

95-7157

公共工程之陰極防蝕應用研討會 論文集



主辦單位： 交通部

 交通部運輸研究所港研中心

 中華民國防蝕工程學會

時間：中華民國 95 年 6 月 20 日

地點：交通部運輸研究所港研中心禮堂

公共工程之陰極防蝕應用研討會 論文集



主辦單位： 交通部

 交通部運輸研究所港研中心

 中華民國防蝕工程學會

時間：中華民國 95 年 6 月 20 日

地點：交通部運輸研究所港研中心禮堂

公共工程之陰極防蝕應用研討會議程表

日期	時間	課 題	主講人	主持人
六月二十日 (星期二)	8:20~9:00	報 到		
	9:00~9:30	開幕及來賓致詞		
	9:30~10:20	公共工程腐蝕及陰極防蝕 現況探討	羅俊雄博士 工研院材化研究所	黃德治所長 交通部運研所
	10:20~10:50	休息及實務觀摩		
	10:50~11:40	構造物之腐蝕與 防蝕機理	葉為忠教授 海洋大學河工所	郭拱源處長 公路總局
	11:40~12:30	鋼筋混凝土構造物陰極 防蝕工程監工實務	黃三哲處長 公路總局	吳鎮封組長 公路總局
	12:30~13:50	午餐及實務觀摩		
	13:50~14:40	海下鋼構造物陰極防蝕 工程監工實務與維護管理	柯正龍副研究員 交通部運研所	郭石盾總工程司 高雄港務局
	14:40~15:30	地下管線陰極防蝕工程 監工實務與維護管理	邱德俊專案經理 中國石油公司	陳哲生博士 柏林公司
	15:30~16:00	休息及實務觀摩		
	16:00~16:50	海底管線陰極防蝕工程 監工實務與維護管理	李皇章經理 中國石油公司	李定宇董事長 金茂公司
	16:50~17:40	綜 合 討 論		邱永芳主任 交通部運研所
	18:00~21:00	晚 宴		

公共工程之陰極防蝕應用研討會論文集



公共工程腐蝕及陰極防蝕現況探討

羅俊雄¹ 饒正²

摘要

陰極防蝕技術之發展與應用已有百餘年歷史，不僅可以應用在水下與土壤環境中，更可應用在鋼筋混凝土結構抵抗氯離子侵害，然而在台灣目前仍處起步階段。為推廣公共工程陰極防蝕理念，交通部運輸研究所港灣技術研究中心與公路總局分別於民國 92 年與 93 年完成「港灣構造物陰極防蝕準則(草案)-鋼筋混凝土構造物篇與鋼構造物篇」與「混凝土橋梁與鋼橋梁防蝕設計與施工準則(草案)」。冀由本土化準則的建立，瞭解陰極防蝕工法、工程案例、實務檢測與維護管理等知識，進而推廣橋梁、港灣設施、地下管線等管理單位對陰極防蝕技術的應用，創造出另一個紀元的「永續型綠色公共工程」。

Present Corrosion and Cathodic Protection of Infrastructures in Taiwan

Jiunn-shyong Luo¹ Cheng Jao²

ABSTRACT

Cathodic protection has been developed and applied for a decade in the world. Not only underwater and underground structures but also rebar in concrete can be successfully protected from corrosion by cathodic protection. However, this technique is not widely used in Taiwan infrastructures. To make more accomplishment, the Harbor and Marine Technology Center, MOTC drafted “Guidelines of Cathodic Protection for Harbor Structures- Steel and Concrete Structures” in 2003. Moreover, the Directorate General of Highways, MOTC also completed “Drafts of Design and Engineering work of Corrosion Prevention for Steel and Concrete Bridges” in 2004.

¹工業技術研究院材料與化工研究所 研究員

²交通部運輸研究所港灣技術研究中心 研究員

All efforts have been focused upon establishing the knowledge of cathodic protection including concept design, field inspection, and maintenance. It is highly expected that by the application of cathodic protection infrastructures in Taiwan such as bridges, harbor structures, underground pipelines, etc. can achieve “Sustainable Green Infrastructures”.

一、前言

公共工程是指供公眾或機關使用目的，在地面上、地面下、水下從事新建、增建、改建、修建、拆除構造物與其所附屬設備及改變自然環境的行為。這種行為涵蓋了建築、土木、水利、環境、交通、機械、電氣與其他經中央主管機關認定之工程。自民國八十年以來，政府一直以每年四千億至五千億的預算進行台灣地區的公共工程建設，由於這些工程的影響層面既廣且深，非但費用鉅大，其完工後的管理使用，更關係著民眾的福祉與安危。由於社會發展造就公共工程建設的增加，鋼鐵構造物與鋼筋混凝土構造物如港灣設施、橋梁、地下管線及海底管線等均屬公共工程建設的一部份；台灣位處亞熱帶與熱帶，四面環海，氣候炎熱潮溼，在此高溫、高濕並帶有鹽分或有害污染物的大氣環境下，結構物均面臨了嚴重的腐蝕問題，當結構物一旦遭受侵蝕而出現損害，輕微者會對使用者產生極大不便或恐慌，嚴重者將影響結構之安全，進而造成重大災害及經濟損失。

陰極防蝕技術之發展與應用已有百餘年歷史，為金屬構造物在水下與土壤環境中最有效的防蝕方法；此外，針對鋼筋混凝土結構之腐蝕防治，業已被肯定為防蝕效能極佳之工法，也獲得美國聯邦公路管理局(FHWA)評估為“唯一能有效抵制混凝土中鋼筋受氯離子侵害之對策”，然而目前在台灣仍處起步階段。基於國內防蝕工程實務之需求及推廣工程防蝕理念，交通部運輸研究所港灣技術研究中心與中華民國防蝕工程學會共同合作，於民國 92 年已完成「港灣構造物陰極防蝕準則(草案)-鋼筋混凝土構造物篇與鋼構造物篇」^[1]之訂定，提供台灣本土環境下各類土建構造物之防蝕依據。此外，交通部公路總局與工業技術研究院材料與化工研究所亦於民國 93 年完成「混凝土橋梁防蝕設計與施工準則(草案)」^[2]與「鋼橋梁防蝕設計與施工準則(草案)」^[2]。因此，本研討會舉辦之主要目的為宣導工程界正視構造物之陰極防蝕理念與需求，積極推行適合本土環境之「構造物陰極防蝕準則(草案)」之應用與遵循，以陰極防蝕工法、工程案例、實務檢測與維護管理等知識介紹，推廣公路橋梁、港灣設施、地下管線等管理單位對陰

極防蝕技術的瞭解，減少因構造物腐蝕劣化或陰極防蝕工法施作檢測不當所造成的嚴重損失。

二、構造物之腐蝕與防蝕

腐蝕是金屬與周圍環境起化學或電化學反應而被破壞的一種侵蝕。金屬發生腐蝕為一自然反應過程，尤其是在酸、鹼或海水等環境下，腐蝕更趨嚴重。全世界每年由於銹蝕所造成之損失數以億計，根據 1975 年美國國家標準局及 Battelle Columbus 實驗室估計，全美每年腐蝕之損失大約為 700 億美元，佔總生產毛額之 4.2%；而 1998 年全美腐蝕直接損失更增加為 2760 億美元，約佔當年總生產毛額 3.1%。其中，在公共工程建設方面因腐蝕而造成的損失約為 226 億美元(如圖 1、圖 2 所示)。台灣目前雖無這方面的統計資料，但相信每年由腐蝕所造成的損失亦不在少數。

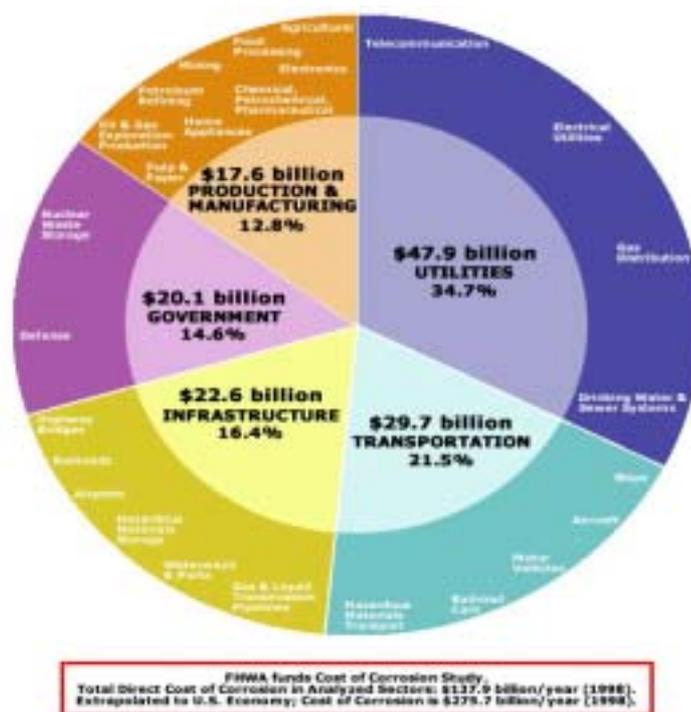


圖 1. 1988 年美國因腐蝕造成之直接損失
(資料來源：Report FHWA-RD-01-156^[3])

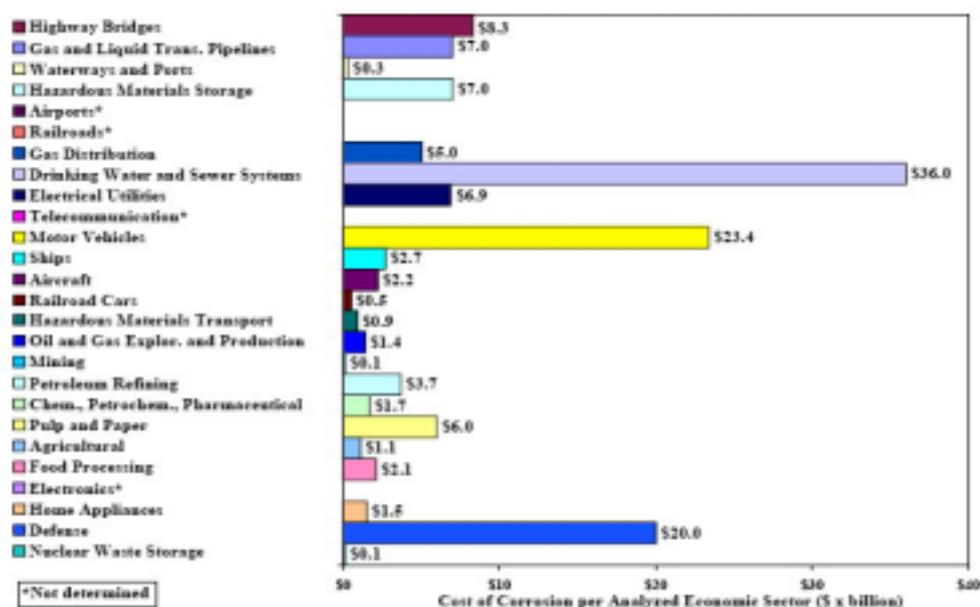


圖 2. 1988 年美國因腐蝕造成之直接損失-各分項之統計

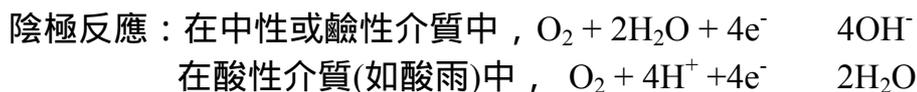
(資料來源：Report FHWA-RD-01-156^[3])

2.1 鋼鐵構造物之腐蝕機理

鋼構所處之腐蝕環境可能為大氣環境、土壤或海水中。大氣腐蝕，依腐蝕鋼構所處之腐蝕環境可能為大氣環境、土壤或海水中。大氣腐蝕，依腐蝕反應可分為化學與電化學反應；在乾燥無水的大氣環境中，金屬表面因氧化、硫化而造成變色或失去金屬光澤等，是為化學腐蝕，而其它劣化行為，則多為電化學反應。即金屬表面為薄層電解液下的腐蝕過程，電解液薄膜是由空氣中的水分於金屬表面吸附、凝聚、及溶有空氣中污染物質所形成，陽極反應為金屬的溶解和水化反應，陰極反應為氧的還原反應，其反應過程如下：



式中，M 代表金屬， M^{n+} 為 n 價金屬離子， $M^{n+} \cdot xH_2O$ 為金屬離子化水合物。



因此大氣環境中的水、氧在鋼鐵表面水膜間的擴散率、大氣中的氯離子含量、以及空氣中的污染物質 (如 SO_2 、灰塵等)，均會影響金屬在大氣中的腐蝕速率。

至於鋼構在海水或土壤中的腐蝕行為亦為一電化學反應。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，浸漬於海水中時，受到海水 pH 值、氯離子含量、溶氧濃度、溫度、流速等因素之影響，或埋設於土壤內，受到土壤中含水量、含氧量、氯離子濃度、硫酸根離子濃度等因素之影響，鋼鐵表面會產生許多微小的腐蝕電池(如圖 3 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：



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

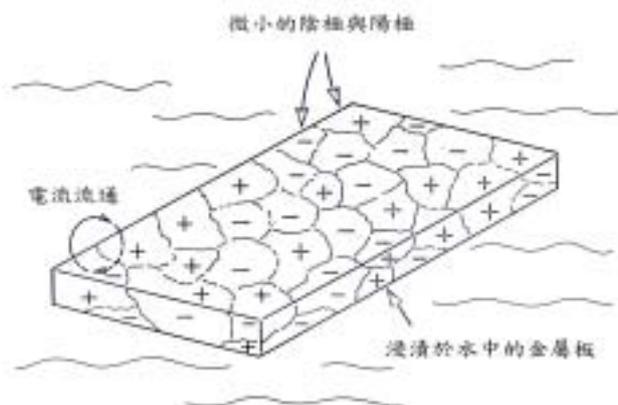


圖 3. 鋼板在海水中產生之微小腐蝕電池示意圖

2.2 鋼筋混凝土構造物之腐蝕機理

鋼筋在混凝土中發生腐蝕的行為為一電化學反應現象，在正常情況下，混凝土因含有氫氧化鈣而為一鹼性環境，pH 值約在 12~13.5 之間，鋼筋在此鹼性環境下表面會產生保護性的鈍態膜，防止鋼筋腐蝕；然而隨著環境中(如海洋環境)氯離子入侵，或混凝土中性化的結果，鋼筋表面的鈍態膜會被破壞，導致鋼筋腐蝕，其機理如圖 4 所示。圖中，陽極反應為金屬(鋼筋)的溶解反應，而陰極反應為氧的還原反應，其基本反應過程如下：



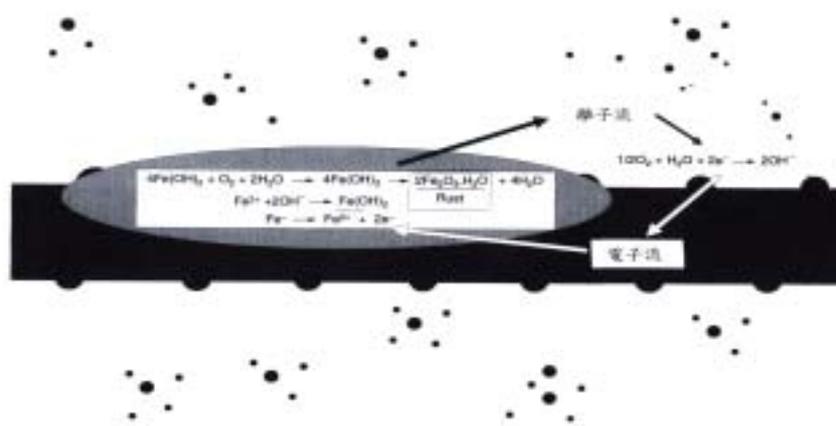


圖 4. 鋼筋腐蝕機理示意圖

(資料來源：Corrosion of Steel in Concrete, E & FN SPON^[4])

根據日本土木學會「混凝土標準示方書-維持管理編」，鋼筋混凝土劣化機構、劣化因素與劣化指標^[5]，如表 1 所示：

表 1. 鋼筋混凝土劣化機構之原因與指標

劣化機構	劣化因素	劣化指標
中性化	二氧化碳	中性化深度 鋼材腐蝕量
鹽害	氯離子	氯離子濃度 鋼材腐蝕量
凍害	凍結融解作用	凍害深度 鋼材腐蝕量
化學的侵蝕	酸性物質 硫酸離子	劣化因子滲透深度 中性化深度 鋼材腐蝕量
鹼質粒料反應	反應性粒料	膨脹量
橋面版疲勞	大型車通行量	開裂量
梁構件疲勞	反覆荷重	累積損傷度 鋼材的龜裂長度

2.3 鋼鐵構造物之防蝕方法

針對鋼鐵結構物腐蝕防治的方法，目前常用的工法包括鋼鐵材料的選擇(耐候鋼)、塗裝防蝕、熱浸鍍鋅、金屬熔射與陰極防蝕等工法；但不論使用何者工法，均應考慮構造物所處之腐蝕環境進行設計。以港灣設施為例，鋼板(管)樁在海洋環境中的防蝕方法比較如表 2 所示。

2.4 鋼筋混凝土構造物之防蝕方法

鋼筋混凝土構造物防蝕的基本原則為阻斷有助鋼筋腐蝕的有害物質(如水分、濕氣、氧氣、二氧化碳、硫酸根離子及鹽份等之侵入)，或以電化學原理抑止鋼筋腐蝕。依據交通部公路總局之「橋梁防蝕設計與施工準則建立之研究」報告^[2]，鋼筋混凝土結構物的防蝕策略可分為基本防蝕方法與特殊防蝕方法，而基本防蝕方法之原則為：

1. 最基本的防蝕方法係使用低滲透性混凝土，例如使用適量水泥、低水灰比、飛灰、高爐爐石粉、矽灰等，以降低混凝土孔隙尺寸或阻隔孔隙。
2. 適當的保護層厚度及給予混凝土良好的養護措施。
3. 設計者可改良構造物暴露環境，例如於混凝土表面設計防水層，改善排水，降低鹽水逕流量，使用滴水槽(drips)雨水槽(gutter)控制逕流量等；並設計適當的檢測維修空間。
4. 為減少濕氣、水分、鹽份附著與積聚，須在橋梁構造型式方面加以考量。
5. 為抑止水分滲入及氧氣、二氧化碳、硫酸根離子與氯離子等之擴散，可採如下方式：
 - (1) 增加保護層厚度，以延緩有害物質到達鋼材表面時間及累積程度。
 - (2) 控制裂縫寬度，以抑制有害物質滲透及擴散。
 - (3) 增加混凝土緻密性，以抑制有害物質滲透及擴散。

除上述防蝕方法外，當鋼筋混凝土結構物處於較嚴苛的腐蝕環境時，可併採行一種或多種之特殊防蝕方法，如下：

1. 進行混凝土表面處理，施作適當的防水膜(membrane)，以抑阻有害物質滲入。
2. 混凝土內添加腐蝕抑制劑，以抑制腐蝕反應保護鋼材。
3. 對鋼筋實施防蝕加工(採用鍍鋅鋼筋、環氧樹脂塗層鋼筋或防護套管)，以抑阻腐蝕反應。
4. 進行陰極防蝕工法，以抑阻腐蝕反應。

此外，由於保護層厚度為混凝土結構最基本的防蝕措施，若欲以施作特殊防蝕方法而減少保護層厚度，恐無法達到預期的防蝕效果，故設計者不應以採用特殊防蝕方法而減少保護層之厚度。

表 2. 鋼板(管)樁在海洋環境中的防蝕方法比較

海洋環境 鋼樁情況 防蝕效果		大氣區		飛沫帶		潮間帶		海水中		海底泥中		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(聚氨酯)包覆		-		△		△		-	-	-	可	可	可
	水中硬化環氧樹脂									-	-	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，防蝕效果良好 △ 施工困難，防蝕效果不佳 - 超出評估範圍

三、陰極防蝕

陰極防蝕是目前廣泛使用的金屬防蝕方法之一，其起源於 1824 年 H. Davy 利用鐵和鋅來保護木製船的銅質配件。1920 年代，美國更廣泛的運用此技術保護墨西哥灣油田附近的地下油管。沿溯至今，陰極防蝕技術已發展成可利用於水中、土壤中，甚至鋼筋混凝土中，作為一種有效的防蝕工程技術，並可與塗裝、包覆等防蝕技術結合，達到相輔相成之效果。

3.1 陰極防蝕原理

陰極防蝕的原理由熱力學的觀點來看，就是將被保護的金屬電位降低，使腐蝕不會產生。以鋼鐵為例，在 Pourbaix diagram (E-pH diagram)中，鋼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，則鋼鐵的腐蝕便不會產生(圖 5)。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。

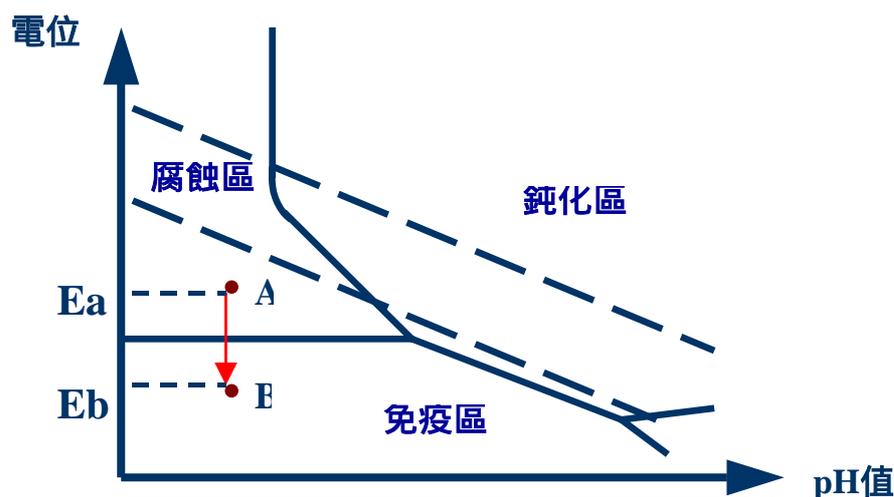


圖 5.鋼鐵腐蝕區、鈍化區、免疫區之分佈

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

3.2 陰極防蝕方法

陰極防蝕的方法有兩種，一為外加電流法，一為犧牲陽極法。外加電流式陰極防蝕系統主要是利用一外部電源來提供陰極與陽極之間的電位差。陽極必須接於電源之正端，而被保護金屬則接於電源的負端。在電力容易獲得的地方，整流器通常被運用至將 AC 電流轉換成 DC 電流，以提供防蝕時所需之電流，然在較偏遠的地區，汽油或柴油發電機，甚至太陽能電池是為外加電流的來源。

犧牲陽極法主要是利用電位較負之金屬為陽極，與被保護金屬於介質(如土壤、水、混凝土等)中聯結，形成一電化學電池，由於異類金屬相接觸，活性較大(active)之金屬(陽極)會在反應中被消耗，而鈍性(noble)的鋼筋(陰極)會因此而被保護。

一般而言，外加電流系統較犧牲陽極系統複雜，且外加一直流電的費用也比安裝犧牲陽極的費用高。然前者可使用可變電源，來保護較大面積，裸鋼或良好被覆的結構物；後者則可應用於結構物之保護電流量需求較少，或介質之比電阻較低的環境。兩者的特性比較如下：

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

犧牲陽極法

裝置簡單

維護需求少

適用於導電性好之環境

初期成本低

會造成以下若干問題：

雜散電流腐蝕

氫脆化

塗層剝落

3.2.1 鋼鐵構造物在水中之陰極防蝕

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，且國外亦有百年的使用經驗。以碼頭鋼板(管)樁為例，利用外加電流法或犧牲陽極法促使陽極放電，電流

從陽極經過海水介質到達鋼板管樁表面，然後經導線回到電源，如此鋼板(管)樁便受到保護。圖 6 與圖 7 分別為鋼構造物在海水中之外加電流式與犧牲陽極式陰極保護之示意圖。

3.2.2 鋼鐵構造物在土壤中之陰極防蝕

地下管線或儲運設備長久埋於地下，受到周圍泥土環境，輸送物質或外力的影響，會逐漸腐蝕劣化，當腐蝕達一定的程度後，就會有破損而導致輸送物質外洩的危險。1920 年代，美國廣泛的運用陰極防蝕技術保護墨西哥灣油田附近的地下油管，至今亦有百年的歷史，而其技術的應用與鋼構造物在海水中的陰極防蝕方法相同，陽極必須接於電源之正端，而地下結構物則接於電源之負端，電流從陽極經過土壤介質到達地下結構物表面，然後沿著地下結構物經導線，回到電源，如此地下結構物便受到保護。圖 8 與圖 9 分別為地下結構物外加電流式與犧牲陽極式陰極保護之示意圖。

3.2.3 鋼筋混凝土構造物之陰極防蝕

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。經驗指出，陰極防蝕法可有效抑制混凝土中鋼筋腐蝕，其方法為利用外加電流法或犧牲陽極法促使陽極放電，電流從陽極經過混凝土介質到達鋼筋表面，然後沿著鋼筋經導線，回到電源，如此鋼筋便受到保護。圖 10 與圖 11 分別為外加電流法與犧牲陽極法陰極保護之示意圖。

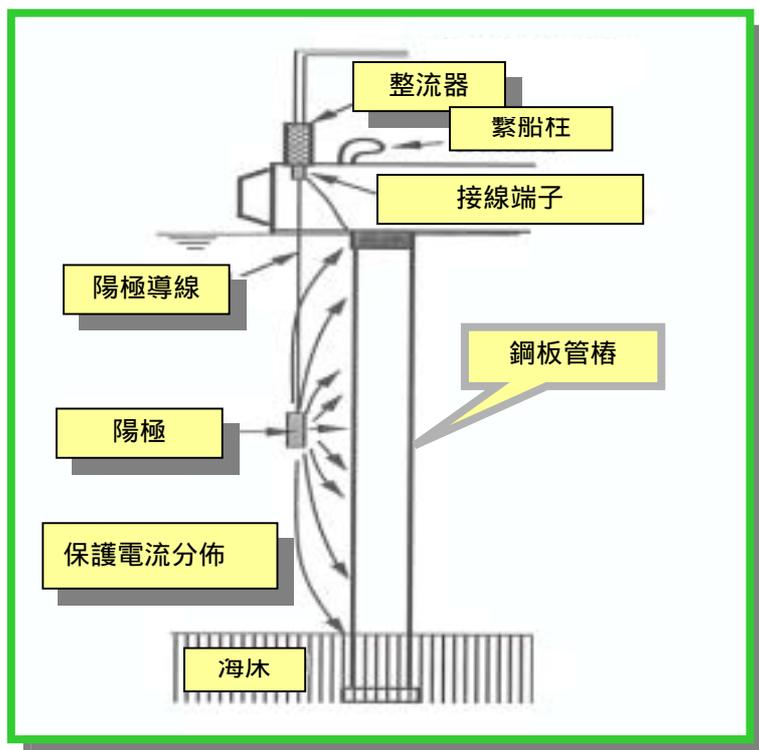


圖 6.碼頭鋼板(管)樁外加電流法示意圖

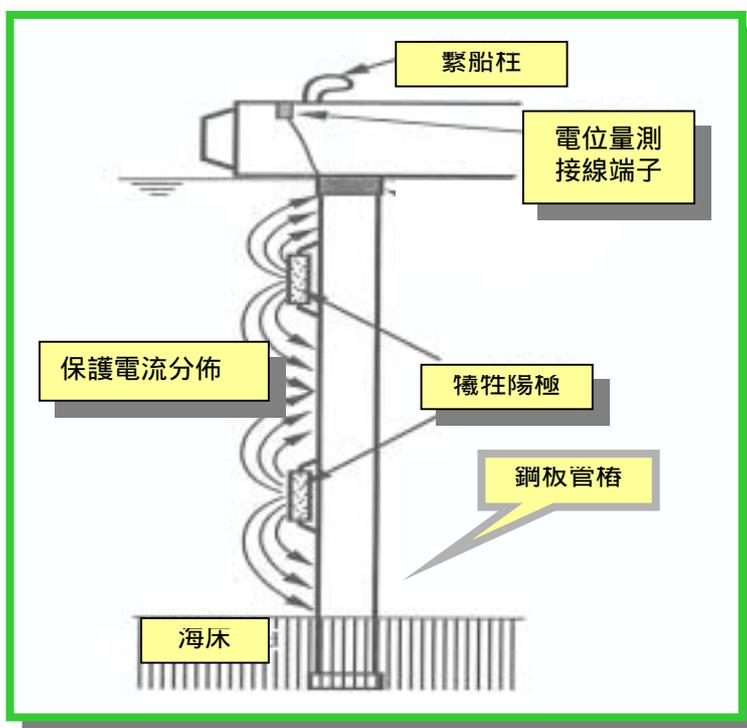


圖 7.碼頭鋼板(管)樁犧牲陽極法示意圖

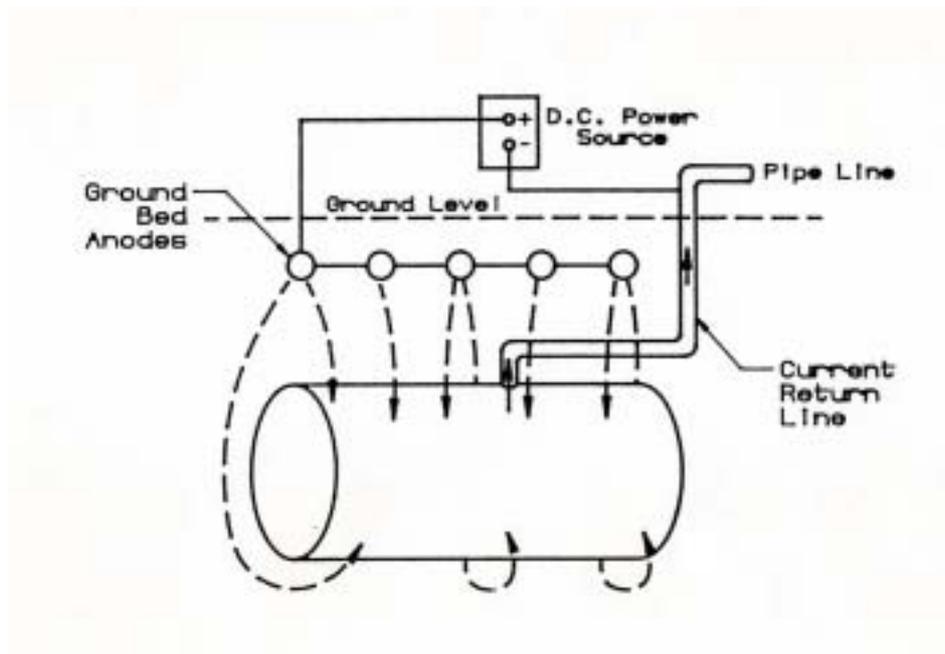


圖 8. 地下結構物外加電流陰極保護示意圖

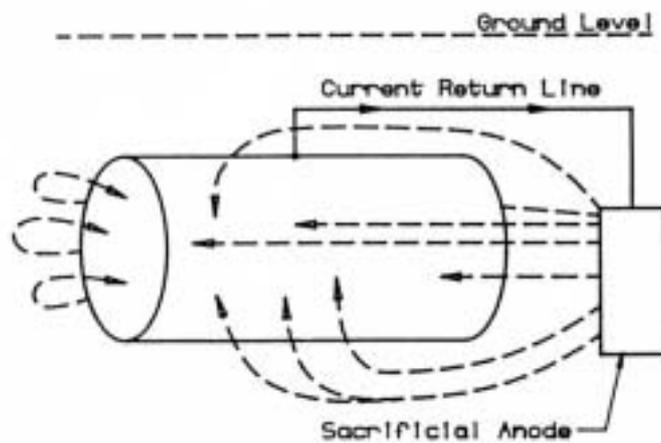


圖 9. 地下結構物犧牲陽極陰極保護示意圖

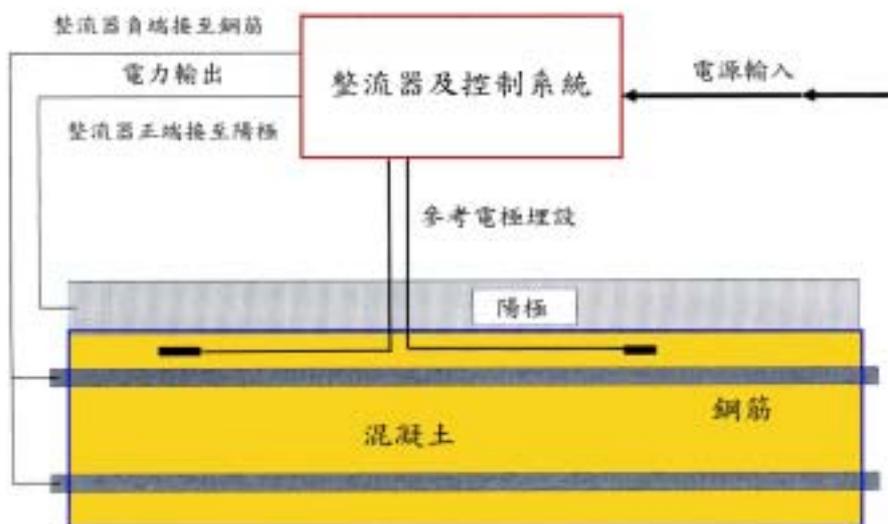


圖 10. 鋼筋混凝土構造物外加電流陰極保護示意圖
(資料來源：Corrosion of Steel in Concrete, E & FN SPON^[4])

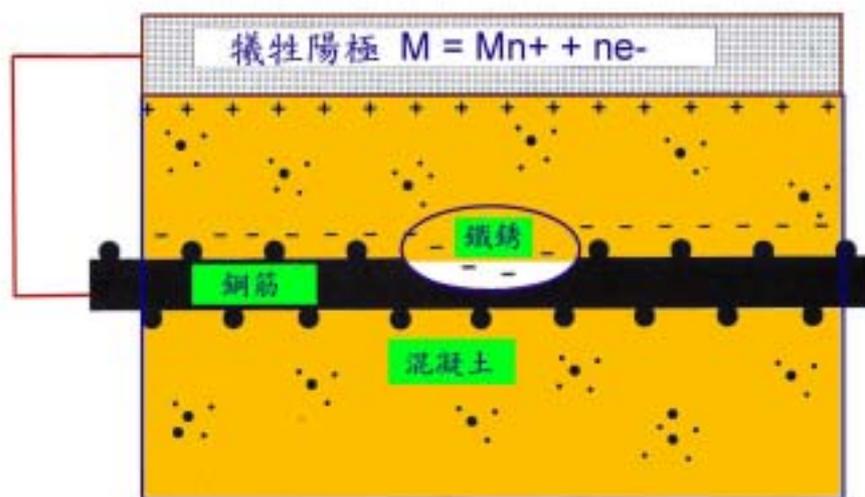


圖 11. 鋼筋混凝土構造物犧牲陽極陰極保護示意圖
(資料來源：Corrosion of Steel in Concrete, E & FN SPON^[4])

四、台灣公共工程腐蝕與陰極防蝕現況

4.1 港灣設施

海港是對外貿易運輸的重要樞紐，台灣的主要國際港口包括基隆港、台中港、高雄港、花蓮港、蘇澳港與台北港，分別由各港務局負責營運與管理，但有關港灣構造物的腐蝕與陰極防蝕檢測，則由交通部運研所港灣技術研究中心協助規劃執行。

4.1.1 港灣構造物之腐蝕與陰極防蝕現況

港灣構造物包括鋼構造物如鋼板(管)樁、拉桿、纜線、管線、機具，以及鋼筋混凝土構造物如沉箱、防波堤、碼頭、各型構件、建物等。目前陰極防蝕技術在台灣港灣構造物的應用上僅限於水下鋼板(管)樁與碼頭面板面海側鋼筋混凝土之防蝕；台灣各港區水下鋼板(管)樁結構均採用犧牲陽極式的陰極保護，而在鋼筋混凝土構造物方面，蘇澳港#13 碼頭之部份碼頭底板於民國 91 年至 92 年間曾進行鋅熔射犧牲陽極式之陰極防蝕與外加電流式之陰極保護試驗，而目前僅蘇澳港#7 碼頭底板全面採用犧牲陽極式鋅熔射之陰極防蝕，以及高雄港#52 碼頭之碼頭底板全面採用外加電流式之陰極保護。

港灣構造物的劣化因素除海洋環境腐蝕的影響外，颱風、地震、波浪與海流外力的影響也會造成構造物的劣化損壞，今將港灣構造物劣化的現象例舉如下。

1. 碼頭鋼樁破損，如圖 12-1 與圖 12-2 所示。
2. 碼頭鋼筋混凝土構造物破損，如圖 13 所示。
3. 鋼筋混凝土碼頭面板(面海側)破損，如圖 14 所示。
4. 鋼板樁碼頭拉桿斷裂變形，如圖 15 所示。
5. 重力式碼頭基礎承載力不足、堤體方塊滑動、漏砂、傾斜、塌陷，如圖 16 所示。
6. 防波堤損壞狀況：堤面龜裂、堤身沉陷、混凝土鹼質與粒料反應、沉箱與胸牆破損塌陷等，如圖 17 所示。



基隆港潮間帶鋼樁腐蝕(民國 81 年)



花蓮港#5 碼頭潮間帶鋼樁腐蝕
(民國 89 年)

花蓮港#5 碼頭陸地側鋼樁破洞

(民國 89 年)



花蓮港#6 碼頭鋼樁開裂
(民國 89 年)



花蓮港#5 碼頭鋼樁開裂
(民國 89 年)

圖 12-1 碼頭鋼樁破損



西 25- 108m



西 26- 87m 處



西 26- 153.3m 處



西 24- 10m 處



西 24- 205m 處



西 26- 83m 處



西 26- 123.3m 處

圖 12-2 基隆港第一突堤碼頭鋼樁破損狀況(民國 90 年)



碼頭底板銹水流出



樁頭混凝土脫落



西 19 第 12 排碼頭底板



混凝土脫落



西 19 第 12 排第二支樁



西 19 第 4、5 排第一支樁

圖 13 基隆港第二突堤碼頭破損狀況(民國 90 年)



碼頭底板入口處



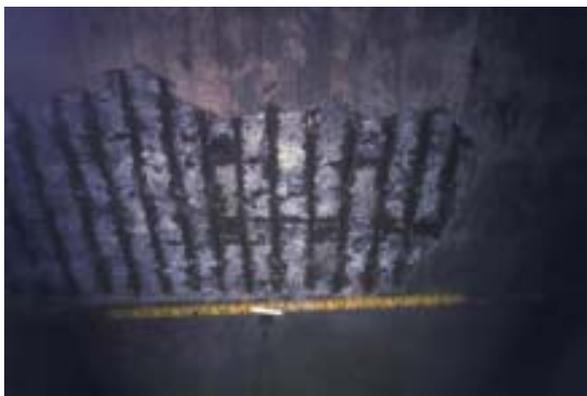
碼頭底板鋼筋銹蝕



#13 碼頭底板混凝土脫落鋼筋銹蝕



#13 碼頭底板與大樑鋼筋銹蝕



#7 碼頭底板混凝土脫落鋼筋銹蝕



#10 碼頭底板混凝土脫落鋼筋銹蝕

圖 14 蘇澳港碼頭底板破損狀況(民國 91 年)



拉桿彎曲變形，無法承受設計拉力



拉桿斷裂，無法承受設計拉力



碼頭面板開裂



碼頭法線彎曲，嚴重變形

圖 15 高雄港中洲#105 碼頭鋼板樁碼頭拉桿斷裂變形(民國 90 年)



台中港#1 至#4A 重力式碼頭基礎塌陷-1(民國 88 年)



台中港#1 至#4A 重力式碼頭基礎塌陷-2(民國 88 年)



台北港 E3 碼頭漏砂塌陷(民國 95 年)

圖 16 重力式碼頭損壞狀況



堤身塌陷-1



堤身塌陷-2



胸牆破損

圖 17 蘇澳港防波堤損壞狀況(民國 91 年)

4.1.2 港灣構造物之腐蝕與陰極防蝕檢測

港灣技術研究中心執行碼頭鋼板(管)樁的腐蝕檢測項目包括鋼板(管)樁的厚度量測、電位量測、犧牲陽極塊的稱重、尺寸量測、以及保護電流量測，其使用的儀器與現場操作狀況如圖 18 所示。

港灣鋼構造物陰極防蝕效果之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，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。由於碼頭鋼板(管)樁陰極防蝕是採犧牲陽極式之防蝕保護，所以犧牲陽極塊會隨浸漬的時間增加而逐漸消耗(如圖 19 所示)；為確保陰極防蝕效果，目視檢測、電位量測與陽極調查應每五年執行一次或當例行檢查發生問題時立即進行。至於陽極壽命計算，如下：

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

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



渦電流測厚計-海生物不須敲除



超音波測厚計-須敲除海生物



A-scan 超音波測厚計-單點量測



鋼板(管)樁厚度量測



B-scan 超音波測厚計-平面量測



鋼板(管)樁厚度量測

圖 18 碼頭鋼板(管)樁的腐蝕檢測



電位檢測儀器(氯化銀參考電極)



陽極塊電位量測



陽極塊保護電流量測儀器



陽極塊保護電流量測



陽極塊秤重



水中對講機

圖 19 碼頭鋼板(管)樁的腐蝕檢測-續



海生物敲除前之鋼樁



海生物敲除後之鋼樁



海生物敲除前之犧牲陽極塊



海生物敲除後之犧牲陽極塊



犧牲陽極塊之消耗-1



犧牲陽極塊之消耗-2

圖 20 碼頭鋼板(管)樁的的陰極防蝕效果

4.2 橋梁

橋梁一直是台灣整個交通路網上重要的結構物，靠近海岸的橋梁，因大氣中的氯離子入侵，或是穿越工業區的橋梁，受到大氣中二氧化硫的影響，再加上台灣的酸雨環境，不僅是鋼筋混凝土橋梁，甚至鋼構橋梁都有腐蝕劣化的情形。台灣因地形關係，橋梁數目眾多，根據統計，台灣地區約有兩百餘座橋梁，分別由交通部台灣區國道高速公路局、台灣鐵路管理局、公路總局、內政部、縣市政府、農委會、原住民委員會、經濟部等單位管轄。

工業技術研究院材料與化工研究所受交通部公路總局委託，於民國 91 年執行「橋梁防蝕設計與施工準則建立之研究」計畫時，針對台灣 176 座橋梁與外島 27 座橋梁(共 203 座)進行目視檢查，以橋齡而言大部份集中在 5 至 30 年之間(亦有 30 年以上者)，若以與海岸距離歸類大部份橋梁則距海岸 0.5 公里之內。根據統計，台灣橋梁目前已施作陰極防蝕者僅佔少數，如台二線的安和橋與和美二橋(包括橋面板、橋墩與大樑)；而正在興建者僅有台 61 線的西濱公路跨南勢溪橋之橋墩。檢測橋梁位置、代號與數量如表 11。

表 11. 橋梁位置與橋梁代號

橋梁位置	橋梁代號	完成檢測橋梁數目
台 1 線	T1-XX*	19
台 2 線	T2-XX*	42
台 3 線	T3-XX*	12
台 9 線	T9-XX*	14
台 11 線	T11-XX*	29
台 15 線	T15-XX*	12
台 17 線	T17-XX*	21
台 26 線	T26-XX*	8
台 61 線	T61-XX*	9
離島	IA-XX* , IB-XX* , IC-XX*	27
鐵路橋梁	S-XX*	10
共計	*表示橋梁序號.	203

目視檢查結果發現，鋼筋混凝土橋梁的劣化現象有：

1. 在護欄及引道損壞情況為混凝土爆裂鋼筋腐蝕外露、混凝土破損或裂縫及銹水，如圖 21 所示。
2. 橋台損壞情況一般為混凝土爆裂鋼筋腐蝕外露、混凝土破損、漏水或裂縫、白華等現象，如圖 22 所示。
3. 端(間)隔梁大多為鋼筋腐蝕外露及曾經修補過之情形，如圖 23 所示。
4. 橋面版方面則出現較嚴重之混凝土爆裂鋼筋腐蝕外露部分也出現裂縫或白華現象，如圖 24 所示。
5. 橋梁之大梁則出現較為嚴重之損壞現象，這種情形在濱海地區橋梁更為顯著，部分橋梁之大梁在梁底或是側面均有因鋼筋腐蝕而造成裂縫，有些大梁已發生混凝土爆裂鋼筋腐蝕外露，部分大梁因鋼筋腐蝕使得混凝土爆裂崩落，雖有部分大梁經過修護，但可發現修護後仍然產生裂縫，如圖 25 所示。
6. 支承部位則以鋼筋腐蝕外露、破裂及支承墊腐蝕為主，如圖 26 所示。
7. 橋梁下部結構之帽梁除了有裂縫發生外，亦有混凝土爆裂剝落及鋼筋腐蝕外露情形出現，如圖 27 所示。
8. 橋墩則出現裂縫並有白華情形，其它損壞情況為鋼筋腐蝕外露混凝土爆裂剝落，另外部分橋墩護板有嚴重之腐蝕損壞發生，至於橋墩基礎被掏空雖有但較少見，如圖 28 所示。
9. 鋼橋部分目視檢測結果大致良好除少數漆膜剝落外，另發現部分橋樑構件有被火燒過的痕跡，應是人為造成，如圖 29 所示。



