94-58-7153 MOTC-IOT-93-H1DA006

港灣構造物檢測與耐久性 試驗研究(3/3)



交通部運輸研究所

中華民國九十四年四月

94-58-7153 MOTC-IOT-93- H1DA006

港灣構造物檢測與耐久性 試驗研究(3/3)

著者:陳桂清、饒正、柯正龍、張道光

交通部運輸研究所

中華民國九十四年四月

國家圖書館出版品預行編目資料

港灣構造物檢測與耐久性試驗研究(3/3) / 陳桂 清等著. -- 初版. -- 臺北市 : 交通部運研 所, 民94 面 : 公分 參考書目:面 ISBN 986-00-0981-3(平裝) 1. 港埠工程 443.32 94007374

 港灣構造物檢測與耐久性試驗研究(3/3)
著者:陳桂清、饒正、柯正龍、張道光
出版機關·父通部運輸研究所 地 址:臺北市敦化北路 240 號
網 址:www.ihmt.gov.tw(中文版/中心出版品) 電 話:(04)26587176
出版年月:中華民國九十四年四月 印 刷 者:飛燕印刷有限公司
版(刷)次冊數:初版一刷 120 冊
本會问时豆戰於交通部運輸研究所港灣技術研究中心網站 定 價:300元 展售處:
交通部運輸研究所運輸資訊組•電話:(02)23496880
三民書局復北店:臺北市復興北路 386 號 4 樓•電話:(02)25016600
國家書坊臺視總店:臺北市八德路三段 10 號 B1•電話:(02)25787542 五南文化廣場:臺中市中山路 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

GPN: 1009401191

ISBN:986-00-0981-3(平裝)

港灣構造物檢測與耐久性試驗研究 ??

交通部運輸研究所

GPN:1009401191 定價 300 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(3/3)				
國際標準書號(或叢刊號) ISBN 986-00-0981-3 (平裝)	政府出版品統一編號 1009401191	運輸研究所出版品編號 94-58-7153	計畫編號 93-H1DA006	
主辦單位:港灣技術研究中 主管:邱永芳 計畫主持人:陳桂清 研究人員:饒 正、柯正龍、 聯絡電話:04-26587118 傳真號碼:04-26564418	心 張道光		研究期間 自93年01月 至93年12月	

關鍵詞:耐久性、鋼板樁腐蝕、鹼質與粒料反應、鋼筋腐蝕

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。

本年度計畫主要分為兩個子計畫來執行;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)混凝土結構物耐久性試驗研究。研究結果顯示;(1) 基隆東8、9號碼頭鋼板樁腐蝕速率約 0.04~0.05mm/vr., 而未防蝕部份則達 0.10~0.13mm/yr.、高雄港69、70碼頭約0.02mm/yr.左右,腐蝕狀況輕微;(2)添加爐 石粉於普通混凝土及海砂混拌之混凝土,對混凝土品質與耐久性均有明顯提升; 另外,花蓮、臺東地區部份混凝土構造物,諸如防波堤、消波塊等有疑似「鹼質 與粒料反應」之現象。

出版日期	頁數	定價	本出版品取得方式
94年4月	322	300	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	悠密	極機密	絕對機密

機密 極機密 絕對機密

(解密【限】條件: 年月 日解密, 公布後解密, 附件抽存後解密, 工作完成或會議終了時解密, 另行檢討後辦理解密) 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 and Material Durable Testing on Harbor Facilities (3/3)				
ISBN (OR ISSN)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER	IOT SERIAL NUMBER	PROJECT NUMBER	
ISBN 986-00-0981-3	1009401191	94-58-7153	93-H1DA006	
(pbk.)				
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			PROJECT PERIOD FROM January 2004 TO December 2004	
FAX: 04-26564418				
KEY WORDS Durability Sheet-piles Corrosion Alkali-silica Reaction Re-bar Corrosion				

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, these facilities are easily corroded, deteriorated and damaged. Their deterioration and safety have been much concerned than ever. Based on practical requirements, this study is especially focused on the durability on steel-structured and reinforced concrete structures.

This yearly research was conducted with the following two subprojects: the first subproject is "Field Investigation on Ports Sheet-Piles Situations and Corrosion Prevention Strategy"; the second subproject is "Durability of Ports Reinforced Concrete Structures". The result of the first subproject showed that steel-piles were corroded slightly under scarified anode protection, and their corrosion rate at #8 and #9 of Keelung Harbor are about 0.04~0.05mm/yr. and 0.02mm/yr. at #69 and # 70 of Kaoshiung Harbor, in comparison with 0.10~0.13 mm/yr. without any protection at Keelung Harbor. And the result of the second subproject indicated that pozzolanic material of slag mixing into cementitious concrete could significantly improve its quality and durability. As to field investigation of concrete structures along east coast of the island, there were some apparent defects found, indicating that embankments, dolphins and landsite structures were being attacked by aggregate silica reaction.

			CLASSIFICATION	
DATE OF PUBLICATION	NUMBER OF PAGES	PRICE	SECRET	
April 2005	322	300	CONFIDENTIAL	
			UNCLASSIFIED	
The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.				

中文	
英文摘要	
表目錄	
圖目錄	
照片目錄	
第一章 前言	1-1
第二章 研究計畫概述2	2-1
2.1 研究時程2	2-1
2.2 計畫內容與研究方法2	2-1
2.2.1 子計畫(一):碼頭鋼板樁現況調查與腐蝕防制方法研究 2	2-1
2.2.1.1 研究內容2	2-2
2.2.1.2 實施方法與步驟2	2-2
2.2.2 子計畫(二):港灣混凝土結構物耐久性試驗研究2	2-3
2.2.2.1 研究內容2	2-3
2.2.2.2 實施方法與步驟2	2-4
2.2.3 子計畫(三):港灣結構物陰極防蝕準則草案訂定研究2	2-5
2.2.3.1 研究內容2	2-5
2.2.3.2 實施方法與步驟2	2-6
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 研究規劃與調查7	方法	3-2
3.2.1 規劃流程		3-2
3.2.2 資料蒐集與第	分析	3-2
3.2.3 調查範圍		3-3
3.2.4 鋼板(管)	春檢測	3-3
3.2.4.1 目視検	演測	3-3
3.2.4.2 厚度量	量測	3-3
3.2.4.3 鋼樁係	R護電位量測	3-4
3.2.5 陽極塊調查		3-5
3.2.5.1 選定隊	景極塊	3-5
3.2.5.2 陽極均	 跟發生電位之量測	3-5
3.2.5.3 陽極均	退外觀檢查	3-5
3.2.5.4 陽極均	電量量測	3-5
3.2.5.5 陽極均	1 釋出電流量測	3-6
3.3 結果與討論		3-7
3.3.1 碼頭構造物	皆景資料分析	3-7
3.3.2 鋼板樁現況	僉測	3-7
3.3.2.1 高雄港	巷 69 號碼頭	3-8
3.3.2.2 高雄港	ŧ 70 號碼頭	3-13
3.3.2.3 基隆港	• 東 8 號碼頭	3-17
3.3.2.4 基隆港	表東 9 號碼頭	3-23

3.3.3 陽極塊調查	3-29
3.3.3.1 陽極塊發生電位	3-32
3.3.3.2 陽極塊外觀檢視及重量耗損	3-37
3.3.3.3 陽極塊釋出電流	3-47
3.4 結論與建議	3-52
3.4.1 結論	3-52
3.4.2 建議	3-52
第四章 港灣混凝土結構物耐久性試驗研究	4-1
4.1 前言	4-1
4.1.1 研究動機	4-1
4.1.2 研究目的	4-1
4.2 研究方法與步驟	4-2
4.2.1 摻用爐石對添加海砂混拌混凝土之耐久性影響	4-2
4.2.1.1 試驗規劃	4-2
4.2.1.2 試驗材料	4-2
4.2.1.3 試體配比	4-6
4.2.1.4 試驗參數與試體編號	4-7
4.2.1.5 試體製作	4-9
4.2.1.6 試驗方法與設備	4-9
4.2.2 混凝土構造物鹼質與粒料反應之調查與潛勢分析	4-17
4.2.2.1 目視調查	4-17

4.2.2.2 現場非破壞性檢測	4-17
------------------	------

4.2.2.3 混凝土鑽心取樣試驗 ------4-18

- 4.2.2.4 水泥砂漿棒膨脹試驗法(ASTM C227)------4-19
- 4.3 試驗結果與討論 ------4-20
 - 4.3.1 摻用爐石對海砂混拌混凝土之耐久性影響 -------4-20

4.3.2 混凝土構造物鹼質與粒料反應調查與潛勢分析 ------4-31

- 4.3.2.1 目視調查 ------4-31
 - 4.3.2.2 非破壞性檢測 ------4-34
- 4.3.2.3 鑽心試體試驗 ------4-35
- 4.4 結論 ------4-38
 - 4.4.1 摻用爐石對海砂混拌混凝土之耐久性影響 -------4-38
- 4.4.2 混凝土構造物鹼質與粒料反應調查與潛勢分析 ------4-38
- 第五章 結論------5-1
- 參考文獻 -------6-1

附錄一 子計畫 (一)碼頭鋼板樁現況調查與腐蝕防制方法研究

们妳—— 们里雷旦间报	附錄三	計畫審查簡報		≹三-	1
-------------	-----	--------	--	-----	---

表目錄

表 3.1 海水中鋼構造物之防蝕保護電位標準	3-5
表 3.2 鋼板(管)樁碼頭構造物背景資料	3-7
表 3.3 基隆港、高雄港之潮位資料	3-7
表 3.4 高雄港 69 號碼頭鋼板樁平均腐蝕速率	3-10
表 3.5 高雄港 69 號碼頭鋼板樁保護電位值	3-12
表 3.6 高雄港 70 號碼頭鋼板樁平均腐蝕速率	3-14
表 3.7 高雄港 70 號碼頭鋼板樁保護電位值	3-16
表 3.8 基隆港東 8 號碼頭鋼管樁之平均腐蝕速率	3-20
表 3.9 基隆港東 8 號碼頭鋼管樁保護電位值	3-22
表 3.10 基隆港東 9 號碼頭鋼板樁平均腐蝕速率	3-26
表 3.11 基隆港東 9 號碼頭鋼管樁保護電位值(1)	3-27
表 3.12 基隆港東 9 號碼頭鋼管樁保護電位值(2)	3-28
表 3.13 高雄港 69 碼頭陽極塊發生電位量測結果	3-33
表 3.14 高雄港 70 碼頭陽極塊發生電位量測結果	3-34
表 3.15 基隆港東 8 碼頭陽極塊發生電位量測結果	3-35
表 3.16 基隆港東 9 碼頭陽極塊發生電位量測結果	3-36
表 3.17 高雄港 69 號碼頭陽極塊尺寸及重量量測結果	3-39
表 3.18 高雄港 70 號碼頭陽極塊尺寸及重量量測結果	3-41
表 3.19 基隆港東 8 號碼頭陽極塊尺寸及重量量測結果	3-43
表 3.20 基隆港東 9 號碼頭陽極塊尺寸及重量量測結果	3-45

表 3.21 高雄港 69 號碼頭陽極塊釋出電流量測結果	3-47
表 3.22 高雄港 70 號碼頭陽極塊釋出電流量測結果	3-48
表 3.23 基隆港東 8 號碼頭陽極塊釋出電流量測結果	3-49
表 3.24 基隆港東 9 號碼頭陽極塊釋出電流量測結果	3-50
表 3.25 國內主要商港鋼構碼頭之鋼樁腐蝕調查結果	3-51
表 4.1 試體之相關試驗內容	4-4
表 4.2 粗粒料之級配	4-4
表 4.3 細粒料之級配(河砂)	4-5
表 4.4 細粒料之級配(海砂)	4-5
表 4.5 粒料之基本物理性質	4-6
表 4.6 配比 A(水灰比 0.45,河砂)	4-6
表 4.7 配比 A(水灰比 0.45,海砂)	4-7
表 4.8 配比 B(水灰比 0.60,河砂)	4-7
表 4.9 配比 B(水灰比 0.60,海砂)	4-7
表 4.10 試驗參數	4-8
表 4.11 各類試體編號說明	4-8
表 4.12 超音波脈波速度與混凝土品質之關係	4-10
表 4.13 混凝土電阻係數與鋼筋腐蝕活性之關係	4-11
表 4.14 試體抗壓強度試驗結果	4-21
表 4.15 試體超音波脈波速度試驗結果	4-27
表 4.16 水灰比 0.45 鋼筋腐蝕電位與齡期的關係	4-30

表 4.17	水灰比 0.60 鋼筋腐蝕電位與齡期的關係	4-31
表 4.18	現場試錘試驗與中性化深度量測之結果-	4-34

圖目錄

圖 3.1 調查規劃流程圖	3-2
圖 3.2 高雄港 69 號、70 號鋼板樁碼頭平面佈置	3-8
圖 3.3 高雄港 69 號碼頭結構斷面	3-8
圖 3.4 FSP 6L U 型鋼板樁 BOX 型式	3-9
圖 3.5 海生物敲除後之鋼板樁表面	3-9
圖 3.6 高雄港 69 碼頭鋼板樁厚度量測水深示意圖3	-10
圖 3.7 高雄港 69 號碼頭平均腐蝕速率與檢測水深之關係3	-11
圖 3.8 高雄港 69 號碼頭鋼板樁保護電位量測位置圖3	-11
圖 3.9 高雄港 70 號碼頭鋼板樁厚度量測位置示意圖3	-13
圖 3.10 高雄港 70 號碼頭平均腐蝕速率與檢測水深之關係3	-14
圖 3.11 高雄港 70 號碼頭鋼板樁保護電位檢測位置示意圖3	-15
圖 3.12 基隆港碼頭平面佈置圖3	-17
圖 3.13 基隆港東 8 號碼頭鋼管樁結構斷面3	-18
圖 3.14 基隆港東 8 號碼頭鋼管樁表面海生物附著之情形3	-18
圖 3.15 基隆港東 8 號碼頭各單元鋼管樁厚度測樁位置及水深3	-19
圖 3.16 基隆港東 8 號碼頭鋼管樁之平均腐蝕速率與水深之關係 3	-20
圖 3.17 基隆港東 8 號碼頭鋼管樁保護電位量測位置示意圖3	-21
圖 3.18 潮汐帶以混凝土保護鋼管樁之情形3	-23
圖 3.19 各鋼管樁間以鋼筋焊接連通之情形3	-24
圖 3.20 未防蝕區之鋼管樁表面腐蝕情形	-24

圖 3.21	防蝕區之鋼管樁表面現況	3-24
圖 3.22	基隆港東 10 號碼頭鋼板樁平均腐蝕速率與水深之關係 - :	3-26
圖 3.23	高雄港 69、70 號碼頭陽極塊配置	3-29
圖 3.24	高雄港鋼板樁碼頭陽極塊安裝示意及電位測試裝置	3-30
圖 3.25	高雄港 70 號碼頭轉角段陽極塊配置	3-30
圖 3.26	基隆港東 8、東 9 號碼頭陽極塊安裝位置	3-31
圖 3.27	基隆港東8號碼頭陽極塊規格及安裝位置	3-32
圖 3.28	高雄港 69 號碼頭陽極塊海生物清除前後之情形	3-40
圖 3.29	高雄港 70 號碼頭陽極塊海生物清除前後之情形	3-42
圖 3.30	基隆港東 8 號碼頭陽極塊海生物清除前後之情形	3-44
圖 3.31	基隆港東 9 號碼頭陽極塊海生物清除前後之情形	3-46
圖 4.1 討	【驗流程	- 4-3
圖 4.2 匹]探針式之電阻量測示意圖	4-13
圖 4.3 鉀	弱筋腐蝕電位值量測示意圖	4-12
圖 4.4 配	B比 A 試體(以河砂混拌)之抗壓強度發展趨勢	4-22
圖 4.5 配	B比 A 試體(以海砂混拌)之抗壓強度發展趨勢	4-22
圖 4.6 配	B比 B 試體(以河砂混拌)之抗壓強度發展趨勢	4-23
圖 4.7 配	B比 B 試體(以海砂混拌)之抗壓強度發展趨勢	4-23
圖 4.8 配	3比 A 試體之抗壓強度與齡期關係	4-24
圖 4.9 配	B比 B 試體之抗壓強度與齡期關係	4-24
圖 4.10	配比 A 試體之超音波脈波速度與齡期的關係	4-26

圖 4.11	配比 B 試體之超音波脈波速度與齡期的關係4	-26
圖 4.12	配比 A 試體之電阻係數與養生齡期的關係4	-28
圖 4.13	配比 B 試體之電阻係數與養生齡期的關係4	-28
圖 4.14	各配比齡期 56 天的透水係數4	-29
圖 4.15	石梯港消波塊 X 光繞射分析試驗結果	-35
圖 4.16	臺東海濱公園消波塊 X 光繞射分析試驗結果4	-36
圖 4.17	臺東大武公園消波塊 X 光繞射分析試驗結果4	-36

照片目錄

照片 4.1 海砂進行氯離子含量檢測之情形	5-13
照片 4.2 ELE 2000KN 抗壓機	4-14
照片 4.3 超音波脈波速度測定儀	4-14
照片 4.4 混凝土透水係數試驗儀	4-15
照片 4.5 混凝土電阻係數量測儀	4-15
照片 4.6 鋼筋腐蝕電位量測之試體灌製前之情形	4-16
照片 4.7 鋼筋腐蝕電位值量測之情形	4-16
照片 4.8 花蓮港新東堤堤身地圖狀裂縫 1	4-32
照片 4.9 花蓮港新東堤堤身地圖狀裂縫 2	4-32
照片 4.10 花蓮港航道消波塊地圖狀裂縫	4-32
照片 4.11 石梯港消波塊地圖狀裂縫	4-32
照片 4.12 新港漁港消波塊地圖狀裂縫	4-32
照片 4.13 富崗漁港堤防裂損現況	4-32
照片 4.14 臺東海濱公園消波塊地圖狀裂縫 1	4-33
照片 4.15 臺東海濱公園消波塊地圖狀裂縫 2	4-33
照片 4.16 臺東大武公園消波塊地圖狀裂縫	4-33
照片 4.17 跨越之臺九線鐵路橋平行主鋼筋方向裂縫	4-33
照片 4.18 臺九線公路橋樑橋墩裂縫 1	4-33
照片 4.19 臺九線公路橋樑橋墩裂縫 2	4-33
照片 4.20 鑽心試體中性化程度量測情形	4-34

照片 4.21	石梯港消波塊 SEM 照片	4-37
照片 4.22	臺東海濱公園消波塊 SEM 照片	4-37

第一章 前 言

臺灣四面環海,地處環太平洋地震帶上,地震發生頻繁,每年颱風 侵襲不斷,港灣設施處於此巨大外力衝擊與海水鹽份浸泡等惡劣環境 下,甚易造成港工構材諸如鋼板樁腐蝕、混凝土劣化、強度損失以及內 部鋼筋腐蝕、斷裂等之破壞現象,對港灣設施(構造物)之耐久性與安全 性威脅甚大。

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。由於臺灣四面環海, 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,臺灣地區新建之港灣設施, 諸如高雄港區第五貨櫃中心、雲林麥寮工業港及臺北港等之開發,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。

港灣混凝土構造物甚易受到海水或海風挾帶高量鹽份之侵入,造成 鋼筋混凝土構造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,因此 R.C.結構物耐久性與安全,已面臨 考驗與亟需改善。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。

近年來,國內風災、地震頻傳,許多公共工程諸如交通設施,屢遭 襲擊,一夕之間不是倒塌就是受損嚴重,構造物面臨岌岌可危、安全堪 慮的窘境。臺灣為一海島型經濟國家,對外經貿運輸主要以海運為主, 港埠設施之完善、營運正常與安全,攸關貨物之流暢與經濟發展。近幾 年來大小風災襲擊及民國 88 年 921 大地震以後,各大商、漁港之碼頭、 防波堤等設施陸續零星發生損壞,例如蘇澳港區之南外廓防波堤沉箱之 掏空塌陷、花蓮港新東防波堤胸牆之嚴重損毀,或其它突發性無預警之 損壞事例,時有所聞。因此,港灣工程結構物現況是否安全堪用,必需 明確瞭解,俾採必要之防範措施。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。

本計畫第一年期間,曾針對混凝土新材料、新工法之開發與應用, 從事相關之試驗與評估工作,研究顯示,採用微晶粉末(microsil)摻料拌 製之混凝土,硬固後其品質與耐久性有明顯提升。在鋼構造物之調查研 究部份,已完成基隆、蘇澳、臺中、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其板樁後線鋼索(條)拉桿之腐 蝕狀況之開挖鑑定,發現位於潮汐帶之鋼板樁其內側與背填土接觸面, 板樁表面有多處穿孔形成大破洞,銹蝕相當嚴重,基隆、蘇澳與臺中港 區部份碼頭鋼板樁腐蝕輕微,鋼板樁上焊接之犧牲陽極塊其表面附著一 層厚重緻密之氫氧化鋁(Al(OH)3)產物及海生物體,顯示陽極塊已發生放 電效能,量測鋼板樁腐蝕電位值達-850mV以下,鋼板樁之陰極防蝕效 應仍然有效。各部份詳細研究結果,請參閱第一年報告(編號: 92-71-750,MOTC-IOT-91-HA04)。

第二年之研究內容,仍然持續第一年之研究方向,除了進行較深入 廣泛研究外,亦因工程防蝕實務須求,增列「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, 補實陰極防蝕準則內容之完整性,亦即可適用於鋼筋混凝土及鋼(鐵)材 構造物,期盼本防蝕準則能提供相關工程單位參考採用。混凝土耐久性 試驗方面,本年度特以自充填混凝土(self-compacting concrete)之新材 料、新工法之開發與應用為研發重點,試驗顯示,自充填混凝土較一般 傳統混凝土之施工、品質及耐久性優越甚多,值得推廣應用濱海地區或 港灣工程採用。在碼頭鋼板樁腐蝕現況調查試驗,調查範圍擴及臺北、 基隆、安平、高雄港,調查結果顯示,各港碼頭鋼板樁之現況並無嚴重 腐蝕情形,陰極防蝕措施發揮功效,板(管)腐蝕速率均小於 0.1mm/yr.。 各部份詳細之研究結果,請參閱第二年報告(編號:93-62-795, MOTC-IOT-92-H1BA04; 93-61-794, MOTC-IOT-92-H1BB02-1; 93-72-7105, MOTC-IOT-92- H1BB02-2)。

本年度(第三年)研究重點如下;在碼頭鋼板樁現況調查與腐蝕防制 方法研究中,陸續進行基隆、高雄港區數座鋼構碼頭之現況調查與防蝕 效應評估。在港灣混凝土耐久性試驗計畫中,基於陸上砂石料源之短缺 或匱乏,特以海砂取代河砂並添加爐石摻料以取代部份水泥來拌製混凝 土,探討其混凝土內鋼筋之腐蝕狀況與耐久性為何?另外混凝土材料產 生, 驗質與粒料反應」之現象,亦為影響混凝土構造物耐久性重要因素 之一,國內研究文獻指出,花東地區部份河川砂石具有活性成份,因此, 花東地區之(粗)粒料及混凝土構造物之調查,亦為本年度之研究重點之 一,各項試驗調查結果,詳列述於後面章節中。

第二章 研究計畫概述

2.1 研究時程

本研究全程原始規劃自民國 91 年 1 月起至民國 94 年 12 月止,為 四年期中短程之計畫。研究期間因業務、時空與政策考量下,研究期 程之縮短為三年,計畫於民國 93 年 12 月完成。計畫執行除了依據原 始規畫內容外,亦適時調整各階段之研究方向,以因應工程實務面之 須求,相關之計畫內容與實施方法簡述於后。

2.2 計畫內容與研究方法

2.2.1 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、臺中、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,擬擴增臺南之安平新港、 臺北港、布袋商港或其它港口之碼頭鋼板樁。期待能建立完整之臺灣 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

2.2.1.1 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

2.2.1.2 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⁻、SO₄⁻²、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。

2.2.2 子計畫(二):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。臺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。

2.2.2.1 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

2.2.2.2 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.自充填混凝土之耐久相關試驗探討

- (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長期耐久性試驗

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」之檢測與防治探討

(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)

2.2.3 子計畫(三):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。但是國內土建工程建造中,採用案例不多,推究原因乃國 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。臺灣地區之鋼板(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。

2.2.3.1 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

2.2.3.2 實施方法與步驟

- 1.蒐集國外鋼版樁碼頭陰極防蝕設計規範資料(包含北歐、英、美、日 等國)。
- 2.國內外鋼版樁碼頭陰極防蝕工程成功案例說明(國內外各1例)。
- 3.陰極防蝕之安裝系統選擇 使用材料規格 設備需求 工程經費估算。
- 4.陰極防蝕安裝之標準程序(包含前處理、安裝過程,拍攝 VCR 說明示 範)。

(1)新建工程施作

(2)現有結構物施作

- 5.鋼版樁碼頭陰極防蝕設計方案(包括系統選擇、材料規格、設備需求、 工程經費估算)
- 6.陰極防蝕效應之驗收標準程序。
- 7.訂定陰極防蝕操作、系統維護管理手冊。
- 8.召開專家、業界與港務局單位座談會(與會人員 10~12 人)至少兩次, 研議適合國內需求之條件。
- 9.訂定港彎鋼構造物陰極防蝕準則草案。

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、 結構體較富彈性、耐震性強、不需要水下基礎工程 等優點,在港灣 工程中廣受應用,然而其最大的缺點為容易發生腐蝕。國內五大商港 之鋼構碼頭建造材料主要有鋼板樁及鋼管樁兩種。

由於早期國內鋼構碼頭設計時,鋼樁之腐蝕速率,多參酌日本港 灣構造物設計基準等設計準則,以 0.20 mm/yr. 為設計允許值,但不同 海域環境之鋼構材料其腐蝕速率均有差異,上述準則之設計條件與基 本假設和國內港口之海域特性應有出入,如逕行採用,是否合適,值 得進一步探討。為此,本所港研中心即於民國 79 年開始,在國內五大 港口之鋼構碼頭進行全面調查。調查結果發現,各港之鋼構碼頭其鋼 樁之腐蝕情形,以基隆港部分碼頭之鋼樁腐蝕問題較為嚴重,不僅腐 蝕速率大於允許設計值,並曾發生穿孔、破洞等情形,甚至發生碼頭 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]~[6]},而花蓮港至民國 92 年止,其碼頭之鋼板樁位於 海中帶部份未曾採用任何防蝕措施,雖腐蝕速率未超出設計允許值, 但因使用年限已超過三、四十年,且靠海床附近曾發現板樁發生彎曲 開裂之現象。歷年調查結果顯示,各港之鋼樁如採用適當之防蝕措施, 均可達到降低其腐蝕速率之效果,例如,海中帶採用犧牲陽極塊作為 防蝕工法。

為確保碼頭營運安全,本所港研中心除持續進行各港之鋼構碼頭 之鋼樁腐蝕現況調查外,並已初步完成港灣構造物安全檢測與評估與 港灣構造物陰極防蝕準則草案等研究^{[7]~[8]}。本年度(93年)將繼續選 定對象為高雄港 69號、70號鋼板樁碼頭及基隆港東8號、東9號鋼管 樁碼頭進行調查,另將彙整分析歷年調查之結果,期能提供各港務維 護單位執行碼頭安全檢測與評估之參考。

3-1

3.2 研究規劃與調查方法

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。



3.2.3 檢測範圍

本年度檢測範圍;高雄港 69 號、70 號鋼板樁碼頭及基隆港東 8 號、東9號鋼管樁碼頭。

3.2.4 鋼板(管)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

高雄港 69號 70號碼頭自起點每3公尺選取1支鋼板樁為厚度檢 測測樁。基隆港東8號、東9號碼頭之鋼管樁為每一單元選取3排共8 支測樁(每一碼頭各有8個單元)。

2. 選定水深與量測位置

依鋼構碼頭之鋼樁腐蝕可能狀況及測樁位於海中帶之長度範圍, 每支測樁選定二至十點水深作為量測點。U型鋼板樁檢測凸面或凹面 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。

3. 厚度量測過程

(1)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,由探頭傳送出之一彈性波,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。 厚度計算可由下列數學式求得:

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

式中V:超音波在鋼材中之傳播速度(5920 m/sec)

S_i:鋼材厚度讀數(mm)

t_{i+1},t_i:探頭接受回聲及初始傳播的時間

(2)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。

(3)海生物敲除厚度量測

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 淨之鋼樁表面,即可讀取鋼樁厚度。於每一水深測點量取兩次鋼樁厚 度,平均後即為其現有厚度。

4. 腐蝕速率計算

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

腐蝕速率 = 腐蝕量 / 使用年期

= (原始厚度-現有厚度) / 使用年期 (公式 3.2)

3.2.4.3 鋼樁保護電位量測

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

防蝕效果的判斷標準如表 3.1 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 -850 mV 為"正",則表示保護不足或防蝕效果不 佳。

表 3.1 海水中鋼構造物之防蝕保護電位標準^[10]

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

3.2.5 陽極塊調查

3.2.5.1 選定陽極塊

陽極塊調查數量分別為高雄港 69 號碼頭選定 14 支、70 號碼頭選 定 26 支,基隆港東 8 號、東 9 號碼頭各選定 20 支。

3.2.5.2 陽極塊發生電位之量測

- 酒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。

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。

3.2.5.5 陽極塊釋出電流量測

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。

3.3 結果與討論

3.3.1 碼頭構造物背景資料分析

高雄港 69 號 70 號碼頭(鋼板樁)及基隆港東 & 東 9 號碼頭(鋼 管樁)等構造物,其背景資料如表 3.2 所示,港口潮位資料如表 3.3 所 示。

碼頭名稱	長度	水深	鋼板(管)樁	原始厚度	完 工	防命虚田
	(m)	(m)	型式	(mm)	日期(年)	別既処埕
高雄港 69 號	320	-14	FSP 6L U 型鋼板樁	27.6	民國 68	犧牲陽極
高雄港 70 號	320	-14	FSP 6L U 型鋼板樁	27.6	民國 68	犧牲陽極
基隆港東8	240	-12	鋼管樁	12	民國 84	犧牲陽極法
基隆港東9	240	-12	鋼管樁	12	民國 79	犧牲陽極法

表 3.2 鋼板 (管) 樁碼頭構造物背景資料

表 3.3 基隆港、高雄港之潮位資料

港口 潮位	基隆港	高雄港
最高高潮位 H.H.W.L	+2.31	+1.50
平均高潮位 M.H.W.L	+1.16	+0.95
平均潮位 M.W.L	+0.89	+0.74
平均低潮位 M.L.W.L	+0.63	+0.53
低潮位 L.W.L	-0.25	+0.11

3.3.2 鋼板樁現況檢測

3.3.2.1 高雄港 69 號碼頭

本座碼頭於民國 68 年完工,水深-14 公尺,碼頭全長 320 公尺, 採用 FSP-6L U 型組合之鋼板樁建造,鋼板樁於完工後即安裝犧牲陽極 塊作為防蝕措施,整支鋼板樁均位於海水中。碼頭平面位置、結構斷 面、使用鋼板樁型式分別示如圖 3.2 至圖 3.4。



圖 3.2 高雄港 69 號、70 號鋼板樁碼頭平面佈置



圖 3.3 高雄港 69 號碼頭結構斷面



圖 3.4 FSP 6L U 型鋼板樁 BOX 型式

1.目視檢測

本座碼頭鋼板樁均位於海水中,表面附著許多海生物,無明顯銹 蝕現象,圖 3.5 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 3.5 海生物敲除後之鋼板樁表面

2.鋼板樁厚度

圖 3.6 為 69 號碼頭鋼板樁厚度量測水深示意圖,於自起點起每 3 公尺取 1 支測樁,共選取 107 支測樁。每支測樁檢測水深分別為 +0.1 m、-1.0 m、-2.0 m、-3.0 m、-4.0 m、-6.0 m、-8.0 m、-10.0 m、-11.0 m、 -12.0 m,計 10 個深度測點,檢測點共計 1070 點。


圖 3.6 高雄港 69 碼頭鋼板樁厚度量測水深示意圖

表 3.4 及圖 3.7 為 69 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約為 0.02 mm/yr.左右,遠小於腐蝕設計 允許值(0.20 mm/yr.),各測樁之每一測點之腐蝕速率均小於設計允許 值;鋼板樁使用時間雖已 25 年,現有厚度僅少數測點為 26.0 mm,最 大減少厚度約 1.6 mm,換算為腐蝕速率約 0.05 mm/yr., 腐蝕程度屬 輕微,顯然安裝犧牲陽極塊已達到防蝕之目的。

水深(m)	+0.1	-1.0	-2.0	-3.0	-4.0	-6.0	-8.0	-10.0	-11.0	-12.0
腐蝕速率 (mm/yr.)	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02

表 3.4 高雄港 69 號碼頭鋼板樁平均腐蝕速率



圖 3.7 高雄港 69 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

鋼板樁保護電位量測位置如圖 3.8,量測結果列於表 3.5。保護電位 最大值為 -917 mV,最小值為 -1030 mV,均小於-850 mV(以 Cu/CuSO4電極量測),鋼板樁處於防蝕保護狀態。



表 3.5 高雄港 69 號碼頭鋼板樁保護電位值

單位: mV

纪宅		水深	(m)		紽蜛		水深	(m)	
利用した	-1.0	-4.0	-7.0	-10.0	利用力元	-1.0	-4.0	-7.0	-10.0
1	-971	-976	-975	-976	31	-1004	-998	-999	-999
2	-956	-961	-961	-961	32	-936	-936	-926	-917
3	-971	-979	-979	-979	33	-987	-988	-991	-994
4	-993	-1013	-1018	-1027	34	-966	-973	-974	-973
5	-993	-1009	-1017	-1016	35	-965	-978	-972	-972
6	-991	-1000	-1010	-1009	36	-945	-956	-961	-962
7	-996	-1012	-1023	-1018	37	-939	-960	-951	-959
8	-973	-989	-989	-989	38	-936	-959	-973	-976
9	-986	-997	-995	-993	39	-962	-973	-967	-984
10	-990	-1008	-1020	-1017	40	-957	-973	-962	-962
11	-1003	-1009	-1014	-961	41	-963	-966	-964	-968
12	-976	-1000	-1008	-1018	42	-984	-976	-980	-979
13	-996	-1024	-1017	-1009	43	-983	-988	-980	-990
14	-991	-1001	-999	-1002	44	-979	-985	-994	-998
15	-1019	-1012	-1023	-1029	45	-990	-980	-984	-985
16	-995	-1009	-1015	-1014	46	-960	-968	-973	-979
17	-988	-1010	-1006	-1008	47	-958	-967	-964	-971
18	-997	-1016	-1010	-1008	48	-969	-977	-974	-979
19	-1011	-1023	-1027	-1026	49	-964	-968	-971	-975
20	-1015	-1023	-1019	-1021	50	-960	-966	-969	-980
21	-1018	-1012	-1017	-1030	51	-960	-967	-974	-981
22	-1011	-1010	-1002	-1004	52	-975	-973	-970	-991
23	-984	-1000	-994	-994	53	-972	-984	-983	-989
24	-973	-984	-983	-984	54				
25	-966	-970	-971	-974	55				
26	-984	-982	-999	-1005	56				
27	-999	-999	-1004	-1002	57				
28	-991	-1005	-1013	-1019	58				
29	-1003	-1002	-1011	-1010	59				
30	-991	-1006	-1005	-1007	60				

3.3.2.2 高雄港 70 號碼頭

本座碼頭亦於民國 68 年完工,水深 -14 公尺,碼頭全長 320 公尺, 採用 FSP 6L 之 U 型鋼板樁建造,整支鋼板樁均位於海水中。碼頭結 構斷面、鋼板樁型式與 69 號碼頭相同。

1.目視檢測

鋼板樁表面附著許多海生物,無明顯銹蝕現象,海生物敲除後, 鋼板樁表面外觀仍然保持光亮。

2.鋼板樁厚度量測

圖 3.9 為 70 號碼頭鋼板樁厚度量測位置示意圖,自起點起每 3 公尺 取 1 支測樁,共選取 123 支測樁。每支測樁檢測水深分別為 +0.1 m、 -1.0 m、-2.0 m、-3.0 m、-4.0 m、-6.0 m、-8.0 m、-10.0 m、-11.0 m、-12.0 m,計 10 個深度測點,檢測點共計 1230 點。



圖 3.9 高雄港 70 號碼頭鋼板樁厚度量測位置示意圖

表 3.6 及圖 3.10 為 70 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為 0.02 0.03 mm/yr.,遠小於設計允許 值。各測樁現有厚度最小值為 25.4 mm,最大減少厚度約 2.2 mm,腐 蝕程度亦屬輕微,顯示安裝犧牲陽極塊已達到防蝕之目的。

水深(m)	+0.1	-1.0	-2.0	-3.0	-4.0	-6.0	-8.0	-10.0	-11.0	-12.0
腐蝕速率 (mm/yr.)	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02

表 3.6 高雄港 70 號碼頭鋼板樁平均腐蝕速率



Corrosion rate (mm/yr.)

