

93-61-794

MOTC-IOT-92-H1BB02-1

港灣構造物陰極防蝕準則訂定研究



交通部運輸研究所
中華民國防蝕工程學會
合作辦理

中華民國九十三年四月

93-61-794

MOTC-IOT-92-H1BB02-1

港灣構造物陰極防蝕準則訂定研究

著 者：陳桂清、饒 正、柯正龍、羅俊雄、翁榮洲
王瑞坤、張英傑、劉益雄、江淑慈

交通部運輸研究所
中華民國防蝕工程學會
合作辦理

中華民國九十三年四月

港 灣 構 造 物 陰 極 防 蝕 準 則 訂 定 研 究

著 者：陳桂清、饒 正、柯正龍、羅俊雄、翁榮洲、王瑞坤、張英傑
劉益雄、江淑慈

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/chinese/lib/lib.htm

電 話：(02)23496789

出版年月：中華民國九十三年四月

印 刷 者：

版(刷)次冊數：初版一刷 120 冊

本書同時登載於交通部運輸研究所網站

定 價： 元

展 售 處：

交通部運輸研究所運輸資訊組•電話：(02)23496880

三民書局重南店：台北市重慶南路一段 61 號 4 樓•電話：(02)23617511

三民書局復北店：台北市復興北路 386 號 4 樓•電話：(02)25006600

國家書坊台視總店：台北市八德路三段 10 號 B1•電話：(02)25787542

五南文化廣場：台中市中山路 6 號•電話：(04)22260330

新進圖書廣場：彰化市中正路二段 5 號•電話：(04)7252792

青年書局：高雄市青年一路 141 號 3 樓•電話：(07)3324910

港灣構造物陰極防蝕準則訂定研究

交通部運輸研究所

GPN : 1009301422

定價 元

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研究			
國際標準書號（或叢刊號）	政府出版品統一編號 1009301422	運輸研究所出版品編號 93-61-794	計畫編號 92-H1BB02-1
本所主辦單位：港研中心 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 聯絡電話：04-26587118 傳真號碼：04-26564418	合作研究單位：中華民國防蝕工程學會 計畫主持人：羅俊雄 研究人員：羅俊雄、翁榮洲、王瑞坤、張英傑、劉益雄、江淑慈 地址：台北市基隆路一段 147 巷 14 號 1F 聯絡電話：(02) 2756-7098 傳真號碼：(02) 8787-8784		研究期間 自 92 年 4 月 至 92 年 10 月
關鍵詞：港灣鋼構造物、陰極防蝕、準則手冊			
摘要： 港灣鋼構造物常年浸漬於海水或埋在海泥中，極易發生銹蝕破壞現象，而陰極防蝕技術應用於港灣構造物上，經歐、美、日等國多年之研究及使用經驗，業已被肯定為防蝕效能極佳之工法。本研究目的在研訂港灣鋼構造物的陰極防蝕準則草案，並修訂「防蝕準則(草案)-R.C.結構物部份」之內容，以供應用依據。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，召開專家座談會研議適合國內需求條件，以利研定港灣鋼構造物陰極防蝕準則草案。			
出版日期	頁數	定價	本出版品取得方式
93 年 4 月	174		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所免費贈閱；私人及私營機關團體可按定價價購。
機密等級： ☐ 限閱 ☐ 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） ☒ 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: Study of Cathodic Protection for Harbor Steel Structures			
ISBN(OR ISSN)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1009301422	IOT SERIAL NUMBER 93-61-794	PROJECT NUMBER 92-H1BB02-1
DIVISION: Harbor & Marine Technology Center DIVISION DIRECTOR: Yung-Fang Chiu PRINCIPAL INVESTIGATOR: Chen Kuei-Ching PROJECT STAFF: Chen Kuei-Ching, Rau-cheng, Ko Jeng-Long PHONE: (04) 04-26587118 FAX:			PROJECT PERIOD FROM 04/2003 TO 10/2003
RESEARCH AGENCY: The Corrosion Engineering Association of the Republic of China PRINCIPAL INVESTIGATOR: Jiunn-shyong Luo PROJECT STAFF: Jiunn-shyong Luo, Jung-Chou Oung, Rey-Kuen Wang, Yin-Jang Chang, Yi-shyong Liu, Shu-tzu Chiang ADDRESS: 14, 1F, Lane 147, Keelung Rd., Sec. 1, Taipei, Taiwan, R.O.C. PHONE: (02) 2756-7098			
KEY WORDS: Harbour Steel Structures , Cathodic protection, Guideline			
ABSTRACT: Corrosion of harbor steel structures in marine environment is apparent. Cathodic protection has been confirmed to be the most efficient method to prevent steel corrosion in submerged zone. Therefore, the present study is focused on developing a guideline for the use of the cathodic protection technique at harbor steel structures in marine environments. The themes included 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 stipulated through full discussion at conferences. It is highly expected that the operation manual would be useful to harbor authorities in Taiwan.			
DATE OF PUBLICATION April 2004	NUMBER OF PAGES 174	PRICE	CLASSIFICATION ☐ SECRET ☐ CONFIDENTIAL ☒ UNCLASSIFIED
The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.			

港灣構造物陰極防蝕準則訂定研究

目 錄

中文摘要.....	I
英文摘要.....	II
第一章 前言.....	1
第二章 文獻回顧.....	3
2.1 海洋環境	3
2.2 海水的腐蝕特性	4
2.2.1 碳鋼在海水中的腐蝕行為	4
2.2.2 海水中影響碳鋼腐蝕的因子	5
2.3 鋼構造物在海洋環境中的防蝕方法.....	8
2.4 陰極防蝕	13
2.4.1 陰極防蝕原理	13
2.4.2 陰極防蝕方法	13
2.4.3 鈣質沉積對陰極保護之影響.....	14
第三章 陰極防蝕規範文獻整理	23
第四章 鋼板(管)樁碼頭陰極防蝕工程案例.....	31
第五章 港灣鋼構造物陰極防蝕	41
5.1 防蝕系統選擇	41
5.2 犧牲陽極陰極保護設計計算.....	42
5.2.1 保護面積計算	42
5.2.2 防蝕電流計算	43
5.2.3 犧牲陽極發生電流量計算	46
5.2.4 犧牲陽極用量計算	48
5.2.5 陽極壽命計算	49
5.2.6 犧牲陽極配置考量	49

5.3	外加電流陰極保護設計計算.....	50
5.4	陰極防蝕系統使用材料及設備需求.....	51
5.4.1	犧牲陽極材料	51
5.4.2	外加電流式陽極材料	56
5.4.3	參考電極	56
5.4.4	整流器	57
5.4.5	導線	57
5.4.6	數位伏特計	57
第六章	陰極防蝕安裝標準程序	67
6.1	犧牲陽極式陰極防蝕安裝	67
6.2	外加電流式陰極防蝕安裝	68
第七章	鋼板樁碼頭陰極防蝕設計案例	75
第八章	陰極防蝕驗收標準程序	79
8.1	陰極防蝕保護標準	79
8.2	保護效果檢測方法	81
第九章	陰極防蝕操作、系統維護管理	85
9.1	陰極防蝕系統操作.....	85
9.2	陰極防蝕系統維護管理	85
第十章	「防蝕準則(草案)-R.C.結構物部份」-蘇澳港 13 號碼頭 鋅熔射犧牲陽極式陰極防蝕施工案例.....	91
10.1	工程位置	91
10.2	鋅熔射犧牲陽極式陰極保護設計	91
10.3	電極安裝	93
10.4	施工步驟	93
10.5	工程評估	94
10.5.1	工程位址目視檢查.....	94
10.5.2	鋼筋之電連通與鋼筋電位.....	95

10.5.3 陰極防蝕效果評估.....	95
10.6 評估結果.....	98
第十一章 「防蝕準則(草案)-R.C.結構物部份」-蘇澳港 13 號碼	
頭外加電流式陰極防蝕施工案例.....	109
11.1 工程位置	109
11.2 陰極保護設計	109
11.3 施工步驟	110
11.4 評估結果	111
參考文獻.....	113
附錄一、第一次專家座談會會議紀錄	
附錄二、第二次專家座談會會議紀錄	
附錄三、期中報告審查意見及回覆	
附錄四、期末報告審查意見及回覆	

第一章 前言

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

由於港灣構造物使用的材料主要為鋼鐵材料(如碳鋼鋼板(管)樁)、鋼筋混凝土(reinforced concrete, RC)及其他相關材料，常年於海洋環境的侵襲下，鋼板(管)樁會產生腐蝕現象，造成構材斷面縮小、性質改變、

整體結構變化，以致於最終強度損失，無法承擔外力作用；而鋼筋混凝土構造物，因海水中或大氣中的氯離子入侵，促使鋼筋銹蝕劣化，造成混凝土膨脹裂開，表面剝落，強度降低，甚至破壞整個結構。因此，瞭解鋼板(管)樁、鋼筋混凝土構造物在海洋環境中的腐蝕行為並選擇有效的防蝕方法，以確保構造物之耐久與安全，有其重要與必要性。

陰極防蝕技術應用於港灣構造物上，經歐、美、日等國多年之研究及使用經驗，業已被肯定為防蝕效能極佳之工法。1973 年美國聯邦州公路運輸署(FHWA)，公開宣佈陰極防蝕法為唯一有效解決鋼筋混凝土構造物(橋樑)腐蝕的方法；而針對鋼構造物在海水浸漬的環境中，陰極防蝕技術更公認為有效的防蝕工法，且國外亦有百年使用的經驗。近十年來，國內雖然已開始進行研究與施作，但尚未訂定相關之規範，設計時大都引用國外各種不同規範，然因其適用條件存在差異性，亟需研擬一套符合國內環境需求之港灣構造物陰極防蝕準則或規範，以供日後現有或新建工程陰極防蝕設計、施工及維修時之參考依據。有鑑於此，交通部運輸研究所於民國 90 年完成「港灣構造物陰極防蝕準則草案訂定（鋼筋混凝土部份）」，但鋼構造物部份仍未制訂。為求陰極防蝕規範的完整性，交通部運輸研究所本年度乃規劃「港灣構造物陰極防蝕準則訂定研究」，擬針對港灣鋼構造物之陰極防蝕技術，彙整學者專家、業界與港務局等單位之經驗，制訂一適合國內環境需求的港灣鋼構造物陰極防蝕準則，並對已完成之鋼筋混凝土部份的草案內容，進行補充修正，以利日後港灣構造物之維護、管理或新建工程之防蝕設計依據。

第二章 文獻回顧

2.1 海洋環境

根據 Boyd etc.所著 Corrosion of Metals in Marine Environment^[1]一文指出，海洋結構物的腐蝕速率依構造物接觸(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，並將鋼材的腐蝕速率與曝露環境之關係，概述如下：

1. 大氣帶(Atmospheric Zone)：

此區域範圍內構造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(管)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，而位於平均低潮位下約 1m 處(亦即水下帶部份)，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. 水中帶(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)樁等構造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^[2]，碳鋼在海洋環境中腐蝕速率與曝露環境之關係如圖 2-1 所示；明顯可見，碳鋼在飛沫帶的腐蝕速率最大，平均低潮位下約 1m 處水下帶部份次之，而潮汐帶的腐蝕速率較低；此外，使用陰極保護技術，碳鋼在平均低潮位下，即水下帶與海泥帶的腐蝕速率均趨近於零，顯示陰極防蝕工法在港灣鋼構造物水下防蝕的應用，有不容置疑之成效。

2.2 海水的腐蝕特性

2.2.1 碳鋼在海水中的腐蝕行為

碳鋼在海水中的腐蝕行為為一電化學反應。由於鋼鐵組織的不均勻性、加工殘留應力與表面狀態的不同，浸漬於海水時，受到海水中 pH 值、氯離子含量、溶氧濃度、溫度、流速等因素之影響，鋼鐵表面會產生許多微小的腐蝕電池(如圖 2-2 所示)；在這些微小腐蝕電池中，

相對電位低者為陽極，進行金屬(鋼鐵)的溶解反應，而相對電位高者為陰極，進行氧的還原反應，基本反應過程如下：

陽極反應： $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$

陰極反應： $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$

由於陽極區與陰極區同處於一鋼鐵表面，又有海水介質存在，電子流流通的結果將會促使陽極金屬的溶解反應，造成碳鋼腐蝕。

2.2.2 海水中影響碳鋼腐蝕的因子

與一般單純的含鹽水溶液不同，天然海水中含有生物、懸浮泥沙、溶解氣體及許多有機與無機物質，彼此間相互影響，以致形成一複雜的水溶液。對於碳鋼鋼材的腐蝕，主要影響因素如下：

1. 含鹽量(氯離子濃度)

海水為一強電解質，溶解了以氯化物為主的大量鹽類，氯離子能破壞鋼鐵表面的鈍態膜或阻止鈍態膜的產生，因此對於碳鋼及一般二價金屬(ferrous metals)而言，海水環境中金屬無法產生鈍化現象，腐蝕容易發生，且由於海水的含鹽量與海水中的溶氧、pH 值、溫度、水深等有相互關係，以致鋼材腐蝕速率有所差異。例如當 NaCl 濃度在 10 g/L 以內時，水溶液的溶氧量將會維持一定值，且鋼鐵的腐蝕速率會隨 NaCl 含量的增加而增加，但當 NaCl 濃度大於 10 g/L 時，溶氧量與鐵的腐蝕速率則會隨 NaCl 濃度的增加而遞減^[3]。與海水相較，在河海交會處的水質腐蝕性較強，原因是因海水中的碳酸鹽為飽和狀態，但當海水稀釋時，水溶液中的碳酸鹽無法與海水中的鈣離子沉積形成碳酸鈣保護層，以致水溶液腐蝕性較強。

2. 導電度

在導電度高的水溶液裏，腐蝕電池中的陽極與陰極作用可藉水溶液導電的特性至較遠的距離發生反應，造成金屬表面大面積的腐蝕。

3. 溶氧量

一般大氣環境下海水中氧含量約為 6~11 ppm，而鋼鐵在海水中的腐蝕主要是受氧去極化的陰極反應所控制，其原因為鋼鐵腐蝕電化學反應過程中，氧在陰極半電池反應時與水作用產生 OH^- ， OH^- 再與陽極半電池反應產生之 Fe^{2+} 作用，形成 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 腐蝕產物；由於氧擴散至陰極表面的速度控制了整個腐蝕過程中的反應速率，因此海水的溶氧量增加，鋼鐵的腐蝕速率增加。

4. 流速

海水的流動會增加氧的擴散或造成鋼鐵表面銹層剝落，促使更多的氧擴散至陰極表面，加速鋼材腐蝕。換句話說，鋼鐵的腐蝕速率隨海水流速的增加而增加，但在某一流速以上時，腐蝕速率將會趨於一定值。此外，當海流衝擊至金屬表面產生機械性的破壞時亦會使金屬磨耗，產生特殊的腐蝕型式(如沖蝕或渦凹腐蝕等)。

5. 溫度

溫度上升會加速電化學反應，因此，海水溫度愈高，鋼鐵的腐蝕速率愈大；溫度季節性的變化將會使金屬腐蝕速率有所差異。在開放系統中，海水加熱至 80 °C 時，鋼鐵的腐蝕速率會隨溫度的升高而增加，最後達到一最大值；但當溫度繼續上升，海水中的溶氧量降低，且保護性的碳酸鈣保護層產生，會造成腐蝕速率下降。然而在密閉系統中，鋼鐵的腐蝕速率則將隨溫度的上升而增加。

6. pH值

海水的pH值是表示海水中多種離子與進入海水之大氣二氧化碳(CO₂)達成平衡時的數值，隨海水深度、溫度、溶氧量等因素而有所差異，會影響氫氧化鎂與碳酸鈣沉積的生成。一般而言，壓力增加則pH值降低，因此在深海地方，鈣質沉積(碳酸鈣保護層)較少在鋼鐵表面生成。

7. 海洋生物附著

海洋中的植物(如海藻等)生長茂密時，海水中的CO₂減少，溶氧量增加；且生物的新陳代謝物與死後殘骸的分解將會產生酸性物質和H₂S，附著海生物的存在增加了細菌微生物(如硫酸還原菌)生長的機率；這些現象均會加速碳鋼在海水中的腐蝕。此外，硬殼(hard-shell)海生物在金屬(或銹層)表面的附著似乎可以當作一個擴散障礙(diffusion barrier)，藉以阻止海水中的溶氧或氯離子進入金屬表面，減緩金屬腐蝕；但以微觀(micro)的觀點來看，海生物在金屬表面的附著亦可能造成氧差或濃度差異電池，促成局部腐蝕。

8. 應力、腐蝕疲勞

對海洋結構之金屬構件而言，海水經常性的沖擊而產生循環性的應力將會產生腐蝕疲勞或加速金屬腐蝕；在某些情形下，張力(tensile stress)接近降伏強度(yield strength)時更易加速金屬破壞。

9. 污染程度

在被污染的海水中，硫化物(sulfides)是經常存在的物質，也是加速碳鋼腐蝕的原因，但若污染的海水中含氧量降低，則碳鋼腐蝕速率也降低。

10. 懸浮泥沙

在流動的海水中，懸浮泥沙會對金屬產生機械性的破壞而增加腐蝕機會。

2.3 鋼構造物在海洋環境中的防蝕方法

防蝕工程的成效，除適當材質之選用與材料規範外，尚須正確的施工程序與監造檢測技術，配合定期與不定期的維護補修程序，更可有效延長結構物的使用年限。防蝕施工可分為先工法與後工法兩種。先工法為針對港灣構造物，將部份組件於岸上或工廠內施以防蝕被覆後再於現場組裝，之後，在現場進行修護補強；而後工法則為結構工程於現場構建完成後再予防蝕施工，其優缺點比較如下：

	優 點	缺 點
先 工 法	1. 施工條件易控制 2. 價格便宜	1. 現場安裝後，易造成大面積破損 2. 施工周延性不足，責任歸屬不明 3. 修補造成預期耐用年限折損 4. 修補困難，工程品質不易控制
後 工 法	1. 整體施工周延完整 2. 施工品質與責任歸屬一致 3. 相對於先工法，期望耐用年限，較易估算 4. 修補容易	1. 工程難度高、單價高 2. 水上與水中作業為專門性之技術，廠商施工實績與作業專職技術人力應納入考量

今依鋼構造物在海洋環境曝露的區域，所使用的防蝕方法概述如下：

1. 海洋大氣帶

鋼鐵結構在海洋大氣帶的防蝕多採用有機重塗塗料，如油性塗

料、氯化橡膠、環氧瀝青、乙烯塗料等，特別是在無機鋅底漆上再刷塗厚膜型的塗料；此外，使用常溫金屬鋁熔射、鋅熔射或鋅鋁熔射後再加上表面塗裝的防蝕方式，亦常為日本及歐美國家使用。

2. 飛沫帶

由於碳鋼在飛沫帶的腐蝕速率最大，國內外採取的防蝕方法為 1) 塗料，如無機鋅底漆+ Coating coal-Tar Epoxy 面漆，2) 有機被覆，如多元酯樹脂 PE、聚氨酯 PU 或環氧樹脂 Epoxy，3) 無機被覆，如混凝土包覆、FRP 包覆或中性石油脂防蝕帶包覆，4) 金屬包覆法，如不銹鋼包覆或低合金抗蝕鋼鐵(如 monel)。對於塗料，一般與海洋大氣帶所使用的塗料相同，但在此環境中耐久性較差且使用週期短；而有機被覆層則具有耐衝擊性且易於修補的特性；混凝土包覆其厚度增加則重量增加，一旦龜裂，修補困難；monel 金屬包覆的防蝕效果良好，但價格昂貴；至於陰極防蝕法，根據挪威 Det Norske Veritas, DNV 實驗室，挪威石油公司(The Norwegian Petroleum Directorate)在北海鑽油平台的防蝕經驗^[4]，鋼樁在飛沫帶與潮汐帶的防蝕方法若僅採用陰極防蝕系統，則會因鋼樁表面歇性乾燥的結果，造成陰極保護在潮間帶無顯著的防蝕功效。今針對飛沫帶鋼鐵結構之防蝕材料、工法，將美國腐蝕工程師學會(NACE International)之技術報告#1G194^[2]，摘錄如下：

(1) 圍堰塗裝(Cofferdam and Coat, C & C)

此系統於現場施工時，需利用鐵製的圍堰將被塗的結構物圍起，並將圍堰與結構物間的海水抽乾，乾燥後，將傳統飛沫帶新結構物使用之有機重塗塗料(high-build organic, heavy-duty coating systems，如無機鋅粉底漆+環氧樹脂中層漆+壓克力或 PU 面漆)塗佈於結構物表面。根據 NACE Standard

RP0176-94^[5]，傳統大氣、飛沫帶使用的有機重塗塗料如表 2-1 所示。但因施工時需要圍堰措施，故此系統僅能供鋼管樁之直線區域(straight tubular sections)施工。

(2) 水中硬化環氧樹脂(Underwater-Curing Epoxy, UCE)

水中硬化環氧樹脂為 100%固化的樹脂，可在潮濕的環境或水中施工，並於空氣或水下硬化。一般而言，此類環氧樹脂於潮間帶使用時，其乾膜厚度應在 0.5 至 2.0 mm 之間。該塗料技術發展至今已 20 多年，其有相當好的抗蝕性與抗陰極剝離(cathodic disbondment resistance)能力，且當樹脂硬化後，可承受波高 1m 的衝擊。再者，因其有可在水下施工的特性，所以被塗裝之鋼板(管)樁無幾何形狀的限制，即任何型式之鋼板(管)樁，均可用此水中硬化環氧樹脂施工。

(3) 水中硬化環氧複合樹脂(Underwater-Curing Epoxy-Based Composite, UCEC, Systems)

水中硬化環氧複合樹脂與水中硬化環氧樹脂相類似，僅於樹脂中添加玻璃纖維(fiberglass)，以增加塗料的強度與穩定性。其有相當好的抗蝕性與機械特性，但在波高 0.6 m 時就無法施工。使用對象僅為鋼管樁(tubular sections)，無法在直線型(flat plate)或 Z 型的鋼樁上使用。

(4) 石油脂防蝕帶包覆(Petrolatum/Wax-Based Composite, PBC, System)

防蝕帶係以耐腐蝕合成纖維為襯材，兩面塗覆中性石油脂防蝕劑並被覆一層高密度聚乙烯膠膜(high density polyethylene film)；防蝕劑中添加惰性劑(inert fillers)、祛水劑(water displacing additives)等成份，以增進適合水下使用與抑制銹蝕

之功能。但其機械性能不佳，若暴露於大氣或海水中，可能受外界環境之機械衝擊(如波浪衝擊)，須另加一機械夾層補強，夾層材質如 PE、PVC、或 FRP 等。一般而言，防蝕帶包覆系統僅能在波高 0.6 m 下施工，施工完成後可抵抗波高 1m 的衝擊，但其保護對象僅限於鋼管樁之直線部份(straight tubular sections)。

(5) 矽膏防蝕帶包覆 (Silicone Gel-Based Composite, SGBC, System)

矽膏防蝕帶包覆系統可分兩部份：矽膏內襯與 urethane 外襯。矽膏內襯的主要功用為在鋼鐵表面形成防水(water-repelling barrier)機制，而 urethane 外襯則提供機械性的保護，避免矽膏內襯受到波浪作用或其他機械原因而破壞。與石油脂防蝕帶包覆系統相似，矽膏防蝕帶包覆系統僅能在波高 0.6 m 下施工，施工完成後可抵抗波高 1m 的衝擊；其保護對象仍限於鋼管樁，無法使用於直線型或 Z 型的鋼板樁上。

(6) 混凝土複合包覆(Concrete Composite System)

此系統乃是利用 PE 或 FRP 作為外部夾層，而夾層與被保護結構物間預留 9.5 至 32 mm，內注混凝土將水排出，固化後即形成包覆。其施工在波高 1.2 m 時仍可進行，且混凝土固化凝結後可抵抗波高 1m 以上的衝擊；但因包覆形狀的限制，此系統僅能在鋼管樁之直線部份(straight tubular sections)施工。

(7) 金屬包覆(Alloy Sheathing)

金屬包覆的方式是將 1-5 mm 厚的銅鎳合金，如 Nickel-Copper Alloy 400 (UNS N04400)、90/10 Copper-Nickel (UNS C70600)

焊接到碳鋼組件，再將碳鋼組件組合至結構體。由於焊接施工的困難，金屬包覆系統在波高 0.6 m 時就無法施工，但一旦完成，可抵抗波高 1m 以上的衝擊。其施工對象包含鋼管樁及直線型或 Z 型板樁。

3. 潮汐帶

雖然碳鋼在潮汐帶的腐蝕速率較低，但其上部緊鄰腐蝕最為嚴重的飛沫帶，隨著潮水的漲落，潮汐帶與飛沫帶並無明顯的界限，因此位於潮汐帶鋼鐵結構物之防蝕方法與飛沫帶相同。

4. 水中帶

對於海水全浸區鋼鐵結構的防蝕，一般採用陰極防蝕或外加保護塗層、被覆或兩者結合之工法，即將鋼鐵極化，使鋼鐵的保護電位達到 -800 mV ~ -1100 mV (vs. Ag/AgCl [sw]，海水氯化銀參考電極)。

5. 海泥帶

海泥帶的溶氧較少故腐蝕較輕，一般採用與水下帶相同的防蝕方法，但採用陰極防蝕設計時，該區帶所需的保護電流密度約為水下帶的五分之一^[5]。

根據日本建設廳、日本港灣協會－港灣設施技術基準及解說，美國腐蝕工程師協會－Group T-1G-27，Publication 1G194，與美國佛羅里達州交通局材料腐蝕實驗室(Materials Lab., FDOT)之研究，配合港區鋼板(管)樁型式，如井筒式直線型鋼板樁、Z型鋼板樁(凸、凹、側三面)、或鋼管樁等，依海洋環境、樁型應用、新樁與舊樁施工成效，將各防蝕工法比較如表2-2所示。

2.4 陰極防蝕

2.4.1 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。

2.4.2 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。以碼頭鋼板管樁為例，電流從陽極經過介質(海水)到達鋼板管樁表面，然後經導線回到電源，如此鋼板管樁便受到保護(如圖 2.5)。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(如鎂、鋁、鋅)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，以碼頭鋼板管樁為例，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)的鋼板管樁(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：

外加電流法

裝置複雜

需要定期維護

可使用於低導電性環境

初期成本較高

會造成以下若干問題：

雜散電流腐蝕

氫脆化

塗層剝落

犧牲陽極法

裝置簡單、施工容易

維護需求少

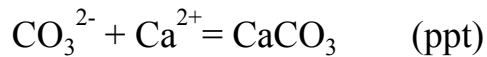
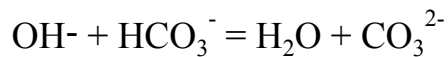
適用於導電性好之環境

成本較低

2.4.3 鈣質沉積對陰極保護之影響

海水中，裸鋼結構在陰極保護下所需的保護電流密度會隨時間的

增加而下降，最終趨於一定值，主要原因是因在海水中進行陰極保護時，鋼鐵與海水界面間的海水其 pH 值會上升，以致結構物表面會有碳酸鈣與氫氧化鎂的沉積物產生，此沉積物稱為鈣質沉積(calcareous deposits)，反應過程如下：



此鈣質沉積可形成擴散障礙，阻止海水中的溶氧進入金屬表面，降低陰極保護時所需的保護電流密度。與有塗層的構造物相較，塗裝結構物所需的保護電流密度是隨時間的增加而增加，其原因是因浸漬時間的增加，塗層有破損與劣化的趨勢，而在陰極保護下所產生的鈣質沉積亦無法達到與原先完好塗層相同的防蝕特性，以致保護電流密度增加。

表 2-1 傳統大氣、飛沫帶使用的有機重塗塗料

TYPICAL COATING SYSTEMS USED IN THE ATMOSPHERIC ZONE ^(a)		
Coating System	Thickness μm	Thickness mils
Wash Primer	13	0.5
Vinyl, intermediate and topcoats (3 to 4 coats)	200 to 250	8-10
Wash Primer	13	0.5
Chlorinated rubber, intermediate and topcoats (3 to 4 coats)	200 to 250	8 to 10
Inorganic zinc-rich self-cured primer	75	3
Epoxy intermediate coat	125	5
Vinyl acrylic or polyurethane topcoat	50	2
Inorganic zinc-rich self-cured primer	75	3
Epoxy intermediate and topcoat (2 coats)	250	10
Inorganic zinc-rich self-cured primer	75	3
Vinyl high-build intermediate coat	100 to 150	4 to 6
Vinyl topcoat (2 coats)	50	2
Inorganic zinc-rich post-cured primer	75	3
Epoxy intermediate coat	125	5
Vinyl acrylic or polyurethane topcoat	50	2
Inorganic zinc-rich post-cured primer	75	3
Epoxy tie-coat	50	2
Epoxy intermediate coat	100 to 150	4 to 6
Vinyl acrylic or polyurethane topcoat	50	2
Inorganic zinc-rich post-cured primer	75	3
Co-polymer tie-coat	50	2
Vinyl high-build topcoat	150 to 250	6 to 10
Inorganic zinc-rich self-cured primer	75	3
Epoxy tie-coat	50	2
High-build polyurethane	150 to 200	6 to 8

^(a) The specified number of coats and the thickness may vary among operators and manufacturers.

(資料來源：NACE Standard RP0176-94)

表 2.2 鋼構造物在海洋環境中的防蝕選擇

海洋環境 鋼樁情況 防蝕效果		大氣帶		飛沫帶		潮汐帶		水下帶		海泥帶		樁型應用		
		新樁	舊樁	新樁	舊樁	新樁	舊樁	新樁	舊樁	新樁	舊樁	鋼管樁	鋼板樁	
													直線型	Z 型
	塗料	◎	◎	○	△	○	△	△	—	○	—	可	可	可
有機被覆	PE 包覆	◎	—	◎	○	◎	○	○	—	—	—	可	可	可
	PU 包覆	◎	—	◎	○	◎	○	○	—	—	—	可	可	可
	水中環氧樹脂	○	○	◎	◎	◎	◎	◎	◎	—	—	可	可	可
無機被覆	水泥包覆	◎	◎	○	○	△	△	△	—	—	—	可	否	否
	中性石油脂防蝕帶	◎	◎	◎	◎	◎	◎	△	△	—	—	可	否	否
金屬包覆	不銹鋼包覆	◎	◎	◎	△	○	—	○	—	—	—	可	可	否
	低合金抗蝕鋼鐵	◎	◎	◎	△	○	—	○	—	○	—	可	可	否
金屬熔射		◎	◎	◎	◎	△	△	—	—	—	—	可	可	可
陰極防蝕		—	—	—	—	○	○	◎	◎	◎	◎	可	可	可

◎ 防蝕效果理想

○ 施工可行，防蝕效果有效

△ 施工困難或防蝕效果不佳

— 超出評估範圍(施工不可行或防蝕無效)

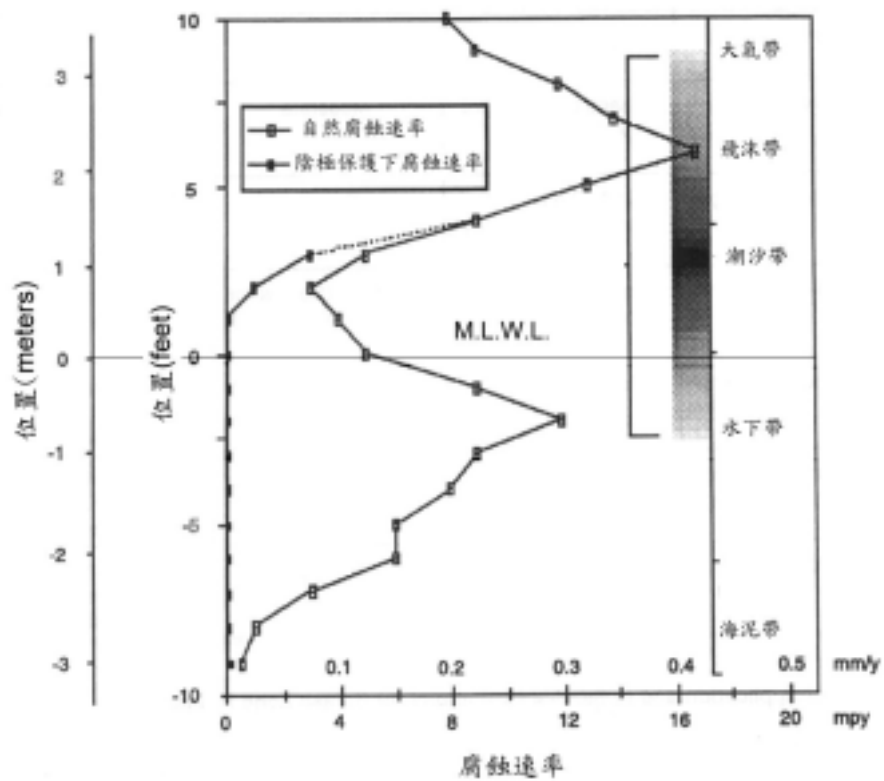


圖 2.1 碳鋼在海洋環境中腐蝕速率與曝露環境之關係

(資料來源：NACE International Publication #1G194)

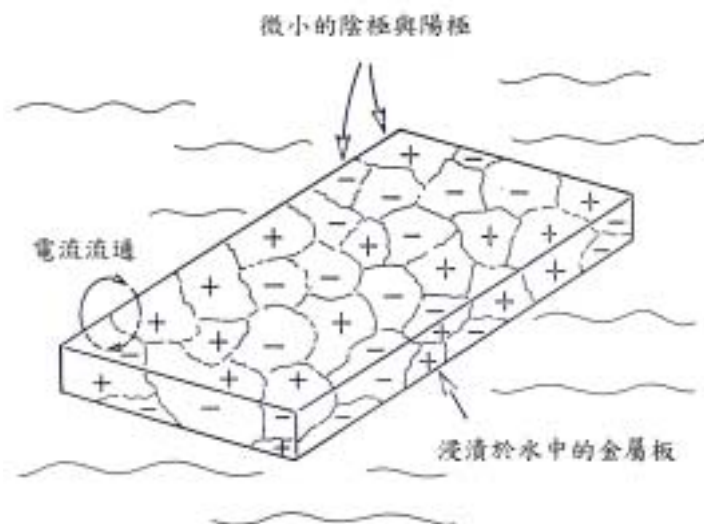


圖 2-2 鋼板在海水中產生之微小腐蝕電池示意圖

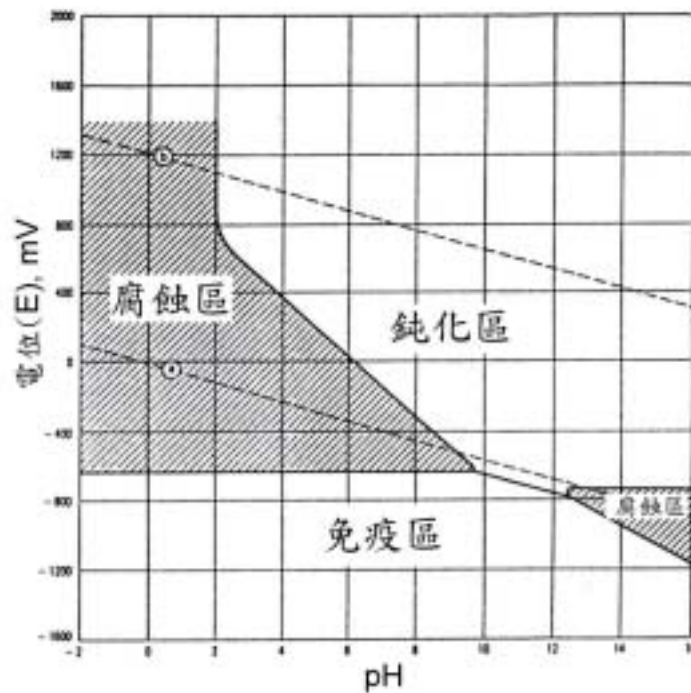


圖 2.3 鐵腐蝕區、鈍化區、免疫區分佈圖

資料來源：Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions, NACE, 1974

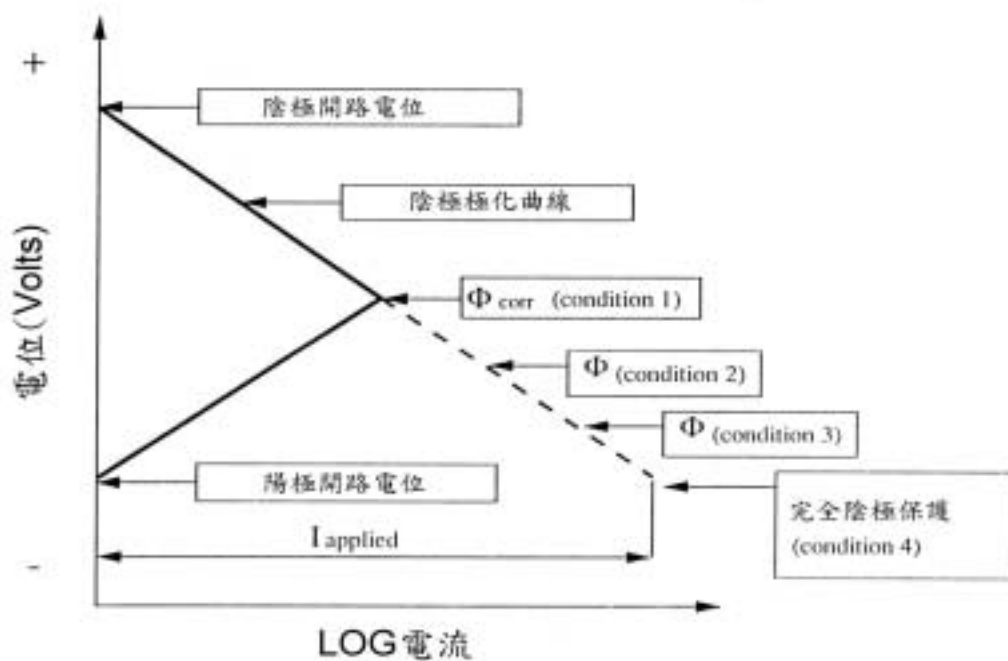
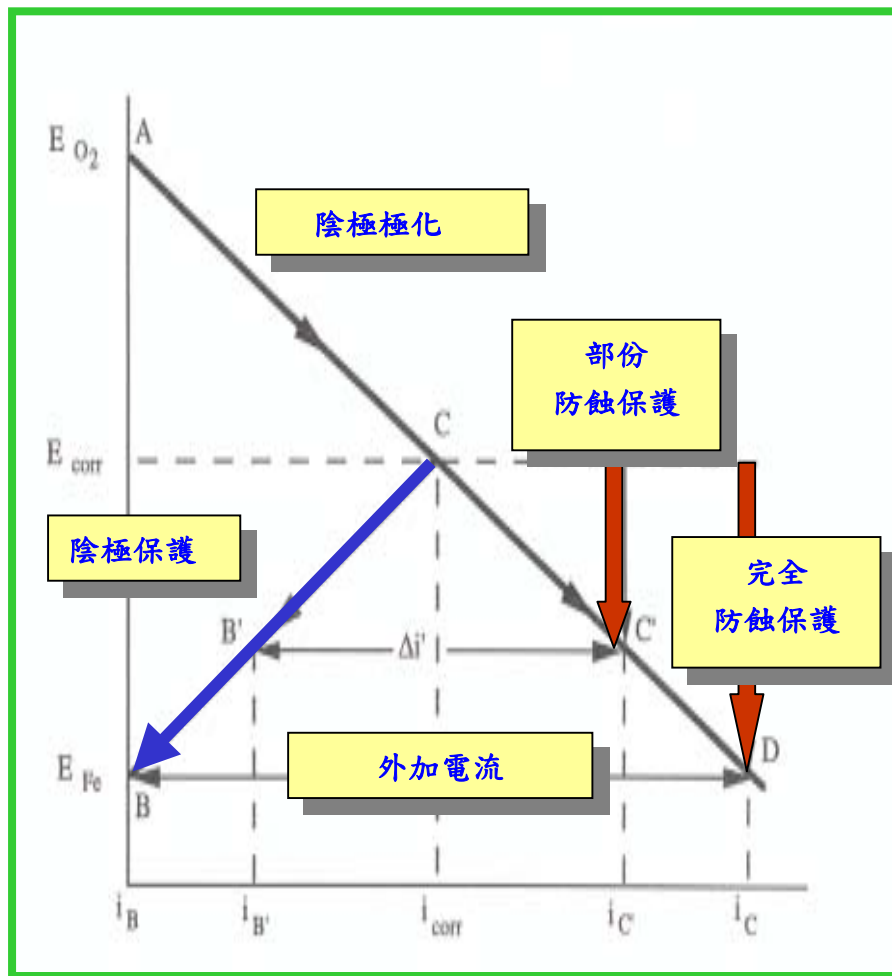