T26-06 引道鋼筋腐蝕外露



T2-20 護欄鋼筋腐蝕外露



T2-30 橋護欄損毀鋼筋腐蝕外露



IC-04 護欄銹水

圖 21 護欄及引道損壞劣化狀況



T2-27 橋台鋼筋腐蝕外露



T11-17 橋台 RC 破損



T2-39 橋台裂縫



T2-10 橋台漏水



T9-03 橋台白華



T9-03 橋台白華

圖 22 橋台劣化狀況



T2-08 間隔梁鋼筋腐蝕外露



T11-09 間隔梁鋼筋腐蝕外露



T15-05 間隔梁鋼筋腐蝕外露



T2-14 間(端)隔梁曾進行修護

圖 23 端(間)隔梁劣化狀況



T2-27 橋面版 RC 破裂鋼筋腐蝕外露



T2-30 橋面版鋼筋腐蝕外露



T17-2 橋面版裂縫



T2-22 橋面版 RC 裂縫



T11-05 橋面版裂縫白華

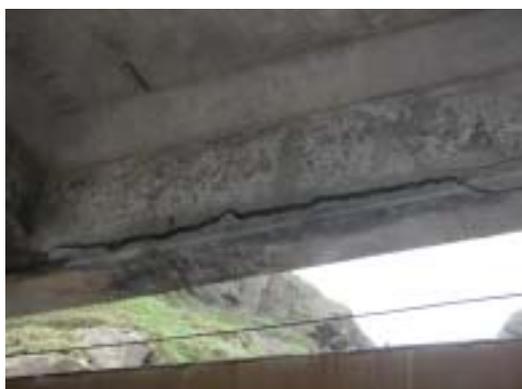
圖 24 橋面版劣化狀況



T2-23 大梁 RC 爆裂



T2-30 大梁 RC 爆裂鋼筋腐蝕外露



T2-24 大梁 RC 爆裂



T2-22 大梁 RC 爆裂鋼筋外露



T2-25 大梁修補



T2-15 大梁修護後裂縫發生

圖 25 大梁劣化狀況



T9-16 支承下方 RC 剝落鋼筋腐蝕外露



T15-01 支承墊破裂



T26-03 支承墊腐蝕

圖 26 支承部位劣化狀況



T2-08 帽梁下方裂縫



T9-14 帽梁裂縫



T9-20 帽梁側面 RC 爆裂



T9-20 帽梁下方 RC 爆裂



T15-01 帽梁底 RC 爆裂鋼筋腐蝕外露



T15-10 帽梁底 RC 爆裂鋼筋腐蝕外露

圖 27 橋梁下部結構之帽梁劣化狀況



T9-23 橋墩裂縫



T9-03 橋墩裂縫白華



T2-12 橋墩 RC 破裂鋼筋腐蝕外露



T2-16 橋墩 RC 破裂鋼筋腐蝕外露



T9-08 橋墩鋼版腐蝕



T17-02 橋基掏空

圖 28 橋墩劣化狀況



T1-13 漆膜剝落



T1-13 漆膜燒痕



南方澳大橋焊道部位銹蝕



南方澳大橋塗層表面銹斑



林口高架橋熱浸鍍鋅鋼構銹蝕

圖 29 鋼橋梁劣化狀況

4.3 地下管線

地下管線長久埋於地下，受到周圍環境(如土壤、地形變化、化學工廠污染物排放) 輸送物質 或其他外力(如開挖施工)之影響，會逐漸腐蝕劣化；一旦管線破損洩漏，不僅會產生工安事故，更會導致環境污染與人民財產損失。早期為了自來水及電話普及化，大肆埋設管線，70 年代，自來水、瓦斯、下水道的興建，十大建設的推動，石油、天然氣、與石化工業原料、產品的輸儲營運，促使台灣地下管線的戰國時代因此展開，各種地下管線如水、電、輸油、輸氣或其他訊號傳輸管線等交錯橫互於地面下，一旦管線發生腐蝕劣化，不僅尋管開挖困難，施工時，更易造成其他管線傷害。目前台灣並無地下管線的專屬管理單位，但各業者如中油公司與部份瓦斯公司在長途管線埋設時均設有陰極防蝕系統；至於自來水公司的管線，目前尚無陰極保護系統。

地下管線腐蝕發生原因有：

1.施工不良

一般管線埋設於地下前都有包覆存在，只在兩端各留下一段距離未予包覆，以便現場焊接使用；由於焊接需於現場施工，所以焊接部位如果包覆不良，腐蝕極可能於焊道附近之熱影響區產生。回填時都使用無鹽溪砂回埋，主要是防止管線放入管溝時，包覆材料受到石子等尖銳物質損壞而使腐蝕產生。至於現場施工時之吊掛作業，均易使管線包覆受損。

2.外力

造成外力破壞的原因計有施工時之機械傷害、地震、河床地等之地層變動、下陷及經常性之重車輾壓等。

3.陰極防蝕效果不佳

一般長途管線都裝有陰極防蝕系統，而陰極防蝕系統在管線新設時均由設計公司進行設計、安裝，其驗收方式都以量測測試點之防蝕電位是否小於-850 mV (vs. 硫酸銅參考電極)為標準，若量測電位大於-850 mV，則直接調整整流器輸出，以符合防蝕電位標準。由於此檢測方式皆以點的方式來判定陰極防蝕系統是否符合原設計標準，無法了解管線全線之陰極防蝕電位，故在施工完成後，須進行全段管線之緊密電位量測，以了解陰極防蝕系統之運作，並將量測所得之防蝕電位當作該段管線背景資料，定期量測、比較，藉以判斷管線包覆破損位置，進而開挖並給予適當修護。

4.輸送物質

管路內部腐蝕是由於管路內部存在不利於腐蝕環境所致，其可能的成因為輸送物質具高度腐蝕性(如 CO_2 、 H_2S 、 Cl_2 、 SO_2 、有機酸等)、管路高低起伏產生之沈積或未定期清管等因素。

5.雜散電流干擾

雜散電流是指電流流動路徑並非原先規劃的電路迴路，或是，大地中任何外來之電流。假若這類電流進入地下金屬結構物，則電流將沿著金屬傳遞，當電流離開金屬再度進入土壤或水中時，在電流離開的金屬表面常有局部腐蝕發生，這現象就稱為雜散電流腐蝕。雜散電流的來源可能是由交流或直流電捷運系統之洩漏電流，或是由其他金屬結構物陰極保護系統干擾所致。

今將地下管線腐蝕劣化之現象例舉於圖 30



施工時之機械傷害



管線與地表交接處無包覆



管線與地表交接處包覆長度不足



埋深不夠之管線



鋼套管內部包覆剝離



管底腐蝕

圖 30 地下管線腐蝕劣化

五、陰極防蝕之維護管理

公共工程一直都在需求下趕工，品質的要求往往在政策完工日期的前提下給犧牲掉，因此即使有好的陰極防蝕設計，若施工不良或缺乏檢測與維護管理等後續工作，仍會造成防蝕失效與嚴重損失。今以鋼筋混凝土構造物陰極防蝕的維護管理，概述如後。

依據交通部運輸研究所港灣技術研究中心與中華民國防蝕工程學會共同合作，於民國 92 年完成之「港灣構造物陰極防蝕準則(草案)-鋼筋混凝土構造物篇」^[1]之第七章系統操作與維護：

7.1 檢測項目

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

7.2 系統運轉中檢查

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

7.3 性能檢測

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

7.3.1 防蝕構件的目視檢查

利用近距離目視檢查，注意結構物是否有任何損壞、腐蝕或變化的位置及其程度。

7.3.2 陽極系統檢查

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

7.3.3 裝設線路

目視檢查所有外露線路(即陽極供電、鋼筋接線和監測設備)的固定與絕緣狀況。

7.3.4 電源

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

7.3.5 性能量測

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

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

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

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

7.4 系統再確認

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

7.4.1 再確認第 7.3 節所述之性能監測所有項目。

7.4.2 預埋式參考電極功能試驗

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

7.4.3 操作資料之建議與確認

檢查操作資料，確認系統性能評估、防蝕可能效益、與系統未來運轉的建議。

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

7.5 書面資料

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

簡言之，系統維護執执行程序流程如圖 31 所示。

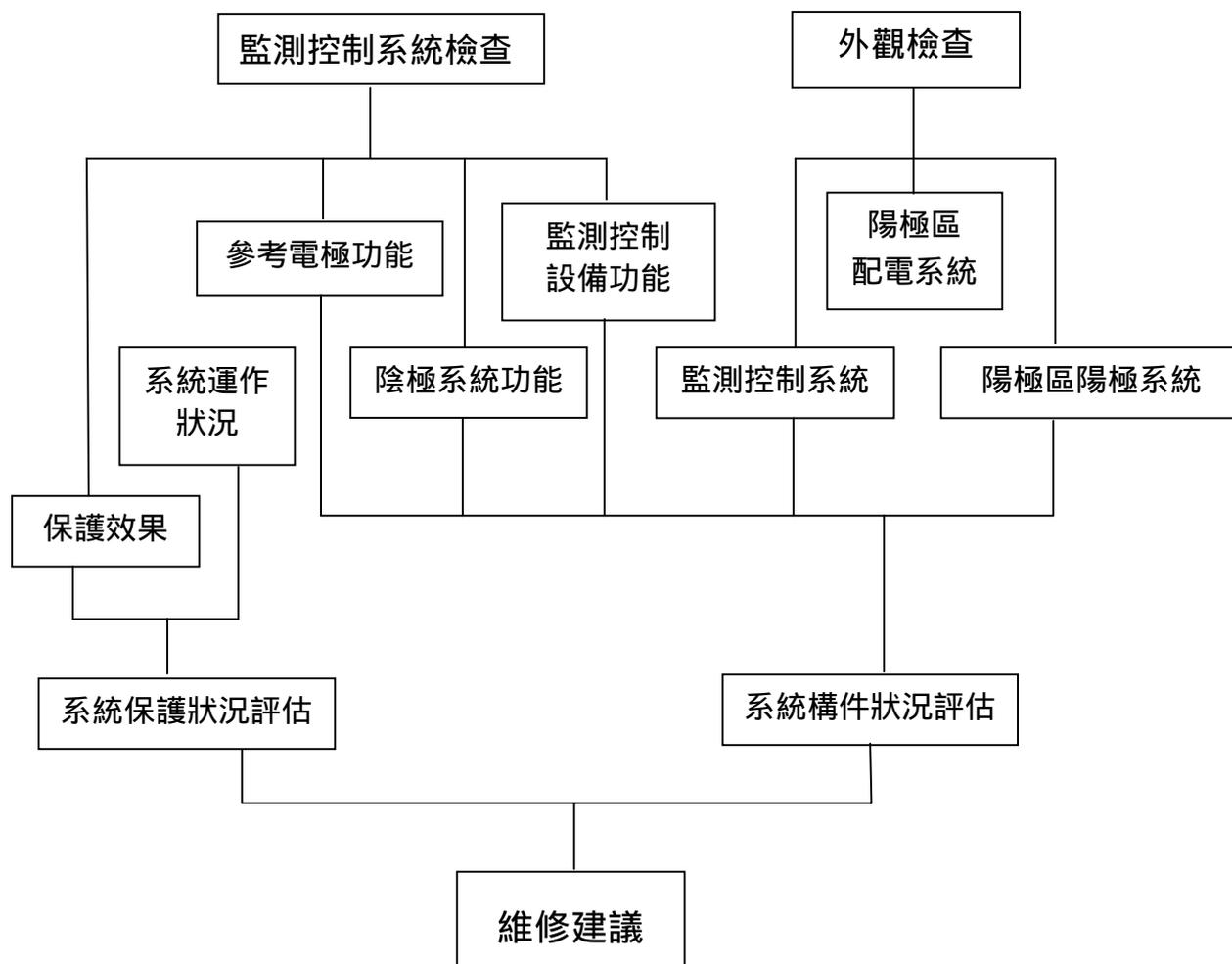


圖 31 鋼筋混凝土構造物陰極防蝕系統維護程序流程

六、結語

陰極防蝕技術之發展與應用已有百餘年歷史，不僅可以應用在水下與土壤環境中，更可應用在鋼筋混凝土結構抵抗氯離子侵害，然而在台灣目前仍處起步階段。為推廣公共工程陰極防蝕觀念，交通部運輸研究所港灣技術研究中心與公路總局分別於民國 92 年與 93 年完成「港灣構造物陰極防蝕準則(草案)-鋼筋混凝土構造物篇與鋼構造物篇」與「混凝土橋梁與鋼橋梁防蝕設計與施工準則(草案)」，冀期各工程設計、施工與管理維護單位能共同推廣，以迎合台灣地區大型公共工程國際化合作、專業化技術與民營化經營的大方向，創造出另一個紀元的「永續型綠色公共工程」。

參考文獻

1. 「港灣構造物陰極防蝕準則(草案)-鋼筋混凝土構造物篇與鋼構造物篇」，交通部運輸研究所港灣技術研究中心委託，中華民國防蝕工程學會與工業技術研究院工業材料研究所共同執行，2003.
2. 「橋梁防蝕設計與施工準則建立之研究」，交通部公路總局委託，工業技術研究院工業材料研究所執行，2004.
3. G.H. Koch, M.P.H. Brongers, N.G. Thompson, Y.P. Virmani, J.H. Payer, “Corrosion Cost and Preventive Strategies in the United States”, FHWA-RD-01-156, Office of Infrastructure Research and Development, Federal Highway Administration, McLean, VA, 2001.
4. John P. Broomfield, “Corrosion of Steel in Concrete, Understanding, investigation and repair” E & FN SPON An imprint of Chapman & Hall, 1997.
5. 日本土木學會，混凝土標準示方書〔維持管理編〕，東京，2001。

構造物之腐蝕與防蝕機理

葉為忠*

摘要

臺灣位處亞熱帶且四面環海，擁有高溫潮濕的氣候，是一利於腐蝕發展的環境，加上近幾年工業及交通廢氣污染日益嚴重，更使得腐蝕的問題有如雪上加霜，若不採取相對應的防蝕措施而放任不管，眾多金屬製品會進而損壞，對社會經濟及人身安全造成直接或間接的損失及傷害。

腐蝕是眾人熟悉之自然現象，透過腐蝕機理，不僅可以清楚解釋陽極與陰極個別之腐蝕行為，亦可進而瞭解腐蝕現象並有效控制腐蝕達到防蝕之效果。

The Mechanisms of Corrosion and Corrosion Prevention for Construction Materials

Weichung Yeih

ABSTRACT

The humid and hot weather of Taiwan provides a hazard environment that induces corrosion. In addition, air pollution from traffics and industry enlarges the corrosion problem. Without corrosion prevention, it is expected corrosion of metal will become a serious problem and it certainly will yield direct and/or indirect damage to the economics as well as human life.

Corrosion is a well-known nature phenomenon. Through understanding its mechanisms, the anodic and cathodic behaviors for the corrosion cell can be clearly explained and from this the corrosion prevention techniques can be developed.

* 國立臺灣海洋大學河海工程研究所 教授

一、前言

鋼鐵材料被使用在各種領域中，如機械零件、石油管路、船舶、飛機及土木工程所使用的鋼筋和鋼結構等，都可以見到它的蹤跡，是人們使用量最多的一種金屬材料。但它是由鐵礦吸收能量冶煉而成的，依據熱力學的概念，自然界中任何物質都有趨向能量最低的傾向，而腐蝕正是一種放出能量的形式，因此在環境允許下，鋼鐵材料將會自發的發生腐蝕^[1,2]。除了材料本身的特性之外，環境對腐蝕程度也有很大的影響，台灣位處亞熱帶且四面環海，擁有高溫潮濕的氣候，屬於有利於腐蝕發展的環境，再加上近幾年工業及交通廢氣污染日益嚴重，更使得腐蝕的問題有如雪上加霜。

若不採取相對應的防蝕措施而放任不管，這些鋼鐵製品會進而損壞，對社會經濟、人身安全造成直接或間接的損失和傷害，對地球資源來說更是一大浪費。因此防蝕技術的相關研究工作是不可避免且相當重要的研究課題，本文將透過腐蝕基理熱力學及電化學的觀點，進而解釋說明腐蝕現象與防蝕技術，冀望大眾對金屬腐蝕與防蝕能有更深入之瞭解。

二、腐蝕機理

2.1 腐蝕之熱力學觀點

金屬腐蝕係指金屬材料表面與周圍環境發生化學或電化學反應，逐步向內部侵蝕進而破壞的現象，由於金屬材料製品大都是礦石經由冶煉等方式製成的，而自然界中任何物質都有趨向能量最低的傾向，且腐蝕恰為一種氧化（放熱）反應，故在一般環境條件下除少數貴重金屬如金、鉑外，大部份金屬材料製品普遍都會自發性發生腐蝕，防蝕工作的目的即在於阻止或延緩腐蝕反應的速率^[1,2]。

一個化學反應是否會自發性的發生，可由熱力學的觀點來加以判斷。若一反應之自由能變化 ΔG 為負，即反應後系統自由能降低，則此反應可以自然發生，反之 ΔG 為正，此反應無法自然發生。先前提到大部分的腐蝕都可視為一種電化學反應，而一個電化學反應之自由能改變量與電位之關係可以下式表示。

$$\Delta G = -nFE$$

其中： n = 反應中轉移之電子數

F = 法拉第常數

$E =$ 平衡電位

一電化學半電池反應之平衡電位 E ，可以藉 Nernst 方程式來決定：

$$E = E_0 + 2.3 \frac{RT}{nF} \log \frac{a_{oxid}}{a_{red}}$$

其中： $E_0 =$ 標準狀態下（25℃，1atm，單位活度(activity)）

之平衡電位

$R =$ 氣體常數

$T =$ 絕對溫度

$a_{oxid} =$ 氧化物質之活度

$a_{red} =$ 還原物質之活度

其中各種金屬相對於以氫半電池電位之標準電位序列可以經由適當實驗求得，如表 1 所示。由上式及表 1 可以求得腐蝕反應之 ΔG 值，並簡單的預測腐蝕反應是否會發生。然而須注意 ΔG 之正負只能用來預測反應發生之方向，並不能藉其大小來預測其化學反應速率^[5]。

Pourbaix 首先運用熱力學概念探討腐蝕反應，並根據 Nernst 方程式及溶解度積導出 Pourbaix 圖（Potential-pH 圖），圖 1 為 Fe-H₂O 系統在 25℃ 時之 Pourbaix 圖^[6]，其主要功用為：

1. 預測反應之自然發生方向。
2. 預估會發生腐蝕之 pH 值和電位區域。
3. 預估腐蝕生成物之組成。
4. 預測何種環境改變會降低或阻止腐蝕發生。

使用此圖時，須特別注意以下限制：

1. 僅能瞭解腐蝕之趨勢，不能判讀出腐蝕速率。
2. 沒有考慮到溫度，合金效應及雜質對腐蝕的影響。
3. 沒有考慮外加離子之影響(如氯離子...等)。

表 1 標準電極電位序列^[3,4]

$\text{Au} \rightarrow \text{Au}^{+3} + 3\text{e}^{-}$	1.42	鈍性端
$\text{Pt} \rightarrow \text{Pt}^{+2} + 2\text{e}^{-}$	1.2	
$\text{Ag} \rightarrow \text{Ag}^{+} + \text{e}^{-}$	0.799	
$2\text{Hg} \rightarrow \text{Hg}_2^{+2} + 2\text{e}^{-}$	0.798	
$\text{Cu} \rightarrow \text{Cu}^{+2} + 2\text{e}^{-}$	0.34	
$2\text{H}^{+} + 2\text{e}^{-} \rightarrow 2\text{H}$	0.000	基準
$\text{Pb} \rightarrow \text{Pb}^{+2} + 2\text{e}^{-}$	-0.126	
$\text{Sn} \rightarrow \text{Sn}^{+2} + 2\text{e}^{-}$	-0.140	
$\text{Ni} \rightarrow \text{Ni}^{+2} + 2\text{e}^{-}$	-0.23	
$\text{Co} \rightarrow \text{Co}^{+2} + 2\text{e}^{-}$	-0.27	
$\text{Cd} \rightarrow \text{Cd}^{+2} + 2\text{e}^{-}$	-0.402	
$\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{+2} + 2\text{e}^{-}$	-0.44	
$\text{Cr} \rightarrow \text{Cr}^{+3} + 3\text{e}^{-}$	-0.71	
$\text{Zn} \rightarrow \text{Zn}^{+2} + 2\text{e}^{-}$	-0.763	
$\text{Al} \rightarrow \text{Al}^{+3} + 3\text{e}^{-}$	-1.66	
$\text{Mg} \rightarrow \text{Mg}^{+2} + 2\text{e}^{-}$	-2.38	
$\text{Na} \rightarrow \text{Na}^{+} + \text{e}^{-}$	-2.71	
$\text{K} \rightarrow \text{K}^{+} + \text{e}^{-}$	-2.92	活性端

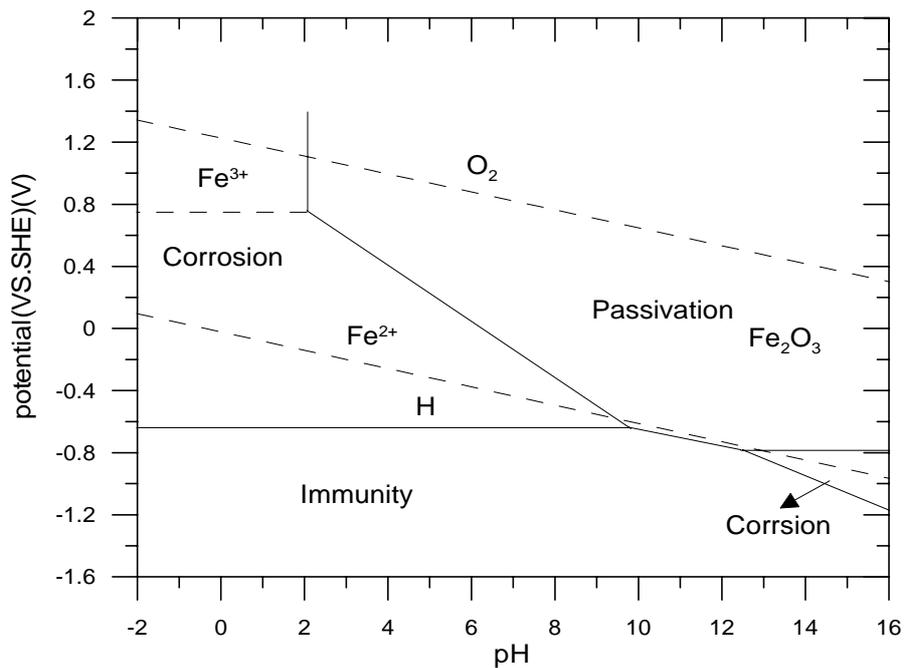
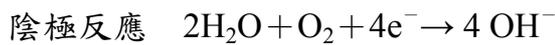


圖 1 鐵的簡易 Pourbaix 圖

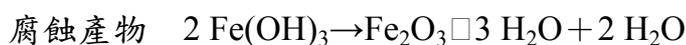
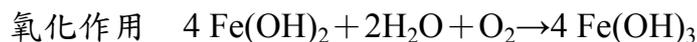
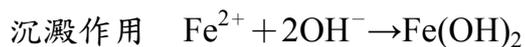
2.2 電化學腐蝕過程

一般常用的碳鋼主要成分除了鐵亦會摻加微量的碳，當浸入含電解質的水中時，由於鐵的電極電位較碳負，故鐵為陽極碳為陰極，兩者又因直接接觸構成電導路，綜合以上因素，因而在碳鋼表面形成腐蝕電池如圖 2，其電化學腐蝕過程為：



(在中性或鹼性環境中)

氫氧根離子產生後，將與鐵離子結合形成氫氧化亞鐵沉澱物($\text{Fe}(\text{OH})_2$)，進而氧化作用生成氫氧化鐵($\text{Fe}(\text{OH})_3$)，其腐蝕生成物俗稱鐵銹，且體積比原先的大 2~7 倍，反應式如下。



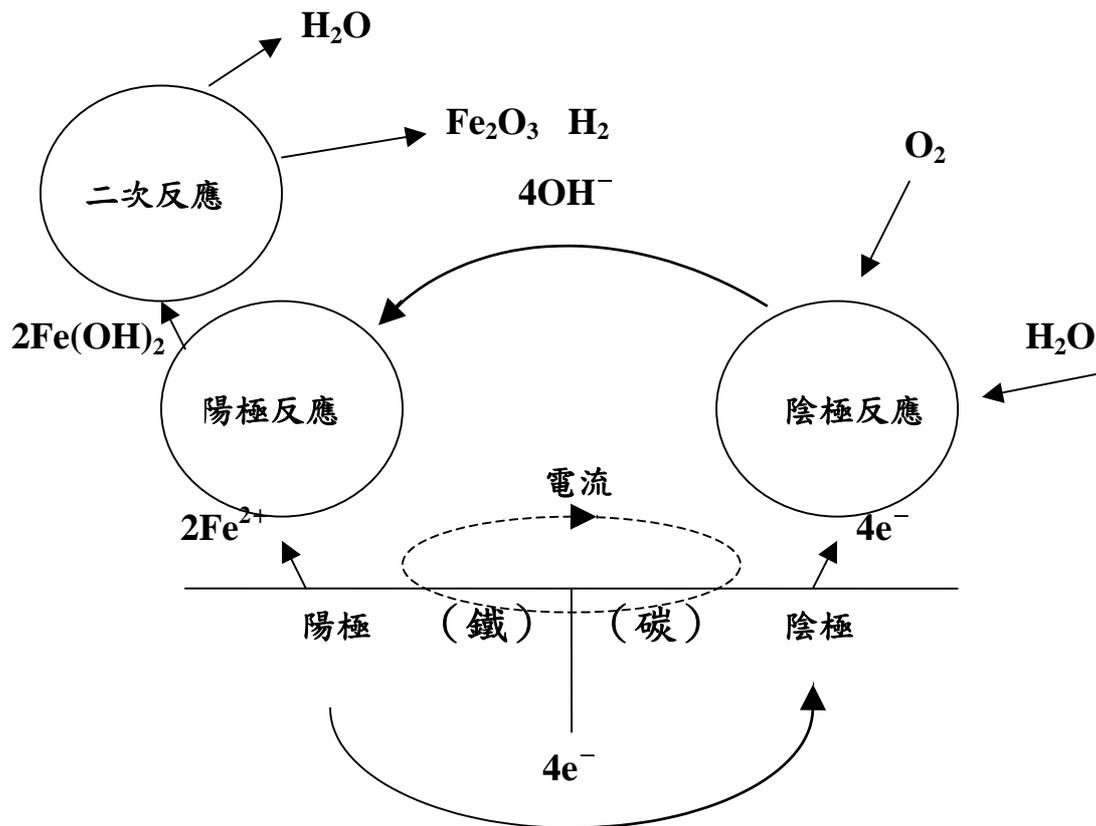


圖 2 碳鋼在水中腐蝕反應示意圖^[7]

2.3 腐蝕速率的量測

以重量損失法作為腐蝕速率的測定方法，通常試驗過程較為繁瑣且需較長之時間，而電化學方法研究腐蝕，不但測定簡單並可觀察其反應機構，目前使用頗為廣泛，以下介紹兩種以電化學方法作為基礎的腐蝕速率測量方法^[1]。

Tafel 外推法

依照圖 3 之說明，按以下步驟進行試驗儀器的配置工作，首先將試片置於工作電極 (WE)，並藉由輔助電極 (Aux) 外加一電流，輔助電極通常使用白金電極，電流大小可由安培計 A 來測量。工作電極之電位可由參考電極 (Ref) 進行量測。

試驗一開始需先量測試片的腐蝕電位，接著開始逐漸改變電位，同時測量電流並轉換成對數單位，即可得到一外加電流極化曲線。圖 4 為此法所得

之一陰極極化曲線。根據合成電位理論，在某一電位上之外加陰極電流，等於該電位上還原反應與氧化反應之速率差。起初，在 E_{corr} 上，氧化與還原速率相等，外加電流為零，當電位離開 E_{corr} 約 50mV 左右，由於總陽極反應速率小至可忽略，外加電流接近總陰極反應速率，於是可得一活性線性關係，此線性區域稱之為 Tafel 區域。由此區域外推至腐蝕電位，即可推得腐蝕速率^[5]。

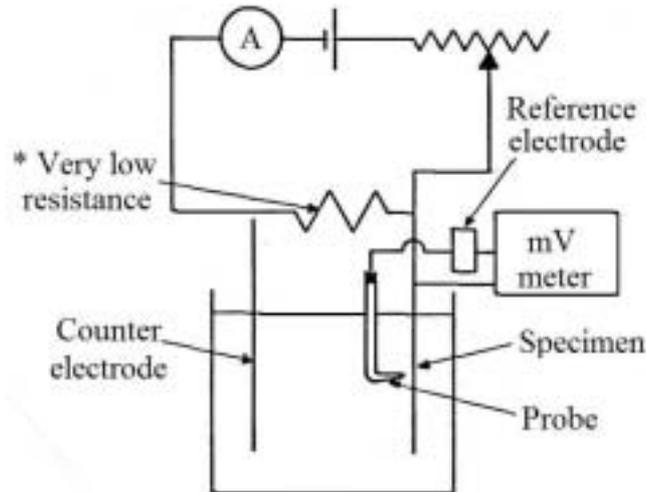


圖 3 外加電流極化曲線測定之線路圖^[8]

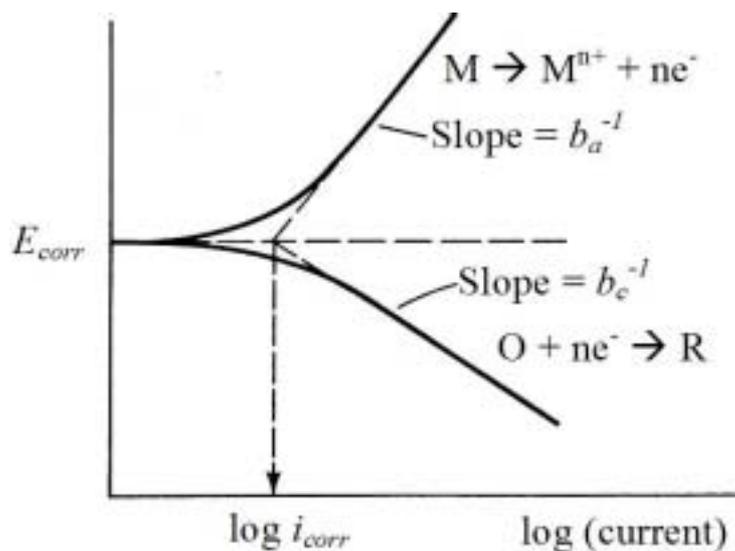


圖 4 外加電流陰極極化曲線顯示 Tafel 區域^[8]

線性極化法

Stern 與 Geary 提出以外加電流對電壓作圖時，在腐蝕電位附近正負 10mV 附近，可以得到近似線性之關係如圖 5 所示^[9]，此線性關係之斜率稱之為極化電阻 R_p (Polarization Resistance)，由 Stern-Geary 公式可推得下式：

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta i_{app}} = \frac{\beta_a \cdot \beta_c}{2.3 i_{corr} (\beta_a + \beta_c)}$$

式中的 β_a 、 β_c 分別為陽極與陰極反應之 Tafel 斜率，因此若 β 值已知，則可以算出腐蝕速率 i_{corr} 。實際上由於線性極化之斜率主要受腐蝕速率控制，斜率愈大腐蝕速率則愈小，而 β 值對斜率之影響較小，故一般假設 $\beta_a = \beta_c = 0.12$ ，可簡化成：

$$i_{corr} = \frac{0.026}{R_p}$$

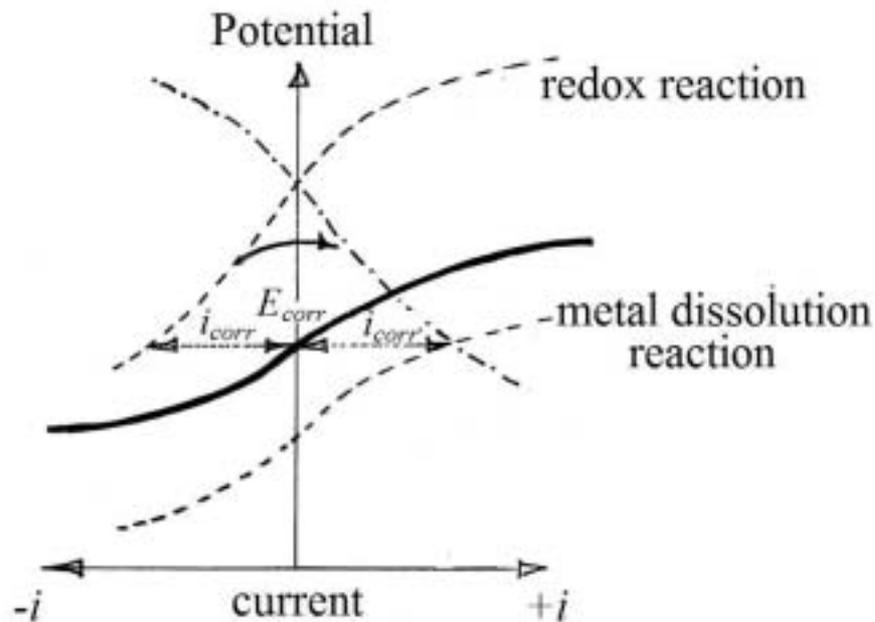
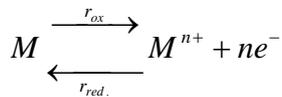


圖 5 線性極化曲線^[8]

三、腐蝕與極化

3.1 極化作用

由於淨電流的流入或流出電極而造成電極電位改變的程度稱之為極化作用(Polarization)，此時，電極不再處於平衡，電極電位改變的程度與外加電流的大小與方向有關，不論電流是由外界流入或者是由伽凡尼作用產生，電位所改變的方向永遠與平衡移動之方向相反。極化程度為電極電位與平衡電位之差值，即過電壓(overvoltage) $\eta = E - E_0$ ，單位為伏特。當電極電位較平衡電位為正或貴重(noble)時，稱此電極於陽極極化狀態，反之電極電位為負或活潑(active)時，稱之為陰極極化。



if $E = E_{eq}$ (平衡電位)， $i_a = |i_c| = i_0$

(Exchange Current Density 交換電流密度)

if $E > E_{eq}$ (平衡電位)， $i_a > |i_c|$ (陽極主控)

if $E < E_{eq}$ (平衡電位)， $i_a < |i_c|$ (陰極主控)

Polarization $\xrightarrow{\text{during force}}$ *overpotential*(過電壓)

3.2 極化曲線(Polarization curve, E-I diagram)

過電壓與 Tafel slope 間之關係：

$$\beta_a = \frac{\eta_a}{\log i_a - \log i_0}$$

$$\therefore \eta_a = \beta_a \log \frac{i_a}{i_0}$$

同理， $\eta_c = \beta_c \log \frac{i_c}{i_0}$ 當電壓的範圍擴大時。

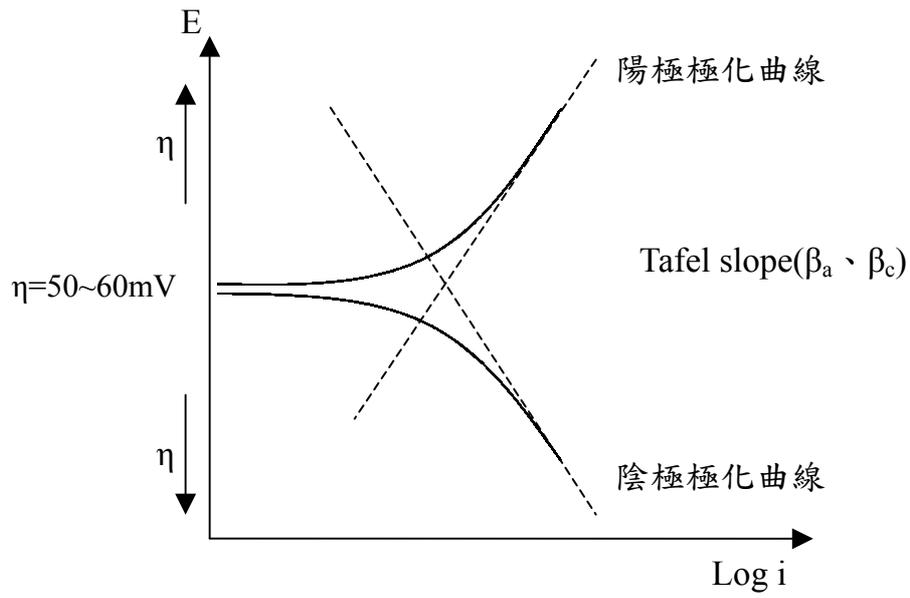


圖 6 極化曲線

陽極反應：

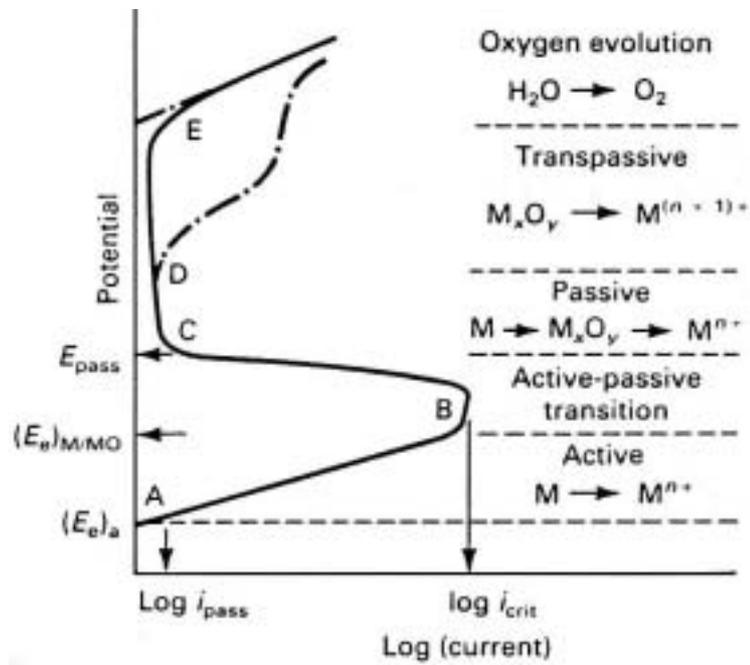


圖 7 陽極反應

AB 段： $M \Leftrightarrow M^{n+} + ne^{-}$ 金屬離子的生成(Tafel region)

CD 段： $M + H_2O \Leftrightarrow MO + 2H^{+} + 2e^{-}$ 氧化物或氫氧化物生成(鈍態)

E 以上： $2H_2O \Leftrightarrow O_2 + 4H^{+} + 4e^{-}$ 氧的氧化分解，如 $Cr_2O_3 \rightarrow CrO_4^{2-}$

* 加速腐蝕速率電位加在 Active 間，但要視鋼材之材料性質而定，

陽極保護：電位加在 Passive 區產生氧化膜，使金屬變為貴重。

Cl⁻ 添加對極化曲線之影響

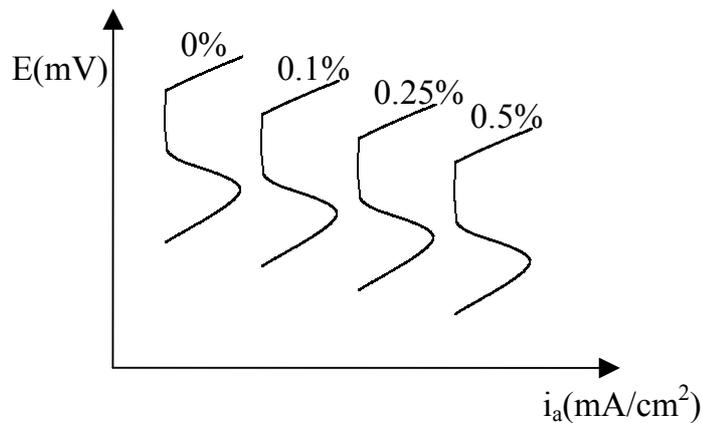


圖 8 Cl⁻ 添加對極化曲線之影響

條件：mild steel 在含有不同百分比氯化鈣含量的飽和石灰水中。

1. 臨界孔蝕電位會隨 Cl⁻ 含量的增加而下降。

2. 鈍化區的範圍亦將變窄。

• metal or alloys → pitting

原因：Cl⁻ 的侵蝕。

• mild steel 於海水中不適作陽極防蝕。

原因：Cl⁻ 會破壞鈍態保護膜而產生孔蝕(pitting)。

Cl⁻ 對 E-pH 圖之影響

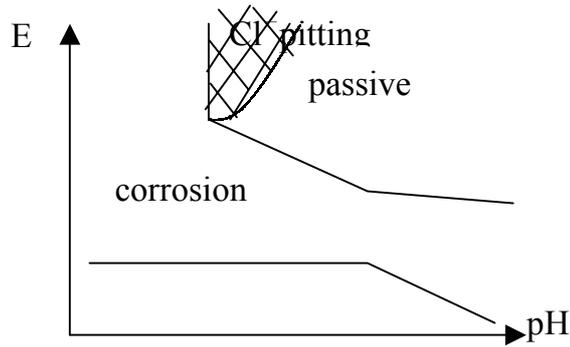


圖 9 Cl⁻ 對 E-pH 圖之影響

金屬處於高鹼性的電解質環境中時，此環境會使金屬表面產生一鈍態保護膜，但當溶液中有 Cl⁻ 存在時，E-pH 圖中之鈍態區範圍將受影響。

Cl⁻ 含量的判定

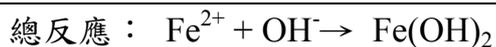
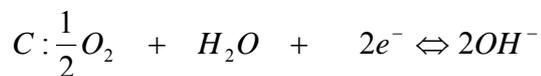
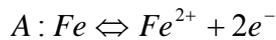
$$\frac{[\text{Cl}^-]}{[\text{OH}^-]} \geq 0.6$$

