

93-62-795

MOTC-IOT-92-H1BA04

港灣構造物檢測與耐久性 試驗研究(2/3)



交通部運輸研究所

中華民國九十三年四月

93-62-795

MOTC-IOT-92-H1BA04

港灣構造物檢測與耐久性 試驗研究(2/3)

著 者：陳桂清、饒正、柯正龍、張道光

交通部運輸研究所

中華民國九十三年四月

港灣構造物檢測與耐久性試驗研究(2/3)

著 者：陳桂清、饒正、柯正龍、張道光

出版機關：交通部運輸研究所

地 址：台北市敦化北路 240 號

網 址：www.iot.gov.tw/chinese/lib/lib.htm

電 話：(02)23496789

出版年月：中華民國九十三年四月

印 刷 者：

版(刷)次冊數：初版一刷 120 冊

本書同時登載於交通部運輸研究所網站

定 價： 元

展 售 處：

交通部運輸研究所運輸資訊組•電話：(02)23496880

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

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

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

五南文化廣場：台中市中山路 6 號•電話：(04)22260330

新進圖書廣場：彰化市中正路二段 5 號•電話：(04)7252792

青年書局：高雄市青年一路 141 號 3 樓•電話：(07)3324910

港灣構造物檢測與耐久性試驗研究

(2/3)

交通部運輸研究所

GPN：1009301423

定價 元

交通部運輸研究所出版品摘要表

出版品名稱：港灣構造物檢測與耐久性試驗研究(2/3)			
國際標準書號（或叢刊號）	政府出版品統一編號 1009301423	運輸研究所出版品編號 93-62-795	計畫編號 92-H1BA04
主辦單位：港灣技術研究中心 主管：邱永芳 計畫主持人：陳桂清 研究人員：饒 正、柯正龍、張道光 聯絡電話：04-26587118 傳真號碼：04-26564418			研究期間 自 92 年 01 月 至 92 年 12 月
關鍵詞：非破壞性檢測、耐久性、腐蝕			
摘要： 港灣構造物(設施)依建造材料區分，大致可分成鋼鐵(材)構造物與(鋼筋)混凝土構造物兩大類，由於常年處於海洋惡劣環境下，各類結構物極易發生腐蝕、劣化、損壞，對設施之安全日益受到重視。基於實務面之需求，本研究特以鋼材及混凝土材料之構造物為探討重點，進行相關試驗研究。 為因應工程防蝕需求，本年度計畫特分為三個子計畫來執行；子計畫(一)碼頭鋼板樁現況調查與腐蝕防治方法研究，子計畫(二)港灣結構物陰極防蝕準則草案訂定研究，子計畫(三)混凝土結構物耐久性試驗研究。研究成果顯示；(1)基隆、台中與安平港之碼頭鋼板樁腐蝕輕微，台北港則較為偏高，腐蝕速率為0.1mm/yr左右；(2)完成「港灣鋼構造物之防蝕準則草案」之擬訂，並修正R.C.結構物之部份內容；(3)自充填混凝土漿體之拌製，具良好之工作度、流動性及粒料不析離，硬化後之品質相當優良，對混凝土之品質與耐久性均有正面之提升效果。			
出版日期	頁數	定價	本 出 版 品 取 得 方 式
93 年 4 月	234		凡屬機密性出版品均不對外公開。普通性出版品，公營、公益機關團體及學校可函洽本所免費贈閱；私人及私營機關團體可按定價價購。
機密等級： ☐ 限閱 ☐ 機密 ☐ 極機密 ☐ 絕對機密 （解密【限】條件： ☐ 年 月 日解密， ☐ 公布後解密， ☐ 附件抽存後解密， ☐ 工作完成或會議終了時解密， ☐ 另行檢討後辦理解密） ☒ 普通			
備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。			

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

TITLE: Field Inspection on Harbor Facilities and Its Material Durability Testing (2/3)			
ISBN(OR ISSN)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1009301423	IOT SERIAL NUMBER 93-62-795	PROJECT NUMBER 92-H1BA04
DIVISION: HARBOR & MARINE TECHNOLOGY CENTER DIVISION DIRECTOR: Yung-Fang Chiu PRINCIPAL INVESTIGATOR: Chen Kuei-Ching PROJECT STAFF: Rau-cheng, Ko Jeng-Long, Chang Tao-Kuang PHONE:04-26587118 FAX:04-26564418			PROJECT PERIOD FROM 01/2003 TO 12/2003
KEY WORDS: Electrochemical technique, Non-destructive test, Durability, Cathodic protection			
ABSTRACT: Harbor facilities are generally classified as steel-structured and reinforced concrete according to constructing materials. Because of exposure to marine aggressive environment all year long, facilities are easily corroded, deteriorated and damaged. Their deterioration and safety have been much concerned than ever. Based on physical requirement, this study is especially focused on the durability on steel-structured and the reinforced concrete structures. In order to meet the practical anti-corrosion demand, the second-year study was divided into three sub projects: Field Investigation on Ports Sheet-Piles Situations and Corrosion Prevention Strategy, Anti-Corrosion Draft Establishment, and Durability and Testing on Reinforced Concrete. The results indicated that steel-piles corrosion rates at Kee-Lung, Taichung, and Ann-Ping Ports were small with no severe defects on surfaces, but a little more corrosion rates for up to 0.1mm/yr. were obtained at Taipei port. Corrosion prevention criteria were revised partially. As to concrete, self-compacting concrete performed excellent workability and enhanced durability.			
DATE OF PUBLICATION April 2004	NUMBER OF PAGES 234	PRICE	CLASSIFICATION ☐ SECRET ☐ CONFIDENTIAL ☒ UNCLASSIFIED
The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.			

目 錄

中文摘要	I
英文摘要	II
表目錄	IX
圖目錄	X III
照片目錄	X IX
第一章 前言	1-1
第二章 研究計畫概述	2-1
2.1 計畫內容與研究方法	2-1
2.1.1 子計畫(一)：碼頭鋼板樁現況調查與腐蝕防制方法研究	2-1
2.1.1.1 研究內容	2-1
2.1.1.2 實施方法與步驟	2-2
2.1.2 子計畫(二)：港灣結構物陰極防蝕準則草案訂定研究	2-3
2.1.2.1 研究內容	2-4
2.1.3 子計畫(三)：港灣混凝土結構物耐久性試驗研究	2-4
2.1.3.1 研究內容	2-4
2.1.3.2 實施方法與步驟	2-5
第三章 鋼板樁碼頭現況調查與腐蝕防制研究	3-1
3.1 前言	3-1
3.2 研究規劃	3-2
3.2.1 規畫流程	3-2

3.2.2	資料蒐集與分析	3-2
3.2.3	檢測範圍	3-3
3.2.4	鋼板樁檢測	3-3
3.2.4.1	目視檢測	3-3
3.2.4.2	厚度量測	3-3
3.2.4.3	鋼板樁保護電位量測	3-9
3.2.5	陽極塊調查	3-10
3.2.5.1	選定陽極塊	3-10
3.2.5.2	陽極塊發生電位之量測	3-10
3.2.5.3	陽極塊外觀檢查	3-10
3.2.5.4	陽極塊重量量測	3-10
3.2.5.5	陽極塊輸出電流量測	3-11
3.3	結果與討論	3-13
3.3.1	碼頭構造物背景資料搜集與分析	3-13
3.3.2	鋼板樁現況檢測	3-13
3.3.2.1	安平港 3 號碼頭	3-13
3.3.3.2	安平港 4 號碼頭	3-23
3.3.3.3	台中港 99 號碼頭	3-29
3.3.3.4	台北港東 1、東 2 號碼頭	3-45
3.3.3.4	台北港東 3 號碼頭	3-56
3.3.3.5	基隆港東 10 號碼頭	3-68

3.3.4 陽極塊調查 -----	3-80
3.3.4.1 陽極塊電位量測 -----	3-81
3.3.4.2 陽極塊外觀檢查及重量量測 -----	3-86
3.3.4.3 陽極塊輸出電流量測 -----	3-93
3.4 結論與建議 -----	3-107
3.4.1 結論 -----	3-107
3.4.2 建議 -----	3-107
第四章 港灣構造物陰極防蝕準則(草案)訂定研究 -----	4-1
4.1 前言 -----	4-1
4.2 陰極防蝕規範之回顧 -----	4-2
4.3 港灣鋼構物之陰極防蝕 -----	4-8
4.3.1 外加電流式 -----	4-8
4.3.2 犧牲陽極式 -----	4-8
4.3.3 陰極防蝕之設計 -----	4-10
4.3.3.1 犧牲陽極式之設計 -----	4-10
4.3.3.2 外加電流陰極保護之設計 -----	4-14
4.4 陰極防蝕系統使用材料及設備需求 -----	4-15
4.4.1 犧牲陽極材料 -----	4-15
4.4.2 外加電流式之陽極材料 -----	4-17
4.4.3 參考電極 -----	4-18
4.4.4 整流器 -----	4-18

4.4.5 導線	4-19
4.4.6 數位伏特計	4-19
4.5 陰極防蝕安裝標準程序	4-19
4.5.1 犧牲陽極式之安裝	4-19
4.5.2 外加電流式之安裝	4-20
4.6 陰極防蝕驗收標準程序	4-23
4.6.1 陰極防蝕保護標準	4-23
4.7 陰極防蝕系統之操作與維護管理	4-24
4.7.1 系統操作	4-24
4.7.2 系統維護管理	4-24
4.8 國內外防蝕工程實際案例介紹	4-26
第五章 港灣混凝土結構物耐久性試驗研究	5-1
5.1 前言	5-1
5.1.1 研究動機	5-1
5.1.2 研究目的	5-1
5.2 文獻回顧	5-2
5.2.1 自充填混凝土	5-2
5.2.2 自充填/高性能混凝土之定義	5-2
5.2.3 自充填混凝土之特性	5-4
5.2.4 SCC 之材料之選擇	5-7
5.2.5 摻料對混凝土之影響	5-12

5.2.6	自充填混凝土之工程性質	5-17
5.2.7	自充填混凝土之工程效益與應用	5-17
5.3	研究方法與步驟	5-18
5.3.1	研究規劃	5-18
5.3.2	試驗材料	5-18
5.3.3	試體配比	5-23
5.3.3.1	SCC 之設計	5-23
5.3.3.2	配比計算之實例說明	5-27
5.3.4	試驗參數與試體編號	5-30
5.3.4.1	試驗參數	5-30
5.3.4.2	試體編號	5-31
5.3.5	試體製作	5-31
5.3.6	試驗方法與設備	5-31
5.3.6.1	坍度與坍流度試驗	5-31
5.3.6.2	V 形漏斗流下試驗	5-33
5.3.6.3	鋼筋間隙通過性試驗	5-34
5.3.6.4	硬固混凝土性能試驗	5-36
5.4	試驗結果與討論	5-42
5.4.1	自充填混凝土之新拌性質	5-42
5.4.2	自充填混凝土硬固性質	5-44
5.5	結論與建議	5-49

5.5.1 結論	5-49
5.5.2 建議	5-49
第六章 結論與建議	6-1
參考文獻	7-1

表目錄

表 3.1 防蝕率與海水浸水率之關係 -----	3-9
表 3.2 海水中鋼構造物之防蝕保護電位標準-----	3-10
表 3.3 鋼板（管）樁碼頭構造物背景資料 -----	3-13
表 3.4 安平港 3 號碼頭鋼板樁平均腐蝕速率-----	3-18
表 3.5 安平港 3 號碼頭鋼板樁保護電位檢測結果-----	3-22
表 3.6 安平港 4 號碼頭鋼板樁平均腐蝕速率檢測結果-----	3-24
表 3.7 安平港 4 號碼頭鋼板樁保護電位檢測結果-----	3-28
表 3.8 台中港 99 號碼頭鋼管樁防蝕塗裝系統 -----	3-36
表 3.9 台中港 99 號碼頭鋼管樁之平均腐蝕速率 -----	3-38
表 3.10 台中港 99 號碼頭鋼管樁腐蝕速率與水深之關係-----	3-40
表 3.11 台中港 99 號碼頭鋼管樁保護電位量測結果（1） -----	3-43
表 3.12 台中港 99 號碼頭鋼管樁保護電位量測結果（2） -----	3-44
表 3.13 台北港東 2 號碼頭鋼板樁平均腐蝕速率 -----	3-49
表 3.14 台北港東 1、東 2 號碼頭鋼板樁保護電位量測結果-----	3-55
表 3.15 台北港東 3 號碼頭鋼板樁之平均腐蝕速率 -----	3-61
表 3.16 台北港東 3 號碼頭鋼板樁保護電位量測結果 -----	3-67
表 3.17 基隆港東 10 號碼頭鋼板樁平均腐蝕速率-----	3-73
表 3.18 基隆港東 10 號碼頭鋼板樁保護電位量測結果 1（防蝕區） -----	3-77

表 3.19 基隆港東 10 號碼頭鋼板樁保護電位量測結果 2 (防蝕區)	3-78
表 3.20 基隆港東 10 號碼頭鋼板樁保護電位量測結果 (未防蝕區)	3-79
表 3.21 安平港 3 號碼頭陽極塊發生電位量測結果	3-82
表 3.22 安平港 4 號碼頭陽極塊發生電位量測結果	3-82
表 3.23 台中港 99 號碼頭陽極塊發生電位量測結果	3-83
表 3.24 台北港東 2、3 號碼頭陽極塊發生電位量測結果	3-84
表 3.25 基隆港東 10 號碼頭陽極塊發生電位量測結果	3-85
表 3.26 安平港 3 號碼頭陽極塊尺寸及重量量測結果	3-89
表 3.27 安平港 4 號碼頭陽極塊尺寸及重量量測結果	3-89
表 3.28 台中港 99 號碼頭陽極塊尺寸及重量量測結果	3-90
表 3.29 台北港東 2、東 3 號碼頭陽極塊尺寸及重量量測結果	3-91
表 3.30 基隆港東 10 號碼頭陽極塊尺寸及重量量測結果	3-92
表 3.31 安平港 3 號碼頭陽極塊輸出電流量測結果	3-93
表 3.32 安平港 4 號碼頭陽極塊輸出電流量測結果	3-94
表 3.33 台中港 99 號碼頭陽極塊輸出電流量測結果	3-95
表 3.34 台北港東 2、東 3 號碼頭陽極塊輸出電流量測結果	3-96
表 3.45 基隆港東 10 號碼頭陽極塊輸出電流量測結果	3-97
表 4.1 各國陰極防蝕規範	4-2
表 4.2 各國規範內容彙整與比較	4-5
表 4.3 國產鋁合金陽極材料之電氣特性	4-17

表 4.4 外加電流式陽極材料性能(日製產品)	4-17
表 4.5 各類型參考電極之電位換算	4-18
表 4.6 海水中鋼構造物之防蝕保護電位標準	4-24
表 4.7 含氧/厭氧環境之防蝕電位標準	4-24
表 4.8 水深與陽極配置數量	4-33
表 4.9 鋼板樁岸壁構造與浸漬環境之基本資料	4-35
表 4.10 所需要之防蝕保護面積	4-36
表 4.11 所需要之防蝕電流	4-36
表 4.12 陽極設置之數量	4-37
表 5.1 高性能混凝土與其他混凝土之比較	5-6
表 5.2 混凝土添加波索蘭材料之特性	5-10
表 5.3 新拌漿體相關性質試驗	5-21
表 5.4 硬固試體之相關試驗	5-21
表 5.5 粗粒料之級配	5-22
表 5.6 細粒料之級配	5-22
表 5.7 粒料之物理性質	5-23
表 5.8 日本土木學會併用系高性能混凝土之規範	5-27
表 5.9 自充填混凝土配比設計	5-30
表 5.10 試驗參數	5-30
表 5.11 超音波脈波速度與混凝土品質之關係	5-36
表 5.12 混凝土電阻與鋼筋腐蝕活性之關係	5-38

表 5.13	漿體之坍流度與析離試驗結果	5-43
表 5.14	漿體之流動性能試驗結果	5-43
表 5.15	試體抗壓強度試驗結果	5-45
表 5.16	試體超音波脈波速度試驗結果	5-47
表 5.17	試體之電阻係數試驗結果	5-48
表 5.18	試體之透水係數試驗結果	5-49

圖目錄

圖 3.1 調查規劃流程圖	3-3
圖 3.2 檢測水深標示方式	3-4
圖 3.3 水面下超音波量測鋼板	3-5
圖 3.4 超音波測厚儀量測之示意圖	3-6
圖 3.5 渦電流檢測設備	3-7
圖 3.6 海水中渦電流量測鋼板樁厚度之情形	3-8
圖 3.7 陽極塊尺寸量測位置	3-11
圖 3.8 陽極塊輸出電流量測	3-11
圖 3.9 電流計、感應環構造及量測原理	3-12
圖 3.10 安平港 3 號、4 號碼頭平面佈置	3-14
圖 3.11 安平港 3 號、4 號碼頭結構斷面	3-14
圖 3.12 PU-32 U 型鋼板樁型式	3-15
圖 3.13 安平港 3 號、4 號碼頭鋼板樁陽極塊配置	3-15
圖 3.14 安平港鋼板樁碼頭陽極塊及電位測試裝置詳圖	3-16
圖 3.15 海生物敲除後之鋼板樁表面 (1)	3-17
圖 3.16 海生物敲除後之鋼板樁表面 (2)	3-17
圖 3.17 安平港 3 號碼頭鋼板樁厚度量測水深示意圖	3-18
圖 3.18 安平港 3 號碼頭平均腐蝕速率與檢測水深之關係	3-19
圖 3.19 安平港 3 號碼頭鋼板樁腐蝕速率與水深之關係 (1)	3-20
圖 3.20 安平港 3 號碼頭鋼板樁腐蝕速率與水深之關係 (2)	3-21

圖 3.21 安平港 3 號碼頭鋼板樁保護電位量測位置	3-22
圖 3.22 安平港 4 號碼頭鋼板樁厚度量測位置示意圖	3-23
圖 3.23 安平港 4 號碼頭鋼板樁平均腐蝕速率與檢測水深之關係	3-24
圖 3.24 安平港 4 號碼頭鋼板樁腐蝕速率與檢測水深之關係 (1)	3-25
圖 3.25 安平港 4 號碼頭鋼板樁腐蝕速率與檢測水深之關係 (2)	3-26
圖 3.26 安平港 4 號碼頭鋼板樁腐蝕速率與檢測水深之關係 (3)	3-27
圖 3.27 安平港 4 號碼頭鋼板樁保護電位量測位置圖	3-27
圖 3.28 台中港 99 號碼頭平面佈置	3-30
圖 3.29 台中港 99 號碼頭鋼管樁結構斷面	3-31
圖 3.30 台中港 99 號碼頭鋼管樁配置平面 (#1 單元)	3-32
圖 3.31 台中港 99 號碼頭陽極塊排列及安裝數量	3-33
圖 3.32 台中港 99 號碼頭陽極塊及電位測試裝置詳圖	3-34
圖 3.33 台中港 99 號碼頭鋼管樁潮間帶防蝕措施	3-35
圖 3.34 海水面上鋼管樁表面之情形	3-37
圖 3.35 潮汐帶水下保護措施固定箍鬆脫 (1)	3-37
圖 3.36 潮汐帶水下保護措施固定箍鬆脫 (2)	3-37
圖 3.37 海床底部陽極塊之鐵蕊鬆脫	3-37
圖 3.38 海床底部陽極塊表面淤泥	3-37
圖 3.39 台中港 99 號碼頭鋼管樁之平均腐蝕速率與水深之關係	3-38
圖 3.40 台中港 99 號碼頭鋼管樁腐蝕速率與水深之關係	3-41
圖 3.41 台中港 99 號碼頭鋼管樁保護電位量測位置	3-42

圖 3.42 台北港東 1 至東 3 號碼頭平面佈置	3-45
圖 3.43 台北港東 1、2 號碼頭結構斷面	3-46
圖 3.44 台北港東 1、2 號碼頭陽極塊配置圖	3-46
圖 3.45 東 1 號碼頭鋼板樁外觀目視結果	3-47
圖 3.46 東 2 號碼頭鋼板樁外觀目視結果	3-47
圖 3.47 東 1、東 2 號碼頭檢測位置	3-48
圖 3.48 台北港東 2 號碼頭鋼板樁平均腐蝕速率與檢測水深之關係	3-49
圖 3.49 台北港東 2 號碼頭鋼板樁腐蝕速率與檢測水深之關係 (1)	3-50
圖 3.50 台北港東 2 號碼頭鋼板樁腐蝕速率與檢測水深之關係 (2)	3-51
圖 3.51 台北港東 2 號碼頭鋼板樁腐蝕速率與檢測水深之關係 (3)	3-52
圖 3.52 台北港東 2 號碼頭鋼板樁腐蝕速率與檢測水深之關係 (4)	3-53
圖 3.53 台北港碼頭鋼板樁保護電位量測位置	3-54
圖 3.54 台北港東 3 號碼頭結構斷面	3-56
圖 3.55 Larssen 6-131 U 型之鋼板樁型式	3-57
圖 3.56 台北港東 3 號碼頭陽極塊配置圖	3-57
圖 3.57 台北港東 3 號碼頭陽極塊及電位測試裝置	3-58
圖 3.58 台北港東 3 號碼頭潮間帶防蝕措施	3-59
圖 3.59 台北港東 3 號碼頭鋼板樁厚度檢測位置	3-60

圖 3.60 台北港東 3 號碼頭鋼板樁平均腐蝕速率與水深之關係 --	3-61
圖 3.61 台北港東 3 號碼頭鋼板樁腐蝕速率與檢測水深之關係 (1) -----	3-62
圖 3.62 台北港東 3 號碼頭鋼板樁腐蝕速率與檢測水深之關係 (2) -----	3-63
圖 3.63 台北港東 3 號碼頭鋼板樁腐蝕速率與檢測水深之關係 (3) -----	3-64
圖 3.64 台北港東 3 號碼頭鋼板樁腐蝕速率與檢測水深之關係 (4) -----	3-65
圖 3.65 台北港東 3 號碼頭鋼板樁腐蝕速率與檢測水深之關係 (5) -----	3-66
圖 3.66 基隆港東 10 號碼頭平面佈置 -----	3-68
圖 3.67 基隆港東 10 號碼頭結構斷面 -----	3-69
圖 3.68 潮汐帶以混凝土保護鋼管樁之情形 -----	3-69
圖 3.69 各鋼管樁間以鋼筋焊接連通之情形 -----	3-69
圖 3.70 未防蝕區之鋼管樁表面腐蝕情形 -----	3-70
圖 3.71 防蝕區之鋼管樁表面情形 -----	3-70
圖 3.72 舊有鋼板樁發現穿孔、破洞之情形 -----	3-70
圖 3.73 基隆港東 10 號碼頭鋼板樁厚度檢測位置示意圖 -----	3-72
圖 3.74 基隆港東 10 號碼頭鋼板樁平均腐蝕速率與水深之關係 -	3-73
圖 3.75 基隆港東 10 號碼頭鋼板樁腐蝕速率與水深之關係 (未防蝕區) -----	3-74

圖 3.76 基隆港東 10 號碼頭鋼板樁腐蝕速率與水深之關係 (防蝕區)	3-75
圖 3.77 基隆港東 10 號碼頭鋼板樁保護電位量測位置	3-76
圖 3.78 安平港 3 號碼頭之陽極塊現場切割後之情形	3-98
圖 3.79 安平港 4 號碼頭之陽極塊現場切割後之情形 (1)	3-99
圖 3.80 安平港 4 號碼頭之陽極塊現場切割後之情形 (2)	3-100
圖 3.81 台中港 99 號碼頭之陽極塊現場切割後之情形 (1)	3-101
圖 3.82 台中港 99 號碼頭之陽極塊現場切割後之情形 (2)	3-102
圖 3.83 台北港碼頭之陽極塊現場切割後之情形 (1)	3-103
圖 3.84 台北港號碼頭之陽極塊現場切割後之情形 (2)	3-104
圖 3.85 基隆港東 10 號碼頭之陽極塊現場切割後之情形 (1)	3-105
圖 3.86 基隆港東 10 號碼頭之陽極塊現場切割後之情形 (2)	3-106
圖 4.1 碼頭鋼板(管)樁施加外加電流式防蝕之簡示圖	4-9
圖 4.2 碼頭鋼板(管)樁施加犧牲陽極式防蝕之簡示圖	4-9
圖 4.3 海水中鋼樁長度計算示意圖	4-10
圖 4.4 電位量測示意圖	4-22
圖 4.5 外加電流式之安裝示意圖	4-22
圖 4.6 剩餘陽極形狀尺寸計算	4-26
圖 4.7 鋼板樁犧牲陽極配置示意圖	4-29
圖 4.8 鋼管(板)樁犧牲陽極配置示意圖	4-34
圖 5.1 強塑劑對混凝土凝結時間之影響	5-14
圖 5.2 添加強塑劑對混凝土之坍度損失	5-14

圖 5.3 固定坍度含不同強塑劑量混凝土之強度發展-----	5-15
圖 5.4 試驗流程 -----	5-20
圖 5.5 混凝土試驗用 V 形漏斗尺寸圖-----	5-33
圖 5.6 U 型鋼筋間隙通過箱 -----	5-35
圖 5.7 四探針式之電阻量測簡示圖 -----	5-38
圖 5.8 試體抗壓強度發展趨勢 -----	5-45
圖 5.9 試體超音波脈波速度與齡期關係圖 -----	5-46
圖 5.10 試體之電阻係數發展與齡期之關係 -----	4-48

照片目錄

照片 5.1	ELE 2000KN 抗壓機	5-39
照片 5.2	超音波測定儀	5-39
照片 5.3	透水試驗儀	5-40
照片 5.4	電滲量試驗儀器（一）-試體前處理	5-40
照片 5.5	電滲量試驗儀器（二）-量測電流量	5-41
照片 5.6	混凝土電阻量測儀	5-41
照片 5.7	V 型漏斗試驗	5-44
照片 5.8	U 型鋼筋間隙通過箱	5-44

第一章 前言

港灣構造物依建造材料可簡單分成混凝土(鋼筋混凝土)及鋼材構物等兩大類。混凝土構物包括有碼頭、防波堤、消波塊、沉箱、碼頭 PC 樁、RC 樁、各型構件及港區建物等。鋼構物主要為碼頭鋼板(管)樁、固定結構之拉桿、鋼纜線以及排放(流)管線等等。由於台灣四面環海，地處環太平洋地震帶上，每年地震、颱風等災害不斷，港灣構造物長年處於此巨大外力衝擊與海洋惡劣環境下，構造物極易發生劣化、腐蝕、損壞、崩塌等現象，對結構物之耐久性與安全性威脅甚巨。

海水對鋼(鐵)材料為一容易腐蝕的環境，鋼構物常年浸泡於海水環境下，甚難倖免於腐蝕損壞的威脅。近年來，台灣地區新建之港灣設施，諸如高雄港區第五貨櫃中心、雲林麥寮工業港及台北港等之開發，均已大量採用鋼板樁碼頭之方式建造，加上各港區早期興建之鋼板樁碼頭，總計數量龐大。為此，鋼板樁之腐蝕現況對碼頭設施之安全與港口營運影響甚鉅。

近年來，隨著時代之演進與科技的進步，新材料(諸如添加波索蘭參料)、新施工技術(如免搗實自充填混凝土)、加速養護等工法，不斷的在開發應用，同時維護工法(諸如防蝕技術與防制策略)之使用，已大幅提升混凝土使用效能與工程品質，並提高結構物之耐久性與使用年限。又國內天災頻傳，許多工程設施一夕之間，不是損壞倒塌，就是安全堪慮，因此，構造物之現況是否安全堪用，必需明確瞭解與確保。為建立安全預警功能，構造物現況之調查、檢測與日常維護必需落實，且日益突顯其重要性與必要性。

本計畫第一年研究重點，乃針對混凝土新材料、新工法之開發與應用，從相關之試驗與評估結果顯示，採用新材料、新工法可大幅改善混凝土之品質與耐久性，對港灣工程設施有顯注之提升。另外，在鋼構造物之調查研究部份，已完成基隆、蘇澳、台中、花蓮、高雄港域之海水

水質調查，並進行花蓮港#5 碼頭鋼板樁腐蝕檢測與後線拉桿之腐蝕開挖檢測、基隆、蘇澳與台中港區部份碼頭鋼板樁腐蝕檢測與陽極塊放電效能之調查。

本年度(92 年)，仍然持續第一年之研究重點進行較深入廣泛研究外，亦因工程防蝕實務須求，增列第三個子計畫(港灣結構物陰極防蝕準則草案訂定研究—港灣鋼構造物之防蝕準則)，進行相關之研究與探討，期盼防蝕準則之完成，能提供相關工程單位參考採用。各子計畫之詳細研究內容，分別列述於實施策略中。

第二章 研究計畫概述

為因應工程實務之須求，本年度特將研究重點分為三個子計畫執行；子計畫(一)碼頭鋼板樁現況調查與腐蝕防制方法研究；子計畫(二)港灣結構物陰極防蝕準則草案訂定研究；子計畫(三)混凝土結構物耐久性試驗研究。各子計畫研究內容細節，分別列述於后：

2.1 計畫內容與研究方法

2.1.1 子計畫(一)：碼頭鋼板樁現況調查與腐蝕防制方法研究

國內鋼板(管)樁碼頭已使用近四、五十年了，從港務局歷年之檢修記錄，以及港研中心多年來之調查發現，部份港口之鋼板樁碼頭在興建之初即未做陰極防蝕保護措施，因此有些鋼板樁之腐蝕早已相當嚴重。

碼頭鋼板(管)樁及其附屬鋼(鐵)材構件，大多位於水面下，由於檢測不易，常有發生嚴重破損而未能及時發現，影響碼頭使用安全甚巨。因此，對鋼構物外觀腐蝕狀況之了解，除了必需派請潛水人員下水，做近距離接觸、觀測、拍照、記錄損壞之位置外，另一方面必需對鋼構物進行鋼材之腐蝕電位量測。鑑於安全與維護之需求，應定期進行現況檢測、監控，以確保結構安全及延長壽命。

本計畫乃以基隆、台中、高雄、花蓮、蘇澳等五大港口之碼頭鋼板樁腐蝕現況調查為主，視經費及人力狀況，擬擴增台南之安平新港、台北港、布袋商港或其它港口之碼頭鋼板樁。期待能建立完整之台灣四周海域海水水質特性，整理歸納影響鋼板樁腐蝕行為因素，進而探討適用於本土鋼構造物腐蝕防治方法。

2.1.1.1 研究內容

1. 調查港區海水水質變化

2. 調查鋼板樁腐蝕現況
3. 量測鋼板樁現有厚度
4. 分析鋼板樁腐蝕速率
5. 研討腐蝕防治機制
6. 鋼板樁碼頭結構安全分析

2.1.1.2 實施方法與步驟

1. 資料蒐集

蒐集港區鋼板(管)樁碼頭建造基本資料(如建造時間、板樁型式、碼頭結構斷面、板樁材料化學成份、防蝕措施等)。

2. 調查港區海水水質變化

分析海水之溫度、比電阻、溶氧量、pH 值、Cl⁻、SO₄²⁻、COD 等變化，建立港區環境腐蝕因子。

3. 調查現有鋼板樁碼頭之腐蝕情形

由潛水人員以目視方式觀察並攝影，紀錄水面下鋼板樁表面腐蝕狀況，供研究人員分析。

4. 鋼板樁之腐蝕電位檢測

以半電池電位儀(高阻抗係數之三用電錶儀)，搭配銅/硫酸銅(Cu/CuSO₄)之參考電極，檢測鋼板樁之腐蝕電位值。

5. 犧牲陽極(塊)之放電效應與消耗檢測

以感應電流計檢測陽極塊所釋放出之保護電流大小，並量測陽極塊耗損之重量。

6. 鋼板樁現有厚度之檢測

每 5 公尺(或適當間距)選定一檢測樁，全面檢測碼頭鋼板樁厚度。

7. 分析碼頭鋼板樁之腐蝕速率

建立每一碼頭鋼板樁之腐蝕速率。

8. 腐蝕防治方法之探討

- (1) 防蝕塗覆
- (2) 防蝕帶包覆
- (3) 安裝犧牲陽極塊之保護
- (4) 其它防蝕設計、防蝕材料之評估

9. 鋼板樁碼頭結構安全分析

評估鋼板樁碼頭結構之安全性。

2.1.2 子計畫(二)：港灣結構物陰極防蝕準則草案訂定研究

海洋環境下不論是浸泡於海水或濱海陸上之結構物，由於受到海水的浸泡或海風中挾帶含量高之鹽份之侵入，鋼構物容易發生銹蝕，鋼筋混凝土構造物亦造成體積膨脹，導致混凝土的劣化，表面剝落、塌陷、終致損壞。西元 1973 年美國聯邦公路總署(FHWA)，經過多年的試驗與研究，公開宣佈陰極防蝕為解決鋼筋混凝土橋樑腐蝕唯一有效的方法。但是國內工程案例中，甚少採用，推究其原因乃國內並無一套完善的規範可供遵循。有鑑於此，本所港研中心乃於民國 90 年，完成「港灣構造物陰極防蝕準則草案-(鋼筋混凝土部份)」之訂定，將可提供港務局及其它工程單位在維護或新建工程時之參考。

至於海水環境下，陰極防蝕更為公認最為有效之防蝕工法，在國外使用已有百年歷史之久。台灣地區之鋼板(管)樁碼頭已使用近四五十年，從港務局歷年來之檢修記錄，以及港研中心對五港區之調查發現，部份港口之鋼板樁碼頭在興建之初即未做陰極防蝕，因此有些鋼板樁之腐蝕早已相當嚴重，並曾發生碼頭結構嚴重損壞案例，對港區營運與安全威脅甚巨。

鑑於工程實務需求，本研究之主要目的，在於彙整專家學者、業界與港務局等單位，共同制定一套適合本土港灣鋼構造物陰極防蝕之準則與防蝕工法，並對以完成之鋼筋混凝土部份之缺失進行檢討修正，以利日後維護、管理或新建工程在防蝕設計上之依據。

2.1.2.1 研究內容

- 1.修訂港灣結構物陰極防蝕準則草案-R.C.結構物部份之內容
- 2.訂定港灣鋼結構物陰極防蝕草案
- 3.研擬碼頭鋼版樁腐蝕評估制度
- 4.研擬碼頭鋼版樁防蝕維護機制

2.1.3 子計畫(三)：港灣混凝土結構物耐久性試驗研究

港灣設施大量使用混凝土材料建造，由於混凝土為一多孔隙性之材料，於海洋環境下甚易受到海水或海風挾帶高量鹽份之侵入，造成鋼筋混凝土結構物中之鋼筋發生銹蝕、體積膨脹，導致混凝土的剝落、塌陷、終致損壞等之嚴重問題。

近年來，隨著時代之演進與科技的進步，新材料(諸如添加波索蘭摻料)、新施工技術(如免搗實自充填混凝土)、加速養護等工法，不斷的在開發應用，不但提升混凝土使用效能與工程品質，並大幅提高結構物之耐久性與安全性。台灣對外經貿運輸主要以海運為主，港灣工程設施之建造、維護與安全極其重要，不言可喻。

2.1.3.1 研究內容

- 1.混凝土材料之應用與性能提升之探討
- 2.混凝土「鹼質與粒料反應」之現地調查與防治改善之探討
- 3.自充填混凝土應用於港灣工程設施
- 4.R.C.結構物之耐久性與鋼筋防蝕防治

5.結構物現況檢測及安全評估與維護。

2.1.3.2 實施方法與步驟

1.相關研究文獻之蒐集及研析

2.新材料之基本物性、化性之試驗

(1)水泥漿相關性質試驗

(2)硬固混凝土相關物理性質試驗(抗壓強度、透水係數、電阻係數、電滲量、彈性模數等)

3.自充填混凝土之相關試驗探討

(1)配比設計、試拌、基本性質試驗(包括抗壓、透水、電阻、電滲、彈性係數等)

(2)自充填混凝土試驗牆耐久性試驗

量測試驗牆混凝土之抗壓強度、電阻係數、超音波波速、中性化深度、鋼筋腐蝕電位、鋼筋腐蝕電流等變化。

4.港灣棧橋碼頭 R.C.面板底面陰極防蝕安裝實作與監測

選定蘇澳港區之棧橋碼頭腐蝕嚴重之 R.C.面板, 進行陰極防蝕之安裝實作與監測, 施做面積約 10m x 9m。

5.混凝土「鹼質與粒料反應」之檢測與防治研究

(1)進行「鹼質與粒料反應」現地調查

(2)建立現地調查之快速檢測、診斷技術、活性粒料試驗

(3)防治方法之研究(表面塗覆、添加波索蘭材料、電化學抑制法)

第三章 鋼板樁碼頭現況調查與腐蝕防制研究

3.1 前言

鋼板（管）樁碼頭具有施工設備簡單、施工期短，工程費用少、壁體較富彈性、耐震性強、不需要水下基礎工程…等優點，在港灣工程中廣受應用，然其最大的缺點為容易發生腐蝕。

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

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

潮汐帶界於高低潮位之間，因空氣與海水波浪之交互作用，海水中之溶氧濃度增加，潮汐帶下方緊臨海中帶之部份，將形成氧氣濃差電池作用，位於此區域之鋼材可視為一陰極反應區，其腐蝕速率低。但低潮位下約 1 公尺處(海中帶部份)因溶氧量低，鋼材變成陽極反應部位，腐蝕量將較大；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。深海處之鋼材由於溶氧量低。腐蝕速率亦相對降低。海泥(床)帶區域內如海底土壤無存在硫化氫或硫酸還原菌，鋼材腐蝕速率很小。

國內鋼板（管）樁之腐蝕速率，早期多沿襲日本之設計準則，以 0.20 mm/yr. 為設計允許值，由於不同海域環境，其腐蝕速率亦有差異，使用上述之準則設計，是否合適，值得研究。本所港研中心於民國 79 年至 91 年間，曾在國內五大港口港區碼頭之鋼板(管)樁進行全面調查，發現部分港區碼頭之鋼板(管)樁腐蝕問題嚴重，不僅腐蝕速率大於允許設計值，並發生穿孔、破洞等情形，甚至曾發生碼頭岸壁後方級配砂石流失、掏空、岸肩沉陷或靠海床處鋼板發生開裂及彎曲等重大損壞^{[1]~[5]}。為確保碼頭作業安全，調查對象以建造年份較早者為優先考量，結果顯示海中帶採用犧牲陽極塊作為防蝕工法，可確實達到降低鋼板樁腐蝕速率之效果。本年度（92 年）將對以往未曾調查過之碼頭構造物繼續進行，調查選定對象為安平港 3 號、4 號碼頭，台北港東 1、東 2、東 3 號碼頭鋼板樁；台中港 99 號碼頭、基隆港東 10 號碼頭鋼管樁，建造時間約 3~13 年左右，調查結果後續將與歷年調查資料進行分析比較。

3.2 研究規劃

3.2.1 規劃流程

本研究參考國內外相關文獻與調查報告後，依實際需求擬訂適當之調查方法與試驗項目，調查規劃流程如圖 3.1 所示。

3.2.2 資料蒐集與分析

蒐集鋼板（管）樁碼頭建造之原始資料，包括碼頭結構設計、板樁型式、防蝕處理方法、使用年限、施工、...等，以及國內外鋼板樁腐蝕防治相關文獻。

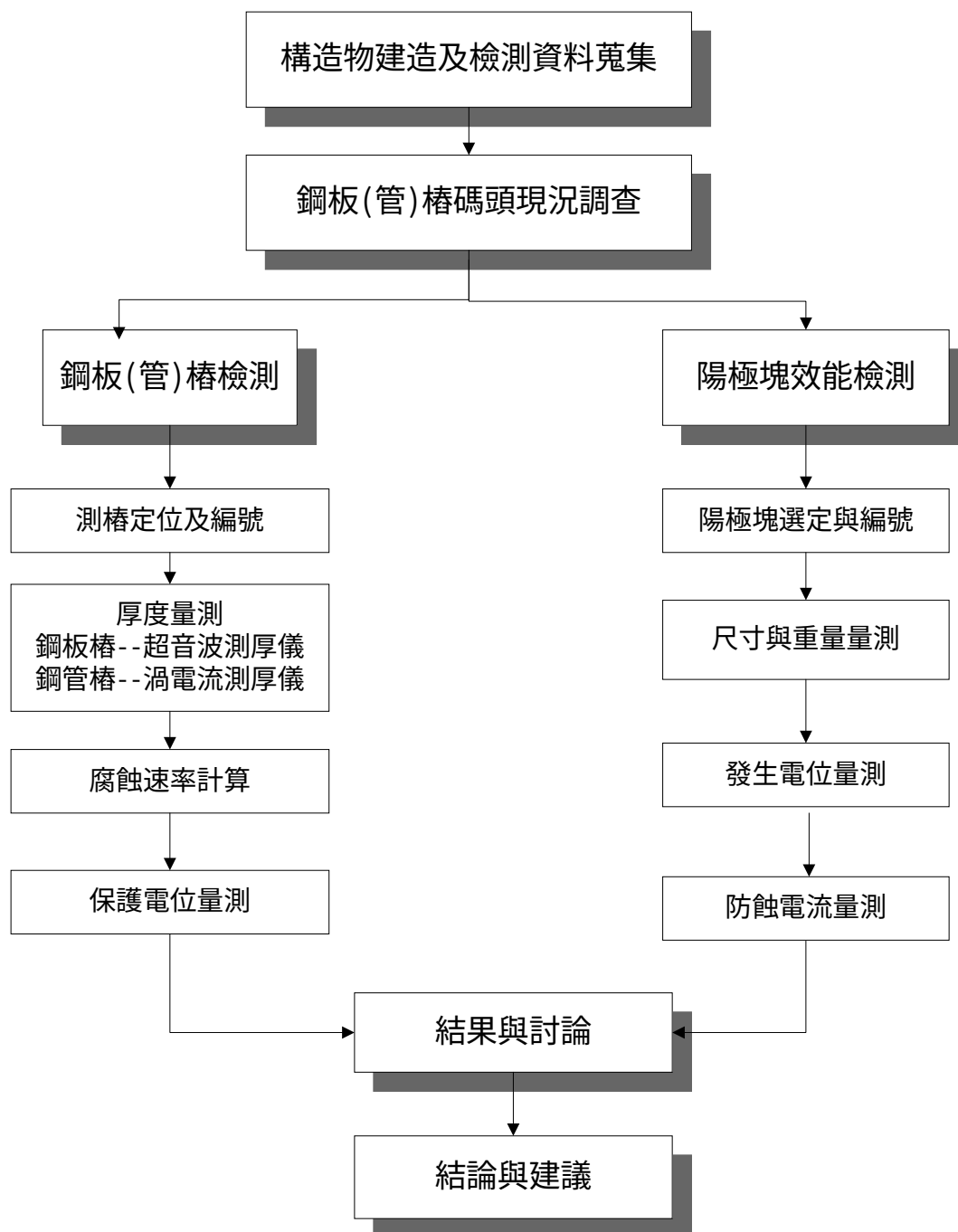


圖 3.1 調查規劃流程圖

3.2.3 檢測範圍

檢測範圍包含台灣地區北、中南部。南部為安平港 3 號、4 號碼頭；中部為台中港 99 號碼頭；北部為台北港東 1、東 3 號碼頭、基隆港東 10 號碼頭。

3.2.4 鋼板樁檢測

3.2.4.1 目視檢測

由潛水人員潛入水下，近距離以目視檢測鋼板（管）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，再檢查鋼板（管）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。

3.2.4.2 厚度量測

1. 選定檢測樁

鋼樁厚度檢測安平港 3 號、4 號碼頭各選定 40、50 支測樁；台北港東 2、東 3 號碼頭各 35、105 支測樁；台中港 99 號碼頭共 6 排 39 支測樁、基隆港東 10 號碼頭共 15 排 45 支測樁。

2. 選定水深與量測位置

依各港碼頭構造物腐蝕可能狀況，每支鋼板（管）樁選定五至九點水深作為量測點，每支測樁之測點以潮汐帶至少一點，水中帶至少兩點為選定原則。U 型鋼板樁檢測其凸面或凹面之厚度，鋼管樁則依圓周四等分取三或四點量測其厚度。檢測水深以平均海平面為基準，標示方式如圖 3.2 所示。

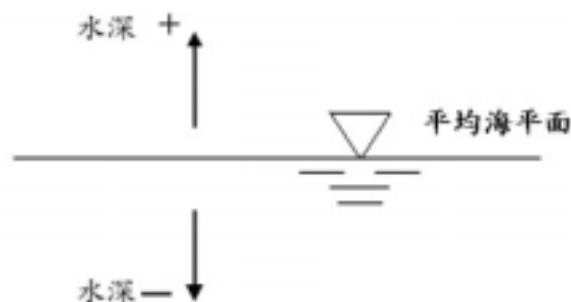


圖 3.2 檢測水深標示方式

3. 厚度量測與步驟

(1) 超音波測厚法

a. 海生物敲除

使用工具敲除鋼板樁表面上附著之海生物體及鐵銹，敲除面積約 20 cm × 20 cm 左右。

b. 厚度量測^[10]

以英國製之 Cygnus I 型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。於每一水深測點量取兩次鋼板樁厚度，平均後即為其現有厚度。圖 3.3 為潛水人員於海中量測鋼板（管）樁厚度之情形。



圖 3.3 水面下超音波量測鋼板

c. 測厚原理

超音波厚度儀係利用脈衝原理，由於音波在鋼材之傳播速率為一定值，因此，由探頭傳送出一彈性波，經鋼材表面至內壁之傳播時間，即可算出波通過路徑之距離(鋼材厚度)，精準度可達 ± 0.1 mm，可由接收器直接讀取厚度，其原理簡示於圖 3.4。

厚度計算可由下列數學式求得：

$$S_i = V \times 1/2 (t_{i+1} - t_i). \quad (\text{公式 3.1})$$

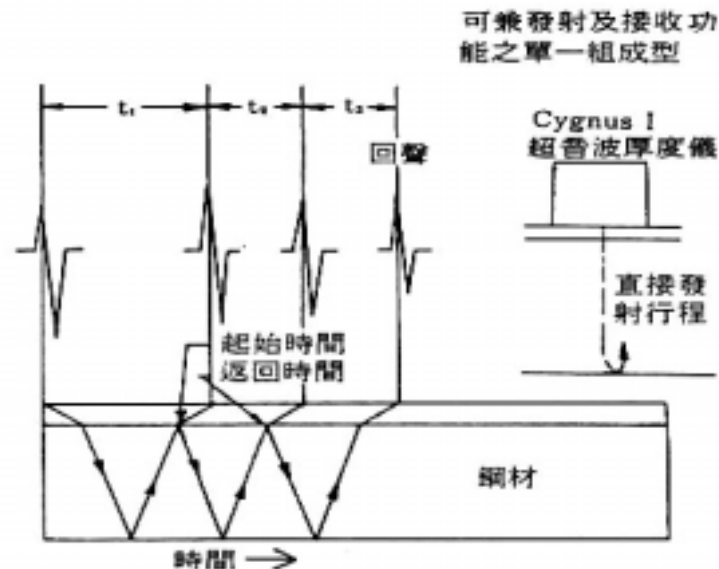


圖 3.4 超音波測厚儀量測之示意圖

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

(2) 渦電流檢測法

a. 檢測設備

檢測設備包括筆記型電腦、訊號處理器、探頭及電池等四個元件。

（如圖 3.5）探頭激發和接收渦電流訊號後，透過訊號處理器平衡、放大等過程，在筆記型電腦上得一時間訊號曲線，利用時間訊號曲線之轉折點，判斷鋼材平均腐蝕情況。本次調查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。



圖 3.5 渦電流檢測設備

b. 檢測原理

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，藉此改變測知其缺陷，達到檢測目的。除可檢測圓柱、管件、薄板等表面及近表面之缺陷外，並可檢測受測材料之材質特性，如塗膜厚度、導電率、導磁率及電阻等，惟僅適用於導電材料。檢測鋼材時，因鋼材厚度及形狀之限制，其內部缺陷不易測出且訊號判定困難，需賴具豐富經驗之檢測者實施。

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

渦電流檢測時所得到之時間訊號曲線，經由統計理論作迴歸分析，計算判定係數而推估鋼材現有厚度。判定係數正確與否直接影響檢測結果，因此，檢測前需先設定參數，如鋼材最大厚度、附著物包覆厚度、環境溫度範圍等，方能得到最佳訊號曲線，提高檢測之準確性，圖 3.6 海水中渦電流量測鋼板樁厚度之情形。。



圖 3.6 海水中渦電流量測鋼板樁厚度之情形

4. 腐蝕速率計算

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

$$\begin{aligned} \text{腐蝕速率} &= \text{腐蝕量} / \text{使用年期} \\ &= (\text{原始厚度}-\text{現有厚度}) / \text{使用年期} \quad (\text{公式 3.2}) \end{aligned}$$

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：

$$V_C = \frac{C}{Y_C + (1-P)Y_P} \quad (\text{公式 3.3})$$

$$V_P = \frac{C - V_C \times Y_C}{Y_P} \quad (\text{公式 3.4})$$

式中 V_C = 無防蝕措施之腐蝕速率 (mm/yr.)

V_P = 有防蝕措施之腐蝕速率 (mm/yr.)

