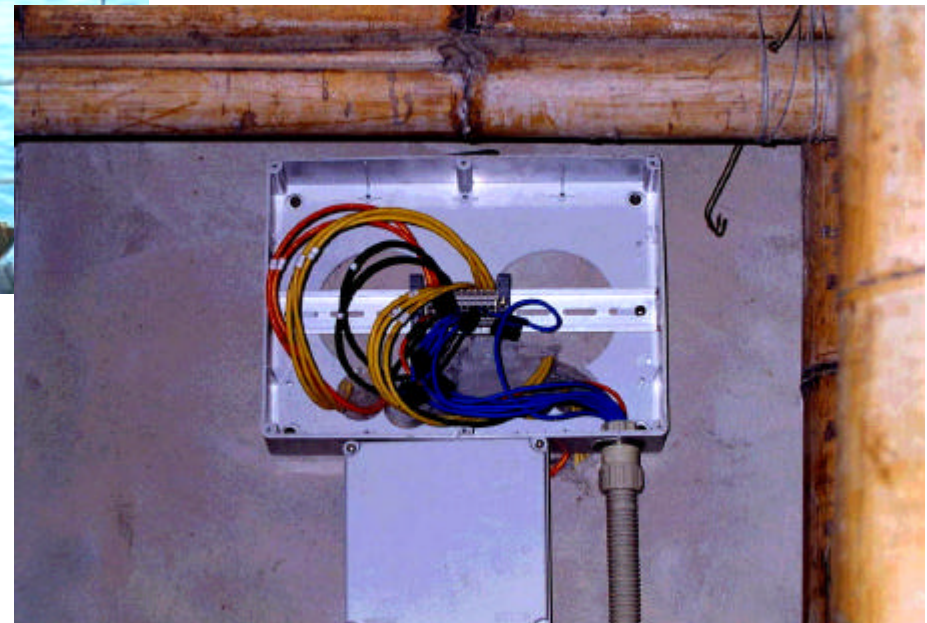
混凝土噴漿覆蓋施工



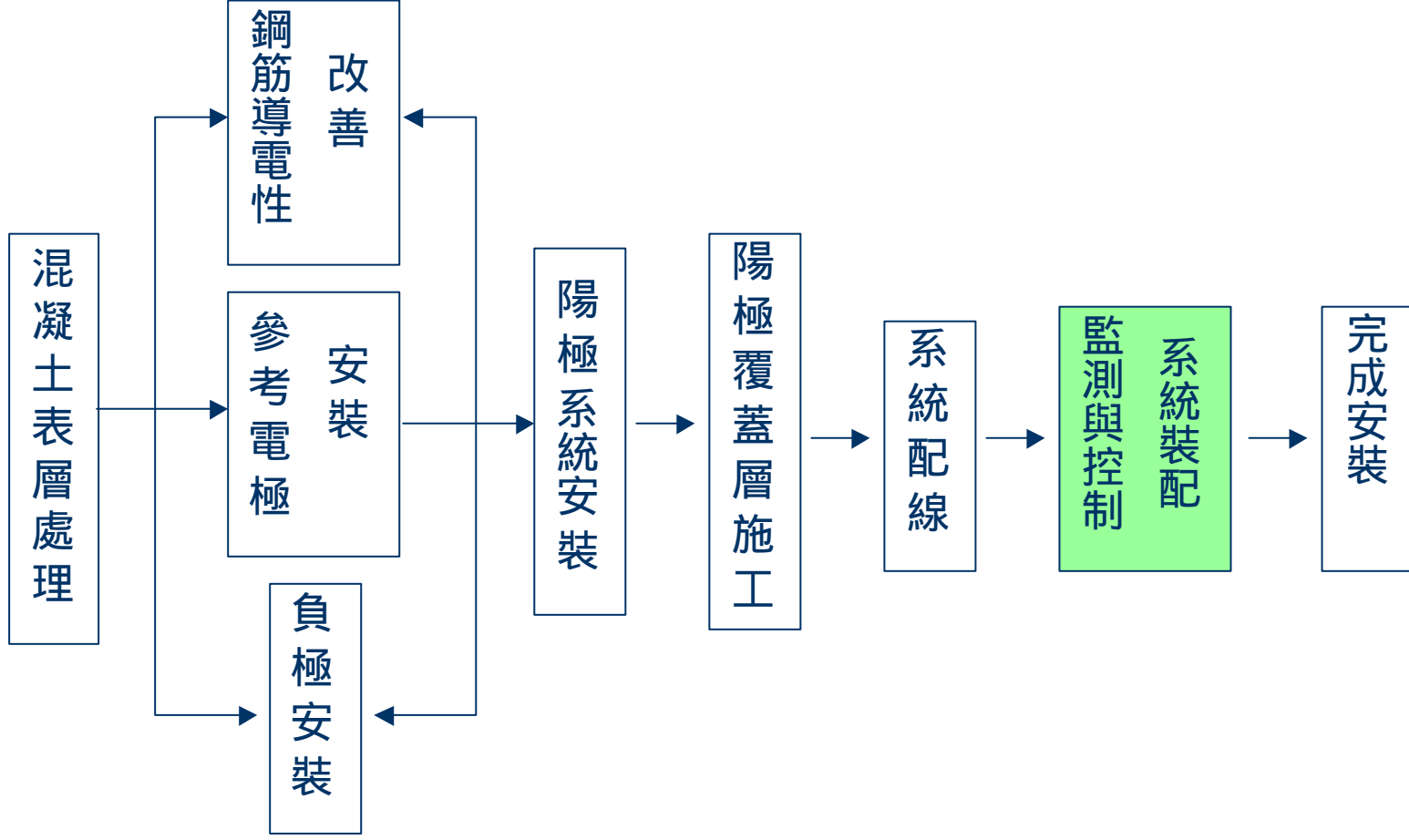




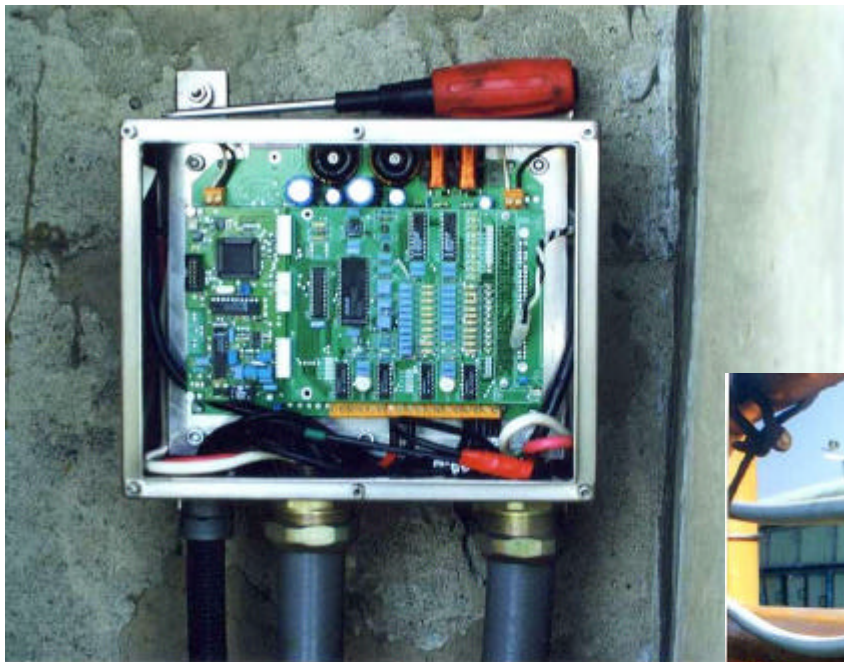
# 系統配線







# 監測與控制系統安裝



# 結語



## 附錄四 審查意見

## 港灣構造物陰極防蝕準則訂定（草案）研究

### 期末報告學者專家審查意見回覆表

審查委員及審查意見	意見回覆
<p>成功大學高振豐教授：</p> <p>1. 報告中犧牲陽極鋅網材料成份除鋅外還添加一些其他元素，但未看到添加銦元素，銦可以增加鋅陽極放電效果，為何不使用含銦的鋅犧牲陽極？</p> <p>2. 鋼筋混凝土陰極防蝕應考慮經濟原則，如材料、施工經費及未來維護費用等。</p> <p>3. 設計案例說明時應增加設計計算。</p>	<p>1. 答：報告中提到的鋅網規範為國內某棧橋碼頭的使用材料，為ASTM B6/B69，此為當時設計者選用的材料。準則中將避免規定陽極材料的成份，因材料的進步日新月異，若在準則中訂定材料規範，日後將有新材料無法使用的困境。</p> <p>2. 答：鋼筋混凝土陰極防蝕的方法選擇應依結構物所在環境，選擇適當工法；由於各工法及使用材料互異，自該考慮材料、施工經費及未來維護費用等。準則中僅針對工法及施工程序作詳細介紹，至於施工、材料費，用因考慮物價變化及廠商報價，準則及研究報告中並未提出，建議業主於設計施工前，召集各材料、施工廠商報價比較。</p> <p>3. 