Threshold concentration(瓶頸濃度)→混凝土中鋼筋會發生腐蝕

上式的意義代表當溶液的 pH 值越高時，則要使金屬發生腐蝕所需之 Cl⁻ 濃度相對地將要更多。

3.3 腐蝕與極化曲線

腐蝕電位



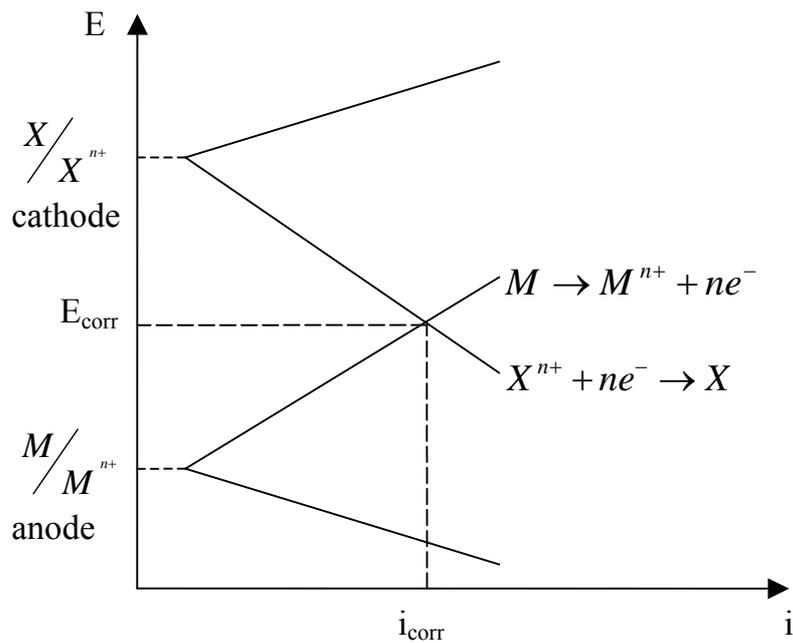


圖 10 合成電位極化曲線

E_{corr} ：腐蝕電位

i_{corr} ：腐蝕電流(密度) \Rightarrow 據此再利用法拉第定律來推估蝕速率。

陰極控制

極化大部份都發生在陰極處，其腐蝕反應受陰極控制，因此腐蝕電位較接近陽極的平衡電位，如鋅在硫酸中或鐵在水中。

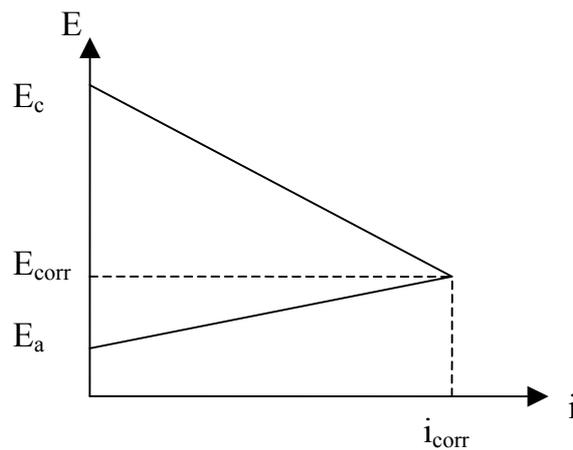


圖 11 陰極控制之極化曲線

陽極控制

極化大部份都發生在陽極處，其腐蝕反應受陽極控制，因此腐蝕電位較接近陰極的平衡電位，如鐵在鉻酸中或鎂在水中。

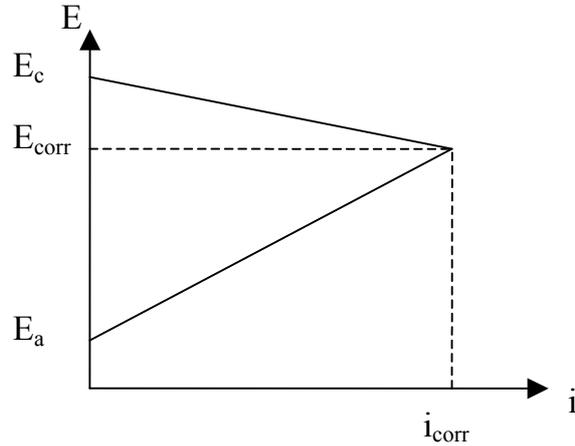


圖 12 陽極控制之極化曲線

混合控制

此為較普遍之情形，陽極與陰極之極化程度大致相同，其腐蝕反應為混合控制。

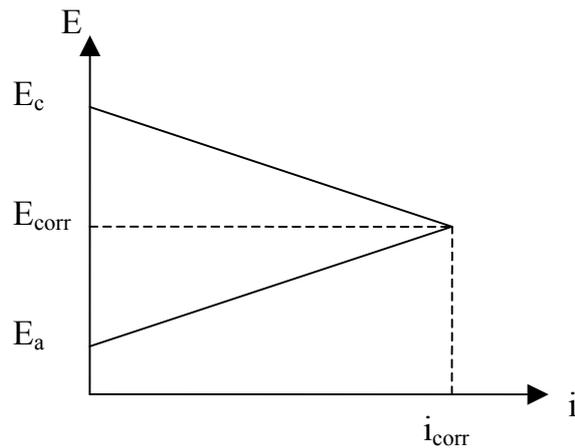


圖 13 混合控制之極化曲線

電阻控制

在陰陽極的極化現象不顯著所造成，高電阻的介質存在。

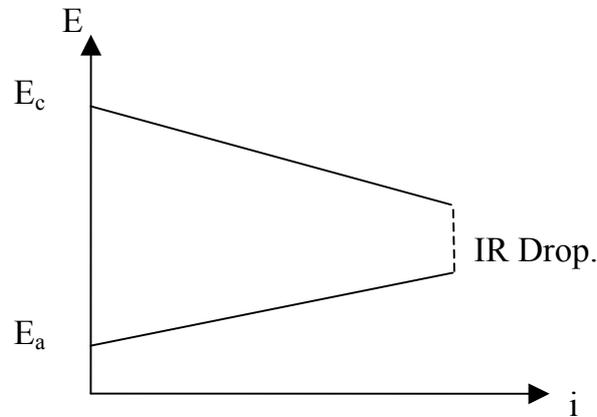


圖 14 電阻控制之極化曲線

外加電流法

Wanger 對欲達到完全之陰極防蝕保護，所需之最小保護電流，曾指出欲被保護金屬材料之電位，必須小於平衡狀態時之電位。由腐蝕電流可知金屬自然腐蝕之速率。腐蝕電流由於受制於陰、陽極之極化程度及電解液之電阻大小，其關係如下^[10]；

$$i = E / R = (E_a - E_c) / (R_a + R_c)$$

式中， i：電流

E：電位

R：電阻

E_a：陽極極化電位

E_c：陰極極化電位

R_a：陽極極化電阻

R_c：陰極極化電阻

完全達到 100% 之陰極保護效應時，其防蝕電流應等於腐蝕電流，即 $i_{\text{corr}} = i_a = i_c$ ，式中 i_a 為陽極電流， i_c 為陰極電流， i_{corr} 為腐蝕電流。

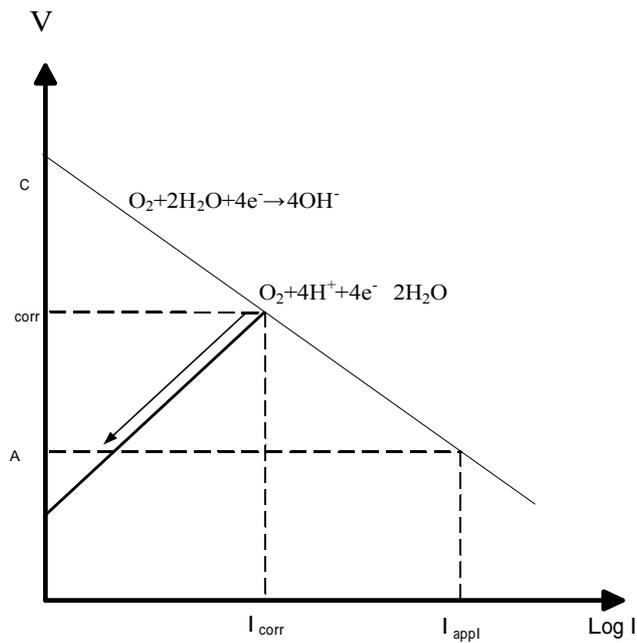


圖 15 外加電流法之極化曲線

犧牲陽極法

利用自然電位較低之金屬(如：Mg、Al、Zn)作為陽極，與被保護隻金屬體耦合在一起，當陽極放出防蝕電流後，使被保護之金屬體的自然電位下降，當電位下降至防蝕電位時，則被保護之金屬體就不會再發生腐蝕行為。

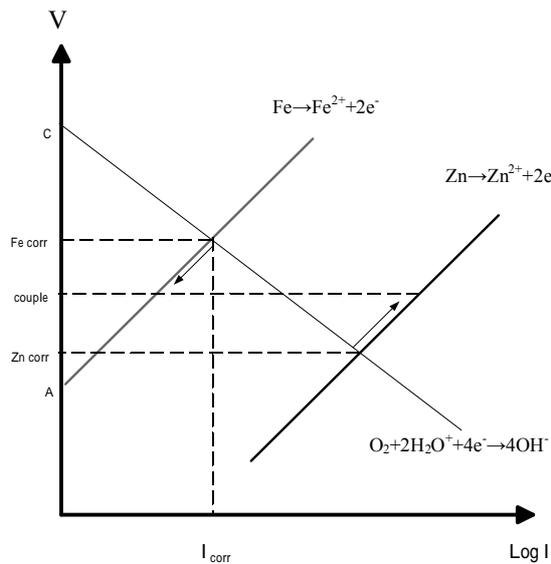


圖 16 犧牲陽極法之極化曲線

四、防蝕工法簡介

4.1 陰極防蝕^[11]

陰極防蝕應用於鋼筋混凝土之腐蝕防治上，可大幅提高結構物之耐久性與安全性。陰極防蝕可有效抑制混凝土中鋼筋腐蝕，其方法主要分為利用外加電流法或犧牲陽極法，其優缺點如表 2 所示。

表 2 標準電極電位序列

	外加電流法	犧牲陽極法
優點	<ol style="list-style-type: none"> 1.適用大規模之結構體、設備或腐蝕性強之環境，較為經濟。 2.電壓、電流調節幅度大，且電極所佔體積小，極易安裝於狹小之場地，適用於任何環境中。 3.使用不溶性之電極，壽命較長。 	<ol style="list-style-type: none"> 1.可適用於無電源供應器之場所或移動性之保護對象，無電費之消耗。 2.小規模且分散之場所、防蝕電流小之場所，使用本法較為經濟。 3.施工簡單、維修、管理容易。
缺點	<ol style="list-style-type: none"> 1.需注意防蝕電流對它種金屬構造物之影響，而且需長期負擔電費。 2.需經常檢查防蝕之導電迴路、監控與供應電源設備是否正常。 3.設計、施工、運轉等之相關工程需具備較專業之知識。 	<ol style="list-style-type: none"> 1.電流之調節及放電能力不佳。 2.需定期更換已消耗陽極。 3.有效電壓小，不適合使用於高電阻係數之環境，如 R.C.結構物等。

4.1.1 外加電流法

外加電流主要是以施加一直流電源裝置（定電流或定電壓），以混凝土作為電解質，供給陰極與陽極間的電位差，而不需由消耗陽極而獲得所需之防蝕電流，直接供給防蝕所需之電流。直流電源供應器上之正端接到輔助陽極，負端則接到被保護體上，接通電流，來達成保護體被極化防蝕的目的。



圖 17 外加電流法^[12]

根據美國佛羅里達州交通局 (Florida Department of Transportation, FDOT)之研究，外加電流法依使用陽極之方式可分為下列五種方式：

1. 導電性塗料(Conductive Coating System)

將混凝土表面挖一細溝，埋入白金鈦線與導電性樹脂，作為導電用陽極然後在混凝土面塗覆導電性的碳系(含 70%以上碳素)顏料，作為次要陽極之裝設。

1984 年 FDOT 在佛羅里達州東岸兩座橋樑的基樁、橫樑、與橋面底部施行導電性塗料之陰極保護，利用地下管線之保護標準為準則。結果顯示，暴露於大氣中之結構物，其鋼筋電位控制於-850mV(以硫酸銅電極參考下)，達到陰極保護之要求；但位於潮位變化的潮間帶，基樁混凝土表面的導電塗料均剝離，造成保護電流分佈不均，由此可知此種陰極防蝕系統不適用於潮間帶與海水浸泡區域之 RC 結構。

2. 導電性橡膠(Conductive Rubber Anode)

導電性橡膠為導電性塗料系統之改良，適用於潮間帶區域之 RC 結構防蝕，將混凝土表面挖一細溝，埋入白金鈦線與導電性樹脂，作為導電性陽極，而混凝土表面則鋪設導電性橡膠為次要陽極。

1987 年 FDOT 於 B. B. McCormick Bridge in Jacksonville, FL 進行試驗。首先將混凝土緊密連接橡膠，此橡膠側有若干凹槽，利於橡膠表面的海鹽沖洗乾淨，維持潮濕環境。導電橡膠安裝後，於導電性橡膠外層需包覆矽膠橡皮墊(silicon rubber pad)與塑膠板(或玻璃纖維板)，作為碰撞之保護措施。根據 FDOT 之測試研究，依結構物所在海象之嚴苛環境，此系統

的服務年限約為 5~17 年。

3. 鈦網陽極外覆混凝土(Titanium Mesh Anode Embedded in Gunitite)

利用 mixed metal oxides(MMO)鈦網作為陽極，由於電流分佈均勻，不裝設次要陽極。只利用塑膠固定帶，將欲保護鋼筋之混凝土表面，直接鋪設鈦網，再將混凝土覆蓋於鈦網上，混凝土厚度需在 5cm 以上。

FDOT 於 1988 年 Howard Frankland Bridge in Tampa, FL 進行鈦網陽極外加電流式陰極保護工程，由於被保護的結構物，一部份處於乾燥的大氣環境中，另一部份處於潮間帶及水下帶間。此工程顯示，因新覆混凝土在潮濕環境中無法與舊有混凝土緊密結合，而造成剝落現象，所以外覆混凝土工法只適用於乾燥之大氣帶，而不適用於與海水接觸之潮間帶與水下帶。

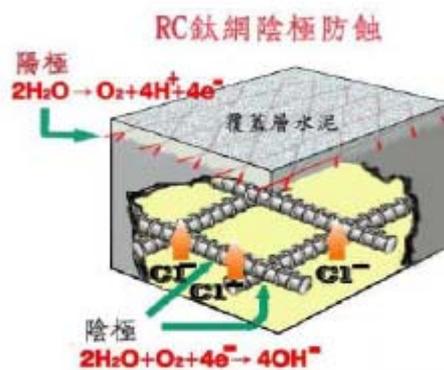


圖 18 鈦網陽極外覆混凝土^[12]

4. 鈦網陽極外覆保護夾層(Titanium Mesh Anode Encapsulated in Structural Jacket)

FDOT 於 Verle Allen Pope Bridge in Crescent Beach, FL 進行研究，經過評估，該橋樁在陰極保護下，鋼筋並無腐蝕劣化之趨勢。本法利用 mixed metal oxides (MMO)鈦網作為陽極，為改良的外覆混凝土工法，首先將 RC 結構物外包覆新的鋼筋混凝土結構，且就有結構物之鋼筋不得與新設鋼筋有通電現象，同時提供不同的保護電流，保護舊有結構物之鋼筋與新設夾層之鋼筋。此工法可對舊有結構物之鋼筋進行陰極保護，並有補強之功能。

5. 外加電流 CP 樁夾層系統(Impressed Current CP Pile Jacket System)

此工法是基樁之陰極保護措施，利用 mixed metal oxides(MMO)鈦網作

為陽極，將陽極固定在玻璃纖維製成的夾層內；施工時將夾層包覆在舊有基樁上，填入波特蘭水泥砂漿。裝置前舊有結構物表面需先清潔並修補。FDOT 於 Ribault River Bridge in Jacksonville, FL 進行此工法施作，陰極防蝕效果極佳。目前已被 FDOT 制定為基樁陰極保護及修復之標準工法。

4.1.2.犧牲陽極法

犧牲陽極方式係利用相對於鋼材活性較高，自然電位較低之金屬（例如鋅）等作為犧牲陽極，以導線連接鋼筋與陽極，當電位下降至防蝕電位時，達到防蝕之目的。根據美國佛羅里達州交通局（Florida Department of Transportation, FDOT）之研究，依使用陽極之方式不同，犧牲陽極可再分為下列四種方式：

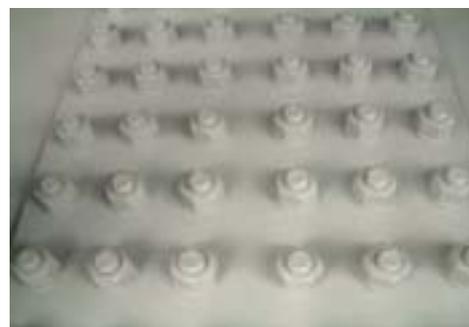
1. 鋅熔射方式（Sprayed Sacrificial Zinc Metalizing System）

利用熔射鋅層被覆作為陽極，為防止高溼、高溫等環境之破壞，一般常用於壓克力樹脂施予封孔處理。首先清除剝落的混凝土並噴砂處理（sandblasting）混凝土及裸露的鋼筋表面，再將混凝土及裸露鋼筋表面噴塗鋅熔射，藉由鋅與鋼筋電連通之傳導或經由混凝土為介質，來達到陰極保護的目的。一般而言，若鋅塗層未直接噴塗於舊有鋼筋表面，亦可使用外加電流方式進行陰極保護。

FDOT 於 1989 年 Niles Channel Bridge in Key West FL 進行此工法施作，被保護的結構物為 Epoxy-coated 鋼筋，此系統產生的保護電流密度為 5 mA/m^2 ，歷經 5 年，保護效果良好；對於未受塗裝的鋼筋，系統產生的保護電流密度為 11 mA/m^2 ，且極化量超過 100 mV 。此系統服務壽命為 7 至 8 年，服務壽命結束後需重新再噴塗，而 RC 結構物與水直接接觸者，無法使用此工法。



(a)



(b)

圖 18 鋅熔射方式(a) 熔射前(b) 熔射後^[13]

2. 鋅板方式 (Perforated Zinc Sheet System)

採用 ASTM A190 的 99.9%純鋅製成的鋅板，密度為 0.02kg/m^3 ，以基樁型是製成的鋅板，直接包覆於混凝土表面，鋅板與鋼筋間銅線連接使之電連通。鋅板外層再利用 50%塑膠 (plastic)，50%木質纖維 (wood fiber) 製成之夾板包覆，此夾板內側有凹槽，可以增加混凝土的導電性；夾板是利用 316 不銹鋼圈箍繫固定在舊有基樁結構上。

FDOT 曾於 B.B. McCormick Bridge in Jacksonville, FL 施作此工法。由於此系統不需特別維護，相對提供了外加電流陰極保護方式外，另一經濟有效的防蝕方法。



圖 19 鋅板方式^[12]

3. 犧牲式陰極保護基樁夾層 (Sacrificial Cathodic Protection Pile Jacksonville, FL)

此工法為鋅板系統之改良，專為 RC 結構物基樁於水下帶、潮間帶、飛沫帶之陰極防蝕使用。施工時以鋅網為陽極，內置於玻璃纖維製成之基樁夾層 (pile jacket) 內，而另一鋅塊為輔助陽極，置於低潮線下 0.6m 的海水中，以銅線將陽極與鋼筋連接在一起。施工時將兩片夾層包覆於混凝土表面，並以水泥砂漿灌入夾層中。

FDOT 曾於 Broward River Bridge in Jacksonville, FL 施作此工法，此系統不需外加電源僅需少許維護，而且造價便宜、施工經濟，已被 FDOT 廣為使用於下水帶、潮間帶、飛沫帶之陰極防蝕。



圖 20 犧牲式陰極保護基樁夾層^[12]

4. 鋅膜導電膠 (3M Zinc-Hydrogel Anode 4727)

鋅板導電其組成為一厚 0.254mm 的鋅膜及一層離子導電膠。施工時將導電膠塗佈於混凝土上，而導電膠之另外一側上覆鋅膜，將鋅膜與鋼筋以銅線電連通，已達到陰極保護的效果。導電膠在潮濕的環境中會失去黏著力而導致鋅膜脫落，造成腐蝕電流分佈不均。因此本工法僅能適用於乾燥的大氣環境中。



圖 21 鋅膜導電膠^[12]

4.2 塗裝、覆襯^[14]

在各類防蝕方法中，塗裝是最經濟及容易施工的防蝕方法，也是一項歷史悠久且應用廣泛的保護方法，惟塗料本身須經過施工程序才能形成塗膜以發揮其機能，即防蝕塗料在基材上形成固化膜。塗膜的防蝕機能在於遮斷腐蝕的環境或提高腐蝕迴路電阻或將腐蝕電位降至免疫區內（另一方式為將腐蝕電位提昇至鈍化區內）以達到腐蝕作用無法形成之環境。

1. 遮斷作用：以塗膜遮斷腐蝕環境，防止外界的腐蝕性物質（水、氧氣、氯離子等）侵入塗膜層保護下之金屬表面，因此須選用對於水與氧等透過性小的材料，例如環氧樹脂等，此外施工程序的正確性及施工品質亦影響防

蝕效果，但由於任何塗層都具有一定程度的滲透性，因此遮斷作用不可能是絕對的，但增加塗膜層厚度可有效增加其對環境的遮斷能力。



圖 22 環氧樹脂

2. 緩蝕作用：在塗層含有化學防蝕摻料下，於有水溶液作為界質時，防蝕摻料會析出緩蝕離子，緩蝕離子會透過各種化學機理使之極化，保持塗膜與金屬介面為微鹼性，達到抑制腐蝕發生，此類較常用的有紅丹和鉻酸鋅等。
3. 抑制電化學反應：利用電化學防蝕方法消除材料因結構不均勻表面發生的局部電池效應，例如於塗料中調配高濃度鋅粉，鋅粉比鐵易離子化，為犧牲陽極作用，消除材料表面所產生之局部電池(伽凡尼電池)。



圖 23 無機富鋅塗料

五、結論

腐蝕是眾人熟悉之自然現象，透過腐蝕機理，不僅可以清楚解釋陽極與陰極個別之腐蝕行為，亦可進而瞭解腐蝕現象並有效控制腐蝕，藉由防蝕技術減少腐蝕對社會經濟、人身安全造成直接或間接的損失和傷害。

參考文獻

1. 鮮祺振，腐蝕理論與實驗，財團法人徐氏基金會出版，中華民國 79 年。
2. 施建志，濕性腐蝕的一般型態及其有關原理，材料科學第十二卷，中華民國 81 年 6 月，第 54~63 頁。
3. G. Kortum and J. O'M. Bockris. Textbook of Electrochemistry, Vol.2, Elsevier, PP.745-755, New York, 1951.
4. W. M. Latimer, Oxidation Potentials, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, P.39, New Jersey, 1952.
5. 翁榮洲，腐蝕與防蝕概論－海洋環境下鋼筋混凝土與鋼材結構物陰極防蝕技術與應用研討會論文集，運輸研究所港灣技術研究中心，中華民國 93 年。
6. Schiessl, "Corrosion of Steel Concrete", RILEM, 1988.
7. A. Beeby., "Corrosion of reinforcement steel in concrete and its relation to cracking", The Structural Engineer, No.3, Vol.56A, March, 1978.
8. <http://engphys.mcmaster.ca/~unene/un1001/>
9. M. Stern and A. Geary, J. Electrochem. Soc., 104, 56, 1957.
10. S. C. Das, "Cathodic Protection Criteria for Steel in Concrete-Some Theoretical and Practical Considerations", Corrosion and Corrosion Protection of Steel in Concrete, Vol. 2, Edited by N. Swamy, Shoffield Academic Press, 1994.
11. 陳桂清、羅俊雄等，港灣構造物陰極防蝕準則訂定(草案)研究，交通部運輸研究所與中華民國防蝕工程學會合作辦理，中華民國 91 年 3 月。
12. <http://cspave.org.tw/material/powerpoint/HSR-2002.pdf>
13. <http://www2.thb.gov.tw/921/3202/3202-4.pdf>
14. 腐蝕防治研習班(防蝕工程實務基礎班) / 中華民國防蝕工程學會，中華民國 80 年 6 月 10-15 日。

鋼筋混凝土構造物陰極防蝕工程監工實務 —以西濱快速公路 WH33-3 標新建工程為例

黃三哲¹ 劉建鐸² 鄧建華³

摘 要

鋼筋混凝土構造物之陰極防蝕方法分為外加電流及犧牲陽極兩種，西濱快速公路 WH33-3 標係公路總局首次在濱海公路新建橋梁位於潮汐變化之感潮河段，採用外加電流之陰極防蝕工法施工。本文最主要係依設計施工過程和應注意事項加以探討，並將施工中遭遇困難情形提出討論，以為後續實施此工法借鏡，另本工程尚在施工中，嗣後完工之維護管理，亦為應關切之課題，如此才能確得陰極防蝕工法之成效。

Cathodic Protection Applied to RC Structure --Western Highway Contract WH33-3 for Example

Sunn-Jer Hwang¹ Chien-To Liu² Jian-Hua Deng³

ABSTRACT

Cathodic Protection applied to RC structure is divided into Impressed Current Cathodic Protection (ICCP) and Sacrificial Anode Cathodic Protection(SACP). Contract WH33-3 of the Directorate General of Highways is the first bridge using Cathodic Protection above the tide changing waters. In this paper, the construction processes and what we need to pay attention to are been discussed. In addition, we point out the difficulties we met under construction in order to give some references for the continuing construction. By the way, this construction is still in process, therefore, the protection and management are essential matters after finishing the work. By doing so, the result of this method can be got thoroughly.

¹交通部公路總局西部濱海公路中區工程處 處長

²交通部公路總局西部濱海公路中區工程處第五工務段 幫工程司

³中華顧問工程司中區辦事處通霄工務所 主任

一、前言

近年來交通部公路總局於沿海關建高架橋梁甚多，惟對防蝕策略均引用國外相關數據，然國內之基本環境、氣候、季風等與國外不同，是否可逕行引用，亦無相關文獻佐證，爰此，公路總局規劃西濱快速公路 WH33-3 標新建工程為陰極防蝕工法示範橋梁，由設計施工階段即進行準則運用與檢討改進。

二、西濱快速公路 WH33-3 標新建工程概述

2.1 地理位置與工程內容

本工程係交通部公路總局西部濱海公路中區工程處西濱快速公路 WH33-3 標(125K+132~127K+060)通霄~五北段新建工程。工程平面位置詳如圖 1 所示，位於苗栗縣通霄鎮，台一線及縱貫線鐵路西側，起於通霄漁港東側西濱快速公路 WH33-4 標終點，經海洋生態園區及通霄火力發電廠東側，越過南勢溪，終點與 WH33-2 標銜接，主線全線採高架橋預力箱型梁施工，總長 1,928 公尺，並於海洋生態園區附近，設置上、下匝道各一處，以健全當地的交通路網。



圖 1 工程位置圖

主線高架橋共計有 7 個單元，其中第 1~4 及第 7 單元，共計 5 單元高架橋位於路上段，採逐跨場撐工法施作；第 5 及第 6 單元，共計 2 單元高架橋(P22~P29)合計 700 公尺，為跨越南勢溪之濱海路段，採懸臂工法施工，其中橋墩柱 P23~P27(南下及北上共計 10 墩)，位於南勢溪河道內，橋位距離出海口約 250~300 公尺，相關墩位與南勢溪出海口位置如圖 2 所示。



圖 2 橋墩 P23~P27 墩位與南勢溪出海

2.2 感潮河段

由於 P23~P27 距出海口約 250~300 公尺，在學理上屬於潮汐變化之感潮河段。本工程開工至今颱風豪雨侵襲時暴潮水位為約 EL3.5m，常時以夏秋兩季潮位較高，漲潮完成時水位約為 EL2.6m，退潮時水位即完全退去，現地漲退潮之情形如照片 1 所示。

考量鋼筋混凝土結構，可能會因海水每日漲退潮的過程中，因乾濕效應加速混凝土之中性化，海水並沿著墩柱表面的微裂隙進入橋墩混凝土內，其中的氯離子會與墩柱鋼筋產生電化學反應，造成鋼筋腐蝕，構件強度同時降低，而影響整個橋梁的使用壽命。有鑑於此，對於感潮段結構物之混凝土及鋼筋應採妥適之防蝕處理，以避免鋼筋腐蝕之情形發生。



(a)南勢溪退潮

(b)南勢溪漲潮

照片 1 南勢溪退潮及漲潮

2.3 防蝕基本措施

在工程實務上，本工程所採取的基本防蝕措施有：

1.增加結構物之保護層厚度

- (1)在上部箱梁外側採 5 公分(一般 4 公分)
- (2)在上部箱梁內側採 4 公分(一般 2.5 公分)
- (3)橋墩、基礎板(側、頂面)及基樁採 10 公分(一般 7.5 公分)
- (4)基礎板底面採 20 公分

2.水泥採波特蘭第二型抗硫水泥

3.降低斷面之張應力(小於 14.9kg/cm^2)，以避免張力側混凝土裂縫產生。

4.最小水泥用量(400kg/m^3)、水灰比(W/C)應在 0.45 以下，並準確控制用水量，拌合時間不得小於 2 分鐘，以獲得高水密性之混凝土。

5.混凝土水溶性氯離子含量並應符合 CNS 之有關規定，細粒料方面[預力混凝土 $<0.012\%$ ，鋼筋混凝土 $<0.024\%$]，混凝土方面[預力混凝土 $<0.15\text{kg/m}^3$ ，鋼筋混凝土 $<0.3\text{kg/m}^3$]。

而針對混凝土及鋼筋常見的防蝕工法如下：

- 1.混凝土防蝕工法：添加防蝕抑制劑、表面防滲塗裝及外加覆襯等方式。
- 2.鋼筋防蝕工法：Epoxy 塗裝、外加電流陰極防蝕、犧牲陽極陰極防蝕及熱浸鍍鋅等方式。

2.4 橋梁上部及下部結構防蝕考量

本工程在實務及規範上，除了採取上述基本的防蝕措施外，另外針對跨越越南勢溪 P23~P27 橋梁上部及下部結構，防蝕考量分別說明如下：

2.4.1 上部結構

由於橋梁頂部高程約為 16.1~19.7 公尺，箱型梁底面張力側高程約為 12~15 公尺，超過國內外學術研究評估報告建議，海面上橋梁距海面至少 10 公尺以上之標準，因此上部結構並未增加其他的防蝕措施。

2.4.2 下部結構

●橋墩基礎

設計位於 EL：-4.0~-9.0 間，長期位於海水面下，不致與空間接觸，較無結構物腐蝕之顧慮。

●墩柱

位於 EL：0.0~4.0 公尺部份，因受潮汐水位影響，橋墩結構有受海水乾、濕循環作用，長期可能發生結構腐蝕；因此，為了避免鋼筋腐蝕，另外針對墩柱鋼筋採取了外加電流陰極防蝕工法施作。

陰極防蝕 (Cathodic protection, CP) 應用於鋼筋混凝土橋梁結構之防蝕技術，經歐美、加、日等國家多年的採用經驗及研究成果，業已肯定為防蝕效能極佳之工法，近十年來，國內雖已開始進行研究與施作，但因完工年代尚短，且國內尚未制定標準規範，目前只有港研中心的準則可參考，設計施工大多引用國外經驗與規範；基於本工程為公路總局首次在濱海公路新建橋梁採用陰極防蝕工法，而工程師對於本工法之瞭解與認知不多，為增進工程人員對本工法之瞭解，因此以本工程為案例，針對新建鋼筋混凝土結構物外加電流式陰極防蝕工法施工時應注意事項，及遭遇困難情形提出探討，以作為後續施工時之參考。

三、鋼筋混凝土結構物陰極防蝕原理

3.1 鋼筋混凝土腐蝕劣化原因

不可抗拒天災外力的作用、人為的疏失及建材之劣化，為造成鋼筋腐蝕及混凝土劣化的主要因素。由於不可抗拒之天災外力，以及人為的疏失原因複雜，不易釐清，因此一般係由材料腐蝕劣化的角度予以探討。

鋼筋腐蝕的原因，乃由於有害物質沿混凝土裂隙進入，導致混凝土鹼性降低，鋼筋表面的鈍態氧化膜被破壞，使得鐵發生氧化反應，而於鋼筋表面形成腐蝕之生成物-鐵銹。鐵銹分為氧化鐵類及氫氧化鐵類(Fe(OH)₂)，此生成物無法與鋼筋表面緊密結合，且由於鐵銹氧化後會帶有結晶水(Fe₂O₃·H₂O)，使得體積膨脹，而導致混凝土產生裂縫與鋼筋保護層剝落。

至於造成混凝土劣化的原因包括：1.混凝土中性化 2.氯離子侵蝕 3.鹼質與粒料的反應 4.結構物龜裂 5.材料與施工品質不良等。

3.2 陰極防蝕原理

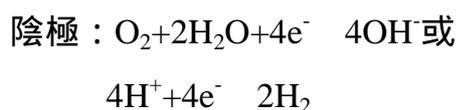
由於鐵的腐蝕係因氧化還原所造成，此可由鐵的電化學反應過程說明，而鐵的電位包括免疫區、孔蝕區及腐蝕區，其中免疫區的電位是落在孔蝕區及腐蝕區的下方，所以如果可以將鐵的電位由腐蝕區的地方下降到免疫區的話，即使混凝土中性化或含有氯離子，則鋼筋仍不會發生腐蝕。然而大自然中鋼筋的電位是不會自動降到免疫區，因此必須借用外力才有辦法使鐵落在免疫區，此即為陰極防蝕的原理。

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

1.放出電子的反應就是鋼筋中的鐵放出電子，形成鐵離子：



2.吸收電子的反應，可以是氧還原為氫氧根離子或還原為氫：



3.合成反應：



陰極防蝕原理即是將鋼筋電位下降變成負極，藉由氫氧根離子在鋼筋表面反應提高混凝土的 pH 值，並在鋼筋表面建立起鈍化層。利用同性相斥的原理，將氯離子排斥至陽極，進而導致鋼筋表面氯化物的減少，以達到避免鋼筋腐蝕，詳如圖 3 所示。

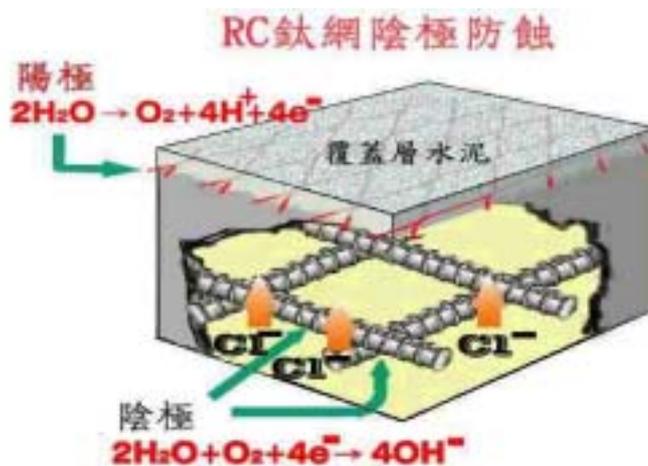


圖 3 外加電流陰極防蝕工法示意圖

3.3 陰極防蝕方法

鋼筋混凝土的陰極防蝕方法分為外加電流及犧牲陽極法兩種：

1. 外加電流方式

主要是利用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，被保護之金屬則接於電源的負端。當電流從陽極經過混凝土到達鋼筋表面，然後沿著鋼筋經由導線回到電源，如此鋼筋便受到保護。

2. 犧牲陽極方式

主要係使用相對於鋼材活性較高(易氧化)之金屬(例如鋅)作為犧牲陽極材料，與被保護金屬於介質(如土壤、水、混凝土等)中聯結，電位較負之金屬為陽極，形成一電化學電池，利用兩者之電位差產生防蝕電流，達到防蝕之目的。

3.4 外加電流陰極防蝕系統簡介

3.4.1 外加電流法

外加電流法和犧牲陽極法的不同在於，外加電流法的電流不是來自陽極腐蝕而是由交流電流整流成為直流電流而來，電流經由直流電源供應器透過陽極而到達鋼筋的表面。地下或水中鋼鐵或混凝土的結構物，如碼頭的鋼板樁防蝕，由於其環境電阻較小，所以犧牲陽極也可以使用。但是在地面以上的鋼筋混凝土陰極防蝕就必須使用外加電流法。

為了使保護電流由直流電源供應器供應到鋼筋表面，系統要如圖 4 方式

安排。圖 4 中顯示電流由直流電源供應器的正極，通過導線到達陽極，再由陽極透過混凝土到達鋼筋，而由鋼筋匯集經過導線回到電源供應器的負極，如此形成一個迴路，保護電流就可以供應到鋼筋表面了。由圖 4 可知陰極防蝕系統至少有以下幾種組件：

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

3.4.2 陽極種類

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

這些材料包括：

1. 鈦網
2. 導電性塗料
3. 導電性水泥
4. 導電橡膠
5. 其他

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

3.4.3 鈦網系統

鈦網系統的第一次陽極材料使用鈦條，而第二次陽極材料則採用表面塗佈含有氧化鈦的鈦網。表面塗佈氧化鈦和其他氧化物的鈦網有下面幾項特色：

1. 這種陽極材料本身相當穩定，不會因電流通過而受損。
2. 在此種陽極表面的反應會傾向促進氧還原而不是氯氣產生，因此，不會造成陽極材料表面混凝土被氯氣及酸攻擊。
3. 此一種材料使用壽命相當長。在實驗室的加速試驗數據顯示此一材料可使用 $7500\text{A}\cdot\text{hr}/\text{m}^2$ ，若以設計電流 $10\sim 100\text{mA}/\text{m}^2$ 計算可使用大約 68,200 ~ 750,000 小時，換算成 8 ~ 85 年之間。

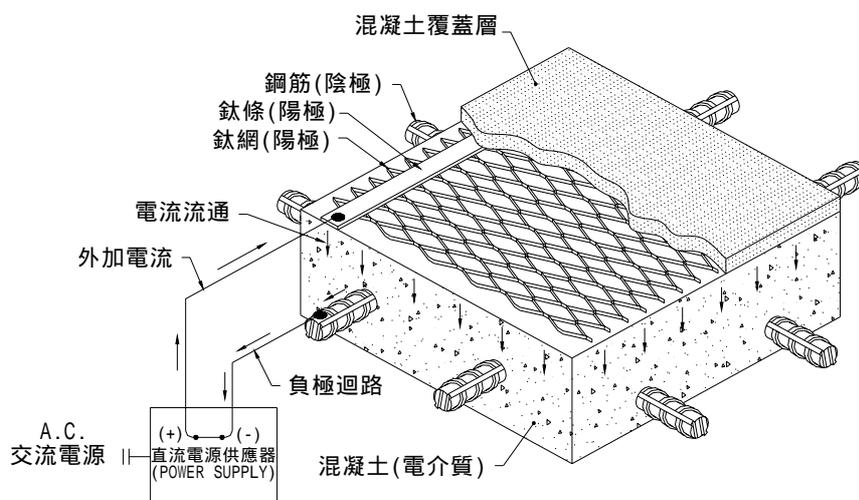


圖 4 陰極防蝕原理示意圖 (外加電流網狀鈦網)

四、外加電流陰極防蝕施工步驟

4.1 施工作業流程

新建鋼筋混凝土結構陰極防蝕系統材料包括陽極系統 (鈦網、鈦條)、參考電極、工作電極、電纜線、導管、電源供應器等，不像舊結構物進行陰極防蝕系統施工時，需先完成前置作業如現場檢測評估、鑿除修補或植筋等繁瑣工作，費用相對為節省。陰極防蝕原理是藉由陽極提供以低伏的直流電流到鋼筋，以防止鋼筋腐蝕。相關之施工作業流程如圖 5 所示。

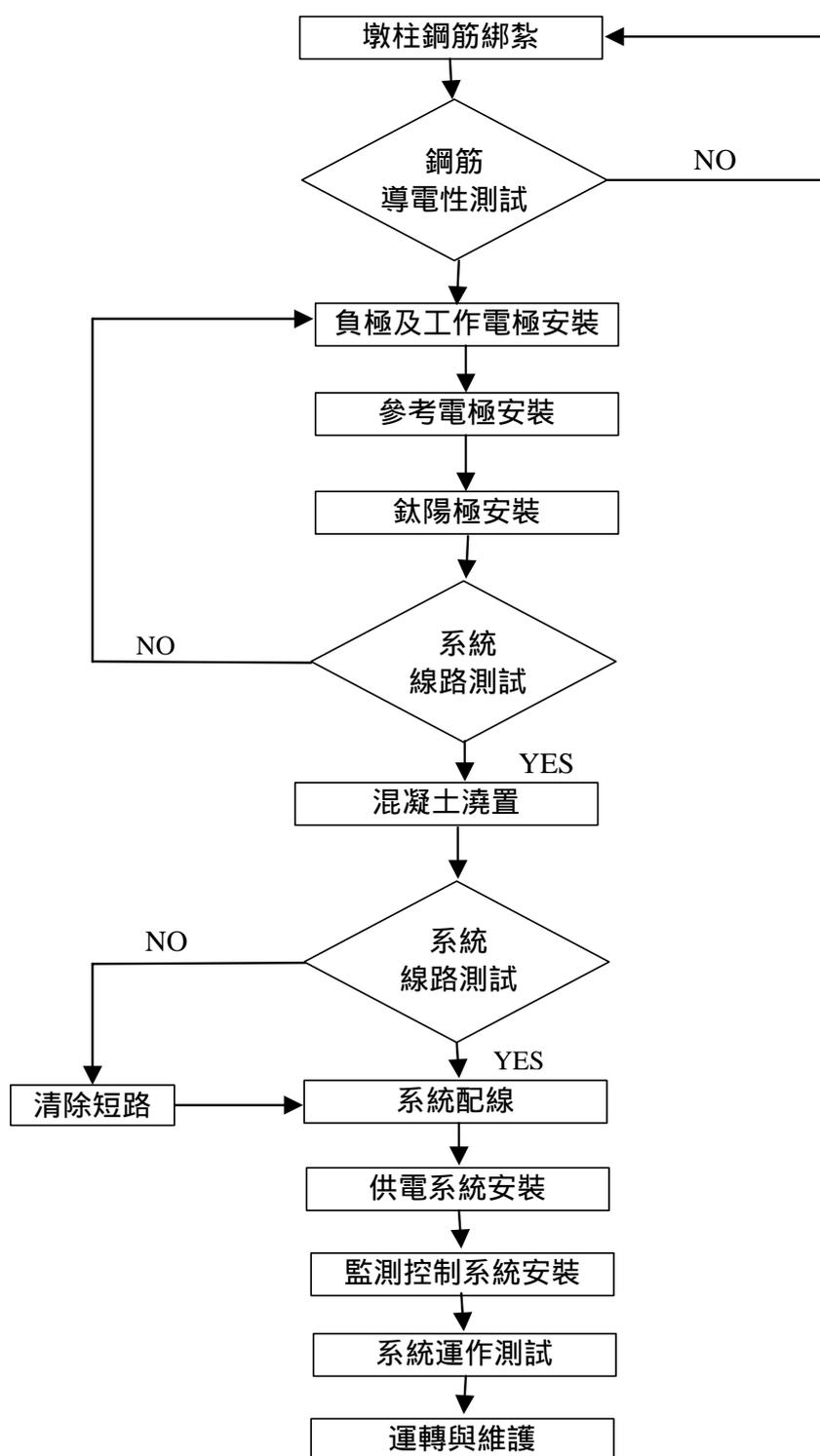


圖 5 新建結構物陰極防蝕系統施工流程

4.2 名詞說明

- 1.陽極：帶狀鈦網及鈦條通以電流後帶正電，即成為陽極。
- 2.參考電極：為固態銀/氯化銀(Ag/AgCl)參考電極，主要功能為量測鋼筋保護電位及極化測試。
- 3.工作電極：工作電極和參考電極配對量測鋼筋保護及防蝕電位，並可當負極使用。其與參考電極、陽極及負極合稱為偵測系統，安裝位置如圖 6 所示。

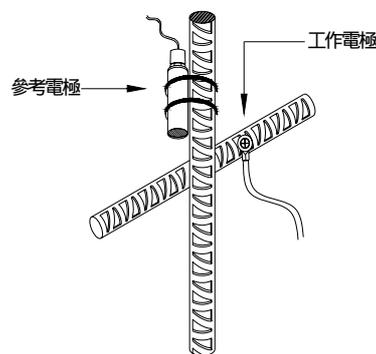


圖 6 偵測系統安裝示意圖

- 4.負極：墩柱鋼筋電位下降後變成負極。其安裝示意如 7 所示。

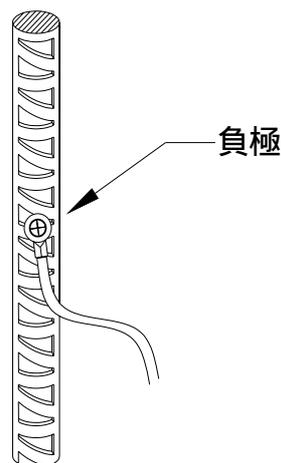


圖 7 負極安裝示意圖

5.去極化測試：鋼筋通電後，通電電位經瞬間斷電 4~24 小時後，扣除原始電位是否達到美國防蝕工程師學會 NACE(National Association of Corrosion Engineers, U.S.A) 的防蝕保護要求 100mV 以上。

4.3 各施工步驟應注意事項

4.3.1 鋼筋綁紮

墩柱鋼筋不論是縱向主筋或箍筋，都應作好相關保護層厚度、間距之控制，及確實以鐵線綁紮牢固，以避免鋼筋太過突出或鬆散，造成後續鈦網之綁紮困難，及電流供應無法平均而影響防蝕的效果。

4.3.2 負極、工作電極及參考電極安裝 (詳照片 2~5)

偵測系統包含參考電極、工作電極、正極及負極。工作電極及負極排流點之安裝需避免安裝在同一支鋼筋上，安裝時係以自攻螺絲將已接好端子的引線鎖於鋼筋上，再用電阻計量測鋼筋與引線間之電阻，若電阻值趨近於零，則表示之間接著良好，否則必需檢查原因並予排除，接線工作確定無誤後，以非導電性環氧樹脂將接著處密封，樹脂乾燥後，再以電錶量測各電極之間的電阻值，若電阻值異常或超過 1 Ω ，則須重新安裝。參考電極以紮線帶綁附於垂直方向之鋼筋上，為確保後續電位量測之準確，其感應探頭(位於底端)應距橫向鋼筋至少 1 公分。所有電極安裝完成需標示清楚、位置及編號等，以免接錯引線。在本工程負極引線為黑色細線，工作電極引線為藍色線，參考電極引線為黃色線並與工作電極引線一起以黑色塑膠導管接出稱之為偵測引線。



照片 2 負極引線安裝



照片 3 工作電極引線安裝



照片 4 參考電極安裝



照片 5 工作電極及參考電極引線安

4.3.3 鈦陽極安裝(詳照片 6~8)

陽極系統包含帶狀鈦網及鈦條，帶狀鈦網安裝時必須注意不得與鋼筋接觸，並且根據設計圖規定數量均佈安裝，由於本工程墩柱係採 2 個昇層施作，因此鈦網需預留足夠的長度，以作為銲接昇高使用。帶狀鈦網係以鋼筋固定夾及紮線帶（如圖 9）固定在鋼筋上，其與鋼筋間的間隔最少必須大於 10mm，以避免混凝土澆置時造成鈦網移動或與鋼筋任一部位接觸，而造成短路。鈦條則以直流點銲機銲接於帶狀鈦網的外部，銲接時必須將鈦網表層的塗層溶解，且至少需有 3 個銲接點。另配合墩柱高度，及為確保導電之效果，設計雖僅上、下 2 圈鈦條，現地實際施工時則採上、中、下 3 圈施作，以與帶狀鈦網緊密接合，使電確實導通（詳圖 10）。每根墩柱並在下、中 2 圈鈦條各有 1 條紅色引線並配合 1 條負極引線接出，與工作電極(參考電極)合計 5 條纜線，經上構箱型梁腹板接至外側胸牆接線盒內。P23~P27 相關陰極防蝕纜線自接線盒接出後，並將沿胸牆內埋設，再接引至橋墩 P22 監控平台上之電源供應箱。