Y_C = 無防蝕措施之年期 (yr)

Y_P = 有防蝕措施之年期 (yr)

C = 腐蝕量 (mm)

P = 防蝕率，防蝕率與海水浸水率之關係示如表 3.1。

表 3.1 防蝕率與海水浸水率之關係^[6]

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

(註) 海水浸水率：鋼材浸於海水之時間與鋼材使用全部時間之比

3.2.4.3 鋼板樁保護電位量測

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板樁連結之不銹鋼電位測試棒上，另一端則置於欲量測之鋼板樁旁。

防蝕效果的判斷標準如表 3.2 所示，若鋼鐵結構物之保護電位值較標準防蝕電位值為"負"時，鋼鐵結構物是為保護狀態，若電位值比標準防蝕電位值"正"時，則表示保護不足或防蝕效果不佳。以飽和硫酸銅參考電極為例，若鋼鐵結構物之電位值較 -850 mV 為"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 3.2 海水中鋼構造物之防蝕保護電位標準^[6]

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

3.2.5 陽極塊調查

3.2.5.1 選定陽極塊

陽極塊調查數量各港均為 15 支。安平港 3 號碼頭選定 6 支，4 號碼頭選定 9 支陽極塊；台中港 99 號碼頭於距起點第 6 及 18 排樁分別選定 7 支及 8 支陽極塊；台北港東 2 碼頭於水深 -2 m 處選定 1 支，東 3 碼頭選定 14 支；基隆港東 10 號碼頭選定距起點 143 m、146 m、149 m 三處各 5 支。

3.2.5.2 陽極塊發生電位之量測

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

3.2.5.3 陽極塊外觀檢查

陽極塊切割後將陽極塊吊至岸上，先將附著之海生物去除後，觀察記錄陽極塊外觀及消耗情況，並量測陽極塊兩端距端點 10 公分處及中間之現有尺寸，量測位置如圖 3.7 所示。

3.2.5.4 陽極塊重量量測

陽極塊完成外觀檢查記錄後，再將其稱重之（最小讀數至 0.1 公斤，陽極塊實際重量應另扣除鐵蕊之重量）。完成殘留重量之量測後，

切下之陽極塊必需再焊接回原來之鋼板樁上，切割前後與焊接後均須拍照記錄。

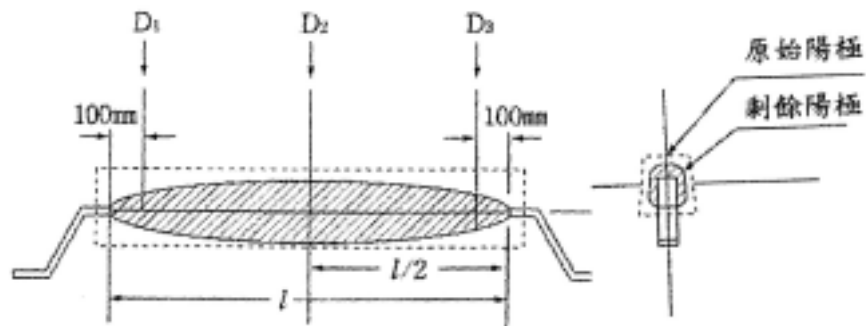


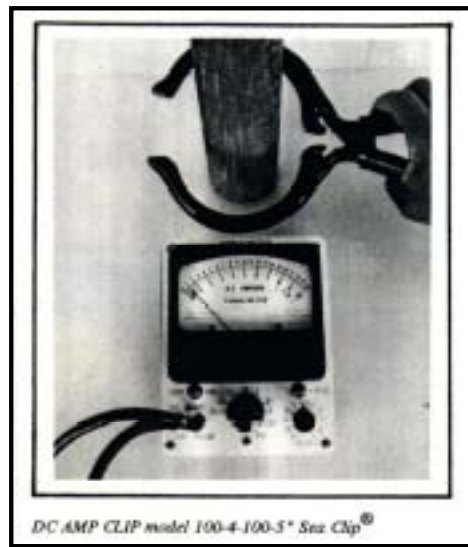
圖 3.7 陽極塊尺寸量測位置

3.2.5.5 陽極塊輸出電流量測

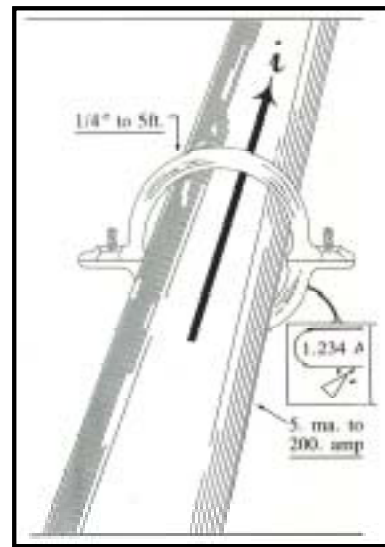
量測時，由潛水人員以電流計之感應環套於陽極塊上方或下方鐵蕊，再由岸上人員直接於電流計讀取電流值。圖 3.8 為潛水人員於海中量測陽極塊輸出電流之情形，電流計及感應環構造示如圖 3.9 (a)，量測原理示如圖 3.9 (b) ^[20]。



圖 3.8 陽極塊輸出電流量測



(a)



(b)

圖 3.9 電流計、感應環構造及量測原理^[20]

3.3 結果與討論

3.3.1 碼頭構造物背景資料搜集與分析

本次調查安平港 3 號、4 號碼頭、台北港東 1、東 2、東 3 號碼頭鋼板樁；台中港 99 號碼頭、基隆港東 10 號碼頭鋼管樁等構造物，背景資料如表 3.3 所示。

表 3.3 鋼板（管）樁碼頭構造物背景資料

構造物名稱	長度 (m)	水深 (m)	鋼板（管）樁 型 式	原始厚度 (mm)	完 工 日期(年)	防蝕處理
安平港3號碼頭	160	-9	SSP PU32 U型鋼板樁	19.5	80	犧牲陽極
安平港4號碼頭	160	-9	SSP PU32 U型鋼板樁	19.5	80	犧牲陽極
台中港99號碼頭	250	-12	SS41 鋼管樁 直徑=800mm	12.0	84	犧牲陽極
台北港東1號碼頭	170	-6	SSP PU32 U型鋼板樁	19.5	83	犧牲陽極
台北港東2號碼頭	170	-6	SSP PU32 U型鋼板樁	19.5	83	犧牲陽極
台北港東3號碼頭	170	-7.5	Larssen 6-131 U型鋼板樁	25.4	90	防蝕帶 犧牲陽極
基隆港東10號碼頭	204	-9	SS41 鋼管樁 直徑=660mm	12.0	79	犧牲陽極

3.3.2 鋼板樁現況檢測

3.3.2.1 安平港 3 號碼頭

本座碼頭於民國 80 年完工，水深 -9 公尺，碼頭全長 160 公尺，採用 SSP PU-32 U 型鋼板樁建造，鋼板樁以安裝犧牲陽極塊作為防蝕措施，整支鋼板樁均位於海水中。碼頭平面佈置、結構斷面、使用鋼板樁型式及陽極塊配置示如圖 3.10 至圖 3.13，陽極塊及電位測試裝置詳圖如圖 3.14。



圖 3.10 安平港 3 號、4 號碼頭平面佈置

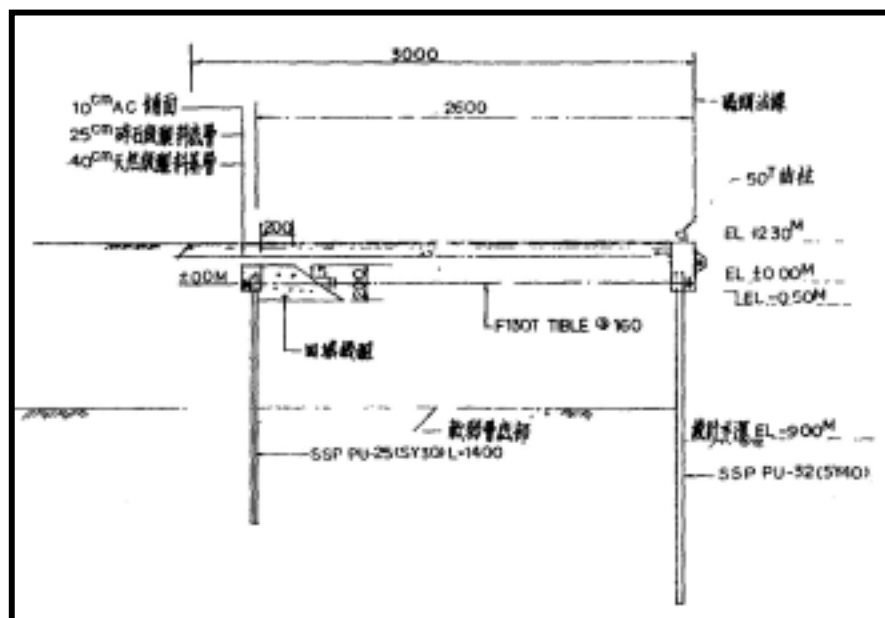


圖 3.11 安平港 3 號、4 號碼頭結構斷面

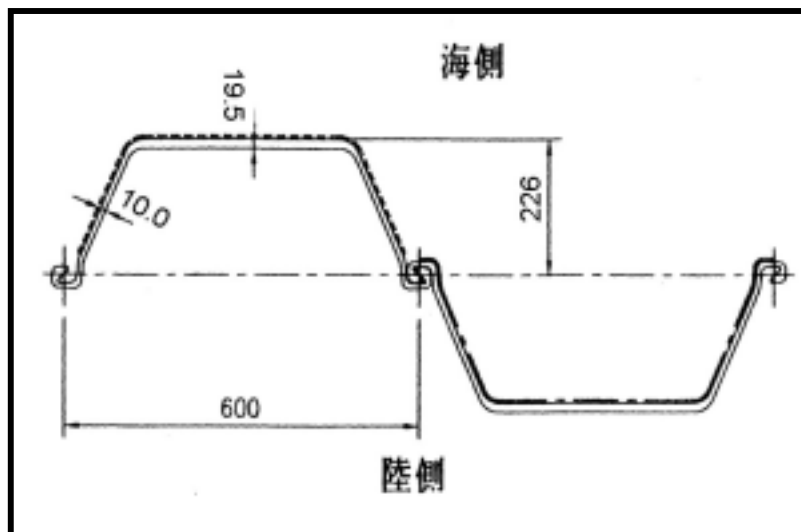
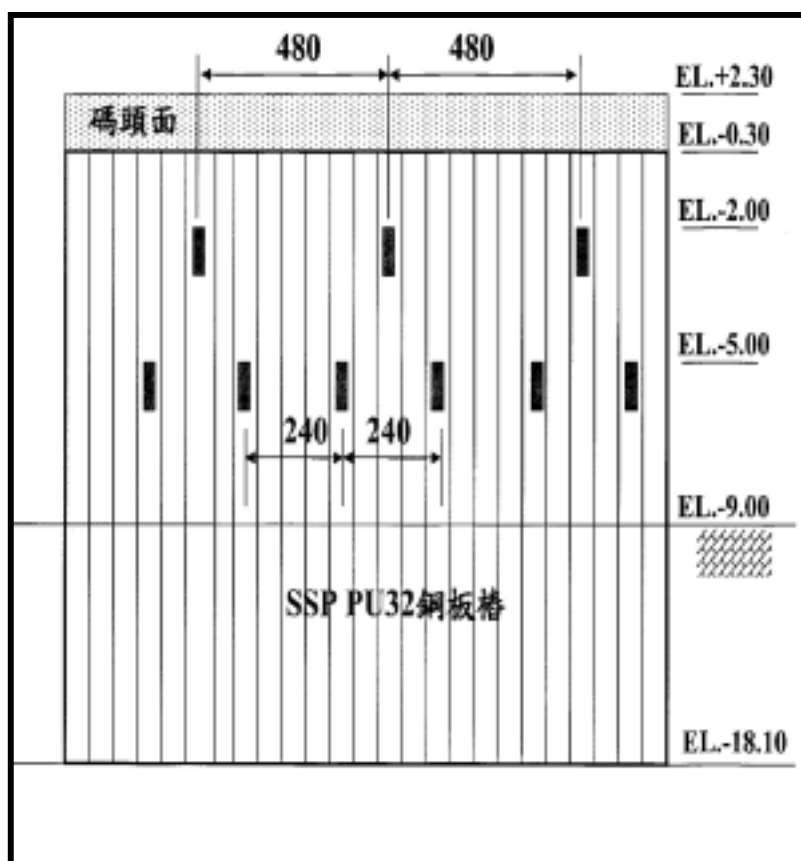


圖 3.12 PU-32 U 型鋼板樁型式



單位：
距離：cm
水深：m

圖 3.13 安平港 3 號、4 號碼頭鋼板樁陽極塊配置

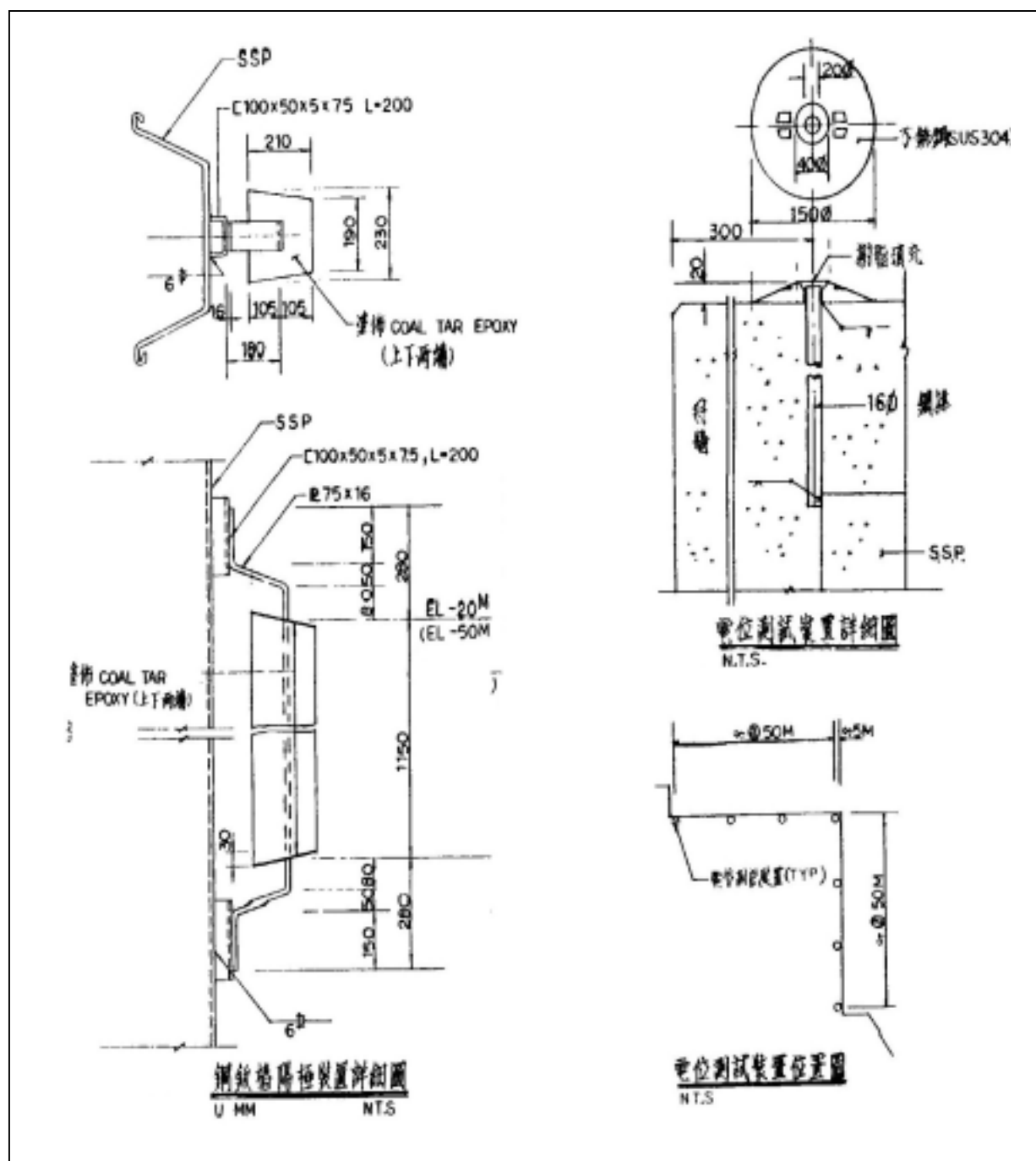


圖 3.14 安平港鋼板樁碼頭陽極塊及電位測試裝置詳圖

1. 目視檢測

本座碼頭鋼板樁均位於海水中，鋼板樁表面附著許多海生物，無明顯銹蝕斑點及凹凸不平現象，圖 3.15 及圖 3.16 為海生物敲除後之鋼板樁表面，外觀仍然保持光亮，顯見無嚴重腐蝕現象。

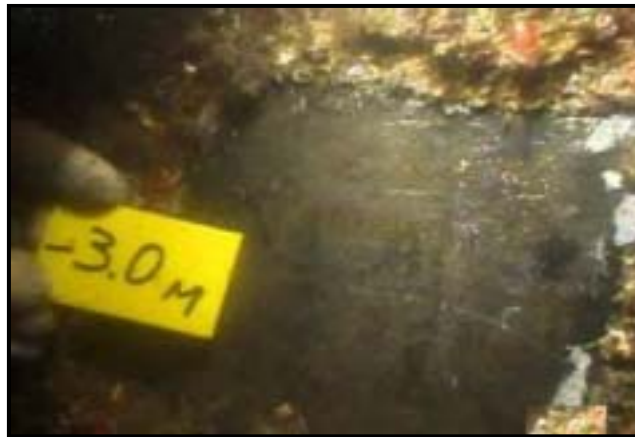


圖 3.15 海生物敲除後之鋼板樁表面 (1)

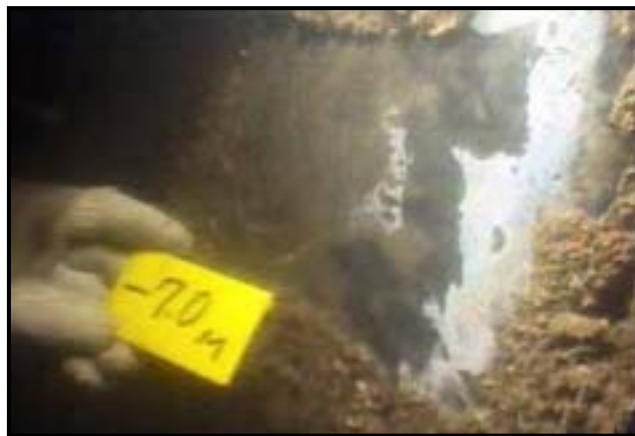


圖 3.16 海生物敲除後之鋼板樁表面 (2)

2. 鋼板樁厚度量測

圖 3.17 為 3 號碼頭鋼板樁厚度量測水深示意圖，於自起點 0 m、20 m、80 m、160 m 處各選取連續 10 支測樁，每支測樁檢測水深分別為 +0.3 m、± 0.0 m、-1.0 m、-2.0 m、-3.0 m、-4.0 m、-5.0 m、-6.0 m、-7.0 m，計 9 個深度測點，檢測點共計 360 點。

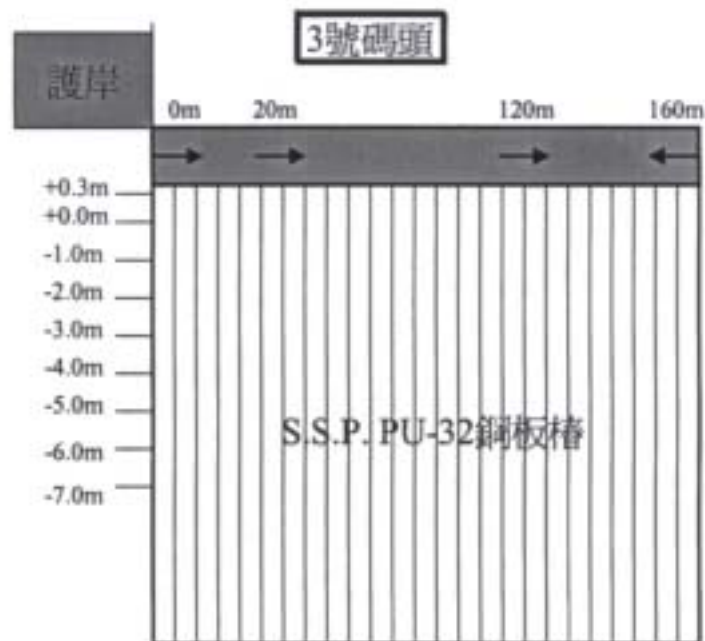


圖 3.17 安平港 3 號碼頭鋼板樁厚度量測水深示意圖

表 3.4 及圖 3.18 為 3 號碼頭鋼板樁平均腐蝕速率與檢測水深之關係。各檢測水深平均腐蝕速率均小於 0.06 mm/yr.，遠小於設計允許值 (0.20 mm/yr.)，圖 3.19 及圖 3.20 為各測樁腐蝕速率與水深關係，每一測點之腐蝕速率亦均小於設計允許值；量測現有厚度最小值為 18.4 mm，最大減少厚度僅約 1.1 mm，顯見腐蝕程度輕微，安裝犧牲陽極塊已達到防蝕之目的。

表 3.4 安平港 3 號碼頭鋼板樁平均腐蝕速率

水深(m)	+0.3	0.0	-1.0	-2.0	-3.0	-4.0	-5.0	-6.0	-7.0
腐蝕速率 (mm/yr.)	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06

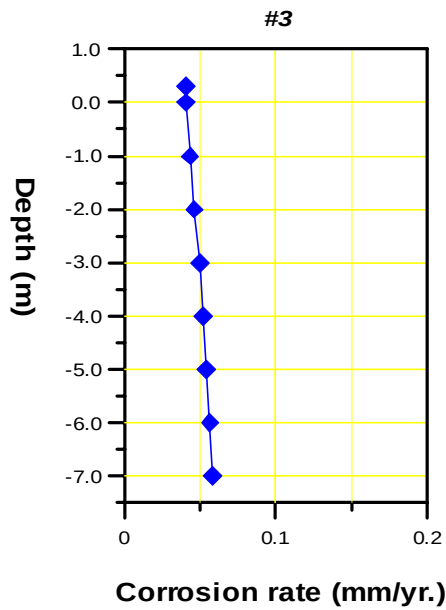


圖 3.18 安平港 3 號碼頭平均腐蝕速率與檢測水深之關係

3. 鋼板樁保護電位量測

鋼板樁保護電位量測位置如圖 3.21，量測結果列於表 3.5。保護電位最大值為 -928 mV ，最小值為 -1025 mV ，本座碼頭陽極塊保護電位均小於 -850 mV (以 Cu/CuSO_4 電極量測)，已達保護鋼板樁免於腐蝕之目的。

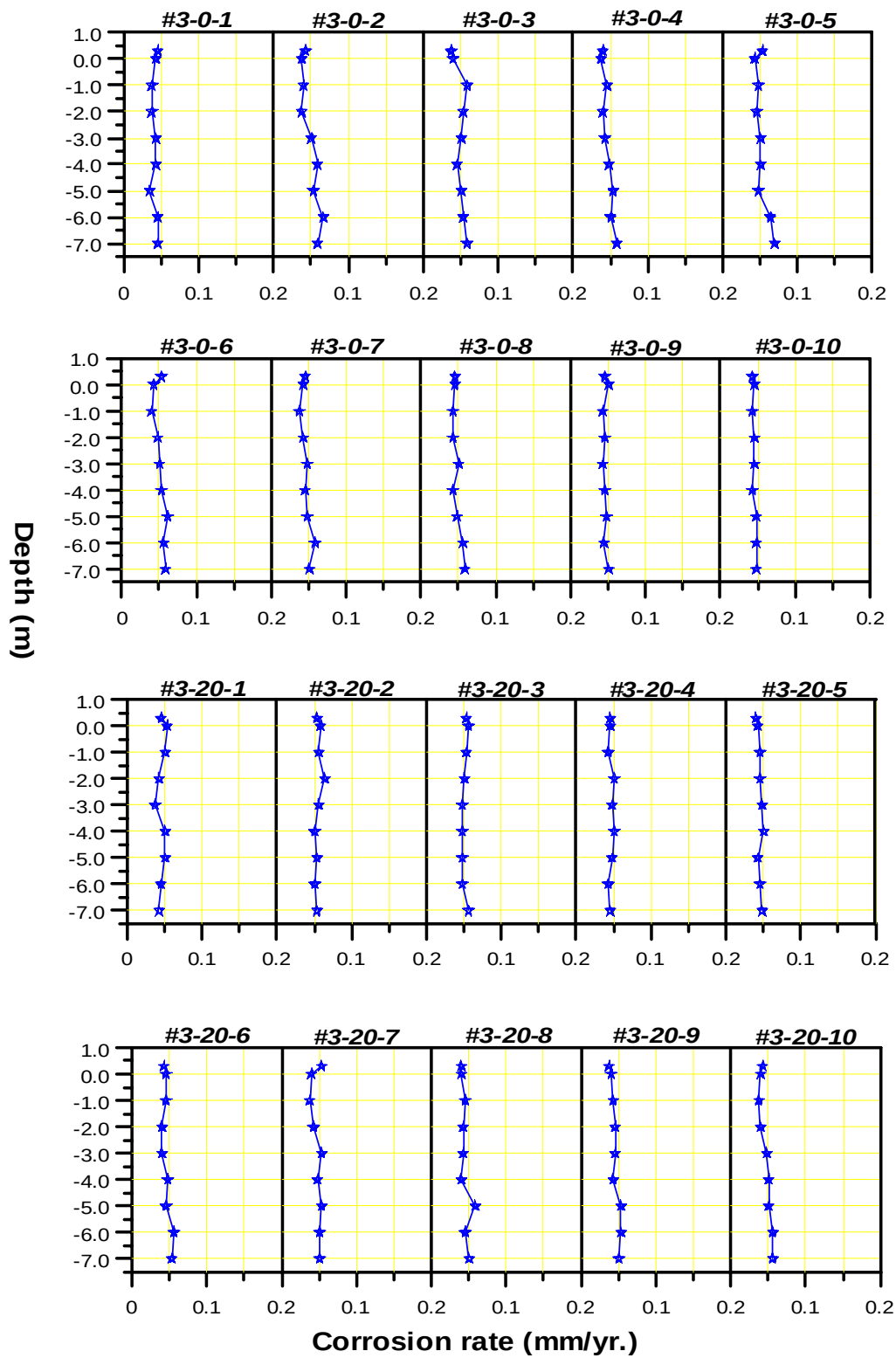


圖 3.19 安平港 3 號碼頭鋼板樁腐蝕速率與水深之關係 (1)

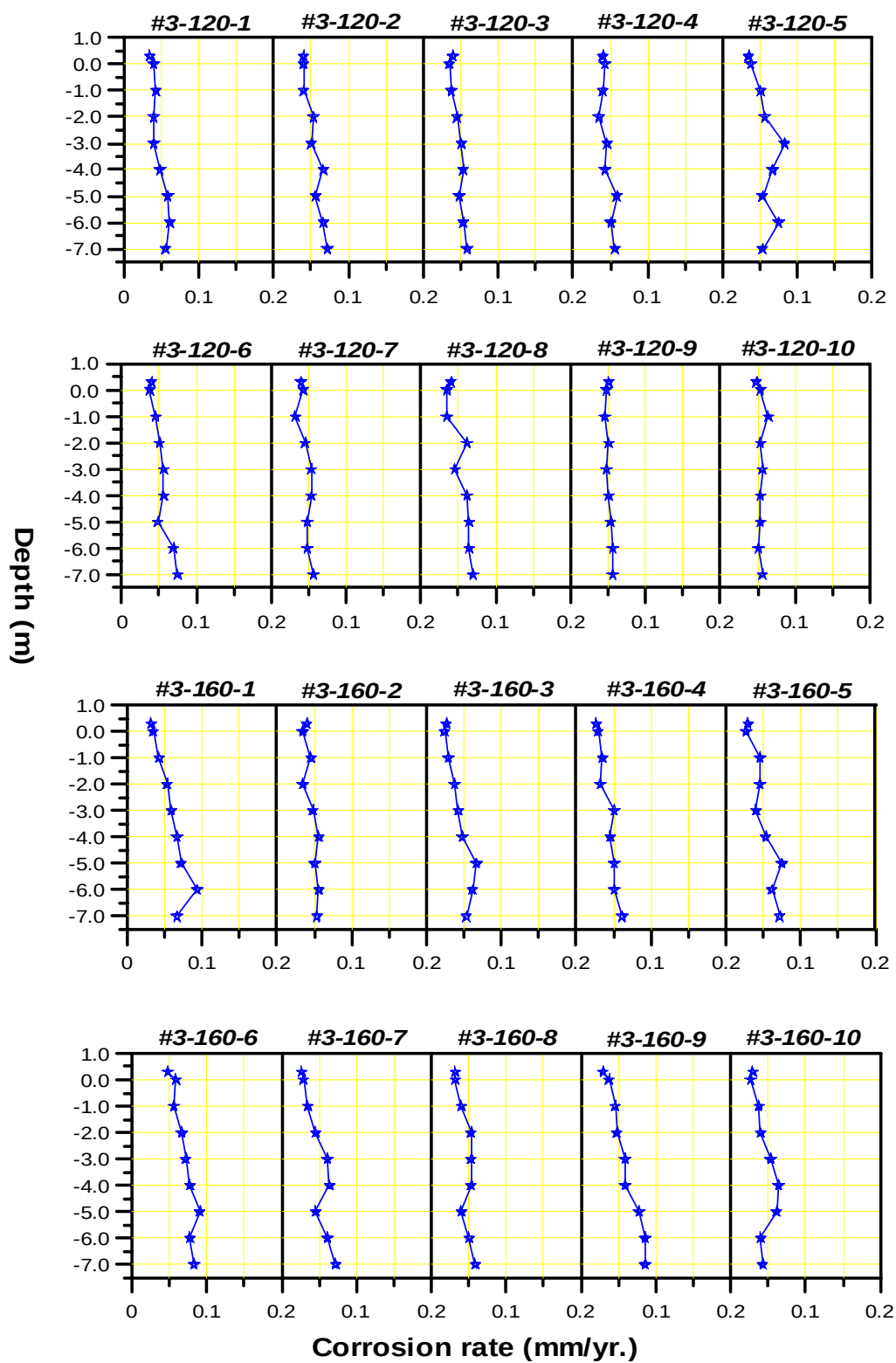


圖 3.20 安平港 3 號碼頭鋼板樁腐蝕速率與水深之關係 (2)

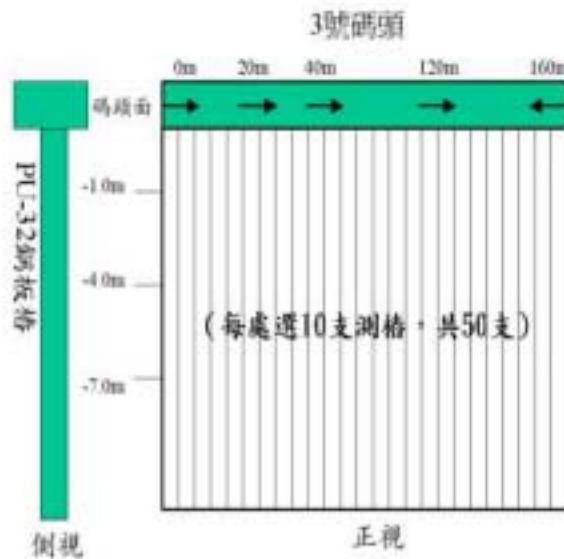


圖 3.21 安平港 3 號碼頭鋼板樁保護電位量測位置圖

表 3.5 安平港 3 號碼頭鋼板樁保護電位檢測結果 (mV)

水深 (m)	保護 電位	編 號	水深 (m)	保護 電位	編 號	水深 (m)	保護 電位	編 號	水深 (m)	保護 電位	編 號	水深 (m)	保護 電位
-1.0	-979	#3-20-1	-1.0	-971	#3-40-1	-1.0	-973	#3-120-1	-1.0	-993	#3-160-1	-1.0	-977
-4.0	-997		-4.0	-985		-4.0	-994		-4.0	-1003		-4.0	-1003
-7.0	-1005		-7.0	-1016		-7.0	-1012		-7.0	-1023		-7.0	-1009
-1.0	-977	#3-20-2	-1.0	-972	#3-40-2	-1.0	-820	#3-120-2	-1.0	-972	#3-160-2	-1.0	-975
-4.0	-1001		-4.0	-988		-4.0	-794		-4.0	-978		-4.0	-997
-7.0	-1005		-7.0	-1012		-7.0	-709		-7.0	-1018		-7.0	-1000
-1.0	-979	#3-20-3	-1.0	-972	#3-40-3	-1.0	-740	#3-120-3	-1.0	-975	#3-160-3	-1.0	-974
-4.0	-1039		-4.0	-982		-4.0	-735		-4.0	-988		-4.0	-997
-7.0	-1004		-7.0	-1018		-7.0	-759		-7.0	-1059		-7.0	-1015
-1.0	-978	#3-20-4	-1.0	-973	#3-40-4	-1.0	-585	#3-120-4	-1.0	-981	#3-160-4	-1.0	-972
-4.0	-995		-4.0	-992		-4.0	-652		-4.0	-989		-4.0	-983
-7.0	-1005		-7.0	-1005		-7.0	-647		-7.0	-1019		-7.0	-1011
-1.0	-981	#3-20-5	-1.0	-972	#3-40-5	-1.0	-606	#3-120-5	-1.0	-986	#3-160-5	-1.0	-973
-4.0	-997		-4.0	-988		-4.0	-620		-4.0	-996		-4.0	-993
-7.0	-1026		-7.0	-1012		-7.0	-721		-7.0	-1014		-7.0	-1013
-1.0	-975	#3-20-6	-1.0	-972	#3-40-6	-1.0	-744	#3-120-6	-1.0	-981	#3-160-6	-1.0	-973
-4.0	-985		-4.0	-982		-4.0	-795		-4.0	-989		-4.0	-993
-7.0	-1016		-7.0	-1005		-7.0	-789		-7.0	-1019		-7.0	-1013
-1.0	-978	#3-20-7	-1.0	-973	#3-40-7	-1.0	-846	#3-120-7	-1.0	-986	#3-160-7	-1.0	-973
-4.0	-1012		-4.0	-992		-4.0	-804		-4.0	-989		-4.0	-994
-7.0	-1011		-7.0	-1005		-7.0	-780		-7.0	-1012		-7.0	-1012
-1.0	-998	#3-20-8	-1.0	-978	#3-40-8	-1.0	-733	#3-120-8	-1.0	-985	#3-160-8	-1.0	-973
-4.0	-1012		-4.0	-995		-4.0	-734		-4.0	-992		-4.0	-1034
-7.0	-1026		-7.0	-1005		-7.0	-705		-7.0	-1023		-7.0	-1014
-1.0	-993	#3-20-9	-1.0	-981	#3-40-9	-1.0	-750	#3-120-9	-1.0	-988	#3-160-9	-1.0	-971
-4.0	-1000		-4.0	-997		-4.0	-790		-4.0	-1003		-4.0	-985
-7.0	-1029		-7.0	-1026		-7.0	-627		-7.0	-1023		-7.0	-1016
-1.0	-994	#3-20-10	-1.0	-975	#3-40-10	-1.0	-634	#3-120-10	-1.0	-995	#3-160-10	-1.0	-972
-4.0	-1005		-4.0	-985		-4.0	-616		-4.0	-1001		-4.0	-988
-7.0	-1024		-7.0	-1016		-7.0	-677		-7.0	-1028		-7.0	-1012

3.3.3.2 安平港 4 號碼頭

本座碼頭於民國 80 年完工，水深 -9 公尺，碼頭全長 160 公尺，採用 SSP PU-32 U 型鋼板樁建造，整支鋼板樁均位於海水中。碼頭結構斷面、鋼板樁型式及陽極塊配置均同 3 號碼頭。

1. 目視檢測

本座碼頭均位於海水中，鋼板樁表面附著許多海生物，無明顯銹蝕斑點及凹凸不平現象，海生物敲除後之鋼板樁表面，外觀仍然保持光亮。

2. 鋼板樁厚度量測

圖 3.22 為 4 號碼頭鋼板樁厚度量測位置示意圖，於自起點 0 m、40 m、80 m、120 m、160 m 共五處各選取連續 10 支測樁，每支測樁檢測水深同 4 號碼頭，檢測點共計 450 點。

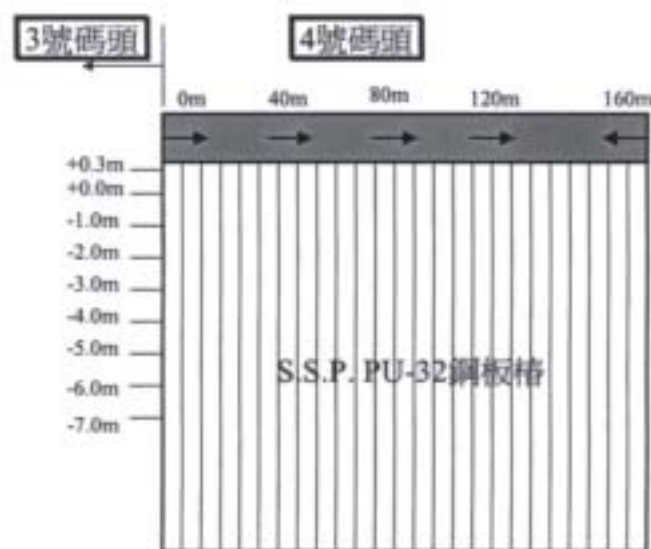


圖 3.22 安平港 4 號碼頭鋼板樁厚度量測位置示意圖

表 3.6 及圖 3.22 為 4 號碼頭鋼板樁平均腐蝕速率與檢測水深之關係。各檢測水深平均腐蝕速率均小於 0.05 mm/yr.，遠小於設計允許值，圖 3.23 至圖 3.25 為各測樁腐蝕速率與水深關係，腐蝕速率亦均小於設

計允許值；量測現有厚度最小值為 18.4 mm，最大減少厚度僅約 1.1 mm，顯見腐蝕程度輕微，安裝犧牲陽極塊已達到防蝕之目的。

3. 鋼板樁保護電位量測

鋼板樁保護電位量測位置如圖 3.26，量測結果列於表 3.7。保護電位最大值為 -942 mV，最小值為 -1068 mV，本座碼頭陽極塊保護電位均小於-850 mV (以 Cu/CuSO₄ 電極量測)，已達保護鋼板樁免於腐蝕之目的。

表 3.6 安平港 4 號碼頭鋼板樁平均腐蝕速率檢測結果

水深(m)	+0.3	0.0	-1.0	-2.0	-3.0	-4.0	-5.0	-6.0	-7.0
腐蝕速率 (mm/yr.)	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05

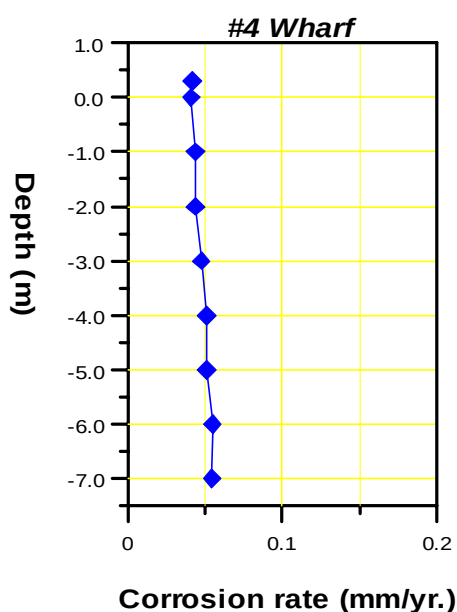


圖 3.23 安平港 4 號碼頭鋼板樁平均腐蝕速率與檢測水深之關係

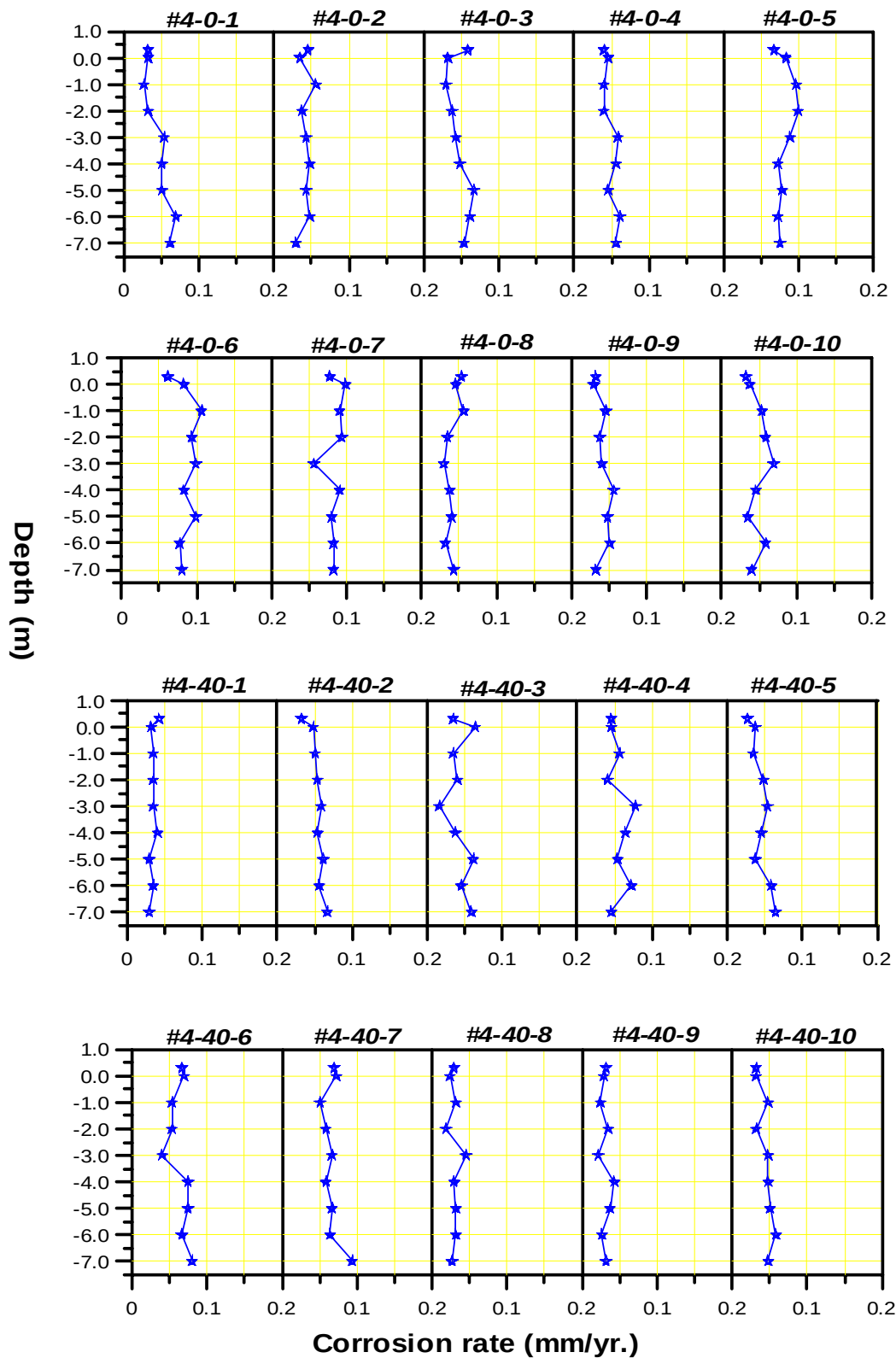


圖 3.24 安平港 4 號碼頭鋼板樁腐蝕速率與檢測水深之關係 (1)

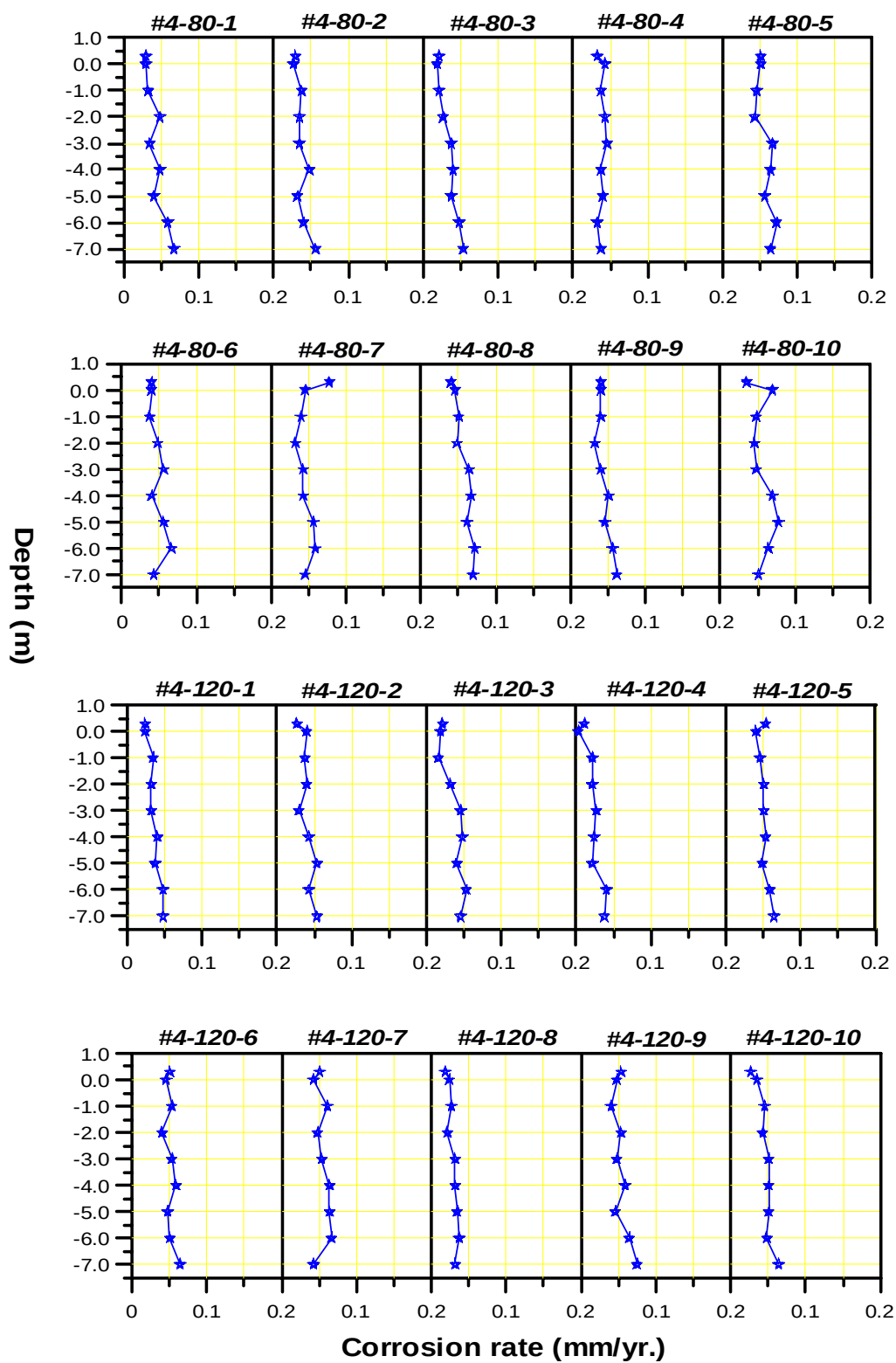


圖 3.25 安平港 4 號碼頭鋼板樁腐蝕速率與檢測水深之關係 (2)

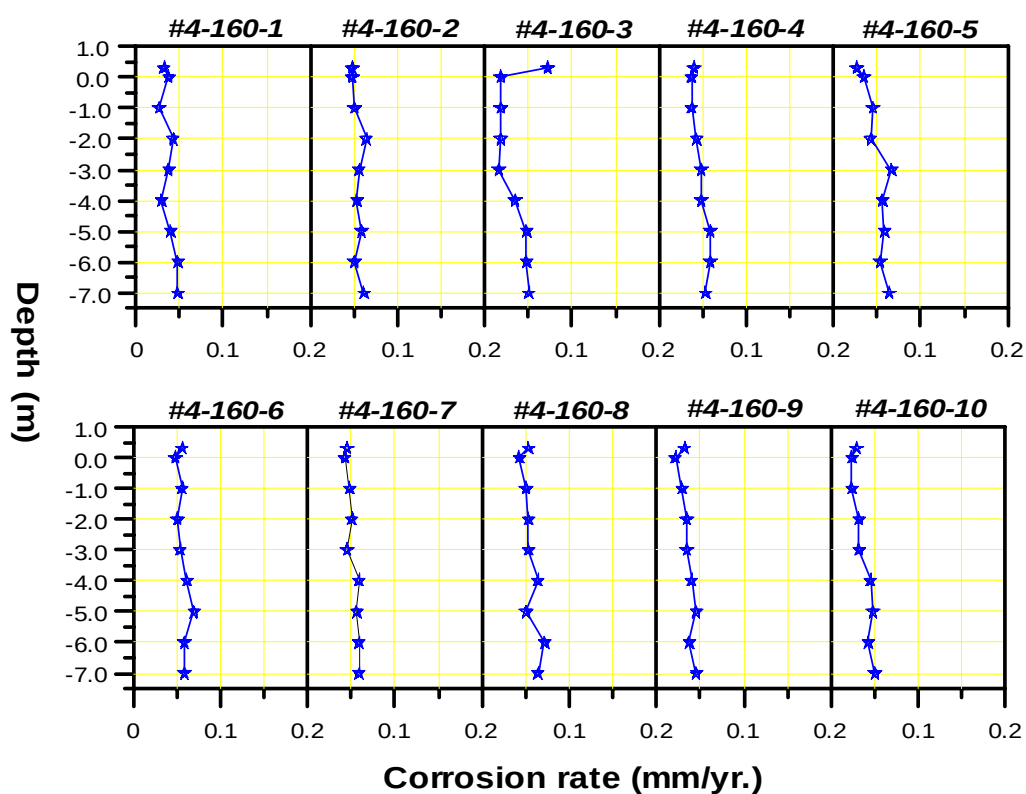


圖 3.26 安平港 4 號碼頭鋼板樁腐蝕速率與檢測水深之關係 (3)

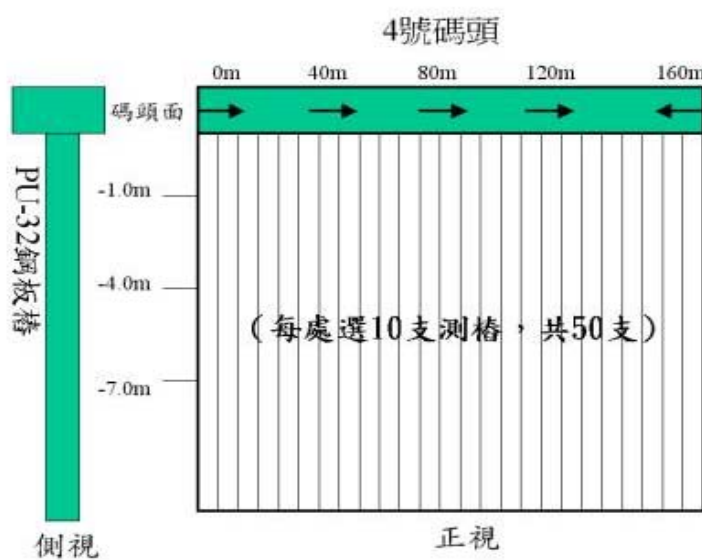


圖 3.27 安平港 4 號碼頭鋼板樁保護電位量測位置圖

表 3.7 安平港 4 號碼頭鋼板樁保護電位檢測結果 (mV)

編號	水深 (m)	保護 電位	編號	水深 (m)	保護 電位	編號	水深 (m)	保護 電位	編號	水深 (m)	保護 電位	編號	水深 (m)	保護 電位
#4-00 -1	-1.0	-1027	#4-40 -1	-1.0	-984	#4-80 -1	-1.0	-973	#4-120 -1	-1.0	-973	#4-160 -1	-1.0	-1002
	-4.0	-1003		-4.0	-998		-4.0	-978		-4.0	-993		-4.0	-1020
	-7.0	-992		-7.0	-1013		-7.0	-1068		-7.0	-1054		-7.0	-1033
#4-00 -2	-1.0	-977	#4-40 -2	-1.0	-982	#4-80 -2	-1.0	-995	#4-120 -2	-1.0	-973	#4-160 -2	-1.0	-1000
	-4.0	-1003		-4.0	-999		-4.0	-1001		-4.0	-994		-4.0	-1019
	-7.0	-1009		-7.0	-1012		-7.0	-1028		-7.0	-1016		-7.0	-1030
#4-00 -3	-1.0	-975	#4-40 -3	-1.0	-988	#4-80 -3	-1.0	-993	#4-120 -3	-1.0	-973	#4-160 -3	-1.0	-1000
	-4.0	-997		-4.0	-1012		-4.0	1003		-4.0	-1034		-4.0	-1056
	-7.0	-1000		-7.0	-1014		-7.0	-1023		-7.0	-1009		-7.0	-1030
#4-00 -4	-1.0	-974	#4-40 -4	-1.0	-984	#4-80 -4	-1.0	-972	#4-120 -4	-1.0	-971	#4-160 -4	-1.0	-997
	-4.0	-997		-4.0	-992		-4.0	-978		-4.0	-985		-4.0	-1025
	-7.0	-1015		-7.0	-1016		-7.0	-1018		-7.0	-1001		-7.0	-1033
#4-00 -5	-1.0	-972	#4-40 -5	-1.0	-988	#4-80 -5	-1.0	-975	#4-120 -5	-1.0	-972	#4-160 -5	-1.0	-998
	-4.0	-983		-4.0	-995		-4.0	-988		-4.0	-988		-4.0	-1012
	-7.0	-1011		-7.0	-1012		-7.0	-1059		-7.0	-1016		-7.0	-1026
#4-00 -6	-1.0	-973	#4-40 -6	-1.0	-995	#4-80 -6	-1.0	-981	#4-120 -6	-1.0	-972	#4-160 -6	-1.0	-993
	-4.0	-987		-4.0	-995		-4.0	-989		-4.0	-988		-4.0	-1000
	-7.0	-1019		-7.0	-1018		-7.0	-1019		-7.0	-1007		-7.0	-1029
#4-00 -7	-1.0	-973	#4-40 -7	-1.0	-988	#4-80 -7	-1.0	-986	#4-120 -7	-1.0	-973	#4-160 -7	-1.0	-994
	-4.0	-991		-4.0	-992		-4.0	-996		-4.0	-992		-4.0	-1005
	-7.0	-1006		-7.0	-1005		-7.0	-1014		-7.0	-1005		-7.0	-1024
#4-00 -8	-1.0	-942	#4-40 -8	-1.0	-1014	#4-80 -8	-1.0	-985	#4-120 -8	-1.0	-973	#4-160 -8	-1.0	-991
	-4.0	-1005		-4.0	-1018		-4.0	-992		-4.0	-987		-4.0	-997
	-7.0	-1013		-7.0	-1014		-7.0	-1023		-7.0	-1007		-7.0	-1023
#4-00 -9	-1.0	-971	#4-40 -9	-1.0	-991	#4-80 -9	-1.0	-988	#4-120 -9	-1.0	-977	#4-160 -9	-1.0	-992
	-4.0	-982		-4.0	-993		-4.0	-1003		-4.0	-996		-4.0	-1011
	-7.0	-1008		-7.0	-1039		-7.0	-1023		-7.0	-1015		-7.0	-1024
#4-00 -10	-1.0	-973	#4-40 -10	-1.0	-1007	#4-80 -10	-1.0	-978	#4-120 -10	-1.0	-978	#4-160 -10	-1.0	-990
	-4.0	-1002		-4.0	-1019		-4.0	-1011		-4.0	-1005		-4.0	-1014
	-7.0	-1010		-7.0	-1014		-7.0	-1019		-7.0	-1009		-7.0	-1021

3.3.3.3 台中港 99 號碼頭

本座碼頭採鋼管樁橋墩式結構建造，全長 250 公尺，水深 -12.0 公尺。碼頭上部結構區分成八個單元，鋼管樁直徑 800 mm，鋼管樁管壁厚度均為 12 mm，碼頭平面佈置、結構斷面如圖 3.28、圖 3.29。港區因為潮汐落差高達 4.5 公尺左右，碼頭建造時在混凝土面版下方 30 公分至 520 公分部位（潮汐帶），除以防蝕膏作為鋼管樁之防蝕外，並以 PE 及 PVC 和固定箍保護，海中帶在水深 -2.0 公尺或 -3.0 公尺和海底處，安裝犧牲陽極塊之陰極防蝕工法保護鋼管樁。陽極塊依不同尺寸區分為 a、b、c 三種型式。本工程於民國 84 年 7 月完工，使用時間迄今約 7 年左右。鋼管樁配置排列、陽極塊配置排列及詳圖與潮汐帶防蝕措施如圖 3.30 至圖 3.33 所示，表 3.8 為編號⑦鋼管樁（靠陸側位置）之防蝕塗裝系統。

1. 目視檢測

本座碼頭鋼管樁（包含預打區）並無發現有孔蝕或破洞等嚴重之腐蝕，海水面上鋼管樁表面附著少數如籐壺等海生物，水深 -3.0 m 則附著海草及其它多種物種之海生物，潮汐帶位於水下之保護措施發現部份固定箍發生鬆脫現象，陸側鋼管樁（編號⑥、⑦）靠海床底部陽極塊可能因碼頭拋石施工撞擊，下方之鐵蕊未焊接牢靠於鋼管樁表面，表面並有一層淤泥。目視結果如圖 3.34 至圖 3.38 所示。

2. 鋼管樁厚度量測

本座碼頭以渦電流方式進行鋼管樁厚度量測，測樁選定距起點第 6、7、8 排樁（碼頭第一單元）及 33、34、35 排樁（碼頭第二單元），每排測樁之檢測水深為 +4.5 m、+3.0 m、+1.0 m、-1.0 m、-3.0 m 及 -7.0 m 共 6 個水深測點。