答：報告中棧橋碼頭的設計案例為工業技術研究院工業材料研究所於1997年為台電公司設計，設計計算書於其期末報告中有詳細的敘述。因智慧財產權問題，本學會工作團隊僅針對此案例提出概念設計，至於詳細計算書的取</p>

台灣海洋大學黃然教授：

- |                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 報告中相關混凝土材料特性之敘述，建議修正（如研究報告中 p5、p8、p9）。 | 1. 答：將參考土木工程學會有關混凝土材料特性敘述，於定稿時修正                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| 2. 陽極材料是否可考量鋁鋅合金，其材料選用標準或程序請說明。           | 2. 答：鎂、鋅、鋁等金屬或合金在工程上常被應用為犧牲陽極的材料。其中鎂具有高活性低極化之特性，是以其合金常被應用於土壤或純水等介質比電阻較高的環境中。至於在天然海水裏由於鎂陽極會造成過保護，低效率和較短的使用年限等缺點，使用較少。鋅具有理想適中的腐蝕電位和低極化，高陽極效率等優點，在陰極防設計上可應用到海洋環境中，尤其是利用純鋅來達到降低極化之目的。鋁及其合金亦被發展成為海水環境中犧牲陽極的材料。然純鋁中由於金屬表面薄膜的形成，會使腐蝕電位往正值 (noble) 方向進行，並且產生過度的極化，因此在其合金中添加微量 (<1%) 的鋅、水銀、銻或錫以保持其活性。再者由於鋁本身低密度、高電價的特性，每單位輸出所須的成本相當低，適合陽極材料的選擇，然由於其會鈍化的特性，不適用於土壤和淡水的環境中。鋼筋混凝土陰極防蝕犧牲陽 |