照片 6 點銲機



照片 7 鈦網鈦條安裝

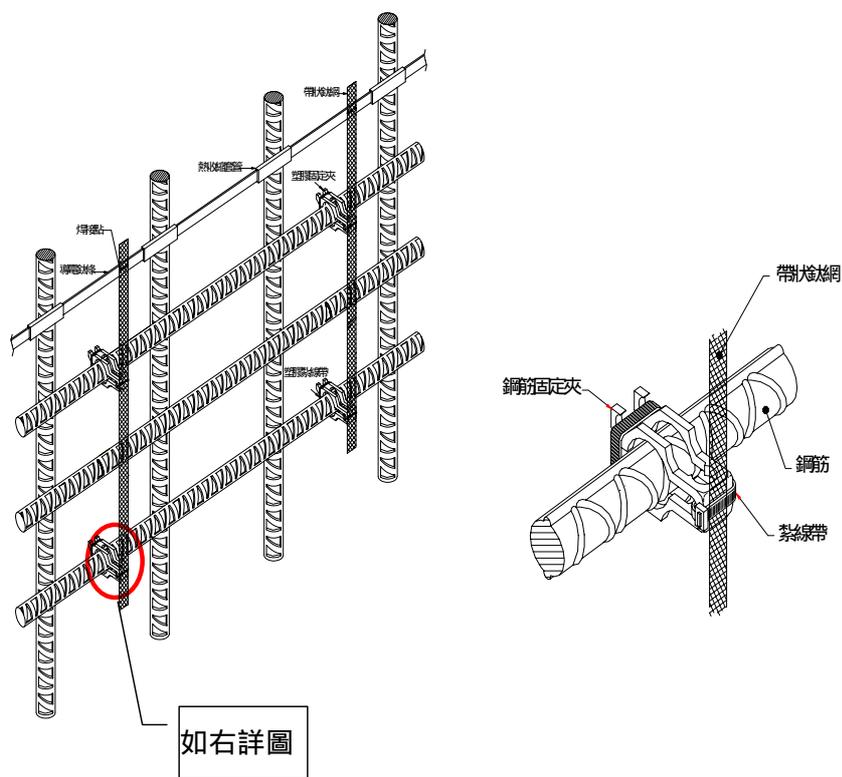


圖 9 帶狀鈦網安裝示意圖

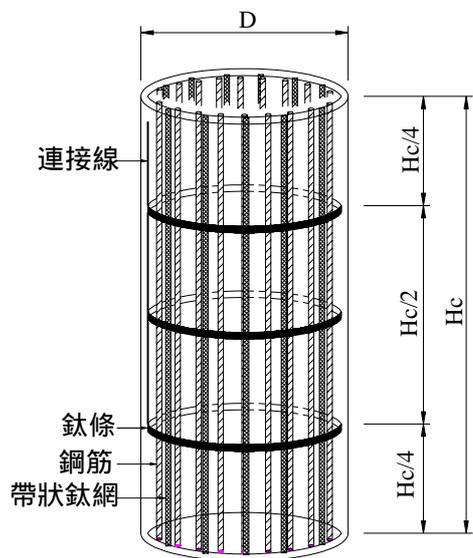


圖 10 墩柱陽極安裝配置圖



照片 8 陽極與負極引線

4.3.4 墩柱封模前系統線路測試

為確保陰極防蝕系統的操作成功，於墩柱封模混凝土澆置前必須進行以下測試。

1. 鋼筋導電性測試 (詳照片 9)

每一陽極區內鋼筋導電性必須良好，如此保護電流方可均勻傳至鋼筋表面。墩柱鋼筋綁紮後，需擇一處之環筋或增加一環筋與所有主筋點銲，以確保防蝕區域內所有鋼筋之導電性連通。測試時可由電阻計量測鋼筋遠端兩方的接點阻抗來判斷，測定值需 $< 1 \Omega$ ，若超過即表示鋼筋之導電性不佳，實務上採增加鐵線之方式予以改善。

2. 陽極導通測試 (詳照片 10)

於整體線路配置完成後需確定陽極互相導通，測定值需 $< 1 \Omega$ 。



照片 9 組模前負極 負極測試



照片 10 組模前陽極 陽極測試

3. 陽極及負極導通測試 (詳照片 11)

確保陽極與鋼筋沒有導通，測定值需 $> 1k \Omega$ 。

4. 負極及工作電極導電性測試 (詳照片 12)

負極及工作電極安裝後須實施導電性測試，以確定互相導通，測定值需 $< 1 \Omega$ 。

5. 檢查與測試參考電極

為確保數據的準確性，參考電極在安裝之前必須先行校正。在參考電極安裝完成混凝土未澆置前，其與鋼筋間之電位，因無混凝土介質，故應處於未導通之狀態；而在混凝土澆置後，參考電極與鋼筋間則應有電位差存在，並於系統測試前，此電位必須量測及記錄，以作為後續去極化測試之依據。



照片 11 組模前陽極 負極測試



照片 12 組模前工作電極 負極測試

4.3.5 墩柱封模後混凝土灌注前中後系統線路測試

1. 負極及工作電極測試 (詳照片 13~15)

在同一區內系統負極及工作電極需互相導通，測定值需 < 1 。



照片 13 澆置前工作電極 負極



照片 14 澆置中工作電極 負極



照片 15 澆置後工作電極 負極

2.陽極及工作電極測試 (詳照片 16~18)

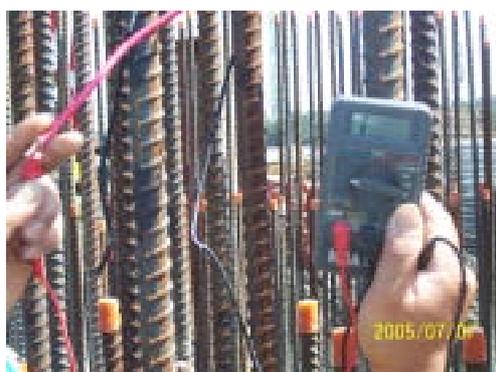
在同一區內系統陽極及工作電極必需沒有導通，測定值需 $> 1k$ 。



照片 16 澆置前工作電極 陽極



照片 17 澆置中工作電極 陽極



照片 18 澆置後工作電極 陽極

3.陽極與陰極絕緣測試 (詳照片 19~21)

在每一區內系統，必須做絕緣測試以確保陽極與鋼筋沒有接觸，測定值需 $> 1k$ 。



照片 19 澆置前陽極 負極



照片 20 澆置中陽極 負極



照片 21 澆置後陽極 負極

4.3.6 混凝土澆置(詳照片 22~23)

系統安裝完成須先行測試無誤後再行封模，混凝土澆注時會以震動棒震動，為瞭解系統是否移動，應同時配合施工量測電位，如電位嚴重下降，低於 100mV 時表示有短路應停止澆置，待處理完成後再繼續進行。在實務上當 P27 右側墩柱澆置混凝土時，震動棒採一般之施工方式，由鋼模與最外層鋼筋間插入震動，因無法量度鈦網與鋼筋之位置，震動棒盲目之推移造成鈦網與鋼筋接觸，而發生短路之情形，後續 P26~P23 墩柱混凝土澆置時震動棒即改由內部插入之方式震動，此缺點為鋼模拆模後，墩柱表面往往會有蜂窩而須予修飾的情形產生，此或可考慮採增加外模震動器的方式予以解決。



照片 22 橋墩柱封模



照片 23 混凝土澆置拆模後

4.3.7 系統運轉測試

橋墩柱混凝土澆置完成並養護 28 天後，才能通電進行外加電流陰極防蝕系統運轉測試，以作為保護效果驗收評估合格之標準，由於本工程尚未施作至此部份，故僅以圖 11 之流程表示：

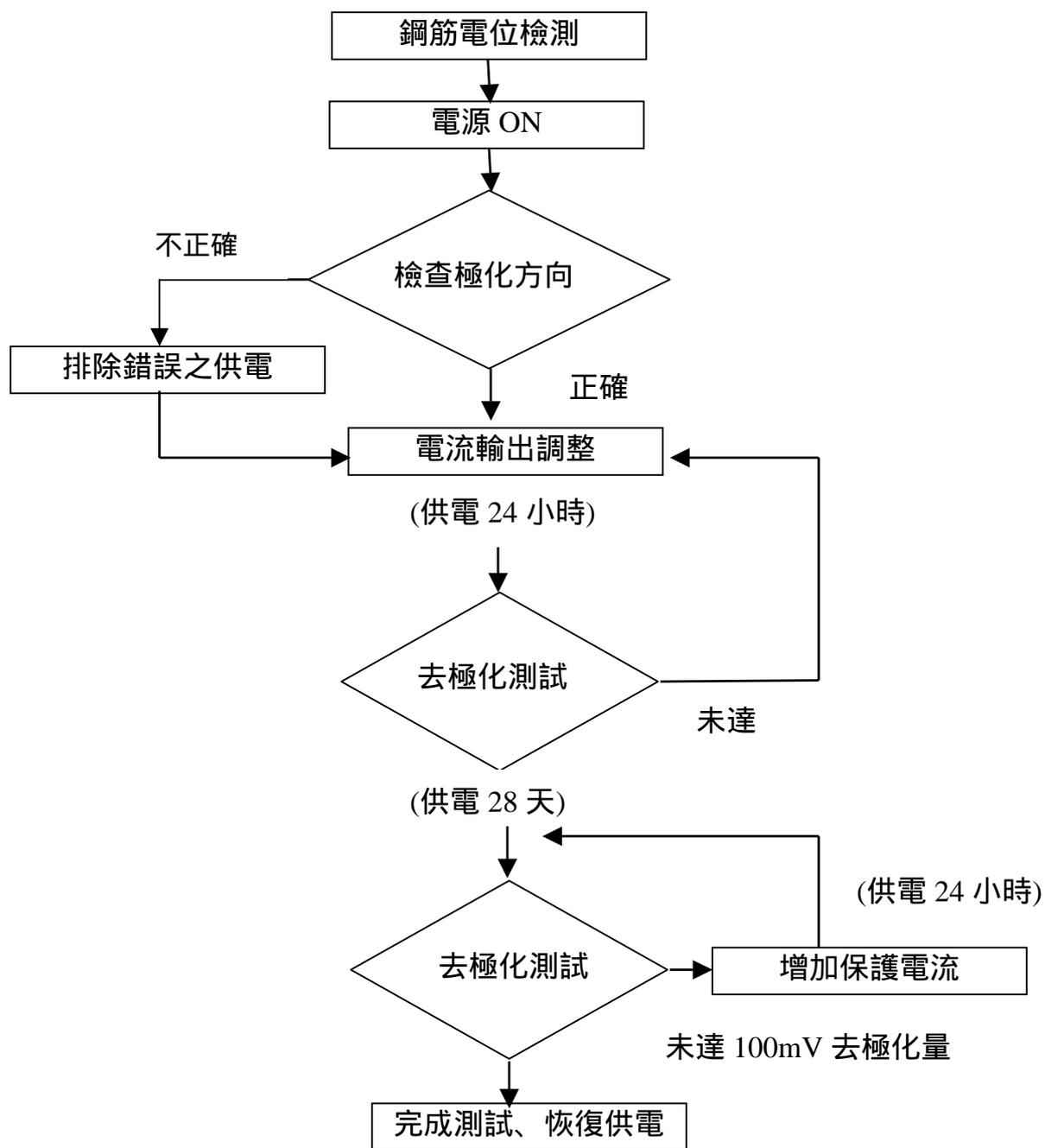


圖 11 系統運轉測試流程圖

五、施工遭遇困難處理

5.1 帶狀鈦網、鈦條材質之試驗

依據契約補充施工說明書「橋墩陰極防蝕工程」章節規定，帶狀鈦網、鈦條材質需符合下表之規定：

表 1 帶狀鈦網

項 目	規 格
寬度	12.7mm 以上
厚度	1.3mm 以上
陽極電阻	0.40ohm/m 以下
抗拉拔力	240MPa 以上(依 ASTM B265 Grade 1 之規定或同等規定)
陽極表層觸媒劑	鈦(Iridium)(混合金屬氧化物)
陽極基材	ASTM B265 Grade 1 Titanium 或同等規定

表 2 鈦條

項 目	規 格
寬度	12.7mm 以上
厚度	0.9mm 以上
陽極基材	ASTM B265 Grade 1 Titanium 或同等規定
電阻值	0.05ohm/m 以下

註：製造廠商必須提出上述規格證明文件。

當辦理材料取樣送驗時，經洽詢國內相關試驗單位，皆告知無法針對本工程所需之帶狀鈦網及鈦條進行試驗，即使經由工業技術研究院材料及化工所劉益雄副研究員瞭解，可進行此項試驗之台灣大學慶齡工業研究中心，亦因相關教授離職而無法予以試驗。為解決此困擾，帶狀鈦網及鈦條採由廠商提出符合規範要求之出廠證明書予以認定。因此，國內想要繼續推展此工法，相關材料應如何檢驗，恐需先予確認。

5.2 P27 右側墩柱混凝土澆置完成後檢測發現短路之處理

混凝土澆置完成後，如發現短路現象時，理論上可用大電流瞬間通電，將短路部份排除。惟本工程於 P27 右側墩柱混凝土澆置完成 1 週後，進行陽極及負極線路測試時發現有短路情形，雖立即以上述之方式處理，但仍無法將短路排除。最終係由德國進口線路探測器(詳照片 24)，利用電磁波原理將墩柱短路位置找出，再由墩柱表面以人工敲鑿之方式，將短路排除(詳照片 25~26)。是否受限於短路範圍太大，或是有其它原因，致採大電流瞬間通電排除短路之方式無效，恐有待專家學者予以深入探討。



照片 24 線路探測器



照片 25(a) 探測短路位置



照片 25(b) 探測短路位置



照片 26 短路位置排除

六、結論

新建鋼筋混凝土結構物採外加電流式陰極防蝕施工，在歐、美、日已有 20 多年的歷史，並被美國聯邦公路管理局 (FHWA) 推薦為 ”唯一能有效抵制混凝土中鋼筋受氯離子侵害之對策 ”，可說是解決鋼筋受鹽害腐蝕問題唯

一較有效之工法。在本工程施工實務上，除遭遇帶狀鈦網、鈦條材質無試驗單位可試驗，及混凝土澆置後發現短路無法處理外，研判後續施工尚可能遭遇最佳電流密度如何選擇、極化方向不正確時如何排除、如何量出正確之參考電極保護電位、如何確保電流正常供輸、以及去極化測試驗證之認定時間等問題，仍有待後續施工時一一瞭解及克服。

本工程墩柱內保護鋼筋之外加電流式陰極防蝕已施作完成，尚未施作完成之結構，預定本年(95)底完工，後續維護與管理仍為本工法成效評估影響重要因素，需繼續作進一步追蹤檢討。

參考文獻

1. 交通部運輸研究所港灣技術研究中心，「港灣結構物陰極防蝕準則(草案)」研究期末報告，民國 90 年。
2. 交通部公路總局西濱中區工程處「西濱快速公路 WH33-3 標通霄溪河川橋墩柱鋼筋防蝕系統維護手冊」。
3. 交通部公路總局西濱中區工程處「西濱快速公路 WH33-3 標通霄溪河川橋技術移轉教育訓練計畫內容」。
4. NACE Standard PR0290-2000,Item No. 21043,NACE International.
5. 交通部公路總局第一工程處，「台二線安和橋銹蝕檢測工作報告」，立偉防蝕工程股份有限公司，民國 85 年。

海下鋼構造物陰極防蝕工程監工實務與維護管理

柯正龍¹ 饒正² 陳桂清²

摘要

陰極防蝕已廣泛應用於各種工程領域，包括碼頭鋼樁、海上鑽油平台等海下鋼構造物，如果設計、安裝施工正確，可達到保護鋼構造物免於腐蝕侵襲之目的。本文將以港灣技術研究中心歷年來對國內主要商港鋼板(管)樁碼頭之檢測結果為例，探討鋼樁碼頭海下鋼構造物施作陰極防蝕工程之安裝程序與維護管理策略。

The Practical Supervision and Maintenance of Cathodic Protection on Submarine Steel Structures

Jeng-Long Ko¹ Cheng Jao² Kuei-Ching Chen²

ABSTRACT

Cathodic protection has been widely used in many areas, including wharf steel-piles, platforms at sea etc., It can achieve protecting the steel structures immuning from corrosion, if correctly designed and installed.

In the paper, wharf steel-piles field surveying results, obtained in the past years by IHMT at major commercial ports around the island, were the examples to be discussed and especially focused on practical supervising of installing procedures of cathodic protection and its maintenancing strategy.

¹交通部運輸研究所港灣技術研究中心 副研究員

²交通部運輸研究所港灣技術研究中心 研究員

一、前言

海下鋼構造物主要包括版樁式碼頭之鋼板樁、棧橋式碼頭之鋼管樁與海上鑽油平台之基樁等；因鋼材具有高容許應力、材質均勻、可塑性高、容易加工、施工迅速…等優點，在港灣碼頭工程中廣受應用，以高雄港為例，使用鋼板樁及鋼管樁之碼頭即佔全部碼頭之 70% 左右（如圖 1），但因鋼材如長年暴露於海洋環境下，容易發生腐蝕，造成厚度減少，嚴重者甚至穿孔、破洞導致強度衰減；此時，如遭颱風、地震、波浪或船舶等外力衝擊，將成碼頭營運安全之重大威脅。

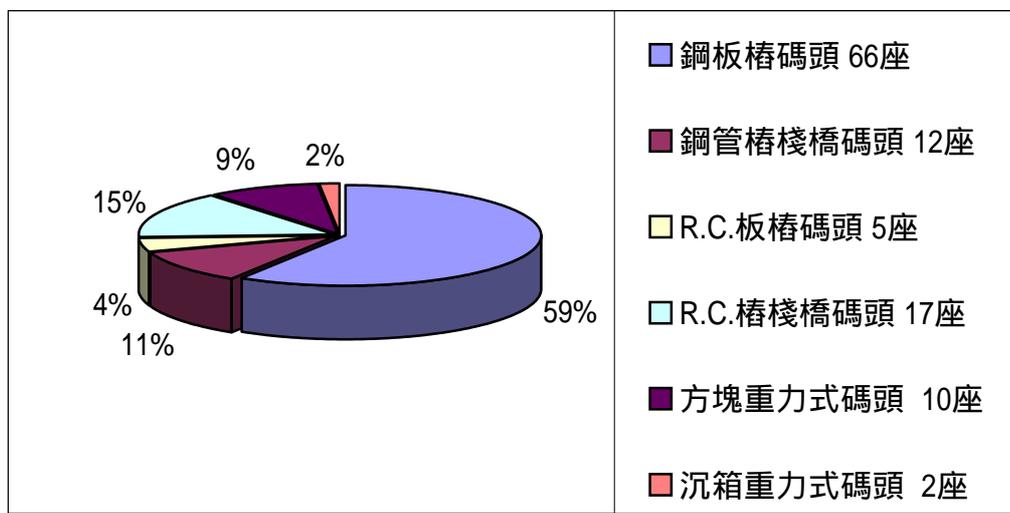


圖 1 高雄港碼頭型式統計圖

(資料來源：交通部高雄港務局，91 年 10 月)

鋼材之腐蝕為一自然的化學反應，其發生與海洋環境有關，依曝露環境之不同，海下鋼構造物之腐蝕部位及速率會有明顯差異，腐蝕形態亦不同。一般將海洋環境分成大氣帶、飛沫帶、潮汐帶、海中帶及海泥(床)帶等五大區域。其中低潮位下約 1 公尺處(海中帶部份)因溶氧量低，鋼材變成陽極反應部位，腐蝕量將較大；鋼材如位於海中帶，因完全浸泡於海水中，其上端緊臨低潮位區域，因氧氣濃差電池作用，加上海生物附著和海流海浪衝擊關係，腐蝕速率較高。為確保鋼構造物免於或降低腐蝕威脅，常用塗料、被覆工法、金屬溶射或陰極防蝕等保護之，表 1 為鋼結構物在海洋環境中的防蝕選擇^[4]。其中陰極防蝕工法應用於海下（海中帶及海泥帶）之鋼構造物，因可收到理想之防蝕效果，而被廣泛應用。

表 1 為鋼結構物在海洋環境中的防蝕選擇

海洋環境 鋼樁情況		大氣帶		飛沫帶		潮汐帶		海中帶		海泥帶		樁型應用		
		新樁	舊樁	鋼管樁	鋼板樁									
													直線型	Z 型
防蝕效果														
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)

台灣電力公司於民國 72 年曾進行深澳發電廠之冷卻海水進水口鋼板樁，在海下部份實施陰極防蝕之外加電流法試驗，發現一段時間後，電流即可均勻分佈，獲得足夠之防蝕電位^[1]。本所港研中心於民國 79 年至 95 年間，曾在國內主要商港港區進行碼頭鋼樁全面調查，發現部份港區之碼頭鋼樁原始設計因無採用適當之防蝕措施，致腐蝕問題嚴重，不僅腐蝕速率大於設計允許值，並發生穿孔、破洞或板樁開裂等損壞情形，導致碼頭發生坍塌，影響結構物及營運安全（如圖 2~5）。但若施工同時即於海中帶採用犧牲陽極塊作為防蝕措施，可達到降低鋼樁腐蝕速率之目的；施工時未安裝犧牲陽極塊，營運一段時間後再採用者，亦可收到保護目的。基隆港東 10 號棧橋式碼頭不同單元之鋼管樁，由目視鋼樁表面銹層、檢測其厚度及保護電位，均顯示犧牲陽極法可達到保護鋼材之目的。圖 6 為該碼頭採用陰極防蝕在敲除表面附著海生物後與未採陰極防蝕之鋼樁比較情形。



圖 2 鋼板樁穿孔破洞情形(低潮位線)



圖 3 鋼板樁穿孔破洞情形 (水中)



圖 4 鋼板樁海底底床開裂情形



圖 5 碼頭面坍塌情形



(a) 採用陰極防蝕之鋼材表面
(光滑無鐵)



(b) 未採用陰極防蝕之鋼材表面
(有鐵 且表面有腐蝕現象)

圖 6 有無採用陰極防蝕之鋼材表面比較情形

二、陰極防蝕⁽⁴⁾

陰極防蝕技術應用於海下鋼構造物上，經歐、美、日等國多年之研究及使用經驗，被肯定為防蝕效能極佳之工法。1973 年美國聯邦公路管理局 (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，交通部運輸研究所為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，於民國 92 年完成「港灣構造物陰極防蝕準則(草案)」，作為港灣構造物之維護、管理或新建工程之防蝕設計依據。目前正進行初審之工作，俟複審完成後，即提供工程界使用。

根據美國腐蝕工程師協會(NACE)技術報告，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，即海中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。

2.1 陰極防蝕原理

由熱力學的觀點來看，陰極防蝕就是將被保護的金屬電位降低，使腐蝕不會產生。而由電化學的觀點來看，腐蝕產生的要件包括陰極、陽極、電解液及陰極與陽極間電子流通的線路。由於陰極與陽極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。當金屬的電位被極化至陽極的開路電位時，金屬會被完全保護，不致有銹蝕情況產生。

2.2 陰極防蝕方法

陰極防蝕分為外加電流法和犧牲陽極法兩種。外加電流法為利用外部電源來提供陰極與陽極之間的電位差。其陽極接於電源之(+)端，被保護金屬則接於電源之(-)端。以碼頭鋼板管樁為例，電流從陽極經過海水到達鋼樁表面，然後經導線回到電源，鋼樁因此便受到保護(如圖 7 所示)。犧牲陽極法則係利用電位較負之金屬如鎂、鋁、鋅及其合金等為陽極，與被保護金屬於海水、土壤等介質中聯結，形成一電化學電池(如圖 8 所示)；由於

異類金屬相接觸，活性較大之金屬(陽極)會在反應中被消耗，而鈍性的鋼樁(陰極)會因此而被保護。

外加電流法較犧牲陽極法複雜，且外加一直流電的費用也比安裝犧牲陽極的費用高，但可使用可變電源，來保護較大面積，裸鋼或良好被覆的結構物；犧牲陽極法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。但 80 年代至今，由於犧牲陽極材料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。

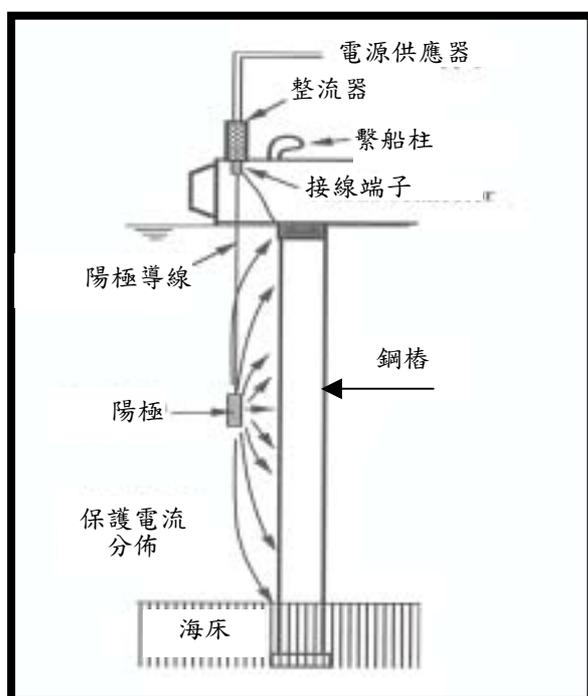


圖 7 碼頭鋼外加電流法示意圖

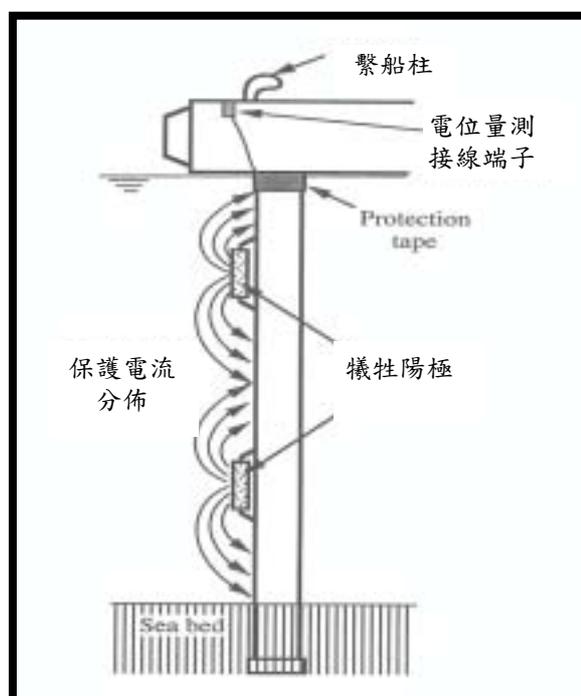


圖 8 碼頭鋼樁犧牲陽極法示意圖

三、陰極防蝕工程之監工實務

陰極防蝕工程施作主要包括系統安裝與安裝後系統測試與驗收。負責陰極防蝕之監工人員，必須具備陰極防蝕設計之基本觀念，及對於其設備與裝置有豐富的知識，始能勝任。為避免施工疏失，施工前應要求施工單位編訂施工標準作業程序，建立施工品質保證制度，對於重要施工項目完成數量等均應詳實記載，以利日後驗收及查證作業。

此外，陰極防蝕現場施作更須了解陰極防蝕工程之特性，必要時需依現場環境條件進行修改。如原設計採用垂直式犧牲陽極安裝，但施工時發現很接近地面，陰極防蝕人員就必須考慮是否更改安裝高程或採水平方式安裝。

陽極安裝前，需特別注意陽極材料電氣性能及尺寸重量等是否符合規範及契約要求。工程完成後，設備的檢查與維護，更須訂定有系統的維護計劃，才能使陰極防蝕系統繼續發揮最大的功用。因此，施工過程中相關資料必須完整詳細建置。

3.1 外加電流法安裝程序及注意事項^[4]

陰極防蝕之外加電流法其施工步驟如下，流程如圖 9 所示。

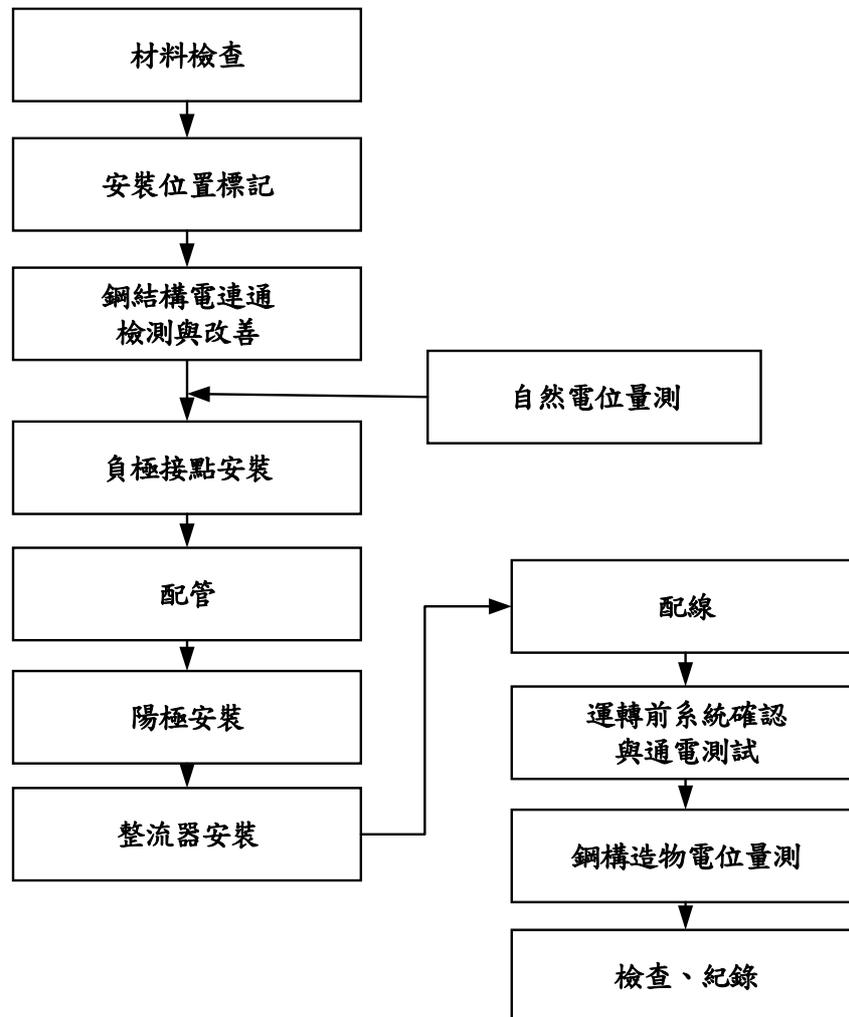


圖 9 陰極防蝕之外加電流法施工流程

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。

外加電流法使用之陽極材料依環境而異。在海水環境中則使用白金系或鉛系，工作電流密度與消耗率依材料組成及廠商產品而異。

表 2 為外加電流法常用之陽極材料性能。

表 2 外加電流法常用之陽極材料性能

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	1.8~ 9.1	無限制	無限制	5
鈦為基材外覆金屬氧化物	0.06	600		

2.固定位置電位測試端子配置

電位測試端子以沿碼頭法線方向每 50 m ~ 100 m 配置一個為原則，

3.鋼構造物電連通檢測與改善

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。

4.負極排流及電位測試導線安裝

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

5. 陽極安裝

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。陽極安裝如圖 10 所示。

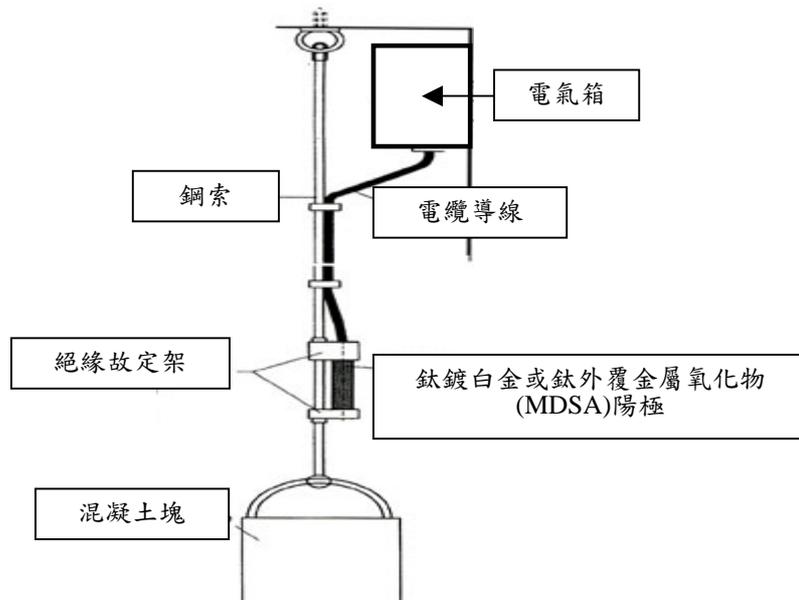


圖 10 外加電流式陽極安裝示意圖

6. 整流器安裝

整流器之各項要求於出廠前須依合約規定，在滿載情況下進行測試，並於現場安裝後檢測其漣波率，以驗證其功能符合要求。

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，裝設於施工圖說之圖示位置的電氣箱內。現場若有 AC 供電電源，則應提供單相 110/220V 或三相 220/480 V 的電壓，且交流頻率為 60 Hz。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；運轉時，必須可在最大輸出的情況下持續操作。並於 AC 側須加裝避雷保護裝置或於 DC 側則須加裝漣波濾波器。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“(-)陰極”，以避免陰極防蝕系統接線錯誤將會造成鋼構造物的嚴重腐蝕。

7. 導線安裝

配線施工應依照國內電工法規規定和標準裝設。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 線路和儀表線路應進行電連通和極性測試，避免線路接錯或短路。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。

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。伏特計輸入阻抗值至少為 1 Mega-ohm，解析度至少為 1 mV。

9. 完工檢查

完工時，除了對工程紀錄照片等進行檢查，確認依據設計圖說施工外，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. 海水氯化銀參考電極) 或更”負”。電位量測方式示如圖 11。

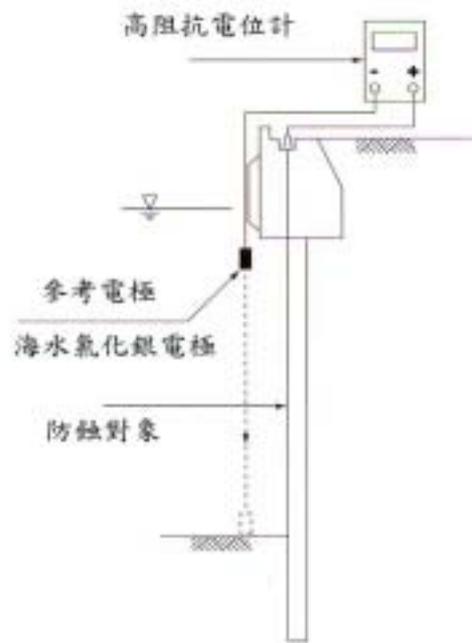


圖 11 電位量測示意圖

3.2 犧牲陽極法安裝程序及注意事項⁽⁴⁾

犧牲陽極安裝方式可採用水中焊接法或螺栓固定法兩種。

施工前，施工單位應先將海水取樣檢驗海水比電阻、海水及海床土壤之電流密度等，並依試驗結果修正鋼樁進行陰極防蝕犧牲陽極所需電流及陽極塊數量，再提送施工計劃書及施工圖說。施工步驟如下，流程如圖 12 所示。

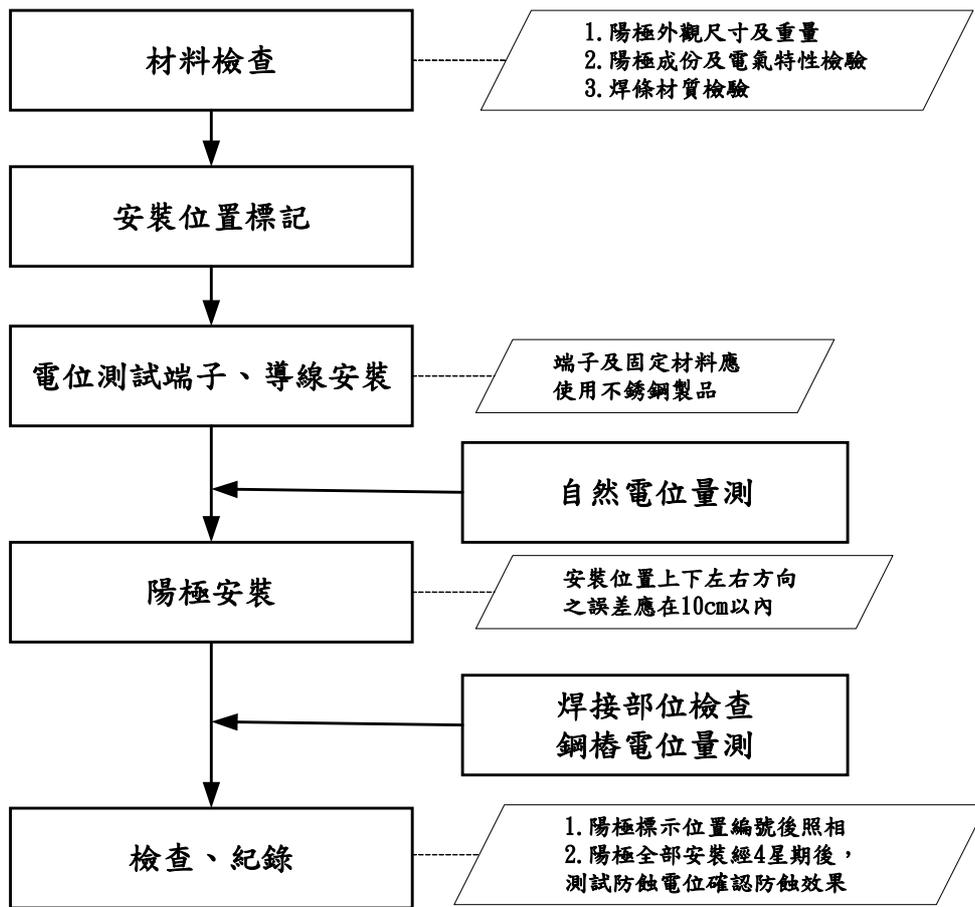


圖 12 陰極防蝕之犧牲陽極安裝流程

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。各陽極塊之形狀尺寸及質量容許誤差範圍在 5%、2% 以內。

目前各國海下鋼構造物之犧牲陽極多採用鋁合金陽極。依據 CNS

13521「陰極防蝕用犧牲陽極性能檢驗法」之步驟，應採集工程現址之海水進行檢驗，其檢驗項目應包括：

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

目前國內各港務局多使用鋁合金陽極塊，鋁合金陽極塊之特性詳如表 3 所示。

表 3 鋁合金陽極塊之特性

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

此外，鋁合金陽極塊之組成百分率，一般規定廠商得自表 4 中選其一種配方製造，並需提供原廠之檢查報告書。

表 4 鋁合金陽極塊之組成百分率

種類	Zn	In	Sn	Mg	Cu	Fe	Si	Ca	other	Al
1	0.05~10.0	0.005~0.05	<0.02	1.0~3.0	<0.01	<0.13	<0.1	<0.02	<0.02	餘數
2	1.0~10.0	0.01~10.0	0.005~0.15	0.1~6.0	<0.01	<0.1	<0.08	0.005~0.05	<0.02	餘數

陽極成份及特性之檢驗應由施工單位會同現場工程司以成品鑽心取樣送驗。陽極製品依生產爐次編號，取樣數量以每批或每一固定數量抽取一個製作 20 cm 直徑之試件實施試驗。試驗結果如不合規定，同屬該爐次製作之成品應視為不合格，應予拒用。

2. 安裝位置標記

依照設計圖說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 30cm。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

電位測試端子之配置距離以沿碼頭法線方向 50m ~ 100m 間隔為原則，需依設計圖說規定辦理且端子及固定材料應使用不銹鋼材質。

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，但鋼樁之支撐鐵板得於陸上先行焊接。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，水中焊接作業技術人員為具備工作經驗並持有合格證照者。版樁式碼頭鋼板樁及棧橋式碼頭鋼管樁之陽極塊安裝方式示如圖 13。

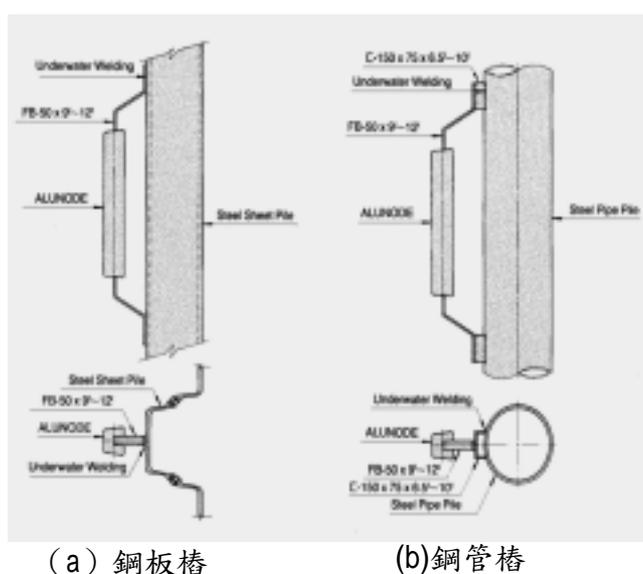


圖 13 版樁式碼頭鋼板樁及棧橋式碼頭鋼管樁之陽極塊安裝方式

水中電焊施工時需注意事項如下：

- (1) 焊接所用焊條應採用鈦鐵礦系適合水中或全位置焊接，符合 CNS E4301 標記產品。
- (2) 所有陽極及測試裝置之焊接規格應明確規定。
- (3) 陽極塊安裝位置，焊接後上下及左右方向之誤差均應在合約允許範圍。

6. 電位量測

將鋼構造物的電位測試導線接於電位計“+”端，海水氯化銀參考電極接於電位計“-”端，量測電位。量測方式如圖 11 所示。

全部陽極塊安裝完竣經四星期後，施工單位應會同工程司於水深-1m 處及海床處（即碼頭設計水深處）測試鋼樁保護電位，據以判定防蝕效果。防蝕效果經工程司認定合格後始認為該陰極防蝕工程完工。

防蝕效果的判斷標準如表 5 及圖 14 所示，若鋼鐵結構物之保護電位值較標準防蝕電位值為“負”時，鋼鐵結構物是為保護狀態，若電位值比標準防蝕電位值“正”時，則表示保護不足或防蝕效果不佳。以海水氯化銀參考電極為例，若鋼鐵結構物之電位值較 -800 mV 為“負”，鋼鐵結構物為保護狀態，但若值較 -800 mV 為“正”，則表示保護不足或防蝕效果不佳。

表 5 海水中鋼構造物之防蝕電位標準

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

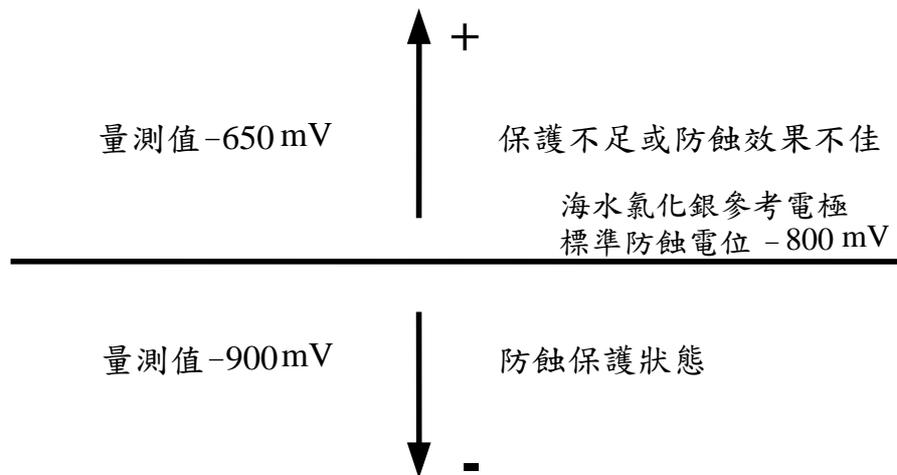


圖 14 陰極防蝕效果判定

海下鋼鋼構造物陰極防蝕工程於竣工驗收後，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。表 6 為陰極防蝕犧牲陽極法竣工驗收後應保存文件和紀錄。

表 6 陰極防蝕犧牲陽極法竣工驗收後應保存文件和紀錄

設計和安裝資料	<ul style="list-style-type: none"> ● 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)
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)	<p style="text-align: center;">操作</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 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
	<p style="text-align: center;">維護</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 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