表 3.9 及圖 3.39 為各檢測樁之平均腐蝕速率與水深之關係，各檢測水深之平均腐蝕速率在 0.05 至 0.07 mm/yr.之間。

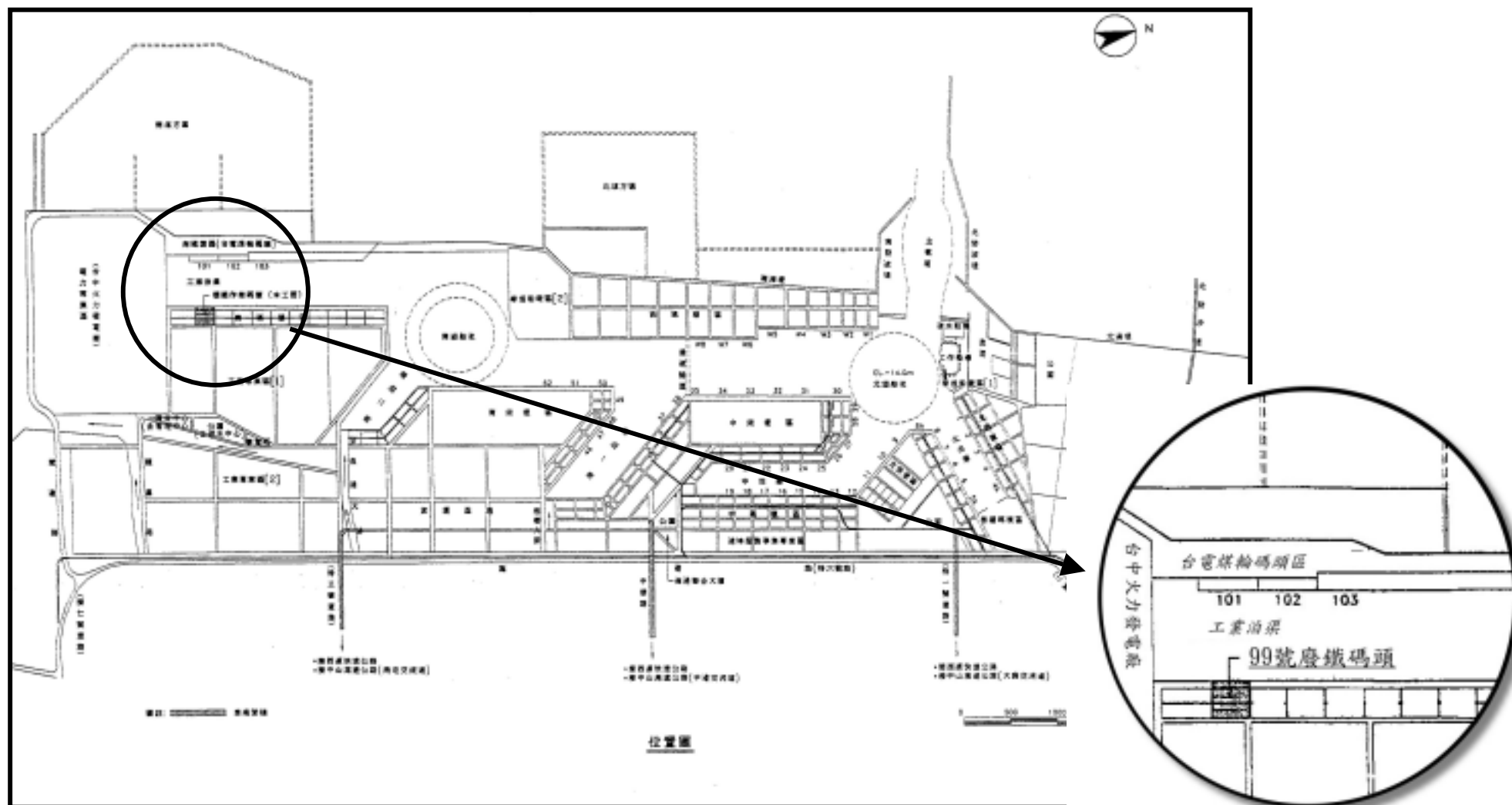


圖 3.28 台中港 99 號碼頭平面佈置圖

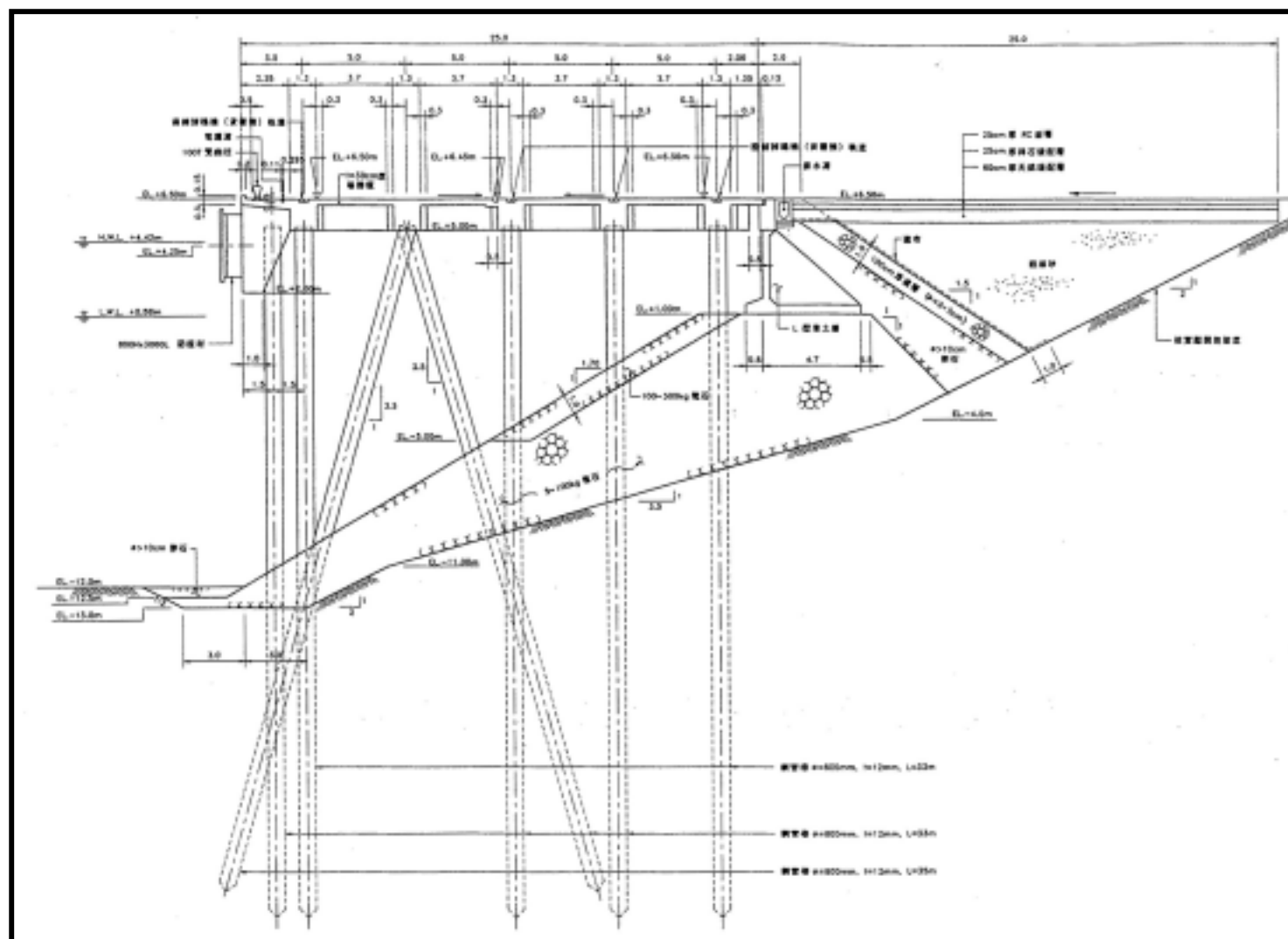


圖 3.29 台中港 99 號碼頭鋼管樁結構斷面

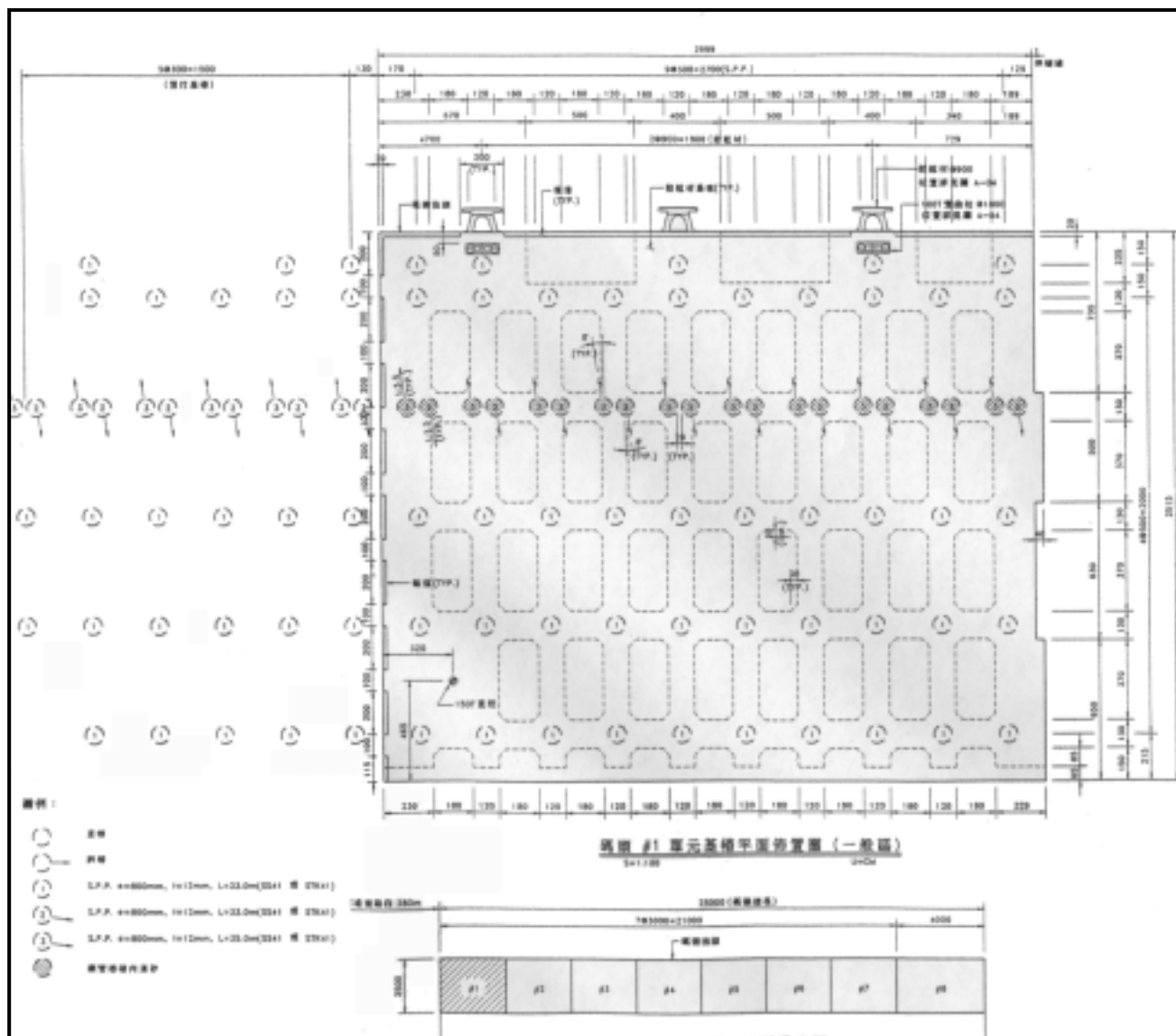
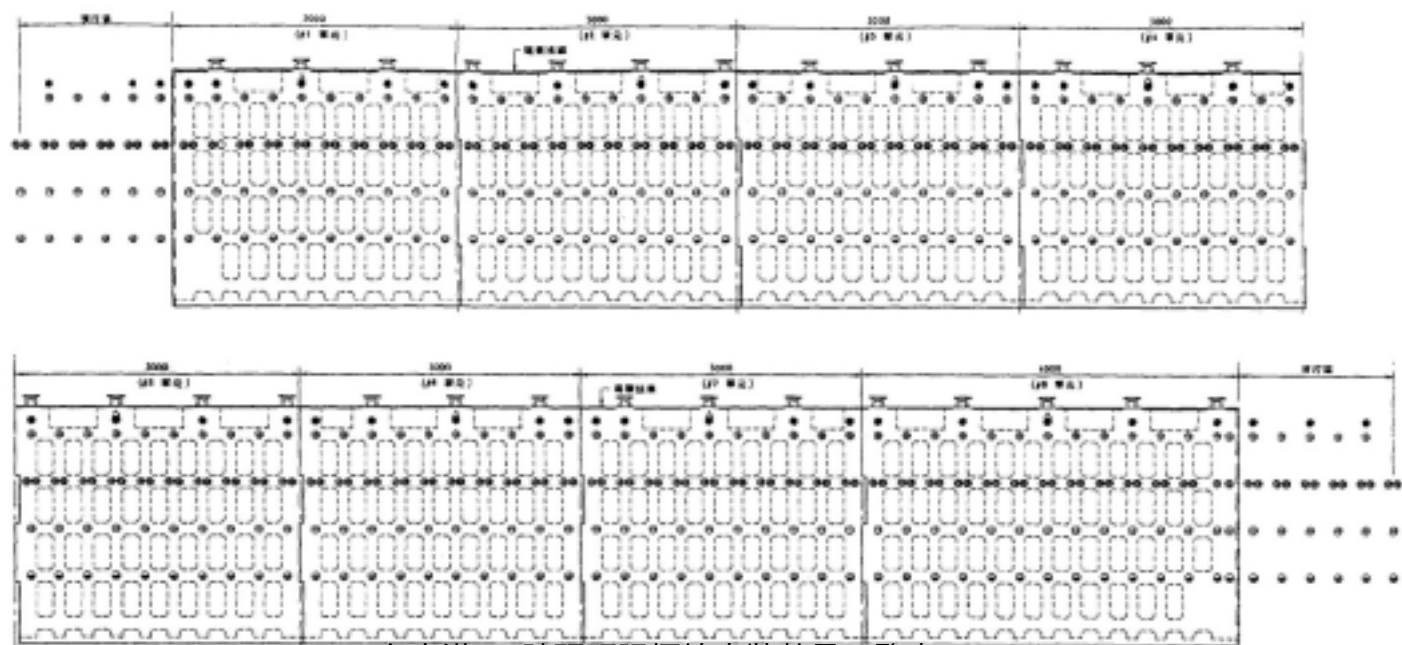


圖 3.30 台中港 99 號碼頭鋼管樁配置平面 (#1 單元)



台中港 99 號碼頭陽極塊安裝數量一覽表

代號	鋁合金陽極塊 尺寸	安裝水深 (m)	安裝數量		合計 (塊)
			碼頭單元	預打區	
a	(225+265) × 250× 650	-3.0 及海床面	76	12	88
a	(225+265) × 250× 650	-3.0 及海床面	168	20	188
a	(225+265) × 250× 650	-2.0 及海床面	332	48	380
b	(190+230) × 210× 1150	海床面	84	12	96
c	(225+265) × 250× 750	海床面	84	12	96
	電位測試裝置	混凝土頂端	8	0	8

圖 3.31 台中港 99 號碼頭陽極塊排列及安裝數量

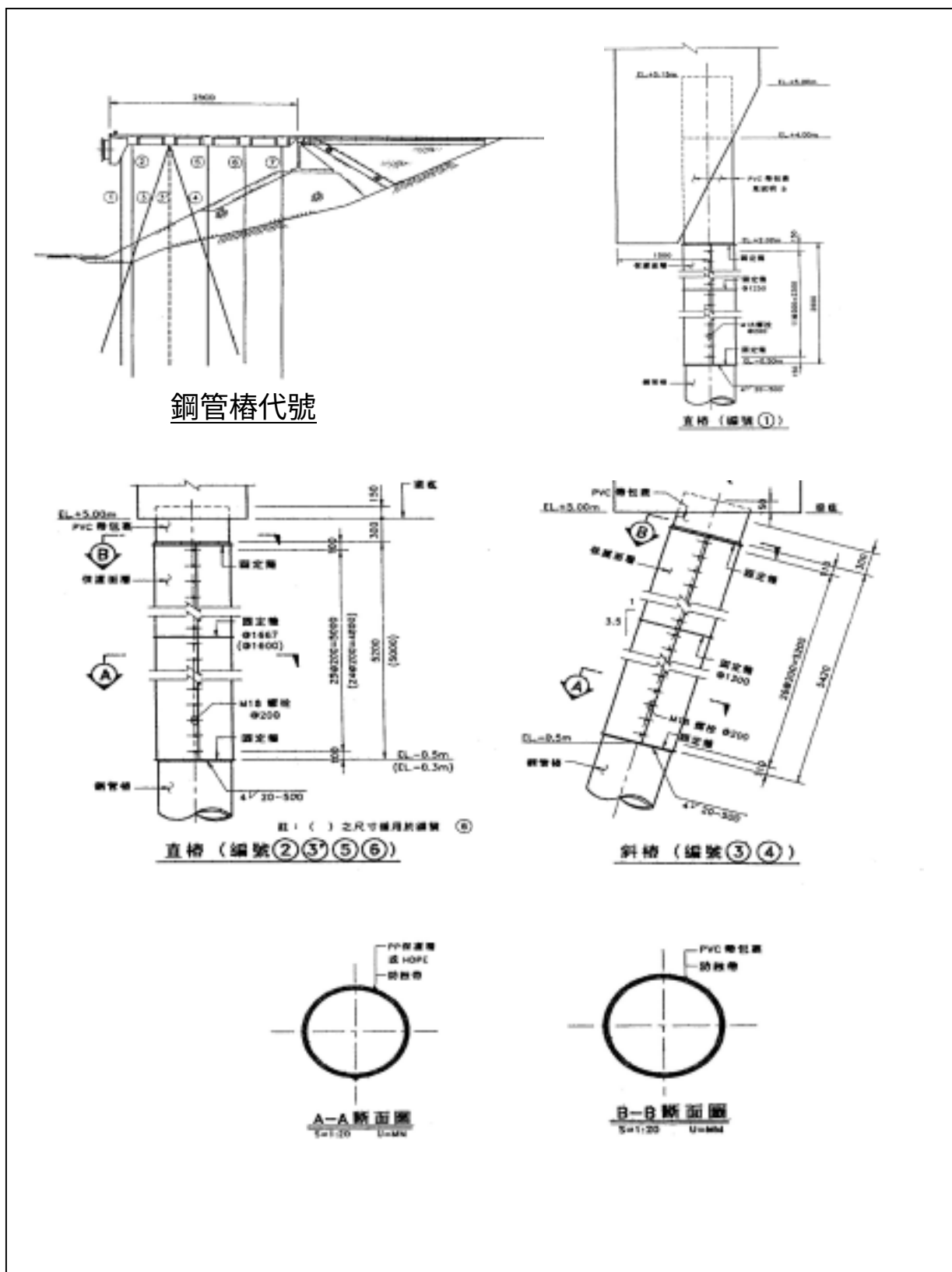


圖 3.33 台中港 99 號碼頭鋼管樁潮間帶防蝕措施

表 3.8 台中港 99 號碼頭鋼管樁防蝕塗裝系統

(鋼管樁編號：⑦)

塗接工程		塗料規格	標準塗佈量 g/m ² /回	塗裝 次數	最少乾 膜厚度	塗裝間格	調 薄 劑
施工 場所	工程						
工 廠	表面 處理	噴砂除銹至 SSPC-SP-10 以上					
	底漆	兩液型 POLYURETHANE PAINT (MITSERON R PRIMER)	150 噴塗	1	30 μ m	2 小時以上 24小時以內	—
	PU 內襯	無溶劑型 高膜厚聚氨基甲酸脂塗料 (MITSERON S-100/A-5000)	4000 專用噴塗機	1	2.0 mm	—	—
	補修	無溶劑型 高膜厚聚氨基甲酸脂塗料 (MITSERON B-500/A-1000)	刷塗或鋤塗	—		—	—
工 地	補漆	工地安裝完成後，應將銲縫預留未漆處及運輸等損壞處補漆，最少乾膜厚度不得小於2.0 mm。					



圖 3.34 海水面上鋼管樁表面



圖 3.35 潮汐帶水下保護措施固定箍鬆脫 (1)



圖 3.36 潮汐帶水下保護措施固定箍鬆脫 (2)



圖 3.37 海床底部陽極塊之鐵蕊鬆脫



圖 3.38 海床底部陽極塊表面淤泥

表 3.10 及圖 3.40 為各檢測樁之腐蝕速率與水深之關係，靠海測之鋼管樁（編號① ③）其腐蝕速率大於較靠陸側者（編號④、⑤），前者檢測點之腐蝕速率有多處大於 0.10 mm/yr.者，後者均小於 0.10 mm/yr.。最大腐蝕速率發生於第 33 排編號②鋼管樁水深+3.0 m 及 +1.0 m 處，其腐蝕速率達 0.19 mm/yr.，已接近設計允許值。由於渦電流測厚未先敲除附著海生物，測厚時可能受到固定箍未緊靠鋼管樁及如螺栓等金屬材質與海生物附著厚度大於預期之影響，同一檢測水深部份測厚值出現大於 1.0 mm 之差異，數據取舍需進一步考量。

表 3.9 台中港 99 號碼頭鋼管樁之平均腐蝕速率

水深(m)	+4.5	+3.0	+1.0	-1.0	-3.0	-7.0
腐蝕速率 (mm/yr.)	0.06	0.06	0.06	0.05	0.06	0.07

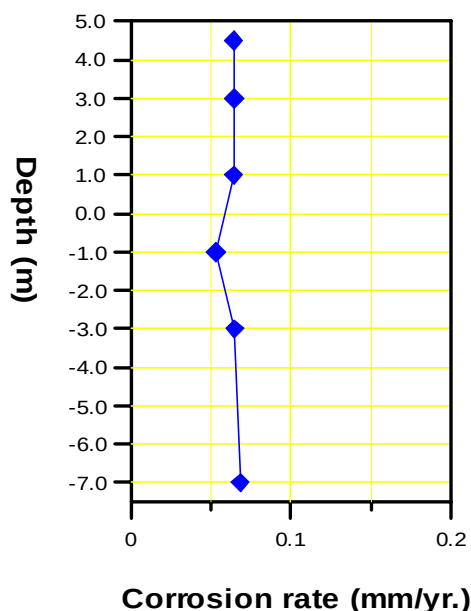


圖 3.39 台中港 99 號碼頭鋼管樁之平均腐蝕速率與水深之關係

3. 保護電位量測

本座碼頭鋼管樁保護電位量測位置如圖 3.41，碼頭每一單元至少選定一處，檢測水深為 -1.0 m 、 -4.0 m 、 -7.0 m 。量測結果列於表 3.11 及表 3.12。保護電位最大值為 -969 mV ，最小值為 -1087 mV ，平均為 -1100 mV 。本座碼頭陽極塊保護電位均小於 -850 mV (以 Cu/CuSO_4 電極量測)，已達保護防蝕之目的。

表 3.10 台中港 99 號碼頭鋼管樁腐蝕速率與水深之關係 (mm/yr.)

水深(m) 檢測位置	第 6 排樁					第 7 排樁				
	L1	L2	L3	L4	L5	L1	L2	L3	L4	L5
+4.5	0.03	0.07	0.05	0.07	0.02	0.11	0.10	0.11	0.09	0.06
+3.0	0.03	0.09	0.08	0.05	0.02	0.11	0.13	0.12	0.10	0.10
+1.0	0.06	0.05	0.08	0.10		0.09	0.13	0.13	0.09	0.05
-1.0	0.01	0.07	0.09	0.01		0.04	0.13	0.11	0.04	0.02
-3.0	0.03	0.15	0.05			0.11	0.14	0.11	0.03	
-7.0		0.14	0.07			0.07	0.13	0.04		
水深(m) 檢測位置	第 8 排樁					第 33 排樁				
	L1	L2	L3	L4	L5	L1	L2	L3	L4	L5
+4.5	0.07	0.06	0.09	0.01	0.02	0.01	0.18	0.11	0.05	0.04
+3.0	0.06	0.08	0.09	0.01	0.02	0.01	0.19	0.09	0.06	0.03
+1.0	0.08	0.10	0.06	0.02	0.04	0.05	0.19	0.05	0.05	0.04
-1.0	0.06	0.06	0.06	0.02	0.02	0.06	0.16	0.05	0.05	0.04
-3.0	0.06	0.09	0.06	0.04		0.04	0.11	0.03	0.04	
-7.0	0.09	0.08				0.06	0.14	0.03		
水深(m) 檢測位置	第 34 排樁					第 35 排樁				
	L1	L2	L3	L4	L5	L1	L2	L3	L4	L5
+4.5	0.04	0.15	0.11	0.05	0.03	0.05	0.04	0.03	0.02	0.05
+3.0	0.03	0.03	0.09	0.06	0.05	0.07	0.03	0.02	0.02	0.06
+1.0	0.02	0.03	0.07	0.06	0.05	0.06	0.03	0.02	0.02	0.04
-1.0	0.02	0.05	0.08	0.08	0.04	0.04	0.05	0.02	0.02	0.04
-3.0	0.02	0.05	0.07	0.09		0.07	0.05	0.03	0.02	
-7.0	0.01	0.03	0.04			0.07	0.05	0.04		

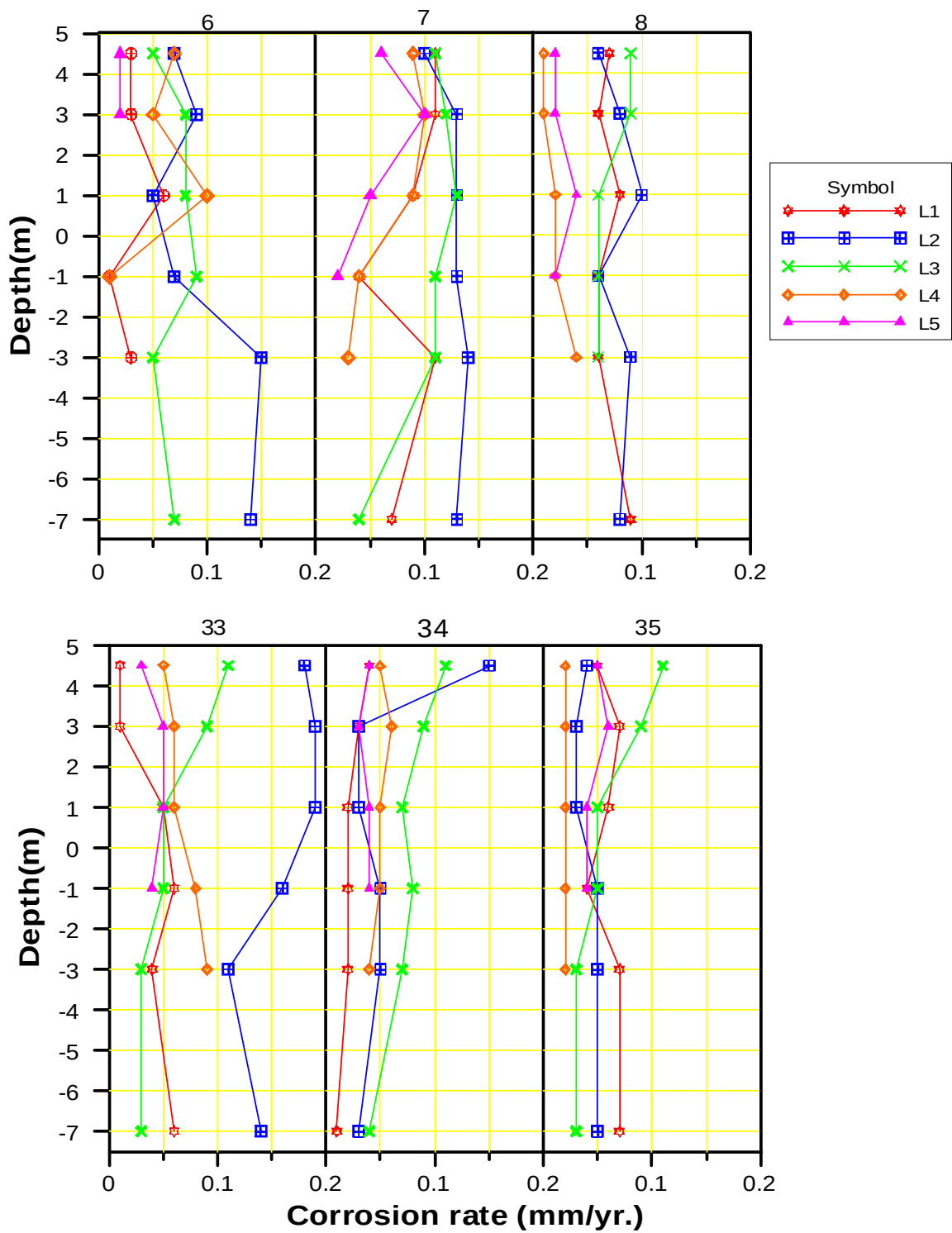


圖 3.40 台中港 99 號碼頭鋼管樁腐蝕速率與水深之關係

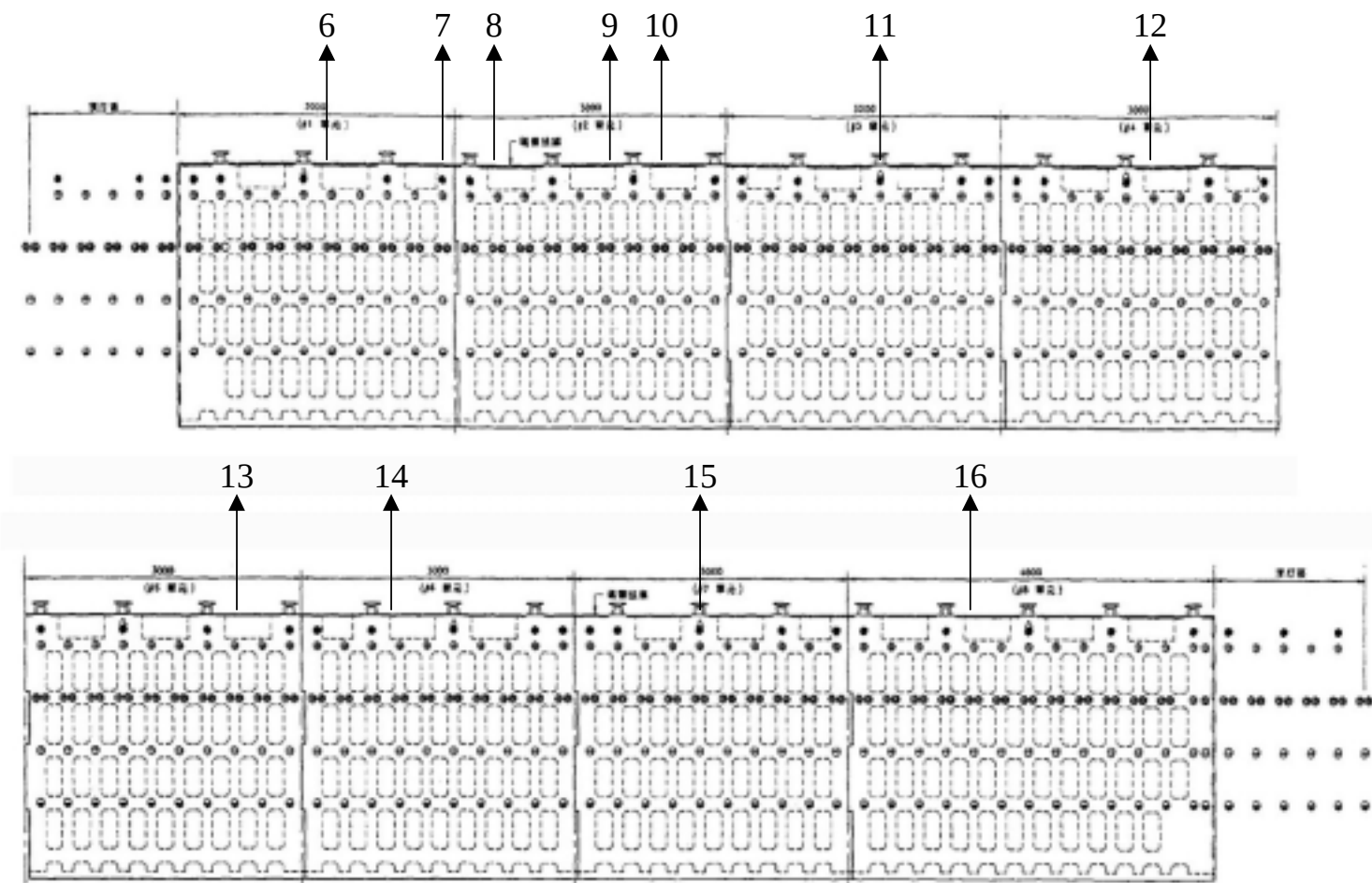


圖 3.41 台中港 99 號碼頭鋼管樁保護電位量測位置

表 3.11 台中港 99 號碼頭鋼管樁保護電位量測結果 (1)

6																												
水深	L1				L2				L3				L4				L5				L6				L7			
m	A面	B面	C面	D面	A面	B面	C面	D面	A面	B面	C面	D面	A面	B面	C面	D面	A面	B面	C面	D面	A面	B面	C面	D面	A面	B面	C面	D面
-1	-1033	-1034	-1034	-1034	-1030	-1030	-1028	-1029	-1032	-1034	-1034	-1059	-1058	-1061	-1061	-1061	-1037	-1037	-1037	-1037	-1030	-1030	-1028	-1029	-1032	-1034	-1034	-1059
-4	-1037	-1037	-1038	-1038	-1032	-1032	-1031	-1029	-1039	-1039	-1039	-1062	-1066	-1062	-1063	-1066	-1038	-1038	-1038	-1037	-1032	-1032	-1031	-1029	-1039	-1039	-1039	-1060
-7	-1037	-1038	-1038	-1036	-1030	-1029	-1027	-1025	-1036	-1036	-1035	-1052	-1066	-1057	-1056	-1057	-1038	-1037	-1037	-1040	-1030	-1029	-1027	-1025	-1036	-1036	-1035	-1058
7																												
水深	L1				L2				L3				L4				L5				L6				L7			
m	A面	B面	C面	D面	A面	B面	C面	D面	A面	B面	C面	D面	A面	B面	C面	D面	A面	B面	C面	D面	A面	B面	C面	D面	A面	B面	C面	D面
-1	-1025	-1028	-1030	-1030	-1033	-1034	-1034	-1036	-1033	-1034	-1034	-1034	-1030	-1030	-1028	-1029	-1032	-1034	-1034	-1033	-1037	-1037	-1037	-1037	-1035	-1034	-1034	-1035
-4	-1028	-1032	-1034	-1036	-1040	-1042	-1044	-1044	-1037	-1037	-1038	-1038	-1032	-1032	-1031	-1029	-1039	-1039	-1039	-1038	-1038	-1038	-1037	-1035	-1037	-1040	-1035	
-7	-1029	-1033	-1033	-1035	-1039	-1038	-1037	-1037	-1037	-1038	-1038	-1036	-1030	-1029	-1027	-1025	-1036	-1036	-1035	-1033	-1038	-1037	-1037	-1040	-1026	-1026	-1026	-1026
8																												
水深	L1				L2				L3				L4				L5				L6				L7			
m	A面	B面	C面	D面	A面	B面	C面	D面	A面	B面	C面	D面	A面	B面	C面	D面	A面	B面	C面	D面	A面	B面	C面	D面	A面	B面	C面	D面
-1	-1014	-1014	-1015	-1016	-1021	-1022	-1019	-1018	-1022	-1021	-1020	-1016	-1027	-1028	-1028	-1028	-1026	-1026	-1028	-1027	-1038	-1055	-1049	-1043	-1001	-1000	-998	-999
-4	-1018	-1028	-1029	-1033	-1027	-1028	-1028	-1028	-1023	-1025	-1023	-1021	-1030	-1034	-1035	-1029	-1026	-1026	-1026	-1025	-1034	-1027	-1027	-1025	-1001	-1001	-1000	-1000
-7	-1017	-1023	-1025	-1026	-1029	-1027	-1026	-1025	-1012	-1013	-1010	-1010	-1029	-1028	-1026	-1025	-1025	-1029	-1031	-1035	-1024	-1026	-1024	-1022	-1005	-1005	-1004	-1004
9																												
水深	L1				L2				L3				L4				L5				L6				L7			
m	A面	B面	C面	D面	A面	B面	C面	D面	A面	B面	C面	D面	A面	B面	C面	D面	A面	B面	C面	D面	A面	B面	C面	D面	A面	B面	C面	D面
-1	-1001	-1000	-1002	-1002	-1017	-1019	-1019	-1019	-1012	-1011	-1011	-1023	-1009	-1009	-1009	-1008	-1009	-1009	-1008	-1008	-1008	-1008	-1008	-1008	-1009	-1009	-1010	-1011
-4	-1009	-1011	-1012	-1013	-1017	-1024	-1024	-1022	-1016	-1015	-1013	-1012	-1017	-1013	-1011	-1010	-1014	-1013	-1012	-1011	-1013	-1012	-1011	-1015	-1012	-1012	-1014	-1016
-7	-1014	-1015	-1015	-1015	-1004	-1005	-1005	-1005	-995	-995	-996	-994	-1014	-1014	-1013	-1011	-1008	-1008	-1007	-1006	-1002	-1001	-1001	-1001	-1002	-1002	-1002	-1002
10																												
水深	L1				L2				L3				L4				L5				L6				L7			
m	A面	B面	C面	D面	A面	B面	C面	D面	A面	B面	C面	D面	A面	B面	C面	D面	A面	B面	C面	D面	A面	B面	C面	D面	A面	B面	C面	D面
-1	-985	-987	-985	-989	-993	-993	-993	-992	-994	-994	-995	-996	-994	-994	-993	-993	-998	-993	-994	-994	-990	-990	-990	-990	-994	-995	-997	-997
-4	-988	-989	-992	-996	-1004	-1000	-997	-995	-994	-994	-995	-993	-993	-995	-996	-998	-995	-992	-992	-993	-992	-992	-992	-992	-1001	-1000	-996	-996
-7	-996	-979	-980	-981	-995	-994	-995	-994	-993	-992	-992	-992	-994	-994	-993	-993	-991	-991	-991	-991	-991	-992	-992	-992	-1001	-997	-995	-998
11																												
水深	L1				L2				L3				L4				L5				L6				L7			
m	A面	B面	C面	D面	A面	B面	C面	D面	A面	B面	C面	D面	A面	B面	C面	D面	A面	B面	C面	D面	A面	B面	C面	D面	A面	B面	C面	D面
-1	-978	-970	-972	-970	-979	-980	-981	-978	-972	-972	-971	-970	-979	-979	-980	-980	-977	-977	-976	-976	-982	-982	-982	-982	-983	-983	-982	-982
-4	-983	-976	-975	-980	-980	-979	-978	-978	-977	-980	-983	-987	-981	-984	-982	-982	-978	-979	-979	-979	-981	-980	-981	-981	-980	-980	-980	-981
-7	-972	-970	-969	-969	-978	-977	-977	-977	-967	-969	-970	-970	-981	-980	-980	-980	-980	-980	-980	-980	-980	-980	-979	-979	-981	-981	-980	-979

表 3.12 台中港 99 號碼頭鋼管樁保護電位量測結果 (2)

12																											
水深	L1				L2				L3							L5				L6				L7			
m	A面	B面	C面	D面	A面	B面	C面	D面	A面	B面	C面	D面	B面	C面	D面	A面	B面	C面	D面	A面	B面	C面	D面	A面	B面	C面	D面
-1	-1033	-1034	-1034	-1034	-1030	-1030	-1028	-1029	-1032	-1034	-1034	-1059	-1037	-1037	-1037	-1037	-1037	-1037	-1037	1032	1034	1034	1033	1022	1021	1020	1016
-4	-1037	-1037	-1038	-1038	-1032	-1032	-1031	-1029	-1039	-1039	-1039	-1062	-1038	-1038	-1037	-1038	-1038	-1038	-1037	-1039	-1039	-1039	-1038	-1023	-1025	-1023	-1021
-7	-1037	-1038	-1038	-1036	-1030	-1029	-1027	-1025	-1036	-1036	-1035	-1052	-1037	-1037	-1040	-1038	-1037	-1037	-1040	-1036	-1036	-1035	-1033	-1036	-1036	-1035	-1058
13																											
水深	L1				L2				L3							L5				L6				L7			
m	A面	B面	C面	D面	A面	B面	C面	D面	A面	B面	C面	D面	B面	C面	D面	A面	B面	C面	D面	A面	B面	C面	D面	A面	B面	C面	D面
-1	-1058	-1061	-1061	-1061	-1037	-1037	-1037	-1037	-1022	-1021	-1020	-1016	-1028	-1028	-1028	-1032	-1034	-1034	-1033	-1037	-1037	-1037	-1037	-1035	-1034	-1034	-1035
-4	-1066	-1062	-1063	-1066	-1038	-1038	-1038	-1037	-1023	-1025	-1023	-1021	-1034	-1035	-1029	-1039	-1039	-1039	-1038	-1038	-1038	-1038	-1037	-1035	-1037	-1040	-1035
-7	-1066	-1057	-1056	-1057	-1038	-1037	-1037	-1040	-1012	-1013	-1010	-1010	-1028	-1026	-1025	-1036	-1036	-1035	-1033	-1038	-1037	-1037	-1040	-1026	-1026	-1026	-1026
14																											
水深	L1				L2				L3							L5				L6				L7			
m	A面	B面	C面	D面	A面	B面	C面	D面	A面	B面	C面	D面	B面	C面	D面	A面	B面	C面	D面	A面	B面	C面	D面	A面	B面	C面	D面
-1	-1014	-1014	-1015	-1016	-1021	-1022	-1019	-1018	-1022	-1021	-1020	-1016	-1028	-1028	-1028	-1026	-1026	-1028	-1027	-1027	-1028	-1028	-1028	-1032	-1034	-1034	-1033
-4	-1018	-1028	-1029	-1033	-1027	-1028	-1028	-1028	-1023	-1025	-1023	-1021	-1034	-1035	-1029	-1026	-1026	-1026	-1025	-1030	-1034	-1035	-1029	-1039	-1039	-1039	-1038
-7	-1017	-1023	-1025	-1026	-1029	-1027	-1026	-1025	-1012	-1013	-1010	-1010	-1028	-1026	-1025	-1025	-1029	-1031	-1035	-1029	-1028	-1026	-1025	-1036	-1036	-1035	-1033
15																											
水深	L1				L2				L3							L5				L6				L7			
m	A面	B面	C面	D面	A面	B面	C面	D面	A面	B面	C面	D面	B面	C面	D面	A面	B面	C面	D面	A面	B面	C面	D面	A面	B面	C面	D面
-1	-1001	-1000	-1002	-1002	-1017	-1019	-1019	-1019	-1012	-1011	-1011	-1023	-1009	-1009	-1008	-1009	-1009	-1008	-1008	-1008	-1008	-1008	-1008	-1009	-1009	-1010	-1011
-4	-1009	-1011	-1012	-1013	-1017	-1024	-1024	-1022	-1016	-1015	-1013	-1012	-1013	-1011	-1010	-1014	-1013	-1012	-1011	-1013	-1012	-1011	-1015	-1012	-1012	-1014	-1016
-7	-1014	-1015	-1015	-1015	-1004	-1005	-1005	-1005	-995	-995	-996	-994	-1014	-1013	-1011	-1008	-1008	-1007	-1006	-1002	-1001	-1001	-1001	-1002	-1002	-1002	-1002
16																											
水深	L1				L2				L3							L5				L6				L7			
m	A面	B面	C面	D面	A面	B面	C面	D面	A面	B面	C面	D面	B面	C面	D面	A面	B面	C面	D面	A面	B面	C面	D面	A面	B面	C面	D面
-1	-1012	-1011	-1011	-1023	-1009	-1009	-1009	-1008	-1009	-1009	-1008	-1008	-1009	-1009	-1008	-1009	-1009	-1008	-1008	-1008	-1008	-1008	-1008	-1026	-1026	-1028	-1027
-4	-1016	-1015	-1013	-1012	-1017	-1013	-1011	-1010	-1014	-1013	-1012	-1011	-1013	-1011	-1010	-1014	-1013	-1012	-1011	-1013	-1012	-1011	-1015	-1026	-1026	-1026	-1025
-7	-995	-995	-996	-994	-1014	-1014	-1013	-1011	-1008	-1008	-1007	-1006	-1014	-1013	-1011	-1008	-1008	-1007	-1006	-1002	-1001	-1001	-1001	-1025	-1029	-1031	-1035

3.3.3.4 台北港東 1、東 2 號碼頭

東 1、東 2 號碼頭於民國 83 年完工，係以 S.S.P. PU-32 U 型之鋼板樁建造，全長各 170 公尺，水深 -6.0 公尺，採用犧牲陽極塊作為防蝕保護。碼頭平面佈置及結構斷面如圖 3.42、圖 3.43，陽極塊配置如圖 3.44，U 型鋼板樁詳圖 3.20（同安平港 3 號碼頭）。

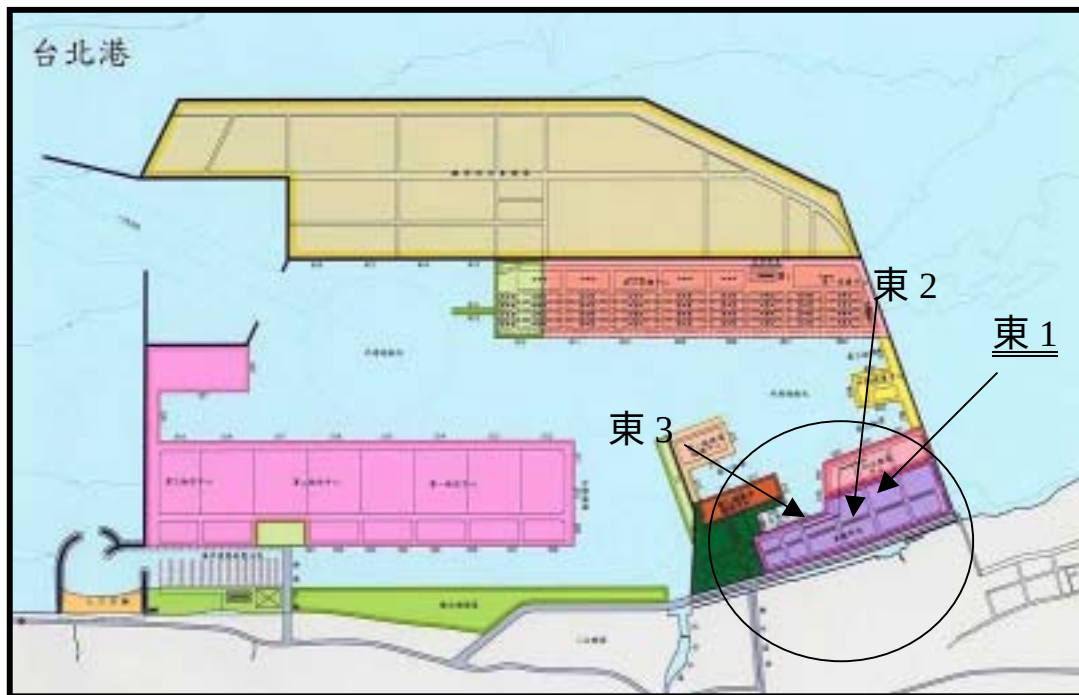


圖 3.42 台北港東 1 至東 3 號碼頭平面佈置

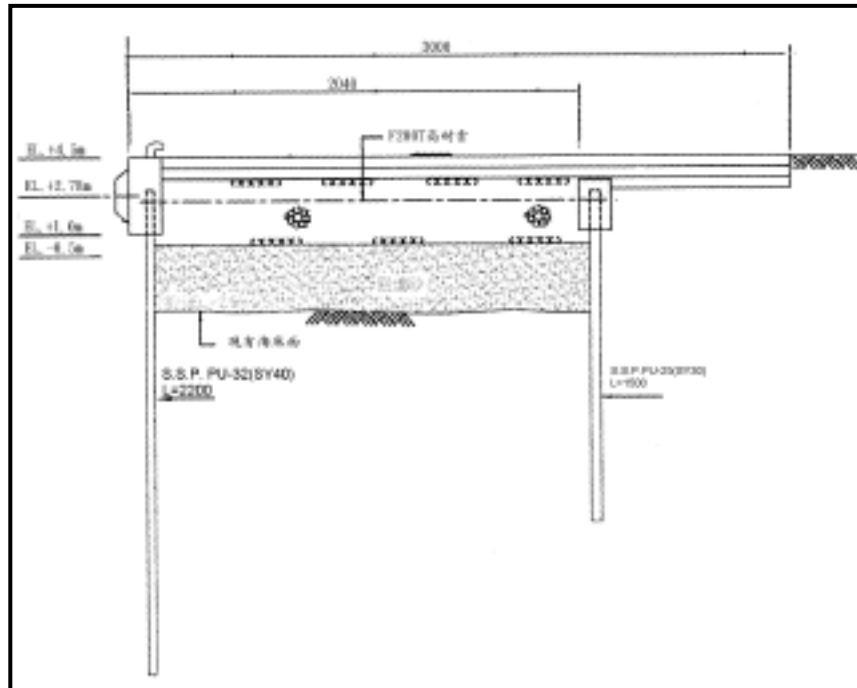


圖 3.43 台北港東 1、2 號碼頭結構斷面

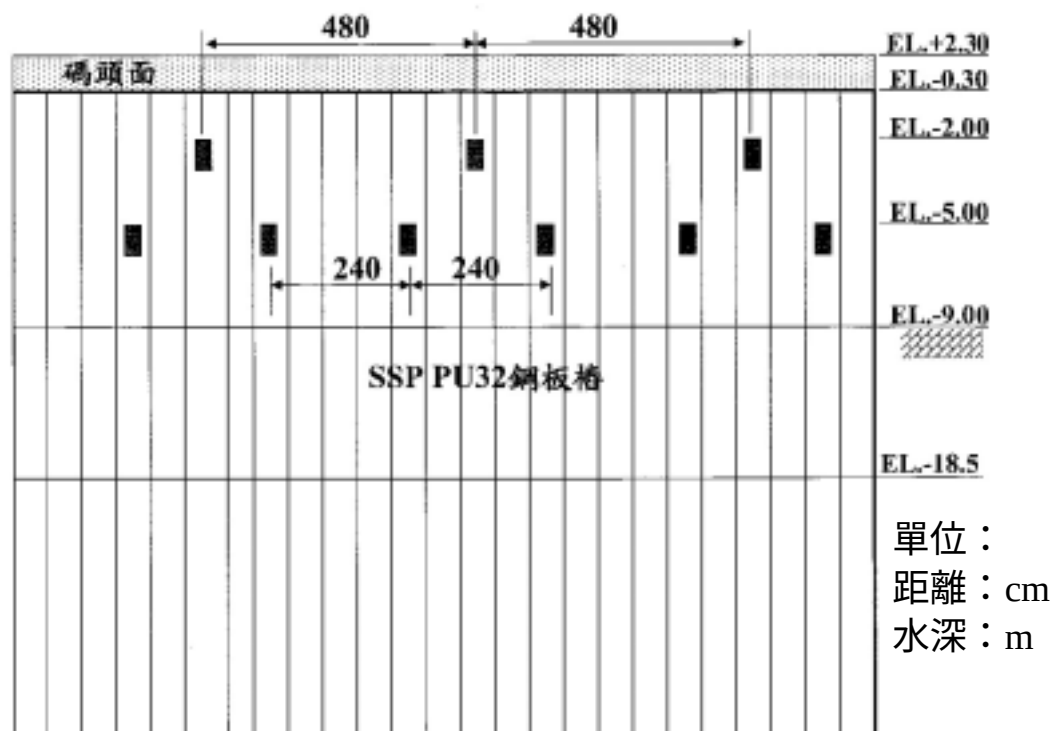


圖 3.44 台北港東 1、2 號碼頭陽極塊配置圖

1. 目視檢測

台北港東 1、東 2 號碼頭鋼板樁外觀並未發現有孔蝕或穿孔破洞等嚴重腐蝕現象，由於碼頭以裝卸砂石為主，碼頭水域海水較其它碼頭混濁，海床亦發現淤沙堆積，導致水深 -5.0 m 處之陽極塊底部被淤沙埋沒，僅露出部份於海床面上，水深 -2.0 m 處之陽極塊部份因外力撞擊脫落，未能提供鋼板樁完全保護；圖 3.45 至圖 3.46 為鋼板樁表面目視結果，部份已出現紅橙色銹斑，海生物敲除後亦缺乏明亮光澤。

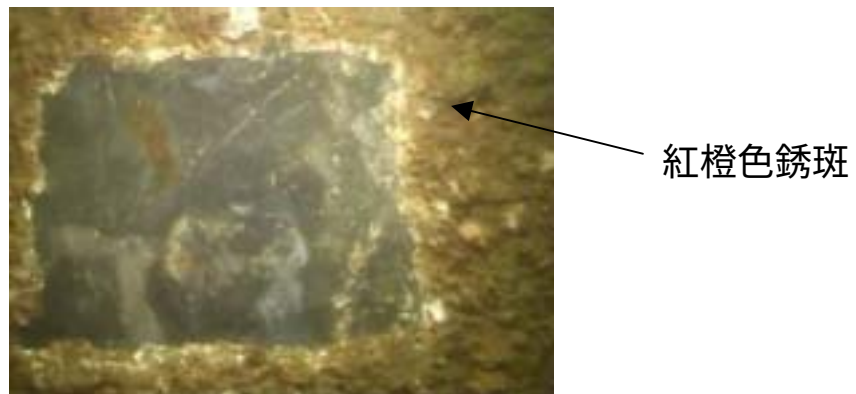


圖 3.45 東 1 號碼頭鋼板樁外觀目視結果

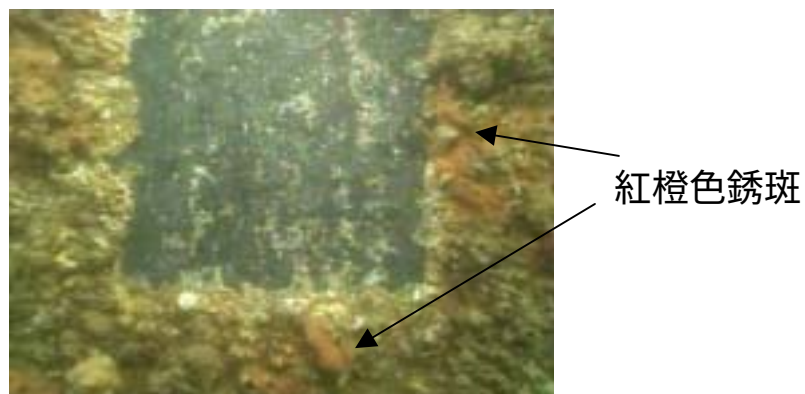


圖 3.46 東 2 號碼頭鋼板樁外觀目視結果

2. 鋼板樁厚度量測

圖 3.47 為東 1、東 2 號碼頭檢測位置示意圖，由於東 1 號碼頭停靠運砂船隻，潛水人員無法靠近進行檢測，故選取東 2 號碼頭自起點 0 m、80 m、120 m 等 3 處各連續 6 支、14 支、29 支共 49 支測樁，測厚水深為 -1.0 m、-2.0 m、-3.0 m、-4.0 m 及 -5.0 m 五個水深測點，起點 0 m 處潮間帶部份另增加 +1.0 m、+0.5 m、± 0.0 m、-6.0 m 四個水深測點，共計 269 個檢測點。

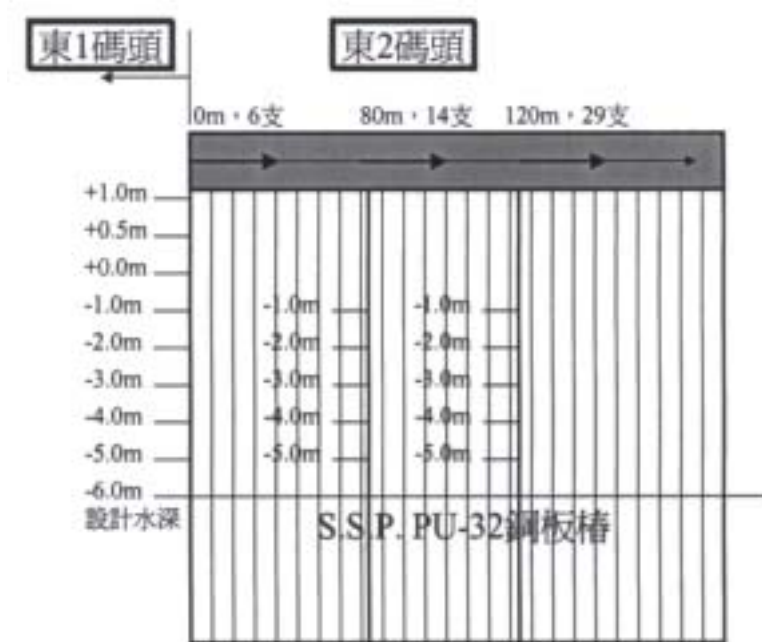


圖 3.47 東 1、東 2 號碼頭檢測位置

表 3.13 及圖 3.48 為東 2 號碼頭各檢測樁之平均腐蝕速率與水深之關係，各檢測水深之平均腐蝕速率在 0.05 至 0.07 mm/yr. 之間。

圖 3.49 至圖 3.52 為東 2 號碼頭各檢測樁之腐蝕速率與水深之關係，腐蝕速率均小於 0.20 mm/yr.。但大於達 0.10 mm/yr. 之檢測點很多，相較於安平港鋼板樁碼頭（使用相同型式鋼板樁及陽極塊）腐蝕情況嚴重。

表 3.13 台北港東 2 號碼頭鋼板樁平均腐蝕速率 (mm/yr.)