圖 2.4 陰極保護極化示意圖

資料來源：Principles and Prevention of Corrosion, Macmillan Publishing Co., 1992



外加電流法之極化曲線

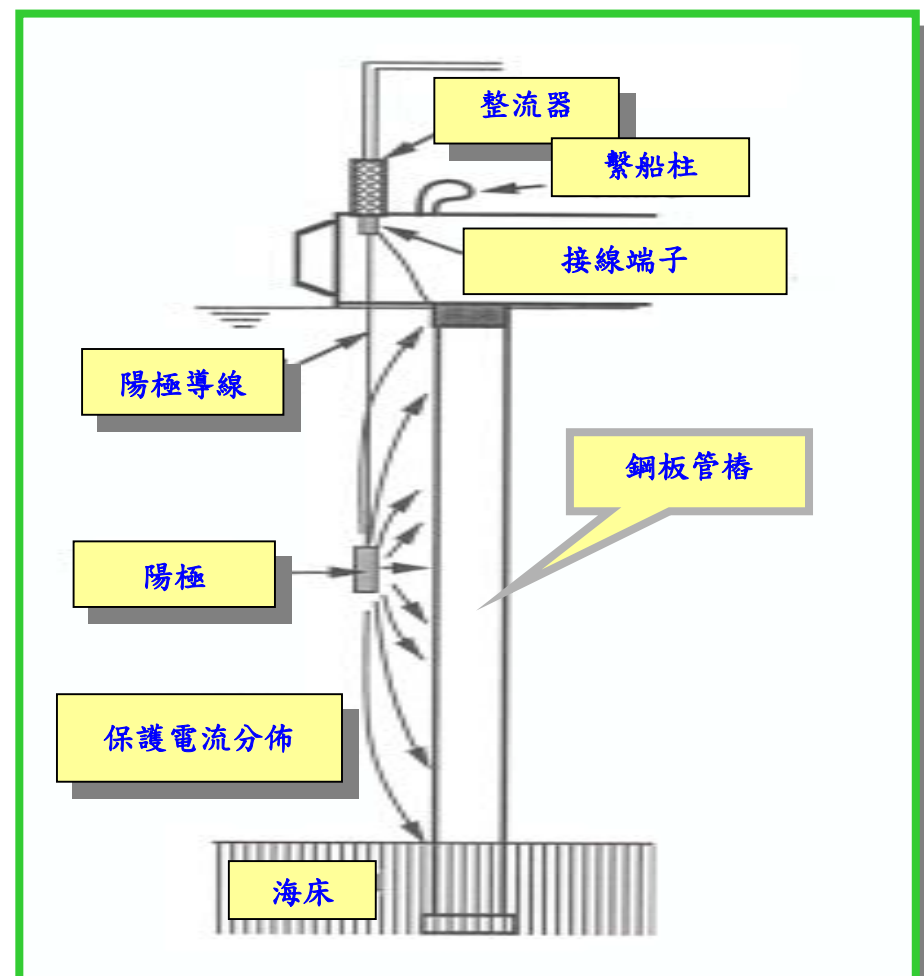
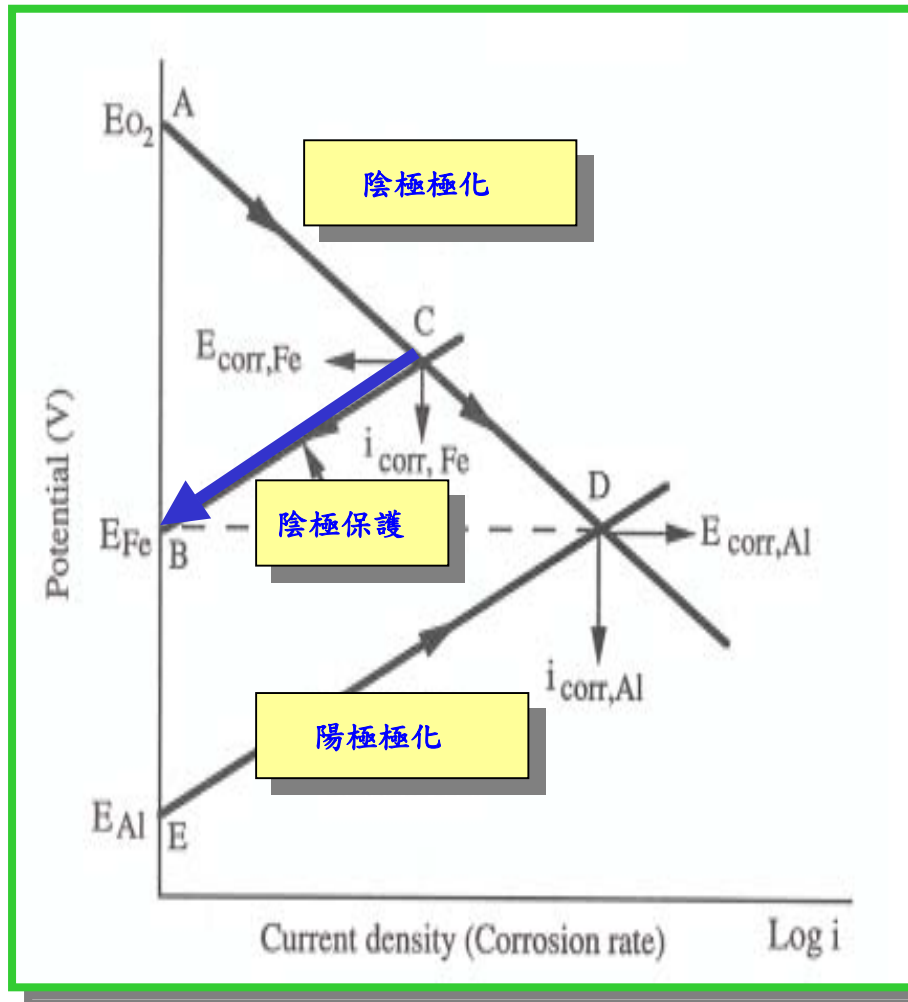


圖 2.5 碼頭鋼板(管)樁外加電流法示意圖



犧牲陽極法之極化曲線

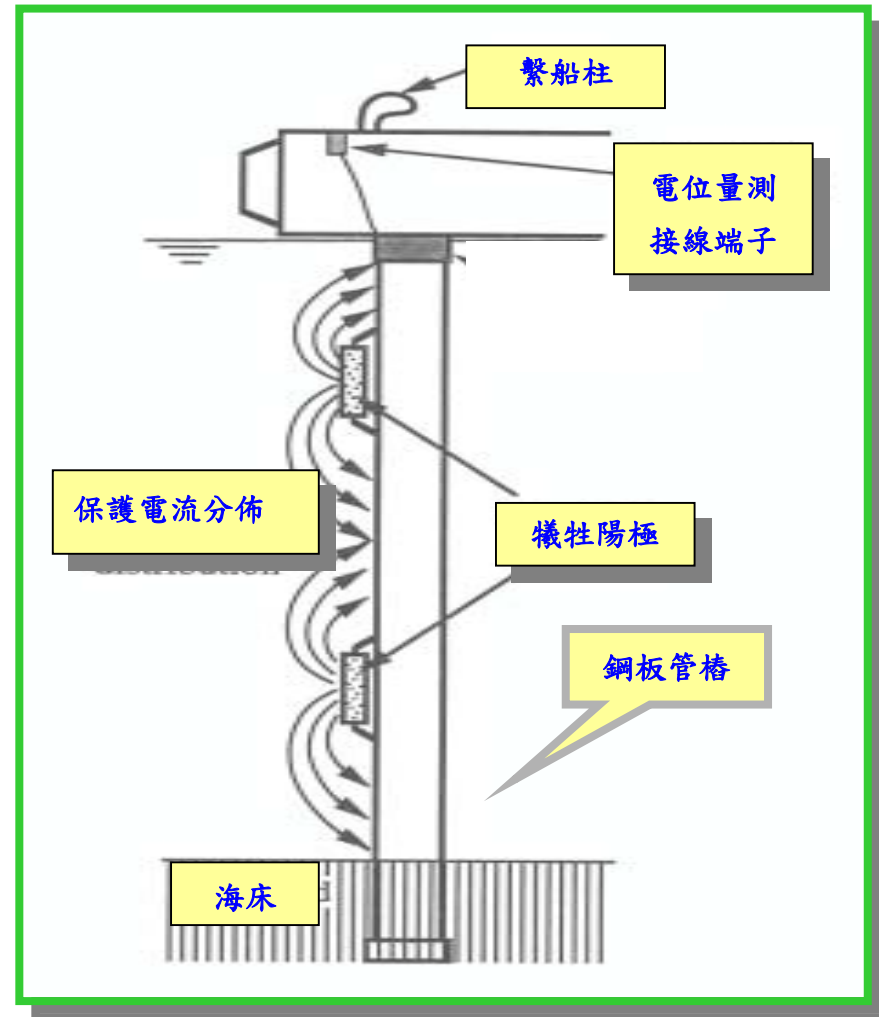


圖 2.6 碼頭鋼板(管)樁犧牲陽極法示意圖

第三章 陰極防蝕規範文獻整理

陰極防蝕技術在國外已有百餘年之研究及應用經驗。早在 1823 年英國曾進行軍方船艦外殼之陰極防蝕工作，至今，此技術已廣泛應用於地下儲運設備(如管線、儲槽)、海域鑽油平台、港灣碼頭鋼板管樁結構、鋼筋混凝土結構、石化廠冷卻器、熱交換器等設施；回顧國外有關港灣鋼構造物陰極保護之參考手冊、準則、規範，如表 3.1 所示。此外，1998 年 6 月，美國材料試驗學會(American Society for Testing and Materials, ASTM) G-1 委員會(Committee G-1 on Corrosion of Metals)亦開始著手制訂海洋構造物與船舶之陰極保護設計規範(Designing Cathodic Protection Systems for Marine Structures and Vehicles)，迄今仍在進行中。

表 3.1 各國陰極防蝕規範

規範準則名稱	制訂單位	發行國別	最後出版日期
港灣鋼構造物防蝕、補修手冊 (改訂版)	日本沿岸開發技術研究中心	日本	1997 年 4 月
港灣構造物的維持、補修手冊	日本沿岸開發技術研究中心	日本	1999 年 6 月
BSI-BS 7361 Cathodic Protection, Part1. Code of practice for land and marine applications	British Standard	英國	1991 年
BS EN 13174 Cathodic protection of harbour installations	British & Eueopan Standards	英國	2001 年
EN 13173 Cathodic protection for steel offshore floating structures	Eueopan Standards	英國	2001 年
EN 12474 Cathodic protection of submarine pipelines	Eueopan Standards	英國	2001 年
DNV RP-B401 Cathodic Protection Design	Det norske Veritas	挪威	1993 年
DIN 30676 Design and application of cathodic protection of external surfaces	German Institute for Standardization	德國	1985 年 10 月
NORSOK Standard M-503 Cathodic protection	Norwegian Technology Standards Institution	挪威	1997 年 9 月
NACE-RP0169 Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping Systems	NACE International	美國	2002 年
NACE- RP0176 Corrosion Control of Steel Fixed Offshore Platforms Associated with Petroleum Production	NACE International	美國	1994 年
NACE-RP0387	NACE International	美國	1999 年

Metallurgical and Inspection Requirements for Cast Sacrificial Anodes for Offshore Applications			
NACE-RP0492 Metallurgical and Inspection Requirements for Offshore Pipeline Bracelet Anodes	NACE International	美國	1999 年
NACE-RP0286 The Electrical Isolation of Cathodically Protected Pipelines	NACE International	美國	2002 年
NACE-RP0572 Design, Installation, Operation, and Maintenance of Impressed Current Deep Groundbeds	NACE International	美國	1995 年
NACE- TM0101 Measurement Techniques Related to Criteria for Cathodic Protection on Underground or Submerged Metallic Tank Systems	NACE International	美國	2001 年
US Army TM 5-811-7 Electrical Design, Cathodic Protection	Departments of the Army	美國	1985 年 4 月
US Navy NAVFAC- MO-307 Corrosion Control	Naval Facilities Engineering Command	美國	1992 年
陰極防蝕工程手冊	化學工業出版社	中國大陸	1998 年

參考下列規範，

1. 日本港灣協會-運輸省港灣局監修，「港灣設施之技術基準·同解說(改訂版)」，1989^[6]
2. 日本建設省土木研究所，「海域中土木鋼構造物之電氣防蝕設計指針(案)·同解說」，1991^[7]
3. 挪威 Det norske Veritas，DNV RP-B401，Cathodic Protection Design，1993^[8]
4. 英國 British Standard，BSI-BS 7361，Cathodic Protection, Part1. Code of practice for land and marine applications，1991^[9]
5. 美國 NACE International，NACE- RP0176，Corrosion Control of Steel Fixed Offshore Platforms Associated with Petroleum Production，1994^[5]

將海洋鋼構造物陰極防蝕所需之防蝕電位、防蝕電流密度、犧牲陽極有效電位、有效電流量與消耗量進行比較，結果如下^[10]：

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

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

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

第四章 鋼板(管)樁碼頭陰極防蝕工程案例

為瞭解國內外鋼板(管)樁碼頭使用陰極防蝕之成效，今蒐集若干案例分述於下：

案例一：日本 A 港，水深-10.0 m 之鋼板樁碼頭陰極防蝕^[7]

1. 岸壁構造及環境

- (1) 碼頭岸壁為鋼板樁結構，鋼板樁在碼頭底板下端(+2.0 m)至-1.0m 間以 PU (polyurethane)塗料塗裝。
- (2) 平均水面+2.54 m。
- (3) 海域無污染。

2. 防蝕對象

- (1) 鋼板樁：型式為 SP-VIL，長度= 24.5 m。
- (2) 碼頭岸壁長度：180 m。
- (3) 水深：-10.0 m。

3. 設計條件

- (1) 陰極防蝕範圍：平均低潮位(M.L.W.L.) +1.3m 以下至海床間。
- (2) 鋼板樁 PU (polyurethane)塗裝範圍為-1.0 ~ +2.0 m 之間，但在鋼板樁接合部位未塗裝部份的面積，約佔 10%。
- (3) 防蝕電流密度選用：海水中= 100 mA/m²，海土中= 20 mA/m²。
- (4) 陰極防蝕方式：犧牲陽極法。
- (5) 陰極防蝕設計年限：20 年。
- (6) 海水比電阻：30 Ω·cm。

4. 防蝕面積

海水中(PU 塗裝部份)： $(1.0\text{m} + 1.3\text{m}) \times 180\text{m} \times 1.75 \times 0.1 = 72.5 \text{ m}^2$

海水中(裸鋼部份)： $(10.0\text{m} - 1.0\text{m}) \times 180\text{m} \times 1.75 = 2835.0 \text{ m}^2$

海底土中： $(22.5\text{m} - 10.0\text{m}) \times 180\text{m} \times 1.75 = 3937.5 \text{ m}^2$

5. 所需防蝕總電流

海水中： $(72.5 \text{ m}^2 + 2835.0 \text{ m}^2) \times 100 \text{ mA/m}^2 = 290.8 \text{ A}$

海底土中： $3937.5 \text{ m}^2 \times 20 \text{ mA/m}^2 = 78.8 \text{ A}$

合計= 369.6 A

6. 陽極選用

(1) 陽極材料：鋁合金陽極。

(2) 尺寸： $(150 + 175) \times 170 \times 1380 \text{ mm}$ 。

(3) 含蕊心之陽極重量： $109.5 \text{ kg} \pm 2\%$ ，淨重： $102.3 \text{ kg} \pm 2\%$ 。

(4) 電流量： $30.3 \text{ A} \cdot \text{y}$ 。

(5) 初期發生電流： 3.0 A/塊 。

(6) 耐用年數：20 年。

7. 陽極數量

(1) 需要數量= $369.6 \text{ A} / 3.0 \text{ A} = 123.2 \text{ 塊}$

(2) 以 3 個水深配置(如圖 4.1 所示)，分別為-2.0 m，-4.5 m，-7.0 m，

配置個數如下：

水深-2.0 m = 46 塊

水深-4.5 m = 33 塊

水深-7.0 m = 46 塊

合計= 125 塊

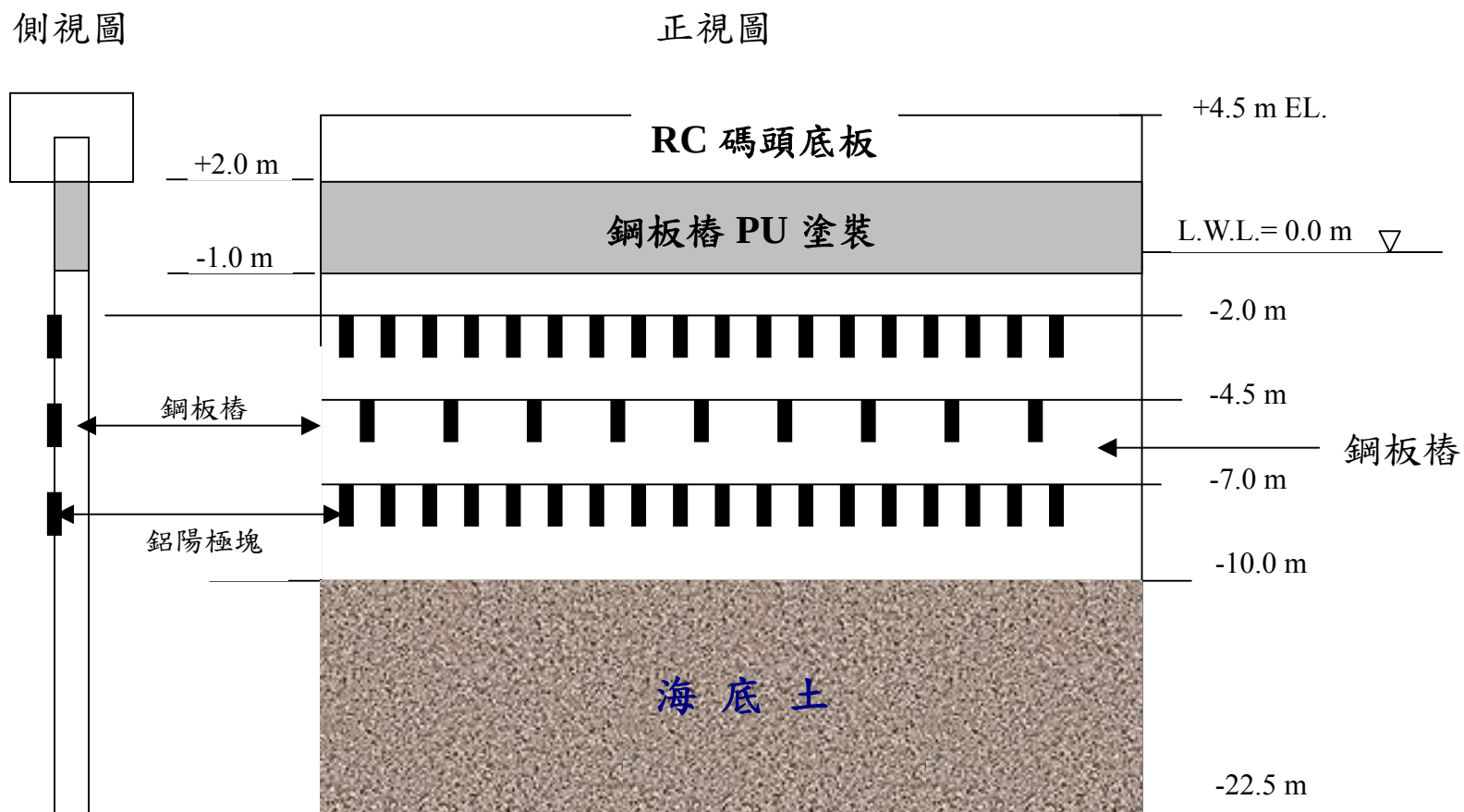


圖 4.1 鋼板樁犧牲陽極配置示意圖

案例二：日本 B 港，水深-13.0 m 之鋼管樁棧橋碼頭陰極防蝕^[7]

1. 岸壁構造及環境

- (1) 碼頭為鋼管樁棧橋式碼頭，岸壁為鋼板樁式護岸。
- (2) 鋼管樁在混凝土底板下端(+2.0 m)至-1.0m 間，鋼板樁在底板下端(+1.0 m)至-1.0m 間，以 PE (polyethane)或 PU (polyurethane) 塗料塗裝。
- (3) 平均水面+1.4 m。
- (4) 海域為污染環境。

2. 防蝕對象

- (1) 鋼管樁：900Φ x 12t，長度= 35.0 m；該棧橋式碼頭共分為 10 區，每區 15 支鋼管樁，共 150 支。
- (2) 鋼板樁：型式為 SP-VL，長度= 22.0 m；碼頭岸壁長度以每 20 m 為一區，共分為 10 區。
- (3) 碼頭岸壁長度：200 m。
- (4) 水深：-13.0 m。

3. 設計條件

- (1) 陰極防蝕範圍：鋼管樁為-1.0 m 以下，鋼板樁為平均低潮位 (M.L.W.L.) +0.7 m 以下至海床間。
- (2) 塗裝範圍：
鋼管樁為-1.0 ~ +2.0 m 之間。
鋼板樁為-1.0 ~ +1.0 m 之間，但在鋼板樁接合部位未塗裝部份的面積，約佔 10%。
- (3) 防蝕電流密度選用：
海水中= 130 mA/m²

$$\text{石礫中} = 65 \text{ mA/m}^2$$

$$\text{海土中} = 30 \text{ mA/m}^2$$

(4) 陰極防蝕方式：犧牲陽極法。

(5) 陰極防蝕設計年限：20 年。

(6) 海水比電阻：35 $\Omega \cdot \text{cm}$ 。

4. 防蝕面積

(1) 被保護結構物共分 10 區，其中每一區之防蝕面積
海水中：

$$\text{第一列鋼管樁} : 0.9 \text{ m} \times \pi \times 12.0 \text{ m} \times 5 \text{ 支} = 169.6 \text{ m}^2$$

$$\text{第二列鋼管樁} : 0.9 \text{ m} \times \pi \times 9.0 \text{ m} \times 5 \text{ 支} = 127.2 \text{ m}^2$$

$$\text{第一列鋼管樁} : 0.9 \text{ m} \times \pi \times 6.0 \text{ m} \times 5 \text{ 支} = 84.8 \text{ m}^2$$

$$\text{合計} = 381.6 \text{ m}^2$$

$$\text{鋼板樁(塗裝部份)} : 20.0 \text{ m} \times 2.0 \text{ m} \times 1.7 \times 0.1 = 6.8 \text{ m}^2$$

$$\text{鋼板樁(裸鋼部份)} : 20.0 \text{ m} \times 4.0 \text{ m} \times 1.7 = 136 \text{ m}^2$$

$$\text{合計} = 142.8 \text{ m}^2$$

石礫中：

$$\text{鋼管樁} : 0.9 \text{ m} \times \pi \times 1.0 \text{ m} \times 5 \text{ 支} = 42.4 \text{ m}^2$$

$$\text{鋼板樁} : 20.0 \text{ m} \times 1.0 \text{ m} \times 1.7 = 34.0 \text{ m}^2$$

海底土中：

$$\text{第一列鋼管樁} : 0.9 \text{ m} \times \pi \times 17.5 \text{ m} \times 5 \text{ 支} = 247.4 \text{ m}^2$$

$$\text{第二列鋼管樁} : 0.9 \text{ m} \times \pi \times 20.5 \text{ m} \times 5 \text{ 支} = 289.8 \text{ m}^2$$

$$\text{第一列鋼管樁} : 0.9 \text{ m} \times \pi \times 23.5 \text{ m} \times 5 \text{ 支} = 332.2 \text{ m}^2$$

$$\text{合計} = 869.4 \text{ m}^2$$

$$\text{鋼板樁} : 20.0 \text{ m} \times 14.5 \text{ m} \times 1.7 = 493.0 \text{ m}^2$$

(2) 防蝕總面積(10 區)

鋼管樁：

$$\text{海水中} = 381.6 \text{ m}^2 \times 10 = 3816.0 \text{ m}^2$$

$$\text{石礫中} = 42.4 \text{ m}^2 \times 10 = 424.0 \text{ m}^2$$

$$\text{海底土中} = 869.4 \text{ m}^2 \times 10 = 8694.0 \text{ m}^2$$

$$\text{合計} = 12934.0 \text{ m}^2$$

鋼板樁：

$$\text{海水中} = 142.8 \text{ m}^2 \times 10 = 1428.0 \text{ m}^2$$

$$\text{石礫中} = 34.0 \text{ m}^2 \times 10 = 340.0 \text{ m}^2$$

$$\text{海底土中} = 493.0 \text{ m}^2 \times 10 = 4930.0 \text{ m}^2$$

$$\text{合計} = 6698.0 \text{ m}^2$$

5. 所需防蝕總電流

(1) 被保護結構物共分 10 區，其中每一區所需之防蝕電流

鋼管樁：

$$\text{海水中} = 381.6 \text{ m}^2 \times 130 \text{ mA/m}^2 = 49.6 \text{ A}$$

$$\text{石礫中} = 42.4 \text{ m}^2 \times 65 \text{ mA/m}^2 = 2.8 \text{ A}$$

$$\text{海底土中} = 869.4 \text{ m}^2 \times 30 \text{ mA/m}^2 = 26.1 \text{ A}$$

$$\text{合計} = 78.5 \text{ A}$$

鋼板樁：

$$\text{海水中} = 142.8 \text{ m}^2 \times 130 \text{ mA/m}^2 = 18.6 \text{ A}$$

$$\text{石礫中} = 34.0 \text{ m}^2 \times 65 \text{ mA/m}^2 = 2.2 \text{ A}$$

$$\text{海底土中} = 493.0 \text{ m}^2 \times 30 \text{ mA/m}^2 = 14.8 \text{ A}$$

$$\text{合計} = 35.6 \text{ A}$$

(2) 所需之防蝕總電流(10 區)

$$\text{鋼管樁} = 78.5 \text{ A} \times 10 = 785.0 \text{ A}$$

$$\text{鋼板樁} = 35.6 \text{ A} \times 10 = 356.0 \text{ A}$$

$$\text{合計} = 1141.0 \text{ A}$$

6. 陽極選用

(1) 陽極材料：鋁合金陽極。

(2) 尺寸：(130 + 175) x 150 x 1990 mm。

(3) 含蕊心重量：130.0 kg $\pm$ 2%，淨重：122.1 kg $\pm$ 2%。

(4) 電流量：36.2 A·y。

(5) 初期發生電流：3.5 A/塊。

(6) 耐用年數：20 年。

7. 陽極數量

(1) 每區間需要數量

$$\text{鋼管樁} = 78.5 \text{ A/區間} \div 3.5 \text{ A/塊} \approx 23 \text{ 塊/區間}$$

$$\text{鋼板樁} = 35.6 \text{ A/區間} \div 3.5 \text{ A/塊} \approx 10 \text{ 塊/區間}$$

(2) 總共需要數量

$$\text{鋼管樁} = 23 \text{ 塊} \times 10 = 230 \text{ 塊}$$

$$\text{鋼板樁} = 10 \text{ 塊} \times 10 = 100 \text{ 塊}$$

$$\text{合計} = 330 \text{ 塊}$$

- (3) 每一區以 3 個水深配置(如圖 4.2 所示), 分別為-2.0 m, -6.0 m, -9.0 m, 配置個數如下。

水深	鋼管樁	鋼板樁
-2.0 m	15 塊	10 塊
-6.0 m	3 塊	-
-9.0 m	5 塊	-
合計	23 塊	10 塊

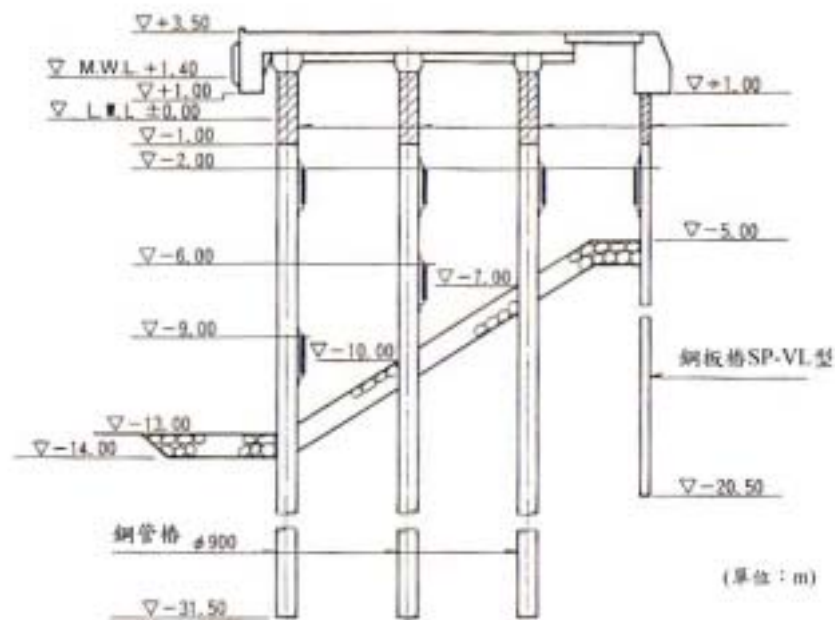
陽極安裝配置圖



陽極配置數量表

陽極配置 記號	安裝水深(m)	數量(塊/每區)	合計(10區)
鋼管樁	-2.0 ~ -9.0	2 × 5 = 10	100 塊
鋼管樁	-2.0 ~ -6.0	2 × 3 = 6	60 塊
鋼管樁	-2.0	1 × 7 = 7	70 塊
鋼板樁	-2.0	1 × 10 = 10	100 塊
合 計		33	330 塊

犧牲陽極安裝位置



電位量測裝置配置圖

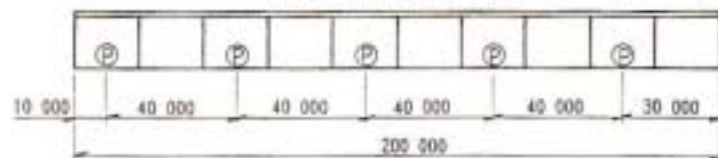


圖 4.2 鋼管(板)樁犧牲陽極配置示意圖

第五章 港灣鋼構造物陰極防蝕

5.1 防蝕系統選擇

港灣鋼構造物陰極防蝕系統的選擇，可以採用犧牲陽極式、外加電流式或兩者相結合。對於港口碼頭設施，過去多採用外加電流式的陰極保護，但 80 年代至今，由於犧牲陽極不斷開發且防蝕性能提高，目前各國多採用犧牲陽極式陰極保護；但在水質變化較大的河口或是流速較大的區域，海水中鋼構造物的陰極防蝕仍宜考慮外加電流式的保護系統的選用。一般而言，陰極防蝕系統的選用，考慮因素如下：

1. 保護系統的可靠性。
2. 對相鄰構造物之影響(雜散電流)。
3. 保護電流需求量。
4. 構造物的複雜性。
5. 構造物壽命。
6. 環境條件等。

顯然的，從保護系統的可靠性、對相鄰構造物雜散電流之影響與構造物的複雜性等因素考慮，犧牲陽極式的陰極保護，驅動電壓低，迴路電阻大(鋼板樁與鋼板樁間接觸不完全)，迴路間之電流小，無雜散電流腐蝕之虞；但在外加電流式陰極保護下，電路迴路的電流較犧牲陽極式大且迴路電壓高，在鋼板樁或鋼管樁間接觸不完全的狀態下，可能會發生雜散電流腐蝕。但由保護電流需求量的觀點來看，需要較大電流保護的鋼構造物，仍應考慮外加電流式的陰極保護。選擇流程如圖 5.1 所示^[10]。

5.2 犧牲陽極式陰極保護設計計算

犧牲陽極式陰極保護設計計算流程如圖 5.2 所示^[10]。

5.2.1 保護面積計算

港灣設施保護面積包括海水中面積與海土中面積。其中海水中長度計算，依據日本沿岸開發技術研究中心之「港灣鋼構造物防蝕、補修手冊(改訂版)」^[10]之定義(圖 5.3 所示)，如下：

1. 一般而言，為平均低潮位(M.L.W.L.)至海底面間的長度。
2. 但當潮差區(高潮位~平均低潮位，H.W.L. ~ M.L.W.L.)面積大於海水中面積 10%時，計算範圍為高潮位(H.W.L.)至海底面間的長度。
3. 若平均低潮位以上至平均潮位間(M.L.W.L. ~ M.W.L.)之鋼板管樁無塗裝被覆，則以平均潮位(M.W.L.)至海底面間的長度為計算範圍。

今依鋼樁的型式，計算保護面積：

1. 鋼板樁

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

式中， A_{s1} =鋼板樁海水中面積， m^2

L =鋼板樁岸壁長度， m

H_1 =海水中長度， m

n =鋼板樁周邊係數(依鋼板樁型式而異，日本各類鋼板樁周邊係數如表 5.1 所示)

海土中面積 $A_{s2} = n \times L \times H_2$

式中， A_{s2} =鋼板樁海土中面積， m^2

L =鋼板樁岸壁長度，m

H_2 =海土中長度，m

n =鋼板樁周邊係數

2. 鋼管樁

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

式中， A_{p1} =鋼板管海水中面積， m^2

D =鋼管樁直徑，m

H_1 =海水中長度，m

N =鋼管樁支數

海土中面積 $A_{p2} = \pi D \times H_2 \times N$

式中， A_{p2} =鋼板樁海土中面積， m^2

D =鋼管樁直徑，m

H_2 =海土中長度，m

N =鋼管樁支數

5.2.2 防蝕電流計算

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

式中， I =所需防蝕總電流，mA

i_i =各環境採用之防蝕電流密度(初期防蝕電流密度)，
mA/ m^2

A_i =海水中與海土中之保護構造物面積， m^2

海水的化學成份、溶氧量或 pH 值會受到河川或其他排水之影響，因此在水質變化較大或硫化物濃度較高的海域，使用陰極防蝕工法須注意防蝕電流密度選用。在厭氧性硫酸還原菌存在的環境裏，因硫化物的影響，鋼構造物會產生局部腐蝕，在此條件下，應增加防蝕設計電流密度。污染海域係指河川或各種排水流入海水處，根據日本建設省土木研究所「海域中土木鋼構造物之電氣防蝕設計指針(案)·同解說」，以 $[\text{NH}_4^+ (\text{ppm}) + 1/\text{Cl}^- (\%)]$ 之計算值為污染指標，當污染指標值大於 0.8 時是為污染海域。此外，在海水中，裸鋼鋼構造物陰極保護所需的保護電流密度會隨時間的增加而下降，最終趨於一定值，此時之電流密度稱為穩定電流密度；主要是因在海水中進行陰極保護時，鋼鐵與海水界面間海水的 pH 值會上升，以致構造物表面有碳酸鈣與氫氧化鎂的沉積物產生，此沉積物稱為鈣質沉積(calcareous deposits)。鈣質沉積可形成擴散障礙，阻止海水中的溶氧進入金屬表面，降低陰極保護所需之保護電流密度。根據國外研究，穩定的保護電流密度約為初期防蝕電流密度之 50 %。

根據 1993 年 DNV RP-B401，Cathodic Protection Design，依地域與水深，將裸鋼所需防蝕電流密度，表列如下：

水深 (m)	防蝕電流密度(mA/m ²)				
		熱帶 (>20 °C)	亞熱帶 (12~20 °C)	溫帶 (7~12 °C)	北極 (<7 °C)
0~30	初期	150	170	200	250
	平均	70	80	100	120
	穩定	90	110	130	170
> 30	初期	130	150	180	220
	平均	60	70	80	100
	穩定	80	90	110	130

註：溫度為年平均之水表面溫度

再參考 1989 年日本港灣協會運輸省港灣局監修，「港灣設施之技術基準·同解說(改訂版)」與 1997 年日本沿岸開發技術研究中心之「港灣鋼構造物防蝕、補修手冊(改訂版)」，初始極化與穩定防蝕電流密度在各環境中的經驗值如下：

1. 裸鋼

防蝕電流密度(mA/m ²)				
環 境			陰極防蝕	
			初期防蝕電流密度	穩定電流密度
一般	港灣	海水中	100	50
		海底土中	20	10
海域	外海	海水中	100 x F	50 x F
		海底土中	20 x F	10 x F
特殊	污染	海水中	100 x K	50 x K
		海底土中	20 x K	10 x K
海域	流速	1 m/s	160	80
		2 m/s	230	115
		3 m/s	270	135

F 為波浪海流影響因素，約為 1.0 ~ 1.5

K 為污染程度，約為 1.2 ~ 1.5

2. 塗裝被覆鋼構造物

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

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

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

i：防蝕電流密度值，依裸鋼鋼構造物所在環境選用

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

5.2.3 犧牲陽極發生電流量計算

為確保選用之犧牲陽極可有效供給陰極防蝕保護電流，犧牲陽極之發生電流量必需計算。

$$I_g = \frac{E}{R_a} \times 1000$$

式中， I_g =每塊犧牲陽極的發生電流，mA

E =有效電位差(驅動電壓)，V，鋅合金陽極為 0.2 V，鋁

合金陽極為 0.25 V

R_a =犧牲陽極對海水的電阻， Ω

其中，犧牲陽極對海水電阻之計算，依犧牲陽極的形狀，如下：

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

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

式中， R_a =犧牲陽極對海水的電阻， Ω

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

L =陽極長度， cm

r =陽極半徑(或陽極等效半徑)， cm

若陽極非圓柱體，則陽極等效半徑 r

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

C =陽極的斷面面積， cm^2

2. 長條棒狀陽極(與被保護構造物表面距離 $\geq 30 \text{ cm}$ ，且 $L < 4r$)