四、陰極防蝕工程之維護管理

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。

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。

由於目前國內海下鋼構造物多採用犧牲陽極式陰極保護系統，故維護管理以下僅介紹犧牲陽極式陰極保護系統部份。

4.1 犧牲陽極法之維護管理

陰極防蝕犧牲陽極系統維護管理分為一般檢查與詳細檢查。維護管理流程如圖 15 所示。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。

1. 一般檢查

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。

2. 詳細檢查

詳細檢查則包括：

- (1) 目視檢測：由潛水人員以近距離目視方式檢查，檢查時應注意鋼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，於設施法線方向上每 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。構造物垂直方向(深度)，以 1 m 或適當的間隔進行電位量測。

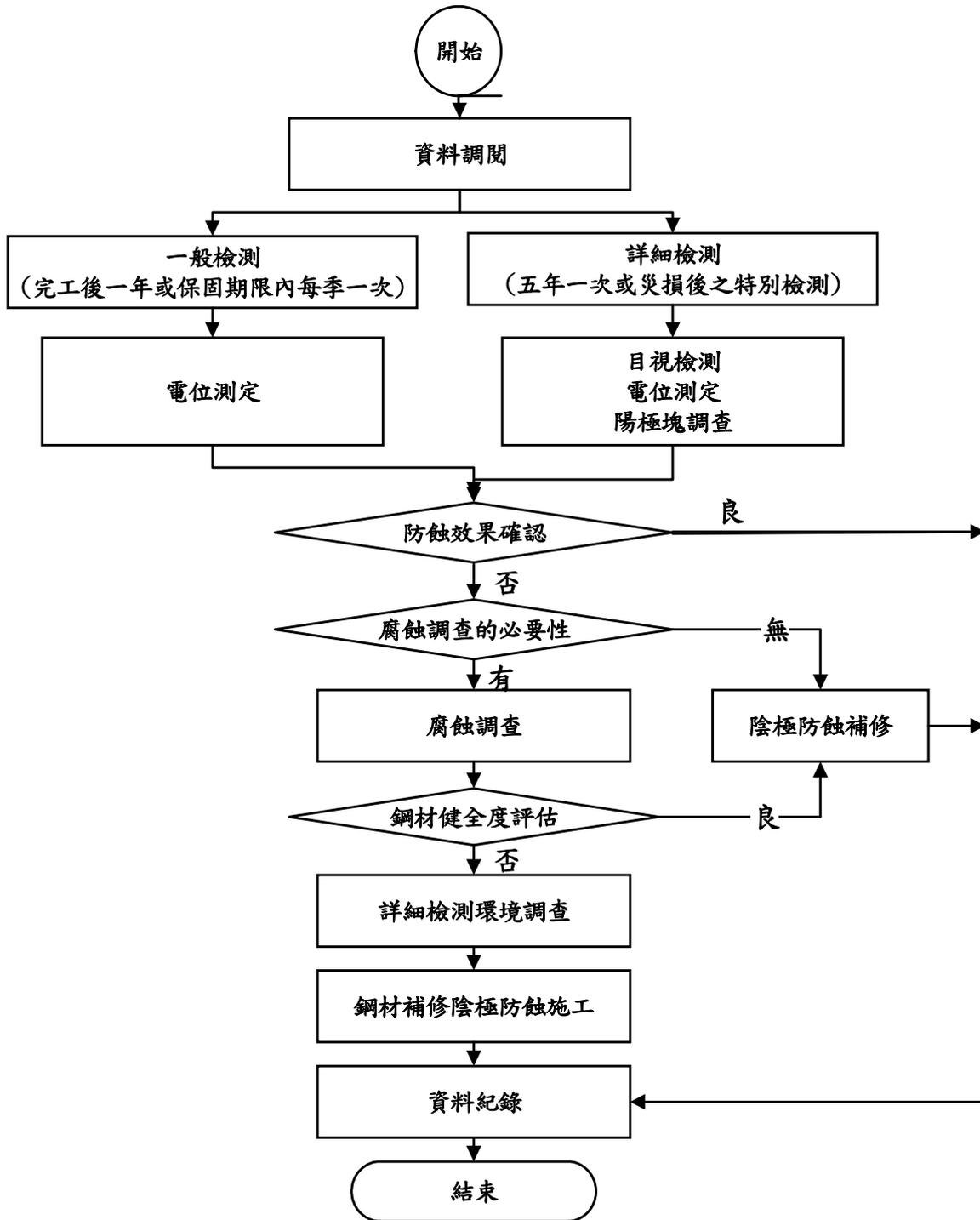


圖 15 陰極防蝕犧牲陽極系統維護管理

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及焊接處是否完整有無脫落情形，陽極消耗量則是選擇陽極數量之 5% ~10% 進行調查，由潛水人員水下量測陽極尺寸，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：

(1)依據剩餘陽極形狀尺寸(如圖 16 所示)之計算法：

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

式中，

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

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

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。

(2)陽極壽命計算

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

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

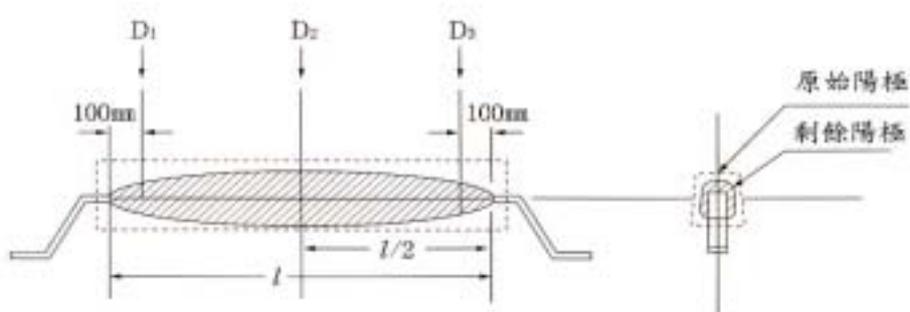


圖 16 剩餘陽極形狀尺寸計算

4.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. 海水氯化銀參考電極) 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。

此外，如因颱風、地震等發生重大災害後，或碼頭營運中發生重大事故及施工不當等人為破壞後，當構造物的安全或營運功能有虞慮時辦理特別檢測。特別檢測之方式應比照詳細檢測之方式辦理。

5.腐蝕調查

陰極防蝕工程經詳細檢查，如確認防蝕效果未達預期成效，應評估其健全度，考慮將陽極塊全面或部份更換；為確保結構物安全，必要時，需繼續進行腐蝕調查。

腐蝕調查步驟如下：

(1)調查對象之資料蒐集與分析

蒐集鋼構造物建造之原始資料，例如，碼頭結構設計水深、靠泊船隻屬性、鋼板(管)樁原始型式及厚度、防蝕處理方法、使用年限、施工、歷年或上次檢測日期及結果...等，以及國內外鋼板樁腐蝕防治相關文獻。調查進行前，應先掌握構造物之特性、釐定檢測的重點位置及注意事項。

(2)檢測範圍之選定

檢測範圍一般視檢測特性及構造物現況來選定，通常以一至數座碼頭為範圍。以結構型式區分，版樁式碼頭則於法線方向約每 30 公尺為一單位，棧橋式碼頭則以原設計之每一單元（約 20 至 50 公尺）為檢測紀錄單元。

(3)鋼樁檢測

A.目視檢測

由潛水人員潛入水下，近距離以目視檢測鋼樁表面腐蝕情況，如

發現有破洞或變形則應先標定位置，丈量或記錄破洞大小，再檢查鋼樁後方級配是否有流失、淘空等現象，最後以照相或攝影存證。檢查重點分述如下

- a. 有無紅橙色的生鏽地方及其範圍。
- b. 有無發生集中腐蝕及其位置。
- c. 有無發生孔蝕、開裂，及其發生之位置。
- d. 附著物的狀況。
- e. 有無船舶或漂流物等撞擊的痕跡。
- f. 有無漏沙之現象

此外，應同時檢測並記錄碼頭構造物其冠牆及樑版底版之鋼筋混凝土部份有無發生混凝土龜裂、剝落之情形或鋼筋外露、鏽蝕情形，記錄應包含發生位置、範圍及大小尺寸等。

B. 厚度量測

厚度測定時最好照相或攝影厚度測點之鋼材表面狀態。

a. 選定檢測樁

鋼板樁碼頭於法線方向以一適當間隔（約 5m）選一組樁，鋼管樁以約 5 支樁選一支樁，進行厚度檢測。但若有發現破損嚴重處則該區（面積）應增加檢測數量。

b. 選定水深與量測位置

依各港碼頭構造物腐蝕可能狀況，鋼板樁其檢測重點位置在剪應力最大處（或拉桿位置）、潮汐帶部位、低潮位線至其下約 1 公尺間、冠牆底至海床面之中間點或彎距最大處及海床處附近應各取一點檢查，其餘配合防蝕塊檢測位置進行檢測。每支鋼板（管）樁選定 3 點以上水深作為量測點。圖 17 為各型鋼樁其表面厚度量測位置。

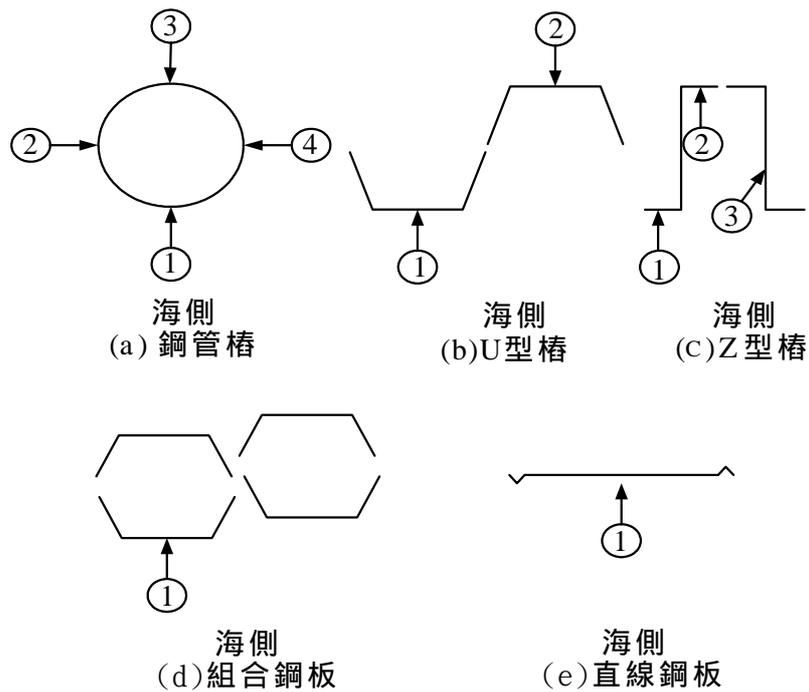


圖 17 各型鋼樁其表面厚度量測位置

c. 厚度量測與步驟

(a) 超音波測厚法

(i) 測厚原理

超音波厚度儀係利用脈衝原理，由於音波在鋼材之傳播速率為一定值，因此，由探頭傳送出一彈性波，經鋼材表面至內壁之傳播時間，即可算出波通過路徑之距離(鋼材厚度)，精準度可達 $\pm 0.1 \text{ mm}$ ，可由接收器直接讀取厚度，厚度計算可由下列數學式求得：

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

式中 V：超音波在鋼材中之傳播速度 (5920 m/sec)

S_i ：鋼材厚度讀數(mm)

t_{i+1} ， t_i ：探頭接受回聲及初始傳播的時間

(ii) 海生物敲除

使用工具敲除鋼板樁表面上附著之海生物體及鐵銹。

(iii) 厚度量測

以超音波厚度儀之探頭，接觸已敲除清理乾淨之鋼材表面，即可讀取鋼材厚度。每一水深之厚度測點，在該處敲除面上量測數點厚度值，其平均值做為該測點厚度，敲除面上測厚位置，原則上採用如圖 18 所示，測定三至五點。

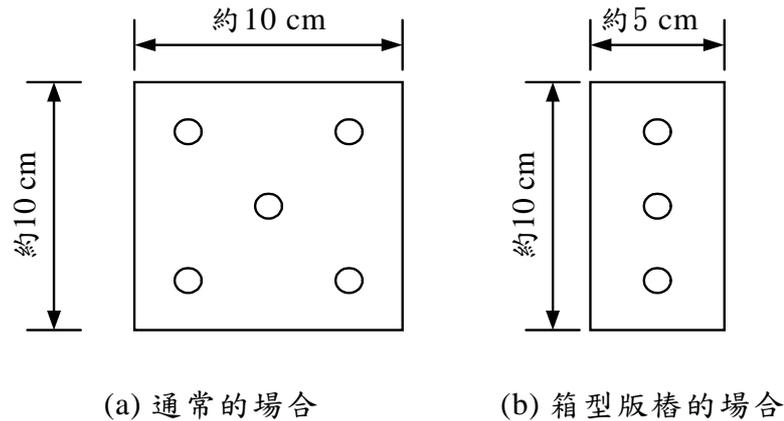


圖 18 鋼樁敲除面上厚度量測位置

(b) 渦電流檢測法

調查時使用經特殊處理之防水探頭，可直接穿透厚度小於 50 mm 之被覆物質。以渦電流進行鋼材現有厚度量測，可不需先清除鋼材表面之覆著海生物。

渦電流檢測係應用電磁感應原理，於鋼材內部生成感應渦電流，渦電流會因鋼材內之瑕疵或物理差異而有所改變，藉此改變達到檢測目的。除可檢測圓柱、管件、薄板等厚度外，並可檢測受測材料之材質特性，如塗膜厚度、導電率、導磁率及電阻等，惟僅適用於導電材料。檢測時因鋼材厚度及形狀限制，其內部缺陷不易測出且訊號判定困難，需賴具豐富經驗之檢測者實施。

渦電流檢測時得到一時間訊號曲線，藉由統計理論作迴歸分析，計算判定係數，推估鋼材現有厚度。判定係數正確與否直接影響檢測結果，檢測前需先設定參數，如鋼材最大厚度、附著物包覆厚度、環境溫度範圍等，方能得到最佳訊號曲線，提高檢測之準確性。

d. 腐蝕速率計算

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

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

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

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

$$V_P = \frac{C - V_C \times Y_C}{Y_P}$$

式中 V_C = 無防蝕措施之腐蝕速率 (mm/yr.)

V_P = 有防蝕措施之腐蝕速率 (mm/yr.)

Y_C = 無防蝕措施之年期 (yr)

Y_P = 有防蝕措施之年期 (yr)

C = 腐蝕量 (mm)

P = 防蝕率，防蝕率與海水浸水率之關係示如表 7。

表 7 防蝕率與海水浸水率之關係

海水浸水率(%)	防蝕率(%)
0~40	40 以下
41~80	41~60
81~99	61~90
100	90 以上

C.鋼樁保護電位量測

以銅/硫酸銅電極為準，量測時以高阻抗電位計或電錶之一端搭接於與鋼樁連結之不銹鋼電位測試棒上，另一端則置於欲量測之鋼樁旁。

6.環境調查

藉由調查海下鋼構造物周邊之海水水質等資料，評估陰極防蝕工程可能受到影響程度或鋼材之腐蝕因子等環境條件，以獲得在詳細檢測評估時所需的資料。環境調查大致分包括最近河口位置、氣象、海象與海水水質、海床土壤、鋼材表面的附著物等，以海水水質影響最大，故檢測項目至少須包含海水之氯離子濃度、水溫、溶氧量、酸鹼度。

7.結構物安全評估

藉由腐蝕調查結果，利用靜力學及動力學結構分析，評估結構物安全性。

五、國內主要商港碼頭之鋼樁腐蝕調查結果

本所港研中心針對國內主要商港碼頭之鋼板樁與鋼管樁，於民國 79 年起進行腐蝕調查及防蝕效能檢測，其主要結果如下：

1.基隆港

本港檢測碼頭包括東 2~東 11，西 19~西 27 等共 18 座碼頭。其中東 5~東 7、西 21~西 23，西 24(部分)、西 27 碼頭鋼樁為 Z 型鋼板樁；西 24~西 26 則為其他港口較少用之井筒式碼頭，採用直線型鋼板樁；東 8~東 10 及西 19~西 20 鋼管樁。潮汐帶防蝕採用塗裝工法，海中帶安裝陰極防蝕之犧牲陽極塊，但檢測時尚有東 5、東 9、東 10 等碼頭之部份未安裝犧牲陽極塊。

民國 79 年至 82 年之調查結果顯示^{[2][3]}：東 5~東 7、西 24~西 27 在低潮位線附近均發現鋼板樁發生穿孔破洞現象，部份碼頭未採防蝕措施前，低潮位線附近多處及海中帶少處之鋼樁腐蝕速率大於 0.20 mm/yr，腐蝕屬嚴重程度，目前除東 5 外，鋼板樁發生穿孔破洞處，多已修護；海中

帶並安裝犧牲陽極改善，民國 90 年重新調查結果腐蝕速率已明顯降低。

安裝犧牲陽極塊保護之鋼板樁，其保護電位均小於 -850mV (v.s.Cu/CuSO₄ 電極)，處於防蝕保護狀態。陽極塊消耗速率 $1.3\sim 3.7\text{ kg/yr}$ 。

2. 台北港

本港檢測碼頭包括東 1~東 3 等。3 座碼頭均以 U 型鋼板樁為建造材料；潮汐帶防蝕採用塗裝工法，海中帶安裝陰極防蝕之犧牲陽極塊。

腐蝕調查結果發現東 2 號碼頭之最大腐蝕速率達 0.14 mm/yr ，腐蝕速率與其他港口比較稍高，其原因可能為調查時因鋼樁使用僅約五年，故腐蝕速率較高，且陽極塊調查結果發現多數均已掉落或因海床淤沙埋沒（調查時僅剩 1 支陽極塊可供切割進行電氣效能檢測），影響陽極塊無法發揮正常之防蝕效果，陽極塊掉落原因，可能為安裝陽極塊時焊接處有缺陷或因運砂船隻等停靠時之外力衝撞所致。表 8 為台北港東 2 號碼頭陽極塊詳細調查情形。東 3 號碼頭鋼板樁，其保護電位均小於 -850mV (v.s.Cu/CuSO₄ 電極)，處於防蝕保護狀態；陽極塊消耗速率 $0.5\sim 3.2\text{ kg/yr}$ 。

3. 蘇澳港

本港檢測碼頭包括 6、7 號及駁船碼頭等。6、7 號碼頭以厚度為 12mm 之鋼管樁為建造材料；駁船碼頭則採用 Z 型鋼板樁。潮汐帶防蝕採用塗裝工法，海中帶安裝陰極防蝕之犧牲陽極塊。

民國 79 年調查結果發現駁船碼頭鋼板樁於潮汐帶腐蝕相當嚴重，3 座碼頭之海中帶部分在採用安裝陰極防蝕之犧牲陽極塊為防蝕措施後，最大腐蝕速率均小於 0.10 mm/yr ；碼頭鋼板樁其保護電位均小於 -850mV (v.s.Cu/CuSO₄ 電極)，處於防蝕保護狀態；陽極塊消耗速率 $0.4\sim 3.0\text{ kg/yr}$ 。

表 8 台北港東 2 號碼頭陽極塊詳細調查情形

陽極塊位置			現況	備註	陽極塊位置			現況	備註
距起點距離	水深 (m)				距起點距離	水深 (m)			
	0	-5	下方埋沒於淤沙中		86.4	-5	掉落		
1.2		-2	下方鐵蕊脫落		87.6	-2	下方鐵蕊脫落		
	2.4	-5	下方埋沒於淤沙中		88.8	-5	掉落		
	4.8	-5	下方埋沒於淤沙中		91.2	-5	掉落		
6		-2	完整 **		92.4	-2	掉落		
	7.2	-5	下方埋沒於淤沙中		93.6	-5	掉落		
	9.6	-5	下方埋沒於淤沙中		96	-5	掉落		
10.8		-2	上方鐵蕊脫落		97.2	-2	掉落		
	12	-5	下方埋沒於淤沙中		98.4	-5	掉落		
	14.4	-5	下方埋沒於淤沙中		100.8	-5	掉落		
15.6		-2	完整		102	-2	掉落		
	16.8	-5	下方埋沒於淤沙中		103.2	-5	掉落		
	19.2	-5	下方埋沒於淤沙中		105.6	-5	掉落		
20.4		-2	上方鐵蕊脫落		106.8	-2	掉落		
	21.6	-5	下方埋沒於淤沙中		108	-5	掉落		
	24	-5	掉落		110.4	-5	掉落		
25.2		-2	掉落		111.6	-2	掉落		
	26.4	-5	掉落		112.8	-5	掉落		
	28.8	-5	下方埋沒於淤沙中		115.2	-5	掉落		
30		-2	掉落		116.4	-2	掉落		
	31.2	-5	下方埋沒於淤沙中		117.6	-5	下方埋沒於淤沙中		
	33.6	-5	下方埋沒於淤沙中		120	-5	下方埋沒於淤沙中		
34.8		-2	掉落		121.2	-2	掉落		
	36	-5	下方埋沒於淤沙中		122.4	-5	掉落		
	38.4	-5	下方埋沒於淤沙中		124.8	-5	掉落		
39.6		-2	上方鐵蕊脫落		126	-2	掉落		
	40.8	-5	下方埋沒於淤沙中		127.2	-5	下方埋沒於淤沙中		
	43.2	-5	下方埋沒於淤沙中		129.6	-5	下方埋沒於淤沙中		
44.4		-2	下方鐵蕊脫落		130.8	-2	上方鐵蕊脫落		
	45.6	-5	掉落		132	-5	掉落		
	48	-5	下方埋沒於淤沙中		134.4	-5	下方埋沒於淤沙中		
49.2		-2	下方埋沒於淤沙中		135.6	-2	下方埋沒於淤沙中		
	50.4	-5	下方埋沒於淤沙中		136.8	-5	掉落		
	52.8	-5	下方埋沒於淤沙中		139.2	-5	掉落		
54		-2	完整 **		140.4	-2	掉落		
	55.2	-5	下方埋沒於淤沙中		141.6	-5	掉落		
	57.6	-5	掉落		144	-5	掉落		
58.8		-2	掉落		145.2	-2	完整		
	60	-5	掉落		146.4	-5	掉落		
	62.4	-5	掉落		148.8	-5	掉落		
63.6		-2	掉落		150	-2	完整 **		
	64.8	-5	掉落		151.2	-5	下方埋沒於淤沙中		
	67.2	-5	掉落		153.6	-5	下方埋沒於淤沙中		
68.4		-2	上方鐵蕊脫落		154.8	-2	掉落		
	69.6	-5	掉落		156	-5	下方埋沒於淤沙中		
	72	-5	掉落		158.4	-5	下方埋沒於淤沙中		
73.2		-2	下方鐵蕊脫落		159.6	-2	掉落		
	74.4	-5	掉落		160.8	-5	掉落		
	76.8	-5	掉落		163.2	-5	下方埋沒於淤沙中		
78		-2	下方鐵蕊脫落		164.4	-2	掉落		
	79.2	-5	掉落		165.6	-5	下方埋沒於淤沙中		
	81.6	-5	掉落		168	-5	下方埋沒於淤沙中		
82.8		-2	完整 **		169.2	-2	完整 **		
	84	-5	掉落		170.4	-5	掉落		

4.花蓮港

花蓮港碼頭採用鋼板樁為建造材料者包括 4~9 號碼頭及航道岸壁；其中 4~9 號碼頭為 Z 型鋼板樁，航道岸壁為 U 型鋼板樁；4~5 號碼頭大氣帶防蝕措施採用塗裝工法；潮汐帶及海中帶之鋼板樁於本所調查時尚未採用任何防蝕措施。

4~5 號碼頭大氣帶之陸側鋼板樁發現穿孔破洞，5~6 號碼頭靠海床處發現數處鋼板樁開裂，已修護改善。鋼板樁之腐蝕速率多小於 0.10mm/yr。鋼板樁碼頭海中帶部份已於民國 93 年起安裝陽極塊。

5.台中港

本港共檢測 29、30、99 碼頭等。3 座碼頭均以厚度為 12mm 之鋼管樁為建造材料，潮汐帶防蝕採用塗裝工法，海中帶則安裝陰極防蝕之犧牲陽極塊。海中帶鋼管樁腐蝕速率多小於 0.10mm/yr。碼頭鋼板樁其保護電位均小於 -850mV (v.s.Cu/CuSO₄ 電極)，處於防蝕保護狀態；陽極塊消耗速率約為 0.4~3.5 kg/yr。

6.高雄港

本港共檢測 39、40、54~58、69、70、78~81 號碼頭等；鋼板樁均位於海中帶，以安裝陰極防蝕之犧牲陽極塊為防蝕措施；腐蝕速率多小於 0.05mm/yr，腐蝕情狀輕微。碼頭鋼板樁其保護電位均小於 -850mV (v.s.Cu/CuSO₄ 電極)，處於防蝕保護狀態；陽極塊消耗速率介於 1.3~4.0 kg/yr.間。

7.安平港

本港共檢測 3、4 號兩座碼頭；以 U 型鋼板樁為建造材料；鋼板樁均位於海中帶，以安裝陰極防蝕之犧牲陽極塊為防蝕措施；腐蝕速率多小於 0.05mm/yr，腐蝕情狀輕微。碼頭鋼板樁其保護電位均小於 -850mV (v.s.Cu/CuSO₄ 電極)，處於防蝕保護狀態；但陽極塊消耗速率為所有調查港口中最高，達 4.9~8.4 kg/yr，可能原因為因碼頭臨近河口，鋼板樁需較高之防蝕電流保護之。

8.馬公港

本港共檢測 1、6、7、8 共 4 座碼頭；均以厚度為 12mm 之鋼管樁為建造材料，潮汐帶防蝕採用塗裝工法，海中帶則安裝陰極防蝕之犧牲陽極塊。海中帶鋼管樁腐蝕速率多小於 0.07mm/yr。碼頭鋼板樁其保護電位均

小於 -850mV (v.s.Cu/CuSO₄ 電極)，處於防蝕保護狀態；陽極塊消耗速率約為 $0.2\sim 3.9\text{ kg/yr}$ 。

六、結論與建議

1. 由國內外文獻及本所港研中心至各港港區進行現場調查結果，海下鋼構造物採用陰極防蝕工法為防蝕措施，確可達到保護鋼材降低腐蝕之目的。
2. 海下鋼構造物採用陰極防蝕之犧牲陽極法，其安裝與維護較採外加電流法簡單，可以減少維護之人力。
3. 為確保海下鋼構造物防蝕系統均處於保護鋼材之狀態，建立一套適當可行之維護管理系統確實必要。
4. 陰極防蝕系統完工後，其設備之檢查與維護，更須訂定有系統的維護計劃，才能使繼續發揮最大的功用；施工及維護管理文件預紀錄應詳實記載，以作為日後改善參考依據。
5. 由於陰極防蝕犧牲陽極法之安裝施工與檢測維護大部份須藉由潛水人員於水下施作進行，對於水下作業安全規定，維護單位應依相關法規嚴格執行。

參考文獻

1. 葉江榮、蔡茂雄、陳銘盤、邱明義、廖財昌，「深澳發電廠冷卻海水鋼板樁陰極防蝕研究」，臺灣電力公司電力研究所，1983。
2. 林維明、饒正，「基隆港碼頭鋼板樁腐蝕調查研究」，港灣技術研究所，港灣技術研究所專刊第 59 號，1990。
3. 饒正、陳桂清、柯正龍，「基隆港碼頭鋼板樁檢測及其維護改善方案研究」，港灣技術研究所，港灣技術研究所專刊第 81 號，1993。
4. 交通部運輸研究所，「港灣構造物陰極防蝕準則訂定(草案)研究」，2002。

地下管線陰極防蝕工程監工實務與維護管理

邱德俊*

摘要

陰極防蝕是地下管線對抗環境腐蝕雜散電流攻擊最主要的方法，但是許多裝設了陰極防蝕的地下管線依然發生腐蝕洩漏。主要原因是許多人都忽略了陰極防蝕施工階段才是確保陰極防蝕成功的基礎。材料的選擇及施工程序的每一步驟都決定了是否會增加防蝕成本、管線是否仍在默默腐蝕的關鍵。在管線存在的環境無法改變的條件下，如果無法在安裝階段掌握工程品質，即使有完美的設計，管線腐蝕必然發生。而有計劃的檢測是維持地下管線安全營運，增加操作壽命的信心。因此本文針對陰極防蝕在各種材料設備的應用、特性及正確的安裝方法，提出在施工階段應注意事項及最適當的工法。對於地下管線的陰極防蝕維護，也特別將緊密極化電位檢測的運用在作為監控地下管線防蝕檢測維護作詳細的論述。

Practice of Audit and Maintenance of Cathodic Protection for Underground Pipeline

Der-Jiunn Chiou

ABSTRACT

The most important method in fighting with corrosion factor in soil for underground pipeline is applying cathodic protection. But, corrosion happens in many underground pipelines equipped with cathodic protection. Frequently due to lack of good installation, both selection of materials and the procedure of installation in cathodic protection will affect whether the maintenance cost will be high and the corrosive behavior still occurs. We cannot change the environment that pipeline laid, thus, the pipeline will be corroded even with perfect design, if we don't pay

*中國石油公司煉製研究所陰極防蝕專案 經理

much attention to quality control during installation stage. Planning a periodic cathodic protection for underground pipeline will increase the confidence in pipeline operation. This article discusses the characteristic of various materials and the correct procedures in installation. Furthermore, application of effective close interval potential survey of underground pipeline will be discussed in detail.

一、前言

地下管線是輸送油料及天然氣最經濟與最安全的方式。在台灣，中油、台塑、聯勤及天然氣公司都擁有大量的地下管線，然而地下管線存在土壤之中即遭受到自然環境及外界干擾而產生腐蝕；為了避免腐蝕而引起洩漏對環境造成污染，地下管線都使用包覆來達成基本的防蝕功能，但是要確保可以長期地維持地下管線的防蝕及增強其防蝕性能採用陰極防蝕已成為必要且必需的工具。

陰極防蝕是以電化學的原理利用工程應用的方式對大範圍的地下金屬結構物進行防蝕措施，它可以對地下或海下的金屬結構物提供防蝕電流使金屬結構物即使在沒有包覆的情況下達到防蝕的目的；地下管線使用有機性的絕緣包覆帶來阻隔金屬管線和土壤環境的腐蝕因子。包覆帶雖有防蝕功能但是管線上的包覆並無法達到百分之百的隔離，而且這些有機包覆有時卻是土壤中硫酸還原菌(sulfate reducing bacteria)相當營養的食物，這些細菌可以分解包覆，破壞包覆產生的產物更加速地下管線鋼材的腐蝕^[1]；土壤環境中的氯離子(chloride)、硫酸根離子(sulfate)也會加速管線的腐蝕。採用陰極防蝕則是可以有效克服包覆所無法達到的防蝕功能，同時陰極防蝕更可以提供地下管線任何位置長時間的防蝕達到確保地下管線的營運安全及增加其操作壽命的目的。

一條使用陰極防蝕保護的地下管線在正常的操作壓力之下並沒有所謂老化的情況，成功的地下管線防蝕系統壽命約 15 年，因此只需更新陰極防蝕系統將可以輕易地延長管線的使用壽命。中油公司自成立以來，在陰極防蝕系統保護之下使用達 30 年的管線相當多，因此為了可以有效地提供管線營運安全及增加操作壽命，良好的設備使用及完善的施工是達成地下管線對抗腐蝕的基本方法。

因此若能在建造時即針對陰極防蝕的設備及工法作充分的瞭解，妥善規劃施工程序可以減少複雜與大範圍的陰極防蝕系統產生缺陷，使地下管線的防蝕功能完整發揮。

本文的主要目的在討論地下管線陰極防蝕工程的各項施工法的特性及適用範圍，提供使用者瞭解並注意如何正確將其應用在陰極防蝕的系統，並說明在陰極防蝕系統下如何對防蝕系統及地下管線系統進行應有的基本維護及檢測工作，以做好地下管線的陰極防蝕保護。

地下管線陰極防蝕的材料種類型式相當多，本文所提均以常用或通用的材料或方法加以說明。陰極防蝕至今仍屬於 State-of-The-Art 階段，各國均未明確的材料規範及施工標準，完全是以經驗值做為參考，因此本文乃以實務之經驗對陰極防蝕在監工及維護管理上做最完整的論述和分析。

2.1 陰極防蝕的監工實務

地下管線陰極防蝕所用的型式可分別犧牲陽極及外加電流陽極兩種見圖 1 及圖 2。

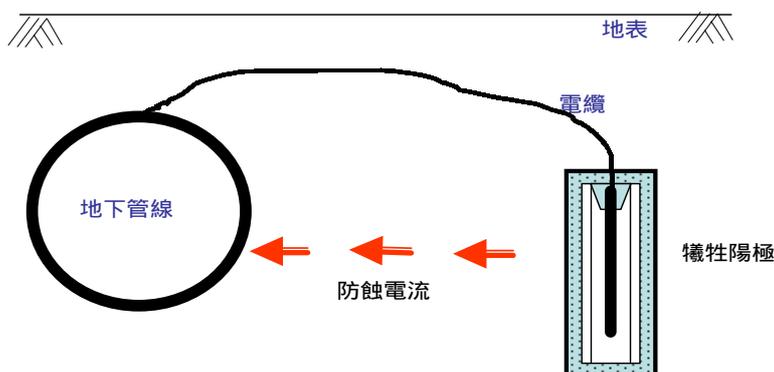


圖 1 陰極防蝕犧牲陽極系統

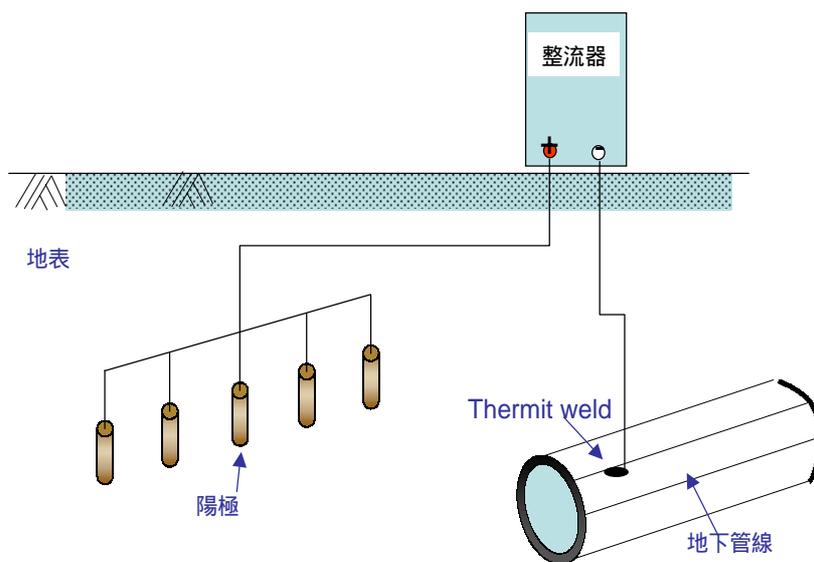


圖 2 外加電流陰極防蝕系統

2.1.1 犧牲陽極

土壤環境中使用鎂合金作為陽極，見圖 3。利用鎂和鋼管的電位差為驅動電壓提供防蝕電流，此時正負極的有效電壓差僅 0.7V 至 1.1V，比市售的家用 1.5V 電池小，因此正負極之間即始增加 1 的電阻都會使電流減少 5% ~ 10% (在 3000 - cm 土壤中) 的電流，因此鎂合金陽極地床和陽極的施工均需以不增加阻抗為主要考量^[2]。

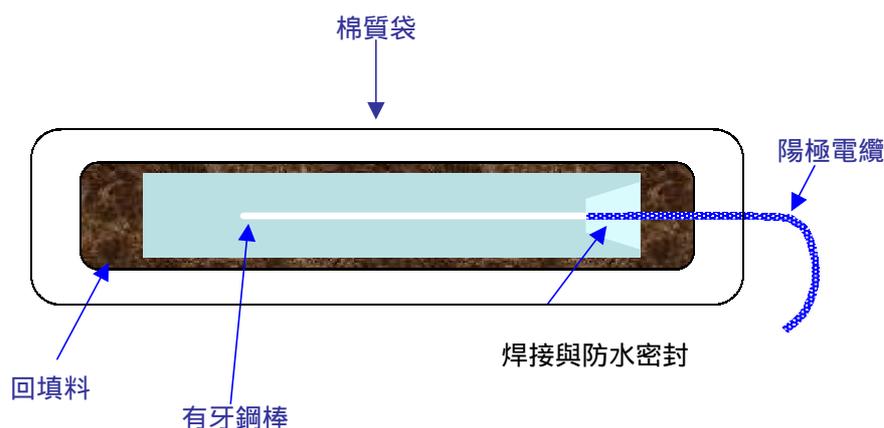


圖 3 鎂合金陽極

鎂合金陽極在安裝前應進行現場電位的檢驗工作，執行方式如下：

- (1) 將鎂合金陽極外包的紙袋或塑膠袋取下(安裝時亦同)。
- (2) 將鎂合金陽極浸泡在裝滿水的大型塑膠桶內浸泡一至二小時，浸泡時導線末端勿放入水中。
- (3) 以硫酸銅參考電極量測時鎂陽極的開路電位應在 -1.45V (標準型) 或 -1.70V (高電位型) 以上。

安裝時鎂陽極埋設的位置 (地床) 應以溪砂回填，地床必須在開挖區的最低位置，儘量使地床保持在濕潤的狀態。陽極距離管線的距離以 1~1.5 公尺時對管線的防蝕有最佳效果，太近時防蝕保護的範圍過度集中會使其他位置缺乏防蝕保護。在工程實務上不太可能將鎂合金陽極埋設距離管線 1~1.5 公尺外，雖然無法維持最佳距離，兩者的距離至少應有 60 公分。設計者會依實務及管線埋設條件增加陽極的數量。陽極數量的增加是因為要克服陽極和管線距離縮小後，部份無法獲得電流的區域。

陽極導線連到地下管線上可以使用併聯的方式來安裝，而安裝的方式如圖 4。

圖 4(a) 的方式可讓陽極的效果發揮到最大，但須作導線和管線的多次焊接及包覆，成本增加。(c) 的方式無法將電流分散並傳遞到管線，而且導線連接的位置完全無法做到防水要求，(b) 的方式是目前使用最多型式，但每個陽極導線接到導線時一定要用三通熱熔焊接 (Thermit Welding) 的方式增加焊接點的強度和導電性，焊接位置被覆的部份也必須使用三通被覆 (Splice Kit) 來包覆確實，阻絕水份的浸入。若焊接位置被覆失效或水份浸入，在土壤中的銅線將在半年內腐蝕，使犧牲陽極系統失效。

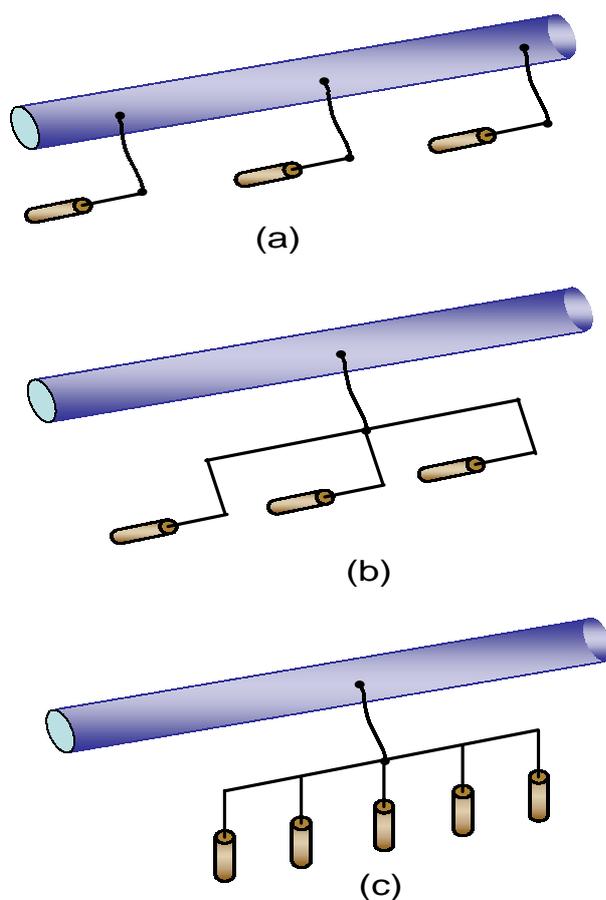


圖 4 鎂合金陽極與地下管線接續方式

某些設計會將陽極或陽極組導線和管線的排流導線引至接線箱內形成回路，這種施工方式，陽極和管線導線的防水處理必須特別注意，最好是將接線箱設置為地上型，則可避免導線腐蝕。

無論採用何種埋設方式，陽極導線線徑最好使用 # 8 AWG 以上且長度不長於 3 公尺若採用 (b) 的接線方式，則主線的線徑應大於 # 8 AWG，主因仍為減少導線阻抗。

2.1.2 外加電流陽極地床

地下管線的外加電流系統陽極常使用淺井式陽極地床和深井式陽極地床兩種型式，淺井式陽極地床的使用越來越少，主因是淺井陽極地床的用地需極大，約需要至少 40 公尺長的區域設置陽極，另一原因是淺井陽極地床會產生干擾。然而淺井陽極地床的施工成本低、施工期短，因此只要用地取得沒有問題，此種型式的地床仍可使用。深井地床則是用地極小，只要兩公尺見方的用地即可以深入地下的方式埋設陽極。缺點則是成本高、施工期長，兩種地床的優缺點見表 1；地床型式示意圖見圖 5 及圖 6。

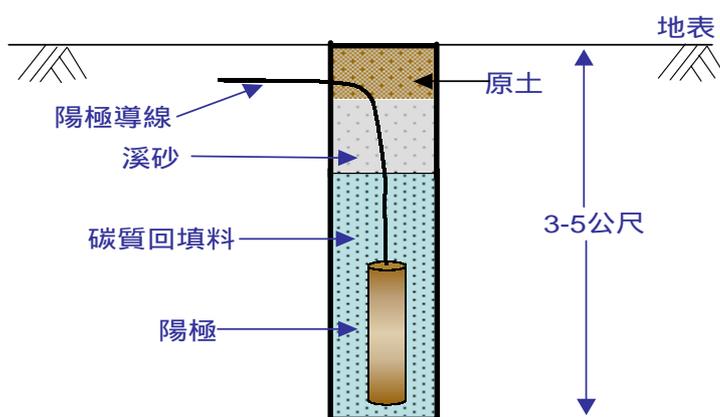


圖 5 外加電流淺井地床

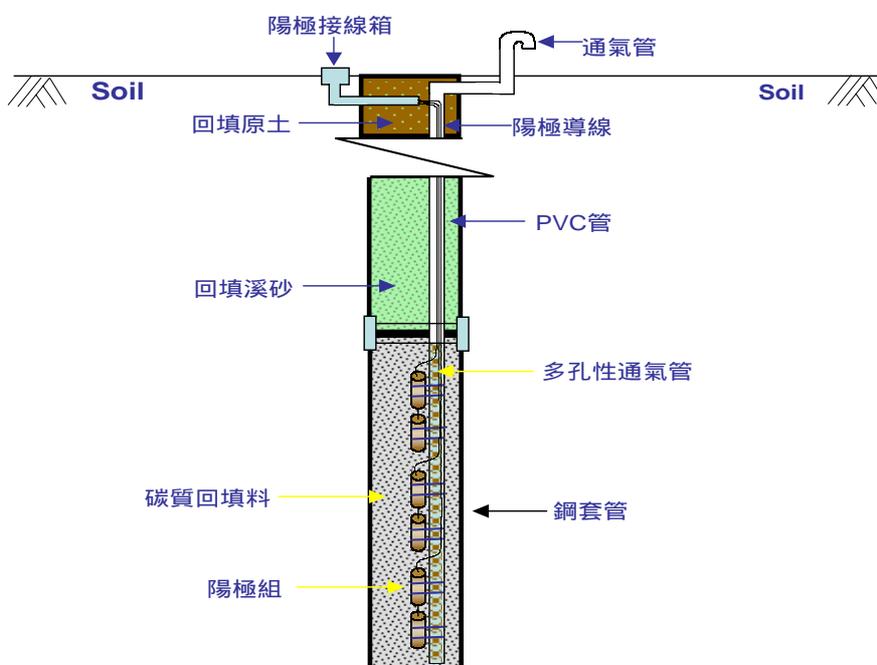


圖 6 外加電流深井地床

表 1 淺井地床與深井地床比較

	優點	缺點
淺井地床	成本低、易施工 適用任何陽極	易產生干擾、用地範圍大 陽極使用數量多 易被外界破壞
深井地床	用地範圍小、陽極數量少 陽極阻抗低	成本較高 陽極以輕質陽極較適合 施工複雜

