

港灣技術研究所專刊第43號

鋼筋混凝土結構物腐蝕調查研究

委託單位：行政院科技顧問組

計畫主持人：林維明

研究員兼港工材料組組長

協同主持人：饒 正

助理研究員

研究人員：陳桂清、周祖望、吳信昇、徐如娟

陳正義、何木火、李小萍

時間：民國76年1月1日至77年3月31日

目 錄

目 錄.....	I
圖之目錄.....	III
表之目錄.....	VII
致謝.....	IX
R.C. 結構物腐蝕概況.....	X
壹、前言.....林維明.....	1
一、調查研究動機	
二、調查研究目的	
三、調查研究方式及範圍	
四、預期成果	
貳、鋼筋混凝土腐蝕鹽害機構.....林維明.....	4
一、前言	
二、鋼材之腐蝕	
三、氯化物之腐蝕	
四、混凝土中氯化物腐蝕	
五、混凝土之損傷機構	
六、結論與建議	
七、參考文獻	
參、橋樑腐蝕調查.....吳信昇.....	41
一、概要	
二、研究調查	
三、調查破壞原因探討	
四、結論與建議	

肆、 港灣結構物腐蝕調查.....陳桂清.....61

- 一、 概要
- 二、 構造物概要
- 三、 調查與試驗
- 四、 結果與討論
- 五、 結論與建議
- 六、 參考文獻

伍、 建築物腐蝕調查.....周祖望.....101

- 一、 調查概要
- 二、 調查對象
- 三、 調查結果與分析
- 四、 結論
- 五、 參考文獻

陸、 防蝕對策.....饒 正.....120

- 一、 前言
- 二、 現場環境之量測
- 三、 腐蝕控制
- 四、 設計時之防蝕對策
- 五、 施工時之防蝕對策
- 六、 結論與建議
- 七、 參考文獻

柒、 結論與建議.....林維明.....130

圖之目錄

圖 2-1 鋼筋混凝土結構物發生腐蝕、耐力降低損壞經過.....	23
圖 2-2 鋼筋混凝土結構物代表性劣化現象與使用性能降低關係.....	23
圖 2-3 PH值與鋼筋腐蝕速率之關係.....	24
圖 2-4 Devanathan-Bockris-Muller之電氣二層模型.....	24
圖 2-5 食鹽溶液中鋼材之腐蝕速率.....	24
圖 2-6 孔蝕之機構.....	24
圖 2-7 鐵之電位 - PH圖(不含氯離子之情況).....	25
圖 2-8 鐵之電位 - PH圖($\text{Cl}^- = 335 \text{ ppm}$).....	25
圖 2-9 鋼鐵陽極之分極曲線.....	25
圖 2-10 含 CaCl_2 之飽和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液中鋼鐵之陽極分極曲線.....	25
圖 2-11 腐蝕速率之分極行為.....	26
圖 2-12 混凝土受氯化物作用發生腐蝕之各種要因及相互關係.....	26
圖 2-13 混凝土中鹽害臨界含鹽量各有關因素之關係.....	27
圖 2-14 混凝土中鋼材之巨大腐蝕現象.....	28
圖 2-15 氯化物與鋼筋腐蝕環境之PH值之關係.....	28
圖 2-16 在含氯化物之飽和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液中鋼鐵腐蝕發生率.....	29
圖 2-17 在含氯化物之飽和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液中鋼鐵腐蝕特性.....	29
圖 2-18 混凝土中含氯量對鋼材腐蝕影響.....	29
圖 2-19 混凝土的水灰比與透水性之關係.....	29
圖 2-20 保護層厚度與透水性之關係.....	30
圖 2-21 混凝土及水泥砂漿之厚度及水灰比對氧氣擴散速率之影響.....	30
圖 2-22 吸水量與比電阻之關係.....	30
圖 2-23 水灰比與比電阻之關係.....	30
圖 2-24 混凝土龜裂要因.....	31
圖 2-25 龜裂寬度與電位差之關係.....	32
圖 2-26 A_c/A_a 與腐蝕深度之關係.....	32

圖 2-27 C/Φ對鋼筋腐蝕之影響性.....	32
圖 2-28 相對濕度與腐蝕率關係.....	33
圖 2-29 氣溫與腐蝕率關係.....	33
圖 2-30 混凝土表面含鹽量與距離海岸遠近關係.....	33
圖 2-31 飛濺鹽份濃度與距離海岸之關係.....	33
圖 2-32 自然電位分佈範例.....	34
圖 2-33 各種環境下鋼筋之疲勞曲線.....	34
圖 2-34 橋樑鋼筋腐蝕現象範例.....	35
圖 2-35 混凝土表面銹斑與龜裂之關係.....	35
圖 2-36 海洋潑濺區之RC結構物鋼筋腐蝕過程.....	36
圖 2-37 代表性橋樑惡化現象.....	36
圖 2-38 橋樑下緣部份惡化現象.....	36
圖 3-1 鑽心試體表面描繪圖.....	45
圖 3-2 材料使用不當及施工不良，致使粗骨材沉澱底部.....	45
圖 3-3 材料使用不當及施工不良，致使粗骨材沉澱底部.....	46
圖 3-4 大埔橋全貌.....	46
圖 3-5 現場超音波探測.....	47
圖 3-6 現場腐蝕測定儀偵測.....	47
圖 3-7 大埔橋與四湖橋之示意圖.....	48
圖 4-1 基隆港碼頭平面佈置及鑽心取樣位置圖.....	73
圖 4-2 台中港碼頭平面佈置及鑽心取樣位置圖.....	74
圖 4-3 高雄港碼頭平面佈置及鑽心取樣位置圖.....	75
圖 4-4 花蓮港碼頭平面佈置及鑽心取樣位置圖.....	76
圖 4-5 蘇澳港碼頭平面佈置及鑽心取樣位置圖.....	77
圖 4-6 橋墩式碼頭構造圖.....	78
圖 4-7 混凝土方塊擁壁式碼頭構造圖.....	79
圖 4-8 基樁棧橋式碼頭斷面圖.....	80
圖 4-9 重力式碼頭斷圖.....	81

圖 4-10 沉箱消波式碼頭断面圖.....	82
圖 4-11 各港口碼頭鑽心試體之照片.....	83
圖 4-12 各港口碼頭鑽心試體之照片(續).....	84
圖 4-13 鑽心試體依深度切割之簡圖.....	84
圖 4-14 鑽心試體外觀描繪圖.....	85
圖 4-15 基隆港W.4號碼頭鑽心試體化學成份含量與深度關係.....	86
圖 4-16 基隆港W.14號碼頭鑽心試體化學成份含量與深度關係.....	86
圖 4-17 台中港3號碼頭鑽心試體化學成份含量與深度關係.....	87
圖 4-18 高雄港第四船渠碼頭鑽心試體化學成份含量與深度關係.....	87
圖 4-19 高雄港第九船渠碼頭鑽心試體化學成份含量與深度關係.....	88
圖 4-20 花蓮港3號碼頭鑽心試體化學成份含量與深度關係.....	88
圖 4-21 花蓮港舊東堤鑽心試體化學成份含量與深度關係.....	89
圖 4-22 蘇澳港2號碼頭鑽心試體化學成份含量與深度關係.....	89
圖 4-23 蘇澳港10號碼頭鑽心試體化學成份含量與深度關係.....	90
圖 4-24 基隆港W.4號碼頭鑽心試體 SEM 圖.....	91
圖 4-25 基隆港W.14號碼頭鑽心試體 SEM 圖.....	92
圖 4-26 基隆港W.14號碼頭鑽心試體 SEM 圖.....	93
圖 4-27 基隆港W.14號碼頭鑽心試體 SEM 圖.....	94
圖 5-1 高雄港 9-1號倉庫位置圖.....	107
圖 5-2 花蓮港 3號倉庫位置圖.....	107
圖 5-3 基隆港西16號倉庫位置圖.....	108
圖 5-4 高雄港 9-1號倉庫混凝土中有害物質侵入分佈.....	108
圖 5-5 花蓮港 3號倉庫混凝土中有害物質侵入分佈.....	109
圖 5-6 基隆港西16號倉庫混凝土中有害物質侵入分佈.....	109
圖 5-7 安南國中倉庫混凝土中有害物質侵入分佈.....	110
圖 5-8 高雄港 9-1號倉庫混凝土中氯離子分佈.....	110
圖 5-9 花蓮港 3號倉庫混凝土中氯離子分佈.....	111

圖 5-10 基隆港西16號倉庫混凝土中氯離子分佈.....	111
圖 5-11 高雄港 9-1號倉庫混凝土中模擬氯離子侵入與時間關係.....	112
圖 5-12 花蓮港 3號倉庫混凝土中模擬氯離子侵入與時間關係.....	112
圖 5-13 基隆港西16號倉庫混凝土中模擬氯離子侵入與時間關係.....	113
圖 5-14 中性化深度與時間關係.....	113
圖 5-15 花蓮港 3號倉庫混凝土中氯離子扣除原污染含量後之分佈.....	114

表之目錄

表 2-1 鋼筋混凝土結構物耐久性與惡化現象.....	37
表 2-2 臨海混凝土結構物鹽害影響要因.....	37
表 2-3 試體中氯離子含量與鈍態之關係.....	37
表 2-4 氯氣擴散量.....	37
表 2-5 大氣中之含鹽量與混凝土中鹽侵透量之關係.....	38
表 2-6 氣溫、濕度、風速、混凝土溫度對水分之蒸發速度之影響.....	39
表 2-7 損傷形態之分類例.....	40
表 3-1 台15線大埔橋試驗錘讀數.....	49
表 3-2 台15線大埔橋試驗錘讀數.....	50
表 3-3 台15線大埔橋試驗錘讀數.....	51
表 3-4 台15線大埔橋超音波波速.....	52
表 3-5 台15線大埔橋腐蝕電位值.....	53
表 3-6 台15線大埔橋腐蝕電位值.....	54
表 3-7 台15線大埔橋腐蝕電位值.....	55
表 3-8 苗栗四湖橋第三節東側試驗錘讀數.....	56
表 3-9 苗栗四湖橋第三節西側試驗錘讀數.....	57
表 3-10 苗栗四湖橋第三節超音波波速.....	58
表 3-11 苗栗四湖橋第三節東側腐蝕電位值.....	59
表 3-12 苗栗四湖橋第三節東側腐蝕電位值.....	60
表 4-1 各港口碼頭結構體鑽心取樣之背景資料.....	95
表 4-2 各港口碼頭鑽心試體物理性質.....	95
表 4-3 試錘數值與混凝土品質關係.....	96
表 4-4 各港口鑽心試體水泥含量及中性化深度.....	96
表 4-5 基隆W.4號碼頭鑽心試體化學成份分析.....	97
表 4-6 基隆W.14號碼頭鑽心試體化學成份分析.....	97

表 4-7 台中港3號碼頭鑽心試體化學成份分析.....	97
表 4-8 高雄港第四船渠碼頭鑽心試體化學成份分析.....	98
表 4-9 高雄港第九船渠碼頭鑽心試體化學成份分析.....	98
表 4-10 花蓮港3號碼頭鑽心試體化學成份分析.....	98
表 4-11 花蓮港舊東堤鑽心試體化學成份分析.....	99
表 4-12 蘇澳港2號碼頭鑽心試體化學成份分析.....	99
表 4-13 蘇澳港10號碼頭鑽心試體化學成份分析.....	99
表 4-14 各港口碼頭結構體鑽心試體有害形成物之 SEM 分析.....	100
表 5-1 高雄港 9-1號倉庫有害物質侵入濃度.....	115
表 5-2 花蓮港 3號倉庫有害物質侵入濃度.....	115
表 5-3 基隆港西 16號倉庫有害物質侵入濃度.....	115
表 5-4 安南國中倉庫有害物質侵入濃度.....	116
表 5-5 物性分析.....	116
表 5-6 氯離子表面濃度及有效擴散係數.....	116
表 5-7 中性化深度及碳化係數.....	116

致 謝

行政院科技顧問組為了調查國內鋼筋混凝土結構物腐蝕實例，並剖析其腐蝕原因，提醒國人對腐蝕之重視；蒐集國外鋼筋混凝土結構物之腐蝕實例及有關鋼筋混凝土腐蝕研究機構之研究成果及正進行之研究方向，俾供國內參考；及提出國內對鋼筋混凝土腐蝕研究之方向，以供決策單位之參考，因此委託本所進行「鋼筋混凝土結構物腐蝕調查研究」，並提供研究經費，特予致謝。

在蒐集國外鋼筋混凝土結構物之腐蝕實例方面，得感謝日本港灣技術研究所大即信明博士，日本沿岸開發技術研究中心中山茂雄部長，鳥取大學西林新藏教授及京都大學宮川豐章教授，丹麥Aalborg大學H.F. Burcharch教授，英國Taywood Engineering Limited總裁Dr.R.D.Browne....等國外友人提供許多寶貴之腐蝕研究成果與實例資料。在調查方面得感謝高雄港楊隊長義忠，基隆港林主任坤田，台中港呂芳甫先生，花蓮港楊永德先生及蘇澳港嚴文裕先生，協助派交通船及蒐集有關資料，公路局提供四座老舊橋樑供給本所調查研究，鐵路局派員協助勘察海線老舊橋樑及提供寶貴資料，特此致謝。

本計劃能獲得如此寶貴之結果，實應歸功於本計劃之協同主持人饒正先生之負責不懈及窮理好學之精神，以及本所港工材料組全體同仁陳桂清先生、周祖望先生、吳信昇先生、陳正義先生、何木火先生、徐如娟小姐、李小萍小姐等，冒著危險經由工作架至橋底檢查底板及大樑等腐蝕狀況，以及在海況惡劣，工作船搖晃下，鑽取混凝土試體，發揮團隊精神，克服一切困難完成本次調查工作，同時整理並分析調查數據以完成本研究報告，本人藉此致意，以表謝忱。

台灣省交通處港灣技術研究所

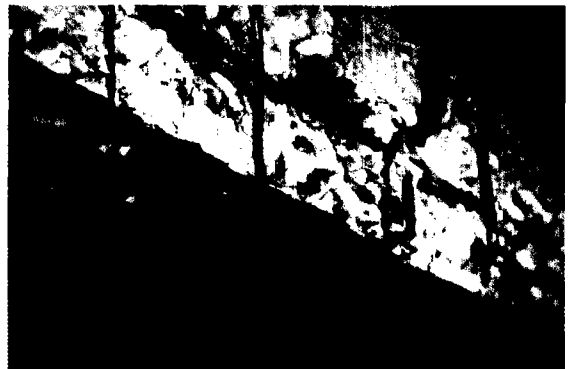
港工材料組組長 林維明

中華民國七十七年三月三十一日

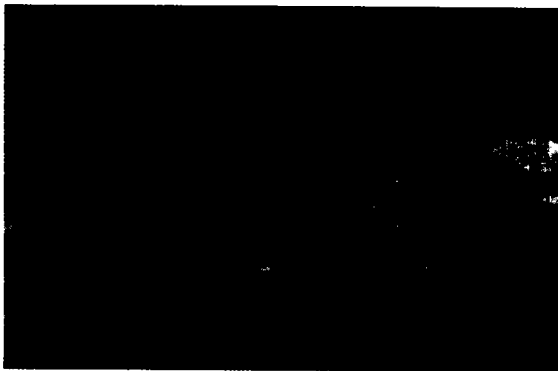
R.C. 結構物之腐蝕概況



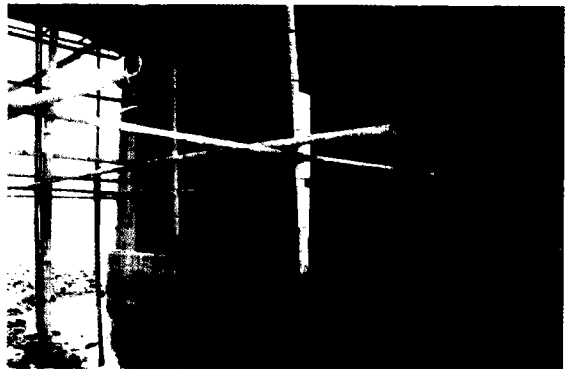
台 9線 127k+428無名橋之板樑



台15線 32k+618大埔橋大樑



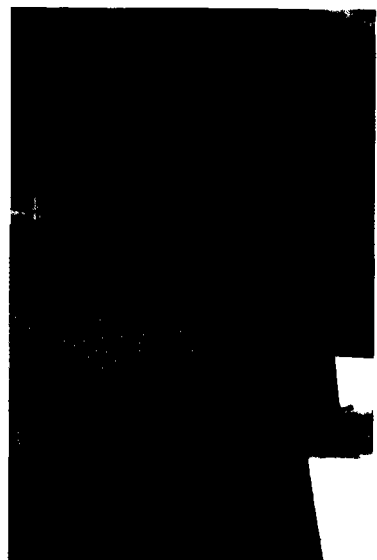
台 1線 116k+590四湖橋之大樑



台 1線 116k+590四湖橋之柱



台17線 99k+768西湖橋之大樑



台17線 99k+768四湖橋之樑柱

R.C. 結構物之腐蝕概況



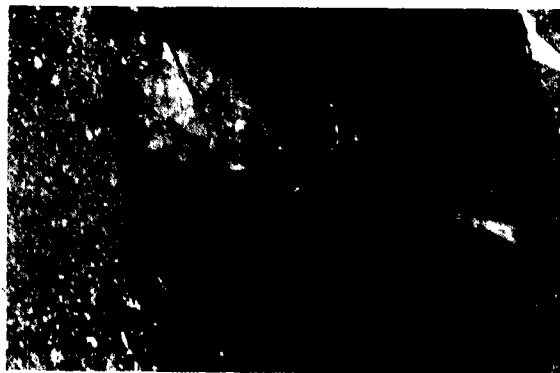
基隆港之碼頭



蘇澳港之沉箱



花蓮港之消波胸牆



花蓮港之東堤



台南安南國中騎樓之樓板



花蓮港倉庫

壹、前言

林維明*

一、調查研究動機

台灣屬海島型地區，常年高溫多濕，鋼結構及鋼筋混凝土結構物常年暴露在此環境下極易發生銹蝕。根據國外資料顯示，每年因腐蝕所造成金錢損失約為國民生產毛額之 2 % 以上，這的確是一筆龐大之數字，現可藉技術作有效地防止與控制。

一般工程材料中鋼筋混凝土的使用最為廣泛且最為耐久，但腐蝕初期不易由外觀察覺，一旦發生銹蝕，將造成結構物龜裂與剝落，甚至使結構物之使用年限降低，因而浪費大量之維修及重建費用，故分析造成鋼筋混凝土腐蝕之因素及剖析造成鋼筋混凝土變質原因，實在刻不容緩。國內鋼筋混凝土結構物腐蝕研究及調查，尚未全面展開，針對如澎湖跨海大橋僅使用十四年即報廢之例，甚為可惜，其他濱海橋樑、建築物及港灣結構物亦有腐蝕問題存在。根據民國 75 年第三屆全國科技會議之決議，將材料與防蝕工程技術之研究，列為國家之重點科技之一，並將整體規劃國內相關技術之研究能力，以達到更有效處理國內所遭遇之材料腐蝕問題。

民國 75 年 6 月「材料與腐蝕研討會」綜合討論，認為鋼筋混凝土腐蝕及防蝕在國內應加強。1986 年中美聯合防蝕研討會（Joint Chinese-American Corrosion Workshop）會議期間兩位美籍專家曾赴澎湖跨海大橋勘察，發現該橋面臨嚴重腐蝕問題企需採取因應措施，因此在會議結論中指出我國交通橋樑及主要公共措施應定期舉行腐蝕調查及安全性評估。會後行政院科技顧問組執行祕書吳伯楨先生即指示本所梁所長負責有關鋼筋混凝土結構物腐蝕調查研究工作，隨即於 76 年元月開始展開本調查工作。

* 省交通處港灣技術研究所研究員兼港工材料組組長

二、調查研究目的

本研究之主要目的為

- (一)調查國內R.C.結構物之腐蝕實例，並剖其腐蝕致因，以提昇國人對腐蝕之重視。
- (二)蒐集國外R.C.結構物之腐蝕實例及有關R.C.腐蝕之研究機構研究成果及目前正在進行之研究方向，供各界參考。
- (三)提出建議國內對R.C.結構物之腐蝕調查分析研究之方向與做法供政府決策單位之參考。
- (四)建立鋼筋混凝土結構物正確防蝕設計施工及維修觀念，以確保公共安全。

三、調查研究方式及範圍

(一)現場調查與試驗室分析項目

1.現場調查項目

- 結構物腐蝕損壞狀況位置記錄
- 試錘與超音波測定混凝土強度
- 保護層厚度測定
- 腐蝕電位分佈量測
- 混凝土結構體鑽心取樣

2.混凝土鑽心試體分析工作

- 鑽心試體外觀描繪與研判
- 試體比重、孔隙與抗壓強度
- 試體之化性分析，了解含 SO_3^{2-} ， MgO ，.....等之成份
- 水泥含量與粗細骨材比率
- 氯離子侵入及碳化深度擴散分佈
- XRD與SEM微觀混凝土病變

(二)調查範圍

1.港灣結構物

高雄、花蓮、蘇澳、基隆及台中等五大港口。

2. 公路橋樑

澎湖跨海大橋腐蝕調查(另案處理)，桃園大埔橋、苗栗四湖橋、台西西湖橋。

3. 鐵路橋樑

下後龍溪橋及下三叉河橋。

4. 建築物

台南安南國中，基隆港及花蓮港倉庫。

四、預期成果

- (一)充份了解鋼筋混凝土腐蝕惡化現象之機理，可作為新建工程時設計工程師及施工人員應注意考慮與防範事項、及使用者之維修參考，以提高施工技術及工程品質，減少因腐蝕所造成之損失，為國家節省公帑與能源。
- (二)增進對鋼筋混凝土等營建材料耐久性之認知，俾提供國內各單位作更進一步相關研究之基礎與方向。
- (三)所使用之調查方法及研究方法，可作為爾後鋼筋混凝土偵測之參考，以求事先加以防範，以減少修護或重建之浪費。
- (四)提供修補及防蝕對策，以延續鋼筋混凝土結構物之服務效能。

貳、鋼筋混凝土腐蝕鹽害機構

林維明*

一、前言

鋼筋混凝土或預力混凝土中之鋼材為何會發生腐蝕現象，若能知悉其腐蝕機理，則可提高其耐久性而且對防蝕工作亦可提出有效之對策。

混凝土中有孔隙存在，而水泥水和作用產生氫氧化鈣及氯化鈉，氯化鉀等鹼性物質，所以酸鹼度大都維持在12.5左右。鋼材在此種強鹼性之環境下，其表面呈不動態膜，即20-60 Å膜厚之氧化鐵(γ -Fe₂O₃ · nH₂O)之薄膜，因此呈現不動態而受保護，如果設計、施工及使用材料正確之優良品質混凝土結構、其中之鋼材應不至於發生腐蝕，然而由於施工中拌合有害成份或外界腐蝕因子，如氯離子(Cl⁻)、硫酸根離子(SO₄²⁻)、硫化物(S²⁻)、二氧化碳(CO₂)等侵入，因此使混凝土鹼性降低，破壞鋼材之不動態而使鋼材變為活性態而易發生腐蝕，而這些有害物中以氯離子之作用最為厲害。氯離子侵至鋼材附著於不動態膜，慢慢地作用使鋼材發生孔蝕現象，引起鋼材由局部腐蝕破壞混凝土引起龜裂，使氯離子更易侵入，引起腐蝕範圍之擴大。有些結構物可能使用3-5年後就發生很明顯的腐蝕現象，如圖一所示腐蝕因子侵入保護層到達鋼筋處為第一階段，然後鋼筋開始腐蝕到成混凝土龜裂為第二階段，腐蝕持續進行耐久力降低，超過應力極限造成結構物崩壞為第三階段。而影響R.C.或P.C.結構物之腐蝕因素，惡化現象及造成使用功能降低之現象，如表一所示。由於混凝土配合比不當、養生、夯實不良，使用海砂或海水拌合，或結構物受乾濕凍融反覆作用，CO₂、Cl⁻、SO₄²⁻等腐蝕因子侵入，受海氣象如波浪、風、氣溫、相對濕度等影響，因而使混凝土惡化，鋼筋腐蝕龜裂，不但影響美觀，而且造成剛性降低，強度不足，有使用之安全顧慮，其相關性如圖二所示。

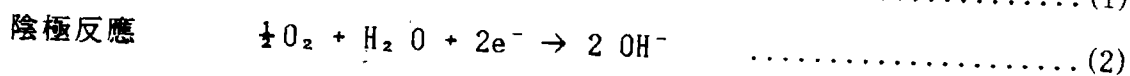
* 省交通處港灣技術研究所研究員兼港工材料組組長

而在臨海地區之鋼筋混凝土或預力混凝土，例如港灣結構或混凝土公路橋樑、鐵道橋、建築物等承受鹽害較為嚴重，其主要影響因素如表二所示，本章將主要檢討有關鹽害之腐蝕機理。

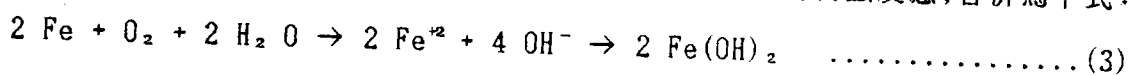
二、鋼材之腐蝕

金屬元素大多以礦石等自然狀態存在於自然界中，然而當其受冶煉成為金屬狀態時，僅為暫時性狀態存在，將會很自然地經由腐蝕回歸於自然狀態之現象，從礦石中冶煉為金屬所需之能量依提煉不同金屬種類而異，例如鎂鋁鐵所需之能量較金銀銅鐵為高。此種循環現象若以鐵為例，赤鐵礦 (Fe_2O_3) 為最常見之鐵礦石，此為鐵之氧化物。而鐵經腐蝕後之鐵銹，生成物亦為 Fe_2O_3 ，自鐵礦冶煉成鐵所需之能量與鐵腐蝕後之鐵銹，具有與鐵礦之化學成份相同之情況所放出之能量，兩者相等僅能量變化速率快慢不同而已。

因此各種金屬存在為不穩定狀態，金屬發生腐蝕之現象乃順乎自然之趨勢，僅是程度不同而已，鋼材腐蝕有水份參與反應者稱為濕蝕，反之則稱為乾蝕，混凝土中鋼材之腐蝕為濕蝕，其為電化學反應之反應式如下：



陽極反應係將兩個電子留在母材處，而鐵金屬變為鐵離子析出之氧化反應現象，在陰極由於有氧氣之存在，在潮濕之電解溶液下吸收陽極之游離電子，因此發生氧氣還原為氫氧根離子之反應，此兩種反應同時進行稱為腐蝕反應，合併為下式：



此即為氫氧根離子與鐵離子結合形成之氫氧化亞鐵，在鋼材表面沉澱，進而氧化逐次變為氫氧化鐵 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ，再失去水份變為 $\text{FeO}(\text{OH})$ (紅銹)，另一部份氧化不完全而變為黑銹 (Fe_3O_4)。由陰極及陽極反應知腐蝕反應中有離子與電子參與，因故被稱為電化學反應，同時腐蝕量亦可以電氣量表示，例如腐蝕速率 1 mm/年之情況下，腐蝕電流密度約為 $100\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。腐蝕現象可以電氣迴路用模型表示之。鋼材所接觸之水溶液之PH值影響其腐蝕速率很大，如圖 3所示[1]，PH值大於 10 以上者腐蝕速率很小，而未中性化健全混凝土之PH值可維持在12以上，因此若混