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

式中， R_a =犧牲陽極對海水的電阻， Ω

ρ =海水比電阻， $\Omega \cdot \text{cm}$

L =陽極長度， cm

r =陽極半徑(或陽極等效半徑)， cm

若陽極非圓柱體，則陽極等效半徑 r

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

C =陽極斷面面積， cm^2

3. 板狀陽極

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

式中， R_a =犧牲陽極對海水的電阻， Ω

ρ =海水比電阻， $\Omega\cdot\text{cm}$

S =陽極長度與寬度的平均值， cm

4. 其他形狀之陽極

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

式中， R_a =犧牲陽極對海水的電阻， Ω

ρ =海水比電阻， $\Omega\cdot\text{cm}$

A =陽極的表面積， cm^2

5.2.4 犧牲陽極用量計算

浸入海水中(或海土中)所需犧牲陽極的塊數

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

式中， N_i =浸入海水中(或海土中)被保護部位所需犧牲陽極的塊數

i_i =各環境採用之防蝕電流密度(初始極化防蝕電流密度)， mA/m^2

A_i =海水中(或海底土中)之保護構造物面積， m^2

I_g =每塊犧牲陽極的發生電流， mA

所需犧牲陽極總塊數

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

式中，餘裕係數為 10% ~ 20%。

5.2.5 陽極壽命計算

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

式中，L=陽極使用壽命，year (y)

N=被保護設施所需陽極總塊數

W=每塊陽極原始重量，kg

Q=陽極消耗量，kg/A·yr

I_{avg} =構造物在保護期間內所需平均保護電流，A；通常約為極化保護電流密度計算出總電流之 0.5 ~ 0.55 倍，在污染海域中約為 0.67 倍^[7]

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

5.2.6 犧牲陽極配置考量

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

5.3 外加電流陰極保護設計計算

80 年代至今，海水中鋼構造物的陰極防蝕多採用犧牲陽極式陰極保護，但在水質變化較大的河口或是流速較大的區域，亦可考慮外加電流式的保護系統的選用；外加電流式陰極保護設計計算流程^[10]，如圖 5.4 所示，其步驟概述於下：

1. 保護面積計算

計算海水中與海土中面積。

2. 防蝕電流計算

陽極的發生電流量可由原廠之陽極性能技術資料獲得，依各部位的保護面積與初始保護電流密度計算陰極保護系統所需的保護電流，並乘以一個裕餘度，作為電流總需求量。依據 1997 年日本沿岸開發技術研究中心之「港灣鋼構造物防蝕、補修手冊(改訂版)」，裕餘度建議為原計算保護電流之 1.1 ~ 1.2 倍^[10]，而參考 1998 年中國大陸「陰極防蝕工程手冊」，裕餘度為原計算保護電流之 1.25 ~ 1.5 倍^[11]。

3. 單一整流器設計輸出電壓計算

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

式中， E =單一整流器輸出最低電壓，V

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

E_c =被保護構造物電壓降，V，(在海水中 $E_c=0$)

E_w =迴路導線之電壓降，V

e =水的分解電壓，V，(在海水中 $e \sim 2.0$ V)

4. 整流器之電壓容量

通常考慮構造物塗層劣化與陽極消耗等因素，整流器輸出電壓設計時會增加餘裕度，則整流器採用之設計輸出電壓(V)為

$$E_{out} = E (1 + x \%)$$

式中， E_{out} = 單一整流器設計輸出電壓，V

E = 單一整流器輸出最低電壓，V

x = 餘裕係數，為 10% ~ 20% 左右。

5.4 陰極防蝕系統使用材料及設備需求

5.4.1 犧牲陽極材料

犧牲陽極藉伽凡尼(Galvanic)作用，使陽極離子釋出，產生電子來保護結構物，因此陽極的消耗，在陰極防蝕過程中是必然的；週期性的檢查、替換犧牲陽極，更是為達到長期防蝕效果必須執行的工作。陽極材料的選擇，在電化學特性上需具有：

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

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，在陰極防蝕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，已被廣泛地應用。近年來，鋁及其合金亦被發展成為海水環境中犧牲陽極的材料。然純鋁在淡水中由於金屬表面薄膜的形成，會使自然電位往正值(noble)方向進行，並且產生過度的極化，因此常在合金中添加微量的鋅、汞、銻等元素以保持其活性，使鋁合金電位更負且電流效率更高。再者由於鋁本身低密度、高電價的特性，每單位質量的發生電流最大，有優越的經濟性，目前各國港灣構造物之陰極防蝕多採用鋁合金陽極。

犧牲陽極的防蝕效果取決於陽極本身的發生電量(A·h/g)，而發生電量又可分為理論與實際發生電量，當實際發生電量與理論發生電量的百分比數大時，表示電流效率良好。理論發生電量是以庫倫定律計算推導，而實際發生電量的量測可參照 CNS 13521「陰極防蝕用犧牲陽極性能檢驗法」^[12]。檢驗項目如下：

1. 實際發生電量 (A.h/kg) =
$$\frac{\text{電量計所得之電量 (A.h)}}{\text{陽極減少之重量 (g)}} \times 1000$$
2. 電流效率 (%) =
$$\frac{\text{電量計所得之電量 (A.h)} \times 100 \%}{\text{陽極減少之重量 (g)} \times \text{理論發生電量 (A.h/kg)}}$$
3. 消耗率 (kg/A.yr) =
$$\frac{1}{\text{實際發生電量 (A.h/kg)}} \times 365 \times 24(\text{h/yr})$$
4. 陽極開路與閉路電位：陽極開路電位即犧牲陽極在電解液中之自然腐蝕電位。閉路電位亦稱為工作電位，為犧牲陽極在電解液中與金屬構造物聯結時之犧牲陽極電位。

目前國內使用的鋁合金陽極塊之特性如下：

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

再者，國外犧牲陽極材料性能資料彙整如下：

1. 日本港灣協會-運輸省港灣局監修，「港灣設施之技術基準·同解說(改訂版)」，1989

特 性		Al-Zn-In		純鋅、 鋅合金	純鎂、 Mg-Mn	Mg-6Al-3Zn
比重		2.6 ~ 2.8		7.14	1.74	1.77
開路陽極電壓 (V vs. SCE)		1.08		1.03	1.56	1.48
對鐵的有效電壓 (V)		0.25		0.20	0.75	0.65
理論發生電量 (A·h/g)		2.87		0.82	2.20	2.21
海水中 1 mA/cm ²	電流效率 (%)	80	90	95	50	55
	實際發生電量(A·h/g)	2.30	2.60	0.78	1.10	1.22
	消耗量 (kg/A·yr)	3.8	3.4	11.8	8.0	7.2
土中 0.03 mA/cm ²	電流效率 (%)	65*		65	40	50
	實際發生電量(A·h/g)	1.86*		0.53	0.88	1.11

* 依陽極組成成份而有所變異

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

海水中

特 性	鋁合金	鋅合金	Mg 合金
開路電位 (V vs. SCE)	-1.08 ~ -1.15	-1.10	-1.50
陽極效率 (%)	80 ~ 95	95	50
發生電流量 (A·h/kg)	2300 ~ 2750	780	1100

3. 挪威 Det norske Veritas，DNV RP-B401，Cathodic Protection Design，1993

海水中

陽極材料	陽極電位 (V)	有效電量 (A·h/kg)
Al-Base	-1.05	2000 (2500 max.)
Zn-Base	-1.00	700 (750 max.)

電位 (vs. Ag/AgCl [sw])

海底土中

陽極材料	陽極電位 (V)	有效電量 (A·h/kg)
Al-Base	-0.95	無規定
Zn-Base	-0.95	

電位 (vs. Ag/AgCl [sw])

陽極設計利用率

陽極形狀	陽極利用率
Long slender Stand-off	0.90
Long ¹ flush-mounted	0.85
Short ² flush-mounted	0.80
Bracelet (half-shell type)	0.80
Bracelet (Segmented type)	0.75

1)陽極長度 $\geq 4 \times$ 厚度

2)陽極長度 $< 4 \times$ 厚度

4. 英國 British Standard, BSI-BS 7361, Cathodic Protection, Part1. Code of practice for land and marine applications, 1991

清淨海水中

陽極材料	陽極電位 Volts	消耗量 kg/A·yr
Mg-Al-Zn	-1.5 ~ -1.7	8
Zn-Al-Cd	-1.05	12
Zn-Hg	-1.05	12
Al-Zn	-0.97	4 ~ 8
Al-Zn-Sn	-1.1 ~ -1.15	4 ~ 9
Al-Zn-Hg	-1.05	約 3.5

電位 (vs. Ag/AgCl [sw])

5. 美國 NACE International，NACE- RP0176，Corrosion Control of Steel Fixed Offshore Platforms Associated with Petroleum Production，1994

海水中

陽極材料	陽極電位 Volts	有效電量 A·h/kg	消耗量 kg/A·yr
Al-Zn-Hg	-1.0~ 1.05	2760~ 2840	3.2 ~3.1
Al-Zn-In	-1.05~ -1.10	2290~ 2600	3.8~ 3.4
Al-Zn-Sn	-1.0~ -1.05	930~ 2600	9.5~ 3.4
Zn(MIL-A-1800lj)	-1.0~ -1.05	770~ 820	11.2~ 10.7
Mg(H-1 Alloy)	-1.4~ -1.6	1100	8.0

5.4.2 外加電流式陽極材料

外加電流式陰極保護所使用的陽極材料與犧牲陽極式不同，並依環境而異。根據日本「港灣鋼構造物防蝕、補修手冊(改訂版)」，在淡水環境中多使用白金系或鐵系，在海水環境中則使用白金系或鉛系；主要原因是因鉛系電極在海水中不易消耗，但在淡水中消耗速率極快，而鐵系的電極在海水中則會有不均勻的消耗。此外，使用外加電流式陰極保護，陽極與被保護構造物間距離至少相距 1.5 m 以上；當其間距離增加，雖然保護電位可均勻分布，但亦會造成電纜壓降的增加，且容易對相鄰構造物產生雜散電流干擾。外加電流式陽極材料之工作電流密度與消耗率依材料組成及廠商產品而異，今摘錄日本「港灣鋼構造物防蝕、補修手冊(改訂版)」所列，如表 5.2 所示。

5.4.3 參考電極

參考電極的選用應選擇在環境變化的情況下亦能維持穩定量測狀

態的電極。氯化銀(Ag/AgCl)參考電極有兩種，若電極中的電解液為海水，是為海水氯化銀(Ag/AgCl/seawater)參考電極；若電解液為飽和 KCl 溶液，則為飽和氯化銀(Ag/AgCl/sat'd KCl)參考電極。海水中使用的參考電極為海水氯化銀電極(Ag/AgCl/seawater)與飽和甘汞電極(SCE)，而土壤或氯離子含量較低的混凝土中，則多採用飽和硫酸銅電極(Cu/CuSO₄)。防蝕電位值依量測時使用的參考電極而異，表 5.3 為鋼構造物在海水中利用不同參考電極量測時之標準防蝕電位。各種參考電極的電位換算如表 5.4 所示。

5.4.4 整流器

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。整流器的總輸出電流值和電壓量應滿足陰極防蝕系統所須的電流量；且整流器運轉時，必須可在最大輸出的情況下持續操作。此外，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。有鑑於陰極防蝕系統接線錯誤將會造成鋼構造物的嚴重腐蝕，因此，整流器正負端應指定並採用不同尺寸的接線端子，以防止接線錯誤。端子應清晰標示“+陽極”和“-鋼構造物”。

5.4.5 導線

所有導線應為銅導體，蕊線以絕緣包覆，並以顏色和編號區別，且導線應裝設於導管內，或採取適當的保護措施。導管可採用 PVC 管或鋼套管，而進出導管的線路最終須由接線箱連接。

5.4.6 數位伏特計

陰極保護系統之防蝕效果須使用數位伏特計與參考電極來量測鋼

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

表 5.1 日本各類鋼板樁周邊係數(依鋼板樁型式而異)

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

資料來源：日本「港灣鋼構造物防蝕、補修手冊(改訂版)」，1997

表 5.2 外加電流式陽極材料性能

種 類	消耗率 kg/A·yr	工作電流密度 mA/m ²		
		海 水	淡 水	土 壤
高矽鐵(Fe-14.5% Si)	0.25 ~ 1.0	-	26	11
高矽鉻鐵(Fe-14.5% Si-4.5% Cr)	0.25 ~ 1.0	26	26	11
鉛合金(Pb-2% Ag)	0.01	500	不適	不適
鉛合金(Pb-6% Sb-1% Ag)	0.09	200	不適	不適
鍍鈦白金(Pt coated Ti)	1.0 E-6	400		
鍍鈮白金(Pt coated Nb)	1.0 E-6	400		80
鍍鉭白金(Pt coated Ta)	1.0 E-6	400		
黑鉛	0.1 ~ 1.0	10 ~ 30	8	8 ~ 11
氧化鐵	0.005 ~ 0.06	<120	<120	<60
碳鋼	6.8 ~ 9.1	無限制	無限制	5
鈦為基材外覆金屬氧化物	0.06	600		

資料來源：日本「港灣鋼構造物防蝕、補修手冊(改訂版)」，1997

表 5.3 海水中鋼構造物之防蝕保護電位標準

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

表 5.4 參考電極電位換算

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

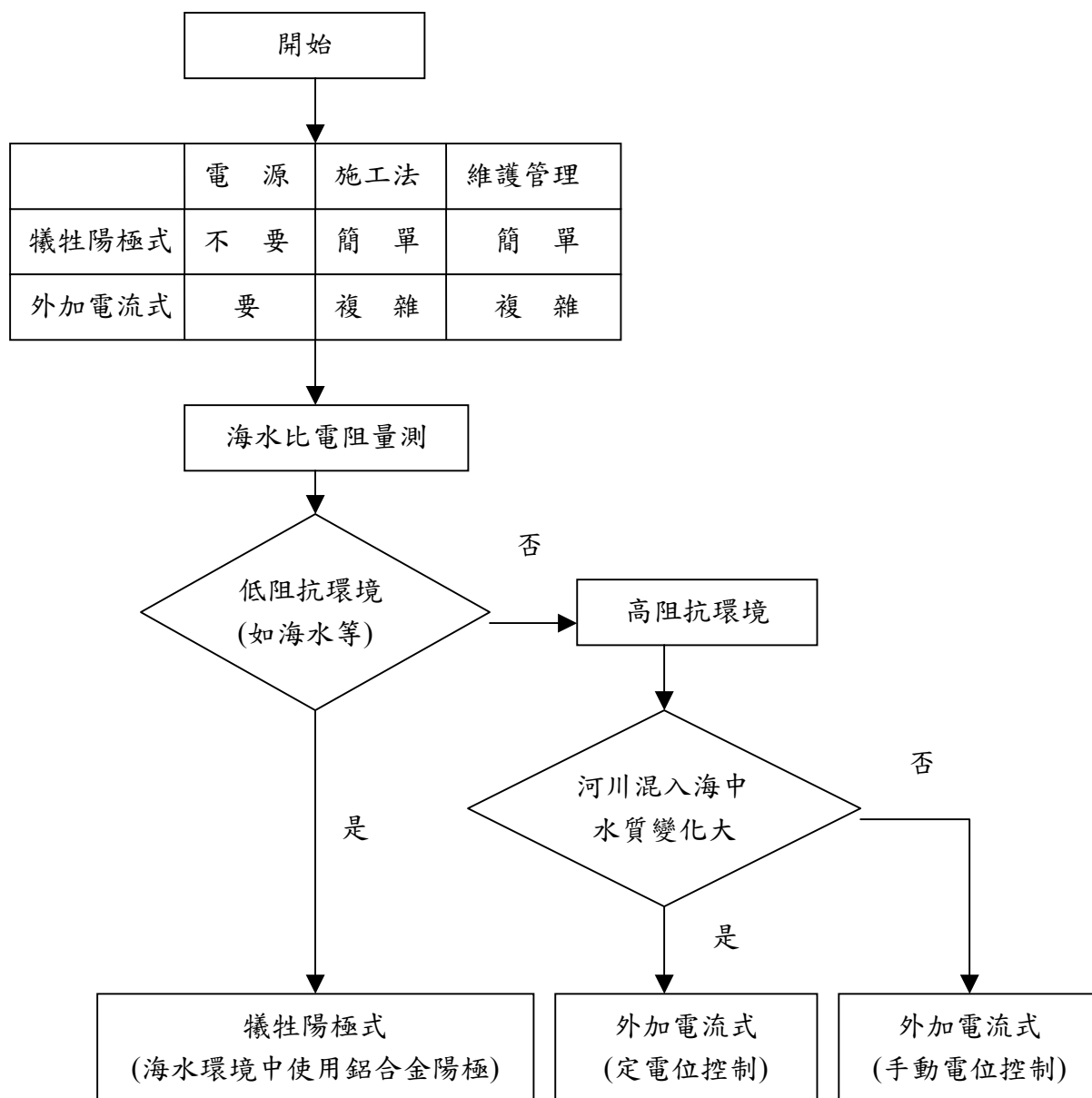


圖 5.1 陰極防蝕系統選擇流程圖

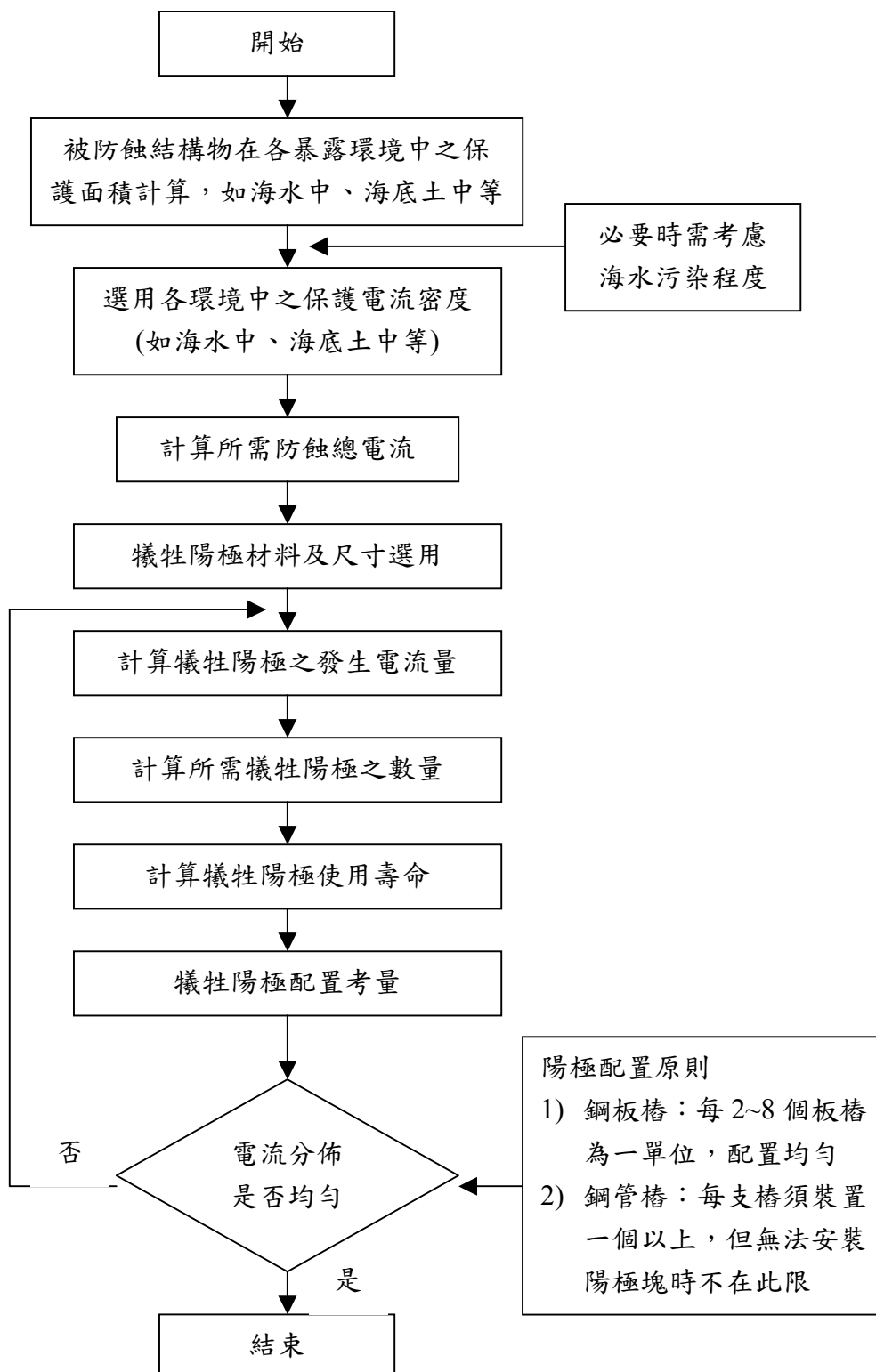


圖 5.2 犧牲陽極陰極保護設計計算流程圖

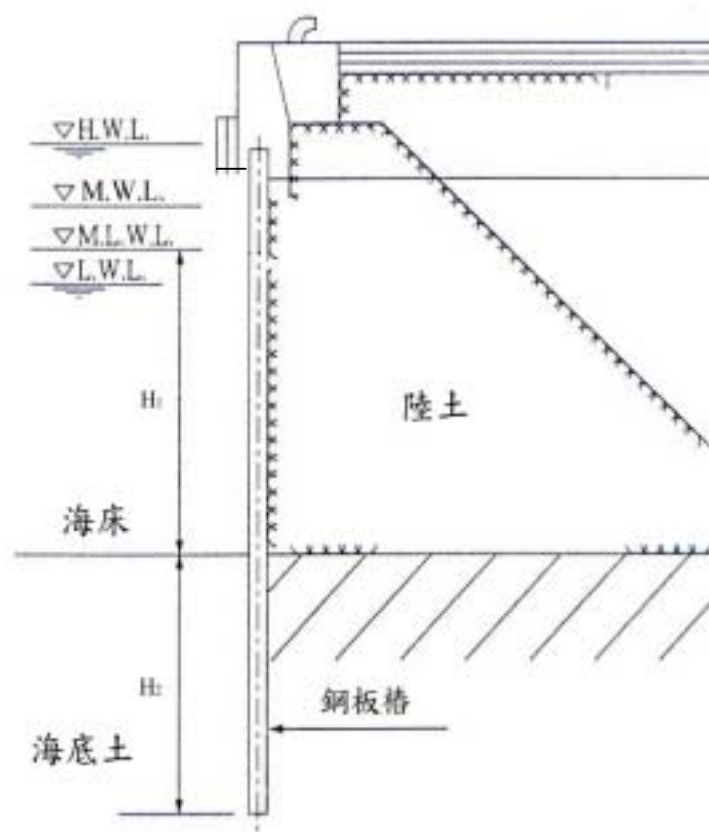


圖 5.3 海水中鋼樁長度計算示意圖

資料來源：日本「港灣鋼構造物防蝕、補修手冊(改訂版)」，1997

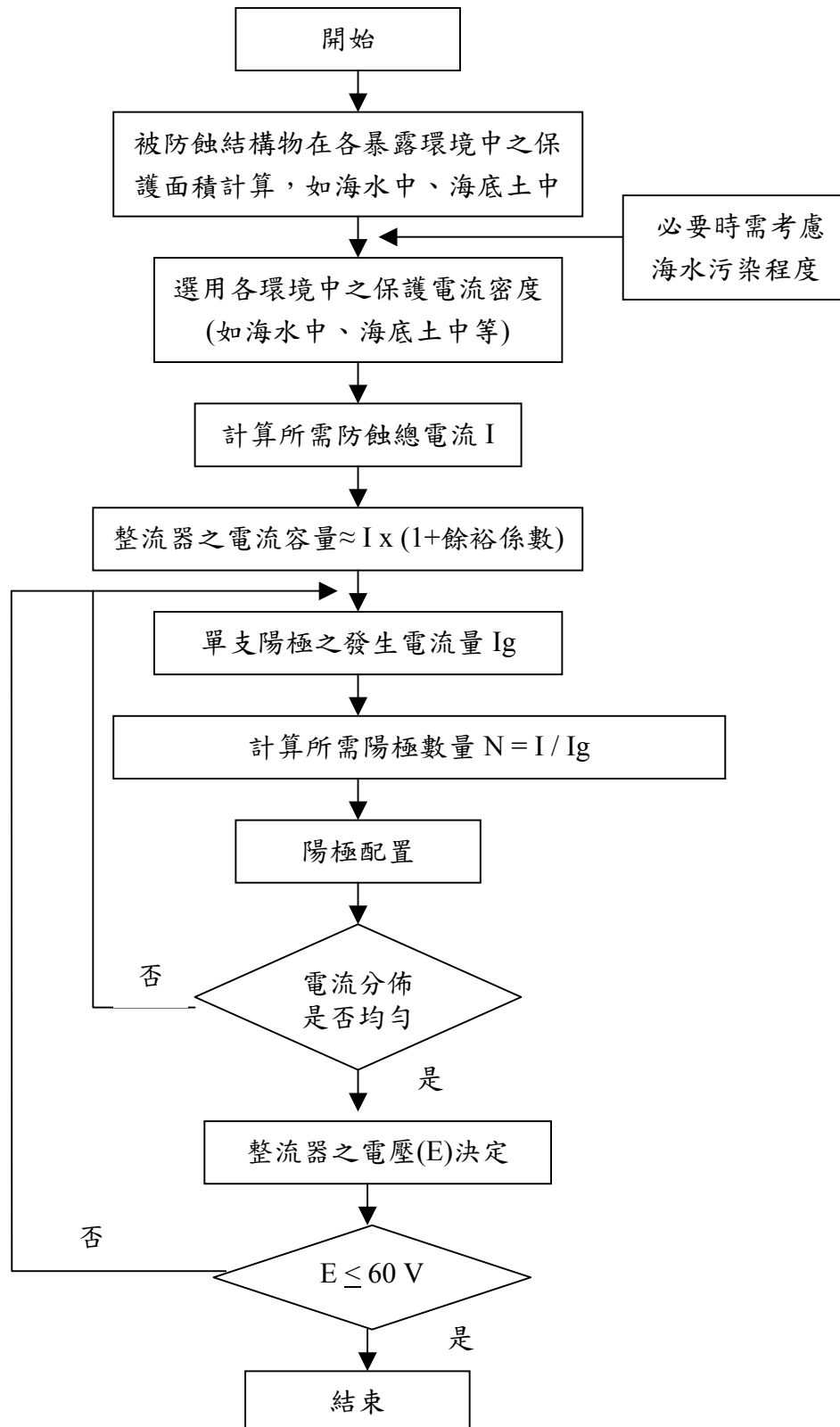


圖 5.4 外加電流式陰極保護設計計算流程圖

第六章 陰極防蝕安裝標準程序

6.1 犧牲陽極式陰極保護安裝

犧牲陽極可採用水中焊接法或螺栓固定法安裝。施工步驟如下，流程如圖 6.1 所示。

1. 材料檢查

施工前須進行材料數量確認，尺寸、質量之抽樣檢查。

2. 安裝位置標記

依照圖面設計，於鋼構造物上標示陽極與電位測試端子安裝位置。犧牲陽極應均勻的佈置於被保護結構設施上，且第一塊犧牲陽極頂端應低於平均低潮位下 30 cm。對鋼板樁而言，原則上以每 2~8 支板樁為一單位，配置在鋼板樁凸部；若不得已需安裝在凹部，則電位分布不均的問題應加注意。對鋼管樁而言，每支樁須裝置一塊以上；但無法安裝陽極塊時不在此限，在此條件下，各鋼管樁之間須使用適當尺寸的鋼條或導線相連接，使被保護體電連通。

3. 固定位置電位測試端子配置

沿碼頭法線方向以 50 m ~ 100 m 間隔為原則，配置一電位測試端子。

4. 電位測試導線安裝

將導線焊接至鋼構造物上，並在焊接處加以密封防水。

5. 陽極安裝

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

6. 電位量測

將鋼構造物的電位測試導線接於電位計“+”端，海水氯化銀 (Ag/AgCl/seawater) 參考電極接於電位計“-”端，量測電位。量測方式如圖 6.2 所示。

6.2 外加電流式陰極保護安裝

外加電流式陰極保護施工步驟如下，流程如圖 6.3 所示。

1. 材料檢查

施工前須進行材料數量確認，尺寸、質量之抽樣檢查。

2. 鋼構造物電連通改善

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

3. 固定位置電位測試端子配置

沿碼頭法線方向以 50 m ~ 100 m 間隔為原則，配置一電位測試端子。

4. 陽極安裝

安裝示意如圖 6.4 所示。陽極與被保護構造物間距離至少相距 1.5 m 以上；當其間距離增加，雖然保護電位可均勻分布，但亦會造

成電纜壓降的增加，且容易對相鄰構造物產生雜散電流干擾。

5. 負極排流及電位測試導線安裝

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

6. 整流器安裝

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

7. 導線安裝

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

8. 運轉前系統確認與通電測試

系統運轉前應先進行測試，以確保所有構件安裝、連結迴路均已正確的配線、連接、和標示；並檢測各迴路之電連通性。通電測試應設定整流器輸出值為設計保護電流量之 20%，使用適當的伏特計和參考電極，量測鋼構造物電位變化方向，以確定 DC 輸出的正確極性。

9. 完工檢查

完工時，除了對工程紀錄照片等進行檢查外，亦須進行構造物的

防蝕電位量測，確認被保護構造物防蝕電位值是否為-800 mV (vs. Ag/AgCl/seawater)或更”負”。

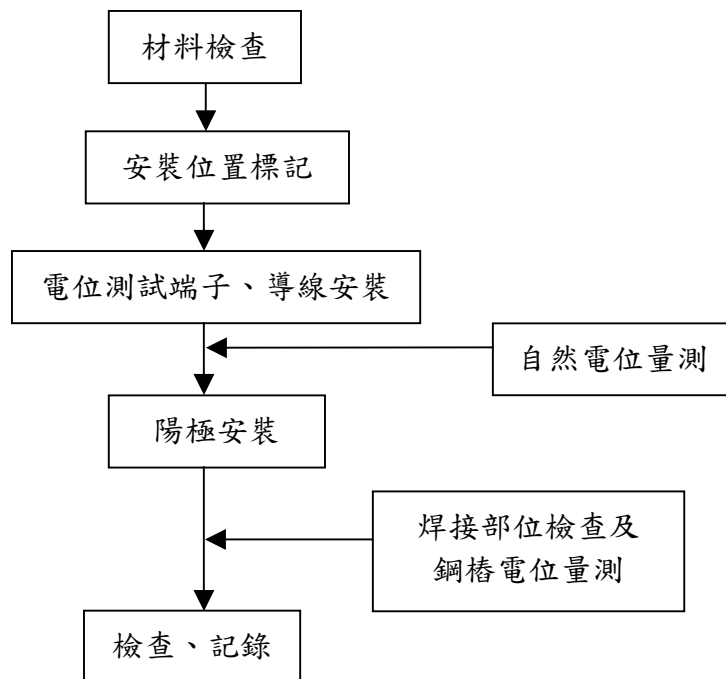


圖 6.1 犧牲陽極式陰極保護安裝流程圖

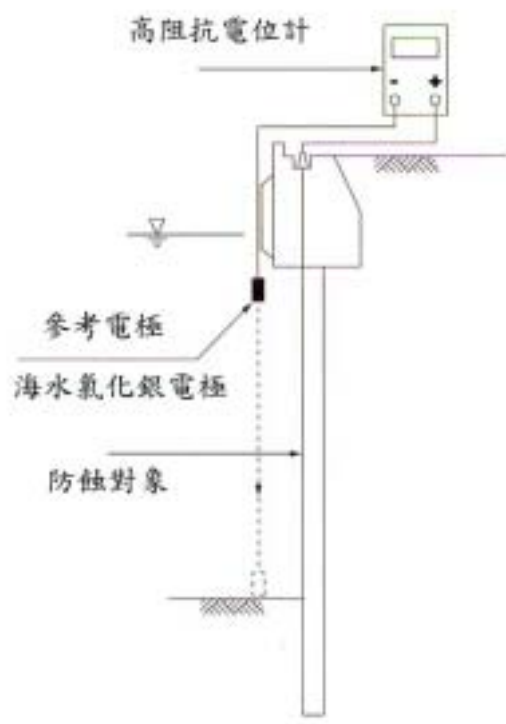


圖 6.2 電位量測示意圖

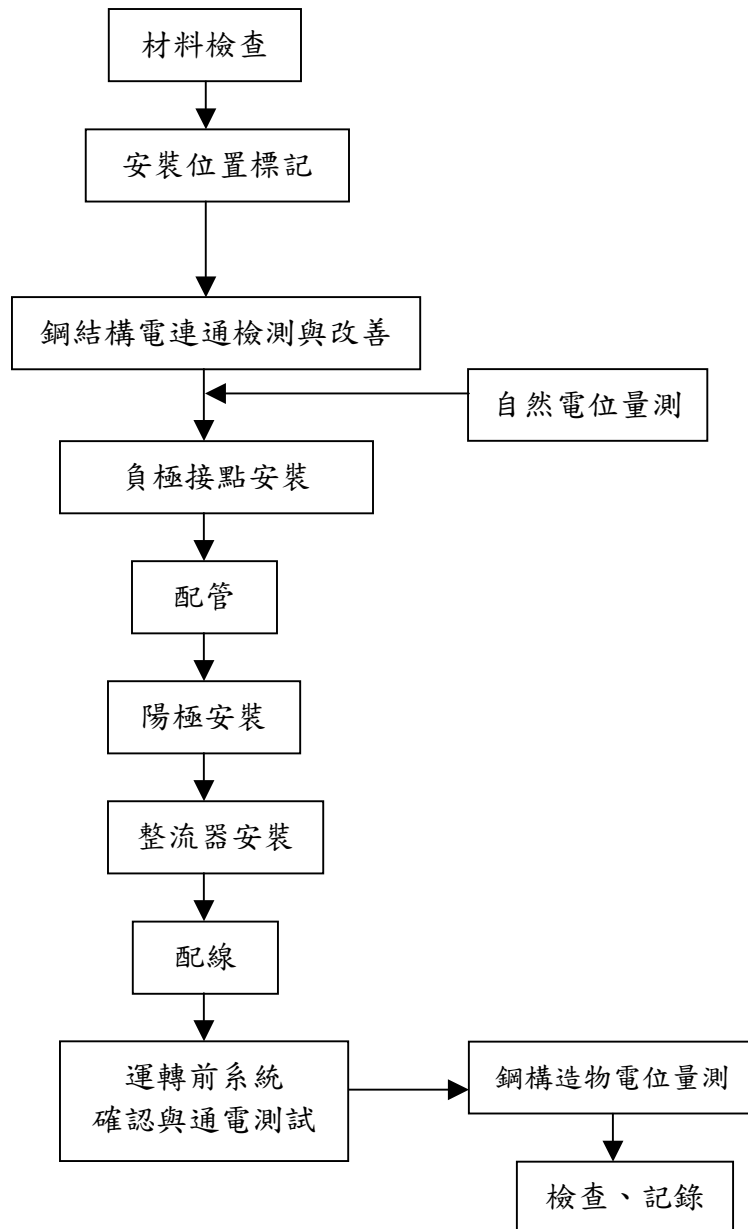


圖 6.3 外加電流式陰極保護安裝流程圖

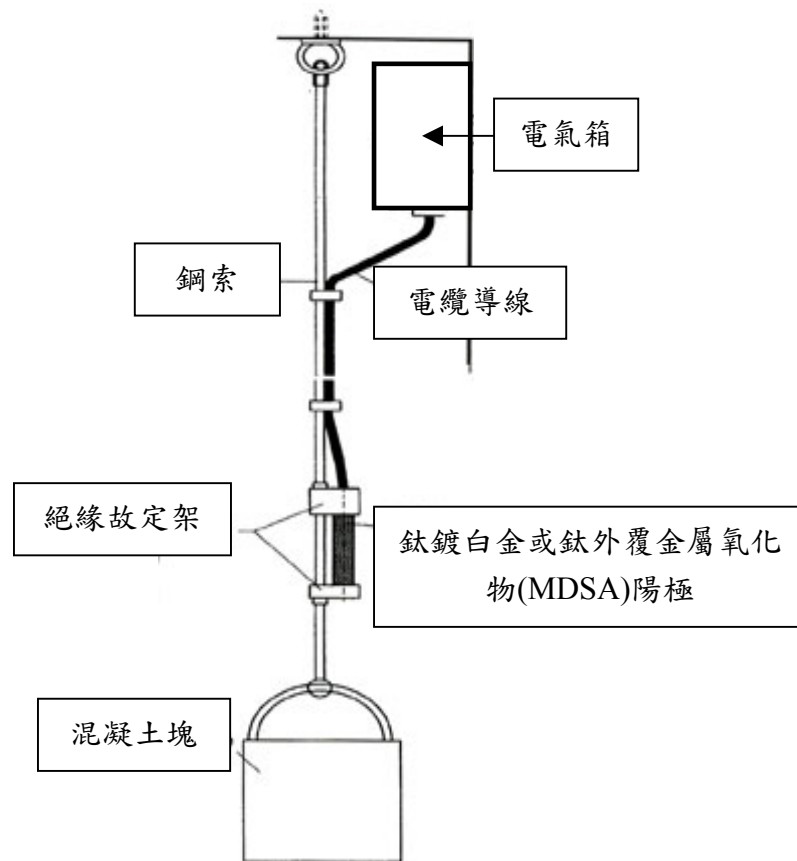


圖 6.4 外加電流式陽極安裝示意圖

第七章 鋼板樁碼頭陰極防蝕設計案例

鋼板(管)樁陰極防蝕技術在國內已實行多年，使用以來防蝕效果良好；今摘錄中華顧問工程司針對國內某港口鋼板樁碼頭之陰極防蝕設計案例，敘述如下：

1. 岸壁構造及環境

碼頭	水深 (EL. m)	鋼板樁			浸漬長度 (m)		
		型式	長度(m)	底部高程 (m)	海水中	石礫中	海底土中
A	-15.0	HZ 775	28	-26.9	10.9	1.0	14.5
		ZH 12	22	-21.1	5.1	1.0	14.5
B	-15.0	HZ 775	28	-26.9	10.9	1.0	14.5
		ZH 12	22	-21.1	5.1	1.0	14.5
C	-14.0	HZ 775A	26	-24.9	9.9	1.0	13.5
		ZH 12	20	-19.1	4.1	1.0	13.5
D	-14.0	HZ 775	26	-24.9	9.9	1.0	13.5
		ZH 12	20	-19.1	4.1	1.0	13.5

2. 設計條件

- (1) 海水比電阻：25 $\Omega \cdot \text{cm}$ 。
- (2) 防蝕電流密度選用：
 - 海水中= 100 mA/m^2
 - 石礫中= 50 mA/m^2
 - 海底土中= 20 mA/m^2
- (3) 陰極防蝕設計年限：20 年。
- (4) 陰極防蝕方式：犧牲陽極法。