2.1.3 淺井陽極地床的施工

淺井陽極埋設的深度為地下三至五公尺左右，淺井地床所使用的陽極大部份是高矽鑄鐵陽極，使用此種陽極時要特別注意導線和陽極接線方式，見圖五。施工的方式是應用鑽井方式鑿挖五吋至八吋直徑的淺井。井的底部應先回填二十公分厚的碳質回填料後再將陽極放入井中，井壁和陽極的空隙應以碳質回填料緊密充填並高於陽極頂部三十公分，剩下的空間則以溪砂及原土回填。通常為了方便施工，會用挖土機以鏟挖之方式挖掘出一個大洞再把陽極置入。這是相當不正確的方式，此種方式無法將碳質回填料均勻且緊密地包圍在陽極周圍，而且在機械夯實的過程會使陽極或導線失效，應盡量避免採用。淺井陽極之間會產生電壓的干擾，使得每一支陽極的輸出電流下降，因此陽極間的距離不得任易縮小，一般而言距離會受陽極的電流大小、陽極的數量有關。淺井陽極床的陽極可用水平的方式埋設，其深度應在地下兩公尺以下，以挖土機鏟挖成溝狀後先回填二十公分厚的碳質回填料，再將水平陽極放入，再覆蓋二十公分厚緊密的碳質回填料。

當陽極以淺井方式埋設時，由於土壤地表的阻抗值高，因此必然會使用數量較多的陽極來克服阻抗，因此陽極的接續變得相當重要。淺井陽極應以數個陽極為一組，再將各組陽極串接後再引至整流器正端。由於分布範圍廣，在末端的陽極會因壓降的關係防蝕功能下降，在可能的情況下可將每一組陽極或每一組陽極引至接線箱後再引至整流器。

外加電流陽極導線和導線的接續比犧牲陽極的接線和包覆更重要，每一個導線間的接續應使用壓接浸錫或三通熱熔焊後再以三通被覆以熱縮方式來處理，否則裸露的銅線會在極短的時間內斷裂或因接續點阻抗太大，產生熱使包覆失效。

2.1.4 深井陽極地床的施工

深井地床是目前使用最頻繁的外加電流陽極地床型式。深井地床井以可使用衝擊式、螺旋式或高壓氣體等鑽井方式，無論採用何種方式都不能使用非金屬管來作為井壁的支撐。有效陽極的部份應使用鋼套管，鋼管和鋼管之間應完全焊接，底部也應盲封。地床井中非有效陽極的部份應使用 PVC 管或 PE 管。當井內的套管安裝完成後，可將陽極依設計的數量、間隔將陽極降到有效陽極區段，陽極導線應固定於井的頂部，陽極應儘量保持在管的中心。通氣管的安裝相當重要，由於陽極在陰極防蝕運作時會產生氧氣、氯氣及熱量。陽極上氧每安培小時可產生 1.83 立方公尺，在高電位下更會產生氯氣。這些氣體會附著在陽極表面使得陽極阻抗增加或陽極因電流集中釋放而崩解，大部份陽極床的阻抗增加的問題都是因此而產生。為了排除這些氣體，陽極井中一定要安裝多孔性的非金屬管，使產生的氣體可以排出。通氣管的排放口不可放置在人手孔內，一定要引至大氣中。

深井地床的有效陽極段要充填碳質回填料，碳質回填料可和陽極緊密接觸降低陽極界面阻抗，使得陽極的消耗速率降低。碳質回填的安裝最佳方式是將碳砂攪拌在水槽中以 $5 \sim 6 \text{ kg/cm}^2$ 的壓力打入井中。在工程實務會將乾燥的碳砂以傾倒的方式倒入井內，這一步驟很容易造成地床井失敗。若要採用此種方式建議可以將碳質回填料以每五分鐘加入五十公斤的碳質回填料的速率倒入，使碳質回填料可以順利沉降至底部，每日倒入的數量不得超過二千公斤，之後靜置二十四小時再重覆進行，一個地床井將需 4 ~ 6 天才能完成碳質回填料的回填，主要目的是使碳質回填料可以完全沉降並緊實。若將四、五千公斤的回填砂快速地傾倒入井內，將可能會阻塞在套管中段，使陽極缺乏碳質回填料而浸泡在水中加速消耗。碳質回填料回填的過程中一定要量測每次回填完成後的殘餘井深，以確定沒有阻塞的情形產生。到達設計深度後剩餘的井深部份則回填溪砂，即可完成陽極井。碳砂的另一目的是散熱，當陽極放電時整個地床的溫度會上昇^[3]，上昇的溫度會使陽極導線被覆失效或使陽極消耗速率增加。陽極床上昇的溫差可由下式計算：

$$\square T = I^2 R_0 / 4\pi k R (L + r_0)$$

T	: 電流	A
I	: 陽極床電流電壓	V
R ₀	: 陽極接地電阻	ohm
k	: 土壤熱傳係數	0.2 Watt / m
L	: 有效陽極長度	m
r ₀	: 陽極半徑	m

以新設長度 30m、直徑 0.135m 的地床來說昇溫可能只有 1.2℃，但若地床阻抗上昇到 10Ω，陽極同時電流上昇至 25A，那麼溫昇將達 82℃，那陽極床將進入惡性循環階段使整個地床失效。由上看來當陽極設置完成後一定要按照操作手冊，切勿任意使陽極電流升高或電壓增加，否則陽極床將無法操作到 15 年的設計期限而提早失效。

淺井陽極由於產生表面的電壓差大，易引起干擾及保護過於集中的問題，因此淺井陽極的距離至少要離地下管線 100 公尺，同時也要遠離未保護的管線或外界管線以避免造成外界管線腐蝕。

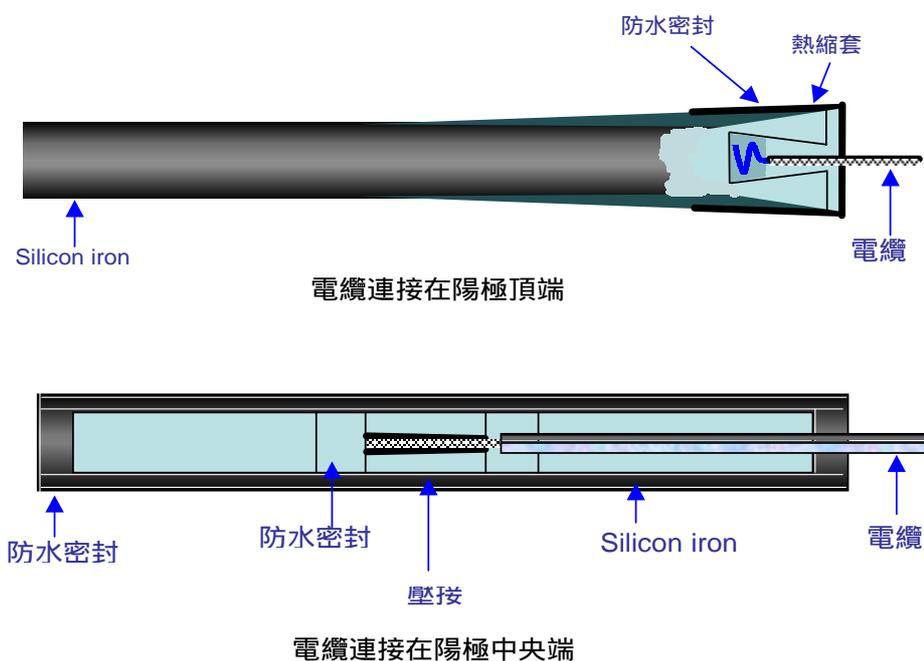


圖7 高矽鑄鐵陽極與電纜接續

2.1.5 整流器安裝

整流器可以安裝在地面或電桿上，安裝在地面之整流器可以容易進行維修及檢查，但應設置圍籬保護以避免使他人遭受電擊，在許多地方整流器無法或不允許安裝在地面時可將整流器安裝在電桿上。電桿必須是 7.5 公尺長的電桿，設置完成後電桿在地面長度為 5.5 公尺，由於電桿上將設置整流器及檢查台，因此電桿的穩定性相當重要。電桿埋設時基礎應安裝與電桿垂直方向之水平腳架，並以石塊回填至少八十公分再回填原土後，以 60 × 60 × 60 公分鋼筋混凝土固定。檢查台架護欄高度要高於 1.1 公尺以避免人員墜落，整流器應有獨立之基礎支撐架並可以固定在電桿上。檢查台架不得負荷

整流器之重量。在風勢大的迎風區為確保其穩定性，可以用雙桿之方式安裝整流器見圖 8，此時整流器將可以安裝在檢查台架。

安裝整流器時電源的輸入端必須安裝電磁開關及漏電斷路器，不可直接將交流電源引入整流器之電磁開關內。整流器安裝時應注意交流電源及其他電力線避免電擊。

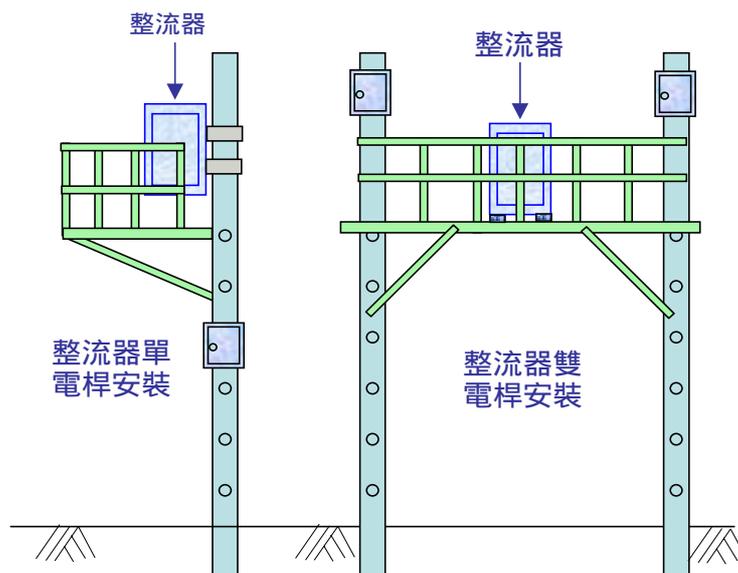


圖8 整流器電桿安裝

2.1.6 導線焊接

由於陰極防蝕是靠陽極放出的電流來提供地下管線防蝕電流，因此系統回路中阻抗的增加都會影響系統的效率 and 效果。在陰極防蝕中導線焊接到地下管線最佳的方式是利用熱熔焊(Thermit welding)方式將導線焊接到管線上見圖 9，焊接時管線將包覆切割十公分見方或在管線與管線的焊道區域，管線表面必須清潔並以砂布或挫刀將焊接區域作簡單的砂磨工作增加粗糙度，焊接完成後應在焊接點由火紅色轉成暗紅色之際以榔頭將焊區凸起敲成平滑並將焊渣清除，以避免破壞包覆。焊接完成後可以用徒手方式將導線抽拉以判斷導線焊接是否牢靠。在包覆時應先用熔融的柏油澆注在焊接的區域，可排除水分及執行包覆前的前處理，這個步驟可以增加包覆和原管線包覆的緊密性，也可在防蝕新舊包覆介面剝離時仍有阻斷水份之作用，當導線焊接在地下管線上並完成包覆後為了避免回填時將導線扯斷或自焊接處脫落，應將導線先纏繞在地下管線上並應套上 PVC 管保護。

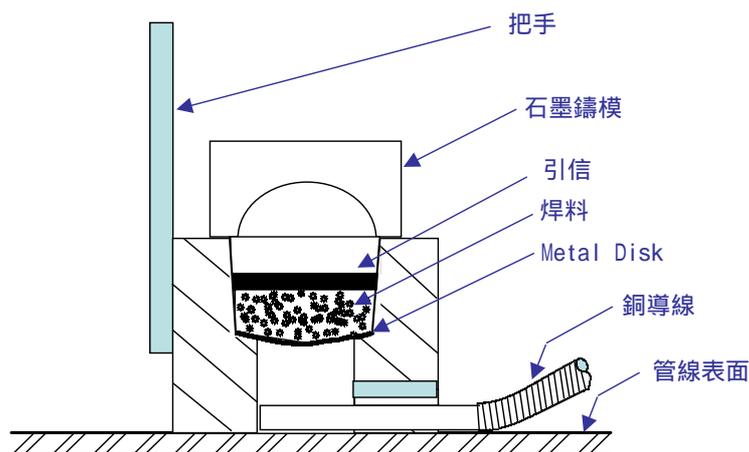


圖9 電纜焊接至鋼管表面

2.1.7 鋅地電池的安裝埋設

鋅地電池在安裝時是以可以快速排除突波電流阻止法蘭兩端電壓差的產生^[4,5]，但除了降低電池兩端的阻抗外，也要避免鋅地電池造成陰極防蝕失效；若有二條以上管線都需同時安裝電池組時不可將兩條管線的同側管安裝在同一電池組的一邊，因為這樣的安裝會使得防蝕電流可能無法依原設計將均勻分布在各管線上，鋅地電池見圖 10。

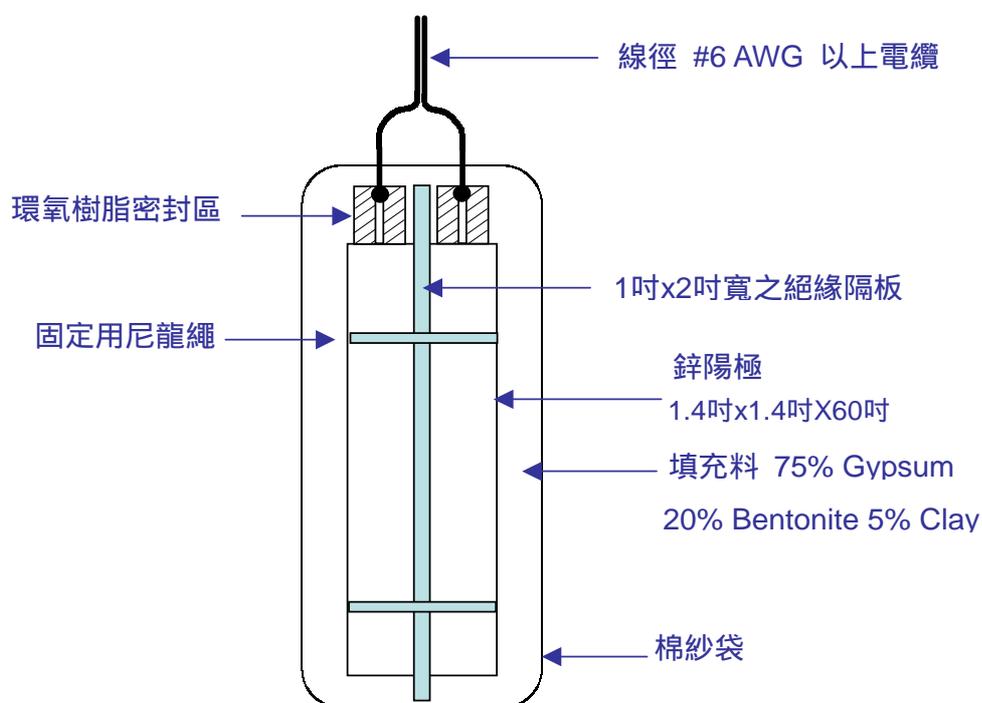


圖 10 鋅地電池組

三、地下管線陰極防蝕的維護管理

成功的地下管線陰極防蝕除了設備材料及施工的完善外，維護管理更是確保地下管線可以長期使用的重要依據。有效地掌握防蝕系統是否正常運作及管線系統的檢測將可以降低操作成本，消除地下管線腐蝕防止地下管線洩漏。

為了維持陰極防蝕正常運作及確保系統的全部都符合規範所要求，電的量測及檢查是必要的步驟。影響保護狀態的條件會隨時間而改變，因此陰極防蝕系統也會的這些改變需要作維護及修改的工作。因此定期的量測和檢查可以瞭解到防蝕狀態的改變，經驗上顯示往往為了應付這些改變，防蝕測試及檢查往往此定期檢查的次數頻繁。

在陰極防蝕正式啟動之前地下管線對地電位應先量測，在送電之後也應量測地下管線對地電位以判斷初始操作是否正常，在適當的極化後應進行防蝕評估以確定防蝕是否依準則正常運作，地下管線評估的種類可以採用下列項目，檢查的週期至少每年一次。

- (1)地下管對土壤電位
- (2)陽極電流
- (3)原始結構物對土壤電位(未通電時)
- (4)結構物對結構物電位
- (5)絕緣是否良好
- (6)附近結構物之影響
- (7)結構物的連續性(單一結構時)
- (8)整流器的電壓、電流、效率設定

定期設備的檢測項目包含了下列項目：

- (1)外加電流陰極防蝕的電流源至少每三個月檢查一次，檢測的項目為電流輸出、電力消耗，電氣是否有不正常的信號。
- (2)所有受到外加電流陰極防蝕設備需每年檢查一次,以避免在使用中受到破損，檢測項目有是否短路、接地程度、計量表正確與否、電路電阻是否昇高等。
- (3)絕緣設備、電氣連通器、絕緣效率,必須定期量測。

在檢測或維護的目標中仍然以地下管線的防蝕檢測最為重要。地下管線施行陰極防蝕後例是否達到原本的防蝕目地只能利用各種電位檢測及智慧

型PIG檢測來判知防蝕狀態。上述兩種檢測法中以電位檢測較為經濟且可以自行執行的方法，這種方法雖有檢測缺陷上的限制，卻可以在防蝕檢測上得到相當不錯的定性結果。以電位檢測而言，由於地下管線接受到防蝕電流時管線會以極化後的電位來表現其目前的狀態。檢測人員則利用量測後電位的高低來研判管線是否腐蝕、包覆是否破壞及是否受到干擾。

陰極防蝕的保護準則是以鋼鐵在土壤或水中受到防蝕電流後可維持到鈍態範圍的電位，目前設定的保護電位值是以美國防蝕工程協會(NACE)於1969年所訂定的鋼鐵對飽和硫酸銅參考電極需達 -850 mV 。事實上此項標準並非絕對適用；因此防蝕工程師在設定防蝕電位時都會針對使用環境來決定是否需維持在更負的電位值，以確保抑制腐蝕行為的發生，近來也提出了(2)、(3)項電位偏移來做為保護的標準。目前常用的防蝕標準簡述如下：

- (1)鋼鐵對飽和硫酸銅參考電極之電位需達 -850 mV 。
- (2)在施行陰極防蝕控制時，結構物的電位須由原來的電位值向負方向移動 300mV 以上。
- (3)在施行陰極防蝕控制後，結構物的極化電位須向負方向移動 -100mV 。

(2)、(3)兩項準則對防蝕效果判定上較為準確，但在實際檢測方法都較為困難，因此目前仍以使鋼鐵電位維持在 -850 mV 以下的準則最為普遍，但為避免造成誤判，可定期紀錄結構物的電位值，若出現電位逐漸向正方向移動時，再進行極化電位量測，如可簡化檢測程序，也可避免誤判。電位的檢測可以定期量測管線各監測點的電位，量測的週期可以每月一次或每季一次，根據電位曲線來判斷防蝕防蝕系統是否正常運作及管線概略的防蝕狀態。但此種方式僅能作為現場操作人員初步的研判，因為這種檢測結果缺乏全面性及無法看到管線的各點狀態，因此目前國內外的公司都已採用緊密極化電位量測來得更準確的電位值，來研判缺陷及防蝕狀態^{[7][8]}。

緊密極化電位是讀取管線在防蝕系統下通電與斷電時的電位，而電位的讀取是以數公尺的長度為量測距離單位讀取管線任一點的電位，精確程度高，在專業人員分析下可以找出管線包覆的缺陷及腐蝕程度。

在量測地下結構物時，參考電極究該放在什麼位置，仍令人相當困擾，由於土壤環境的差異造成各地區土壤的 $IR\text{ Drop}$ 都不相同，而一般的保護電位所讀出來的值都包含了所在位置和結構物間之 $IR\text{ Drop}$ 。因此有些地方量測值為 -850 mV ，卻仍發生腐蝕也就是量測的電位無法讓操作人員瞭解結構物上每點之狀態，這種 $IR\text{ Drop}$ 不同所造成的誤差，經常被忽略。 $IR\text{ Drop}$ 包含在保護電位中，如下式所示：

$$E = E_p + V_{IR} \dots\dots\dots(1)$$

E =保護電位值

E_p =管線上之極化電位(真實電位)

V_{IR} =土壤中所產生的 IR Drop

E_p 為結構物接受到陰極防蝕電流的真正電位，即極化電位，而根據該式 (1)若能消除 V_{IR} 或量出 V_{IR} ，可得到 $E = E_p$ 或 $E_p = E - V_{IR}$ 即電位計上出現的電位值等於極化電位或經由計算而可得 E_p 。求得極化電位的方式，一般在應用上雖有多種方式，但在工程應用上以斷電法最為可行及準確。

斷電法量測緊密極化電位是使用電流間斷器，串聯在陰極防蝕系統電路中，間斷器以固定頻率將防蝕電源開路及閉路，當電源切斷時防蝕電流為零。方程式(1)演變為方程式(2)

$$E = E_p + V_{IR} \dots\dots(1) \qquad V_{IR} = I \times f(R) = 0$$

$$E = E_p \dots\dots\dots(2)$$

在以瞬間所獲得到以電位即為極化電位，實際之量測方式如圖 11 說明。

斷電時瞬間電位的讀取需要以記錄器來讀取，斷電的時間間隔不可太長，一般在 0.5 秒內，否則會導致結構物的去極化作用，而產生所得到的電位為去極化後之電位。若有兩個以上整流站則使用同步斷電器來間斷電源，以避免干擾而讀取不正確的電位。

在工程實務緊密電位及極化電位是同時進行，其檢測時設備配置見圖 11。管線保護電位量測及緊密極化電位量測的設備及量測的方法分別如下說明。



圖 11 緊密極化電位配置圖

3.1 管線保護電位量測法

3.1.1 設備

- (1)高輸入阻抗電錶(電位計)
- (2)飽和硫酸銅參考電極
- (3)導線

3.1.2 量測程序

- (1)將電錶調至電壓量測功能
- (2)以導線連接參考電極
- (3)將另一條導線連接地下結構物之測試端子,或露出地面之結構物,如閥。
- (4)移動參考電極至所要量測結構物之正上方
- (5)讀取電位值

3.2 緊密電位量測法

緊密電位量測的目的在判斷長途管線防蝕效果、管線陰極區及陽極區甚至可以判斷包覆劣化之程度，緊密電位之量測距離。一般 3 至 5 公尺，量測時由於需沿管線測量長度經常長達一公里，因此導線以使用細銅線以減輕量測時導線之重量及擴充性，量測的方式如一般保護電位。

3.2.1 設備

- (1)高輸入阻抗電錶(電位計)
- (2)飽和硫酸銅參考電極
- (3)導線長度一公里以上

3.2.2 量測程序

- (1)由地下管線測試端子連接導線至電錶一端。
- (2)將參考電極連接之電錶另一端。
- (3)讀取管對地電位值。
- (4)延長導線，移動參考電極距上一測試點 3 公尺，讀取電位。
- (5)根據所讀數據作電位對距離作圖，即可判斷地下管線各項防蝕狀態。

3.3 極化電位量測法

3.3.1 設備

- (1)輸入高阻抗電錶(電位計)
- (2)電流間斷器
- (3)記錄器
- (4)飽和參考電極
- (5)導線

3.3.2 量測程序

- (1)將電流間斷器的 ON/OFF 分別設為 1.5 秒/0.5 秒或 1.6 秒/0.4 秒。
- (2)設定間斷器啟動時間
- (3)將間斷器串聯至 DC 整流器之輸出端。
- (4)設定記錄器讀數值之時間需大於 2 秒(1.5 秒+0.5 秒)
- (5)將連接參考電極之導線接至記錄器之負端,連接地下結構物的導線接至電位記錄器之正端。
- (6)待間斷器啟動後按下參考電極之開關記錄電位值。

緊密電位和極化電位的同時應用可以確立管線的每一位置的防蝕及包覆狀態提供了是否需開挖修覆的依據。圖 12 及圖 13 為緊密極化電位量測的量測結果及管線所對應的狀態。

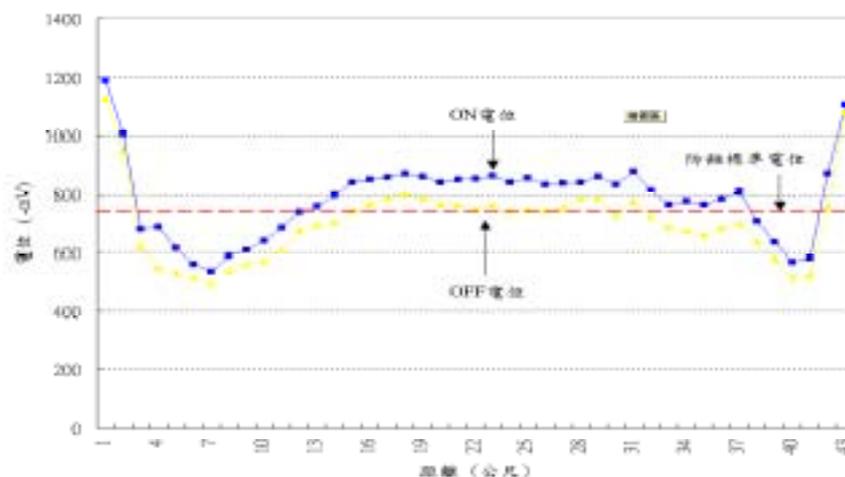


圖 12 地下管線緊密極化電位曲線圖



圖 13 為圖 12 曲線圖管線之對應狀態

四、結論

地下管線的陰極防蝕對企業來說是一種看不見回收的投資，因此在主客觀來說常常受到忽略，國內發多次油料及天然氣油漏事件後，大家才開始投入心力維持管線陰極防蝕系統，管線的腐蝕及漏洩卻依然發生，主因是雖然瞭解陰極防蝕的重要卻忽略在施工過程應專注的程序及標準，也使得後續操作和檢測的困難，這種施工過程中的疏忽，使得必須花上大量人力和財力去做改善、維護和檢測。陰極防蝕系統在管線操作期間的變動是非常小，因此良好的施工將是確保陰極防蝕成功的最重要步驟，而操作過程中定期而準確地進行檢測及維護工程絕對可以確保管線安全延長操作壽命，降低工安環保事件，更可有效降低事業單位之營運成本。

參考文獻

1. G.D. Fauque, in Sulfate-Reducing Bacteria (ed., L.L. Barton), p. 217-241, Plenum Press, New York, NY (1995).
2. NACE Basic Corrosion Course, NACE, 1973, Houston, Texas.
3. W.V.Baeckmann, etc. Handbook of Cathodic Protection, 3rd. Gulf, Houston, Texas.
4. NACE Standard RP-286, The Electrical Isolation of Cathodically Protected Pipelines, 1986
5. Zinc Anode Grounding Cell, Kbasco Service Incorporated.

6. NACE Standard RP-169-83,1983
7. D. Slatter, M.C. Davidson, J.P. Grapiglia and W.T. Wong, Material Performance, Feb. 35 (1993).
8. Y.B. Cho, K.W. Park, K.S. Jeon, H.S. Song, D.S. Won, S.M. Lee and Y.T. Kho, in Proc. of the First Int. Pipeline Conf., Book No. H1048A, ASME, New York, NY.

海底管線陰極防蝕工程監工實務與維護管理

李皇章*

摘要

海底輸油氣管線外部銹蝕之防制措施，業界通常是同時使用外部防蝕塗裝及陰極防蝕，防蝕塗裝提供避免外部銹蝕之主要及第一層保護，而陰極防蝕則是提供管線塗裝受損壞處之防蝕保護，海底管線之陰極防蝕通常使用合金手鐲式犧牲陽極(Bracelet-Type Alloy Sacrificial Anode)。

海底管線設置及修護費用龐大，設計使用年限可能達數十年，因此包括海底管線陰極防蝕在內保護措施之施作品質及後續維護管理之執行，為確保海底管線安全操作之最重要課題之一，本文主要目的為提供有關海底管線陰極防蝕工程施工階段，包括犧牲陽極之鑄造、安裝，之監造實務，以及海底管線操作營運階段檢測計畫之執行經驗，以供參考。

The General Practice on Sub-marine Pipeline Cathodic Protection Work Supervision and Maintenance

Huang-Chang Lee

ABSTRACT

A combination of external anti-corrosion coating and cathodic protection system is normally required to provide protection for a submarine pipeline against external corrosion. The anti-corrosion coating is the primary barrier to prevent external corrosion while the Cathodic Protection system is used to provide protection at areas of coating damage or deterioration. Bracelet-Type Alloy Sacrifice Anode is usually used in a submarine pipeline cathodic protection system.

Offshore pipeline project usually requires large capital costs and is designed for a

* 中國石油公司天然氣事業部工務室 經理

service life in some cases up to 50 years. To ensure the integrity of the offshore pipeline in its service life, strict enforcement of quality plan for the manufacturing and installation of cathodic protection systems during construction period and adequate Cathodic protection system inspection and maintenance programs during operation are considered to be among the most important concerns for a offshore pipeline operator.

一、前言

海底管線預防外部銹蝕所使用陰極防蝕保護，除較短管線或近岸段管線可能使用外加電流系統外，最常使用者為犧牲陽極系統，該系統一般設計成獨立自足系統，所使用犧牲陽極塊則直接安裝在管線上，通常海管陰極防蝕系統設計使用年限即為受保護海管之設計年限。

陽極塊一般均以等間距方式安裝在海管上，其間距通常為 10 至 16 節鋼管長，海管通常每一節長度為 12 m，亦即約每 120 至 200 m 安裝一陽極塊；為避免海上佈放管線時受倒夾具(Tensioner)損壞海管外部混凝土包覆(Concrete Weight Coating)及犧牲陽極，陽極塊厚度須與安裝管節混凝土包覆厚度相當，陽極塊則安裝在管節之中央位置，實務上陽極塊長度至少須達 250 mm，厚度須達 40 mm，而重量設計須使能提供至海管設計使用年限終年時防蝕塗裝預估損壞面積所需保護電流需求(參圖 1、2)。

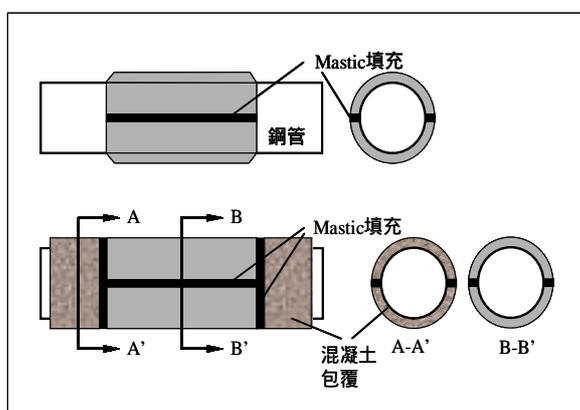


圖 1. 海管犧牲陽極示意圖

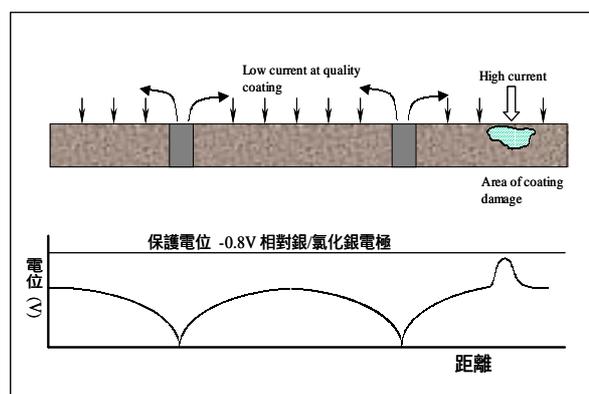


圖 2. 海管陰極防蝕保護電位變化

二、海管陰極防蝕工程辦理方式

海管陰極防蝕工程辦理方式隨業者對整個海底管線計畫招標策略考量而有不同，如採用全部統包(Turnkey)方式，一般由業者委託專業顧問公司依

選用規範提供陰極防蝕系統之基本設計及系統需求，細部設計、系統製造採購及安裝則交由統包廠商辦理，惟相關設計結果、製造及安裝程序及品保計畫仍須經業者/顧問公司審核後據以執行。

如基於計畫預算控制或時程考量，陰極防蝕系統可能由業者委託顧問公司完成基本及細部設計後，自行辦理陰極防蝕系統材料採購，再交由單獨發包之鋼管塗裝廠商或部份統包廠商進行陽極塊之安裝工作。

無論採何種方式進行，業者均須要求各廠商就其所辦理項目提出製造及/或安裝程序，以及品保計畫供業主/設計顧問審核，業主或其委託之監造顧問並據以撰寫監造計畫，以為執行期間監造之依據。

三、陽極製造

使用於海底管線之陽極通常為鋁或鋅合金模鑄手鐲式(Cast Bracelet-Type) 陽極組合，每組陽極由兩具半骨架(half shell)模鑄於軟鋼蕊(mild steel insert)上，軟鋼蕊兩端再以焊接方式固定於軟鋼夾環上。

3.1 製造程序

業主須要求廠商準備並提供所有與陽極製造相關作業之製造程序規範，包括各製程之合格認定程序，該程序規範至少須包括下列各項：

- 陽極蕊部(core)材質，表面清潔處理之程序及標準
- 材料之接收、處理及儲存
- 陽極材料化學成分之最大及/或最小含量(重量百分比)，以及不純成分之最大含量
廠商於開工前須提供化學成分證明書給業主審核
- 陽極組合之細部設計圖，包括嵌入物(insert)在陽極內位置，以及其允許公差
- 陽極蕊部焊接程序
- 陽極鑄造前蕊部準備程序
- 陽極鑄造程序，包括溫度控制及添加合金成分
- 陽極之檢驗及測試
- 陽極之標示及標誌
- 包裝、儲存及運送

3.2 品質控制

於開始正式生產前，廠商須提交其 OA/QC 計畫給業主審核，業主並得於正式生產製造期間隨時就廠商之所有相關工作進行查核，業主應依據廠商之檢驗及測試計畫標示任何停留點，以便配合進行驗證。

3.3 材料及鑄造

業主應明定犧牲陽極材料化學成分含量上限，廠商須依據該規定條件驗證所有陽極材料，驗證程序可以包括實際測試或審查供應商提供之證明文件，所有不合格材料須予標示並隔離。

材料、焊接、表面清潔處理及陽極蕊部之最後檢驗，以及陽極面對鋼管面之塗裝等須符合參考規範所訂定之標準，如 NACE、SSPC SP-01、10，或 DNV RP F103 等。

所有與陽極蕊部準備及陽極鑄造相關之作業廠商須依據業主核定之製造程序規範規定進行，包括所使用之設備及程序，除非事先經業主核可，前述製造程序規範不得變更。

3.4 陽極之檢查及測試

陽極檢查及測試之重點規定及要求至少須包括：

- 廠商負責進行規定測試及分析人員必須有具合格證照 (NACE 所發證照) 及一定教育程度及工作經驗，同時所有檢驗程序及報告須經合格證照人員簽署。
- 廠商必須進行陽極合金化學成分分析之時機、頻率，以及結果認定方式。
- 廠商須依規定方法進行陽極合金化學成分分析，以決定陽極之化學成分。
- 廠商須確定合金電化學特性符合業主規定最低需求，包括：
 - ◆ 模擬實際海底管線安裝處海水溫度及鹽度範圍內環境下之閉路電位；
 - ◆ 電流效率百分比；
 - ◆ 能量能力(Energy capability)，amp-hr/kg
 - ◆ 消耗率(Consumption rate)，kg/amp-year

- 廠商須提供合適精度之秤以控制陽極組合之重量，並須符合業主規定之重量限制範圍，每一陽極淨重並須清楚標示在陽極上。
- 在陽極包裝及運送前須以目視檢查所有陽極是否有超過業主規定尺寸限制之裂縫，包括裂縫寬度、長度及沿陽極圓周角度。檢測方法及依據。

為利於檢查測試之進行及業主查核，所有檢測項目、時機或頻率、範圍及標準須於檢查及測試程序書內以列表表示。

3.5 文件及標誌

為利於產品追蹤，業主應於採購規範內明確規定有關陽極標誌及文件格式，廠商須將業主之規定納入製造程序規範及檢驗及測試程序書內。

標誌及文件規定之基本需求是，所有製造過程中所進行之所有檢驗及測試結果均需完整紀錄，並可追蹤至任何單一陽極或批號，包括陽極蕊部證明文件或塗裝材料。

四、陽極安裝

4.1 陽極安裝方式設計

一般海管犧牲陽極固定於管線及電氣接線方式由陽極製造廠商提供細部設計，實際安裝、固定及電氣接線則由包覆廠商辦理。

包覆廠商須依陽極製造廠商之設計圖將犧牲陽極安裝於防蝕塗裝管上，手鐮式陽極一般以螺栓方式將軟鋼夾環鎖緊固定於塗裝管上，兩條電氣連接線一般以灼熱焊接(thermite welding)，如圖 3、brazing 或 explosion 焊接方式與鋼管相連接。

陽極固定設計如採螺栓方式應計算佈管時可能產生之最大剪力以為驗證，陽極組設計並應確保電氣導線受到保護，該保護可以是將導線設計置於兩半塊陽極塊間之縫隙內再以適當填充料保護(如照片 1)；

陽極組固定設計如採焊接方式，則焊接程序應特別注意避免焊接進行時產生過熱而傷及管材。

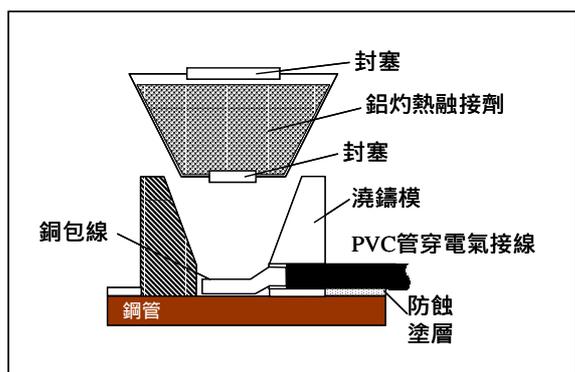


圖 3. 陽極電氣接線以 Thermite Welding 方式與鋼管連接



照片 1. 兩片陽極間以 Mastic 填充

4.2 安裝程序規範

鋼管包廠商須針對犧牲陽極安裝相關工作提出安裝程序規範供業主審核，程序規範至少須包括：

- 材料及設備規範，包括證明文件及材料表
- 陽極收料、處理及儲存
- 陽極安裝詳細設計圖，包括允許公差
- 陽極固定之檢驗及測試
- 設計、材料及檢測紀錄文件管理

4.3 陽極安裝

所有安裝工作須依據核可之安裝及焊接程序嚴格執行，陽極安裝於防蝕塗裝鋼管上之位置應依業主之規定(一般位於鋼管中央位置)，陽極安裝之鋼管如有混凝土配重包覆，則安裝程序應特別針對避免混凝土包覆層內加勁鋼筋與陽極塊直接接觸提出預防措施。

廠商安裝程序須包括任何因陽極安裝作業導致之鋼管塗裝損壞之修護及填充料澆灌程序，並須符合業主規範規定。

4.4 檢驗及測試

有關犧牲陽極安裝於塗裝鋼管之檢驗及測試程序至少須包括下列項目：

- 接頭固定目視檢查。
- 電氣連接線連接與否目視檢查。
- 電氣連接線與鋼管接頭須以帶硬質橡膠襯墊榔頭敲擊，以確認焊接穩固。
- 量測陽極與鋼管間電阻，以確保兩者間無通電接觸。
- 量測陽極與混凝土包覆層鋼筋間電阻，以確認兩者間無通電接觸。
- 陽極表面必須維持乾淨，如有沾染混凝土、填充料或其他外物應即去除。

五、維護管理

海管工程完工進入操作營運階段後必須擬定管線內、外部檢查及修護計畫，以確保海管操作安全，海管陰極防蝕系統是其中重要項目之一，檢查目的在確認陰極防蝕系統正常運作，符合設計規範須提供之適當防蝕保護，以及評估計算陽極之剩餘壽命。

陰極防蝕系統檢查之時機及頻率目前並無統一標準可供依循，一般較常被接受採用之建議為於海管安裝完成後一年即進行一次檢查，以確定陽極功能正常，後續檢查則持續進行至設計年限之一半，檢查頻率則視每次檢查結果以決定下次檢查時機，因為鋼管防蝕塗裝在海管操作營運初期應仍處於良好狀況，因此完成第一次檢測後如無異常狀況，間隔較長時間後再進行第二次檢查是可以接受。

經由防蝕系統檢查，建立沿海底管線及陽極處之防蝕電位變化，以及量測電位梯度圖，正常狀態使用鋅陽極電位應在-800 mV 與-1050 mV (ref. Ag/AgCl) 之間，如為鋁陽極則應為-800 mV 至-1100 mV。

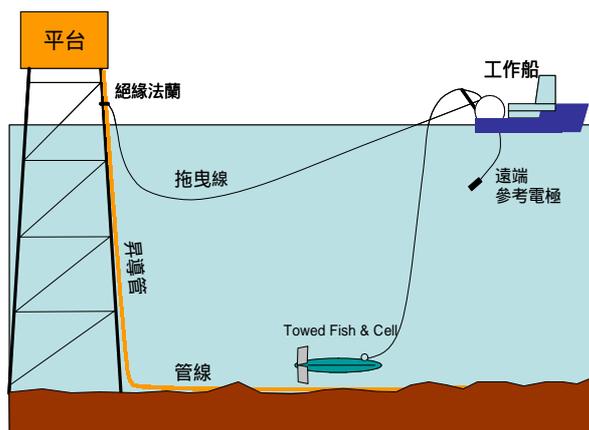
5.1 檢查方法

目前海底管線陰極防蝕檢查工作業界最為普遍使用的方法有拖曳線檢測法(Trailing Wire Method)及電極對電極(CTC)檢測法兩種，兩種技術簡要說明如下：

1. 拖曳線檢測法 (Trailing Wire Method)

本法典型進行方式如右圖所示，電位由控制於接近管線正上方拖魚

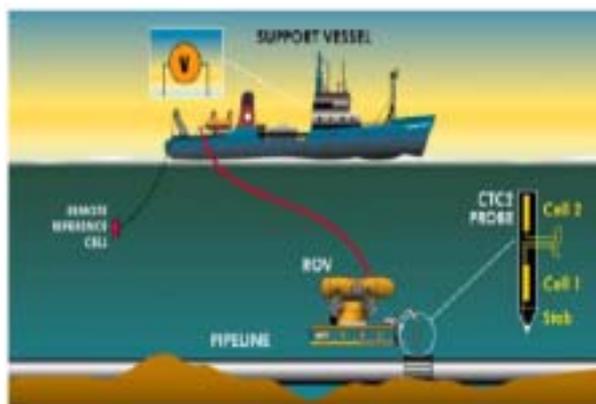
(Towed Fish) 量測，拖曳線(通常為 Copper Wire)連接於海上平台昇導管，遠端參考電極本系統僅能測量防蝕電位沿管線變化，適用於管線掩埋之電位量測，因埋管之故進行時無法進行與鋼管接觸量測，所量測數據精確度及可信度不高，因此僅能提供防蝕保護水準之一般性評估，不能用於評估犧牲陽極效能；另本法受到拖曳線長度限制，



，僅適合於長度在 30~40 公里以內海管防蝕量測，特別適用於海域平台間集流管線，或平台與水下生產井間管線，有時也使用於近岸段海管之量測，此時拖曳線則繫接於岸上測試點，如果技術可行，本法進行時至少每 1~2 公里應進行一次與鋼管之接觸量測，以避免系統量測之偏離。

2. 電極對電極法(Cell to Cell)

針對長途海底管線檢查目前業界普遍使用所謂”Cell to Cell (CTC)”檢測法，進行方式及佈置詳如右圖所示，內含電極之量測探針(Probe)安裝於水下遙控載具 (ROV)機械臂上，ROV 航行於海管上方並控制使探針垂直於管線(探針朝管線中心)，由於保護電位於鋼管表面起 1m 範圍變化最大，



，2~5m 電位變化就不顯著，因此探針與管線距離應維持小於 1 米，所量測電位才能反映該處實際電位變化，同時為避免量測數據隨距離增加產生偏離，檢測時如發現暴露鋼管或陽極探針應與陽極接觸以取得該處絕對電位，原則上量測時至少每 1 公里應進行一次接觸量測，以取得局部絕對電位值，作為系統校正之用。

本法除可量測連續電位外，如使用內含雙電極(示意圖探針內之 Cell 1 及 Cell 2)探針，則除電位量測外，並可藉由探針內兩分開一定距離電極分別量測之電位及該距離計算出電位梯度(Field Gradient)，該電位梯度資料配合陽極相關設計資料可以估算陽極剩餘服務壽命，以及評估防蝕包覆損壞狀況。

由於探針與鋼管距離及探針與陽極鋼管接觸量測直接影響本法所測得數據之精確度及可靠度，也因此本檢測技術較適用於未掩埋或淺埋海管之檢測，如屬後者則水下遙控載具(ROV)必須增加鋼管追蹤器(Pipe Tracker)，以確認淺埋管線位置。

本檢測工作所需之設備除上述電極對電極檢測系統及水下遙控載具外，至少尚需要下列設備：

- 工程用差分衛星定位系統(DGPS)，提供工作船正確定位；
- 短距定位系統(USBL)，提供水下遙控載具相對工作船之定位；
- 水下攝影設備，供 ROV 操作人員操作及海管目視檢查用；
- 羅經(Gyrocompass)、水深儀(Altimeter)，提供 ROV 方位及水深位置；
- 聲納側掃系統(Sonar Scan)、海床地形聲納系統(Bathymetric System)，偵測 ROV 週遭地形變化及障礙物；
- 管線追蹤器(Pipe Tracker)；
- 資料蒐集、處理及儲存、繪圖電腦軟硬體設備