得，應得到台電公司之同意。

	極的採用，根據國外規範，目前多是採用鋅，如鋅網、鋅板、鋅塊、甚至鋅熔射；而鋁鋅合金的技術目前多使用於鋼材上。
3.防蝕準則草案條文，文字部分應可再潤飾修正，俾能符合實際需要。	3.答：準則草案內的文字及章節，將重新修正，於正式報告中提出。
交通部科技顧問室許書王技正：	
1.第二章文獻回顧部分，參考文獻應詳予註明。	1.答：遵照辦理。
2.準則草案 p12, 4.1.3 章節中，應符合 CNS 國家標準的要求”，是否應註明若沒有 CNS 國家標準規範時，如何處理。	2.答：若無 CNS 國家標準規範時，將請參照國外標準，如 ASTM 或 BS Standard 等。
3.準則草案 p 21，5.2 章節中，是否在防蝕工作進行前應確認結構物是否適合修補，像混凝土發生鹼質與粒料反應（AAR）時，修補幾乎是無效的。	3.答：由於陰極保護僅能使鋼筋維持現狀，不再銹蝕，並無法使鋼筋回復到未銹蝕前的尺寸大小；所以在進行陰極防蝕設計前，一定要先確認結構物的安全性，再判斷是否適合修補，然後進行陰極保護。
4.準則草案 p 11, 4.1.1 章節中，必須嚴格遵照製造商的指示和建議使用，建議應加以修正，改為應依合約規定，廠商提出施作方法及建議，經業主同意後使用。	4.答：遵照辦理。
運輸研究所運工組曾志煌組長：	
1.本研究題目範圍僅在鋼筋混凝土構造物，但國內各港口鋼板管樁	1.答：依照合約，本研究計畫僅針對鋼筋混凝土構造物制訂陰極防