3. 防蝕面積

以碼頭岸壁長度 2.065 m 為一單位, 每單位內包含 HZ 775 與 ZH 12 鋼板樁各一支, 每單位鋼板樁寬度:

$$\text{HZ 775} = 0.99 \text{ m}$$

$$\text{ZH 12} = 1.27 \text{ m}$$

$$\text{合計} = 2.26 \text{ m}$$

則在碼頭單位寬度(2.065 m)內鋼板樁的防蝕面積
= 鋼板樁所在環境長度 x 每單位鋼板樁寬度

環境 \ 碼頭	A 與 B	C 與 D
海水中	$14.5 \times 2.26 = 32.77 \text{ m}^2$	$13.5 \times 2.26 = 30.51 \text{ m}^2$
石礫中	$1.0 \times 2.26 = 2.26 \text{ m}^2$	$1.0 \times 2.26 = 2.26 \text{ m}^2$
海底土中	$10.9 \times 0.99 = 10.79 \text{ m}^2$ $5.1 \times 1.27 = 6.48 \text{ m}^2$	$9.9 \times 0.99 = 9.80 \text{ m}^2$ $4.1 \times 1.27 = 5.21 \text{ m}^2$

4. 所需防蝕電流=防蝕電流密度 x 防蝕面積

環境	防蝕電流密度	A 與 B 碼頭	C 與 D 碼頭
海水中	100 mA/m^2	3.28 A	3.05 A
石礫中	50 mA/m^2	0.11 A	0.11 A
海底土中	20 mA/m^2	0.35 A	0.30 A
合 計		3.74 A	3.46 A

5. 陽極選用

(1) 陽極材料：鋁合金陽極。

(2) 尺寸：(210 + 250) x 240 x 1000 mm；蕊心所在之陽極兩面以

煤焦樹脂塗佈。

(3) 陽極壽命計算

陽極等效直徑

$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times (21 + 25) \times 24}{2\pi}} = 26.51 \text{ cm} > \frac{100}{6} \text{ cm}$$

$$\text{陽極表面積} = (21 + 25 + 24.08 \times 2) \times 100 = 9416 \text{ m}^2$$

$$\text{犧牲陽極對海水的電阻} \quad R_a = \frac{0.266\rho}{\sqrt{A}} = \frac{0.266 \times 25}{\sqrt{9416}} = 0.06853 \Omega$$

$$\text{犧牲陽極發生電流量} \quad I_g = \frac{E}{R_a} = \frac{0.25}{0.06853} = 3.648 \text{ A}$$

$$\text{陽極淨重} \quad N.W. = \left(\frac{21 + 25}{2} \times 24 - 5 \times 1.6 \right) \times 100 \times 2.7 \times 10^{-3} = 146.9 \text{ kg}$$

$$\text{陽極壽命} \quad L = \frac{\text{陽極淨重}}{\text{消耗率} \times \text{平均電流}} = \frac{146.9}{3.5 \times \frac{3.648}{2}} = 23.01 \text{ yr}$$

6. 陽極數量

(1) 每 4.13 m (=2.065 m x 2) 單位寬度內陽極設置數量：

碼頭	陽極數量計算 所需總電流量 ÷ 平均電流量	陽極數量(塊)
A 與 B 碼頭	(3.74 A x 2) ÷ (3.684 A ÷ 2)	4.2 ~ 5
C 與 D 碼頭	(3.46 A x 2) ÷ (3.684 A ÷ 2)	3.8 ~ 4

(2) 以 3 個水深配置，分別為 -1.0 m，-5.0 m，-9.0 m

第八章 陰極防蝕驗收標準程序

8.1 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 -850mV。相對的，對飽和氯化銀參考電極(Ag/AgCl [sat'd KCl])則需小於 -750mV，對高純度鋅參考電極(99.99%)需大於 250mV。
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)300mV 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)100mV 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。

1992 年，美國腐蝕工程師協會修訂陰極保護電位標準為 Standard RP-0169-92，對鋼鐵而言：

1. 在陰極保護下，利用飽和硫酸銅參考電極量測到的負電位至少為 850mV。
2. 對飽和硫酸銅參考電極而言，負極化電位至少為 850mV。
3. 在結構物表面與穩定參考電極間之陰極極化量至少為 100 mV。

Standard RP-0169-92 的比較為：第一項標準是指在陰極保護下通電時，被保護結構物的電位必須小於-850mV，且在電位量測時，必須注意由土壤、結構物塗層、包覆等所造成的 IR drop；換句話說，在直接量測地下結構物電位進行保護電位評定時，結構物的保護電位應等於 -850mV 加上 IR drop 之影響（即可能為-1100 mV 或更負，日本採用標準）。第二項標準是指在陰極保護斷電瞬間量測結構物的電位(極化電位)必須小於-850mV；在斷電的情況下，無電流流過結構物塗層、包覆及土壤，自然無 IR drop 存在，此時結構物的電位必須小於-850mV。第三項標準與 RP-0169-83 之第三項標準相同，即斷電瞬間結構物的陰極極化量至少為 100 mV。

近年來國內外多採用修訂後之 Standard RP-0169-92 作為陰極防蝕設計及驗收規範，凡符合三項標準中之其中一項，均視為達到陰極保護之效果。2002 年，修訂後之 Standard RP-0169-02 之陰極保護標準與 Standard RP-0169-92 相同，但內容增加了陰極保護設計與施工之注意事項。

表 8.1 為鋼構造物在海水中利用不同參考電極量測時之標準防蝕電位。在含氧(aerobic)的環境中，浸漬於海水中鋼構造物的防蝕電位，

以海水氯化銀參考電極(Ag/AgCl/seawater)量測，電位值須達到-800 mV 以下，方被判定達到陰極保護標準；而在厭氧(anaerobic)環境中(如海底泥中)，鋼構造物的防蝕電位須達到 -900 mV 以下 (vs. Ag/AgCl/seawater)，但最大防蝕電位不宜超過 -1100 mV (vs. Ag/AgCl/seawater)，如表 8.2 所示。至於塗裝被覆鋼構造物，防蝕電位應控制在-800 mV ~ -1100 mV (vs. Ag/AgCl/seawater)之間，主要原因是為避免過大的保護電流導致塗膜劣化或剝離。

8.2 保護效果檢測方法

港灣鋼構造物陰極防蝕電位的檢測是利用參考電極與電位計進行，將鋼構造物的電位測試導線接於電位計”+”端，海水氯化銀(Ag/AgCl/seawater)參考電極接於電位計”-”端，量測方式如圖 6.2 所示。

防蝕效果的判斷標準如表 8.1 所示，若鋼構造物之電位值較標準防蝕電位值為”負”時，鋼構造物是為保護狀態，若電位值比標準防蝕電位值”正”時，則表示保護不足或防蝕效果不佳。以海水氯化銀參考電極為例，若鋼構造物之電位值較-800 mV 為”負”，鋼構造物為保護狀態，但若值較-800 mV 為”正”，則表示保護不足或防蝕效果不佳，判定案例如圖 8.1 所示。

表 8.1 含氧環境與厭氧環境之防蝕電位標準

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

表 8.2 海水中鋼構造物之防蝕保護電位標準

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

註：氯化銀(Ag/AgCl)參考電極有兩種，若電極中的電解液為海水，是為海水氯化銀(Ag/AgCl/seawater)參考電極；若電解液為飽和 KCl 溶液，則為飽和氯化銀(Ag/AgCl/sat'd KCl)參考電極。

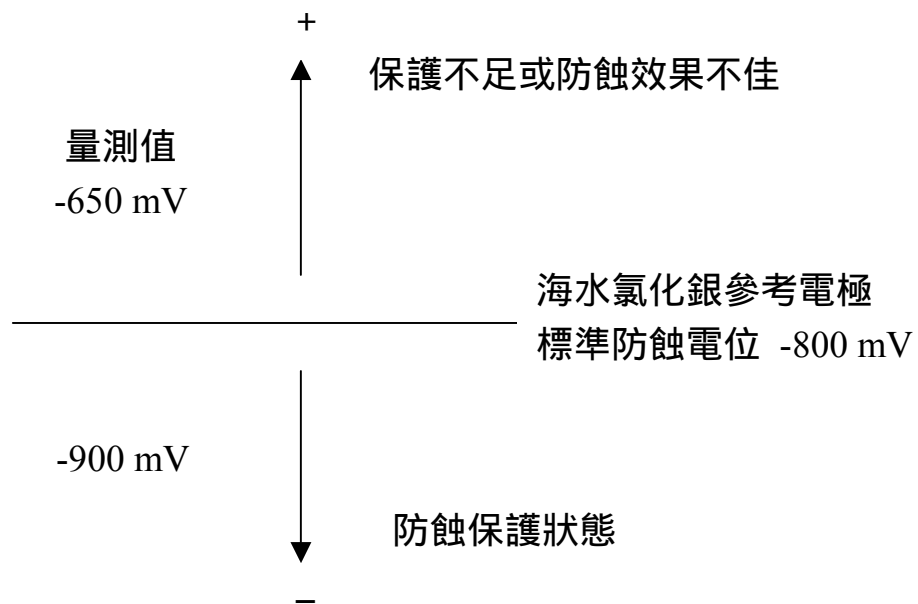


圖 8.1 陰極防蝕效果判定

第九章 陰極防蝕操作、系統維護管理

9.1 陰極防蝕系統操作

港灣鋼構造物犧牲陽極式陰極保護系統在犧牲陽極塊安裝後必須定期進行構造物的防蝕電位量測；但針對外加電流式陰極保護系統，安裝後必須進行運轉前系統確認與通電測試，即系統運轉前應先進行測試，以確保所有構件安裝、連結迴路均已正確的配線、連接、和標示，並檢測各迴路之電連通性。通電測試應設定整流器輸出值為設計保護電流量之 20%，使用伏特計和參考電極，量測鋼構造物電位變化方向，以確定 DC 輸出的正確極性。

9.2 陰極防蝕系統維護管理

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

犧牲陽極式陰極防蝕系統：

(1) 設計和安裝

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

(2) 操作和維護手冊

手冊應包含系統操作所需的資料。包括：詳細圖說、使用材料性能資料、檢測結果數據等：

A 節 - 操作

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

B 節 - 維護

- 所有設備安裝的技術資料
- 日常維護和操作的指引，包括檢查步驟、診斷與接線圖
- 陽極製造商詳細資料和備用品清單
- 陽極更新程序，包括使用材料與工具資料

外加電流式陰極保護系統

(1) 設計和安裝

- 陽極材料
- 陽極安裝
- 導線、導管與接線箱
- 被保護構造物電通性與連接方法
- 負極接點與電位量測端子位置
- 電源、接地、與固定方式
- 施工日期和時間(說明安裝問題和解決方法)
- 整流器之電壓與電流的最大容許值

(2) 操作和維護手冊

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

A 節 - 操作

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

B 節 - 維護

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

2. 維護管理

維護管理分為一般檢查與詳細檢查。一般檢查的項目為電位量測；詳細檢查為目視檢測、電位量測與陽極調查。一般檢查之頻率為完工驗收後第一年每季一次，之後，每年進行一次檢查；詳細檢查為每五年一次或當一般檢查發生問題時立即進行。

一般檢查的電位量測為在碼頭上已設置固定電位測試端子的地方，進行電位量測。端子的配置，沿碼頭法線方向，以 50 m ~ 100 m 間隔為原則。量測時，於端子位置，以海水氯化銀參考電極沿構造物深度方向，以 1 m 或適當的間隔進行電位量測。詳細檢查則包括：

- (1) 目視檢測：派遣潛水夫，利用近距離目視檢查，注意構造物與犧牲陽極塊是否有任何損壞、腐蝕或變化的位置及其程度。
- (2) 電位量測：以檢測率 20% 以上為目標，設法線上每 3 m ~ 5 m 進行被保護構造物之電位量測，在棧橋式碼頭之鋼管樁則以前列樁為檢測對象。構造物深度方向，以 1 m 或適當的間隔進行電位量測。
- (3) 犧牲陽極調查：針對陽極安裝情形與陽極消耗量等相關事項進行調查。陽極安裝情形係指陽極安裝數量的確認，陽極消耗量則是選擇陽極數量之 5 % ~ 10 % 進行調查，由潛水夫水下量測陽極尺寸，或切除陽極蕊心移至陸地上秤重，計算陽極消耗量及剩餘使用年限。計算方法如下：

A. 依據剩餘陽極形狀尺寸(如圖 9.1 所示)之計算法：

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

式中，

$$D : \text{平均周長} = (D_1 + D_2 + D_3) / 3$$

D_1, D_3 : 距離蕊心端約 10 cm 之剩餘陽極周長

D_2 ：剩餘陽極中央周長

l ：剩餘陽極長度

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

C. 陽極壽命計算

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

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

3. 防蝕效能評估

依據電位量測及陽極調查結果進行陰極防蝕效能評估，即電位測定結果如在防蝕保護電位-800 mV (vs. Ag/AgCl/seawater) 以下或更”負”，則被保護構造物維持防蝕狀況；若電位在-800 mV 以上或更”正”時，則其部份保護不足，須做詳細檢查。可參考前次檢查結果探究原因，制訂對策與未來運轉建議。

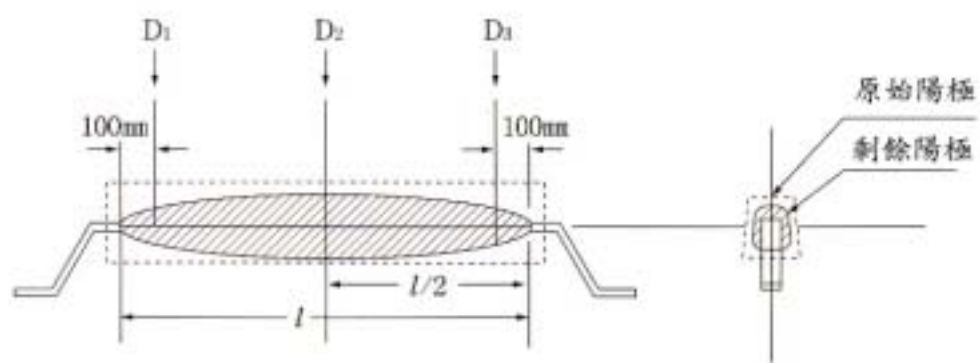


圖 9.1 剩餘陽極形狀尺寸計算

第十章 「防蝕準則(草案)-R.C.結構物部份」-蘇澳港 13 號碼頭鋅熔射犧牲陽極式陰極防蝕施工案例

10.1 工程位置

蘇澳港 13 號碼頭為 RC 樁棧橋式碼頭，民國 70 年完工，碼頭平面位置如圖 10.1，斷面圖如圖 10.2 所示。由於碼頭底板為預鑄鋼筋混凝土結構，常年處於潮濕的環境中(滿潮時底板與海水面間之距離約 1m)，受到海水與氯鹽入侵，早已有鋼筋銹蝕、混凝土剝落的現象。為解決此問題並瞭解鋅熔射在鋼筋混凝土結構防蝕上的應用，民國 91 年 6 月，工研院工材所與東昇琳科技公司選擇 13 號碼頭兩基樁間之底板進行犧牲陽極式陰極保護研究，試驗位置如圖 10.3 所示，底板鋼筋配置如圖 10.4 所示。再者，為評估鋅熔射工法的有效性，今將試驗底板(面積 48 m²)劃分為二個區域，一個區域不作熔射處理，僅就鋼筋現狀進行混凝土修補，而另一區域則進行植筋、紮筋與鋅熔射施工等工作，以為比較。

10.2 鋅熔射犧牲陽極式陰極保護設計

1. 鋼筋表面積計算

由於工程位置之鋼筋有嚴重銹斷情況，今依據原碼頭底板鋼筋配置進行植筋、紮筋補強工作，鋼筋尺寸與數量如下：

- (1) 植筋：#4 鋼筋 28 支，#6 鋼筋 80 支。其中#4 鋼筋長度 90 cm，入孔深度 35 cm，紮筋長度 55 cm；#6 鋼筋長度 100 cm，入孔深度 35 cm，紮筋長度 65 cm。
- (2) 紮筋：#4 鋼筋 28 支，長度 710 cm，#6 鋼筋 40 支，長度 410

cm。

(3) #4 鋼筋直徑= 1.27 cm , #6 鋼筋直徑= 1.91 cm

(4) 鋼筋總面積=植筋面積+紮筋面積= $(1.27/2)^2 \pi \times 55 \times 28 + (1.91/2)^2 \pi \times 65 \times 80 + (1.27/2)^2 \pi \times 710 \times 28 + (1.91/2)^2 \pi \times 410 \times 40 = 89025 \text{ cm}^2 \approx 8.9 \text{ m}^2$

2. 電流需求量計算

防蝕電流密度需求視結構物之特性與腐蝕性質而定，根據英國混凝土學會技術規範 Concrete Society Technical Report No. 37 建議，針對地上結構物，鋼筋表面保護電流密度為 10~20 mA/m²，則

鋼筋所需保護總電流= $8.9 \text{ m}^2 \times 20 \text{ mA/m}^2 \approx 180 \text{ mA} = 0.18 \text{ Amp}$

3. 鋅熔射層厚度計算

假設欲保護年限為 30 年，所需鋅之重量 W(kg)，則

$$W = \frac{CR \times L \times ATC}{E \times U}$$

上式中， CR=消耗率(kg/A.year)= 11.8

L=使用壽命(year)= 30

ATC=平均總電流(amps)= 0.18

E=效率常數= 0.95

U=利用因子= 0.85

$$\text{所需鋅重量 } W = \frac{11.8 \times 30 \times 0.18}{0.95 \times 0.85} = 78.9 \text{ kg} \approx 80 \text{ kg}$$

今混凝土表面熔射面積 = 420 cm x 710 cm，則

$$\text{所需鋅熔射層厚度 } T (\mu\text{m}) = \frac{W}{D \times A}$$

上式中， W = 重量(g)， D = 密度(g/cm³)， A = 面積(cm²)

$$\text{所需鋅熔射層厚度 } T (\mu\text{m}) = \frac{80 \times 1000}{7.14 \times 420 \times 710} = 0.0375 \text{ cm} = 375 \mu\text{m}$$

10.3 電極安裝

電極安裝位置如圖 10.5 所示，其中永久式 Ag/AgCl 參考電極有 6 支，平均分佈於碼頭底板施工程範圍內，用以量測鋼筋之自然與保護電位；鋅塊陽極(3cm x 3cm x 5cm) 9 個，使用目的為便利鋅熔射層的導線連接，即藉由鋅塊在混凝土表面的埋設，將鋅熔射噴塗至鋅塊表面，使之與混凝土表面之熔射層電連通，促使鋅熔射層陽極均勻放電。

10.4 施工步驟

施工流程如圖 10.6 所示，步驟如下：

1. 鋼筋混凝土表面處理：將剝落混凝土敲除，並將銹蝕鋼筋噴砂除銹，露出金屬光澤；若鋼筋銹蝕情況嚴重，則予以切除。
2. 使用空氣槍將混凝土表面碎削清除並以噴火槍趨除表面水氣。

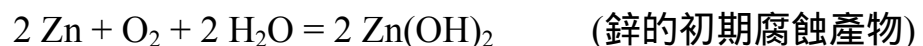
3. 鋼筋電連通測試。
4. 混凝土修補披覆。
5. 植筋與紮筋。
6. 電極與導線連接：包括 Ag/AgCl 參考電極，鋅塊陽極與鋼筋導線之連接。
7. 混凝土披覆，保護層厚度 7.5 cm。
8. 混凝土表面鋅熔射：使用材料為 99.9%純鋅，以電弧方式熔射，熔射層厚度 400 μm 。
9. 封孔：熔射後 4 小時內以 water based 無機鋅塗料封孔，厚度 25 μm 。
10. 鋼筋電位測試箱安裝：測試箱內包括參考電極接線端子 6 個，鋅陽極接線端子 9 個與鋼筋接線端子 15 個。

10.5 工程評估

熔射施工後之防蝕效果評估分別於施工完成後 90 日、120、180 日與 270 日進行。

10.5.1 工程位址目視檢查

為瞭解熔射施工後混凝土表面鋅熔射層是否有劣化或混凝土剝落的情形，防蝕保護 180 日後派遣潛水人員檢視工程位置，結果顯示，混凝土無剝落情形且鋅熔射層封孔塗層表面有白色物質存在。推論可能是因鋅進行陽極反應，以致鋅的腐蝕產物(鋅白)由封孔孔隙滲出；換句話說，鋅熔射犧牲陽極式的陰極保護，鋅的氧化需要氧氣與水份的存在以進行下列反應，



而封孔塗料是採透氣性 water based 的無機鋅塗料，所以當陰極保護作用時，鋅陽極放電而其腐蝕產物會由封孔塗料的孔隙滲出。

10.5.2 鋼筋之電連通與鋼筋電位

為使陰極防蝕的保護電流均勻分佈到被保護結構物之鋼筋，鋼筋間的電連通性必需加以確認，即使用熔接鋼絲網或鐵絲搭接的鋼筋，只要電阻不超過 $1\ \Omega$ ，即可保證導電性質良好。施工時既有鋼筋間的電阻值為 $300 \sim 400\ \text{K}\Omega$ ，植筋與紮筋後鋼筋間的電阻值為 $0.2 \sim 0.3\ \Omega$ ，新舊鋼筋間無電連通。即陰極防蝕的保護電流將均勻分佈至新植鋼筋的表面，並不會因電連通而傳導至已銹斷的鋼筋，造成保護電流設計不足之情況。

鋼筋電位變化的情形如表 10.1 所示。表中符號 B# vs. R# 表示參考電極 R# 所在位置之鋼筋 B# 的電位，其中，R1 參考電極位於未作熔射(陰極保護)處理之區域，而 R2 - R6 參考電極則位於陰極保護區域。顯然的，混凝土表面未進行鋅熔射處理時混凝土內的鋼筋，其電位(B1 vs. R1)維持在 $-190 \sim -160\ \text{mV vs. Ag/AgCl}$ 之間，而在熔射陰極保護範圍內，各參考電極所在之鋼筋電位隨保護時間的增加而往正值方向移動，並趨於一定值。究其原因，是因鋅熔射陽極與鋼筋搭接進行陰極保護初期，鋼筋(裸鋼)需要極化，以致鋅熔射陽極放電，造成鋼筋電位降低；隨著保護時間的增加，鋼筋極化已呈穩定狀態，保護電流僅需維持鋼筋之極化，故與極化之初相比較，鋼筋電位較正且趨於穩定狀態。

10.5.3 陰極防蝕效果評估

依據 NACE International RP290-2000^[13] 規範，斷電後鋼筋電位之退極化量通常是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 4～24 小時(或更長)後的電位，其差值必需在 100 mV 以上(即斷電後鋼筋電位去極化量 ≥ 100 mV)，方能確定陰極防蝕達到設計之預期效果。即

$$V_{\text{depole}} = |V_{\text{OFF, final}} - V_{\text{OFF, instant}}| \geq 100 \text{ mV}$$

上式中， V_{depole} = 斷電後鋼筋電位之退極化量

$V_{\text{OFF, final}}$ = 瞬間斷電後最終的鋼筋電位(通長為瞬間斷電後 4～24 小時之鋼筋電位)

$V_{\text{OFF, instant}}$ = 瞬間斷電之鋼筋電位

圖 10.7 至圖 10.12 分別為不同暴露時間各參考電極所在位置鋼筋通斷電電位之時間序列圖。由於本工程是採犧牲陽極式陰極保護，故通電狀態是將鋅熔射陽極導線與鋼筋陰極導線在測試箱內以接線端子相連接，使陽極與陰極形成迴路而電連通，而斷電狀態是將測試箱內之陽極導線與陰極導線分離，造成斷電情況；量測時以電位記錄器記錄鋼筋電位，每秒記錄一次，連續記錄 8 個小時以上(其中，通電時間約 1 小時，斷電時間約 7 小時)。由於參考電極 R1 位於非熔射區，鋼筋電位不受陰極保護通斷電之影響，故量測時段內鋼筋的電位維持一定值，如圖 10.7 所示。圖 10.8 為參考電極 R2 量測所得之鋼筋電位，陰極保護時鋼筋的電位值較負，瞬間斷電時電位急劇往正值方向移動，隨後漸趨於一穩定值；由於陰極保護通電時參考電極量測到的電位為鋼筋的極化電位加上混凝土電阻產生的電壓降(IR drop)，所以斷電瞬間急劇上升的電位，是為混凝土產生的 IR drop，而瞬間斷電 0.1～1 秒後所量測到的電位，為扣除混凝土 IR drop 影響之鋼筋極化電位(即 $V_{\text{OFF, instant}}$)。相同的現象在其他熔射範圍內(除參考電極 R5 所在位置外)，其餘參考電極(R3、R4、R6)量測時亦有相同的趨勢，如圖 10.9 至圖 10.12；究其原因，可能是因 R5 所在位置的混凝土經常受海水潑

濺而呈水飽和狀態(wet saturated)，混凝土有電容效應產生，鋼筋所需退極化時間較長^[13]，以致在通斷電量測時間內(8 小時)，鋼筋之通電電位與斷電電位相近；如防蝕保護 270 日後，R5 所在位置之鋼筋，其通電電位為-413 mV (vs. Ag/AgCl)，而斷電 6 小時後之電位為-408 mV (vs. Ag/AgCl)。

表 10.2 至表 10.5 分別為不同暴露時間各參考電所在位置鋼筋之通電電位、斷電電位、7 小時退極化後之電位、通電時由混凝土電阻產生的電壓降(IR drop)、鋼筋極化量以及保護電流密度之數據。在防蝕保護 90 日後，保護電流密度為 7.8 mA/m^2 ，但鋼筋極化量均小於 100 mV 之保護標準，經檢視，發現鋅陽極塊編號 A5 的位置(如圖 10.5 所示)，其負極排流點(鋼筋導線連接處)鬆脫，以致鋅陽極塊 A5 附近的鋅熔射層無法發揮局部保護功效，造成附近參考電極 R4 所測得鋼筋之極化量較低；但綜合而言，鋼筋間的電連通將可吸引其他位置的鋅熔射層進行陰極保護。防蝕保護 120 日後，保護電流密度為 16.7 mA/m^2 ，除參考電極 R4 與 R5 所在位置外，鋼筋極化量均大於 100 mV，顯示已達陰極保護標準；其中，R4 位置是因其附近鋼筋導線鬆脫，R5 位置是因混凝土呈水飽和狀態，以致鋼筋極化量小於 100 mV。然而比較熔射與非熔射區域之鋼筋電位，R4 與 R5 位置之鋼筋斷電電位分別為-290 mV 與 -396 mV (vs. Ag/AgCl)，而 R1 位置之鋼筋電位-164 mV (vs. Ag/AgCl)，顯示 R4 與 R5 區域之鋼筋已呈陰極極化現象，雖然極化量小於 100 mV，但仍有陰極保護效果。表 6.6 與表 6.7 分別為防蝕保護 180 日與 270 日後之結果，保護電流密度分別為 8.9 mA/m^2 與 11.1 mA/m^2 ，其中，鋼筋退極化量均與 120 日之數據相近，顯示陰極保護在 120 日時，鋼筋極化已達穩定狀態，且由於鋼筋之間的電連通性，混凝土表面鋅熔射犧牲陽極式的陰極保護，可有效降低鋼筋之腐蝕速率。

10.6 評估結果

1. 針對鋼筋混凝土結構，鋅熔射犧牲陽極式的陰極保護適用於濕度較高的環境，如海洋環境中的飛沫帶與潮汐帶；而大氣帶因濕度較低，混凝土電阻較大，鋅熔射層可能無法提供有效的保護電流；水中帶則因鋅熔射層消耗速率過快，無法進行長時間之陰極保護。
2. 蘇澳港 13 號碼頭熔射工程陰極保護 120 日後，參考電極 R2、R3、R6 位置鋼筋的退極化量大於 100 mV，符合設計保護標準；而 R4 位置因鋼筋導線鬆脫，R5 位置因混凝土呈水飽和狀態，以致鋼筋極化量小於 100 mV。然而 R4 與 R5 位置鋼筋瞬間斷電電位分別為 -290 mV 與 -396 mV (vs. Ag/AgCl)，與無熔射(R1 位置)區域之鋼筋電位 -164 mV (vs. Ag/AgCl) 比較，R4 與 R5 區域的鋼筋已呈陰極極化現象。
3. 270 日後，參考電極 R2、R3 位置鋼筋的退極化量仍大於 100 mV，R5、R6 位置則因混凝土呈水飽和狀態(IR 降分別為 2 mV 與 7 mV)，鋼筋極化量小於 100 mV。比較 R5 與 R6 位置鋼筋瞬間斷電電位與斷電 7 小時後之電位，其值相近(R5: -411 mV vs. -408 mV, R6: -370 mV vs. -344 mV)，顯示 R5 與 R6 所在位置的鋼筋在斷電 7 小時後，仍呈陰極極化現象。因此，混凝土表面鋅熔射犧牲陽極式的陰極保護，可有效降低鋼筋的腐蝕速率。
4. 在陰極保護的情況下，混凝土受海水潑濺呈水飽和狀態時會產生電容效應，以致鋼筋所需退極化的時間較長。
5. 施工時，被保護鋼筋間的電連通性必需加以確認，其電阻值必需小於 1 ohm，且需避免與未保護區域的鋼筋相搭接。

表 10.1 鋼筋電位 (單位= mV vs. AgCl)

陰極保護 時間	B1 vs. R1	B2 vs. R2	B3 vs. R3	B4 vs. R4	B5 vs. R5	B6 vs. R6
Day 0	-188	-567	-519	-430*	-590	-594
Day 90	-185	-370	-410	-333*	-305	-488
Day 120	-164	-352	-408	-303*	-401	-479
Day 180	-160	-356	-408	-263*	-337	-392
Day 270	-190	-384	-395	-272*	-413	-377

註：R4 位置鋼筋導線鬆脫

表 10.2 陰極保護 90 日後鋼筋之通電、斷電電位與極化量

參考 電極	通電電位 (mV)	瞬間斷電 電位 (mV)	退極化後最終 電位 (mV) (t ≥ 4 小時)	IR 降 (mV)	極化量 =退極 化後最終電位- 瞬間斷電電位	備註
R1	-185	-185	-185			電流密度 = 7.8 mA/m ²
R2	-370	-340	-256	30	84	
R3	-410	-396	-358	14	38	
R4	-333	-295	-251	38	44	
R5	-305	-303				
R6	-488	-419	-333	69	86	

註：連接安裝後 90 日量測，保護電流= 70mA，鋼筋總面積= 9m²

表 10.3 陰極保護 120 日後鋼筋之通電、斷電電位與極化量

參考電極	通電電位 (mV)	瞬間斷電電位 (mV)	退極化後最終電位 (mV) (t ≥ 4 小時)	IR 降 (mV)	極化量 =退極化後最終電位-瞬間斷電電位	備註
R1	-164	-164	-164			電流密度 = 16.7 mA/m ²
R2	-352	-309	-136	43	173	
R3	-408	-384	-271	24	113	
R4	-303	-290	-228	-	-	
R5	-401	-396	-389	5	7	
R6	-479	-416	-298	63	118	

註：連接安裝後 120 日量測，保護電流= 150mA，鋼筋總面積= 9m²

表 10.4 陰極保護 180 日後鋼筋之通電、斷電電位與極化量

參考電極	通電電位 (mV)	瞬間斷電電位 (mV)	退極化後最終電位 (mV) (t ≥ 4 小時)	IR 降 (mV)	極化量 =退極化後最終電位-瞬間斷電電位	備註
R1	-160	-160	-160			電流密度 = 8.9 mA/m ²
R2	-356	-314	-139	42	175	
R3	-408	-388	-288	20	100	
R4	-263	-251	-202	-	-	
R5	-337	-335	-321	2	14	
R6	-392	-350	-244	42	106	

註：安裝連接後 180 日量測，保護電流= 80mA，鋼筋總面積= 9m²

表 10.5 陰極保護 270 日後鋼筋之通電、斷電電位與極化量

參考 電極	通電電位 (mV)	瞬間斷電 電位 (mV)	退極化後最終 電位 (mV) (t ≥ 4 小時)	IR 降 (mV)	極化量 =退極 化後最終電位- 瞬間斷電電位	備註
R1	-190	-190	-190			電流密度 = 11.1 mA/m ²
R2	-384	-365	-195	19	170	
R3	-395	-377	-276	18	101	
R4	-272	-266	-242	-	-	
R5	-413	-411	-408	2	5	
R6	-377	-370	-344	7	26	

註：安裝連接後 270 日量測，保護電流= 100mA，鋼筋總面積= 9m²

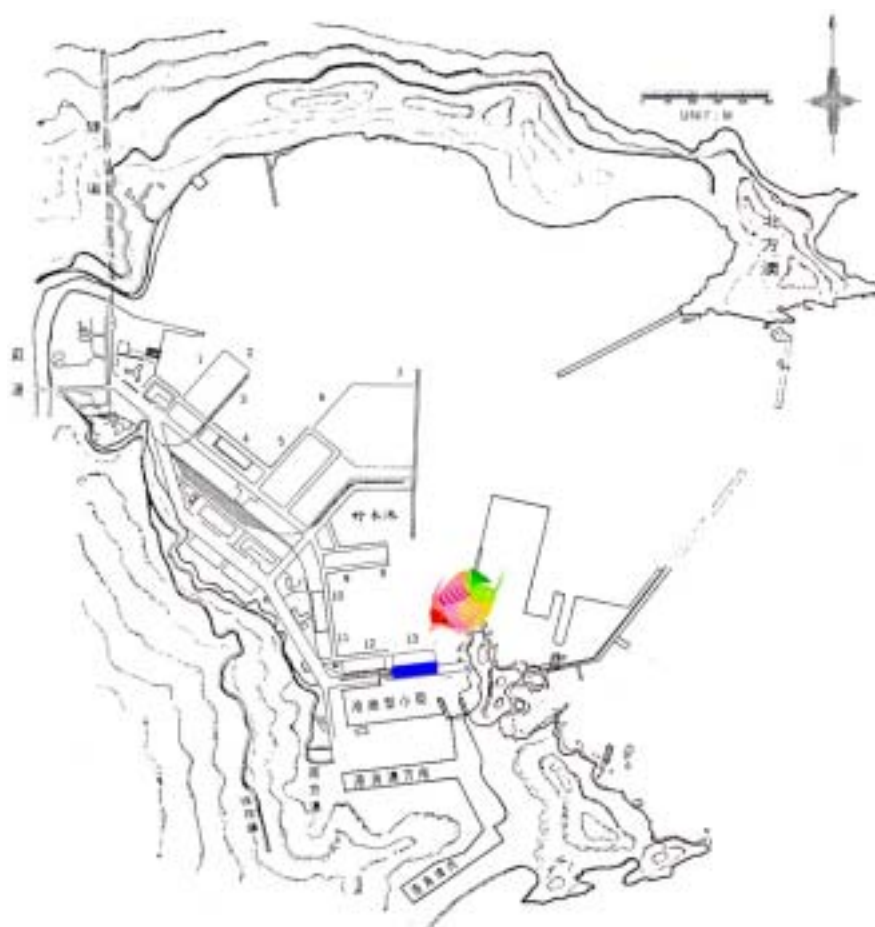


圖 10.1 蘇澳港 13 號碼頭平面位置圖

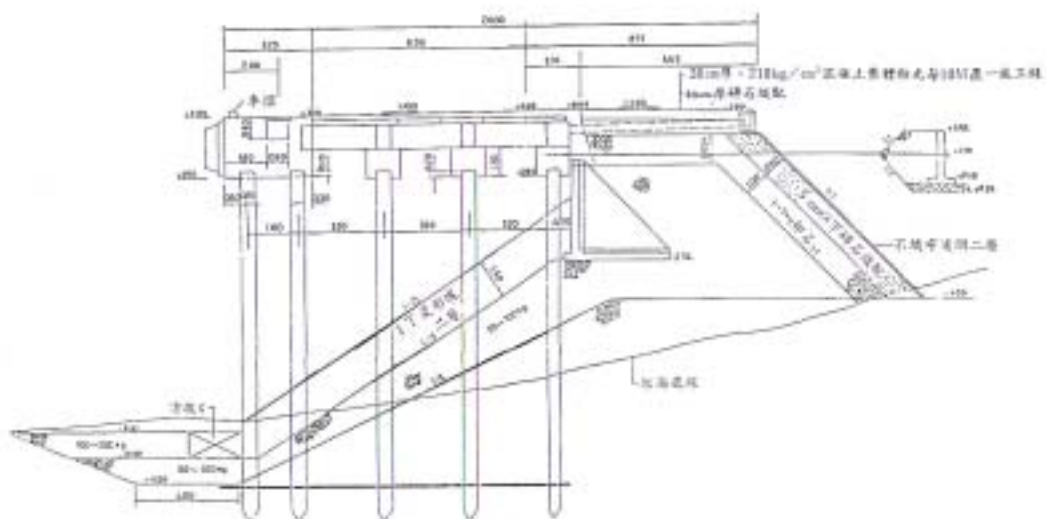


圖 10.2 蘇澳港 13 號碼頭斷面圖

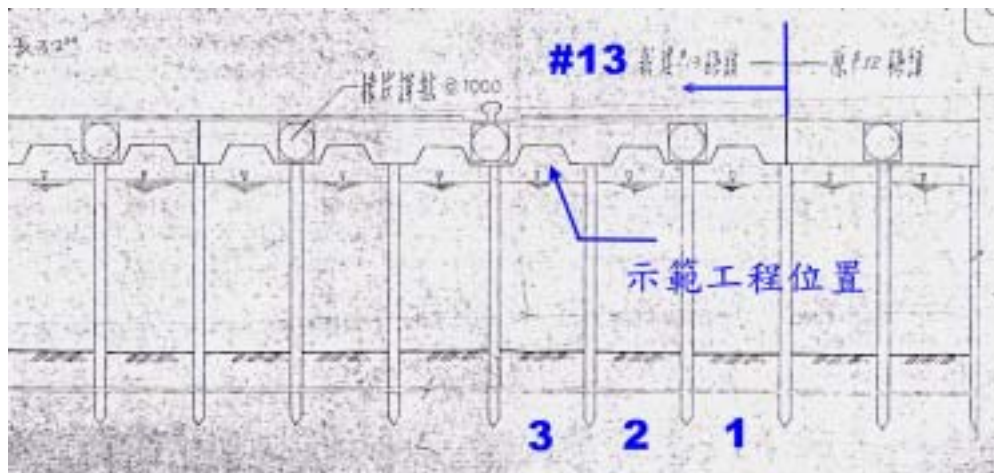


圖 10.3 蘇澳港 13 號碼頭熔射工程位置圖

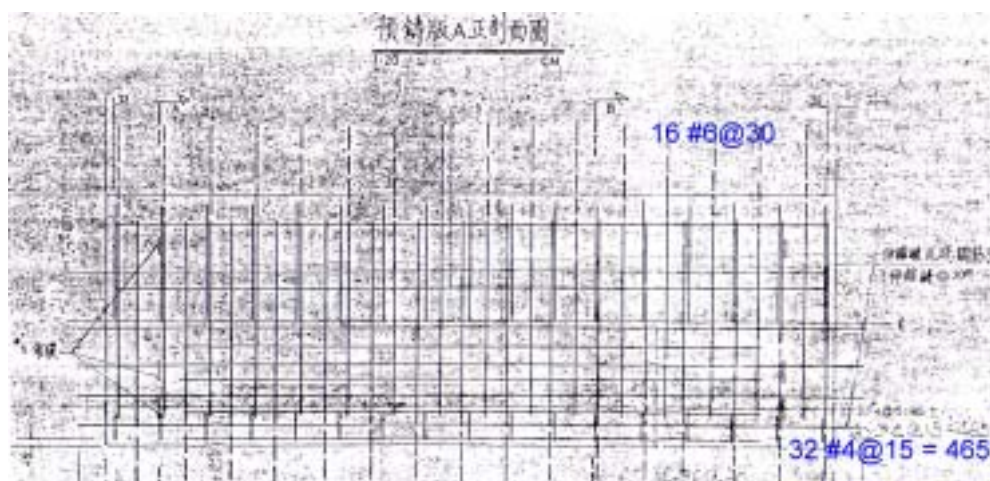
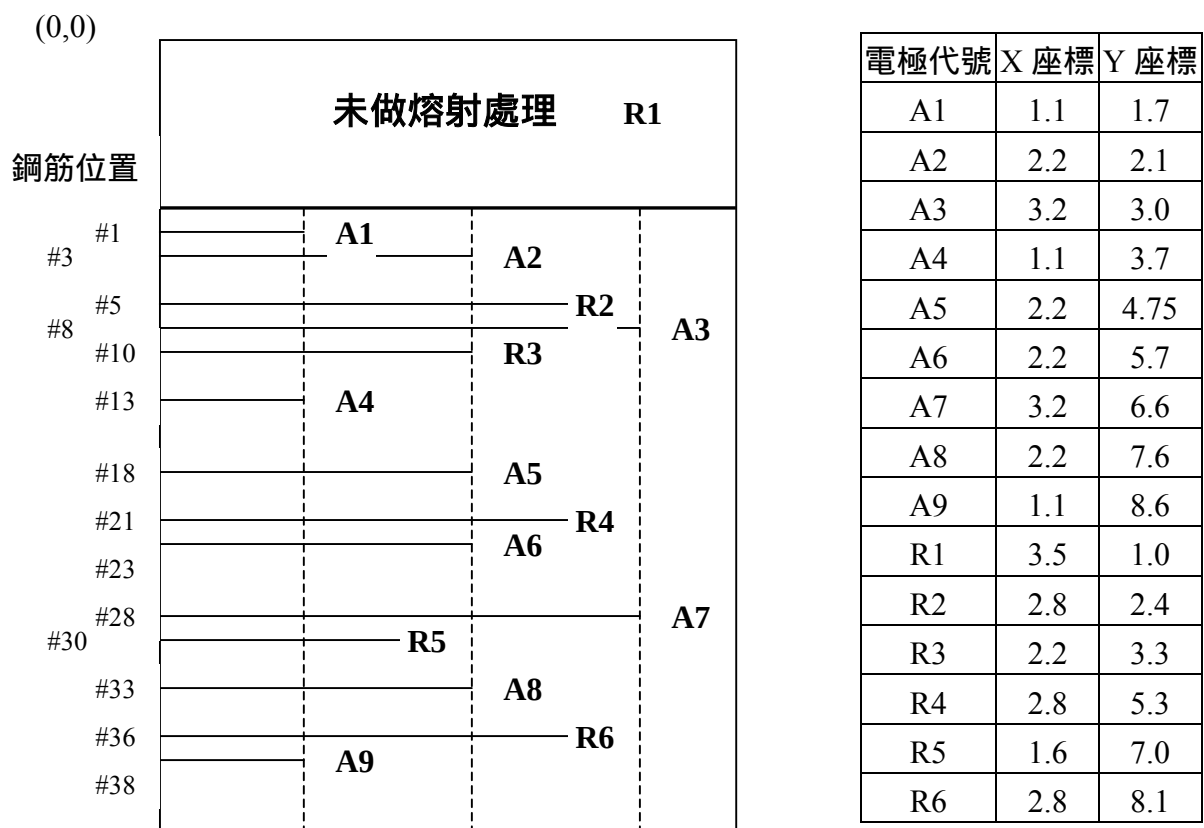