凝土未含有鹽份等腐蝕物質時，則在其中之鋼材可視為幾乎不會被腐蝕。

三、氯化物之腐蝕

本來易發生腐蝕之金屬失去其活性，變為如黃金般難於發生腐蝕狀態之現象稱為鈍態。但有關發生鈍態之機理，目前尚未有被公認之理論。但可概述如下：

鈍態為氧氣在鋼材表面上，化學吸著後所產生緻密之氧化物層，使之形成 $3nm$ ($1nm = 10^{-9} m$) 厚度之鈍態膜為其特徵，在混凝土中，由於沉澱物層變為相當厚。但在產生鈍態之環境中(例如混凝土)，如果含有相當濃度之氯離子，則將破壞鈍態膜，有關氯離子對腐蝕之影響性，目前有三套理論，即氧化膜理論 (The Oxide Film Theory)，吸附理論 (The Absorption Theory) 及短暫合成理論 (The Transitory Complex Theory) 等。例如被認為化學吸著中之氧氣原子或水份子中之 Cl^- 侵入產生如圖4所示之特異吸著[2]，在此部份之被覆膜則將被破壞而導致鋼材產生溶解。雖然也有許多學者提出說明該理論。因此鋼材在鹽化物溶液中產生活性溶解發生腐蝕之概率將提高。圖5說明在食鹽溶液中鋼材之腐蝕速率[3]，由圖中可見海水中含鹽量為 3% 時，腐蝕速率為最高，濃度在 3% 以下時，腐蝕速率隨食鹽濃度增高而遞增，然而大於 3% 則反之。原因為 Cl^- 增多，則在水溶液中能參與陰極反應所需之溶氧量降低所致，由於 Cl^- 未直接參與電化學腐蝕反應，故氧化所需之氧氣量減少，自然腐蝕速率受減。而氯離子含量在 3% 以下，腐蝕速率增大之原因有二：

(一) 由於 Cl^- 濃度變化對腐蝕初期 $Fe(OH)_2$ 之生成情形及覆蓋於表面之狀態將有差異。

(二) Cl^- 具有將初期被覆發生局部再溶解之作用。吾人可概略作以下之了解即：

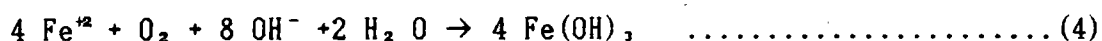
Cl^- 在海水濃度之程度時，具有促進腐蝕反應之觸媒作用及減少水溶液之電氣阻抗，促進化學反應之速率。

一般而言，混凝土含有鹽份，則其中之鋼材之腐蝕速率將加快。另一現象為將產生孔蝕，對孔蝕尚未有被公認之定義。一般會產生蝕孔，其形狀略近圓形。

孔蝕會產生如圖 6 所示之反應機構 [4]。在蝕孔之底端會產生使鋼材溶解之陽

極反應，而陰極反應則如式 (2)所示之氧氣還原反應。此反應將在比較健全之鋼材表面鈍態被膜上發生。

由於陽極反應產生之鐵離子一部份向蝕孔之外界擴散，而被溶存氧氣氧化後變成溶解度極低之 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ，沉澱於蝕孔之進口處而妨礙其他 Fe^{+2} 離子向外界之擴散，因此鐵離子就氧化為氫氧化鐵如下式：



因此蝕孔內之陽離子與陰離子保持平衡，水溶液中之 Cl^- 侵入蝕孔內， Cl^- 數量逐次增多，而 Fe^{+2} 與水發生分解作用使得水溶液之PH值降低，故孔蝕作用將愈趨發展。

鈍態膜被破壞後是否會進展至孔蝕係受環境條件之影響甚大，如果溶存氧氣或 OH^- 等能助長鈍態生成之成份多時，被破壞之膜容易修復之可能性很高，但如果破膜之成份有 Cl^- 存在時，鈍態膜難於再生，因此 Cl^- 量超過極限值時，才會產生孔蝕，並且有潛伏期間。

鋼材之腐蝕狀況可用圖 7及圖 8之電位—PH值關係圖表示[5]，圖7為不含 Cl^- 之溶液情況，具有廣闊之不動態領域。而在含 0.01mol (355ppm) Cl^- 之水溶液中，在PH值 < 6 之情況，並無鈍態存在，而當PH值 > 6 時，則會有孔蝕及不完全鈍態之領域出現， Cl^- 量超過 0.01mol 時，則孔蝕領域會向右下方擴大，因此可根據電位—PH圖判斷是否會發生腐蝕及其傾向，由混凝土中測定之PH值亦可用來判定是否有發生腐蝕之傾向，發生孔蝕後，蝕孔周圍之電位會降落，上述電位與PH關係圖僅能對於腐蝕傾向作判斷，而無法表示腐蝕速率，欲瞭解腐蝕速率，僅能以鋼材電位與電流密度之關係曲線即分極曲線加以判斷。如圖 9 為鋼鐵之陽極之分極曲線，於鹼性溶液中，鋼材陽極自卑電位逐次向貴電位變化所求得之陽極分極曲線圖，如圖9中之ABCDE曲線形狀，在AB之電位區域，鋼鐵呈活性態，隨電位上昇，其溶解速率將增大，電流量超過 I_c 即減少其溶解速率，電流量在極小值 I_p 時，則幾乎不會溶解，在CD電位區域，鋼鐵呈現不動態，無 Cl^- 存在時，在DE域會存有氧氣之產生。但含 Cl^- 而產生孔蝕時，

有孔蝕電位 E_c ，電流增大而產生孔蝕。在混凝土中之鋼材開始為鈍態化而自然電位為F點時，如圖9中不出現虛線部份，則分極曲線如圖中FDE實線部份，混凝土若有 Cl^- 存在於 E_c 電位，其電流會增大，而產生孔蝕，開始發生孔蝕之電位稱為臨界孔蝕電位，所以鋼鐵發生孔蝕之自然電位為在孔蝕電位時，孔蝕處之凹處變為陽極，而外部不動態膜為陰極，產生局部電池，同時在孔蝕坑處，因為陽極反應進行，氯離子濃度增高，腐蝕生成物 $FeCl_2$ 的加水分解而使溶液中之PH值降低，因此促進鋼材之溶解，將孔蝕之電位 E' 移向卑電位如圖9中之 E_p 電位時，孔蝕即停止，因此鋼材呈鈍態化，所以自然電位在領域Ⅰ範圍內不會發生孔蝕，而在領域Ⅱ範圍內，雖不會發生孔蝕，但尚有腐蝕之發展，在領域Ⅲ則會產生孔蝕並且繼續成長，亦即鋼材之電位若使用陰極防蝕法將其變為比 E_p 更卑之電位即領域Ⅰ，則不會發生孔蝕現象，若電位再降低至更卑之電位如AB區域，則鈍態被破壞，鋼材呈現活性溶解，如變為比A更卑之電位，則可防止鋼材之腐蝕，A點為陰極防蝕下之防蝕電位。圖10為在含有 $CaCl_2$ 的飽和 $Ca(OH)_2$ 溶液中之鋼材陽極分極曲線。

有關腐蝕速率可用圖11所示之陽極反應與陰極反應兩分極曲線加以說明，如上述腐蝕反應包括陽極及陰極反應，由陽極反應所放出之電子被陰極反應所吸收，若兩反應之速率不同則無法達到平衡，在陽極反應分極曲線與陰極反應分極曲線之交叉點處，此兩反應之電流一致，故可滿足條件，故此交點之電位為自然電位，電流即可表示腐蝕速率，如圖11為理想化之陽極反應與陰極反應之分極曲線，在此例中不管有無 Cl^- 或溶存氧氣存在，陰極與陽極分極曲線在鈍態交叉之電流量非常小(I_p 值)，但含 Cl^- 且溶氧量少情況比較前者電流量較大，兩者均顯示有較鈍態電流為大之電流故 Cl^- 含量與溶氧量對於鋼材之腐蝕影響性均非常大。

四、混凝土中氯化物腐蝕

上述鋼材在含氯化物溶液中可能發生腐蝕之傾向可由電位—PH值判斷，而腐蝕速率可根據分極曲線解說，而在混凝土中之情形如何，則可由圖8及圖11了解，因

鹽害造成之腐蝕問題，其主因應由孔蝕所致。

例如歐洲混凝土委員會(The Comit'e Euro-International du B'eton CEB)對於混凝土耐久性之研究得出，混凝土受氯化物作用發生腐蝕之各種要因及其相互關係，如圖12所示[6]，圖中 Cl^- 含量超過臨界值，將促成陽極分解經由鋼鐵之通路傳送電子，因此產生電化學反應，鋼筋表面有電位差因而造成孔蝕現象，混凝土導電度傳送氫氧根離子(OH^-)，而且在電解質溶液中之含氧量亦將促使鐵氧化生銹，這些都是先決條件，其重要性如前述，而影響這些條件有主因及次因，以及應採取之防蝕設計方法及降低腐蝕速率應採取之措施，圖12雖不很完整，但可讓人簡易地了解如何造成混凝土中鋼材受氯化物作用發生腐蝕之概要。圖13為影響混凝土鹽害臨界含鹽量之各種要因關係[6]。

由圖12及圖13顯示 Cl^- 量，混凝土之緻密度，保護層厚度龜裂及環境條件等均為影響混凝土中鋼材腐蝕之重要因素，混凝土結構物之均勻度為相當重要之因素，造成混凝土發生嚴重之氯化物腐蝕多為因巨電池(Macrocell)所引起，Macrocell腐蝕為在陽極與陰極反應偏離處產生，且比較微電池(Microcell)之腐蝕速率為大，混凝土中鋼材巨電池腐蝕情形如圖14所示[7]，Macrocell之之情形大致如下：

- (一)陽極部份鋼材周界為有透水性混凝土，高 Cl^- 濃度，PH值低，因此形成自然電位為卑電位。
- (二)陰極部份鋼材周界為不透水性混凝土，含氯離子濃度低，因此混凝土之PH值高，因此形成鋼材自然電位為貴電位。

造成陽極部份之混凝土透水性高可能由於使用水灰比高或產生龜裂，品質低劣或惡劣環境等情形所致。

引起鋼筋混凝土中氯化物腐蝕之主要因素及其作用可概述如下：

1. 氯離子含量

如上述PH值對腐蝕速率有很大之影響性，根據此觀點Erlin等[8]曾提出混凝土PH值若能維持較高值，造成鹽害之臨界值亦將相對地提高，若滲透侵入少量之氯離子對於鋼筋將不會造成很嚴重之腐蝕影響性，如圖15所示，然而

Erlin 等之研究結果為根據水溶液之實驗數據，因此不一定能做為混凝土中 Cl^- 容許量之參考根據。

另外在鹼性環境下鋼材之鈍態膜是否受破壞決定於 $\text{Cl}^- / \text{OH}^-$ 之濃度比，Hausmann [9] 於含氯化物之飽和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液中對於鋼材之實驗結果發現 $\text{Cl}^- / \text{OH}^- < 0.6$ ，則氯化物不會使鋼材發生腐蝕，又 Gouda [10] 調查飽和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液中混凝土中鋼鐵發現在不含 Cl^- 之鹼性溶液中之 $\text{PH} > 11.5$ 情況可得安定鈍態，又 Cl^- 存在下，則 PH 值之臨限值將隨 Cl^- 濃度增加而遞增其關係為半對數曲線如圖15所示，關係式為

$$\text{PH} = 0.83 \log \text{Cl}^- + k \text{ (常數)}$$

在混凝土中含氯化物在容許值以下才不會使鋼材發生腐蝕，Hausmann曾研究得出結果如圖16及圖17所示，氯化物濃度在 0.02 mol/l 以下鋼材為鈍態，否則就發生孔蝕，因 Cl^- 濃度增加，孔蝕電位為卑電位，所以鋼材不發生腐蝕，氯化物之容許濃度為 0.02 mol/l (700 ppm)，有關氯化物容許值，學者尚未有一致之認定值。然而目前各國均分別訂有規定值於各種規範內。一般而言如圖13所示 Cl^- (其含量佔水泥重量之 0.4% 以下) 侵入擴散於混凝土內部與 Monosulphate ($\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaSO}_4 \cdot n \text{ H}_2\text{O}$) 起化學反應變成與鹽害無關之 Friedell 鹽 ($\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaCl} \cdot n \text{ H}_2\text{O}$) 被固定在混凝土內 [11]。因此以水泥重量百分比規定 Cl^- 臨界含量之例不少，但在製作混凝土時，如水泥用量增加，臨界 Cl^- 量亦可隨之增加，同時亦有以混凝土百分比規定 Cl^- 含量者 [12]，例如在海洋環境下，由海水侵入混凝土結構物之 Cl^- 量非常大，且 Friedell 鹽之狀態並非經常為穩定，因此需規定水泥砂漿或混凝土中之實際水泥用量之 0.4% 為 Cl^- 容許值。

例如大即信明博士 [13] 等使用陽極曲線研究水泥砂漿中，鋼材是否有鈍態領域獲得如表三之結果，根據該結果， Cl^- 含量愈多，呈現鈍態有愈少之傾向，氯化物為水泥砂漿重量之 0.15% 以下情況，有 80% 之試體呈現鈍態，而超過 0.15% ，則僅有 50% 以下之試體為鈍態，一般混凝土中之水泥砂漿量為 1500 kg/m^3 ，則當氯化物含量為 0.05% 及 0.15% 時，即混凝土中含氯量為 0.75 kg/m^3

及 $2.25\text{kg}/\text{m}^3$ 。

宮川豐章博士等曾將黑皮異形鋼筋埋設於水灰比0.50之混凝土中，並靜置於恆溫(20°C)、恆濕(相對濕度 90%)之環境下達 3年得出含鹽量與鋼材腐蝕面積率之關係如圖18所示[14]，腐蝕實驗結果偏差非常大，在圖18中龜裂寬度($0\sim 6\times 10^{-2}\text{mm}$)太小，故不考慮其影響性， Cl^- 量大於 $2.5\text{kg}/\text{m}^3$ 時，則生銹面積顯著地增大，考慮保持鈍態之 Cl^- 容許界限量為在 $1.2\sim 2.5\text{kg}/\text{m}^3$ ，此數值與大即博士之數值相當接近，若以水泥重量百分率表示，則為0.3%及0.6%，而與上述friedell鹽狀態固定之 Cl^- 量為水泥重之0.4%範圍相近。但大即及宮川兩位博士之實驗結果係在實驗室非常小心注意且正確地製作之試體所作之實驗，在現場施工時，結果不一定與該結果相符，例如在冬季時由於橋面版撒佈融雪劑(含氯化物)滲透至鋼筋，使之發生腐蝕，腐蝕所需之氧氣供應充足，故在嚴酷之腐蝕環境下，混凝土中由於 Cl^- 產生腐蝕之界限值可定為 $0.89\text{kg}/\text{m}^3$ [15]，而產生嚴重腐蝕之數值為 $1.19\text{kg}/\text{m}^3$ [16]，上述數值係在惡劣之環境下實驗結果，較之大即及宮川等之實驗值為低，因此 Cl^- 量之界限值為：在材料中容許含 Cl^- 量約為 $0.6\text{kg}/\text{m}^3$ ，而由環境侵入之容許 Cl^- 量以 $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ 為控制目標為宜。

2. 混凝土之緻密性

一般認為鋼筋混凝土或預力混凝土之防蝕之基本對策為製緻密性的混凝土，混凝土之緻密度對鹽害之相關性如何？具有何種意義？茲說明如下：

混凝土防蝕上重要之任務有二，其一為應製成PH值高之混凝土，使鋼材表面有堅固之鈍態膜，另一為控制水份、鹽份、氧氣等之侵入，並且能抵抗由於鋼材腐蝕生成物之膨脹壓力，混凝土中性化之主因為空氣中之二氧化碳侵入而引起，因此如果能製成緻密度高之混凝土則可抑制二氧化碳之侵入。緻密度高之混凝土具有上述之多種功能，故佔在混凝土結構物之防蝕功能上可謂一非常重要之因素。

為製造密實性高之混凝土，一般用之方法為適度地提高混凝土之單位水泥用量並降低水灰比，圖19為混凝土之水灰比與透水係數之關係[17]，如圖示水

灰比由0.6 降為0.5，則透水係數降低2.5倍，故降低水灰比則防蝕性將增強，同時透水性亦受保護層厚度影響如圖20所示，在海洋結構物情況，腐蝕最嚴重地方並非在海中而在飛沫帶，受到水壓作用下，混凝土孔隙之毛細管作用吸水，滲透侵入混凝土中，根據木內先生[18]等所作吸水試驗結果，吸水量及吸水高度均隨水灰比增高而遞增，在水灰比大之情況，受乾濕反覆作用下，相當多量之水及氧氣將滲透侵至鋼筋處。

鋼材在水中發生腐蝕需有水中之溶存氧氣，在腐蝕反應中氧氣為不可缺之因素，促進陰極反應及鋼鐵之腐蝕速率，若混凝土中 Cl^- 含量不多，鈍態膜不易被破壞之環境下，氧氣充足則可形成氧化膜對防蝕反而有利，而若氯化物破壞鈍態膜，若鋼材處無氧氣供應，則亦不會發生腐蝕，在海水中溶氧量少，而且混凝土孔隙充滿水，因此氧氣擴散速率緩慢，因此在海水中之混凝土結構物腐蝕情況不會太大，相反的在飛沫帶，氧氣供應充分，再加上乾濕反覆作用引起鹽份濃縮，因此促進陰極反應而造成嚴重之腐蝕，這種腐蝕可使用透水性低密度良好之混凝土加以抑制。圖21所示為混凝土及砂漿之氧氣擴散速率[19]，可見水灰比愈小，保護層愈厚，則氧氣之擴散量將減少，宮川博士曾作過實驗，使用混凝土保護層表面已乾燥，然而其內部鋼材附近尚在未乾燥狀態之試體，測定氧氣擴散到達量如表四所示[18]。由表中可見水灰比及保護層厚度變化對於氧氣擴散之抑制效果並不顯著，然而若將混凝土置於相對濕度 80%之環境下，則氧氣擴散之到達量可增大40倍，因此可獲知混凝土配比及保護層厚度對於鋼材腐蝕雖為很重要之因素，但環境因素之影響性更為重要，保護層不但具有抵抗氧氣擴散之功能，而且對於鋼材表面之鈍態膜之抑制效果更大，將來必須對於各種環境下鈍態膜之行為作詳細之研究。水份及鹽分之滲透可使混凝土保護層之電氣阻抗降低且使腐蝕電流容易流通，因而更促進腐蝕作用，木內先生[18]曾使用自來水作各種乾濕反覆條件下測定混凝土之電氣阻抗，結果如圖22所示，圖中可見高分子水泥混凝土(Polymer Cement Concrete, PCC)之比電阻抗為最大。以普通混凝土而言，水灰比愈大，則比電阻抗值就愈小，尤其是 $w/c=0.32$ 為高比電阻抗，即使經常在水中亦較 $w/c=0.6$ 及 0.4 之乾燥混凝土之阻抗值為大，故水灰比低之

混凝土，其防蝕效果較佳。岡田教授等[20]曾以人工海水飽和之混凝土予以乾燥量測其比電阻變化如圖23所示，圖中可見水灰比 $w/c=0.6$ & 0.7 在開始乾燥到3週，乾燥期間之比電阻與水灰比無關為一定值，而其他範圍則 w/c 愈小，比電阻抗就愈大。此結果與圖22之結果相符，因此在一般環境下， w/c 愈小，則比電阻抗就會愈大，因此腐蝕電流就愈難流通，故對抑制腐蝕之效果愈佳。

混凝土之密實性在結構體內相當不均一性，此種現象會在鋼材表面產生電位差形成腐蝕電池，由於這種腐蝕電位差大故通常稱為巨大電池作用（Macro-cell），例如水灰比高，單位用水量愈多之高坍度混凝土，則結構物之不均一性就愈為顯著，混凝土上層之水灰比大而下層較小，相差可達13%[21]。

3. 龜裂與保護層厚度

引起混凝土龜裂之要因如圖24所示，龜裂成為水份及氯離子容易侵至鋼材之通道，同時使混凝土變為不均質，亦為導致巨大電池腐蝕之主因。

檢討龜裂可能引起腐蝕之情況，需考慮兩點：一為是否會發生腐蝕，另一為腐蝕速率，赤塚先生等[22]曾將已發生龜裂之混凝土樑置於海中一年後觀測，發現鋼筋腐蝕面積達50%，做為容許限度時，其龜裂寬度為0.1mm，這是屬於是否會發生腐蝕之問題，而非腐蝕速率之問題。

岡田教授等等[20]曾將保護層厚度20mm之兩個試體，使其發生龜裂後撤人工海水，試驗結果如圖25所示，由圖25(a)中可見龜裂寬度不同使得鋼材之腐蝕電位亦高低不均，圖示有龜裂情況之電位差較未龜裂情況為大，因此可以斷定腐蝕與龜裂寬度有關，根據上述結果獲知，站在是否會發生腐蝕之觀點而言，龜裂寬度容許值為0.1~0.2mm，但水灰比愈大則電位與龜裂寬度之相關性就愈小，當水灰比達0.7情況如圖25(b)所示看不出其相關性，因若水灰比大，則雖沒有發生龜裂之處，然而因保護層之混凝土其密實性差，所以水份及鹽份容易滲透進入，除龜裂處外，混凝土結構體各處易發生腐蝕，因此所謂容許龜裂寬度僅限於水灰比低於某種程度才具有意義，在海洋環境下，如果水灰比大，則不管使用任何措施控，均失去意義，由此觀點，緻密性混凝土結構物龜裂寬度控制界限之水灰比約0.6。

接著討論腐蝕混凝土中鋼材之腐蝕速率一般而言依氧氣擴散到達鋼材表面之速率而定。氧氣為陰極反應上不可缺之要因，若在無龜裂處產生陰極反應，則可以說龜裂寬度與腐蝕速率並無直接關係。陽極與陰極間之混凝土間之混凝土阻抗大時，產生腐蝕之起始電力大部份由陰極與陽極之電氣抵抗所引起之電位差所耗盡，雖對腐蝕速率會有影響，但還是與龜裂寬度沒有直接關係。氧氣擴散，混凝土保護層之電氣阻抗，混凝土之緻密性及環境條件等均為影響腐蝕速率之主要因素，因此在圖12中採取防蝕法或降低腐蝕速率中對於降低龜裂寬度這一項曾提出問號「？」。

當然龜裂寬度大時，龜裂之長度與寬度會成長，再加上龜裂使混凝土與鋼材之接觸面產生空隙，會產生間隙腐蝕，因而腐蝕面積增大，如果沿著鋼材方向發生龜裂，則腐蝕面積將增大，這些現象為使腐蝕面積增大之影響性，然而對龜裂部份之腐蝕速率增大似乎沒有什麼關係。

如果混凝土中之腐蝕速率受氧氣擴散之影響，對會發生腐蝕之龜裂部份面積較小，而不會發生腐蝕之面積，也就是說陰極面積大則對陽極部份之氧氣量亦按比例增大，腐蝕速率可能也會增大，以龜裂處為陽極，其他未龜裂處為陰極，試驗結果如圖26所示[23]，圖中說明陰極與陽極之面積比對腐蝕深度之影響性，並且顯示若比值大時，則腐蝕深度亦會相對地增大，表示龜裂部份與非龜裂部份之比例對腐蝕速率有很大之影響性，而且限於龜裂部份之 $A_c/A_a=0$ 時比非龜裂部份形成巨大電池時之腐蝕速率大了很多。

如前述，容許龜裂寬度與保護層厚度之關係相當大，在混凝土保護層表面假如龜裂寬度相同，如果保護層厚，則鋼材表面露出之面積較小，而且腐蝕生成物易沉積於此或有些未水和之水泥在此處進行水和，因此具有自癒功效之機率性增高。

保護層愈大則對於防止水分、鹽份、氧氣等滲透之能力就愈大，因此可提高防蝕能力，但如果使用直徑大之鋼材時，由於混凝土之乾縮，拘束增大，其內部易產生微裂，而且由於與混凝土之界面之擴大，故易受泌水之影響，且孔蝕之發生機率增大，致防蝕功能降低，因此雖須配合環境條件規定適當的保護層厚度，但鋼材之直徑亦需一併考慮。根據Attimtay之研究報告[24]指

出保護層厚度與鋼材直徑之比例定為 2.5 - 3.0 以上時，對防蝕功能上相當有效(圖27)，而小林等[25]則主張比例應定大於4。

4. 環境條件

環境條件包括溫濕度、乾濕程度、海浪潑濺接觸程度或海風吹送海鹽之飛沫量等，每一項均為重要之因素。然而根據這方面之研究資料，較之上述混凝土結構物腐蝕要因如 Cl^- 量、氧氣、電氣阻抗、混凝土品質等之研究資料為少，如果對象結構物很明確，則可依實績作設計。

圖28及29說明腐蝕率隨相對濕度及氣溫變化之範例[26]，而受鹽害之範圍，根據岸谷等在日本調查結果，混凝土表面含鹽量與離海岸距離之關係如圖30所示[27]，而飛濺之鹽份濃度與離岸距離關係如圖31所示[28]，大致距海岸200公尺內結構體表面含鹽份較多，在1公里以內尚受鹽份之影響而風大之地區則其影響範圍可達數公里，但在10公里以外地區，除非特殊情況，否則鹽害之影響性甚少，據 堅野氏實地測量結果如表五所示 [29]，臨海地區一般而言，風速大，氣溫變化大，則將影響混凝土中水份之蒸發速度，根據 W. Lerch 之實驗結果有關風速、濕度、氣溫、混凝土溫度等，對水份之蒸發速度之影響性如表六所示[30]。

有關環境作用之資料收集不能完整有二個理由，因為現實之環境因素本身已經很複雜，再加上各種因素錯綜在一起，欲將其代表性之因素過濾出來使之單純化之工作相當困難。嚴格來講，全國各地均具有各不相同之環境條件，而另一理由為環境作用，在試驗室模擬現場復現相當困難，不過目前尚在作各種測試工作[31,32]。

一般而言在飛沫帶，波浪容易潑濺之處，而且受到乾濕反覆作用，鹽份在混凝土中濃淡不同，以及充份之氧氣供給之關係，因此腐蝕作用最為嚴重，由於季節風自海向陸地吹送，將海水飛沫或海鹽粒子帶上陸地，因此濱海地區之橋樑及建築物受鹽害，澎湖跨海大橋就是一個明顯之範例。

5. 巨大電池腐蝕(Macrocell Corrosion)

混凝土內部及外界環境不均一性，因此R.C.中產生裂縫，空隙中空氣含量不同，含水量不同，密度有差異或與鋼筋接觸面產生空隙，而鋼筋之材質不均

勻，鋼材有凹痕，鋼材表面氧化鐵鱗片層通稱為黑皮(Fe_2O_3 , Mill Scale)被破壞或冶金時晶界有間隙破壞等現象都容易在鋼材表面上產生電位差，形成腐蝕電池，這種電池作用，其電位差大，故通常稱為巨大電池作用，有下列各種情況之作用

(1)不同金屬之接觸作用(Bimetallic Corrosion)

混凝土結構物中有兩種以上金屬接觸時，會構成局部電池作用，卑電位之金屬為陽極，而腐蝕濕潤環境下或有氯化物存在時，特別應避免有這種現象發生。

(2)活性鈍態電池作用(Active-Passive Corrosion)

在龜裂處鋼材暴露，因此與受混凝土保護之鋼材形成活性鈍態電池作用，這種電池作用可產生數百 mV之電位差，裸鋼部份/保護部份之面積比小時，裸鋼之腐蝕性更為顯著。

(3)濃淡電池作用(Differential Concentration Cell)

混凝土中氧氣濃度、氯化物濃度或鹼性濃度不同，則在濃度低處之鋼材為陽極，而濃度高處為陰極，因此形成濃淡電池，陽極部份之鋼材容易發生腐蝕。

(4)迷失電流作用(Stray Current Corrosion)