測定位置 (水深(m))	+0.3	0.0	-1.0	-2.0	-3.0	-4.0	-5.0	-6.0	-7.0
腐蝕速率 (mm/yr.)	0.09	0.09	0.09	0.10	0.11	0.11	0.10	0.11	0.10

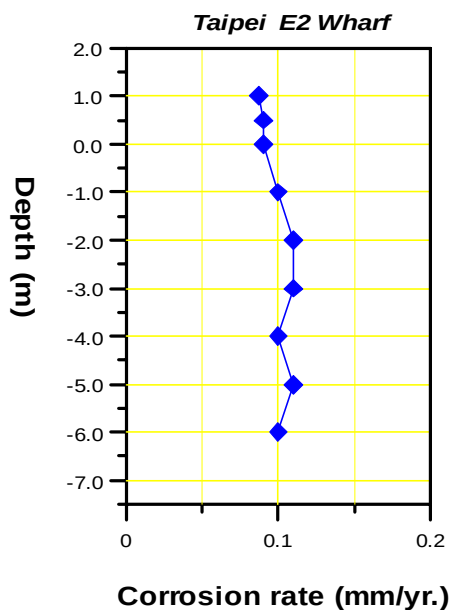


圖 3.48 台北港東 2 號碼頭鋼板樁平均腐蝕速率與檢測水深之關係

3.保護電位量測

東 1、東 2 號碼頭鋼板樁保護電位量測位置如圖 3.53 所示，檢測水深為 -1.0 m、 -3.0 m、 -5.0 m，量測結果列於表 3.14。保護電位最大值為 -585 mV，最小值為 -899 mV。除東 2 號碼頭距起點 120 公尺處，保護電位接近 -850 mV 之有效防蝕電位外，量測值多介於 -600 -800 mV，明顯為達保護狀態。

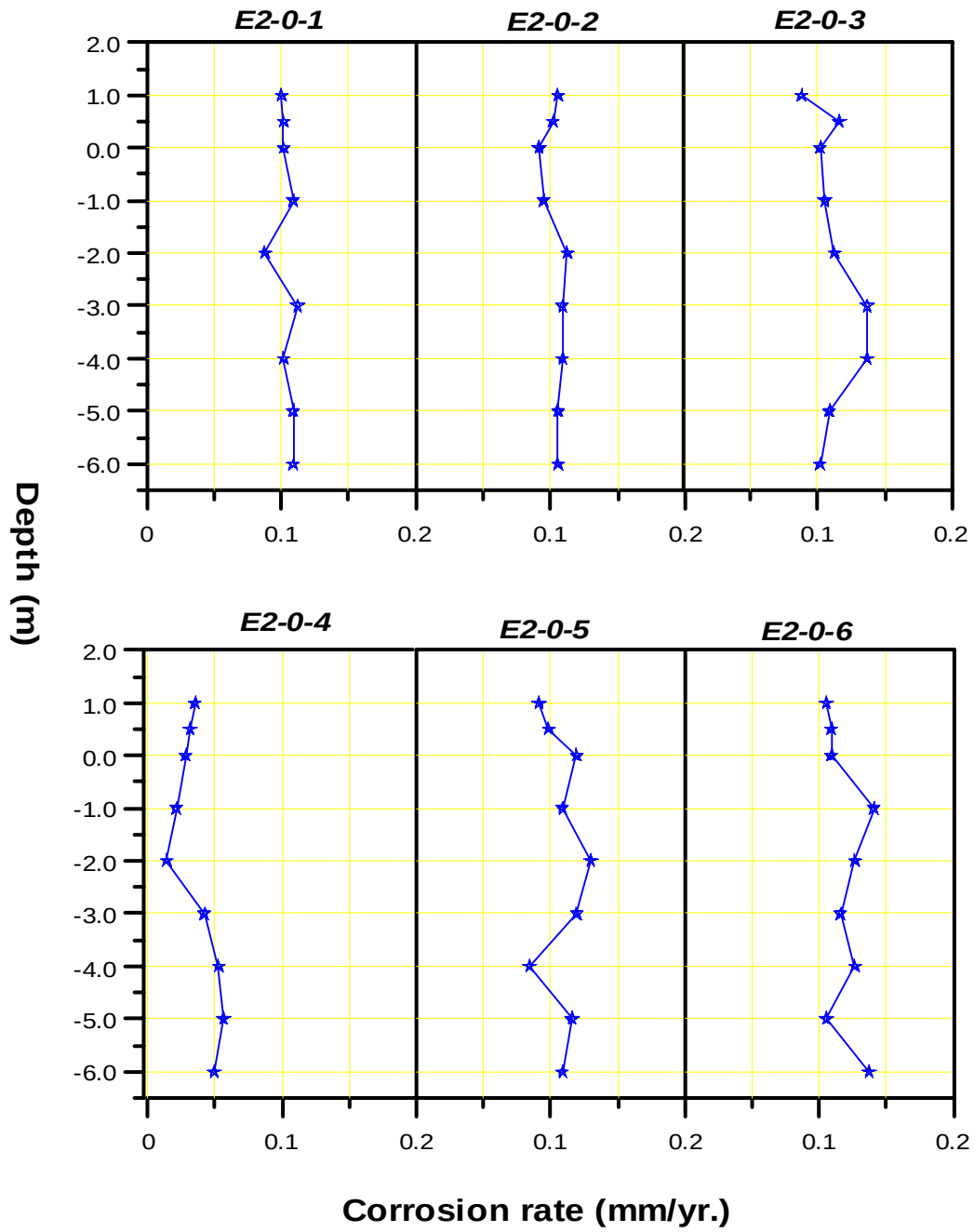


圖 3.49 台北港東 2 號碼頭鋼板樁腐蝕速率與檢測水深之關係 (1)

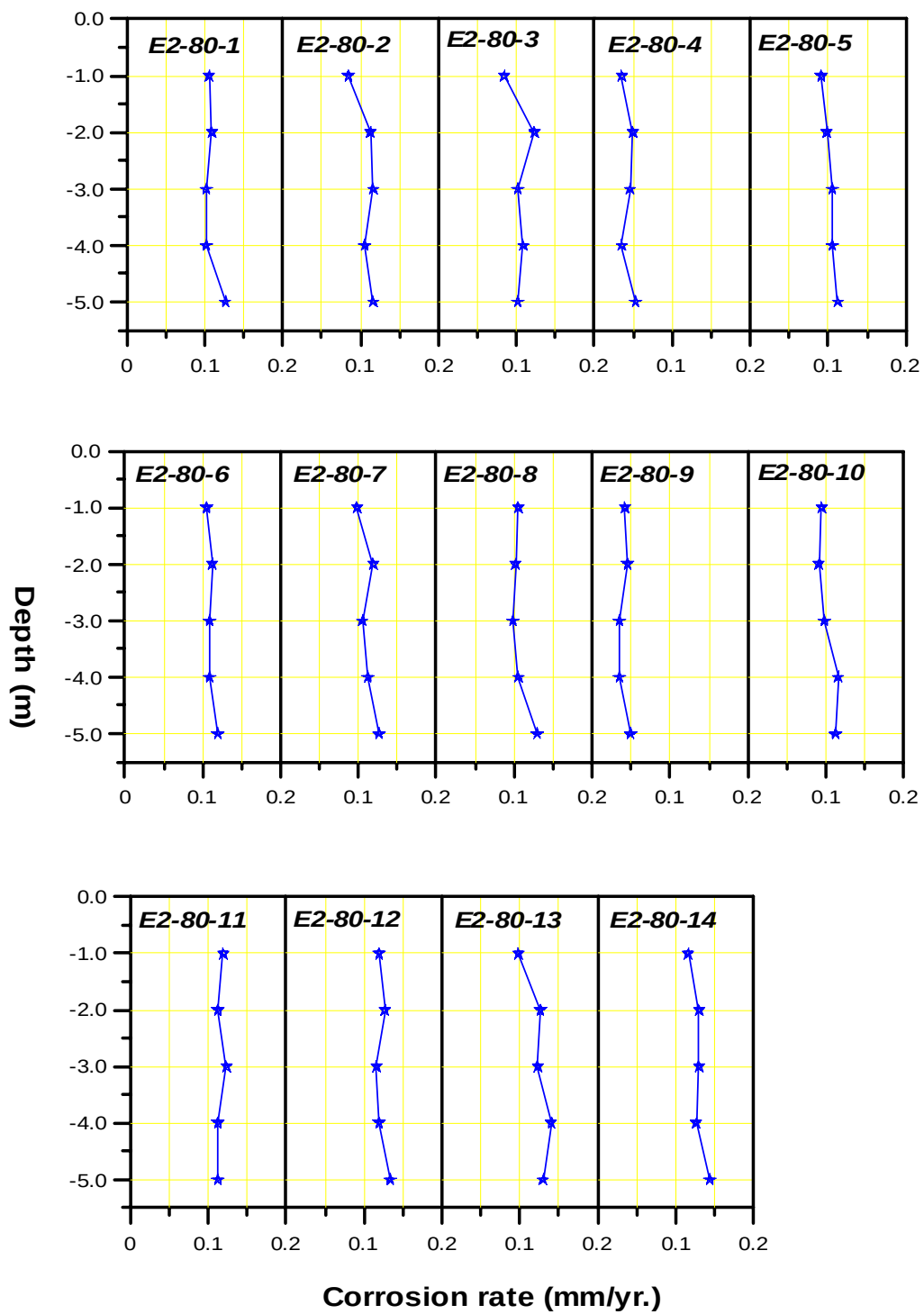


圖 3.50 台北港東 2 號碼頭鋼板樁腐蝕速率與檢測水深之關係 (2)

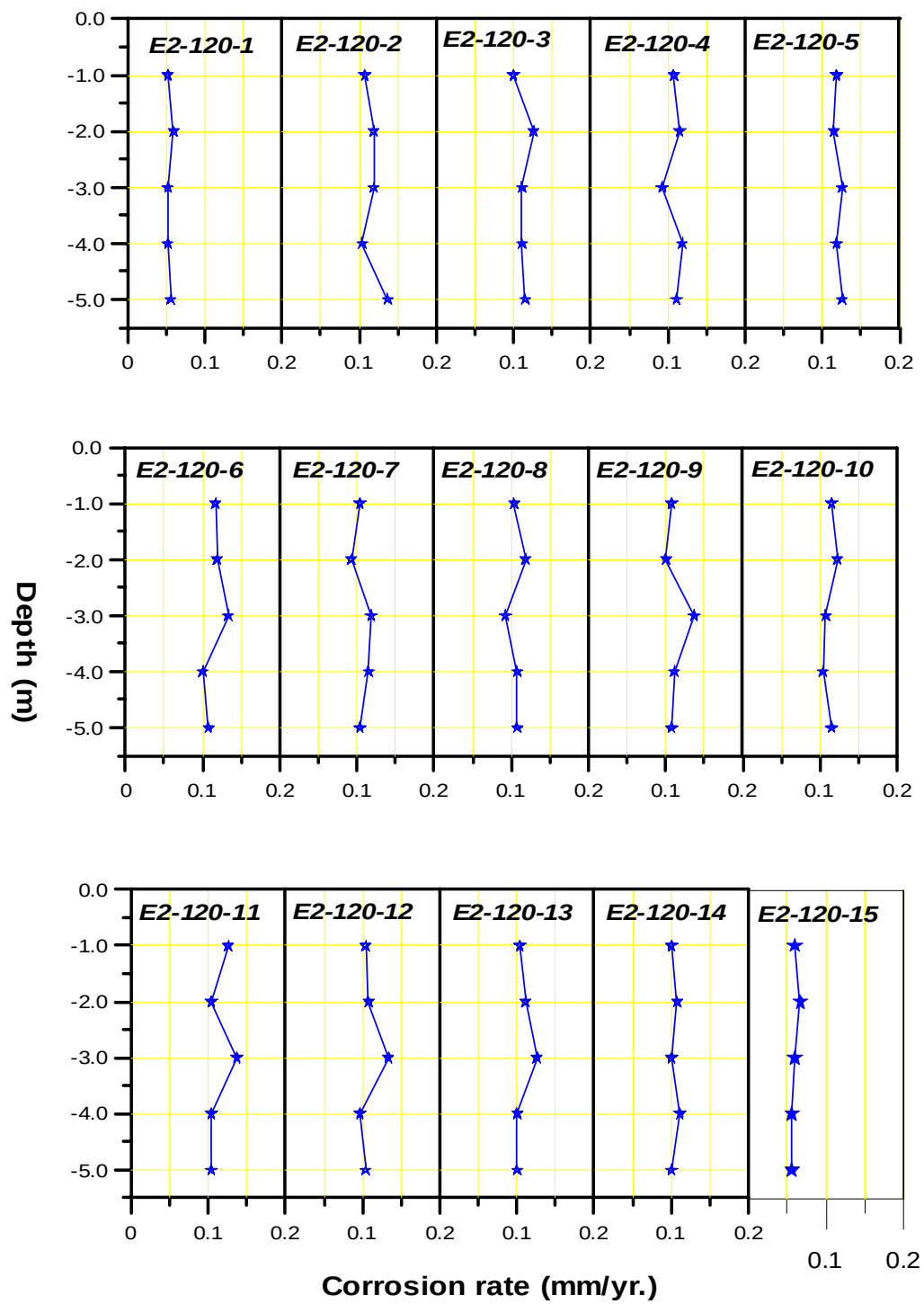


圖 3.51 台北港東 2 號碼頭鋼板樁腐蝕速率與檢測水深之關係 (3)

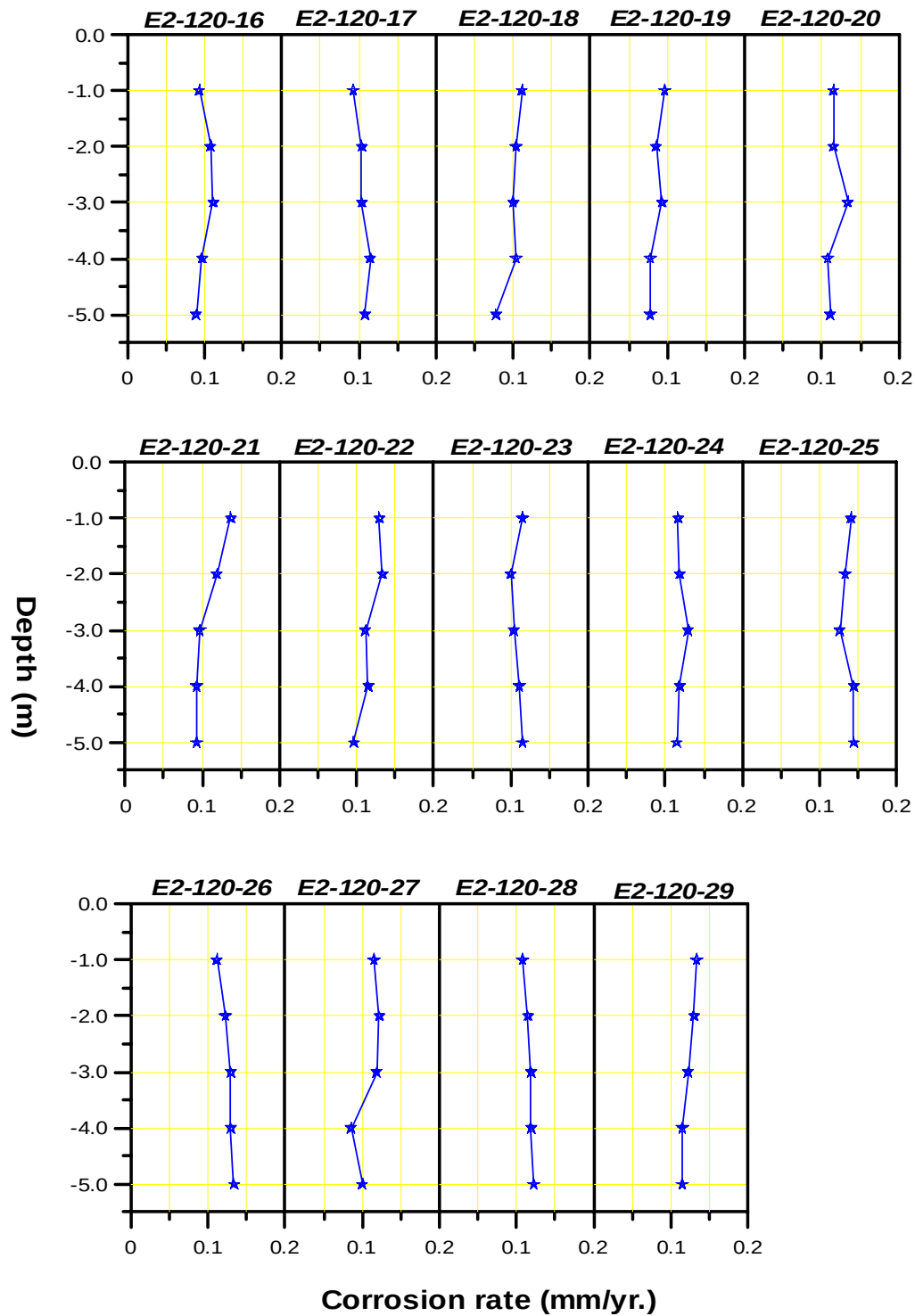


圖 3.52 台北港東 2 號碼頭鋼板樁腐蝕速率與檢測水深之關係 (4)

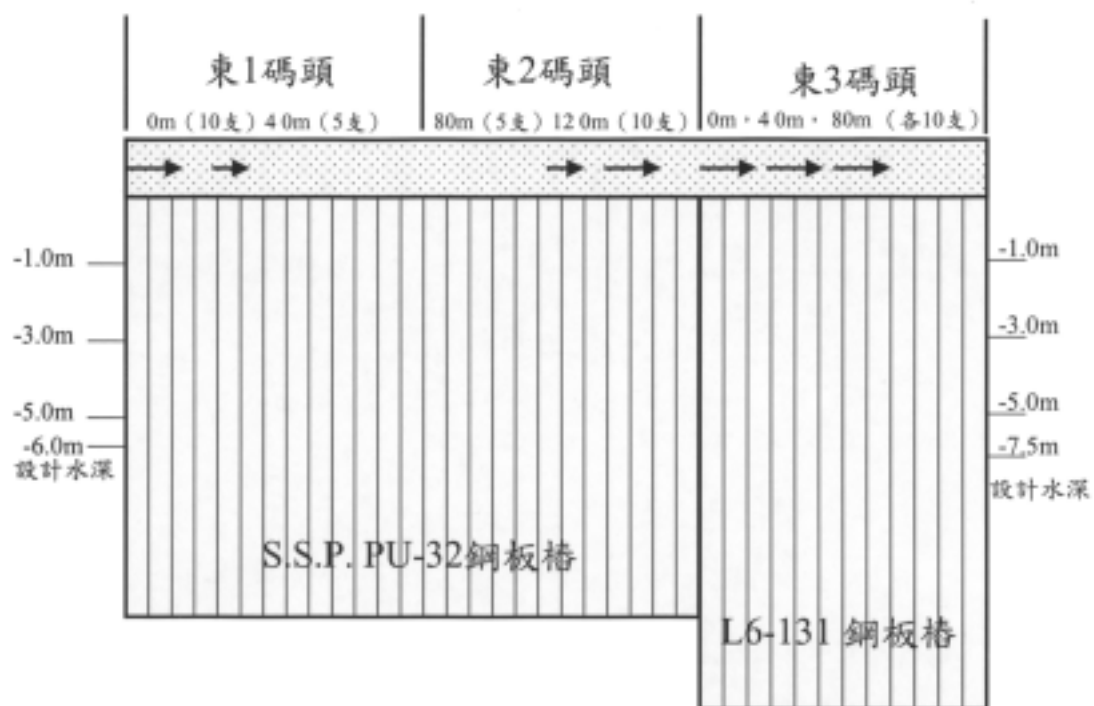


圖 3.53 台北港碼頭鋼板樁保護電位量測位置

表 3.14 台北港東 1、東 2 號碼頭鋼板樁保護電位量測結果

編 號	保護電位		編 號	保護電位		編 號	保護電位		編 號	保護電位	
E1-00-1	-1.0	-742	E1-40-1	-1.0	-705	E2-80-1	-1.0	-764	E2-120-1	-1.0	-898
	-3.0	-738		-3.0	-756		-3.0	-800		-3.0	-899
	-5.0	-762		-5.0	-767		-5.0	-763		-5.0	-888
E1-00-2	-1.0	-820	E1-40-2	-1.0	-783	E2-80-2	-1.0	-802	E2-120-2	-1.0	-847
	-3.0	-794		-3.0	-797		-3.0	-807		-3.0	-892
	-5.0	-709		-5.0	-817		-5.0	-776		-5.0	-891
E1-00-3	-1.0	-740	E1-40-3	-1.0	-727	E2-80-3	-1.0	-765	E2-120-3	-1.0	-870
	-3.0	-735		-3.0	-685		-3.0	-765		-3.0	-890
	-5.0	-759		-5.0	-836		-5.0	-687		-5.0	-885
E1-00-4	-1.0	-585	E1-40-4	-1.0	-537	E2-80-4	-1.0	-716	E2-120-4	-1.0	-830
	-3.0	-652		-3.0	-765		-3.0	-688		-3.0	-869
	-5.0	-647		-5.0	-665		-5.0	-688		-5.0	-894
E1-00-5	-1.0	-606	E1-40-5	-1.0	-688	E2-80-5	-1.0	-699	E2-120-5	-1.0	-837
	-3.0	-620		-3.0	-693		-3.0	-693		-3.0	-870
	-5.0	-721		-5.0	-685		-5.0	-695		-5.0	-838
E1-00-6	-1.0	-744	E1-40-6	-1.0		E2-80-6	-1.0		E2-120-6	-1.0	-808
	-3.0	-795		-3.0			-3.0			-3.0	-806
	-5.0	-789		-5.0			-5.0			-5.0	-847
E1-00-7	-1.0	-846	E1-40-7	-1.0		E2-80-7	-1.0		E2-120-7	-1.0	-829
	-3.0	-804		-3.0			-3.0			-3.0	-836
	-5.0	-780		-5.0			-5.0			-5.0	-817
E1-00-8	-1.0	-733	E1-40-8	-1.0		E2-80-8	-1.0		E2-120-8	-1.0	-856
	-3.0	-734		-3.0			-3.0			-3.0	-854
	-5.0	-705		-5.0			-5.0			-5.0	-825
E1-00-9	-1.0	-750	E1-40-9	-1.0		E2-80-9	-1.0		E2-120-9	-1.0	-870
	-3.0	-790		-3.0			-3.0			-3.0	-838
	-5.0	-627		-5.0			-5.0			-5.0	-842
E1-00-10	-1.0	-634	E1-40-10	-1.0		E2-80-10	-1.0		E2-120-10	-1.0	-787
	-3.0	-616		-3.0			-3.0			-3.0	-792
	-5.0	-677		-5.0			-5.0			-5.0	-841

3.3.3.4 台北港東 3 號碼頭

東 3 號碼頭於民國 90 年完工，係以 Larssen 6-131 U 型之鋼板樁建造，全長 170 公尺，水深 -7.5 公尺，採犧牲陽極法作為防蝕措施。碼頭平面佈置如圖 3.42，碼頭結構斷面與鋼板樁型式如圖 3.54 至圖 3.55，陽極塊配置及詳圖、潮間帶防蝕措施如圖 3.56 至圖 3.58。

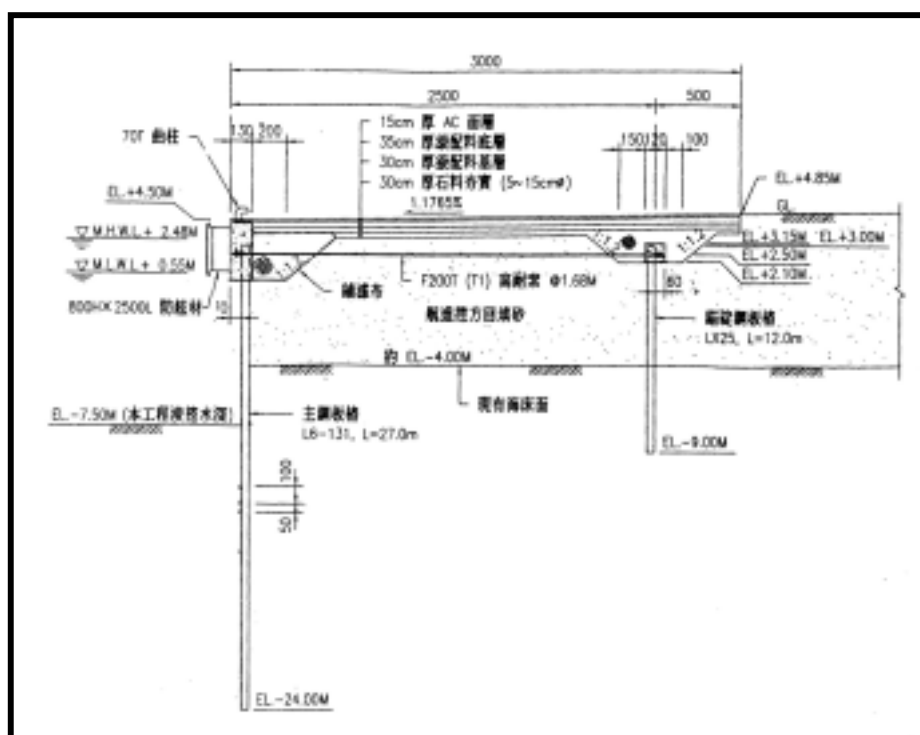


圖 3.54 台北港東 3 號碼頭結構斷面

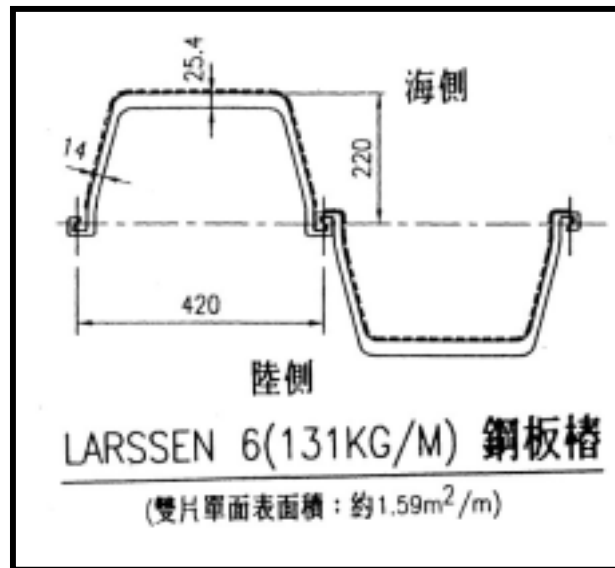


圖 3.55 Larssen 6-131 U 型之鋼板樁型式

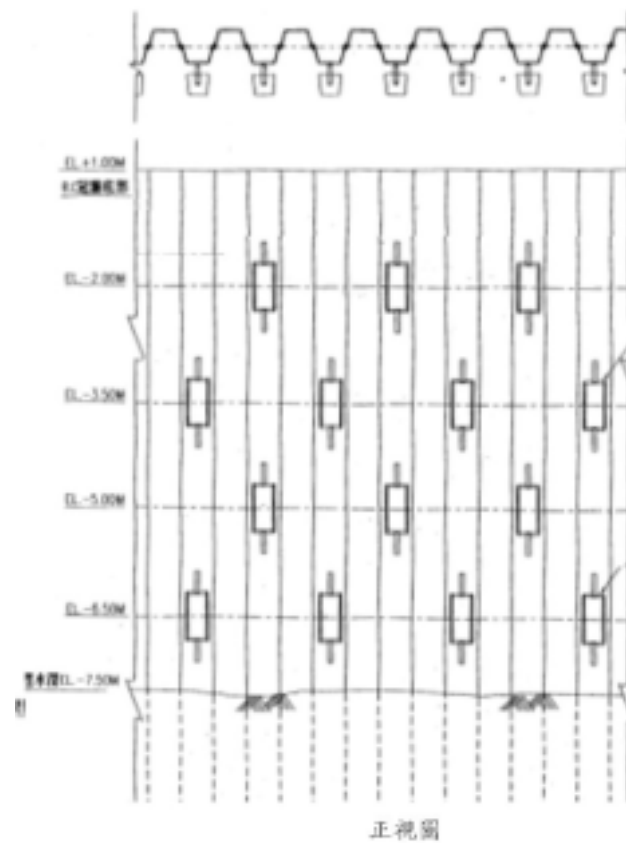
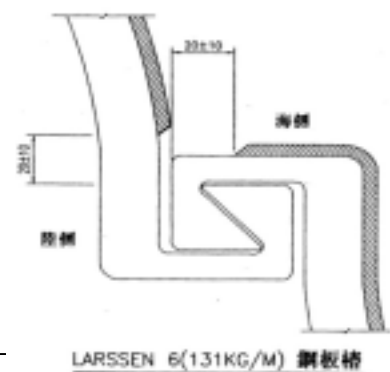
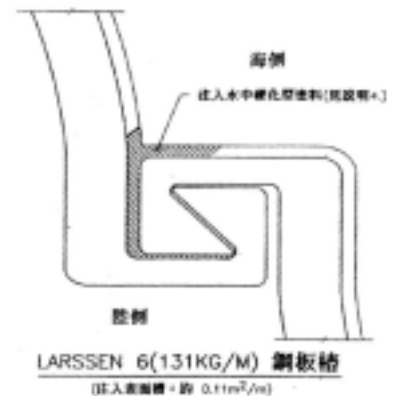
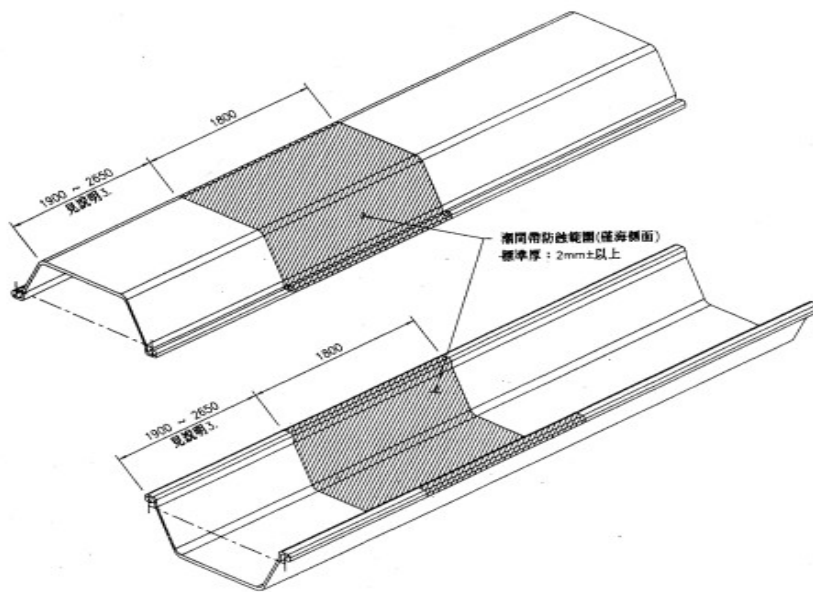


圖 3.56 台北港東 3 號碼頭陽極塊配置圖



台北港潮間帶防蝕說明：

1. 鋼板樁塗裝區域表面處理須噴砂至SSPC-SP-10(SIS Sa2.5)以上，粗糙度 $75 \mu\text{m}$ 以上；表面處理後二小時內須立即噴塗底漆，二日內須完成面漆噴塗；漆料另詳規範。
2. 打樁後如有刮損處需另行補修，海中接頭及刮損則另使用水中凝結型塗料修補。
3. 鋼板樁潮間帶防蝕範圍之高程由EL.+1.1 M 至 EL.-0.7M計1.8M，EL.+1.1M 以上之鋼板樁長度為變值(1.9~2.65M)，請配合設計圖 QA-09 鋼板樁之樁頂高程而定。
4. 鋼板樁隼頭以高壓塗料槍注入防蝕塗料，至接縫處注滿適溢出為止。

圖 3.58 台北港東 3 號碼頭潮間帶防蝕措施

1. 目視檢測

東 3 號碼頭鋼板樁外觀並未發現有孔蝕或穿孔破洞等現象。

2. 鋼板樁厚度量測

圖 3.59 為東 3 號碼頭檢測位置示意圖。因碼頭停靠運油船隻作業中, 為作業安全考量, 測樁選自起點 0 m 處起共 105 支, 檢測水深為 -1.0 m、 -2.0 m、 -3.0 m、 -4.0 m -5.0 m 及 -6.0 m 等六個水深測點, 共計 630 個檢測點。

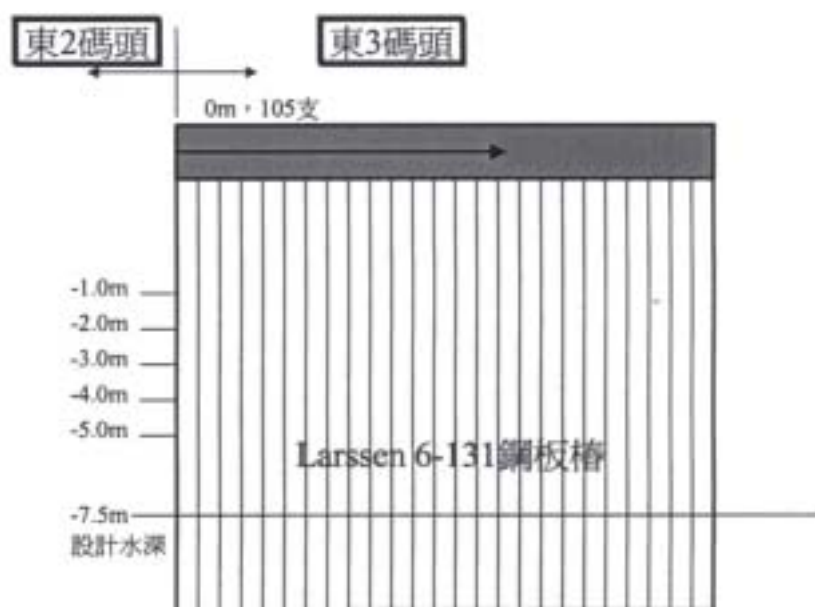


圖 3.59 台北港東 3 號碼頭鋼板樁厚度檢測位置

表 3.15 及圖 3.60 為東 3 號碼頭鋼板樁平均腐蝕速率檢測結果, 各檢測水深平均腐蝕速率均為 0.14 mm/yr, 鋼板樁減少厚度大多介於 0.02 mm 至 0.03 mm 之間, 僅少數測點為 0.05 mm。由於本座碼頭使用僅約二年, 腐蝕速率雖大於東 1 及東 2 號碼頭, 但實際腐蝕情況尚屬輕微。各檢測樁腐蝕速率與檢測水深之關係如圖 3.61 至圖 3.65。

表 3.15 台北港東 3 號碼頭鋼板樁之平均腐蝕速率

水深(m)	-1.0	-2.0	-3.0	-4.0	-5.0	-6.0
腐蝕速率 (mm/yr.)	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14

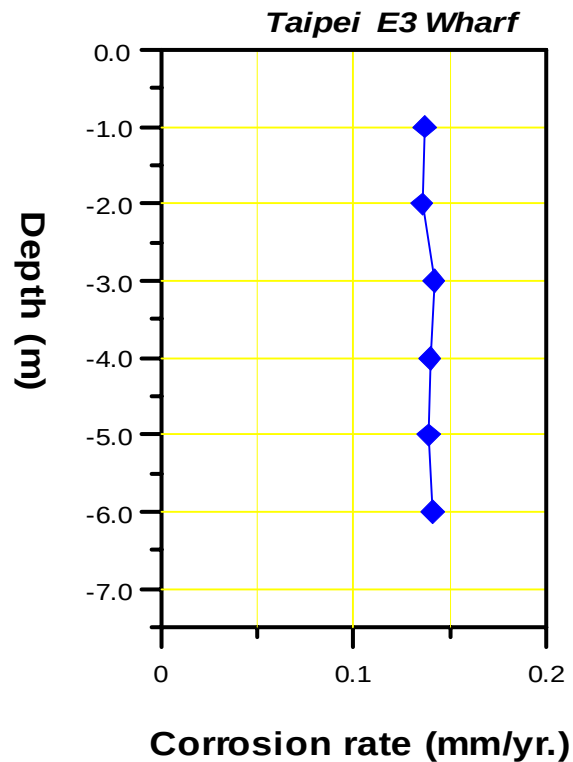


圖 3.60 台北港東 3 號碼頭鋼板樁平均腐蝕速率與水深之關係

3.保護電位量測

鋼板樁保護電位量測位置如圖 3.53。量測水深為 -1.0 m 、-3.0 m 及 -5.0 m。量測結果列於表 3.16。保護電位最大值為 -928 mV，最小值為 -1025 mV，本座碼頭陽極塊保護電位均小於 -850 mV，已達保護之目的。

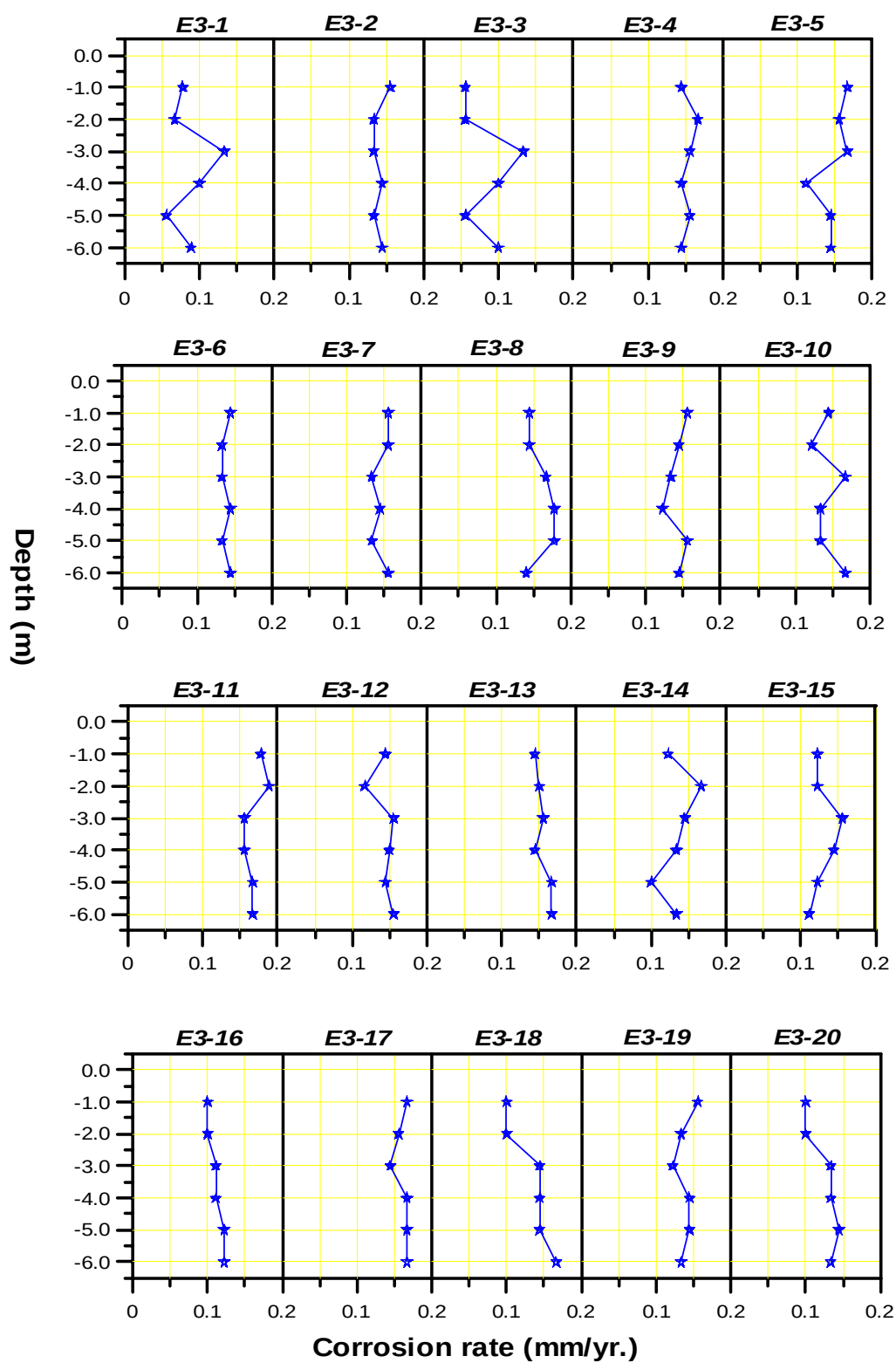


圖 3.61 台北港東 3 號碼頭鋼板樁腐蝕速率與檢測水深之關係 (1)

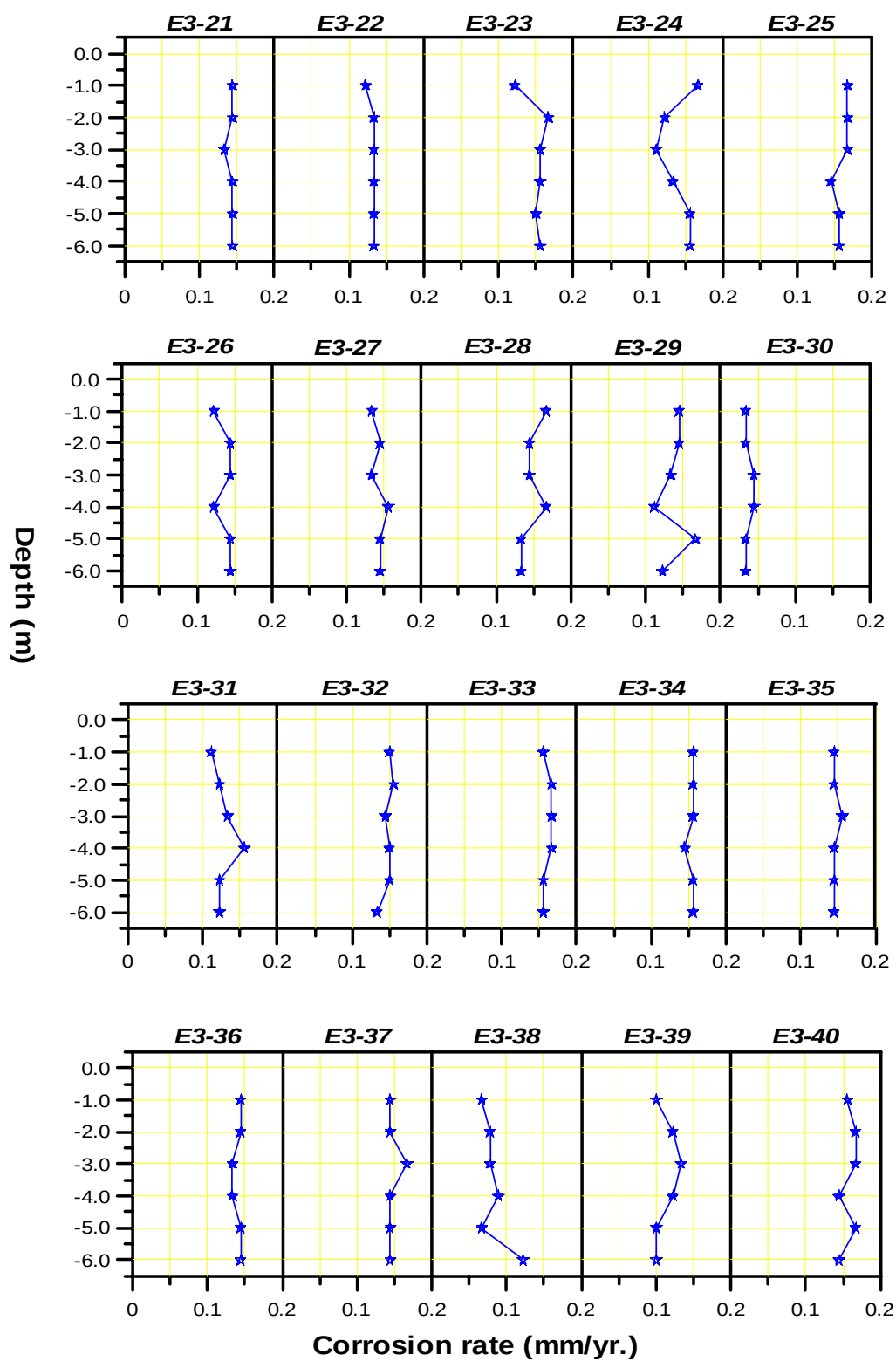


圖 3.62 台北港東 3 號碼頭鋼板樁腐蝕速率與檢測水深之關係 (2)

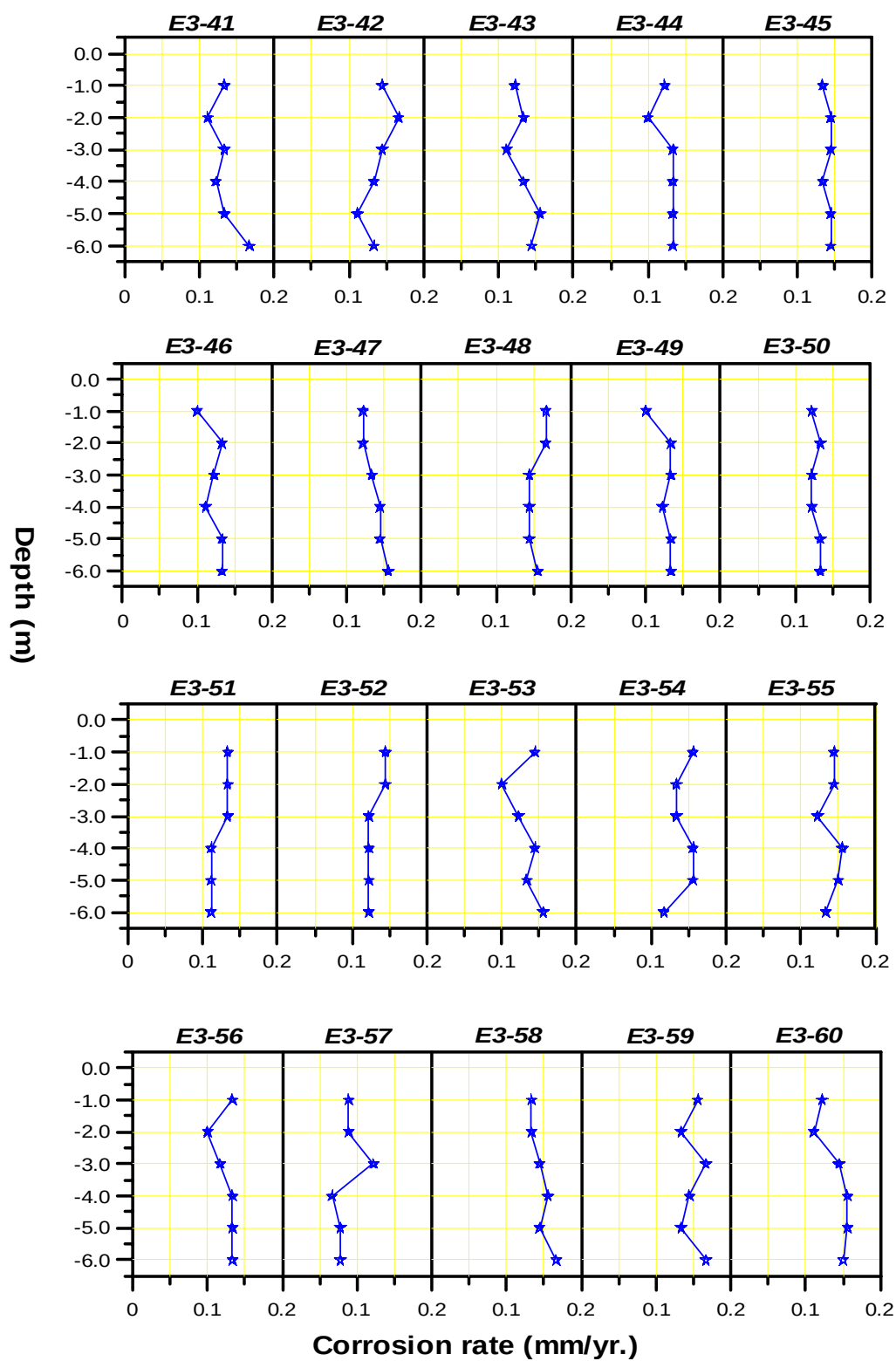


圖 3.63 台北港東 3 號碼頭鋼板樁腐蝕速率與檢測水深之關係 (3)

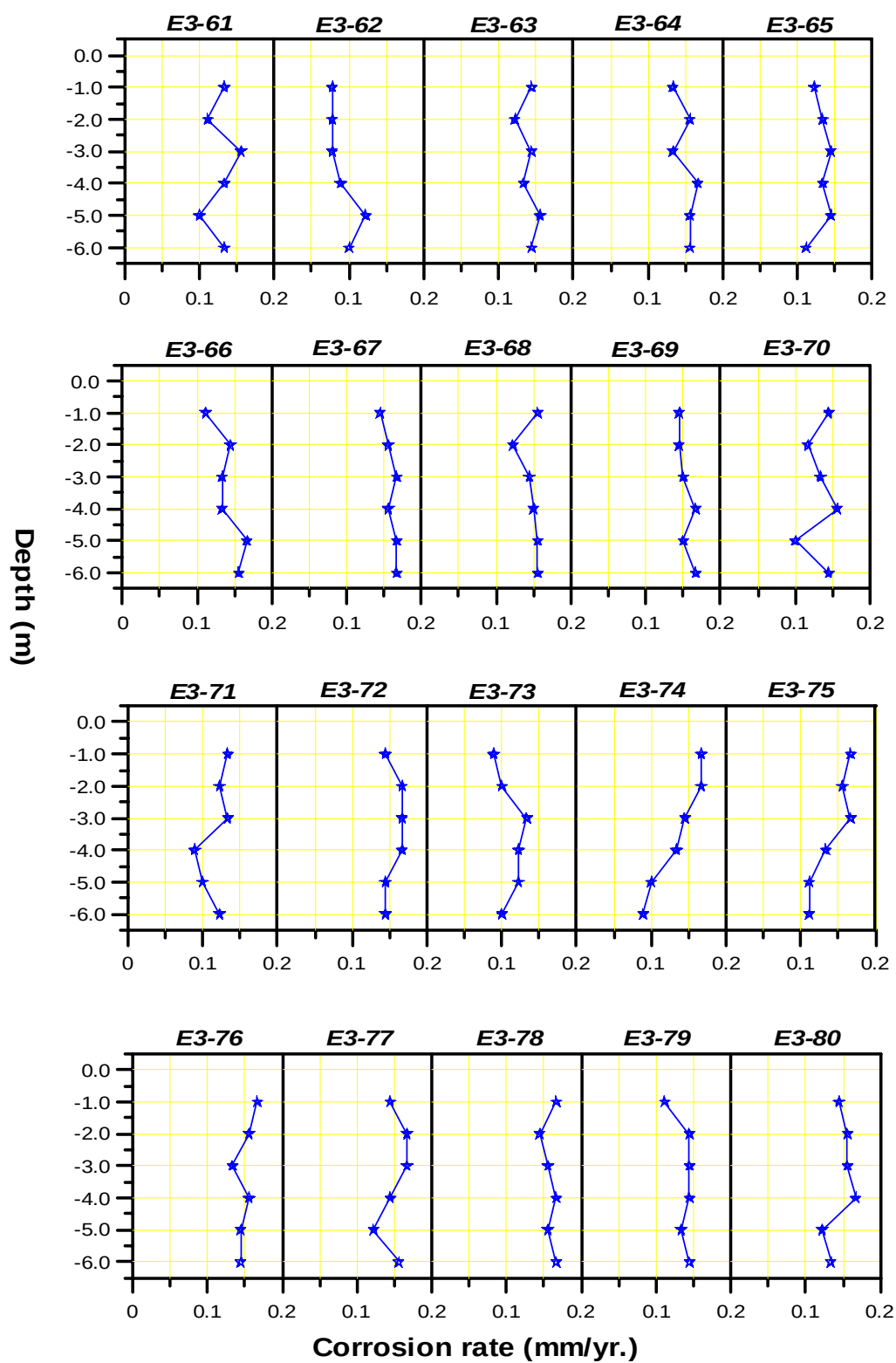


圖 3.64 台北港東 3 號碼頭鋼板樁腐蝕速率與檢測水深之關係 (4)

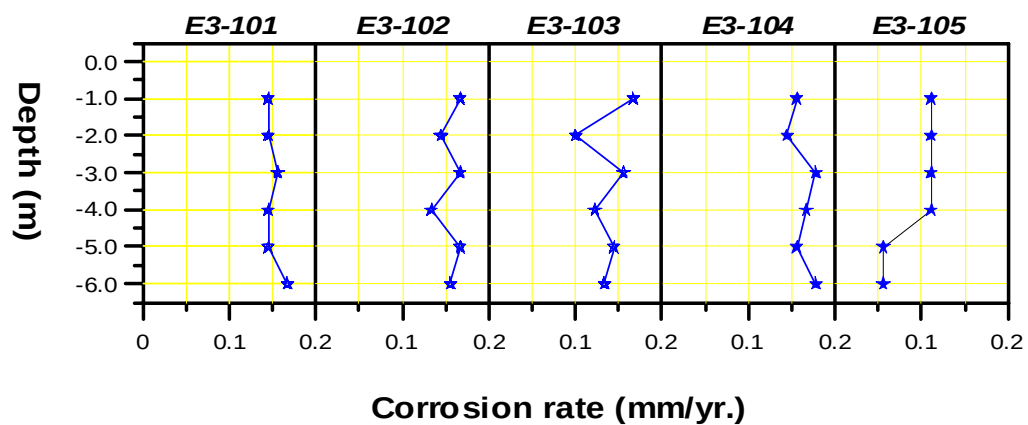


圖 3.65 台北港東 3 號碼頭鋼板樁腐蝕速率與檢測水深之關係 (5)

表 3.16 台北港東 3 號碼頭鋼板樁保護電位量測結果 (mV)

鋼板樁 編 號	發生電位			鋼板樁 編 號	發生電位			鋼板樁 編 號	發生電位		
	水深	切割前	焊後後		水深	切割前	焊後後		水深	切割前	焊後後
E3-00-1	-1.0	-993	-994	E3-40-1	-1.0	-993	-995	E3-80-1	-1.0	-991	-990
	-3.0	-1039	-1040		-3.0	-1046	-1051		-3.0	-1027	-1036
	-5.0	-1009	-1052		-5.0	-1001	-1004		-5.0	-1011	-1008
E3-00-2	-1.0	-991	-990	E3-40-2	-1.0	-991	-988	E3-80-2	-1.0	-979	-981
	-3.0	-1021	-1016		-3.0	-1017	-1016		-3.0	-1005	-1007
	-5.0	-1014	-1015		-5.0	-1034	-1019		-5.0	-1003	-1004
E3-00-3	-1.0	-978	-980	E3-40-3	-1.0	-976	-978	E3-80-3	-1.0	-991	-977
	-3.0	-1006	-1007		-3.0	-1010	-1011		-3.0	-1000	-1010
	-5.0	-1003	-1004		-5.0	-997	-999		-5.0	-1004	-1010
E3-00-4	-1.0	-980	-975	E3-40-4	-1.0	-991	-993	E3-80-4	-1.0	-987	-989
	-3.0	-1010	-1010		-3.0	-1032	-1018		-3.0	-1021	-1022
	-5.0	-1009	-1007		-5.0	-1050	-1041		-5.0	-1016	-1017
E3-00-5	-1.0	-998	-995	E3-40-5	-1.0	-992	-993	E3-80-5	-1.0	-967	-968
	-3.0	-1057	-1051		-3.0	-1023	-1024		-3.0	-988	-988
	-5.0	-1011	-1004		-5.0	-1030	-1030		-5.0	-1016	-1015
E3-00-6	-1.0	-987	-988	E3-40-6	-1.0	-1015	-1025	E3-80-6	-1.0	-936	-926
	-3.0	-1015	-1016		-3.0	-1019	-1039		-3.0	-1079	-1062
	-5.0	-1015	-1019		-5.0	-1024	-1033		-5.0	-1046	-1038
E3-00-7	-1.0	-982	-978	E3-40-7	-1.0	-1029	-1029	E3-80-7	-1.0	-943	-947
	-3.0	-1011	-1011		-3.0	-1039	-1039		-3.0	-1007	-1008
	-5.0	-1003	-999		-5.0	-1031	-1031		-5.0	-1017	-1018
E3-00-8	-1.0	-996	-993	E3-40-8	-1.0	-1027	-1032	E3-80-8	-1.0	-945	-942
	-3.0	-1029	-1018		-3.0	-1029	-1038		-3.0	-1029	-1030
	-5.0	-1041	-1041		-5.0	-1026	-1036		-5.0	-1032	-1037
E3-00-9	-1.0	-996	-993	E3-40-9	-1.0	-1015	-1035	E3-80-9	-1.0	-947	-945
	-3.0	-1023	-1024		-3.0	-1019	-1056		-3.0	-1034	-1028
	-5.0	-1034	-1030		-5.0	-1024	-1060		-5.0	-1033	-1023
E3-00-10	-1.0	-988	-990	E3-40-10	-1.0	-1029	-1061	E3-80-10	-1.0	-947	-951
	-3.0	-1036	-1036		-3.0	-1039	-1068		-3.0	-1022	-1019
	-5.0	-1007	-1008		-5.0	-1031	-1075		-5.0	-1015	-1016