圖 10.4 底板鋼筋配置圖



註： A 為鋅陽極塊，R 為 Ag/AgCl 參考電極

圖 10.5 電極安裝位置圖

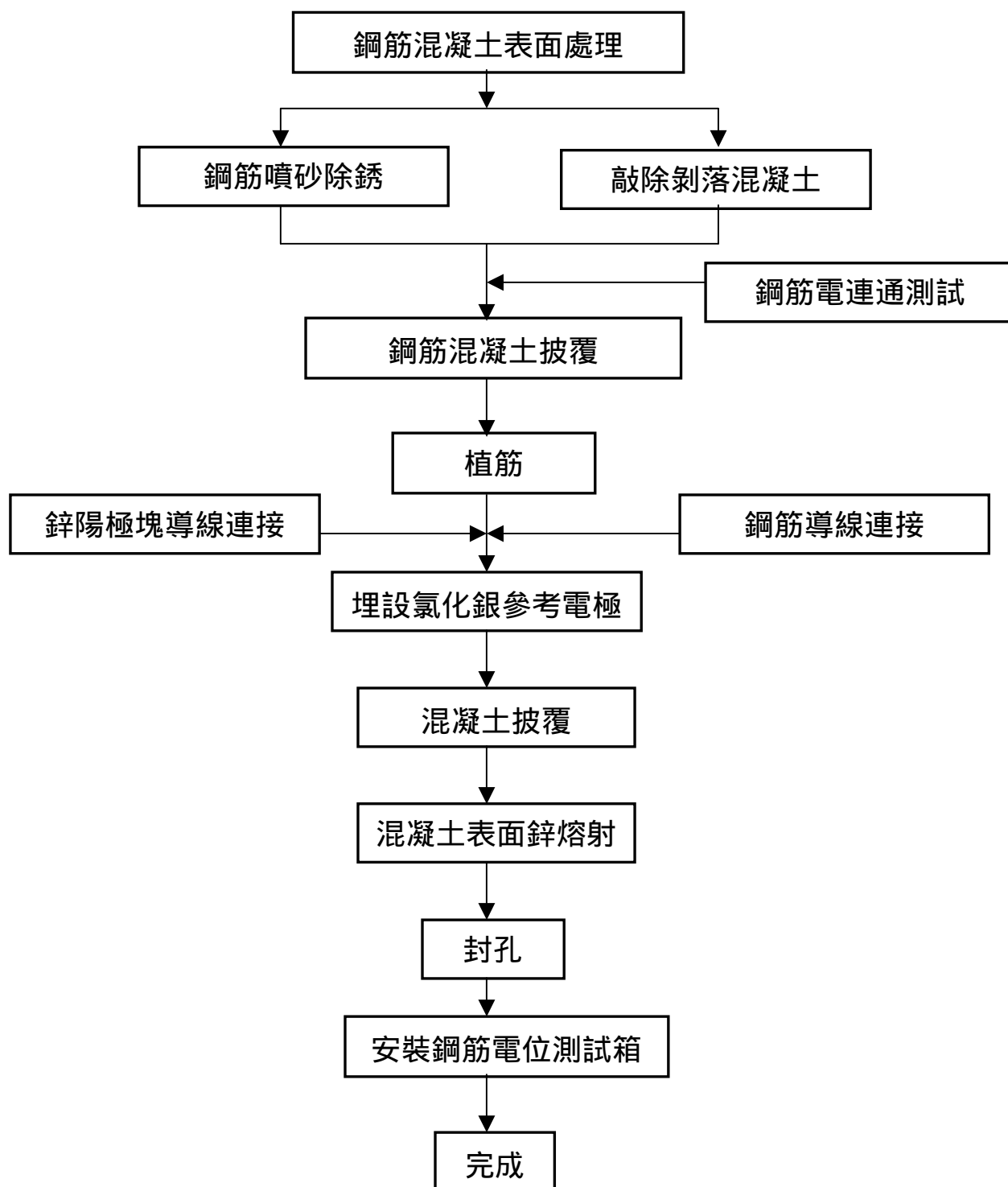


圖 10.6 施工流程圖

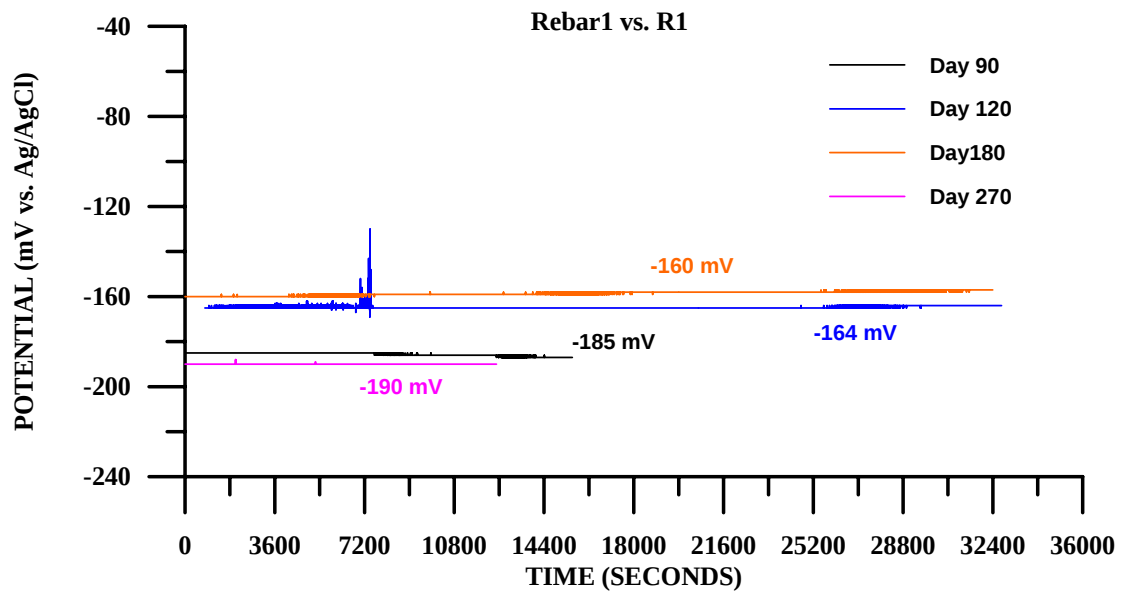


圖 10.7 參考電極 R1 所在位置鋼筋通斷電電位之時間序列圖

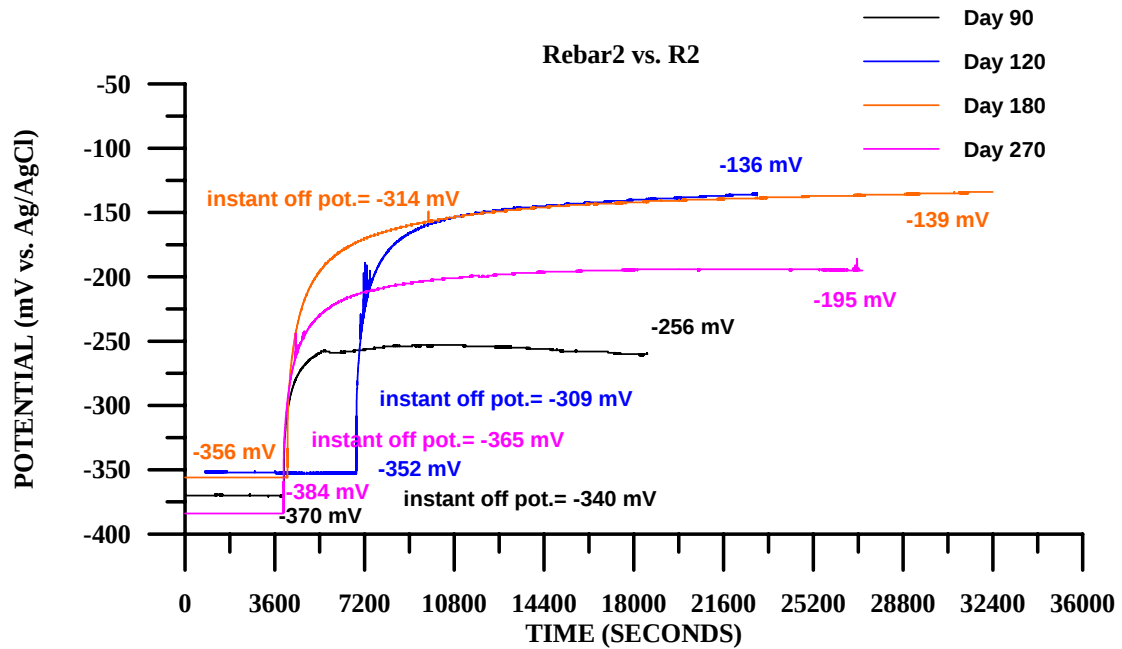


圖 10.8 參考電極 R2 所在位置鋼筋通斷電電位之時間序列圖

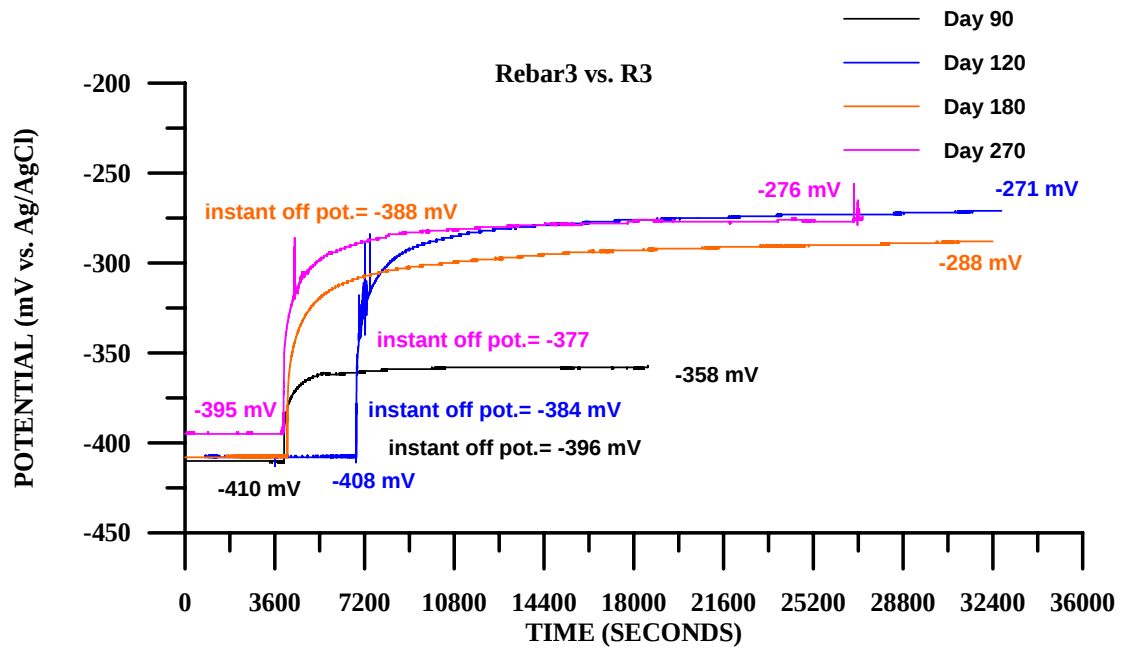


圖 10.9 參考電極 R3 所在位置鋼筋通斷電電位之時間序列圖

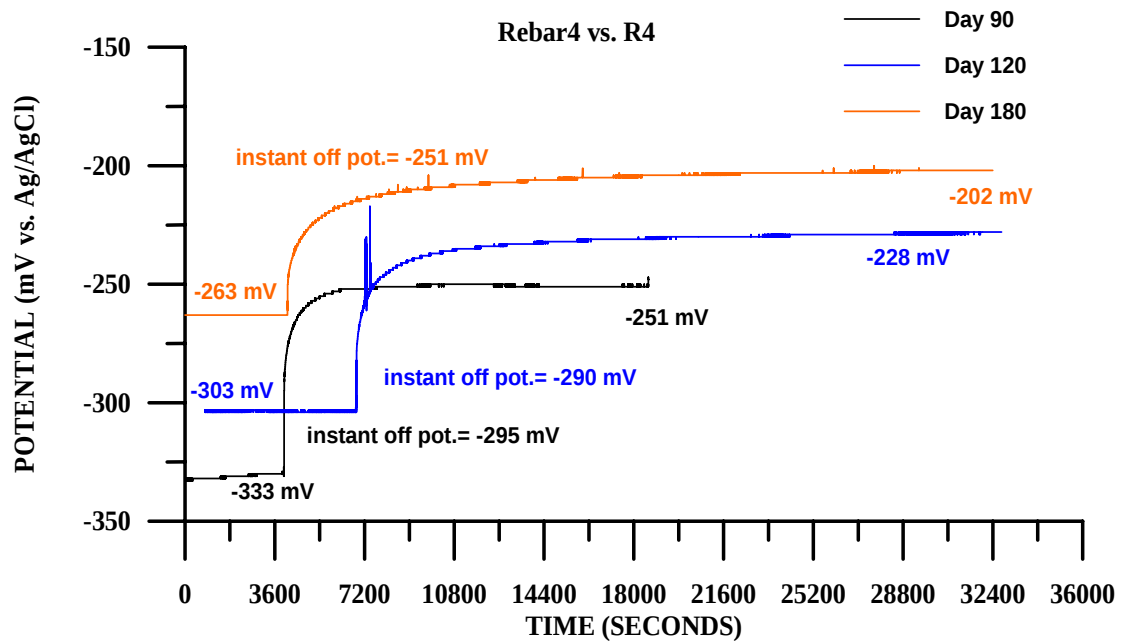


圖 10.10 參考電極 R4 所在位置鋼筋通斷電電位之時間序列圖

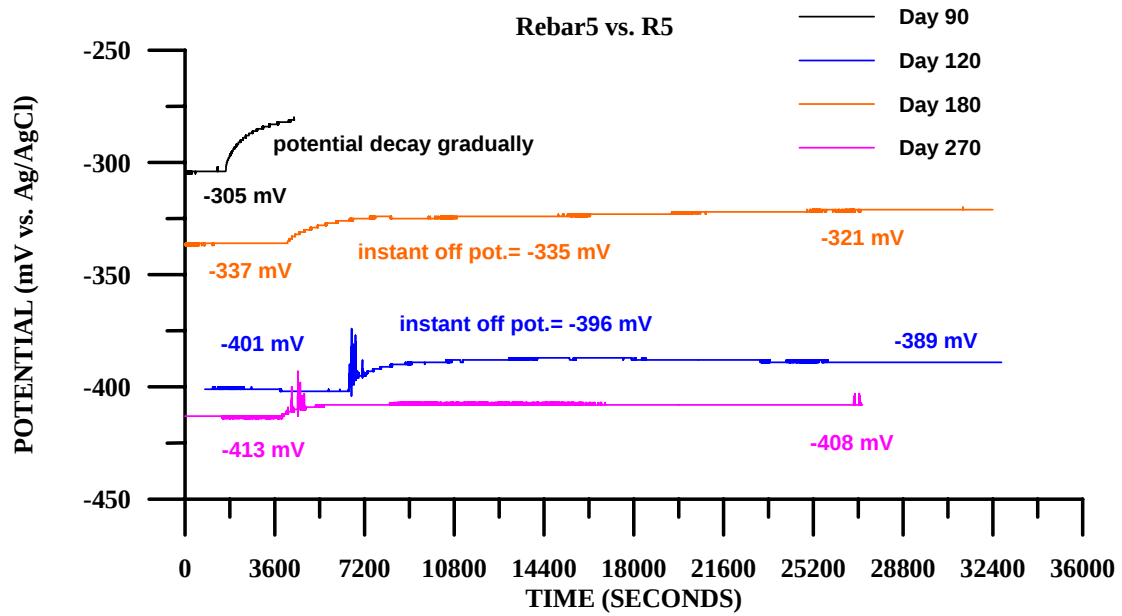


圖 10.11 參考電極 R5 所在位置鋼筋通斷電電位之時間序列圖

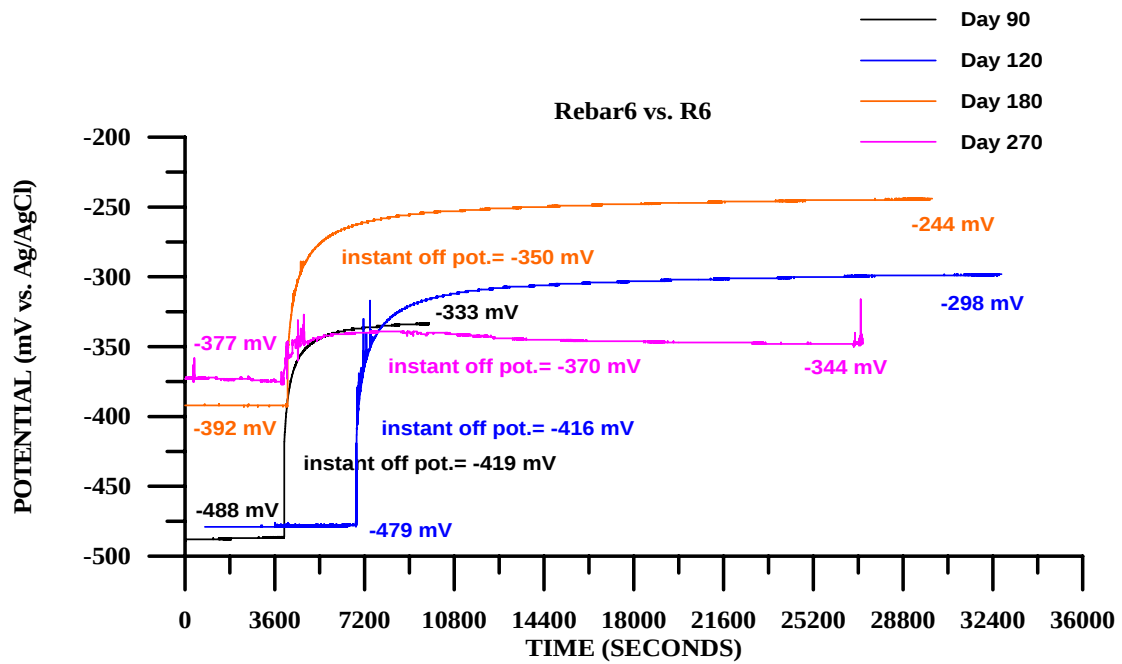


圖 10.12 參考電極 R6 所在位置鋼筋通斷電電位之時間序列圖

第十一章 「防蝕準則(草案)-R.C.結構物部份」-蘇澳港 13 號碼頭外加電流式陰極防蝕施工案例

民國 92 年 5 月交通部運研所港灣技術研究中心委託立偉防蝕工程顧問公司進行蘇澳港 13 號碼頭底板外加電流式陰極保護研究，今將其報告成果^[14]摘錄如下。

11.1 工程位置

工程位置為 13 號碼頭 0K+145 至 0K+155 兩區域，混凝土總面積為 90 m^2 ，鋼筋面積為 55.18 m^2 ，陽極設計電流密度為 10 mA/m^2 。系統設計如下表所示。

位置	負極排流點	參考電極
#30	2 處	2 支
#31	2 處	2 支

11.2 陰極保護設計

1. 所需保護電流

位 置	混凝土表面積	鋼筋表面積	設計電流密度	保護電流量
#30	45 m^2	27.6 m^2	10mA	0.275A
#31	45 m^2	27.6 m^2	10mA	0.275A

2. 陽極：帶狀鈦網陽極。

3. 參考電極：飽和 Ag/AgCl 銀氯化銀參考電極。

11.3 施工步驟

1. 混凝土表面處理：將剝落混凝土敲除，若鋼筋銹蝕情況嚴重，則予以切除。混凝土鑿除後表面採用高壓水刀清洗以利修補水泥接著。
2. 植筋與紮筋：施工範圍內之鋼筋已完全銹蝕，因此必須將舊有鋼筋切除並進行植筋處理。植筋依原設計圖以#4、#6 鋼筋雙向每 20 cm 植筋，#4 鋼筋植入 11 公分共 88 支，#6 鋼筋植入 17 公分共 192 支。紮筋完成後量測鋼筋之導電性，電阻值需小於 1Ω 。
3. 陽極安裝：陽極使用 ELGARD E100 帶狀鈦網陽極，沿結構物每 40 cm 安裝一條。為避免鈦網與鋼筋接觸造成短路，帶狀鈦網兩端固定後與鋼筋交錯位置，以固定夾及紮線帶固定，每 20 ~ 30cm 安裝一固定夾。
4. 電極與導線連接：陽極導線以紅色 5.5 mm^2 電力電纜線與鈦條陽極連接；負極排流點安裝以自攻螺方式固定，負極排流線為黑色 5.5 mm^2 電力電纜線。鋼筋電位監測導線以自攻螺方式固定，即以自攻螺絲將端子導線鎖於鋼筋上，導線為黃色 3.5 mm^2 電力電纜線。
5. 混凝土披覆：採用 FOSROC 生產 RENDEROC SPXTRA 導電水泥，以噴塗方式施工，每次噴塗厚度 1.5~2.0 cm，保護層厚度約 9~12 cm。
6. 電源供應器及配線：整流器採用 3A、18V 之規格，正端接於紅色陽極導線，負端接於黑色負極排流線。參考電極與鋼筋電位監測導線接至電位測試箱內之量測端子。

7. 系統安裝檢查：系統運轉前應先進行測試，以確保所有構件安裝、連結迴路均已正確的配線、連接、和標示；並檢測各迴路之電流通性。在外加電流式陰極防蝕系統中，設定整流器輸出值為設計保護電流量之 20%，使用適當的伏特計和參考電極，量測鋼筋電位變化方向，以確定 DC 輸出的正確極性。
8. 保護電位調整：鋼筋電位呈現穩定時調整輸出電流以達到保護標準。系統按此水準維持運轉 14~28 天後進行「100 mV 電位衰減量」系統性能測試，檢查保護效果是否正常。

11.4 評估結果

該工程於民國 92 年 7 月完工，長期防蝕成效目前正持續評估中。

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. H. Uhlig, D. Triadis, and M. Stern, J. Electrochem. Soc., 102, 59, 1955.
4. R. E. Lye, "Splash Zone Protection on Offshore Platforms- A Norwegian Operator's Experience", Materials Performance, Vol. 40, No. 4, April 2001.
5. "Corrosion Control of Steel Fixed Offshore Platforms Associated with Petroleum Production", NACE Standard RP0176-94, 1994.
6. 港灣設施之技術基準·同解說(改訂版), 日本港灣協會-運輸省港灣局監修, 1989.
7. 海域中土木鋼構造物之電氣防蝕設計指針(案) ·同解說, 日本建設省土木研究所, 1991.
8. Cathodic Protection Design , DNV RP-B401 , 挪威 Det norske Veritas , 1993.
9. Cathodic Protection, Part1. Code of practice for land and marine applications , BSI-BS 7361 , British Standard , 1991.
10. 港灣鋼構造物防蝕、補修手冊(改訂版), 日本沿岸開發技術研究中心, 1997.
11. 陰極防蝕工程手冊, 化學工業出版社, 中國大陸, 1998.
12. 陰極防蝕用犧牲陽極性能檢驗法, CNS 13521, 經濟部中央標準局, 1995.
13. "Impressed Current Cathodic Protection of Reinforcing Steel in

Atmospherically Exposed Concrete Structures”, NACE Standard RP0290-2000, NACE international, Houston, TX, 2000.

14. “蘇澳港 13 號碼頭外加電流式陰極防蝕施工案例”，交通部運研所港灣技術研究中心提供，2003。

附錄一

第一次專家座談會會議紀錄

『港灣構造物陰極防蝕準則訂定研究』第一次專家座談會會議紀錄

- 一、時 間：九十二年六月二十六日下午九時三十分
- 二、地 點：交通部運輸研究所港灣技術研究中心二樓簡報室
- 三、主 持 人：李豐博副主任
- 四、出席單位及人員：如附件簽到冊
- 五、主席致詞：(略)
- 六、簡 報：羅俊雄博士(略)
- 七、討論提綱及意見：

(一) 水中帶防蝕規範是否參考國外相關規範，直接採用犧牲陽極法

高雄港 鍾英鳳 科長：

- (1) 高雄港鋼板樁均採用犧牲陽極法，除樁頭與潮間帶使用防蝕帶外並未採用外加電流法，至目前為止效果良好，鋼板樁銹蝕厚度很小。
- (2) 建議適用範圍應予說明，提供設計及維護單位參考依循。
- (3) 建議應參考現場海水水質檢測數據，做為設計參考

台中港 邱垂貞 副處長：

- (1) 台中港碼頭鋼板樁或鋼管樁於配合台電電廠及西三、西四碼頭開始使用犧牲陽極法防蝕，至目前為止效果良好，鋼板樁銹蝕厚度很小，以台中港水質環境適用犧牲陽極法。

交通部科技顧問室 許書王 技正：

- (1) 建議準則訂定可參考交通部相關研究報告(例如公路工程守則第8章護欄部份)，犧牲陽極法如較為適用，可建議在某些條件下可考慮採用外加電流法。

台灣海洋大學 張建智 教授：

- (1) 在不考慮海水流速下，犧牲陽極法較為適用。
- (2) 海水流速大於或小於一定流速下是否需要特別考量其他防蝕方式。
- (3) 在不同環境下，潮汐帶及大氣帶鋼板樁可能無法受到完全保護。

◆執行單位回覆：

水面上因無海水作為介質不適用犧牲陽極法(防蝕一般以塗覆裝工法處理)，在河海交會處，國外規範雖可能採用外加電流法，但 NACE 及日本規範並未清楚界定。

港研中心 陳桂清 研究員：

- (1) 準則訂定以犧牲陽極法為主，但國內仍有少數防蝕工程採用外加電流法，因此在準則訂定時，仍應酌列外加電流法參考。
- (2) 相關參數在訂定準則時，可列入國外規範之參考值，提供設計單位參考。

港研中心 饒正 研究員：

- (1) 本所曾經調查港區水域之海水流速，時速多小於 50cm，對犧牲陽極法影響應該不大，建議以犧牲陽極法為主，外加電流法則列入參考。

結論：水中帶防蝕以犧牲陽極法為主，外加電流法則列入參考

(二) 海水中保護面積計算

成功大學 高振豐 教授：

- (1) 建議採用平均低潮位做為計算依據。

交通部科技顧問室 許書王 技正：

- (1) 目前各設計標準並統一，建議彙整各港設計參數作為日後修訂或驗證依據。

港研中心 陳桂清 研究員：

- (1) 採用平均潮位做為計算依據較為保守。
- (2) 建議參酌國外規範計算方式及理由辦理。
- (3) 本次座談會意見應為初步結論，建議俟第二次座談會彙整業界意見後辦理。

高雄港 鍾英鳳 科長：

- (1) 考量鋼板樁入土深度部份，計算高度建議加深 1 公尺較符合實際。

◆執行單位回覆：

計算時應加入裕餘度。

港研中心 朱金元 科長：

- (1) 如採用平均潮位做為計算依據較應有更明顯理由說明。

◆執行單位回覆：

擬以平均低潮位為主，並加強解說說明，必要時可選用平均潮位。

結論：初步以平均低潮位為主，並加強解說說明，必要時可選用平均潮位，並俟彙整第二次座談會業界意見後辦理。

(三) 防蝕電流密度選用

高雄港 鍾英鳳 科長：

- (1) 建議應先量測確認現場海水水質，做為設計參考，最好依據海水比電阻值適度調整。

港研中心 饒正 研究員：

- (1) 選用之防蝕電流愈大，理論上犧牲陽極塊消耗速率愈大，設計時陽極塊尺寸也愈大，但與鋼板樁實際需要可能有很大，根據本所調查目前有些碼頭之陽極塊可用期限應將高於設計年限。

結論：防蝕電流密度選用將參考日本規範，以一般海域 100 mA，海水污染環境以 150 mA 為參考值，但將列入如塗裝發生破損可能影響之因素。

(四) 設計之裕餘度

高雄港 鍾英鳳 科長：

- (1) 高雄港之犧牲陽極法設計之裕餘度約 1.1 倍，但以往設計資料，部份已遺失，實際計算過程中建議應加入海水環境可能改變之影響。

台中港 邱垂貞 副處長：

- (1) 台中港之犧牲陽極塊目前並無達到設計年限之案例，裕餘度顧問公司設計時約為 1.2 倍。

台灣海洋大學 張建智 教授：

- (1) 裕餘度之設計建議應彙整實際案例座一考量，避免類似中國大陸採用太大裕餘度而失去意義。

結論：裕餘度設計擬以 1.1 至 1.2 為參考標準，並將持續蒐集國內設計單位採用標準與理由作為日後修訂之參考。

(五) 陽極材料之選擇

成功大學 高振豐 教授：

- (1) 陽極材料應以鋁鋅為主，為增加效能並需添加少量元素，如鈮、鈣等，但鐵元素含量太高會降低效率。

港研中心 饒正 研究員：

- (1) 目前各港之驗收規範相同，建議驗收前陽極塊試驗步驟應遵照中華民國國家標準 (CNS) 實施。

高雄港 鍾英鳳 科長：

- (1) 建議準則訂定前材料選擇部份，應先找相關業者討論。

◆執行單位回覆：

已拜訪部份業者進行了解，但因部份業者技術層次只在生產加工，討論結果可能僅適用於少數業者。

港研中心 陳桂清 研究員：

- (1) 陽極塊材料成分要求可能又困難，建議應以材料放電效能需達一定標準做為選擇依據。

台灣海洋大學 張建智 教授：

- (1) 建議應依中華民國國家標準（CNS）之相關規範做為選用標準，主要試驗項目應包括電流效率、消耗量等。

◆執行單位回覆：

目前國內廠商製作之陽極塊，電流效率達 92 至 95 %，準則訂定時擬以符合中華民國國家標準（CNS）相關規範為要求。

結論：陽極材料之選擇需符合中華民國國家標準（CNS）相關規範。

主席結論：

- (1) 各討論提綱之結論請中華民國防蝕工程學會於制定準則時參考辦理。
- (2) 為求周延，第二次座談會應邀請相關業界並彙整其意見

附錄二

第二次專家座談會會議紀錄

臺灣構造物陰極防蝕準則訂定研究第二次專家學者座談會

會議時間：92 年 9 月 29 日

會議地點：交通部運輸研究所臺灣技術研究中心一樓會議室

主持人：朱金元科長

主席致辭：(略)

座談（討論）事項：

臺灣技術研究中心朱金元科長：

本研究案準則訂定格式與內容目前行政院公共工程委員會(以下簡稱工程會)是否有類似規範可供參考,如有,建議應參酌現有格式撰寫,應可得到較佳效果。

研究單位答覆：

目前工程會尚無臺灣構造物陰極防蝕相關規範可供參考,本研究案撰寫格式主要依據為貴中心九十年度委託本學會辦理之『臺灣構造物陰極防蝕準則訂定研究—鋼筋混凝土部份』。

匯茂公司王維寧董事長：

1. 陽極塊安裝位置在平均潮位下 30 公分是否合適
2. 目前國內鋼管樁多以陽極塊作為防蝕工法,部份設計有以鋼筋或其他導通方法設計連接各鋼管樁,由於各鋼管樁均已具有保護電流,請問是否需要設計連通,請大家提供寶貴意見。
3. 陽極快需要數量計算,本公司曾委託學者及至日本等國蒐集相關資料,目前設計有以陽極塊發生之平均電流或最大電流作為計算依據,並無統一算法,請大家討論應以何者較為適宜提。日本規範設計陽極塊,發生電流係以最大電流計算,使用年限為二十年,目前國內幾座較早安裝犧牲陽極塊之碼頭,陽極塊在使用十二、三年時便有消耗完畢現象,以本公司實際施工及調查經驗發現,陽極塊數量不足,鋼板(管)樁保護電位將不足夠。

4. 陽極塊中間鐵蕊，一般設計時並無分叉，由實際經驗發現陽極塊消耗並非均勻，此時剩餘之陽極塊本身極易掉落，致喪失防蝕效果，建議在準則內可加考慮其可能影響。

研究單位答覆：

陽極塊安裝位置在平均潮位下 30 公分，係指第一支（最上方）安裝位置，應用時以哪個位置較為妥當，請各位專家學者提供寶貴意見。

高雄港務局鍾英鳳科長：

各港域達到最低潮位機率很小，一般多以平均低潮位作為設計依據，安裝位置建議以各港最低潮位與平均低潮位關係再深入考量。

工業技術研究院王瑞坤研究員：

以台中港為例，當港域之潮差變化較大時，應再加考慮潮間帶防蝕措施可能受到影響。

台中港務局郭明哲組長：

台中港鋼管樁因潮差及施工拋石作業影響，實際上距離陸地最近之鋼管樁無法以安裝陽極塊方式作為防蝕措施。

中華顧問工程司王志強先生：

鋼板（管）樁防蝕設計一般分為海水面上及海水下兩部份。海水下部份主要利用海水作為介質，使防蝕電流保護鋼構造物，考量波高及浪流影響，建議可以規定最低潮位下多少距離安裝第一支陽極塊；陸上部份另有防蝕工法可供考量。

工業技術研究院翁榮洲主任：

潮間帶一般以塗裝工法保護，塗裝位置設計在最低潮位下 50 公分，與陽極塊應有互相保護作用。

花蓮港務局方禎祥總工程司：

國內各港口潮差不同，潮位在達最低潮位或可供施工時間極短，各港修補工法需因地制宜，陽極塊安裝位置另需考量碼頭設計水深，設計

時仍需以實際可達之防蝕效果作為主要考量因素。

高雄港務局鍾英鳳科長：

陽極塊安裝位置應考量防蝕電位可能衰減問題。

研究單位答覆：

1. 陽極塊安裝後防蝕電位實際上會衰減。
2. 本準則定義係以「在海水中」之港灣鋼構造物作為研究之主要對象，即完全浸泡在海水中之部份，潮間帶不予考慮。
3. 建議仍以平均低潮位為宜，但安裝距離依港口及碼頭設計深度不同。

高雄港務局鍾英鳳科長：

建議訂為平均低潮位 30 公分以下（即陽極塊頂點距離平均低潮位 30 公分「以下」）。

初步結論：

陽極塊第一支安裝位置距離平均低潮位 30 公分「以下」。

「有關設計陽極塊數量計算」

研究單位答覆：

設計時有關電流密度之選用，請各專家學者參考附件準則草案第 22 頁之防蝕電流計算，裸鋼設計時已先考慮海水污染問題。

電流密度之選用以最大需要之電流密度計算，並加入安全係數，計算結果陽極塊需用數量應大於實際需求（請參考準則草案第 13 頁圖表）。

依第一次專家學者座談會之初步結論：陽極塊需用數量以乾淨海水，最大需求電流計算。陽極塊使用年限以陽極塊平均發生電流計算。

花蓮港務局方禎祥總工程司：

請問海水水質乾淨或污染如何區分，建議應有客觀數字提供設計時參考’。

研究單位答覆：

海水水質乾淨或污染，係針對選用防蝕電流而考量，準則內將增加解說說明。此外陽極塊消耗率一般規定應大於 90 % 以上，檢測方法需依據為中國國家標準（以下簡稱 CNS）實施，但 CNS 規定以人工海水作為溶液，可否建議改用港口碼頭現有海水，另請提供意見。