圖 3.10 高雄港 70 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

鋼板樁保護電位量測位置如圖 3.11,量測結果列於表 3.7。保護電 位最大值為 -892 mV,最小值為 -993 mV,保護電位均小於-850 mV (以 Cu/CuSO4電極量測),鋼板樁處於防蝕保護狀態。



圖 3.11 高雄港 70 號碼頭鋼板樁保護電位檢測位置示意圖

表 3.7 高雄港 70 號碼頭鋼板樁保護電位值

單位: mV

编驰		水深	(m)		编號		水深	(m)	
저에 그//	-1.0	-4.0	-7.0	-10.0	저빠 그//Ն	-1.0	-4.0	-7.0	-10.0
1	-980	-990	-993	-990	36	-950	-965	-953	-956
2	-982	-988	-982	-960	37	-937	-965	-949	-956
3	-951	-962	-968	-970	38	-948	-950	-962	-964
4	-971	-979	-978	-984	39	-934	-962	-954	-956
5	-960	-971	-963	-959	40	-934	-940	-956	-953
6	-942	-951	-952	-958	41	-932	-945	-940	-942
7	-935	-951	-948	-946	42	-929	-924	-932	-932
8	-979	-962	-958	-958	43	-924	-954	-941	-943
9	-951	-973	-972	-963	44	-941	-944	-954	-950
10	-957	-958	-953	-959	45	-928	-943	-937	-945
11	-969	-963	-992	-966	46	-948	-931	-938	-944
12	-974	-967	-974	-972	47	-913	-929	-932	-933
13	-920	-927	-929	-936	48	-914	-924	-934	-931
14	-919	-936	-926	-931	49	-900	-929	-934	-933
15	-934	-945	-939	-939	50	-892	-923	-931	-943
16	-938	-959	-950	-957	51	-915	-948	-930	-928
17	-954	-954	-963	-962	52	-902	-923	-952	-936
18	-945	-950	-947	-951	53	-912	-915	-933	-946
19	-939	-962	-962	-953	54	-927	-921	-931	-932
20	-924	-931	-941	-943	55	-906	-943	-928	-926
21	-925	-926	-925	-928	56	-928	-924	-943	-942
22	-895	-916	-924	-932	57	-916	-924	-927	-948
23	-931	-954	-957	-965	58	-911	-934	-927	-956
24	-930	-968	-973	-970	59	-925	-934	-941	-941
25	-921	-934	-934	-934	60	-952	-978	-967	-977
26	-959	-960	-954	-959	61	-926	-929	-923	-922
27	-915	-934	-943	-934	62	-920	-941	-936	-932
28	-921	-947	-943	-936	63	-922	-949	-947	-955
29	-944	-943	-947	-948	64	-924	-945	-940	-938
30	-943	-958	-959	-959	65	-935	-940	-960	-952
31	-952	-958	-958	-956	66	-952	-969	-967	-960
32	-965	-975	-977	-977	67	-960	-977	-987	-987
33	-958	-973	-976	-969					
34	-955	-964	-963	-964					
35	-950	-959	-956	-969					

3.3.2.3 基隆港東8號碼頭

本座碼頭原為鋼板樁結構型式,民國 82 年因營運需要,自原有碼 頭岸線向海側延伸 20 公尺,設計水深 -12.0 m,採棧橋式鋼管樁結構, 碼頭全區共分為 8 個單元,每一單元各打設 8 排鋼管樁,於民國 84 年 完工,潮汐帶部位之鋼管樁以混凝土保護,海中帶採用犧牲陽極塊法 作為防蝕措施,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。碼頭平面佈置、結構斷面及單元管樁配置平 面分別示於圖 3.12 至圖 3.13。



圖 3.12 基隆港碼頭平面佈置圖



圖 3.13 基隆港東 8 號碼頭鋼管樁結構斷面

1.目視檢測

潮汐帶部位之鋼管樁以混凝土包覆保護,外觀無孔蝕或破洞等嚴 重之腐蝕,潮汐帶及海中帶之鋼管樁表面附著許多如牡蠣、籐壺等大 型海生物,如圖 3.14 所示。



圖 3.14 基隆港東 8 號碼頭鋼管樁表面海生物附著之情形

2.鋼管樁厚度

厚度測樁選定全區碼頭之每一單元之第3及第5排自海測算起第1 支樁,及第4排自海測算起第1至第6支樁為測樁,每支測樁依其所 處實際水深,檢測水深為-1.5 m、-2.0 m、-3.0 m、-4.0 m、-5.0 m、 -7.0 m、-9.0 m及-10.0 m 等2至8個不同水深測點,每一單元之鋼管 樁檢測位置及水深如圖 3.15 所示。



圖 3.15 基隆港東 8 號碼頭各單元鋼管樁厚度測樁位置及水深

表 3.8 及圖 3.16 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 0.04 至 0.05 mm/yr. 之間。單一測樁之最大 腐蝕速率多發生於水深 -1.5 m 及 -2.0 m 處,腐蝕速率為 0.10 mm/yr.,低於設計允許值,腐蝕程度屬於輕微。

水深(m)	-1.5	-2.0	-3.0	-4.0	-5.0	-7.0	-9.0	-10.0
腐蝕速率	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04
(mm/yr.)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04

表 3.8 基隆港東 8 號碼頭鋼管樁之平均腐蝕速率



Corrosion rate (mm/yr.)

圖 3.16 基隆港東 8 號碼頭鋼管樁之平均腐蝕速率與水深之關係

3.鋼管樁保護電位

本座碼頭之鋼管樁保護電位選定各單元之第 2 至第 4 排樁之前 3 支樁(自海測算起),量測水深為 -1.0 m、 -4.0 m、 -7.0 m 及-10.0 m, 量測位置如圖 3.17,量測結果列於表 3.9。保護電位最大值為 -1016 mV,最小值為 -1088 mV,4 小於 -850 mV (以 Cu/CuSO4 電極量測) 標準防蝕保物電位值,管樁處於防蝕保護狀態。



圖 3.17 基隆港東 8 號碼頭鋼管樁保護電位量測位置示意圖

表 3.9 基隆港東 8 號碼頭鋼管樁保護電位值

____ (單位:mV)

檢測	编號		水深	(m)		檢測	编號		水深	(m)	-
位置	ᆘᆘᄪ᠕ᠾ	-1.0	-4.0	-7.0	-10.0	位置	<i>ի</i> կm J//Ն	-1.0	-4.0	-7.0	-10.0
	1	-1053	-1050	-1051	-1054		1	-1036	-1036	-1033	-1034
8A-2	2	-1064	-1057	-1054	-1055	8E-2	2	-1064	-1057	-1054	-1055
	3	-1086	-1088	-1087	-1087		3	-1086	-1088	-1087	-1087
	1	-1052	-1043	-1039	-1043		1	-1052	-1043	-1039	-1043
8A-3	2	-1069	-1066	-1055	-1048	8E-3	2	-1069	-1066	-1055	-1048
	3	-1066	-1056	-1054	-1057		3	-1066	-1056	-1054	-1057
	1	-1029	-1032	-1030	-1026		1	-1029	-1032	-1030	-1026
8A-4	2	-1033	-1035	-1034	-1033	8E-4	2	-1033	-1035	-1034	-1033
	3	-1034	-1035	-1034	-1034		3	-1034	-1035	-1034	-1034
	1	-1028	-1026	-1031	-1036		1	-1028	-1026	-1031	-1036
8B-2	2	-1031	-1031	-1032	-1033	8F-2	2	-1031	-1031	-1032	-1033
	3	-1029	-1029	-1030	-1033		3	-1029	-1029	-1030	-1033
	1	-1019	-1017	-1017	-1020		1	-1019	-1017	-1017	-1020
8B-3	2	-1033	-1031	-1028	-1027	8F-3	2	-1033	-1031	-1028	-1027
	3	-1035	-1034	-1034	-1033		3	-1035	-1034	-1034	-1033
	1	-1019	-1026	-1022	-1016		1	-1019	-1026	-1022	-1016
8 B -4	2	-1033	-1026	-1023	-1026	8F-4	2	-1033	-1026	-1023	-1026
	3	-1036	-1032	-1030	-1029		3	-1036	-1032	-1030	-1029
	1	-1034	-1034	-1033	-1035		1	-1034	-1034	-1033	-1035
8C-2	2	-1041	-1041	-1038	-1035	8G-2	2	-1041	-1041	-1038	-1035
	3	-1041	-1039	-1039	-1041		3	-1041	-1039	-1039	-1041
	1	-1031	-1033	-1040	-1038		1	-1031	-1033	-1040	-1038
8C-3	2	-1045	-1043	-1041	-1039	8G-3	2	-1045	-1043	-1041	-1039
	3	-1046	-1043	-1041	-1040		3	-1046	-1043	-1041	-1040
	1	-1034	-1039	-1035	-1031		1	-1034	-1039	-1035	-1031
8C-4	2	-1039	-1039	-1036	-1036	8G-4	2	-1039	-1039	-1036	-1036
	3	-1048	-1041	-1036	-1035		3	-1048	-1041	-1036	-1035
	1	-1033	-1033	-1033	-1033		1	-1033	-1033	-1033	-1033
8D-2	2	-1033	-1033	-1031	-1033	8H-2	2	-1033	-1033	-1031	-1033
	3	-1033	-1034	-1033	-1033		3	-1033	-1034	-1033	-1033
	1	-1032	-1031	-1033	-1033	a== -	1	-1032	-1031	-1033	-1033
8D-3	2	-1042	-1041	-1036	-1034	8H-3	2	-1042	-1041	-1036	-1034
	3	-1042	-1041	-1040	-1040		3	-1042	-1041	-1040	-1040
	1	-1039	-1039	-1047	-1040		1	-1039	-1039	-1047	-1040
8D-4	2	-1048	-1046	-1041	-1038	8H-4	2	-1048	-1046	-1041	-1038
	3	-1039	-1040	-1038	-1037		3	-1039	-1040	-1038	-1037

3.3.2.4 基隆港東9號碼頭

本座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-12.0 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,每支鋼管樁於水深-2.0 及-7.0 m (或-4.5m) 處安裝 2 支陽極塊。碼頭結構斷面及各單元之平面配置,如圖 3.12 及 圖 3.13 所示(同東 8 號碼頭)。

1.目視檢測

本座碼頭潮汐帶部位之鋼管樁以混凝土包覆保護,如圖 3.18 所 示。海中帶則分為防蝕與未防蝕等兩區,防蝕區(A D單元)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 3.19 所示。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(E H單元)之鋼管樁表面清除覆 著之藤壺等海生物後,發現一層紅橙色銹層,顯示鋼樁表面已出現銹 蝕現象,如圖 3.20 所示,而防蝕區之鋼管樁則表面光亮,腐蝕程度輕 微至無,如圖 3.21 所示。



圖 3.18 潮汐帶以混凝土保護鋼管樁之情形



圖 3.19 各鋼管樁間以鋼筋焊接連通之情形



圖 3.20 未防蝕區之鋼管樁表面腐蝕情形



圖 3.21 防蝕區之鋼管樁表面現況

2.鋼板樁厚度

厚度測樁選定全區碼頭之每一單元之第3及第5排自海測算起第1 支樁,及第4排自海測算起第1至第6支樁為測樁,每支測樁依其所 處實際水深,檢測水深為-1.5 m, -2.0 m, -3.0 m, -4.0 m, -5.0 m, -7.0 m, -9.0 m及-10.0 等2至8個不同水深測點,各單元之鋼管樁檢 測位置及水深(同東8號碼頭),如圖3.15 所示。

表 3.10 及圖 3.22 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 0.07 至 0.10 mm/yr. 之間,均小於允許設計 值。防蝕區(A D單元)各測樁腐於水深 -1.5 m 至-3.0 m 處之測樁 腐蝕速率較大;靠海測第 6 排之鋼樁之腐蝕速率明顯又大於其他各排 鋼樁。此外,D單元之單一測樁之最大腐蝕速率達 0.13 mm/yr.,已接 近未防蝕區之各單元者,可能原因為其接近未防蝕區或安裝時間較晚。

未防蝕區(E H 單元) 各測樁於水深 -1.5 m 及 -3.0 m 處,大值 為 0.14 mm/yr.,腐蝕速率雖低於設計允許值,但敲除鋼樁表面覆著 之海生物後,發現有一層紅棕色銹斑,顯示腐蝕之生成產物已開始產 生,應注意後續狀況。

3.保護電位量測

本座碼頭各單元鋼管樁保護電位量測位置示意圖,如圖 3.17(同 東8號碼頭),防蝕區(A~D單元)之量測結果列於表 3.11,保護電位 最大值為 –955 mV,最小值為 -1028 mV,均小於 -850 mV,鋼管樁 處於防蝕狀態。

表 3.12 為未防蝕區 (E~H 單元)之量測結果,各單元之鋼樁保護 電位介於-791 -665 mV 之間,均大於-850 mV,鋼管樁均處於腐蝕 狀態。其中 E 單元因臨防蝕區較近,鋼管樁之保護電位(-791 -739 mV)稍小於 F、G、H 單元(-698 -665 mV)。

水深(m)	-1.5	-2.0	-3.0	-4.0	-5.0	-7.0	-9.0	-10.0	備註
腐蝕速率 (mm/yr.)	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	防蝕區 (A~D)
	0.10	0.10	0.10	0.10	0.09	0.09	0.08	0.08	未防蝕區 (E~H)

表 3.10 基隆港東 9 號碼頭鋼板樁平均腐蝕速率



Corrosion rate (mm/yr.)

圖 3.22 基隆港東 10 號碼頭鋼板樁平均腐蝕速率與水深之關係

表 3.11 基隆港東 9 號碼頭鋼管樁保護電位值 (1) _____單位:mV

檢測	伯忠	水深(m)							
位置	利用万元	-1.0	-4.0	-7.0	-10.0				
	1	-960	-960	-959	-961				
9A-2	2	-955	-956	-958	-959				
	3	-956	-957	-957	-968				
	1	-960	-971	-977	-971				
9A-3	2	-977	-979	-977	-971				
	3	-975	-975	-976	-980				
	1	-1008	-1028	-1000	-986				
9A-4	2	-985	-987	-979	-977				
	3	-987	-989	-978	-978				
	1	-989	-987	-992	-989				
9B-2	2	-979	-982	-984	-987				
	3	-980	-977	-977	-980				
	1	-985	-986	-984	-981				
9B-3	2	-976	-976	-976	-978				
	3	-978	-978	-980	-979				
9 B -4	1	-973	-975	-976	-978				
	2	-979	-980	-980	-979				
	3	-978	-979	-981	-982				
	1	-986	-992	-993	-986				
9C-2	2	-977	-981	-982	-982				
	3	-977	-978	-977	-977				
	1	-980	-981	-986	-985				
9C-3	2	-984	-997	-1003	-987				
	3	-977	-973	-974	-973				
	1	-974	-982	-983	-980				
9C-4	2	-975	-978	-981	-985				
	3	-976	-975	-971	-972				
	1	-979	-1004	-995	-993				
9D-2	2	-970	-977	-985	-990				
	3	-970	-971	-969	-968				
	1	-974	-975	-981	-976				
9D-3	2	-977	-980	-988	-990				
	3	-976	-980	-974	-977				
	1	-960	-966	-975	-980				
9D-4	2	-973	-975	-979	-979				
	3	-976	-975	-976	-977				

表 3.12 基隆港東 9 號碼頭鋼管樁保護電位值 (2) ____單位:mV

檢測	编辑				
位置	利用 刀几	-1.0	-4.0	-7.0	-10.0
	1	-776	-777	-791	-791
9E-2	2	-787	-788	-789	-790
	3	-786	-786	-788	-786
	1	-775	-770	-767	-762
9E-3	2	-762	-761	-762	-762
	3	-756	-757	-756	-754
	1	-756	-757	-757	-756
9E-4	2	-747	-749	-749	-750
	3	-739	-740	-740	-740
	1	-691	-690	-690	-690
9F-2	2	-683	-684	-685	-690
	3	-682	-677	-678	-680
	1	-690	-687	-687	-686
9F-3	2	-681	-681	-682	-683
	3	-677	-677	-677	-676
	1	-680	-680	-680	-679
9F-4	2	-683	-681	-682	-687
	3	-688	-688	-689	-690
	1	-676	-673	-673	-670
9G-2	2	-675	-672	-670	-669
	3	-675	-674	-676	-678
	1	-677	-679	-680	-678
9G-3	2	-669	-672	-674	-675
	3	-668	-665	-667	-666
	1	-676	-676	-678	-681
9G-4	2	-671	-672	-672	-675
	3	-675	-674	-671	-672
	1	-691	-690	-689	-689
9H-2	2	-684	-685	-685	-686
	3	-683	-681	-681	-681
	1	-691	-691	-691	-690
9H-3	2	-685	-688	-688	-688
	3	-684	-684	-684	-685
	1	-698	-698	-698	-698
9H-4	2	-692	-692	-692	-693
-	3	-688	-687	-688	-687

3.3.3 陽極塊調查

陽極塊調查範圍包括高雄港 69、70 號碼頭及基隆東 8、東 9 號碼 頭,高雄港 69 檢測 14 支,70 號碼頭檢測 26 支(與 69 號碼頭銜接段 14 支,轉角接 71 號碼頭部份 12 支),基隆東 8、東 9 號碼頭均檢測 20 支陽極塊,總計 80 支。

高雄港 69、70 號碼頭於民國 68 年完工時已安裝陽極塊作為防蝕 措施,民國 84 年考量原有陽極塊消耗情形及剩餘重量不多,且使用時 間已接近設計年限,全部予以更新。陽極塊安裝位置及方式如圖 3.23 及圖 3.24 所示,安裝水深為 -2.0m、 -5.5m、-9.0m 及-12.5m 等,每 14 支陽極塊為一排列單元。陽極塊尺寸為(210+250)×250之梯形斷 面,全長 1150 cm、圖 3.25 則為 70 號碼頭於轉角段(#70A,全長 50 m) 之陽極塊安裝位置及方式,於第 1 支及每間隔 2 支後之鋼板樁上,各 安裝 4 支陽極塊後,安裝水深亦為 -2.0m、 -5.5m、-9.0m 及-12.5m。



圖 3.23 高雄港 69、70 號碼頭陽極塊配置



圖 3.24 高雄港鋼板樁碼頭陽極塊安裝示意及電位測試裝置



基隆東 8 號碼頭鋼管樁於民國 84 年安裝犧牲陽極塊作為防蝕措施,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,陽極塊安裝位置及型式如圖 3.26 及圖 3.27 所示,各單元之陽極塊平面配置示如圖 4.56。陽極塊尺寸包括 a 型:(225+265) × 250× 650 cm 及 b 型:(190+230) × 210× 1150 cm 兩種型式,每支淨重分別約 101、135 公斤(不含鐵蕊重)。調查選定 A 及 H 單元之第 2 排樁靠海側前 3 支鋼管樁(L1 L3),及第 3 排靠海側前 2 支鋼管樁(L1 L2),即各 10 支陽極塊(A 單元陽極塊:a型;H 單元陽極塊:b型),合計檢測 20 支陽極塊。

基隆港東9號碼頭全區鋼管樁計有4個單元未採取防蝕措施,另4 個單元則安裝犧牲陽極塊以保護鋼管樁,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)× 210×1150 cm,每支淨重約135 公斤(不含鐵蕊重)。調查選定A單元 之第2至第4排樁靠海側前3支鋼管樁(L1 L3),第3及第5排樁靠 海側前2支鋼管樁(L1 L2),合計檢測20支陽極塊。陽極塊安裝方 式及位置與平面配置,同東8號碼頭。



圖 3.26 基隆港東 8、東9號碼頭陽極塊安裝位置



圖 3.27 基隆港東 8 號碼頭陽極塊規格及安裝位置

3.3.3.1 陽極塊發生電位

量測時,以高阻抗之數位電錶探棒之一端接觸於鋼板樁連結之不 電位測試棒上,另一端探棒則連接銅/硫酸銅電極,並置於欲量測位置 旁,量測位置選在陽極塊上中下三等份處。

1.高雄港 69 碼頭

陽極塊發生電位量測結果如表 3.13 所示。切割前其發生電位最大 值為 -1012 mV,最小值為 -1063 mV,焊接後最大值為 -1086 mV, 最小值為 -1205 mV,均釋出足夠之防蝕保護電位。

		生電位((mV,vs	. Cu/CuS	O ₄ 電極)	
陽極塊編號		切割前			焊接後		備註
	上	中	下	上	中	下	
69-1	-1048	-1048	-1063	-1200	-1204	-1205	
69-2	-1019	-1020	-1017	-1183	-1180	-1200	
69-3	-1018	-1018	-1012	-1204	-1205	-1114	
69-4	-1038	-1037	-1016	-1113	-1113	-1119	
69-5	-1034	-1033	-1035	-1102	-1103	-1089	
69-6	-1021	-1018	-1037	-1093	-1086	-1113	
69-7	-1016	-1034	-1033	-1113	-1113	-1119	
69-8	-1016	-1034	-1033	-1102	-1103	-1089	
69-9	-1035	-1042	-1040	-1093	-1200	-1204	
69-10	-1038	-1037	-1016	-1113	-1113	-1119	
69-11	-1034	-1033	-1035	-1102	-1103	-1089	
69-12	-1021	-1018	-1037	-1093	-1086	-1113	
69-13	-1016	-1034	-1033	-1113	-1113	-1119	
69-14	-1016	-1034	-1033	-1102	-1103	-1089	
最大發生電位		-1012			-1086		
最小發生電位		-1063			-1205		

表 3.13 高雄港 69 碼頭陽極塊發生電位量測結果

2.高雄港 70 碼頭

本座碼頭陽極塊發生電位量測結果如表 3.14 所示,切割前發生電 位最大值為 -1033 mV,最小值為 -1101 mV,焊接後最大值為 -1001 mV,最小值為 -1037 mV(小於切割前之電位,可能為量測時,陽極 塊尚未充分發揮釋出電壓),但均釋出足夠之防蝕保護電位。。

		生電位((mV,vs	. Cu/CuS	O ₄ 電極)	
陽極塊編號		切割前			焊接後		備註
	上	中	下	上	中	下	
70-1	-1089	-1091	-1044	-1001	-1002	-1013	
70-2	-1063	-1062	-1062	-1031	-1037	-1026	
70-3	-1066	-1062	-1057	-1035	-1023	-1015	
70-4	-1056	-1060	-1059	-1028	-1035	-1024	
70-5	-1059	-1069	-1069	-1023	-1020	-1020	
70-6	-1058	-1057	-1055	-1028	-1013	-1007	
70-7	-1045	-1038	-1042	-1002	-1009	-1008	
70-8	-1042	-1041	-1041	-1018	-1022	-1015	
70-9	-1043	-1035	-1033	-1024	-1018	-1020	
70-10	-1052	-1053	-1042	-1015	-1011	-1011	
70-11	-1045	-1046	-1047	-1018	-1007	-1015	
70-12	-1037	-1039	-1040	-1022	-1024	-1018	
70-13	-1042	-1047	-1042	-1012	-1011	-1005	
70-14	-1036	-1037	-1041	-1017	-1016	-1011	
70A-1	-1096	-1100	-1099	-1024	-1023	-1026	
70A -2	-1083	-1083	-1089	-1024	-1026	-1024	
70A -3	-1096	-1094	-1095	-1017	-1023	-1023	
70A -4	-1101	-1101	-1100	-1028	-1031	-1035	
70A -5	-1090	-1096	-1096	-1003	-1008	-1003	
70A -6	-1096	-1101	-1098	-1011	-1017	-1010	
70A -7	-1103	-1098	-1096	-1026	-1017	-1018	
70A -8	-1091	-1090	-1091	-1006	-1007	-1005	
70A -9	-1092	-1096	-1094	-1005	-1005	-1001	
70A -10	-1078	-1080	-1078	-1009	-1010	-1010	
70A -11	-1079	-1083	-1080	-1014	-1015	-1016	
70A -12	-1099	-1101	-1096	-1016	-1018	-1003	
最大發生電位	-1033						
最小發生電位		-1103			-1037		

表 3.14 高雄港 70 碼頭陽極塊發生電位量測結果

3.基隆港東8號碼頭

本座碼頭陽極塊發生電位量測結果如表 3.15 所示,切割前發生電 位最大值為 -1028 mV,最小值為 -1062 mV,焊接後最大值為 -1037 mV,最小值為 -1142 mV,均釋出足夠之防蝕保護電位。。

)						
陽極塊編號		切割前			焊接後		備註	
	上	中	下	Ъ	中	下		
E8-A1	-1058	-1046	-1034	-1123	-1120	-1115		
E8-A2	-1043	-1045	-1034	-1110	-1114	-1123		
E8-A3	-1043	-1045	-1038	-1123	-1119	-1119		
E8-A4	-1047	-1045	-1039	-1128	-1122	-1110		
E8-A5	-1033	-1032	-1028	-1092	-1099	-1103		
E8-A6	-1038	-1039	-1037	-1125	-1137	-1142		
E8-A7	-1046	-1043	-1034	-1142	-1135	-1127		
E8-A8	-1042	-1041	-1032	-1118	-1121	-1113		
E8-A9	-1047	-1040	-1033	-1130	-1139	-1128		
E8-A10	-1044	-1042	-1037	-1114	-1118	-1112		
E8-H1	-1049	-1046	-1043	-1071	-1068	-1056		
E8-H2	-1052	-1052	-1042	-1071	-1074	-1061		
E8-H3	-1045	-1046	-1047	-1057	-1069	-1059		
E8-H4	-1050	-1052	-1051	-1079	-1093	-1082		
E8-H5	-1049	-1047	-1042	-1049	-1064	-1067		
E8-H6	-1040	-1046	-1036	-1037	-1050	-1037		
E8-H7	-1039	-1040	-1040	-1100	-1081	-1059		
E8-H8	-1045	-1048	-1042	-1040	-1038	-1075		
E8-H9	-1062	-1062	-1054	-1088	-1073	-1074		
E8-H10	-1048	-1050	-1045	-1073	-1071	-1042		
最大發生電位	-1028			-1037				
最小發生電位		-1062			-1142			

表 3.15 基隆港東 8 碼頭陽極塊發生電位量測結果

4.基隆港東9號碼頭

本座碼頭陽極塊發生電位量測結果如表 3.16 所示,切割前發生電 位最大值為 -1028 mV,最小值為 -1062 mV,焊接後最大值為 -1037 mV,最小值為 -1142 mV,均釋出足夠之防蝕保護電位。

	教						
陽極塊編號	切割前				備註		
	上	中	下	上	中	下	
E8-A1	-1058	-1046	-1034	-1123	-1120	-1115	
E8-A2	-1043	-1045	-1034	-1110	-1114	-1123	
E8-A3	-1043	-1045	-1038	-1123	-1119	-1119	
E8-A4	-1047	-1045	-1039	-1128	-1122	-1110	
E8-A5	-1033	-1032	-1028	-1092	-1099	-1103	
E8-A6	-1038	-1039	-1037	-1125	-1137	-1142	
E8-A7	-1046	-1043	-1034	-1142	-1135	-1127	
E8-A8	-1042	-1041	-1032	-1118	-1121	-1113	
E8-A9	-1047	-1040	-1033	-1130	-1139	-1128	
E8-A10	-1044	-1042	-1037	-1114	-1118	-1112	
E8-H1	-1049	-1046	-1043	-1071	-1068	-1056	
E8-H2	-1052	-1052	-1042	-1071	-1074	-1061	
E8-H3	-1045	-1046	-1047	-1057	-1069	-1059	
E8-H4	-1050	-1052	-1051	-1079	-1093	-1082	
E8-H5	-1049	-1047	-1042	-1049	-1064	-1067	
E8-H6	-1040	-1046	-1036	-1037	-1050	-1037	
E8-H7	-1039	-1040	-1040	-1100	-1081	-1059	
E8-H8	-1045	-1048	-1042	-1040	-1038	-1075	
E8-H9	-1062	-1062	-1054	-1088	-1073	-1074	
E8-H10	-1048	-1050	-1045	-1073	-1071	-1042	
最大發生電位	-1028						
最小發生電位		-1062					

表 3.16 基隆港東 9 碼頭陽極塊發生電位量測結果

3.3.3.2 陽極塊外觀檢視及重量耗損

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,檢視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,完成後,再焊回原處。

1.高雄港 69 號碼頭

本座碼頭共切割 14 支陽極塊,陽極塊表面附著許多海草、藤壺、 海蟲等海生物,外觀與原有比較仍十分完整,消耗輕微。除去附著海 生物後,表面反應產物主要為白色之氫氧化鋁(Al(OH)₃),為鋁合 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,側面部位之消耗較大,有凹陷之現象。

陽極塊現有尺寸紀錄,以量取距兩端端點各 10 公分及中央三處周 長。表 3.17 為陽極塊尺寸及重量量測結果。陽極塊除去附著海生物後 剩餘淨重(不含鐵蕊重量)為 121.5 129.6 kg 之間,消耗重量達 43.8

13.48 kg 左右,以民國 84 年安裝至今計算,消耗速率約為 0.49 1.49 kg/yr.。陽極塊周長約介於 86 94.5 cm 間,與原有尺寸相較減少 不多,圖 3.28 為陽極塊現場切割(下)後置於陸上進行海生物清除前 後之情形。

陽極塊剩餘重量以目前消耗速率及假設陽極材料未完全消耗前未 受外力衝擊脫落,推估應可使用至二十年之設計年限。

2.高雄港 70 號碼頭

本座碼頭切割之 26 支陽極塊 (#70,14 支;#70A,12 支),其外 觀相當完整,表面附著許多海草、藤壺、海蟲等海生物。表面在除去 反應產物後,側面小部位之消耗較大,有凹陷之現象。表 3.18 為陽極 塊尺寸及重量量測結果,除去附著海生物後剩餘淨重為 124.4 132.4 kg 間,消耗重量約 2.55 10.55 kg 左右,以民國 84 年安裝至今計 算,消耗率約為 0.28 1.17 kg/yr.。陽極塊周長在 86 94 cm 間,與原 有周長比較,減少量不多。圖 3.29 為陽極塊現場切割後置於陸上進行 海生物清除前後之情形。陽極塊剩餘重量以目前消耗速率及假設陽極 材料未完全消耗前未受外力衝擊脫落,推估應可使用至二十年之設計 年限。

3.基隆港東8號碼頭

本座碼頭切割共 20 支陽極塊,表面附著藤壺等海生物。表 3.19 為陽極塊尺寸及重量量測結果,其中 A 單元之陽極塊(a型)剩餘重 量 94.9 99.9 kg,消耗量達 1.21 6.71kg,除去海生物及反應產物後, 陽極塊消耗情形均勻,並無較明顯之凹陷孔洞。陽極塊周長約介於 94

98cm 間。H 單元之陽極塊(b型)剩餘重量為 122.0 133.1 kg 之間, 消耗量達 1.91 13.0kg,除去海生物及反應產物後,側面有明顯之凹陷 孔洞,陽極塊周長約介於 80 84 cm 間。以民國 84 年安裝至今計算, 消耗率分別為 0.13 0.75 及 0.21 0.44kg/yr.間。圖 3.30 為陽極塊現場 切割後置於陸上進行海生物清除前後之情形。陽極塊剩餘重量以目前 消耗速率及假設陽極材料未完全消耗前未受外力衝擊脫落,推估應可 使用至二十年之設計年限。

4.基隆港東9號碼頭

本座碼頭切割共 20 支陽極塊。其外觀與類似於東 8 號碼頭 H 單元 之 b 型陽極塊。表面除去反應產物後,側面出現多處凹陷孔洞。表 3.20 為陽極塊尺寸及重量量測結果,剩餘重量約在 91.8 107.8 kg 間, 消耗量約 27.1 43.2 kg 左右,以民國 84 年安裝至今計算,消耗速 率約為 2.3 3.6 kg/yr。陽極塊周長在 73 91 cm 之間。圖 3.31 為本 座碼頭之陽極塊現場切割後置於陸上進行海生物清除前後之情形。

陽極塊剩餘重量以目前消耗速率及假設陽極材料未完全消耗前未 受外力衝擊脫落,推估應可使用至二十年之設計年限。

编號		尺寸 ((cm)		原有重量 (kg)	剩餘重量	消耗重量 (kg)	消耗速率
	上	中	下	平均	(Kg)	(Kg)	(Kg)	(Kg/ y1.)
69-1	86.0	84.0	88.0	86.0	134.98	121.5	13.48	1.49
69-2	92.0	92.0	91.0	92.0	134.98	130.6	4.38	0.49
69-3	88.0	89.0	88.0	88.0	134.98	121.5	13.48	1.50
69-4	90.5	91.0	90.0	90.5	134.98	125.5	9.48	1.05
69-5	92.0	93.0	91.5	92.0	134.98	127.6	7.38	0.82
69-6	90.0	90.0	93.0	90.0	134.98	128.5	6.48	0.72
69-7	89.5	91.0	92.0	89.5	134.98	128.5	6.48	0.72
69-8	90.5	91.0	95.5	90.5	134.98	127.5	7.48	0.83
69-9	94.5	94.0	94.0	94.5	134.98	129.6	5.38	0.60
69-10	91.0	94.0	96.0	91.0	134.98	126.5	8.48	0.94
69-11	91.0	89.0	91.0	91.0	134.98	126.5	8.48	0.94
69-12	90.0	90.0	90.0	90.0	134.98	129.5	5.48	0.61
69-13	91.0	89.0	91.0	91.0	134.98	126.5	8.48	0.95
69-14	90.0	90.0	90.0	90.0	134.98	129.5	5.48	0.61

表 3.17 高雄港 69 號碼頭陽極塊尺寸及重量量測結果



圖 3.28 高雄港 69 號碼頭陽極塊海生物清除前後之情形

编號		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				
70-1	91.2	88.3	98.4	92.6	134.98	129.5	5.48	0.60
70-2	92.8	91.0	93.0	92.3	134.98	126.6	8.38	0.93
70-3	91.0	91.8	91.8	91.5	134.98	126.5	8.48	0.94
70-4	94.0	87.4	90.0	90.5	134.98	127.5	7.48	0.83
70-5	89.0	90.0	89.0	89.3	134.98	126.6	8.38	0.93
70-6	92.0	90.0	91.0	91.0	134.98	127.5	7.48	0.83
70-7	93.0	92.0	91.0	92.0	134.98	125.5	9.48	1.05
70-8	90.0	87.1	89.2	88.8	134.98	126.5	8.48	0.94
70-9	89.0	90.0	90.4	89.8	134.98	128.6	6.38	0.71
70-10	92.0	90.0	87.0	89.7	134.98	130.5	4.48	0.50
70-11	94.0	88.0	92.6	91.5	134.98	127.5	7.48	0.83
70-12	91.0	90.0	92.0	91.0	134.98	126.5	8.48	0.95
70-13	93.0	89.0	85.0	89.0	134.98	128.5	6.48	0.72
70-14	91.0	91.6	86.6	89.7	134.98	127.5	7.48	0.83
70A-1	86.0	84.0	88.0	86.0	134.98	126.3	8.68	0.96
70A-2	92.0	92.0	91.0	91.7	134.98	129.4	5.59	0.62
70A-3	88.0	89.0	88.0	88.3	134.98	124.5	10.49	1.17
70A-4	90.5	91.0	90.0	90.5	134.98	125.5	9.46	1.05
70A-5	92.0	93.0	91.5	92.2	134.98	130.4	4.55	0.51
70A-6	90.0	90.0	93.0	91.0	134.98	130.5	4.51	0.50
70A-7	89.5	91.0	92.0	90.8	134.98	124.4	10.55	1.17
70A-8	90.5	91.0	95.5	92.3	134.98	126.5	8.51	0.95
70A-9	94.5	94.0	94.0	94.2	134.98	132.4	2.55	0.28
70A-10	91.0	94.0	96.0	93.7	134.98	126.4	8.55	0.95
70A-11	91.0	89.0	91.0	90.3	134.98	125.5	9.48	1.05
70A-12	90.0	90.0	90.0	90.0	134.98	128.4	6.58	0.73