電車或電氣化鐵路所使用之直流電設備之電力，可能有迷失電流流入混凝土結構物中之鋼材，此種情況容易產生激烈的腐蝕通常也稱為電蝕。

在混凝土中產生嚴重腐蝕時，腐蝕作用係以 Macrocell狀態(即全面腐蝕)如圖27所示，陽極與陰極面積比為 0時稱為 Microcell(局部電池即孔蝕)狀態，顯然的由於Macrocell所產生之腐蝕速率較Microcell之腐蝕之速率大得很多。

從自然電位分佈之觀點產生全面腐蝕之範例，可列舉武若耕司之研究結果[32]說明，如圖32所示，在圖32(a)中水灰比為 0.6，而圖32(b)中水灰比為0.4~0.6，8個月後自然電位分佈，水灰比 0.4情況較 0.6情況為低，由於水灰比分佈不均勻，故產生Macrocell，而 $w/c=0.4$ 自然電位為貴電位，顯示平坦之形狀，在圖32(b)中，水灰比為 0.6處，自然電位為卑位形

成凸狀而成為陽極部份，且由於有腐蝕生成物，對混凝土產生膨脹壓力而向軸向生成龜裂。而圖32(c)及32(d)為有龜裂情形之範例，依水灰比不同而有顯著之電位分佈變化，圖中可見水灰比值大時，在初期之自然電位為卑電位形成凸狀成為陽極，隨時間進展電位全面變為卑位，Macrocell行為逐漸淡薄，由於腐蝕生成物向軸向發生龜裂，故在原龜裂處或近旁繼續成長擴大龜裂範圍，所以可推定其腐蝕速率相當大，但如果水灰比較小 $w/c=0.4$ 之情況雖稍有Macrocell之行為，全體之電位為貴電位，顯示具有不至於發生腐蝕之傾向，並且在軸向發生龜裂，因此可見如混凝土緻密性不同，則造成 Macrocell腐蝕之現象亦迥然不同。

根據圖32，Macrocell之陽極(自然電位為卑位成凸狀處)與陰極(凹狀處)之間距約為35-95cm，而被認為會產生腐蝕之電位差則大於 200mv以上，此結果與Browne氏之報告[34]相符合，岡田教授等[33]利用數值分析自然電位為卑位而凸形部份或自然電位有急變部份可推定為有嚴重之 Macrocell腐蝕，推定結果與上述數值相近[33]。

總而言之，如果混凝土製作使用水灰比低，密實性良好而內部緻密度偏差很低之情形，則即使產生龜裂亦可期望能自癒，且因電氣阻抗大，對於Macrocell腐蝕之防蝕貢獻亦很大。

6. 中性化

卜特蘭水泥水合反應後產生 C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF 及約 25 %之 $Ca(OH)_2$ ，使混凝土之PH值保持在12以上。硬化混凝土吸收空氣中之 CO_2 ，使 $Ca(OH)_2$ 變為 $CaCO_3$ ，PH值逐漸降低，此種現象稱為中性化，因此鈍態受破壞，鋼鐵腐蝕速率增大。通常中性化進行速率很慢，根據河野實驗數據在大氣暴露 5年，使用普通卜特蘭水泥中性化達 2.6mm。

7. 其他

除上述腐蝕機構外，尚有腐蝕疲勞及應力腐蝕。

鋼材在腐蝕性環境下，受反覆應力時會顯著地降低疲勞強度，此種現象稱為腐蝕疲勞，Taylor等[35]所作實驗結果如圖33所示，經過 10^8 次反覆應力後，已不存在疲勞限度，即此時已超過疲勞極限。

應力腐蝕係予以高拉力之預力鋼材產生破裂之現象，亦稱為遲破壞，在鹽份氣氛中，不發生孔蝕而直接破裂之例子亦很多，因非常脆之斷裂，故為很危險之破壞形態，發生應力腐蝕之限界約為抗拉強度之60%。

五、混凝土之損傷機構

並非在海洋之所有混凝土結構物都會受到損傷，雖在同一施工條件下，因環境條件之差異或結構形式不同，因此損傷程度亦不同，實際觀測結構物惡化情形就可了解上述現象。

損傷形態分類如表七所示，根據此分類，一般龜裂大都發生於劣化進行過程中之末期，有時在施工後不久也會發現劣化現象，一般劣化並非整個結構物全面性都發生，而是在結構物某些部位產生集中惡化之現象較多。

以混凝土橋樑之損傷結果為例，說明如下：

如圖34所示在此橋之下部結構並未發生腐蝕之異常現象，而在橋樑上部結構發生顯著之劣化現象，詳細觀測結果，發現在樑底或側面有異狀之劣化現象，如圖34所示凸緣(Flange)下面發現有較寬大之裂縫，沿軸向發生龜裂之例子亦很多，而且亦有混凝土呈片狀剝落現象發生。

將龜裂部份與其周圍敲開來檢查結果發現銹斑雖少，但鋼材呈咖啡色鐵銹，不但補助鋼材生銹而且套管及預力鋼棒之表面上也生成很厚紅色的鐵銹。樑之側面或底端之混凝土表面上發現有黑咖啡色之銹斑，然而混凝土本身尚未龜裂。

鋼筋腐蝕時，根據混凝土之品質及環境條件不同，因此對於混凝土造成的損傷程度亦有很大之差異，如圖35為銹斑與龜裂之關係，由於混凝土損傷之複雜性高，鋼筋腐蝕將導致結構物損壞，由於鋼筋生銹，斷面積缺損，因而降低強度並且使混凝土發生龜裂導致惡性循環現象。

對結構物而言鋼筋強度降低，將會導致撓度增大，而使用功能降低，混凝土發生龜裂，不但降低本身之強度，而且保護層會剝落而更加速腐蝕作用，因此根據海岸地區受鹽害之混凝土結構物調查結果發現，龜裂之產生對混凝土之損傷過程影響很大，對防蝕上是一項很重要之控制因素。

(一) 龜裂發生之過程

從鋼筋開始發生腐蝕進行到損傷之過程為鹽份滲透及蓄積，鋼筋腐蝕然後產生龜裂進展到可目視程度，其一系列之關係如圖36所示。

鋼筋混凝土之劣化速度在剛開始發生腐蝕期間進相當緩慢，但過後則加速進行，結構物建造後初期暫時尚無任何異狀出現，然而在此期間，飛來之鹽份附著於混凝土表面上而逐漸滲透侵入結構體內部蓄積。

鋼筋或箍筋開始發生腐蝕，混凝土表面會出現銹斑，若鋼筋之保護層薄時，則以魚鱗狀剝落，再繼續進行腐蝕會發現有縱向龜裂，由外觀察即可發現其損傷情形，從而可判斷混凝土內鋼筋已銹蝕，保護層已喪失保護功能，因此使得腐蝕因子(如鹽份、 CO_2 或氧氣)容易侵入而加速腐蝕作用，加之 Macrocell腐蝕作用，更使鋼筋集中腐蝕。

有時已發生龜裂，然而尚未發現銹斑，其內部鋼筋早已發生腐蝕，因之龜裂會一直擴展，隨著混凝土劣化之進行，保護層厚度不均一或其周圍潮濕條件不同，有時會出現銹斑或不出現銹斑現象，如圖35所示。

龜裂發生後，補修工作相當困難，因鋼筋保護層已喪失防蝕功能，而且體內蓄積大量之鹽分之故，而防止龜裂發生相當重要，並非已發生龜裂，鋼筋混凝土之功能就會完全喪失功能，有時抗壓強度尚在安全範圍內，若能及時控制劣化繼續進行，則尚能保持其功能，因此需要確定有效的防蝕對策及提早作補修工作。

在混凝土結構物發生龜裂及損傷進展中必須注意下列各點：

1. 由外觀判斷腐蝕狀態。
2. 利用非破壞性儀器及鑽心取樣瞭解分析惡化程度及範圍。
3. 依據損傷程度及範圍選擇適當之補修材料及方法，須要求品質高及技術優良。

(二) 龜裂特徵

由於鹽害所產生之龜裂僅為損傷之一部份，除龜裂外尚有許多現象出現，例如同時可發現龜裂、混凝土剝落、銹斑、混凝土有浮突狀....等現象。沿保護層薄之鋼筋方向之混凝土有龜裂之成長，而在預力混凝土龜裂形態為沿主筋或箍

筋之縱向發展方向。劣化狀況可分魚鱗狀剝落，缺角或縱向龜裂三大類如圖37所示。保護層厚度與在結構體之部位都會影響其劣化狀況，保護層薄之情況大多數在樑下面中央部份發生魚鱗狀之剝落，而保護層厚度較大，龜裂大都發生在角部或樑之側面所產生之龜裂較大，嚴重時會造成混凝土保護層之剝落。在樑底凸緣(Flange)部份之劣化詳細狀況如圖38所示，在此例雖然保護層厚度有55-60mm，但混凝土內部之鋼筋及套管一部份已發生腐蝕並有龜裂成長中。

六、結論與建議

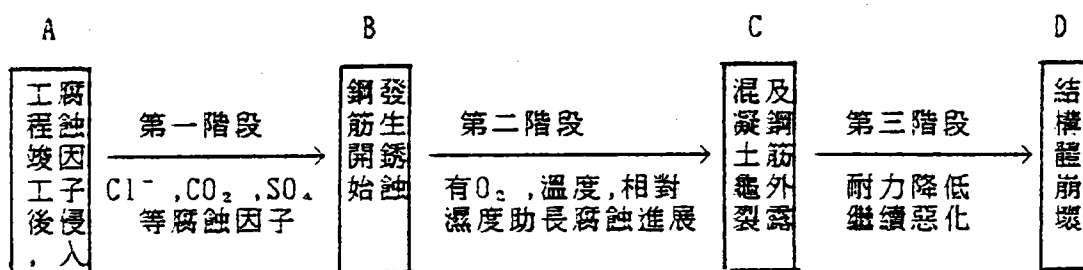
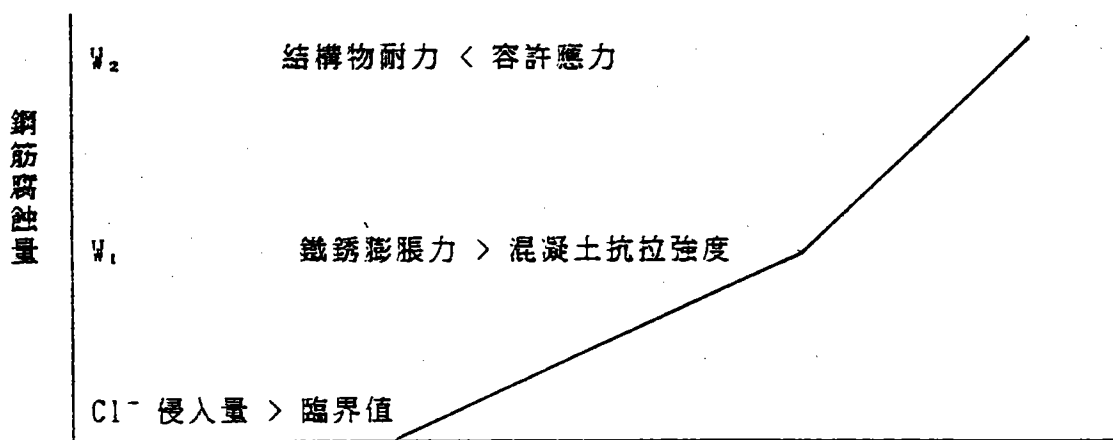
本章僅對鹽害之機理及混凝土橋樑之損傷惡化作一粗淺之介紹，這方面有待今後再多作調查及試驗才能更明瞭其中機理，港灣技術研究所目前正積極在這方面努力，希望能對工業界有所幫助。

七、參考文獻

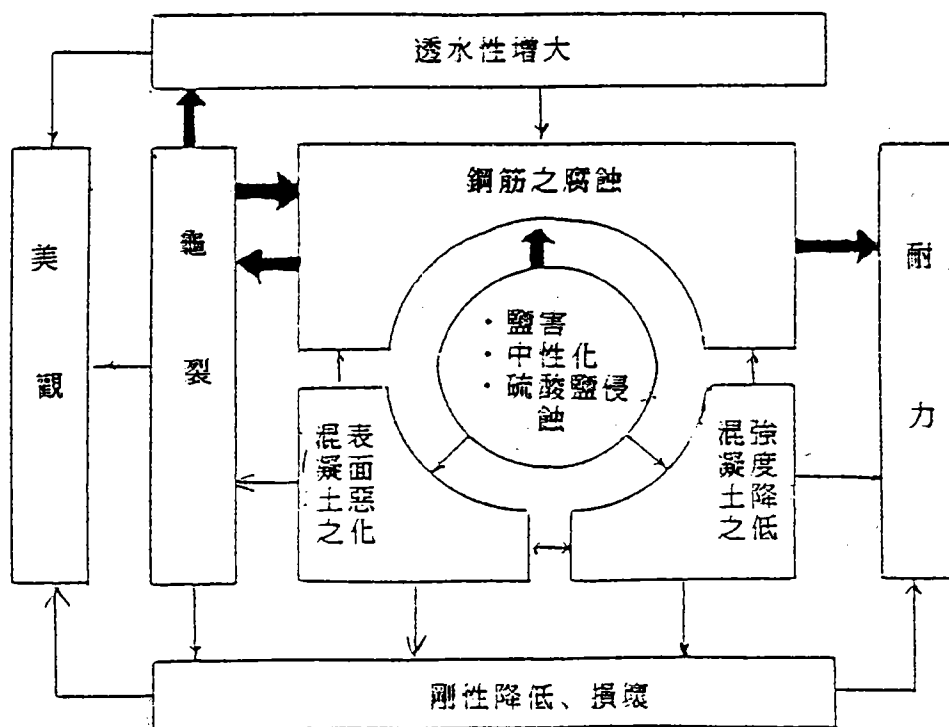
1. Whitman, W., et al. : Effect of hydrogen-ion concentration on the submerged corrosion of steel, Ind. Eng. Chem. Vol.16 No.7 1924.7, pp.665-670
2. 田村英雄ほか：現代電氣化學，培風館，1980.6
3. 井上勝也：錆との戦い，三省堂，1969.5
4. 日根文男：腐蝕工學の概要，化學同人，1977.6
5. 小林豊治：コンクリート中の鋼材の腐食，防食の基礎，海洋コンクリート構造物防食指針(案)，日本コンクリート工學協會，1983.2. pp.39-46
6. CEB Task Group Durability : Durability of concrete structure -state-of-the-art report-, Bulletin d'Information, CEB No.148, 1982.2
7. 腐食防食部門委員會 TG：コンクリート腐食 - 鐵筋コンクリート中 鐵筋の腐食に関する試験方法，材料 第27卷 第302號，1978.11, pp.44-47
8. Erlin, B..et al. : Corrosion of metals in concrete - Needed research-, ACI SP-49, 1975, pp.39-46

9. Hausmann D.A. : Materials Protection, Vol.6, No.11, p 19, 1967
10. Gouda V.K. : British Corrosion Journal, Vol.5, p.198, 204, 1970
11. Richartz, W. : Die binding von Chlorid bei der Zementerhaltung, Zement-Kalk-Gips, Heft 10, 1969, S.447-456
12. 例えば, 日本コンクリート工學協會 : 海洋コンクリート構造物の防食指針(案) 1983.2
13. 大即・横井・下沢 : モルタル 中鉄筋の不動態に及ぼす鹽素の影響, 土木學論文報告集 No.360/V-3, 1985.8, pp.111-118
14. 宮川豊章 : Early chloride corrosion of reinforcing steel in concrete, 京都大學博士論文, 1985.2
15. Stratfull, R.F. : Corrosion autopsy of a structually unsound bridge deck, HRR 433, 1973.12, pp.1-11
16. Stewart, C.E. : Consideration for repairing salt damaged bridge decks, ACI Journal Vol.72 No.12, 1975.12, pp.685-713
17. Powers, T.C..et al, : Permeability of Portland cement paste, ACI Journal Vol.51, 1954.11, pp.285-298
18. 木内・宮川・岡田 : コンクリートの 電氣抵抗および酸素浸透について, 土木學會第38回年次學術講演會講演概要集 第5部, 1983.9, pp.265-266
19. GjØrv. O.E., et al. : Diffusion of dissolved oxygen through concrete, Corrosion/76, Paper No.17, 1976.3, p.17
20. 岡田 清・宮川豊章 : コンクリートの水ヤメント比 よひひひわれか 鐵筋腐食に與える影響について, ヤメント技術年報 33卷, 1979.12, pp.494-497
21. 神田 衛 ほか : コンクリート 打込み後の部材断面における水ヤメント比の分布性狀, ヤメント・コンクリート No.357, 1976.11, pp.38-43
22. 赤塚雄三・關博ほか : 海水の作川を受ける鐵筋コンクリートのひひ"われと鐵筋の腐食について, ヤメント・コンクリート No.266, 1966.4, pp.38-43
23. 岡田・小柳・宮川 : コンクリート部材 のひひ"われと鐵筋腐食に關する研究, 土木學會論文報告集第281號, 1979.1, pp.75-87

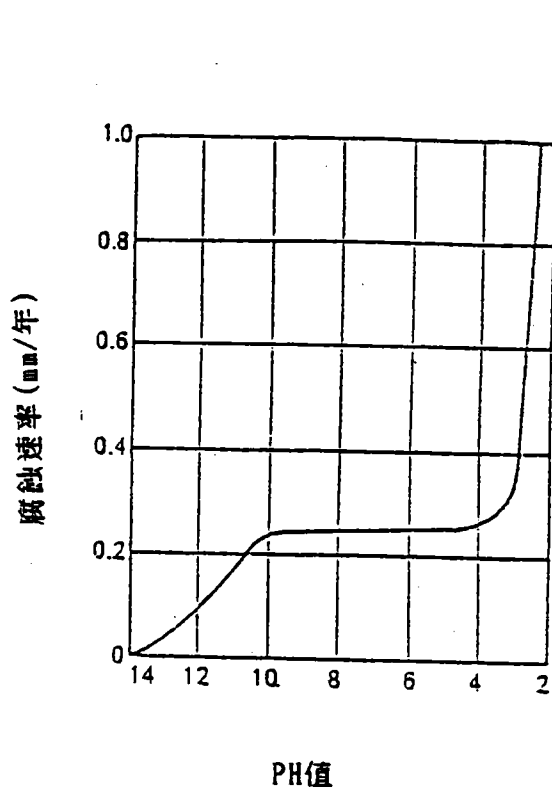
24. Attimtay, E.: Chloride corrosion of reinforced concrete, Texas Univ., 1971.3
25. 小林和夫・宮川豊章 ほか : かぶり コンクリート 鉄筋腐食に與える 影響, ヤメント 技術年報 36巻, 1982.12, pp.497-501
26. Tuutti, K " Service life of structures with Regard to corrosion of Embedded Steel " Performance of concrete in Marine Environment ACI SP -65 1980
27. 岸谷孝一、竺井浩 : 鉄筋コンクリート構造物, 鹽分侵入 に関する文獻的研究 : 昭和60年度日本建築學會大學學術講演梗概, 1985.10
28. Corrosion of Atmospheres : ISO/TC, 156, WG4, N66E, 1983.
29. 堅野紀元 : 鹽分による 鉄筋の腐食と防食対策, あうか -建設省建築研究成果 撰, 建築研究振興協會, 1984.10
30. JASS 5 1986 p.413
31. 岡田・小林・宮川・本田 : 分極抵抗法を用いた鉄筋腐食モニタリング"による 補修基準について, 第 5回コンクリート 工學年次講演會講演論文集, 1983.6, pp.249-252
32. 武若耕司 ほか : 海洋環境からコンクリート中へ浸透する鹽分量の推定に関する 2, 3 實驗, 土木學會第 39回年次學術講演會講演概要集 第 5部, 1984. 10, pp.39-40
33. 岡田・小林・宮川 : 自然電位の測定 によるコンクリート橋樑の健全度の判定 基準について, 土木學會關西支部昭和57年度シンポジウム 論文集, 1982.2 pp.125-132
34. Browne, R.D., et al. : The long-term performance of concrete in the marine environment, Off-Shore Structure, ICE, 1974
35. Taylor, H.P.J., et al : Fatigue in offshore concrete structures, SE Vol.56A No.3, 1978.8.pp.69-76



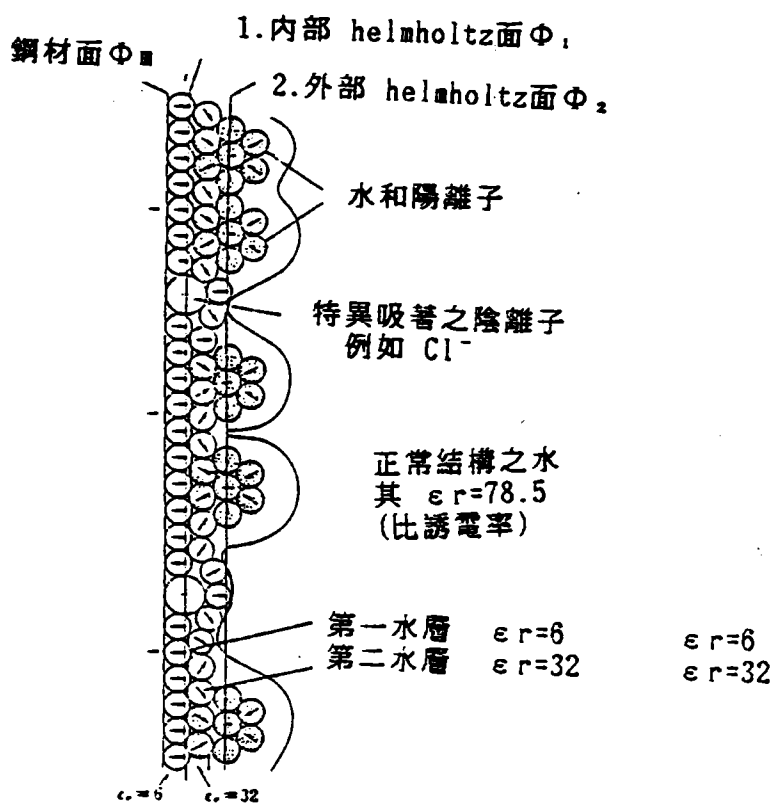
圖一 鋼筋混凝土結構物發生腐蝕、耐力降低損壞經過



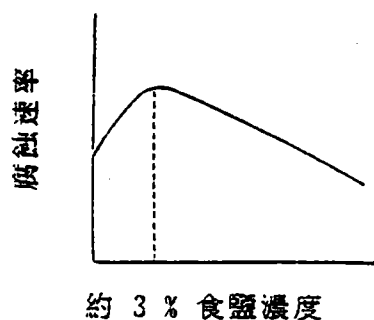
圖二 鋼筋混凝土結構物代表性劣化現象與使用性能降低關係



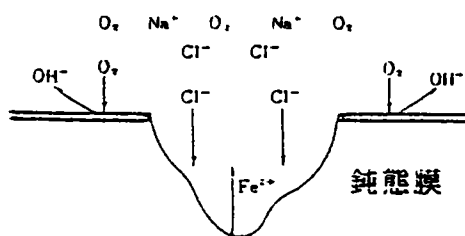
圖三 PH值與鋼筋腐蝕速率之關係



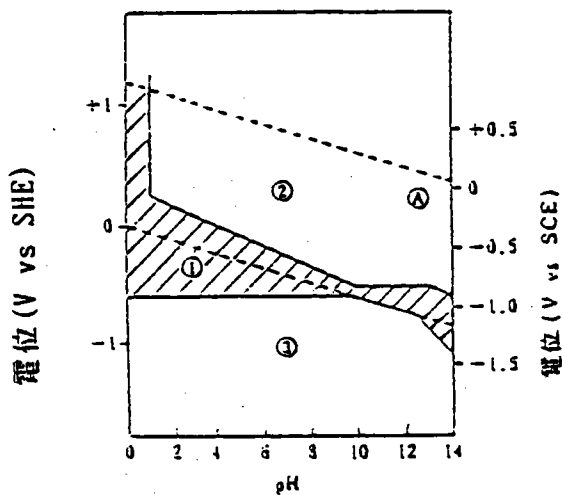
圖四 Devanathan-Bockris-Muller
之電氣二層模型



圖五 食鹽溶液中鋼材之腐蝕速率



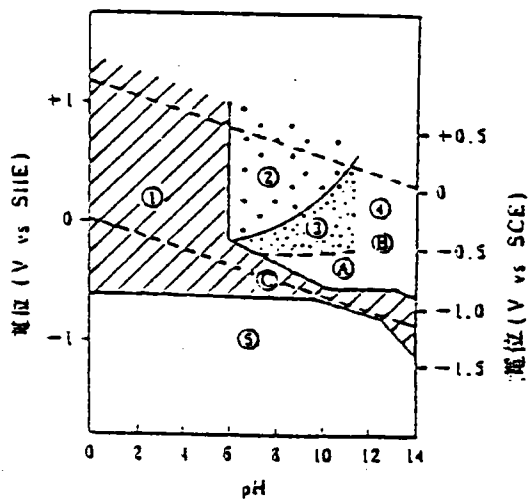
圖六 孔蝕之機構



①全面腐蝕 ②鈍態

③免銹區(陰極防蝕)

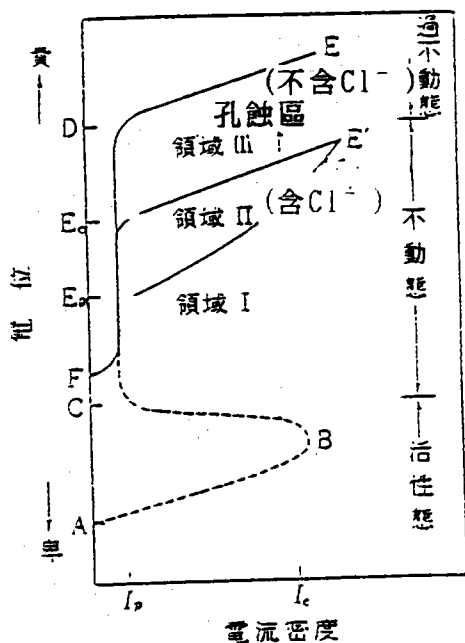
圖七 鐵之電位 - PH 圖
(不含氯離子之情況)



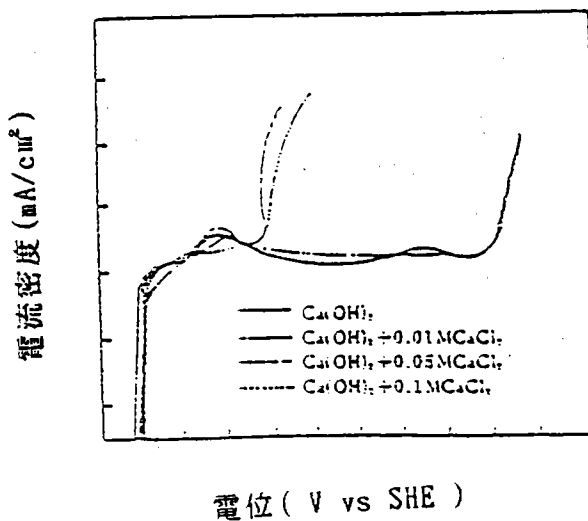
①全面腐蝕 ②孔蝕 ③不完全鈍態

④完全鈍態 ⑤免銹區(陰極防蝕)