花蓮港務局方禎祥總工程司：

有關陽極塊檢測頻率規定為三年一次，應否考慮修正。

研究單位答覆：

新建碼頭定點量測（約每 100 公尺一點）建議一般檢查需每季量測一次電位，詳細檢查需由潛水人員於水下不同深度量測，暫定為三年一次。

港灣技術研究中心饒正研究員：

本中心目前詳細檢查建議以五年一次為原則。

高雄港務局鍾英鳳科長：

1. 由於碼頭數量眾多，以各港務局現有人力，不可能每季量測一次。
2. 建議修正為：新建碼頭一般檢查第一年每季量測一次電位，以後約一年一次。
3. 詳細檢查五年實施一次應較為可行。

台中港務局郭明哲組長：

各鋼管樁樁頭處理實際已與其他鋼管樁有電流連通，是否需要另以鋼筋接通。

中華顧問工程司王志強先生：

目前設計均以單樁作為考量，並不需以其他方式支援，提供保護電流。

港灣技術研究中心陳桂清研究員：

如以鋼筋接通，鋼筋焊接位置可能受到漂流物或海流衝擊造成危險。外加電流法可能需要，但犧牲陽極法各樁間距均大於 4 公尺以上，且發生電流亦足供防蝕需要，應可不予接通。

研究單位答覆：

外加電流法如未接通可能會發生雜散電流，犧牲陽極法因以單樁設計，是否接通可再考量。

花蓮港務局方禎祥總工程司：

老舊碼頭改善可能需要考量連通問題，新建棧橋式碼頭鋼管樁設計時應先考量有否需要。

港灣技術研究中心饒正研究員：

鋼管樁間以鋼筋連通，可能危及日後潛水人員水下檢測之安全。

台中港務局郭明哲組長：

如不連通，距離陸地最近之樁可能因潮差及拋石影響防蝕效果。

港灣技術研究中心陳桂清研究員：

距離陸地最近之樁可採用較小陽極或其他適當防蝕工法。

中華顧問工程司王志強先生：

目前施工工法及防蝕材料進步很多，潮間帶或無法安裝陽極塊之位置應可採用塗裝工法得到防蝕效果量。

花蓮港務局方禎祥總工程司：

棧橋式碼頭安裝陽極塊是否需考量施工時拋石可能撞擊陽極塊之問題。

匯茂公司王維寧董事長：

實際施工應無此顧慮，因海水區及拋石區各有適用之陽極塊。

研究單位答覆：

日本規範規定每一支鋼管樁至少需安裝一塊以上陽極塊，但水深較淺時不在此限。

花蓮港務局方禎祥總工程司：

水深較淺應改為無法安裝陽極塊者較為恰當。

研究單位答覆：

改為無法安裝陽極塊者，必須使用鋼條使其電連通。

研究單位提案討論：

陽極塊設計需用數量以最大需求電流計算，使用年限以陽極塊平均發生電流計算（請參考附件第 25 頁），是否是當可行？

台中港務局郭明哲組長：

建議採用比較保守方式較為適當。

高雄港務局鍾英鳳科長：

陽極塊表面機會隨時間而有變化，陽極發生電流不可能保持定值，建議考亮其可能影響。

匯茂公司王維寧董事長：

1. 陽極塊效能試驗如用碼頭原地海水，實務上不易施作，且海水隨時流動，水質會隨時間不同而有變化，樣本可能與設計不符，建議檢驗時海水溶液應以人工海水較為客觀。
2. 海水有無污染，施工前再行將海水或海泥採樣送驗，結果如與設計不符，勢將變更設計，造成陽極塊需用數量或安裝位置需作變更，將會延誤施工時效，產生更多困擾，建議設計時可採加計安

全係數考量或避免在施工期間檢驗海水海泥，造成困擾。

3. 海水水質會隨時改變，碼頭用途也可能與原設計不同而改變該港域海水水質，建議如可預期海水水質可能遭受污染，設計時應先考量其影響。

交通部許書王技正：

1. 本次會議屬於座談性質，為使各專家學者可充分提供寶貴意見，建議先提出意見供研究單位彙整參考，並使會議順利進行。
2. 本研究案草案提出後，需先試行一段時間並加修訂確認，建議本次會議不需做出具體結論。

研究單位答覆：

海水比電阻為陽極塊放電效能之主要因素，建議水質檢驗項目應包括（碼頭）現場之海水比電阻。

中華顧問工程司王志強先生：

海水流速為海水電流密度之另一重要因素，建議應列入設計考量。

研究單位答覆：

以參考國外規範，列入準則考量。

中華顧問工程司王志強先生：

早期國內碼頭採用日本規範設計陽極塊，常有使用年限未能達到設計要求之現象，造成陽極塊數量不足，未能發揮足夠效果，故工程顧問公司現在設計時均會加入修正因素。但防蝕電流採用 100 mA 似乎不足實務需求，以高雄港為例，防蝕電流採用以達 150 至 175 mA。

台中港務局郭明哲組長：

1. 棧橋式碼頭拋石區，鋼管樁焊接陽極塊後可會因施工撞擊陽極塊而使其掉落。
2. 距離陸地之第一支樁位安裝陽極塊是否會影響碼頭整體使用年

限。

花蓮港務局方禎祥總工程司：

建議新建碼頭在施工時，應要求承商配合防蝕工法採用適當施作方式，舊有碼頭施作亦應要求承商比照處理。

台中港務局郭明哲組長：

防蝕措施檢測頻率，碼頭新建完工及保固期限內，可要求承商依據合約實施，但全港區碼頭數量眾多，限於人力，檢測頻率如何制定？

研究單位答覆：

詳細檢查擬以五年一次，一般檢查以每季一次為原則，工程保固期限依據合約另行規定。

港灣技術研究中心饒正研究員：

建議可參考本所『港灣構造物安全檢測與評估』相關規定辦理。

港灣技術研究中心陳桂清研究員：

本研究案制定成果屬「草案」階段，建議研究單位對於研究內容之文字用語作一適當修飾，名詞應予統一，附件內容錯誤或誤植部份請修正。

中華顧問工程司王志強先生：

1. 量測保護電位之測試端子，為避免距離太長，影響量測正確度，建議端子間距離以不超過 50 公尺為原則。
2. 鋼板樁被保護面積計算，鋼板樁背填土面之影響程度建議應適當考慮或加入適當係數。

花蓮港務局方禎祥總工程司：

建議端子間距離以不超過 50 公尺為原則。

研究單位答覆：

將列入考量。

高雄港務局鍾英鳳科長：(略，另詳書面資料)

交通許書王技正：(略，另詳書面資料)

主席結論：

1. 感謝諸位專家學者百忙中撥冗參加本次座談會並提供寶貴意見。
2. 請研究單位就各專家學者所提意見彙整並於期末報告提出相關對策。
3. 散會

附錄三

期中報告審查意見及回覆

「台灣構造物陰極防蝕準則訂定研究」期中報告審查會議紀錄

- 一、日期：民國 92 年 7 月 15 日
- 二、時間：下午一點三十分
- 三、地點：交通部運輸研究所港研中心二樓簡報室
- 四、主席：邱永芳主任
- 五、出席人員：如附件簽到冊
國立中央大學土木工程系：李釗 教授（請假）
國立成功大學化學工程系：高振豐 教授
國立台灣海洋大學河海工程系：張建智 教授
國立雲林科技大學營建工程系：蘇南 教授
交通部科技顧問室：許書王 技正
交通部運輸研究所台灣技術研究中心：李豐博副主任、陳桂清研究員
中華民國防蝕工程學會：羅俊雄博士、王瑞坤
- 六、主席致詞：（略）
- 七、中華民國防蝕工程學會簡報：（略）
- 八、審查意見：（所有委員提出審查意見後，由中華民國防蝕學會一起答復）

交通部科技顧問室許書王技正

1. 第 11 頁混凝土覆合包覆，建議修改為複合包覆。
2. 第 29 頁 4.2 節文字，建議修改加入斷句。
3. 第 29 頁 4.1 節之考慮因素條文，建議修正句尾之標點符號。
4. 第 30 頁 4.2.1 節之保護面積計算條文，建議修正句尾之標點符號。
5. 第 31 頁 4.2.1 鋼管樁值徑，應修正為直徑。
6. 第 41 頁流程圖內「河川混入.....」，建議修正為「河川混入海中，水質變化大」。
7. 第 45 頁庫倫定率應為庫倫定律。
8. 第 60 頁等有關鋼筋電位較負（正）或較小（大）等之說明文字，建議應統一避免混淆。
9. 陰極防蝕效果評估瞬間斷電 4 24 小時後之電位，量測方式及次數有無規定？
10. 陽極使用材料，建議加註需合乎環境保護相關法令之規定。
12. 本研究案之座談會及審查會議紀錄，建議應附於期末報告初稿內。

成功大學高振豐教授

1. 第 15 頁碳酸根離子請修正。
2. 第 41 頁流程圖，部份說明標點符號建議修正。

3. 第 34 頁電阻計算公式似乎較為繁雜，建議盡量採用簡單易用之公式。
4. 犧牲陽極材料成份如含鎘汞等元素，不符目前環保規定。
5. 蘇澳港實例部份，保護電流之效果評估不同天期之變化請說明。
6. 蘇澳港實例部份應為港灣構造物防蝕準則 R.C.部份之內容補充，建議應於章節適當位置說明以免誤解。

雲林科技大學蘇南教授

1. 準則格式建議應於撰寫前將內容定位清楚。
2. 準則撰寫建議應經由一研究小組成員定期針對內容逐一詳細討論，避免日後使用解讀可能誤用。
3. 準則位階及效力建議在蒐集相關參考資料或文獻(例如美國 ASTM、日本、英國 BS，德國，……等) 應同時了解其位階及是否具法定效力。
4. 準則內容應考量可讀性、方便使用及容易參考等原則，以供規劃設計、施工維護及行政人員等各依所需使用。

台灣海洋大學張建智教授

1. 對於研究單位之報告內容，本人給予正面肯定。
2. 第 2 頁港務局請修正。
3. 本研究案如要達到制定規範之要求，仍需時間及經費支持，建議準則訂定先以施工手冊或草案為定位。
4. 本研究案加列鋼筋混凝土部份之內容，建議應明確指出係補充修訂資料。
5. 圖 2.1 陰極防蝕成效對照內容指的是犧牲陽極或外加電流之成效。
6. 第 7 頁硫酸還原菌請修正。
7. 第 8 頁先工法與後工法之優缺點比較，建議應明確指出適用於鋼結構物或鋼筋混凝土結構物。
8. 第 15 頁方程式內 ppt 定義，建議說明清楚。
9. 第 16 頁表格內容，建議應譯成中文方便使用者參考。
10. 第 19 頁圖說，建議加註出處或文獻參考來源。
11. 防蝕電流單位部份為 A，部份為 I，建議應予統一避免混淆。
12. 第 33 頁之破損率建議加 $\times 100\%$ 表示。
13. 第 34 頁長條棒狀陽極，當長度小於 30 公分或如 $L \leq 4r$ 時應如何計算？
14. 第 35 頁其他形狀之 Ra 面積代號為 A 或 S，建議應予統一避免混淆。
15. 建議本計劃陰極防蝕準則訂定應先加說明研究主軸為犧牲陽極法。
16. 水面上如飛沫帶及潮汐帶，鋼板樁適用之防蝕工法，可否說明？

交通部運輸研究所港研中心李豐博副主任

1. 第 26 頁及第 27 頁表格，建議考量是否可將各國規範內容分開說明。
2. 設計參數之依據及各國規範訂定來源，建議應加說明。
3. 蘇澳港 R.C. 構造物部份背景資料，建議應予說明。

4. 第 3 頁海洋環境下水中帶、海中帶、水下帶等是否為同一位置建議應予統一
5. 第 22 頁 ASTM 中文翻譯，建議修正為美國材料試驗協會較佳。
6. 第 30 頁海水中長度計算之沿岸長度部份，建議 L1、L2 部份應予統一。
7. 第 30 頁海水中長度計算之相關潮位，建議應加列圖說表示。
8. 第 44 頁陰極與犧牲陽極等之 迦凡尼 效應，建議加註原文。

交通部運輸研究所港研中心陳桂清研究員

1. 本案鋼結構物陰極防蝕準則草案，建議應於第二次專家學者座談會前提供與會之相關單位或顧問公司，俾於會議進行時可充分討論，取得共識及初步結論
2. 蘇澳港實例部份現場實測數據中如何解讀水飽和狀態？
3. 不同天期之參考電位變化似無規律性，請問可能原因為何？

九、審查意見答覆：

中華民國防蝕工程學會羅俊雄博士：

1. 感謝各位審查委員之指正，報告內打字錯誤將改正。
2. 本次期中報告初稿係為本案之研究報告，有關準則訂定其內容將包括條文適用範圍、解說等。
3. 準則草案將於第二次專家學者座談會前提出供與會專家學者充分討論，取得初步結論。
4. 準則內容係由本研究團隊每二星期定期召開一次會議討論後訂定。
5. 準則架構將包含主要條文、適用範圍、設計、施工、驗收、維護等內容。
6. 退極化電位量測時間，係於瞬間斷電後開始每一秒逐筆持續記錄，記錄時間至少八小時共三萬多筆紀錄。
7. 有關陽極材料設計公式，係引用自挪威 DNV 及英國 BS 等國際目前通用之規範，將會補充註明之。
8. 陽極材料尺寸設計部份，如長度小於 30 公分，由實際形狀及安裝考量應不致發生 $L < 4r$ 之情形，目前國外規範使用並無此疑慮。
9. 陽極材料成份會加註須符合環境保護相關法令規定之要求。
10. 有關中國國家標準（CNS）海水採樣部份，會以海水表面之水質作為陽極效率試驗之參數依據。
11. 有關蘇澳港電位量測部份，其數據大小會因受測物週遭環境（天候、溼度）變化而影響，尤其受測物位於潮汐帶變化會較明顯。
12. 有關蘇澳港現場實測判讀為水飽和狀態，係經由潛水人員於碼頭面下實際目測及量測數據經依據 NACE 相關文獻報告後確認。
13. 有關準則修訂鋼筋混凝土部份，將於期末報告初稿加入鋅熔射工法及外加電流工法之現場實測資料。
14. 有關資料蒐集部份，目前國外相關規範研究團隊均已蒐集齊全，將彙整

後交港研中心參考。

15. 本計畫研究內容係針對港灣構造物陰極防蝕準則訂定，國外相關規範及施作實例均為犧牲陽極法。
16. 有關飛沫帶及潮汐帶之防蝕工法，基隆港務局於兩年前已委託工研院辦理完成。

十、主席結論

1. 期中報告初稿內容審查通過。
2. 各審查委員所提意見納入期末報告初稿參考。
3. 審查會及專家學者座談會意見及答覆納入期末報告初稿。

十一、散會

附錄四

期末報告審查意見及回覆

港灣構造物陰極防蝕 準則訂定研究

期 末 簡 報



中華民國防蝕工程學會

中華民國92年11月

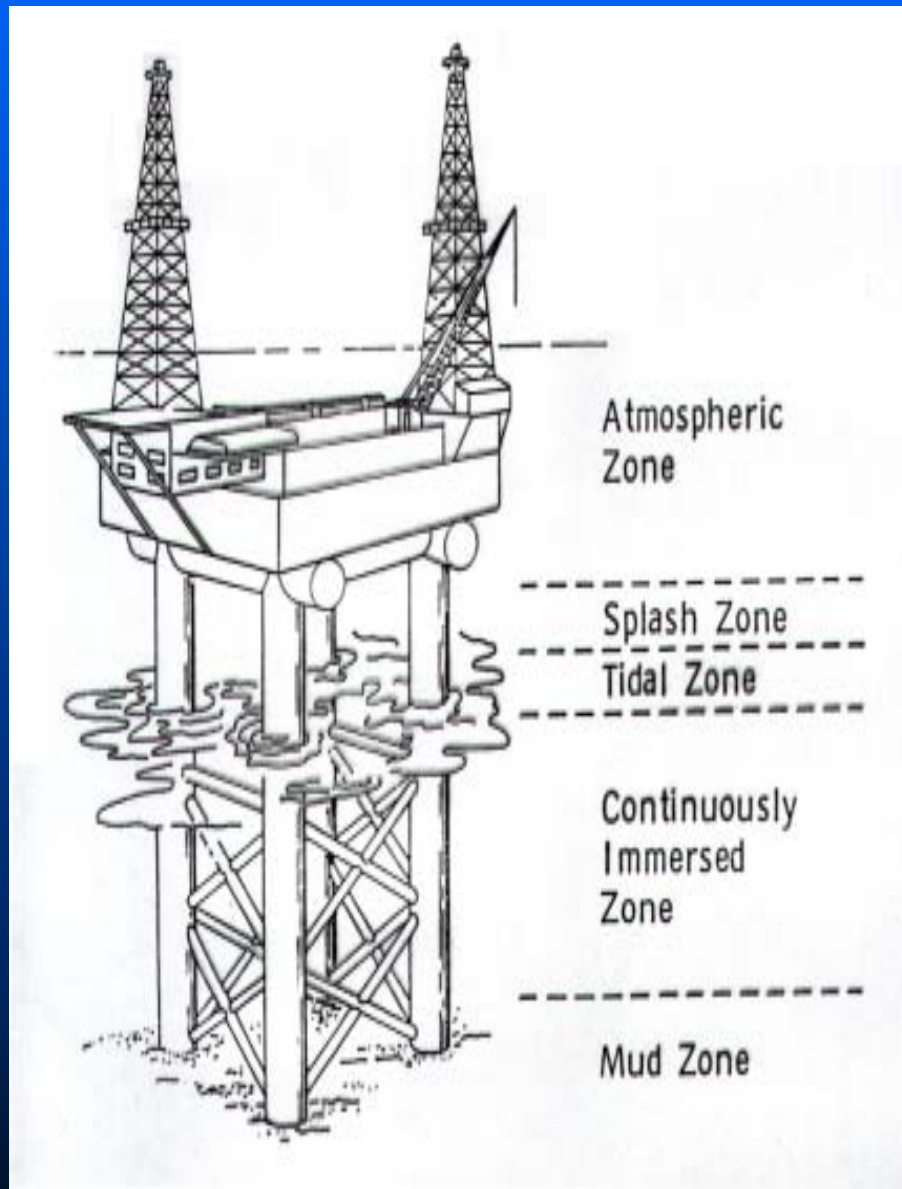
計畫緣起

- 民國90年交通部運輸研究所完成「港灣構造物陰極防蝕準則草案訂定 - (鋼筋混凝土部份)」，但在鋼構部份仍未制訂。
- 本計畫擬針對港灣構造物鋼構部份，制訂一適合國內環境需求的港灣鋼構造物陰極防蝕準則與施工規範，並對已完成之鋼筋混凝土部份的草案內容，進行補充修正，以利日後港灣構造物之維護、管理或新建工程之防蝕設計依據。

主要工作內容

- 蒐集國外鋼版樁碼頭陰極防蝕設計規範資料。
- 鋼板樁碼頭陰極防蝕工程成功案例說明。
- 陰極防蝕之安裝系統選擇、材料規格、設備需求。
- 安裝之標準程序。
- 鋼板樁碼頭陰極防蝕案例規劃。
- 陰極防蝕效應之驗收標準程序。
- 訂定陰極防蝕操作、系統維護管理手冊。
- 召開專家、業界與港務局單位座談會至少兩次，研議適合國內需求之規範。
- 訂定港灣鋼構造物陰極防蝕準則草案。
- 檢討修訂「港灣構造物陰極防蝕準則草案訂定 - (鋼筋混凝土部份)」。

海洋環境腐蝕分類

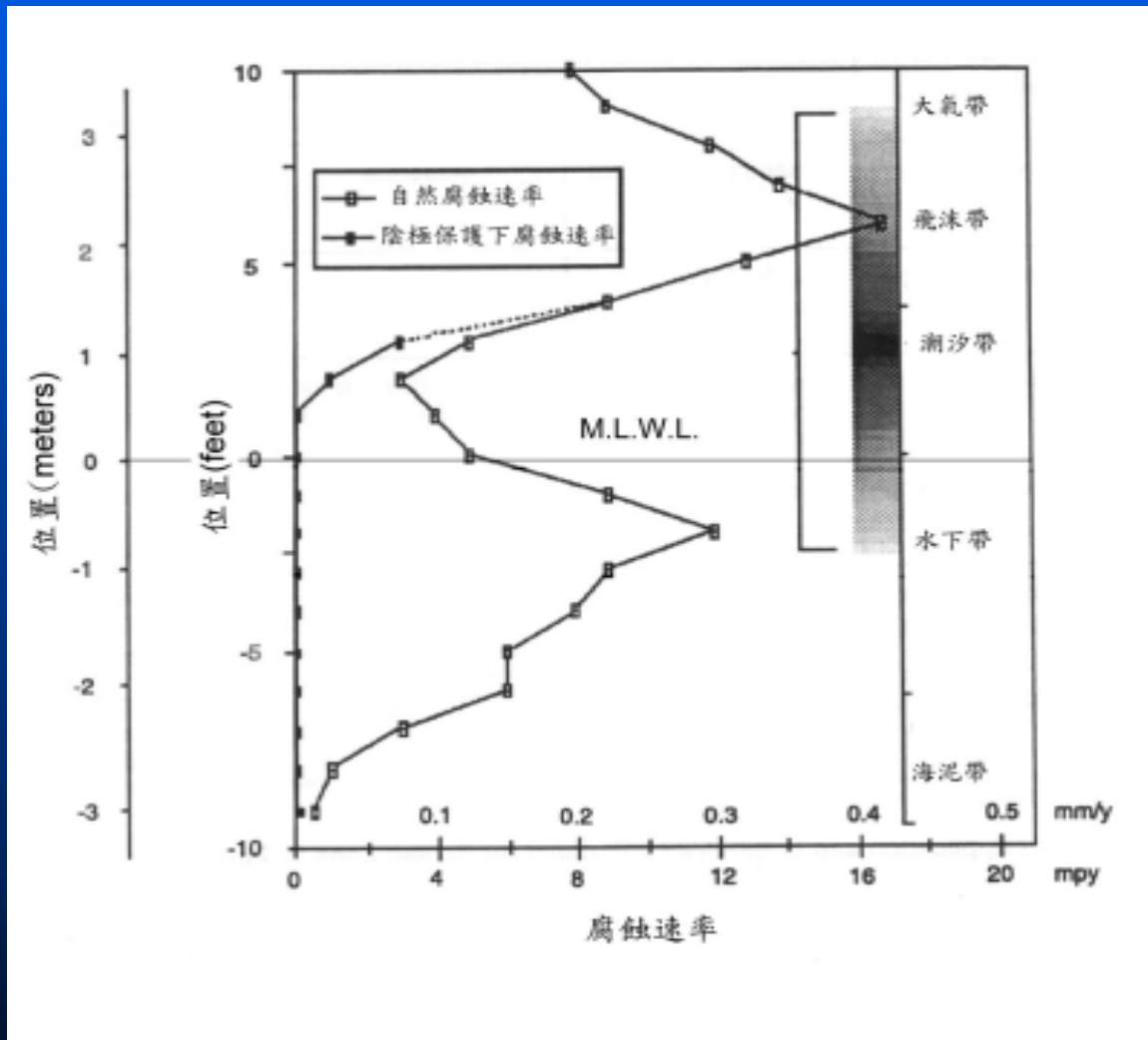


1. 大氣帶
2. 飛沫帶
3. 潮汐帶
4. 水中帶
5. 海泥帶

潮間帶

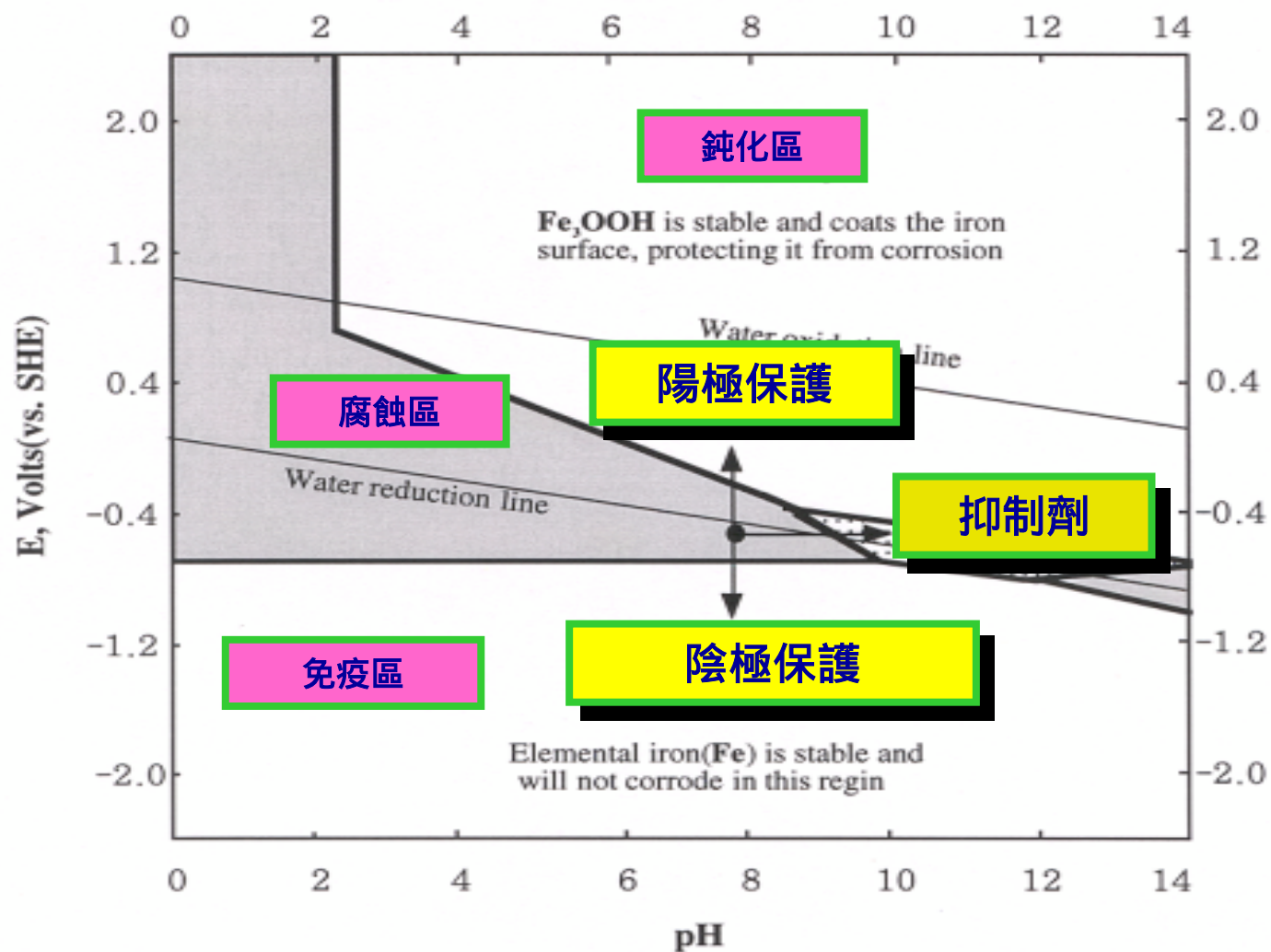
From Corrosion of Metals in Marine Environments, by Boyd etc.

海洋環境腐蝕趨勢

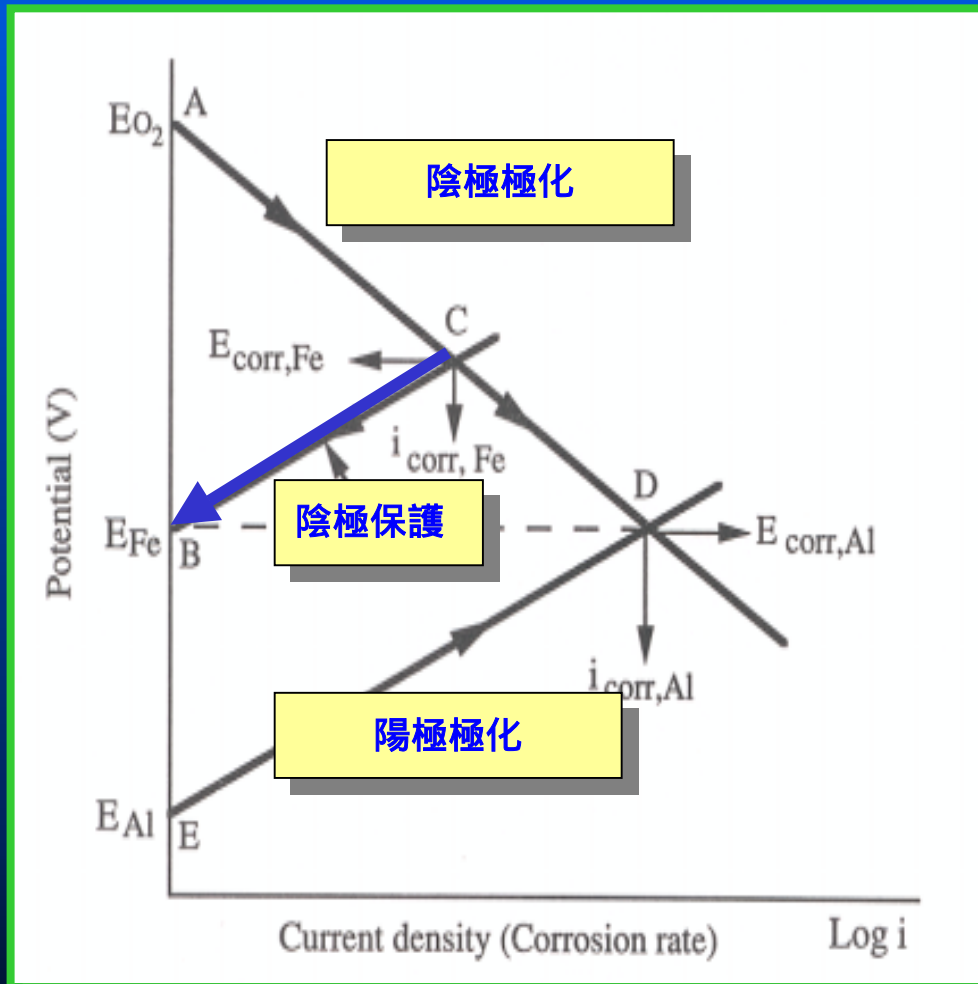


(資料來源：NACE International Task Group T-1G-27)

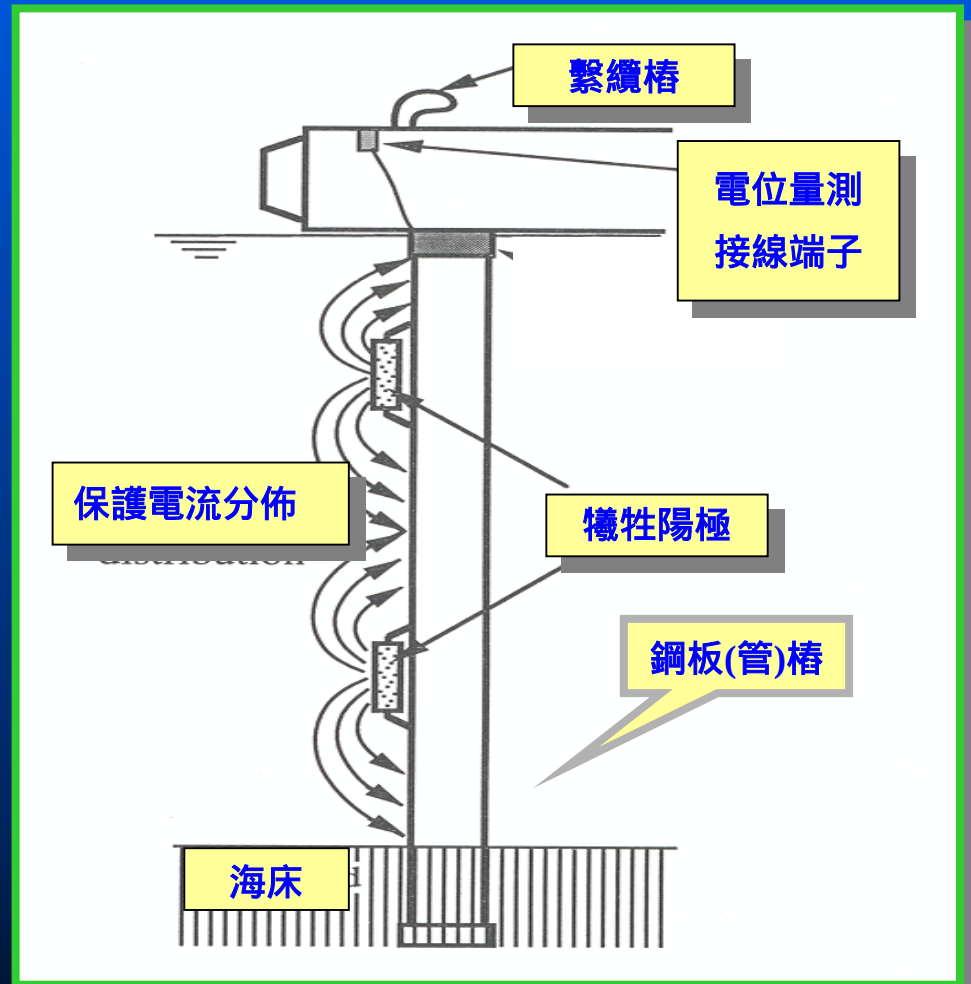
陰極防蝕原理



犧牲陽極法

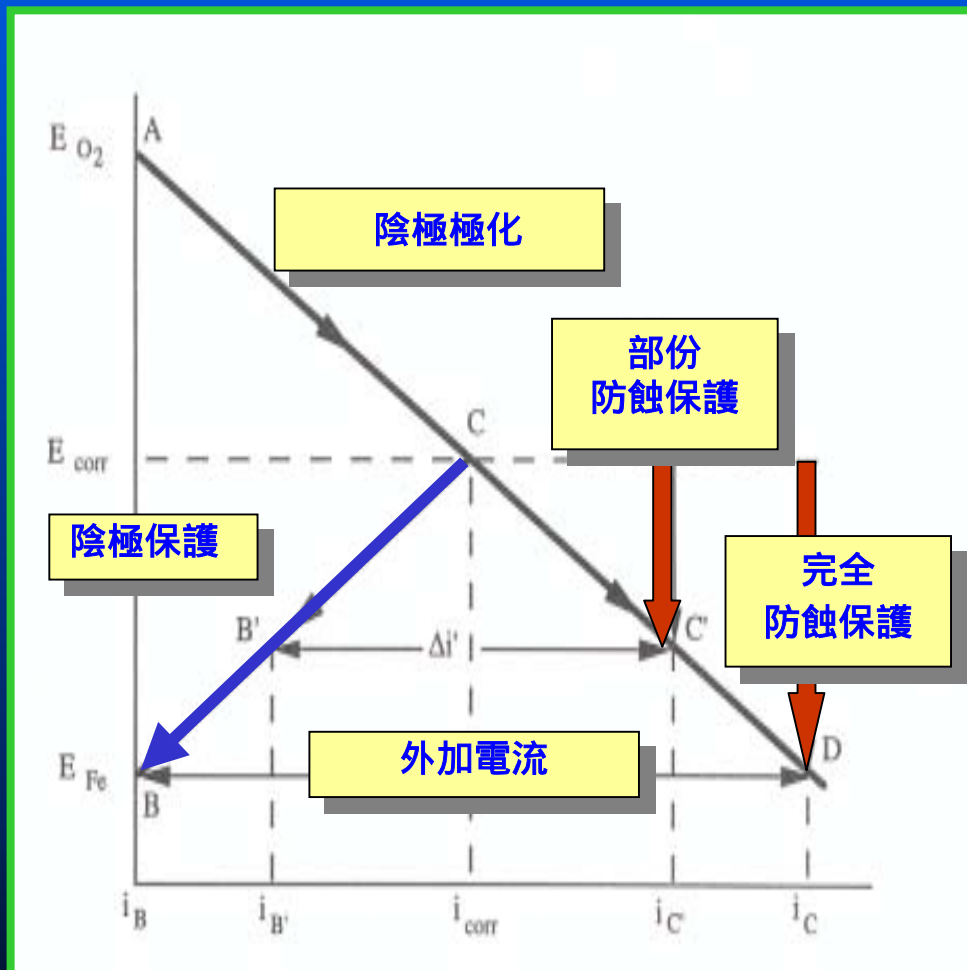


犧牲陽極法之極化曲線

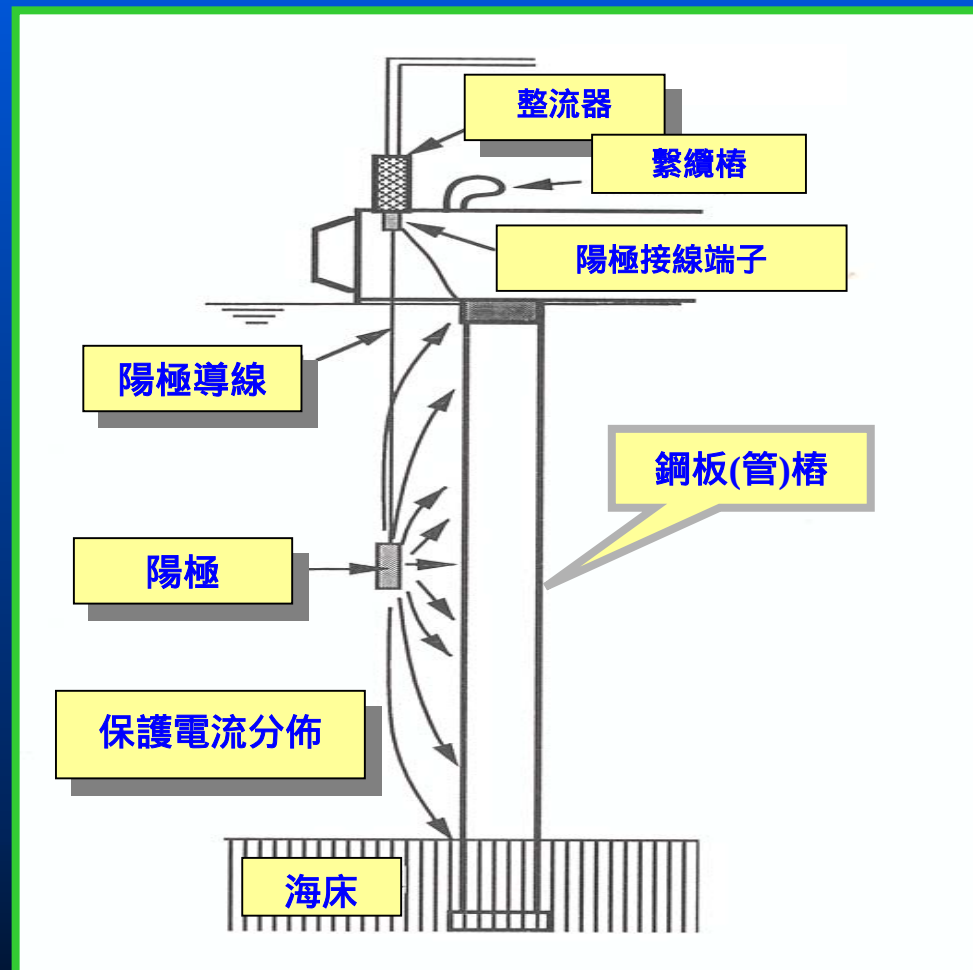


碼頭鋼板管樁犧牲陽極法示意圖

外加電流法



外加電流法之極化曲線



碼頭鋼板(管)樁外加電流法示意圖

陰極防蝕規範參考資料

規範準則名稱	制訂單位	發行國別	最後出版日期
港灣鋼構造物防蝕、補修手冊 (改訂版)	日本沿岸開發技術研究中心	日本	1997年4月
港灣構造物的維持、補修手冊	日本沿岸開發技術研究中心	日本	1999年6月
BSI-BS 7361 Cathodic Protection, Part1. Code of practice for land and marine applications	British Standard	英國	1991年
BS EN 13174 Cathodic protection of harbour installations	British & Euopean Standards	英國	2001年
EN 13173 Cathodic protection for steel offshore floating structures	Euopean Standards	英國	2001年
EN 12474 Cathodic protection of submarine pipelines	Euopean Standards	英國	2001年
DNV RP-B401 Cathodic Protection Design	Det norske Veritas	挪威	1993年
DIN 30676 Design and application of cathodic protection of external surfaces	German Institute for Standardization	德國	1985年10月
NORSOK Standard M-503 Cathodic protection	Norwegian Technology Standards Institution	挪威	1997年9月