5.2 檢測實務

長途海底管線進行全線陰極防蝕檢查工作，基於技術及經濟性考量，宜配合其他海上檢查項目合併進行，例如側掃聲納(Side Scan Sonar)、淺層剖面儀(Sub-bottom Profiler)及多音束聲納儀(Multi-beam Echo sounder)等檢查項目，在規劃上可安排先進行側掃聲納及淺層剖面儀檢查工作，主要考量是經由前述兩項檢查工作，可以取得管線確切埋設位置，以及埋設深度或暴露懸空管線分佈等資料，再依此等資料規劃全線或僅就暴露或淺埋管段進行陰極防蝕檢查工作。

經常因受管線埋深或海域天候影響，全線檢查並不可行，則僅能就確認暴露或懸空管線進行陰極防蝕檢測工作，至於掩埋部份，實務上可依據定期安排進行之管線內部智慧型檢測器(Intelligent Pigging)檢查工作，評估管線外部腐蝕狀況，如有發現異常可疑區域，再針對該區進行檢查，此項局部地區檢查，可能須進行管線局部噴挖工作，以達檢查之目的。

為確保檢測之品質，負責檢測工作之廠商應提出完整檢測工作執行計畫書，內容至少應包括：

- 檢測範圍及項目
- 檢測設備及規範

- 計畫時程及檢測程序
- 各項主要設備儀器，包括衛星定位、量測設備之初始校正及測試程序及檢測期間校正程序
- 資料整合、收集、處理、分析及儲存程序
- 品保及品管程序
- 工作團隊組織、人員及職掌
- 緊急應變程序
- 檢查報告內容及格式

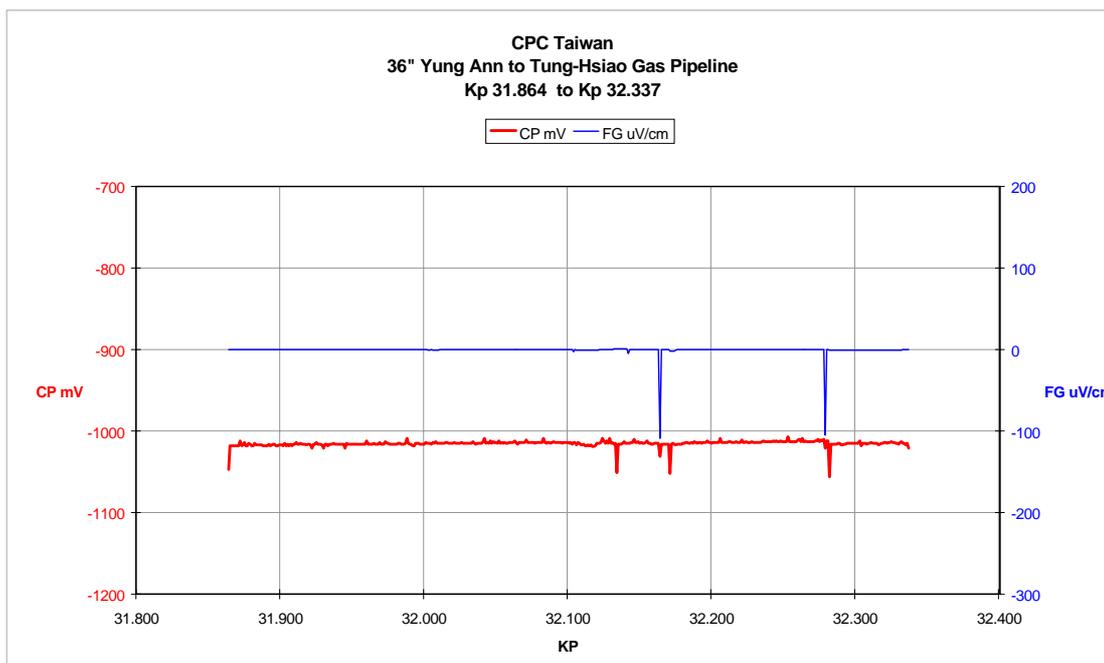
為確保檢查工作順利進行，重要儀器設備或易損耗項目應有足購備品以供換修，重要設備如衛星定位系統、導航系統等至少須配備兩套，以備不時之需，在設備規範部份，應依檢測地點水深及天候條件，尤其是海流條件，選定足夠馬力等級之水下遙控載具，以及操作水下遙控載具所需控制管束(Control Umbilical)長度，以利檢測工作之進行，。

為利於檢測工作有效率進行，工作船上應備資料處理分析、繪圖系統，以便即時進行初步資料處理及分析工作，確認所取得資料符合需求條件後方可繼續進行檢查工作，否則即應重行檢查，或者經初步分析發現明顯異常狀況，應即評估是否需要進行進一步檢查。

5.3 檢測結果

沿管線量測所得電位變化圖提供管線防蝕保護水準之評估，如防蝕電位在-800 mV 及-1050 mV (相對 Ag/AgCl, 鋅陽極)之間，或-800 mV 及-1100 mV(鋁陽極)之間則表示管線受到良好保護，如防蝕電位更正於-800 mV，表示管線防蝕保護程度不足，而如更負於-1050 /1100 mV，則須注意鋼管發生氫脆化及疲勞破壞可能性，如管線係埋管狀態，則量測之電位值應更負於-900 mV，才能視為管線已獲得足夠保護。

現場電位梯度資料可用於進一步分析評估陽極輸出電流、防蝕包覆損壞地點之電流分佈，陽極輸出電流可用於計算陽極消耗及剩餘壽命，典型檢測結果如下圖。



一般檢查結果可歸類如下：

1. 防蝕保護良好，即
 - 低電位場強度，低陽極電流輸出。
 - 防蝕電位水準介於-900 mV 及-1050 mV 之間(相對於 Ag/AgCl，鋅陽極)，或介於-900 mV 及-1100 mV 之間(相對於 Ag/AgCl，鋁陽極)。
2. 防蝕保護不佳，即
 - 高電位場強度，高陽極電流輸出。
 - 陽極位置有較大電位差。
 - 管線局部地區發現高電位場強度。
 - 電位水準正於-850 mV。

六、結語

中油公司除現有操作營運中永安至通霄長 237 公里 36 吋海底氣管外，目前正規劃埋設另一條由台中港至桃園大潭長 135 公里 36 吋海底氣管，預估民國 96 年底完成後，兩條海管將負擔大部分天然氣輸送任務，合計投資金額超過新台幣 250 億，海管操作安全重要性不言可喻，筆者曾參與第一條海管之設計、構建，以及初期營運階段檢測工作，在陰極防蝕檢測部份，一

方面因海管係採埋管設計施工，另一方面因受限於台灣海峽潮汐及洋流限制，經評估後僅選定幾處較長暴露管線進行檢測，檢測結果經評估防蝕包覆仍屬完好，電位水準符合規定水準，犧牲陽極未發現明顯活動，顯示海管防蝕保護均為正常。

本文目的係就海管計畫執行期間與陰極防蝕工程執行部份提出實務經驗，希望藉由本文發表獲得業界先進回饋及指教。

參考文獻

1. DNV RP B401 Cathodic Protection Design.
2. DNV RP F103 Cathodic Protection of Submarine Pipelines by Galvanic Anodes.
3. Andrew Palmer (Cambridge University), Cathodic Protection, Offshore Pipeline Engineering 2001.
4. DNV Final Report for Inspection Technology & Equipment Specification Manual Revision 3.
5. 中油公司，台中-通霄-大潭 36 吋海底輸氣管線工程，鋁陽極規範書。
6. 中油公司，台中-通霄-大潭 36 吋海底輸氣管線工程，海底管線混凝土包覆規範。

附 錄

港灣構造物陰極防蝕準則（草案）

港灣構造物陰極防蝕準則(草案)

目 錄

附錄 A 鋼筋混凝土構造物

第一章 總則.....	附 A1-1
1.1 適用範圍	附 A1-1
1.2 內容概要	附 A1-1
1.3 參考規範	附 A1-3
第二章 陰極防蝕設計前之調查評估	附 A2-1
2.1 前言	附 A2-1
2.2 構造物背景資料收集	附 A2-1
2.3 目視檢測	附 A2-1
2.4 保護層測量	附 A2-1
2.5 剝落層位置調查	附 A2-1
2.6 鋼筋導電性測試	附 A2-2
2.7 腐蝕電位量測	附 A2-2
2.8 混凝土電阻係數	附 A2-3
2.9 報告	附 A2-3
第三章 陰極防蝕系統設計需求	附 A3-1
3.1 陰極防蝕系統選擇	附 A3-1
3.2 陰極防蝕系統功能需求	附 A3-1
3.3 電流分佈原則	附 A3-2
3.4 外加電流式陰極防蝕系統之餘裕度	附 A3-3
3.5 陰極防蝕系統監測設計	附 A3-3
第四章 材料及裝置.....	附 A4-1
4.1 混凝土修補及鋪面材料	附 A4-1
4.2 陽極材料	附 A4-2

4.3 交流電源.....	附 A4-3
4.4 整流器	附 A4-3
4.5 導線	附 A4-5
4.6 數位伏特計	附 A4-6
4.7 參考電極	附 A4-7
第五章 系統安裝.....	附 A5-1
5.1 系統安裝總則	附 A5-1
5.2 既有構造物劣化調查	附 A5-2
5.3 鋼筋電連通性測試	附 A5-2
5.4 既有構造物混凝土表面準備	附 A5-3
5.5 負極、監測電極的安裝	附 A5-3
5.6 混凝土修補	附 A5-4
5.7 陽極安裝	附 A5-5
5.8 配電安裝	附 A5-6
第六章 試車運轉及驗收.....	附 A6-1
6.1 運轉前系統確認與測試	附 A6-1
6.2 系統試運轉	附 A6-1
6.3 性能驗收	附 A6-2
6.4 書面資料	附 A6-2
第七章 系統操作與維護.....	附 A7-1
7.1 檢測項目	附 A7-1
7.2 系統運作中檢查	附 A7-1
7.3 性能檢測	附 A7-1
7.4 系統再確認	附 A7-2
7.5 書面資料	附 A7-3

附錄 B 鋼構造物

第一章 總則.....	附 B1-1
1.1 適用範圍	附 B1-1
1.2 內容概要	附 B2-1
第二章 基本原則.....	附 B2-1
2.1 一般	附 B2-1
2.2 陰極防蝕工法種類	附 B2-1
2.3 陰極防蝕系統選擇	附 B2-3
2.4 防蝕電位	附 B2-4
2.5 塗裝被覆鋼構造物防蝕電位	附 B2-6
2.6 裸鋼防蝕電流密度	附 B2-6
2.7 塗裝被覆鋼構造物防蝕電流密度	附 B2-8
2.8 參考規範與標準	附 B2-9
第三章 陰極防蝕系統設計	附 B3-1
3.1 陰極防蝕系統選擇	附 B3-1
3.2 犧牲陽極式	附 B3-2
3.3 外加電流式	附 B3-12
第四章 材料及裝置.....	附 B4-1
4.1 犧牲陽極式	附 B4-1
4.2 外加電流式	附 B4-2
4.3 數位伏特計	附 B4-5
4.4 參考電極	附 B4-5
第五章 系統安裝.....	附 B5-1
5.1 犧牲陽極式	附 B5-1
5.2 外加電流式	附 B5-3
5.3 完工檢查	附 B5-5
第六章 系統驗收.....	附 B6-1

6.1 防蝕性能驗收	附 B6-1
6.2 書面資料	附 B6-1
第七章 系統維護及管理.....	附 B7-1
7.1 一般	附 B7-1
7.2 檢查頻率	附 B7-1
7.3 一般檢查	附 B7-1
7.4 詳細檢查	附 B4-1
7.5 防蝕性能標準	附 B7-3
7.6 防蝕效能評估	附 B7-3
7.7 書面資料	附 B7-4
附錄 C 鋼板(管)樁碼頭陰極防蝕工程案例	附 C-1

附錄 A

鋼筋混凝土構造物篇

第一章總則

1.1 適用範圍

本準則僅適用於鋼筋混凝土構造物需陰極保護者，不包括預力混凝土構造物及金屬構造物。本準則適用於鋼筋混凝土構造物之陰極防蝕工程設計、安裝、驗收、系統操作與維護管理。

1.2 內容概要

本準則提供執行鋼筋混凝土構造物陰極防蝕工程所需之各項要求及必要遵守規定。

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

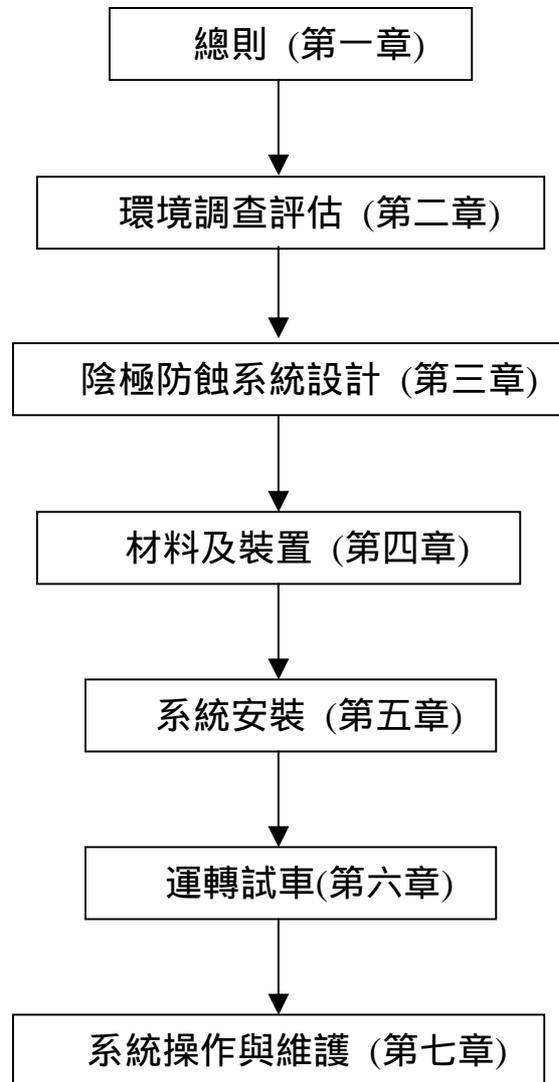


圖 1.1 鋼筋混凝土構造物之陰極防蝕工程執行流程圖

1.3 參考規範

本準則所參考之相關規範及標準包括

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

第二章 陰極防蝕設計前之調查評估

2.1 前言

鋼筋混凝土構造物若使用陰極防蝕技術作為保固方法，應進行下列調查。

2.2 構造物背景資料收集

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

2.3 目視檢測

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

2.4 保護層測量

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

2.5 剝落層位置調查

需進行陰極保護的區域，應檢查混凝土保護層剝落的情況。

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

2.6 鋼筋電連通性測試

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

解說：測試所需的次數與構造物的大小和複雜性有關，且在現場測試前很難決定。建議每 10 m^2 混凝土表面應進行一次測試，且每一構造物至少須 4 次鋼筋電連通性測試，以確認鋼筋間的電阻值低於 1 ohm 。

2.7 腐蝕電位量測

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

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

2.8 混凝土電阻係數

混凝土電阻係數量測是利用 Wenner 四極法於現場量測。

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

2.9 報告

上述所有測試結果均應詳細記錄，並轉送工程設計師參考。

第三章 陰極防蝕系統設計需求

3.1 陰極防蝕系統選擇

系統設計時應依構造物所處環境，選擇適當之陰極防蝕系統。

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

表 3.1 鋼筋混凝土陰極防蝕系統選擇

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

3.2 陰極防蝕系統功能需求

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

解說：防蝕電流密度需求視構造物之特性與腐蝕性質而定。針對埋設或水中構造物，鋼筋表面積電流密度為 5 mA/m^2 ，而針對地上構造物則為 $10\sim 20 \text{ mA/m}^2$ 。「100 mV 電位衰減量」為當陰極防蝕系統到達穩定保護電位時進行斷電，量測瞬間斷電後的電位

與斷電 4~24 小時後的電位，其差值必需在 100 mV 以上(即斷電 4 至 24 小時鋼筋電位去極化量 >100 mV)，方可確定陰極防蝕已達設計預期效果(參考 NACE Standard RP290-90)。但某些陰極防蝕系統之 100 mV 電位衰減量必須數天甚至數月始可達到，如已受防蝕保護達數月之久(或呈水飽和狀態)之構造物，電位衰減測量期間應超過 24 小時以上。

3.3 電流分佈原則

外加電流式陰極防蝕系統電流分佈，依下列準則以確保電流分佈均勻。

- (1)陽極系統應區分為若干個獨立的陽極區，且每一陽極區應有個別控制的變壓整流器輸出供電。每一陽極區的陽極應提供均勻的電流分佈，使此區域的鋼筋獲得適當的陰極保護。
- (2)陽極應裝設如下：
 - i. 陽極不得與混凝土結構內或結構表面之任何金屬元件接觸(包括鋼筋和非接受陰極保護的金屬元件)，以防止系統短路。
 - ii. 陽極與所有金屬元件必須保持適當距離，且每一陽極區域必須相互獨立。

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

3.4 陰極防蝕系統之餘裕度

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

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

3.5 陰極防蝕系統監測

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

第四章 材料及裝置

4.1 混凝土修補及鋪面材料

4.1.1 材料類型

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

針對本節的用途，修補及鋪面材料可分為三類：

- (1) 噴塗材料
- (2) 現場澆注混凝土
- (3) 鏟抹砂漿及膠結砂漿

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

4.1.2 材料性質

修補材料必須採用適當的施工方法，不得因熱效應或收縮效應而造成過度裂縫。

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

4.1.3 構成材料選用

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

4.1.4 測試

修補或鋪面材料應滿足前節所述之多項要求，並提出測試報告。

解說：修補或鋪面材料的抗壓強度於 28 日後應為 40 N/mm^2 左右。修補或鋪面材料與原混凝土間的結合強度將會影響陰極防蝕效果，故建議使用適當試驗方法(如拉拔試驗等)，進行新舊混凝土間結合強度評估。

4.2 陽極材料

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

解說：

1. 鈦網陽極

鈦陽極基材為 Titanium, Grade 1 per ASTM B265，外覆貴重金屬或其他金屬氧化物(Mixed Metal Oxide, MMO)，物理性質具延展性。其製成形狀有管狀、網狀、或條狀，對鋼筋混凝土而言，使用之陽極為網狀(鈦網)或條狀(鈦條)。鈦網網目在 $30 \times 70 \text{ mm}$ 至 $100 \times 200 \text{ mm}$ 之間，且根據實驗室的加速試驗，鈦網表面電流密度為 200 mA/m^2 時，鈦網陽極壽命約為 10-50 年，壽命的長短由金屬氧化物被覆層之厚度與消耗率而定。換句話說，陽極系統實際的壽命，取決於陽極與混凝土界面間的劣化程度，而此劣化現象的產生，是因陽極過度放電時產生的酸性產物與混凝土反應，促使混凝土劣化。因此，美國聯邦高速公路局(FHWA)及英國 Concrete Society 建議，陽極的最大電流密度應在 110 mA/m^2 以下。再者，鈦網的型式與尺寸會影響鈦網陽極提供電流密度的大小，其值約在 $10\text{-}50 \text{ mA/m}^2$ 之間。鈦陽極的安裝是以塑膠釘固定陽極於混凝土表面，且為了防止電流供應不

均，鈦陽極上方需噴塗 10-15 mm 以上的保護層(混凝土)。

2. 鋅網

使用鋅網材料成份為 ASTM B6/B69。

3. 鋅熔射

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

4. 其他陽極材料系統

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

4.3 交流電源

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

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

4.4 整流器

4.4.1 概要

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

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

4.4.2 電氣箱

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

4.4.3 控制和連接

每一台整流器的輸出應包括下列元件：

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

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

4.4.4 電子元件

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

4.4.5 整流器檢測

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

4.5 導線

4.5.1 概要

所有導線應為銅導體，蕊線以絕緣包覆，並以顏色和編號區別。

4.5.2 DC 導線

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

解說：導線尺寸通常介於 $2.5\sim 16\text{ mm}^2$ ，其絕緣包覆為 PVC、HDPE、XLPE 或其他材質。

4.5.3 參考電極導線

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

解說：參考電極用的銅導線通常為 2.5 mm^2 ，在某些情況則可使用較粗的導線。若有受電磁干擾的可能，如高電壓 AC 電纜，則應使用隔離線路。

4.5.4 導線保護

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

4.6 數位伏特計

陰極保護系統之防蝕效果需使用數位伏特計與參考電極來量測鋼筋電位。

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

4.7 參考電極

4.7.1 概要

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

4.7.2 預埋式參考電極

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

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

4.7.3 攜帶式參考電極

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

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

第五章 系統安裝

5.1 系統安裝總則

陰極防蝕系統的施工根據構造物特性區分為既有構造物與新建構造物二種工作流程。

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

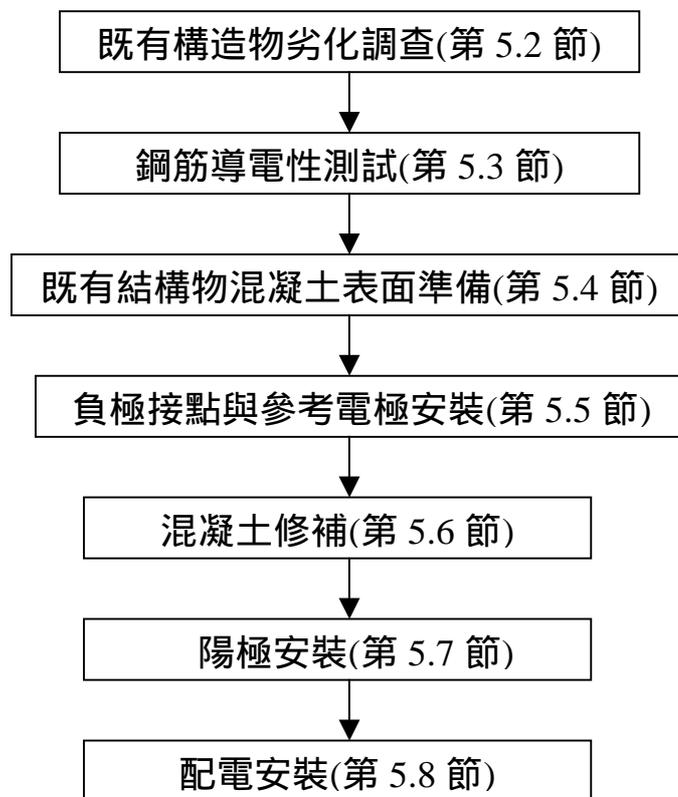


圖 5.1 既有構造物之系統安裝工作流程

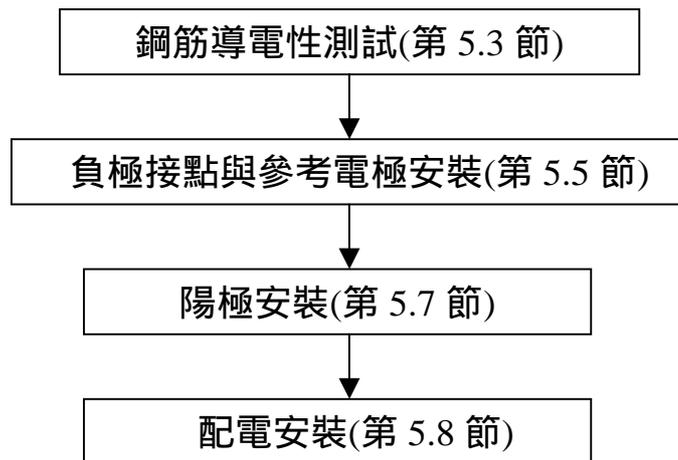


圖 5.2 新建構造物之系統安裝工作流程

5.2 既有構造物劣化調查

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

5.3 鋼筋電連通性測試

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

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

5.4 既有構造物混凝土表面準備

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

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

5.5 負極接點與參考電極的安裝

5.5.1 負極接點的安裝

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

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

5.5.2 金屬固定件

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

5.5.3 參考電極安裝

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

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

解說：混凝土修補區域參考電極的安裝，參考電極與鋼筋間的距離應小於 40 mm。若參考電極所處位置不需任何修補，參考電極與鋼筋間的距離通常為 5~40 mm。此外，為提供性能評估與驗收試驗，則參考電極的安裝應距修補區域 500~1000 mm。參考電極安裝時應注意防止電極周圍形成氣袋，且參考電極應儘量靠近混凝土內的鋼筋。

5.6 混凝土修補

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

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

5.7 陽極安裝

所有陽極系統的安装工作必須符合各陽極系統之特定規格要求。

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

1. 導電性塗料

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

2. 常溫電弧鋅熔射

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

3. 鈦網陽極

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

5.8 配電安裝

5.8.1 導線安裝

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

5.8.2 整流器安裝

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

第六章 試車運轉及驗收

6.1 運轉前系統確認與測試

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

6.2 系統試運轉

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

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

6.3 性能驗收

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

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

6.4 書面資料

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

解說：本準則建議系統設計、安裝、試運轉、操作、和維護手冊需包含以下資料。

1.設計和安裝

- 參考電極的位置、方位與可能偵測深度
- 監測設備
- 陽極材料和被覆種類
- 陽極區域/陽極安裝
- 陽極和負極連接系統
- 導線、導管與接線箱
- 鋼筋的電連通性測試
- 鋼筋電通性與連接方法
- 陽極安裝前混凝土的表面準備，包括殘留金屬或外露金屬的處理
- 電源、接地、與固定方式
- 陽極系統、被覆厚度、電阻、強度、黏性試驗結果

- 施工日期和時間(說明安裝問題和解決方法)
- 整流器之電壓與電流的最大容許值

2.系統試運轉

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

3.操作和維護手冊

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

A.節 - 操作

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

B 節 - 維護

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

第七章 系統操作與維護

7.1 檢測項目

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

7.2 系統運轉中檢查

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

7.3 性能檢測

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

7.3.1 防蝕構件的目視檢查

利用近距離目視檢查，注意構造物是否有任何損壞、腐蝕或變化的位置及其程度。

7.3.2 陽極系統檢查

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

7.3.3 裝設線路

目視檢查所有外露線路(即陽極供電、鋼筋接線和監測設備)的固定與絕緣狀況。

7.3.4 電源

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

7.3.5 性能量測

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

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

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

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

7.4 系統再確認

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

7.4.1 再確認第 7.3 節所述之性能監測所有項目。

7.4.2 預埋式參考電極功能試驗

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

7.4.3 操作資料之建議與確認

檢查操作資料，確認系統性能評估、防蝕可能效益、與系統未來運轉的建議。

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

7.5 書面資料

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

附錄 B

鋼構造物篇

第一章總則

1.1 適用範圍

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

解說：

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

1.2 內容概要

本準則提供執行港灣鋼構造物陰極防蝕工程所須之各項要求及必要遵守規定。

解說：本準則根據圖 1.1 執行一般港灣鋼構造物之陰極防蝕工程，主要工作項目包括總則(第一章)、基本原則(第二章)、陰極防蝕系統設計(第三章)、材料及裝置(第四章)、系統安裝(第五章)、系統驗收(第六章)及系統維護與管理(第七章)等。

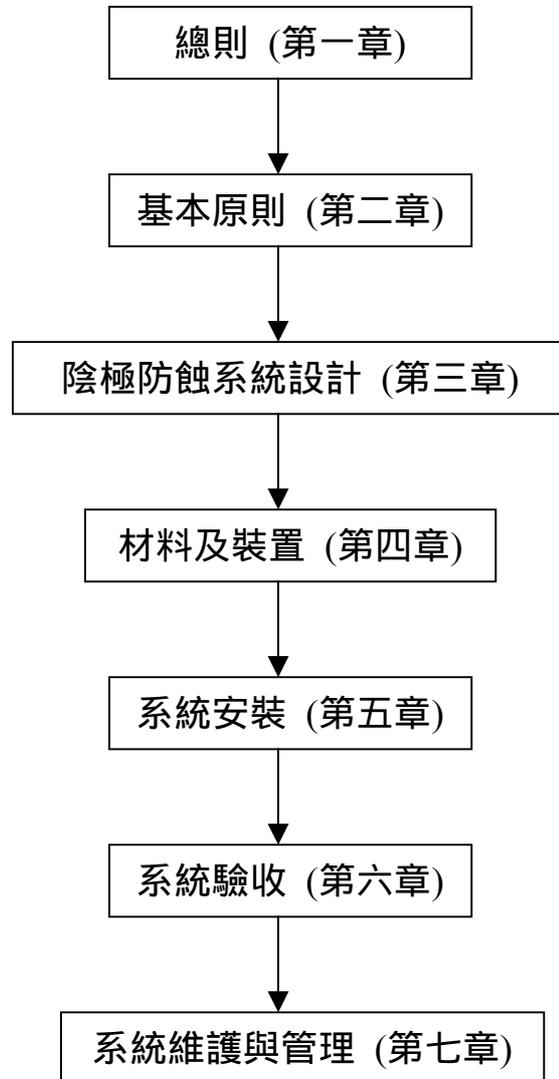


圖 1.1 港灣鋼構造物陰極防蝕工程準則內容

第二章基本原則

2.1 一般

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

2.2 陰極防蝕工法種類

- (1) 犧牲陽極法。
- (2) 外加電流法。

解說：

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

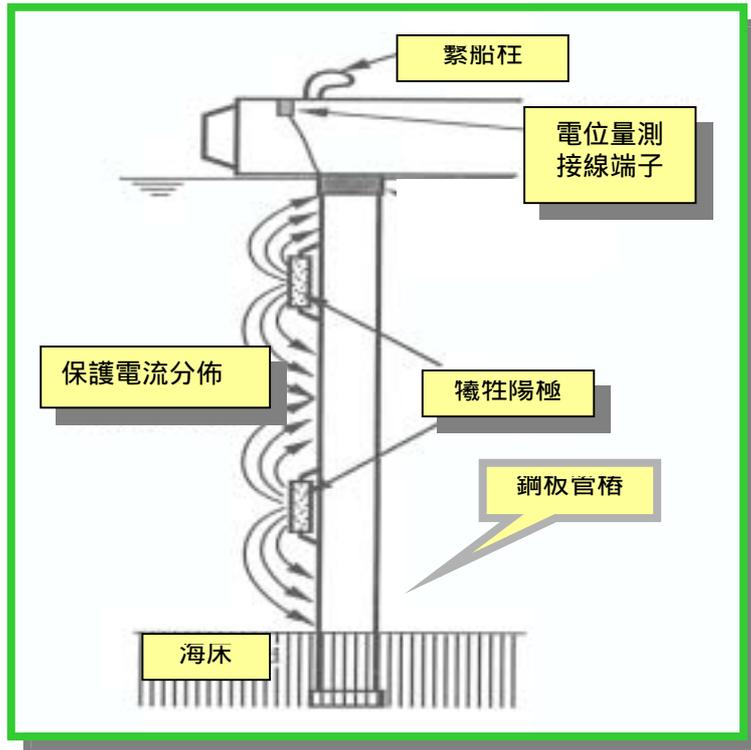


圖 2.2.1 碼頭鋼板(管)樁犧牲陽極法示意圖

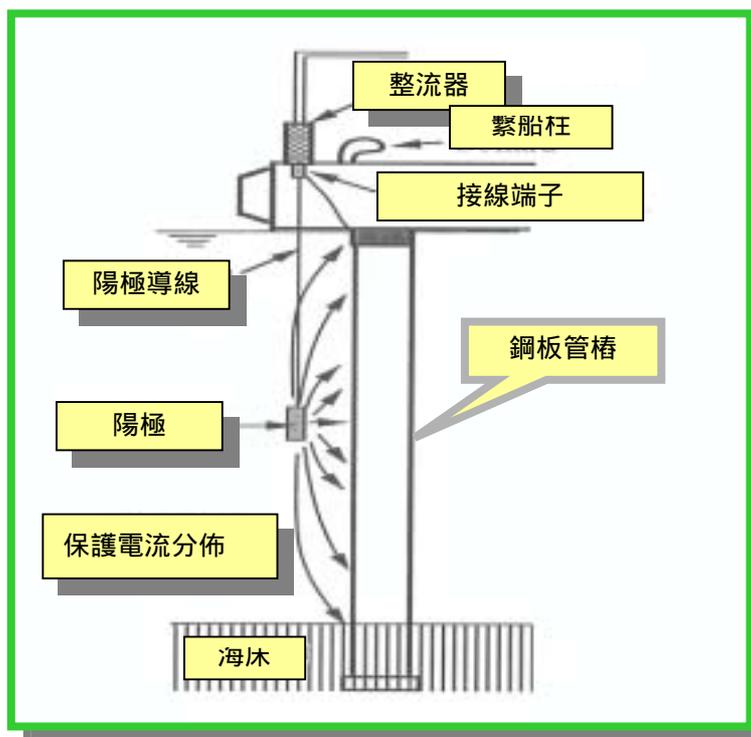


圖 2.2.2 碼頭鋼板(管)樁外加電流法示意圖

3. 犧牲陽極式與外加電流式陰極保護的特性比較如表 2.2.1 所示。

表 2.2.1 犧牲陽極式與外加電流式陰極保護的特性比較

方式	優點	缺點
犧牲陽極方式	<ol style="list-style-type: none"> 1. 裝置簡單、維護需求少。 2. 長期運轉成本較低。 3. 陽極壽命可依防蝕設計決定。 4. 適合小規模獨立性之構造物。 5. 適合於無電源的場所。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 提供之驅動電壓及保護電流有限。
外加電流方式	<ol style="list-style-type: none"> 1. 輸出電壓可自由調節。 2. 在河海水交會處或水流速度較大的環境，可有效提供防蝕電流。 3. 適用於比電阻較高的環境。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 可能會造成雜散電流腐蝕。

2.3 陰極防蝕系統選擇

陰極防蝕系統的選用，須考慮下列因素：

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

解說：陰極防蝕系統選定須考慮被保護構造物的尺寸、結構與環境。

對於港口碼頭設施，過去多採用外加電流式的陰極保護，但 1980

年代至今，因犧牲陽極材料不斷開發且防蝕性能提高，目前多採用犧牲陽極式陰極保護；但在水質變化較大的河口或是流速較大的區域，外加電流式的陰極保護系統宜併入考慮。

2.4 防蝕電位

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

解說：

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

表 2.4.1 含氧環境與厭氧環境之防蝕電位標準

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

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

表 2.4.2 海水中鋼構造物之電位標準

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

表 2.4.3 參考電極電位換算

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

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

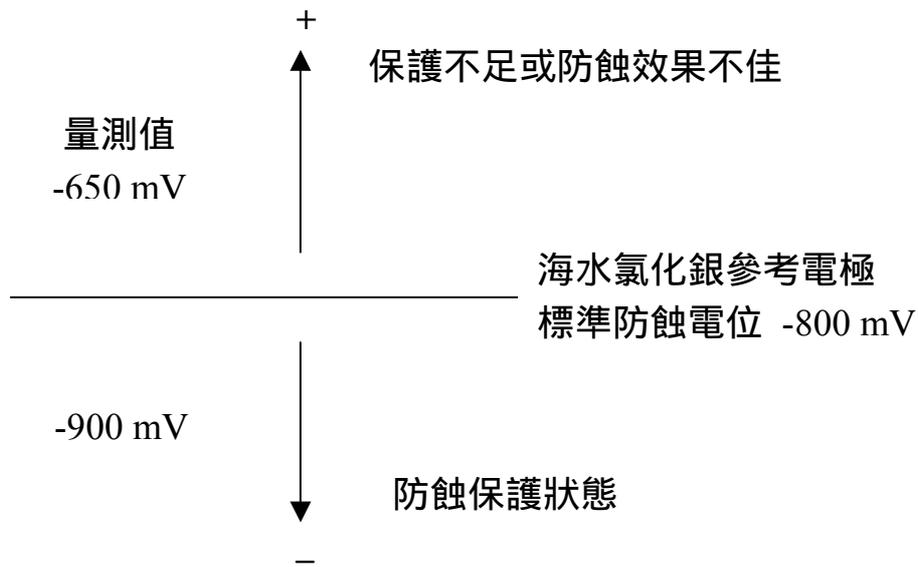


圖 2.4.1 陰極防蝕效果判定

2.5 塗裝被覆鋼構造物防蝕電位

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

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

2.6 裸鋼防蝕電流密度

裸鋼防蝕電流密度的選用因鋼構造物所處的環境而異。

解說：

1. 裸鋼陰極防蝕電流密度的選用宜參考下列標準。

環 境			陰極防蝕
			初期防蝕電流密度(mA/m ²)
一般 海域	港 灣	海水中	100
		石礫中	50
		海底土中	20
	外 海	海水中	150
		石礫中	75
		海底土中	30
特殊 海域	污 染	海水中	150
		石礫中	75
		海底土中	30
	流 速	1 m/s	160
		2 m/s	230
		3 m/s	270

1. 防蝕電流密度為鋼構造物達到防蝕電位標準或電位更”負”時，每單位面積所需的保護電流。
2. 防蝕電流密度的選用因鋼構造物所處環境的不同而有所差異；根據海象調查結果及海域腐蝕因子分析來決定防蝕電流密度，進而計算出犧牲陽極的放電量與整流器的容量。影響鋼材腐蝕特性的環境因子有波浪、潮汐、海流、海水比電阻、pH 值、水溫、溶氧量、含鹽量(氯離子濃度)、懸浮泥沙、海生物與污染程度等。
3. 海水的化學成份、溶氧量或 pH 值會受到河川或其他排水之影響。因此，在水質變化較大或硫化物濃度較高的海域，使用陰極防蝕工法須注意防蝕電流密度選用、保護電流分布與陽極配置。在厭氧性硫酸還原菌存在的環境裏，因硫化物的影響，鋼構造物會產生局部腐蝕，在此條件下，須增加防蝕電流密度。
4. 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。

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

2.7 塗裝被覆鋼構造物防蝕電流密度

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

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

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

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

i ：防蝕電流密度值，依 2.6 節裸鋼鋼構造物所在環境選用

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

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

2.8 參考規範與標準

本準則參考之相關標準及規範包括：

- (1)“陰極防蝕用鎂合金犧牲陽極”，CNS-13518，H3163，1995/4，中華民國/經濟部標準檢驗局。
- (2)“陰極防蝕用鋅合金犧牲陽極”，CNS-13519，H3164，1995/4，中華民國/經濟部標準檢驗局。
- (3)“陰極防蝕用鋁合金犧牲陽極”，CNS-13520，H3165，1995/4，中華民國/經濟部標準檢驗局。
- (4)“陰極防蝕犧牲陽極性能檢驗法”，CNS-13521，H2118，1995/4，中華民國/經濟部標準檢驗局。
- (5)“港灣設施之技術基準·同解說(改訂版)”，日本運輸省港灣局監修，日本港灣協會，1989/2。
- (6)“海域中土木鋼構造物之電氣防蝕設計指針(案)·同解說”，日本建設省土木研究所，1991/3。
- (7)“Cathodic Protection Design”，DNV RP-B401，Det norske Veritas，1993。
- (8)“Cathodic Protection, Part1. Code of Practice for Land and Marine Applications”，BSI-BS 7361，British Standard，1991。
- (9)“Corrosion Control of Steel Fixed Offshore Platforms Associated with Petroleum Production”，NACE- RP0176，NACE International，1994。
- (10)陰極防蝕工程手冊，化學工業出版社，中國大陸，1998。

解說：國外陰極防蝕相關規範之比較如下。

<p>名稱 (制定機關)</p>	<p>運輸省港灣局監修 港灣設施之技術基準·同解說 (改訂版)(1989.2) (社)日本港灣協會</p>	<p>海域中土木鋼構造物之電氣防 蝕設計指針(案)·同解說 (1991.3) (日本建設省土木研究所)</p>	<p>RP B401 (1993) Cathodic Protection Design (DNV)</p>	<p>BS 7361 Part 1: 1991 Cathodic Protection (BSI)</p>	<p>RP0176-94(Rev'd Mar. 1994) Corrosion Control of Steel Fixed Offshore Platforms Associated with Petroleum Production (NACE Int'l)</p>																																																																																																																			
<p>防蝕電位</p>	<p>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/CuSO₄) -850</p>	<p>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</p>	<p>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</p>	<p>環境參考電極防蝕電位 單位: V 含氧性環境 Cu/CuSO₄ -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/CuSO₄ -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</p>	<p>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/CuSO₄ -0.85 以下 SCE -0.78 以下 Zn +0.25 以下 Ag/AgCl [sat'd KCl] -0.75 以下</p>																																																																																																																			
<p>防蝕電流 密度</p>	<p>裸鋼初期防蝕電流密度 海水中 100 mA/m² 石礫中 50 mA/m² 海底土中 20 mA/m² 陸土中 10 mA/m² 包覆塗裝初期防蝕電流密度 塗裝 20+100S mA/m² 混凝土 10+100S mA/m² 有機被覆 100S mA/m² S: 破損率 = $\frac{\text{塗裝或被覆破損面積}}{\text{全部面積}}$</p>	<p>防蝕電流密度(mA/m²)</p> <table border="1" data-bbox="741 983 1391 1350"> <thead> <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 防蝕電流密度</th> </tr> <tr> <th>初期電流密度</th> <th>穩定電流密度</th> </tr> </thead> <tbody> <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="6">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">海外</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> </tbody> </table> <p>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</p>			環境			陰極防蝕		複合陰極防蝕 防蝕電流密度	初期電流密度	穩定電流密度	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	海外	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	<p>典型海域的設計基準</p> <table border="1" data-bbox="1547 983 2031 1410"> <thead> <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> </thead> <tbody> <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> </tbody> </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 防蝕電流密度																																																																																																																
			初期電流密度	穩定電流密度																																																																																																																				
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	海外	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																																																																																																																			

<p>名稱 (制定機關)</p>	<p>運輸省港灣局監修 港灣設施之技術基準·同解說 (改訂版)(1989.2) (社)日本港灣協會</p>	<p>海域中土木鋼構造物之電氣防 蝕設計指針(案)·同解說 (1991.3) (日本建設省土木研究所)</p>	<p>RP B401 (1993) Cathodic Protection Design (DNV)</p>	<p>BS 7361 Part 1: 1991 Cathodic Protection (BSI)</p>	<p>RP0176-94(Rev'd Mar. 1994) Corrosion Control of Steel Fixed Offshore Platforms Associated with Petroleum Production (NACE Int'l)</p>																																																																											
<p>防蝕電流 密度</p>	<table border="1" data-bbox="862 470 1391 770"> <thead> <tr> <th rowspan="2">水深 (m)</th> <th colspan="4">防蝕電流密度(A/m²)</th> </tr> <tr> <th>熱帶 (>20°C)</th> <th>亞熱帶 (12~20°C)</th> <th>溫帶 (7~12°C)</th> <th>北極 (<7°C)</th> </tr> </thead> <tbody> <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> </tbody> </table> <p data-bbox="862 778 1131 802">溫度為年平均之水表面溫度</p> <p data-bbox="862 837 1288 933">塗膜損壞率 f_c [損壞係數 x 100 (%)] f_c (平均) = $K_1 + K_2 \times \text{設計耐用年數} / 2$ f_c (最終) = $K_1 + K_2 \times \text{設計耐用年數}$</p> <p data-bbox="817 965 974 989">塗膜損壞係數</p> <table border="1" data-bbox="817 997 1391 1329"> <thead> <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> </thead> <tbody> <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> <td></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> </tbody> </table> <p data-bbox="817 1337 952 1361">DFT:乾膜厚度</p>			水深 (m)	防蝕電流密度(A/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	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	<p>防蝕電流密度</p> <p>海水中 (25Ω.cm) 初期= 100 mA/m² 穩定=30 ~ 70 mA/m²</p> <p>海底土中 10 ~ 30 mA/m²</p> <p>塗裝初期 (如 tar epoxy,厚度 =0.2 mm) 5 mA/m²</p>	
水深 (m)	防蝕電流密度(A/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	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·同解說 (改訂版)(1989.2) (社)日本港灣協會	海域中土木鋼構造物之電氣防 蝕設計指針(案)·同解說 (1991.3) (日本建設省土木研究所)	RP B401 (1993) Cathodic Protection Design (DNV)	BS 7361 Part 1: 1991 Cathodic Protection (BSI)	RP0176-94(Rev'd Mar. 1994) Corrosion Control of Steel Fixed Offshore Platforms Associated with Petroleum Production (NACE Int'l)																																																					
	犧牲陽極 電位、有效電流量及消耗量	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">特 性</th> <th>Al-Zn-In</th> <th colspan="2">純鋅、鋅合金</th> </tr> </thead> <tbody> <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> </tbody> </table> <p>* 依陽極組成成份而有所變異</p>		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	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																																																						
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">特 性</th> <th>純鎂、Mg-Mn</th> <th colspan="2">Mg-6Al-3Zn</th> </tr> </thead> <tbody> <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> </tbody> </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		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·yr)	陽極材料	陽極電位 (Volts)	有效電量 (A·h/kg)	消耗量 (kg/A·yr)
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																																																							
		Al-Base	-1.05	2000	Mg-Al-Zn	-1.5 ~ -1.7	8	Al-Zn-Hg	-1.0	2760	3.2																																															
		Zn-Base	-1.00	2500 max. 700 750 max.	Zn-Al-Cd	-1.05	12	~	~	~ 2840	~3.1																																															
		陽極電位 (vs. Ag/AgCl [sw])			Zn-Hg	-1.05	12	Al-Zn-In	-1.05	2290	3.8																																															
		海底土中			Al-Zn	-0.97	4 ~ 8	~	~	~ 2600	~ 3.4																																															
		陽極材料	陽極電位 (V)	有效電量 (A·h/kg)	Al-Zn-Sn	-1.1 ~ -1.15	4 ~ 9	Al-Zn-Sn	-1.05	930	9.5																																															
		Al-Base	-0.95	無規定	Al-Zn-Hg	-1.05	約 3.5	~	~	~ 2600	~ 3.4																																															
		Zn-Base	-0.95		電位 (vs. Ag/AgCl [sw])			Zn(MIL-A -1800lj)	-1.0	770	11.2																																															
		陽極設計利用率						~	~	~ 820	~ 10.7																																															
		陽極形狀		陽極利用率				Mg(H-1 Alloy)	-1.0	1100	8.0																																															
		Long slender		0.90				~	~	~	~																																															
		Stand-off						-1.05																																																		
		Long ¹ flush-mounted		0.85				-1.4																																																		
		Short ² flush-mounted		0.80				~ -1.6																																																		
		Bracelet		0.80																																																						
		half-shell type																																																								
		Bracelet		0.75																																																						
		Segmented type																																																								
		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																																																					
		發生電量 (A·h/kg)	2300 ~ 2750	780	1100																																																					