<p>腐蝕問題似乎更為嚴重，準則內容是否考慮加入鋼管樁防蝕部分？</p>	<p>蝕準則草案，鋼板管樁腐蝕防蝕問題並未在本計畫內討論。確實，國內各港口鋼板管樁腐蝕問題更為嚴重，建請編擬經費，執行鋼板管樁防蝕準則草案之制訂。</p>
<p>2.鋼管樁海泥帶腐蝕問題應如何處理？</p>	<p>2.答：在此暴露區域內，鋼板管樁等結構物均係埋入於海底土層中，與海水接觸較小，一般而言鋼材之腐蝕速率很小，然而在污染的海域中，如有硫化氫(H<sub>2</sub>S)或海泥中有硫酸還原菌存在的話，則鋼材的腐蝕性會增加，可使用外加電流式陰極防蝕法保護。</p>
<p>3.採用陰極防蝕所需經費如何估算？</p>	<p>3.答：鋼筋混凝土陰極防蝕經費，根據廠商提供，外加電流式陰極保護，新建結構物約 NT\$ 7000 元/m<sup>2</sup>，既有結構物約 NT\$ 9000 元/m<sup>2</sup>；確實經費需視被保護結構物所在環境而定。</p>
<p>4.陰極防蝕在水下施作有否困難？</p>	<p>4.答：目前基隆港鋼板管樁在水下均有犧牲陽極式陰極保護，而鋼筋混凝土結構在水下亦可使用鋅犧牲陽極保護，所以陰極防蝕在水下施作有無難。</p>
<p>5.陰極防蝕在工法何種可推薦使用？</p>	<p>5.答：鋼筋混凝土陰極防蝕的方法選擇應依結構物所在環境，選擇適當工法，報告中已將各環境適用的工法比較，如附表。</p>
<p>運輸研究所港研中心饒正研究員：</p>	



1.在短期內完成此準則草案，請問此準則是否可用？另外請建議本研究後續可進行之研究課題，以加強港灣構造物準則之適用性。	1.答：本學會工作團隊-工業技術研究院工業材料研究，於民國 85 年至 88 年間成功的使用陰極防蝕技術於台電興達電廠與大林電廠棧橋碼頭施作，今該團隊將其現場工作經驗提供予本學會，作為準則草案制訂的參考，因此該準則的適用性應無問題。
2.本準則之標題，是否可改為「港灣鋼筋混凝土構造物陰極防蝕準則草案」較符合本準則之內容。	2.答：將依照許書王技正建議及主席裁示：本研究報告與準則之標題，更改為「港灣構造物陰極防蝕準則草案-鋼筋混凝土篇」。
3.請將期中報告審查意見及辦理情形於期末定稿時附上。	3.答：遵照辦理。
4.圖表可否將英文部份改為中文？ 運輸研究所港研中心陳桂清研究員	4.答：遵照辦理。
1.本研究蒐集到之相關規範，請防蝕學會整理一份提供港研中心參考。	1.答：遵照辦理。
2.期末報告、準則草案等內容，上有多處錯字，或語意不明的地方，請更改	2.答：遵照辦理。
3.棧橋碼頭陰極防蝕設計案例，並未詳細列出工程設計與計算過程，從 p62 或 p66 之表 6.1，並無法瞭解設計過程及整個陰極防蝕系統安裝過程，請補充之。	3.答：報告中棧橋碼頭的設計案例為工業技術研究院工業材料研究所於 1997 年為台電公司設計，設計計算書於其期末報告中有詳細的敘述。因智慧財產權問題，本學會工作團隊僅針對此案例提出概念設計，至於計算書的取得，應得到台電公司的同意。陰極防