圖 3.29 高雄港 70 號碼頭陽極塊海生物清除前後之情形

		尺寸 ((cm)		原有重量	剩餘重量 (kg)	消耗重量 (kg)	消耗速率 (kg/yr.)
編號	 -	山	<u>ہ</u>	平均	(kg)			
E8-A1	96.0	97.5	95.5	96.3	101.15	97.5	3.65	0.40
E8-A2	94.5	97.5	92.0	94.7	101.15	95.2	5.95	0.66
E8-A3	98.0	97.0	95.5	96.8	101.15	99.1	2.05	0.22
E8-A4	97.0	95.5	94.0	95.5	101.15	96.2	4.95	0.55
E8-A5	98.0	97.5	98.5	98.0	101.15	98.2	2.95	0.33
E8-A6	98.0	97.5	99.0	98.2	101.15	99.7	1.45	0.16
E8-A7	97.0	97.0	94.0	96.0	101.15	94.4	6.75	0.75
E8-A8	98.5	96.0	95.0	96.5	101.15	99.9	1.25	0.13
E8-A9	97.0	93.0	93.0	94.3	101.15	95.1	6.05	0.68
E8-A10	96.0	97.0	95.0	96.0	101.15	98.0	3.15	0.35
E8-H1	79.0	80.0	81.0	80.0	134.98	125.4	9.54	1.06
E8-H2	79.5	87.5	86.0	84.3	134.98	122.0	12.98	1.44
E8-H3	85.0	81.0	79.0	81.7	134.98	133.1	1.88	0.21
E8-H4	82.0	80.5	79.5	80.7	134.98	125.0	9.98	1.11
E8-H5	81.5	81.0	80.0	80.8	134.98	125.6	9.38	1.04
E8-H6	84.0	78.0	83.0	81.7	134.98	125.9	9.08	1.01
E8-H7	82.0	81.0	81.0	81.3	134.98	131.0	3.98	0.44
E8-H8	84.0	81.5	81.0	82.2	134.98	126.2	8.78	0.98
E8-H9	81.5	82.0	81.0	81.5	134.98	124.1	10.88	1.21
E8-H10	83.0	81.5	81.0	81.8	134.98	126.4	8.58	0.95

表 3.19 基隆港東 8 號碼頭陽極塊尺寸及重量量測結果



圖 3.20 基隆港東 8 號碼頭陽極塊海生物清除前後之情形

編號		尺寸((cm)		原有重量	剩餘重量 (kg)	消耗重量	消耗速率
	上	中	下	平均	(kg)		(kg)	(kg/yr.)
E9-1	71.0	72.5	75.5	73.0	134.98	94.0	40.98	4.55
E9-2	71.0	78.0	83.5	77.5	134.98	106.7	28.28	3.14
E9-3	83.0	86.0	85.5	84.8	134.98	119.1	15.88	1.76
E9-4	90.0	87.0	80.5	85.8	134.98	116.7	18.28	2.03
E9-5	87.0	86.0	80.5	84.5	134.98	122.2	12.78	1.42
E9-6	86.0	89.0	84.0	86.3	134.98	118.7	16.28	1.81
E9-7	89.5	94.0	89.0	90.8	134.98	128.9	6.08	0.67
E9-8	90.0	94.0	93.0	92.3	134.98	129.9	5.08	0.56
E9-9	92.5	93.5	87.0	91.0	134.98	130.1	4.88	0.55
E9-10	72.0	79.0	61.5	70.8	134.98	105.5	29.48	3.28
E9-11	86.0	88.5	86.5	87.0	134.98	127.4	7.58	0.84
E9-12	93.5	91.0	91.0	91.8	134.98	127.0	7.98	0.89
E9-13	90.0	89.0	89.0	89.3	134.98	128.1	6.88	0.77
E9-14	92.0	91.0	90.0	91.0	134.98	123.5	11.48	1.28
E9-15	91.0	88.0	87.0	88.7	134.98	127.6	7.38	0.82
E9-16	92.0	91.0	92.0	91.7	134.98	127.4	7.58	0.84
E9-17	85.5	92.0	88.0	88.5	134.98	125.5	9.48	1.06
E9-18	89.5	94.0	91.0	91.5	134.98	129.2	5.78	0.65
E9-19	91.0	96.0	92.0	93.0	134.98	126.1	8.88	0.98
E9-20	88.5	87.5	88.0	88.0	134.98	125.4	9.58	1.06

表 3.20 基隆港東 9 號碼頭陽極塊尺寸及重量量測結果


圖 4.60 基隆港東 9 號碼頭陽極塊海生物清除前後之情形

3.3.3.3 陽極塊釋出電流

本次調查之陽極塊釋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. 高雄港 69 號碼頭

本座碼頭陽極塊釋出電流量測結果列於表 3.21: 陽極塊切割前(未 清除海生物)瞬間最大值 0.3 安培,最小值為 0.1 安培;焊接後(海生 物已清除)瞬間最大值 0.8 安培,最小值為 0.25 安培。

一般而言,陽極塊之釋出電流與其消耗速率有相對應關係,電流發生與陽極塊之等量直徑有關。

陽極塊編號	虎 切割前 焊接		妾後	備註	
	上	下	上	下	
69-1	0.70	0.40	0.70	0.40	
69-2	0.30	0.20	0.30	0.20	
69-3	0.30	0.10	0.30	0.10	
69-4	0.70	0.50	0.70	0.50	
69-5	0.70	0.30	0.70	0.30	
69-6	0.10	0.20	0.10	0.20	
69-7	0.20	0.50	0.20	0.50	
69-8	0.40	0.40	0.40	0.40	
69-9	0.50	0.30	0.50	0.30	
69-10	0.70	0.20	0.70	0.20	
69-11	0.50	0.40	0.50	0.40	
69-12	1.20	0.30	1.20	0.30	
69-13	0.10	0.10	0.10	0.10	
69-14	0.10	0.60	0.10	0.60	
釋出電流最大值	0.30		0.80		
釋出電流最小值	0.	10	0.	25	
平均釋出電流	0.	21	0.	46	

表 3.21 高雄港 69 號碼頭陽極塊釋出電流量測結果

2. 高雄港 70 號碼頭

本座碼頭釋出電流量測結果列於表 3.22: 陽極塊切割前(未清除 海生物)瞬間最大值 0.3 安培,最小值為 0.1 安培;焊接後(海生物已 清除)瞬間最大值 0.8 安培,最小值為 0.25 安培。

	釋出電流 (安培 , A)				
陽極塊編號	切割前		焊	妾後	備註
	上	下	上	下	
70-1	0.10	0.20	1.20	0.70	
70-2	0.20	0.10	1.50	0.50	
70-3	0.30	0.10	1.40	0.50	
70-4	0.10	0.10	1.90	0.70	
70-5	0.20	0.10	2.20	1.40	
70-6	0.20	0.20	1.60	1.40	
70-7	0.30	0.20	0.90	1.40	
70-8	0.20	0.10	0.70	1.10	
70-9	0.20	0.10	0.60	1.10	
70-10	0.30	0.20	1.00	1.10	
70-11	0.40	0.20	0.90	1.40	
70-12	0.20	0.10	0.60	0.20	
70-13	0.40	0.20	1.40	1.30	
70-14	0.30	0.20	0.45	0.80	
70A-1	0.20	0.30	0.60	0.60	
70A-2	0.20	0.20	0.60	0.50	
70A-3	0.30	0.20	0.30	0.50	
70A-4	0.40	0.10	0.50	0.20	
70A-5	0.20	0.10	1.00	0.50	
70A-6	0.30	0.10	0.40	0.50	
70A-7	0.20	0.20	0.50	0.20	
70A-8	0.20	0.20	0.20	0.70	
70A-9	0.20	0.10	0.20	1.00	
70A-10	0.30	0.20	0.90	1.40	
70A-11	0.40	0.30	0.70	0.70	
70A-12	0.20	0.30	0.60	0.60	
釋出電流最大值	0.40		2.2		
釋出電流最小值	0.	10	0.	20	
釋出電流平均值	0.2	21	0.	.84	

表 3.22 高雄港 70 號碼頭陽極塊釋出電流量測結果

3. 基隆港東8號碼頭

本座碼頭釋出電流量測結果列於表 3.23:陽極塊切割前(未清除 海生物)瞬間最大值 0.36 安培,最小值為 0.01 安培;焊接後(海生物 已清除)瞬間最大值 1.00 安培,最小值為 0.02 安培。

		釋出電流	E(安培,A		
陽極塊編號	切割	創前	焊持	妾後	備註
	上	下	上	下	
E8-A1	0.20	0.17	0.32	0.27	
E8-A2	0.12	0.17	0.46	0.25	
E8-A3	0.36	0.00	1.00	0.30	
E8-A4	0.19	0.28	0.25	0.45	
E8-A5	0.05	0.28	0.46	0.15	
E8-A6	0.10	0.34	0.56	0.40	
E8-A7	0.21	0.21	0.51	0.52	
E8-A8	0.14	0.18	0.52	0.24	
E8-A9	0.20	0.28	0.26	0.50	
E8-A10	0.12	0.12	0.46	0.40	
E8-H1	0.09	0.25	0.40	0.50	
E8-H2	0.32	0.22	0.65	0.12	
E8-H3	0.13	0.18	0.25	0.67	
E8-H4	0.20	0.21	0.40	0.25	
E8-H5	0.26	0.01	0.68	0.60	
E8-H6	0.25	0.31	0.26	0.10	
E8-H7	0.17	0.16	0.20	0.20	
E8-H8	0.35	0.14	0.08	0.28	
E8-H9	0.17	0.24	0.75	0.47	
E8-H10	0.23	0.25	0.50	0.02	
釋出電流最大值	0.36		1.00		
釋出電流則值	0.0	01	0.	02	
平均釋出電流	0.	21	0.	46	

表 3.23 基隆港東 8 號碼頭陽極塊釋出電流量測結果

4. 基隆港東9號碼頭

本座碼頭釋出電流量測結果列於表 3.24: 陽極塊切割前(未清除 海生物)瞬間最大值 0.60 安培,最小值為 0.01 安培;焊接後(海生物 以清除)瞬間最大值 0.67 安培,最小值為 0.07 安培。

	釋出電流 (安培 , A)				
陽極塊編號	切割	創前	焊持	妾後	備註
	上	下	上	下	
E9A1-1	0.40	0.60	0.46	0.67	
E9A1-2	0.30	0.40	0.46	0.45	
E9A1-3	0.20	0.18	0.30	0.30	
E9A1-4	0.20	0.20	0.25	0.32	
E9A1-5	0.30	0.08	0.42	0.18	
E9A1-6	0.29	0.26	0.36	0.40	
E9A1-7	0.15	0.20	0.21	0.32	
E9A1-8	0.03	0.03	0.12	0.24	
E9A1-9	0.01	0.35	0.16	0.50	
E9A1-10	0.25	0.17	0.36	0.42	
E9A2-1	0.28	0.19	0.40	0.32	
E9A2-2	0.25	0.12	0.45	0.12	
E9A2-3	0.17	0.04	0.25	0.07	
E9A2-4	0.11	0.15	0.30	0.28	
E9A2-5	0.09	0.05	0.18	0.20	
E9A2-6	0.12	0.11	0.25	0.17	
E9A2-7	0.42	0.22	0.52	0.20	
E9A2-8	0.27	0.08	0.28	0.20	
E9A2-9	0.11	0.09	0.25	0.27	
E9A2-10	0.25	0.19	0.37	0.12	
釋出電流最大值	0.60		0.67		
釋出電流則值	0.0	01	0.	07	
平均釋出電流	0.	21	0.4	46	

表 3.24 基隆港東 9 號碼頭陽極塊釋出電流量測結果

3.3.4 歷年調查結果彙整分析

表 3.25 為歷年國內主要商港鋼構碼頭之鋼樁腐蝕調查結果。鋼樁 之腐蝕情形,以基隆港部分碼頭較為嚴重,花蓮港至民國 92 年止,其 碼頭之鋼板樁位於海中帶部份尚未採用任何防蝕措施,雖然腐蝕速率 未超出設計允許值,但因使用年限已超過三、四十年,且靠海床附近 曾發現板樁發生彎曲開裂之現象。各港之鋼樁如採用適當之防蝕措 施,均可達到降低其腐蝕速率之效果,例如,海中帶採用犧牲陽極塊 作為防蝕工法。

港口	檢測碼頭		供言计		
	編號	鋼材種類	防蝕措施	腐蝕速率 (mm/yr.)	11月百二
基隆港	E2 E10 W19 W27	E5 E7、W21 W24、W27:Z型 鋼板樁 W24 W26:井筒 式鋼板樁 E8 E10:鋼管樁 W19 W20: 鋼管樁	潮汐帶:塗裝工法 海中帶:犧牲陽極 法(E5、E9、E10 尚有部份未安裝)	1.E5 E7、W24 W27 在低潮 位線附近均發現鋼板樁發生 穿孔破洞現象 2.部份碼頭未採防蝕措施前,低 潮位線附近多處及海中帶少 處之鋼樁腐蝕速率大於 0.20 mm/yr.,腐蝕屬嚴重程度,目 前除 E5 外,多已修護海中帶 並安裝犧牲陽極改善,腐蝕速 率已降低。。	陽極塊消耗速率: 1.3 3.7 kg/yr.
臺北港	E1 E3	U 型鋼板樁	潮汐帶:塗裝工法 海中帶:犧牲陽極 法	1.最大腐蝕速率 0.14 mm/yr.。 (調查時因鋼樁使用僅約五 年,故腐蝕速率較高) 2.腐蝕速率:東1、東2>東3	陽極塊消耗速率: 0.5 3.2 kg/yr.
蘇澳港	6、7 駁 船	駁船:鋼板樁 6、7:鋼管樁	潮汐帶:塗裝工法 海中帶:犧牲陽極 法	1.駁船碼頭未採防蝕措施前,低 潮位線附近多處鋼樁腐蝕速 率大於 0.20 mm/yr.,腐蝕屬嚴 重程度,已修護海中帶並安裝 犧牲陽極改善,腐蝕速率已降 低。 2.鋼管樁(6、7號碼頭) 腐蝕速率多小於 0.10mm/yr。	陽極塊消耗速率: 0.4 3.0 kg/yr.
花蓮港	4 9 航道岸壁	4 9:2型鋼板樁 航道岸壁:U型鋼 板樁	4 5 號碼頭大氣 帶:塗裝工法 潮汐帶:無 海中帶:無	 1.4 5號碼頭大氣帶之陸側鋼 板樁發現穿孔破洞 2.5 6號碼頭靠海床處發現數 處鋼板樁開裂,已修護改善。 3.鋼板樁之腐蝕速率多小於 0.10mm/yr.。 	
臺中港	29、30、99	鋼管樁	潮汐帶:塗裝工法 海中帶:犧牲陽極 法	鋼管樁腐蝕速率多小於 0.14mm/yr.。	陽極塊消耗速率: 0.4 3.5 kg/yr.
安平港	3、4	U型鋼板樁	海中帶 : 犧牲陽極 法	鋼管樁腐蝕速率多小於 0.05mm/yr.,腐蝕情狀輕微。	1.鋼板樁均位於海中 帶 2.陽極塊消耗速率: 4.9 8.4 kg/yr.
高雄港	39, 40, 58, 69, 70, 78, 81	U型鋼板樁	海中帶:犧牲陽極 法	鋼管樁腐蝕速率多小於 0.05mm/yr. ,腐蝕情狀輕微。	1.鋼板樁均位於海中 帶 2.陽極塊消耗速率: 1.3 4.0 kg/yr.

表 3.25 國內主要商港鋼構碼頭之鋼樁腐蝕調查結果

3.4 結論與建議

3.4.1 結論

- 本次調查之碼頭,除基隆港東9號碼頭部份外,鋼樁均採用犧牲陽 極塊作為防蝕措施,目視檢視及鋼樁現有厚度與保護電位量測結果 顯示,安裝陽極塊可達到對鋼樁防蝕保護之目的。
- 2.鋼樁腐蝕速率均小於設計允許值,但基隆港東9號碼頭未採用防蝕
 措施部份,其腐蝕速率相對較高於已採用防蝕措施部份。
- 3.陽極塊發生電位與釋出電流量測結果顯示,陽極塊之電氣性能可達 到保護鋼樁防蝕之目的。
- 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.歷年調查結果顯示,鋼構碼頭如有採用防蝕措施,則其鋼樁均可降 低腐蝕速率。

3.4.2 建議

- 1.碼頭使用如超過二十年或設計年限者,為確保碼頭結構安全與正常 運作,應定期進行檢測與維護。
- 2.鋼樁如發現穿孔、破洞,應儘速修護並採適當之防蝕措施,以免損 害繼續擴大。
- 3.未採用防蝕保護措施之鋼構碼頭,應全面施加適當之防蝕措施。

第四章 港灣混凝土結構物耐久性試驗研究

4.1 前言

4.1.1 研究動機

臺灣近年來的各主要河川由於環保意識、道路橋樑安全及防洪整 治與水土保持安全之因素,不得不將河川禁採之範圍擴大與限制,其 影響已造成砂石供需之不平衡,於是衍生了許多社會、環境及經濟層 面之問題,尤其是混凝土中主要材料-砂石之影響更加嚴重。而臺灣四 面環海,海砂蘊藏豐富,若能將其應用於混凝土中,將可彌補砂石短 缺之危機。雖然海砂中 CI 對鋼筋混凝土有腐蝕鋼筋及其他不良之影 響,但是基於陸上砂石來源之匱乏與耗盡,以及海砂資源之豐富與利 用,從另一角度思考,或許可從其它方法,諸如添加波索蘭材料、化 學摻料(鋼筋腐蝕抑制劑) 電化學防蝕技術等,來改善海砂混凝土之 耐久性與品質。本研究乃藉由添加波索蘭材料-爐石,探討海砂混凝土 之各項新拌與硬固性質及其耐久性能,內部鋼筋之腐蝕狀況,並評估 應用於 R.C.結構物之可行性。

又河川砂石禁採範圍逐漸擴大,業者對於粒料之品質更不會去選 擇,尤其是粒料之活性問題。從以前之報告顯示臺灣東部之粒料有潛 在發生「鹼質與粒料之反應」,雖然東砂西運之政策可以暫且解決砂石 短缺之困境,然而鹼質與粒料之反應是一大威脅。港灣環境具有高濕 與高鹼質之特性,加上潮汐與風等外力及乾濕循環的作用,使的混凝 土構造物之耐久性面臨嚴重之考驗。本所港研中心數年前即對國內各 大商港進行混凝土構造物之鹼質與粒料反應之調查,本研究將繼續過 去數港之分析模式對臺東地區之混凝土構造物及其粒料來源進行調查 與試驗,提供相關單位參酌,期望能協助港灣管理單位瞭解此一反應 之潛勢與危害,進而在維修現有或規劃新建混凝土構造物時有所依據。

4.1.2 研究目的

本研究之主要目的;1.以添加爐石於海砂混凝土中,探討混凝土之 基本性能變化及其適用性,並評估對鋼筋腐蝕之影響性,以提供爾後 使用海砂混凝土之參考。2.臺灣花東地區部份河川粒料具有活性反應現 象,不利於混凝土之耐久性能,特對當地混凝土結構物進行調查,以 了解可能發生「鹼質與粒料反應」之潛勢。

4.2 研究方法與步驟

本研究分為兩個單元來進行:第一單元為「摻用爐石對添加海砂 混拌混凝土之耐久性影響」,第二單元為「混凝土構造物鹼質與粒料反 應之調查與潛勢分析」。

4.2.1 摻用爐石對添加海砂混拌混凝土之耐久性影響

4.2.1.1 試驗規劃

採用 ACI 混凝土配比設計法,以添加不等比例之爐石(取代水泥量) 於海砂及河砂混拌之混凝土中,進行漿體拌製之基本性質試驗,以及 硬固後之各項試驗。試驗流程如圖 4.1 所示,相關試驗內容與敘述如表 4.1 所示。

4.2.1.2 試驗材料

- 1. 水泥:卜特蘭 型水泥。
- 2. 拌合水: 自來水。
- 3. 爐石粉:國內中聯資源公司生產之高爐石粉,比重為2.90。
- 4. 粒料:粗粒料最大粒徑 1/2",細粒料之細度模數 FM 為 2.70, 粒料 之級配及物理性質如表 4.2、表 4.3 及表 4.5 所示
- 5. 海砂:取自臺中港區航道海域浚挖之海砂,氯離子含量 0.24 %,細 度模數 FM 為 2.13,粒料之級配及物理性質如表 4.4、表 4.5。



圖 4.1 試驗流程

項目 試體種類	養護條件	試驗項目	試驗齡期(天)
15×30cm	試體拆模後,置入養生室, 養護到所需之齡期	抗壓強度、超音 波脈波速度、電 阻係數	14、28 56、90
10×20cm	試體拆模後,置入養生室, 養護到所需之齡期	透水係數(特製試 體)	56
矩形試體 (10×10×36)cm	試體拆模後,置入養生室進 行養護到 28 天後,分別至入 海水與空氣中	鋼筋腐蝕電位量 測	28、90

表 4.1 試體之相關試驗內容

表 4.2 粗粒料之級配

篩號	累積通過率 (%)	ASTM C33 規範
1″	100	100
3/4"	100	90~100
1/2″	78.03	-
3/8"	35.69	20~55
NO.4	0.67	0~10
NO.8	0	0~5

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 4.3 細粒料之級配(河砂)

4.4 細粒料之級配(海砂)

篩號	累積通過率 (%)	ASTM C33 規範
NO.4	99.7	95~100
NO.8	98.2	80~100
NO.16	87.8	50~85
NO.30	59.76	25~60
NO.50	29.57	10~30
NO.100	11.7	2~10

物理性質	粗粒料	細粒料(河砂)	細粒料(海砂)
細度模數 (FM)	-	2.70	2.13
比重 (SSD)	2.58	2.58	2.63
吸水率(%)	1.72	2.20	1.36
乾單位重 (kg/m ³)	1529	-	-
乾比重	2.61	2.63	2.68
含水量(%)	0.17	0.6	1.93

表 4.5 粒料之基本物理性質

4.2.1.3 試體配比

以 ACI 混凝土配比設計法設計, 試體水灰比為 0.45 與 0.60, 設計 強度分別為 450kg/cm² 及 300kg/cm², 漿體拌製所需之用料量, 如表 4.6~4.9 所示。

编號	粗粒料 (kg/m ³)	細粒料 (kg/m ³)	7 K (kg/m ³)	水泥 (kg/m ³)	爐石 (kg/m ³)	爐石取代 水泥量
A-R0	863	718	218	484	0	0 %
A-R30	863	718	218	339	145	30 %
A-R50	863	718	218	242	242	50 %

表 4.6 配比 A(水灰比 0.45,河砂)

編號	粗粒料 (kg/m ³)	細粒料 (kg/m ³)	7次 (kg/m ³)	水泥 (kg/m ³)	爐石 (kg/m ³)	爐石取代 水泥量
A-D0	807	789	218	484	0	0 %
A-D30	807	789	218	339	145	30 %
A-D50	807	789	218	242	242	50 %

表 4.7 配比 A(水灰比 0.45,海砂)

表 4.8 配比 B(水灰比 0.60,河砂)

編號	粗粒料 (kg/m ³)	細粒料 (kg/m ³)	水 (kg/m ³)	水泥 (kg/m ³)	爐石 (kg/m ³)	爐石取代 水泥量
B-R0	863	819	218	363	0	0 %
B-R30	863	819	218	254	109	30 %
B-R50	863	819	218	181.5	181.5	50 %

表 4.9 配比 B(水灰比 0.60,海砂)

編號	粗粒料 (kg/m ³)	細粒料 (kg/m ³)	水 (kg/m ³)	水泥 (kg/m ³)	爐石 (kg/m ³)	爐石取代 水泥量
B-D0	807	892	218	363	0	0 %
B-D30	807	892	218	254	109	30 %
B-D50	807	892	218	181.5	181.5	50 %

4.2.1.4 試驗參數與試體編號

1.試驗參數

項目	參數
水灰比	0.45、0.60
細粒料	浚挖海砂、河砂
爐石粉取代水泥量%	0 % 、 30 % 、 50 %
暴露環境	空氣、海水
齒令期	14天,28天,56天,90天

表 4.10 試驗參數

2.試體編號

試驗共有二個不同之配比,水灰比 0.45 配比其編號為 A,水灰比 0.60 配比其編號為 B,如使用海砂混拌時第二編碼為 D,河砂編碼為 R, 第三編碼為爐石粉取代水泥量 0%,30%,50%,其編碼為 0,30,50。 各類試體編號說明如下表 4.11;

編號代碼	水灰比	河砂	海砂	爐石取代量
A	0.45	-	-	-
В	0.60	-	-	-
R	-	*	-	-
D	-	-	*	-
0	-	-	-	0 %
30	-	-	-	30 %
50	-	-		50 %

表 4.11 各類試體編號說明

試體編號說明如下:

A-R0: A(水灰比 0.45), R(河砂), 0(爐石取代水泥量 %) B-R30: B(水灰比 0.60), R(河砂), 30(爐石取代水泥量 30 %) A-D0:A(水灰比 0.45),D(海砂),0(爐石取代水泥量 %)

B-D50:B(水灰比 0.60), D(海砂), 50(爐石取代水泥量 50%)

4.2.1.5 試體製作

試體製作材料包括水泥、粗細粒料、水、及爐石粉等,依設計配 比計量,以拌合機充分拌合後,將混凝土漿體灌製入各類型試體模內, 於澆置 24 小時後拆模,隨即將試體置入養生室養護。

4.2.1.6 試驗方法與設備

1.海砂氯離子含量檢測

依據 CNS 13407 細粒料中水溶性 CI 含量試驗法 (如照片 4.1),對 浚挖海砂 CI 含量進行分析試驗步驟如下:

- a. 秤取海砂試樣 1000g, 置入 1L 廣口瓶內, 在溫度 105~110 烘箱內 烘乾至恆重, 求出試樣之乾重。
- b. 注入 500ml 蒸餾水於廣口瓶內,加蓋靜置 24 小時後,每隔 5 分鐘, 將廣口瓶底部反轉搖振瓶子一次,共計三次,以充分溶出試樣內之 水溶性氯離子。
- c. 靜置片刻後,以吸量管吸取廣口瓶內試樣之上層澄清液 50ml,置於 三角錐形瓶中,做為檢測試液。
- d. 加入 1ml 鉻酸鉀指示劑於三角錐形瓶試液中,充分搖晃後以濃度
 0.1N 之硝酸銀溶液滴定之,滴定之溶液顏色由青黃色變成紅褐色且
 不消失為止,此時,溶液已達滴定終點,記錄硝酸銀之滴定量 A(ml)。
- e. 空白試驗:另取 50ml 蒸餾水,依步驟 d 之操作過程,進行空白試驗, 此時亦可求得硝酸銀滴定溶液之消耗量 B(ml)。

氯離子含量計算:

(a) 水溶性氯離子含量 (%) =
$$\frac{0.0035 \times (A-B) \times 10}{W} \times 100$$

(b) 鹽分(NaCl)含量(%) = $\frac{0.00584 \times (A-B) \times 10}{W} \times 100$

註:試驗必需做兩次以上,取其平均值

銘酸鉀指示劑濃度為 5 % (W/V)

2.抗壓強度試驗

採用 ELE2000KN 之抗壓試驗機(如照片 4.2 所示), 試驗方法依 據中國國家標準 CNS 1232 規範。

3.超音波脈波速度量測

使用英國 CNS 儀器公司出品之 PUNDIT(Portable Uitrasonic Non-Destructive Digital Indicating Tester)超音波脈波速度測定儀(如照 片 4.3 所示),量測在硬固混凝土材質內超音波脈波之傳遞速度,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 4.12 所示,可作初步研判^[13]。

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

表 4.12 超音波脈波速度與混凝土品質之關係^[13]

本試驗採用日製之內壓式透水試驗儀,如照片 4.4 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/cm²)及低壓(70 kg/cm²)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分別安裝壓力錶 50 kg/cm² 各一個。試驗時間為 7 日,每日定時記錄排出量筒之水位變化 及時間,將記錄之數據,代入達西公式(Darcy Formula),即可量出試體 之透水係數;

$$k = \frac{\log_{e} r_{0}}{2 h} \bullet \frac{Q}{P_{0}}$$
 (達西公式)

式中;

5.電阻係數試驗

以英國 Colebrand Advanced Engineering 公司之四探針並排之電阻 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,即可由儀板上讀出電阻值。圖 4.2 為四針式之電 阻量測儀器,示意圖,試驗儀器如照片 4.5。混凝土電阻係數與其中所 含鋼筋之活性程度之關係如表 4.13 所示^[14]。

表 4.13 混凝土電阻係數與鋼筋腐蝕活性之關係⁽¹⁴⁾

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

6.鋼筋腐蝕電位值量測

混凝土中鋼筋之腐蝕狀況為一電化學反應,因此鋼筋表面會發展出 有陽極與陰極之現象。本研究為量測混凝土內之鋼筋腐蝕電位值變 化,特製作一個 10cm× 10cm× 36cm 矩型木模試體,內埋置#4 鋼筋, 其中量測之導線一端與鋼筋焊接,如圖 4.3 所示。照片 4.6 為試體灌製 前之情形,試體於澆置 24 小時後拆模,隨即將試體置入養生室進行養 護,養護至一定齡期時進行電位值量測。電位量測使用三用電錶,一 端接到導線,另一端接上氯化銀參考電極上並與混凝土表面接觸,在 電錶上即可讀取腐蝕電位值,試驗情形如照片 4.7 所示。



圖 4.2 四探針式之電阻量測示意圖



圖 4.3 鋼筋腐蝕電位值量測示意圖



照片 4.1 海砂進行氯離子含量檢測之情形



照片 4.2 ELE 2000KN 抗壓機



照片 4.3 超音波脈波速度測定儀



照片 4.4 混凝土透水係數試驗儀



照片 4.5 混凝土電阻係數量測儀



照片 4.6 鋼筋腐蝕電位量測之試體灌製前之情形



照片 4.7 鋼筋腐蝕電位值量測之情形

4.2.2 混凝土構造物鹼質與粒料反應之調查與潛勢

研究內容包括;資料之蒐集、現場目視調查、非破壞性檢測、鑽 心取樣、試驗室之各項試驗、試驗數據之分析等。

4.2.2.1 目視調查

混凝土發生鹼質與粒料反應時,可從構造物表面的徵候做初步判 測。調查範圍包括花蓮港區及花東(臺11線)濱海公路沿線各類小型 漁港設施,諸如防波堤、消波塊、碼頭;縱谷區則以鐵、公路橋樑及 建築物為主。

4.2.2.2 現場非破壞性檢測

依據目視調查的結果,篩選防波堤、消波塊等構造物進行現場非 破壞性檢測。由硬固混凝土之表面硬度、中性化深度、裂縫狀況等初 步評估混凝土現況,並研判鹼質與粒料反應的發生之潛在趨勢。各項 檢測項目及概要說明如下述:

1.反彈錘試驗

以反彈錘(Schmidt rebound hammer)撞擊混凝土表面,依據所得之 反彈值,估計混凝土構造物表面之硬度,並研判混凝土的均勻性。比 對反彈值推估所得與鑽心試體之抗壓強度試驗結果,探討混凝土強度 變化和鹼質與粒料反應間之可能關係。

2.混凝土中性化試驗

本試驗主要係探討混凝土構造物中性化的程度,並與其他試驗相 互比較分析。利用電鑽或鐵鎚先敲除少量結構體表面之混凝土,刷除 混凝土新鮮面上之細顆粒後,以酚 指示劑噴灑(刷)之,若表面呈 現桃紅色,則表示該處屬於鹼性;若未變色,則表該處已中性化,而 後量取混凝土的中性化深度。

4-17

4.2.2.3 混凝土鑽心取樣試驗

利用鑽心設備在現場進行鑽心取樣,除將試體攜回實驗室進行相 關之試驗外,並與非破壞性試驗所得之結果相互印證。鑽心試體進行 之試驗項目包括有X光繞射分析 (XRD)、掃描式電子顯微鏡分析 (SEM)、加速浸泡試驗、與以醋酸鈾螢光法檢測反應產物等。

1.X 光繞射分析 (XRD)

X 光繞射分析係由 X 光發射管發出一已知波長之 X 光射線照射於 試體上,並量測反射之 X 光射線強度為最大時所對應之角度,再由 Bragg's 公式計算出結晶體晶格面之間隔距離 d 。根據此一關係探討結 晶體之構造特性,並進行礦物鑑別及定性分析。透過 XRD 分析可鑑定 混凝土之化性(化合物)變化,並進一步探討病變之可能原因。

2.掃描式電子顯微鏡分析 (SEM)

捐瞄式電子顯微鏡 (Scanning Election Microscopy, 簡稱 SEM), 係利用電子槍發射高能量聚焦電子光束,在磁力線圈的作用下,有系 統地以電子光束在試體表面來回掃瞄,藉此得到試體表面外形或晶像 之外觀。利用 SEM 分析可對混凝土孔隙結構分佈、晶相變化進行微觀 分析,並觀察反應產物以鑑定可能病變之原因。

3.加速浸泡實驗

將現場鑽心試驗所得之鑽心試體儲存於不同的環境,並監測其鹼 質與粒料反應的情形。鑽心試體裁切成適當長度後,表面粘設 4 組測 點,每組測點之距離以測微計量測後,分別將試體置於 38 ,相對濕 度 100%的環境中以及 1N NaOH 的溶液中,定期量測各環境中試體之 長度變化。

4.醋酸鈾螢光法

由於鈾會取代鹼質與粒料反應後之鹼矽膠體中的鹼質,且產生之 反應產物在短波(254nm)紫外光的照射下會有黃綠色的反應特徵,據 此可檢測鹼質與粒料反應是否發生。

4.2.2.4 水泥砂漿棒膨脹試驗法(ASTM C227)

本試驗將自花東沿海地區可能具鹼質與粒料反應活性潛能之粒料,依據 ASTM C227 試驗方法及在指定的養護條件下,量測儲存期間砂漿棒長度變化,而判斷其是否具反應活性。

4.3 試驗結果與討論

4.3.1 摻用爐石對海砂混拌混凝土之耐久性影響

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,例如抗壓強度高時,相對其彈性模數、抗拉強度、水密 性及耐久性亦均較為理想。

表 4.14 為彙整各配比試體之抗壓強度與養生齡期間之試驗結果 , 各配比試體之抗壓強度發展趨勢,則繪製於圖 4.4 至圖 4.9。表 4.14 中 顯示配比 A(水灰比 0.45)之各類型試體之抗壓強度均較配比 B(水灰比 0.60)高出甚多,驗證低水灰比可得較高強度混凝土。其中若以河砂拌 製之混凝土為例,如配比 A(河砂,水灰比 0.45)試體,其抗壓強度發展 與爐石粉取代水泥量及養生齡期,呈正向關係趨勢,亦即抗壓強度隨 爐石粉取代水泥量及養生齡期之增加而增加,且其抗壓強度為各配比 中最佳者,例如試體 A-R50 其強度為 536kg/cm²(14 天)、606kg/cm²(28 天)、633kg/cm²(56 天)、658kg/cm²(90 天), 且均較原始設計強度高出甚 多,而此配比中爐石取代量為 30%、0%者、其抗壓強度依序遞降,整 體發展趨勢如圖 4.4 所示。 而配比 A 如以海砂來混拌混凝土, 爐石取 代水泥量 30%時,其強度卻較爐石取代量 50%者為高,如圖 4.5所示, 推究原因可能海砂之細度模數(F.M.=2.13),較河砂之細度模數 (F.M.=2.70)為小所致。圖 4.6 與 4.7 則為配比 B 分別混拌河砂及海砂之 混凝土試體之強度發展趨勢,以爐石粉取代水泥量 30%,可得到最大 之抗壓強度。圖 4.8 及圖 4.9 分別彙整配比 A 及配比 B 混拌河/海砂試 體之抗壓強度。

齡期 試體編號		14 天	28天	56天	90天
	A-R0	488	526	561	592
	A-R30	526	601	625	634
配比 A (W/C , 0.45)	A-R50	536	606	633	658
	A-D0	485	517	552	591
	A-D30	509	579	601	623
	A-D50	488	552	587	607
	B-R0	383	412	461	498
配比 B (W/C , 0.60)	B-R30	396	450	501	528
	B-R50	374	425	474	509
	B-D0	278	295	318	335
	B-D30	307	349	378	404
	B-D50	299	340	347	354