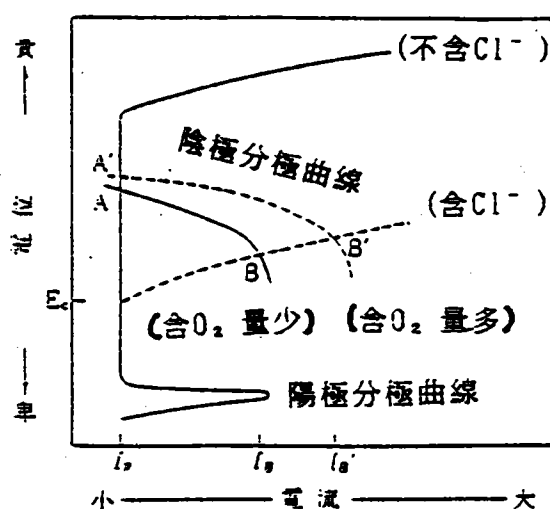
圖八 鐵之電位 - PH圖
($\text{Cl}^- = 335 \text{ ppm}$)



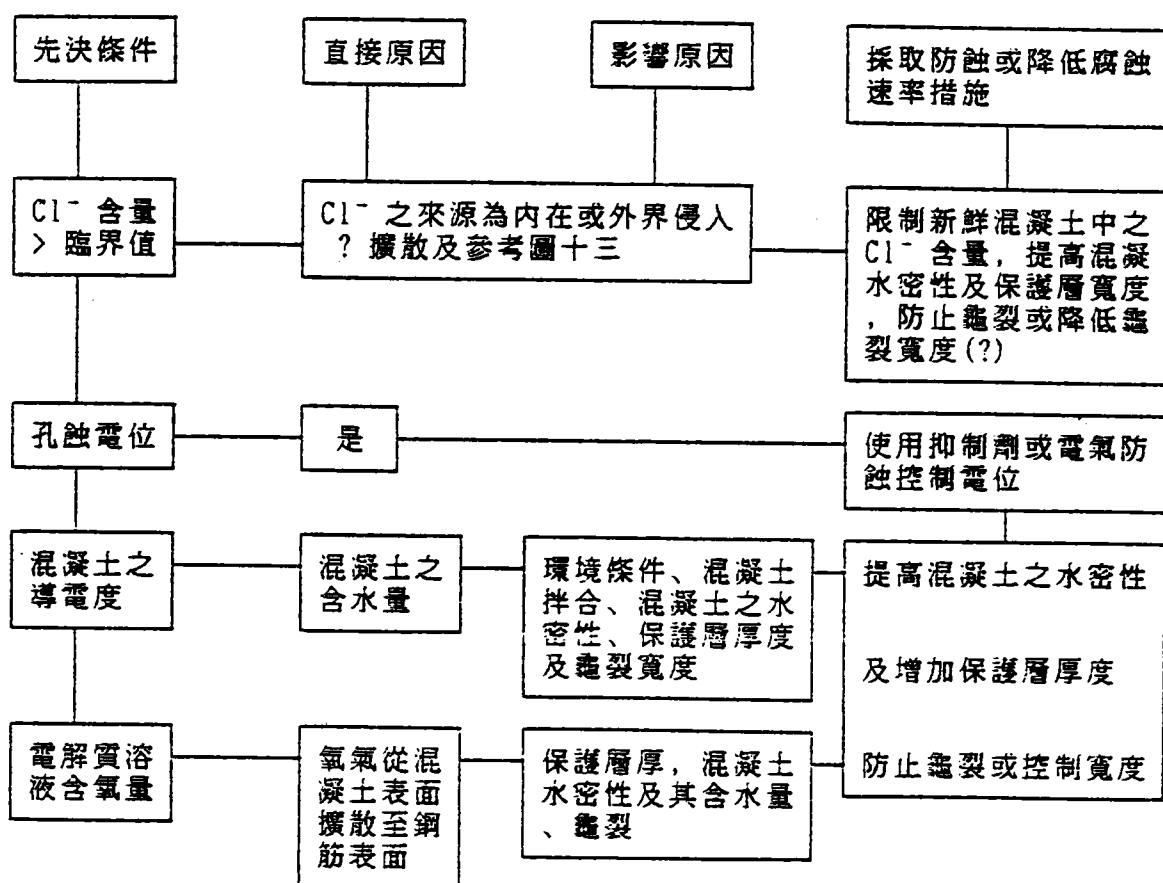
圖九 鋼鐵陽極之分極曲線



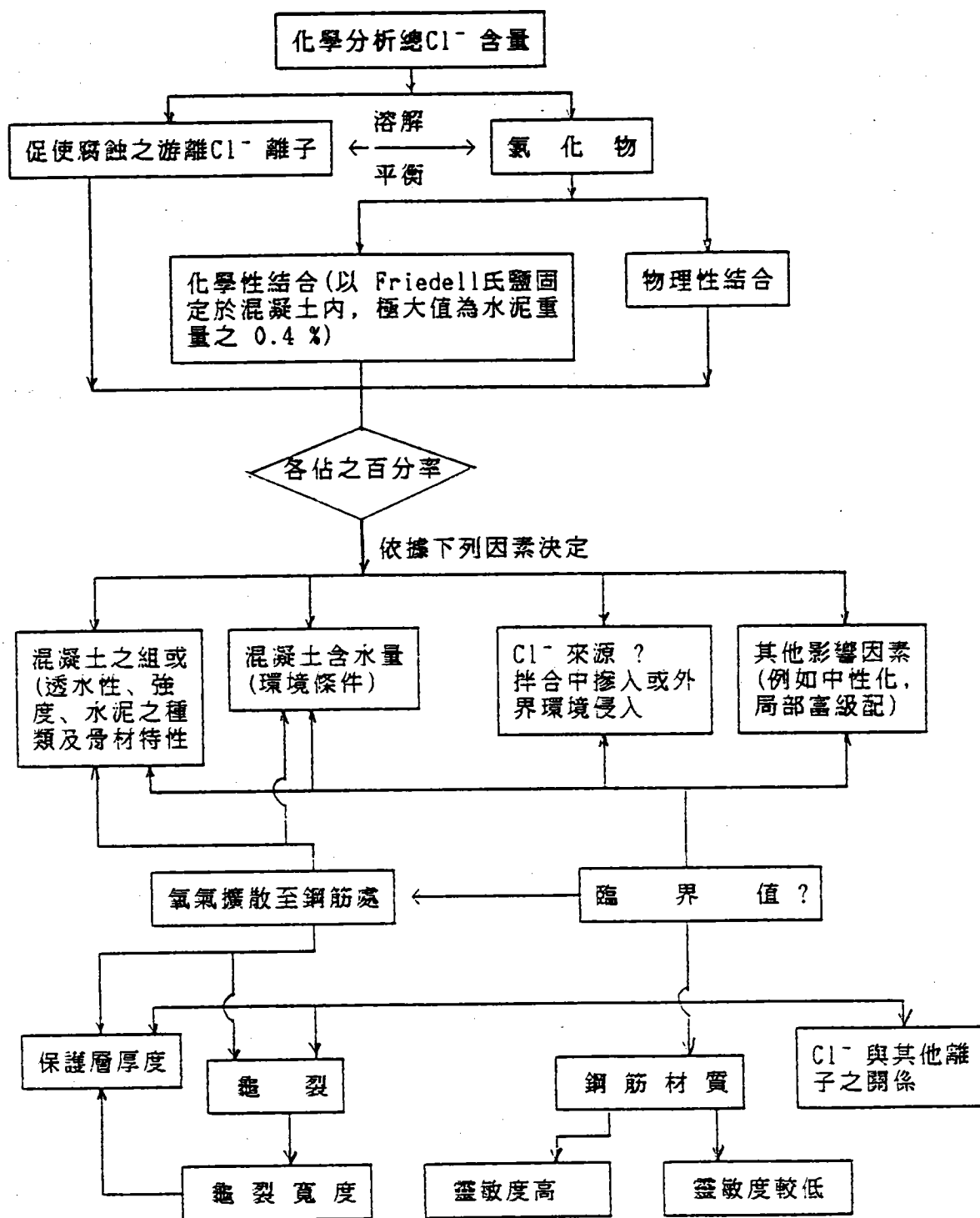
圖十 含 CaCl_2 之飽和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液中鋼鐵之陽極分極曲線



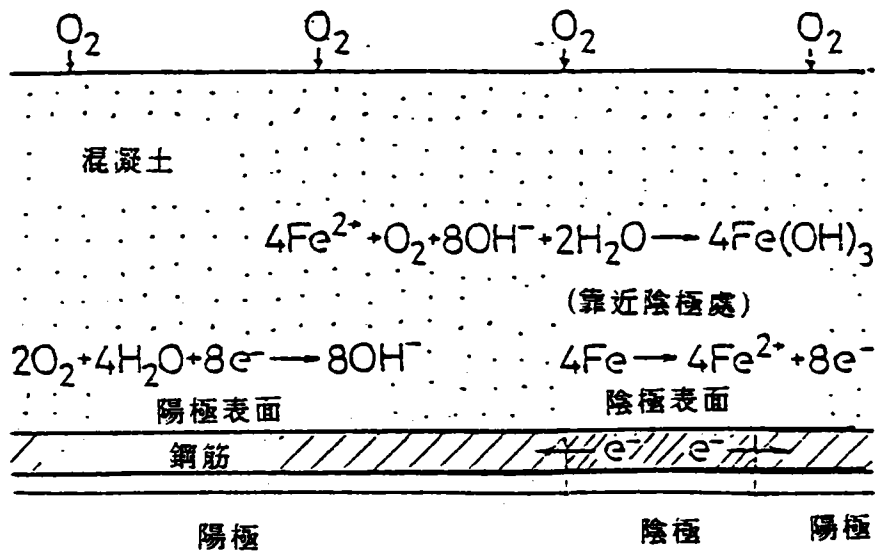
圖十一 腐蝕速率之分極行為



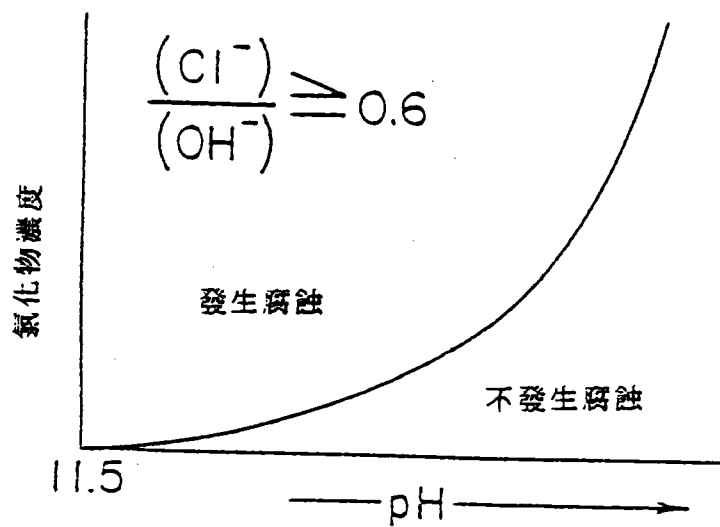
圖十二 混凝土受氯化物作用發生腐蝕之各種要因及相互關係



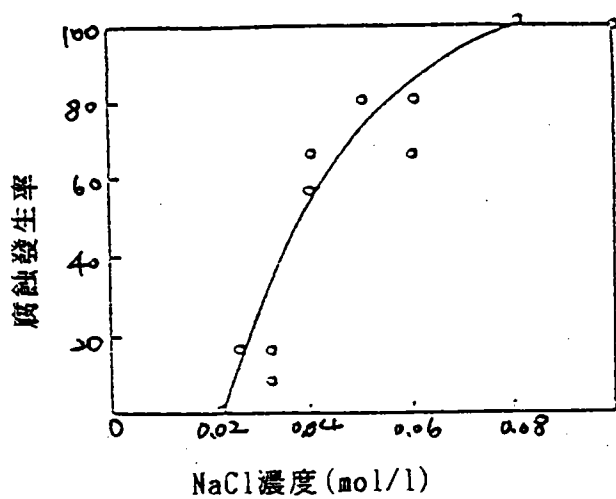
圖十三 混凝土中鹽害臨界含鹽量各有關因素之關係



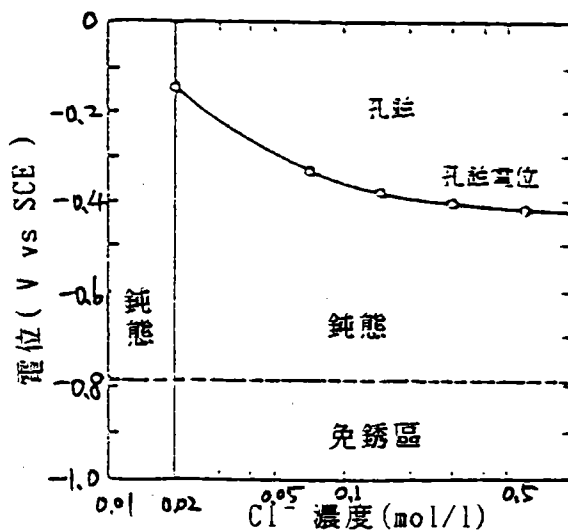
圖十四 混凝土中鋼材之巨大腐蝕現象



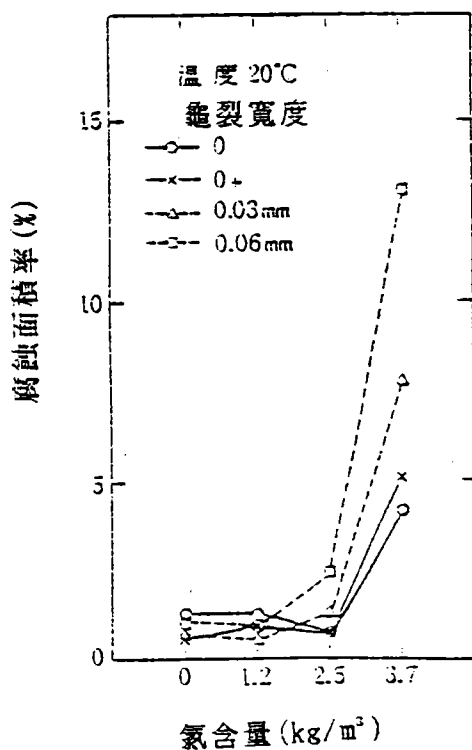
圖十五 氯化物與鋼筋腐蝕環境之PH值之關係



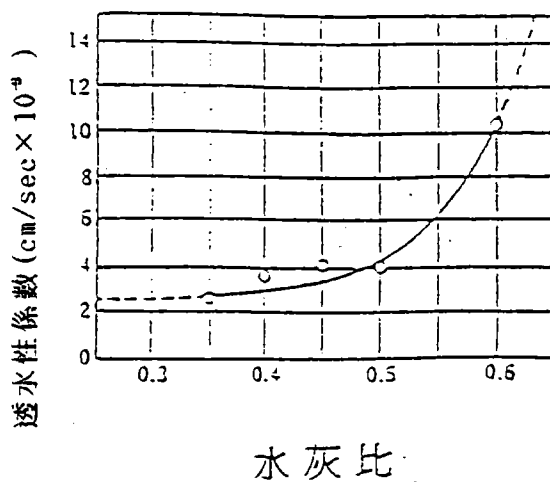
圖十六 在含氯化物之飽和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液中鋼鐵腐蝕發生率



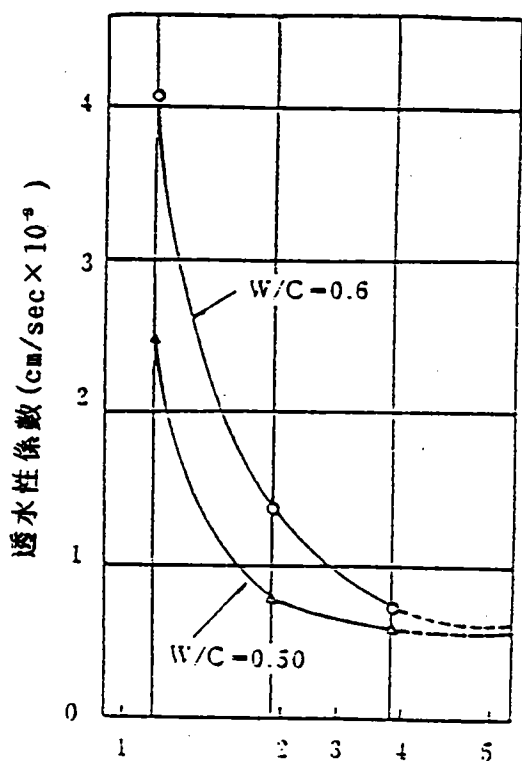
圖十七 在含氯化物之飽和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液中鋼鐵腐蝕特性



圖十八 混凝土中含氯量對鋼材腐蝕影響

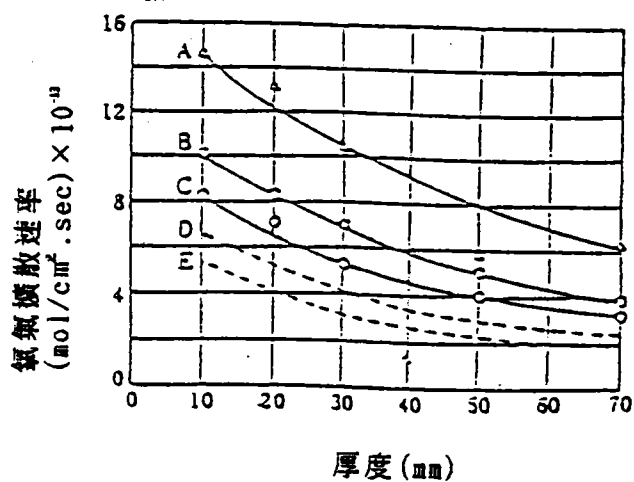


圖十九 混凝土的水灰比與透水性之關係



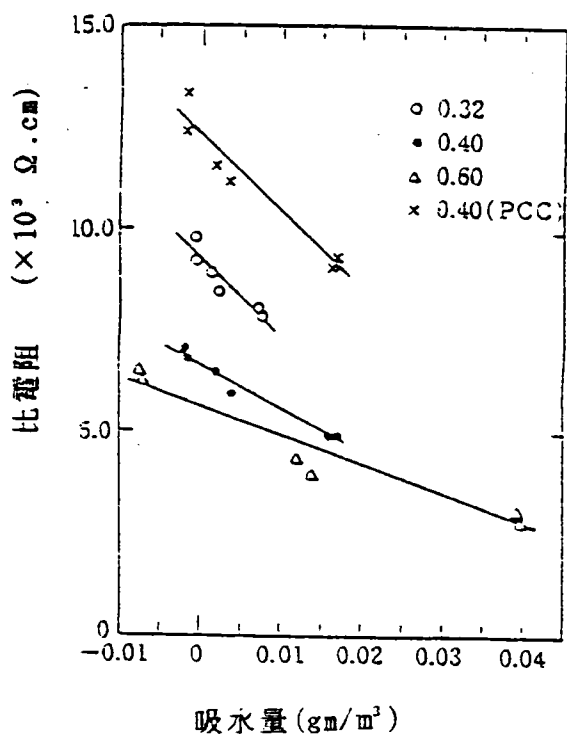
保護層厚度 (cm)

圖二十 保護層厚度與透水性之關係



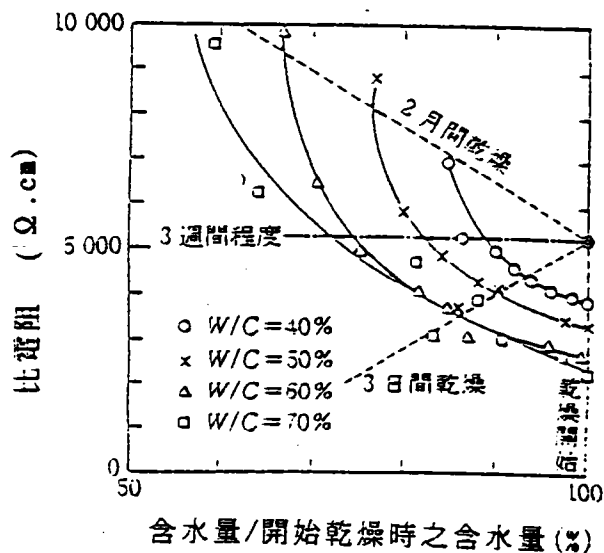
混凝土 w/c A = 0.6 A = 0.5 c = 0.4
水泥砂漿 w/c D = 0.6 E = 0.5

圖二十一 混凝土及水泥砂漿之厚度及水灰比對氧氣擴散速率之影響



吸水量 (gm/m³)

圖二十二 吸水量與比電阻之關係



圖二十三 水灰比與比電阻之關係

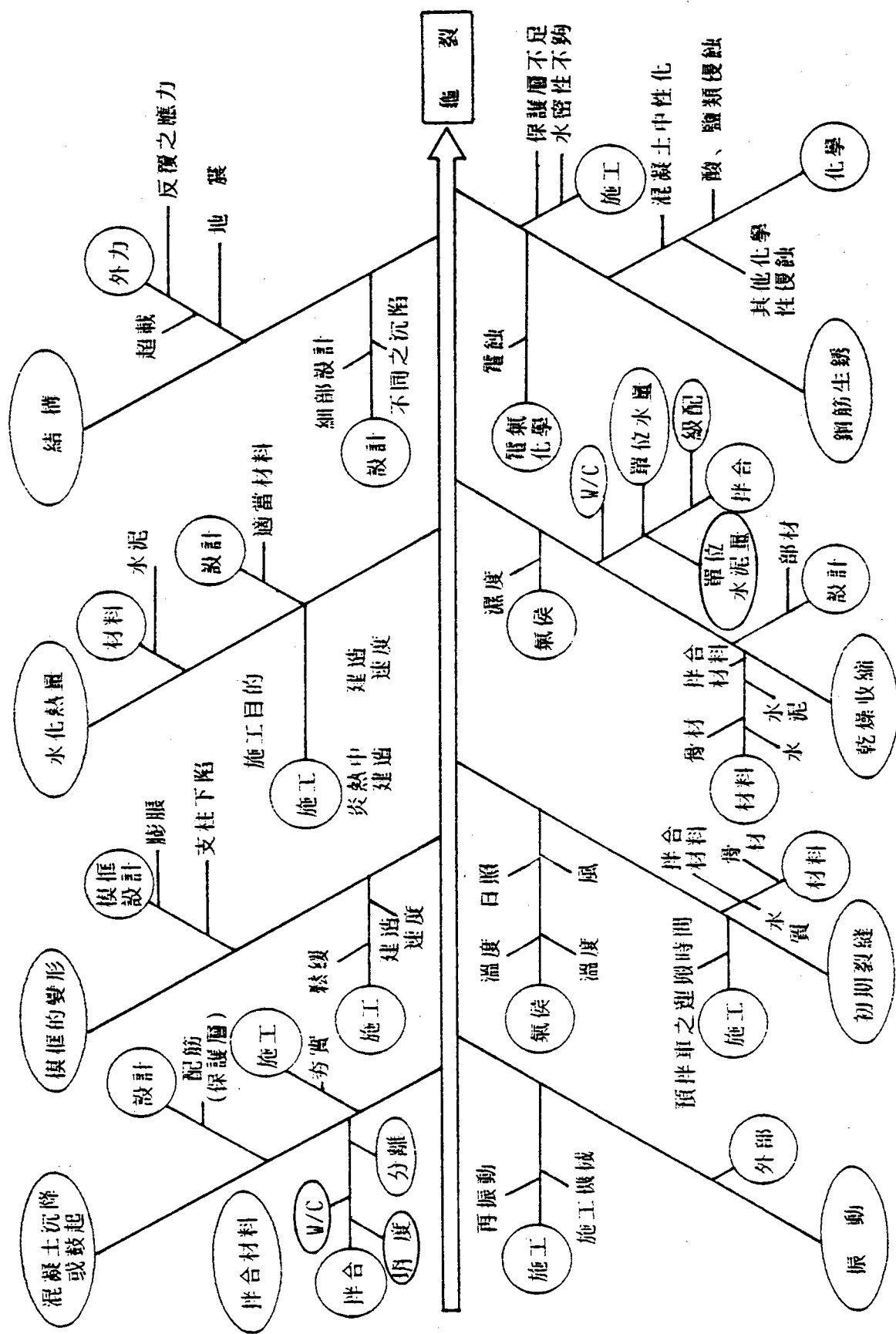
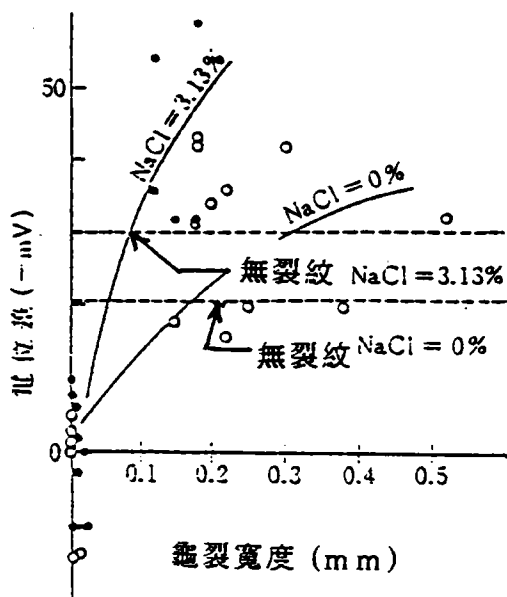
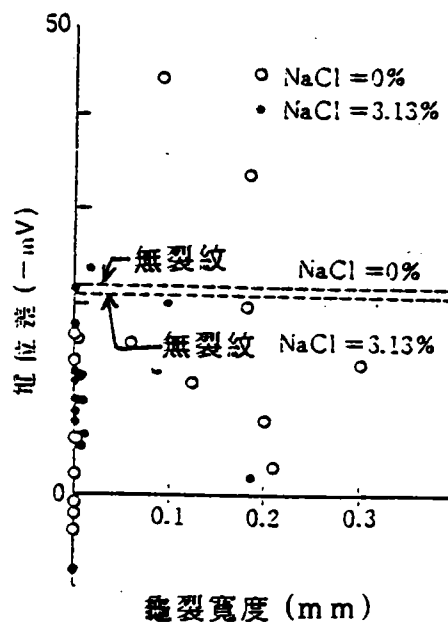