3.3.3.5 基隆港東 10 號碼頭

基隆港東 10 號碼頭原為鋼板樁碼頭，於民國 72 年竣工，因營運需要，民國 77 年起自原有碼頭岸線向海側延伸 20 公尺，設計水深 -9.0 m，採棧橋式鋼管樁結構，共分為 8 個單元，鋼管樁以七支為一排，於民國 79 年完工。全區鋼管樁計有 4 個單元未採取任何防蝕措施，另 4 個單元則安裝犧牲陽極塊保護鋼管樁，每支鋼管樁於水深為 -2.0 及 -4.5m 或 -7.0 m 處安裝 2 支陽極塊。碼頭平面佈置、結構斷面如圖 3.66、圖 3.67 所示。

1. 目視檢測

本座碼頭潮汐帶部位之鋼管樁以混凝土保護（如圖 3.68），海中帶則分為防蝕與未防蝕兩區。防蝕區採用犧牲陽極塊法，鋼管樁為陽極塊提供之保護電流能互相支援，在各鋼管樁間以鋼筋焊接連通（如圖 3.69）。全區碼頭之鋼管樁外觀並未發現有孔蝕或穿孔破洞；但未防蝕區之鋼管樁表面清除海生物後，發現一層紅橙色銹層，顯示腐蝕較為嚴重（如圖 3.70），防蝕區之鋼管樁則表面光亮，腐蝕程度輕微至無（如圖 3.71）。又舊有鋼板樁發現多處穿孔破洞之情形（如圖 3.72）。

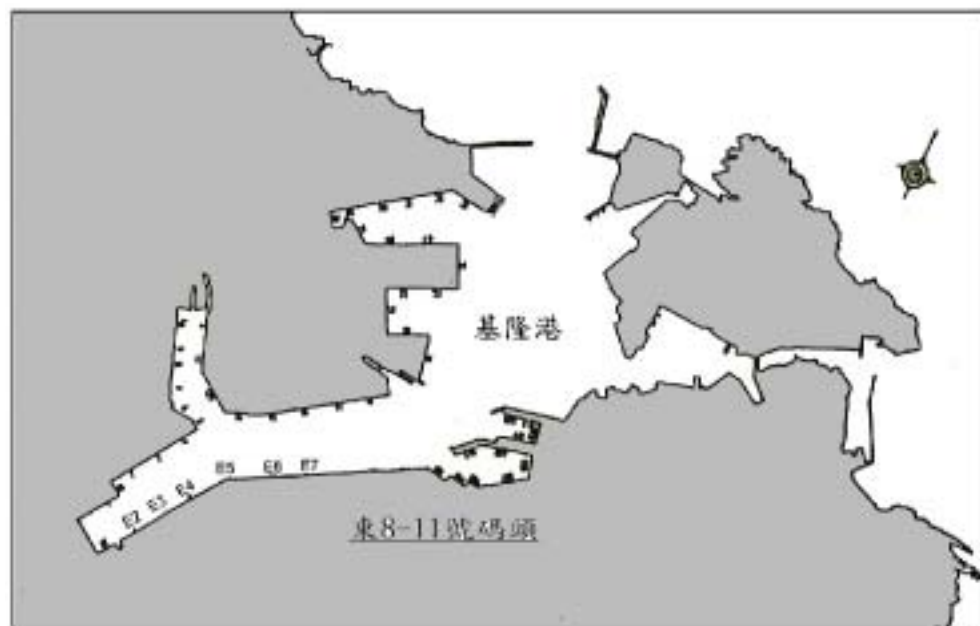


圖 3.66 基隆港東 10 號碼頭平面佈置

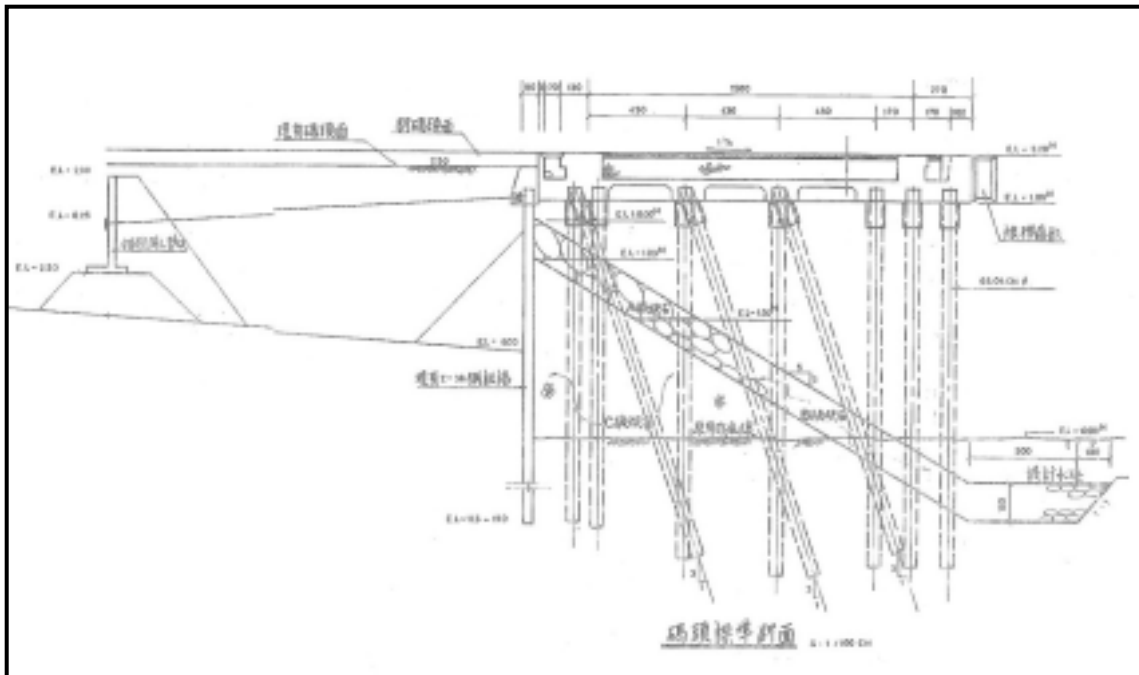


圖 3.67 基隆港東 10 號碼頭結構斷面

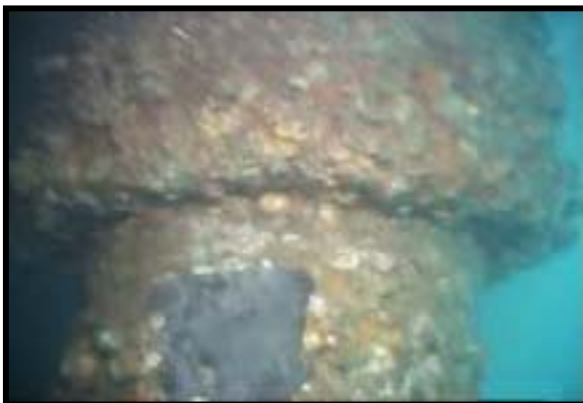


圖 3.68 潮汐帶以混凝土保護鋼管樁之情形



圖 3.69 各鋼管樁間以鋼筋焊接連通之情形



圖 3.70 未防蝕區之鋼管樁表面腐蝕情形



圖 3.71 防蝕區之鋼管樁表面情形



圖 3.72 舊有鋼板樁發現穿孔、破洞之情形

2. 鋼板樁厚度量測

圖 3.73 為東 10 號碼頭鋼板樁厚度檢測位置示意圖。表 3.17 及圖 3.74 為東 10 號碼頭鋼管樁平均腐蝕速率與水深關係，防蝕區各檢測水深之平均腐蝕速率均小於未防蝕區，顯示陽極塊已發揮保護鋼管樁減少腐蝕之效益。兩區之最大平均腐蝕速率發生於水深 -0.70 m 及 -1.00 m 處，分別為 0.11 、 0.07 mm/yr. 。

圖 3.75 為東 10 號碼頭鋼板樁未防蝕區腐蝕速率與檢測水深之關係。最大腐蝕速率為 0.17 mm/yr. ，水深 -0.70 m -1.50 m 之間，檢測點之腐蝕速率多數大於 0.10 mm/yr. ，最大減少厚度達 2.15 mm ，目視檢測此區部份鋼管樁表面發現有一層紅棕色銹斑，顯示腐蝕較為嚴重，值得注意。

圖 3.76 為東 10 號碼頭鋼板樁防蝕區腐蝕速率與檢測水深之關係。各檢測水深之腐蝕速率差異不大，除水深 -0.70 m 及 -1.00 m 各有一測點之腐蝕速率為 0.12 mm/yr. 外，其餘均小於 0.10 mm/yr.，顯示採用之犧牲陽極法已達保護之目的。

3.保護電位量測

鋼板樁保護電位量測位置如圖 3.77, 防蝕區之量測結果列於表 3.18 與表 3.19。保護電位最大值為 -967 mV，最小值為 -1087 mV，防蝕區鋼管樁之保護電位均小於 -850 mV，已達保護之目的。未防蝕區之量測結果列於表 3.20。保護電位最大值為 -624 mV，最小值為 -719 mV，鋼管樁處於腐蝕狀態。

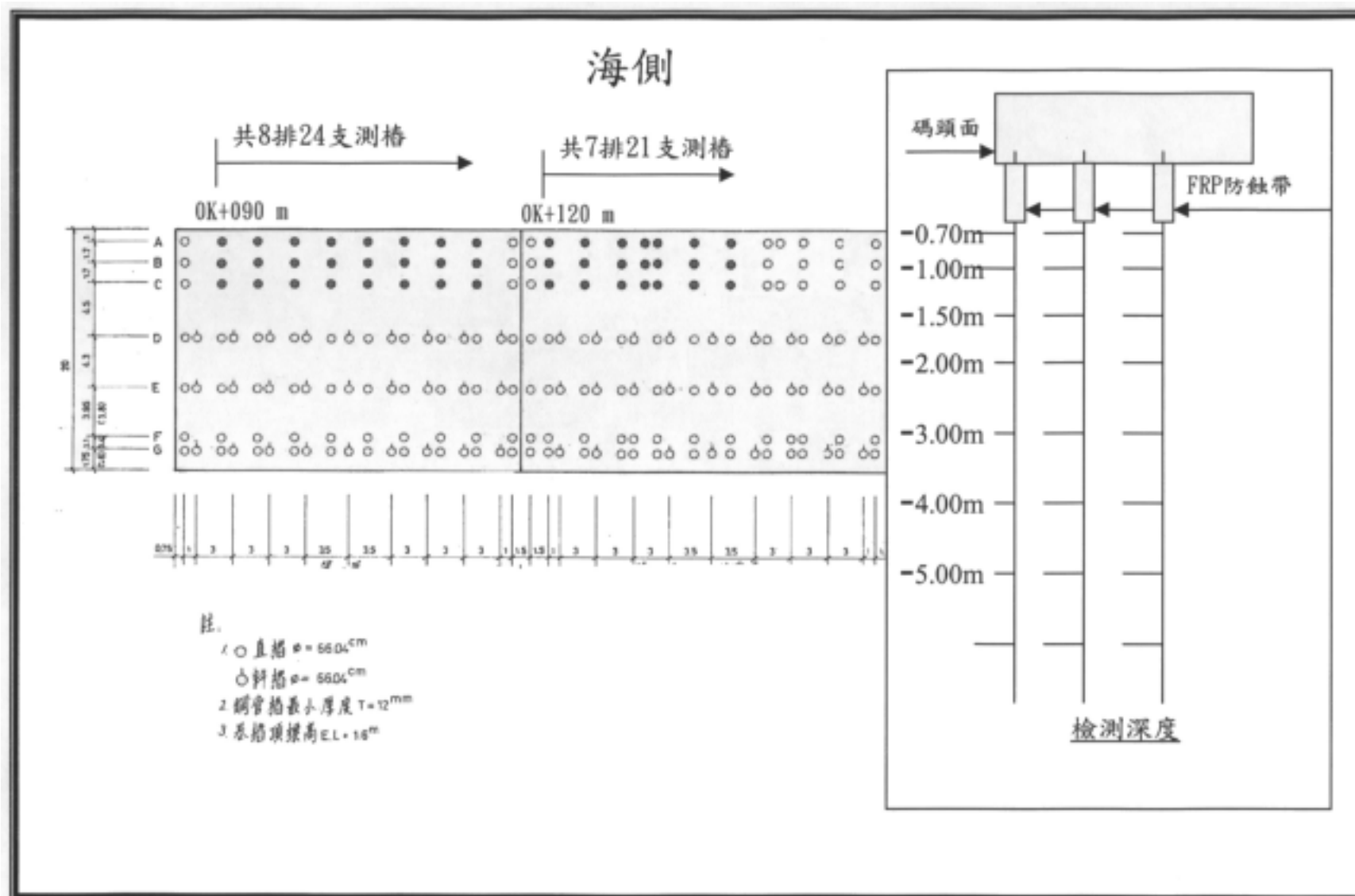


圖 3.73 基隆港東 10 號碼頭鋼板樁厚度檢測位置示意圖

表 3.17 基隆港東 10 號碼頭鋼板樁平均腐蝕速率

水深(m)	-0.70	-1.00	-1.50	-2.00	-3.00	-4.00	-5.00	備註
腐蝕速率 (mm/yr.)	0.11	0.11	0.10	0.10	0.09	0.10	0.09	未防蝕區
	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	防蝕區

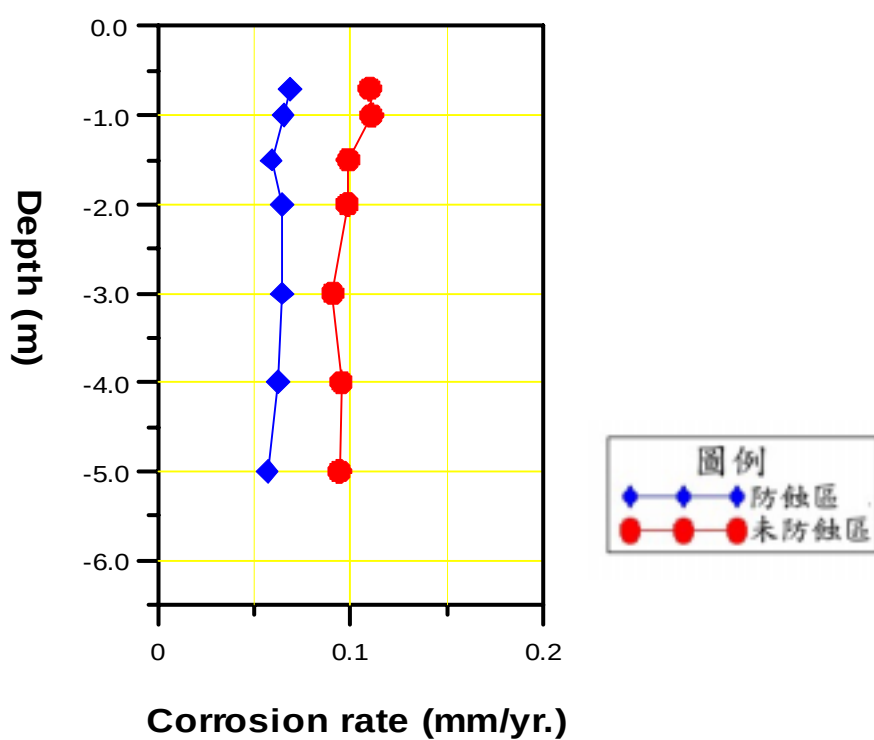


圖 3.74 基隆港東 10 號碼頭鋼板樁平均腐蝕速率與水深之關係

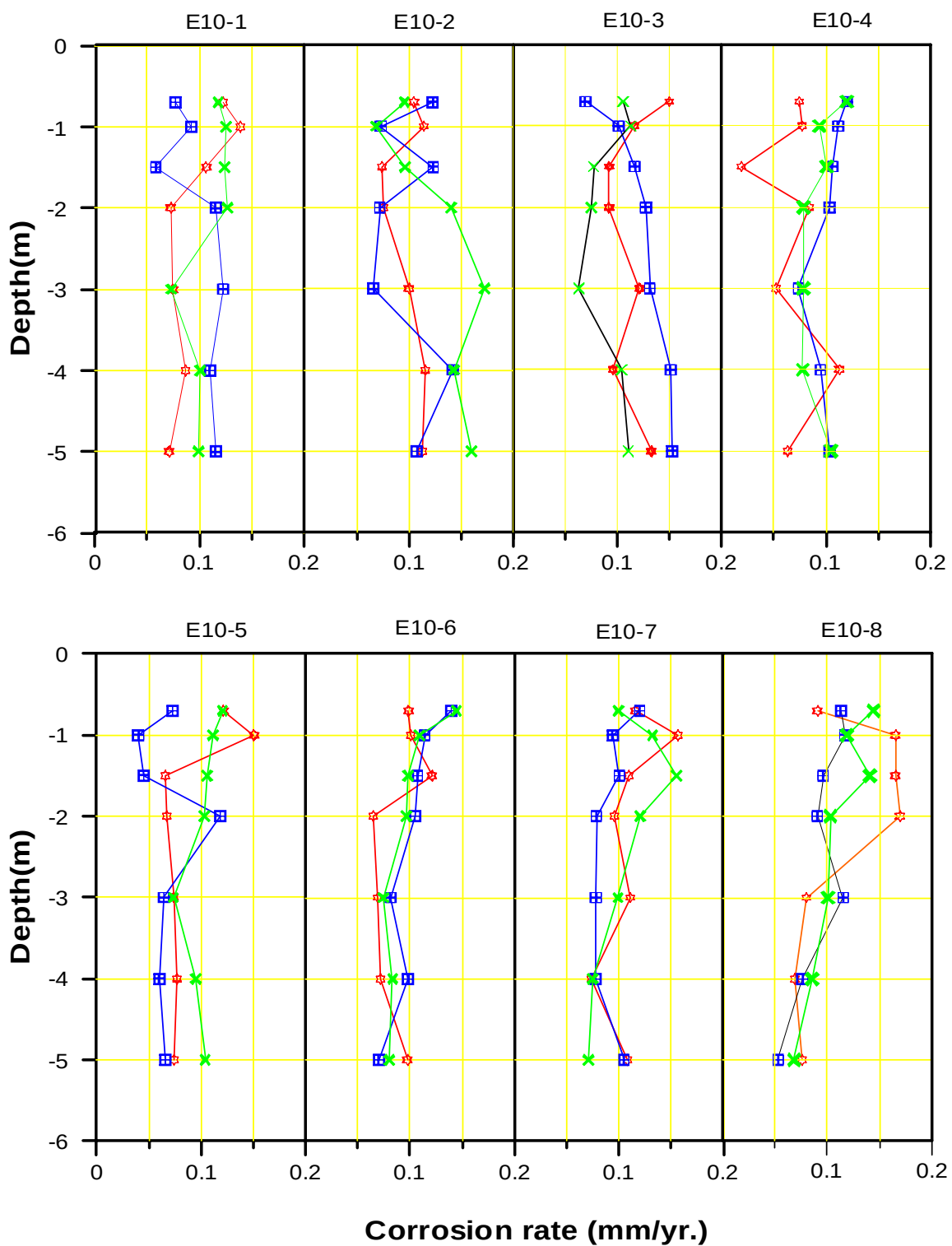


圖 3.75 基隆港東 10 號碼頭鋼板樁腐蝕速率與水深之關係（未防蝕區）

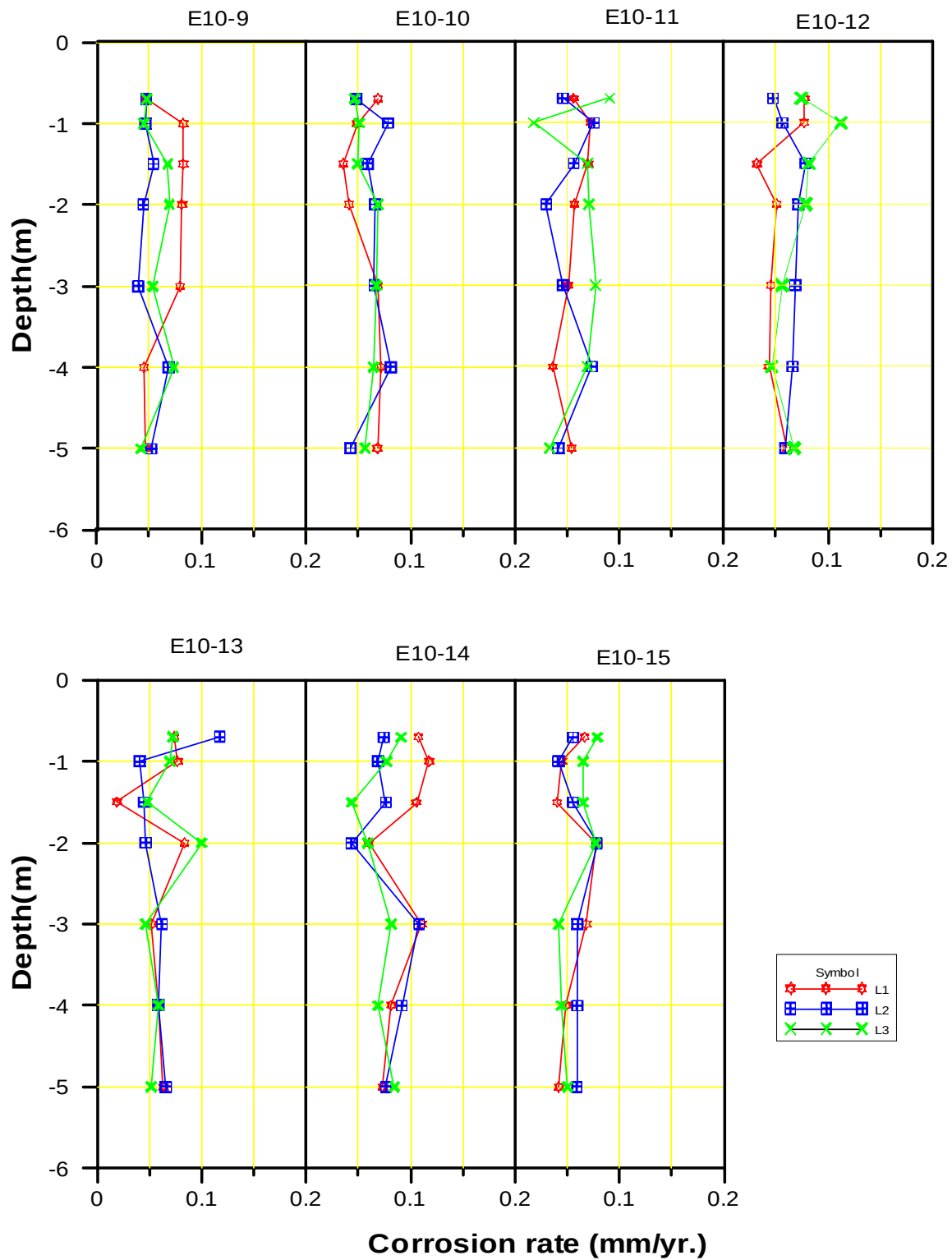


圖 3.76 基隆港東 10 號碼頭鋼板樁腐蝕速率與水深之關係（防蝕區）

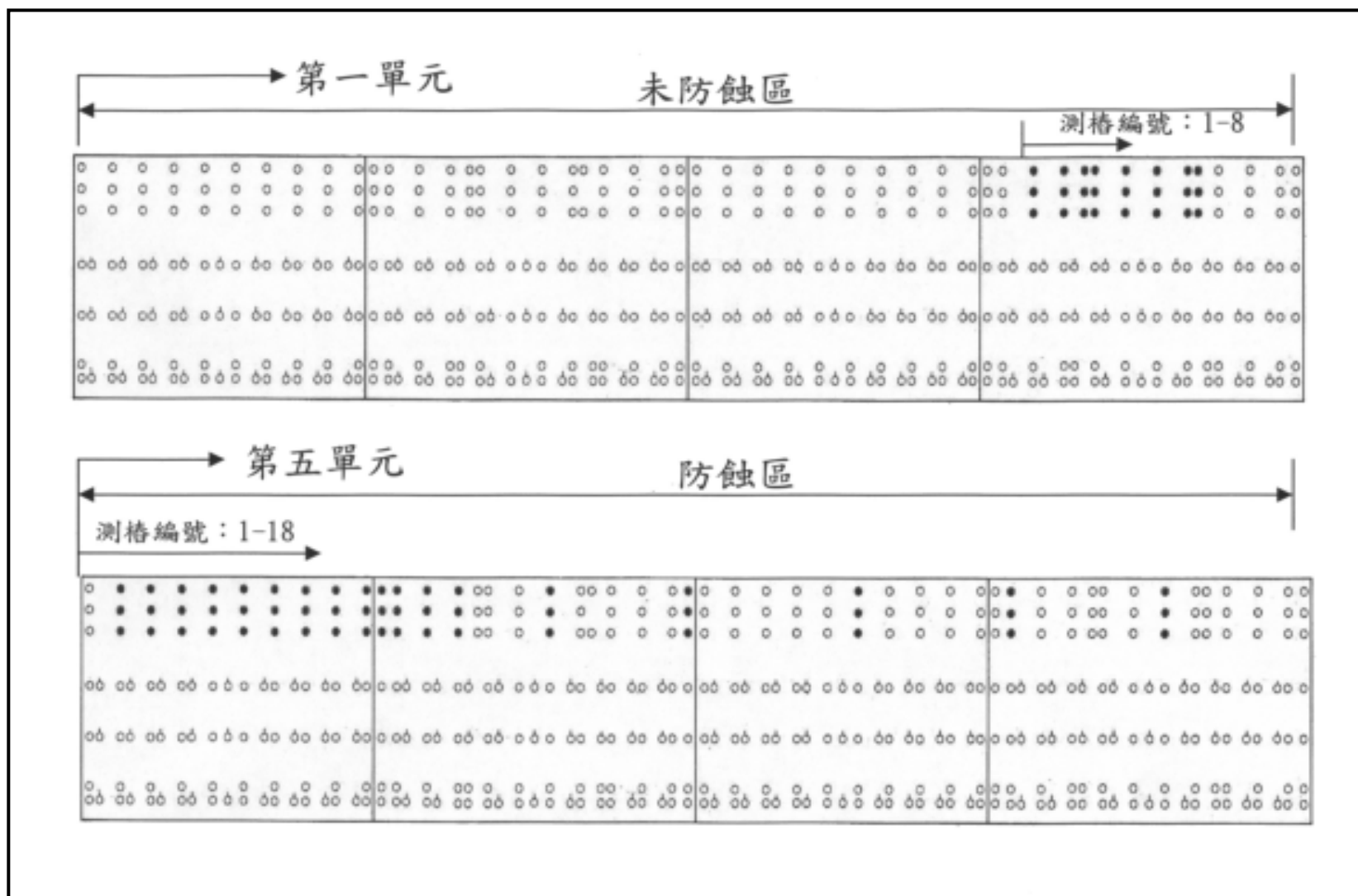


圖 3.77 基隆港東 10 號碼頭鋼板樁保護電位量測位置

表 3.18 基隆港東 10 號碼頭鋼板樁保護電位量測結果 1 (防蝕區)

1										2									
水 深	L 1			L 2			L 3			水 深	L 1			L 2			L 3		
m	A 面	B 面	C 面	A 面	B 面	C 面	A 面	B 面	C 面	m	A 面	B 面	C 面	A 面	B 面	C 面	A 面	B 面	C 面
-1	-1057	-1055	-1058	-1061	-1062	-1062	-1059	-1060	-1058	-1	-1058	-1058	-1058	-1057	-1056	-1056	-1061	-1061	-1061
-4	-1056	-1058	-1061	-1065	-1062	-1062	-1087	-1063	-1063	-4	-1066	-1061	-1059	-1059	-1058	-1057	-1062	-1063	-1066
-7	-1048	-1048	-1046	-1048	-1048	-1047	-1054	-1053	-1052	-7	-1066	-1059	-1057	-1068	-1064	-1062	-1057	-1056	-1057
3										4									
水 深	L 1			L 2			L 3			水 深	L 1			L 2			L 3		
m	A 面	B 面	C 面	A 面	B 面	C 面	A 面	B 面	C 面	m	A 面	B 面	C 面	A 面	B 面	C 面	A 面	B 面	C 面
-1	-1025	-1028	-1030	-1033	-1034	-1034	-1033	-1034	-1034	-1	-1030	-1030	-1028	-1032	-1034	-1034	-1037	-1037	-1037
-4	-1028	-1032	-1034	-1040	-1042	-1044	-1037	-1037	-1038	-4	-1032	-1032	-1031	-1039	-1039	-1039	-1038	-1038	-1038
-7	-1029	-1033	-1033	-1039	-1038	-1037	-1037	-1038	-1038	-7	-1030	-1029	-1027	-1036	-1036	-1035	-1038	-1037	-1037
5										6									
水 深	L 1			L 2			L 3			水 深	L 1			L 2			L 3		
m	A 面	B 面	C 面	A 面	B 面	C 面	A 面	B 面	C 面	m	A 面	B 面	C 面	A 面	B 面	C 面	A 面	B 面	C 面
-1	-1014	-1014	-1015	-1021	-1022	-1019	-1022	-1021	-1020	-1	-1027	-1028	-1028	-1026	-1026	-1028	-1038	-1055	-1049
-4	-1018	-1028	-1029	-1027	-1028	-1028	-1023	-1025	-1023	-4	-1030	-1034	-1035	-1026	-1026	-1026	-1034	-1027	-1027
-7	-1017	-1023	-1025	-1029	-1027	-1026	-1012	-1013	-1010	-7	-1029	-1028	-1026	-1025	-1029	-1031	-1024	-1026	-1024
7										8									
水 深	L 1			L 2			L 3			水 深	L 1			L 2			L 3		
m	A 面	B 面	C 面	A 面	B 面	C 面	A 面	B 面	C 面	m	A 面	B 面	C 面	A 面	B 面	C 面	A 面	B 面	C 面
-1	-1001	-1000	-1002	-1017	-1019	-1019	-1012	-1011	-1011	-1	-1009	-1009	-1009	-1009	-1009	-1008	-1008	-1008	-1008
-4	-1009	-1011	-1012	-1017	-1024	-1024	-1016	-1015	-1013	-4	-1017	-1013	-1011	-1014	-1013	-1012	-1013	-1012	-1011
-7	-1014	-1015	-1015	-1004	-1005	-1005	-995	-995	-996	-7	-1014	-1014	-1013	-1008	-1008	-1007	-1002	-1001	-1001
9										10									
水 深	L 1			L 2			L 3			水 深	L 1			L 2			L 3		
m	A 面	B 面	C 面	A 面	B 面	C 面	A 面	B 面	C 面	m	A 面	B 面	C 面	A 面	B 面	C 面	A 面	B 面	C 面
-1	-985	-987	-985	-993	-993	-993	-994	-994	-995	-1	-994	-994	-993	-998	-993	-994	-990	-990	-990
-4	-988	-989	-992	-1004	-1000	-997	-994	-994	-995	-4	-993	-995	-996	-995	-992	-992	-992	-992	-992
-7	-996	-979	-980	-995	-994	-995	-993	-992	-992	-7	-994	-994	-993	-991	-991	-991	-991	-992	-992

表 3.19 基隆港東 10 號碼頭鋼板樁保護電位量測結果 2 (防蝕區)

11										12									
水 深	L 1			L 2			L 3			水 深	L 1			L 2			L 3		
m	A 面	B 面	C 面	A 面	B 面	C 面	A 面	B 面	C 面	m	A 面	B 面	C 面	A 面	B 面	C 面	A 面	B 面	C 面
-1	-978	-970	-972	-979	-980	-981	-972	-972	-971	-1	-979	-979	-980	-977	-977	-976	-982	-982	-982
-4	-983	-976	-975	-980	-979	-978	-977	-980	-983	-4	-981	-984	-982	-978	-979	-979	-981	-980	-981
-7	-972	-970	-969	-978	-977	-977	-967	-969	-970	-7	-981	-980	-980	-980	-980	-980	-980	-980	-979
13										14									
水 深	L 1			L 2			L 3			水 深	L 1			L 2			L 3		
m	A 面	B 面	C 面	A 面	B 面	C 面	A 面	B 面	C 面	m	A 面	B 面	C 面	A 面	B 面	C 面	A 面	B 面	C 面
-1	-1001	-1000	-1002	-1017	-1019	-1019	-1012	-1011	-1011	-1	-1009	-1009	-1009	-1009	-1009	-1008	-1008	-1008	-1008
-4	-1009	-1011	-1012	-1017	-1024	-1024	-1016	-1015	-1013	-4	-1017	-1013	-1011	-1014	-1013	-1012	-1013	-1012	-1011
-7	-1014	-1015	-1015	-1004	-1005	-1005	-995	-995	-996	-7	-1014	-1014	-1013	-1008	-1008	-1007	-1002	-1001	-1001
15										16									
水 深	L 1			L 2			L 3			水 深	L 1			L 2			L 3		
m	A 面	B 面	C 面	A 面	B 面	C 面	A 面	B 面	C 面	m	A 面	B 面	C 面	A 面	B 面	C 面	A 面	B 面	C 面
-1	-985	-987	-985	-993	-993	-993	-994	-994	-995	-1	-994	-994	-993	-998	-993	-994	-990	-990	-990
-4	-988	-989	-992	-1004	-1000	-997	-994	-994	-995	-4	-993	-995	-996	-995	-992	-992	-992	-992	-992
-7	-996	-979	-980	-995	-994	-995	-993	-992	-992	-7	-994	-994	-993	-991	-991	-991	-991	-992	-992
17										18									
水 深	L 1			L 2			L 3			水 深	L 1			L 2			L 3		
m	A 面	B 面	C 面	A 面	B 面	C 面	A 面	B 面	C 面	m	A 面	B 面	C 面	A 面	B 面	C 面	A 面	B 面	C 面
-1	-978	-970	-972	-979	-980	-981	-972	-972	-971	-1	-979	-979	-980	-977	-977	-976	-982	-982	-982
-4	-983	-976	-975	-980	-979	-978	-977	-980	-983	-4	-981	-984	-982	-978	-979	-979	-981	-980	-981
-7	-972	-970	-969	-978	-977	-977	-967	-969	-970	-7	-981	-980	-980	-980	-980	-980	-980	-980	-979

表 3.20 基隆港東 10 號碼頭鋼板樁保護電位量測結果（未防蝕區）

1										2									
水深	L1			L2			L3			水深	L1			L2			L3		
m	A面	B面	C面	A面	B面	C面	A面	B面	C面	m	A面	B面	C面	A面	B面	C面	A面	B面	C面
-1	-656	-657	-648	-664	-655	-650	-710	-703	-721	-1	-688	-698	-671	-667	-658	-650	-660	-661	-664
-4	-671	-659	-651	-673	-664	-662	-686	-700	-676	-4	-687	-700	-676	-676	-670	-669	-668	-679	-664
-7	-659	-660	-624	-668	-669	-668	-683	-698	-680	-7	-687	-700	-674	-680	-672	-672	-675	-675	-673
3										4									
水深	L1			L2			L3			水深	L1			L2			L3		
m	A面	B面	C面	A面	B面	C面	A面	B面	C面	m	A面	B面	C面	A面	B面	C面	A面	B面	C面
-1	-681	-671	-665	-686	-681	-673	-685	-679	-673	-1	-673	-688	-662	-675	-668	-658	-672	-673	-672
-4	-682	-681	-684	-694	-688	-683	-697	-692	-688	-4	-687	-681	-676	-661	-674	-670	-675	-675	-670
-7	-692	-694	-689	-689	-683	-674	-701	-694	-694	-7	-673	-676	-679	-662	-677	-676	-672	-668	-669
5										6									
水深	L1			L2			L3			水深	L1			L2			L3		
m	A面	B面	C面	A面	B面	C面	A面	B面	C面	m	A面	B面	C面	A面	B面	C面	A面	B面	C面
-1	-688	-684	-681	-667	-669	-669	-695	-695	-696	-1	-707	-708	-708	-706	-706	-708	-718	-715	-709
-4	-719	-703	-699	-678	-675	-674	-698	-701	-709	-4	-710	-714	-715	-707	-706	-706	-714	-710	-707
-7	-710	-708	-705	-689	-690	-688	-705	-713	-710	-7	-719	-718	-718	-705	-709	-711	-714	-716	-714
7										8									
水深	L1			L2			L3			水深	L1			L2			L3		
m	A面	B面	C面	A面	B面	C面	A面	B面	C面	m	A面	B面	C面	A面	B面	C面	A面	B面	C面
-1	-701	-700	-698	-707	-709	-709	-712	-711	-711	-1	-709	-699	-699	-709	-712	-708	-718	-718	-716
-4	-709	-711	-712	-717	-714	-709	-716	-715	-713	-4	-707	-701	-711	-704	-713	-712	-713	-708	-711
-7	-714	-715	-715	-704	-705	-705	-698	-698	-696	-7	-714	-714	-713	-708	-708	-707	-712	-709	-711

3.3.4 陽極塊調查

陽極塊調查範圍包括安平港 3 號、4 號碼頭，台中港 99 號碼頭，台北港東 2 及東 3 碼頭，基隆港東 10 號碼頭；每港均檢測 15 支陽極塊，總計 60 支。

安平港 3 號、4 號碼頭於民國 80 年安裝犧牲陽極塊作為防蝕措施，陽極塊焊接於水深為 -2.0、-5.0 處鋼板樁之凸面，陽極塊尺寸為 $(190+230) \times 210 \times 1150$ cm，每支淨重約 134.98 公斤（不含鐵蕊重），共安裝 236 支。本次調查之 3 號碼頭自起點 0 m 及 160 m 兩處各取三支，共檢測 6 支陽極塊；4 號碼頭則自起點 0 m、80 m、160 m 三處，每處亦取三支，共檢測 9 支。

台中港 99 號碼頭於民國 84 年在全區之鋼管樁（包含預打區）安裝 1、2 支陽極塊，安裝水深為 -2.0 或 -3.0 公尺處及靠近海床部位，陽極塊分為 a 型（尺寸： $(225+265) \times 250 \times 650$ cm，安裝數量 556 支）、b 型（尺寸： $(190+230) \times 210 \times 1150$ cm，安裝數量 192 支）、c 型（尺寸： $(225+265) \times 250 \times 750$ cm，安裝數量 96 支）三種型式。自海側算起前四排（編號 ①、②、③、④）鋼管樁皆以 a 型陽極塊作為防蝕措施，每支陽極塊淨重約 101 公斤，本次調查選定碼頭第一單元第 6 排共 4 支鋼管樁（編號 ①、②、③、④）上之 7 支陽極塊及第二單元第 18 排樁共 4 支鋼管樁（編號 ①、②、③、④）上之 8 支陽極塊進行檢測。

台北港東 1、東 2 號碼頭鋼板樁陽極塊於民國 80 年安裝，陽極塊焊接於水深為 -2.0、-5.0 m 處鋼板樁之凸面，陽極塊尺寸為 $(190+230) \times 210 \times 1150$ cm，每支陽極塊淨重約 134.98 公斤（不含鐵蕊重）。

本次調查先由潛水人員於水下目視檢測，發現台北港東 1、東 2 號碼頭位於水深-2 m 之陽極塊，因運砂船隻碰撞等原因，陽極塊與鋼板樁焊接處之鐵蕊多處脫落，部份陽極塊並已掉落於海床上；由於碼頭原有水深僅約-6 m，因海岸漂砂及碼頭岸肩堆積之砂石部份掉落海

中，造成淤積，現有位於水深-5 m 處之陽極塊已全部遭淤沙埋沒，僅露出一部份於海床上，無法進行相關檢測項目。調查期間，東 1 號碼頭正停靠運砂船隻進行裝卸作業，為安全考量及配合現況，東 2 碼頭選定自起點約 160 m 處之 1 支完整陽極塊進行檢測，其餘改選東 3 號碼頭由起點起共 14 支陽極塊，東 3 號碼頭鋼板樁陽極塊於民國 90 年安裝，陽極塊焊接於水深為 -2.0、-3.0、-5.0、處鋼板樁之凸面，陽極塊尺寸為 $(225+265) \times 250 \times 650$ cm，每支陽極塊淨重約為 110 公斤（不含鐵蕊重）。

基隆港東 10 號碼頭原為鋼板樁碼頭，於民國 72 年竣工，因營運需要，民國 77 年起自原有碼頭岸線向海側延伸 20 公尺，採棧橋式鋼管樁結構，共分為 8 個單元，鋼管樁以七支為一排，並於民國 79 年完工。全區鋼管樁計有 4 個單元未採取任何防蝕措施，另 4 個單元則安裝犧牲陽極塊保護鋼管樁，每支鋼管樁於水深為 -2.0 及 -7.0 m（或 -4.5m）處安裝 2 支陽極塊，陽極塊尺寸為 $(190+230) \times 210 \times 1150$ cm，每支淨重約 134.98 公斤（不含鐵蕊重）。本次調查選定碼頭自碼頭第 6 單元，自起點約 143 m、146 m、149 m 三處，每處取靠海側前 3 支鋼管樁（L1 ~ L3），共 5 支陽極塊（L1：2 支、L2：2 支、L3：1 支），合計檢測 15 支。

3.3.4.1 陽極塊電位量測

1. 安平港 3 號、4 號碼頭

量測時，以高阻抗之數位電錶一端之探棒接觸於鋼板樁連結之不銹鋼電位測試棒上，另一端探棒則連接銅/硫酸銅電極，置於欲量測位置旁，量測位置選在陽極塊上中下三等份處。

安平港 3 號、4 號碼頭陽極塊發生電位量測結果示如表 3.21 及表 3.22。3 號碼頭陽極塊切割前發生電位最大值為 -1058 mV，最小值為 -1073 mV，焊接後最大值為 -1140 mV，最小值為 -1199 mV。

4 號碼頭切割前最大值為 -1012 mV，最小值為 -1063 mV，焊接

後最大值為 -1093 mV，最小值為 -1205 mV，均小於-850 mV，已達防蝕之目的。

表 3.21 安平港 3 號碼頭陽極塊發生電位量測結果

陽極塊編號	發生電位 (mV, vs. Cu/CuSO ₄ 電極)						備註
	切割前			焊接後			
	上	中	下	上	中	下	
#3-0-1	-1073	-1072	-1071	-1140	-1159	-1140	
#3-0-2	-1063	-1064	-1062	-1156	-1172	-1178	
#3-0-3	-1061	-1060	-1059	-1177	-1180	-1189	
#3-160-1	-1061	-1061	-1058	-1188	-1199	-1156	
#3-160-2	-1059	-1059	-1059	-1156	-1204	-1183	
#3-160-3	-1062	-1062	-1062	-1180	-1183	-1180	
最大發生電位	-1058			-1140			
最小發生電位	-1073			-1199			

表 3.22 安平港 4 號碼頭陽極塊發生電位量測結果

陽極塊編號	發生電位 (mV, vs. Cu/CuSO ₄ 電極)						備註
	切割前			焊接後			
	上	中	下	上	中	下	
#4-0-1	-1048	-1048	-1063	-1200	-1204	-1205	
#4-0-2	-1019	-1020	-1017	-1183	-1180	-1200	
#4-0-3	-1018	-1018	-1012	-1204	-1205	-1114	
#4-80-1	-1038	-1037	-1016	-1113	-1113	-1119	
#4-80-2	-1034	-1033	-1035	-1102	-1103	-1089	
#4-80-3	-1021	-1018	-1037	-1093	-1086	-1113	
#4-160-1	-1016	-1034	-1033	-1113	-1113	-1119	
#4-160-2	-1016	-1034	-1033	-1102	-1103	-1089	
#4-160-3	-1035	-1042	-1040	-1093	-1200	-1204	
最大發生電位	-1012			-1093			
最小發生電位	-1063			-1205			

2. 台中港 99 號碼頭

本座碼頭陽極塊發生電位量測結果如表 3.23，陽極塊切割前發生電位最大值為 -1008 mV ，最小值為 -1073 mV ，焊接後最大值為 -107 mV ，最小值為 -1205 mV ，均小於 -850 mV ，已達防蝕之目的。

表 3.23 台中港 99 號碼頭陽極塊發生電位量測結果

陽極塊編號	發生電位（mV，，vs. Cu/CuSO ₄ 電極）						備註
	切割前			焊接後			
	上	中	下	上	中	下	
6-1-B 上	-1073	-1072	-1071	-1120	-1136	-1140	
6-2-A 上	-1063	-1064	-1062	-1159	-1140	-1156	
6-2-B 上	-1061	-1060	-1059	-1172	-1178	-1177	
6-3-A 上	-1061	-1061	-1058	-1180	-1189	-1188	
6-3-B 上	-1059	-1059	-1059	-1199	-1156	-1156	
6-4-A 上	-1062	-1062	-1062	-1111	-1183	-1180	
18-1-A 上	-1048	-1048	-1063	-1200	-1204	-1205	
18-1-B 上	-1019	-1020	-1017	-1114	-1113	-1119	
18-2-A 上	-1018	-1018	-1012	-1102	-1103	-1089	
18-2-B 上	-1038	-1037	-1016	-1149	-1092	-1067	
18-3-A 上	-1034	-1033	-1035	-1086	-1072	-1081	
18-3-B 上	-1021	-1018	-1018	-1093	-1086	-1099	
18-4-A 上	-1023	-1022	-1022	-1143	-1156	-1156	
18-4-B 上	-1009	-1009	-1008	-1132	-1134	-1134	
6-1-B 上	-1012	-1010	-1009	-1185	-1183	-1189	
最大發生電位	-1008			-1067			
最小發生電位	-1073			-1205			

3. 台北港東 2 及東 3 碼頭

台北港東 2 及東 3 碼頭陽極塊發生電位量測結果如表 3.24，其中東 2 號碼頭陽極塊（編號 E2-1）切割前發生電位最大值為 -882 mV ，最小值為 -886 mV ，焊接後最大值為 -892 mV ，最小值為 -893 mV 。東 3 號碼頭陽極塊（編號 E3-1 E14）切割前發生電位最大值為 -1012 mV ，最小值為 -1063 mV ，焊接後最大值為 -1049 mV ，最小值為 -1106 mV ，均小於 -850 mV ，已達防蝕之目的。

表 3.24 台北港東 2、3 號碼頭陽極塊發生電位量測結果

陽極塊編號	發生電位 (mV, vs. Cu/CuSO ₄ 電極)						備註
	切割前			焊接後			
	上	中	下	上	下		
E2-1	-886	-886	-882	-892	-891	-893	
最大發生電位	-882			-892			
最小發生電位	-886			-893			
E3-1	-1033	-1032	-1033	-1080	-1089	-1088	
E3-2	-1032	-1032	-1032	-1049	-1056	-1056	
E3-3	-1023	-1022	-1022	-1080	-1089	-1088	
E3-4	-1062	-1062	-1062	-1099	-1106	-1106	
E3-5	-1019	-1020	-1017	-1081	-1083	-1080	
E3-6	-1045	-1045	-1063	-1090	-1094	-1095	
E3-7	-1017	-1021	-1017	-1084	-1083	-1089	
E3-8	-1016	-1018	-1020	-1082	-1083	-1089	
E3-9	-1028	-1027	-1026	-1069	-1062	-1067	
E3-10	-1014	-1013	-1015	-1086	-1072	-1081	
E3-11	-1019	-1020	-1020	-1093	-1086	-1099	
E3-12	-1013	-1012	-1012	-1083	-1086	-1086	
E3-13	-1019	-1019	-1018	-1092	-1104	-1104	
E3-14	-1017	-1019	-1019	-1085	-1083	-1089	
最大發生電位	-1012			-1049			
最小發生電位	-1063			-1106			

4. 基隆港東 10 號碼頭

本座碼頭陽極塊發生電位量測結果如表 3.25，陽極塊切割前發生電位最大值為 -1013 mV ，最小值為 -1037 mV ，焊接後最大值為 -1022 mV ，最小值為 -1089 mV ，均小於 -850 mV ，已達防蝕之目的。

表 3.25 基隆港東 10 號碼頭陽極塊發生電位量測結果

陽極塊編號	發生電位 (mV, vs. Cu/CuSO ₄ 電極)						備註
	切割前			焊接後			
	上	中	下	上	下		
E10-143.4-1	-1016	-1016	-1013	-1065	-1084	-1089	
E10-143.4-2	-1016	-1018	-1018	-1022	-1024	-1024	
E10-143.4-3	-1026	-1031	-1025	-1035	-1033	-1036	
E10-143.4-4	-1019	-1022	-1026	-1025	-1028	-1028	
E10-143.4-5	-1036	-1037	-1022	-1038	-1038	-1030	
E10-146.5-1	-1016	-1016	-1013	-1065	-1084	-1089	
E10-146.5-2	-1016	-1018	-1018	-1022	-1024	-1024	
E10-146.5-3	-1026	-1031	-1025	-1035	-1033	-1036	
E10-146.5-4	-1019	-1022	-1026	-1025	-1028	-1028	
E10-146.5-5	-1036	-1037	-1022	-1038	-1038	-1030	
E10-149.5-1	-1016	-1016	-1013	-1065	-1084	-1089	
E10-149.5-2	-1016	-1018	-1018	-1022	-1024	-1024	
E10-149.5-3	-1026	-1031	-1025	-1035	-1033	-1036	
E10-149.5-4	-1019	-1022	-1026	-1025	-1028	-1028	
E10-149.5-5	-1036	-1037	-1022	-1038	-1038	-1030	
最大發生電位	-1013			-1022			
最小發生電位	-1037			-1089			

3.3.4.2 陽極塊外觀檢查及重量量測

陽極塊於水中量測電位及電流後，由潛水人員於水中以乙炔將陽極塊上下兩處鐵芯切斷，由吊車吊至岸上，先觀察其外觀完整性及海生物附著情形，如有必要再量測各單元尺寸變化，再將附著之海生物與反應產物刮除乾淨後，量測其淨重並扣除鐵芯重即為陽極塊剩餘重量。調查完成後，再焊回原處。

1. 安平港 3 號、4 號碼頭

安平港 3 號碼頭共切割 6 支陽極塊，4 號碼頭共切割 9 支陽極塊。陽極塊表面均附著許多海生物，外觀呈紡錘狀，消耗程度已超過原有尺寸之一半以上，且表面發現有許多凹陷孔洞。孔洞最大直徑約 5 公分，並有中型之海生物，如螃蟹與小魚寄居其內。除去附著海生物後，表面反應產物明顯增多，反應產物主要為白色之氫氧化鋁 ($\text{Al}(\text{OH})_3$)，係鋁合金陽極塊因鋁之溶解後與海水中之氫氧離子 (OH^-) 作用所生成。表面在除去反應產物後，其外形呈不規則之狼牙棒狀。

陽極塊現有尺寸量取距兩端端點個 10 公分及中央三處周長。尺寸及重量量測結果如表 3.26 所示。陽極塊除去附著海生物後剩餘淨重(不含鐵蕊重量)僅約 25.6 ~ 71.2 kg (平均 47.9 kg)，消耗重量達 63.8 ~ 109.4 kg 左右 (平均 87.0 kg)，以安裝時間為民國 80 年至今計算，消耗速率為 4.9 ~ 8.4 kg/yr. (平均 6.7 kg/yr.)，陽極塊周長約介於 20 ~ 60 cm 間，與原有尺寸相較減少許多，圖 3.78 為 3 號碼頭陽極塊現場切割後置於陸上之情形。

4 號碼頭陽極塊量測結果如表 3.27 所示，剩餘淨重亦僅約 36.6 ~ 66.3 kg (平均 52.6 kg)，消耗重量達 68.6 ~ 98.4 kg 左右 (平均 82.4 kg)，以安裝時間為民國 80 年至今計算，消耗速率為 5.3 ~ 7.6 kg/yr. (平均約 6.3 kg/yr.)，陽極塊周長約介於 40 ~ 75 cm 間，與原有尺寸相較減少許多，但較 3 號碼頭略佳，圖 3.79 為 4 號碼頭陽極塊現場切割後置於陸上之情形。

兩座碼頭之陽極塊剩餘重量以目前消耗速率及考量陽極材料未完全消耗前即與鐵蕊脫落等因素，推估可再使用 7 年，達到二十年之設計年限。

2. 台中港 99 號碼頭

本座碼頭切割之 15 支陽極塊，其外觀仍相當完整但表面附著許多海生物，除去表面海生物及反應產物後，表面只有少處部份出現微小凹陷孔洞。尺寸及重量量測結果如表 3.28 所示，陽極塊除去附著海生物後剩餘淨重，約在 84.4 ~ 97.4 kg 間（平均 47.9 kg），消耗重量約為 3.7 ~ 11.7 kg 左右（平均 7.3 kg），安裝時間以民國 84 年至今計算，消耗率約為 2.8 ~ 3.5 kg/yr.（平均 1.0 kg/yr.），陽極塊周長均大於 90 cm 以上，比較原有周長，減少量不多。陽極塊剩餘重量以目前消耗速率，推估應可繼續保護鋼板樁至設計年限，圖 3.80 至圖 3.81 為本座碼頭之陽極塊現場切割後置於陸上之情形。

3. 台北港東 2 及東 3 碼頭

台北港東 2 碼頭切割 1 支陽極塊（編號：E2-1），其表面附著許多海生物，除去表面海生物及反應產物後，發現有多處凹陷約 1 ~ 2 公分之孔洞，陽極塊兩端成圓錐狀。尺寸及重量量測結果如表 3.29 所示，剩餘重量 80.8kg，消耗量達 54.2 kg，安裝時間以民國 84 年至今計算，消耗率為 6.0 kg/yr.，陽極塊周長約介於 61 ~ 73 cm 間。本座碼頭之陽極塊以目前剩餘重量及消耗速率推估可再使用約 12 年，可繼續保護鋼板樁至設計年限。本座碼頭其它之陽極塊，因船隻碰撞脫落或遭淤沙埋沒，已無法提供鋼板樁足夠之防蝕保護電位。

東 3 碼頭切割 14 支陽極塊（編號：E3-1 ~ E3-14），因使用時間僅約 2 年，外觀仍然相當完整，並無多大消耗。陽極塊尺寸及重量量測結果如表 3.29，剩餘重量約在 101.9 ~ 108.8 kg（平均 105.6 kg），消耗量僅約 1.2 ~ 8.1 kg 左右（平均 4.4 kg），本座碼頭使用至今僅約二年六個月，陽極塊消耗率約為 0.5 ~ 3.2 kg/yr.（平均 1.8 kg/yr.），

陽極塊周長均大於 100 cm，消耗程度極輕微。如陽極塊設計使用為二十年推估，可繼續保護鋼板樁至設計年限，圖 3.82 至圖 3.83 為兩座碼頭之陽極塊現場切割後置於陸上之情形。

4. 基隆港東 10 號碼頭

本座碼頭共切割三排鋼管樁之陽極塊，每排 5 支，共計 15 支。其外觀與類似於台北港東 2 號碼頭者。陽極塊除去表面之反應產物後，出現多處凹陷深度小於 1 公分之孔洞。陽極塊尺寸及重量量測結果如表 3.30，陽極塊剩餘重量約在 91.8 ~ 107.8 kg 間（平均 101.6 kg），消耗量約 271 ~ 43.2 kg 左右（平均 33.3 kg），如以安裝時間為民國 80 年至今計算，消耗速率約為 2.3 ~ 3.6 kg/yr. 左右（平均 2.8kg/yr.），陽極塊周長約 85 cm，減少量輕微。陽極塊以目前消耗速率推估，可繼續保護鋼管樁至設計年限，圖 3.84 至圖 3.85 為本座碼頭之陽極塊現場切割後置於陸上之情形。

表 3.26 安平港 3 號碼頭陽極塊尺寸及重量量測結果

編號	尺寸 (cm)				原有重量 (kg)	剩餘重量 (kg)	消耗重量 (kg)	消耗速率 (kg/yr.)
	上	中	下	平均				
#3-0-1	31	50	38	39.7	135.0	31.6	103.4	8.0
#3-0-2	40	58	47	48.3	135.0	49.9	85.0	6.5
#3-0-3	44	51	40	45.0	135.0	54.5	80.4	6.2
#3-160-1	50	63	46	53.0	135.0	71.2	63.8	4.9
#3-160-2	26	39	34	33.0	135.0	25.6	109.4	8.4
#3-160-3	49	59	51	53.0	135.0	54.7	80.2	6.2
最大值						71.2	109.4	8.4
最小值						25.6	63.8	4.9
平 均						47.9	87.0	6.7