表 4.14 試體抗壓強度試驗結果 (kg/cm²)



圖 4.4 配比 A 試體(以河砂混拌)之抗壓強度發展趨勢





圖 4.6 配比 B 試體(以河砂混拌)之抗壓強度發展趨勢





圖 4.8 配比 A 試體之抗壓強度與齡期關係



圖 4.9 配比 B 試體之抗壓強度與齡期關係

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 4.15 及圖 4.10 與圖 4.11 為各配比試體進行超音波脈波速度量測 所得之結果。表 4.15 中顯示,各類型試體之脈波速度均隨養生齡期之 增加而變快,推究可能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)變為甚快。表 4.15 中除了部 份試體(編號 B-Dxx,以海砂混拌之試體)外,各類型試體於不同養生齡 期下,其超音波脈波速度均大於 4.0km/sec 以上,如依據表 4.12 混凝土 品質等級判別標準,混凝土之品質相當穩定且屬於優良等級。上述之 結果恰與抗壓強度發展趨勢,關係呈一致性且相互驗證。



圖 4.10 配比 A 試體之超音波脈波速度與齡期的關係



圖 4.11 配比 B 試體之超音波脈波速度與齡期的關係

配比	齡期	14 天	28天	56天	90天
	A-R0	4.008	4.175	4.300	4.449
	A-R30	4.039	4.236	4.392	4.570
配比 A	A-R50	4.103	4.240	4.493	4.584
(W/C , 0.45)	A-D0	4.031	4.204	4.358	4.405
	A-D30	4.110	4.217	4.381	4.517
	A-D50	4.032	4.205	4.371	4.432
配比 B (W/C , 0.60)	B-R0	4.11	4.218	4.205	4.398
	B-R30	4.149	4.367	4.493	4.518
	B-R50	4.141	4.359	4.401	4.484
	B-D0	3.767	3.929	4.097	4.189
	B-D30	3.785	3.984	4.121	4.255
	B-D50	3.878	3.998	4.189	4.228

表 4.15 試體超音波脈波速度試驗結果(km/sec)

3.電阻係數

混凝土電阻係數之大小在鋼筋混凝吐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。

圖 4.12 與圖 4.13 分別為配比 A 與配比 B 試體之電阻係數試驗結 果。兩圖中顯示,混凝土之電阻係數均隨養生齡期之增加而增大,與 混凝土之強度發展並未有相同之趨勢,探究原因可能為混凝土試體量 測時其表面之乾濕度影響到量測。在齡期 90 天時只有河砂添加爐石 50 % 時之電阻係數有超過 20 k -cm,其他電阻係數均未達 20 k -cm。 如依據表 4.13 之關係判定,試體內部鋼筋不易發生腐蝕行為。

4-27



圖 4.12 配比 A 試體之電阻係數與養生齡期的關係



圖 4.13 配比 B 試體之電阻係數與養生齡期的關係

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。

圖 4.14 為試體齡期 56 天之透水係數試驗結果。以配比 A(河砂混 拌之試體)爐石取代量 50%時,其透水係數最低,約為 1.0 x 10⁻⁸cm/sec。 如以海砂混拌之試體而言,有添加爐石粉取代水泥量者,其試體透水 係數均比未添加爐石粉取代者為低,上述結果印證添加爐石粉能改善 混凝土漿體之緻密性,致使孔隙降低。



齡期

圖 4.14 各配比齡期 56 天的透水係數

5.鋼筋腐蝕電位值量測

腐蝕是一種電化學反應,在鋼筋表面會形成許多陰極和陽極之小
電池(cell)區域,在不同位置有不同的電位和電流產生。利用此理論, 可檢測某一範圍之電位分佈狀況,以評估鋼筋表面發生腐蝕的可能程 度與範圍。

表 4.16 與表 4.17 分別為配比 A 與配比 B 試體內之鋼筋腐蝕電位 值量測結果。由於本項試驗仍在初始階段且時間甚短,試體漿體可能 仍處於水化發展期間,因此,兩表中之鋼筋腐蝕電位值變化差異很大, 並未呈現明顯或規律趨勢,此刻,甚難依據表中數據解讀內部鋼筋實 際之腐蝕狀況,欲得正確之結果,以掌控鋼筋腐蝕發展過程,本項試 驗應長期進行監測。

配比	齡期	28 天	90天
	A-R0 (Air)	-215	-218
	A-R0 (Sea)	-217	-228
	A-R30 (Air)	-538	-548
	A-R30 (Sea)	-537	-600
	A-R50 (Air)	-435	-516
配比 A	A-R50 (Sea)	-405	-553
(W/C , 0.45)	A-D0 (Air)	-106	-111
	A-D0 (Sea)	-116	-308
	A-D30 (Air)	-179	-181
	A-D30 (Sea)	-154	-526
	A-D50 (Air)	-343	-231
	A-D50 (Sea)	-350	-576

表	4.16 水灰比 0.45	鋼筋腐蝕電位與齡期的關係((mV))
---	---------------	---------------	------	---

配比	齡期	28 天	90天
	B-R0 (Air)	-75	-80
	B-R0 (Sea)	-73	-82
	B-R30 (Air)	-162	-187
	B-R30 (Sea)	-157	-189
	B-R50 (Air)	-123	-148
配比 B	B-R50 (Sea)	-124	-204
(W/C , 0.60)	B-D0 (Air)	-93	-112
	B-D0 (Sea)	-86	-298
	B-D30 (Air)	-80	-87
	B-D30 (Sea)	-78	-305
	B-D50 (Air)	-86	-144
	B-D50 (Sea)	-89	-287

表 4.17 水灰比 0.60 鋼筋腐蝕電位與齡期的關係 (mV)

4.3.2 混凝土構造物鹼質與粒料反應調查與潛勢分析

4.3.2.1 目視調查

花蓮港新東堤與花東沿海之石梯港、長濱漁港、新港漁港之防波 堤則出現地圖狀裂縫、裂縫處並有滲出物等疑似鹼質與粒料反應之徵 候。此外,花蓮港西堤及航道東側之消波塊,各漁港內消波塊也都發 現零星或大批地圖狀裂縫、滲出物等明顯鹼質與粒料反應徵候,省道 臺11線及臺9線至臺東大武沿線之消波塊及部份橋樑之橋墩亦有多處 發現類似徵候,且批段性十分明顯,如照片 4.8~4.19。



照片 4.8 花蓮港新東堤堤身地圖狀裂縫 1 照片 4.9 花蓮港新東堤堤身地圖狀裂縫 2



照片 4.10 花蓮港航道消波塊地圖狀裂縫





照片 4.12 新港漁港消波塊地圖狀裂縫 照片 4.13 富崗漁港堤防裂損現況





- 照片 4.14 臺東海濱公園肖波塊也圖探縫1 照片 4.15 臺東海濱公園肖波塊也圖探疑縫2



照片 4.16 臺東大武公園消波塊地圖狀裂 照片 4.17 跨越之臺九線鐵路橋平行主鋼 筋方向裂縫 縫



照片 4.18 臺九線公路橋樑橋墩裂縫 1

照片 4.19 臺九線公路橋樑橋墩裂縫 2

4.3.2.2 非破壞性檢測

1.試錘試驗

試錘試驗結果如表 4.18 所示。換算為混凝土之表面硬度,花蓮港 新東堤堤身之測點除一處低於設計值 210 kg/cm²外,於均大於設計值。 消波塊部份其硬度除新港漁港明顯偏低外,於均屬正常值(140 kg/cm²) 以上;由於消波塊屬消耗性構件,其強度不足並不致發生重大損害。

構造物名稱	表面硬度(kg/cm ²)	中性化深度(mm)
花蓮港新東堤	163 339	1 4
石梯漁港消波塊	162 195	0.5 3
新港漁港消波塊	105.0	0.5 3.
臺東濱海公園消波塊	243 351	1 3
大武公園消波塊	386 438	1 2.5

表 4.18 現場試錘試驗與中性化深度量測之結果

2.中性化試驗

試驗結果詳如表 4.18 所示,中性化程度均不高,以花蓮港新東堤較高,約在1mm至4mm深度左右,照片 4.20 為鑽心試體進行中性化深度量測之情形。



照片 4.20 鑽心試體中性化程度量測情形

4.3.2.3 鑽心試體試驗

1. X 光繞射分析 (XRD)

本試驗係將混凝土構造物以鑽心試體擇要敲取碎片,各試樣壓碎 之碎片分袋,分別取出部份碎片,依規定研磨至通過所需篩號(#100) 之粉末,進行 XRD 實驗,試驗結果如圖 4.15 至 圖 4.17 所示,經比對 可能具有活性之成分,活性成分主要有 Tridymite(鱗英石) Cristobalite (方英石) (Ca,Na)(Si,Al)₄O₈(鹼矽膠體)及可能使混凝土發生膨脹之 Ettringite (鈣釩石) 等。



圖 4.15 石梯港消波塊 X 光繞射分析試驗結果



圖 4.16 臺東海濱公園消波塊 X 光繞射分析試驗結果



圖 4.17 臺東大武公園消波塊 X 光繞射分析試驗結果

2. 掃描式電子顯微鏡分析 (SEM)

本研究中所選擇的 SEM 試體,分別取自鑽心試體或鑿取自有疑似 鹼質與粒料反應徵候之現地結構物碎片。石梯港及臺東海濱公園消波 塊部份試體其內部有海綿狀體之膠結物,與屬於活性粒料和鹼性物質 反應所生成的產物類似,部份形狀包括了海綿狀體之膠結物、細絲狀 等,如照片 4.21 至 4.22 所示;顯示其組成成份包括鹼、矽、鈣、鋁和 鈉之膠體,與外部徵候調查結果相互印證,應有鹼質與粒料反應之生 成物存在。

為確認類似鹼質與粒料反應膠體產物的存在與反應膠體產物的成 分,本研究後續將對部分完成浸泡試驗之試體同時進行 EDS 分析,如 出現類似鹼性物質反應所生成的產物,且經分析含有鈉、鉀、矽、鈣 等成分,可與 X 光繞射分析及目視檢測結果相互比對確認粒料活性。



照片 4.21 石梯港消波塊 SEM 照片



照片 4.22 臺東海濱公園消波塊 SEM 照片

3.鑽心試體斷面醋酸鈾法試驗

現場完成鑽心試體取樣後,以醋酸鈾法檢測試體表面是否含有鹼 矽膠體。各試體斷面在噴灑醋酸鈾液體前後之照片比對分析,經過詳 細色澤變化鑑定後,整體而言,尚無出現黃綠色反應(鹼矽膠體)的區域。

4.鑽心試體浸泡試驗膨脹量量測

鑽心試體浸泡環境分為 38 1N NaOH 溶液,及 38 ,相對濕度 100%兩種。本試驗因需長期觀測,目前試驗尚在進行中。

4.3.2.4 ASTM C227 水泥砂漿棒膨脹試驗法

依據 ASTM C227 規範規定,將取自具活性潛能之地區(臺東縣東 河、三仙台....等地區)之粒料製作成水泥砂漿棒,含鹼量則調整至 1.2 %,本試驗因需長期觀測,目前試驗尚在進行中。

4.4 結論

4.4.1 摻用爐石對海砂混拌混凝土之耐久性影響

- 1.配比 A(水灰比 0.45)試體,不添加爐石的河砂與海砂其抗壓強度發 展非常相似,而水灰比在 0.6 時以河砂的抗壓強度較高。
- 2.配比 A(水灰比 0.45)試體,添加 50% 爐石的河砂其抗壓強度最高, 而其他配比在添加 30% 爐石的河砂與海砂,其強度發展較高。
- 3.有添加爐石的海砂與河砂混凝土,其強度發展都比不添加爐石的 佳。

4.含爐石粉之混凝土試體,其電阻係數較不含爐石粉試體者為高。 4.4.2 混凝土構造物鹼質與粒料反應調查與潛勢分析研究

花蓮港區內及花東地區部份小型漁港或護岸設施諸如堤防消波 塊、以及陸上橋樑等構造物外觀,其外觀有發現鹼質與粒料反應之外 部徵候,顯示其有發生鹼質與粒料反應之潛能及疑慮。

第五章 結論

臺灣四面環海,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、崩塌等問題,對構構物之耐久性與安 全及港埠營運影響至鉅。臺灣對外經貿運輸主要以海運為主,港灣設 施扮演重要關鍵角色,因此,如何提升設施之建設、工程品質與耐久 性,以及維護、管理與安全極為重要,自不言可喻。本年度各子計畫 執行所得初步結果,簡略歸納如下:

- 基、高港區之鋼板樁碼頭,均有安裝犧牲陽極塊之陰極防蝕措施, 防蝕保護效果良好,基港東#8、東#9 碼頭之腐蝕速率約 0.10mm/yr., 高港#69、#70 碼頭約 0.02mm/yr.。
- 2. 安裝之陽極塊其電氣性能良好,其年耗損速率正常,如無外力衝擊 掉落,應可達到原始設計防蝕保護年限(二十年)。
- 混凝土摻用波索蘭材料混拌,可提升鋼筋混凝土構造物之品質與耐 久性能。
- 花蓮、臺東之瀕海地區部份混凝土構造物,諸如商漁港之防波堤、 護岸設施、建物、消波塊等,發現有疑似鹼質與粒料反應之癥候。

參考文獻

- [1] 臺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] 臺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。
- [3] 交通部運輸研究所,「碼頭鋼板樁現況調查與腐蝕防治研究」, MOTC-IOT-IHMT-MA9011,2002。
- [4] 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 板樁岸壁調查檢測」,IHMT-9001,2002。
- [5] 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)。
- [6] 交通部運輸研究所,「港灣構造物檢測與耐久性試驗研究(2/3)」, MOTC-IOT-92-H1BA04,民國91年3月,2002)。
- [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] 交通部運輸研究所,「港灣構造物陰極防蝕準則(草案)」, MOTC-IOT-92-H1BB02,2003。
- [9] 臺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。
- [10] 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。
- [11] 石黑健、白石基雄、海輪博之,"鋼矢板工法", p571,日本,山海 堂,1982。
- [12] Samuel A. Bradford, "Corrosion Control ", Van Nostrand Reinhold, New York, U.S.A., 1993.
- [13] ASTM C876-91, "Standard Test Method for Holf-Cell Potentials of

Uncoated Reinforcing Steel in Concrete " 。

- [14] 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。
- [15] Stanton, T. E. (1940), "Expansion of Concrete Through Reaction Between Cement and Aggregate", Proc. ASCE, Vol.66.
- [16] Hobbs, D. W. (1988), Alkali-Silica Reaction in Concrete, Thoma Telford, London.
- [17] Lee, C. (1986), "Available Alkalis in Fly and Their Effects on Alkali-Aggregate Reaction", PHD Dissertation, Iowa State University.
- [18] 王櫻茂,楊宏儀(1991),以普蜀蘭混合材料防制鹼-骨材反應(二), 行政院國科會專題研究報告。
- [19] 李釗,陳桂清,許書王(1998),花蓮港區混凝土構造物鹼質與粒料 反應之調查研究,臺灣省政府交通處港灣技術研究所研究報告。
- [20] 李釗,柯正龍(1999),臺中、基隆及蘇澳港區混凝土構造物鹼質與 粒料反應調查與潛勢分析研究,國立中央大學土木工程所碩士論文。
- [21] 李釗,陳桂清,許書王(1999),港區混凝土構造物鹼質與粒料反應 調查與潛勢分析研究,臺灣省政府交通處港灣技術研究所研究報告。
- [22] 李釗,許書王(1999),臺灣地區鹼質與粒料反應抑制策略之研究, 國立中央大學土木工程研究所博士論文。
- [23] Deng, M.S. (1996), "Alkali-Silica Reaction in The Cement Concrete Pavement of Airport", ICAAR, 10th International Conference.
- [24] ASTM C150-97a (1998), "Standard Specification for Portland Cement", American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA.
- [25] Jonathan, Wood G. M. (2000), "Comparison of Field Performance With Laboratory Testing: How Safe And Economic Are Current AAR Specification?", ICAAR, 11th International Conference, . PP.543-552.
- [26] SHRP-C/FR-91-101 (1991), Handbook For The Identification of Alkali-Silica Reactivity In Highway Structures, Strategic Highway

Research Program1.

- [27] Hooton, R. D. (1996), "Recent Developments in Testing for ASR in North America", ICAAR, 10th International Conference, PP.280-287.
- [28] ASTM C295-90 (1998), "Standard Guide for Petrographic Examination of Aggregate for Concrete", American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA.
- [29] ASTM C289-94 (1998), "Standard Test Method for Potential Alkali-Silica Reactivity of Aggregates(Chemical Method)", American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA.
- [30] ASTM C227-97a (1998), "Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Cement-Aggregate Combinations(Mortar-Bar Method)", American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA.
- [31] ASTM C1260-94 (1998), "Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)", American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA.
- [32] ASTM C1293-95 (1998), "Standard Test Method for Concrete Aggregates by Determination of Length Change of Concrete Due to Alkali-Silica Reaction", American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA.
- [33] Marie de Grosbois and Eric Fontaine (2000), "Performance of The 60
 -Accelerated Concrete Prism Test For The Evaluation of Potential Alkali-Reactivity of Concrete Aggregates", ICAAR, 11th International Conference. PP.277-286.
- [34] Marie de Grosbois and Eric Fontaine (2000), "Evaluation of The Potential Alkali-Reactivity of Concrete Aggregates : Performance of Testing Methods and A Producer's Point of View", ICAAR, 11th International Conference. PP.267-276.
- [35] Giampiero Barisone and Gaetana Restivo (2000), "Alkali-Silica Reactivity of Some Italian Opal and Flints Tested Using A Modified

Mortar Mar Test", ICAAR, 11th International Conference. PP.239-245. [36]李釗, 許書王, 陳桂清(1996),「由破裂之消波塊探討鹼骨材反應」, 港灣報導, PP.30-40.

- [37] 李釗, 謝文凱(1997), 抑制鹼-骨材反應之基礎研究, 國立中央大學 土木工程所碩士論文。
- [38] Shayan, A., Diggins R. and Ivanusec I. (1996), "Effectiveness of Fly Ash in Normal and Steam-Cured Concrete", C.C.R., Vol. 26, PP.153-164.
- [39] Sidney, M. and J. F. Young, Concrete, PP.444-448.
- [40] Bungey, J. H. (1994), "Testing of Concrete in Structure", 2nd ed. Surrey University Press U.S.A.

附錄一

子計畫(一)碼頭鋼板樁現況調查與腐蝕 防制方法研究

第一章 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、 結構體較富彈性、耐震性強、不需要水下基礎工程 等優點,在港灣 工程中廣受應用,然而其最大的缺點為容易發生腐蝕。國內五大商港 之鋼構碼頭建造材料主要有鋼板樁及鋼管樁兩種。

由於早期國內鋼構碼頭設計時,鋼樁之腐蝕速率,多參酌日本港 灣構造物設計基準等設計準則,以 0.20 mm/yr.為設計允許值,但不同 海域環境之鋼構材料其腐蝕速率均有差異,上述準則之設計條件與基 本假設和國內港口之海域特性應有出入,如逕行採用,是否合適,值 得進一步探討。為此,本所港研中心即於民國 79 年開始,在國內五大 港口之鋼構碼頭進行全面調查。調查結果發現,各港之鋼構碼頭其鋼 樁之腐蝕情形,以基隆港部分碼頭之鋼樁腐蝕問題較為嚴重,不僅腐 蝕速率大於允許設計值,並曾發生穿孔、破洞等情形,甚至發生碼頭 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]~[6]},而花蓮港至民國 92 年止,其碼頭之鋼板樁位於 海中帶部份未曾採用任何防蝕措施,雖腐蝕速率未超出設計允許值, 但因使用年限已超過三、四十年,且靠海床附近曾發現板樁發生彎曲 開裂之現象。歷年調查結果顯示,各港之鋼樁如採用適當之防蝕措施, 均可達到降低其腐蝕速率之效果,例如,海中帶採用犧牲陽極塊作為 防蝕工法。

為確保碼頭營運安全,本所港研中心除持續進行各港之鋼構碼頭 之鋼樁腐蝕現況調查外,並已初步完成港灣構造物安全檢測與評估與 港灣構造物陰極防蝕準則草案等研究^{[7]~[8]}。本年度(93年)將繼續選 定對象為高雄港 69號、70號鋼板樁碼頭及基隆港東8號、東9號鋼管 樁碼頭進行調查,另將彙整分析歷年調查之結果,期能提供各港務維 護單位執行碼頭安全檢測與評估之參考。

第二章 文獻回顧

2.1 鋼材之腐蝕機理

金屬發生腐蝕為一自然的反應程序,大多數的金屬材料曝露於大 氣環境下,都會自然發生物質退化,逐漸被腐蝕的現象,尤其是在酸、 鹼或海水等環境下,腐蝕更趨嚴重。腐蝕是電化學反應之行為,其間 涉及電子的轉移,如金屬由原子狀態因放出電子而變成金屬離子,或 金屬離子因獲得電子而成為金屬,因而構成氧化(陽極)及還原(陰極)反 應之發生。因此,任何腐蝕的發生,必須具有陽極反應和陰極反應以 及能使電子或離子流動轉移之導電途徑(亦即電解質),形成一封閉的導 電迴路。

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

陽 極: Fe $Fe^{+2} + 2e^{-1}$

陰 極: $H_2O + 1/2O_2 + 2e^-$ 2OH⁻

總反應: $Fe + H_2O + 1/2O_2$ Fe(OH)₂

 $Fe(OH)_2$ 並繼續反應,生成紅銹 $Fe(OH)_3$ 或黑銹 Fe_3O_4 H_2O 產物。

2.2 影響鋼板樁腐蝕之因子

2.2.1 曝露區域

從許多調查研究發現,海洋結構物腐蝕的部位及速率有很明顯的 差異。由於彼此接觸(曝露)環境不同,其腐蝕形態亦不同,一般將海洋 環境區分成五個曝露區域。

1.大氣帶

此區域之鋼結構物不接觸海水,表面完全曝露接觸大氣中之各種 介質,諸如氣體、日照 等大自然介質,由於海洋大氣中含有較高 濃度之海鹽粒子,加上濕度大、日照、溫度之變化,鋼材外表很容易 受到侵蝕,其腐蝕速率為一般內陸地區大氣腐蝕的 2~5 倍。

2.飛沫帶

自平均高潮位以上至海面大氣帶下端,屬於海洋大氣與海水交界 面。鋼材曝露於此範圍內時,由於不斷反覆地受到海浪的潑濺以及日 曬乾燥,產生乾濕循環作用,致使附著鋼材表面之鹽份及氧氣濃度不 斷增濃,腐蝕最為嚴重,為五個曝露區域中,腐蝕最嚴重的部位。一 般低碳鋼如沒有任何防蝕處理時,其腐蝕速率可達 0.5~1.0 mm/yr.,約 為海中帶的 5~10 倍。

3.潮汐帶

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

4.海中帶

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

5.海泥(床)帶

鋼材埋入於海底土層之部份,由於與海水接觸面較小,其腐蝕速 率相對很小。但在污染海域中,如有硫化氫 (H₂S) 或海泥中有硫酸還 原細菌存在的話,則鋼材的腐蝕性會增加,腐蝕速率變大。

2.2.2 海水的性質

海水是一個極複雜的水溶液,為大自然環境下一個包容性非常大的緩衝溶液,碼頭鋼板(管)樁絕大部份(約 80%)都浸泡於海水溶液下, 其間金屬材料發生腐蝕之變化很大,因此有關海水之化性、物性及相 關影響因素都必須深入探討之。

1.含鹽量

海水因含有很高的鹽份(以氯離子濃度或鹽度表示之),為鋼材最易 發生電化學腐蝕反應之環境。在廣闊的大海中,海水中約含有3.5%(重 量百分比)之氯入鈉或鹽度約介於32 36 之間。在封閉的海灣水域,由 於蒸發作用致使海水鹽度較高,例如紅海其鹽度約為41。而在有河川 流入之海口附近,因受陸地淡水溪流之稀釋,則鹽度較低。

海水中之 CI⁻能穿透破壞鋼材表面之鈍化性質或阻止鈍態保護膜之 生成,因而使鋼材表面發生腐蝕。含鹽量之多寡與溶氧量、pH 值、溫 度、水深等均有相互關係。

2.溫度

海水之表面溫度,常因地球緯度之影響而有所變化。其範圍從極 地-2 至赤道 35 之間。依據動力學理論,溫度每上昇 10°K,腐蝕 速率將增加一倍。當海水溫度升高時,致使鋼材變成為較不高貴電位 之金屬,此時鋼材之腐蝕電位開始移向電位更負之方向,亦即鋼材更 容易進行腐蝕反應。港灣結構物等開放系統,隨溫度上升,溶氧量減 少,鋼鐵之腐蝕速率為最大,而如海水管線等密閉系統,沒有溶氧量 減少之發生,故腐蝕速率隨溫度之上升而遞增。

3.pH 值

海水之 pH 值在正常情況下介於 8.1 至 8.3 之間。但在停滯不流動 之港灣海域中或海水中含有大量有機物體,可能使海水變成較酸性, 海水之 pH 值降低至 7.0 以下。pH 值之變化隨著海水之深度、溫度、 溶氧量 等因素之不同而異。

鋼材在海水中極易發生腐蝕, 金屬表面生成一層阻礙氧氣擴散之 Fe(OH)₂ 膜, 隨著腐蝕之進行, 此膜不斷的更新滋長, 並與鹼性海水接 觸, 因此鐵表面之 pH 值約為 9.5。當海水 pH 值低於 4 時, 鋼材表面 之 Fe(OH)₂ 鈍態保護膜被溶解, 鐵表面之 pH 值降低。鐵材之次表面層 不斷地析出且更能直接與海水接觸,腐蝕速率增大約等於氫氣生成與 氧氣去極化作用所產生之腐蝕速率。而 pH 值大於 10 時,增加環境之 鹼性,亦增加鋼材表面之 pH 值,因此鐵表面之鈍態保護膜不易溶解, 腐蝕速率大幅降低。

4.溶氧量

氧是海水中金屬發生腐蝕最主要的催化劑。海水中鋼材之腐蝕速 率依其表面之溶氧量而定,若海水之溶氧量增加時,則接觸鋼材表面 之氧量增加,其腐蝕速率增大。在正常的大氣壓下,海水之溶氧量隨 著溫度及鹽度之變化,維持一平衡關係。

溶氧量亦隨海水深度而有所差異,主要受到海中植物進行光合作 用或有機生物體之分解作用,而致使溶氧量有所消長,在深海處溶氧 量低,對大多數之金屬而言,其腐蝕速率相對亦低。溶氧量亦受海水 流速之增大而增濃,亦受某些好氧細菌之作用(消耗)而降低濃度。

5.比導電度

海水之比導電度(conductivity)是決定金屬腐蝕量多寡之一個重要因素,尤其是在有伽仉尼偶合作用(Galvanic coupling)及金屬表面局部有間隙存在的地方。海水較其它水溶液比具有很高的比導電度,約比

一般水溶液高 250 倍以上。海水之高比導電度容易造成鋼材表面大面 積的發生腐蝕反應,尤其是鋼材表面之陽極面積小而陰極面積大時, 腐蝕更是嚴重,最後形成局部孔蝕或間隙腐蝕。比導電度之倒數稱謂 之比電阻(resistivity)。

6.深度

美國海軍試驗站研究人員於 1966 年,曾在太平洋的試驗站所做的 深海腐蝕試驗,結果顯示,腐蝕速率隨著深度之增加而呈遞減趨勢, 但如深至海床泥土時,若有硫化合物存在時,更能助長厭氧性之硫酸 還原菌之滋長,可能加速金屬之腐蝕反應速率。

7.流速

海水流速對金屬腐蝕速率有多方面的影響。它不但能造成增加較 易到達接觸金屬表面之溶氧量,又能因海流衝擊之機械效應,去除金 屬表面鈍態保護膜,更促使氧氣較易對金屬表面進行擴散及濃度極 化,造成金屬發生腐蝕。

8.迷失電流

迷失電流乃指不沿正規路徑,而走其它路徑流通之電流謂之。一 旦這種迷失電流進入金屬結構物時,在離開結構物之處,會發生電蝕 現象並加速腐蝕速率。海洋結構物諸如碼頭鋼板樁、油井平台,船舶 停泊港口卸貨或進行電焊維修工程時或安裝防蝕系統(外加電流)時,其 供電設備,可能發生斷路或漏電,這些電流可能經由船殼或直接流入 海水中,由於海水是良好之電解質,更容易將這些電流傳導至鋼板樁 等金屬結構物,迷失電流一旦進入結構物,則會加速腐蝕速率。

9.海生物附著

海水中包含有許多各種不同的有機生物體等,這些有機生物體有 微污生物諸如細菌等,及巨污生物諸如海藻、滕壺、貝類等。由於海 生物所排放之黏液(slime)容易附著於結構物表面上,接著形成生物黏液 膜,萌芽的固著微生物體持久大量的附著,最後繁殖形成巨大的附著 生物體,造成結構體局部的腐蝕劣化及荷重增加。

2.3 鋼構造物在海洋環境中的防蝕方法

依據鋼構造物在海洋環境曝露的區域,所使用的防蝕方法概述如 下:

1.海洋大氣帶

鋼結構在海洋大氣帶的防蝕多採用有機重塗塗料,如油性塗料、 氯化橡膠、環氧瀝青、乙烯塗料等,特別是在無機鋅底漆上再刷塗厚 膜型的塗料;此外,使用常溫金屬鋁熔射、鋅熔射或鋅鋁熔射後再加 上表面塗裝的防蝕方式,亦常為日本及歐美國家使用。

2.飛沫帶

由於碳鋼在飛沫帶的腐蝕速率最大,國內外採取的防蝕方法為(1) 塗料,如無機鋅底漆+Coating coal-Tar Epoxy 面漆,(2)有機被覆,如 多元酯樹脂 PE、聚氨酯 PU 或環氧樹脂 Epoxy,(3)無機被覆,如混 凝土包覆、FRP 包覆或中性石油脂防蝕帶包覆,(4) 金屬包覆法,如 不銹鋼包覆或低合金抗蝕鋼鐵(如 monel)。對於塗料,一般與海洋大氣 帶所使用的塗料相同,但在此環境中耐久性較差且使用週期短;而有 機被覆層則具有耐沖擊性且易於修補的特性;混凝土包覆其厚度增加 則重量增加,一旦龜裂,修補困難;monel 金屬包覆的防蝕效果良好, 但價格昂貴;至於陰極防蝕法,鋼樁在飛沫帶與潮汐帶的防蝕方法若 僅採用陰極防蝕系統,會因鋼樁表面歇性乾燥的結果,造成陰極保護 在潮間帶無顯著的防蝕功效。

美國腐蝕工程師學會(NACE International)曾於其技術報告 #1G194,針對飛沫帶鋼鐵結構之防蝕材料、工法,建議如下:

(1) 圍堰塗裝

圍堰塗裝(Cofferdam and Coat, C & C)於現場施工時, 需利用鐵製 的圍堰將被塗的結構物圍起,並將圍堰與結構物間的海水抽乾,乾燥 後,將傳統飛沫帶新結構物使用之有機重塗塗料, 如無機鋅粉底漆+環 氧樹脂中層漆+壓克力或 PU 面漆)塗佈於結構物表面。因施工時需要圍 堰措施,故此系統僅能供鋼管樁之直線區域施工。

(2) 中硬化環氧樹脂

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

(3) 水中硬化環氧複合樹脂

水 中 硬 化 環 氧 複 合 樹 脂 (Underwater-Curing Epoxy-Based Composite, UCEC, Systems)與水中硬化環氧樹脂相類似,僅於樹脂中添 加玻璃纖維,以增加塗料的強度與穩定性。其有相當好的抗蝕性與機 械特性,但在波高 0.6 m 時就無法施工。使用對象僅為鋼管樁,無法在 直線型或 Z 型的鋼樁上使用。

(4)石油脂防蝕帶包覆

石油脂防蝕帶包覆(Petrolatum/Wax-Based Composite, PBC, System) 係以耐腐蝕合成纖維為襯材,兩面塗覆中性石油脂防蝕劑並被覆一層 高密度聚乙烯膠膜;防蝕劑中添加惰性劑、祛水劑等成份,以增進適 合水下使用與抑制銹蝕之功能。但其機械性能不佳,若暴露於大氣或 海水中,可能受外界環境之機械衝擊(如波浪衝擊),須另加一機械夾層 補強,夾層材質如 PE、PVC、或 FRP 等。一般而言,防蝕帶包覆系統 僅能在波高 0.6 m 下施工,施工完成後可抵抗波高 1m 的衝擊,但其保 護對象僅限於鋼管樁之直線部份。

(5) 矽膏防蝕帶包覆

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

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

(6) 混凝土複合包覆

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

(7) 金屬包覆(Alloy Sheathing)

金屬包覆的方式是將 1-5 mm 厚的銅鎳合金,如 Nickel-Copper Alloy 400 (UNS N04400)、90/10 Copper-Nickel (UNS C70600)焊接到碳 鋼組件,再將碳鋼組件組合至結構體。由於焊接施工的困難,金屬包 覆系統在波高 0.6 m 時就無法施工,但一旦完成,可抵抗波高 1m 以上 的衝擊。其施工對象包含鋼管樁及直線型或 Z 型板樁。

3.潮汐帶

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

4.海中帶

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

5.海泥帶

一般採用與海中帶相同的防蝕方法。如採用陰極防蝕設計時,該 區帶所需的保護電流密度約為海中帶的五分之一^[5]。

2.4 陰極防蝕

2.4.1 陰極防蝕方法

陰極防蝕的方法有兩種,一為外加電流法,一為犧牲陽極法。外 加電流法主要是利用一外部電源來提供陰極與陽極之間的電位差。陽 極必須接於電源之正端,而被保護金屬則接於電源的負端。

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

一般而言,外加電流法較犧牲陽極法複雜,且外加直流電之費用 也比安裝犧牲陽極高。然前者可使用可變電源,來保護較大面積之裸 鋼或良好被覆的結構物;後者則可應用於結構物之保護電流量需求較 少,或介質之比電阻較低的環境。表 2.1 為兩者的特性比較。

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

表 2.1 外加電流法與犧牲陽極法之特性比較

第三章 研究規劃與調查方法

3.1 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 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。



3.3 檢測範圍

本年度檢測範圍;高雄港 69 號、70 號鋼板樁碼頭及基隆港東 8 號、東9號鋼管樁碼頭。

3.4 鋼板(管)樁檢測

3.4.1 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。

3.4.2 厚度量測

1. 選定檢測樁

高雄港 69 號 70 號碼頭自起點每 3 公尺選取 1 支鋼板樁為厚度檢 測測樁。基隆港東 8 號、東 9 號碼頭之鋼管樁為每一單元選取 3 排共 8 支測樁 (每一碼頭各有 8 個單元)。

2. 選定水深與量測位置

依鋼構碼頭之鋼樁腐蝕可能狀況及測樁位於海中帶之長度範圍, 每支測樁選定二至十點水深作為量測點。U型鋼板樁檢測凸面或凹面 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. 厚度量測過程

(1)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,由探頭傳送出之一彈性波,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 3.3。

厚度計算可由下列數學式求得:

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

(公式 3.1)



圖 3.3 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)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。

(3)海生物敲除厚度量測

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 淨之鋼樁表面,即可讀取鋼樁厚度。於每一水深測點量取兩次鋼樁厚 度,平均後即為其現有厚度。圖 3.4 為潛水人員於海中量測鋼樁厚度之 情形。



圖 3.4 以超音波量測鋼樁厚度之情形

4. 腐蝕速率計算

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

腐蝕速率 = 腐蝕量 / 使用年期

= (原始厚度-現有厚度) / 使用年期 (公式 3.2)

3.4.3 鋼樁保護電位量測

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

防蝕效果的判斷標準如表 3.1 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 -850 mV 為"正", 則表示保護不足或防蝕效果不 佳。

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

表 3.1 海水中鋼構造物之防蝕保護電位標準

3.5 陽極塊調查

3.5.1 選定陽極塊

陽極塊調查數量分別為高雄港 69 號碼頭選定 14 支、70 號碼頭選 定 26 支,基隆港東 8 號、東 9 號碼頭各選定 20 支。

3.5.2 陽極塊發生電位之量測

- 酒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。

3.5.3 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 3.5 所示。



圖 3.5 陽極塊尺寸量測位置

3.5.4 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。

3.5.5 陽極塊釋出電流量測

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 3.6 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如圖 3.7 所示。