<p>高雄港務局楊義忠組長(書面資料)</p> <p>1. 準則草案表 3.1 內水下帶之鋅(鋁、鎂)塊犧牲陽極式防蝕系統，實際應用是否適用？</p>	<p>蝕系統安裝過程，在本學會製作的 VCD 中將有詳細介紹。</p> <p>1. 答：除鎂陽極不適用外，國外施工方式係利用導線將鋅或鋁陽極與混凝土內部鋼筋相連接，再將混凝土進行修補。</p>
-----------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------

附表

<div> <div>陰極防蝕系統</div> <div>暴露環境</div> </div>		大 氣 帶	潮 間 帶 (含飛沫帶)	水下帶
外加電流式	導電性塗料	○	△	△
	導電性橡膠	○	○	△
	鈦網陽極-外覆混凝土	⊙	○	○
	鈦網陽極-外覆保護夾層	○	⊙	⊙
犧牲陽極式	鋅熔射方式	⊙	△	△
	鋅網-外覆保護夾層方式	○	⊙	⊙
	鋅板導電凝膠	⊙	△	△

⊙防蝕效果理想                      ○防蝕效果良好                      △ 防蝕效果不佳

## 附錄五 港灣構造物陰極防蝕準則（草案）

# 第一章 港灣構造物陰極防蝕準則總則

## 1.1 適用範圍

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

## 1.2 內容概要

本準則提供執行鋼筋混凝土結構陰極防蝕工程所需之各項要求及必要遵守規定。

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

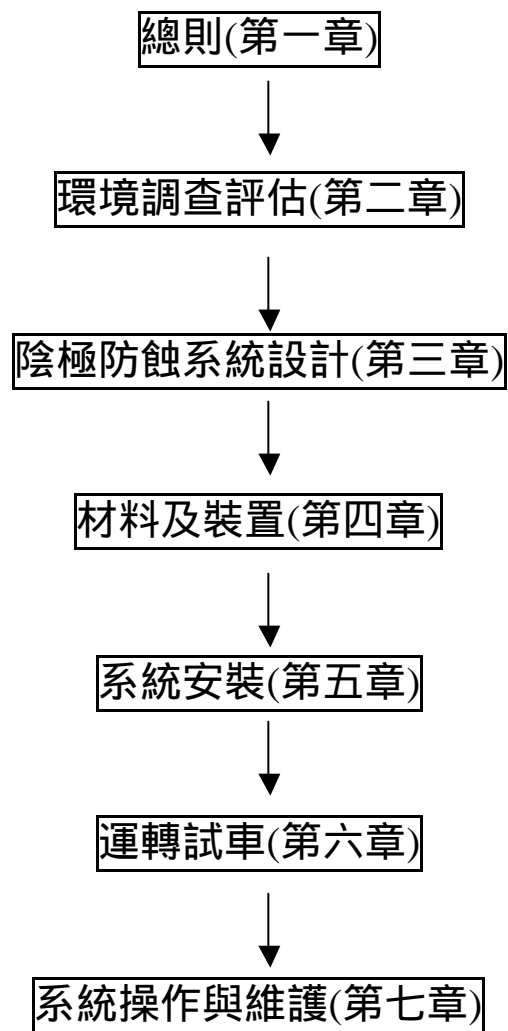


圖 1.1、鋼筋混凝土結構之陰極防蝕工程執行流程圖

### 1.3 參考規範

本準則所參考之相關規範及標準包括

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

## 第二章 陰極防蝕設計前之調查評估

### 2.1 前言

鋼筋混凝土結構物若使用陰極防蝕技術作為保固方法，應進行下列調查。

### 2.2 結構物背景資料收集

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

### 2.3 目視檢測

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

### 2.4 保護層測量

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

### 2.5 剝落層位置調查

需進行陰極保護的區域，應檢查混凝土保護層剝落的情況。

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

## 2.6 鋼筋電連通性測試

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

解說：測試所需的次數與構造物的大小和複雜性有關，且在現場測試前很難決定。建議每  $10\text{ m}^2$  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  $1\text{ ohm}$ 。