圖24 混凝土龜裂要因

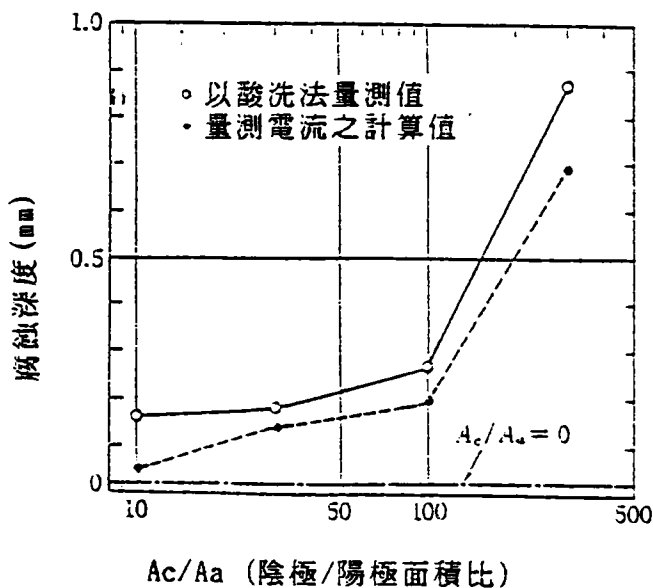


② $w/c = 0.4$

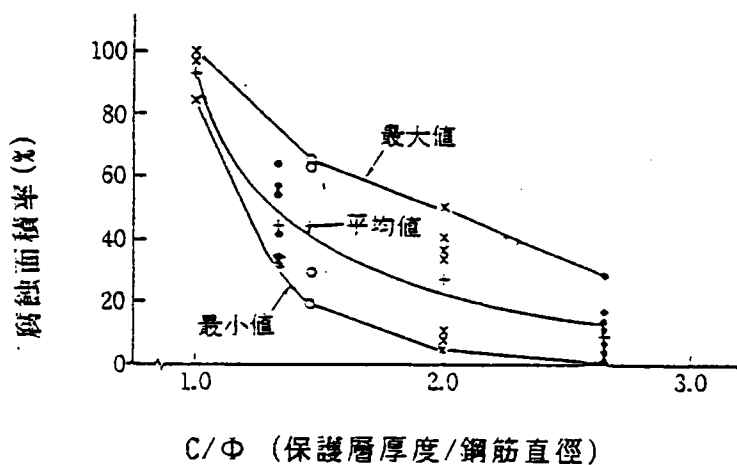


③ $w/c = 0.7$

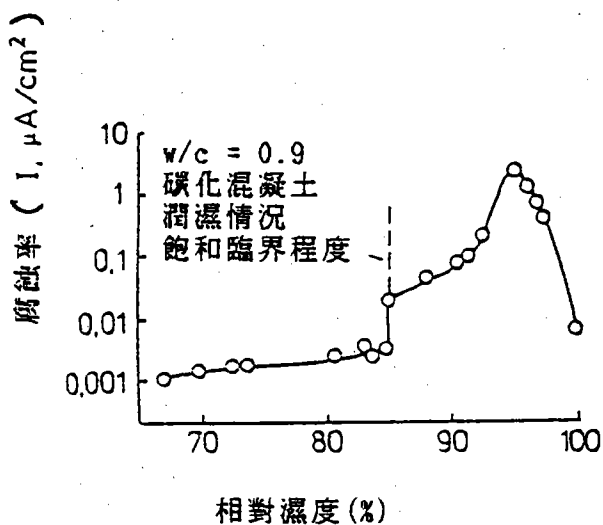
圖二十五 龜裂寬度與電位差之關係



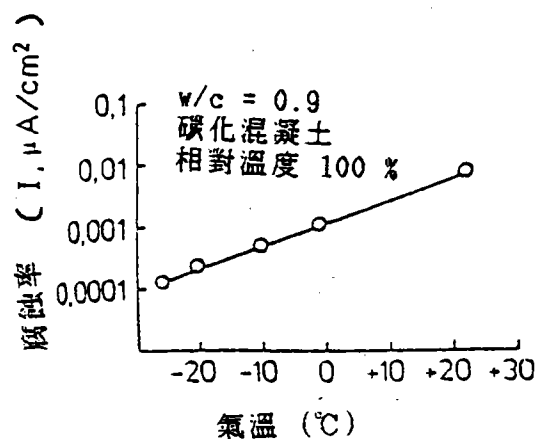
圖二十六 A_c/A_a 與腐蝕深度之關係



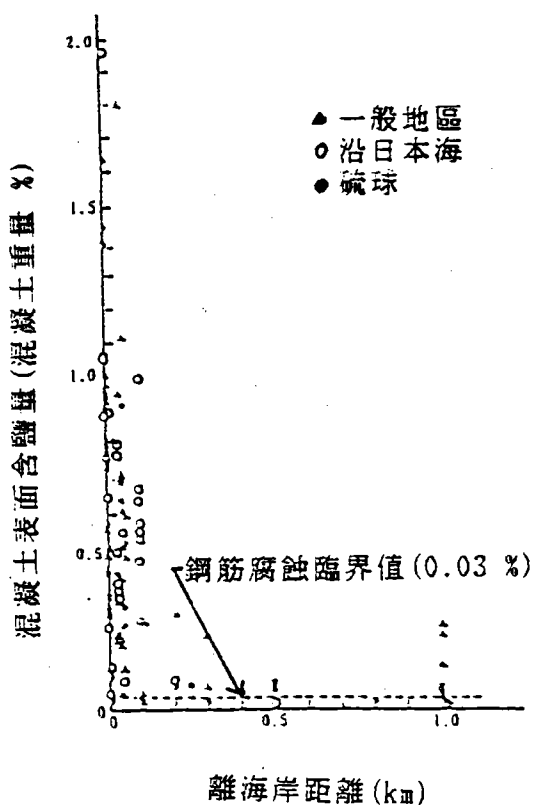
圖二十七 C/ϕ 對鋼筋腐蝕之影響性



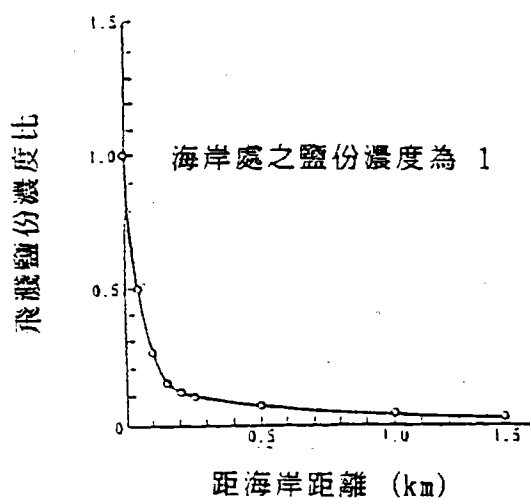
圖二十八 相對濕度與腐蝕率關係



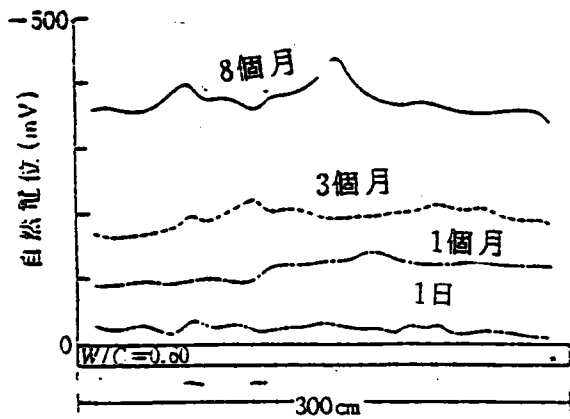
圖二十九 氣溫與腐蝕率關係



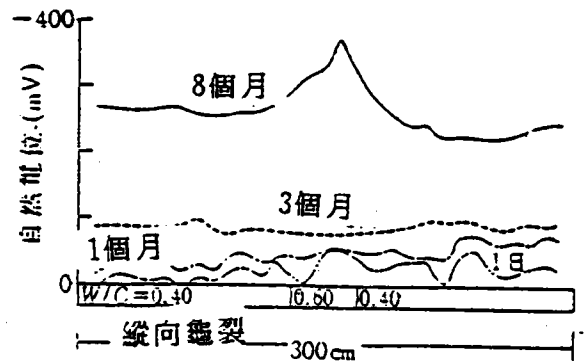
圖三十 混凝土表面含鹽量與距離海岸遠近關係



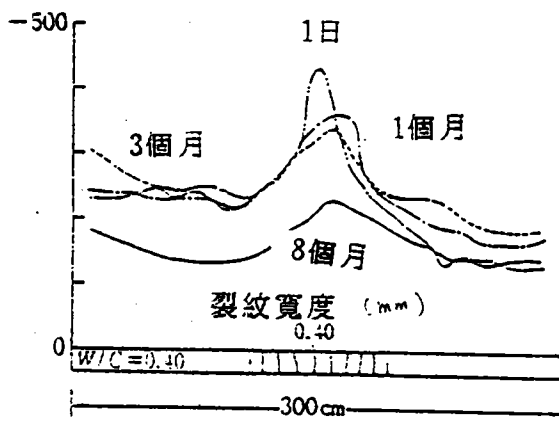
圖三十一 飛測鹽份濃度與距離海岸之關係



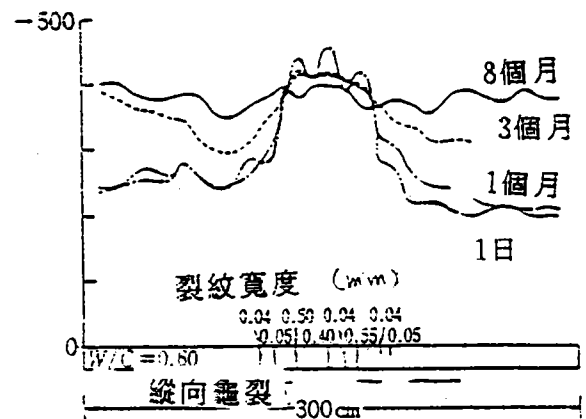
(a) $w/c = 0.6$



(b) $w/c = 0.4 \sim 0.6$

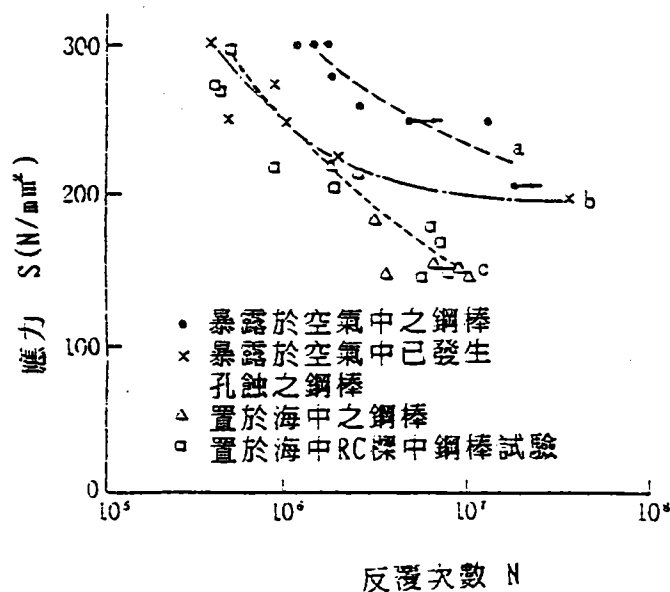


(c) $w/c = 0.4$, 已龜裂

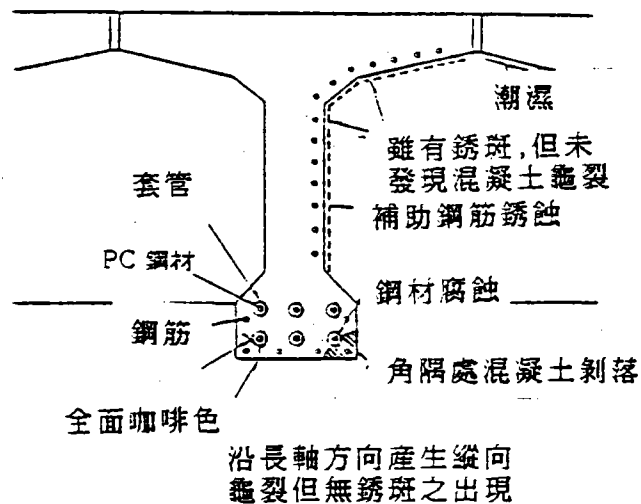


(d) $w/c = 0.6$ 已龜裂

圖三十二 自然電位分佈範例



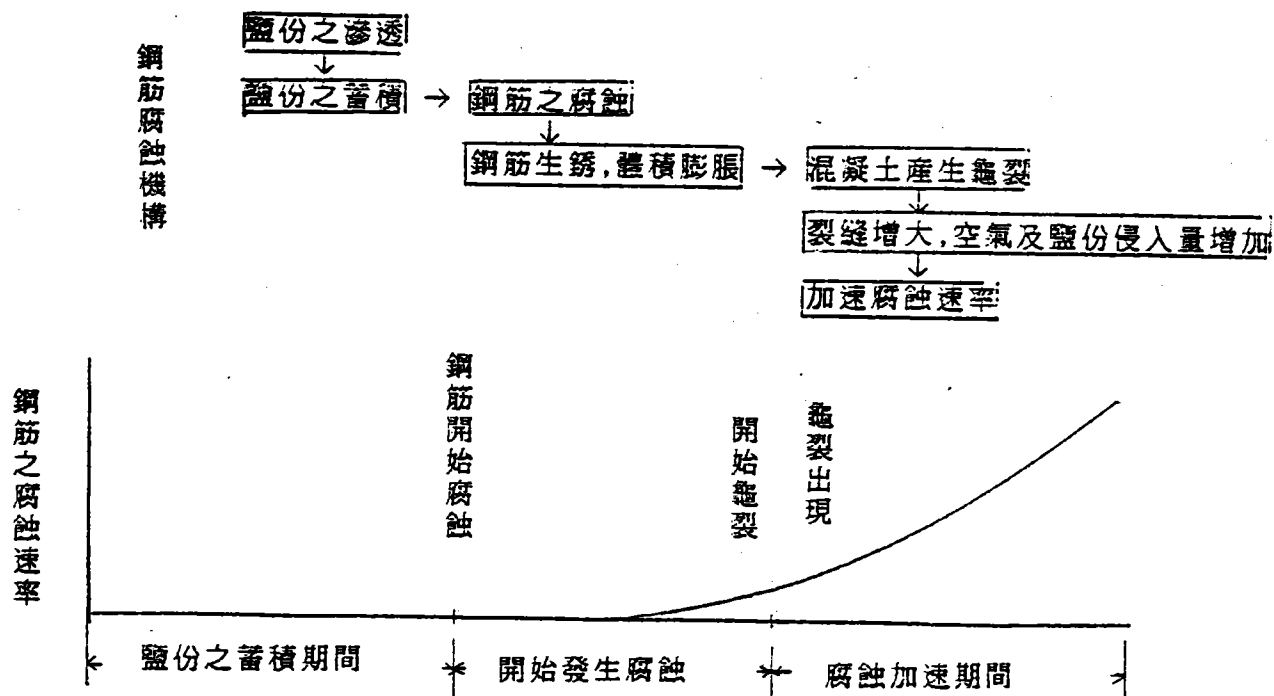
圖三十三 各種環境下鋼筋之疲勞曲線



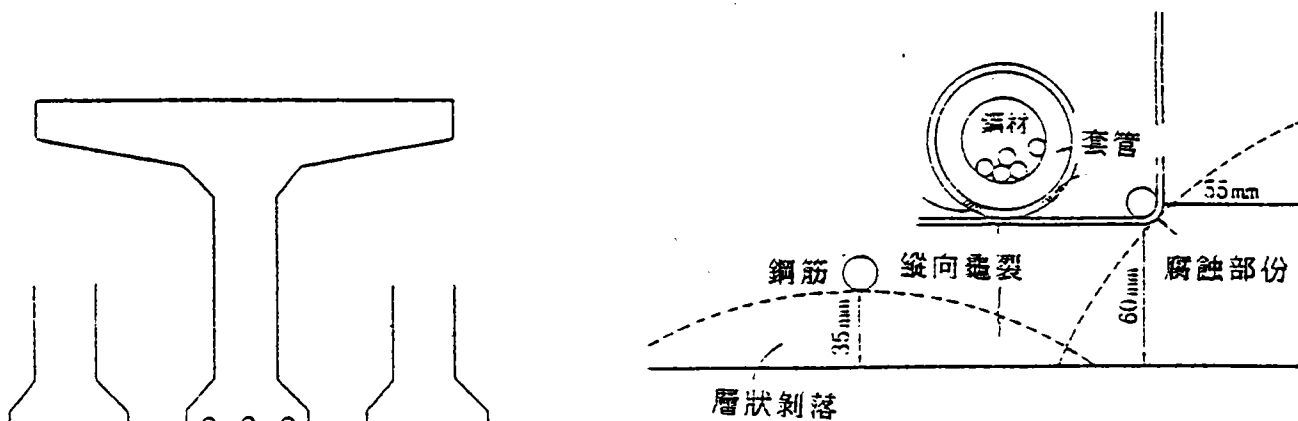
圖三十四 橋樑鋼筋腐蝕現象範例

原因	鋼筋之腐蝕	有大量之鹽份供應
環境	經常濕潤	經常發生乾燥與潤濕反覆現象
腐蝕之進行	銹水流出於混凝土表面	由於乾燥時,鋼筋生銹體積膨脹 因而使混凝土產生龜裂 裂縫成長達到預力鋼棒處(保護層雖有 5 公分厚,仍有龜裂至鋼棒之腐蝕範例) 沿著裂縫,鹽份可快速滲透,因而加速預力鋼棒之腐蝕 混凝土表面雖未見到銹斑,然而預力鋼棒已經發生銹蝕現象

圖三十五 混凝土表面銹斑與龜裂之關係



圖三十六 海洋潑濺區之RC結構物鋼筋腐蝕過程



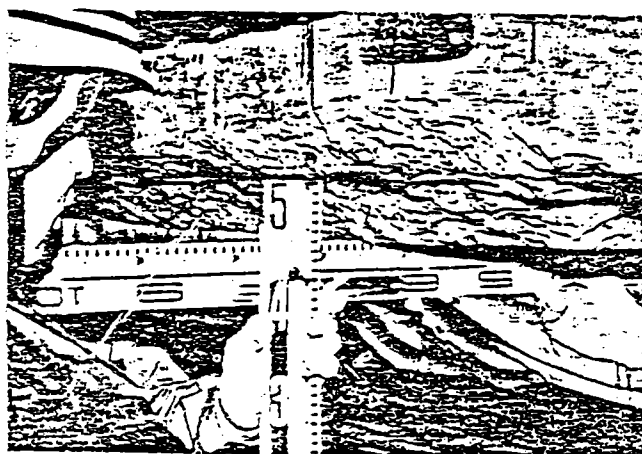
多發生在中央部位
 [補強鋼筋之保護層厚度約在20-35mm範圍]

多發生角隅處
 [保護層厚度約50mm以上]

側面發生龜裂
 [保護層厚度約為50mm以上]

(a)魚鱗狀剝落 (b)缺角 (c)縱向龜裂

圖三十七 代表性橋樑惡化現象



圖三十八 橋樑下緣部份惡化現象

表一 鋼筋混凝土結構物耐久性與惡化現象

影 響 因 素	RC 惡 化 現 象	使用功能降低
1. 外在環境因素 • 乾濕或凍融反覆作用 • 海鹽作用 • 空氣中所含侵蝕性物質作用(如 CO_2 , SO_2 , SO_3^{2-}) • 環境、氣溫、相對濕度 2. 內在因素 • 混凝土材料配合設計不當 • 養生、夯實不良、水密性不佳 • 使用海水、海砂或第一種水泥	• 混凝土中性化 • 硫酸鹽侵蝕及鹽害 • 混凝土表面劣化 • 混凝土強度降低 • 鋼筋腐蝕、銹斑 • 降低剛性 • 透水性增大	• 耐力 • 美觀 • 變形 • 防水性

表二 臨海混凝土結構物鹽害影響要因

海鹽侵入與飛沫 附著要因	附 著 物	滲 透 性	鋼 材 之 腐 蝕
1. 氣象條件 2. 海象條件 3. 距海岸狀況	1. 結構物形狀 2. 混凝土表面	1. 混凝土之健全度 2. 混凝土之緻密性 3. 使用時間 4. 溫、濕度	1. 鋼材之保護層厚度 2. 鋼材之種類及品質 3. 混凝土水密性 4. 使用時間

表三 試體中氯離子含量與鈍態之關係

Cl^- 在水 泥砂漿中 之含量%	≤ 0.075	$0.075 < \leq 0.125$ (0.10)	$0.125 < \leq 0.175$ (0.10)	$0.175 < \leq 0.225$ (0.20)	$0.225 < \leq 0.275$ (0.25)	$0.275 < \leq 0.325$ (0.30)	$0.324 < \leq 0.425$ (0.40)	$0.375 < \leq 0.425$ (0.40)	0.425 (0.425)
呈現鈍態 之試體量 (%)	95	83	82	47	46	52	42	21	4

表四 氧氣擴散量

水灰比(w/c)	保護層厚度(mm)	擴散量 ($\times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{O}_2 / \text{cm}^2 \cdot \text{sec}$)
0.32	20	11.3
	50	12.6
0.40	20	7.0
	50	10.0
	50 #1	43.6
0.6	20	5.2
	50	8.3
0.40 (pcc) #2	20	6.8
	50	7.9

註 #1 相對濕度 80%

#2 pcc : polymer cement concrete (聚合水泥混凝土)

表五 大氣中之含塩量與混凝土中塩侵透量之關係

離海岸之距離	200 m 以內之距離	1 km 以內之距離	10 km 以內之距離	10 km 以上之陸地
大氣中之含塩量	0.3 ~ 0.8 mg / dm ² / 日	平均 0.2 mg / dm ² / 日	風大時會有塩分存在	不影響混凝土耐久性
混凝土表層部 塩份侵透量	超過塩害界限含量 0.03 % 甚多	500 m 以內會超 過 0.03 % , 800 m 以內不會超過	—	—

表六 氣溫、濕度、風速、混凝土溫度對水分之蒸發速度之影響

混凝土溫度 (°C)	氣溫 (°C)	濕度 (%)	露點 (°C)	風速 (m/hr)	水分之蒸發速度 (kg/m ² /hr)
(1)風速增加時					
21.1	21.1	70	15.0	0	0.074
21.1	21.1	70	15.0	8	0.186
21.1	21.1	70	15.0	16	0.304
21.1	21.1	70	15.0	24	0.417
21.1	21.1	70	15.0	32	0.539
21.1	21.1	70	15.0	40	0.662
(2)濕度減少時					
21.1	21.1	90	19.4	16	0.098
21.1	21.1	70	15.0	16	0.304
21.1	21.1	50	10.0	16	0.490
21.1	21.1	30	12.8	16	0.662
21.1	21.1	10	-10.6	16	0.858
(3)混凝土溫度及氣溫增高時					
10.0	10.0	70	5.0	16	0.098
15.6	15.6	70	10.0	16	0.211
21.1	21.1	70	15.0	16	0.304
26.7	26.7	70	21.1	16	0.377
32.2	32.2	70	26.1	16	0.540
37.8	37.8	70	31.1	16	0.882
(4)混凝土溫度 (21.1°C) , 氣溫降低時					
21.1	26.7	70	21.1	16	0.000
21.1	21.1	70	15.0	16	0.304
21.1	10.0	70	5.0	16	0.613
21.1	-1.1	70	-6.1	16	0.809
(5)氣溫 (4.4°C) 、濕度 100 % 混凝土溫度高時					
26.7	4.4	100	4.4	16	1.004
21.1	4.4	100	4.4	16	0.637
15.6	4.4	100	4.4	16	3.308
(6)混凝土溫度高, 氣溫 4.4°C , 風速變化時					
21.1	4.4	50	-5.0	0	0.172
21.1	4.4	50	-5.0	16	0.794
21.1	4.4	50	-5.0	40	1.749
(7)氣溫 21.1°C 、混凝土溫度降低時					
26.7	21.1	50	10	16	0.858
21.1	21.1	50	10	16	0.490
15.6	21.1	50	10	16	0.221
(8)濕度 10 % 、混凝土溫度及氣溫高, 風速變化時					
32.2	32.2	10	-3.8	0	0.343
32.2	32.2	10	-3.8	16	1.646
32.2	32.2	10	-3.8	40	3.626

表七 損傷形態之分類例

劣化度	外觀特徵	鋼材之腐蝕
0	無異常	內部之鋼筋材沒發生腐蝕
1 2	由於銹斑而污染外觀 有鱗狀之剝離(也有沒出現銹斑之情形)	箍鐵筋等鋼筋發生腐蝕
3 4	縱向(軸方向)有龜裂(無銹斑之現象較多) 發展為全面性縱向龜裂	套管及PC鋼線亦在腐蝕

參、橋樑腐蝕調查

吳信昇*

一、概要

本研究就台15線32k+618之大埔橋及台1線116k+590西湖橋進行調查，大埔橋位於桃園縣大園鄉居大園工業區，為該區主要出入口，車輛往來頗為頻繁。該橋民國四十三年建造完成，使用至今已三十五年之久，將於明年拆除重建，附近民眾莫不為此危橋之安全性而憂心忡忡，本所人員實地前往調查，發現腐蝕程度確實相當嚴重，保護層剝落、鋼筋裸露，橋頭下部擋土結構混凝土有一相當寬之裂縫，重車通過會發生鬆動。因該橋為光復後不久後興建，百廢待興，物資材料嚴重缺乏，設計準則無從參考之下建造完成，然歷經三十多年，不管在車輛之數量及車輛載重都急速增加，政府方面在公共建設支出逐年增加，而此橋樑仍未見改善，不知全省各地還有多少類似此種危橋，應全面性調查並儘速改善之，以維護民眾之安全為是。西湖橋位於苗栗縣西湖鄉，本橋僅作現場非破壞性檢驗。

二、研究調查

(一)本研究調查項目步驟如下

1.現場非破壞性調查

包括試驗錘、超音波、鋼筋探測器、腐蝕電位測定儀等。

2.實驗室分析

包括試體描繪、強度試驗、中性化深度測試、透水試驗、比重、吸水率、化性分析等。

此等試驗方法請參閱第肆章。

* 省交通處港灣技術研究所助理

(二)調查結果及分析

1.現場非破壞調查：大埔橋

保護層厚度：3-4公分

試驗錘：除第二標讀數介於25~35之間，屬於中等級混凝土外，其餘均屬劣等混凝土，請參閱表3-1~表3-3。

超音波：大部份在2.5km/sec以下，是屬於劣等混凝土，請參閱表3-4。

腐蝕電位值：數值都超過600mV以上，根據報告指出，腐蝕電位值超過350mV以上，則鋼筋95%以上是腐蝕，因此可診斷內部鋼筋全部腐蝕。請參閱表3-5~表3-7。

2.實驗室試驗：大埔橋

試體描繪：請參閱圖 3-1

強度試驗：110kg/cm² (註：試體直徑68mm長度136mm)

中性化深度：32mm (註：酚酞指示劑測定)

透水係數： 1.08×10^{-8} m/sec

比重：2.26

吸水率：4.78%

化性分析：

深度(mm) \ 化學成份	CaO %	MgO %	SO ₃ %	Cl ⁻ %
0-10	65	1.14	0	0.18
10-20	65	1.19	0	0.12
20-30	65	1.18	0	0.11
30-50	65	1.71	0	0.41
50-100	65	5.51	0	0.73
100-150	65	2.78	0	0.32

綜合研判所得數據此橋全因力學上的破壞，由於載重大及疲勞返復作用，致使樑彎曲變形拉力區處混凝土剝落，鋼筋裸露造成全面腐蝕。

3. 現場非破壞調查：西湖橋

試驗錘：絕大部份讀數大於35，應屬優良混凝土。參閱表3-8及3-9。

超音波：均大於 3.0km/sec屬於優良混凝土。參閱表3-10。

腐蝕電位值：西側面(靠海面)均大於 600mV以上，東側面(不靠海面)介於 200-300mV之間，參閱表3-11及表3-12。

三、結構破壞原因探討

造成大埔橋破壞原因可歸納下列：

(一) 材料使用不當及施工不良

從鑽心試體描繪(圖3-1)可看出，級配不良， $\frac{1}{2}$ "左右之骨材含量過少，根據實驗室分析水泥含量亦僅11.5%，該樑寬只有35公分，內含鋼筋多支加上施工不良，由圖3-2、圖3-3可見粗骨材被兩支鋼筋夾位，係粗骨料粒徑過大與規範不合，(不得超過鋼筋淨距 $\frac{3}{4}$ ，寬度 $\frac{1}{5}$)致使鋼筋握裹強度及抗彎強度無法充分發揮，大大減低該樑應有之功能。

(二) 載重作用 (Loading)

該橋臨近工業區常有貨櫃車出入，然三十五年前設計並無法滿足現代需要，過大之載重，且混凝土抗張強度甚低；致使混凝土保護層產生裂縫並且剝落，又無適當修補措施，大氣中CO₂、水分容易進入造成鋼筋腐蝕，腐蝕狀況極為嚴重。另根據現場調查發現此橋應不會有衝擊作用(Impact)，因衝擊力大小常由車速來決定，該地因橋頭、橋尾有兩處大轉彎且為單線道，所以應不致有衝擊力產生，純粹為載重所引起。