圖 3.6 陽極塊輸出電流量測



圖 3.7 電流計、感應環構造圖

第四章 結果與討論

4.1 碼頭構造物背景資料分析

高雄港 69 號 70 號碼頭(鋼板樁)及基隆港東 & 東 9 號碼頭(鋼 管樁)等構造物,其背景資料如表 4.1 所示,港口潮位資料如表 4.2 所 示。

堆 商夕採	長度	水深	鋼板(管)樁	原始厚度	完 工	防命虚田
1~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	(m)	(m)	型 式	(mm)	日期(年)	別既処埕
高雄港 69 號	320	-14	FSP 6L U 型鋼板樁	27.6	民國 68	犧牲陽極
高雄港 70 號	320	-14	FSP 6L U 型鋼板樁	27.6	民國 68	犧牲陽極
基隆港東8	240	-12	鋼管樁	12	民國 84	犧牲陽極法
基隆港東9	240	-12	鋼管樁	12	民國 79	犧牲陽極法

表 4.1 鋼板 (管) 樁碼頭構造物背景資料

表 4.2 基隆港、高雄港之潮位資料

港口 潮位	基隆港	高雄港
最高高潮位 H.H.W.L	+2.31	+1.50
平均高潮位 M.H.W.L	+1.16	+0.95
平均潮位 M.W.L	+0.89	+0.74
平均低潮位 M.L.W.L	+0.63	+0.53
低潮位 L.W.L	-0.25	+0.11

4.2 鋼板樁現況檢測

4.2.1 高雄港 69 號碼頭

本座碼頭於民國 68 年完工,水深-14 公尺,碼頭全長 320 公尺, 採用 FSP-6L U 型組合之鋼板樁建造,鋼板樁於完工後即安裝犧牲陽極 塊作為防蝕措施,整支鋼板樁均位於海水中。碼頭平面位置、結構斷 面、使用鋼板樁型式分別示如圖 4.1 至圖 4.3。



圖 4.1 高雄港 69 號、70 號鋼板樁碼頭平面佈置



圖 4.2 高雄港 69 號碼頭結構斷面



圖 4.3 FSP 6L U 型鋼板樁 BOX 型式

1.目視檢測

本座碼頭鋼板樁均位於海水中,表面附著許多海生物,無明顯銹 蝕現象,圖 4.4 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 4.4 海生物敲除後之鋼板樁表面

2.鋼板樁厚度

圖 4.5 為 69 號碼頭鋼板樁厚度量測水深示意圖,於自起點起每 3 公尺取 1 支測樁,共選取 107 支測樁。每支測樁檢測水深分別為 +0.1 m、-1.0 m、-2.0 m、-3.0 m、-4.0 m、-6.0 m、-8.0 m、-10.0 m、-11.0 m、 -12.0 m,計 10 個深度測點,檢測點共計 1070 點。


表 4.3 及圖 4.6 為 69 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約為 0.02 mm/yr.左右,遠小於腐蝕設計 允許值(0.20 mm/yr.),圖 4.7 至圖 4.12 為各測樁腐蝕速率與水深關係, 每一測點之腐蝕速率均小於設計允許值;鋼板樁使用時間雖已 25 年, 現有厚度僅少數測點為 26.0 mm,最大減少厚度約 1.6 mm,換算為腐 蝕速率約 0.05 mm/yr.,腐蝕程度屬輕微,顯然安裝犧牲陽極塊已達到 防蝕之目的,圖 4.13 至圖 4.15 為鋼板樁現有厚度等高線及 3D 示意圖。

水深(m)	+0.1	-1.0	-2.0	-3.0	-4.0	-6.0	-8.0	-10.0	-11.0	-12.0
腐蝕速率 (mm/yr.)	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02

表 4.3 高雄港 69 號碼頭鋼板樁平均腐蝕速率



Corrosion rate (mm/yr.) 圖 4.6 高雄港 69 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

鋼板樁保護電位量測位置如圖 4.16,量測結果列於表 4.4。保護電 位最大值為 -917 mV,最小值為 -1030 mV,均小於-850 mV(以 Cu/CuSO4電極量測),鋼板樁處於防蝕保護狀態。



圖 4.7 高雄港 69 號碼頭鋼板樁腐蝕速率與水深之關係 (1)



圖 4.8 高雄港 69 號碼頭鋼板樁腐蝕速率與水深之關係 (2)



圖 4.9 高雄港 69 號碼頭鋼板樁腐蝕速率與水深之關係 (3)







圖 4.11 高雄港 69 號碼頭鋼板樁腐蝕速率與水深之關係 (5)



圖 4.12 高雄港 69 號碼頭鋼板樁腐蝕速率與水深之關係(6)



圖 4.13 高雄港 69 號碼頭鋼板樁現有厚度等高線及 3D 示意圖 (1)



圖 4.14 高雄港 69 號碼頭鋼板樁現有厚度等高線及 3D 示意圖 (2)



圖 4.15 高雄港 69 號碼頭鋼板樁現有厚度等高線及 3D 示意圖 (3)



圖 4.16 高雄港 69 號碼頭鋼板樁保護電位量測位置圖

表 4.4 高雄港 69 號碼頭鋼板樁保護電位值

單位: mV

编驰		水深	(m)		紽蛅	水深(m)				
利用 力亢	-1.0	-4.0	-7.0	-10.0	利用 分元	-1.0	-4.0	-7.0	-10.0	
1	-971	-976	-975	-976	31	-1004	-998	-999	-999	
2	-956	-961	-961	-961	32	-936	-936	-926	-917	
3	-971	-979	-979	-979	33	-987	-988	-991	-994	
4	-993	-1013	-1018	-1027	34	-966	-973	-974	-973	
5	-993	-1009	-1017	-1016	35	-965	-978	-972	-972	
6	-991	-1000	-1010	-1009	36	-945	-956	-961	-962	
7	-996	-1012	-1023	-1018	37	-939	-960	-951	-959	
8	-973	-989	-989	-989	38	-936	-959	-973	-976	
9	-986	-997	-995	-993	39	-962	-973	-967	-984	
10	-990	-1008	-1020	-1017	40	-957	-973	-962	-962	
11	-1003	-1009	-1014	-961	41	-963	-966	-964	-968	
12	-976	-1000	-1008	-1018	42	-984	-976	-980	-979	
13	-996	-1024	-1017	-1009	43	-983	-988	-980	-990	
14	-991	-1001	-999	-1002	44	-979	-985	-994	-998	
15	-1019	-1012	-1023	-1029	45	-990	-980	-984	-985	
16	-995	-1009	-1015	-1014	46	-960	-968	-973	-979	
17	-988	-1010	-1006	-1008	47	-958	-967	-964	-971	
18	-997	-1016	-1010	-1008	48	-969	-977	-974	-979	
19	-1011	-1023	-1027	-1026	49	-964	-968	-971	-975	
20	-1015	-1023	-1019	-1021	50	-960	-966	-969	-980	
21	-1018	-1012	-1017	-1030	51	-960	-967	-974	-981	
22	-1011	-1010	-1002	-1004	52	-975	-973	-970	-991	
23	-984	-1000	-994	-994	53	-972	-984	-983	-989	
24	-973	-984	-983	-984	54					
25	-966	-970	-971	-974	55					
26	-984	-982	-999	-1005	56					
27	-999	-999	-1004	-1002	57					
28	-991	-1005	-1013	-1019	58					
29	-1003	-1002	-1011	-1010	59					
30	-991	-1006	-1005	-1007	60					

4.3.2 高雄港 70 號碼頭

本座碼頭亦於民國 68 年完工,水深 -14 公尺,碼頭全長 320 公尺, 採用 FSP 6L 之 U 型鋼板樁建造,整支鋼板樁均位於海水中。碼頭結 構斷面、鋼板樁型式與 69 號碼頭相同。

1.目視檢測

鋼板樁表面附著許多海生物,無明顯銹蝕現象,海生物敲除後, 鋼板樁表面外觀仍然保持光亮。

2.鋼板樁厚度量測

圖 4.17 為 70 號碼頭鋼板樁厚度量測位置示意圖,自起點起每 3 公 尺取 1 支測樁,共選取 123 支測樁。每支測樁檢測水深分別為 +0.1 m、 -1.0 m、-2.0 m、-3.0 m、-4.0 m、-6.0 m、-8.0 m、-10.0 m、-11.0 m、-12.0 m,計 10 個深度測點,檢測點共計 1230 點。



圖 4.17 高雄港 70 號碼頭鋼板樁厚度量測位置示意圖

表 4.5 及圖 4.18 為 70 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為 0.02 0.03 mm/yr.,遠小於設計允許 值。圖 4.19 至圖 4.25 為各測樁腐蝕速率與水深關係,現有厚度最小值 為 25.4 mm,最大減少厚度約 2.2 mm,腐蝕程度亦屬輕微,顯示安裝 犧牲陽極塊已達到防蝕之目的。

水深(m) +0.1-1.0 -2.0 -3.0 -4.0 -6.0 -8.0 -10.0 -11.0 -12.0 腐蝕速率 0.03 0.03 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 0.02 (mm/yr.)

表 4.5 高雄港 70 號碼頭鋼板樁平均腐蝕速率



Corrosion rate (mm/yr.)

圖 4.18 高雄港 70 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

鋼板樁保護電位量測位置如圖 4.29,量測結果列於表 4.6。保護電 位最大值為 -892 mV,最小值為 -993 mV,保護電位均小於-850 mV (以 Cu/CuSO4電極量測),鋼板樁處於防蝕保護狀態。



圖 4.19 高雄港 70 號碼頭鋼板樁平均腐蝕速率與檢測水深之關係(1)



圖 4.20 高雄港 70 號碼頭鋼板樁平均腐蝕速率與檢測水深之關係 (2)



圖 4.21 高雄港 70 號碼頭鋼板樁平均腐蝕速率與檢測水深之關係 (3)



圖 4.22 高雄港 70 號碼頭鋼板樁平均腐蝕速率與檢測水深之關係 (4)



圖 4.23 高雄港 70 號碼頭鋼板樁平均腐蝕速率與檢測水深之關係 (5)



圖 4.24 高雄港 70 號碼頭鋼板樁平均腐蝕速率與檢測水深之關係 (6)



圖 4.25 高雄港 70 號碼頭鋼板樁平均腐蝕速率與檢測水深之關係(7)



圖 4.26 高雄港 70 號碼頭鋼板樁現有厚度等高線及 3D 示意圖 (1)



圖 4.27 高雄港 70 號碼頭鋼板樁現有厚度等高線及 3D 示意圖 (2)



圖 4.28 高雄港 70 號碼頭鋼板樁現有厚度等高線及 3D 示意圖 (3)



圖 4.29 高雄港 70 號碼頭鋼板樁保護電位檢測位置示意圖

表 4.6 高雄港 70 號碼頭鋼板樁保護電位值

單位: mV

编驰		水深	(m)		编辑	水深(m)				
저에 그//	-1.0	-4.0	-7.0	-10.0	제배 그//Ն	-1.0	-4.0	-7.0	-10.0	
1	-980	-990	-993	-990	36	-950	-965	-953	-956	
2	-982	-988	-982	-960	37	-937	-965	-949	-956	
3	-951	-962	-968	-970	38	-948	-950	-962	-964	
4	-971	-979	-978	-984	39	-934	-962	-954	-956	
5	-960	-971	-963	-959	40	-934	-940	-956	-953	
6	-942	-951	-952	-958	41	-932	-945	-940	-942	
7	-935	-951	-948	-946	42	-929	-924	-932	-932	
8	-979	-962	-958	-958	43	-924	-954	-941	-943	
9	-951	-973	-972	-963	44	-941	-944	-954	-950	
10	-957	-958	-953	-959	45	-928	-943	-937	-945	
11	-969	-963	-992	-966	46	-948	-931	-938	-944	
12	-974	-967	-974	-972	47	-913	-929	-932	-933	
13	-920	-927	-929	-936	48	-914	-924	-934	-931	
14	-919	-936	-926	-931	49	-900	-929	-934	-933	
15	-934	-945	-939	-939	50	-892	-923	-931	-943	
16	-938	-959	-950	-957	51	-915	-948	-930	-928	
17	-954	-954	-963	-962	52	-902	-923	-952	-936	
18	-945	-950	-947	-951	53	-912	-915	-933	-946	
19	-939	-962	-962	-953	54	-927	-921	-931	-932	
20	-924	-931	-941	-943	55	-906	-943	-928	-926	
21	-925	-926	-925	-928	56	-928	-924	-943	-942	
22	-895	-916	-924	-932	57	-916	-924	-927	-948	
23	-931	-954	-957	-965	58	-911	-934	-927	-956	
24	-930	-968	-973	-970	59	-925	-934	-941	-941	
25	-921	-934	-934	-934	60	-952	-978	-967	-977	
26	-959	-960	-954	-959	61	-926	-929	-923	-922	
27	-915	-934	-943	-934	62	-920	-941	-936	-932	
28	-921	-947	-943	-936	63	-922	-949	-947	-955	
29	-944	-943	-947	-948	64	-924	-945	-940	-938	
30	-943	-958	-959	-959	65	-935	-940	-960	-952	
31	-952	-958	-958	-956	66	-952	-969	-967	-960	
32	-965	-975	-977	-977	67	-960	-977	-987	-987	
33	-958	-973	-976	-969						
34	-955	-964	-963	-964						
35	-950	-959	-956	-969						

4.2.3 基隆港東8號碼頭

本座碼頭原為鋼板樁結構型式,民國 82 年因營運需要,自原有碼 頭岸線向海側延伸 20 公尺,設計水深 -12.0 m,採棧橋式鋼管樁結構, 碼頭全區共分為 8 個單元,每一單元各打設 8 排鋼管樁,於民國 84 年 完工,潮汐帶部位之鋼管樁以混凝土保護,海中帶採用犧牲陽極塊法 作為防蝕措施,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。碼頭平面佈置、結構斷面及單元管樁配置平 面分別示於圖 4.30 至圖 4.32。



圖 4.30 基隆港碼頭平面佈置圖



圖 4.31 基隆港東 8 號碼頭鋼管樁結構斷面



圖 4.32 基隆港東 8 號碼頭鋼管樁配置平面 (以A 單元為例)

1.目視檢測

潮汐帶部位之鋼管樁以混凝土包覆保護,外觀無孔蝕或破洞等嚴 重之腐蝕,潮汐帶及海中帶之鋼管樁表面附著許多如牡蠣、籐壺等大 型海生物,如圖 4.33 及圖 4.34 所示。





圖 4.33 基隆港東 8 號碼頭鋼管樁表面海生物附著之情形 (1)

圖 4.34 基隆港東 8 號碼頭鋼管樁表面海生物附著之情形 (2)

2. 鋼管樁厚度

厚度測樁選定全區碼頭之每一單元之第3及第5排自海測算起第1 支樁,及第4排自海測算起第1至第6支樁為測樁,每支測樁依其所 處實際水深,檢測水深為-1.5m、-2.0m、-3.0m、-4.0m、-5.0m、 -7.0m、-9.0m及-10.0m等2至8個不同水深測點,每一單元之鋼管 樁檢測位置及水深如圖 4.35 所示。



圖 4.35 基隆港東 8 號碼頭各單元鋼管樁厚度測樁位置及水深

表 4.7 及圖 4.36 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 0.04 至 0.05 mm/yr. 之間。表 4.8 至表 4.9 及圖 4.37 至圖 4.40 為各測樁腐蝕速率與水深之關係,單一測樁之最大 腐蝕速率多發生於水深 -1.5 m 及 -2.0 m 處,腐蝕速率為 0.10 mm/yr.,低於設計允許值,腐蝕程度屬於輕微。

水深(m)	-1.5	-2.0	-3.0	-4.0	-5.0	-7.0	-9.0	-10.0		
腐蝕速率 (mm/yr.)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04		

表 4.7 基隆港東 8 號碼頭鋼管樁之平均腐蝕速率



Corrosion rate (mm/yr.)

圖 4.36 基隆港東 8 號碼頭鋼管樁之平均腐蝕速率與水深之關係

3. 鋼管樁保護電位

本座碼頭之鋼管樁保護電位選定各單元之第 2 至第 4 排樁之前 3 支樁(自海測算起),量測水深為 -1.0 m、 -4.0 m、 -7.0 m 及-10.0 m, 量測位置如圖 4.41,量測結果列於表 4.10。保護電位最大值為 -1016 mV,最小值為 -1088 mV,均小於 -850 mV(以 Cu/CuSO4電極量測) 標準防蝕保物電位值,管樁處於防蝕保護狀態。

表 4.8 基隆港東 8 號碼頭鋼管樁腐蝕速率與水深之關係 (1)

	_						<u> 単心:mm/yr.</u>					
水游	€(m)	-15	-2.0	-3.0	-4.0	-5.0	-7.0	-9.0	-10.0			
測	樁編號	-1.5	-2.0	-3.0	-4.0	-5.0	-7.0	-9.0	-10.0			
單元 A	a3-1	0.02	0.01	0.01	0.03	0.02	0.02	0.01	0.02			
	a4-1	0.03	0.04	0.03	0.04	0.04	0.03	0.04	0.03			
	a4-2	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02					
	a4-3	0.01	0.01	0.01	0.01							
	a4-4	0.01	0.01	0.01	0.01							
	a4-5	0.06	0.07	0.06								
	a4-6	0.08	0.09	0.08								
	a5-1	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02			
平	均	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02			
單元 B -	b3-1	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.06	0.07	0.06			
	b4-1	0.03	0.04	0.03	0.04	0.03	0.04	0.03	0.03			
	b4-2	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05					
	b4-3	0.07	0.07	0.06	0.07							
	b4-4	0.09	0.08	0.09	0.08							
	b4-5	0.07	0.08	0.09								
	b4-6	0.05	0.05	0.05								
	b5-1	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03	0.03			
平均		0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.04	0.04	0.04			
	c3-1	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05			
	c4-1	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06			
	c4-2	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05					
單元 C	c4-3	0.06	0.06	0.06	0.06							
-70 C	c4-4	0.03	0.04	0.04	0.03							
	c4-5	0.06	0.06	0.06								
	c4-6	0.08	0.07	0.08								
	c5-1	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06			
平	均	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06			
	d3-1	0.09	0.09	0.08	0.07	0.08	0.09	0.09	0.08			
	d4-1	0.03	0.04	0.03	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03			
	d4-2	0.04	0.06	0.05	0.05	0.06	0.04					
單元 D	d4-5	0.03	0.04	0.04	0.04							
	d4-5	0.04	0.04	0.04	0.10							
	d4-6	0.05	0.04	0.05								
	d5-1	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.03	0.04	0.05			
平	均	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05			

表 4.9 基隆港東 8 號碼頭鋼管樁腐蝕速率與水深之關係 (2)

單位:mm/yr.

水深	£(m)	15	2.0	2.0	4.0	5.0	7.0	0.0	10.0
測	樁編號	-1.5	-2.0	-3.0	-4.0	-5.0	-7.0	-9.0	-10.0
	e3-1	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
單元 E-	e4-1	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
	e4-2	0.08	0.08	0.07	0.08	0.08	0.07		
	e4-3	0.04	0.04	0.04	0.04				
	e4-4	0.04	0.04	0.04	0.04				
	e4-5	0.04	0.05	0.05					
	e4-6	0.07	0.08	0.07					
	d5-1	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.03	0.04	0.05
平	均	0.05	0.06	0.05	0.05	0.06	0.05	0.05	0.05
	f3-1								
	f4-1	0.04	0.06	0.06	0.07	0.07	0.04	0.05	0.06
	f4-2	0.03	0.04	0.04	0.04	0.03	0.04		
開규 F	f4-3	0.05	0.05	0.05	0.04				
70 I	f4-4	0.06	0.07	0.07	0.06				
	f4-5	0.07	0.07	0.07					
	f4-6	0.06	0.06	0.06					
	f5-1	0.05	0.07	0.06	0.06	0.05	0.05	0.04	0.06
平	均	0.05	0.06	0.06	0.05	0.05	0.04	0.04	0.06
	g3-1	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05
	g4-1	0.02	0.03	0.02	0.03	0.03	0.02	0.03	0.02
	g4-2	0.07	0.07	0.06	0.06	0.07	0.08		
留元 G	g4-3	0.07	0.07	0.07	0.06				
± 100	g4-4	0.05	0.05	0.05	0.05				
	g4-5	0.04	0.04	0.04					
	g4-6	0.04	0.04	0.04					
	g5-1	0.05	0.05	0.04	0.05	0.04	0.04	0.05	0.05
平	均	0.05	0.05	0.04	0.05	0.04	0.05	0.04	0.04
	h3-1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	h4-1	0.04	0.06	0.06	0.07	0.07	0.04	0.05	0.06
	h4-2	0.03	0.04	0.04	0.04	0.03	0.04		
單元 H	h4-3	0.05	0.05	0.05	0.04				
	h4-4	0.06	0.07	0.07	0.06				
	h4-5	0.07	0.07	0.07					
	h4-6	0.06	0.06	0.06					
	h5-1	0.05	0.07	0.06	0.05	0.05	0.05	0.04	0.06
平	均	0.04	0.05	0.05	0.05	0.04	0.03	0.03	0.04
總马	四均	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04





圖 4.37 基隆港東 8 號碼頭鋼管樁腐蝕速率與水深之關係 (1)





圖 4.38 基隆港東 8 號碼頭鋼管樁腐蝕速率與水深之關係 (2)


圖 4.39 基隆港東 8 號碼頭鋼管樁腐蝕速率與水深之關係 (3)





圖 4.40 基隆港東 8 號碼頭鋼管樁腐蝕速率與水深之關係 (4)



圖 4.41 基隆港東 8 號碼頭鋼管樁保護電位量測位置示意圖

表 4.10 基隆港東 8 號碼頭鋼管樁保護電位值

(單位:mV)

檢測	编號		水深	(m)		檢測	编號	水深(m)				
位置	<i>м</i> үтэ <i>JII</i> с	-1.0	-4.0	-7.0	-10.0	位置	ט ער מואיי	-1.0	-4.0	-7.0	-10.0	
	1	-1053	-1050	-1051	-1054		1	-1036	-1036	-1033	-1034	
8A-2	2	-1064	-1057	-1054	-1055	8E-2	2	-1064	-1057	-1054	-1055	
	3	-1086	-1088	-1087	-1087		3	-1086	-1088	-1087	-1087	
	1	-1052	-1043	-1039	-1043		1	-1052	-1043	-1039	-1043	
8A-3	2	-1069	-1066	-1055	-1048	8E-3	2	-1069	-1066	-1055	-1048	
	3	-1066	-1056	-1054	-1057		3	-1066	-1056	-1054	-1057	
	1	-1029	-1032	-1030	-1026		1	-1029	-1032	-1030	-1026	
8A-4	2	-1033	-1035	-1034	-1033	8E-4	2	-1033	-1035	-1034	-1033	
	3	-1034	-1035	-1034	-1034		3	-1034	-1035	-1034	-1034	
	1	-1028	-1026	-1031	-1036		1	-1028	-1026	-1031	-1036	
8B-2	2	-1031	-1031	-1032	-1033	8F-2	2	-1031	-1031	-1032	-1033	
	3	-1029	-1029	-1030	-1033		3	-1029	-1029	-1030	-1033	
	1	-1019	-1017	-1017	-1020		1	-1019	-1017	-1017	-1020	
8B-3	2	-1033	-1031	-1028	-1027	8F-3	2	-1033	-1031	-1028	-1027	
	3	-1035	-1034	-1034	-1033		3	-1035	-1034	-1034	-1033	
8B-4	1	-1019	-1026	-1022	-1016	8F-4	1	-1019	-1026	-1022	-1016	
	2	-1033	-1026	-1023	-1026		2	-1033	-1026	-1023	-1026	
	3	-1036	-1032	-1030	-1029		3	-1036	-1032	-1030	-1029	
	1	-1034	-1034	-1033	-1035		1	-1034	-1034	-1033	-1035	
8C-2	2	-1041	-1041	-1038	-1035	8G-2	2	-1041	-1041	-1038	-1035	
	3	-1041	-1039	-1039	-1041		3	-1041	-1039	-1039	-1041	
	1	-1031	-1033	-1040	-1038		1	-1031	-1033	-1040	-1038	
8C-3	2	-1045	-1043	-1041	-1039	8G-3	2	-1045	-1043	-1041	-1039	
	3	-1046	-1043	-1041	-1040		3	-1046	-1043	-1041	-1040	
	1	-1034	-1039	-1035	-1031		1	-1034	-1039	-1035	-1031	
8C-4	2	-1039	-1039	-1036	-1036	8G-4	2	-1039	-1039	-1036	-1036	
	3	-1048	-1041	-1036	-1035		3	-1048	-1041	-1036	-1035	
	1	-1033	-1033	-1033	-1033		1	-1033	-1033	-1033	-1033	
8D-2	2	-1033	-1033	-1031	-1033	8H-2	2	-1033	-1033	-1031	-1033	
	3	-1033	-1034	-1033	-1033		3	-1033	-1034	-1033	-1033	
	1	-1032	-1031	-1033	-1033		1	-1032	-1031	-1033	-1033	
8D-3	2	-1042	-1041	-1036	-1034	8H-3	2	-1042	-1041	-1036	-1034	
	3	-1042	-1041	-1040	-1040		3	-1042	-1041	-1040	-1040	
	1	-1039	-1039	-1047	-1040		1	-1039	-1039	-1047	-1040	
8D-4	2	-1048	-1046	-1041	-1038	8H-4	2	-1048	-1046	-1041	-1038	
	3	-1039	-1040	-1038	-1037		3	-1039	-1040	-1038	-1037	

4.2.4 基隆港東9號碼頭

本座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-12.0 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,每支鋼管樁於水深-2.0 及-7.0 m (或-4.5m) 處安裝 2 支陽極塊。碼頭結構斷面及各單元之平面配置,如圖 4.30 及 圖 4.31 所示 (同東 8 號碼頭)。

1.目視檢測

本座碼頭潮汐帶部位之鋼管樁以混凝土包覆保護,如圖 4.42 所 示。海中帶則分為防蝕與未防蝕等兩區,防蝕區(A D單元)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 4.43 所示。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(E H單元)之鋼管樁表面清除覆 著之藤壺等海生物後,發現一層紅橙色銹層,顯示鋼樁表面已出現銹 蝕現象,如圖 4.44 所示,而防蝕區之鋼管樁則表面光亮,腐蝕程度輕 微至無,如圖 4.45 所示。



圖 4.42 潮汐帶以混凝土保護鋼管樁之情形



圖 4.43 各鋼管樁間以鋼筋焊接連通之情形



圖 4.44 未防蝕區之鋼管樁表面腐蝕情形



圖 4.45 防蝕區之鋼管樁表面現況

2.鋼板樁厚度

厚度測樁選定全區碼頭之每一單元之第3及第5排自海測算起第1 支樁,及第4排自海測算起第1至第6支樁為測樁,每支測樁依其所 處實際水深,檢測水深為-1.5m、-2.0m、-3.0m、-4.0m、-5.0m、 -7.0m、-9.0m及-10.0等2至8個不同水深測點,各單元之鋼管樁檢 測位置及水深(同東8號碼頭),如圖4.35所示。

表 4.11 及圖 4.46 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 0.07 至 0.10 mm/yr. 之間,均小於允許設計 值。表 4.12 及圖 4.47 至圖 4.48 為防蝕區(A D單元)各測樁腐蝕速 率與水深之關係,於水深 -1.5 m 至-3.0 m 處之測樁腐蝕速率較大;靠 海測第 6 排之鋼樁之腐蝕速率明顯又大於其他各排鋼樁。此外,D 單 元之單一測樁之最大腐蝕速率達 0.13 mm/yr.,已接近未防蝕區之各單 元者,可能原因為其接近未防蝕區或安裝時間較晚。

表 4.13 及圖 4.49 至圖 4.50 為未防蝕區(E H 單元) 各測樁腐蝕 速率與水深之關係,單一測樁之最大腐蝕速率多發生於水深 -1.5 m 及 -3.0 m 處,大值為 0.14 mm/yr.,腐蝕速率雖低於設計允許值,但敲 除鋼樁表面覆著之海生物後,發現有一層紅棕色銹斑,顯示腐蝕之生 成產物已開始產生,應注意後續狀況。

3.保護電位量測

本座碼頭各單元鋼管樁保護電位量測位置示意圖,如圖 4.41(同 東8號碼頭),防蝕區(A~D單元)之量測結果列於表 4.14,保護電位 最大值為 –955 mV,最小值為 -1028 mV,均小於 -850 mV,鋼管樁 處於防蝕狀態。

表 4.15 為未防蝕區 (E~H 單元)之量測結果,各單元之鋼樁保護 電位介於-791 -665 mV 之間,均大於-850 mV,鋼管樁均處於腐蝕 狀態。其中 E 單元因臨防蝕區較近,鋼管樁之保護電位(-791 -739 mV)稍小於 F、G、H 單元(-698 -665 mV)。

水深(m)	-1.5	-2.0	-3.0	-4.0	-5.0	-7.0	-9.0	-10.0	備註
腐蝕速率	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	防蝕區 (A~D)
(mm/yr.)	0.10	0.10	0.10	0.10	0.09	0.09	0.08	0.08	未防蝕區 (E~H)

表 4.11 基隆港東 9 號碼頭鋼板樁平均腐蝕速率



圖 4.46 基隆港東 10 號碼頭鋼板樁平均腐蝕速率與水深之關係

表 4.12 基隆港東 9 號碼頭鋼板樁腐蝕速率與水深之關係(防蝕區) 單位:mm/yr.

ZKÿ	ξ(m)	15	2.0	2.0	4.0	5.0	7.0	0.0	10.0
測	樁編號	-1.3	-2.0	-3.0	-4.0	-5.0	-7.0	-9.0	-10.0
	a3-1	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
	a4-1	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
	a4-2	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04		
ᄜᆕᄾ	a4-3	0.06	0.06	0.05	0.06				
Ψ儿 A	a4-4	0.05	0.05	0.06	0.05				
	a4-5	0.04	0.05	0.05					
	a4-6	0.11	0.11	0.12					
	a5-1	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
平	均	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02
	b3-1	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
	b4-1	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
	b4-2	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05		
開규 B	b4-3	0.06	0.06	0.06	0.06				
半九 D	b4-4	0.06	0.06	0.06	0.06				
	b4-5	0.07	0.07	0.06					
	b4-6	0.07	0.07	0.06					
	b5-1	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.08	0.08
平	均	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
	c3-1	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
	c4-1	0.04	0.05	0.05	0.04	0.05	0.04	0.05	0.05
	c4-2	0.09	0.10	0.10	0.09	0.09	0.10		
留元で	c4-3	0.09	0.09	0.09	0.10				
ギルし	c4-4	0.10	0.11	0.11	0.11				
	c4-5	0.12	0.12	0.12					
	c4-6	0.13	0.13	0.13					
	c5-1	0.09	0.09	0.09	0.10	0.09	0.10	0.10	0.09
平	均	0.09	0.09	0.09	0.08	0.07	0.07	0.06	0.06
	d3-1	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
	d4-1	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
	d4-2	0.12	0.13	0.13	0.12	0.13	0.12		
單元 D	$\frac{u4-3}{d4-4}$	0.12	0.12	0.12	0.12				
	d4-5	0.12	0.12	0.12	0.12				
	d4-6	0.13	0.13	0.13					
	d5-1	0.11	0.11	0.11	0.11	0.12	0.11	0.12	0.12
平	均	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.11	0.11
總马	四均	0.09	0.09	0.09	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07

表 4.13 基隆港東 9 號碼頭鋼板樁腐蝕速率與水深之關係 (未防蝕區) 單位:mm/yr.