## 2.7 腐蝕電位量測

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

解說：一般而言，鋼筋腐蝕電位量測時使用的參考電極為銀/氯化



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

## 2.8 混凝土電阻係數

混凝土電阻係數量測是利用 Wenner 四極法於現場量測。

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

## 2.9 報告

上述所有測試結果均應詳細記錄，並轉送工程設計師參考。

### 第三章 陰極防蝕系統設計需求

#### 3.1 陰極防蝕系統選擇

系統設計時應依結構物所處環境，選擇適當之陰極防蝕系統。

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

表 3.1、鋼筋混凝土陰極防蝕系統選擇

環境	環境分析	陰極防蝕系統選擇
大氣帶	結構物完全曝露於大氣中之各種介質，如氣體、日照...等；結構物多處於較乾燥的環境中	1. 鈦網陽極-外覆混凝土 2. 鋅熔射 3. 鋅板導電凝膠
潮間帶	範圍不僅包含高、低潮位間的潮汐帶，更包括平均高潮位以上至海面大氣帶下端之飛沫帶區域；結構物受乾濕循環交替作用	1. 鈦網陽極-外覆保護夾層 2. 鋅網-外覆保護夾層方式
水下帶	混凝土結構物長期浸泡在海水	1. 鋅、鋁塊犧牲陽極式防蝕系統 1. 鈦網陽極-外覆保護夾層 2. 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「 $100\text{ mV}$  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  $5\text{ mA/m}^2$ ，而針對地上結構物則為  $10\sim 20\text{ mA/m}^2$ 。「 $100\text{ mV}$  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  $100\text{ mV}$  以上(即斷電 4 至 24 小時鋼筋電位去極化量  $>100\text{ mV}$ )，方可確定陰極防蝕已達設計預期效果(參考 NACE Standard RP290-90)。但某些陰極防蝕系統之  $100\text{ mV}$  電位衰減量必須數天甚至數月始可達到，如已受防蝕保護達數月之久(或呈水飽和狀態)之結構物，電位衰減測量期間應超過 24 小時以上。

### 3.3 電流分佈原則

外加電流式陰極防蝕系統電流分佈，依下列準則以確保電流分佈均勻。

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

## 2. 陽極應裝設如下

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

解說：陽極材料安裝時需與任何金屬元件保持至少 15 mm 以上的距離。而陽極區域的劃分是以混凝土面積 1000 m<sup>2</sup> 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  $40 \text{ N/mm}^2$  左右。

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

#### 4.2 陽極材料

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

解說：

### 1. 鈦網陽極

鈦陽極基材為 Titanium, Grade 1 per ASTM B265，外覆貴重金屬或其他金屬氧化物(Mixed Metal Oxide, MMO)，物理性質具延展性。其製成形狀有管狀、網狀、或條狀，對鋼筋混凝土而言，使用之陽極為網狀(鈦網)或條狀(鈦條)。鈦網網目在 30 x 70 mm 至 100 x 200 mm 之間，且根據實驗室的加速試驗，鈦網表面電流密度為 200 mA/m<sup>2</sup> 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<sup>2</sup> 以下。再者，鈦網的型式與尺寸會影響鈦網陽極提供電流密度的大小，其值約在 10-50 mA/m<sup>2</sup> 之間。鈦陽極的安裝是以塑膠釘固定陽極於混凝土表面，且為了防止電流供應不均，鈦陽極上方需噴塗 10-15 mm 以上的保護層(混凝土)。

### 2. 鋅網

使用鋅網材料成份為 ASTM B6/B69。

### 3. 鋅熔射

鋅熔射所使用的陽極材料為純鋅，依 ASTM B8331 或 ANSI/AWS 5.33 之規定，鋅成分最少為 99.5%，鋅線之線徑最少為 4.8 mm。噴塗厚度依照 FDOT 建議為 0.38~0.5 mm，英國 Concrete Society 建議為 0.2 mm。



#### 4. 其他陽極材料系統

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

##### 4.3 交流電源

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

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

##### 4.4 整流器

###### 4.4.1 概要

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

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

#### 4.4.2 電氣箱

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

#### 4.4.3 控制和連接

每一台整流器的輸出應包括下列元件：

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

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

#### 4.4.4 電子元件

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

#### 4.4.5 整流器檢測

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

### 4.5 導線

#### 4.5.1 概要

所有導線應為銅導體，蕊線以絕緣包覆，並以顏色和編號區別。

#### 4.5.2 DC 導線

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

解說：導線尺寸通常介於  $2.5\sim 16\text{ mm}^2$ ，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  $2.5\text{ mm}^2$ ，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。