表 3.27 安平港 4 號碼頭陽極塊尺寸及重量量測結果

編號	尺寸 (cm)				原有重量 (kg)	剩餘重量 (kg)	消耗重量 (kg)	消耗速率 (kg/yr.)
	上	中	下	平均				
#4-0-1	45	58	50	51.0	135.0	44.6	90.4	7.0
#4-0-2	50	60	55	55.0	135.0	48.5	86.5	6.7
#4-0-3	47	60	55	54.0	135.0	47.5	87.5	6.7
#4-80-1	56	70	60	62.0	135.0	56.9	78.1	6.0
#4-80-2	37	54	48	46.3	135.0	50.0	85.0	6.5
#4-80-3	49	63	52	54.7	135.0	59.8	75.2	5.8
#4-160-1	50	60	50	53.3	135.0	63.3	71.7	5.5
#4-160-2	54	63	53	56.7	135.0	66.3	68.6	5.3
#4-160-3	48	75	43	55.3	135.0	36.6	98.4	7.6
最大值						66.3	98.4	7.6
最小值						36.6	68.6	5.3
平 均						52.6	82.4	6.3

表 3.28 台中港 99 號碼頭陽極塊尺寸及重量量測結果

編號	尺寸 (cm)				原有重量 (kg) *	剩餘重量 (kg) **	消耗重量 (kg)	消耗速率 (kg/yr.)
	上	中	下	平均				
6-1-A 上	95	93	92	93.3	101.15	91.1	10.0	1.4
6-1-B 上	95	94	92	93.7	101.15	89.4	11.7	1.7
6-2-A 上	95	97	97	96.3	101.15	94.3	6.8	1.0
6-2-B 上	98	93	98	96.3	101.15	92.6	8.6	1.2
6-3-A 上	96	97	97	96.7	101.15	95.2	6.0	0.9
6-3-B 上	99	95	97	97.0	101.15	95.4	5.8	0.8
6-4-A 上	99	96	98	97.7	101.15	95.6	5.5	0.8
18-1-A 上	94	96	98	96.0	101.15	96.2	5.0	0.7
18-1-B 上	93	95	95	94.3	101.15	94.5	6.7	1.0
18-2-A 上	94	95	95	94.7	101.15	94.7	6.5	0.9
18-2-B 上	98	96	89	94.3	101.15	89.6	11.5	1.6
18-3-A 上	95	93	99	95.7	101.15	92.7	8.5	1.2
18-3-B 上	96	97	99	97.3	101.15	95.3	5.8	0.8
18-4-A 上	91	98	97	95.3	101.15	97.4	3.7	0.5
18-4-B 上	48	96	94	79.3	101.15	93.7	7.5	1.1
最大值						97.4	11.7	1.7
最小值						89.4	3.7	0.5
平 均						93.8	7.3	1.0

表 3.29 台北港東 2、東 3 號碼頭陽極塊尺寸及重量量測結果

編號	尺寸 (cm)				原有重量 (kg) *	剩餘重量 (kg) **	消耗重量 (kg)	消耗速率 (kg/yr.)
	上	中	下	平均				
E2-1	62	71	63	65.3	134.98	80.77	54.21	6.02
E3-1	100	101	100	100.3	110.00	101.95	8.05	3.22
E3-2	101	102	102	101.7	110.00	103.22	6.78	2.71
E3-3	101	103	100	101.3	110.00	103.76	6.24	2.50
E3-4	102	102	104	102.7	110.00	106.88	3.12	1.25
E3-5	103	103	100	102.0	110.00	105.42	4.58	1.83
E3-6	103	104	103	103.3	110.00	108.46	1.54	0.62
E3-7	102	103	100	101.7	110.00	105.03	4.97	1.99
E3-8	105	104	102	103.7	110.00	106.34	3.66	1.46
E3-9	102	103	103	102.7	110.00	102.60	7.40	2.96
E3-10	106	104	105	105.0	110.00	107.76	2.24	0.90
E3-11	102	103	102	102.3	110.00	107.64	2.36	0.94
E3-12	103	104	103	103.3	110.00	105.72	4.28	1.71
E3-13	103	104	103	103.3	110.00	108.84	1.16	0.46
E3-14	104	103	102	103.0	110.00	105.04	4.96	1.99
最大值						108.8	8.1	3.2
最小值						101.9	1.2	0.5
平 均						105.6	4.4	1.8

表 3.30 基隆港東 10 號碼頭陽極塊尺寸及重量量測結果

編號	尺寸 (cm)				原有重量 (kg) *	剩餘重量 (kg) **	消耗重量 (kg)	消耗速率 (kg/yr.)
	上	中	下	平均				
134.4-1	87	90	85	87.3	135.0	103.3	31.7	2.6
134.4-2	85	87	83	85.0	135.0	99.1	35.8	3.0
134.4-3	85	86	87	86.0	135.0	99.8	35.2	2.9
134.4-4	86	89	85	86.7	135.0	95.3	39.7	3.3
134.4-5	87	90	85	87.3	135.0	104.8	30.1	2.5
146.5-1	87	89	85	87.0	135.0	102.3	32.7	2.7
146.5-2	85	89	82	85.3	135.0	95.8	39.2	3.3
146.5-3	83	85	83	83.7	135.0	91.8	43.2	3.6
146.5-4	87	90	86	87.7	135.0	104.4	30.6	2.5
146.5-5	87	89	85	87.0	135.0	101.1	33.9	2.8
149.5-1	88	92	87	89.0	135.0	107.8	27.1	2.3
149.5-2	90	91	86	89.0	135.0	106.1	28.9	2.4
149.5-3	87	90	85	87.3	135.0	104.1	30.9	2.6
149.5-4	86	89	85	86.7	135.0	102.7	32.3	2.7
149.5-5	87	90	85	87.3	135.0	106.1	28.9	2.4
最大值						107.8	43.2	3.6
最小值						91.8	27.1	2.3
平 均						101.6	33.3	2.8

3.3.4.3 陽極塊輸出電流量測

本次調查每一港口各檢測 15 塊陽極塊，輸出電流量測係以電流計為之，量測位置選在陽極塊上下兩處。

1. 安平港 3 號、4 號碼頭

3 號碼頭輸出電流量測結果列於表 3.31：陽極塊表面海生物清除前瞬間最大值 0.4 安培，最小值為 0.1 安培，平均為 0.23 安培；海生物清除後瞬間最大值 0.5 安培，最小值為 0.25 安培，平均為 0.45 安培。4 號碼頭輸出電流量測結果列於表 3.32：陽極塊表面海生物清除前瞬間最大值 0.3 安培，最小值為 0.1 安培，平均為 0.21 安培；海生物清除後瞬間最大值 0.5 安培，最小值為 0.25 安培，平均為 0.46 安培。

由於陽極塊消耗速率與輸出電流有相對應關係，發生有與陽極塊等量直徑有關，一般設計陽極塊之型式時，為避免陽極塊消耗太快或設計斷面過於龐大，造成施工不便，均希望瞬間電流不應太大。

表 3.31 安平港 3 號碼頭陽極塊輸出電流量測結果

陽極塊編號	輸出電流（安培，A）				備註
	切割前		焊接後		
	上	下	上	下	
#3-0-1	0.30	0.00	0.50	0.00	
#3-0-2	0.20	0.00	0.40	0.00	
#3-0-3	0.10	0.00	0.50	0.00	
#3-160-1	0.10	0.00	0.30	0.00	
#3-160-2	0.40	0.00	0.50	0.00	
#3-160-3	0.25	0.00	0.50	0.00	
輸出電流最大值	0.40		0.50		
輸出電流最小值	0.10		0.25		
平均輸出電流	0.23		0.45		

表 3.32 安平港 4 號碼頭陽極塊輸出電流量測結果

陽極塊編號	輸出電流（安培，A）				備註
	切割前		焊接後		
	上	下	上	下	
#4-0-1	0.00	0.20	0.00	0.25	
#4-0-2	0.20	0.00	0.25	0.00	
#4-0-3	0.30	0.00	0.60	0.00	
#4-80-1	0.00	0.10	0.00	0.80	
#4-80-2	0.20	0.00	0.30	0.00	
#4-80-3	0.20	0.00	0.30	0.00	
#4-160-1	0.30	0.00	0.35	0.00	
#4-160-2	0.20	0.00	0.80	0.00	
#4-160-3	0.20	0.00	0.50	0.00	
輸出電流最大值	0.30		0.80		
輸出電流最小值	0.10		0.25		
平均輸出電流	0.21		0.46		

2. 台中港 99 號碼頭

本座碼頭之陽極塊輸出電流量測結果列於表 4.33：陽極塊表面海生物清除前瞬間最大值 0.5 安培，最小值為 0.1 安培，平均為 0.256 安培，海生物清除後瞬間最大值 0.8 安培，最小值為 0.3 安培，平均為 0.46 安培。

表 3.33 台中港 99 號碼頭陽極塊輸出電流量測結果

陽極塊編號	輸出電流（安培，A）				備註
	切割前		焊接後		
	上	下	上	下	
6-1-A 上	0.10	0.10	0.30	0.00	
6-1-B 上	0.00	0.10	0.00	0.30	
6-2-A 上	0.10	0.00	0.50	0.00	
6-2-B 上	0.10	0.00	0.50	0.00	
6-3-A 上	0.40	0.00	0.40	0.00	
6-3-B 上	0.30	0.00	0.40	0.00	
6-4-A 上	0.10	0.00	0.30	0.00	
18-1-A 上	0.20	0.09	0.30	0.00	
18-1-B 上	0.30	0.00	0.60	0.00	
18-2-A 上	0.00	0.10	0.50	0.00	
18-2-B 上	0.20	0.00	0.50	0.00	
18-3-A 上	0.20	0.10	0.60	0.00	
18-3-B 上	0.30	0.00	0.40	0.00	
18-4-A 上	0.20	0.30	0.80	0.00	
18-4-B 上	0.10	0.30	0.50	0.00	
輸出電流最大值	0.50		0.8		陽極塊上下合計
輸出電流最小值	0.10		0.3		
平均輸出電流	0.25		0.46		

3. 台北港東 2、東 3 號碼頭

台北港東 2、東 3 號碼頭之陽極塊輸出電流量測結果列於表 3.34。
東 2 號碼頭陽極塊表面海生物清除前約 0.1 安培，海生物清除後約 0.3 安培。

東 3 號碼頭陽極塊表面海生物清除前瞬間最大值 0.6 安培，最小值為 0.1 安培，平均為 0.14 安培，海生物清除後瞬間最大值 0.7 安培，最小值為 0.18 安培，平均為 0.37 安培。

表 3.34 台北港東 2、東 3 號碼頭陽極塊輸出電流量測結果

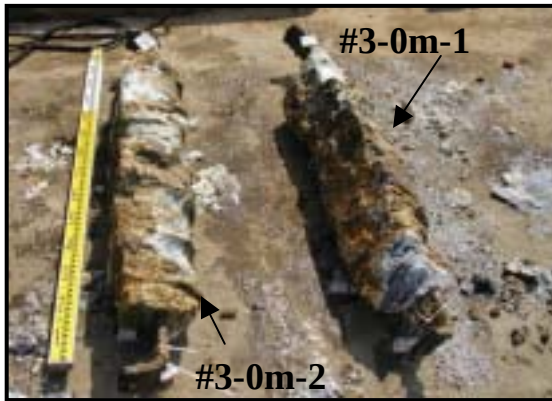
陽極塊編號	輸出電流（安培，A）				備註
	切割前		焊接後		
	上	下	上	下	
E2-1	0.00	0.10	0.30	0.00	
E3-1	0.00	0.10	0.00	0.30	
E3-2	0.10	0.00	0.10	0.20	
E3-3	0.10	0.00	0.50	0.00	
E3-4	0.10	0.00	0.30	0.00	
E3-5	0.10	0.00	0.18	0.00	
E3-6	0.10	0.00	0.25	0.00	
E3-7	0.00	0.10	0.20	0.00	
E3-8	0.00	0.10	0.35	0.00	
E3-9	0.00	0.10	0.00	0.30	
E3-10	0.20	0.00	0.50	0.00	
E3-11	0.20	0.00	0.50	0.00	
E3-12	0.10	0.00	0.30	0.00	
E3-13	0.30	0.00	0.70	0.00	
E3-14	0.20	0.00	0.50	0.00	
輸出電流最大值	0.6		0.70		陽極塊上下合計
輸出電流最小值	0.10		0.18		
平均輸出電流	0.14		0.37		

4. 基隆港東 10 號碼頭

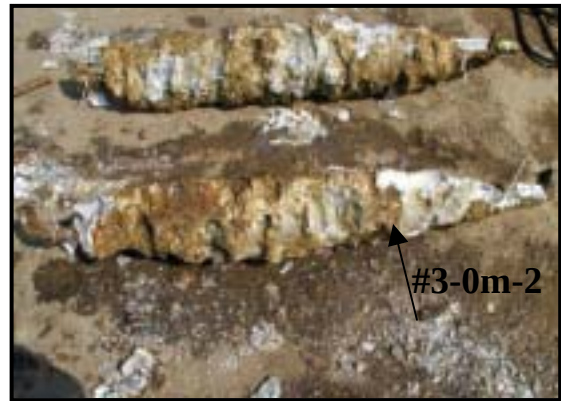
本座碼頭之陽極塊輸出電流量測結果列於表 3.36：陽極塊表面海生物清除前瞬間最大值 0.56 安培，最小值為 0.12 安培，平均為 0.29 安培，海生物清除後瞬間最大值 1.0 安培，最小值為 0.3 安培，平均為 0.65 安培。

表 3.35 基隆港東 10 號碼頭陽極塊輸出電流量測結果

陽極塊編號	輸出電流（安培，A）				備註
	切割前		焊接後		
	上	下	上	下	
E10-143.4-1	0.28	0.10	1.00	0.00	
E10-143.4-2	0.21	0.00	0.20	0.30	
E10-143.4-3	0.32	0.00	0.61	0.00	
E10-143.4-4	0.25	0.00	0.30	0.00	
E10-143.4-5	0.12	0.00	0.40	0.00	
E10-146.5-1	0.29	0.00	0.82	0.00	
E10-146.5-2	0.25	0.00	0.54	0.00	
E10-146.5-3	0.26	0.00	0.67	0.00	
E10-146.5-4	0.46	0.10	0.90	0.00	
E10-146.5-5	0.39	0.00	0.79	0.00	
E10-149.5-1	0.25	0.00	0.61	0.00	
E10-149.5-2	0.35	0.10	0.89	0.00	
E10-149.5-3	0.15	0.00	0.48	0.00	
E10-149.5-4	0.20	0.00	0.80	0.00	
E10-149.5-5	0.20	0.00	0.00	0.50	
輸出電流最大值	0.56		1.0		陽極塊上下合計
輸出電流最小值	0.12		0.3		
平均輸出電流	0.29		0.65		



編號#3-0m-1，海生物清除前



編號#3-0m-2，海生物清除前



編號#3-0m-3，海生物清除後



編號#3-160m-1，海生物清除前



編號#3-160m-1 3，海生物清除前



編號#3-160m-1，海生物清除前

圖 3.78 安平港 3 號碼頭之陽極塊現場切割後之情形



編號#4-0m-1，海生物清除中



編號#4-0m-2，海生物清除前



編號#4-0m-3，海生物清除前



#4-80m 處，海生物清除前



編號#4-80m-1，海生物清除前



編號#4-80m-1，海生物清除後

圖 3.79 安平港 4 號碼頭之陽極塊現場切割後之情形 (1)



編號#4-80m-all, 海生物清除前



編號#4-80m-all, 海生物清除前



編號#4-80m-all, 海生物清除前



編號#4-80m-all, 海生物清除前



編號#4-80m-all, 海生物清除前



編號#4-80m-all, 海生物清除前

圖 3.80 安平港 4 號碼頭之陽極塊現場切割後之情形 (2)



編號 6-1A，海生物清除前



編號 6-1B，海生物清除前



編號 6-2A，海生物清除前



編號 6-2B，海生物清除前



編號 6-3A，海生物清除前



編號 6-3B，海生物清除前



編號 6-4A，海生物清除前

圖 3.81 台中港 99 號碼頭之陽極塊現場切割後之情形 (1)



編號 18-1A, 海生物清除後



編號 18-1B, 海生物清除後



編號 18-2A, 海生物清除後



編號 18-2B, 海生物清除後



編號 18-3A, 海生物清除後



編號 18-3B, 海生物清除前



編號 18-4A, 海生物清除前



編號 18-4B, 海生物清除後

圖 3.82 台中港 99 號碼頭之陽極塊現場切割後之情形 (2)



編號 E2-1，海生物清除前



編號 E2-1，海生物清除後



編號 E3-1，海生物清除前



編號 E3-2，海生物清除前



編號 E3-3，海生物清除前



編號 E3-4，海生物清除前



編號 E3-5，海生物清除前



編號 E3-6，海生物清除前

圖 3.83 台北港碼頭之陽極塊現場切割後之情形 (1)



編號 E3-7, 海生物清除前



編號 E3-8, 海生物清除前



編號 E3-9, 海生物清除前



編號 E3-10, 海生物清除前



編號 E3-11, 海生物清除前



編號 E3-12, 海生物清除前



編號 E3-13, 海生物清除前



編號 E3-14, 海生物清除前

圖 3.84 台北港號碼碼頭之陽極塊現場切割後之情形 (2)



東 10 號碼頭，海生物清除前



編號 143-1，海生物清除後



編號 143-2，海生物清除後



編號 143-3，海生物清除後



編號 143-4，海生物清除後



編號 143-5，海生物清除後



編號 146-1，海生物清除後



編號 146-2，海生物清除後

圖 3.85 基隆港東 10 號碼頭之陽極塊現場切割後之情形 (1)



編號 146-3，海生物清除後



編號 146-4，海生物清除後



編號 146-5，海生物清除後



編號 149-1，海生物清除後



編號 149-2，海生物清除後



編號 149-3，海生物清除後



編號 149-4，海生物清除後



編號 149-5，海生物清除後

圖 3.86 基隆港東 10 號碼頭之陽極塊現場切割後之情形 (2)

3.4 結論與建議

3.4.1 結論

1. 本次調查之碼頭，除基隆港東 10 號碼頭部份外，鋼板（管）樁均採用犧牲陽極塊作為防蝕措施，目視檢測及鋼板（管）樁現有厚度與保護電位量測結果顯示，陽極塊可達到對鋼板（管）樁防蝕保護之目的。

2. 鋼板（管）樁腐蝕速率均小於設計允許值，但基隆港東 10 號碼頭未採用防蝕措施部份與台北港東 2 號碼頭因陽極塊脫落或遭淤砂埋沒，腐蝕速率較高。台北港東 3 號碼頭鋼板樁使用時間不足三年，其減少厚度多介於 0.2 ~ 0.3 mm 間，腐蝕程度尚屬合理範圍。

3. 陽極塊發生電位與輸出電流量測結果顯示，陽極塊可達到保護鋼板（管）樁防蝕之目的。陽極塊發生電位及輸出電流，以安平港 3 號 4 號碼頭最大，基隆港東 10 號碼頭及台中港 99 號碼頭次之，台北港東 3 號最小。

4. 陽極塊依調查時之剩餘重量及消耗速率推估，均可使用至二十年之設計年限。

5. 台中港 99 號碼頭及台北港東 2 號碼頭之潮汐帶防蝕措施，發現部份固定框及螺栓有鬆脫現象，降低防蝕成效。

3.4.2 建議

1. 台北港東 1、東 2 號碼頭鋼板樁陽極塊多數脫落或遭淤砂埋沒，應速重新安裝。

2. 台中港 99 號碼頭及基隆港東 10 號碼頭防蝕區，靠陸側海床部位之陽極塊下方鐵蕊，發現部份與鋼管樁脫落；台中港 99 號碼頭及

台北港東 1、東 2 號碼頭潮汐帶部份防蝕措施鬆脫，應速檢修以期發揮防蝕效益。

3. 基隆港東 10 號碼頭未防蝕區應速採用犧牲陽極法作為鋼管樁防蝕措施。

4. 為確保碼頭安全與正常營運，鋼板（管）樁應定期實施檢測及進行維護工作。

第四章 港灣構造物陰極防蝕準則(草案)訂定研究

4.1 前 言

港灣構造物主要之建造材料為鋼鐵、混凝土及其他材料。在海洋環境下不論是浸泡於海水或濱海陸上之結構物，由於受到海水的浸泡或海風中挾帶含量高之鹽份之侵入，鋼構造物容易發生銹蝕，鋼筋混凝土構造物亦因內部鋼筋腐蝕造成體積膨脹開裂，導致混凝土材料的劣化，表面剝落、塌陷、終致損壞。如何有效降低或阻止鋼筋腐蝕，進而提升結構物之使用年限，乃為當今亟需克服之問題。西元 1973 年美國聯邦公路總署(FHWA)，經過多年的試驗與研究，公開宣佈陰極防蝕為解決鋼筋混凝土橋樑腐蝕唯一有效的方法。綜觀在國內工程案例中，甚少採用，推究其原因乃國內並無一套完善的規範可供遵循。雖然國外規範可全然引進，但是地域、環境等因素不同，並無法完全適用於本土。為此，本所(港研中心)已於民國 90 年度，完成「港灣構造物陰極防蝕準則草案-(鋼筋混凝土部份)」之訂定^[21]。

至於海水環境下，陰極防蝕更為大家公認對鋼材最為有效之防蝕工法，在國外使用已有百年歷史之久。台灣地區之鋼板(管)樁碼頭已使用近四五十年，從各港務局歷年來之檢修記錄，以及港研中心對五港區之調查發現，部份港口之鋼板樁碼頭在興建之初即未做陰極防蝕，因此，有些鋼板樁之腐蝕早已相當嚴重，並曾發生碼頭結構嚴重損壞案例，對港區營運與安全威脅甚巨，此問題必需予於重視與解決。有鑑於已完成之「港灣構造物陰極防蝕準則草案」，對「鋼構造物」部份之防蝕仍未制訂相關規範，無法提供各界遵循採用，甚為遺憾。

為因應工程實務之需求與防蝕準則之完整性，本年(92 年)度特在原來完成之準則草案內容中增訂「鋼構造物」部份之陰極防蝕，期望彙整專家學者、業界與港務局等單位，集思廣義共同制定一套適合本土港灣鋼構造物防蝕之準則與施工規範，並對已完成之鋼筋混凝土部

份之草案內容缺失進行檢討修正，以利日後維護、管理或新建工程在防蝕設計上之依據。本研究計畫所研擬完成之準則草案內容，鑑於篇幅所限，將另行印製出版。

4.2 陰極防蝕規範之回顧

陰極防蝕技術在國外已有百餘年之研究及應用經驗。早在 1823 年英國曾進行軍方船艦外殼之陰極防蝕工作，至今，此技術已廣泛應用於地下儲運設備(如管線、儲槽)、海域鑽油平台、港灣碼頭鋼板管樁結構、鋼筋混凝土結構、石化廠冷卻器、熱交換器等設施。

近年來，美、日、歐洲等先進國家所制訂對港灣鋼構造物陰極保護之參考手冊、準則、規範等^[22,23,24,25,26]，相關資訊甚為齊全特簡列於表 4.1 可供參考引用。此外，1998 年 6 月，美國材料試驗學會(American Society for Testing and Materials, ASTM) G-1 委員會，亦開始著手制訂海洋結構物與船舶之陰極保護設計規範，迄今仍在進行中。

表 4.1 各國陰極防蝕規範^[22,23,24,25,26]

規範準則名稱	制訂單位	發行國別	最後出版日期
港灣鋼構造物防蝕、補修手冊(改訂版)	日本沿岸開發技術研究中心	日本	1997 年 4 月
港灣構造物的維持、補修手冊	日本沿岸開發技術研究中心	日本	1999 年 6 月
BSI-BS 7361 Cathodic Protection, Part1. Code of practice for land and marine applications	British Standard	英國	1991 年
BS EN 13174 Cathodic protection of harbour installations	British & European Standards	英國	2001 年
EN 13173 Cathodic protection for steel offshore floating structures	European Standards	英國	2001 年

EN 12474 Cathodic protection of submarine pipelines	European Standards	英國	2001 年
DNV RP-B401 Cathodic Protection Design	Det norske Veritas	挪威	1993 年
DIN 30676 Design and application of cathodic protection of external surfaces	German Institute for Standardization	德國	1985 年 10 月
NORSOK Standard M-503 Cathodic protection	Norwegian Technology Standards Institution	挪威	1997 年 9 月
NACE-RP0169 Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping Systems	NACE International	美國	2002 年
NACE- RP0176 Corrosion Control of Steel Fixed Offshore Platforms Associated with Petroleum Production	NACE International	美國	1994 年
NACE-RP0387 Metallurgical and Inspection Requirements for Cast Sacrificial Anodes for Offshore Applications	NACE International	美國	1999 年
NACE-RP0492 Metallurgical and Inspection Requirements for Offshore Pipeline Bracelet Anodes	NACE International	美國	1999 年
NACE-RP0286 The Electrical Isolation of Cathodically Protected Pipelines	NACE International	美國	2002 年
NACE-RP0572 Design, Installation, Operation, and Maintenance of Impressed Current Deep Groundbeds	NACE International	美國	1995 年
NACE- TM0101 Measurement Techniques Related to Criteria for Cathodic Protection	NACE International	美國	2001 年

on Underground or Submerged Metallic Tank Systems			
US Army TM 5-811-7 Electrical Design, Cathodic Protection	Departments of the Army	美國	1985 年 4 月
US Navy NAVFAC- MO-307 Corrosion Control	Naval Facilities Engineering Command	美國	1992 年
陰極防蝕工程手冊	化學工業出版社	中國大陸	1998 年

上述表 4.1 中之各國規範內容中，僅將海洋鋼構造物陰極防蝕所需之防蝕電位、防蝕電流密度、犧牲陽極有效電位、有效電流量與其消耗量進行比較，彙整摘錄於表 4.2^[27]。

表 4.2 各國規範內容彙整與比較

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

表 4.2 各國規範內容彙整與比較(續)

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

表 4.2 各國規範內容彙整與比較(續)

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)																																														
電位、 有效電流量及消耗量						海水中		清淨海水中		海水中																																														
		<table><tr><th colspan="2">特 性</th><th colspan="2">Al-Zn-In</th><th colspan="2">純鋅、鋅合金</th></tr><tr><td colspan="2">比重</td><td colspan="2">2.6 ~ 2.8</td><td colspan="2">7.14</td></tr><tr><td colspan="2">開路陽極電壓 (V vs. SCE)</td><td colspan="2">1.08</td><td colspan="2">1.03</td></tr><tr><td colspan="2">對鐵的有效電壓 (V)</td><td colspan="2">0.25</td><td colspan="2">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 colspan="2">0.82</td></tr><tr><td>海水中 1 mA/cm²</td><td>電流效率 (%) 實際發生電量 (A·h/g) 消耗量 (kg/A·y)</td><td>80 2.30 3.8</td><td>90 2.60 3.4</td><td colspan="2">95 0.78 11.8</td></tr><tr><td>土中 0.03 mA/cm²</td><td>電流效率 (%) 實際發生電量 (A·h/g)</td><td colspan="2">65* 1.86*</td><td colspan="2">65 0.53</td></tr></table> * 依陽極組成成份而有所變異		特 性		Al-Zn-In		純鋅、鋅合金		比重		2.6 ~ 2.8		7.14		開路陽極電壓 (V vs. SCE)		1.08		1.03		對鐵的有效電壓 (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 (%) 實際發生電量 (A·h/g) 消耗量 (kg/A·y)	80 2.30 3.8	90 2.60 3.4	95 0.78 11.8		土中 0.03 mA/cm ²	電流效率 (%) 實際發生電量 (A·h/g)	65* 1.86*		65 0.53		陽極材料		陽極電位 (V)	有效電量 (A·h/kg)	陽極材料	陽極電位 Volts	消耗量 kg/A·y	陽極材料	陽極電位 Volts	有效電量 A·h/kg	消耗量 kg/A·y
		特 性		Al-Zn-In		純鋅、鋅合金																																																		
		比重		2.6 ~ 2.8		7.14																																																		
		開路陽極電壓 (V vs. SCE)		1.08		1.03																																																		
		對鐵的有效電壓 (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 (%) 實際發生電量 (A·h/g) 消耗量 (kg/A·y)	80 2.30 3.8	90 2.60 3.4	95 0.78 11.8																																																		
		土中 0.03 mA/cm ²	電流效率 (%) 實際發生電量 (A·h/g)	65* 1.86*		65 0.53																																																		
		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	Al-Zn-In	~ -1.05	~ 2840	~3.1																																														
陽極電位 (vs. Ag/AgCl [sw])				Zn-Hg	-1.05	12	Al-Zn-Sn	-1.05	2290	3.8																																														
海土中				Al-Zn	-0.97	4 ~ 8	Al-Zn-Sn	~ -1.10	~ 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	-1.0	930	9.5																																														
Al-Base		-0.95	無規定	Al-Zn-Hg	-1.05	約 3.5	Al-Zn-Sn	~ -1.05	~ 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								Mg(H-l Alloy)	~ -1.05	~ 820	~ 10.7																																													
陽極形狀		陽極 利用率																																																						
Long slender Stand-off		0.90																																																						
Long ¹ flush-mounted		0.85																																																						
Short ² flush-mounted		0.80																																																						
Bracelet half-shell type		0.80																																																						
Bracelet Segmented type		0.75																																																						
1)陽極長度≥ 4 x 厚度																																																								
2)陽極長度< 4 x 厚度																																																								

4.3 港灣鋼構物之陰極防蝕

海水(洋)環境下，陰極防蝕為鋼鐵材料最佳之防蝕選擇。陰極防蝕的方法，可以採用犧牲陽極式、外加電流式或兩者兼具之組合。港口碼頭設施，早期多採用外加電流式，但1980年迄今，由於犧牲陽極不斷開發且防蝕性能提高，目前各國多採用犧牲陽極式；但在水質變化較大的河口或是水流流速較大的區域，仍宜考慮選用外加電流式的保護系統。

4.3.1 外加電流式

本法乃是利用一外部直流電源器來提供陰極與陽極之間的電位差。陽極接於直流電源器之「+」端，而被保護體(金屬)則接於直流電源器的「-」端。以碼頭鋼板(管)樁防蝕為例說明，電流從陽極經過介質(海水)到達鋼板(管)樁表面，然後再經導線回到電源器，如此鋼板(管)樁便受到保護，簡明之防蝕示意如圖4.1所示。在電源容易獲得的地方，整流器通常被應用至將交流(AC)電源轉換成直流(DC)電源，以提供防蝕所需之電流。然而在較偏遠的地區，汽油或柴油發電機，甚至太陽能電池則為外加電流的來源。

4.3.2 犧牲陽極式

本法乃是將電位較負之金屬(如鎂、鋁、鋅等)當為陽極，與被保護體於介質(如土壤、水、混凝土等)中聯結，形成一電化學電池，以碼頭鋼板(管)樁為例，其防蝕示意如圖 4.2 所示；由於異類金屬相互接觸時，活性較大之金屬(視為陽極)，會在電化學電池反應中被消耗，而較鈍性的鋼板管樁(視為陰極)，則會被保護。

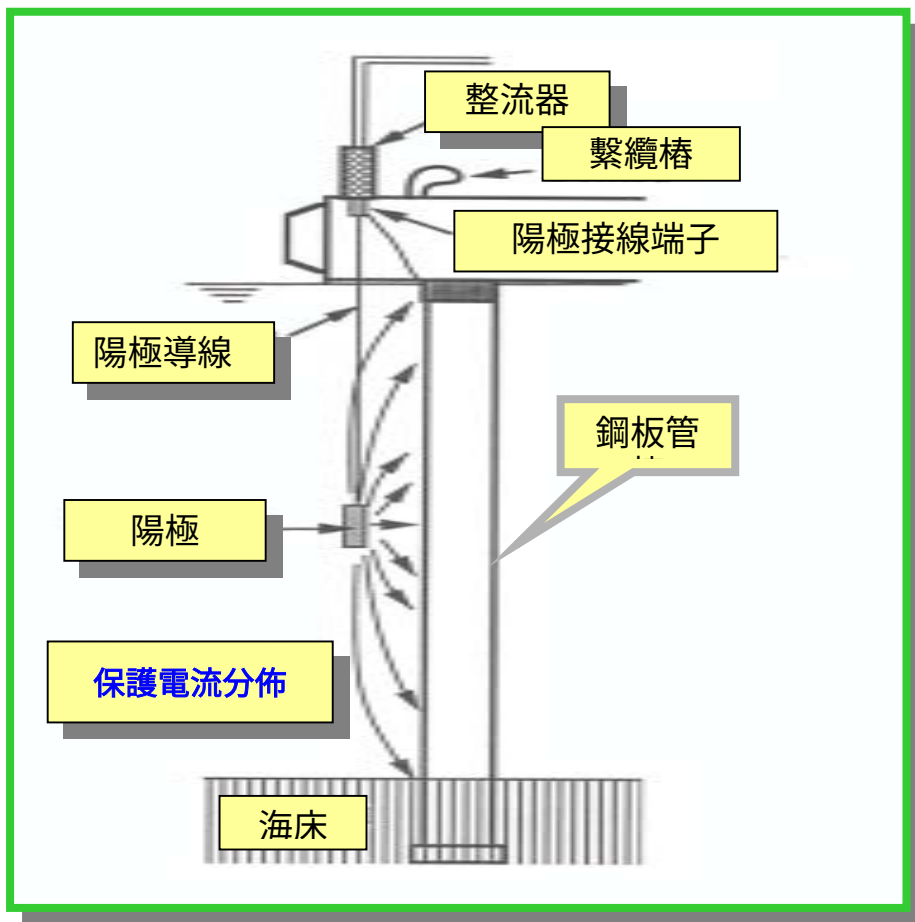


圖 4.1 碼頭鋼板(管)樁施加外加電流式防蝕之簡示圖

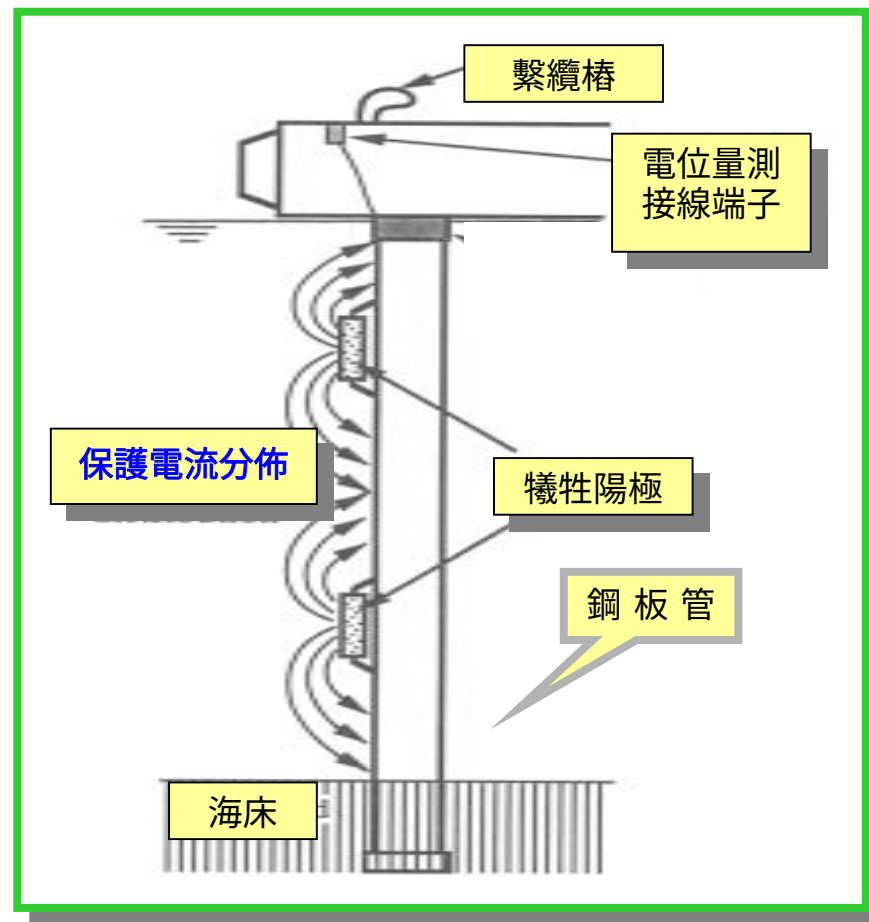


圖 4.2 碼頭鋼板(管)樁施加犧牲陽極式防蝕之簡示圖

4.3.3 陰極防蝕之設計

4.3.3.1 犧牲陽極式之設計

犧牲陽極式之陰極防蝕設計，其相關參數之考量如下；

1.保護面積計算

港灣設施保護面積包括海水中與海土中面積。海水中長度計算，依據日本沿岸開發技術研究中心之「港灣鋼構造物防蝕 補修手冊(改訂版)」^[27]之定義(圖 4.3 所示)，如下：

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

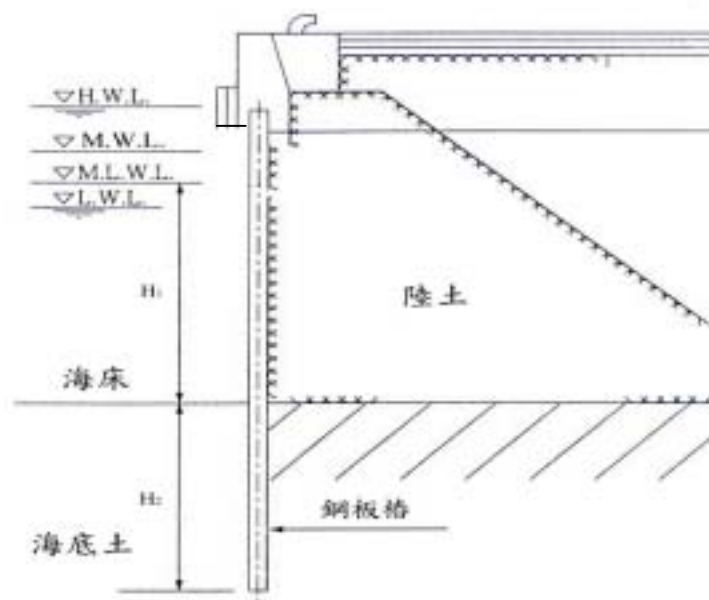


圖 4.3 海水中鋼樁長度計算示意圖

如鋼樁的型式不同，其計算保護面積分別如下：

A. 鋼板樁 型式

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

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

A_{s1} ：海水中面積(m^2)， A_{s2} ：海土中面積(m^2)

H_1 ：海水中長度(m)， H_2 ：海土中長度(m)

n ：鋼板樁周邊係數， L ：鋼板樁沿法線之長度(m)

B. 鋼管樁 型式

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

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

A_{p1} ：鋼管樁海水中面積(m^2)， A_{p2} ：鋼管樁海土中面積(m^2)

H_1 ：海水中長度(m)， H_2 ：海土中長度(m)

N ：鋼管樁支數， D ：鋼管樁直徑(m)

2. 所需防蝕電流計算^[7]

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

I ：所需防蝕總電流(mA)

i_i ：各環境採用之防蝕電流密度(mA/m^2)

A_i ：海水中及海土中之保護面積(m^2)

海水的化學成份 溶氧量或 pH 值會受到河川或其他排放水之影響，因此，在水質變化較大或硫化物濃度較高的海域，使用陰極防蝕工法須注意防蝕電流密度選用。在厭氧性硫酸還原菌存在的環境

裏，因硫化物的影響，鋼鐵結構物會產生局部腐蝕，在此條件下，應增加防蝕設計電流密度。此外，海水中裸鋼所需的保護電流密度會隨時間的增加而下降，最終趨於一定值，此時之電流密度稱為穩定電流密度。根據國外研究指出，穩定的保護電流密度約為初期防蝕電流密度之 50 %。

3. 犧牲陽極發生電流量計算

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

I_g ：每塊犧牲陽極的發生電流(mA)

E ：有效電位差(V)

R_a ：犧牲陽極對海水的電阻(Ω)

R_a 之計算，依據犧牲陽極的形狀而定，其值如下：

(1)長條棒狀陽極；與被保護結構物表面距離 ≥ 30 cm，且

a. $L \geq 4r$ 時

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

b. $L < 4r$ 時

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

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(或等效半徑)，cm

若陽極非圓柱體，則陽極等效半徑 r

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

A ：陽極的斷面面積(cm^2)

(2)板狀陽極

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

R_a ：犧牲陽極對海水的電阻(Ω)

ρ ：海水比電阻($\Omega \cdot \text{cm}$)

C ：陽極長度與寬度的平均值(cm)

(3)其他形狀之陽極

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

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)

4.犧牲陽極(塊)數量計算

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

N_i ：所需犧牲陽極的塊數

i_i ：各環境採用之防蝕電流密度(mA/m^2)

A_i ：海水中及海土中之保護面積(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

$$N = (\sum N_i) \times (1 + \text{餘裕係數}), \text{ 餘裕係數為 } 10\% \sim 20\%$$

5.陽極(塊)壽命計算

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

L：陽極(塊)使用壽命(年,y)

N：所需陽極總塊數

W：每塊陽極原始重量(kg)

E：陽極消耗量($k_g/A \cdot y$)

I_{avg} ：保護期間所需平均保護電流(A)；通常為極化總電流之 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，鋤式陽極為 0.75 ~ 0.80，其他形狀為 0.75 ~ 0.90

6.犧牲陽極配置考量

犧牲陽極應均勻的佈置於被保護結構設施上，且應低於平均低潮位下 30 cm。對鋼板樁而言，每 2~8 個板樁為一單位，配置均勻。對鋼管樁而言，每支樁須裝置一塊以上，但無法安裝陽極塊時不在此限，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。

4.3.3.2 外加電流陰極保護之設計

外加電流式之陰極保護設計，其步驟概述於下：

1.保護面積計算

海水中與海土中面積之計算、參照 4.3.3.1 節內容之規定。

2.防蝕電流計算

陽極的發生電流量可由陽極產品性能資料獲得。依各部位的保護面積與初始保護電流密度計算陰極保護系統所需的保護電流，並乘以

一個裕餘係數做為電流總需求量。1997 年日本之「港灣鋼構造物防蝕、補修手冊(改訂版)」，裕餘係數建議為原計算保護電流之 10~20%^[27]，1998 年中國大陸「陰極防蝕工程手冊」，建議為 25~50%^[28]。

3.單一整流器設計輸出電壓計算

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

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 $\times$ 陽極對海水電阻)(V)

E_c ：被保護結構物電壓降(V)，(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)，(海水中 $e \sim 2.0$ V)

4.整流器之電壓容量

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

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

式中， E_{out} ：單一整流器設計輸出電壓(V)

E ：單一整流器輸出最低電壓(V)

x ：餘裕係數，為 10% ~ 20%。

4.4 陰極防蝕系統使用材料及設備需求

4.4.1 犧牲陽極材料

犧牲陽極藉伽凡尼(Galvanic)作用，使陽極之金屬離子釋出，產生電荷來供應(保護)結構物，因此陽極材料之消耗，在陰極防蝕過程中是

必然的。週期性的檢查、替換犧牲陽極，更是達成長期防蝕效果必須執行的工作。陽極材料的選擇，在電化學特性上需具有：

- (1)具有相當的活性，且穩定之金屬材料。
- (2)不會鈍化，放電時極化小，溶解均勻，反應產物易脫落。
- (3)必須具有較高的電流效率。
- (4)腐蝕產物無毒性，不污染環境。

鎂、鋅、鋁等金屬或合金在工程上常被應用為犧牲陽極的材料。其中鎂具有高活性低極化之特性，其合金常被應用於土壤或純水等介質比電阻較高的環境中。在天然海水中，由於鎂陽極會造成過度保護、低電氣效率和較短的使用年限等缺點，因此較少使用。鋅具有理想適中的腐蝕電位和低極化、高電氣效率等優點，可應用於海洋環境中。近年來，鋁及其合金亦被研發適用於海水環境之犧牲陽極材料。由於純鋁金屬表面易形成一層金屬薄膜，會使腐蝕電位往正值方向進行，並且產生過度的極化，因此常在鋁合金中添加微量的鋅、汞、銻等元素以保持其活性，使鋁合金電位更負且電流效率更高。再者由於鋁具低密度、高電子價數的特性，每單位質量的發生電流最大，有優越的經濟性，目前各國港灣鋼構造物之陰極防蝕多採用鋁合金陽極。

犧牲陽極的防蝕效果取決於陽極材料的發生電流量($A \cdot h/g$)，而發生電流量又可分為理論與實際發生電流量，當實際發生電流量與理論發生電流量的比值愈大時，表示其電流效率良好。理論發生電流量是以庫倫定律計算推導，而實際發生電量的量測可參照 CNS 13521「陰極防蝕用犧牲陽極性能檢驗法」^[29]。國內所使用的鋁合金陽極塊，其電氣特性如表 4.3 所示，國外之犧牲陽極材料電氣性能之資料則彙整於表 4.2。

表 4.3 國產鋁合金陽極材料之電氣特性

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

4.4.2 外加電流式之陽極材料

外加電流式所使用的陽極材料與犧牲陽極式不同，並依環境而異。根據日本「港灣鋼構造物防蝕、補修手冊(改訂版)」之建議，在淡水環境中多使用白金系或鐵系材料，在海水環境中則使用白金系或鉛系；主要原因乃是因鉛系電極在海水中不易消耗，但在淡水中消耗速率極快，而鐵系的電極在海水中則會有不均勻的消耗。外加電流式陽極材料之工作電流密度與消耗率依材料組成及廠商產品而異，表 4.4 為摘自日本「港灣鋼構造物防蝕、補修手冊(改訂版)」內容^[27]。

表 4.4 外加電流式陽極材料性能(日製產品)

種 類	消耗率 kg/A·y	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	~ 1.0	10 ~ 30	8	8 ~ 11
氧化鐵	0.005 ~ 0.06	<120	<120	<60
碳鋼	~ 9.1	無限制	無限制	5
鈦為基材外覆金屬氧化物	0.06	600		

4.4.3 參考電極

參考電極應選擇在環境變化的情況下，能維持穩定量測狀態的電極。氯化銀參考電極有兩種，若電極中的電解液為海水者，是謂海水氯化銀(Ag/AgCl/seawater)參考電極；若電解液為飽和 KCl 溶液，則為飽和氯化銀(Ag/AgCl/sat'd KCl)參考電極。海水中使用的參考電極為海水氯化銀電極與飽和甘汞電極(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)。各種參考電極的電位換算如表 4.5 所示。

表 4.5 各類型參考電極之電位換算

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

4.4.4 整流器

外加電流式陰極保護系統，現地若有 AC 供電電源，則應提供單相 110/220 volt 或三相 220/480 volt 的電壓，且交流頻率為 60 Hz。整流器的總輸出電流值和電壓量應滿足陰極防蝕系統所須的電流量；且整流器運轉時，必須可在最大輸出的情況下持續操作。此外，整流器之 AC 側須加裝避雷保護裝置，而 DC 側則須加裝漣波濾波器。有鑑於陰極防蝕系統接線錯誤將會造成鋼構造物的嚴重腐蝕，因此，整流器正負端應指定並採用不同尺寸的接線端子，以防止接線錯誤。端子應清晰標示「+陽極」和「-鋼構造物」。

4.4.5 導線

所有導線應為銅質導體，蕊線以絕緣包覆，並以顏色和編號區別，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，進出導管的線路最終須由接線箱連接。

4.4.6 數位伏特計

陰極保護系統之防蝕效果須使用數位伏特計與參考電極來量測鋼鐵結構物之電位。使用的數位伏特計(DVM)，輸入阻抗值至少為 1 Mega-ohm，解析度至少為 1 mV。

4.5 陰極防蝕安裝標準程序

4.5.1 犧牲陽極式之安裝

犧牲陽極可採用水中鉚接法或螺栓固定法安裝。施工步驟如下：

1.材料檢查

施工前須進行材料數量確認，尺寸、質量之抽樣檢查。

2.安裝位置標記

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

3.固定位置電位測試端子配置

沿碼頭法線方向以 50 m ~ 100 m 間隔，設置一電位測試端子。

4.電位測試導線安裝

將導線銲接至鋼構造物上，並在銲接處加以密封防水。

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放至設計水深，以水中銲接方式將陽極固定於鋼鐵結構物上。銲接前須將銲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。

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，量測方式如圖 4.4 所示。

4.5.2 外加電流式之安裝

外加電流式陰極保護，其施工步驟如下；

1.材料檢查

施工前須進行材料數量確認，尺寸、質量之抽樣檢查。

2.鋼結構電連通改善

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

3.固定位置電位測試端子配置

沿碼頭法線方向以 50 m ~ 100 m 間隔，設置一電位測試端子。

4.陽極安裝

陽極之安裝如圖 4.5 所示。陽極與被保護體間距離至少相距 1.5 m 以上；當間距離增加，雖然保護電位可均勻分布，但會造成電纜

壓降的增加，且容易對相鄰結構體產生雜散電流(stray current)干擾。

5.負極排流及電位測試導線安裝

依照圖面設計位置，將負極排流及電位測試導線銲接於鋼鐵結構物上，並在銲接處加以密封防水。

6.整流器安裝

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

7.導線安裝

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

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，量測鋼結構電位變化方向，以確定 DC 輸出的正確極性。

9.完工檢查

完工時，除了對工程紀錄照片等進行檢查外，亦須進行結構物的防蝕電位量測，確認被保護結構物防蝕電位值是否為-800 mV (vs. Ag/AgCl/seawater)或更”負”。

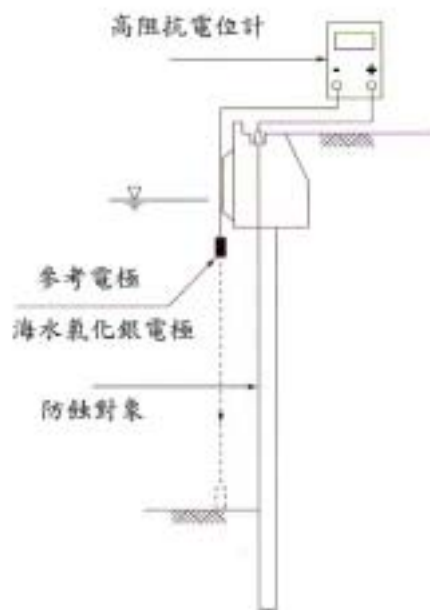


圖 4.4 電位量測示意圖

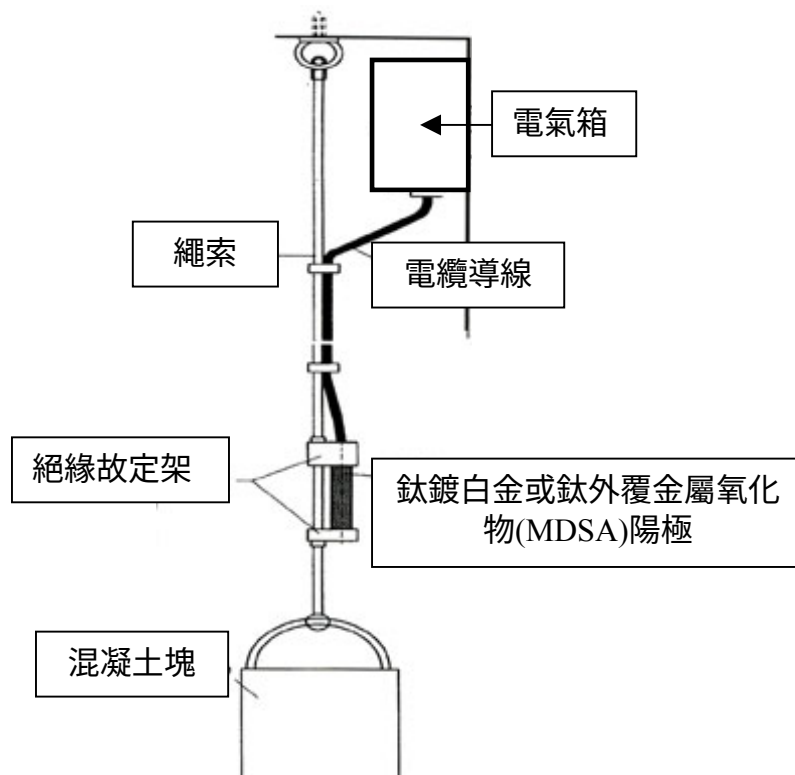


圖 4.5 外加電流式之安裝示意圖

4.6 陰極防蝕驗收標準程序

4.6.1 陰極防蝕保護標準

西元 1992 年，美國 NACE 修訂陰極保護電位標準(Standard RP-0169-92)^[30]如下：

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

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

近年來國內外多採用修訂後之 Standard RP-0169-92 作為陰極防蝕設計及驗收規範，凡符合三項標準之一者，均視為達到陰極保護之效果。2002 年，修訂後之 Standard RP-0169-02 之陰極保護標準與 Standard RP-0169-92 相同，但內容僅增加了陰極保護設計與施工之注意事項。

表 4.6 為鋼構造物在海水中利用不同參考電極量測時之標準防蝕電位。在含氧(aerobic)的環境中，以海水氯化銀參考電極量測，防蝕電位值須達到-800 mV 以下；而在厭氧(anaerobic)環境中(如海底泥中)，防蝕電位須達到-900 mV 以下，但最大防蝕電位不宜超過-1100 mV，如表 4.7 所示。至於塗裝被覆之鋼鐵結構物，防蝕電位應控制在-800 mV ~ -1100 mV 之間，主要原因是為避免過大的保護電流導致塗膜劣化或剝離。

表 4.6 海水中鋼構造物之防蝕保護電位標準

防蝕電位	參考電極
-780 mV	飽和甘汞電極
-800 mV	海水氯化銀電極
-750 mV	飽和氯化銀電極
-850 mV	飽和硫酸銅電極

表 4.7 含氧/厭氧環境之防蝕電位標準(以 Ag/AgCl 海水用電極量測)

環境狀況	最小防蝕電位	最大防蝕電位
含氧	-800	-1100
厭氧	-900	-1100

4.7 陰極防蝕系統之操作與維護管理

4.7.1 系統操作

港灣鋼構造物犧牲陽極式陰極保護系統在犧牲陽極塊安裝後必須定期進行結構物的防蝕電位量測；但針對外加電流式陰極保護系統，安裝後必須進行運轉前系統確認與通電測試，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%^[31]，使用伏特計組合參考電極，量測鋼結構電位變化方向，以確定 DC 輸出的正確極性。

4.7.2 系統維護管理

1. 書面資料保存

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。

2.維護管理

維護管理分為一般檢查與詳細檢查。一般檢查的項目為電位量測；詳細檢查為目視檢測、電位量測與陽極塊消耗之調查。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。詳細檢查簡述如下：

- (1)目視檢測：派遣潛水夫，利用近距離目視檢查，注意結構物與犧牲陽極塊是否有任何損壞、腐蝕或變化等之相關位置及其程度。
- (2)電位量測：鋼板樁以 20%以上之檢測率為目標，沿碼頭法線方向每 3 m ~ 5 m 進行電位量測。棧橋式碼頭則以前排之鋼管樁為檢測對象，依序為縱向深度方向之鋼管樁。
- (3)犧牲陽極(塊)調查：針對陽極安裝情形與陽極消耗量等相關事項進行調查。陽極安裝情形係指陽極安裝數量的確認，陽極消耗量則是選擇陽極數量之 5 % ~10 %進行調查，由潛水夫水下量測陽極尺寸，或切除陽極蕊心移至陸地上秤重，計算陽極消耗量及剩餘使用年限。計算方法如下：