					-		-		<u>IIIII/ y1.</u>
之长涕	(m)	-1.5	-2.0	-3.0	-4.0	-5.0	-7.0	-9.0	-10.0
測	樁編號								
	e3-1	0.06	0.06	0.07	0.07	0.06	0.07	0.06	0.07
	e4-1	0.06	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
	e4-2	0.07	0.07	0.08	0.08	0.08	0.07		
ᄜᆕᄑ	e4-3	0.09	0.09	0.09	0.08				
里儿 ^丘	e4-4	0.09	0.09	0.09	0.09				
	e4-5	0.11	0.10	0.10					
	e4-6	0.11	0.11	0.11					
	d5-1	0.10	0.10	0.09	0.10	0.09	0.09	0.10	0.09
平	均	0.09	0.09	0.09	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07
	f3-1	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
	f4-1	0.06	0.06	0.07	0.07	0.07	0.07	0.06	0.06
	f4-2	0.08	0.09	0.09	0.09	0.08	0.09		
單元 F	f4-3	0.13	0.13	0.13	0.13				
	f4-4	0.13	0.13	0.13	0.13				
	f4-5	0.14	0.14	0.14					
	f4-6	0.12	0.12	0.12					
	f5-1	0.11	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
平均		0.10	0.11	0.11	0.10	0.08	0.08	0.08	0.08
	g3-1	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
	g4-1	0.09	0.09	0.08	0.08	0.09	0.09	0.09	0.08
	g4-2	0.13	0.12	0.12	0.13	0.13	0.13		
留元の	g4-3	0.11	0.11	0.11	0.11				
710	g4-4	0.11	0.11	0.11	0.11				
	g4-5	0.11	0.11	0.11					
	σ 4 -6	0.12	0.12	0.12					
	g5-1	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
平	均	0.11	0.11	0.11	0.10	0.10	0.10	0.10	0.09
	h3-1	0.07	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07	0.08
	h4-1	0.06	0.07	0.06	0.06	0.06	0.07	0.06	0.07
	h4-2	0.11	0.12	0.12	0.11	0.11	0.12		
單元 H	h4-3	0.12	0.12	0.12	0.12				
	h4-4	0.12	0.12	0.12	0.12				
	h4-5	0.11	0.11	0.12					
	h4-6	0.13	0.13	0.13					
	h5-1	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.12	0.11	0.12
平	均	0.10	0.11	0.11	0.10	0.09	0.09	0.08	0.09
總马	四均	0.09	0.09	0.09	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07



圖 4.47 基隆港東 9 號碼頭鋼板樁腐蝕速率與水深之關係 (1)



圖 4.48 基隆港東9號碼頭鋼板樁腐蝕速率與水深之關係(2)



圖 4.49 基隆港東 9 號碼頭鋼板樁腐蝕速率與水深之關係 (3)





表 4.14 基隆港東 9 號碼頭鋼管樁保護電位 (1)

單位:mV

檢測	紽暭		水深	(m)	
位置	利用分元	-1.0	-4.0	-7.0	-10.0
	1	-960	-960	-959	-961
9A-2	2	-955	-956	-958	-959
	3	-956	-957	-957	-968
	1	-960	-971	-977	-971
9A-3	2	-977	-979	-977	-971
	3	-975	-975	-976	-980
	1	-1008	-1028	-1000	-986
9A-4	2	-985	-987	-979	-977
	3	-987	-989	-978	-978
	1	-989	-987	-992	-989
9B-2	2	-979	-982	-984	-987
	3	-980	-977	-977	-980
	1	-985	-986	-984	-981
9B-3	2	-976	-976	-976	-978
	3	-978	-978	-980	-979
	1	-973	-975	-976	-978
9B-4	2	-979	-980	-980	-979
	3	-978	-979	-981	-982
	1	-986	-992	-993	-986
9C-2	2	-977	-981	-982	-982
	3	-977	-978	-977	-977
	1	-980	-981	-986	-985
9C-3	2	-984	-997	-1003	-987
	3	-977	-973	-974	-973
	1	-974	-982	-983	-980
9C-4	2	-975	-978	-981	-985
	3	-976	-975	-971	-972
	1	-979	-1004	-995	-993
9D-2	2	-970	-977	-985	-990
	3	-970	-971	-969	-968
	1	-974	-975	-981	-976
9D-3	2	-977	-980	-988	-990
	3	-976	-980	-974	-977
	1	-960	-966	-975	-980
9D-4	2	-973	-975	-979	-979
	3	-976	-975	-976	-977

表 4.45 基隆港東 9 號碼頭鋼管樁保護電位 (2)

單位:mV

檢測	编號		水深	(m)	
位置	闷曲 加九	-1.0	-4.0	-7.0	-10.0
	1	-776	-777	-791	-791
9E-2	2	-787	-788	-789	-790
	3	-786	-786	-788	-786
	1	-775	-770	-767	-762
9E-3	2	-762	-761	-762	-762
	3	-756	-757	-756	-754
	1	-756	-757	-757	-756
9E-4	2	-747	-749	-749	-750
	3	-739	-740	-740	-740
	1	-691	-690	-690	-690
9F-2	2	-683	-684	-685	-690
	3	-682	-677	-678	-680
	1	-690	-687	-687	-686
9F-3	2	-681	-681	-682	-683
	3	-677	-677	-677	-676
9F-4	1	-680	-680	-680	-679
	2	-683	-681	-682	-687
	3	-688	-688	-689	-690
	1	-676	-673	-673	-670
9G-2	2	-675	-672	-670	-669
	3	-675	-674	-676	-678
	1	-677	-679	-680	-678
9G-3	2	-669	-672	-674	-675
	3	-668	-665	-667	-666
	1	-676	-676	-678	-681
9G-4	2	-671	-672	-672	-675
	3	-675	-674	-671	-672
	1	-691	-690	-689	-689
9H-2	2	-684	-685	-685	-686
	3	-683	-681	-681	-681
	1	-691	-691	-691	-690
9H-3	2	-685	-688	-688	-688
	3	-684	-684	-684	-685
	1	-698	-698	-698	-698
9H-4	2	-692	-692	-692	-693
	3	-688	-687	-688	-687

4.3 陽極塊調查

陽極塊調查範圍包括高雄港 69、70 號碼頭及基隆東 8、東 9 號碼 頭,高雄港 69 檢測 14 支,70 號碼頭檢測 26 支(與 69 號碼頭銜接段 14 支,轉角接 71 號碼頭部份 12 支),基隆東 8、東 9 號碼頭均檢測 20 支陽極塊,總計 80 支。

高雄港 69、70 號碼頭於民國 68 年完工時已安裝陽極塊作為防蝕措施,民國 84 年考量原有陽極塊消耗情形及剩餘重量不多,且使用時間已接近設計年限,全部予以更新。陽極塊安裝位置及方式如圖 4.51 及圖 4.52 所示,安裝水深為 -2.0m、 -5.5m、-9.0m 及-12.5m 等,每 14 支陽極塊為一排列單元。陽極塊尺寸為(210+250)× 250 之梯形斷面, 全長 1150 cm。圖 4.53 則為 70 號碼頭於轉角段(#70A,全長 50 m)之陽極塊安裝位置及方式,於第 1 支及每間隔 2 支後之鋼板樁上,各安裝 4 支陽極塊後,安裝水深亦為 -2.0m、 -5.5m、-9.0m 及-12.5m。



圖 4.51 高雄港 69、70 號碼頭陽極塊配置



圖 4.52 高雄港鋼板樁碼頭陽極塊安裝示意及電位測試裝置



圖 4.53 高雄港 70 號碼頭轉角段陽極塊配置

基隆東 8 號碼頭鋼管樁於民國 84 年安裝犧牲陽極塊作為防蝕措施,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,陽極塊安裝位置及型式如圖 4.54 及圖 4.55 所示,各單元之陽極塊平面配置示如圖 4.56。陽極塊尺寸包括 a 型:(225+265) × 250× 650 cm 及 b 型:(190+230) × 210× 1150 cm 兩種型式,每支淨重分別約 101、135 公斤(不含鐵蕊重)。調查選定 A 及 H 單元之第 2 排樁靠海側前 3 支鋼管樁(L1 L3),及第 3 排靠海側前 2 支鋼管樁(L1 L2),即各 10 支陽極塊(A 單元陽極塊:a型;H 單元陽極塊:b型),合計檢測 20 支陽極塊。

基隆港東9號碼頭全區鋼管樁計有4個單元未採取防蝕措施,另4 個單元則安裝犧牲陽極塊以保護鋼管樁,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)× 210×1150 cm,每支淨重約135 公斤(不含鐵蕊重)。調查選定A單元 之第2至第4排樁靠海側前3支鋼管樁(L1 L3),第3及第5排樁靠 海側前2支鋼管樁(L1 L2),合計檢測20支陽極塊。陽極塊安裝方 式及位置與平面配置,同東8號碼頭。





圖 4.55 基隆港東 8 號碼頭陽極塊規格及安裝位置



圖 4.56 基隆港東 8、東9號碼頭陽極塊平面配置

4.3.1 陽極塊發生電位

量測時,以高阻抗之數位電錶探棒之一端接觸於鋼板樁連結之不 電位測試棒上,另一端探棒則連接銅/硫酸銅電極,並置於欲量測位置 旁,量測位置選在陽極塊上中下三等份處。

1.高雄港 69 碼頭

陽極塊發生電位量測結果如表 4.16 所示。切割前其發生電位最大 值為 -1012 mV,最小值為 -1063 mV,焊接後最大值為 -1086 mV, 最小值為 -1205 mV,均釋出足夠之防蝕保護電位。

	發	生電位((mV,vs	s. Cu/CuS	O ₄ 電極)	
陽極塊編號		切割前			焊接後		備註
	上	中	下	上	中	下	
69-1	-1048	-1048	-1063	-1200	-1204	-1205	
69-2	-1019	-1020	-1017	-1183	-1180	-1200	
69-3	-1018	-1018	-1012	-1204	-1205	-1114	
69-4	-1038	-1037	-1016	-1113	-1113	-1119	
69-5	-1034	-1033	-1035	-1102	-1103	-1089	
69-6	-1021	-1018	-1037	-1093	-1086	-1113	
69-7	-1016	-1034	-1033	-1113	-1113	-1119	
69-8	-1016	-1034	-1033	-1102	-1103	-1089	
69-9	-1035	-1042	-1040	-1093	-1200	-1204	
69-10	-1038	-1037	-1016	-1113	-1113	-1119	
69-11	-1034	-1033	-1035	-1102	-1103	-1089	
69-12	-1021	-1018	-1037	-1093	-1086	-1113	
69-13	-1016	-1034	-1033	-1113	-1113	-1119	
69-14	-1016	-1034	-1033	-1102	-1103	-1089	
最大發生電位		-1012			-1086		
最小發生電位		-1063			-1205		

表 4.16 高雄港 69 碼頭陽極塊發生電位量測結果

2.高雄港 70 碼頭

本座碼頭陽極塊發生電位量測結果如表 4.17 所示,切割前發生電 位最大值為 -1033 mV,最小值為 -1101 mV,焊接後最大值為 -1001 mV,最小值為 -1037 mV(小於切割前之電位,可能為量測時,陽極 塊尚未充分發揮釋出電壓),但均釋出足夠之防蝕保護電位。。

	發						
陽極塊編號		切割前			焊接後		備註
	上	中	下	上	中	下	
70-1	-1089	-1091	-1044	-1001	-1002	-1013	
70-2	-1063	-1062	-1062	-1031	-1037	-1026	
70-3	-1066	-1062	-1057	-1035	-1023	-1015	
70-4	-1056	-1060	-1059	-1028	-1035	-1024	
70-5	-1059	-1069	-1069	-1023	-1020	-1020	
70-6	-1058	-1057	-1055	-1028	-1013	-1007	
70-7	-1045	-1038	-1042	-1002	-1009	-1008	
70-8	-1042	-1041	-1041	-1018	-1022	-1015	
70-9	-1043	-1035	-1033	-1024	-1018	-1020	
70-10	-1052	-1053	-1042	-1015	-1011	-1011	
70-11	-1045	-1046	-1047	-1018	-1007	-1015	
70-12	-1037	-1039	-1040	-1022	-1024	-1018	
70-13	-1042	-1047	-1042	-1012	-1011	-1005	
70-14	-1036	-1037	-1041	-1017	-1016	-1011	
70A-1	-1096	-1100	-1099	-1024	-1023	-1026	
70A -2	-1083	-1083	-1089	-1024	-1026	-1024	
70A -3	-1096	-1094	-1095	-1017	-1023	-1023	
70A -4	-1101	-1101	-1100	-1028	-1031	-1035	
70A -5	-1090	-1096	-1096	-1003	-1008	-1003	
70A -6	-1096	-1101	-1098	-1011	-1017	-1010	
70A -7	-1103	-1098	-1096	-1026	-1017	-1018	
70A -8	-1091	-1090	-1091	-1006	-1007	-1005	
70A -9	-1092	-1096	-1094	-1005	-1005	-1001	
70A -10	-1078	-1080	-1078	-1009	-1010	-1010	
70A -11	-1079	-1083	-1080	-1014	-1015	-1016	
70A -12	-1099	-1101	-1096	-1016	-1018	-1003	
最大發生電位		-1033			-1001		
最小發生電位		-1103			-1037		

表 4.17 高雄港 70 碼頭陽極塊發生電位量測結果

3.基隆港東8號碼頭

本座碼頭陽極塊發生電位量測結果如表 4.18 所示,切割前發生電 位最大值為 -1028 mV,最小值為 -1062 mV,焊接後最大值為 -1037 mV,最小值為 -1142 mV,均釋出足夠之防蝕保護電位。。

	發	生電位((mV,vs	s. Cu/CuS	O ₄ 電極)	
陽極塊編號		切割前			焊接後		備註
	上	中	下	上	中	下	
E8-A1	-1058	-1046	-1034	-1123	-1120	-1115	
E8-A2	-1043	-1045	-1034	-1110	-1114	-1123	
E8-A3	-1043	-1045	-1038	-1123	-1119	-1119	
E8-A4	-1047	-1045	-1039	-1128	-1122	-1110	
E8-A5	-1033	-1032	-1028	-1092	-1099	-1103	
E8-A6	-1038	-1039	-1037	-1125	-1137	-1142	
E8-A7	-1046	-1043	-1034	-1142	-1135	-1127	
E8-A8	-1042	-1041	-1032	-1118	-1121	-1113	
E8-A9	-1047	-1040	-1033	-1130	-1139	-1128	
E8-A10	-1044	-1042	-1037	-1114	-1118	-1112	
E8-H1	-1049	-1046	-1043	-1071	-1068	-1056	
E8-H2	-1052	-1052	-1042	-1071	-1074	-1061	
E8-H3	-1045	-1046	-1047	-1057	-1069	-1059	
E8-H4	-1050	-1052	-1051	-1079	-1093	-1082	
E8-H5	-1049	-1047	-1042	-1049	-1064	-1067	
E8-H6	-1040	-1046	-1036	-1037	-1050	-1037	
E8-H7	-1039	-1040	-1040	-1100	-1081	-1059	
E8-H8	-1045	-1048	-1042	-1040	-1038	-1075	
E8-H9	-1062	-1062	-1054	-1088	-1073	-1074	
E8-H10	-1048	-1050	-1045	-1073	-1071	-1042	
最大發生電位	-1028						
最小發生電位		-1062			-1142		

表 4.18 基隆港東 8 碼頭陽極塊發生電位量測結果

4.基隆港東9號碼頭

本座碼頭陽極塊發生電位量測結果如表 4.19 所示,切割前發生電 位最大值為 -1028 mV,最小值為 -1062 mV,焊接後最大值為 -1037 mV,最小值為 -1142 mV,均釋出足夠之防蝕保護電位。

	No.	生電位	(mV,vs	s. Cu/CuS	O ₄ 電極)	
陽極塊編號		切割前			焊接後		備註
	上	中	下	上	中	下	
E8-A1	-1058	-1046	-1034	-1123	-1120	-1115	
E8-A2	-1043	-1045	-1034	-1110	-1114	-1123	
E8-A3	-1043	-1045	-1038	-1123	-1119	-1119	
E8-A4	-1047	-1045	-1039	-1128	-1122	-1110	
E8-A5	-1033	-1032	-1028	-1092	-1099	-1103	
E8-A6	-1038	-1039	-1037	-1125	-1137	-1142	
E8-A7	-1046	-1043	-1034	-1142	-1135	-1127	
E8-A8	-1042	-1041	-1032	-1118	-1121	-1113	
E8-A9	-1047	-1040	-1033	-1130	-1139	-1128	
E8-A10	-1044	-1042	-1037	-1114	-1118	-1112	
E8-H1	-1049	-1046	-1043	-1071	-1068	-1056	
E8-H2	-1052	-1052	-1042	-1071	-1074	-1061	
E8-H3	-1045	-1046	-1047	-1057	-1069	-1059	
E8-H4	-1050	-1052	-1051	-1079	-1093	-1082	
E8-H5	-1049	-1047	-1042	-1049	-1064	-1067	
E8-H6	-1040	-1046	-1036	-1037	-1050	-1037	
E8-H7	-1039	-1040	-1040	-1100	-1081	-1059	
E8-H8	-1045	-1048	-1042	-1040	-1038	-1075	
E8-H9	-1062	-1062	-1054	-1088	-1073	-1074	
E8-H10	-1048	-1050	-1045	-1073	-1071	-1042	
最大發生電位	-1028						
最小發生電位		-1062			-1142		

表 4.19 基隆港東 9 碼頭陽極塊發生電位量測結果

4.3.2 陽極塊外觀檢視及重量耗損

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,檢視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,完成後,再焊回原處。

1.高雄港 69 號碼頭

本座碼頭共切割 14 支陽極塊,陽極塊表面附著許多海草、藤壺、 海蟲等海生物,外觀與原有比較仍十分完整,消耗輕微。除去附著海 生物後,表面反應產物主要為白色之氫氧化鋁(Al(OH)₃),為鋁合 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,側面部位之消耗較大,有凹陷之現象。

陽極塊現有尺寸紀錄,以量取距兩端端點各 10 公分及中央三處周 長。表 4.20 為陽極塊尺寸及重量量測結果。陽極塊除去附著海生物後 剩餘淨重(不含鐵蕊重量)為 121.5 129.6 kg 之間,消耗重量達 43.8

13.48 kg 左右,以民國 84 年安裝至今計算,消耗速率約為 0.49 1.49 kg/yr.。陽極塊周長約介於 86 94.5 cm 間,與原有尺寸相較減少 不多,圖 4.57 為陽極塊現場切割(下)後置於陸上進行海生物清除前 後之情形。

陽極塊剩餘重量以目前消耗速率及假設陽極材料未完全消耗前未 受外力衝擊脫落,推估應可使用至二十年之設計年限。

2.高雄港 70 號碼頭

本座碼頭切割之 26 支陽極塊 (#70,14 支;#70A,12 支),其外 觀相當完整,表面附著許多海草、藤壺、海蟲等海生物。表面在除去 反應產物後,側面小部位之消耗較大,有凹陷之現象。表 4.21 為陽極 塊尺寸及重量量測結果,除去附著海生物後剩餘淨重為 124.4 132.4 kg 間,消耗重量約 2.55 10.55 kg 左右,以民國 84 年安裝至今計 算,消耗率約為 0.28 1.17 kg/yr.。陽極塊周長在 86 94 cm 間,與原 有周長比較,減少量不多。圖 4.58 為陽極塊現場切割後置於陸上進行 海生物清除前後之情形。陽極塊剩餘重量以目前消耗速率及假設陽極 材料未完全消耗前未受外力衝擊脫落,推估應可使用至二十年之設計 年限。

3.基隆港東8號碼頭

本座碼頭切割共 20 支陽極塊,表面附著藤壺等海生物。表 4.22 為陽極塊尺寸及重量量測結果,其中 A 單元之陽極塊(a型)剩餘重 量 94.9 99.9 kg,消耗量達 1.21 6.71kg,除去海生物及反應產物後, 陽極塊消耗情形均勻,並無較明顯之凹陷孔洞。陽極塊周長約介於 94

98cm 間。H 單元之陽極塊(b型)剩餘重量為 122.0 133.1 kg 之間, 消耗量達 1.91 13.0kg,除去海生物及反應產物後,側面有明顯之凹陷 孔洞,陽極塊周長約介於 80 84 cm 間。以民國 84 年安裝至今計算, 消耗率分別為 0.13 0.75 及 0.21 0.44kg/yr.間。圖 4.59 為陽極塊現場 切割後置於陸上進行海生物清除前後之情形。陽極塊剩餘重量以目前 消耗速率及假設陽極材料未完全消耗前未受外力衝擊脫落,推估應可 使用至二十年之設計年限。

4.基隆港東9號碼頭

本座碼頭切割共 20 支陽極塊 其外觀與類似於東 8 號碼頭 H 單元 之 b 型陽極塊。表面除去反應產物後,側面出現多處凹陷孔洞。表 4.23 為陽極塊尺寸及重量量測結果,剩餘重量約在 91.8 107.8 kg 間, 消耗量約 27.1 43.2 kg 左右,以民國 84 年安裝至今計算,消耗速 率約為 2.3 3.6 kg/yr。陽極塊周長在 73 91 cm 之間。圖 4.60 為本 座碼頭之陽極塊現場切割後置於陸上進行海生物清除前後之情形。陽 極塊剩餘重量以目前消耗速率及假設陽極材料未完全消耗前未受外力 衝擊脫落,推估應可使用至二十年之設計年限。

编號		尺寸((cm)		原有重量 (kg)	剩餘重量	消耗重量 (kg)	消耗速率
	上	中	下	平均		(Kg)		(Kg/ y1.)
69-1	86.0	84.0	88.0	86.0	134.98	121.5	13.48	1.49
69-2	92.0	92.0	91.0	92.0	134.98	130.6	4.38	0.49
69-3	88.0	89.0	88.0	88.0	134.98	121.5	13.48	1.50
69-4	90.5	91.0	90.0	90.5	134.98	125.5	9.48	1.05
69-5	92.0	93.0	91.5	92.0	134.98	127.6	7.38	0.82
69-6	90.0	90.0	93.0	90.0	134.98	128.5	6.48	0.72
69-7	89.5	91.0	92.0	89.5	134.98	128.5	6.48	0.72
69-8	90.5	91.0	95.5	90.5	134.98	127.5	7.48	0.83
69-9	94.5	94.0	94.0	94.5	134.98	129.6	5.38	0.60
69-10	91.0	94.0	96.0	91.0	134.98	126.5	8.48	0.94
69-11	91.0	89.0	91.0	91.0	134.98	126.5	8.48	0.94
69-12	90.0	90.0	90.0	90.0	134.98	129.5	5.48	0.61
69-13	91.0	89.0	91.0	91.0	134.98	126.5	8.48	0.95
69-14	90.0	90.0	90.0	90.0	134.98	129.5	5.48	0.61

表 4.20 高雄港 69 號碼頭陽極塊尺寸及重量量測結果



圖 4.57 高雄港 69 號碼頭陽極塊海生物清除前後之情形

编號		尺寸((cm)		原有重量	剩餘重量	消耗重量	消耗速率
	上	中	下	平均	(kg)	(kg)	(kg)	(kg/yr.)
70-1	91.2	88.3	98.4	92.6	134.98	129.5	5.48	0.60
70-2	92.8	91.0	93.0	92.3	134.98	126.6	8.38	0.93
70-3	91.0	91.8	91.8	91.5	134.98	126.5	8.48	0.94
70-4	94.0	87.4	90.0	90.5	134.98	127.5	7.48	0.83
70-5	89.0	90.0	89.0	89.3	134.98	126.6	8.38	0.93
70-6	92.0	90.0	91.0	91.0	134.98	127.5	7.48	0.83
70-7	93.0	92.0	91.0	92.0	134.98	125.5	9.48	1.05
70-8	90.0	87.1	89.2	88.8	134.98	126.5	8.48	0.94
70-9	89.0	90.0	90.4	89.8	134.98	128.6	6.38	0.71
70-10	92.0	90.0	87.0	89.7	134.98	130.5	4.48	0.50
70-11	94.0	88.0	92.6	91.5	134.98	127.5	7.48	0.83
70-12	91.0	90.0	92.0	91.0	134.98	126.5	8.48	0.95
70-13	93.0	89.0	85.0	89.0	134.98	128.5	6.48	0.72
70-14	91.0	91.6	86.6	89.7	134.98	127.5	7.48	0.83
70A-1	86.0	84.0	88.0	86.0	134.98	126.3	8.68	0.96
70A-2	92.0	92.0	91.0	91.7	134.98	129.4	5.59	0.62
70A-3	88.0	89.0	88.0	88.3	134.98	124.5	10.49	1.17
70A-4	90.5	91.0	90.0	90.5	134.98	125.5	9.46	1.05
70A-5	92.0	93.0	91.5	92.2	134.98	130.4	4.55	0.51
70A-6	90.0	90.0	93.0	91.0	134.98	130.5	4.51	0.50
70A-7	89.5	91.0	92.0	90.8	134.98	124.4	10.55	1.17
70A-8	90.5	91.0	95.5	92.3	134.98	126.5	8.51	0.95
70A-9	94.5	94.0	94.0	94.2	134.98	132.4	2.55	0.28
70A-10	91.0	94.0	96.0	93.7	134.98	126.4	8.55	0.95
70A-11	91.0	89.0	91.0	90.3	134.98	125.5	9.48	1.05
70A-12	90.0	90.0	90.0	90.0	134.98	128.4	6.58	0.73

表 4.21 高雄港 70 號碼頭陽極塊尺寸及重量量測結果



圖 4.58 高雄港 70 號碼頭陽極塊海生物清除前後之情形

編號	尺寸 (cm)				原有重量 (kg)*	剩餘重量	消耗重量	消耗速率
	上	中	下	平均	(Kg)*	(kg) **	(kg)	(kg/y1.)
E8-A1	96.0	97.5	95.5	96.3	101.15	97.5	3.65	0.40
E8-A2	94.5	97.5	92.0	94.7	101.15	95.2	5.95	0.66
E8-A3	98.0	97.0	95.5	96.8	101.15	99.1	2.05	0.22
E8-A4	97.0	95.5	94.0	95.5	101.15	96.2	4.95	0.55
E8-A5	98.0	97.5	98.5	98.0	101.15	98.2	2.95	0.33
E8-A6	98.0	97.5	99.0	98.2	101.15	99.7	1.45	0.16
E8-A7	97.0	97.0	94.0	96.0	101.15	94.4	6.75	0.75
E8-A8	98.5	96.0	95.0	96.5	101.15	99.9	1.25	0.13
E8-A9	97.0	93.0	93.0	94.3	101.15	95.1	6.05	0.68
E8-A10	96.0	97.0	95.0	96.0	101.15	98.0	3.15	0.35
E8-H1	79.0	80.0	81.0	80.0	134.98	125.4	9.54	1.06
E8-H2	79.5	87.5	86.0	84.3	134.98	122.0	12.98	1.44
E8-H3	85.0	81.0	79.0	81.7	134.98	133.1	1.88	0.21
E8-H4	82.0	80.5	79.5	80.7	134.98	125.0	9.98	1.11
E8-H5	81.5	81.0	80.0	80.8	134.98	125.6	9.38	1.04
E8-H6	84.0	78.0	83.0	81.7	134.98	125.9	9.08	1.01
E8-H7	82.0	81.0	81.0	81.3	134.98	131.0	3.98	0.44
E8-H8	84.0	81.5	81.0	82.2	134.98	126.2	8.78	0.98
E8-H9	81.5	82.0	81.0	81.5	134.98	124.1	10.88	1.21
E8-H10	83.0	81.5	81.0	81.8	134.98	126.4	8.58	0.95

表 4.22 基隆港東 8 號碼頭陽極塊尺寸及重量量測結果



4.59 基隆港東 8 號碼頭陽極塊海生物清除前後之情形

編號	尺寸 (cm)				原有重量 (kg)*	剩餘重量	消耗重量 (kg)	消耗速率
	上	中	下	平均	(Kg)	(Kg)	(Kg)	(Kg/y1.)
E9-1	71.0	72.5	75.5	73.0	134.98	94.0	40.98	4.55
E9-2	71.0	78.0	83.5	77.5	134.98	106.7	28.28	3.14
E9-3	83.0	86.0	85.5	84.8	134.98	119.1	15.88	1.76
E9-4	90.0	87.0	80.5	85.8	134.98	116.7	18.28	2.03
E9-5	87.0	86.0	80.5	84.5	134.98	122.2	12.78	1.42
E9-6	86.0	89.0	84.0	86.3	134.98	118.7	16.28	1.81
E9-7	89.5	94.0	89.0	90.8	134.98	128.9	6.08	0.67
E9-8	90.0	94.0	93.0	92.3	134.98	129.9	5.08	0.56
E9-9	92.5	93.5	87.0	91.0	134.98	130.1	4.88	0.55
E9-10	72.0	79.0	61.5	70.8	134.98	105.5	29.48	3.28
E9-11	86.0	88.5	86.5	87.0	134.98	127.4	7.58	0.84
E9-12	93.5	91.0	91.0	91.8	134.98	127.0	7.98	0.89
E9-13	90.0	89.0	89.0	89.3	134.98	128.1	6.88	0.77
E9-14	92.0	91.0	90.0	91.0	134.98	123.5	11.48	1.28
E9-15	91.0	88.0	87.0	88.7	134.98	127.6	7.38	0.82
E9-16	92.0	91.0	92.0	91.7	134.98	127.4	7.58	0.84
E9-17	85.5	92.0	88.0	88.5	134.98	125.5	9.48	1.06
E9-18	89.5	94.0	91.0	91.5	134.98	129.2	5.78	0.65
E9-19	91.0	96.0	92.0	93.0	134.98	126.1	8.88	0.98
E9-20	88.5	87.5	88.0	88.0	134.98	125.4	9.58	1.06

表 4.23 基隆港東 9 號碼頭陽極塊尺寸及重量量測結果



圖 4.60 基隆港東 9 號碼頭陽極塊海生物清除前後之情形

4.3.3 陽極塊釋出電流

本次調查之陽極塊釋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. 高雄港 69 號碼頭

本座碼頭陽極塊釋出電流量測結果列於表 4.24: 陽極塊切割前(未 清除海生物)瞬間最大值 0.3 安培,最小值為 0.1 安培;焊接後(海生 物已清除)瞬間最大值 0.8 安培,最小值為 0.25 安培。

一般而言,陽極塊之釋出電流與其消耗速率有相對應關係,電流 發生與陽極塊之等量直徑有關。

陽極塊編號	切割	創前	焊持	妾後	備註
	Ч	下	上	下	
69-1	0.70	0.40	0.70	0.40	
69-2	0.30	0.20	0.30	0.20	
69-3	0.30	0.10	0.30	0.10	
69-4	0.70	0.50	0.70	0.50	
69-5	0.70	0.30	0.70	0.30	
69-6	0.10	0.20	0.10	0.20	
69-7	0.20	0.50	0.20	0.50	
69-8	0.40	0.40	0.40	0.40	
69-9	0.50	0.30	0.50	0.30	
69-10	0.70	0.20	0.70	0.20	
69-11	0.50	0.40	0.50	0.40	
69-12	1.20	0.30	1.20	0.30	
69-13	0.10	0.10	0.10	0.10	
69-14	0.10	0.60	0.10	0.60	
釋出電流最大值	0.30		0.80		
釋出電流影小值	0.10		0.25		
平均釋出電流	0.21		0.46		

表 4.24 高雄港 69 號碼頭陽極塊釋出電流量測結果

2. 高雄港 70 號碼頭

本座碼頭釋出電流量測結果列於表 4.25: 陽極塊切割前(未清除 海生物)瞬間最大值 0.3 安培,最小值為 0.1 安培;焊接後(海生物已 清除)瞬間最大值 0.8 安培,最小值為 0.25 安培。

		<u></u>			
陽極塊編號	切割	創前	焊	妾後 (1997)	備註
	上	下	上	下	
70-1	0.10	0.20	1.20	0.70	
70-2	0.20	0.10	1.50	0.50	
70-3	0.30	0.10	1.40	0.50	
70-4	0.10	0.10	1.90	0.70	
70-5	0.20	0.10	2.20	1.40	
70-6	0.20	0.20	1.60	1.40	
70-7	0.30	0.20	0.90	1.40	
70-8	0.20	0.10	0.70	1.10	
70-9	0.20	0.10	0.60	1.10	
70-10	0.30	0.20	1.00	1.10	
70-11	0.40	0.20	0.90	1.40	
70-12	0.20	0.10	0.60	0.20	
70-13	0.40	0.20	1.40	1.30	
70-14	0.30	0.20	0.45	0.80	
70A-1	0.20	0.30	0.60	0.60	
70A-2	0.20	0.20	0.60	0.50	
70A-3	0.30	0.20	0.30	0.50	
70A-4	0.40	0.10	0.50	0.20	
70A-5	0.20	0.10	1.00	0.50	
70A-6	0.30	0.10	0.40	0.50	
70A-7	0.20	0.20	0.50	0.20	
70A-8	0.20	0.20	0.20	0.70	
70A-9	0.20	0.10	0.20	1.00	
70A-10	0.30	0.20	0.90	1.40	
70A-11	0.40	0.30	0.70	0.70	
70A-12	0.20	0.30	0.60	0.60	
釋出電流最大值	0.40		2.2		
釋出電流最小值	0.10		0.20		
釋出電流平均值	0.2	21	0.	84	

表 4.25 高雄港 70 號碼頭陽極塊釋出電流量測結果
3.基隆港東8號碼頭

本座碼頭釋出電流量測結果列於表 4.26: 陽極塊切割前(未清除 海生物)瞬間最大值 0.36 安培,最小值為 0.01 安培;焊接後(海生物 已清除)瞬間最大值 1.00 安培,最小值為 0.02 安培。

釋出電流(安培,)	
陽極塊編號	切割	創前	焊	妾後	備註
	上	下	۲	下	
E8-A1	0.20	0.17	0.32	0.27	
E8-A2	0.12	0.17	0.46	0.25	
E8-A3	0.36	0.00	1.00	0.30	
E8-A4	0.19	0.28	0.25	0.45	
E8-A5	0.05	0.28	0.46	0.15	
E8-A6	0.10	0.34	0.56	0.40	
E8-A7	0.21	0.21	0.51	0.52	
E8-A8	0.14	0.18	0.52	0.24	
E8-A9	0.20	0.28	0.26	0.50	
E8-A10	0.12	0.12	0.46	0.40	
E8-H1	0.09	0.25	0.40	0.50	
E8-H2	0.32	0.22	0.65	0.12	
E8-H3	0.13	0.18	0.25	0.67	
E8-H4	0.20	0.21	0.40	0.25	
E8-H5	0.26	0.01	0.68	0.60	
E8-H6	0.25	0.31	0.26	0.10	
E8-H7	0.17	0.16	0.20	0.20	
E8-H8	0.35	0.14	0.08	0.28	
E8-H9	0.17	0.24	0.75	0.47	
E8-H10	0.23	0.25	0.50	0.02	
釋出電流最大值	0.	36	1.	00	
釋出電流則值	0.	01	0.	02	
平均釋出電流	0.	21	0.	46	

表 4.26 基隆港東 8 號碼頭陽極塊釋出電流量測結果

4.基隆港東9號碼頭

本座碼頭釋出電流量測結果列於表 4.27: 陽極塊切割前(未清除 海生物)瞬間最大值 0.60 安培,最小值為 0.01 安培;焊接後(海生物 以清除)瞬間最大值 0.67 安培,最小值為 0.07 安培。

	釋出電流(安培,A)				
陽極塊編號	切割	創前	焊接後		備註
	上	下	上	下	
E9A1-1	0.40	0.60	0.46	0.67	
E9A1-2	0.30	0.40	0.46	0.45	
E9A1-3	0.20	0.18	0.30	0.30	
E9A1-4	0.20	0.20	0.25	0.32	
E9A1-5	0.30	0.08	0.42	0.18	
E9A1-6	0.29	0.26	0.36	0.40	
E9A1-7	0.15	0.20	0.21	0.32	
E9A1-8	0.03	0.03	0.12	0.24	
E9A1-9	0.01	0.35	0.16	0.50	
E9A1-10	0.25	0.17	0.36	0.42	
E9A2-1	0.28	0.19	0.40	0.32	
E9A2-2	0.25	0.12	0.45	0.12	
E9A2-3	0.17	0.04	0.25	0.07	
E9A2-4	0.11	0.15	0.30	0.28	
E9A2-5	0.09	0.05	0.18	0.20	
E9A2-6	0.12	0.11	0.25	0.17	
E9A2-7	0.42	0.22	0.52	0.20	
E9A2-8	0.27	0.08	0.28	0.20	
E9A2-9	0.11	0.09	0.25	0.27	
E9A2-10	0.25	0.19	0.37	0.12	
釋出電流最大值	0.	60	0.	67	
釋出電流最小值	0.	01	0.	07	
平均釋出電流	0.1	21	0.	46	

表 4.27 基隆港東 9 號碼頭陽極塊釋出電流量測結果

4.4 歷年調查結果彙整分析

表 4.28 為歷年國內主要商港鋼構碼頭之鋼樁腐蝕調查結果。鋼樁 之腐蝕情形,以基隆港部分碼頭較為嚴重,花蓮港至民國 92 年止,其 碼頭之鋼板樁位於海中帶部份尚未採用任何防蝕措施,雖然腐蝕速率 未超出設計允許值,但因使用年限已超過三、四十年,且靠海床附近 曾發現板樁發生彎曲開裂之現象。各港之鋼樁如採用適當之防蝕措 施,均可達到降低其腐蝕速率之效果,例如,海中帶採用犧牲陽極塊 作為防蝕工法。

洪口	檢測碼頭	鋼材現況			/#⇒÷
	編號	鋼材種類	防蝕措施	腐蝕速率 (mm/yr.)	NHI AT
基隆港	E2 E10 W19 W27	E5 E7、W21 W24、W27:Z型 鋼板樁 W24 W26:井筒 式鋼板樁 E8 E10:鋼管樁 W19 W20: 鋼管樁	潮汐帶:塗裝工法 海中帶:犧牲陽極 法(E5、E9、E10 尚有部份未安裝)	1.E5 E7、W24 W27 在低潮 位線附近均發現鋼板樁發生 穿孔破洞現象 2.部份碼頭未採防蝕措施前,低 潮位線附近多處及海中帶少 處之鋼樁腐蝕速率大於 0.20 mm/yr.,腐蝕屬嚴重程度,目 前除 E5 外,多已修護海中帶 並安裝犧牲陽極改善,腐蝕速 率已降低。。	陽極塊消耗速率: 1.3 3.7 kg/yr.
台北港	E1 E3	U 型鋼板樁	潮汐帶:塗裝工法 海中帶:犧牲陽極 法	1.最大腐蝕速率 0.14 mm/yr.。 (調查時因鋼樁使用僅約五 年,故腐蝕速率較高) 2.腐蝕速率:東1、東2>東3	陽極塊消耗速率: 0.5 3.2 kg/yr.
蘇澳港	6、7 駁 船	駁船:鋼板樁 6、7:鋼管樁	潮汐帶:塗裝工法 海中帶:犧牲陽極 法	1.駁船碼頭未採防蝕措施前,低 潮位線附近多處鋼樁腐蝕速 率大於 0.20 mm/yr.,腐蝕屬嚴 重程度,已修護海中帶並安裝 犧牲陽極改善,腐蝕速率已降 低。 2.鋼管樁(6、7號碼頭) 腐蝕速率多小於 0.10mm/yr。	陽極塊消耗速率: 0.4 3.0 kg/yr.
花蓮港	4 9 航道岸壁	4 9:Z型鋼板樁 航道岸壁:U型鋼 板樁	4 5 號碼頭大氣 帶:塗裝工法 潮汐帶:無 海中帶:無	 1.4 5號碼頭大氣帶之陸側鋼 板樁發現穿孔破洞 2.5 6號碼頭靠海床處發現數 處鋼板樁開裂,已修護改善。 3.鋼板樁之腐蝕速率多小於 0.10mm/yr.。 	
台中港	29、30、99	鋼管樁	潮汐帶:塗裝工法 海中帶:犧牲陽極 法	鋼管樁腐蝕速率多小於 0.14mm/yr.。	陽極塊消耗速率: 0.4 3.5 kg/yr.
安平港	3、4	U 型鋼板樁	海中帶:犧牲陽極 法	鋼管樁腐蝕速率多小於 0.05mm/yr.,腐蝕情狀輕微。	1.鋼板樁均位於海中 帶 2.陽極塊消耗速率: 4.9 8.4 kg/yr.
高雄港	39, 40, 58, 69, 70, 78, 81	U 型鋼板樁	海中帶 : 犧牲陽極 法	鋼管樁腐蝕速率多小於 0.05mm/yr. ,腐蝕情狀輕微。	1.鋼板樁均位於海中 帶 2.陽極塊消耗速率: 1.3 4.0 kg/yr.