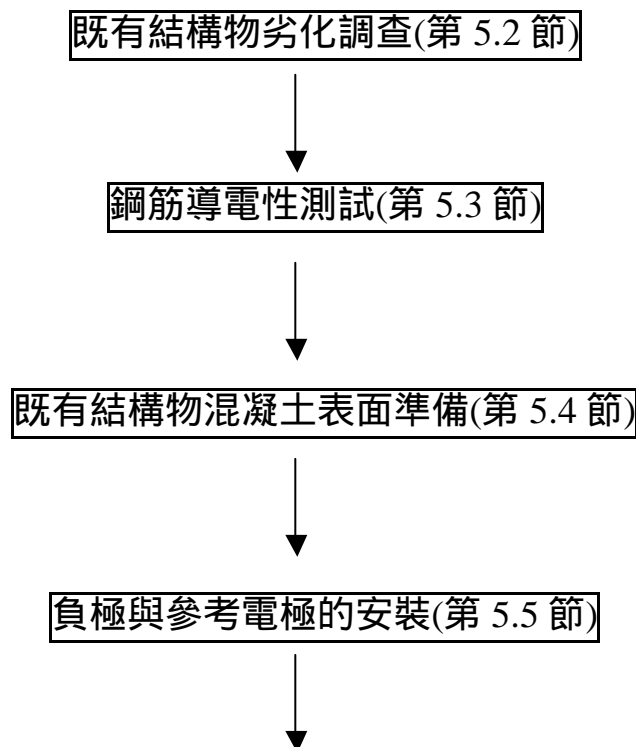
解說：攜帶式參考電極通常採用銀/氯化銀參考電極，但其他類型  
之參考電極如銅/硫酸銅參考電極亦可使用。

## 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。



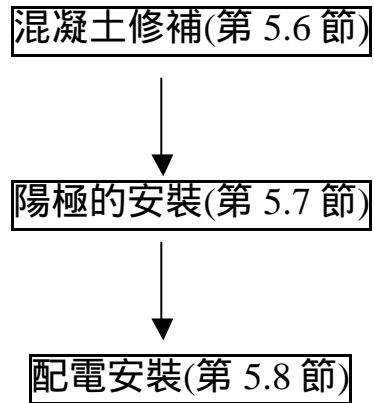


圖 5.1、既有結構物之系統安裝工作流程

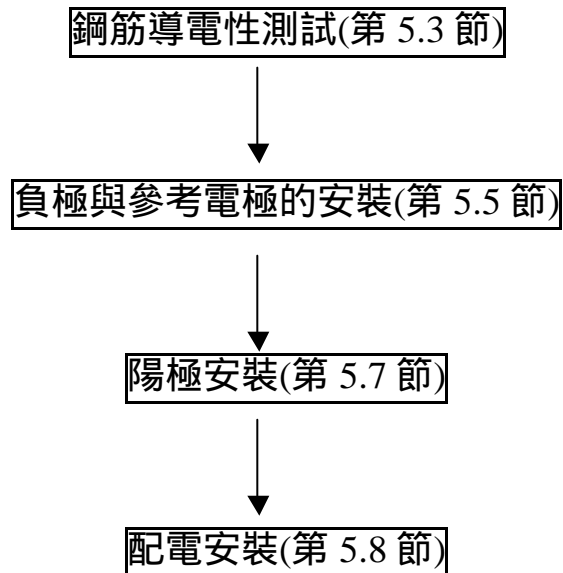


圖 5.2、新建結構物之系統安裝工作流程

## 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。熔射層厚度量測可依 ASTM E367 以磁性測定法測量。檢測時應 50 平方公尺取 25 點作厚度量測，每點量測 5 次，取其平均值判定是否合乎標準。

### 3. 鈦網陽極

鈦網陽極安裝時必須清除混凝土表面殘餘汙漬或雜物，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。