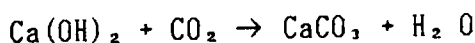
(三) 疲勞作用 (Fatigue)

混凝土構件受到反覆的動態荷重、在這等情況，破裂將會在應力遠小於靜力破壞強度時發生，此一現象稱之為疲勞破壞，本橋也由於反覆動態荷重作用並由

於材料不當及施工不良，在此惡性循環之下，保護層嚴重剝落，減少混凝土與鋼筋之間握裹力，導致撓度加大，裂縫向中性軸延伸且寬度增加。

(四) 混凝土中性化

混凝土硬化後，水泥水合生成物的氫氧化鈣 $[Ca(OH)_2]$ 呈強鹼性，鹼性環境中鐵表面會產生一層保護膜，鐵不會溶解成離子狀態。當混凝土表面受大氣中 CO_2 作用，則氫氧化鈣慢慢變成碳酸鈣。



其鹼性值降低，一旦PH值降低，則上述保護鋼筋條件喪失，水份及二氧化碳的作用，鋼筋就被腐蝕。

在有碳酸鈣存在下更會加速腐蝕進行，所以在中性化範圍內之鋼筋必定生銹。

本橋中性化深度在32mm可能是造成腐蝕之主因。

四、結論與建議

(一) 從現場非破壞性試驗方法來印証實驗室試驗結果非常吻合，根據研究報告指出，試驗錘讀數在25以下及超音波波速在2.5km/sec以下，均為劣等之混凝土。而大埔橋其兩種試驗都在劣等範圍，再經鑽心試體抗壓試驗值為 $110kg/cm^2$ 屬於劣等混凝土，故可証明使用非破壞性試驗方法來調查鋼筋混凝土結構物安全性是可行的。

(二) 根據研究報告指出，腐蝕電位值在200mV以下，大約有5%腐蝕；介於 200 mV~350 mV，有 50%左右腐蝕；大於 350mV，則超過 95%以上腐蝕；大埔橋全部大於600 mV，可斷定腐蝕相當嚴重。由調查發現混凝土剝落，混凝土透水係數大，大氣中二氧化碳、水份進入，致使全面腐蝕；所以今後材料選擇，良好品質控制是確保良好混凝土結構物最佳原則。

(三) 由四湖橋腐蝕電位值中可發現在靠海側並且雨水能直接濺濕處，其值均大於600 mV以上，而同在一支樑之靠陸側，雨水不易濺濕，其值介於 200-300mV之間，所以靠海側混凝土應儘可能使密實或作塗裝以延長其使用年限。

(四) 建議儘速研擬非破壞性檢查方法來對於全省公共結構物作全面性調查，作為維修重整之依據。

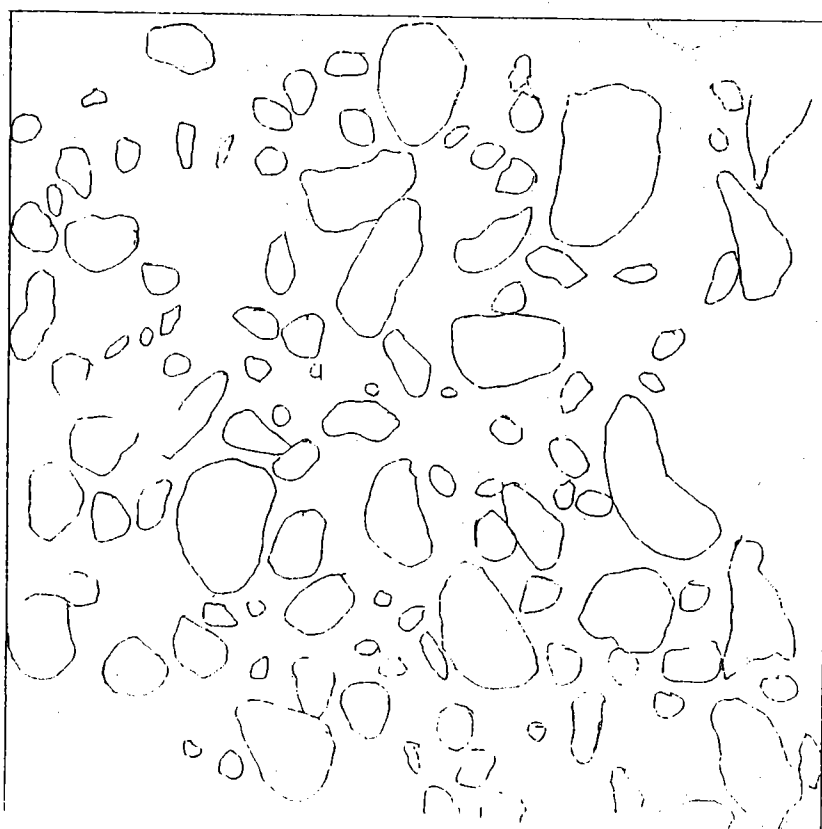


圖 3-1 鑽心試體表面描繪圖



圖 3-2 材料使用不當及施工不良，致使粗骨材沉澱底部



圖 3-3 材料使用不當及施工不良，致使粗骨材沉澱底部



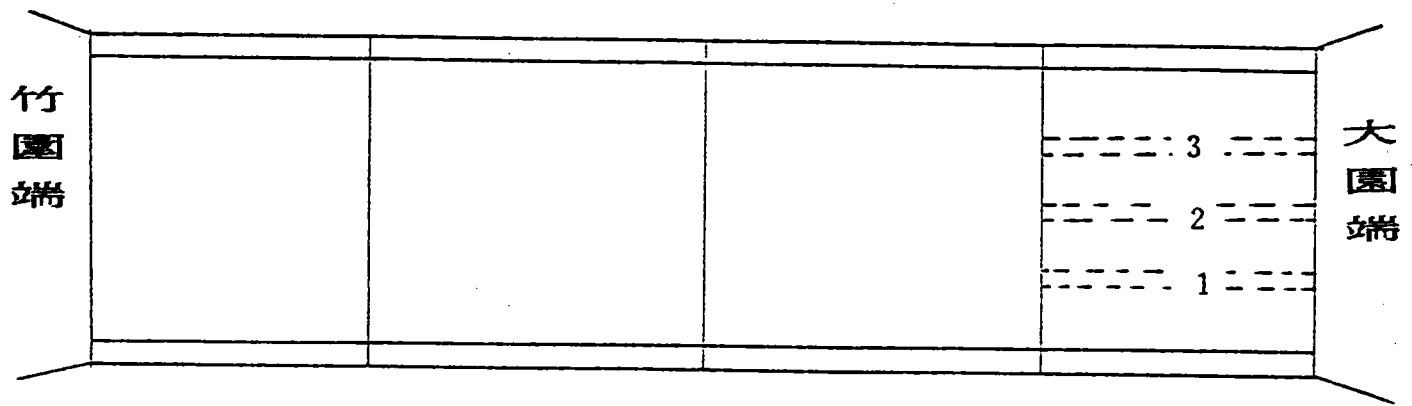
圖 3-4 大埔橋全貌



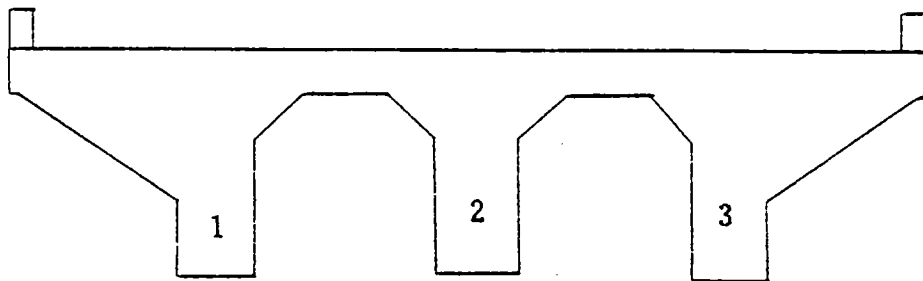
圖 3-5 現場超音波探測



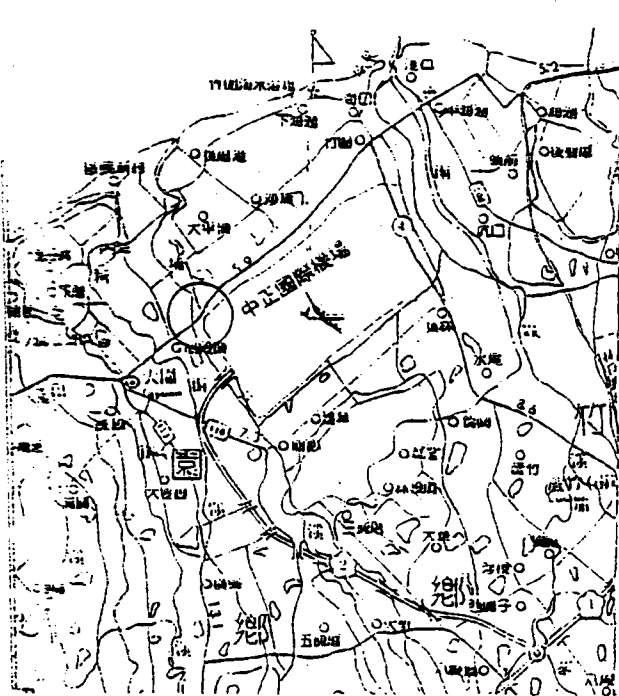
圖 3-6 現場腐蝕測定儀偵測



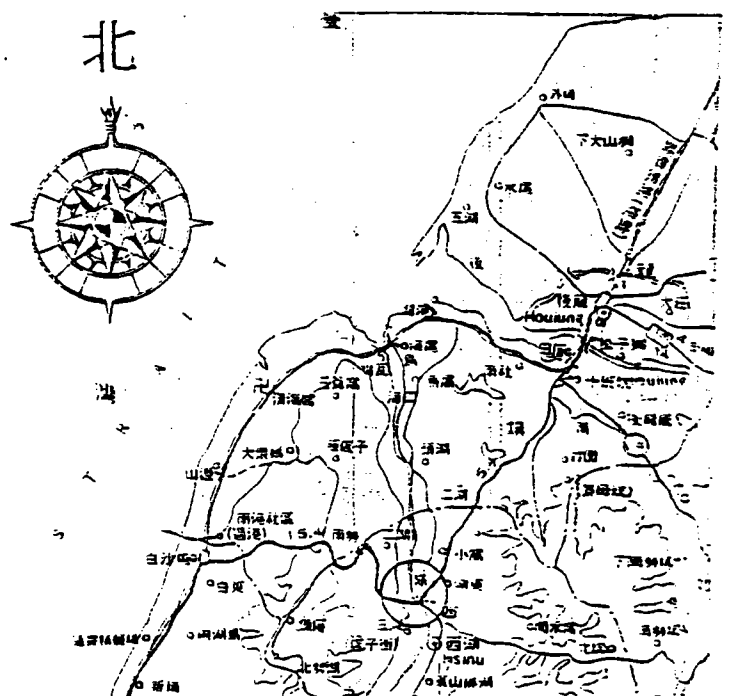
N



大埔橋示意圖



大埔橋位置圖



西湖橋位置圖

圖 3-7 大埔橋與四湖橋之示意圖

表 3-1 台15線大埔橋試驗值讀數

25	22	35	28	23	0	47	16	22	0	27	27	18	10	20	37	22	16	17	12	18	22	22	10	20	17	24	26	16	17	20			
26	16	28	32	18	0	24	0	0	0	0	16	20	0	0	18	10	16	27	10	23	12	10	0	10	18	14	0	12	0	12	17	20	16

一 樑 外 側

30	34	26	27	28	23	16	30	26	43	30	33	30	30	30	33	23	23	24	23	23	26	23	18	23	37	36	16	27	28	25	11	17	21	22	
20	28	26	26	30	26	16	28	22	29	28	25	16	0	0	0	0	0	0	23	11	18	25	20	18	16	17	16	19	23	0	25	27	15	0	20

一 樑 內 側

試驗值讀	預測強度	混凝土等級
< 25	172kg/cm ²	劣等
25~35	172kg/cm ² ~355kg/cm ²	中等
> 35	355kg/cm ²	優等

表 3-2 台15線大埔高式驗証讀數

二 標 外 側																																	
16	0	39	23	26	36	28	26	26	19	23	23	23	29	23	24	27	29	24	33	29	25	38	26	35	28	25	39	26	29	25	28	24	25
0	0	26	42	38	23	30	27	28	28	26	23	24	25	23	28	22	27	25	29	27	44	18	24	19	18	25	16	23	25	32	30	30	21

二 標 内 側																																		
12	28	24	31	28	28	30	25	28	24	27	24	26	28	28	28	27	23	27	15	36	28	28	19	23	15	18	25	25	30	29	27	28	25	27
27	25	23	25	28	26	30	34	22	23	23	25	24	24	22	27	25	21	33	23	16	16	25	21	21	25	21	17	18	18	26	28	28	28	31

表 3-3 台15線大柑嶺式驗車讀數

15	23	27	23	25	20	21	22	20	14	0	0	16	0	0	0	0	18	28	12	16	14	18	17	18	18	20	26	26	27	18	21	21	20	25
10	24	27	27	0	14	18	25	0	18	0	0	0	0	0	0	0	27	23	12	11	15	14	17	0	12	11	17	12	16	17	13	19	0	15

三標外側

21	23	20	16	22	18	23	16	17	17	17	14	17	17	17	20	20	18	21	16	0	0	10	17	12	13	22	11	0	23	26	28	10	18	0	11
24	18	23	22	11	22	15	15	16	21	14	14	0	0	0	22	10	12	0	0	0	0	14	11	16	0	14	16	18	12	25	24	13	22	10	0

三標內側

表 3-4 台15線大埔橋超音波波速

— x 2.3 2.8 2.1 1.4 x x 3.0 1.9 1.7 2.4 2.6 2.6 x x x 3.0 2.2 2.2 1.8 1.5 1.8 1.8 3.3 2.5 3.0 3.0 1.3 2.6 1.0 2.2 2.2 2.8 x x 1.8 1.8 x x x 1.0 1.5 x 1.7 x x x x 1.7 1.4 1.3 x x 1.3 1.8 x x 1.3 2.1 1.0 1.5 2.2 1.8	— 1.3 1.5 3.1 3.0 3.0 2.9 3.2 2.2 3.3 2.5 2.2 1.2 3.0 2.5 3.6 2.9 2.7 2.4 2.8 2.8 2.5 2.9 3.2 2.0 2.6 2.4 3.0 2.8 3.0 2.3 3.0 2.8 3.0 2.6 2.8 1.4 1.1 3.0 3.2 2.6 2.9 2.6 2.6 2.9 2.6 2.0 2.0 2.9 2.3 2.6 2.0 2.2 2.4 2.6 2.1 2.3 2.2 2.9 2.1 2.3 1.8 2.1 1.7 2.4 2.3 2.8 3.0 3.2 3.2 2.1	— 1.1 1.8 3.2 2.5 3.4 1.5 2.6 2.8 x x x x x 1.1 1.0 1.7 2.7 x x x x 2.1 1.3 1.5 3.6 2.8 3.0 3.4 2.8 2.2 2.6 x 2.6 3.0 2.8 x 1.1 1.0 1.2 x x x x x 1.5 x x x x 1.0 1.8 1.8 2.2 2.2 1.5 1.5 1.0
--	--	--

註：表中“x”為混凝土剝落無法精確測量深寬或混凝土內裂縫寬度以致超音波無法收到回傳訊號

超音波波速 km/sec	< 2.5 $2.5 \sim 3.0$ $3.0 <$
混凝土等級	劣等 中等 優等

表 3-5 台15線大埔高腐蝕電位值 單位: mV

一 樑 外 側	765	770	725	745	725	675	695	680	685	690	680	715	690	700	675	685	715	715	750	730	730	700	725	740	745	715	700	720	740						
	715	735	700	730	710	685	600	660	670	710	690	695	705	690	680	655	655	650	650	665	675	680	705	710	730	715	725	690	710	760	720	720	705	705	720

一 樑 底 側	835	785	855	840	745	755	760	760	835	825	775	800	800	760	745	825	790	745	780	775	660	725	715	735	745	770	745	725	710	685	715	710	655	690	670
	770	800	720	815	660	745	710	715	720	835	750	655	790	790	825	655	670	740	855	735	660	540	720	710	720	740	715	715	725	735	720	710	700	675	665

一 樑 內 側	785	790	845	815	810	830	835	825	840	850	850	840	845	855	815	810	790	765	825	835	845	810	795	805	795	825	790	775	810	825	800	785	780	845	830
	790	785	810	790	830	835	800	785	820	825	805	855	840	845	760	785	785	745	785	820	840	790	770	785	795	810	800	745	765	730	790	780	765	780	785

腐蝕電位值 (mV)	腐蝕機率 (%)
< 200	5
200~350	50
> 350	95

表 3-6 台15線大埔橋附近電位值 單位: mV

二樑外側	
815 835 780 755 755 770 760 780 740 755 745 750 740 750 770 780 775 795 800 840 805 810 810 825 815 795 760 770 750 770 770 760 765 760 780	
825 840 775 785 800 805 780 775 760 740 745 745 735 755 780 780 775 795 800 830 805 800 810 820 830 810 780 770 795 780 765 780 795 820	
二樑底側	
730 780 790 765 745 750 735 735 735 725 720 725 730 735 750 760 755 765 785 795 800 815 820 820 815 815 805 800 785 760 750 755 790 800 815	
705 770 790 775 775 745 735 720 715 725 715 720 735 745 755 790 790 785 780 790 805 805 795 775 770 775 755 760 750 770 800 805 800	
二樑內側	
805 825 810 770 745 705 695 695 695 720 730 735 735 760 770 765 750 735 760 790 825 805 815 835 845 845 820 780 770 790 790 745 725 735 730	
765 815 805 785 765 750 720 715 710 725 740 745 735 755 770 775 755 755 780 825 840 830 825 835 840 835 830 800 790 790 785 765 750 760 755	

表 3-7 台15線大埔高腐蝕電位值

單位: mV

三樑外側	
795 845 830 790 785 775 765 740 710 740 740 790 810 780 815 825 830 790 775 740 725 690 700 695 725 720 715 735 770 795 745 745 735 740 765	
760 805 800 745 710 730 735 700 690 720 745 750 760 800 815 835 815 790 770 765 685 690 670 690 740 715 715 740 765 740 725 705 705 730	
三樑底側	
760 705 710 700 675 655 670 690 715 720 715 710 765 775 790 725 795 770 740 750 675 675 655 660 665 680 665 670 690 695 690 675 665 645 650	
770 740 725 715 655 655 685 685 700 740 730 735 760 785 815 830 780 760 825 730 665 665 660 660 665 665 665 680 685 670 660 655 665	
三樑內側	
705 705 725 715 715 710 690 675 680 660 670 670 700 685 730 735 725 725 785 680 675 680 705 710 735 715 700 735 735 725 715 705 770	
685 705 710 715 705 695 670 655 680 655 655 650 390 720 710 720 715 715 680 680 640 670 720 675 680 725 695 695 720 725 725 705 695 705 760	

表 3-8 苗栗四湖橋第三節東側試驗值數

後龍←

34	36	30	30	35	36	31	36	43	40	43	43	38	33	36	46	33
37	34	33	34	21	23	33	33	41	48	35	37	43	31	43	28	30
44	47	47	41	41	18	26	44	40	41	33	45	47	46	49	49	45
40	37	45	35	37	38	41	37	37	43	35	38	46	48	51	30	40
27	38	41	39	46	36	30	38	36	39	46	45	33	46	40	40	26

41	44	44	30	30	36	32	44	46	38	33	42	35	41	45	43	24
46	39	41	30	34	44	42	48	46	48	35	43	47	28	34	41	38
42	36	32	42	38	40	36	44	33	36	43	48	46	39	36	47	36
34	40	34	38	37	34	42	34	44	37	42	31	22	43	41	42	41
38	32	39	30	41	36	29	38	24	21	36	32	36	41	37	34	42
43	42	37	24	39	48	42	41	39	50	39	33	39	33	41	38	32
36	35	40	17	40	36	44	46	45	34	40	42	28	35	43	33	36
38	42	33	38	39	30	35	39	30	35	30	35	39	27	38	42	33
41	46	40	37	40	46	41	45	40	42	39	41	36	37	37	40	46
29	23	21	30	29	32	30	30	30	37	27	28	23	23	21	30	29

→通霄

41	40	39	36	38	44	37	43	38	39	38	38	37	40	37	41	40
31	41	30	40	33	40	36	38	42	39	35	39	41	42	43	37	46
35	36	36	41	41	36	46	39	40	44	44	39	43	46	41	34	44
31	28	32	38	44	44	44	32	43	44	46	45	39	37	41	44	41
27	31	32	24	34	31	46	24	38	41	37	36	44	40	46	41	37

試驗值數	預測強度	混凝土等級
< 25	172kg/cm ²	劣等
25~35	172kg/cm ² ~355kg/cm ²	中等
> 35	355kg/cm ²	優等

表 3-9 苗栗四湖橋第三節西側橋式驗鍾讀數

後龍←

30	29	37	32	35	34	35	37	30	28	26	34	38	38	40	39	36	37
33	38	43	38	38	35	37	38	25	32	37	25	34	34	28	35	36	30
40	33	40	41	37	35	37	42	39	35	40	39	38	35	40	37	40	34
43	39	39	37	41	43	40	40	35	32	38	40	42	23	37	45	30	31
26	23	32	33	26	35	28	37	30	33	28	30	36	26	32	29	36	33

35	38	43	39	32	43	39	38	36	32	41	39	39	36	43	38	37	36	41	39	33	39	36	33	38	28	31	37	38	25	34	34	37	38	37	31	35	
34	37	36	32	36	37	40	38	40	39	42	34	36	41	34	42	41	35	34	40	37	39	40	35	35	28	18	25	37	30	34	40	30	37	37	35	37	
41	33	40	43	43	38	38	39	40	42	39	40	39	39	40	37	38	42	29	40	38	42	39	35	35	35	35	35	37	35	38	35	40	35	37	39	39	37
48	38	42	38	40	35	37	38	34	38	37	42	38	38	37	35	35	35	40	38	40	39	33	35	43	37	43	37	33	42	43	40	35	35	40	36	35	35
27	43	38	36	38	38	22	38	26	30	38	38	25	44	31	34	32	35	39	31	36	42	33	37	38	37	30	37	28	34	30	30	38	29	30	15	16	

→通霄

38	33	34	38	39	39	42	40	40	34	42	44	40	31	36	38	33	38
34	32	34	36	33	35	40	40	44	36	38	28	44	38	38	40	34	36
41	38	44	41	40	42	44	40	45	44	28	38	41	40	36	44	41	40
34	37	41	43	41	40	34	38	38	44	39	38	40	34	43	43	39	36
37	36	36	37	37	32	44	25	36	38	36	35	38	29	28	31	30	31

表 3-10 苗栗四湖橋第三節超音波波速 單位kg/sec

後龍←

5.1	5.1	5.4	5.3	5.0	5.2	5.0	5.3	5.4	5.1	5.3	5.1	5.3	5.5	5.8	5.9
5.8	6.0	5.3	5.0	5.9	6.2	6.3	6.0	5.7	5.8	5.9	5.1	4.9	4.9	5.1	5.3
5.6	6.0	5.9	5.8	5.0	5.8	5.7	5.1	5.0	4.9	5.6	5.5	5.3	5.3	5.6	5.0
5.7	4.9	5.9	6.0	5.8	4.8	5.8	5.6	4.9	5.8	5.5	5.6	5.7	5.6	5.3	4.7
3.7	3.8	4.1	3.8	3.8	3.8	4.0	3.7	4.0	3.3	3.8	4.0	3.8	3.8	3.7	3.8

5.3	5.3	5.3	5.3	5.2	5.2	5.3	5.1	5.0	4.9	5.0	5.0	5.1	5.0	5.4	5.1
4.7	5.2	5.9	5.8	5.3	5.6	5.3	5.3	4.9	5.5	5.4	5.7	5.6	5.3	5.6	5.4
5.4	5.3	5.7	6.2	4.7	5.5	5.3	5.0	5.0	5.6	5.3	5.4	5.7	5.3	4.9	5.3
5.9	5.9	5.9	6.3	5.9	5.1	4.9	5.6	5.6	4.9	5.6	5.5	5.9	5.6	5.3	5.2
3.1	3.1	3.0	3.6	3.1	3.8	3.8	3.2	3.0	3.0	3.4	3.8	3.8	3.8	3.4	3.6
3.9	4.2	3.2	3.8	3.9	3.1	3.3	3.1	4.2	3.1	3.5	3.7	3.0	3.4	3.0	3.1
5.2	5.3	5.0	5.0	5.2	5.6	5.4	5.4	5.3	5.2	5.3	5.3	5.2	5.1	5.0	5.2
5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3
5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5
5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6
5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7
5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8
5.9	5.9	5.9	5.9	5.9	5.9	5.9	5.9	5.9	5.9	5.9	5.9	5.9	5.9	5.9	5.9
6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
6.1	6.1	6.1	6.1	6.1	6.1	6.1	6.1	6.1	6.1	6.1	6.1	6.1	6.1	6.1	6.1
6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2
6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3
6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4
6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5
6.6	6.6	6.6	6.6	6.6	6.6	6.6	6.6	6.6	6.6	6.6	6.6	6.6	6.6	6.6	6.6
6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7
6.8	6.8	6.8	6.8	6.8	6.8	6.8	6.8	6.8	6.8	6.8	6.8	6.8	6.8	6.8	6.8
6.9	6.9	6.9	6.9	6.9	6.9	6.9	6.9	6.9	6.9	6.9	6.9	6.9	6.9	6.9	6.9
7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0
7.1	7.1	7.1	7.1	7.1	7.1	7.1	7.1	7.1	7.1	7.1	7.1	7.1	7.1	7.1	7.1
7.2	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2
7.3	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3
7.4	7.4	7.4	7.4	7.4	7.4	7.4	7.4	7.4	7.4	7.4	7.4	7.4	7.4	7.4	7.4
7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5
7.6	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6
7.7	7.7	7.7	7.7	7.7	7.7	7.7	7.7	7.7	7.7	7.7	7.7	7.7	7.7	7.7	7.7
7.8	7.8	7.8	7.8	7.8	7.8	7.8	7.8	7.8	7.8	7.8	7.8	7.8	7.8	7.8	7.8
7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9
8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0
8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1
8.2	8.2	8.2	8.2	8.2	8.2	8.2	8.2	8.2	8.2	8.2	8.2	8.2	8.2	8.2	8.2
8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3
8.4	8.4	8.4	8.4	8.4	8.4	8.4	8.4	8.4	8.4	8.4	8.4	8.4	8.4	8.4	8.4
8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5
8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6
8.7	8.7	8.7	8.7	8.7	8.7	8.7	8.7	8.7	8.7	8.7	8.7	8.7	8.7	8.7	8.7
8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8
8.9	8.9	8.9	8.9	8.9	8.9	8.9	8.9	8.9	8.9	8.9	8.9	8.9	8.9	8.9	8.9
9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0
9.1	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1
9.2	9.2	9.2	9.2	9.2	9.2	9.2	9.2	9.2	9.2	9.2	9.2	9.2	9.2	9.2	9.2
9.3	9.3	9.3	9.3	9.3	9.3	9.3	9.3	9.3	9.3	9.3	9.3	9.3	9.3	9.3	9.3
9.4	9.4	9.4	9.4	9.4	9.4	9.4	9.4	9.4	9.4	9.4	9.4	9.4	9.4	9.4	9.4
9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5
9.6	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6
9.7	9.7	9.7	9.7	9.7	9.7	9.7	9.7	9.7	9.7	9.7	9.7	9.7	9.7	9.7	9.7
9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8
9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9
10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0