表 4.28 國內主要商港鋼構碼頭之鋼樁腐蝕調查結果

第五章 結論與建議

5.1 結論

 本次調查之碼頭,除基隆港東9號碼頭部份外,鋼樁均採用犧牲陽 極塊作為防蝕措施,目視檢視及鋼樁現有厚度與保護電位量測結果 顯示,安裝陽極塊可達到對鋼樁防蝕保護之目的。

2.鋼樁腐蝕速率均小於設計允許值,但基隆港東9號碼頭未採用防蝕 措施部份,其腐蝕速率相對較高於已採用防蝕措施部份。

3.陽極塊發生電位與釋出電流量測結果顯示,陽極塊之電氣性能可達 到保護鋼樁防蝕之目的。

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.歷年調查結果顯示,鋼構碼頭如有採用防蝕措施,則其鋼樁均可降 低腐蝕速率。

5.2 建議

碼頭使用如超過二十年或設計年限者,為確保碼頭結構安全與正常運作,應定期進行檢測與維護。

 鋼樁如發現穿孔、破洞,應儘速修護並採適當之防蝕措施,以免 損害繼續擴大。

3. 未採用防蝕保護措施之鋼構碼頭,應全面施加適當之防蝕措施。

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,「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。
- [3] 交通部運輸研究所,「碼頭鋼板樁現況調查與腐蝕防治研究」, MOTC-IOT-IHMT-MA9011,2002。
- [4] 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 鋼板樁岸壁調查檢測」,IHMT-9001,2002。
- [5] 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)。
- [6] 交通部運輸研究所,「港灣構造物檢測與耐久性試驗研究(2/3)」, MOTC-IOT-92-H1BA04,民國91年3月,2002)。
- [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] 交通部運輸研究所,「港灣構造物陰極防蝕準則(草案)」, MOTC-IOT-92-H1BB02,2003。
- [9] 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。
- [10] 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。
- [11] 石黑健、白石基雄、海輪博之,"鋼矢板工法", p571,日本,山 海堂,1982。
- [12] Samuel A. Bradford, "Corrosion Control", Van Nostrand Reinhold, New York, U.S.A., 1993.

- [13] Lg. Hlasamichi Kowara, "Metal Corrosion Damage and Protection Technology", Allerton Press INC, 1989.
- [14] F. W. Fink and W. K. Boyd, "The Corrosion of Metals in Marine Environment", DMIC Report 245, 1970.
- [15] "Splash Zone Maintenance Systems for Maine Steel Structures ", NACE International Task Group T-1G-27, 1994.
- [16] H. Uhlig, D. Triadis, and M. Stern, J. Electrochem. Soc., 102, 59, 1955.
- [17] R. E. Lye, "Splash Zone Protection on Offshore Platforms- A Norwegian Operator's Experience", Materials Performance, Vol. 40, No. 4, April 2001.
- [18] G. wranglen, " An Introduction to corrosion and Protection of Metals", Chapman and Hall, NewYork, 1985.
- [19] Mars G. Fontana, :"Corrosion Engineering", 3rd ed ,. McGRaw-Hill Book company, U.S.A., 1986.
- [20] Francis, L. LAQUE, "Marine Corrosion Cause and Prevention, pp95-163.", Joho Wiley and Sons, INC., U.S.A. 1975.
- [21] "Swain Meter", William H. Swain Co., 1989.
- [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] 陰極防蝕用犧牲陽極性能檢驗法, CNS 13521, 經濟部中央標準局, 1995。
- [29] "Impressed Current Cathodic Protection of Reinforcing Steel in Atmospherically Exposed Concrete Structures", NACE Standard RP0290-2000, NACE international, Houston, TX, 2000.
- [30] Cathodic Protection of Concrete Bridgws : A Manual of Practice, Strategic Highway Research Program, SHRP-S-372, 1993.
- [31] 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。

附錄二

子計畫(二)混凝土結構物耐久性試驗 研究

第一章 前言

1.1 研究動機

台灣近年來的各主要河川由於環保意識、道路橋樑安全及防洪整 治與水土保持安全之因素,不得不將河川禁採之範圍擴大與限制,其 影響已造成砂石供需之不平衡,於是衍生了許多社會、環境及經濟層 面之問題,尤其是混凝土中主要材料-砂石之影響更加嚴重。而台灣四 面環海,海砂蘊藏豐富,若能將其應用於混凝土中,將可彌補砂石短 缺之危機。雖然海砂中之 CI⁻對鋼筋混凝土有腐蝕鋼筋及其他不良之影 響,但是基於陸上砂石來源之匱乏與耗盡,以及海砂資源之豐富與利 用,從另一角度思考,或許可從其它方法,諸如添加波索蘭材料、化 學摻料(鋼筋腐蝕抑制劑) 電化學防蝕技術等,來改善海砂混凝土之 耐久性與品質。本研究乃藉由添加波索蘭材料-爐石,探討海砂混凝土 之各項新拌與硬固性質及其耐久性能,內部鋼筋之腐蝕狀況,並評估 應用於 R.C.結構物之可行性。

又河川砂石禁採範圍逐漸擴大,業者對於粒料之品質更不會去選 擇,尤其是粒料之活性問題。從以前之報告顯示台灣東部之粒料有潛 在發生「鹼質與粒料之反應」,雖然東砂西運之政策可以暫且解決砂石 短缺之困境,然而鹼質與粒料之反應是一大威脅。港灣環境具有高濕 與高鹼質之特性,加上潮汐與風等外力及乾濕循環的作用,使的混凝 土構造物之耐久性面臨嚴重之考驗。本所港研中心數年前即對國內各 大商港進行混凝土構造物之鹼質與粒料反應之調查,本研究將繼續過 去數港之分析模式對台東地區之混凝土構造物及其粒料來源進行調查 與試驗,提供相關單位參酌,期望能協助港灣管理單位瞭解此一反應 之潛勢與危害,進而在維修現有或規劃新建混凝土構造物時有所依據。

1.2 研究目的

本研究之主要目的;1.以添加爐石於海砂混凝土中,探討混凝土之 基本性能變化及其適用性,並評估對鋼筋腐蝕之影響性,以提供爾後 使用海砂混凝土之參考。2.台灣花東地區部份河川粒料具有活性反應現 象,不利於混凝土之耐久性能,特對當地混凝土結構物進行調查,以 了解可能發生「鹼質與粒料反應」之潛勢。

第二章 文獻回顧

2.1 海砂性質與影響

通常一般海砂較河砂顆粒微小且細,含有高量之氯離子,氯離子 主要乃儲存於海砂顆粒之表面薄層孔隙內,以及因海水蒸發而殘留(存) 於海砂顆粒表面層上。除了 含有高量的氯離子外,海砂亦含有少量其 它海水成份之離子,諸如鎂離子(Mg⁺²)、硫酸根離子(SO₄⁻²)、及其它鹼 性離子(Na⁺、K⁺、Ca⁺²)等,對鋼筋混凝土具有相當程度之侵蝕性,其 影響性簡述如下:

2.1.1 對鋼筋腐蝕之影響

一般而言,鋼筋在品質良好的混凝土中是不會生銹的,其原因是 在混凝土的孔隙溶液(pore solution)中,由於含有飽和的氫氧化鈣和 鈉、鉀的鹽類,使混凝土內部成為高鹼性(pH = 12 13)的環境,而鋼 筋在此條件下會在表面生成與鋼筋密切結合鈍態的氧化鐵,對鋼筋形 成保護作用,使鋼筋不會受到腐蝕。但是當混凝土內部有氯離子,且 有氧和水分共同存在時,不論氯離子是來自水泥、骨材、拌合水、摻 料等混凝土材料,或是來自海洋環境、去冰鹽等的氯離子,均會使混 凝土中的鋼筋產生腐蝕,混凝土內部 pH 值和氯離子濃度與鋼筋腐蝕的 關係如圖 2.1 所示,一般而言,當混凝土內部 [Cl]/[OH]的莫耳比(molar ratio)大於 0.6 時,即使混凝土的 pH 值大於 11.5,鹼性環境對鋼筋的 保護作用會消失,鈍態的氧化鐵保護膜會受到破壞,使鋼筋易於腐蝕。

氯離子對鋼筋腐蝕的影響機理,主要是氯離子會破壞鋼筋表面的 鈍態氧化鐵保護膜,造成鐵離子(Fe⁺²)的溶出,並生成水溶性的氯化鐵 (FeCl₂)錯合物。這種氯化鐵錯合物會溶解且離開鋼筋的表面,並擴散 進入混凝土的孔隙溶液中,與氫氧根離子(OH)反應生成 Fe(OH)₂,同 時釋放出 Cl⁻, Fe(OH)₂ 會進一步與氧、水反應生成鐵銹。上述一連串 的反應,鋼筋將不斷地產生腐蝕反應,使鐵元素離開鋼筋表面;且由 於反應中會再度釋放出 Cl⁻, 使得 Cl⁻可以反覆不斷地參與腐蝕反應, 其 侵蝕機理與過程如圖 2.2。一旦 Cl⁻含量達到足以產生鋼筋腐蝕的臨界 值, 則腐蝕便很難再加以抑制。



圖 2.2 氯離子侵蝕鋼筋之機理與過程

2.1.2 對混凝土之影響

1.氯離子

氯離子除了對鋼筋混凝土結構物中之鋼筋會造成腐蝕外,CI之侵 入亦會致使混凝土材料在水化硬固過程中,發生水泥水化物膠體結構 上的變化,造成硬固混凝土體積發生極大的變化。研究學者熟知,當 水泥水化產物(CaO SiO₂ H₂O,簡稱 C-S-H 膠體)與 CI 接觸時會形成 高溶解性的氯化鈣(CaCl₂),而使原來具緻密性之 C-S-H 膠體溶出,變 為多孔性的網狀結構,增加了水泥漿體的毛細孔體積。由於滲透性的 增加,使得海水中之鎂離子(Mg⁺²)更易侵入混凝土內,取代 C-S-H 膠 體中之鈣,而變成不具膠結性的 M-S-H (MgO SiO₂ H₂O),造成混凝 土強度損失。同時當氯化鈣與水泥中之鋁酸三鈣(C₃A)反應時,會生成 氯化鋁酸鈣 (C₃A CaCl₂ 10H₂O, chloridealuminate);其反應式如下:

> $2 \text{ Cl} + \text{Ca}^{+2} + \text{C}_3\text{A} + 10 \text{ H}_2\text{O}$ C₃A CaCl₂ 10H₂O (CaCl₂) Chloraluminite (氯化鋁酸鈣)

2.硫酸根離子(SO4-2)

硫酸根離子與混凝土漿體之反應過程甚為複雜,主要與鋁酸三鈣(C₃A)反應,產生所謂「硫酸鹽侵蝕」,使得水泥漿體積膨脹形成內應力進而導致混凝土構造物龜裂,一般較被接受的反應機理是由鈣釩石二度膨脹和石膏腐蝕兩種反應組合而成,形成鈣釩石二度膨脹的主要原因,乃是水泥中的鋁酸三鈣(C₃A)的水化產物對硫酸鹽不穩定所造成,由於純 C₃A 水化速率相當快,會造成混凝土閃凝的現象,而影響混凝土的工作性和日後的強度,其反應式如下;

C₃A + 21H₂O C₄AH₁₃ + C₂AH₈ 2C₃AH₆ + 9H (水化石榴石)

與

$$MgSO_{4^{(aq)}}$$

C₃A CaCl₂ 10 H₂O C₃A CaSO₄ 32H₂O
鈣釠石(ettringite)

上述反應,致使混凝土體積膨脹,導致結構物發生龜裂,降低結構物之耐久性。

3.其它鹼性離子

海砂(水)中之 Mg⁺²能與混凝土漿體中之水化產物 Ca(OH)₂反應產生難溶的 Mg(OH)₂,其化學反應如下:

 $Ca(OH)_2 + Mg^{+2} - Mg(OH)_2 + Ca^{+2}$

Mg(OH)₂ 為片狀結構,沉澱於表層連通性毛細管中,有阻塞外界物質進入之 保護作用,孔隙結構雖然不會遭到明顯破壞,由於滲透性的增加,使得海砂(水) 中之鎂離子(Mg⁺²)更易侵入混凝土內,取代 C-S-H 膠體中之鈣,而變 成不具膠結性的 M-S-H (MgO SiO₂ H₂O),造成混凝土強度損失。表 2.1 為海砂(水)成份對混凝土性質之影響。

气化弛 (NaCl)	氯離子會造成鋼筋腐蝕			
录[1し]] (NaCl)	鈉離子會惡化鹼骨材反應			
	氯離子會造成鋼筋腐蝕			
	與氫氧化鈣反應生成氫氧化鎂和氯化鈣			
	1.硫酸根離子會造成硫酸鹽侵蝕			
	2.鎂離子會與C-S-H中之鈣進行陽離子交			
	換,生成M-S-H破壞水泥漿體結構,降			
	低強度			
硫酸鈣 (CaSO ₄)	造成硫酸鹽侵蝕			
氯化鈣 (CaCl ₂)	造成鋼筋腐蝕			
	1.加速水泥水化, 縮短凝結時間			
	2.提高早期強度,降低晚期強度			
綜合影響	3.水溶性鹽類易造成混凝土析晶現象			
	4.造成硫酸鹽侵蝕和鋼筋腐蝕			
	5.降低混凝土耐久性			

表 2.1 海砂或海水中之成分對混凝土性質的影響[1]

2.2 添加波索蘭材料對混凝土的影響

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 2.2^[2,3]所示, 摻料簡要說明於下;

(1)飛灰

飛灰含有豐富之氧化矽(SiO₂)、氧化鋁(Al₂O₃)以及氧化 鐵(Fe_2O_3),其結構為玻璃質球狀物,粒徑約在 0.4um~100um 之 間,其比重為 2.0~2.2。當波索蘭反應發生時,飛灰中的 SiO,及 Al₂O₃與水泥漿體中之氫氧化鈣(Ca(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。

(2) 爐石

爐石為熔煉鋼鐵時所生的副產物,其中含有氧化矽(SiO₂)、氧 化鋁(Al₂O₃)以及氧化鐵(Fe₂O₃)等成份。爐渣由高爐排出冷卻 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 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。

表 2.2 混凝土添加波索蘭材料之特性^[2,3]

		飛灰	爐石	矽灰	稻穀灰
		SiO_2 , Al_2O_3 , CaO ,	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ 及Fe ₂ O ₃	SiO ₂	纖維素,木質素及半纖維素
成	份	MgO , Na $_2$ O , K $_2$ O			
		及碳等化合物			
		1.減少用水量,改善	1.改善工作度	1.降低水泥含量	1.較高之早期強度及耐久性
		工作度,增加水密	2.提高晚期強度	2.生產超高強度混	2.有較高強度
佰	Φŀ	性	3.增加耐久性	凝土	3.凝結時間縮短
逻	和	2.提高晚期強度		3.增加耐久性	4.乾縮量小
		3.減少體積變化增			
		加耐久性			
		1.降低早期強度	1.降低早期強度	1.工作性較差	1.工作度較差
缺	點	2.延緩凝結時間	2.乾縮量增加	2.價格高	2.性能了解不足,有待進一步
					研究
		1.佔膠結料 8%	1.佔膠結料 20~30%	1.佔膠結料 12%	1.工作性及坍度隨添加量增
		預拌混凝土	氣候較冷期間	減低水泥含量	加而下降
		2.佔膠結 15~35%	2.佔膠結料 50%	2.佔膠結 3~18%	2.稻穀灰之取代量以 20%為
		混凝土污工製品	抗硫侵蝕混凝土	增加含飛灰或爐	上限超過則工作度將降底
		3.佔膠結料 30%	3.佔膠結料 75%	石混凝土早期強度	3.一般以稻穀灰取代後會有
		巨積混凝土	巨積混凝土	3.佔膠結料 10%	早凝及減少泌水之現象
		4.佔膠結料 22%	4.佔膠結 40~50%	減少氯離子侵入	4.稻穀灰之取代量以 20%以
應	用	高性能混凝土	高性能混凝土	混凝土	內時早期及晚期抗壓強度
方	向		5.佔膠結 40~65%	4.佔膠結料	均可提高
			抗凍融及鹼矽骨材	20~33%	高性能混凝土
			反應	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	

(3) 矽灰

矽灰係由高純度的石英與煤在電弧爐中加熱至 2000 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 0.1um,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:

3CH + 2S C_3S_2H3 (3CaO $2SiO_2$ $3H_2O$)

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。

目前國內應用爐石粉於混凝土有下列三種使用策略[4]:

- (1)作混凝土添加物:爐石粉在預拌廠中直接添加於水泥、水、砂石 等材料中;或爐石粉與飛灰混合成爐灰再加入上述材料中。
- (2)作混合水泥:爐石粉與卜特蘭水泥混合成水泥,稱為卜特蘭高爐水泥(爐石粉添加量約 30~70%),作為混凝土的膠結料。其製造須符合 CNS 3654 之規定。
- (3)作水泥添加物:在卜特蘭水泥製程中添加 5%以內之爐石粉,而 視同卜特蘭 I型水泥,為需符合 CNS 61 規範。

2.3 使用海砂/海水混凝土抑制硫酸鹽侵蝕的策略

使用海砂、海水於混凝土時對構造物造成不同程度的侵蝕,導致 耐久性的降低,要完全避免鋼筋混凝土不發生腐蝕極為不易,但若在 設計與材料選用、施工等過程能多加注意方可延遲腐蝕發生,或減低 侵蝕之程度,而增長結構物的使用壽命。茲將應用海砂、海水於混凝 土時,抑制硫酸鹽侵蝕的改善策略列述於下表 2.3,以供參考^[5]。

抑制策略	改善方法	改善
	 1.水泥: .減低鋁酸三鈣(C₃A)及鋁鐵酸四鈣(C₄AF) 之含量,選用抗硫水泥(Type 2 或 Type 5) 取代普通卜特蘭水泥(Type 1)。 .調整水泥含量,以C₄AF 替代一部份之C₃A 含量。 2.細骨材: 	抵抗硫酸鹽侵蝕。
	. 取用海砂 , 須經充分清洗之除鹽處理。	使含鹽量在容許值以下
	. 應使用骨材粒度佳 , 吸水率較小者。	達到較佳級配。
一、改良混凝土品質	 3.摻料: . 選用波索蘭材料如飛灰,水淬爐石等。 . 添加亞硝酸鈣等防蝕劑作為腐蝕抑制劑。 4.調整配比: . 使用低水灰比混凝土。 . 增加水泥含量。 5.施工品控: . 嚴格執行施工計畫。全面品質管制及檢查。 . 確實搗實。 6.養護: . 利用蒸氣養護使 C-A-H 相分解。 7.其他: . 使用高分子含浸混凝土,直接將高分子與混凝土聚合成一體。 . 利用強塑劑或高度減水劑的減水混凝土。 	增加混凝土緊密程度,減 低滲透性。 形成保護膜減少氯鹽所造 成的鋼筋腐蝕。 增進混凝土強度。 避免混凝土孔隙發生可延 緩鹽分滲透速度。 增加抗硫作用 可提高強度,降低水密 性,減少龜裂。
二、增加鋼筋保護層厚度	. 足夠的鋼筋保護層厚度。	延遲鹽分到達鋼筋的時間
三、鋼筋充分的防銹處理	. 以環氧樹脂塗裝及鍍鋅處理。	使鋼筋的表面防銹蝕
四、混凝土表面塗佈	. 選用表面塗封材料如防水劑、瀝青塗覆。	遲滯氧氣、水分、氯化物 鹽分的進入
五、杜絕腐蝕機會	 . 嚴格限制超載之荷重。 . 容許裂縫寬度之限制。 . 防止或降低混凝土的乾燥收縮。 	防患龜裂裂縫急腐蝕環境 的產生

表 2.3	使用海砂/海水混凝土抑制硫酸鹽侵蝕的策略	挌
1 4.0		۰н

資料來源:國立台灣工業技術學院營建材料研究室

第三章 研究方法與步驟

本研究分為兩個單元來進行:第一單元為「摻用爐石對添加海砂 混拌混凝土之耐久性影響」,第二單元為「混凝土構造物鹼質與粒料反 應之調查與潛勢分析」。

3.1 摻用爐石對添加海砂混拌混凝土之耐久性影響

3.1.1 試驗規劃

採用 ACI 混凝土配比設計法,以添加不等比例之爐石(取代水泥量) 於海砂及河砂混拌之混凝土中,進行漿體拌製之基本性質試驗,以及 硬固後之各項試驗。試驗流程如圖 3.1 所示,相關試驗內容與敘述如表 3.1 所示。

3.1.2 試驗材料

- 1. 水泥:卜特蘭 型水泥。
- 2. 拌合水: 自來水。
- 3. 爐石粉:國內中聯資源公司生產之高爐石粉,比重為2.90。
- 4. 粒料:粗粒料最大粒徑 1/2",細粒料之細度模數 FM 為 2.70, 粒料 之級配及物理性質如表 3.2、表 3.3 及表 3.5 所示
- 5. 海砂:取自台中港區航道海域浚挖之海砂,氯離子含量 0.24%,細 度模數 FM 為 2.13,粒料之級配及物理性質如表 3.4、表 3.5。



圖 3.1 試驗流程

項目 試體種類	養護條件	試驗項目	試驗齡期(天)
15×30cm	試體拆模後,置入養生室, 養護到所需之齡期	抗壓強度、超音 波脈波速度、電 阻係數	14、28 56、90
10×20cm	試體拆模後,置入養生室, 養護到所需之齡期	透水係數(特製試 體)	56
矩形試體 (10×10×36)cm	試體拆模後,置入養生室進 行養護到 28 天後,分別至入 海水與空氣中	鋼筋腐蝕電位量 測	28、90

表 3.1 試體之相關試驗內容

表 3.2 粗粒料之級配

篩號	累積通過率 (%)	ASTM C33 規範
1″	1″ 100	
3/4"	100	90~100
1/2″	78.03	-
3/8"	35.69	20~55
NO.4	0.67	0~10
NO.8	0	0~5

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 3.3 細粒料之級配(河砂)

3.4 細粒料之級配(海砂)

篩號	累積通過率 (%)	ASTM C33 規範
NO.4	99.7	95~100
NO.8	98.2	80~100
NO.16	87.8	50~85
NO.30	59.76	25~60
NO.50	29.57	10~30
NO.100	11.7	2~10

物理性質	粗粒料	細粒料(河砂)	細粒料(海砂)
細度模數 (FM)	-	2.70	2.13
比重 (SSD)	2.58	2.58	2.63
吸水率(%)	1.72	2.20	1.36
乾單位重 (kg/m ³)	1529	-	-
乾比重	2.61	2.63	2.68
含水量(%)	0.17	0.6	1.93

表 3.5 粒料之基本物理性質

3.1.3 試體配比

以 ACI 混凝土配比設計法設計, 試體水灰比為 0.45 與 0.60, 設計 強度分別為 450kg/cm² 及 300kg/cm², 漿體拌製所需之用料量, 如表 3.6~3.9 所示。

編號	粗粒料 (kg/m ³)	細粒料 (kg/m ³)	7K (kg/m ³)	水泥 (kg/m ³)	爐石 (kg/m ³)	爐石取代 水泥量
A-R0	863	718	218	484	0	0 %
A-R30	863	718	218	339	145	30 %
A-R50	863	718	218	242	242	50 %

表 3.6 配比 A(水灰比 0.45, 河砂)

編號	粗粒料 (kg/m ³)	細粒料 (kg/m ³)	水 (kg/m ³)	水泥 (kg/m ³)	爐石 (kg/m ³)	爐石取代 水泥量
A-D0	807	789	218	484	0	0 %
A-D30	807	789	218	339	145	30 %
A-D50	807	789	218	242	242	50 %

表 3.7 配比 A(水灰比 0.45,海砂)

表 3.8 配比 B(水灰比 0.60,河砂)

編號	粗粒料 (kg/m ³)	細粒料 (kg/m ³)	7K (kg/m ³)	水泥 (kg/m ³)	爐石 (kg/m ³)	爐石取代 水泥量
B-R0	863	819	218	363	0	0 %
B-R30	863	819	218	254	109	30 %
B-R50	863	819	218	181.5	181.5	50 %

表 3.9 配比 B(水灰比 0.60,海砂)

編號	粗粒料 (kg/m ³)	細粒料 (kg/m ³)	7 火 (kg/m³)	水泥 (kg/m ³)	爐石 (kg/m ³)	爐石取代 水泥量
B-D0	807	892	218	363	0	0 %
B-D30	807	892	218	254	109	30 %
B-D50	807	892	218	181.5	181.5	50 %

3.1.4 試驗參數與試體編號

1.試驗參數

拌製混凝土漿體之相關試驗參數如下表 3.10 所示。

表 3.10 試驗參數

項目	參數		
水灰比	0.45、0.60		
細粒料	浚挖海砂、河砂		
爐石粉取代水泥量%	0 % 、 30 % 、 50 %		
暴露環境	空氣、海水		
齒令期	14天,28天,56天,90天		

2.試體編號

試驗共有二個不同之配比,水灰比 0.45 配比其編號為 A,水灰比 0.60 配比其編號為 B,如使用海砂混拌時第二編碼為 D,河砂編碼為 R, 第三編碼為爐石粉取代水泥量 0%,30%,50%,其編碼為 0,30,50。 各類試體編號說明如下表 3.11;

編號代碼	水灰比	河砂	海砂	爐石取代量
А	0.45	-	-	-
В	0.60	-	-	-
R	-	*	-	-
D	-	-	*	-
0	-	-	-	0 %
30	-	-	-	30 %
50	-	-		50 %

表 3.11 各類試體編號說明

試體編號說明如下:

A-R0: A(水灰比 0.45), R(河砂), 0(爐石取代水泥量 %) B-R30: B(水灰比 0.60), R(河砂), 30(爐石取代水泥量 30 %) A-D0: A(水灰比 0.45), D(海砂), 0(爐石取代水泥量 %) B-D50:B(水灰比 0.60), D(海砂), 50(爐石取代水泥量 50%)

3.1.5 試體製作

試體製作材料包括水泥、粗細粒料、水、及爐石粉等,依設計配 比計量,以拌合機充分拌合後,將混凝土漿體灌製入各類型試體模內, 於澆置 24 小時後拆模,隨即將試體置入養生室養護。

3.1.6 試驗方法與設備

1.海砂氯離子含量檢測

依據 CNS 13407 細粒料中水溶性 Cl⁻含量試驗法(如照片 3.1),對 浚挖海砂 Cl⁻含量進行分析試驗步驟如下:

- a. 秤取海砂試樣 1000g, 置入 1L 廣口瓶內, 在溫度 105~110 烘箱內 烘乾至恆重, 求出試樣之乾重。
- b. 注入 500ml 蒸餾水於廣口瓶內,加蓋靜置 24 小時後,每隔 5 分鐘, 將廣口瓶底部反轉搖振瓶子一次,共計三次,以充分溶出試樣內之 水溶性氯離子。
- c. 靜置片刻後,以吸量管吸取廣口瓶內試樣之上層澄清液 50ml,置於 三角錐形瓶中,做為檢測試液。
- d. 加入 1ml 鉻酸鉀指示劑於三角錐形瓶試液中,充分搖晃後以濃度
 0.1N 之硝酸銀溶液滴定之,滴定之溶液顏色由青黃色變成紅褐色且
 不消失為止,此時,溶液已達滴定終點,記錄硝酸銀之滴定量 A(ml)。
- e. 空白試驗:另取 50ml 蒸餾水,依步驟 d 之操作過程,進行空白試驗, 此時亦可求得硝酸銀滴定溶液之消耗量 B(ml)。

氯離子含量計算:

(a) 水溶性氯離子含量 (%) = $\frac{0.0035 \times (A-B) \times 10}{W} \times 100$

(b) 鹽分(NaCl)含量(%) = $\frac{0.00584 \times (A-B) \times 10}{W} \times 100$

註:試驗必需做兩次以上,取其平均值

銘酸鉀指示劑濃度為 5 % (W/V)

2.抗壓強度試驗

採用 ELE2000KN 之抗壓試驗機(如照片 3.2 所示), 試驗方法依 據中國國家標準 CNS 1232 規範。

3.超音波脈波速度量測

使用英國 CNS 儀器公司出品之 PUNDIT(Portable Uitrasonic Non-Destructive Digital Indicating Tester)超音波脈波速度測定儀(如照 片 3.3 所示),量測在硬固混凝土材質內超音波脈波之傳遞速度,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 3.12 所示,可作初步研判^[6]。

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

表 3.12 超音波脈波速度與混凝土品質之關係^[6]

本試驗採用日製之內壓式透水試驗儀,如照片 3.4 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/cm²)及低壓(70 kg/cm²)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分別安裝壓力錶 50 kg/cm² 各一個。試驗時間為 7 日,每日定時記錄排出量筒之水位變化 及時間,將記錄之數據,代入達西公式(Darcy Formula),即可量出試體 之透水係數;

$$k = \frac{\log_{e} \frac{r_{0}}{r_{i}}}{2 h} \bullet \frac{Q}{P_{0}}$$
 (達西公式)

式中;

5.電阻係數試驗

以英國 Colebrand Advanced Engineering 公司之四探針並排之電阻 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,即可由儀板上讀出電阻值。圖 3.2 為四針式之電 阻量測儀器,示意圖,試驗儀器如照片 3.5。混凝土電阻係數與其中所 含鋼筋之活性程度之關係如表 3.13 所示^[7]。

表 3.13 混凝土電阻係數與鋼筋腐蝕活性之關係⁽⁷⁾

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

6.鋼筋腐蝕電位值量測

混凝土中鋼筋之腐蝕狀況為一電化學反應,因此鋼筋表面會發展出 有陽極與陰極之現象。本研究為量測混凝土內之鋼筋腐蝕電位值變 化,特製作一個 10cm× 10cm× 36cm 矩型木模試體,內埋置#4 鋼筋, 其中量測之導線一端與鋼筋焊接,如圖 3.3 所示。照片 3.6 為試體灌製 前之情形,試體於澆置 24 小時後拆模,隨即將試體置入養生室進行養 護,養護至一定齡期時進行電位值量測。電位量測使用三用電錶,一 端接到導線,另一端接上氯化銀參考電極上並與混凝土表面接觸,在 電錶上即可讀取腐蝕電位值,試驗情形如照片 3.7 所示。



圖 3.2 四探針式之電阻量測示意圖



圖 3.3 鋼筋腐蝕電位值量測示意圖



照片 3.1 海砂進行氯離子含量檢測之情形



照片 3.2 ELE 2000KN 抗壓機



照片 3.3 超音波脈波速度測定儀



照片 3.4 混凝土透水係數試驗儀



照片 3.5 混凝土電阻係數量測儀



照片 3.6 鋼筋腐蝕電位量測之試體灌製前之情形



照片 3.7 鋼筋腐蝕電位值量測之情形

3.2 混凝土構造物鹼質與粒料反應之調查與潛勢

研究內容包括;資料之蒐集、現場目視調查、非破壞性檢測、鑽 心取樣、試驗室之各項試驗、試驗數據之分析等。

3.2.1 目視調查

混凝土發生鹼質與粒料反應時,可從構造物表面的徵候做初步判 測。調查範圍包括花蓮港區及花東(台11線)濱海公路沿線各類小型 漁港設施,諸如防波堤、消波塊、碼頭;縱谷區則以鐵、公路橋樑及 建築物為主。

3.2.2 現場非破壞性檢測

依據目視調查的結果,篩選防波堤、消波塊等構造物進行現場非 破壞性檢測。由硬固混凝土之表面硬度、中性化深度、裂縫狀況等初 步評估混凝土現況,並研判鹼質與粒料反應的發生之潛在趨勢。各項 檢測項目及概要說明如下述:

1.反彈錘試驗

以反彈錘(Schmidt rebound hammer)撞擊混凝土表面,依據所得之 反彈值,估計混凝土構造物表面之硬度,並研判混凝土的均勻性。比 對反彈值推估所得與鑽心試體之抗壓強度試驗結果,探討混凝土強度 變化和鹼質與粒料反應間之可能關係。

2.混凝土中性化試驗

本試驗主要係探討混凝土構造物中性化的程度,並與其他試驗相 互比較分析。利用電鑽或鐵鎚先敲除少量結構體表面之混凝土,刷除 混凝土新鮮面上之細顆粒後,以酚 指示劑噴灑(刷)之,若表面呈 現桃紅色,則表示該處屬於鹼性;若未變色,則表該處已中性化,而 後量取混凝土的中性化深度。

3.2.3 混凝土鑽心取樣試驗

利用鑽心設備在現場進行鑽心取樣,除將試體攜回實驗室進行相 關之試驗外,並與非破壞性試驗所得之結果相互印證。鑽心試體進行 之試驗項目包括有X光繞射分析 (XRD)、掃描式電子顯微鏡分析 (SEM)、加速浸泡試驗、與以醋酸鈾螢光法檢測反應產物等。

1.X 光繞射分析 (XRD)

X 光繞射分析係由 X 光發射管發出一已知波長之 X 光射線照射於 試體上,並量測反射之 X 光射線強度為最大時所對應之角度,再由 Bragg's 公式計算出結晶體晶格面之間隔距離 d 。根據此一關係探討結 晶體之構造特性,並進行礦物鑑別及定性分析。透過 XRD 分析可鑑定 混凝土之化性(化合物)變化,並進一步探討病變之可能原因。

2.掃描式電子顯微鏡分析 (SEM)

捐瞄式電子顯微鏡 (Scanning Election Microscopy, 簡稱 SEM), 係利用電子槍發射高能量聚焦電子光束,在磁力線圈的作用下,有系 統地以電子光束在試體表面來回掃瞄,藉此得到試體表面外形或晶像 之外觀。利用 SEM 分析可對混凝土孔隙結構分佈、晶相變化進行微觀 分析,並觀察反應產物以鑑定可能病變之原因。

3.加速浸泡實驗

將現場鑽心試驗所得之鑽心試體儲存於不同的環境,並監測其鹼 質與粒料反應的情形。鑽心試體裁切成適當長度後,表面粘設 4 組測 點,每組測點之距離以測微計量測後,分別將試體置於 38 ,相對濕 度 100%的環境中以及 1N NaOH 的溶液中,定期量測各環境中試體之 長度變化。

4.醋酸鈾螢光法
由於鈾會取代鹼質與粒料反應後之鹼矽膠體中的鹼質,且產生之 反應產物在短波(254nm)紫外光的照射下會有黃綠色的反應特徵,據 此可檢測鹼質與粒料反應是否發生。

3.2.4 水泥砂漿棒膨脹試驗法 (ASTM C227)

本試驗將自花東沿海地區可能具鹼質與粒料反應活性潛能之粒料,依據 ASTM C227 試驗方法及在指定的養護條件下,量測儲存期間砂漿棒長度變化,而判斷其是否具反應活性。

第四章 試驗結果與討論

4.1 摻用爐石對海砂混拌混凝土之耐久性影響

4.1.1 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,例如抗壓強度高時,相對其彈性模數、抗拉強度、水密 性及耐久性亦均較為理想。

表 4.1 為彙整各配比試體之抗壓強度與養生齡期間之試驗結果 , 各 配比試體之抗壓強度發展趨勢,則繪製於圖 4.1 至圖 4.6。表 4.1 中顯 示, 配比 A(水灰比 0.45)之各類型試體之抗壓強度均較配比 B(水灰比 0.60)高出甚多,驗證低水灰比可得較高強度混凝土。其中若以河砂拌 製之混凝土為例,如配比 A(河砂,水灰比 0.45)試體,其抗壓強度發展 與爐石粉取代水泥量及養生齡期,呈正向關係趨勢,亦即抗壓強度隨 爐石粉取代水泥量及養生齡期之增加而增加,且其抗壓強度為各配比 中最佳者,例如試體 A-R50 其強度為 536kg/cm²(14 天)、606kg/cm²(28 天)、633kg/cm²(56天)、658kg/cm²(90天),且均較原始設計強度高出甚 多,而此配比中爐石取代量為30%、0%者、其抗壓強度依序遞降,整 體發展趨勢如圖 4.1 所示。而配比 A 如以海砂來混拌混凝土, 爐石取 代水泥量 30%時,其強度卻較爐石取代量 50%者為高,如圖 42所示, 推究原因可能海砂之細度模數(F.M.=2.13),較河砂之細度模數 (F.M.=2.70)為小所致。圖 4.3 與 4.4 則為配比 B 分別混拌河砂及海砂之 混凝土試體之強度發展趨勢,以爐石粉取代水泥量 30%,可得到最大 之抗壓強度。圖 4.5 及圖 4.6 分別彙整配比 A 及配比 B 混拌河/海砂試 體之抗壓強度。