陰極防蝕規範參考資料

NACE-RP0169 Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping Systems	NACE International	美國	2002年
NACE- RP0176 Corrosion Control of Steel Fixed Offshore Platforms Associated with Petroleum Production	NACE International	美國	1994年
NACE-RP0387 Metallurgical and Inspection Requirements for Cast Sacrificial Anodes for Offshore Applications	NACE International	美國	1999年
NACE-RP0492 Metallurgical and Inspection Requirements for Offshore Pipeline Bracelet Anodes	NACE International	美國	1999年
NACE-RP0286 The Electrical Isolation of Cathodically Protected Pipelines	NACE International	美國	2002年
陰極防蝕工程手冊	化學工業出版社	中國大陸	1998年

名稱 (制定機關)	運輸省港灣局監修 港灣設施之技術基準・同解説 (改訂版)(1989.2) (社)日本港灣協會	海城中土木鋼構造物之電氣防 蝕設計指針(案)・同解説 (1991.3) (日本建設省土木研究所)	RP B401 (1993) Cathodic Protection Design (DNV)	BS 7361 Part 1: 1991 Cathodic Protection (BSI)	RP0176-94(Rev'd Mar. 1994) Corrosion Control of Steel Fixed Offshore Platforms Associated with Petroleum Production (NACE Int'l)																																																																																																															
防蝕電位	參考電極防蝕電位(單位: mV) 飽和甘汞電極 (SCE) -770 氯化銀參考電極 (Ag/AgCl [sw]) -780 飽和硫酸銅參考電極 (Cu/CuSO ₄) -850	環境防蝕電位(SCE) 單位: mV 清淨海域 -770 污染海域 -900 高流速海域 -770 與塗裝並用之防蝕電位(SCE) -770 ~ -1050	環境防蝕電位(Ag/AgCl[sw]) 單位: V 通氣性環境 -0.80 以下 厭氣性環境 -0.90 以下	環境參考電極防蝕電位 單位: V 通氣性環境 Cu/CuSO ₄ -0.80 以下 Ag/AgCl [sw] -0.80 以下 Ag/AgCl [sat'd KCl] -0.75 以下 Zn +0.25 以下 厭氣性環境 Cu/CuSO ₄ -0.95 以下 Ag/AgCl [sw] -0.90 以下 Ag/AgCl [sat'd KCl] -0.85 以下 Zn +0.15 以下	防蝕基準(Ag/AgCl [sw]) 防蝕電位 -0.80 V 以下 與自然腐蝕電位相較，往負 的方向位移 300 mV 以上 參考電極防蝕電位(單位: V) Cu/CuSO ₄ -0.85 以下 SCE -0.78 以下 Zn +0.25 以下 Ag/AgCl [sat'd KCl] -0.75 以下																																																																																																															
防蝕電流密度	環境初期電流密度 海水中 100 mA/m ² 石礫中 50 mA/m ² 海土中 20 mA/m ² 陸土中 10 mA/m ² 包覆塗裝初期電流密度 塗裝 20+100S mA/m ² 混凝土 10+100S mA/m ² 有機被覆 100S mA/m ² S:損傷率= $\frac{\text{塗裝或被覆破損面積}}{\text{全部面積}}$	環境電流密度(mA/m ²) <table><tr><th colspan="3" rowspan="2">環 境</th><th colspan="2">陰極防蝕</th><th rowspan="2">複合陰極防蝕</th></tr><tr><th>初期電流密度</th><th>最終電流密度</th></tr><tr><td rowspan="2">一般</td><td rowspan="2">內灣性</td><td>海水中</td><td>100</td><td>50</td><td rowspan="10">為左邊之值乘 以 P₁P₂ 為塗膜 破損或劣化時 之裸鋼露出 率，約為 0.1 ~ 0.25</td></tr><tr><td>土 中</td><td>20</td><td>10</td></tr><tr><td rowspan="2">海城</td><td rowspan="2">外洋性</td><td>海水中</td><td>100 x F</td><td>50 x F</td></tr><tr><td>土 中</td><td>20 x F</td><td>10 x F</td></tr><tr><td rowspan="2">特殊</td><td rowspan="2">污染</td><td>海水中</td><td>100 x K</td><td>50 x K</td></tr><tr><td>土 中</td><td>20 x K</td><td>10 x K</td></tr><tr><td rowspan="3">海城</td><td rowspan="3">流速</td><td>1 m/s</td><td>160</td><td>80</td></tr><tr><td>2 m/s</td><td>230</td><td>115</td></tr><tr><td>3 m/s</td><td>270</td><td>135</td></tr></table> F 為波浪海流影響因素，約為 1.0 ~ 1.5 K 為污染程度，約為 1.2 ~ 1.5	環 境			陰極防蝕		複合陰極防蝕	初期電流密度	最終電流密度	一般	內灣性	海水中	100	50	為左邊之值乘 以 P ₁ P ₂ 為塗膜 破損或劣化時 之裸鋼露出 率，約為 0.1 ~ 0.25	土 中	20	10	海城	外洋性	海水中	100 x F	50 x F	土 中	20 x F	10 x F	特殊	污染	海水中	100 x K	50 x K	土 中	20 x K	10 x K	海城	流速	1 m/s	160	80	2 m/s	230	115	3 m/s	270	135	典型海域的設計基準 <table><tr><th rowspan="2">海域</th><th rowspan="2">比電阻 (Ω.cm)</th><th rowspan="2">溫度 (°C)</th><th colspan="3">防蝕電流密度 (mA/m²)</th></tr><tr><th>初期</th><th>平均</th><th>最終</th></tr><tr><td>墨西哥灣</td><td>20</td><td>22</td><td>110</td><td>55</td><td>75</td></tr><tr><td>美國西岸</td><td>24</td><td>15</td><td>150</td><td>90</td><td>100</td></tr><tr><td>庫克灣</td><td>50</td><td>2</td><td>430</td><td>380</td><td>380</td></tr><tr><td>北海北部</td><td>26 ~ 33</td><td>0 ~ 12</td><td>180</td><td>90</td><td>120</td></tr><tr><td>北海南部</td><td>26 ~ 33</td><td>0 ~ 12</td><td>150</td><td>90</td><td>100</td></tr><tr><td>紐芬蘭</td><td>15</td><td>30</td><td>130</td><td>65</td><td>90</td></tr><tr><td>澳洲</td><td>23 ~ 30</td><td>12 ~ 18</td><td>130</td><td>90</td><td>90</td></tr><tr><td>巴西</td><td>20</td><td>15 ~ 20</td><td>180</td><td>65</td><td>90</td></tr><tr><td>非洲西岸</td><td>20 ~ 30</td><td>5 ~ 21</td><td>130</td><td>65</td><td>90</td></tr><tr><td>印尼</td><td>19</td><td>24</td><td>110</td><td>55</td><td>75</td></tr></table>	海域	比電阻 (Ω.cm)	溫度 (°C)	防蝕電流密度 (mA/m ²)			初期	平均	最終	墨西哥灣	20	22	110	55	75	美國西岸	24	15	150	90	100	庫克灣	50	2	430	380	380	北海北部	26 ~ 33	0 ~ 12	180	90	120	北海南部	26 ~ 33	0 ~ 12	150	90	100	紐芬蘭	15	30	130	65	90	澳洲	23 ~ 30	12 ~ 18	130	90	90	巴西	20	15 ~ 20	180	65	90	非洲西岸	20 ~ 30	5 ~ 21	130	65	90	印尼	19	24	110	55	75
環 境						陰極防蝕			複合陰極防蝕																																																																																																											
			初期電流密度	最終電流密度																																																																																																																
一般	內灣性	海水中	100	50	為左邊之值乘 以 P ₁ P ₂ 為塗膜 破損或劣化時 之裸鋼露出 率，約為 0.1 ~ 0.25																																																																																																															
		土 中	20	10																																																																																																																
海城	外洋性	海水中	100 x F	50 x F																																																																																																																
		土 中	20 x F	10 x F																																																																																																																
特殊	污染	海水中	100 x K	50 x K																																																																																																																
		土 中	20 x K	10 x K																																																																																																																
海城	流速	1 m/s	160	80																																																																																																																
		2 m/s	230	115																																																																																																																
		3 m/s	270	135																																																																																																																
海域	比電阻 (Ω.cm)	溫度 (°C)	防蝕電流密度 (mA/m ²)																																																																																																																	
			初期	平均	最終																																																																																																															
墨西哥灣	20	22	110	55	75																																																																																																															
美國西岸	24	15	150	90	100																																																																																																															
庫克灣	50	2	430	380	380																																																																																																															
北海北部	26 ~ 33	0 ~ 12	180	90	120																																																																																																															
北海南部	26 ~ 33	0 ~ 12	150	90	100																																																																																																															
紐芬蘭	15	30	130	65	90																																																																																																															
澳洲	23 ~ 30	12 ~ 18	130	90	90																																																																																																															
巴西	20	15 ~ 20	180	65	90																																																																																																															
非洲西岸	20 ~ 30	5 ~ 21	130	65	90																																																																																																															
印尼	19	24	110	55	75																																																																																																															

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

名 稱 (制定機關)		運輸省港灣局監修 港灣設施之技術基準・同解説 (改訂版)(1989.2) ((社)日本港灣協會)		海城中土木鋼構造物之電氣防 蝕設計指針(案)・同解説 (1991.3) (日本建設省土木研究所)		RP B401 (1993) Cathodic Protection Design (DNV)		BS 7361 Part 1: 1991 Cathodic Protection (BSI)		RP0176-94(Rev'd Mar. 1994) Corrosion Control of Steel Fixed Offshore Platforms Associated with Petroleum Production (NACE Int'l)									
電位、有效電流量及消耗量 犧牲陽極		特 性		Al-Zn-In		純鋅・鋅合金		海水中		清淨海水中		海水中							
		比重		2.6~2.8		7.14		陽極材料		陽極電位 (V)		有效電量 (A·h/kg)		陽極材料		陽極電位 (Volts)		消耗量 (kg/A·y)	
		開路陽極電壓 (V vs. SCE)		1.08		1.03		Al-Base		-1.05		2000		Mg-Al-Zn		-1.5~-1.7		8	
		對鐵的有效電壓 (V)		0.25		0.20		Zn-Base		-1.00		2500 max. 700 750 max.		Zn-Al-Cd		-1.05		12	
		理論發生電量 (A·h/g)		2.87		0.82								Zn-Hg		-1.05		12	
		海水中		電流效率 (%)		80		90		95				Al-Zn		-0.97		4~8	
		1 mA/cm ²		實際發生電量 (A·h/g)		2.30		2.60		0.78				Al-Zn-Sn		-1.1~-1.15		4~9	
				消耗量 (kg/A·y)		3.8		3.4		11.8				Al-Zn-Hg		-1.05		約 3.5	
		土中		電流效率 (%)		65*		65											
		0.03 mA/cm ²		實際發生電量 (A·h/g)		1.86*		0.53											

陰極防蝕案例

案例一：日本A港，水深-10.0 m之鋼板樁岸壁碼頭

■ 陽極選用

- 陽極材料：鋁合金陽極。
- 尺寸： $(150 + 175) \times 170 \times 1380$ mm。
- 含蕊心之陽極重量： $109.5 \text{ kg} \pm 2\%$ ，淨重： $102.3 \text{ kg} \pm 2\%$ 。
- 電流量： $30.3 \text{ A} \cdot \text{y}$ 。
- 初期發生電流： 3.0 A/塊 。
- 耐用年數：20年。

側視圖

正視圖



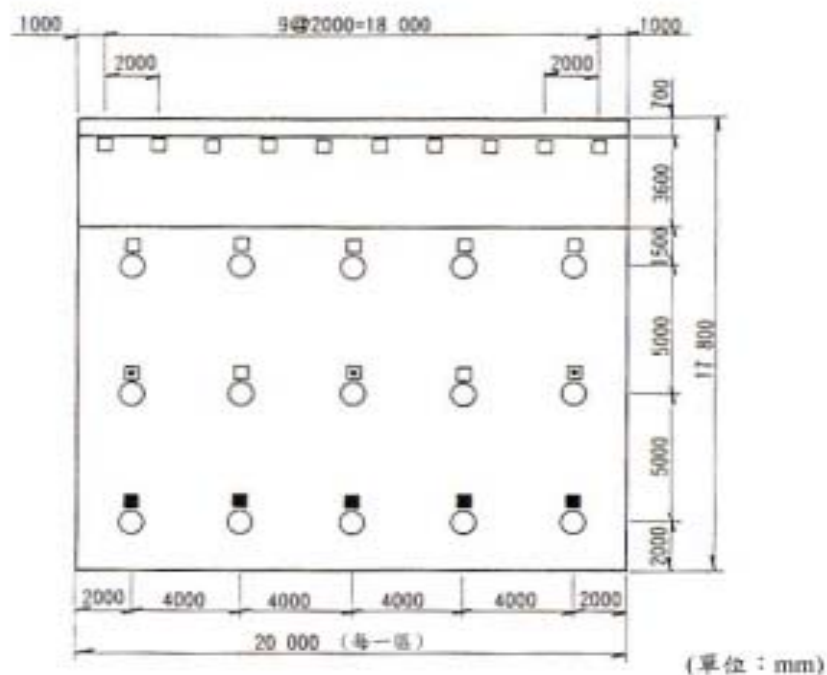
陰極防蝕案例-續

案例二：日本B港，水深-13.0 m之鋼管樁棧橋碼頭(岸壁為鋼板樁)

■ 陽極選用

- 陽極材料：鋁合金陽極。
- 尺寸： $(130 + 175) \times 150 \times 1990$ mm。
- 含蕊心之陽極重量： $130.0 \text{ kg} \pm 2\%$ ，淨重： $122.1 \text{ kg} \pm 2\%$ 。
- 電流量： $36.2 \text{ A} \cdot \text{y}$ 。
- 初期發生電流： 3.5 A/塊 。
- 耐用年數：20年。

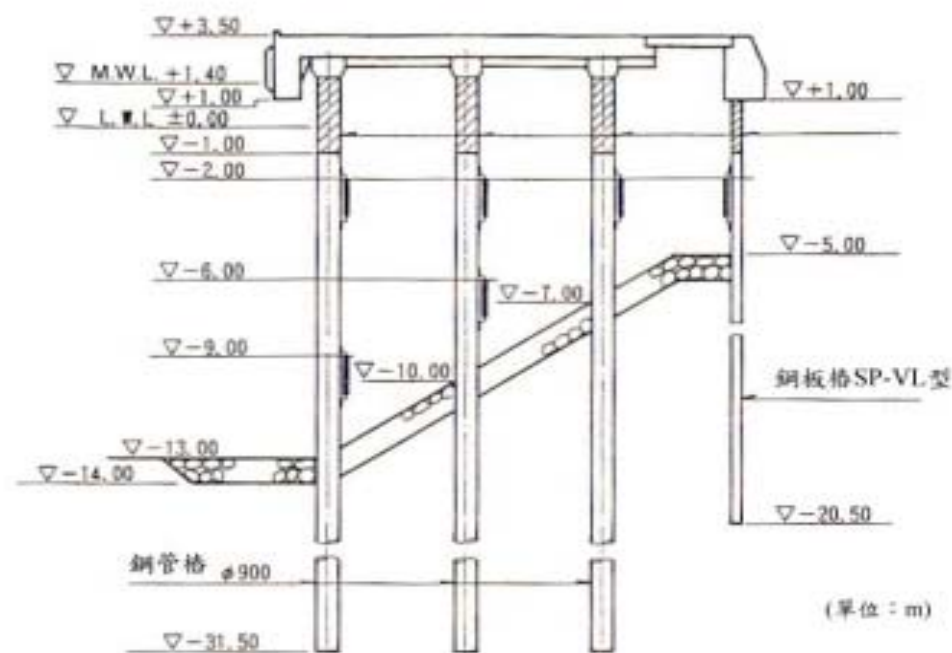
陽極安裝配置圖



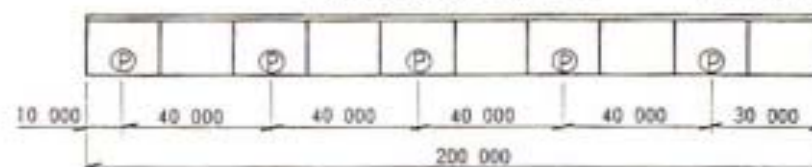
陽極配置數量表

陽極配置 記號	安裝水深(m)	數量(塊/每區)	合計(10區)
鋼管格 ■	-2.0, -9.0	2 × 5 = 10	100 塊
鋼管格 □	-2.0, -6.0	2 × 3 = 6	60 塊
鋼管格 □	-2.0	1 × 7 = 7	70 塊
鋼板格 □	-2.0	1 × 10 = 10	100 塊
合 計		33	330 塊

犧牲陽極安裝位置



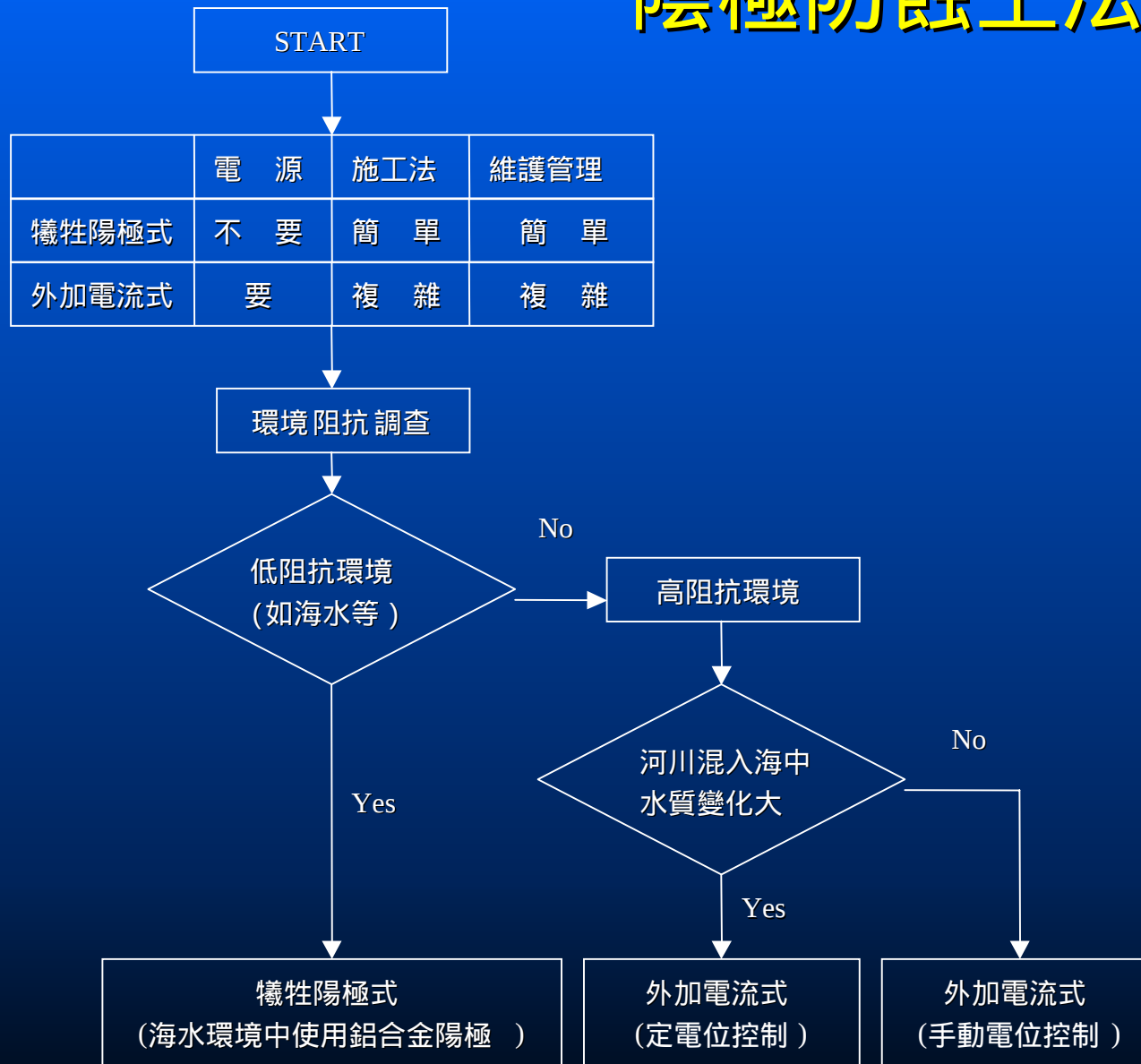
電位量測裝置配置圖 (單位：mm)



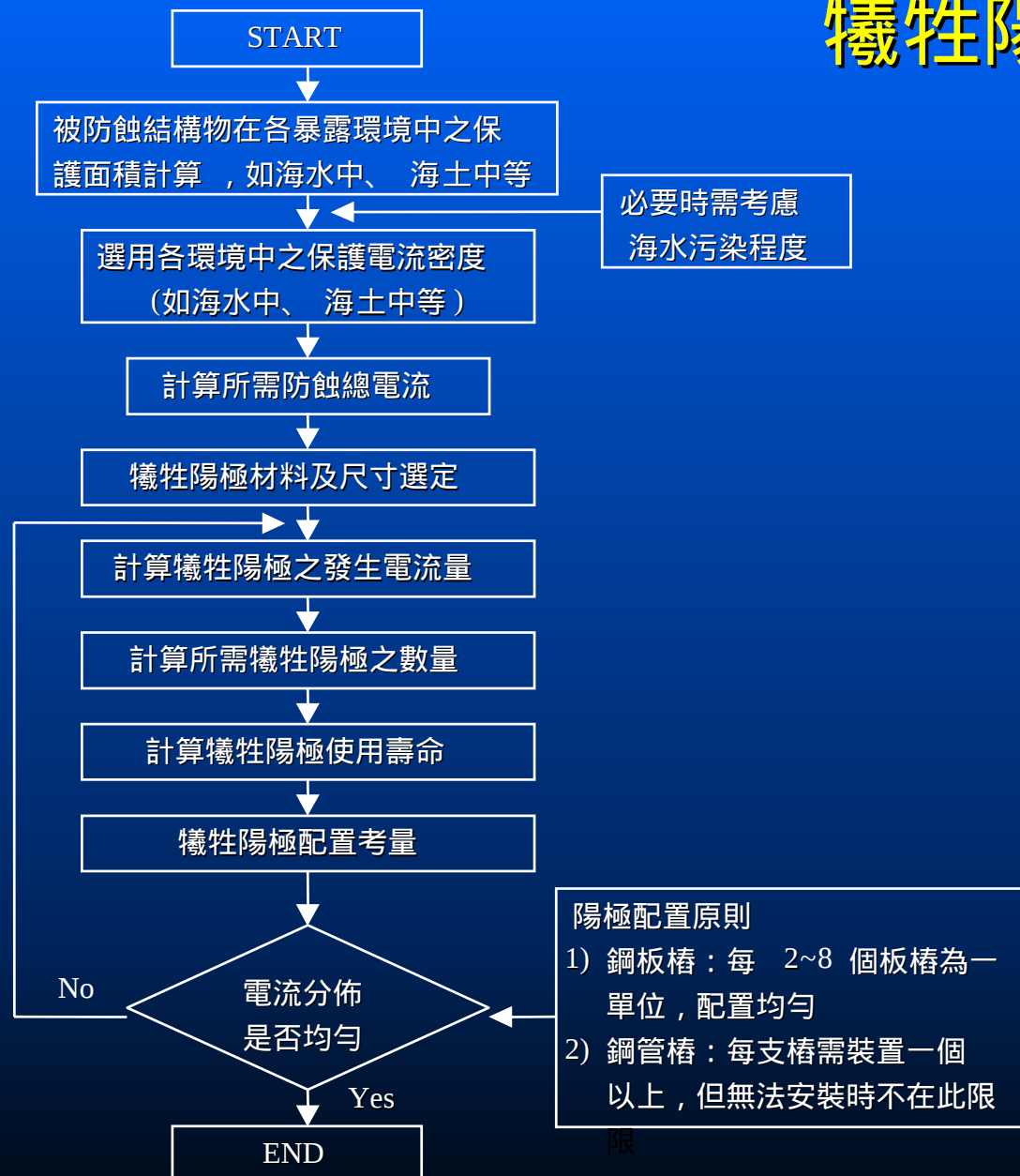
陰極防蝕系統選擇

- 港灣鋼構造物陰極防蝕系統的選擇，可以採用犧牲陽極法、外加電流法或兩者相結合。對於港口碼頭設施，過去多採用外加電流法的陰極保護，但80年代至今，由於犧牲陽極不斷開發且防蝕性能提高，目前國內外多採用犧牲陽極式陰極保護；但在水質變化較大的河口或是流速較大的區域，海水中鋼構造物的陰極防蝕仍宜考慮外加電流式的保護系統的選用。

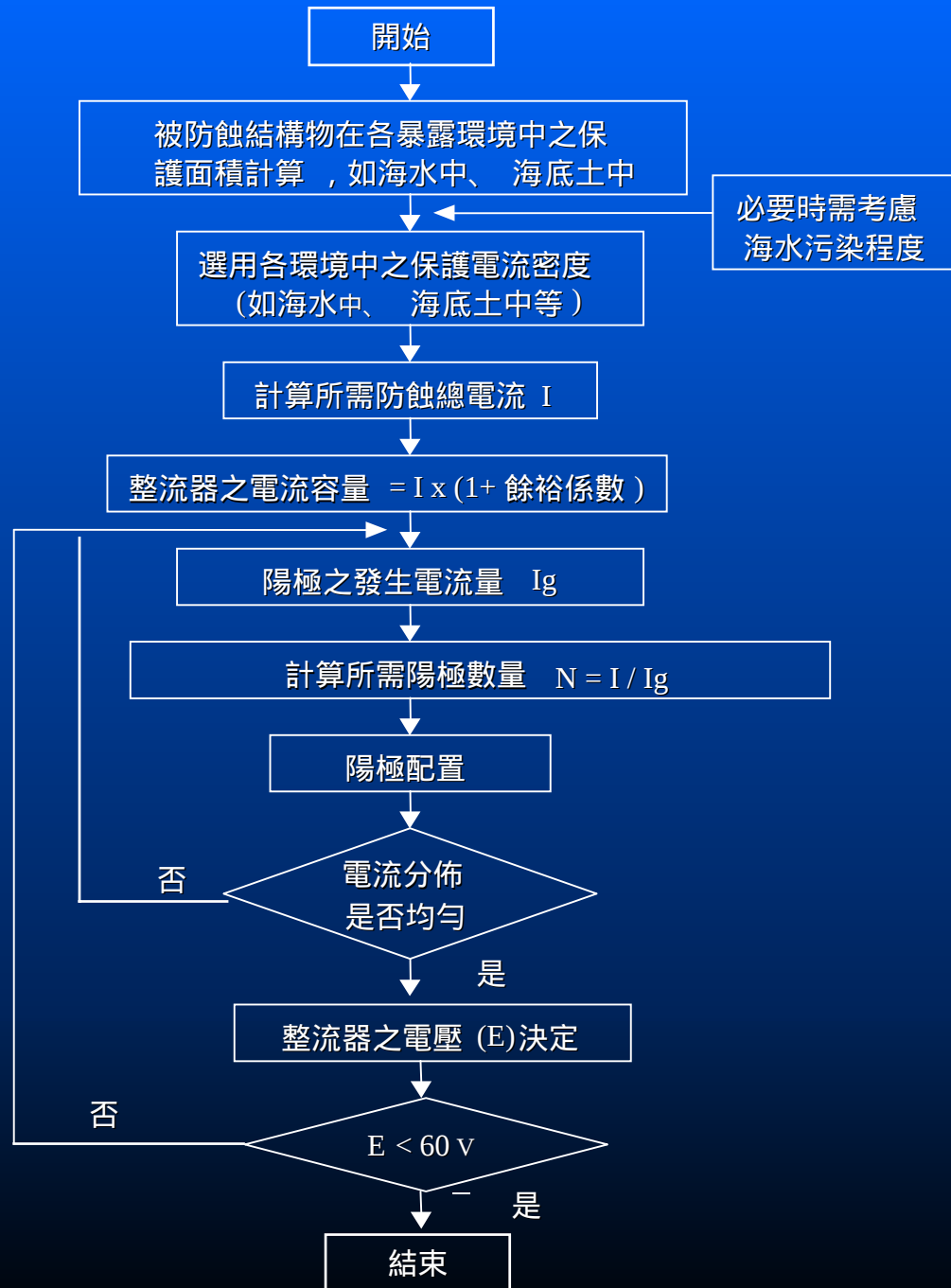
陰極防蝕工法選擇



犧牲陽極法



外加電流法



陰極保護設計計算

■ 鋼板樁保護面積計算

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

➤ 海土中面積 $A_{s2} = n \times L \times H_2$

式中， A_{s1} 、 A_{s2} = 鋼板樁海水、海土中面積， m^2

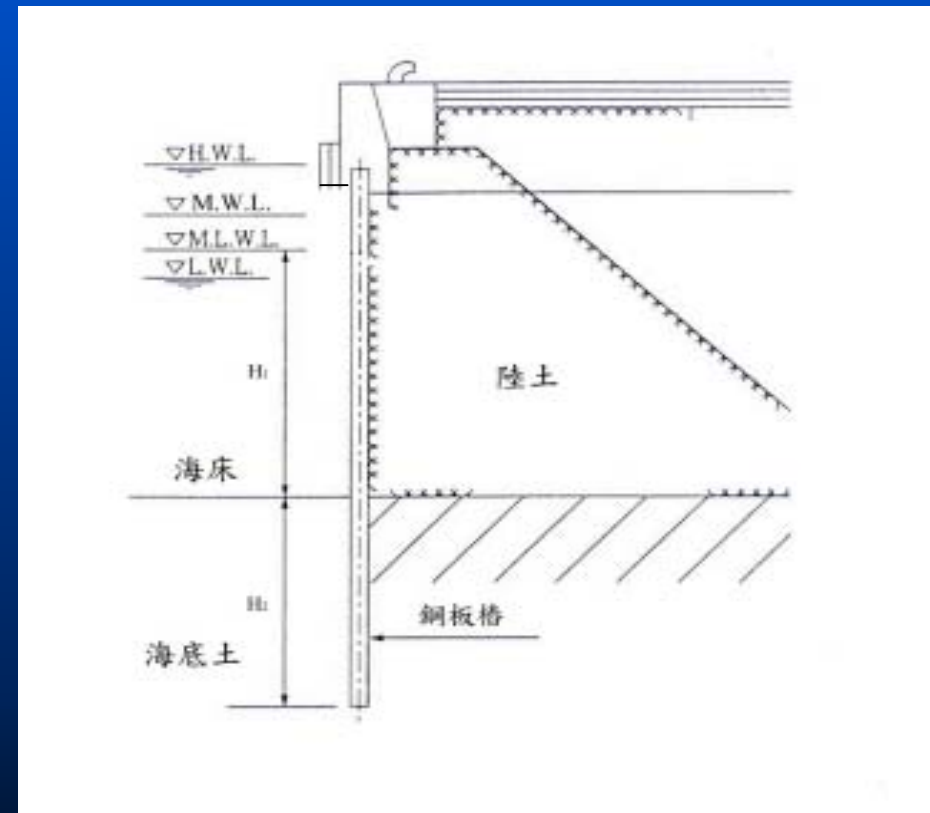
L = 鋼板樁沿岸長度， m

H_1 、 H_2 = 海水、海土中長度， m

n = 鋼板樁周邊係數(依鋼板樁型式而異)

海水中長度計算

- 海水中的長度原則上是以平均低潮位(M.L.W.L.)以下至海床間的區域計算。但若考慮水深測量的誤差，必要時可以平均潮位(M.W.L.)以下至海底土間的區域計算。



陰極保護設計計算-續

■ 防蝕電流計算

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

式中， I =所需防蝕總電流，mA

i_i =各環境採用之防蝕電流密度(初始極化防蝕電流密度)，mA/m²

A_i =海水中或海土中之保護結構物面積，m²

裸鋼防蝕電流密度選用

環 境			陰 極 防 蝕
			初 期 電 流 密 度 i (mA/m ²)
一 般 海 域	港 灣	海 水 中	100
		石 礫 中	50
		海 底 土 中	20
	外 海	海 水 中	150
		石 礫 中	75
		海 底 土 中	30
特 殊 海 域	污 染	海 水 中	150
		石 礫 中	75
		海 底 土 中	30
	流 速	1 m/s	160
		2 m/s	230
		3 m/s	270

註:污染海域係指河川或各種排水流入海水處。參考日本建設省土木研究所「海域中土木鋼構造物之電氣防蝕設計指針(案)·同解說」,以 $[\text{NH}_4^+(\text{ppm}) + 1/\text{Cl}^-(\%)]$ 之計算值為污染指標,當污染指標值大於0.8時為污染海域。

塗裝被覆鋼構造物防蝕電流密度

塗裝被覆初期電流密度

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

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

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

i : 電流密度值，依裸鋼鋼構造物所在環境選用

$$B : \text{破損率 (\%)} = \frac{\text{塗裝或被覆破損面積}}{\text{全部面積}} \times 100 \%$$

犧牲陽極陰極保護設計計算-續

■ 犧牲陽極發生電流量計算

$$I_g = \frac{E}{R_a} \times 1000$$

式中， I_g = 每塊犧牲陽極的發生電流，mA

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

R_a = 犧牲陽極對海水的電阻， Ω

犧牲陽極對海水電阻之計算

- 長條棒狀陽極(與被保護結構物表面距離 ≥ 30 cm , 且 $L \geq 4r$)

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

式中 ,

R_a = 犧牲陽極對海水的電阻 , Ω

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

L = 陽極長度 , cm

r = 陽極半徑(或陽極等效半徑) , cm

若陽極非圓柱體 , 則陽極等效半徑

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

A = 陽極的斷面面積 , cm^2

犧牲陽極對海水電阻之計算

- 長條棒狀陽極(與被保護結構物表面距離 ≥ 30 cm , 且 $L < 4r$)

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

式中，

R_a = 犧牲陽極對海水的電阻， Ω

ρ = 海水比電阻， $\Omega \cdot \text{cm}$

L = 陽極長度，cm

r = 陽極半徑(或陽極等效半徑)，cm

若陽極非圓柱體，則陽極等效半徑

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

A = 陽極的斷面面積， cm^2

犧牲陽極對海水電阻之計算

■ 板狀陽極

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

式中， R_a = 犧牲陽極對海水的電阻， Ω

ρ = 海水比電阻， $\Omega \cdot \text{cm}$

C = 陽極長度與寬度的平均值， cm

犧牲陽極對海水電阻之計算

■ 其他形狀之陽極

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

式中， R_a = 犧牲陽極對海水的電阻， Ω

ρ = 海水比電阻， $\Omega \cdot \text{cm}$

S = 陽極的表面積， cm^2

犧牲陽極陰極保護設計計算-續

■ 犧牲陽極用量計算

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

式中，

N_i =浸入海水中(或海土中)被保護部位所需犧牲陽極的塊數

i_i =各環境採用之防蝕電流密度(初始極化防蝕電流密度)，mA/m²

A_i =海水中(或海土中)之保護結構物面積，m²

I_g =每塊犧牲陽極的發生電流，mA

所需犧牲陽極總塊數 $N = (\sum N_i) \times (1 + \text{餘裕係數})$

裕餘度設計

■ 犧牲陽極式：

所需犧牲陽極總塊數 $N = (\sum N_i) \times (1 + \text{餘裕係數})$

式中，餘裕係數為10% ~ 20%

■ 外加電流式：

裕餘度為原計算保護總電流之1.1 ~ 1.2倍

犧牲陽極陰極保護設計計算-續

■ 陽極壽命計算

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

式中， L =陽極使用壽命，year (y)

N =被保護設施所需陽極總塊數

W =每塊陽極原始重量，kg

E =陽極消耗量，kg/A·y

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

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

犧牲陽極配置

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

犧牲陽極材料選擇

- 依據CNS 13521「陰極防蝕用犧牲陽極性能檢驗法」之步驟，採集陰極防蝕施工位置水表海水，進行下列測試：

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

$$\text{電流效率 (\%)} = \frac{\text{電量計所得之電量 (A.h)} \times 100 \%}{\text{陽極減少之重量 (g)} \times \text{理論發生電量 (A.h/kg)}}$$

$$\text{消耗率 (kg/A.Yr)} = \frac{1}{\text{實際發生電量 (A.h/kg)}} \times 365 \times 24 \text{ (h/Yr)}$$

陽極開路與閉路電位

鋁合金陽極塊之陽極性能

項 目	標 準
陽極開路電位(mV)	(S.C.E.) $\leq$ -1100 Cu/CuSO ₄ $\leq$ -1150 Ag/AgCl/Seawater $\leq$ -1100
有效電壓 (V)	0.25 $\pm$ 5%
理論發生電量 (A.h/kg)	2900 $\pm$ 2%
電流效率 (%)	90
有效電量 (A.h/kg)	2600
消耗率 (kg/A.Yr)	3.40