→通霄

5.3	5.1	5.5	5.6	5.2	5.6	5.1	5.6	5.6	5.3	5.4	5.2	5.3	5.5	5.3	5.6
5.9	5.4	5.6	5.3	4.6	4.1	5.1	4.4	4.4	4.4	5.3	5.3	5.2	5.3	5.7	5.0
5.8	5.5	5.1	5.0	5.3	5.3	5.7	5.6	5.3	5.3	5.1	5.3	4.8	5.2	5.1	5.5
6.1	5.9	5.8	5.7	5.6	5.7	6.0	5.6	4.8	5.6	5.5	5.8	5.6	5.3	5.5	5.8

超音波波速 km/sec	混凝土等級
< 2.5	劣等
2.5~3.0	中等
3.0 <	優等

表 3-11 苗栗西湖橋第三節西側腐蝕電位值 單位mV

後龍←

590	535	535	510	510	665	650	660	660	650	660	655	675	665	655	675	670	670
625	620	610	605	635	680	700	675	675	670	670	695	675	660	680	655	680	680
590	590	615	575	565	665	675	655	655	655	675	680	650	645	675	670	665	665
705	665	710	675	665	685	695	675	660	660	665	700	670	655	675	670	665	665
705	675	715	695	695	690	680	705	685	680	685	670	690	680	690	680	680	685

635	620	645	635	650	650	650	645	640	655	650	660	645	640	630	665	645	640	655	640	670	665	655	670	660	670	665	660	680	680	720	700	695	700	705		
655	645	655	645	645	655	635	670	655	660	675	665	675	670	655	650	655	660	640	645	670	660	685	680	670	690	695	680	680	680	680	680	680	680	700	705	
655	650	670	675	645	665	660	670	655	650	690	695	700	670	655	650	655	645	670	665	680	670	680	670	665	660	690	715	700	695	715	765	740	710	720	715	
670	660	725	675	680	685	655	705	670	670	690	680	710	680	655	675	660	770	680	705	685	660	675	690	680	665	650	670	700	675	700	710	740	740	735	715	725
730	695	725	740	720	710	700	710	710	720	745	730	720	695	670	695	700	740	735	700	710	690	710	710	690	695	700	715	700	710	710	745	780	805	825	815	

→道南

695	715	740	710	695	690	675	680	680	655	695	105	120	090	075	560	570	540
725	735	740	725	695	690	670	690	695	675	530	530	525	505	520	555	560	550
745	740	730	715	690	680	665	680	680	675	555	560	565	530	535	580	555	565
765	750	740	715	695	685	685	685	665	675	570	580	585	570	550	605	595	580
805	755	720	715	705	690	685	695	695	695	595	575	620	585	570	605	625	620

腐蝕電位值 (mV)	腐蝕速率 (%)
< 200	5
200~350	50
2350	95

表 3-12 苗栗四湖鄉第三節東側區域電位值 單位mV

後龍←

255	220	235	310	300	225	230	245	330	240	220	250	220	210	225	325	235
270	270	280	285	290	255	240	290	280	240	235	250	225	210	240	230	295
305	300	315	295	290	265	260	290	295	280	255	250	250	220	270	250	280
280	280	300	310	335	255	295	320	330	275	240	270	300	250	285	280	290
270	245	275	280	295	260	255	280	280	300	255	330	310	300	325	240	260

300	260	280	255	215	215	225	250	270	265	215	230	255	225	205	220	210	220	230	215	250	210	270	215	215	205	240	215	200	175	265	250	255	215	190	220	225
285	300	325	300	295	240	245	245	235	250	265	275	275	255	235	270	245	295	250	230	255	235	250	215	230	235	245	250	250	260	255	290	320	230	215	285	275
290	295	340	310	275	270	255	285	310	280	265	270	295	295	275	250	275	300	235	235	265	230	265	255	235	270	250	255	215	230	330	320	340	270	250	330	285
290	315	340	315	320	315	285	310	295	295	280	270	330	310	295	305	270	280	260	265	255	290	305	250	275	295	305	320	250	270	375	340	355	310	285	350	345
300	290	320	300	305	275	325	340	270	295	315	245	280	305	310	290	295	290	255	270	260	270	285	240	280	275	245	265	250	265	305	285	280	300	235	320	310

→通霄

190	185	205	215	190	175	165	200	185	175	170	165	210	190	165	190	160	190
210	200	235	235	200	205	205	210	205	200	210	210	200	215	215	205	210	190
245	230	250	260	240	200	185	220	220	225	225	195	235	210	220	255	205	230
265	250	300	310	275	225	230	245	240	225	250	240	265	240	250	270	240	245
230	240	245	235	235	210	205	220	210	200	250	215	225	220	240	315	285	260

肆、港灣結構物腐蝕調查

陳 桂 清※

一、概要

混凝土在常態環境條件下為極具耐久性之材料。但港灣混凝土結構物因長年處於海洋嚴酷的腐蝕條件下，混凝土結構物易受到海水鹽份、硫酸鹽類的侵入，構造物中之混凝土品質開始劣化，發生龜裂、剝落、鋼筋腐蝕....等不良現象，時間一久，構造物加速劣化，最後將危及安全，縮短構造物使用年限。

台灣位處於亞熱帶，四面環海，為一典型的海島型氣候，終年高溫多濕，是一個構造物極易受到鹽害發生腐蝕之海洋環境。過去由於科技不發達，國人一般都忽略腐蝕的嚴重性，因此在公共設施，工程施工，設計上均缺乏考慮可能造成腐蝕的因子，結果工程完工後，使用未達年限即陸續發現嚴重的品質缺失，甚至影響整個設施的使用安全，例如澎湖跨海大橋僅使用十數年即發生嚴重的腐蝕而報廢[1]，即為一個最好的例子。近年來，由於科技的進步，資訊的發達，工程人員已漸漸了解防蝕的重要性，同時防蝕工程已列為國家發展重點科技之一，即將整體規劃國內的防蝕策略與規範。因此，建立港灣混凝土結構物的防蝕規範，以做為將來建造新港，在工程設計，施工上的參考與依據已刻不容緩。

本研究乃以台灣本島現有五大港口(基隆港、台中港、高雄港、花蓮港、蘇澳港)之老舊碼頭結構物為調查對象，進行現場目測觀察，非破壞性試驗及鑽心取樣，並配合試驗室內做化學與物理方面的分析，同時並採用精密儀器，諸如 SEM,EDX ,X-Ray繞射之分析，微觀混凝土結構物發生劣化之形成物成份。綜合上述各種分析資料，可研判混凝土結構物目前的品質狀況，以及發生腐蝕劣化的可能因子，最後建立規範。

※ 省交通處港灣技術研究所副研究員

二、結構物概要

本研究乃以台灣本島現有五大港口之老舊碼頭結構物為調查對象，各港口碼頭平面佈置及鑽心取樣(Core Drilling)之相關位置如圖 4-1 至圖 4-5 所示。各港口鑽心取樣之碼頭其簡略背景資料如表 4-1所示。碼頭型式及其構造斷面圖如圖 4-6 至圖 4-10。

三、調查與試驗

(一)調查方法

港灣鋼筋混凝土結構物之品質發生耐久性的問題原因很多，包括保護層不足、混凝土施工品質不佳，加上結構體常年浸漬、曝露於海洋嚴酷腐蝕的環境下，海水中之硫化物(SO_4^{2-})的侵蝕，造成構造物之龜裂或剝落，氯化物(Cl^-)的滲入，大氣中二氧化碳及濕氣的侵入，更加速混凝土品質的劣化、鋼筋的腐蝕，為探討結構物可能發生劣化、腐蝕的原因及其影響性，因此必須進行非破壞性之試驗及鑽心取樣並做化性及物性的分析。

1.現場非破壞性試驗(In Situ/Nondestructive Testing)[2]

(1)現場實地觀測(Field Observation)

由各港務局提供老舊碼頭並支援小型交通船赴現場，實地觀察碼頭結構體外表是否有龜裂或剝落損壞情形，並拍照繪圖紀錄之。此項工作依 ACI, 201,R-68 規範辦理。

(2)試驗錘試驗(Test Hammer Test)

本試驗依 ASTM C-805規範執行。測試範圍以鑽心取樣位置為中心點，一公尺見方內，每相隔十公分之距離繪一測試點，作一網狀分佈測試。利用試驗錘撞擊混凝土表面，發生反彈作用，根據反彈力可推導混凝土表面強度，判斷混凝土表面的品質狀況。

(3)鋼筋測定儀試驗(R-Meter Test)

此種儀器，鋼筋受到磁場作用會發生偏離，因此可測知鋼筋位置，並由磁力的強弱可辨別鋼筋混凝土保護層之厚度，同時可供鑽心取樣位置選定之參考。

2. 混凝土結構體鑽心取樣 (Core Test)

各港口老舊碼頭結構體雖然其建造日期不一，有的已使用五、六十年（如花蓮港），有的僅使用七、八年（如蘇澳港），但常年浸漬、曝露於海洋環境下，混凝土之品質狀況將發生變化，這種狀況依海水鹽份及硫酸鹽份侵入的程度與當初建造或許在設計、施工及使用材料上有所不同而定。為瞭解混凝土劣化的致因，因此必須做混凝土結構體鑽心取樣，利用化學分析方法及物理分析來研判。本研究鑽心取樣位置大都位於潮汐帶及飛沫帶之間。

(二) 試驗室分析

試驗室分析工作包括下列各項：

1. 鑽心試體描繪

將試體表面展開描繪，由此資料粗略可看出當時使用混凝土配比是否適當、老化現象....等。

2. 抗壓試驗 (Compressive Strength Test)

試體作試驗錘及抗壓試驗、比較分析其抗壓強度，本試驗依 ASTM C39-84 規範執行。

3. 透水試驗 (Permeability)

本試驗之目的在測定混凝土之透水係數，間接檢定混凝土之水密性。試驗原理，即用圓柱形鑽心試體將一定壓力之水，在單位時間內自單位面積流出水量的多寡，利用 Darcy 定理，即可求出透水係數。

4. 中性化試驗 (Carbonation Depths Test) [3]

將鑽心試體劈裂後，利用化學指示劑（酚酞），塗抹於試體劈裂面，觀測劈裂面顏色之變化，量出碳化的深度。

5. 比重試驗 (Gravity Test)

依 ASTM C-642 規範執行。

6. 吸水率試驗 (Absorption Test)

依 ASTM C-642 規範執行。本試驗目的在了解混凝土結構物吸水狀況。

7. 水泥含量分析 (Cement Content Analysis)

各港口鑽取之試體依 ASTM C85-66 之規範處理，測定水泥含量。

8. 化學成份分析 (Chemical Analysis)

各港口鑽取之試體，直徑 3"，深度約 15-20 公分，如圖 4-11 至圖 4-12 所示。試體從表面 (亦即與海水接觸面) 算起，依次以深度 1 公分、2 公分、3 公分、3 至 5 公分、5 至 10 公分、10 至 15 公分等切割之，見圖 4-13 所示。將切割後之每一深度試體，依 ASTM 規範處理，然後研磨成粉狀顆粒，此為化學分析之試樣，然後再依 ASTM C114-85，進行 CaO 、 MgO 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 含量之化學分析。

9. 掃描式電子顯微鏡分析 (Scanning Electron Microscopy)

各試體經此精密儀器，可分析出混凝土劣化之形成物，及惡化現象。

四、結果與討論

(一) 現場非破壞性試驗

1. 現場實地觀測各港口鑽心取樣之老舊碼頭壁面，在潮汐帶、飛沫帶以上，壁面外觀均呈完好，沒有明顯龜裂、剝落、吐銹.... 等不良現象。各港碼頭壁面 (除高雄港外) 均有海生物 (諸如貝類等) 棲息於壁面上，造成表面些微浸蝕。惟高雄港第四船渠、第九四船渠碼頭壁面，有厚油污存在，此為高雄港位於重工業區附近，廢水排放至港內，加上港內拆船油污外洩所致。

2. 試錘試驗

各港口碼頭結構體其試錘試驗結果列於表 4-2，從表中可看出各碼頭結構體混凝土表面品質尚為良好。(根據文獻顯示其試錘數值與混凝土表面之品質關係如表 4-3 所示 [3]。)

3. 鋼筋保護層厚度

各港口鑽心取樣之碼頭壁面，經鋼筋探測儀量測，其保護層平均厚度均在 40 mm 以上。

(二) 混凝土結構體之鑽心取樣

利用鑽心取樣設備，赴各港做鑽心取樣，鑽心試體如圖 4-11 至圖 4-12 所示。試體攜回試驗室作化學成份及物理性分析。

(三)試驗室分析

1.鑽心試體外觀描繪，如圖 4-14 所示。

大多數之試體，其粗細骨材粒徑懸殊，骨材分佈不均。例如花蓮港舊東堤粗骨材最大粒徑為50mm，又粗骨材粒料多呈扁平狀，容易造成浮水現象，使骨材界面處停滯許多氣泡無法排除，增加混凝土之透水性，一旦受到外力，極易沿著界面處產生龜裂，加速混凝土濕氣及氯離子之滲入擴散，增加腐蝕速率。又高雄港第四船渠碼頭，水泥漿含量少，大多數是骷髏石堆積而成的，因此從試體外觀亦可窺略一二。

2.抗壓強度試驗

各港口鑽心試體抗壓強度如表4-2 所示。從表中可看出花蓮港舊東堤抗壓強度相當差，又該堤防目前已有多處損壞，堤防嚴重下陷及掏空，準備進行堤防固結修護。高雄港第四船渠碼頭，抗壓強度亦很差，經鑽心取樣，發現結構體大多數是骷髏石堆積而成的，水泥漿含量少，因此抗壓效果很差。

3.透水試驗

各港口混凝土試體其透水係數如表4-2 所列。從表中可看出，各碼頭試體之透水係數極高，超過臨界值($K \leq 10^{-10}$ m/sec)甚多[5]，因此可粗略判定試體之孔隙極大，混凝土配比不當，或是施工不良等造成。此研判與試體外觀描繪，大致配合。由於混凝土透水率高，海水易於侵入混凝土，將起化學反應而造成破壞。

4.比重試驗

結果列於表 4-2。

5.吸水試驗

結果列於表 4-2。

6.中性化深度試驗

結果列於表 4-3，從表中可看出CO₂ 浸入在試體內起化學反應，生成 CaCO₃，原可填塞混凝土孔隙及降低滲透性或阻止海水再侵入混凝土內部，但易與硫酸鹽類(SO₄²⁻)起作用，生成鈣矾石(Ettringite)而造成混凝土體積膨脹而發生龜裂[6]。

7. 水泥含量分析

按 ASTM C85-66規範分析，各鑽心試體水泥含量如表 4-4所示。依富級配混凝土 (1:2:4) 之配比混凝土中，水泥含量至少應佔有14 % 以上。從表中可看出有些試體水泥含量偏低。上述之分析結果，亦可能係實驗誤差所造成，但至少可看出其混凝土品質甚不穩定，亦即施工品質不良。

8. 化學成份分析

各港口碼頭之鑽心試體，其化學成份如圖 4-15至圖 4-23所示，實驗數據參考表4-5 至表 4-13 所示。由於各港結構體常年浸漬於海洋環境中，因此混凝土的化學成份已起了明顯變化， MgO ， SO_4^{2-} ， Cl^- 之含量已明顯超過原來的標準[6]。

9. 掃描式電子顯微鏡(SEM)分析

表 4-14 為鑽心試體經SEM分析之結果。

圖4-24可明顯看出基隆港W.4號碼頭鑽心試體在1-2公分深度已有Ettringite (鈣矾石， $C_3A \cdot CaSO_4 \cdot 31H_2O$) 針狀結晶物，顯示此處受硫酸鹽嚴重侵蝕的現象。圖 4-25 顯示基隆港W.14號碼頭鑽心試體在 2-3公分深度有許多氯離子出現，形成鈣氯鋁石(Monochloroaluminate, $C_3A \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$) 有害物質。圖 4-26顯示基隆港W.14 號碼頭鑽心試體在 2-3公分深度亦有片狀之氫氧化鎂 (Brucite, $Mg(OH)_2$) 形成。圖4-27為基隆港W.14號碼頭鑽心試體在 3- 5公分處，圖中圓點顯示混凝土受到 CO_2 氣體的侵入而碳化形成碳酸鈣 (Calcite, $CaCO_3$) 的證據，針狀如線之部份即為Ettringite[7]。

綜合上述之物性、化性及 SEM微觀分析，各港口碼頭鋼筋混凝土結構體之狀況如后：

基隆港

W. 4號碼頭

項目	目前狀況
1.結構體外觀	: 仍然良好, 壁面有貝類生物棲息, 壁面有生物孔蝕現象。
2.試錘讀數	: 30 (混凝土品質在平均值以下)
3.抗壓強度	: 219 kg/cm ²
4.水泥含量	: 6.80 % (偏低許多)
5.中性化深度	: 2.5mm
6.化學成份	: MgO, SO ₃ ²⁻ , Cl ⁻ 含量均有明顯變化
7.Cl ⁻ 滲透深度	: 約 5cm 左右
8.SEM微觀	: 在試體中已形成劣化混凝土中品質之有害物質存在 (諸如 Ettringite, Portlandite, Monochloroaluminate等)。
9.透水率	: —
10.比重	: —
11.吸水率	: —

W. 14號碼頭

目前狀況
仍然良好, 壁面略有孔蝕。
34 (混凝土品質在平均值以下)。
198kg/cm ²
5.98 %
3.0mm
MgO, SO ₃ ²⁻ , Cl ⁻ 含量均有明顯變化。
—
在試體中已形成劣化混凝土中品質之有害物質存在 (諸如 Ettringite, Portlandite, Monochloroaluminate 等)。
2.03×10 ⁻¹¹ m/sec
2.25
5.07 %

高雄港

第四船渠碼頭

項目	目前狀況
1. 結構體外觀	: 尚為良好，壁面有厚油污存在，表面有孔蝕現象。
2. 試錘讀數	: 28 (混凝土品質在平均值以下)
3. 抗壓強度	: 126kg/cm^2
4. 水泥含量	: 5.17 %
5. 中性化深度	: 20mm
6. 化學成份	: MgO , SO_3^{2-} , Cl^- 含量均有明顯變化。
7. Cl^- 滲透深度	: 約 10cm 左右
8. SEM微觀	: 在試體中已形成劣化混凝土中品質之有害物質存在 (諸如 Ettringite, Portlandite, Monochloroaluminate等)。
9. 透水率	: —
10. 比重	: —
11. 吸水率	: —

第九船渠碼頭

目前狀況
仍然完好，壁面有厚油污存在，表面略有孔蝕現象。
38 (混凝土品質仍然完好)
262kg/cm^2
—
3.0mm
MgO , SO_3^{2-} , Cl^- 含量均有明顯變化。
約 3cm 左右
在試體中已形成劣化混凝土中品質之有害物質存在。 (諸如 Ettringite, Portlandite Monochloroaluminate 等)。

$5.95 \times 10^{-8} \text{ m/sec}$
 2.30
 5.78 %

花蓮港

3號碼頭

項目	目前狀況
1.結構體外觀	: 尚為良好，壁面有貝類生物棲息，壁面有生物孔蝕現象。
2.試錘讀數	: 34 (混凝土品質在平均值以下)
3.抗壓強度	: 207kg/cm^2
4.水泥含量	: 8.39 %
5.中性化深度	: 4.0mm
6.化學成份	: MgO , SO_3^{2-} , Cl^- 含量均有明顯變化。
7. Cl^- 滲透深度	: 約 3cm 左右
8.SEM微觀	: 在試體中已形成劣化混凝土中品質之有害物質存在。 (諸如 Ettringite, Portlandite, Monochloroaluminate等)。
9.透水率	: 4.61×10^{-10}
10.比重	: 2.55
11.吸水率	: 2.36 %

舊東堤

目前狀況
仍然完好，然部份地區有掏空下陷。
32 (混凝土品質在平均值以下)
96 kg/cm^2
10.59 %
11.0mm
MgO , SO_3^{2-} , Cl^- 含量均有明顯變化。
約 5cm 左右
在試體中已形成劣化混凝土中品質之有害物質存在。 (諸如 Ettringite, Portlandite, Monochloroaluminate 等)。
$2.61 \times 10^{-11}\text{ m/sec}$
2.41
2.80 %

蘇澳港

2號碼頭

項目	目前狀況
1.結構體外觀	: 尚為良好，壁面有貝類生物棲息，壁面有生物孔蝕現象。
2.試錘讀數	: 31 (混凝土品質在平均值以下)
3.抗壓強度	: $150\text{kg}/\text{cm}^2$
4.水泥含量	: 10.08 %
5.中性化深度	: 3.9mm
6.化學成份	: MgO , SO_3^{2-} , Cl^- 含量均有明顯變化。
7. Cl^- 滲透深度	: 約 2cm 左右
8.SEM微觀	: 在試體中已形成劣化混凝土中品質之有害物質存在。 (諸如 Ettringite, Portlandite, Monochloroaluminate等)。
9.透水率	: 6.48×10^{-10}
10.比重	: 2.30
11.吸水率	: 7.04 %

10號碼頭

目前狀況
尚為良好，壁面有貝類生物棲息，壁面有生物孔蝕現象。
35 (混凝土品質在平均值以下)
—
—
—
MgO , SO_3^{2-} , Cl^- 含量均有明顯變化。
約 5cm 左右
在試體中已形成劣化混凝土中品質之有害物質存在。 (諸如 Ettringite, Portlandite Monochloroaluminate 等)。
$6.0 \times 10^{-9} \text{ m/sec}$
2.35
4.45 %

五、結論與建議

(一)結論

五大港口碼頭結構物從外觀，以及現場非破壞性試驗上，看出鋼筋混凝土結構體之狀況仍然完好，但從化學分析以及 X-Ray、SEM 等儀器分析下，發現結構體之內部混凝土的品質已發生變化，混凝土中之化學成份已起明顯變化，海水鹽份(Cl^-)亦已滲入結構體內部10公分左右；又配合 X-Ray及 SEM的分析，在結構體內已發現有危害混凝土品質的形成物出現，諸如 Ettringite, Calcite, Portlandite, Brucite, Monochloroaluminate 等。這些形成物將破壞混凝土的品質，造成剝落、龜裂等現象。而 Cl^- 的滲入，將腐蝕結構體中的鋼筋，造成鋼筋體積的膨脹，加速導致結構體的龜裂。

(二)建議

1. 本島地處極易腐蝕之海洋環境，至今尚未建立海洋環境下之預力及鋼筋混凝土結構物之設計與施工規範，請政府有關單位儘速檢討並訂定規範，以確保工程品質。
2. 國內有關R.C及P.C腐蝕調查研究、維修技術、經濟效益及實務工程經驗等之研究心得，應定期舉行學術研討會，以推動國內海洋混凝土之研究技術水準，確保工程結構與安全。
3. 在海洋混凝土結構物設計規劃時，必須作海域環境條件下，防蝕材料選用及施工技術等之評估。

六、參考文獻

1. "澎湖跨海大橋腐蝕調查研究" 港灣技術研究所, 1987
2. Malhotra, V.M. "In Situ/Nondestructive Testing of Concrete"
3. Currie, R.J. "Carbonation Depths in Structural-Quality Concrete"
4. Woodrow, Taylor "Concrete in the Ocean No. 5"
5. Gjorv, O.E. "Durability of Reinforced Concrete Wharves in Norwegian Harbors"

6. Lea, F.M. " The Chemistry of Cement and Concrete 3rd. Ed."
7. "Performance of Concrete in Marine Enivroment", ACI SP - 65
8. " ASTM annual book vol. 04.02, 1986 "

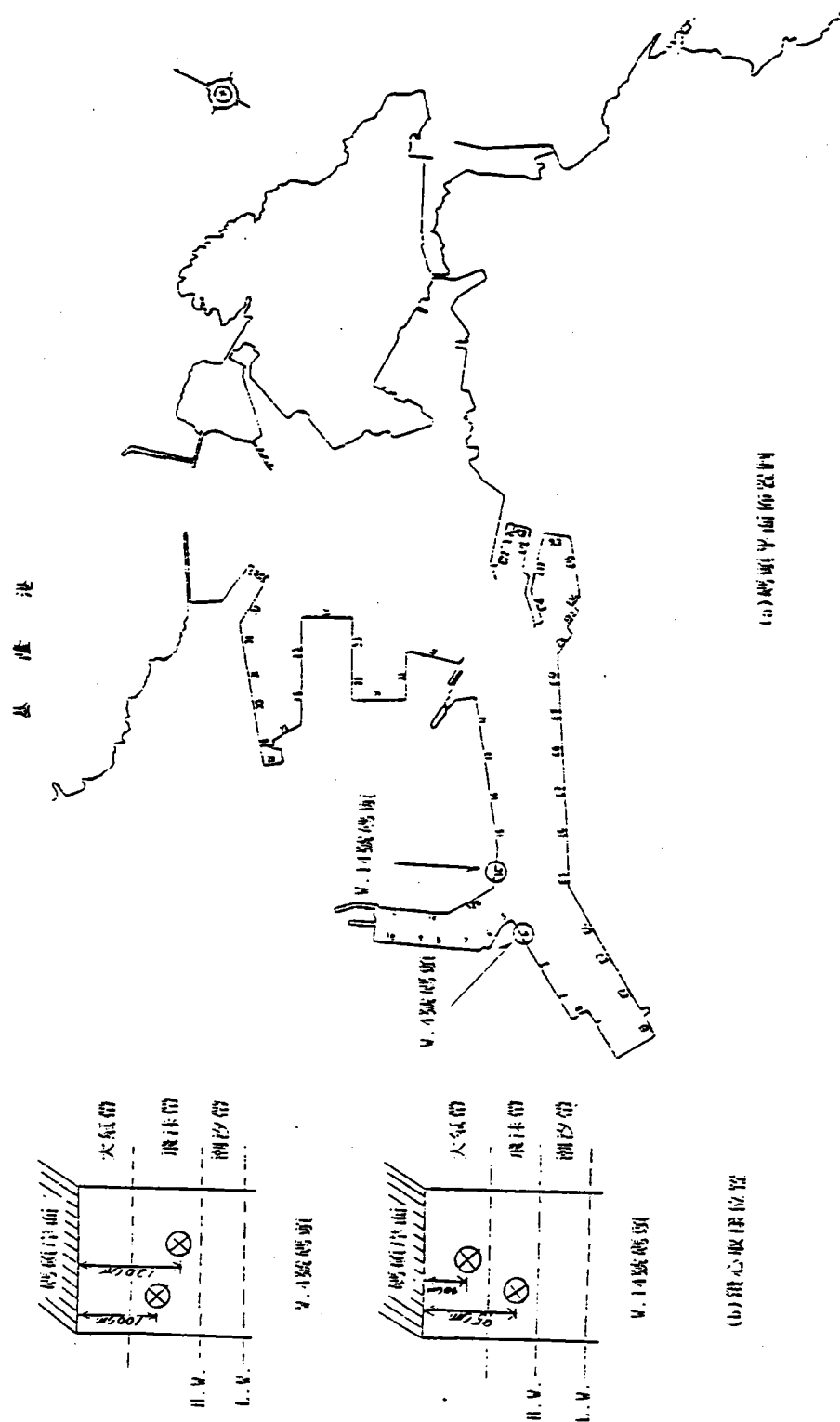
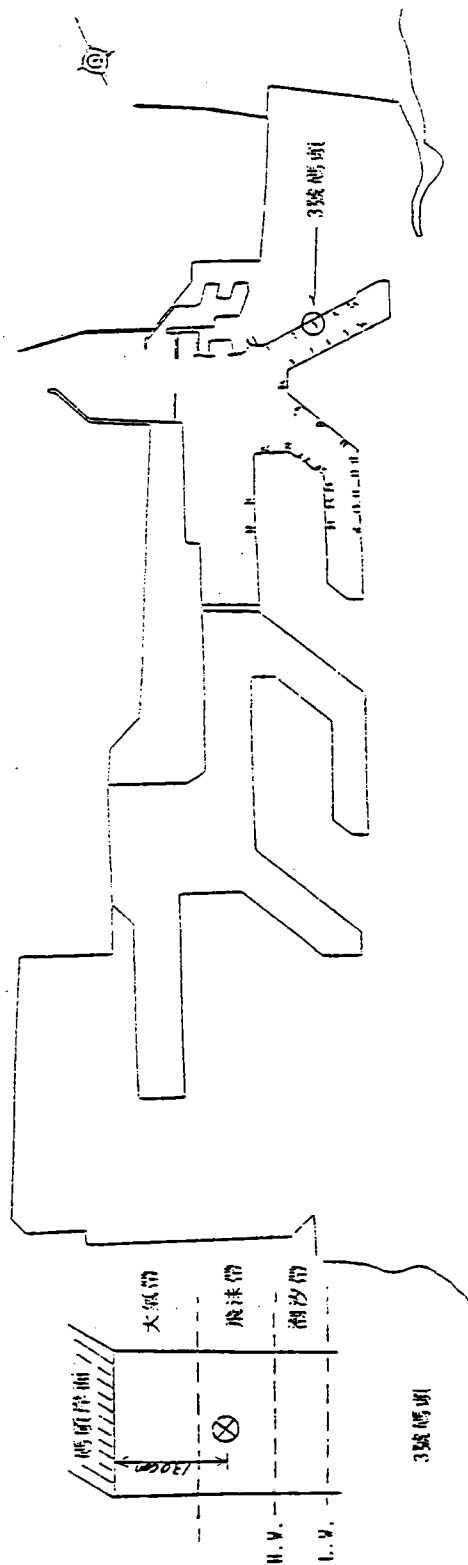