齡期 試體編號		14 天	28天	56天	90天
配比A (W/C, 0.45)	A-R0	488	526	561	592
	A-R30	526	601	625	634
	A-R50	536	606	633	658
	A-D0	485	517	552	591
	A-D30	509	579	601	623
	A-D50	488	552	587	607
配比 B (W/C , 0.60)	B-R0	383	412	461	498
	B-R30	396	450	501	528
	B-R50	374	425	474	509
	B-D0	278	295	318	335
	B-D30	307	349	378	404
	B-D50	299	340	347	354

表 4.1 試體抗壓強度試驗結果 (kg/cm²)



圖 4.1 配比 A 試體(以河砂混拌)之抗壓強度發展趨勢





圖 4.3 配比 B 試體(以河砂混拌)之抗壓強度發展趨勢





圖 4.5 配比 A 試體之抗壓強度與齡期關係



圖 4.6 配比 B 試體之抗壓強度與齡期關係

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 4.2 及圖 4.7 與圖 4.8 為各配比試體進行超音波脈波速度量測所 得之結果。表 4.2 中顯示,各類型試體之脈波速度均隨養生齡期之增加 而變快,推究可能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)變為甚快。表 4.2 中除了部份試體 (編號 B-Dxx,以海砂混拌之試體)外,各類型試體於不同養生齡期下, 其超音波脈波速度均大於 4.0km/sec 以上,如依據表 3.12 混凝土品質等 級判別標準,混凝土之品質相當穩定且屬於優良等級。上述之結果恰 與抗壓強度發展趨勢,關係呈一致性且相互驗證。



圖 4.7 配比 A 試體之超音波脈波速度與齡期的關係



圖 4.8 配比 B 試體之超音波脈波速度與齡期的關係

配比	齡期	14 天	28天	56天	90天
配比A (W/C , 0.45)	A-R0	4.008	4.175	4.300	4.449
	A-R30	4.039	4.236	4.392	4.570
	A-R50	4.103	4.240	4.493	4.584
	A-D0	4.031	4.204	4.358	4.405
	A-D30	4.110	4.217	4.381	4.517
	A-D50	4.032	4.205	4.371	4.432
配比 B (W/C , 0.60)	B-R0	4.11	4.218	4.205	4.398
	B-R30	4.149	4.367	4.493	4.518
	B-R50	4.141	4.359	4.401	4.484
	B-D0	3.767	3.929	4.097	4.189
	B-D30	3.785	3.984	4.121	4.255
	B-D50	3.878	3.998	4.189	4.228

表 4.2 試體超音波脈波速度試驗結果 (km/sec)

3.電阻係數

混凝土電阻係數之大小在鋼筋混凝吐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。

圖 4.9 與圖 4.10 分別為配比 A 與配比 B 試體之電阻係數試驗結 果。兩圖中顯示,混凝土之電阻係數均隨養生齡期之增加而增大,與 混凝土之強度發展並未有相同之趨勢,探究原因可能為混凝土試體量 測時其表面之乾濕度影響到量測,在齡期 90 天時只有河砂添加爐石 50 % 時之電阻係數有超過 20 k -cm,其他電阻係數均未達 20 k -cm。 如依據表 3.13 之關係判定,試體內部鋼筋不易發生腐蝕行為。



圖 4.9 配比 A 試體之電阻係數與養生齡期的關係



圖 4.10 配比 B 試體之電阻係數與養生齡期的關係

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。

圖 4.11 為試體齡期 56 天之透水係數試驗結果。以配比 A(河砂混 拌之試體)爐石取代量 50%時,其透水係數最低,約為 1.0 x 10⁻⁸cm/sec。 如以海砂混拌之試體而言,有添加爐石粉取代水泥量者,其試體透水 係數均比未添加爐石粉取代者為低,上述結果印證添加爐石粉能改善 混凝土漿體之緻密性,致使孔隙降低。



齡期

圖 4.11 各配比齡期 56 天的透水係數

5.鋼筋腐蝕電位值量測

腐蝕是一種電化學反應, 在鋼筋表面會形成許多陰極和陽極之小

電池(cell)區域,在不同位置有不同的電位和電流產生。利用此理論, 可檢測某一範圍之電位分佈狀況,以評估鋼筋表面發生腐蝕的可能程 度與範圍。

表 4.3 與表 4.4 分別為配比 A 與配比 B 試體內之鋼筋腐蝕電位值 量測結果。由於本項試驗仍在初始階段且時間甚短,試體漿體可能仍 處於水化發展期間,因此,兩表中之鋼筋腐蝕電位值變化差異很大, 並未呈現明顯或規律趨勢,此刻,甚難依據表中數據解讀內部鋼筋實 際之腐蝕狀況,欲得正確之結果,以掌控鋼筋腐蝕發展過程,本項試 驗應長期進行監測。

配比	齡期	28 天	90天
	A-R0 (Air)	-215	-218
	A-R0 (Sea)	-217	-228
	A-R30 (Air)	-538	-548
	A-R30 (Sea)	-537	-600
配比 A (W/C , 0.45)	A-R50 (Air)	-435	-516
	A-R50 (Sea)	-405	-553
	A-D0 (Air)	-106	-111
	A-D0 (Sea)	-116	-308
	A-D30 (Air)	-179	-181
	A-D30 (Sea)	-154	-526
	A-D50 (Air)	-343	-231
	A-D50 (Sea)	-350	-576

表 4.3 水灰比 0.45 鋼筋腐蝕電位與齡期的關係 (mV)

配比	齢期	28 天	90天
	B-R0 (Air)	-75	-80
	B-R0 (Sea)	-73	-82
	B-R30 (Air)	-162	-187
配比 B (W/C , 0.60)	B-R30 (Sea)	-157	-189
	B-R50 (Air)	-123	-148
	B-R50 (Sea)	-124	-204
	B-D0 (Air)	-93	-112
	B-D0 (Sea)	-86	-298
	B-D30 (Air)	-80	-87
	B-D30 (Sea)	-78	-305
	B-D50 (Air)	-86	-144
	B-D50 (Sea)	-89	-287

表 4.4 水灰比 0.60 鋼筋腐蝕電位與齡期的關係 (mV)

4.2 混凝土構造物鹼質與粒料反應調查與潛勢

4.2.1 目視調查

花蓮港新東堤與花東沿海之石梯港、長濱漁港、新港漁港之防波 堤則出現地圖狀裂縫、裂縫處並有滲出物等疑似鹼質與粒料反應之徵 候。此外,花蓮港西堤及航道東側之消波塊,各漁港內消波塊也都發 現零星或大批地圖狀裂縫、滲出物等明顯鹼質與粒料反應徵候,省道 台11線及台9線至台東大武沿線之消波塊及部份橋樑之橋墩亦有多處 發現類似徵候,且批段性十分明顯,如照片 4.1~4.12。



照片 4.1 花蓮港新東堤堤身地圖狀裂縫 1 照片 4.2 花蓮港新東堤堤身地圖狀裂縫 2



照片 4.3 花蓮港航道消波塊地圖狀裂縫



照片 4.4 石梯港消波塊地圖狀裂縫



照片 4.5 新港漁港消波塊地圖狀裂縫



照片 4.6 富崗漁港堤防裂損現況



照片 4.7 台東海賓公園 肖 放射 也圖 状 疑縫 1 照片 4.8 台東海濱公園 肖 皮 地 圖 状 疑 縫 2



照片 4.9 台東大武公園消波塊地圖狀裂 照片 4.10 跨越之台九線鐵路橋平行主鋼 筋方向裂縫 縫



照片 4.11 台九線公路橋樑橋墩裂縫 1 照片 4.12 台九線公路橋樑橋墩裂縫 2

4.2.2 非破壞性檢測

1.試錘試驗

試錘試驗結果如表 4.5 所示。換算為混凝土之表面硬度,以花蓮港 新東堤堤身,消波塊部份其強度則屬正常值以上。

構造物名稱	表面硬度(kg/cm ²)	中性化深度(mm)
花蓮港新東堤	163 339	1 4
石梯漁港消波塊	162 195	0.5 3
新港漁港消波塊	105.0	0.5 3.
台東濱海公園消波塊	243 351	1 3
大武公園消波塊	386 438	1 2.5

表 4.5 現場試錘試驗與中性化深度量測之結果

2.中性化試驗

試驗結果詳如表 4.18 所示,中性化程度均不高,以花蓮港新東堤較高,約在1mm 至4mm 深度左右,照片 4.13 為鑽心試體進行中性化深度量測之情形。



照片 4.13 鑽心試體中性化程度量測情形

4.2.3 鑽心試體試驗

1. X 光繞射分析 (XRD)

本試驗係將混凝土構造物以鑽心試體擇要敲取碎片,各試樣壓碎 之碎片分袋,分別取出部份碎片,依規定研磨至通過所需篩號(#100) 之粉末,進行 XRD 實驗,試驗結果如圖 4.12 至 圖 4.14 所示,經比對 可能具有活性之成分,活性成分主要有 Tridymite(鱗英石) Cristobalite (方英石) (Ca,Na)(Si,Al)₄O₈(鹼矽膠體)及可能使混凝土發生膨脹之 Ettringite (鈣釠石) 等。



圖 4.12 石梯港消波塊 X 光繞射分析試驗結果



圖 4.13 台東海濱公園消波塊 X 光繞射分析試驗結果



圖 4.14 台東大武公園消波塊 X 光繞射分析試驗結果

2. 掃描式電子顯微鏡分析 (SEM)

本研究中所選擇的 SEM 試體,分別取自鑽心試體或鑿取自有疑似 鹼質與粒料反應徵候之現地結構物碎片。石梯港及台東海濱公園消波 塊部份試體其內部有海綿狀體之膠結物,與屬於活性粒料和鹼性物質 反應所生成的產物類似,部份形狀包括了海綿狀體之膠結物、細絲狀 等,如照片 4.14 至 4.15 所示;顯示其組成成份包括鹼、矽、鈣、鋁和 鈉之膠體,與外部徵候調查結果相互印證,應有鹼質與粒料反應之生 成物存在。

為確認類似鹼質與粒料反應膠體產物的存在與反應膠體產物的成 分,本研究後續將對部分完成浸泡試驗之試體同時進行 EDS 分析,如 出現類似鹼性物質反應所生成的產物,且經分析含有鈉、鉀、矽、鈣 等成分,可與 X 光繞射分析及目視檢測結果相互比對確認粒料活性。



照片 4.14 石梯港消波塊 SEM 照片



照片 4.15 台東海濱公園消波塊 SEM 照片

3.鑽心試體斷面醋酸鈾法試驗

現場完成鑽心試體取樣後,以醋酸鈾法檢測試體表面是否含有鹼 矽膠體。各試體斷面在噴灑醋酸鈾液體前後之照片比對分析,經過詳 細色澤變化鑑定後,整體而言,尚無出現黃綠色反應(鹼矽膠體)的區域。

4.鑽心試體浸泡試驗膨脹量量測

鑽心試體浸泡環境分為 38 1N NaOH 溶液,及 38 ,相對濕度 100 % 兩種。本試驗因需長期觀測,目前試驗尚在進行中。

4.2.4 ASTM C227 水泥砂漿棒膨脹試驗法

依據 ASTM C227 規範規定,將取自具活性潛能之地區(台東縣東 河、三仙台....等地區)之粒料製作成水泥砂漿棒,含鹼量則調整至 1.2 %,本試驗因需長期觀測,目前試驗尚在進行中。

第五章 結論

5.1 摻用爐石對海砂混拌混凝土之耐久性影響

- 1.配比 A(水灰比 0.45)試體,不添加爐石的河砂與海砂其抗壓強度發 展非常相似,而水灰比在 0.6 時以河砂的抗壓強度較高。
- 2.配比 A(水灰比 0.45)試體,添加 50% 爐石的河砂其抗壓強度最高, 而其他配比在添加 30% 爐石的河砂與海砂,其強度發展較高。
- 3.有添加爐石的海砂與河砂混凝土,其強度發展都比不添加爐石的 佳。
- 4.含爐石粉之混凝土試體,其電阻係數較不含爐石粉試體者為高。

5.2 混凝土構造物鹼質與粒料反應調查與潛勢分析研究

花蓮港區內及花東地區部份小型漁港或護岸設施諸如堤防消波 塊、以及陸上橋樑等構造物外觀,其外觀有發現鹼質與粒料反應之外 部徵候,顯示其有發生鹼質與粒料反應之潛能及疑慮。

參考文獻

- [1] 李釗,「港灣混凝土構造物劣化探討(一)」,港灣構造物安全檢測 與評估研習會,交通部運輸研究所,2002。
- [2] 林柄炎,「飛灰矽灰高爐石用在混凝土中」, 1993。
- [3] 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。
- [4] 蘇南,「高爐石粉對混凝土耐久性之影響」,應用礦物摻料提昇混凝 土品質研討會論文輯, p93~p94,1999。
- [5] 王和源、黃兆龍,「海砂/海水混凝土巨觀特性與抑制策略」,混凝 土摻用海砂之策略及檢測技術研討會論文輯,p -5~p -18,台 北,1994。
- [6] ASTM C876-91, "Standard Test Method for Holf-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete".
- [7] 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。
- [8] Stanton, T. E. (1940), "Expansion of Concrete Through Reaction Between Cement and Aggregate", Proc. ASCE, Vol.66.
- [9] Hobbs, D. W. (1988), Alkali-Silica Reaction in Concrete, Thoma Telford, London.
- [10] Lee, C. (1986), "Available Alkalis in Fly and Their Effects on Alkali-Aggregate Reaction", PHD Dissertation, Iowa State University.
- [11] 王櫻茂,楊宏儀(1991),以普蜀蘭混合材料防制鹼-骨材反應(二), 行政院國科會專題研究報告。
- [12] 李釗,陳桂清,許書王(1998),花蓮港區混凝土構造物鹼質與粒料 反應之調查研究,台灣省政府交通處港灣技術研究所研究報告。

[13] 李釗,柯正龍(1999),台中、基隆及蘇澳港區混凝土構造物鹼質與 粒料反應調查與潛勢分析研究,國立中央大學土木工程所碩士論文。

- [14] 李釗,陳桂清,許書王(1999),港區混凝土構造物鹼質與粒料反應 調查與潛勢分析研究,台灣省政府交通處港灣技術研究所研究報告。
- [15] 李釗,許書王(1999),台灣地區鹼質與粒料反應抑制策略之研究, 國立中央大學土木工程研究所博士論文。
- [16] Deng, M.S. (1996), "Alkali-Silica Reaction in The Cement Concrete Pavement of Airport", ICAAR, 10th International Conference.
- [17] ASTM C150-97a (1998), "Standard Specification for Portland Cement", American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA.
- [18] Jonathan, Wood G. M. (2000), "Comparison of Field Performance With Laboratory Testing: How Safe And Economic Are Current AAR Specification?", ICAAR, 11th International Conference, . PP.543-552.
- [19] SHRP-C/FR-91-101 (1991), Handbook For The Identification of Alkali-Silica Reactivity In Highway Structures, Strategic Highway Research Program1.
- [20] Hooton, R. D. (1996), "Recent Developments in Testing for ASR in North America", ICAAR, 10th International Conference, PP.280-287.
- [21] ASTM C295-90 (1998), "Standard Guide for Petrographic Examination of Aggregate for Concrete", American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA.
- [22] ASTM C289-94 (1998), "Standard Test Method for Potential Alkali-Silica Reactivity of Aggregates(Chemical Method)", American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA.
- [23] ASTM C227-97a (1998), "Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Cement-Aggregate Combinations(Mortar-Bar Method)", American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA.
- [24] ASTM C1260-94 (1998), "Standard Test Method for Potential Alkali

Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method) ", American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA.

- [25] ASTM C1293-95 (1998), "Standard Test Method for Concrete Aggregates by Determination of Length Change of Concrete Due to Alkali-Silica Reaction", American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA.
- [26] Marie de Grosbois and Eric Fontaine (2000), "Performance of The 60
 -Accelerated Concrete Prism Test For The Evaluation of Potential Alkali-Reactivity of Concrete Aggregates", ICAAR, 11th International Conference. PP.277-286.
- [27] Marie de Grosbois and Eric Fontaine (2000), "Evaluation of The Potential Alkali-Reactivity of Concrete Aggregates : Performance of Testing Methods and A Producer's Point of View", ICAAR, 11th International Conference. PP.267-276.
- [28] Giampiero Barisone and Gaetana Restivo (2000), "Alkali-Silica Reactivity of Some Italian Opal and Flints Tested Using A Modified Mortar Mar Test", ICAAR, 11th International Conference. PP.239-245.
- [29]李釗, 許書王, 陳桂清(1996), 「由破裂之消波塊探討鹼骨材反應」, 港灣報導, PP.30-40.
- [30] 李釗, 謝文凱(1997), 抑制鹼-骨材反應之基礎研究, 國立中央大學 土木工程所碩士論文。
- [31] Shayan, A., Diggins R. and Ivanusec I. (1996), "Effectiveness of Fly Ash in Normal and Steam-Cured Concrete", C.C.R., Vol. 26, PP.153-164.
- [32] Sidney, M. and J. F. Young, Concrete, PP.444-448.
- [33] Bungey, J. H. (1994), "Testing of Concrete in Structure", 2nd ed. Surrey University Press U.S.A.

附錄三

計畫審查簡報

港灣結構物檢測與耐久性試 驗研究

計劃主持人:陳桂清 研究人員:饒正、柯正龍、張道光 羅建明、李昭明、何木火









報告人:柯正龍 民國九十四年二月一日 港灣結構物檢測與耐久性試驗研究

子計劃一:碼頭鋼板樁現況調查 與腐蝕防方法研究

間報內容 一、前言

- 二、研究規劃
- 三、結果與討論



前青



前 言(1/3)

研究目的

*建立台灣四周港灣之鋼材腐蝕資料

*整理歸納影響鋼板 管 樁腐蝕行為

*探討台灣本土性碼頭鋼板 管 樁腐蝕防治方法。



前 **言**(2/3) 研究動機

◆鋼板 管 樁在海洋環境下易因腐蝕而損壞。

◈歷年調查結果發現五大港口部分鋼板樁腐蝕 問題嚴重。

◈國內鋼樁腐蝕速率,每年允許之最大腐蝕量 為0.20mm,是否合適,值得探討。



潮間帶鋼板樁腐蝕穿孔破洞



鋼板樁碼頭拉桿斷裂變形



海床處鋼板樁開裂











各港鋼板樁基本資料

港口名稱	碼頭編號	備	註
基隆港	E2-E12, E14, W19-W27		
蘇澳港	6,7,駁船碼頭		
台北港	E1-E3		
花蓮港	4-9,航道岸壁		
台中港	29-35, 99-102, W1-W5		
高雄港	1 , 11-12 , 34-47 , 55-58 , 62-70 , 78-81 , 116-118		
安平港	3,4		










































超音波測厚計





渦電流法檢測設備





鋼樁厚度檢測





鋼管樁斷面示意圖



腐蝕速率計算

腐蝕速率 = 腐蝕量/使用年期					
(減少厚度)/使用年期(1)					
$V_C = \frac{C}{Y_C + (1 - P)Y_P}$	(2)				
$V_P = \frac{C - V_C \times Y_C}{Y_P}$	(3)				

式中 V_{c} = 無防蝕措施之腐蝕速率 V_{p} = 有防蝕措施之腐蝕速率 Y_{c} = 無防蝕措施之年期 Y_{p} = 有防蝕措施之年期 C = 腐蝕量(mm)P=防蝕率

鋼樁厚度檢測

海水中鋼材之防蝕保護電位標準

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



陽極塊消耗率及殘存年限推估









(a)陽極塊表面清理



<u>(b)陽極</u>塊電位量測





構造物基本資料

碼頭 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
高雄港 69號	320	-14	FSP 6L U型鋼板樁	27.6	68	犧牲陽極
高雄港 70號	320	-14	FSP 6L U型鋼板樁	27.6	68	犧牲陽極
基隆港 東8號	240	-12	鋼管樁	12.0	84	犧牲陽極
基隆港 東9號	240	-12	鋼管樁	12.0	79	犧牲陽極



高雄港69、70號碼頭 鋼板樁結構示意圖





基隆港東8、東9號碼頭鋼管樁結構示意圖





基隆港東8、東9號碼頭鋼管樁厚度量測位置

構造物基本資料



基隆港東8、東9號碼頭鋼管樁保護電位量測位置





高雄港69號碼頭鋼板樁之腐蝕速率



高雄港70號碼頭鋼板樁之腐蝕速率



基隆港東8號碼頭鋼板樁之腐蝕速率



基隆港東9號碼頭鋼板樁之腐蝕速率









高雄港69、70號碼頭陽極塊安裝示意圖



高雄港70號碼頭(轉角段)陽極塊安裝示意圖



基隆港東8號碼頭陽極塊安裝示意圖



陽極塊目視檢測

•表面附著許多海生物

•海生物敲除後,發現許多反應產物

•反應產物為白色之氫氧化鋁(Al (OH)₃)

•外觀仍然十分完整



高雄港69號碼頭陽極塊調查



高雄港70號碼頭陽極塊調查



基隆港東8號碼頭陽極塊調查



港東9號碼頭陽極塊調查



陽極塊尺寸與重量量測

項目 碼頭編號	消耗重量 Kg	消耗率 Kg/yr.	殘存年限 (year)
高雄港69號	15.6 35.2	1.7 3.9	> 20
高雄港70號	14.8 34.8	1.6 3.9	> 20
基隆港東8號	9.3 17.3	1.0 1.9	> 20
基隆港東9號	8.2 47.8	0.9 5.3	> 20

陽極塊發生電位量測(單位;mV)

碼頭編號	切割前			焊接後		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
高雄港 69號	-1016	-1065	-1046	-1013	-1072	-1056
高雄港 70號	-1033	-1091	- 1051	- 1001	- 1037	- 1018
基隆港 東8 號	-1028	-1062	-1043	-1037	-1142	-1093
基隆港 東9 號	- 996	-1070	- 1021	- 1015	- 1089	-1021

陽極塊發生電流(單位:安培,A)

碼頭編號	海生物清除前			海生物清除後		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
高雄港	0.60	0.10	0.32	0.80	0.20	0.42
69號						
高雄港	0.60	0.10	0.28	0.90	0.20	0.46
70號						
基隆港	0.37	0.05	0.19	1.0	0.08	0.44
東8 號						
基隆港	0.4	0.1	0.20	0.00	0.20	0.20
東9號		U.1	0.20	U.OU	0.20	0.30



結 論(1/2)

1.本年度各檢測碼頭之鋼樁表面外觀未發 現腐蝕嚴重狀況。

 2.高雄港69、70號碼頭之鋼樁建造初期即 採取防蝕措施,鋼板樁之厚度損失輕微。
 3.基隆港鋼樁部份,東8號碼頭建造初期即 採取防蝕措施,鋼板樁之厚度損失並不 嚴重,東9號碼頭部份較大。

結 論(2/2)

4. 採用犧牲陽極法作為防蝕措施保護之碼頭, 鋼樁之保護電位均小於 -850mV(銅/硫酸銅 參考電極),處於防蝕保護狀態。
5.以基隆港東9號碼頭為例,鋼樁碼頭建造初 期即採防蝕措施保護之鋼樁,其腐蝕速率明 顯小於未採保護者。


子計畫二:港灣混凝土結構物耐 久性試驗研究

港灣結構物檢測與耐久性試驗研究



Part 1: 摻用爐石對海砂混凝土之影響

Part 2: 混凝土構造物鹼質與粒料反應 調查與潛勢分析研究









▶四、結論與建議



前言

台灣的各主要河川都列為禁採之限制,已經造成混凝土中 主要材料-砂石來源短缺之嚴重問題。而台灣四面環海,海 砂蘊藏豐富,若能將其應用於混凝土中,將可彌補砂石短 缺之危機。雖然海砂對鋼筋混凝土有不良之影響,但值得 去研究如何將其應用於混凝土中。本研究乃藉由添加波索 蘭材料-爐石,量測海砂混凝土之各項新拌與硬固性質及耐 久性能,最後評估海砂應用於混凝土之可行性。





1.研究規劃

本研究乃探討海砂及爐石摻拌於混凝土之相關性質。以ACI 混凝土配比設計法,以河砂及海砂設計二種水灰比(0.45、 0.6),以添加不等比例之摻料-爐石(取代水泥量),進行漿 體拌製之基本性質試驗,拌製之混凝土試體在養護一定齡 期後,進行硬固後之各項試驗。



2.試驗材料

- 水泥:採用環球水泥Type ト特蘭水泥。
- 拌合水:自來水。
- 爐石粉:中聯資源公司生產之高爐石粉,比重為2.90。
- 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2.70。
- 海砂:來自台中港7號碼頭南填方區浚挖海砂,細度模數
 FM為2.13。



粒料相關物理性質

物理性質	粗 粒 料	細粒料(河砂)	細粒料(海砂)
細度模數(FM)	-	2.70	2.13
比重(SSD)	2.58	2.58	2.63
吸水率(%)	1.72	2.20	1.36
乾搗單位重(kg/m³)	1529	-	-
乾 比 重	2.61	2.63	2.68
含水量(%)	0.17	0.6	1.93



配比設計A 水灰比**(W/C = 0.45)**



爐石取代 水 泥 量	編號	粗骨材 (kg/m ³)	細骨材-河砂 (kg/m ³)	水 (kg/m ³)	水泥 (kg/m ³)	爐石 (kg/m ³)
爐石(0%)	A-R0	863	718	218	484	0
爐石30%)	A-R30	863	718	218	339	145
爐石50%)	A-R50	863	718	218	242	242

	爐石取代 水 泥 量	編	號	粗骨材 (kg/m ³)	細骨材-海砂 (kg/m ³)	水 (kg/m ³)	水泥 (kg/m³)	爐石 (kg/m ³)
	爐石(0%)	A-D0		A-D0 807 789		218	484	0
	爐石(30%)	A-D3	30	807	789	218	339	145
T	爐石(50%)	A-D5	50	807	789	218	242	242



配比設計B 水灰比**(W/C = 0.60)**

爐石取代 水 泥 量	编號	粗骨材 (kg/m ³)	細骨材-河砂 (kg/m ³)	水 (kg/m ³)	水泥 (kg/m³)	爐石 (kg/m ³)
爐石(0%)	B-R0	863	819	218	363	0
爐石 (30%)	B-R30	863	819	218	254	109
爐石 (50%)	B-R50	B-R50 863 819		218	181.5	181.5
爐石取代 水 泥 量	編 號 粗骨材 (kg/m ³)		細骨材-海砂 (kg/m ³)	水 (kg/m ³)	水泥 (kg/m³)	爐石 (kg/m ³)
爐石(0%)	B-D0	807	892	218	363	0
爐石(30%)	%) B-D30 8		892	218	254	109
爐石(50%)	B-D50	807	892	218	181.5	181.5





項目	試驗變數					
水灰比	0.45,0.6					
細粒料	浚挖海砂、河砂					
爐石取代量	0%,30%,50%					
暴露環境	空氣、海水					
齡期	14天、28天、56天、90天					





3.試驗製作與量測



試體製作

試體養護

[位量測試體製作

超音波量測試



電位量測



電阻量測





度發展與齡期之關係



A(W/C=0.45)



度發展與齡期之關係

B(W/C=0.60)





水灰比0.45時抗壓強度與齡期的關係



水灰比0.65時抗壓強度與齡期的關係

2.超音波量測



水灰比0.45時超音波速與齡期的關係 水灰比0.60時超音波速與齡期的關係

超音波脈波速與混凝土品質之關係

脈 波 速 度 (m/sec)	混凝土品質	
< 2500	不良	
2500~3000	中等	
> 3000	優良	





水灰比0.45時電阻係數與齡期的關係 水灰比0.60時電阻係數與齡期的關係

混凝土電阻與鋼筋腐蝕活性之關係

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



3.電阻量測

水灰比0.45時電阻係數與齡期的關係 (K cm)

齡期 配比	A-R0	A-R30	A-R50	A-D0	A-D30	A-D50
14天	6.9	7.5	9.0	6.6	7.8	10.8
28天	7.5	9.0	13.2	7.8	10.5	14.4
56天	7.8	12.3	18.0	8.4	15.3	18.6
90天	8.1	15.0	26.1	9.6	18.6	26.1

水灰比0.60時電阻係數與齡期的關係 (K cm)

齡期 配比	B-R0	B-R30	B-R50	B-D0	B-D30	B-D50
14天	6.0	6.9	8.7	6.0	6.6	7.5
28天	6.3	8.7	10.5	6.3	7.8	10.8
56天	6.9	11.4	18.3	6.6	8.7	12.3
90天	7.5	13.5	21.3	7.5	9.6	17.1







各配比齡期56天的透水係數

5.電位量測

ᆙᄮᄮᆆᇊ						
黀期 環境	28天	90天		黀 職 職	28天	90天
A-R0(Air)	-215	-218		B-R0(Air)	-75	-80
A-R0(sea)	-217	-228		B-R0(sea)	-73	-82
A-R30(Air)	-538	-548		B-R30(Air)	-162	-187
A-R30(sea)	-537	-600		B-R30(sea)	-157	-189
A-R50(Air)	-435	-516		B-R50(Air)	-123	-148
A-R50(sea)	-405	-553		B-R50(sea)	-124	-204
齡期 環境	28天	90天		巖期 環境	28天	90天
A-D0(Air)	-106	-111		B-D0(Air)	-93	-112
A-D0(sea)	-116	-308		B-D0(sea)	-86	-298
A-D30(Air)	-179	-181		B-D30(Air)	-80	-87
A-D30(sea)	-154	-526		B-D30(sea)	-78	-305
A-D50(Air)	-343	-231		B-D50(Air)	-86	-144
A-D50(sea)	-350	-576		B-D50(sea)	-89	-287
水灰比0.4	5電位與	닁齡期	水灰比0.60電位與齡期			
的關	係(mV)			的關	係(mV)	









🥬 結論

- 水灰比在0.45時不添加爐石的河砂與海砂其抗壓強度發展非常相似,而水灰比在0.6時以河砂的抗壓強度較高。
- 水灰比在0.45時添加 50% 爐石的河砂其抗壓強度最高,而其 他配比在添加30% 爐石的河砂與海砂,其強度發展較高。
- 有添加爐石的海砂與河砂混凝土,其強度發展都比不添加爐石的佳。
- 超音波脈波速與混凝土強度發展相似,很適合應用在非破壞性 檢測。
- 添加爐石的混凝土其電阻係數都比不添加爐石的高。





- 本研究之試體為短期試驗,就耐久性方面應需繼續 監測其長期發展。
- 在適當的用水量之下,採用低水灰比與添加爐石以 提升混凝土強度。
- 鋼筋混凝土之腐蝕電位與電阻變化較大,短時間無法看出趨勢,應長期監測。
- 最好不用海砂,如不得以狀況使用海砂應只能使用 於次要結構與無筋混凝土。
- 建立使用海砂的正確觀念及方法,並研擬具體規



研究動機

- ▶ 砂石短缺將無法完全避免使用活性骨材
- ▶ 環保問題可能導致水泥含鹼量増加以及工業廢水問題
- ▶ 水泥來源的多元化使得水泥含鹼量更難掌 握控制
- ▶國內屬海島型氣候,如潮濕、高溫等
- ◆上述原因均易使混凝土結構物發生鹼質與 粒料反應之危害



鹼質與粒料反應之定義

粒料中含有的活性矽成份,被氫氧根離子 分解後,與水泥中的鹼金屬(鈉、鉀)結合, 形成吸水後具膨脹性之鹼矽膠體(alkalisilica gel)。此反應會使混凝土表面產生 地圖狀的裂縫,造成結構物強度與承重能 力降低,甚至崩毀。





混凝土構造物內部徵候

▶ 混凝土內部可能出現微細裂縫、膠體反應 產物、粒料周圍有暗色的反應圈等徵候

➤ 因為鹼矽膠體係由水泥中的鹼金屬與活性 粒料中的活性矽所形成,反應在粒料周圍 先發生然後再逐漸侵入粒料內部,故粒料 周圍有暗色的反應圈,亦是判定鹼質與粒 料反應的重點。

混凝土構造物外部徵候

□純混凝土構造物

表面會呈不規則的地圖狀裂縫,裂縫會隨時間變寬。 數條不同走向的裂痕併交會於焦點中心,在近混凝 土表面甚至會有起泡爆裂的現象,如未受磨蝕與沖 刷影響,混凝土表面有呈透明、白色或濕點狀之反 應生成物(膠體)滲出。

□鋼筋混凝土構造物

由於鋼筋的束制,其裂縫將沿著主應力方向開裂或 與鋼筋平行。 AAR 的 機 理









石梯港消波塊



石梯港消波塊



台東海濱公園消波塊





台九線鐵路橋



台九線鐵路橋橋台



台九線鐵路橋



台九線鐵路橋橋台



石梯港消波塊1



新港漁港消波塊



大武公園消波塊





非破壞性檢測結果

		中性化深度	推估強度	
		(mm)	(kg/cm²)	
	大武海濱公園	1.0~2.0	276	
	小港漁港	1.0~2.5	219	6 TVA
	一長濱漁港新消波塊	1.0~2.0	192	R
	新港漁港消波塊	1.0~3.0	262	
	石梯坪漁港消波塊	1.0~2.0	179	~~
	台東海濱公園消波塊	1.0~2.0	325	
	台9線371k 鐵路橋台	1.0~2.0	-	



- ▶花蓮台東之漁港、堤防、消波塊發生 AAR的情況相當普遍,部份橋樑亦有發生 疑慮。未來新建工程若使用東部地區粒 料,應予留意。
- ▶目前國內重大新建工程多已規範驗質與 粒料反應之檢測項目,對具有鹼質與粒 料反應潛勢之檢測方法與抑制或防治措 施,值得繼續探討。




附錄四

審查意見處理情形表

交通部運輸研究所自辦研究計畫 審查意見處理情形表

計畫名稱:港灣構造物檢測與耐久性試驗研究 執行單位:港研中心第一科

審查委員及其所提之意見	計畫承辦單位處理情形	備	註	
國立台灣海洋大學 張建智教授				
1.本研究內容豐富,具應用參 考價值。特別在犧牲陽極腐 蝕防治上,提供許多現場量 測數據及目前基隆港鋼管 樁及高雄港鋼板樁的腐蝕 資訊。	感謝支持			
2.利用海砂取代河砂拌合的 混凝土,建議於文中說明其 未來用途及研究意義。	陸上砂石來源之匱乏與耗 盡,以及海砂資源之豐富與 利用,或許可從其它方法, 諸如添加波索蘭材料、化學 摻料(鋼筋腐蝕抑制劑) 電 化學防蝕技術等,來改善海 砂混凝土之耐久性與品質。			
3.請補充說明犧牲陽極塊的 消耗速率是否與深度有關。	由目前檢測數據顯示,陽極 塊消耗速率與深度尚無明確 關係。			
國立中興大學 林炳森教授				
1.第 3-14 頁文中保護電位最 大值與表 3-7 內容不一致。	錯誤部份已完成修正			
2.第 3-20 頁文中保護電位最 大值與表 3-9 內容不一致。	錯誤部份已完成修正			
3.第 3-33 頁文中保護電位最 大值與表 3-13 內容不一致。	錯誤部份已完成修正			

4.第 3-33 頁文中保護電位最 小值與表 3-13 內容不一致。	錯誤部份已完成修正		
5.第 4-29 透水試驗只做 56 天,建議應有長期記錄。	透水試體模數量有限,故只 選擇 56 天。		
6.第 4-29 之 5.鋼筋腐蝕電位 值量測結果與 3.電阻係數 結果不一致,應說明原因; 並說明五種檢測結果之相 關性。	 耐久性試驗屬於長期 性,短期間之試驗數據變 化僅供參考無法評估未 來趨勢。 持續檢測較長齡期各試 體之各項變化。 		
	 五種檢測方法可初估混 凝土之品質與耐久性。 		
國立中山大學 李賢華教授			
1.本研究案為長期性之研究 案須投注相當的時間 人力 及物力,其成果對於港灣管 理單位有相當助益,對於進 行中之工程亦具有品質監 視之意義。	感謝李教授對本計畫之肯定 與支持。		
2.未來之研究可針對潮間帶 之防蝕更加著力,因陰極防 蝕之作用及效能已甚為清 楚,故防蝕準則之建立甚為 必要亦值得肯定。	防蝕準則本所已於本年度完 成建立。 未來之研究方向將以潮間帶 防蝕措施為主		
3.有關混凝土之劣化研究,目 前多為現象及機制之探 討,對於改善部份或研發新 材料可多家探討。	遵照辦理		