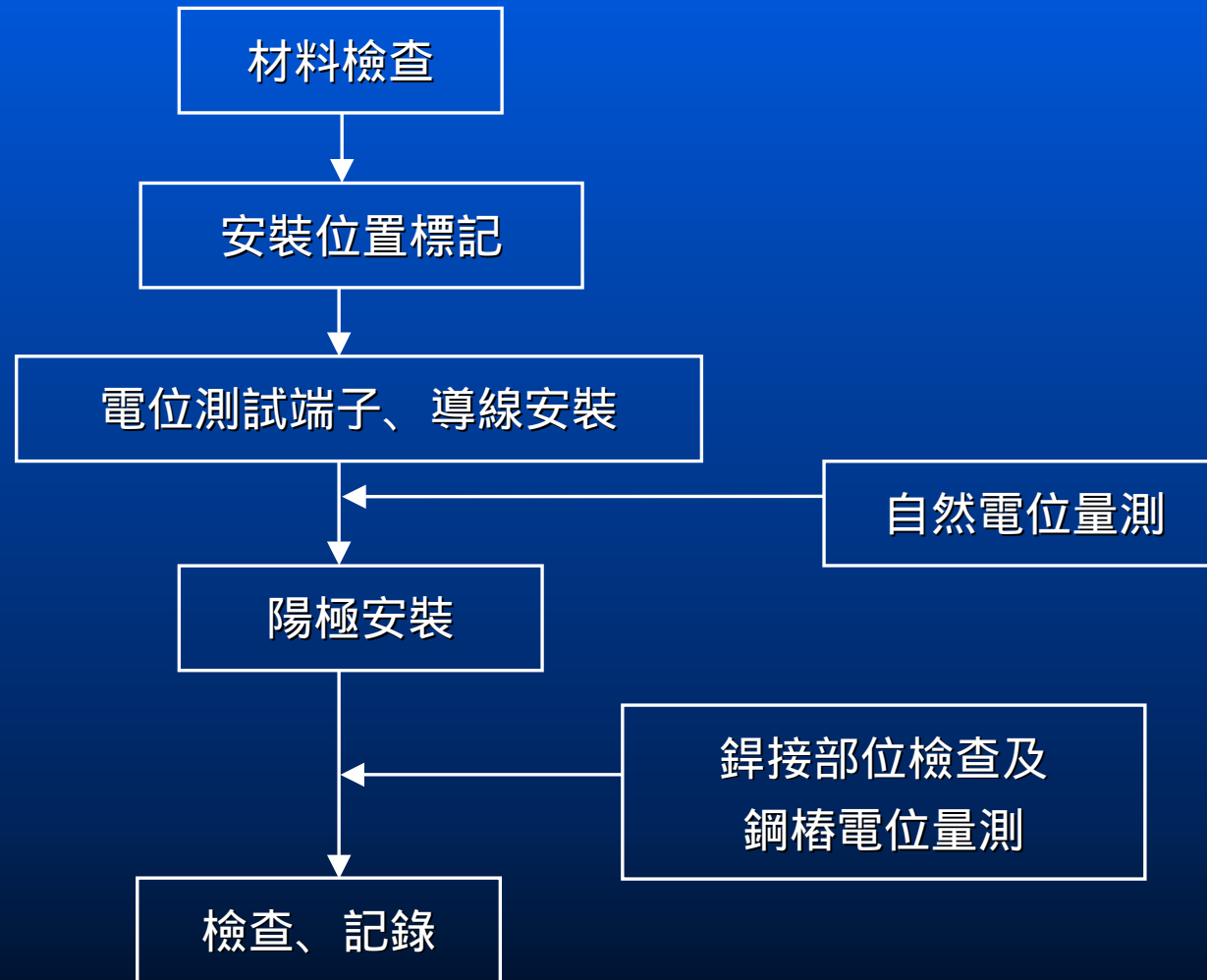
參考電極

海水中使用之參考電極為海水氯化銀電極(Ag/AgCl/seawater)

參考電極電位換算

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

犧牲陽極系統安裝流程圖



材料檢查

材料數量確認，尺寸、質量抽樣檢查

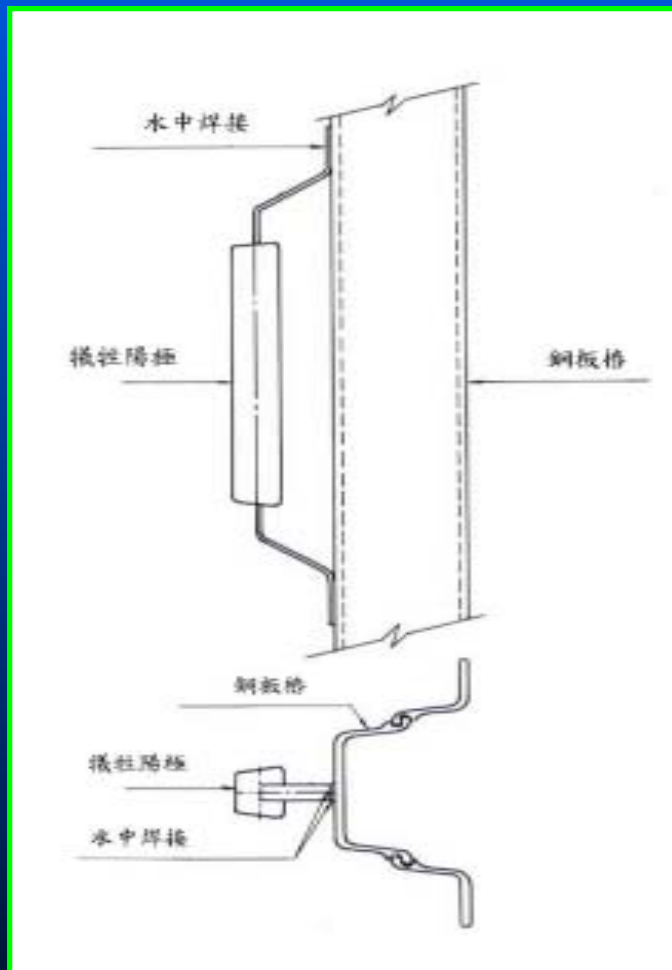


電位測試導線安裝

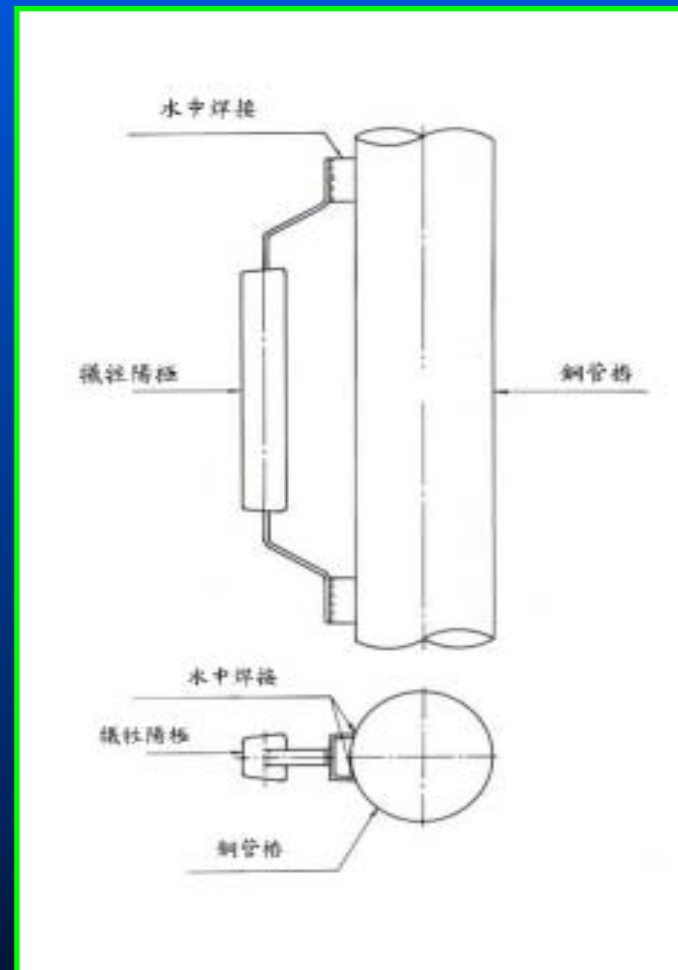
- 將導線銲接至鋼構造物上，並在銲接處加以密封防水。



犧牲陽極塊安裝示意圖



鋼板樁



鋼管樁

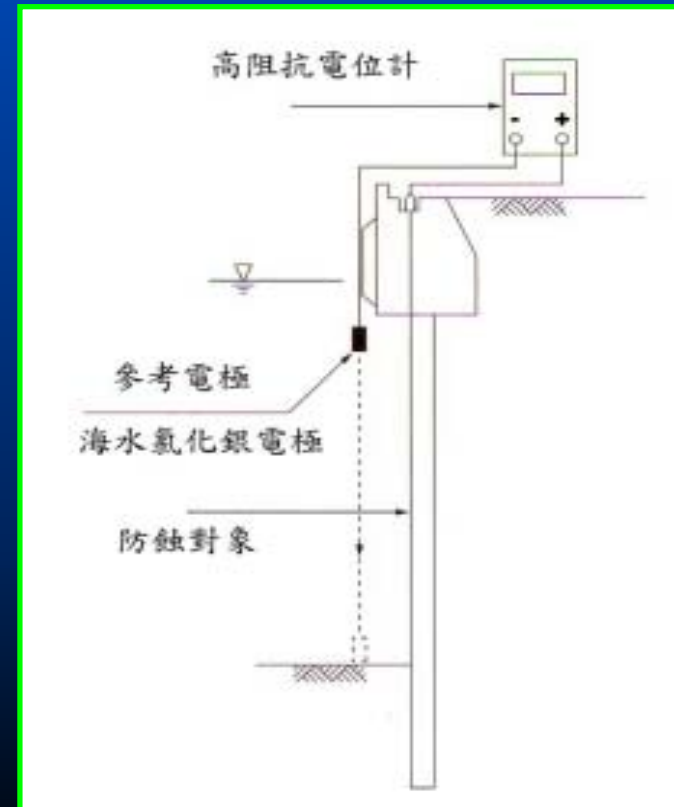
犧牲陽極塊支架銲接部位檢查



相片來源：聖強企業股份有限公司

電位量測

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



電位量測-續

- 固定位置之電位測試端子配置，以50 m ~ 100 m間隔為原則。若鋼管樁相互間無電連通，則固定位置電位端子所測得之電位，為端子銲接之單樁電位。

水下電位量測



相片來源：工研院工材所



相片來源：港灣技術研究中心

鋼板樁碼頭陰極防蝕設計案例

■ 岸壁構造及環境

碼頭	水深 (EL. m)	鋼板樁			浸漬長度 (m)		
		型式	長度(m)	底部高程 (m)	海水中	石礫中	海底土中
A	-15.0	HZ 775	28	-26.9	10.9	1.0	14.5
		ZH 12	22	-21.1	5.1	1.0	14.5
B	-15.0	HZ 775	28	-26.9	10.9	1.0	14.5
		ZH 12	22	-21.1	5.1	1.0	14.5
C	-14.0	HZ 775A	26	-24.9	9.9	1.0	13.5
		ZH 12	20	-19.1	4.1	1.0	13.5
D	-14.0	HZ 775	26	-24.9	9.9	1.0	13.5
		ZH 12	20	-19.1	4.1	1.0	13.5

資料來源：高雄港務局

鋼板樁碼頭陰極防蝕設計案例-續

■ 設計條件

➤ 海水比電阻： $25\ \Omega\cdot\text{cm}$ 。

➤ 防蝕電流密度選用：

海水中= $100\ \text{mA}/\text{m}^2$

石礫中= $50\ \text{mA}/\text{m}^2$

海底土中= $20\ \text{mA}/\text{m}^2$

➤ 陰極防蝕設計年限：20年。

➤ 陰極防蝕方式：犧牲陽極法。

鋼板樁碼頭陰極防蝕設計案例-續

■ 陽極選用

- 材料：鋁合金陽極。
- 尺寸： $(210 + 250) \times 240 \times 1000$ mm；蕊心所在之陽極兩面以煤焦樹脂塗佈。
- 陽極壽命計算：23年。

■ 陽極數量

碼頭	陽極數量計算 所需總電流量÷平均電流量	陽極數量(塊)
A 與 B 碼頭	$(3.74 \text{ A} \times 2) \div (3.684 \text{ A} \div 2)$	4.2 ~ 5
C 與 D 碼頭	$(3.46 \text{ A} \times 2) \div (3.684 \text{ A} \div 2)$	3.8 ~ 4

■ 陽極配置：

以3個水深配置，分別為-1.0 m，-5.0 m，-9.0 m

陰極防蝕驗收標準

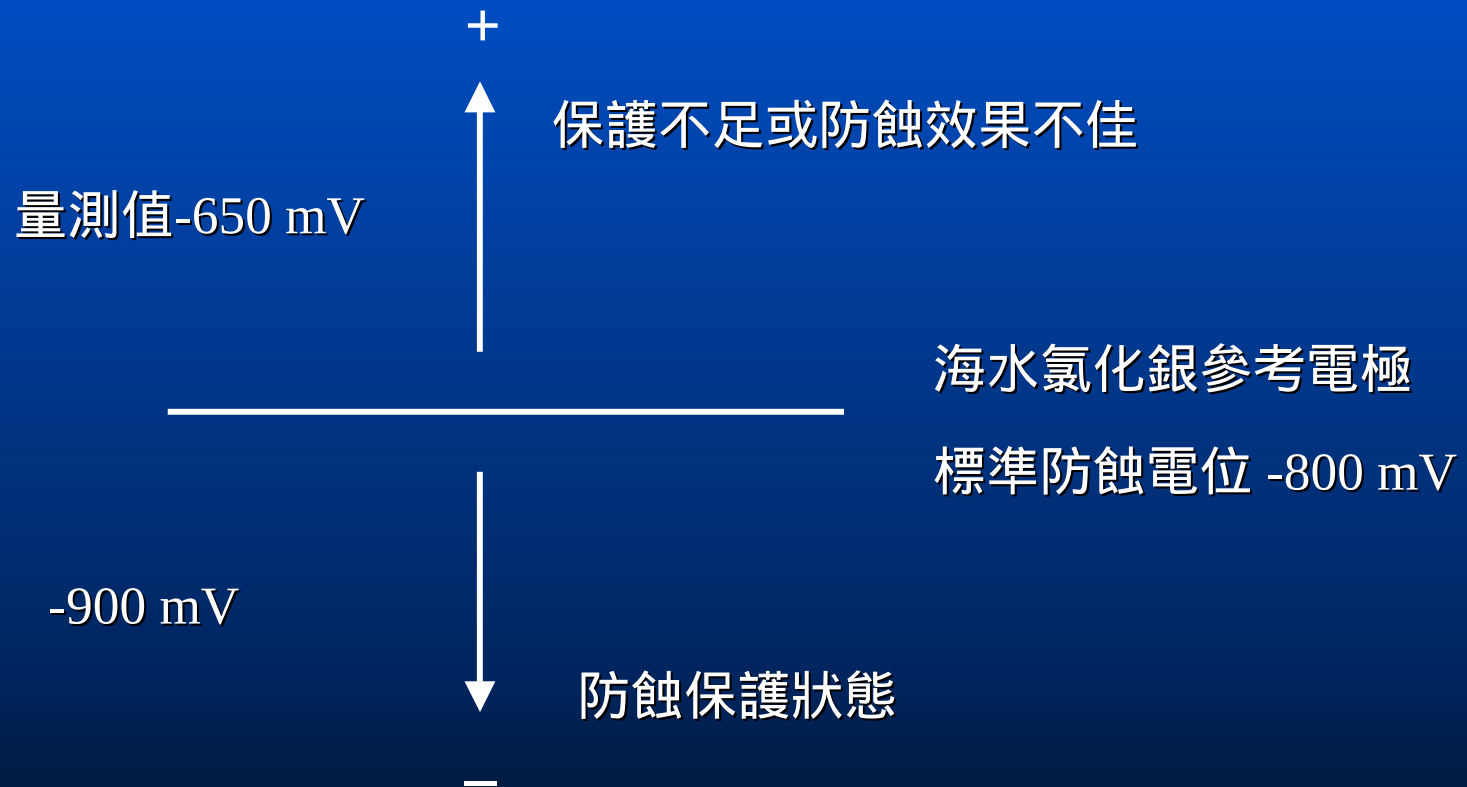
NACE RP-0169-02

海水中鋼構造物之防蝕保護電位標準

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

註：海水中常使用的參考電極為海水氯化銀電極(Ag/AgCl/seawater)

陰極防蝕效果判定



防蝕系統維護管理

■ 一般檢查

- 頻率：完工驗收後第一年每季一次，之後，每年進行一次檢查。

➤ 電位量測

在碼頭上已設置固定電位測試端子的地方，進行電位量測。端子的配置，沿碼頭法線方向，以50 m ~ 100 m間隔為原則。量測時，於端子位置，以海水氯化銀參考電極沿構造物深度方向，以1 m或適當的間隔進行電位量測。

防蝕系統維護管理-續

- 詳細檢查

- 頻率：每五年一次。

- 目視檢測

- 電位量測

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

- 犧牲陽極調查

犧牲陽極調查是針對陽極安裝情形與陽極消耗量等相關事項進行調查。陽極安裝情形係指陽極安裝數量的確認，陽極消耗量則是選擇陽極數量之5 % ~ 10 %進行調查。

犧牲陽極塊使用狀況



相片來源：高雄港務局

陽極剩餘壽命計算

■ 陽極剩餘重量

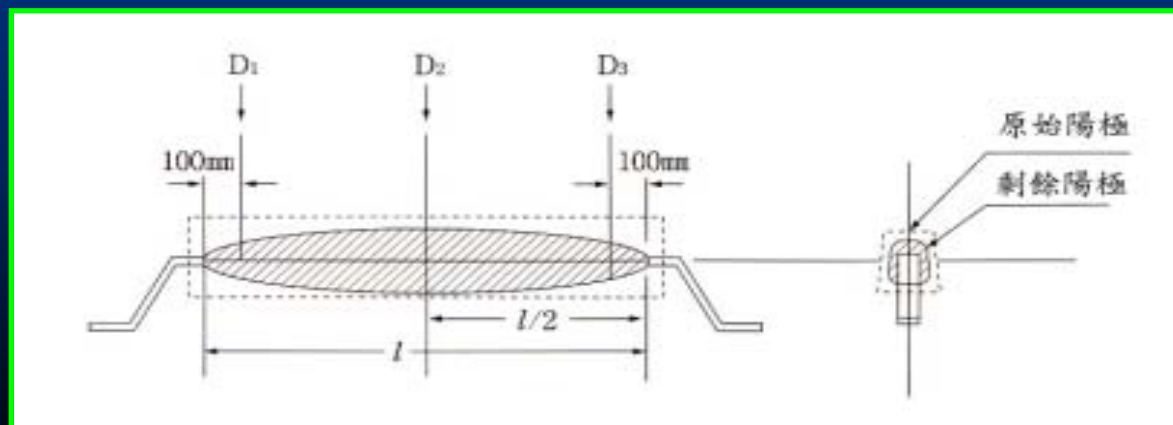
$$= \left[(D / 4)^2 \cdot l - \text{蕊心體積} \right] \times \text{陽極密度}$$

式中， D ：平均周長 $= (D_1 + D_2 + D_3) / 3$

D_1, D_3 ：距離蕊心端約10 cm之剩餘陽極周長

D_2 ：剩餘陽極中央周長

l ：剩餘陽極長度



陽極剩餘壽命計算-續

- **陽極秤重**：打撈至陸地上，切斷蕊心後秤量，扣除陽極內蕊心金屬的重量，即得陽極剩餘重量。
- **陽極壽命計算**

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

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

專家座談會

- 第一次專家座談會：92/06/26於梧棲港灣技術研究中心舉行。
- 第二次專家座談會：92/09/29於梧棲港灣技術研究中心舉行。

防蝕準則(草案)-R.C.結構物

- 鋅熔射犧牲陽極式陰極防蝕施工案例
- 外加電流式陰極防蝕施工案例

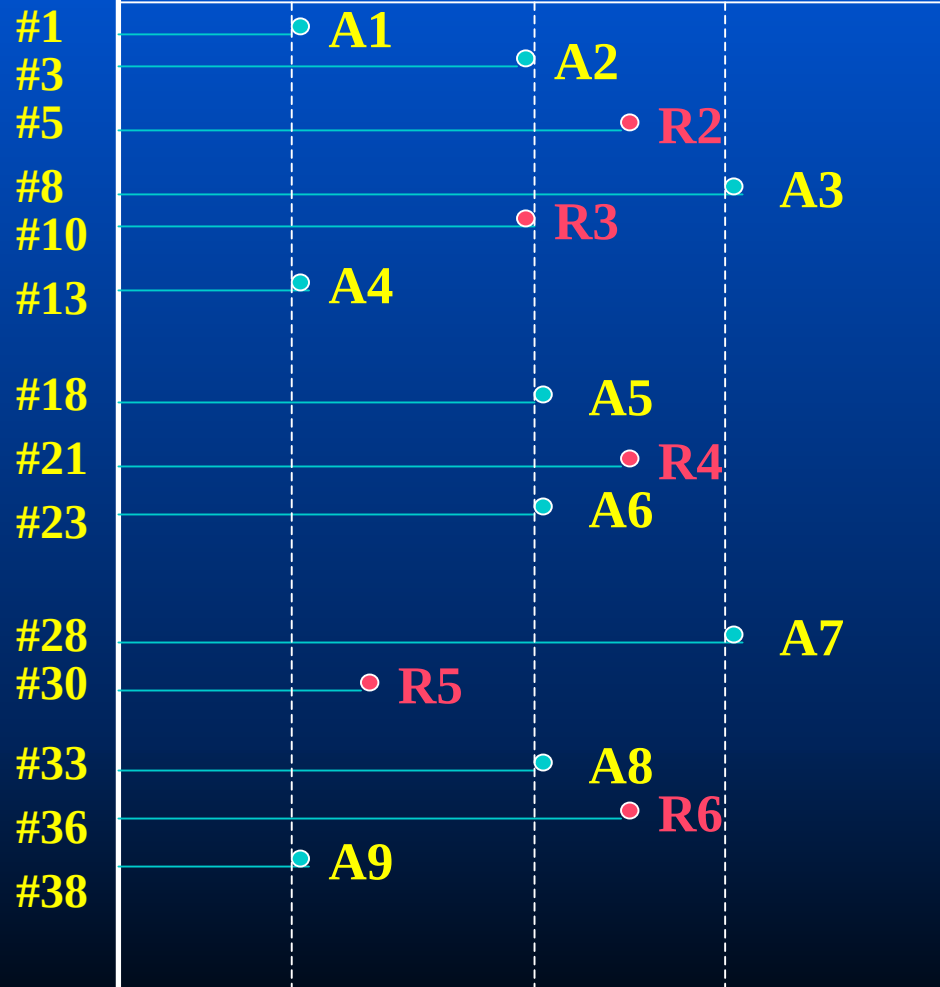
鋅熔射陰極防蝕施工案例

- 執行單位：工研院工材所、東昇琳科技公司
- 時間：民國91年6月
- 工程位置：蘇澳港13號碼頭底板
- 鋼筋保護面積：9 m²
- 設計電流密度：20 mA/m²
- 陽極：99.9% 鋅
- 參考電極：飽和Ag/AgCl參考電極
- 施工方式：電弧熔射

陰極防蝕電極安裝設計

(0,0)

鋼筋位置



A：鋅塊 x 9

R：Ag/AgCl參考電極 x 6

電極代號	X 座標	Y 座標
A1	1.1	1.7
A2	2.2	2.1
A3	3.2	3.0
A4	1.1	3.7
A5	2.2	4.75
A6	2.2	5.7
A7	3.2	6.6
A8	2.2	7.6
A9	1.1	8.6
R1	3.5	1.0
R2	2.8	2.4
R3	2.2	3.3
R4	2.8	5.3
R5	1.6	7.0
R6	2.8	8.1

評估結果

- 蘇澳港13號碼頭熔射工程陰極保護270日後，參考電極R2、R3位置鋼筋的退極化量大於100 mV，符合保護標準；而R5、R6位置因混凝土呈水飽和狀態，以致鋼筋極化量小於100 mV。然而R5、R6位置鋼筋之瞬間斷電電位與斷電7小時後的電位相近，與無熔射(R1位置)區域之鋼筋電位相比較，R5、R6區域的鋼筋已呈陰極極化現象。因此，混凝土表面鋅熔射犧牲陽極式的陰極保護，可有效降低鋼筋之腐蝕速率。
- 針對鋼筋混凝土結構，鋅熔射犧牲陽極式的陰極保護適用於濕度較高的環境，如海洋環境中的飛沫帶與潮汐帶；而大氣帶因濕度較低，混凝土電阻較大，鋅熔射層可能無法提供有效的保護電流；水中帶則因鋅熔射層消耗速率過快，無法進行長時間之陰極保護。

RC結構陰極防蝕之比較-原草案

暴露環境 陰極防蝕		大氣區	潮汐區 (含飛沫帶)	水中區
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

RC結構陰極防蝕之比較-修正後

暴露環境 陰極防蝕		大氣區	潮汐區 (含飛沫帶)	水中區
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	◎ (潮濕)	◎ (飛沫帶)	△
	鋅網-外覆保護夾層方式	○	◎	◎
	鋅板導電凝膠	◎ (乾燥)	△	△

◎防蝕效果理想 ○防蝕效果良好 △防蝕效果不佳

外加電流式陰極防蝕施工案例

- 執行單位：交通部運研所港灣技術研究中心
- 時間：民國92年5月
- 工程位置：蘇澳港13號碼頭底板
- 鋼筋保護面積：55.18 m²
- 設計電流密度：10 mA/m²
- 陽極：帶狀鈦網陽極
- 參考電極：飽和Ag/AgCl參考電極

施工步驟

- **混凝土表面處理**：鑿除後混凝土表面使用高壓水刀清洗。
- **植筋與紮筋**：#4鋼筋植入11公分共88支，#6鋼筋植入17公分共192支。
- **陽極安裝**：使用ELGARD E100帶狀鈦網陽極，沿結構物每40 cm安裝一條。
- **電極與導線連接**：陽極導線以電力電纜線與鈦條陽極連接；負極排流點安裝以自攻螺方式固定。
- **混凝土披覆**：以導電水泥用噴塗方式施工，保護層厚度約9~12 cm。
- **電源供應器及配線**：整流器採用3A、18V之規格。
- **系統安裝檢查**：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。
- **保護電位調整**：鋼筋電位呈現穩定時調整輸出電流以達到保護標準。系統按此水準維持運轉14~28天後進行「100 mV電位衰減量」系統性能測試，檢查保護效果是否正常。

評估結果

- 該工程於民國92年7月完工，長期防蝕成效目前正持續評估中。

簡報完畢
敬請指正

「台灣構造物陰極防蝕準則訂定研究」期末報告審查會議記錄

- 一、日期：民國 92 年 11 月 12 日
- 二、時間：上午 11 點 10 分
- 三、地點：交通部運輸研究所港研中心二樓簡報室
- 四、主席：邱永芳主任
紀錄：柯正龍
- 五、出席人員：
 - 國立中央大學土木工程系：李釗 教授
 - 國立成功大學化學工程系：高振豐 教授
 - 國立台灣海洋大學河海工程系：張建智 教授（請假）
 - 國立雲林科技大學營建工程系：蘇南 教授
 - 交通部科技顧問室：許書王 技正
 - 交通部運研所港研中心：李豐博副主任、朱金元科長、饒正、陳桂清研究員
 - 中華民國防蝕工程學會：羅俊雄、翁榮洲博士
- 六、主席致詞：（略）
- 七、中華民國防蝕工程學會簡報：（略）
- 八、審查意見：（各委員提出審查意見後，由中華民國防蝕工程學會彙整答復）

雲林科技大學蘇南教授

- 1. 本準則研究之初稿架構完整，值得肯定，具有理論與應用價值。
- 2. 部份條文之解說過於簡潔，影響其可讀性（如 4.1），敬請酌予補充。
- 3. 準則草案之部份位章節請補充參考文獻（如第 3、4 章，並請將公式標準或引用數據註明出處）。
- 4. 準則宜附撰寫小組委員之名單，另建議成立審查小組，邀請產、官、學、研界參加審查。

成功大學高振豐教授

- 1. 附件三之期中報告審查意見，本人報告中第 4 項「犧牲陽極材料成份如含鋅、汞等元素」，應改為「犧牲陽極材料成份如含鎳、汞等元素」。
- 2. 以『 NH_4^+ (ppm) + 1/Cl (%)』之計算值為污染指標大於 0.8 時為污染海域，請檢核所用單位，以符實用。
- 3. 鋁合金陽極塊之陽極性能其電流效率應提高至 93 %。
- 4. 陰極防蝕設計條件，海水比電阻應以 20 ~ 25 Ω 為範圍。
- 5. Ag/AgCl/seawater 應改為銀/氯化銀於海水中。
- 6. 鋅熔射方式只適用大氣區潮濕帶及飛沫帶、潮汐帶。
- 7. 整體而言，本研究做得很好，值得鼓勵。

國立中央大學土木工程系：李釗 教授

1. 本研究報告及草案內容，頁首均標記中華民國防蝕學會，建議改為委託單位全銜，較為合適。
2. 海底土防蝕施工情形，建議加以文字描述。
3. 報告第 4 頁腐蝕調查結果如何研判，建議可酌加說明。
4. 報告第 35 頁陽極效率部份，除鋁合金外有無其他材料可供參考。
5. 報告第 50、51 頁有關檢測沿碼頭法線方向，建議適當修正或增加說明。
6. 報告第 50、51 頁有關陽極塊調查，陽極塊切下秤重後無後續解說，建議增加後續作業（如秤重完成後，安裝回原位....等）。

交通部科技顧問室許書王技正

1. 草案第 頁之研究單位申明事項，建議取消。
2. 草案第 16 頁有關外加電流解說部份，建議應適當修正。
3. 草案內容格式應統一，例如第 9 頁 2.6 節與第 35 頁 4.1.3 節。
4. 草案第 45 頁內容，建議增加解說。
5. 未來委託單位需進行本案相關審查作業時，研究單位可否承諾，願意無條件配合辦理。
6. 報告所附案例，建議以附錄形式置於草案內容。

交通部運輸研究所港研中心李豐博副主任

1. 有關報告第 4 章及第 7 章，建議考量是否併為一章。
2. 報告第 40、42 頁有關之防蝕電流密度，建議名稱應予統一。
3. 報告第 63 頁有關外加電流法中陽極安裝方法，建議加強說明。
4. 草案第 6 頁表格（表 2.4.1）位置應重新調整編排
5. 草案第 9 頁及第 24 頁有關電流密度名稱應予統一。

交通部運輸研究所港研中心朱金元科長

1. 草案第 43 頁 5.2.2 節材料檢查之系統安裝抽樣檢查作業，建議加列應檢測項目及其抽檢數量。

交通部運輸研究所港研中心饒正研究員

1. 建議日後應將本研究鋼結構物陰極防蝕準則草案與本所民國 90 年之混凝土結構物陰極防蝕準則草案合併出版，俾利港務局等相關單位使用參考。
2. 草案第 4 頁圖 2.2.1 及圖 2.2.2 中之繫纜樁，應改為繫船柱。
3. 草案第 12 頁（2.8 參考規範與標準），建議增加解說，例如參考第 4 章內容。
4. 報告及草案內容有關保護電流、防蝕電流，建議改為一致。
5. 草案第 21、22 頁沿岸長度，建議改為岸壁長度。
6. 草案第 35 頁陽極特性參考標準與港務局現有資料略有出入，請問參考來源為何？

九、審查意見答覆：

中華民國防蝕工程學會羅俊雄博士：

1. 感謝各位審查委員之指正，有關報告初稿內錯誤將檢討改正。
2. 有關陽極性能的電流效率訂為 90 %，係第二次專家學者座談會依據國內產品現況，討論後所得之共識。
3. 準則草案將於第二次專家學者座談會前提出供與會專家學者充分討論，取得初步結論。
4. 由案例檢討，鋅熔射工法應可適用於港區飛沫帶及潮汐帶部份構造物。
5. 報告及草案格式將依委託單位規定辦理。
6. 海底土之結構物部份，其保護面積以併於水中帶陽極塊計算及由其提供防蝕電流。
7. 有關陽極材料目前以鋁合金為主
8. 委託單位日後如需辦理其他審查作業，研究單位願意無條件配合辦理。
9. 有關報告初稿中案例章節，係依研究預定工作內容規定辦理。

十、主席結論

1. 期末報告初稿內容審查通過。
2. 各審查委員所提意見及建議，請研究單位修改或參考，並列入期末正式報告書內。
3. 期末報告格式請研究單位依本所相關規定辦理。
4. 期末報告及合約規定所需併送資料，請研究單位依據合約規定時程辦理。

十一、散會（12 時 56 分）

交通部運輸研究所合作研究計畫
□期中☑期末報告審查意見處理情形表

計畫名稱：港灣構造物陰極防蝕準則訂定研究

執行單位：中華民國防蝕工程學會

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦單位 審查意見
雲林科技大學 蘇南教授		
1. 本準則研究之初稿架構完整，值得肯定，具有理論與應用價值。		
2. 部份條文之解說過於簡潔，影響其可讀性(如 4.1)，敬請酌予補充。	遵照辦理。 其中 4.1 節之解說是說明國外犧牲陽極材料之選用，在 2.8 節之解說中已有比較。	
3. 準則草案之部份章節請補充參考文獻(如第 3、4 章，並請將公式標準或引用數據註明出處)。	遵照辦理，於 2.8 節已集中列出所參考之規範文獻。	
4. 準則宜附撰寫小組委員之名單，另建議成立審查小組，邀請產、官、學、研界參加審查。	遵照辦理。	
成功大學 高振豐教授		
1. 附件三之期中報告審查意見，本人報告中第 4 項「犧牲陽極材料成份如含鋅、汞等元素」，應改為「犧牲陽極材料成份如	遵照辦理。	

含鎘、汞等元素」。		
2. 以『 NH_4^+ (ppm) + $1/\text{Cl}^-$ (%)』之計算值為污染指標大於 0.8 時為污染海域，請檢核所用單位，以符實用。	NH_4^+ 之單位為 ppm， Cl^- 之單位為%。如 Cl^- 濃度=20000 ppm，則第二項 $1/\text{Cl}^-$ 之值為： $\frac{1}{20000 / 1000000} = \frac{1}{2 (\%)} = 0.5$	
3. 鋁合金陽極塊之陽極性能其電流效率應提高至 93%。	有關陽極性能的電流效率訂為 90%，係第二次專家學者座談會依據國內產品現況，討論後所得之共識。	
4. 陰極防蝕設計條件，海水比電阻應以 20 ~ 25 Ω 為範圍。	建議以現場實測海水比電阻值為設計基準。	
5. Ag/AgCl/seawater 應改為銀/氯化銀於海水中。	氯化銀(Ag/AgCl)參考電極有兩種，若電極中的電解液為海水，稱為海水氯化銀(Ag/AgCl/seawater)參考電極；若電解液為飽和 KCl 溶液，則為飽和氯化銀(Ag/AgCl/sat'd KCl)參考電極。	
6. 鋅熔射方式只適用大氣區潮濕帶及飛沫帶、潮汐帶。	針對鋼筋混凝土構造物之陰極防蝕，鋅熔射方式適用於大氣區的潮濕環境與潮汐區的飛沫帶；但對鋼鐵結構物而言，金屬熔射則僅適用於大氣帶及飛沫帶。	
7. 整體而言，本研究做得很好，值得鼓勵。		
國立中央大學 李釗教授		
1. 本研究報告及草案內容，頁首均標記中華民國防蝕學會，建議改為委託單位全	遵照辦理，將參照委託單位研究報告格式。	

銜，較為合適。		
2. 海底土防蝕施工情形，建議加以文字描述。	鋼鐵結構物於海底土中的陰極防蝕是藉浸漬於海水中的犧牲陽極塊加以保護，在海底土中並未施工，設計時需將海底土中的保護面積與保護電流加以計算。	
3. 準則草案第 4 頁腐蝕調查結果如何研判，建議可酌加說明。	遵照辦理。海水比電阻調查的目的為計算犧牲陽極對海水的電阻值，以確保選用之犧牲陽極可有效供給陰極防蝕保護電流。	
4. 草案第 35 頁陽極效率部份，除鋁合金外有無其他材料可供參考。	目前國內外多採用鋁合金犧牲陽極，故 4.1.3 節僅規範鋁合金材料。	
5. 草案第 50、51 頁有關檢測 <u>沿碼頭法線方向</u> ，建議適當修正或增加說明。	沿碼頭法線方向即為沿碼頭岸壁方向。	
6. 草案第 50、51 頁有關陽極塊調查，陽極塊切下秤重後無後續解說，建議增加後續作業（如秤重完成後，安裝回原位....等）。	遵照辦理。	
交通部科技顧問室 許書王技正		
1. 草案第 頁之研究單位申明事項，建議取消。	遵照辦理。	
2. 草案第 16 頁有關外加電流解說部份，建議應適當修正。	遵照辦理。	

3. 草案內容格式應統一，例如第 9 頁 2.6 節與第 35 頁 4.1.3 節。	遵照辦理。	
4. 草案第 45 頁內容，建議增加解說。	將調整編排內容。	
5. 未來委託單位需進行本案相關審查作業時，研究單位可否承諾，願意無條件配合辦理。	定當配合辦理。	
6. 報告所附案例，建議以附錄形式置於草案內容。	遵照辦理。	
交通部運輸研究所港研中心 李豐博副主任		
1. 有關報告第 4 章及第 7 章，建議考量是否併為一章。	章節為依據委託單位之工作項目撰寫。	
2. 報告第 40、42 頁有關之防蝕電流密度，建議名稱應予統一。	遵照辦理。	
3. 報告第 63 頁有關外加電流法中陽極安裝方法，建議加強說明。	目前國內外港灣鋼構造物多採用犧牲陽極式陰極保護，故外加電流法中之陽極安裝僅以圖示說明。	
4. 草案第 6 頁表格（表 2.4.1）位置應重新調整編排。	遵照辦理。	
5. 草案第 9 頁及第 24 頁有關電流密度名稱應予統一。	遵照辦理。	
交通部運輸研究所港研中心 朱金元科長		
1. 草案第 43 頁 5.2.2 節	施工前進行之檢查作業包括材	

材料檢查之系統安裝抽樣檢查作業，建議加列應檢測項目及其抽檢數量。	料數量確認，尺寸、質量抽樣檢查；各陽極的形狀尺寸容許範圍在 $\pm 5\%$ 以內、質量容許範圍在 2%以內。抽檢數量建議為 50%。	
交通部運輸研究所港研中心 饒正研究員		
1. 建議日後應將本研究鋼結構物陰極防蝕準則草案與本所民國 90 年之混凝土結構物陰極防蝕準則草案合併出版，俾利港務局等相關單位使用參考。	遵照辦理。	
2. 草案第 4 頁圖 2.2.1 及圖 2.2.2 中之繫纜樁，應改為繫船柱。	遵照辦理。	
3. 草案第 12 頁 (2.8 參考規範與標準)，建議增加解說，例如參考第 4 章內容。	遵照辦理。	
4. 報告及草案內容有關保護電流、防蝕電流，建議改為一致。	遵照辦理。	
5. 草案第 21、22 頁沿岸長度，建議改為岸壁長度。	遵照辦理。	
6. 草案第 35 頁陽極特性參考標準與港務局現有資料略有出入，請問參考來源為何？	原陽極特性參考標準之出處為中華顧問工程司，今依港務局資料再行修正。	
主席結論		
1. 期末報告初稿內容審查通過。		

2. 各審查委員所提意見及建議，請研究單位修改或參考，並列入期末正式報告書內。	遵照辦理。	
3. 期末報告格式請研究單位依本所相關規定辦理。	遵照辦理。	
4. 期末報告及合約規定所需併送資料，請研究單位依據合約規定時程辦理	遵照辦理。	