A.依據剩餘陽極塊形狀尺寸(如圖 4.6 所示)之計算法：

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

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

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

C.陽極壽命計算

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

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

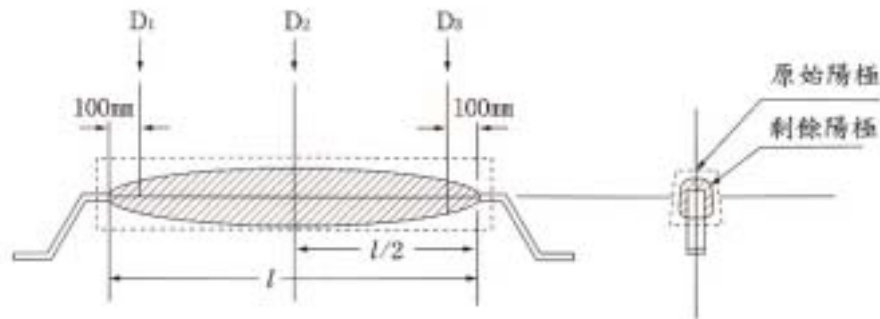


圖 4.6 剩餘陽極形狀尺寸計算

3.防蝕效能評估

依據電位量測及陽極調查結果進行陰極防蝕效能評估，如防蝕保護電位-800 mV (vs. Ag/AgCl/seawater) 以下或更”負”，則被保護結構物維持防蝕狀況；若電位在-800 mV 以上或更”正”時，則其部份保護不足現象，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。

4.8 國內外防蝕工程實際案例介紹

案例一：日本 A 港，水深-10.0 m 之鋼板樁碼頭陰極防蝕^[32]

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 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：海水中 100 mA/m²，海土中 20 mA/m²。

(4)防蝕方式：犧牲陽極法。

(5)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 ± 2%，淨重：102.3 kg ± 2%。

(4)電流量：30.3 A·y。

(5)初期發生電流：3.0 A/塊。

(6)耐用年數：20 年。

7.陽極數量

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

(2)以 3 個水深配置(如圖 4.7 所示), 分別為-2.0 m, -4.5 m, -7.0 m 處,
配置個數如下：

水深-2.0 m 計 46 塊

水深-4.5 m 計 33 塊

水深-7.0 m 計 46 塊

合計 125 塊

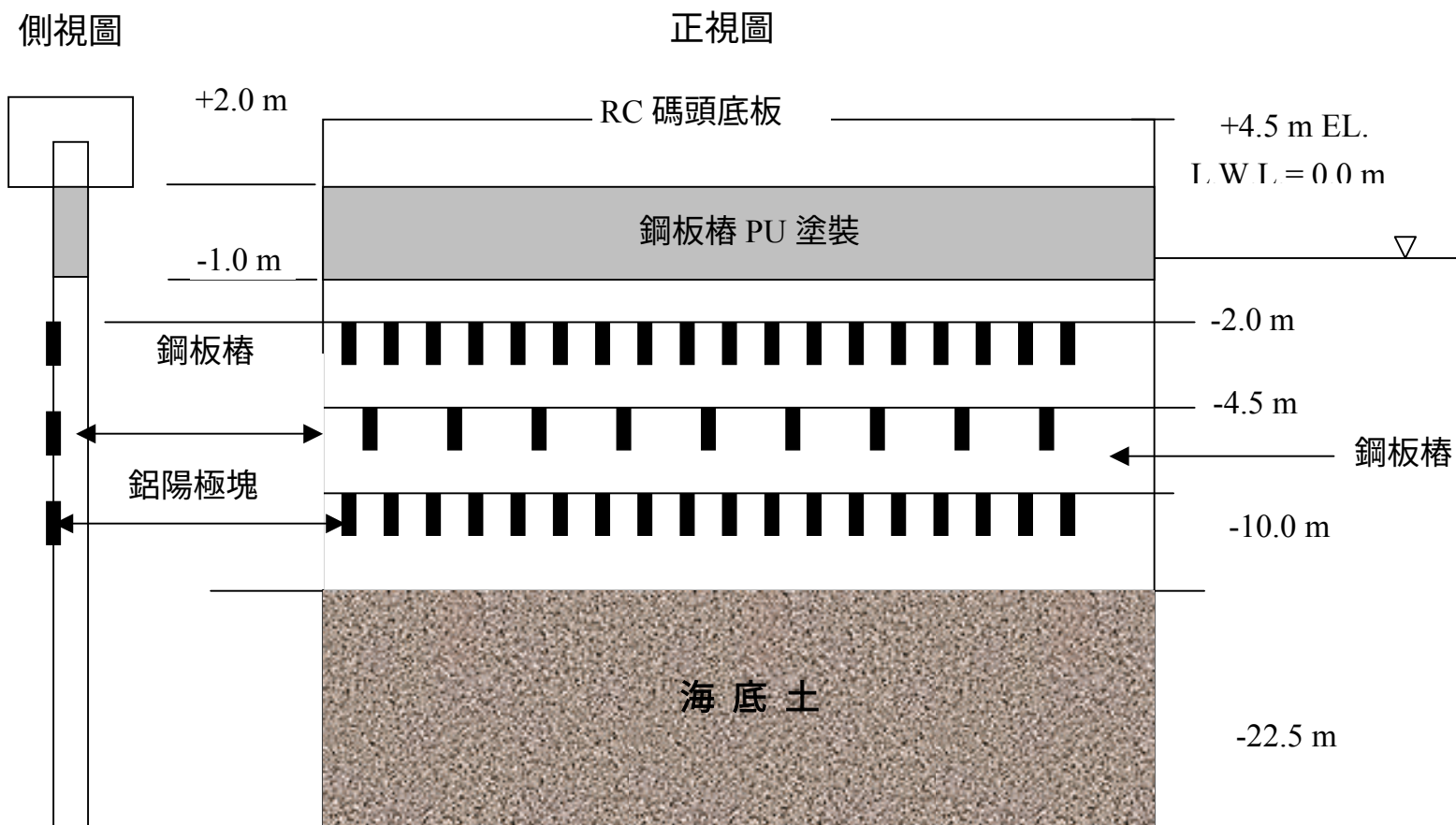


圖 4.7 鋼板樁犧牲陽極配置示意圖

案例二：日本 B 港，水深-13.0 m 之鋼管樁棧橋碼頭陰極防蝕^[32]

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 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；碼頭共分為 10 區，每區 15 支總共 150 支鋼管樁。
- (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)防蝕方式：犧牲陽極法。

(5)防蝕設計年限：20 年。

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

4.防蝕面積

(1)被保護結構物共分 10 區，其中每一區之防蝕面積
海水中：

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

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

第三列鋼管樁： $0.9 \text{ m} \times \pi \times 6.0 \text{ m} \times 5 \text{ 支} = 84.8 \text{ m}^2$

合計= 381.6 m^2

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

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

合計= 142.8 m^2

石礫中：

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

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

海底土中：

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

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

第三列鋼管樁： $0.9 \text{ m} \times \pi \times 23.5 \text{ m} \times 5 \text{ 支} = 332.2 \text{ m}^2$

合計= 869.4 m^2

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

(2)防蝕總面積(10 區)

鋼管樁：

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

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

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

$$\text{合計} = 12934.0 \text{ m}^2$$

鋼板樁：

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

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

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

$$\text{合計} = 6698.0 \text{ m}^2$$

5.所需防蝕總電流

(1)被保護結構物共分 10 區，其中每一區所需之防蝕電流

鋼管樁：

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

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

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

$$\text{合計} = 78.5 \text{ A}$$

鋼板樁：

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

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

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

$$\text{合計} = 35.6 \text{ A}$$

(2)所需之防蝕總電流(10 區)

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

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

$$\text{合計} = 1141.0 \text{ A}$$

6.陽極選用

- (1)陽極材料：鋁合金陽極。
- (2)尺寸： $(130 + 175) \times 150 \times 1990$ mm。
- (3)含蕊心重量：130.0 kg + 2%，淨重：122.1 kg + 2%。
- (4)電流量：36.2 A·y。
- (5)初期發生電流：3.5 A/塊。
- (6)耐用年數：20 年。

7.陽極數量

- (1)每區間需要數量

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

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

- (2)總共需要數量

鋼管樁= 23 塊 $\times 10 = 230$ 塊

鋼板樁= 10 塊 $\times 10 = 100$ 塊

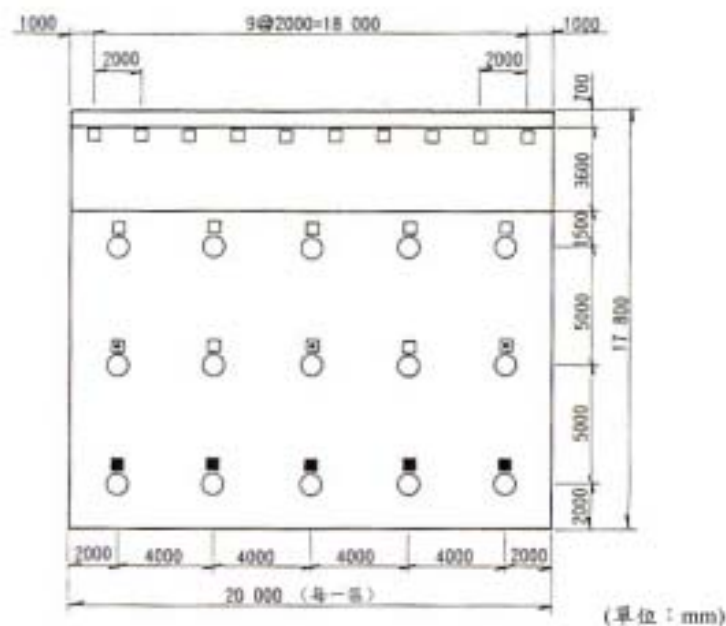
合計= 330 塊

- (3)每一區以 3 個水深配置(如圖 4.8 所示)，分別為-2.0 m，-6.0 m，-9.0 m 處，其配置個數如下表 4.8。

表 4.8 水深與陽極配置數量

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

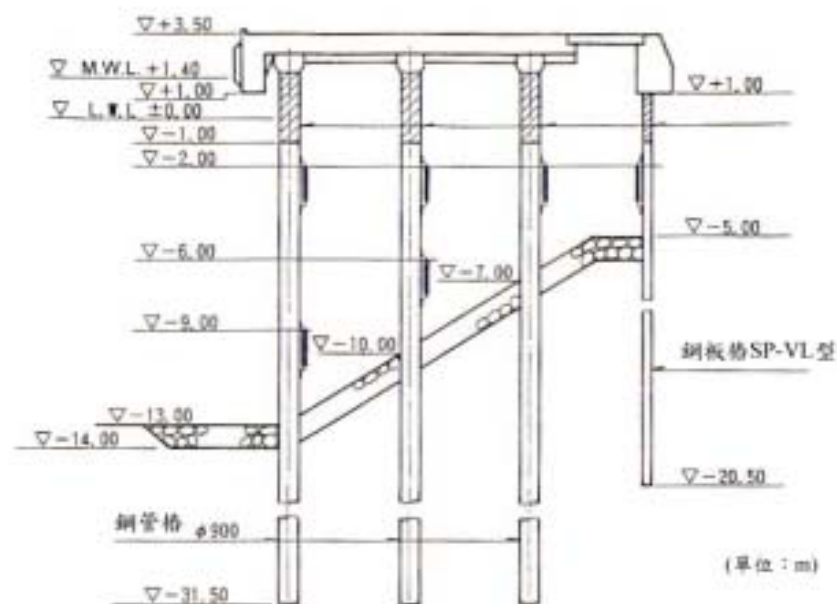
陽極安裝配置圖



陽極配置數量表

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

犧牲陽極安裝位置



電位量測裝置配置圖 (單位: mm)

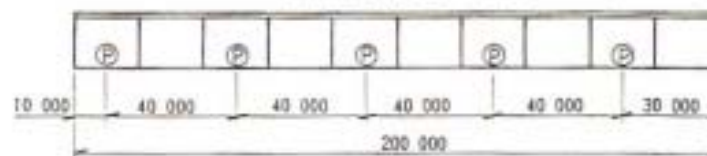


圖 4.8 鋼管(板)樁犧牲陽極配置示意圖

案例三、國內某港口鋼板樁碼頭之陰極防蝕

1.岸壁構造及環境

表 4.9 鋼板樁岸壁構造與浸漬環境之基本資料

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

2.設計條件

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

3.防蝕面積

以碼頭岸壁長度 2.065 m 為一單位，每單位內包含 HZ 775 與 ZH 12 鋼板樁各一支，每單位鋼板樁寬度為 2.26m(HZ 775 型 0.99m+ZH 12 型 1.27 m)。

則每單位寬度(2.065 m)之鋼板樁，在不同浸漬環境下，所需之

防蝕面積如表 4.10。

所需之防蝕面積 = 鋼板樁所在環境長度× 每單位鋼板樁寬度

表 4.10 所需要之防蝕保護面積

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

4. 所需防蝕電流=防蝕電流密度 x 防蝕面積

所需之防蝕電流如表 4.11 ；

表 4.11 所需要之防蝕電流

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

5. 陽極選用

(1)陽極材料：鋁合金陽極。

(2)尺寸：(210 + 250) x 240 x 1000 mm ；蕊心所在之陽極兩面以煤焦樹脂塗佈。

(3)陽極壽命計算

陽極等效直徑

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

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

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

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

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

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

6. 陽極數量

(1) 每 4.13 m (=2.065 m x 2) 單位寬度內，陽極設置之數量如表 4.12 所示。

表 4.12 陽極設置之數量

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

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

4.9 結語

海水(洋)對金屬材料原本就是一非常容易腐蝕的環境，港灣碼頭鋼板(管)樁，常年浸泡或接觸於海水，其腐蝕損壞對結構安全威脅甚巨。

陰極防蝕在國外使用已有百年之久，防蝕成效甚佳，為海洋環境下公認對鋼材最為有效之防蝕工法。基於國內防蝕工程實務之需求，本所義不容辭地投下人力與經費，歷經兩年期間，彙整專家、學者、業界及工程單位等意見，完成「港灣構造物陰極防蝕準則草案」之研訂，將可提供港務局及其它工程單位，今後對陸上及海水下現有構造物之防蝕維護、管理或新建工程在防蝕設計上之依據，將可大幅提升工程設施之耐久性與使用年限。

第五章 港灣混凝土結構物耐久性試驗研究

5.1 前言

5.1.1 研究動機

港灣鋼筋混凝土結構物長年受到海洋惡劣環境之侵蝕下，易使混凝土產生劣化，再加上傳統混凝土有很多之缺陷，諸如施工性不良、工人擅自加水及未適當之搗實，造成材料析離、泌水及冷縫蜂窩之現象，這些不良因素在海洋環境下，更加速混凝土之劣化。混凝土為一多孔隙之材料，經由這些劣化因子的交互作用下，使其產生新裂縫致使有害物質如氯離子甚易入侵混凝土內部，破壞鋼筋表面之鈍態保護膜，造成鋼筋發生腐蝕銹斷，影響結構物安全甚巨。如何提升傳統施工方法，改善混凝土之品質與耐久性乃為營造界一直努力的方向。

自充填混凝土（Self-compacting Concrete, SCC）具有高流动性之特性，不需振動與搗實可完全藉由其自身之流動能力而填充至狹窄之鋼筋間隙及模版各角落，達到充分填充之效果，而且在施工階段亦可發現其具有減少骨材析離與泌水之現象，這些優點更能取代傳統混凝土，確保結構物在惡劣環境下有較長之耐久性。

台灣地處於海洋環境下，混凝土之耐久性必須特別加以重視，以減少發生劣化之機率。因此如何針對傳統施工法加以改良，尤其是在港灣環境下所應具有之耐久性特性，以有效提昇港灣工程混凝土品質，因此決定執行本研究計畫。

5.1.2 研究目的

本研究之主要目的係以添加爐石與強塑劑拌製自充填混凝土，期盼能克服傳統混凝土漿體工作度之不足及避免工人任意加水與搗實不良所造成之弊病，進而提升混凝土之工程品質與耐久性。

5.2 文獻回顧

5.2.1 自充填混凝土

自充填混凝土係指澆置過程中不需施加任何振動搗實，完全藉由其自身之充填能力而流動至鋼筋間隙及模版各角落之特殊混凝土。日本發展自充填混凝土之初，曾以高性能混凝土（High Performance Concrete, HPC）來指稱這種混凝土並將其區分為三類；(1)高強度高性能混凝土(2)高流動高性能混凝土(3)特殊功能高性能混凝土。其中第(2)項即為自填充混凝土，不須搗實即可達到均勻填充模版。歐、美國家所發展之 HPC 則略有不同，除強調高強度與高坍度外，並要求需具耐久性，但對工作性並沒要求需達到「自充填」的程度，因此 HPC 的施工過程中，振動、搗實仍是必要的^[33]。由此可知，日本的 HPC 與歐美的 HPC 顯然不是同一種材料。目前，日本產官學界針對免振動高性能混凝土或高流動混凝土採用了「自充填混凝土, SCC」之正式名稱^[34]，用以和 HPC 作一區隔，使得 SCC 在名稱上，不易生混淆。數年前，國內學術界 HPC 研究群所提出的 TAICON 概念，其精神亦是在於使所欲強調的混凝土性質更加明確。基本上，TAICON 概念已經是極為接近 SCC 的定義。對照前述有關高性能混凝土的定義，所謂 HPC 與 SCC 間之歧異就顯得很清楚了，那就是--SCC 其實也是 HPC，而其所要求的 ” 高性能 ”，便是其 ” 自動充填、免振動的施工便利性 ”。更明確來說，SCC 應該是 HPC 的一種。SCC 之充填性能需藉由適當的配比設計，並配合特殊化學摻料的使用所達成。自充填混凝土可有效避免因施工人員素質、訓練或管理之不良，所造成的施工瑕疵及品質落差，大幅提升構件的可靠度^[35]。

5.2.2 自充填/高性能混凝土之定義

為明確區分自充填與高性能混凝土本質上之差異，下列特摘取國內外對此材料之定義及相關說明；

國內部份；

1. 國科會；

自充填混凝土：

具高工作性、高流動性(坍度 >250 mm)、高強度($f_c' > 8000$ psi)，澆置 45 分鐘後仍具坍度 235 mm。

2. 結構工程學會；

高性能混凝土：

於『高性能混凝土特別條款』，定義高性能混凝土係混凝土經過品質保證技術，確保品質一致性及穩定性，滿足營建工程優良品質之需求。其特別條款乃依據美國混凝土學會 ACI 318 -95 「結構混凝土」精神及內涵所補充，在使混凝土由規劃設計及配比時能考量有耐久性及能確保最終結構體混凝土品質。目的在確保 HPC 澆鑄之結構物品質，免除蜂窩，泌水及析離等問題，使達到「安全性、耐久性、經濟性、工作性及生態性」之準則。

國外部份；

高性能混凝土：

- (1) 法國學者 F. de Larard 直接定義 HPC 為圓柱試體，強度大於 50Mpa(約 7000psi)的混凝土。
- (2) 日本東京大學岡村甫教授：
 - a. 工作度良好，澆置時不必振動，可流動填滿模版內任一角落。
 - b. 初期因水泥水化熱導致的裂縫少，乾縮和潛變少。
 - c. 後期強度高，耐久性好、抵抗劣化的能力強。
- (3) 美國 CALSPAN-UP 研究中心；
 - a. 必須具下列其中之一的特性：
 - (a) 澆置後 28 天之抗壓強度大於 14000psi(980 Kg/cm²)。

(b) 4 小時之抗壓強度大於 3000psi(210 Kg/cm²)。

(c) 4 小時之抗壓強度大於 5000psi(350 Kg/cm²)。

b. 經過 300 次之凍融循環，具有耐久因子大於 80%之特性。

c. 水灰比必小於 0.35。

5.2.3 自充填混凝土之特性

高性能/自充填混凝土乃是由水泥、粗細骨材及摻料所組成之混凝土，在材料選用、配比設計與品質管制上，較傳統混凝土嚴謹，表 5.1^[36]為與其它混凝土之比較。為確保品質、經濟、環保與資源再利用，自充填混凝土具有下列幾項特性^[37]：

1. 安全性

安全性並非無盡的超高強度或特別需求之標準，而是強調達到設計者目標要求的強度性質。通常可控制減水劑及強塑劑等多種方式，在不改變水泥膠結材料的用量下，可藉由降低水膠比(W/B)(指水與水泥加上卜作嵐材料總重和之比值)，提昇其安全性。且添加飛灰等卜作嵐材料，可改善水泥水化產物中「氫氧化鈣」的生產量，進而改善骨材與水泥漿之弱界面有利於長期強度之提昇，然而過度添加則會影響其早期強度。養護條件對強度之影響性甚大應特別注意。使用飛灰及爐石必須有該批材料品質穩定性之測試資料以驗證其安全性。

2. 耐久性

臺灣地區為海洋環境及潮濕區域，混凝土及結構體受鹽害及體積穩定性等耐久性的問題必須特別加以重視，以減少發生劣化之機率。因耐久性問題直接與水的流動有關，所以必須限制拌合水量在 170 kg/m³ 以下，或降低水膠比(W/B)，使其孔隙減少可阻礙水的移動。添卜作嵐材料及降低用水量常係控制降低孔隙的最佳策略。添加卜作嵐調整適度水膠比(W/B)，可消耗其中所含易溶性物質，提昇施工後組成材料在混凝土結構體內分佈之均勻性及穩定性，可增大結構混凝土之電

阻($20\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$)，降低氯離子之滲透電量(<2000 庫倫)，因此可提高水密性，對耐久性有當大的貢獻。在混凝土中添卜作嵐材料必須事先確認對耐久性的要求標準

3. 工作性

以往常將美國混凝土學會(ACI)要求的最低坍度標準當作設計坍度，導致混凝土施工困難，因而造成工地的施工人員擅自加水，以滿足泵送性及施工性，而促成混凝土品質低落之現象。高性能混凝土所具良好的工作性質對現場施工者而言是相當重要的，尤其對結構體之連續性及減少發生蜂窩和泌水現象之機率，確保均勻性相當有利。飛灰摻入混凝土中，其正面效應是因中空圓球形顆粒之軸承效用可改善工作性。然而應注意飛灰燒失量及破裂之同心飛灰玻璃球會造成大量的吸附拌合水，而使其需求量大為提昇，以及漿體稠度增大等負面效應，故飛灰在使用前應事先以評估其可能對工作性之影響，並加以調整出最佳之填加量。

4. 經濟性

考慮高性能混凝土之經濟性，不能一味地減少水泥用量，而係以提高「水泥強度效益」為主要之依據，水泥強度效益至少應達到每公斤水泥有 15psi 之抗壓強度之標準。且為確保其品質，在相同設計下，水膠比(W/B)必須確保不變，且需降低用水量。如以卜作嵐材料可直接取代部份水泥或部份砂，然而取代不當或過量使用將會造成早期強度嚴重不足之現象。另外考慮骨材顆粒堆積更為密實不但可減少骨材間的空隙，且可減少水泥用量能達到經濟性的訴求。

表 5.1 高性能混凝土與其他混凝土之比較^[36]

性質		傳統混凝土	高強度混凝土	HPC/SCC
強度(Mpa)		21~42	>42	>21
坍度(mm)		25~100	100	230~270
流動度(mm)		---	---	>600
用途		一般建築物	高層建築之底層柱、剪力牆、結構體	各類工程建築物
材料選擇	水泥	細度 2800 Blaine, 28天強度28 MPa (4000 psi)	C ₃ S 含量較高，細度3500~4000Blaine，品質均勻者，7 天強度要求29.4Mpa(4200 psi)	同高強度混凝土
	骨材	要求洗淨即可，砂之FM2.3~3.0 即可，以 2.6 較佳，粗骨材最大粒徑1"或 1.5"，以求經濟性	3/8"~3/4"骨材最大徑有較佳之結果，骨材表面不可有雜質或黏土，粗骨材之用量可較高，砂採用粗砂(FM=3.0)	3/16"~3/2"最大粒徑骨材，餘同高強度混凝土之骨材
	摻料	無特別限制	必須使用減水劑、減水緩凝劑或強塑劑(高性能減水)	高性能減水劑、緩凝劑為必要添加之材料
	卜作嵐材料	除 ACI 318 耐久性考慮外，一般並不限定使用	飛灰、砂灰、爐石粉或稻穀灰取代部分水泥及砂，使用量 5~20%水泥量	飛灰、砂灰、爐石粉或稻穀灰取代水泥或砂，用量視設計需要而定
配比設計		坍度依結構物而定，水灰比視持久性及強度而定 水泥用量 320 kg/m ³ 以上	坍度 100mm 以上，水泥用量390~560 kg/ m ³ ，水灰 0.3~0.4 範圍	緻密配比法，坍度必須甚大，水泥用量<400 kg/ m ³ ，水灰比<0.6
拌合、澆置、搗實及養護		稠度良好；不可過量振動，以防止析離，失去輪氣量；一般養護作業	稠度甚硬和粘；注意必須迅速搗實，並且要充分振動，寧可超振動；養護作業特別重要	傳統拌合設備，強調拌合程序，利用泵送機泵送，免振動搗實，施工時必須注意模板的設計以防爆模，養護作業非常重要
品質管制		一般性品質控制	預拌廠及現場必須有範圍較廣的品質控制計畫，包括材料的儲存至施工階段均須嚴密控制，確保強度及最小之變異	由材料料源之品管，混凝土製程品管及模型試驗、原型試驗及現場施工檢驗，必須有全盤性之品質保證制度，施工前之配比證工作至少六個月以上

5.生態性

混凝土的應用考慮生態性的觀念在過去並不受重視，然而自從1990年起保護地球自然資源的觀念下，混凝土設計必須達到生態保護的目標，其最簡單的方法是必須減少使用可能會在製程中排放大量二氧化碳而造成嚴重溫室效應的水泥及鋼鐵材料的使用量。為增加混凝土構造物的使用壽命，在混凝土的組成材料中摻加工業固態廢料，應用工業再生材料及應用本土化材料等為可行之道；例如使用卜作嵐材料如飛灰等可獲得緻密性之結構體可應用造紙廢料之木質素所製造之減水劑、強塑劑及輸氣劑可增加混凝土之流動性。直接可減少用水量，並可減少耗能的水泥材料之用量，均是達到確保生態性之方法。大量使用飛灰及爐石等卜作嵐材料可解決環保問題，節省自然資源，確實達到資源保護之功效。

5.2.4 SCC 材料之選擇

自充填混凝土與普通混凝土的組成成份(水泥、水、骨材)大致相同，主要不同在於使用強塑劑及波索蘭摻料(飛灰、爐石及矽灰)，而普通混凝土在結構物有耐久性考量時，才使用波索蘭摻料。HPC/SCC之性能需經過材料試驗、配比試拌等一序列嚴謹之品質保證工作，方能達成。其材料選擇的重點如下：

1. 水泥

HPC/SCC 的水泥若無特殊需要，採用 ASTM Type I 水泥即可。

2. 骨材

骨材應注意尺寸、形狀、表面紋理、礦物性質和淨潔度等。

(1) 粗骨材

傳統混凝土粗骨材之最大粒徑愈大則經濟性愈佳，然而對高性能混凝土而言，為了補償骨材/水泥漿體界面的強度，必須採用較小粒徑，粗骨材最大粒徑被認為以不超過 20mm 為適宜。粗骨材的

使用量較傳統混凝土為高，而工作度的達成 可藉由強塑劑與最大緻密法調配細料比例等不同方式來達成。

(2) 細骨材

高性能混凝土使用的膠結性材料較多，故骨材間的漿量是充裕的，細骨材的顆粒限制較小，細度模數(FM)為 3 的粗砂由於有較小的表面積，不會與顆粒小而量大的膠結材料爭逐水份，可獲得較佳的工作性與表面粉刷性質，此種有別於傳統混凝土有較大的 FM 範圍(2.3~3.1)。

3. 化學摻料

摻料對混凝土極限強度影響極微，然而因為減水而使水灰比或孔隙降低，則可獲較大之強度效益。依據 ACI 規範，降低用水量將嚴重影響新拌混凝土的工作性，甚至無法充分均勻拌合、澆置及搗實，故必須使用表面活性劑類型之減水劑。自充填混凝土通常添加 ASTM F 型(高度減水劑)或 G 型(高度減水緩凝劑)之強塑劑；添加強塑劑之目的，乃係藉由界面活性劑之包圍水泥顆粒表面，使帶有同性電荷進而產生互相排斥作用而使工作度增加，使低水灰比之混凝土仍具流動性質。添加適當之劑量而不產生泌水及析離為加強塑劑之重點。因此，如果沒有加入強塑劑於混凝土內，就沒有今日之 HPC 及 SCC。目前常用之強塑劑之化學成份有下列幾種；(1)磺化奈甲醛聚合物(Sulphonated naphthalene formaldehyde condensates, 簡稱 SNF)，(2)磺化三聚氰氨甲醛聚合物(Sulphonated melamine formaldehyde condensates, 簡稱 SMF)，(3)改良式磺化木質素(Modified salts of ligninsulfonates, 簡稱 MLS)，(4)梭酸高分子聚合物(Polycarboxylic acid sodium salt, 簡稱 PCA)，

4. 波索蘭材料

波索蘭材料的使用量通常在 5~20%的水泥重量。過低效果不佳，過高則可能影響工作性或影響強度，而且其反應不能充分發揮，因此每一種波索蘭材料皆應找出最佳使用量。波索蘭材料包括稻穀灰，矽

灰，高爐石及飛灰等，具有下列之優點：

- (1) 降低水泥水化熱、高乾縮量及生產成本。
- (2) 波索蘭反應使得骨材/水泥漿界面形成具膠結性之物質，可改善漿體之水密性，增進耐久性。
- (3) 降低或減少鹼骨材反應所造成之潛在性膨脹。

一般常用之波索蘭材料如表 5.2^[38,39]所示，摻料簡要說明於下；

a. 飛灰

飛灰含有豐富之氧化矽 (SiO_2)、氧化鋁 (Al_2O_3) 以及氧化鐵 (Fe_2O_3)，其結構為玻璃質球狀物，粒徑約在 $0.4\mu\text{m}\sim 100\mu\text{m}$ 之間，其比重為 $2.0\sim 2.2$ 。當波索蘭反應發生時，飛灰中的 SiO_2 及 Al_2O_3 與水泥漿體中之氫氧化鈣 ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) 反應，產生晶狀的鈣鋁鹽類 (C-A-H) 以及低密度的鈣矽膠體 (C-S-H)，來填塞混凝土中微小的孔隙，並提高骨材介面鍵結強度，減少混凝土的透水性並提高其耐久性。添加飛灰亦會影響新拌混凝土的用水量、稠度與膠結特性。在相同坍度條件下，當飛灰之燒失量小於 5.5% 時，可節省拌合用水量。反之，則必須增加更多的用水量以維持相同的坍度。含鈣質 (CaO) 較高之 C 型飛灰的波索蘭反應較快，迅速生成鈣矽膠體 (C-S-H) 來填塞混凝土中微小的孔隙，因此混凝土的早期強度較高。含鈣質較低之 F 型飛灰的波索蘭反應較慢，混凝土的早期強度便會降低。因此，在 ACI 規範中規定飛灰在一般混凝土取代量上 C 級為 15~35%，F 級為 15~25%。飛灰反應緩慢，故早期強度降低，但添加飛灰可改善混凝土的泌水現象及減小孔隙結構，提升其耐久性。

b. 爐石

爐石為熔煉鋼鐵時所生的副產物，其中含有氧化矽 (SiO_2)、氧化鋁 (Al_2O_3) 以及氧化鐵 (Fe_2O_3) 等成份。爐渣由高爐排出冷卻

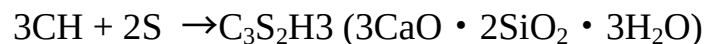
表 5.2 混凝土添加波索蘭材料之特性^[38,39]

	飛灰	爐石	矽灰	稻穀灰
成 份	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , CaO, MgO, Na ₂ O, K ₂ O 及碳等化合物	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ 及 Fe ₂ O ₃	SiO ₂	纖維素, 木質素及半纖維素
優 點	1.減少用水量, 改善工作度, 增加水密性 2.提高晚期強度 3.減少體積變化增加耐久性	1.改善工作度 2.提高晚期強度 3.增加耐久性	1.降低水泥含量 2.生產超高強度混凝土 3.增加耐久性	1.較高之早期強度及耐久性 2.有較高強度 3.凝結時間縮短 4.乾縮量小
缺 點	1.降低早期強度 2.延緩凝結時間	1.降低早期強度 2.乾縮量增加	1.工作性較差 2.價格高	1.工作度較差 2.性能了解不足, 有待進一步研究
應 用 方 向	1.佔膠結料 8% →預拌混凝土 2.佔膠結 15~35% →混凝土污工製品 3.佔膠結料 30% →巨積混凝土 4.佔膠結料 22% →高性能混凝土	1.佔膠結料 20~30% →氣候較冷期間 2.佔膠結料 50% →抗硫侵蝕混凝土 3.佔膠結料 75% →巨積混凝土 4.佔膠結 40~50% →高性能混凝土 5.佔膠結 40~65% →抗凍融及鹼矽骨材反應	1.佔膠結料 12% →減低水泥含量 2.佔膠結 3~18% →增加含飛灰或爐石混凝土早期強度 3.佔膠結料 10% →減少氯離子侵入混凝土 4.佔膠結料 20~33% →高強度及超高強度混凝土 5.佔膠結料 6% →耐火混凝土 6.佔膠結料 6~9% →高性能混凝土	1.工作性及坍度隨添加量增加而下降 2.稻穀灰之取代量以 20%為上限超過則工作度將降底 3.一般以稻穀灰取代後會有早凝及減少泌水之現象 4.稻穀灰之取代量以 20%以內時早期及晚期抗壓強度均可提高 →高性能混凝土

所得之固體物，稱為高爐石，依其冷卻方式的不同，可分為水淬爐石與氣冷爐石兩種。水淬爐石是高爐熔渣以噴水方式急速冷卻，使爐渣碎裂成粒狀，由於冷卻時間過於短促，晶體不易形成且微結構凌亂開放，活性大增且具膠結性，只要細加研磨即可取代部分水泥，亦稱為高爐熟料。氣冷爐石是採用徐冷方式，形成構造較堅固且緻密，活性不佳且無膠結性，可做混凝土骨材或製造水泥之原料。活性高的高爐熟料在水中表面會產生一層酸膜阻隔水份的進入，故需利用氫氧化鈣與石膏等觸媒的侵蝕酸膜，使高爐熟料水、氫氧化鈣產生水化作用。若高爐熟料取代量太大，則水泥水化所產生的氫氧化鈣與石膏等觸媒量相對減少，致使高爐水泥之初期強度發展因水化反應並不完全而低於普通水泥。後期因進行一般波索蘭反應(有效填充孔隙、消耗氫氧化鈉以抵抗硫化物侵蝕與鹼骨材反應)，因而提高混凝土的強度與耐久性。當用水量相同時，高爐水泥之坍度會大於普通水泥。

c. 矽灰

矽灰係由高純度的石英與煤在電弧爐中加熱至 2000°C所產生矽金屬及鐵矽合金所濃縮的副產品。其成份為高含量不定型或非常細球型顆粒的二氧化矽，約佔 85~98%，其餘為少量的金屬化合物。典型的矽灰比重約在 2~2.5，遠小於波特蘭水泥的 3.15，其平均粒徑約為 0.1μm，約為波特蘭水泥顆粒的 1/100 倍，為相當分散的狀態，可與氫氧化鈉起化學反應，其反應式如下：



由於矽灰有較高之親水性，因此添加之矽灰量和需水量之間有密切的關係性，在固定坍度下需水量會隨矽灰用量增加而增加，所以在不增加用水量的理想工作度要求下，矽灰必須與強塑劑一起使用，方能發揮其最大功效。

5. 水

使用拌合水最簡單的原則是「凡是可以喝的水皆可當拌合水」。高性能混凝土若考慮高膠結用量所導致之水化熱問題及避免引起溫度龜裂，則拌合水宜採用冰水(溫度約 10°C)以獲致較良好之初期水化效果，俾產生細密之水泥漿體基體組織，而有益於混凝土極限強度。

5.2.5 摻料對混凝土之影響

1. 強塑劑對新拌混凝土漿體之影響

強塑劑對混凝土之影響，可分為新拌混凝土及硬固混凝土兩方面加以詳述^[40]。

(1) 水化程度

混凝土中添加強塑劑時，當水泥一接觸到水後，鈣離子立即被釋放出而進入溶液且吸附於水泥顆粒表面，因此表面變成帶正電荷，而溶液中強塑劑即吸附於表面而阻礙水化之進行，由於強塑劑有分散作用，可增加水泥漿體之工作度且藉著擴散作用通過保護層進入水泥顆粒，因此造成此系統內壓力增加而破壞保護層，進而加速水化作用。添加強塑劑對水泥砂漿之水化程度會有幫助，強塑劑由於可均勻分散水泥，使水化空間有效地利用，因而水化程度較高。而添加強塑劑對水泥漿卻相反，因強塑劑具有分散及促凝之作用，會使其水化產物生成量較少，而殘留較大量之未水化水泥顆粒，因此水化程度降低^[41]。

(2) 泌水及分離現象

若在適當劑量下，強塑劑對新拌混凝土泌水 (Bleeding)及分離 (Segregation)現象並不十分明顯，但對於輸送帶灌置流質混凝土時，必須小心預防產生分離現象^[42]，Soshiroda 曾指出^[43]，當強塑劑作為減水效應時(工作性固定)，可降低新拌混凝土分離現象。從另一觀點來說，若強塑劑作為分散水泥或是減少水泥含量(增加骨材含量)效應時，會增加混凝土之泌水及分離現象，但若添加輸氣劑(Air-entraining admixture)則對控制析離十分有效。

(3) 凝結時間

一般而言，添加強塑劑均會延緩初凝時間，並且隨劑量之增加而延長初凝時間^[44]，如圖 5.1 所示，而此種緩凝之作用並不致於影響硬化後混凝土之性質。

(4) 坍度損失

坍度損失(Slump loss)為影響混凝土工作性及施工品質重要因素之一。一般強塑劑較常應用於預鑄混凝土，若應用於預拌混凝土工業時，則須先克服坍度損失在技術上之困難。至於坍度損失真正之原因，目前尚無明確之解釋，只能推測由於新拌混凝土中水泥漿化學及物理性質改變所致。對於坍度隨時間快速損失之現象，如圖 5.2 所示^[44,45]，Hattori 曾解釋為在水泥漿體中，水泥顆粒水化凝結之潛伏期比水泥顆粒在水化過程中形成化學鍵結(Chemical bonding)扮演更重要角色^[46,47]。

2. 強塑劑對硬固混凝土之影響

添加強塑劑雖會延長混凝土初凝之時間，但對硬化後混凝土性質並無不良之影響。在不改變水灰比情況下，高流動混凝土之抗壓強度會低於一般混凝土^[48]，但強塑劑若以減水劑來使用時，強度會隨減水率相對增加，如圖 5.3 所示^[46]。就硬固後混凝土之乾縮現象(Drying shrinkage)而言，通常高流動混凝土較一般混凝土約大 11%左右；在相同強度之流動混凝土，其彈性係數略高於一般混凝土^[48]。潛變(Creep)與添加強塑劑無多大關連，在十分乾燥之環境下，含強塑劑混凝土顯示較大之潛變量，因此對於高應力之結構設計必須加以考慮^[46]。

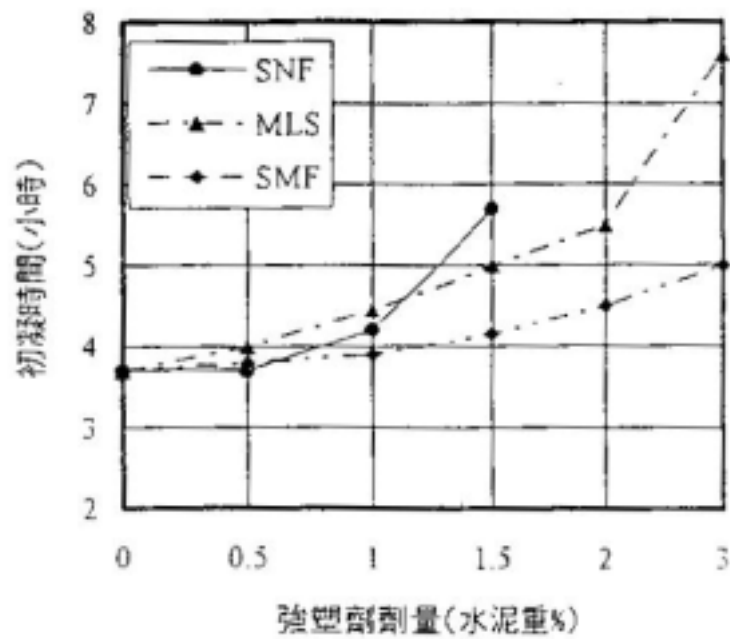


圖 5.1 強塑劑對混凝土凝結時間之影響^[44]

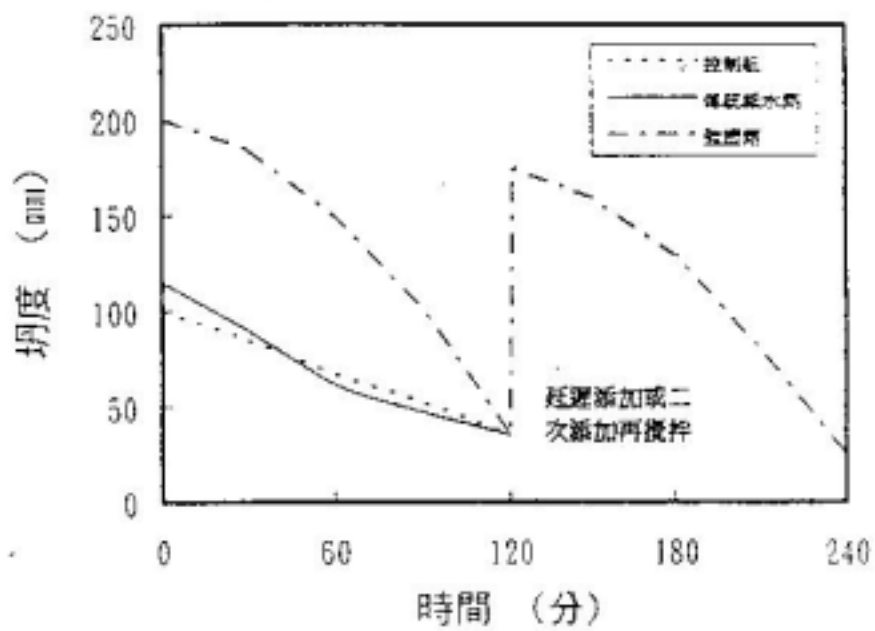


圖 5.2 添加強塑劑對混凝土之坍度損失^[44,45]

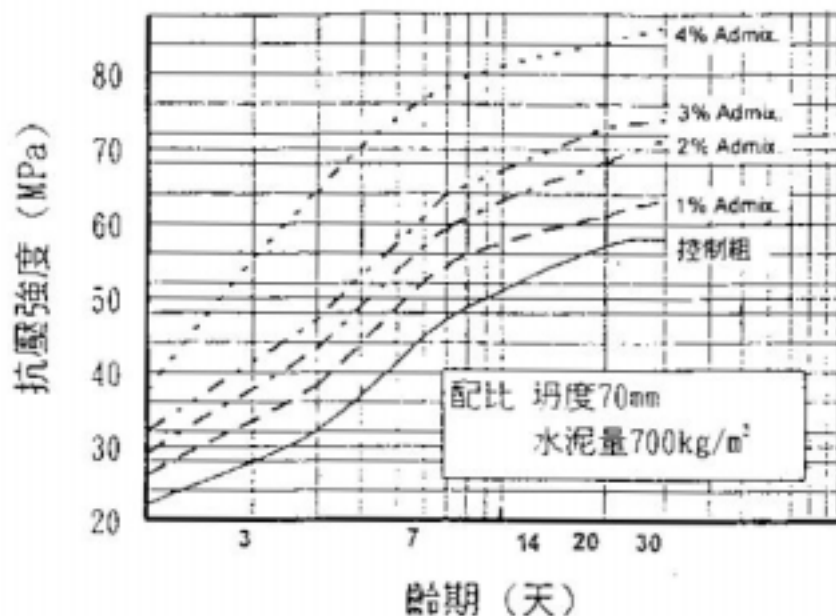


圖 5.3 固定坍度含不同強塑劑量混凝土之強度發展^[46]

3. 波索蘭材料對自充填混凝土之影響

根據 ASTM C618 之定義：波索蘭材料是一種含矽或含矽與鋁之材料，本身不具或稍具膠結能力，但是在常溫且有水之情況下會與氫氧化鈣產生緩慢反應稱為波索蘭反應^[49]。波索蘭材料具有粒徑小(細度 $3000\text{cm}^2/\text{g}$ 以上)及水化較慢之波索蘭反應，因此對混凝土諸如新拌性質、硬固性質、耐久性及體積穩定性等都產生改變，茲分述如下：

(1) 新拌性質

對於有泌水或析離傾向之新拌混凝土，摻入細粉料之顆粒，可以減少空隙體積，故通常可以使工作性得到改善。飛灰或爐石粉之粒徑細小，又呈玻璃質，故可在一定坍度下降低用水量，但矽灰由於較具黏性則對工作度有降低之作用^[50]。

(2) 強度

添加飛灰及爐石粉之混凝土由於波索蘭反應較慢，因此早期強度較一般混凝土為低，但晚期強度則較一般混凝土為高。Tsukayama 及 Miyosui 以飛灰混凝土進行 28 天之抗壓試驗，在 21°C 養護下，其強度可達普通混凝土 90 天強度，在 10 年後，其強度可達 120%^[50,51]。矽灰由於對水有很高之親和力，在拌和物中很少有游離水存在，使得相同水灰比有較少之孔隙，因而早期強度較其它兩種材料為高，矽灰對混凝土強度之主要貢獻，在正常養護溫度下大約發生在齡期 3~8 天，此時添加 10% 矽灰混凝土之強度約大於未添加矽灰混凝土強度之 30%^[52]。

(3) 耐久性

當水泥混合料添加波索蘭材料時，由於波索蘭材料能影響用水量、稠度及膠結特性。並因晚期之波索蘭反應，能由不定形 (Amorphous) 之矽酸鹽與氫氧化鈣作用 ($\text{CH} + \text{A/S} + \text{H} \rightarrow \text{C} - \text{A/S} - \text{H}$) 結合成 C-S-H 膠體及 C-A-H 鹽類，如此能減小孔隙、改變晶相，同時 CH 量溶出減少，因此抗硫酸鹽能力增加^[45]。同時水化過程中 Aft 及 Afm 相對地減少，因而減少體積之膨脹，增加耐久性。Kimurs 做過長時間之實驗，將試體浸於海中，結果 10 年後，發現其抗硫酸鹽侵蝕之能力大於普通水泥混凝土之試體，R.Doug Hooton 及 T.Gerry 並做過相同之試驗，添加 30% 飛灰之膨脹率為 0.026，而普通水泥混凝土試體則為 0.152^[50,51]。在一般之條件下添加波索蘭材料，因在幾天內不會產生明顯反應，故在巨積混凝土中添加波索蘭材料能降低水化熱，進而減少裂縫產生及增加耐久性。

(4) 體積穩定性

由於飛灰之波索蘭反應時間較慢，以致在膠體結構內之水份(層間水及化學鍵水)與飛灰作用較慢。因此在相同水灰比下，當其承受暫態濕度變化，大孔隙與小孔隙間之水份較易流動，造成水流速率增加而破壞尚未生成完整之膠體而導致較大潛變，當高齡期時

由於波索蘭反應生成之膠體填充空隙而降低潛變。添加爐石粉之混凝土，在水泥水化作用完全時，潛變比普通水泥混凝土小或相同。但如在水化早期(4~7 天)就承受載重時，由於波索蘭反應較慢，混凝土之硬化未完全，因此潛變係數會比普通水泥混凝土為大^[53]。矽灰混凝土由於矽灰與水之親和力較大，泌水較少，水份大部份都被包含在混凝土內，且因矽灰顆粒較小，故乾縮變形較一般混凝土為大，且易因塑性收縮而產生裂縫^[54,55]。

5.2.6 自充填混凝土之工程性質

自充填混凝土能利用自重，不需震動即可通過鋼筋間隙自行充填至模版的各個角落，且不會因為漿體的高變形能力而發生粗粒料析離之現象^[34]。

為提昇流動性及充填能力，SCC 將粗粒料用量減少，約為傳統混凝土之 85 %~90 %，並增加強塑劑用量至臨界析離狀態，為避免高流動性造成之析離，SCC 大量使用飛灰、爐石等礦物摻料，以增加漿體比重及稠度^[56]。

5.2.7 自充填混凝土之工程效益與應用

國內自充填混凝土應用於土木工程首推中二高烏日跨越橋，以及國工局興建之淡水河北側快速道路之橋墩部分。在建築工程方面，因超高層鋼構之柱內灌漿亦必需用自充填混凝土，其工程案例如台北國際金融中心、梧棲童綜合醫院、南投縣政府縣政中心辦公大樓及永樂國小 921 重建工程等均是。

日本至 1998 年為止，SCC 使用量已超過 120 萬立方公尺，如日本大阪之世界第一地上之液化天然瓦斯（LNG）儲存槽、世界最長之吊橋明石海峽大橋之主體結構、日本之村野過濾廠等^[57]。

除日本外，歐美各國使用 SCC 之工程案例亦日增，在加拿大 Sheerbrooke 市 Webster 停車場補強工程中，SCC 在沒有任何搗實的情

況下，成功的在佈滿縱向筋及剪力筋的補強結構中，填入 7.5cm 之狹小空間。此外在 Montreal 市 Meauharnois 電廠補強工程及 Hibernia 海域平台等工程中，SCC 亦發揮其絕佳之工作性，輕易填滿體積龐大配筋複雜之混凝土工程。歐盟之 Brite-EuRam 計畫中，積極推廣 SCC 應用於住宅建築，瑞典之 NCC 營造、水泥混凝土研究院、法國 GTM 營造、國家橋樑道路中央研究所等單位均積極參與^[58]。

從上述國內外許多工程案例中，經驗顯示，使用自充填混凝土其主要之工程效益如下^[57]：

1. 可應用於混凝土搗實非常困難之結構體。
2. 混凝土充填密實，可有效提昇結構之可靠性。
3. 應用於巨積混凝土，以減少勞力、縮短工期。
4. 減少工地噪音，合乎環保要求。
5. 達到混凝土施工自動化、合理化。

5.3 研究方法與步驟

5.3.1 研究規劃

本研究之主要目的在探討自充填混凝土之配比設計、基本性質與耐久性。首先參考日本土木學會之 SCC 配比設計，以 30 %、40 % 及 50 % 之爐石粉取代水泥量，設計所需要之配比，經試驗室多次試拌，調整出強塑劑之最佳量且符合 SCC 之新拌性質要求，包括坍度、坍流度、判斷材料析離與泌水、箱型通過試驗、鋼筋間隙通過能力、V 型漏斗等，配比確定後製作一系列之混凝土試體，進行新拌混凝土漿體之基本性質試驗，試體在養護一定齡期後進行硬固性質之各項試驗，試驗流程如圖 5.4 所示，相關試驗內容與敘述如表 5.3~5.4 所示。

5.3.2 試驗材料

1. 水泥：採用台泥 Type I 卜特蘭水泥。
2. 拌合水：自來水。
3. 爐石粉：中聯資源公司生產之高爐石粉，比重為 2.90。
4. 強塑劑：使用高性能減水劑，採用 HiCON 公司生產之強塑劑。
5. 粒料：粗細粒料取自混凝土拌合廠，粗粒料最大粒徑 1/2”，細粒料之細度模數 FM 為 2.72，粒料之級配及物理性質如表 5.5、表 5.6 及表 5.7 所示。

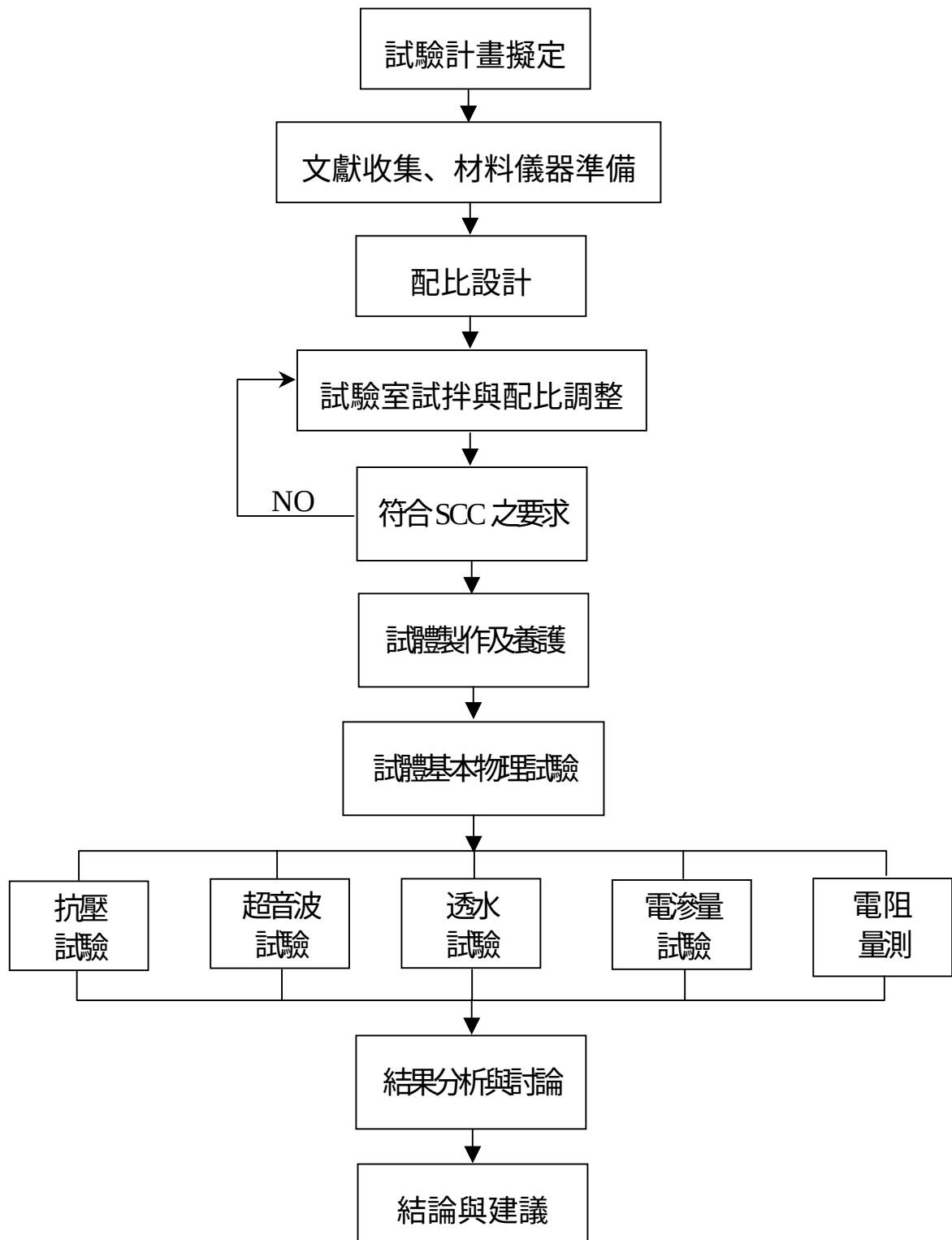


圖 5.4 試驗流程

表 5.3 新拌漿體相關性質試驗

試驗項目	試驗儀器/方式
坍度試驗	坍度錐
坍流度試驗	坍度錐
泌水及析離	目視
流速試驗	V 型漏斗
鋼筋間距（隙）通過性試驗	U 型鋼筋間隙通過箱

表 5.4 硬固試體之相關試驗

項目 試體種數		養護條件	試驗項目	試驗齡期(天)
圓 柱 試 體	Φ 15×30 cm	試體拆模後，置入養生室進行養護到所需之齡期	抗壓強度、超音波、電阻	7、14、28 56、90
	Φ 10×20 cm	試體拆模後，置入養生室進行養護到所需之齡期	氯離子電滲	56
	Φ 10×20 cm	試體拆模後，置入養生室進行養護到所需之齡期	透水(特製試體)	28、56