1)陽極長度 ≥ 4 x 厚度
2)陽極長度 < 4 x 厚度

第三章 陰極防蝕系統設計

3.1 陰極防蝕系統選擇

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

解說：

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

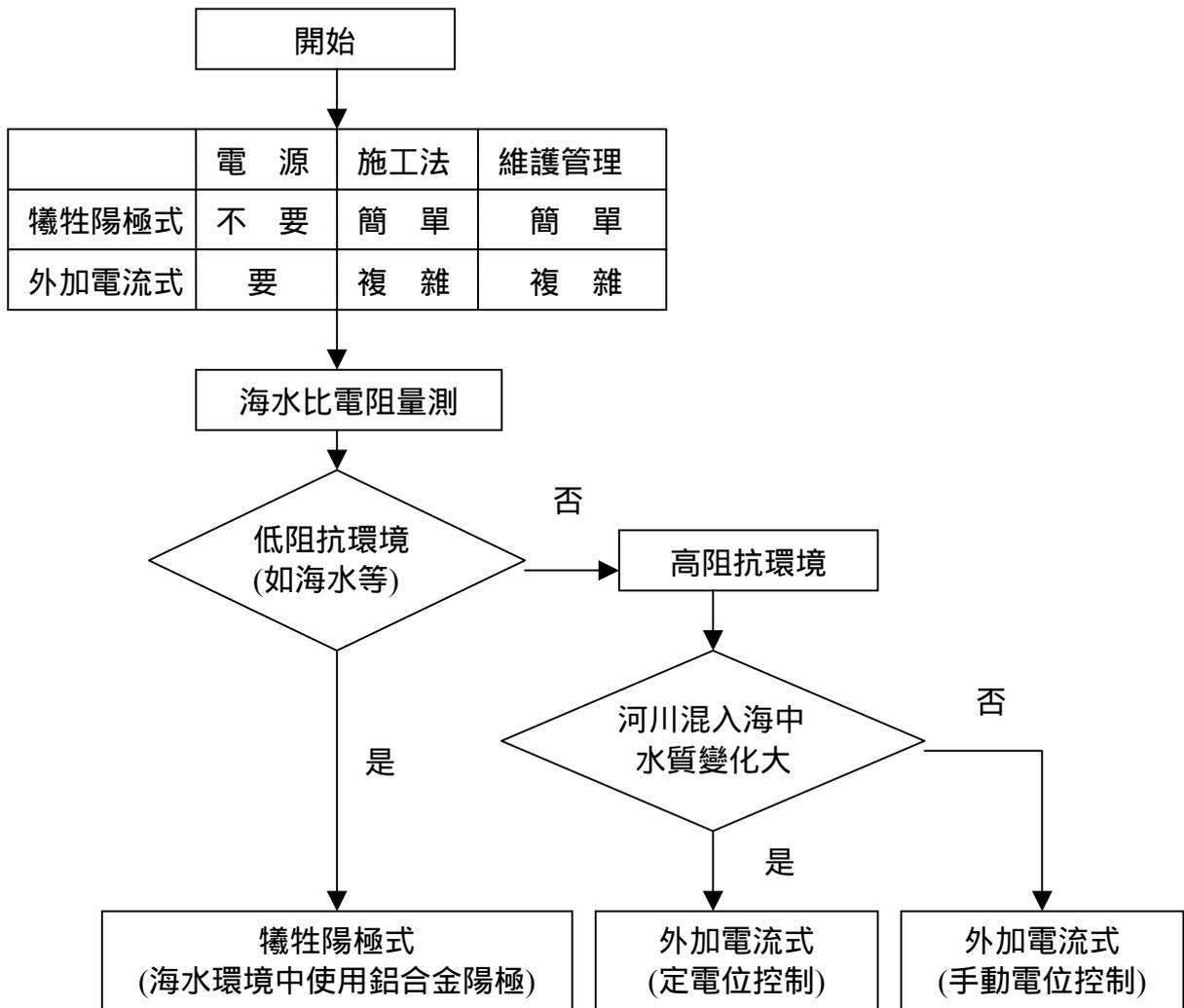


圖 3.1.1 陰極防蝕系統選擇流程圖

3.2 犧牲陽極式

3.2.1 設計基本方針

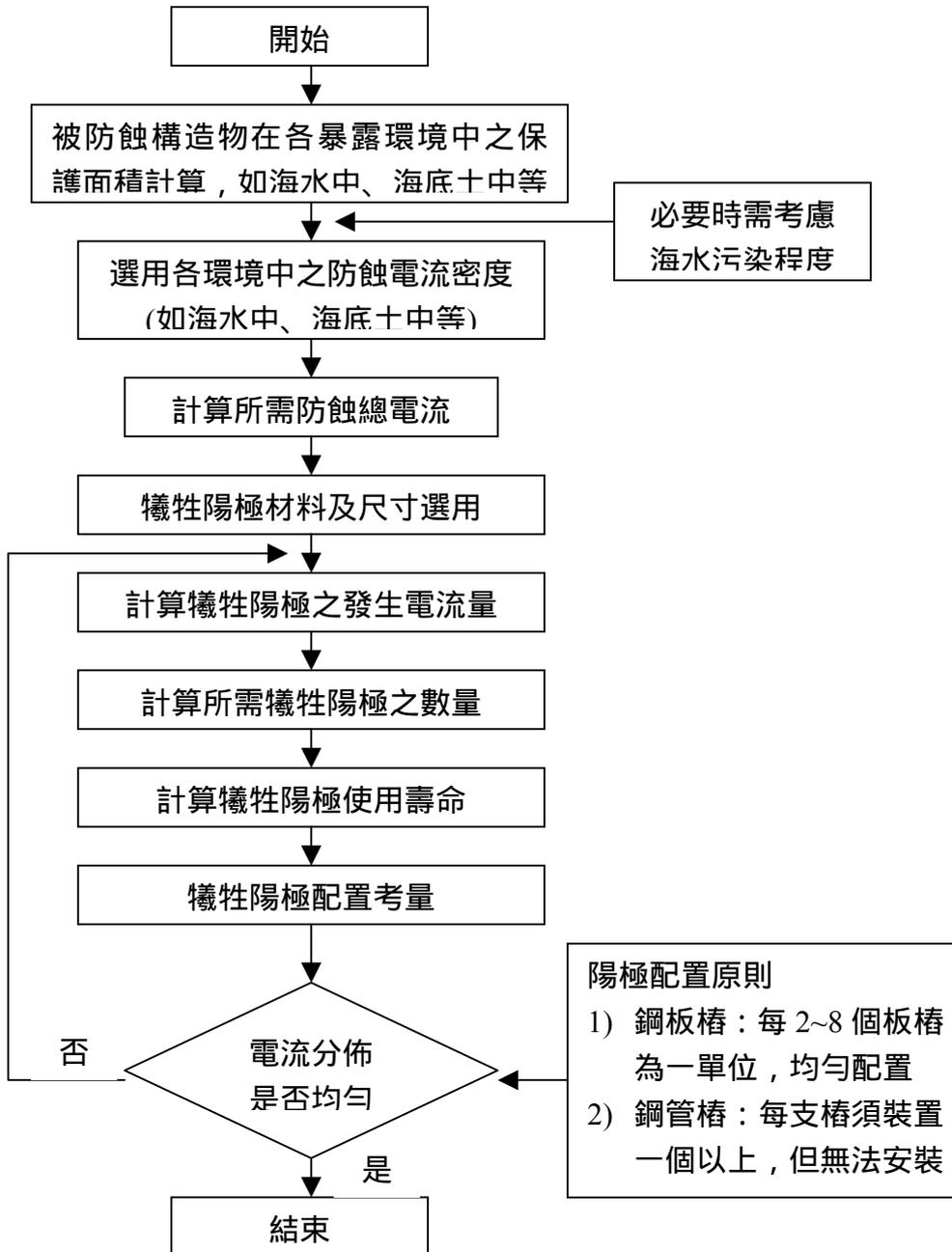
設計時須考慮下列事項，以確保防蝕電位。

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

解說：

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

3.2.2 設計流程



3.2.3 保護面積計算

港灣設施保護面積包括海水中面積與海底土中面積。

解說：

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

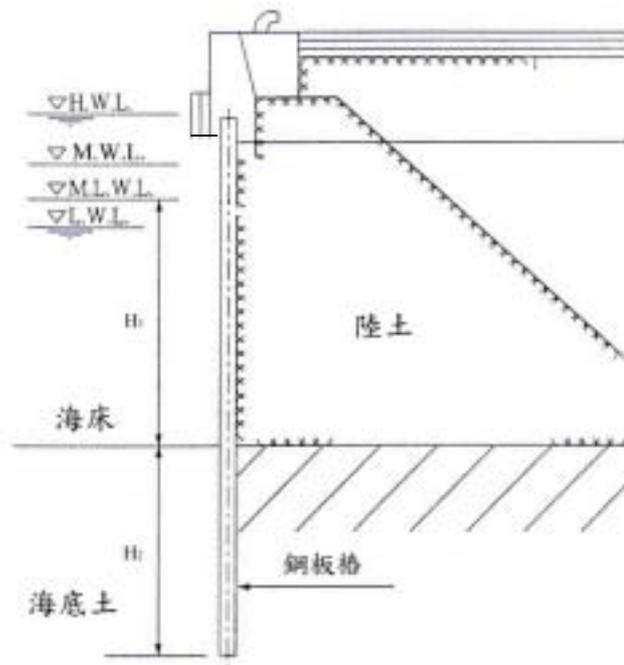


圖 3.2.3.1 海水中鋼板樁長度計算示意圖

2. 依鋼樁的型式，計算保護面積：

(1) 鋼板樁

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

式中， A_{s1} = 鋼板樁海水中面積， m^2

L=鋼板樁岸壁長度，m

H₁=海水中長度，m

n=鋼板樁周邊係數(依鋼板樁型式而異，如表 3.2.3.1 所示)

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

式中， A_{s2} =鋼板樁海土中面積，m²

L=鋼板樁岸壁長度，m

H₂=海底土中長度，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} =鋼管樁海水中面積，m²

D=鋼管樁直徑，m

H₁=海水中長度，m

N=鋼管樁支數

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

式中， A_{p2} =鋼管樁海土中面積，m²

D=鋼管樁直徑，m

H₂=海底土中長度，m

N=鋼管樁支數

表 3.2.3.1 日本各類鋼板樁周邊係數(依鋼板樁型式而異)

種 類		係數	種 類		係數			
C型鋼板樁	YSP-I	I	1.25	Z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) KSP-II SKSP-II	II	1.55	H型鋼板樁	YSP-B66		1.2	
	FSP-III NKSP-III(L) KSP-III SKSP-III	III	1.65		YSP-B74			
	FSP-IV NKSP-IV (L)	IV	1.85		KSP-H			
	C型鋼板樁	FSP-IV(L) NKSP-IV (L)	IV	1.85	直線型鋼板樁	YSP-F FSP-F		1.1
		KSP-IV SKSP- IV				KSP-F		
		FSP-IA NKSP- IA KSP- IA SKSP- IA	IA	1.4		YSP-FA FSP- FA	FA	1.1
		FSP-IIA NKSP-IIA KSP-IIA SKSP-IIA	IIA	1.6		KSP- FA		
		FSP-IIA NKSP-IIA KSP-IIA SKSP-IIA	IIA	1.6		YSP- Fx KSP- Fx	FA	1.1
		FSP-III _A NKSP-III _A KSP-III _A SKSP-III _A	III _A	1.7		鋼管板		
	FSP-IV _A NKSP-IV _A KSP- IV _A SKSP- IV _A	IV _A	1.8					
	FSP-V _L NKSP-V _L KSP-V _L SKSP-V _L	V _L	1.7					
	FSP-VI _L NKSP-VI _L KSP-VI _L SKSP-VI _L	VI _L	1.75					

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

3.2.4 防蝕電流計算

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

式中，I=所需防蝕總電流，mA

i_i =各環境採用之防蝕電流密度(初期防蝕電流密度)，mA/m²

A_i =海水中與海底土中之保護構造物面積，m²

解說：

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

(1) 裸鋼

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

(2)塗裝被覆鋼構造物

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

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

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

i ：防蝕電流密度值，依 2.6 節裸鋼鋼構造物所在環境選用

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

3.2.5 犧牲陽極發生電流量計算

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

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

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

解說：犧牲陽極對海水電阻之計算，依犧牲陽極的形狀，如下：

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

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

式中， R_a =犧牲陽極對海水的電阻， Ω

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

L =陽極長度，cm

r =陽極半徑(或陽極等效半徑)，cm

若陽極非圓柱體，則陽極等效半徑 r

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

C =陽極的斷面面積， cm^2

(2) 長條棒狀陽極^[2] (與被保護構造物表面距離 $\geq 30 \text{ cm}$ ，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^[2]

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

式中， R_a =犧牲陽極對海水的電阻， Ω

ρ =海水比電阻， $\Omega \cdot \text{cm}$

S =陽極長度與寬度的平均值， cm

(4) 其他形狀之陽極^[2]

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

式中， R_a =犧牲陽極對海水的電阻， Ω

ρ =海水比電阻， $\Omega\cdot\text{cm}$

A =陽極的表面積， cm^2

註：

[1] Dwight, H.B., "Calculation of Resistance to Ground", Electrical Engineering 55, 12 (1936): pp. 1319-1328.

[2] McCoy, J.E., "Corrosion Control by Cathodic Protection", Transactions of the Institute of Marine Engineering, 82, No. 6, June, 1970, pp. 82-86.

3.2.6 犧牲陽極用量計算

浸入海水中(或海土中)所需犧牲陽極的塊數

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

式中， N_i =浸入海水中(或海土中)被保護部位所需犧牲陽極的塊數

i_i =各環境採用之防蝕電流密度(初始極化防蝕電流密度)， mA/m^2

A_i =海水中(或海土中)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

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

解說：餘裕係數為 10% ~ 20%。

3.2.7 陽極壽命計算

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

式中，L=陽極使用壽命，year (yr)

N=被保護設施所需陽極總塊數

W=每塊陽極原始重量，kg

Q=陽極消耗量，kg/A·yr

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

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

3.2.8 犧牲陽極配置考量

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

3.3 外加電流式

3.3.1 設計基本方針

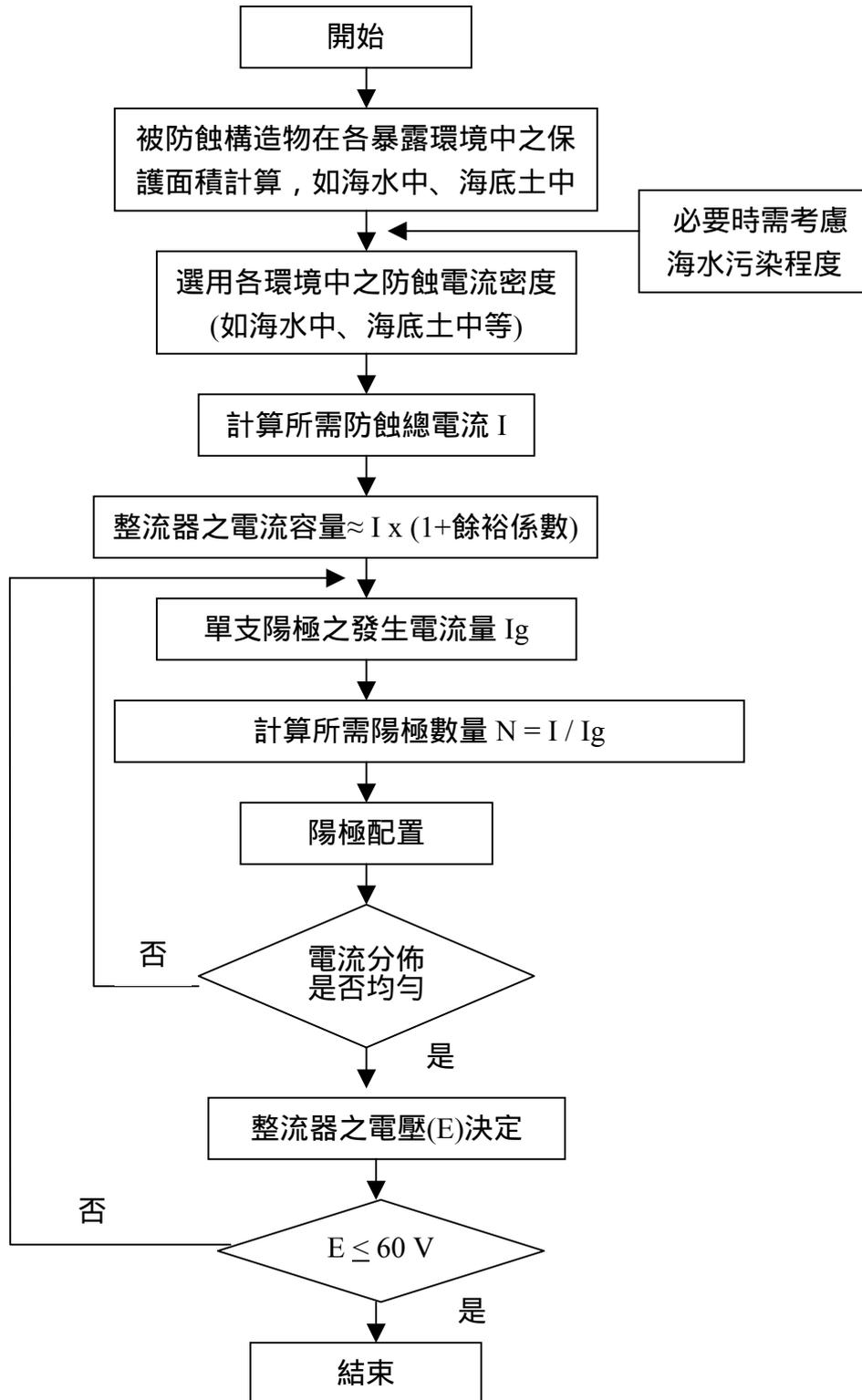
設計時須考慮下列事項，以確保防蝕電位。

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

解說：

1. 防蝕電流密度的選用須考慮被保護構造物所處環境並依據 2.6 節與 2.7 節決定。
2. 外加電流式陰極保護所使用的陽極材料與犧牲陽極式不同，多採用不溶性或消耗率低的合金金屬。在海水中，使用鈦鍍白金(platinized titanium)或鈦基材外覆金屬氧化物(titanium coated with the mixture of noble and non-noble metal oxides)等陽極。
3. 陽極配置間隔以被保護構造物能獲得均等電位分布為原則。
4. 直流電源之電源電壓應在 60 V 以下。使用設備若有 CNS 規範者必須符合 CNS 規範性能。
5. 雜散電流是指電流流動路徑並非原先規劃的電路迴路。假若陽極與被防護構造物間有其他金屬結構時，電流將沿該金屬傳遞，當電流離開金屬再度進入海水中時，在電流離開的金屬表面會有局部腐蝕產生，這現象稱為雜散電流腐蝕。在外加電流式陰極保護下，電路迴路的電流較犧牲陽極式大且迴路電壓高，在鋼板樁或鋼管樁間接觸不完全的狀態下，可能會發生雜散電流腐蝕。為防止雜散電流腐蝕，鋼板樁或鋼管樁間須使用適當尺寸的鋼條或導線相連接，使被保護體電連通。
6. 固定位置之電位測試端子配置，以 50 m ~ 100 m 間隔為原則，並考慮維護管理之便易性。

3.3.2 設計流程



3.3.3 保護面積計算

港灣設施保護面積包括海水中面積與海底土中面積。

解說：與 3.2.3 節相同。

3.3.4 防蝕電流計算

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

式中，I=所需防蝕總電流，mA

i_i =各環境採用之防蝕電流密度(初始防蝕電流密度)，mA/m²

A_i =海水與或海土中之保護構造物面積，m²

解說：與 3.2.4 節相同。

3.3.5 整流器之電流容量

整流器之電流容量 = I x (1+餘裕係數)。

解說：餘裕係數為 10% ~ 20%。

3.3.6 陽極之發生電流量

參考由原廠提出之陽極性能技術資料。

3.3.7 單一整流器設計輸出電壓計算

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

式中，E=單一整流器輸出最低電壓，V

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

E_c =被保護構造物電壓降，V，(在海水中 $E_c=0$)

E_w =迴路導線之電壓降，V

e=水的分解電壓，V，(在海水中 e = 2.0 V)

3.3.7 整流器之電壓容量

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

式中， E_{out} = 單一整流器設計輸出電壓，V

E = 單一整流器輸出最低電壓，V

x = 餘裕係數

解說：餘裕係數為 10% ~ 20%。

第四章材料及裝置

4.1 犧牲陽極式

4.1.1 陽極材料要求

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

解說：國外犧牲陽極使用材料，如 2.8 節解說所示。

4.1.2 陽極性能檢驗

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

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

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

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

$$2. \text{ 電流效率 (\%)} = \frac{\text{電量計所得之電量 (A.h)} \times 100\%}{\text{陽極減少之重量 (g)} \times \text{理論發生電量 (A.h/kg)}}$$

$$3. \text{ 消耗率 (kg/A.yr)} = \frac{1}{\text{實際發生電量 (A.h/kg)}} \times 365 \times 24 \text{ (h/yr)}$$

4. 陽極開路電位即犧牲陽極在電解液中之自然腐蝕電位。閉路電位亦稱為工作電位，為犧牲陽極在電解液中與金屬構造物聯結時之犧牲陽極電位。

4.1.3 陽極電流效率

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

解說：鋁合金陽極塊之陽極性能宜參考下列標準。

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

4.2 外加電流式

4.2.1 陽極材料

應選擇消耗率低且具耐久性之合金金屬。

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

表 4.2.1 外加電流式陽極材料性能

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

資料來源：日本「港灣鋼構造物防蝕、補修手冊(改訂版)」, 1997

4.2.2 交流電源

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

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

4.2.3 整流器

採用外加電流式陰極保護系統時，整流器的總輸出電流值和電壓量應滿足陰極防蝕系統所須的電流量；且整流器運轉時，必須可在最大輸出的情況下持續操作。

解說：

2.1. 電氣箱：

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

3. 控制和連接：

每一台整流器的輸出應包括下列元件：

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

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

4. 電子元件

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

5. 整流器檢測

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

4.2.4 導線

所有導線應為銅導體，蕊線以絕緣包覆，並以顏色和編號區別。

解說：

1. DC 導線

DC 導線為整流器正端至陽極與整流器負端至鋼構造物間的導線。視通過電流大小，選用適當截面積的銅導線；不論導線為單蕊或多蕊，均須絕緣，並以顏色區分正電導線和負電導線。導線尺寸通常介於 $2.5 \sim 16 \text{ mm}^2$ ，其絕緣包覆為 PVC、HDPE、XLPE 或其他材質。

2. 參考電極導線

參考電極使用的導線應符合第 4.2.4 節的規定。

3. 導線保護

導線應裝設於導管內，或採取其他適當的保護措施。導管採用 PVC 管或鋼套管。進出導管的線路最終須由接線箱連接。

4.3 數位伏特計

陰極保護系統之防蝕效果須使用數位伏特計與參考電極來量測鋼構造物電位。

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

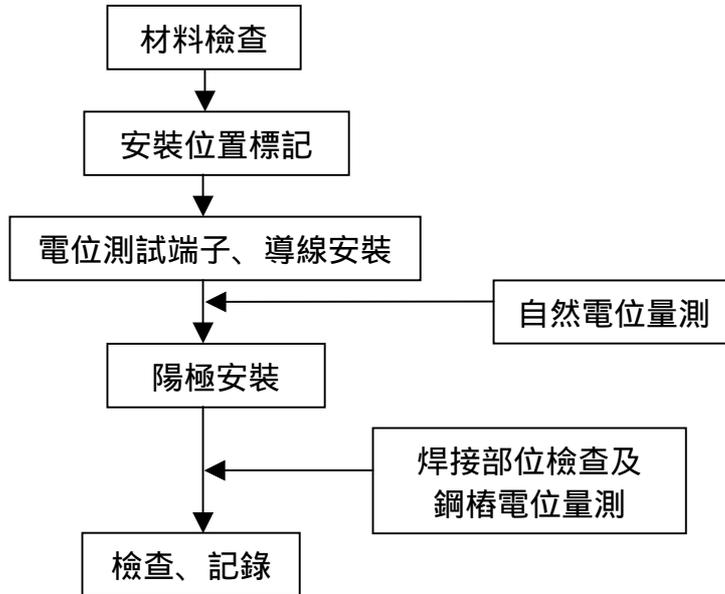
4.4 參考電極

參考電極通常採用海水氯化銀(Ag/AgCl/seawater)參考電極，應具有出廠證明，詳列參考電極類型、理論電位、和相對於其它標準電極之測試電位。

第五章 系統安裝

5.1 犧牲陽極式

犧牲陽極可採用水中焊接法或螺栓固定法安裝。施工步驟如下：



5.1.1 材料檢查

施工前須進行材料數量確認，尺寸、質量之抽樣檢查。

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

5.1.2 安裝位置標記

依照圖面設計，於鋼構造物上標示陽極與電位測試端子安裝位置。

解說：

1. 犧牲陽極應均勻的佈置於被保護結構設施上，且第一塊犧牲陽極頂端應低於平均低潮位下 30 cm 。對鋼板樁而言，原則上以每 $2\sim 8$ 支板樁

為一單位，配置在鋼板樁凸部；若不得已需安裝在凹部，則電位分布不均的問題應加注意。對鋼管樁而言，每支樁須裝置一塊以上；但無法安裝陽極塊時不在此限，在此條件下，各鋼管樁之間須使用適當尺寸的鋼條或導線相連接，使被保護體電連通。

2. 固定位置電位測試端子配置，以 50 m ~ 100 m 間隔為原則。

5.1.3 電位測試導線安裝

將導線焊接至鋼構造物上，並在焊接處加以密封防水。

5.1.4 陽極安裝

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

5.1.5 電位量測

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

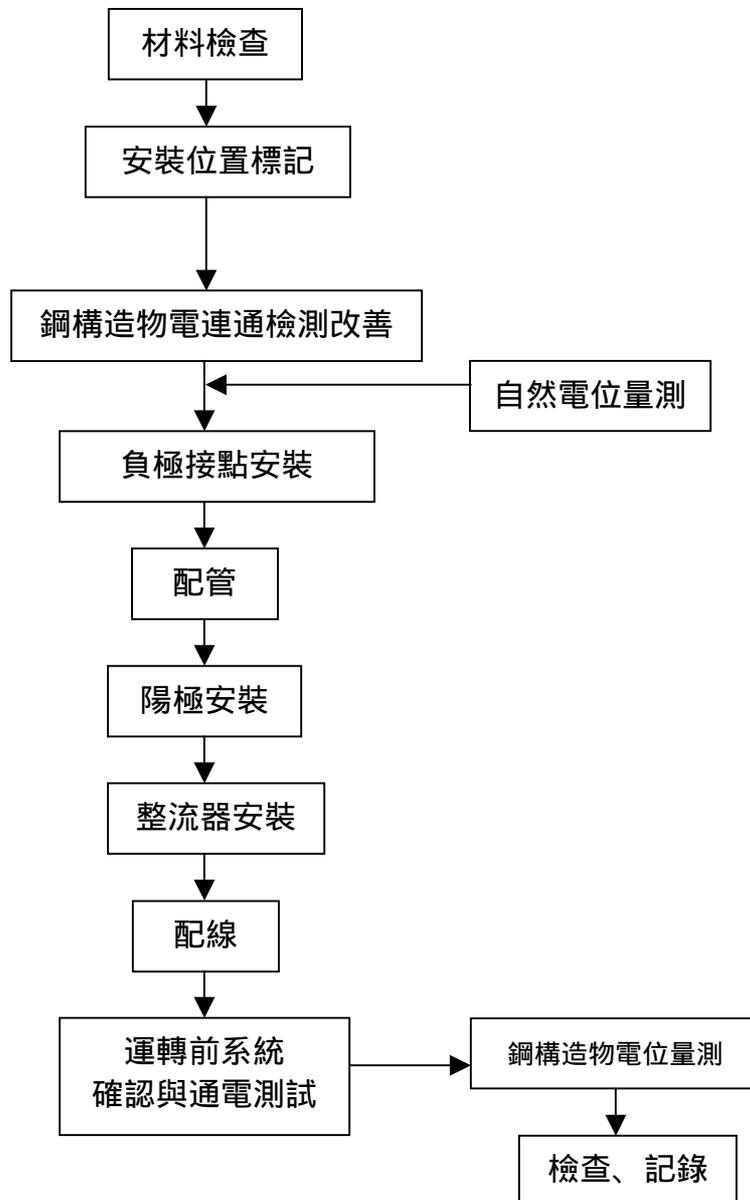
解說：如圖 5.1.5 所示。



圖 5.1.5 電位量測示意圖

5.2 外加電流式

5.2.1 施工步驟：



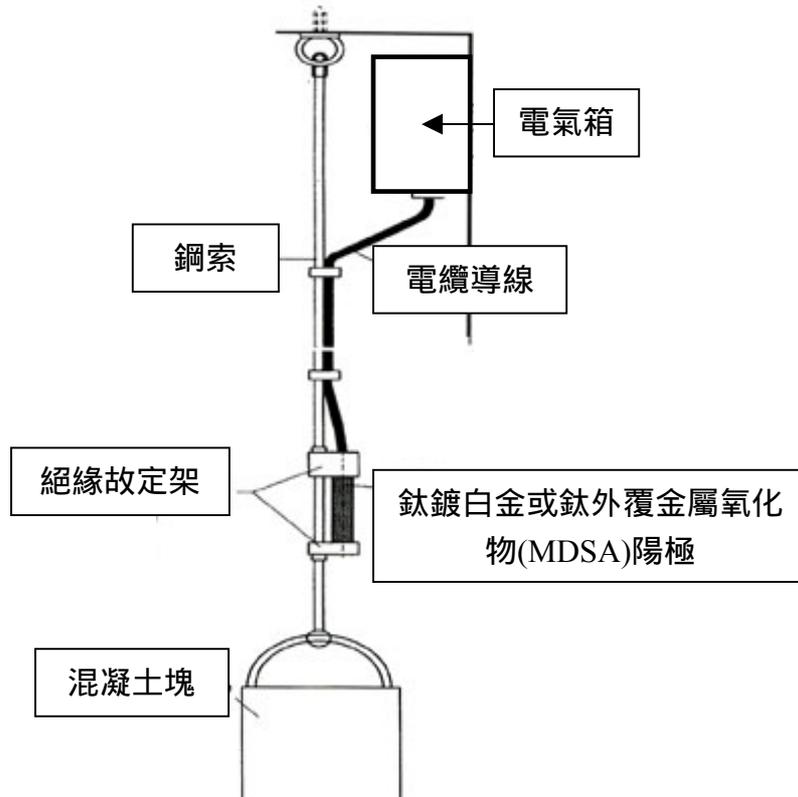
5.2.2 材料檢查

施工前須進行材料數量確認，尺寸、質量之抽樣檢查。

5.2.3 鋼構造物電連通改善

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

5.2.4 陽極安裝



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

5.2.5 負極排流及電位測試導線安裝

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

5.2.6 整流器安裝

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

5.2.7 導線安裝

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

5.2.8 運轉前系統確認與通電測試

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

5.3 完工檢查

完工時，除了對工程紀錄照片等進行檢查外，亦須進行構造物的防蝕電位量測。

解說：

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

第六章 系統驗收

6.1 防蝕性能驗收

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

6.2 書面資料

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

6.2.1 犧牲陽極式

犧牲陽極式陰極防蝕系統驗收完成後，須保存相關紀錄和文件。

解說：本準則建議系統設計、安裝、操作、和維護手冊需包含以下資料。

1. 設計和安裝

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

2. 操作和維護手冊

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

A. 節 - 操作

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

B.節 - 維護

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

6.2.2 外加電流式

外加電流式陰極防蝕系統驗收完成後，須保存相關紀錄和文件。

解說：本準則建議系統設計、安裝、操作、和維護手冊需包含以下資料。

1.設計和安裝

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

2.操作和維護手冊

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

A.節 - 操作

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

B.節 - 維護

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

第七章 系統維護及管理

7.1 一般

陰極防蝕的維護管理應依據維護管理計畫確實執行。

7.2 檢查頻率

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

解說：依檢查頻率進行維護管理，但當一般檢查發生問題時須立即進行詳細檢查。

7.3 一般檢查

7.3.1 電位量測

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

7.4 詳細檢查

7.4.1 目視檢測

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

7.4.2 電位量測

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

7.4.3 犧牲陽極調查

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

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

1. 依據剩餘陽極形狀尺寸(如圖 7.4.3.1 所示)之計算法：

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

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

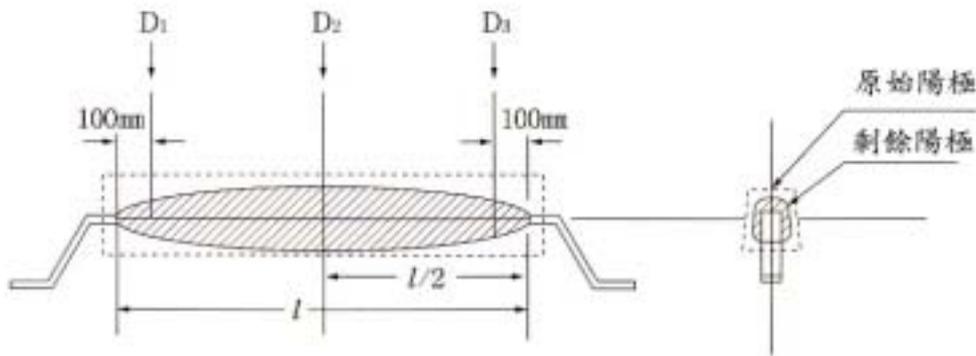


圖 7.4.3.1 剩餘陽極形狀尺寸計算

6. 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。

7. 陽極壽命計算

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

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

7.5 防蝕性能標準

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

7.6 防蝕效能評估

依據電位量測及陽極調查結果進行陰極防蝕效能評估。

解說：電位測定結果如在防蝕保護電位 -800 mV (vs. Ag/AgCl/seawater) 以下或更“負”，則被保護構造物維持防蝕狀況；若電位在 -800

mV 以上或更”正”時，則其部份保護不足，須做詳細檢查。可參考前次檢查結果探究原因，制訂對策與未來運轉建議。

7.7 書面資料

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

附錄 C

鋼板(管)樁碼頭陰極防蝕工程案例

案例一：日本 A 港，水深-10.0 m 之鋼板樁碼頭陰極防蝕^[1]

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)：(1.0m + 1.3m) x 180m x 1.75 x 0.1= 72.5 m²

海水中(裸鋼部份)：(10.0m - 1.0m) x 180m x 1.75= 2835.0 m²

海底土中：(22.5m - 10.0m) x 180m x 1.75= 3937.5 m²

5. 所需防蝕總電流

海水中：(72.5 m² + 2835.0 m²) x 100 mA/m² = 290.8 A

海底土中：3937.5 m² x 20 mA/m² = 78.8 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) x 170 x 1380 mm。
- (3) 含蕊心之陽極重量：109.5 kg \pm 2% , 淨重：102.3 kg \pm 2%。
- (4) 電流量：30.3 A·yr。
- (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 A / 3.0 A = 123.2 塊
- (2) 以 3 個水深配置(如圖 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

註：

- [1] 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.

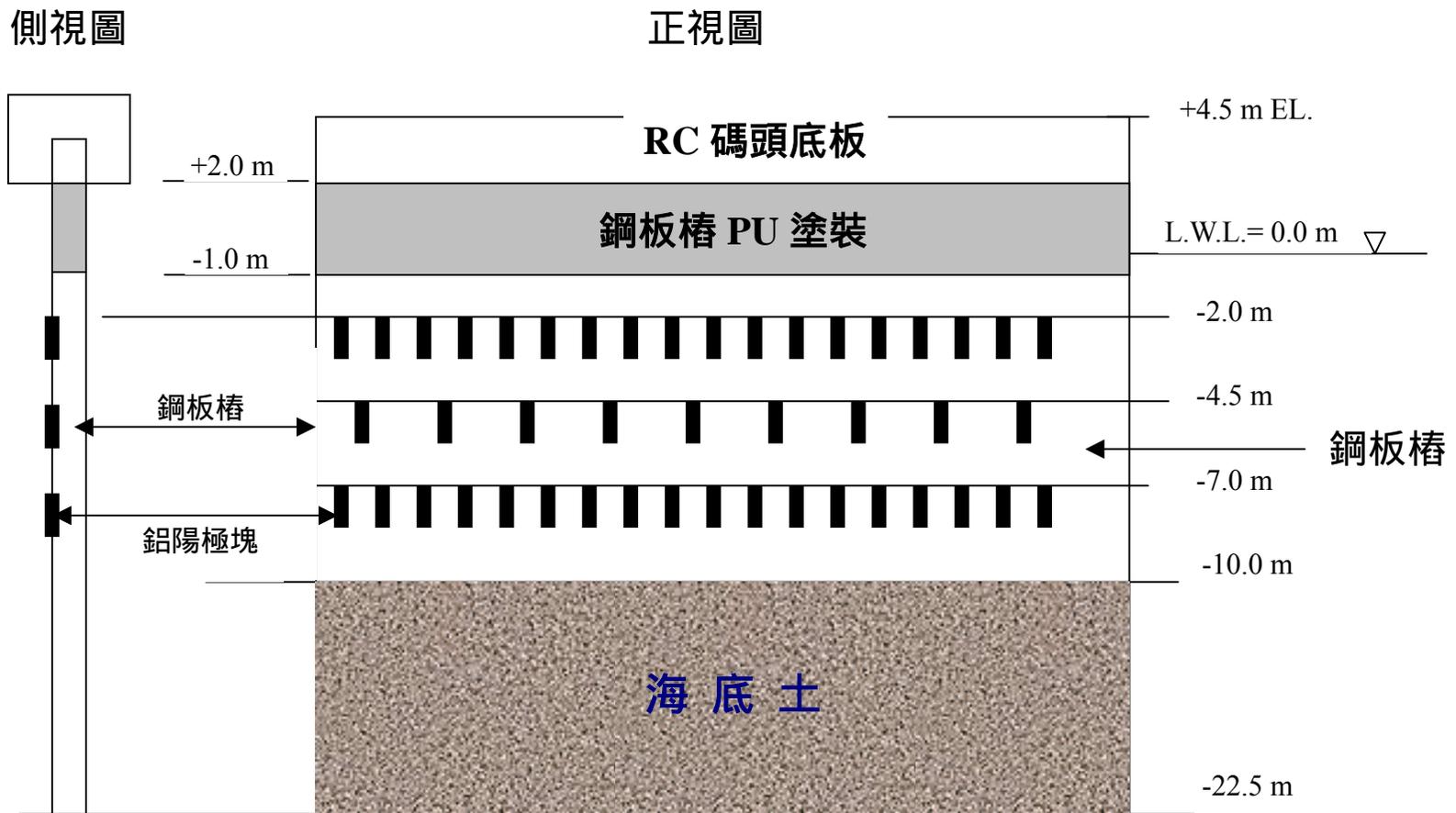


圖 1. 鋼板樁犧牲陽極配置示意圖

案例二：日本 B 港，水深-13.0 m 之鋼管樁棧橋碼頭陰極防蝕^[1]

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
石礫中= 65 mA/m²
海土中= 30 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：35 $\Omega\cdot\text{cm}$ 。

4. 防蝕面積

(1)被保護構造物共分 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) 被保護構造物共分 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 ± 2% ， 淨重：122.1 kg ± 2%。

(4)電流量：36.2 A·yr。

(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

鋼管樁= 78.5 A/區間 ÷ 3.5 A/塊 ≈ 23 塊/區間

鋼板樁= 35.6 A/區間 ÷ 3.5 A/塊 ≈ 10 塊/區間

(2) 總共需要數量

鋼管樁= 23 塊 x 10= 230 塊

鋼板樁= 10 塊 x 10= 100 塊

合計= 330 塊

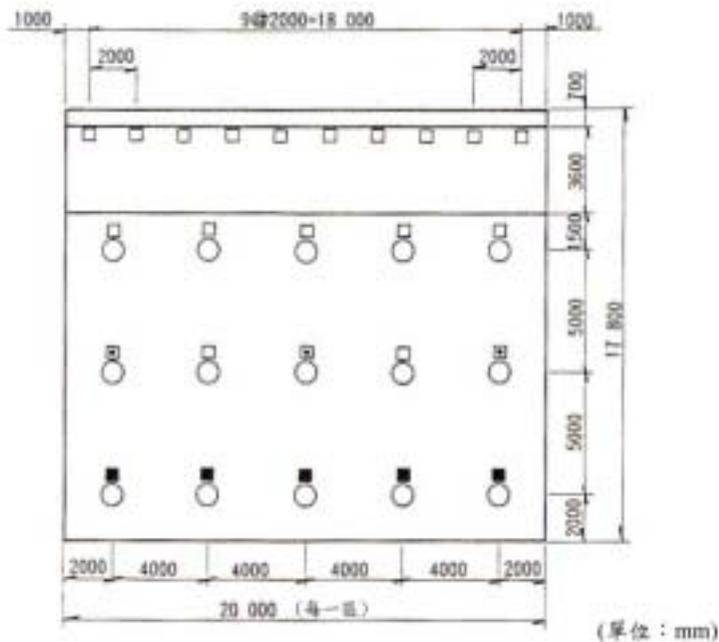
(3)每一區以 3 個水深配置(如圖 2 所示)，分別為-2.0 m，-6.0 m，-9.0 m，配置個數如下。

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

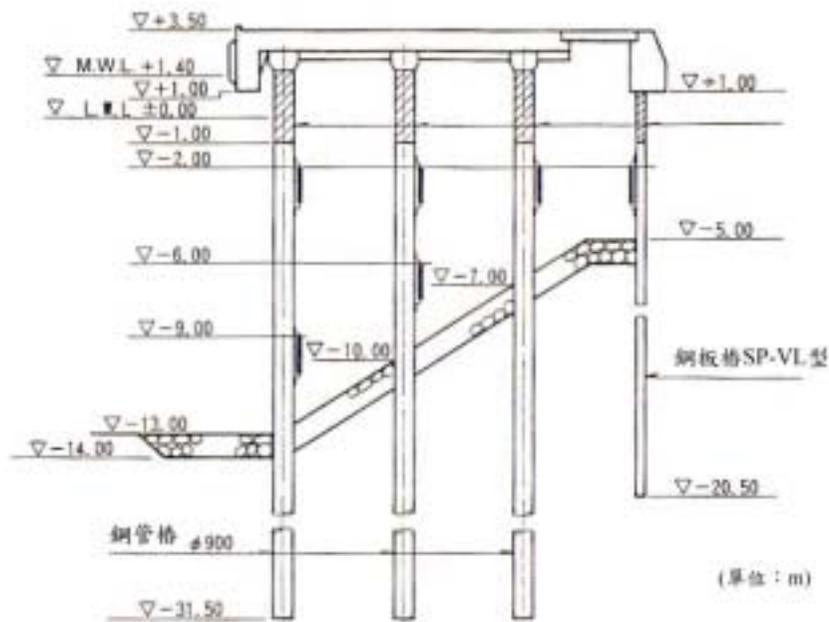
註：

[1]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.

陽極安裝配置圖



犧牲陽極安裝位置



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

電位量測裝置配置圖



圖 2. 鋼管(板)樁犧牲陽極配置示意圖