表 5.5 粗粒料之級配

篩號	累積通過率 (%)	ASTM C33 規範
1 $\frac{1}{2}$	100	100
3/4 $\frac{1}{2}$	100	90~100
1/2 $\frac{1}{2}$	78.03	—
3/8 $\frac{1}{2}$	35.69	20~55
NO.4	0.67	0~10
NO.8	0	0~5

表 5.6 細粒料之級配

篩號	累積通過率 (%)	ASTM C33 規範
NO.4	98.4	95~100
NO.8	81.2	80~100
NO.16	67.2	50~85
NO.30	51.6	25~60
NO.50	24.6	10~30
NO.100	6.6	2~10

表 5.7 粒料之物理性質

物理性質	粗粒料	細粒料
乾比重	2.57	2.58
吸水率 (%)	0.83	1.0
總含水率 (%)	2.0	2.0
細度模數	—	2.72
乾單位重 (kg/m^3)	1533	—
最大粒徑 (cm)	1.3	—

5.3.3 試體配比

5.3.3.1 SCC 之設計

本次試驗之配比乃依據日本土木學會自充填混凝土配比設計方法，及用柴希文博士之修正簡易 SCC 配比設計法設計配比^[57]，經過試驗室試拌與調整配比後，最後設計出所需求自充填混凝土，並通過流動性的試驗，以確保其良好的充填性能。充填性能之標準則依據日本土木學會所提出併用系高性能混凝土之規範，如表 5.8 所示^[59]。SCC 之設計流程與考量因素摘述於下；

1. 決定粗粒料用量

日本建築學會 (JASS 5 1997) 18-3 節規定 SCC 粗粒料最大粒徑分為 15 mm、20 mm 及 25 mm 三種^[60]。

一般使用粗粒料之最大粒徑為 20 mm，並假設空氣含量為 1.0%，即 $V_a = 0.01 \text{ m}^3 / \text{m}^3$ 。

$$W_g = V_g \times \rho_g \times 1000$$

其中， ρ_g 為粗粒料之比重， V_g 為表 5.8 中所列之單位粗粒料絕對體

積，視配比設計所需充填等級而定。

粗粒料之用量會影響 SCC 之彈性模數 (E 值)，因此不宜為貪求良好之間隙通過性，一味降低其用量。如結構體配筋密集，例梁柱接頭，建議粗粒料之最大粒徑採用 13 mm (1/2")， $V_g=0.30\text{ m}^3/\text{m}^3$ 。如結構體配筋稀少，例橋梁擴展基腳，則建議粗粒料之最大粒徑採用 25 mm (1")， $V_g=0.35\text{ m}^3/\text{m}^3$ 。

以 G/G_{lim} 設計粗粒料用量，如使用日本一般的建議值 $G/G_{lim}=0.5$ ，則粗粒料之絕對體積 $V_g(G)=0.5\times G_{lim}\times(1-V_a)$ ，粗粒料之單位用量 $W_g=V_g\times\rho_g\times\rho_w\times1000=0.5\times\text{乾擣單位重}\times(1-V_a)\approx0.5\times\text{乾擣單位重}$ 其中， G_{lim} 為粗粒料之實積率，且 $G_{lim}=\text{乾擣單位重}/(\text{粗粒料比重}\times\text{水單位重})$ 。

2. 決定細粒料用量

$$V_s=(1-V_a-V_g)\times(V_s/V_m)$$

$$W_s=V_s\times\rho_s\times1000$$

其中， ρ_s 為細粒料之比重， (V_s/V_m) 之建議值為 0.40~0.47。

$$S/a=0.50\pm0.02$$

一般而言，細粒料以河砂為佳，若必須採用碎石砂，最好與一定比例之河砂一起使用，否則對間隙通過性 (U 型試驗) 會有不良的影響。

3. 計算漿體體積

$$V_{paste}=1-V_g-V_s$$

其中， V_{paste} 為漿體體積，包含空氣含量之體積，建議值為 $0.38\sim0.42\text{ m}^3/\text{m}^3$ 。

4. 決定用水量

日本建築學會（1997）JASS 5 對自充填混凝土的要求：

$$W_w = 160 \sim 185 \text{ kg/m}^3$$

$$V_w = 0.16 \sim 0.185 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

在日本因冬天天氣嚴寒，所以一般混凝土均含有 $4.5\% \pm 1.5\%$ 的輸氣量，而台灣地區則無此需要因此用水量可酌予增加，建議以不超過 195 kg 為原則。

5. 決定粉體體積

$$V_p = V_{paste} - V_w - V_a$$

其中， V_p 為粉體之體積，粉體系列建議粉體之體積為 $0.16 \sim 0.19 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ，而粉體膠結料不低於 300 kg/m^3 （增粘劑系列），以大於 400 kg/m^3 為佳（併用系列）。

6. 決定粉體量

$$W_p = V_p \times S.G_p \times 1000$$

其中， $S.G_p$ 為使用粉料之平均比重，其計算之方式如下：

$$S.G_p = \left[\frac{100}{\sum_{i=1}^n (P_i / S.G_i)} \right]$$

其中， P_i 為第 i 種粉料佔所有粉料之重量比， $S.G_i$ 第 i 種粉料之比重，則由 $W_i = W_p \times P_i$ 可計算出各種粉料之使用量。

使用波索蘭材料，可產生卜作嵐反應，惟其反應速率之快慢與溫度及卜特蘭水泥（OPC）用量有關，如冬天低溫時，大量使用卜作嵐材料以致卜特蘭水泥用量偏低，則強度之發展將極為緩慢，因此建議 OPC 之最低用量以 270 kg/m^3 以上為宜^[26]。

7. 決定強塑劑之用量

通常強塑劑的用量與粉料使用量的多少及水膠比之大小有關，不同強塑劑其使用之比例也有所不同。

8. 預測抗壓強度

將上述步驟所計算出之配比，代入下式中，預測所設計配比 28 天齡期之抗壓強度 f_c ：

$$f_c = \frac{K_g \bullet R_c}{\left(1 + 3.1 \frac{W + A}{C(1 + K_1 + K_2) + GGBS} \right)^2}$$

式中，

K_g = aggregate coefficient

R_c = cement strength measured on matar

W = free water content (kg/m^3)

A = volume of the entrapped air (litre/m^3)

$K_1 = 0.4PFA/C + 3SF/C$ ($K_1 \leq 0.5$)

$K_2 = 0.2LSP/C$ ($K_2 \leq 0.07$)

GGBS：爐石粉

PFA：飛灰

SF：矽灰

LSP：石灰石粉末

9. 檢核水膠比是否滿足耐久性及強度之需求

表 5.8 日本土木學會併用系高性能混凝土之規範^[59]

自充填等級		1	2	3
構造條件	鋼筋最小間距(mm)	35~60	60~200	200 以上
	鋼筋量(kg/m ³)	350 以上	100~350	100 以下
箱型試驗充填高度(mm)		300 以上 (R1 障礙)	300 以上 (R2 障礙)	300 以上 (無障礙)
單位粗粒料絕對容積(m ³ / m ³)		0.28~0.30	0.30~0.33	0.30~0.35
流動性	坍流度(mm)	650~750	600~700	500~650
材料分離 抵抗性	V 漏斗流下時間 (sec)	10~25	7~20	7~20
	坍流度到達 500mm 所需時間(sec)	5~20	3~15	3~15

5.3.3.2 配比計算之實例說明

本試驗共有三種配比，設計粉體量分別以 30 %、40 % 及 50 % 之爐石粉取代水泥量，計算出 SCC 之所需配比。

材料基本資料：

- 粗粒料：最大粒徑為 13mm，比重為 2.57。
- 細粒料：比重為 2.58。
- 水泥：比重為 3.15。
- 爐石粉：比重為 2.90。
- R1 障礙：D10 竹節鋼筋 5 支，鋼筋間隙為 35mm。

配比設計過程：

1. 決定粗粒料用量

依據表 5.8，充填性能等級為 R1 時，單位粗骨材之絕對體積為 $0.28 \sim 0.30 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ，取 $V_g = 0.30 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ，則

$$W_g = 0.30 \times 2.57 \times 1000 = 771 \text{ kg}/\text{m}^3$$

2. 決定細粒料用量

假設空氣含量為 1.0% ($V_a = 0.01 \text{ m}^3/\text{m}^3$)，並取 $(V_s/V_m) = 0.47$ ，則

$$V_s = (1 - 0.01 - 0.30) \times 0.47 = 0.3243 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

$$W_s = 0.3243 \times 2.58 \times 1000 = 837 \text{ kg}/\text{m}^3$$

3. 計算漿體體積

$$V_{paste} = 1 - 0.30 - 0.3243 = 0.3757 \approx 0.38 \text{ m}^3/\text{m}^3 \quad (\text{O.K.})$$

4. 決定用水量

$$W_w = 185 \text{ kg}/\text{m}^3$$

$$V_w = 0.185 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

5. 決定粉體體積

$$V_p = 0.3757 - 0.185 - 0.01 = 0.1807 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

6. 決定粉體量

(1) 設爐石粉取代水泥重量之比例為 30%，則

$$S.G_p = \left[\frac{100}{(70/3.15) + (30/2.9)} \right] = 3.071$$

$$W_p = 0.1807 \times 3.071 \times 1000 \approx 555 \text{ kg}/\text{m}^3$$

$$W_1 = 555 \times 0.7 \approx 389 \text{ kg}/\text{m}^3$$

$$W_2 = 555 \times 0.3 \approx 167 \text{ kg/m}^3$$

(2) 設爐石粉取代水泥重量之比例為 40%，則

$$W_1 \approx 330 \text{ kg/m}^3$$

$$W_2 \approx 220 \text{ kg/m}^3$$

(3) 設爐石粉取代水泥重量之比例為 50%，則

$$W_1 \approx 273 \text{ kg/m}^3$$

$$W_2 \approx 273 \text{ kg/m}^3$$

其中， W_1 為水泥之用量， W_2 為爐石粉之用量。

7. 決定強塑劑之用量

強塑劑之用量取使用粉料重量之 1.4%，則

$$(1) \text{ 爐石粉取代水泥重量之比例為 } 30\%, W_{sp} = 555 \times 0.014 = 7.77 \text{ kg/m}^3$$

$$(2) \text{ 爐石粉取代水泥重量之比例為 } 40\%, W_{sp} = 7.7 \text{ kg/m}^3$$

$$(3) \text{ 爐石粉取代水泥重量之比例為 } 50\%, W_{sp} = 7.64 \text{ kg/m}^3$$

8. 預測抗壓強度

將上述步驟所計算出之配比，代入下式中，預測所設計配比 28 天齡期之抗壓強度 f_c ：

(1) 爐石粉取代水泥重量之比例為 30%

$$f_c = \frac{K_g \bullet R_c}{\left(1 + 3.1 \frac{W + A}{C(1 + K_1 + K_2) + GGBS}\right)^2} = 72.37 \text{ MPa} \approx 723.7 \text{ kg/cm}^2$$

(2) 爐石粉取代水泥重量之比例為 40%

$$f_c = \frac{K_g \bullet R_c}{\left(1 + 3.1 \frac{W + A}{C(1 + K_1 + K_2) + GGBS}\right)^2} = 60.55 \text{ MPa} \approx 605.5 \text{ kg/cm}^2$$

(3) 爐石粉取代水泥重量之比例為 50%

$$f_c = \frac{K_g \bullet R_c}{\left(1 + 3.1 \frac{W + A}{C(1 + K_1 + K_2) + GGBS}\right)^2} = 60 \text{ MPa} \approx 600 \text{ kg/cm}^2$$

式中， $K_g = 4.6$ (for gravel)， $R_c = 58 \text{ MPa}$ 。

設計之配比經過試拌調整如表 5.9 所示。

表 5.9 自充填混凝土配比設計

項目 配比	水泥 (kg/m ³)	水 (kg/m ³)	粗粒料 (kg/m ³)	細粒料 (kg/m ³)	爐石粉 (kg/m ³)	強塑劑 (kg/m ³)	W/C	W/B	爐石
A	389	185	771	837	167	6.54	0.49	0.34	30 %
B	330	185	771	837	220	6.98	0.58	0.35	40 %
C	273	185	771	837	273	7.42	0.70	0.34	50 %

5.3.4 試驗參數與試體編號

5.3.4.1 試驗參數

表 5.10 為拌製混凝土漿體之相關試驗參數。

表 5.10 試驗參數

混凝土配比	A 型、B 型、C 型
爐石粉取代水泥量%	30 %，40 %，50 %
養護天數	7 天，14 天，28 天，56 天， 90 天

5.3.4.2 試體編號

試驗共有三個不同之配比，配比 A 為爐石粉取代水泥量 30%，其編號為 A-30。配比 B 為爐石粉取代水泥量 40%，其編號為 B-40。配比 C 為爐石粉取代水泥量 50%，其編號為 C-50。

5.3.5 試體製作

混凝土材料包括水泥、粗係粒料、水、強塑劑及爐石粉等，依設計配比以拌合機拌合後，隨即將混凝土灌製入 $\phi 15\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ 、 $\phi 10\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ 圓柱試體模內，於澆置 24 小時後拆模，隨即將試體置入養生室進行養護。

5.3.6 試驗方法與設備

5.3.6.1 坍度與坍流度試驗

混凝土之工作性影響施工之難易與品質控制，通常以坍度及流坍度來評估其工作度。坍度試驗是公認的簡易試驗方法，CNS 1176 有明確的規定。量測的器具主要為一圓錐體之坍度模，頂端直徑 10 cm、底端直徑 20 cm、高度 30 cm，加上一支直徑 16 mm，長度 60 cm 之半圓球頂之鋼棒。其試驗方法為將混凝土漿體分三層填入坍度模內，一層以搗棒均勻搗實 25 次後，立即將坍度模向上垂直拔起，量測錐頂面至坍下混凝土之垂直高度，即為坍度值。用坍度來表示混凝土之工作性，不足以表現流動的特有性質，因而有「坍流度試驗」，其方法係在坍度試驗之後，量測新拌混凝土擴散之直徑。

試驗器材^[57]：

1. 使用 CNS 1176（混凝土坍度試驗法）規定之坍度錐。

2. 使用具有十足水密性及鋼性，板厚 2.0mm 以上，大小 0.8m×0.8m 以上表面光滑之鋼製品，若有握把需在不妨礙測定坍流度的位置，如要測 500mm 坍流度到達時間，可在表面描繪 500mm 的圓形。
3. 坍流度用縮尺或讀數為 1mm 之量尺及測定用輔助器具，測定用輔助器具可為 L 形角鋼切割加工而成。若能保證使用量尺即能正確測量時，亦可不設測定用輔助器。
4. 裝載容器用有 12 公升左右容量之水桶。
5. 使用能測到 1/10 秒的馬錶。

試驗步驟：

1. 坍度錐內側及表面用濕布擦拭後置於水平之平板上，且平板表面亦需先用濕布擦拭。
2. 試料採用免搗實、免震動的方法，一次填滿坍度錐，且試料填充的動作需在 2 分鐘內完成。
3. 將充滿混凝土的坍度錐上面用刮刀刮平後，將坍度錐垂直向上拉起，拉上 300mm 的時間約 2~3 秒，待混凝土停止流動後，量測擴散圓形的最大直徑及與其垂直的另一直徑，兩者之平均值即為坍流度值（混凝土的坍流度如偏離圓形，當兩直徑相差 50mm 以上時，則需以同一盤試料再做一次試驗），而混凝土中央部分的坍下量即為坍度值，並用目視觀察混凝土有無材料分離的現象。
4. 同時記錄自拉起坍度錐開始至混凝土流到 500mm 的時間，並用馬錶量測到 1/10 秒精度。

量測項目：

- a. 坍流度：混凝土自由擴散直徑。
- b. 擴散時間：混凝土擴散達直徑 50 cm 所經歷時間。

c.檢視漿體析離：應同時檢視是否有骨材沉澱、堆積、或漿體析離的現象。

5.3.6.2 V 形漏斗流下試驗^[57]

試驗器材：

1. 鋼製 V 漏斗如圖 5.5 所示形狀、尺寸，容量為 10 公升、內部平滑之鋼製混凝土試驗用 V 形漏斗。
2. 漏斗試驗裝置設有支撐台，如下圖所示。
3. 漏斗排放口、開口、可瞬間打開具水密性的底蓋，上端都必須磨光平滑。
4. 漏斗試驗裝置以外，準備投料用容器、受料容器（12 公升左右）、刮平用刮刀、馬錶（能測到 1/10 秒）、濕布等。

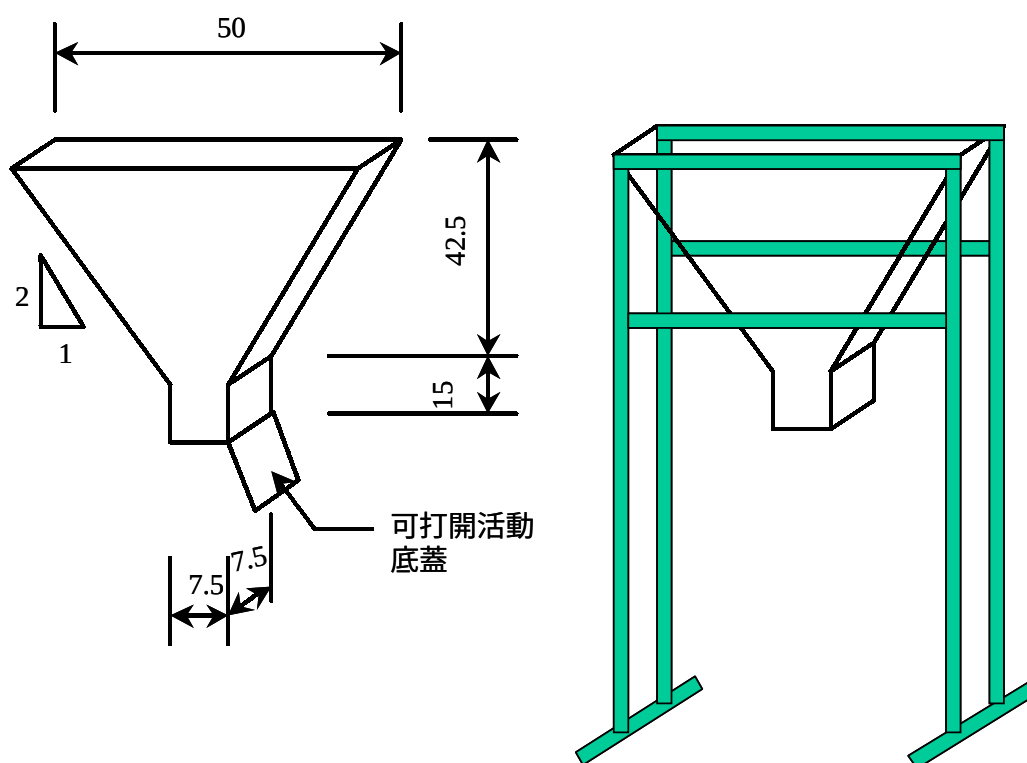


圖 5.5 混凝土試驗用 V 形漏斗尺寸圖

試驗步驟：

1. 將洗淨漏斗垂直（上面水平）設置，漏斗內側用濕布擦乾。
2. 排放口下放置受料盤，關閉底蓋。
3. 填充混凝土前，檢查排放口確認動作正常，然後將試料慢慢灌進漏斗，並用刮刀將漏斗上面之混凝土刮平。
4. 蓋平完 10 秒內打開排放口底蓋，用馬錶測全量排完時間，並觀看排放中是否有部分塞住現象，而稠度較高之混凝土，較難判斷瞬間排完時間，故可從漏斗上方觀看。

量測項目：

流下（完）時間：混凝土完全流經下方出口所經歷時間。

5.3.6.3 鋼筋間隙通過性試驗^[57]

試驗器材及尺寸如圖 5.6 所示：

1. 依構件鋼筋量或最小鋼筋間距決定流動障礙等級(鋼筋量由高至低依續可分為 R1 障礙、R2 障礙、與無障礙三種等級，參考附表)。
2. 為儘量減少混凝土與容器磨擦，充填裝置使用表面平滑且能觀察混凝土流動狀態之材料，一般使用透明材質較多。填充裝置中央部分配置有柵狀竹節鋼筋之流動障礙物構造，其中流動障礙 R1 配置 D10 竹節鋼筋 5 支，R2 配置 D13 竹節鋼筋 3 支，如圖 5.6 所示形狀、尺寸之容器。
3. 填充裝置中央部分設活動隔門，用可開關隔板將裝置分隔成兩室（A 室、B 室）。
4. 如需測量通過障礙之粗骨材量，可利用在 B 室下方之採樣閘門。
5. 填充裝置以外需要準備投料用容器（約 5 公升左右）、刮平用刮刀、量尺（讀數為 1mm）、馬錶（能測到 1/10 秒）、濕布等。

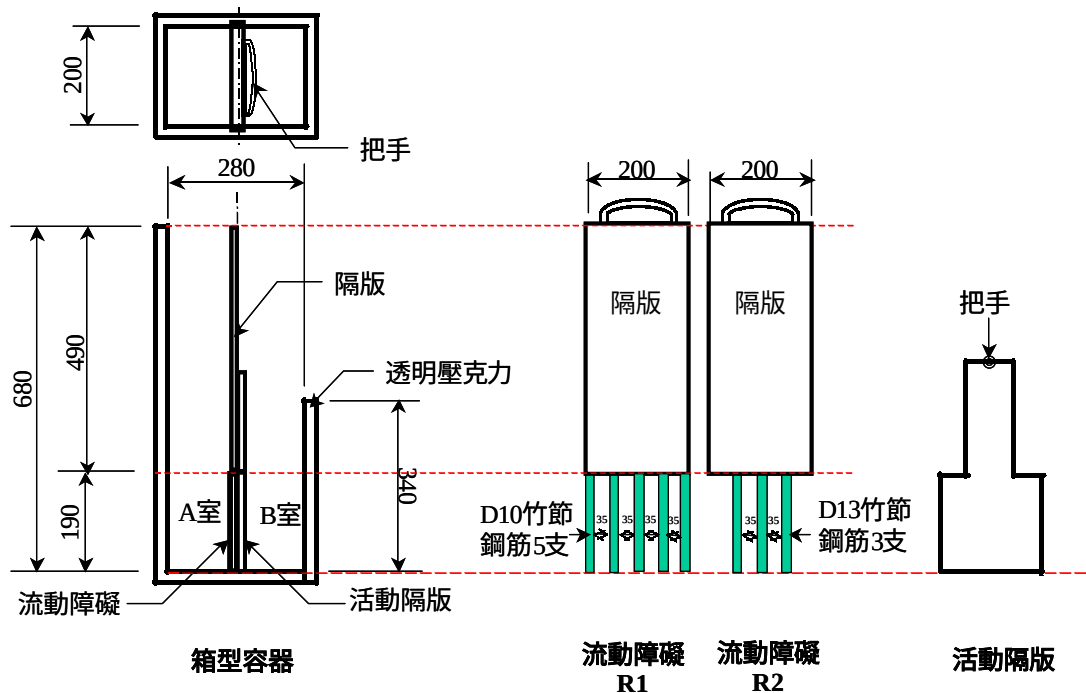


圖 5.6 U 型鋼筋間隙通過箱

試驗步驟：

1. 填充裝置垂直放置，上面保持水平。
2. 裝好填充裝置隔間門的流動障礙隔板。
3. 容器內面、隔間門、流動障礙隔板用濕布擦乾淨。
4. 關閉隔間門，將混凝土試料注入 A 室，不使用搗棒或敲打，連續將混凝土注入至 A 室上端。
5. 用金屬製規尺或刮刀除去多餘的試料後，再用刮刀刮平，並靜置 1 分鐘。
6. 一口氣拉起隔間門，混凝土就通過流動障礙流入 B 室，充填 B 室至靜止流動。
7. 用量尺量測 B 室容器底端至填充混凝土上面之高度，測到 1mm 為填充高度 B_{ho} 。

量測項目：

充填高度：混凝土由 A 室流經鋼筋障礙充填至 B 室後充填之高度，一般以 30 cm 為通過標準。

5.3.6.4 硬固混凝土性能試驗

1. 抗壓強度試驗

本試驗採用 ELE2000KN 之抗壓試驗機（如照片 5.1 所示），實驗方法依據中國國家標準 CNS 1232。

2. 超音波脈波速度量測

使用英國 CNS 儀器公司出品之 PUNDIT(Portable Ultrasonic Non-Destructive Digital Indicating Tester)超音波測定儀（如照片 5.2 所示），量測超音波速在硬固混凝土材質內之傳遞，了解混凝土之品質狀況。儀器本體主要包括時間顯示器及脈波發射器和接收器等兩部份。其應用於混凝土強度檢測之原理為利用脈波發射器，將超音波脈波傳入混凝土中利用接收器量測脈波在其內部之傳遞時間，再依據脈波的傳遞路徑計算脈波速度。

試驗進行時，依其發射探頭與接收探頭之位置，分為直接法、半直接法及間接法三種。前二種方法可得較令人滿意的結果。故實際檢測時，多應用直接法求出速度後，配合混凝土試體密度及彈性模數，以判斷混凝土品質及均勻穩定程度。脈波速度與混凝土品質關係如表 5.11 所示，可作初步研判^[61]。

表 5.11 超音波脈波速度與混凝土品質之關係^[61]

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

3. 透水試驗

本試驗採用日製之內壓式透水試驗儀，如照片 5.3 所示，可供四組直徑 10×20 cm 試體，同時進行試驗。儀器之壓力來源來自高壓氮氣，氮氣瓶配備高壓(300 kg/cm^2)及低壓(70 kg/cm^2)錶各一個，具有調壓之功能，在四聯式透水試驗容器及給水容器上方皆按裝壓力錶 50 kg/cm^2 各一個。試驗時間為 7 日，每日定時記錄量筒之水位變化及時間，將記錄之數據代入達西公式(Darcy Formula)，便可量出試體之透水係數；

$$k = \frac{\rho \log_e \frac{r_0}{r_i}}{2\pi h} \cdot \frac{Q}{P_0} \quad (\text{達西公式})$$

式中；

k ：透水係數 (cm/sec) ρ ：水單位重 (kg/cm^3)

r_0 ：試體半徑 (cm) r_i ：試體中心孔半徑 (cm)

Q ：流量 (cm^3/sec) P_0 ：壓力 (kgf/cm^2)

4. 電滲量試驗

參考 ASTM C1202 作氯離子滲透性量測，利用外加直流電壓 (60V)，使電解液(NaCl, NaOH)解離產生，帶電的陰離子，並加速其對混凝土的滲透，量取隨時間變化其通過混凝土電流的大小，再計算其電量(庫倫=安培×秒)作為氯離子滲透性的指標。實驗儀器如照片 5.4 及照片 5.5。

5. 電阻係數試驗

本試驗採用英國 Colebrand Advanced Engineering 公司之具四探針並排之電阻量測儀器，量測時盡量避開或遠離鋼筋位置，將混凝土表面磨平，四個探針接觸表面按下，即可立即讀出電阻值。圖 5.7 為四針式之電阻量測簡示圖，試驗儀器如照片 5.6。混凝土電阻係數與其中所含鋼筋之活性程度之關係如表 5.12 所示^[62]。

表 5.12 混凝土電阻與鋼筋腐蝕活性之關係⁽⁶²⁾

電阻係數(kohm.cm)	鋼筋腐蝕活性程度
<5	非常高
5-10	高
10-20	低/中等
>20	低

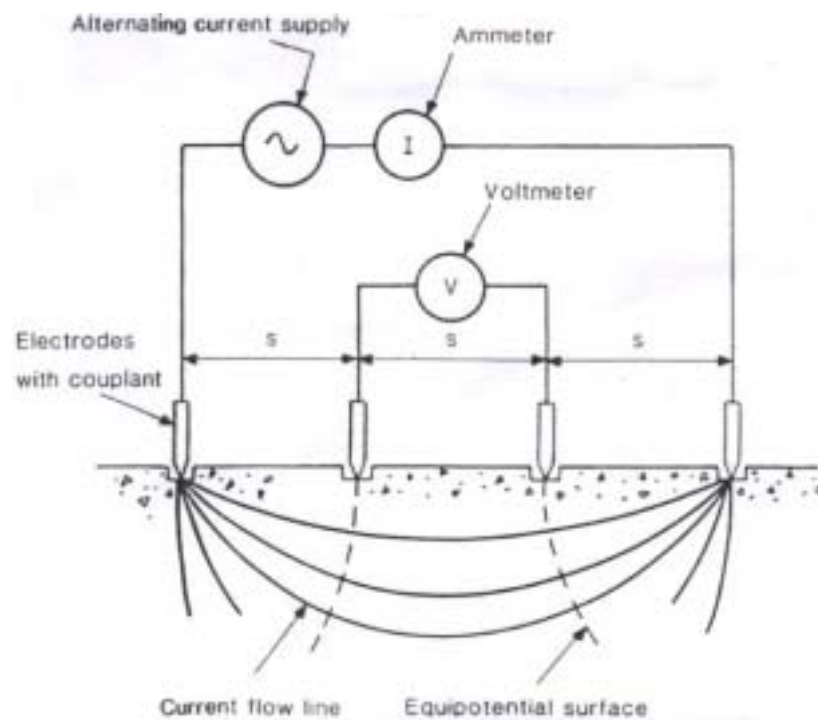


圖 5.7 四探針式之電阻量測簡示圖



照片 5.1 ELE 2000KN 抗壓機



照片 5.2 超音波測定儀



照片 5.3 透水試驗儀



照片 5.4 電滲量試驗儀器（一）-試體前處理



照片 5.5 電滲量試驗儀器（二）-量測電流量



照片 5.6 混凝土電阻量測儀

5.4 試驗結果與討論

5.4.1 自充填混凝土之新拌性質

設計出來之自充填混凝土其新拌漿體性質，需經過流動性能的檢測試驗，以確保漿體具有良好之自充填性。量測之項目包括坍度、坍流度、材料析離與泌水之判斷、鋼筋間隙通過性試驗、V 形漏斗流下試驗等。

1. 漿體之拌合

自充填混凝土由於添加波索蘭材料及強塑劑，其拌合過程與一般傳統混凝土不同，如何調整拌合方法成為一重要關鍵。一般爐石粉之比重較水泥小，細度亦較細，因此，欲要增加漿體之工作度需添加強塑劑（高性能減水劑，SP），當其與水泥、水及粗細粒料拌合時，可能會造成粉體凝集與結塊情形，如何確保新拌混凝土之品質，在拌合過程中也扮演重要的角色。

設計之 SCC 漿體經過多次試拌結果顯示，如改變拌合順序與延長拌合時間，可減少漿體之結塊情形。拌製 SCC 之投料順序為細粒料→水泥→爐石→（水+SP），最後才添加粗粒料。

2. 漿體之坍流度與析離泌水

自充填混凝土之新拌性質規範，並無明確規定坍度值應定為多少，基本上坍流度越大其坍度相對也越大。表 5.13 為漿體之坍流度與析離試驗結果。表中顯示，漿體之坍流度值約在 65~69cm 之間，坍度值在 25~26cm 之間，對於 R1 障礙規定流度值在 65~75cm 之間，完全符合本試驗之配比設計，然而配比 C-50 之漿體有微量泌水及粒料析離之情形，分析原因可能是爐石取代水泥量較大，爐石有釋水之特性，致使的混凝土之自由水量增加，稀釋了漿體使得漿體黏滯性降低無法黏住粗粒料，而造成混凝土有輕微之泌水與粒料析離現象。

表 5.13 漿體之坍流度與析離試驗結果

新拌性質 \ 配比	A-30	B-40	C-50	備註
坍度(cm)	26	25	25.5	
坍流度(cm)	69	65	66	
析離與泌水	無	無	微量泌水	目視判定

3. V 形漏斗與鋼筋間隙通過性試驗

表 5.14 為新拌漿體之流動性能試驗結果，照片 5.7~5.8 為試驗過程之情形。試驗中漿體之鋼筋間隙通過性，其充填高度都可超過 300mm，V 形漏斗之流下時間也能符合 R1 障礙之 25 秒內。剖析原因乃試驗所使用粒料之最大粒徑為 $1/2\phi$ (13mm)，屬於較小之粒徑，故可有效提高新拌漿體之流變能力與鋼筋通過性，加上粗粒料的比表面積增加，與水泥漿接觸面積也增加，可提高潤滑效果，亦可增加流動性。在細骨材方面，細粒料率 (s/a) 的大小對工作性有很大之影響，當細粒料率大時，有時無法確保流動性，細粒料率小時，會容易產生析離泌水之現象，一般細骨材率在 0.51~0.57 時會有不錯之效果，本試驗之細粒料率為 0.52，因此確有不錯之效果。

表 5.14 漿體之流動性能試驗結果

新拌性質 \ 配比		A	B	C
箱型試驗充填高度(mm)		306	302	303
流動性	坍流度(mm)	690	650	660
材料分離 抵抗性	V 漏斗流下時間 (sec)	24	23	22



照片 5.7 V 型漏斗試驗



照片 5.8 U 型鋼筋間隙通過箱

5.4.2 自充填混凝土硬固性質

1. 抗壓強度

抗壓強度為混凝土品質控制之重要指標之一，如假設混凝土為均質材料時，單軸抗壓除了可知道混凝土抵抗壓力能力外，亦可推估其它物理性質，例如抗壓强度高，相對其彈性模數、抗拉強度、水密性及耐久性亦均較為理想^[63]。

表 5.15 及圖 5.8 為試體抗壓強度與齡期之試驗結果。依 SCC 的配比設計預測，28 天之抗壓強度分別 A-30 配比為 723kg/cm^2 ，B-40 為 605.5kg/cm^2 及 C-40 為 600kg/cm^2 ，但表 5.15 試體實際之抗壓強度與比設計值略有差異(偏高)。圖 5.8 中各配比之抗壓強度都隨著齡期的增長而增加，28 天後之強度仍在持續發展，顯然添加爐石粉有提高晚期強度之趨勢。90 天之抗壓強度以爐石取代水泥量 40 % 為最大，依次為 30 % 及 50 % 者，原因可能為爐石含量高，部份之爐石完全沒有機會進行

波索蘭反應，另外試驗中亦發現配比 C-50 之漿體有微量泌水現象，致使其強度發展趨居於三配比之最小。

表 5.15 試體抗壓強度試驗結果 (kg/cm²)

齡期 配比	7 天	14 天	28 天	56 天	90 天
A-30	255	474	720	751	769
B-40	240	455	688	763	770
C-50	231	401	655	706	738

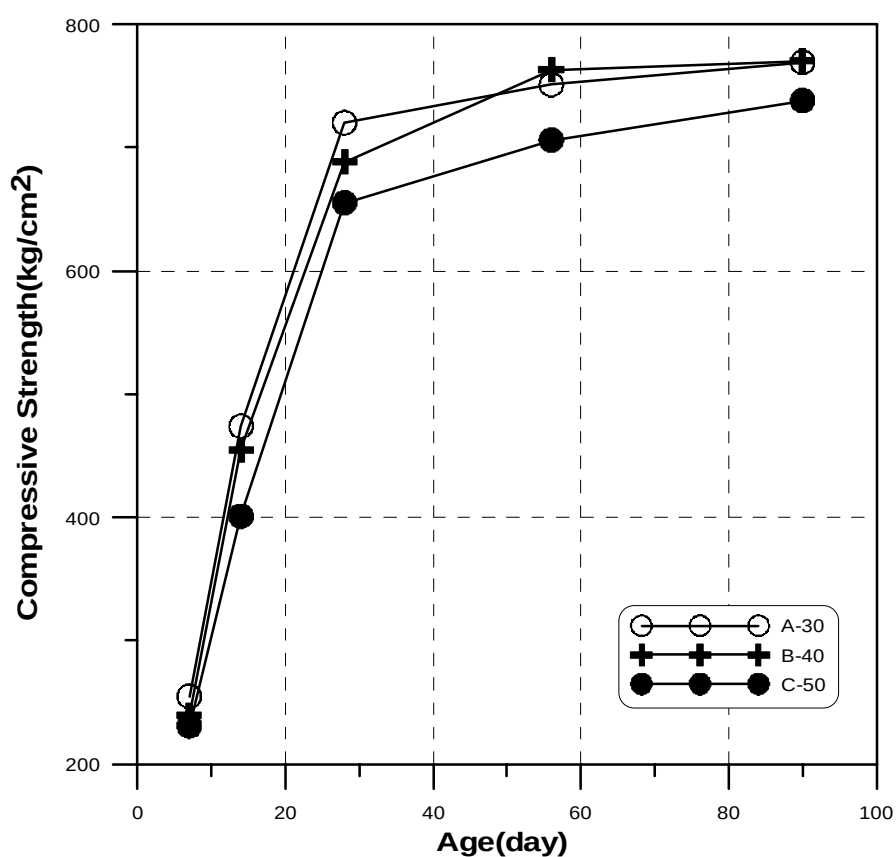


圖 5.8 試體抗壓強度發展趨勢

2. 超音波脈波速度

超音波脈波速度量測，係藉由超音波脈動在介質內之傳遞速度之快慢，可評估受測介質內部之均勻性及其組織之緻密性為何？當介質緻密時則脈波速度快，若介質內部有孔隙或裂縫存在時，則其脈波速度顯著變慢。

表 5.16 及圖 5.9 為試體進行超音波脈波速度量測之結果，脈波速度隨養生齡期增加而變快，主要原因乃水泥漿體水化過程充分且持續進行，水化產物（C-S-H）膠體發展完整，並充分填滿孔隙路徑，致使漿體趨於緻密硬實，因此波速通過介質（漿體）變的甚快。表中之超音波速度均達 4.0km/sec 以上，依據表 5.11 之關係判讀，自充填混凝土之品質相當穩定且屬於優良等級。

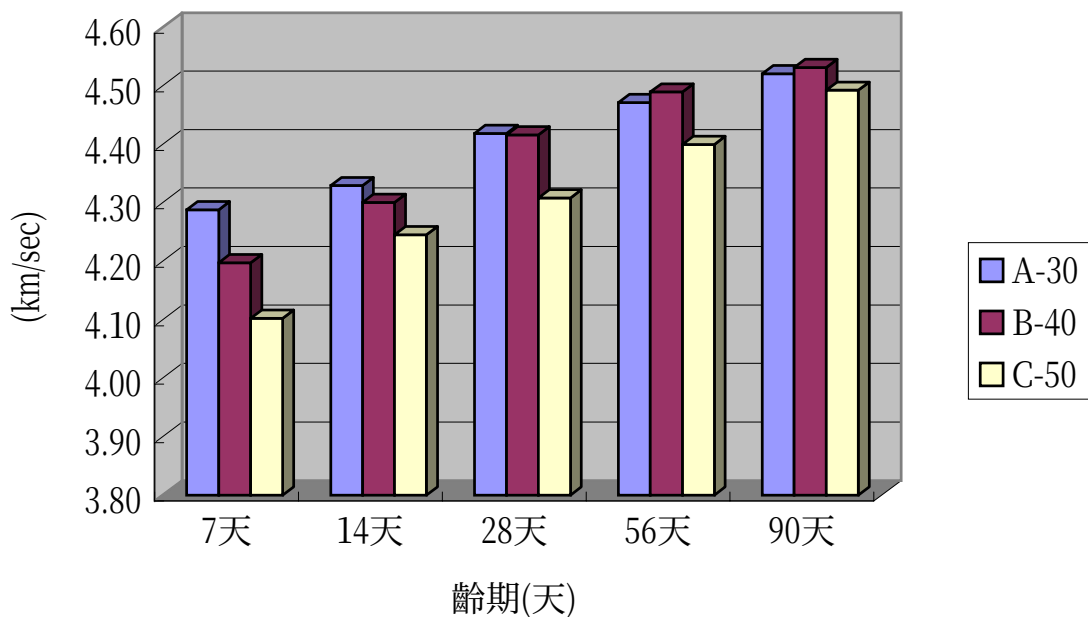


圖 5.9 試體超音波脈波速度與齡期關係圖

表 5.16 試體超音波脈波速度試驗結果 (km/sec)

齡 期 配 比	7 天	14 天	28 天	56 天	90 天
A-30	4.288	4.329	4.418	4.471	4.520
B-40	4.197	4.300	4.416	4.489	4.531
C-50	4.102	4.245	4.308	4.399	4.492

3. 電阻係數

混凝土電阻係數之大小在鋼筋混凝土結構物之腐蝕觀念中，可用來評估腐蝕電流通過混凝土介質的一種能力指標，電阻係數高表示電荷不易通過混凝土介質，電阻係數低則表示電荷較易流通，對混凝土內之鋼筋腐蝕威脅性高。此外，電阻係數亦可作為混凝土品質良窳鑑定標準之一。

表 5.17 及圖 5.10 為自充填混凝土試體之電阻係數試驗結果。表中顯示，養生未達 14 天（含）之試體，電阻係數均未達 $20 \text{ k}\Omega\text{-cm}$ （自充填混凝土品質驗收標準值），主要原因乃養生齡期不足，水泥漿體尚未充分完成水化硬固過程。養生齡期 28 天時，配比 A-30 為添加爐石較少（僅取代水泥量 30%）之試體，其漿體水化硬固過程中，尚未大幅受到波索蘭反應之緩慢效應所牽制，因此，試體之電阻係數較易達品質驗收標準值。至於齡期 56 天以上之試體，混凝土電阻係數值均超過 $20 \text{ k}\Omega\text{-cm}$ ，且隨齡期之增加而增大，顯示添加爐石粉所拌製之自充填混凝土，因波索蘭反應之效應發揮晚期各項物性之提升，其品質隨養生齡期之增長而更為提高。表 5.12 為混凝土之電阻係數與其內部鋼筋腐蝕活性之關係，可做為驗證自充填鋼筋混凝土結構物，其內部鋼筋不易發生銹蝕行為。

表 5.17 試體之電阻係數試驗結果 ($k\Omega\cdot\text{cm}$)

齡 期 配 比	7 天	14 天	28 天	56 天	90 天
A-30	14.1	16.8	21.6	25.2	30.1
B-40	13.2	16.0	17.5	25.4	32.9
C-50	13.0	15.8	16.1	20.8	27.3

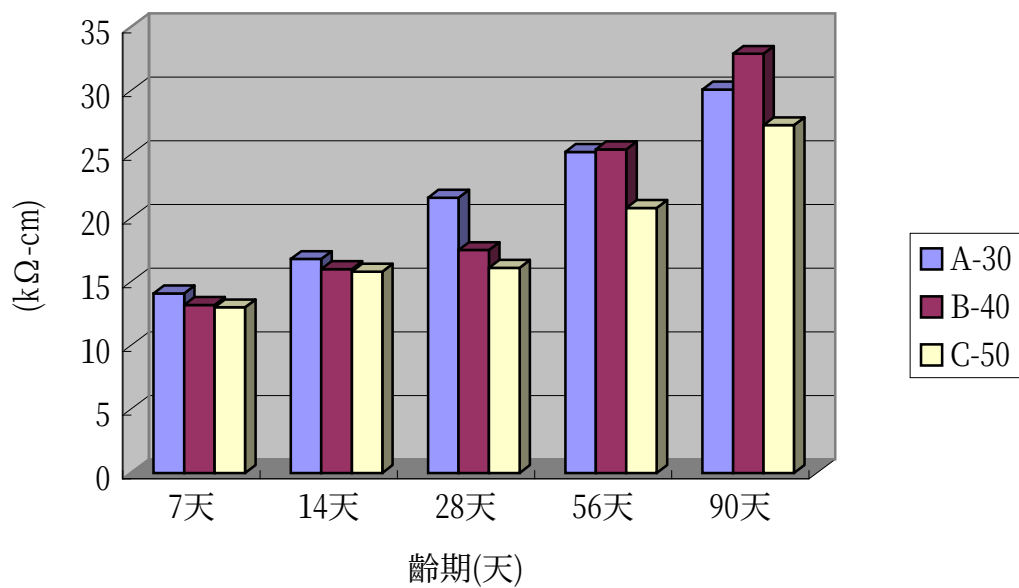


圖 5.10 試體之電阻係數發展與齡期之關係圖

4. 透水係數

透水係數乃水份通過混凝土漿體難易之表示，與漿體之緻密性、搗實與孔隙分佈有密切之關係。它受到配比設計（水灰比）、粒料粒徑

大小、水泥用量及養生條件等參數所影響。因此，透水係數之變化對混凝土之品質與耐久性影響至鉅。

表 5.18 為試體之透水係數試驗結果。表中顯示透水係數隨養生齡期之增長而降低，養護 56 天之試體其透水係數較養護 28 天者為低，其中以爐石量取代 40 % 之試體，其透水係數最低 ($9.32 \times 10^{-9} \text{ cm/sec}$)。前述之現象與抗壓試驗結果，相互印證，顯示試驗所拌製之自充填混凝土品質相當穩定且一致性。

表 5.18 試體之透水係數試驗結果 ($1 \times 10^{-9} \text{ cm/sec}$)

齡 期 配 比	28 天	56 天
A-30	10.89	9.36
B-40	11.12	9.32
C-50	12.51	10.77

5.5 結論與建議

5.5.1 結論

1. 設計拌製之自充填混凝土，其漿體之工作性均能符合 SCC 之基本要求。
2. 晚期抗壓強度 (56、90 天齡期) 以 40 % 爐石取代量為最佳，依序為 30 % 與 50 % 者。
3. 超音波脈波速度達 4.0 km/sec 以上，混凝土之品質屬於優良等級。
4. 電阻係數大於 20 k Ω -cm。

5.5.2 建議

1. 本計畫所設計之自充填混凝土均屬高強度等級，應設計改良適合中低強度之自充填混凝土。
2. 添加摻料之試體欲使漿體達到良好之工作性，應適當調整強塑劑之劑量。

第六章 結論與建議

台灣地處太平洋地震帶上，地震、颱風頻襲，加上海水鹽份浸泡侵蝕下，對港灣構造物之耐久性與安全威脅甚大。台灣對外經貿運輸主要以海運為主，港灣工程之建造、維護與安全極為重要，對民生影響甚巨。本年度各子計畫執行所得初步成果，簡略歸納如下：

1. 基於耐久性、經濟效應及使用安全考量，在鋼構物(碼頭鋼板樁)必需定期進行腐蝕狀況檢測與結構安全之評估，對新建之鋼構造物需做適當之防蝕處理，提高耐久性並確保碼頭之正常營運。
2. 「港灣構造物陰極防蝕準則」草案之完成，可提供工程單位在防蝕維護之依據，將可大幅改善結構物之內久性與使用年限。
3. 對於混凝土構造物，應開發新材料或新工法以應用於港灣設施之建造，諸如大量使用高性能(自充填)混凝土或於普通混凝土中添加波索蘭材料或採用 II 型水泥等材料建造，以提升結構物之耐久性。

參考文獻

- [1] 台灣省政府交通處港灣技術研究所，「基隆港碼頭鋼板樁腐蝕調查研究」港灣技術研究所專刊第 59 號， 1990。
- [2] 台灣省政府交通處港灣技術研究所，「港灣鋼構造物耐久性研究第三年報告」，港灣技術研究所，81 研(十二)， 1992。
- [3] 台灣省政府交通處港灣技術研究所，「基隆港碼頭鋼板樁檢測及其維護改善方案研究」，港灣技術研究所專刊第 81 號， 1993。
- [4] 交通部運輸研究所，「港灣構造物檢測與耐久性試驗研究」，MOTC-IOT-91-HA04，民國 91 年 3 月， 2002)。
- [5] 交通部運輸研究所，「花蓮港外港防波堤及碼頭鋼板樁監測－碼頭鋼板樁暗必調查檢測」，IHMT-9001，民國 91 年 5 月。
- [6] 台灣省政府交通處港灣技術研究所，「港灣及海岸構造物設計基準」，專刊第 123 號，p3-26，民國 86 年 1 月。
- [7] 交通部，「港灣構造物安全檢測與評估之研究」，民國 89 年 9 月。
- [8] 日本運輸省港灣技術研究所，「港灣構造物腐蝕評價手法」，港灣技術資料， No.501，p11，1984。
- [9] 日本運輸省港灣技術研究所，「港灣構造物腐蝕評價手法」，港灣技術資料， No.501，p11，1984。
- [10] 石黑健、白石基雄、海輪博之，"鋼矢板工法"， p571，日本，山海堂，1982。
- [11] Samuel A. Bradford, " Corrosion Control ", Van Nostrand Reinhold, New York, U.S.A. , 1993.
- [12] Lg. Hlasamichi Kowara , "Metal Corrosion Damage and Protection Technology", Allerton Press INC, 1989.

- [13] F. W. Fink and W. K. Boyd, "The Corrosion of Metals in Marine Environment", DMIC Report 245, 1970.
- [14] "Splash Zone Maintenance Systems for Marine Steel Structures ", NACE International Task Group T-1G-27, 1994.
- [15] H. Uhlig, D. Triadis, and M. Stern, J. Electrochem. Soc., 102, 59, 1955.
- [16] R. E. Lye, "Splash Zone Protection on Offshore Platforms- A Norwegian Operator's Experience", Materials Performance, Vol. 40, No. 4, April 2001.
- [17] G. wranglen, " An Introduction to corrosion and Protection of Metals", Chapman and Hall, NewYork, 1985.
- [18] Mars G. Fontana, : "Corrosion Engineering", 3rd ed ., McGRaw-Hill Book company, U.S.A., 1986.
- [19] Francis, L. LAQUE, "Marine Corrosion Cause and Prevention , pp95-163.", Joho Wiley and Sons, INC., U.S.A. 1975.
- [20] "Swain Meter", William H. Swain Co., 1989.
- [21] 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」, MOTC-IOT-IHMT-90-004, 民國 91 年 3 月。
- [22] 日本港灣協會-運輸省港灣局監修, 「港灣設施之技術基準·同解說 (改訂版)」, 1989。
- [23] 日本建設省土木研究所, 「海域中土木鋼構造物之電氣防蝕設計 指針(案) ·同解說」, 1991。
- [24] Det norske Veritas, DNV RP-B401, Cathodic Protection Design, 1993。
- [25] British Standard, BSI-BS 7361, Cathodic Protection, Part1. Code of practice for land and marine applications, 1991.

- [26] NACE International, NACE- RP0176, Corrosion Control of Steel Fixed Offshore Platforms Associated with Petroleum Production, 1994.
- [27] 「港灣鋼構造物防蝕、補修手冊(改訂版)」，日本沿岸開發技術研究中心，1997。
- [28] 陰極防蝕工程手冊，化學工業出版社，中國大陸，1998。
- [29] 陰極防蝕用犧牲陽極性能檢驗法，CNS 13521，經濟部中央標準局，1995。
- [30] “Impressed Current Cathodic Protection of Reinforcing Steel in Atmospherically Exposed Concrete Structures”, NACE Standard RP0290-2000, NACE international, Houston, TX, 2000.
- [31] Cathodic Protection of Concrete Bridgws : A Manual of Practice, Strategic Highway Research Program, SHRP-S-372 , 1993.
- [32] 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。
- [33] Henry,G.R., “ ACI Defines High-Performance Concrete ”,Concrete International,Vol.21,No.2,pp.56-57,February 1999.
- [34] Okamura, H, ” Self-compacting High Performance Concrete ” , ACI Concrete International,pp.50-54, July, 1997。
- [35] 詹穎雯，「SCC 均勻性與鋼筋握裹性質之研究」，自充填混凝土工程性質及其應用研討會，台灣營建研究院， pp.22-24,2000。
- [36] 黃兆龍，「由高雄 85 層 T&C Tower 論 HPC 材料選擇及性能」，高性能混凝土研發及應用研討會論文輯， p83~109,1994。
- [37] 林維明、饒正、張道光，「港灣環境下高性能混凝土結構體之性質研究（一）」， p4~p6,1998。
- [38] 林柄炎，「飛灰矽灰高爐石用在混凝土中」， 1993。

- [39] 黃兆龍，「高爐熟料及飛灰材料在混凝土工程上之應用」，高爐石與飛灰資源在混凝土工程上應用研討會，台灣營建研究中心，台北市，1986。
- [40] 黃兆龍，「高性能混凝土之優生設計法」，高性能混凝土研發及推廣研討會論文輯，p91~121,台北,1997。
- [41] 沈政南，「化學摻料對普通混凝土耐火性能影響之研究」，國立台灣工業技術學院碩士論文，1994。
- [42] Continental Engineering Corporation，"Final Report on Concrete Quality YUAN SHAN Bridge",1979.
- [43] T.Soshiroda, "Segregation Characteristics of Concrete Containing a High Range Water-Reducing Admixture"，Superplasticizers in Concrete, p121-138, 1979.
- [44] V.M.Malhotra and Malanka, "Performance of Superplasticizers in Concrete",Superplasticizers in Concrete. p209~243, 1979.
- [45] Mindess,S.and J.F.,Young，"Concrete,Prentice Hall", Englewood Cliffs, N.J., 1981.
- [46] V.M.Malhotra，"Superplasticizers：Their effect on Fresh and Hardened Concrete",Concrete International, 1985.
- [47] 黃兆龍，「混凝土添加強塑劑之效能研究」，台灣營建研究中心，民國 75 年 8 月。
- [48] Ravindra K. and Dhir and Andrew W.f.Yap., "Superplasticized Flowing Concrete：Strength and Deformation Properties, Magazine of Concrete Research"，vol.36 No.129,Dec., 1984.
- [49] ASTM, 1984 Annual Book of ASTM Standard,Vol.04.01~04.24., 1984.

- [50] 沈得縣、黃兆龍，「高爐熟料與飛灰之波索蘭反應機理及對水泥漿體巨微觀性質影響之研究」，國立台灣工業技術學院博士論文，1991。
- [51] Metha,P.K.,Concrete Strucure, “Properties and Materials, Prentice-Hall”, 1993.
- [52] 林柄炎，「矽灰對耐火混凝土的物理性和化學成分的影響」，現代營建 112 期，1989。
- [53] 松下博通，「高爐水泥混凝土之應用」，混凝土技術研討會，1993。
- [54] Hwang, C.L.and C.Y.Lin, “Strength Development of Blended Blast-Furnace Slag-Cement Mortars,Journal of the Chinese Institute of Engineers ”,Vol.9,No.3 ,Taiwan , 233-239 ,1986.
- [55] 陳桂清，「電化學技術應用於鹽害 R.C 結構物之去鹽成效與鋼筋腐蝕行為研究」,1999。
- [56] 江堅銘，「中低強度自充填混凝土研發及工程性質研究」，國立交通大學土木工程研究所碩士論文，2002。
- [57] 柴希文、苗伯霖，「混凝土自動化－自充填混凝土在施工上的應用」，混凝土施工自動化論文集，台灣營建研究院，2000。
- [58] 石尊仁，「中低強度自充填混凝土應用於一般建築工程之探討」，朝陽科技大學碩士論文，2003。
- [59] 日本土木學會，「高流動性混凝土施工指針」，July，1998。
- [60] 日本建築學會，JASS5,1997。
- [62] ASTM C876-91，”Standard Test Method for Holf-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete”。
- [62] 黃兆龍、湛淵源、廖東昇、楊偉奇，「污水處理防漏混凝土設計及施工驗證」，高性能混凝土設計及應用，p66，民國 88 年 5 月。

[63] 黃兆龍，「高性能混凝土之優生設計法」，高性能混凝土研發及推廣研討會論文輯 p91~121,台北,1997。