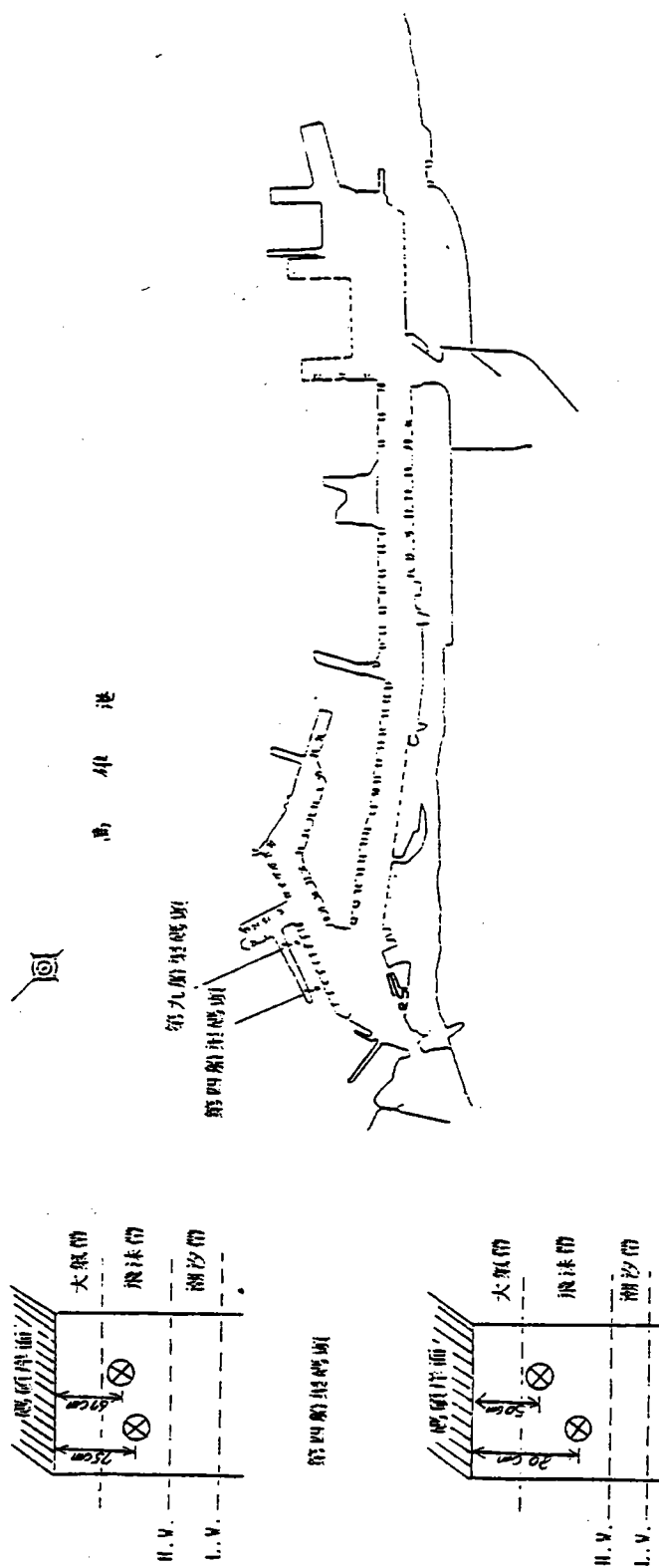
圖 4-1 基隆港碼頭(平面)佈置及鑽心取樣位置圖



(a) 碼頭平面佈置圖

(b) 鑽心取樣位置

圖 4-2 台中港碼頭平面佈置及鑽心取樣位置圖



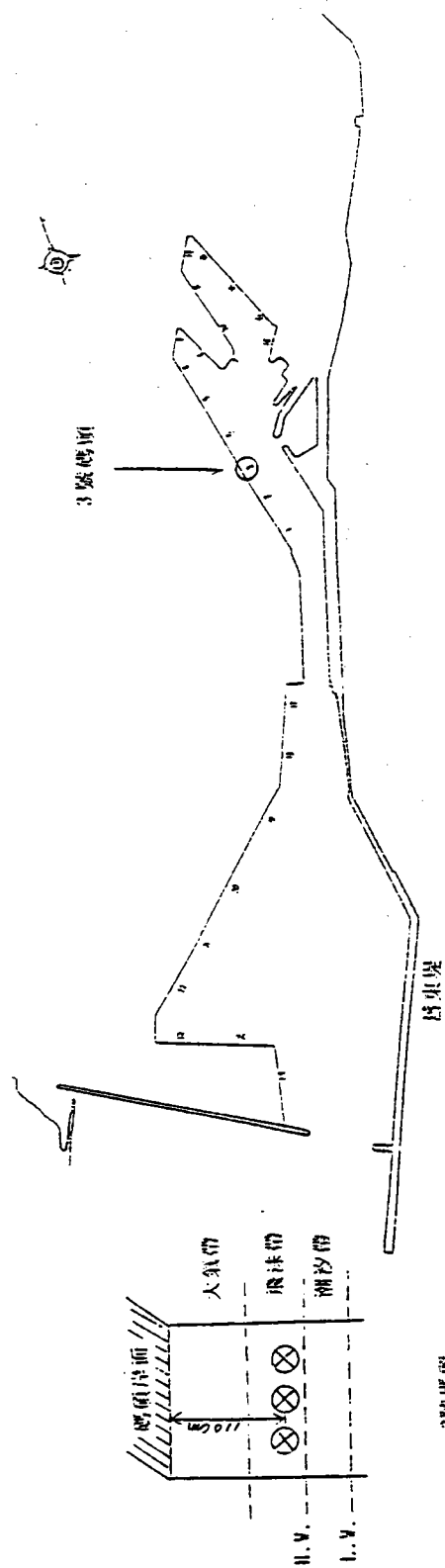
第九船塢碼頭

(b) 鑽心取樣位置

(a) 碼頭平面佈置圖

圖 4-3 高雄港碼頭平面佈置及鑽心取樣位置圖

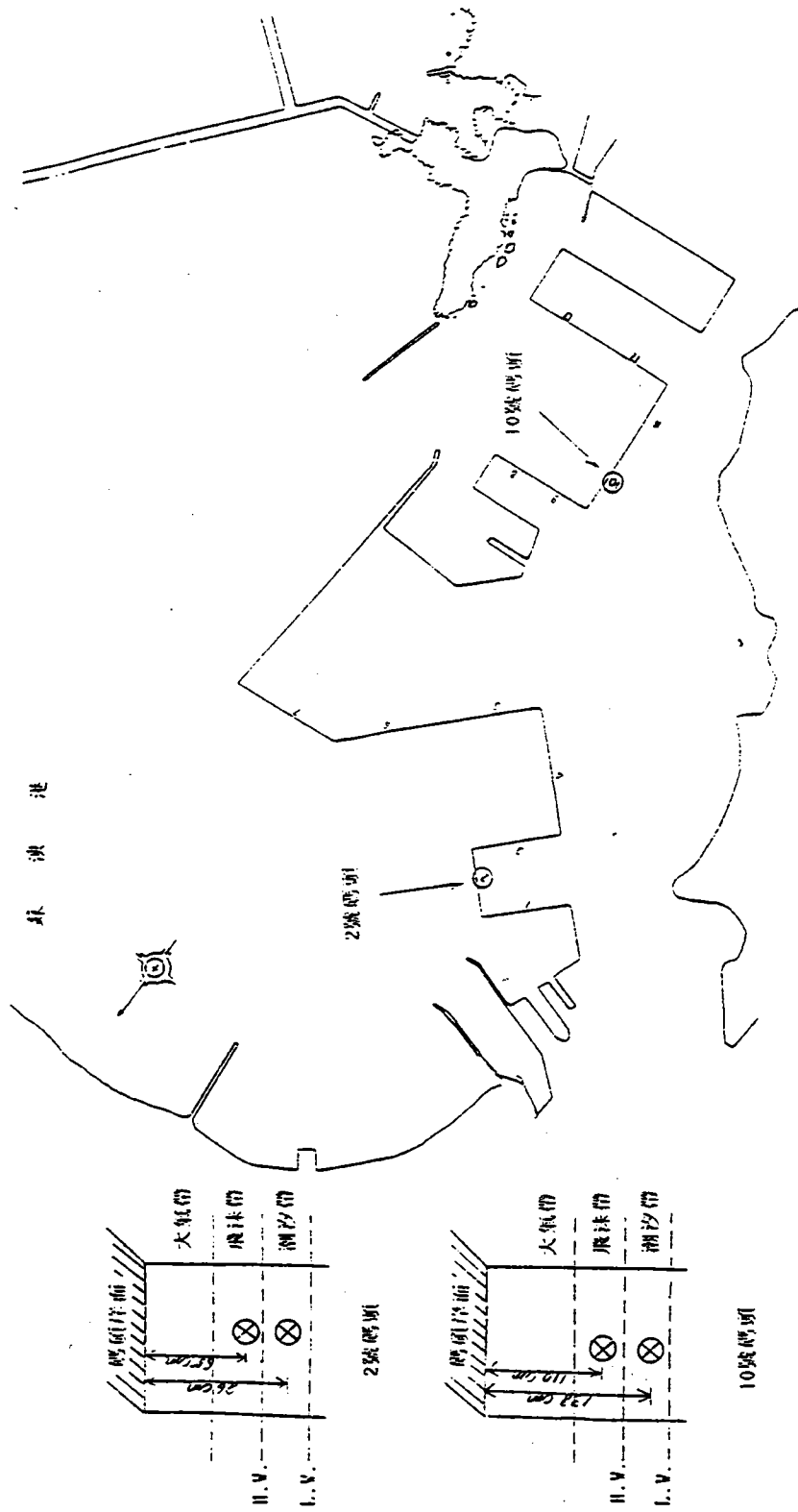
花 蓮 港



(a) 碼頭平面佈置圖

(b) 鑽心取樣位置

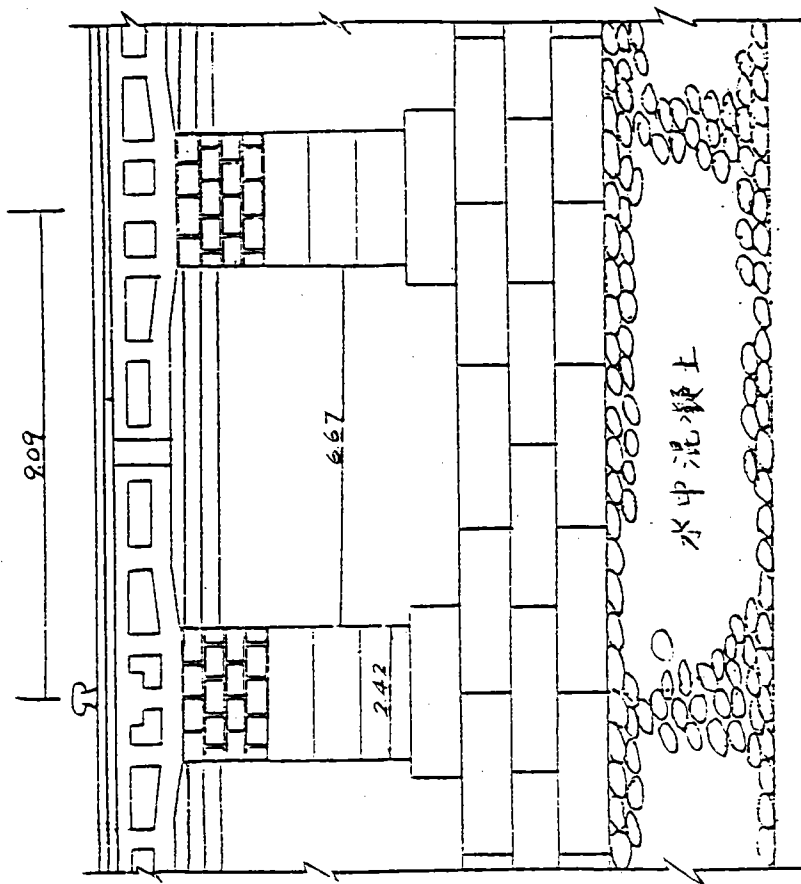
圖 4-4 花蓮港碼頭平面佈置及鑽心取樣位置圖



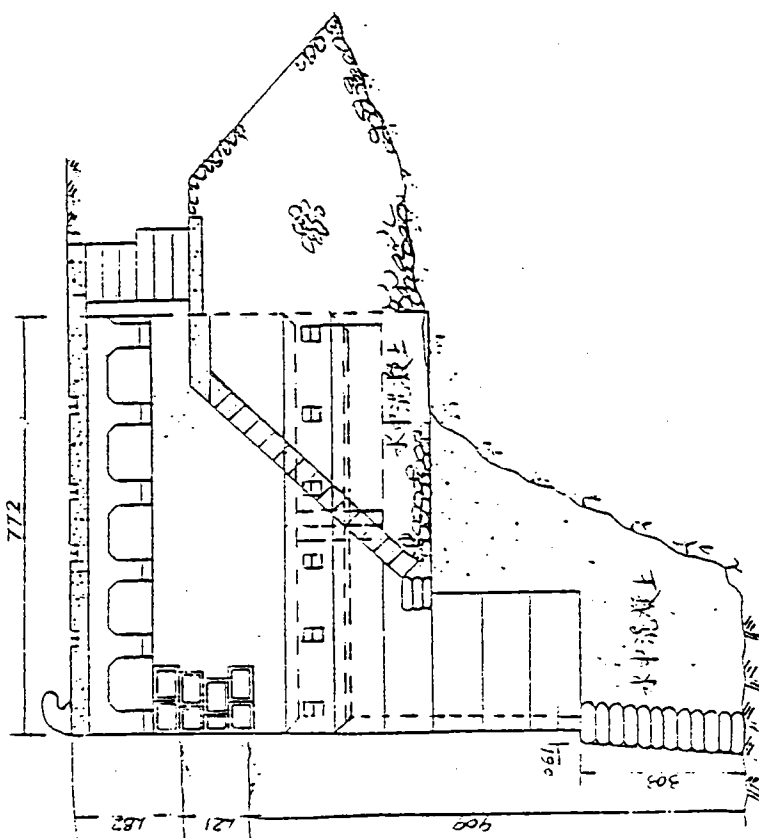
(a) 碼頭平面佈置圖

(b) 鑽心取樣位置

圖 4-5 基隆港碼頭平面佈置及鑽心取樣位置圖

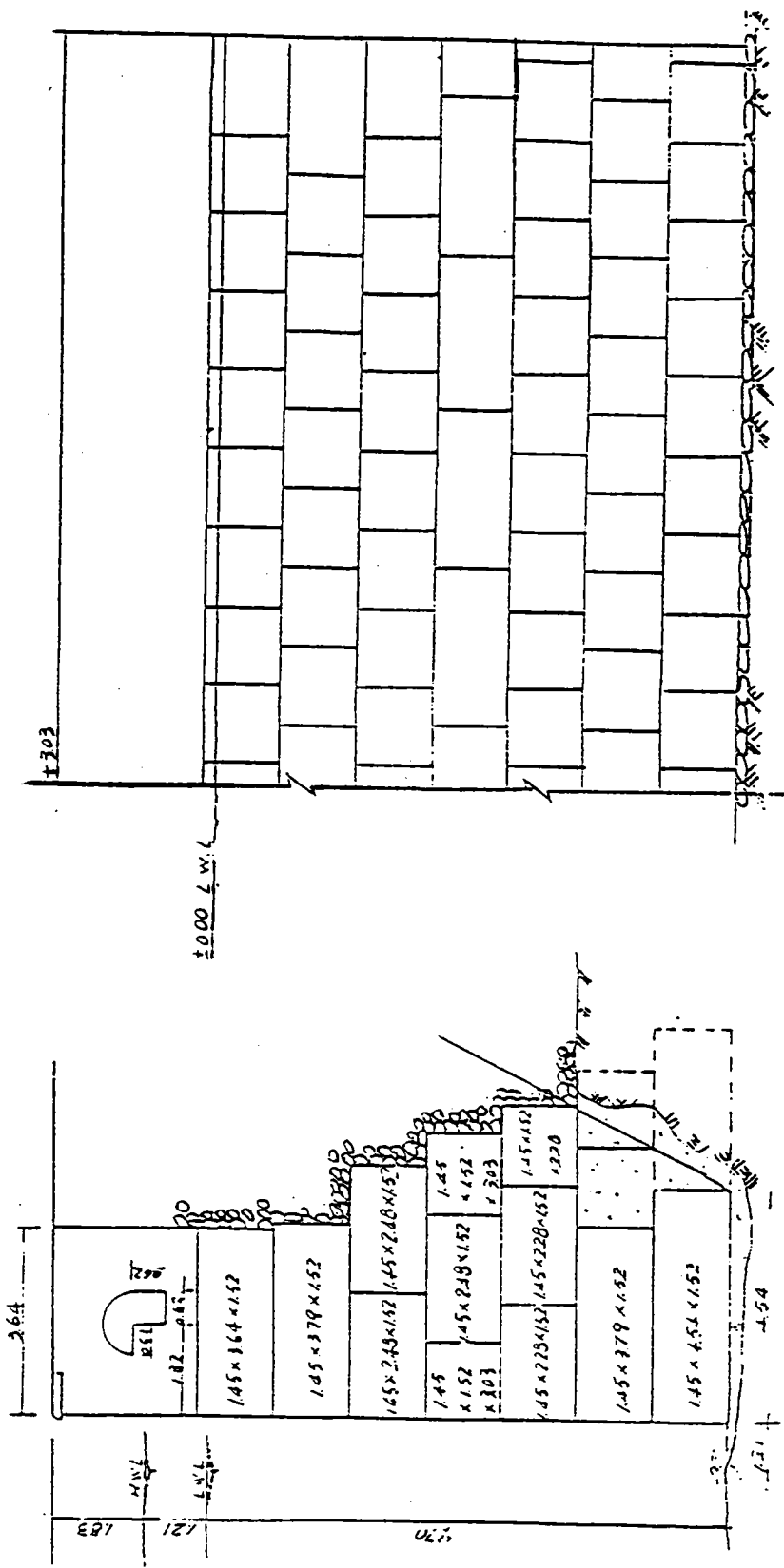


正面圖



剖面圖

圖 4-8 橋墩式碼頭構造圖



正面圖

剖面圖

圖 4-7 混凝土方塊牆壁式碼頭構造圖

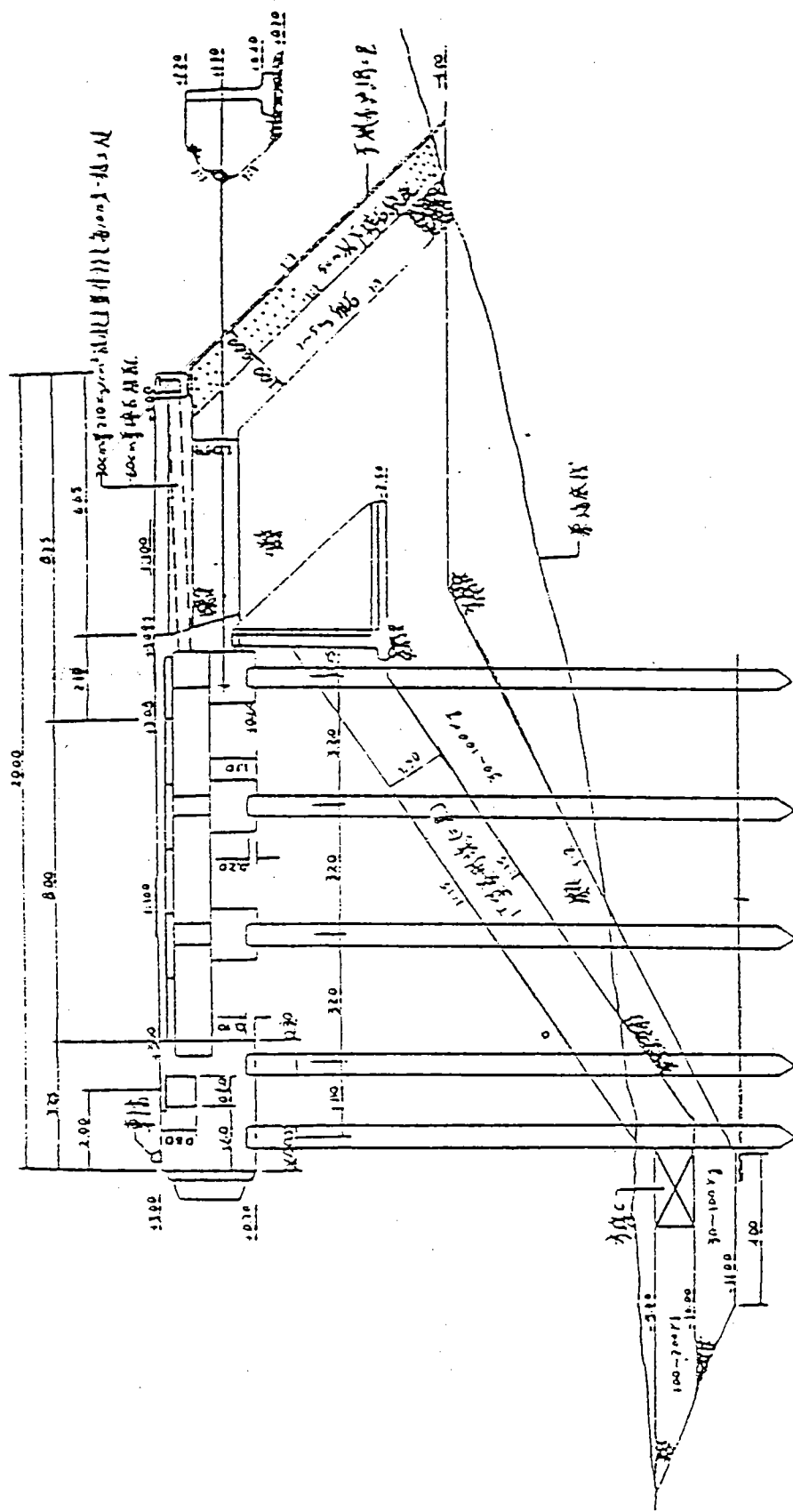
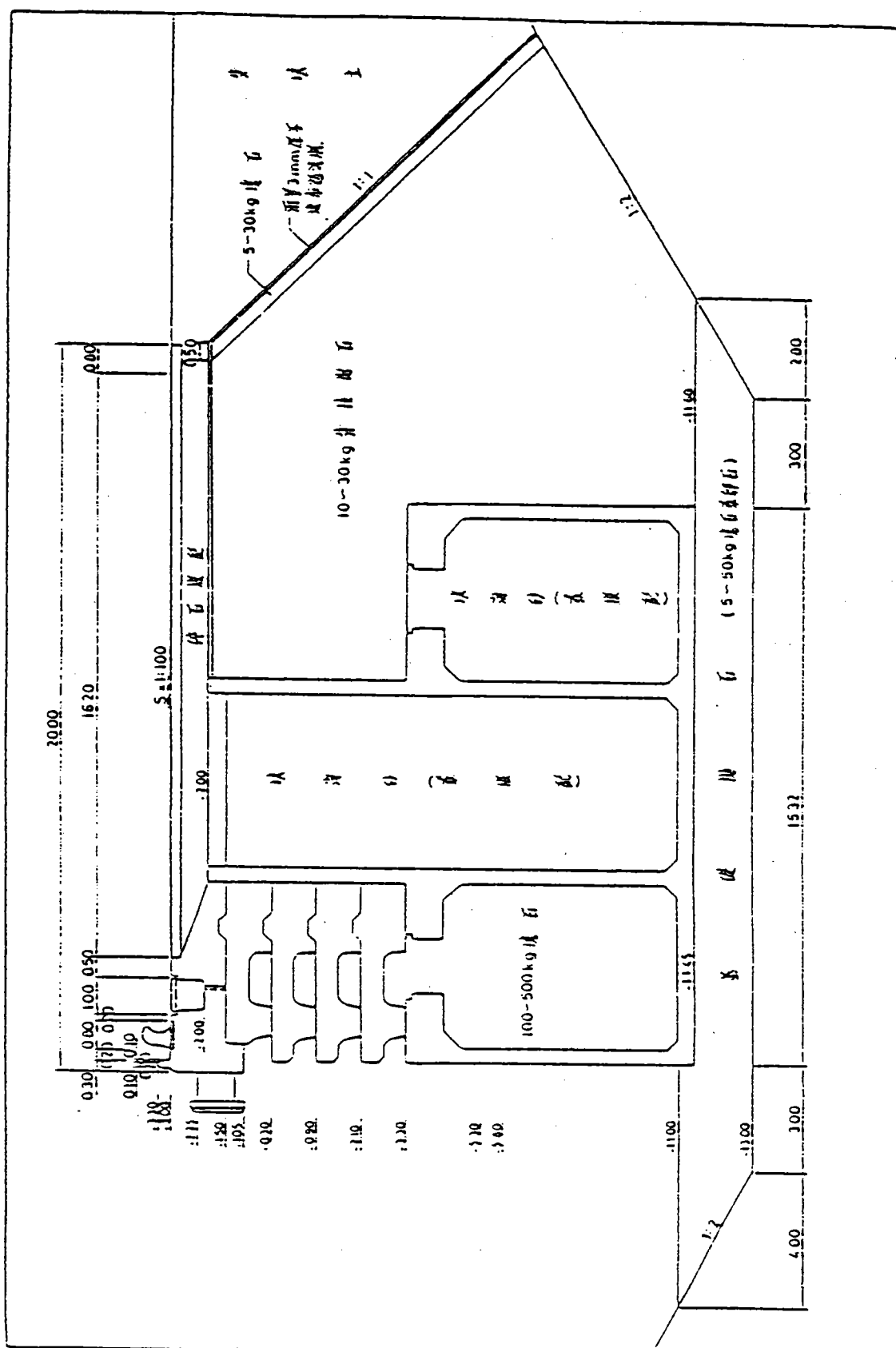


圖 4-8 基樁棧橋式碼頭斷面圖



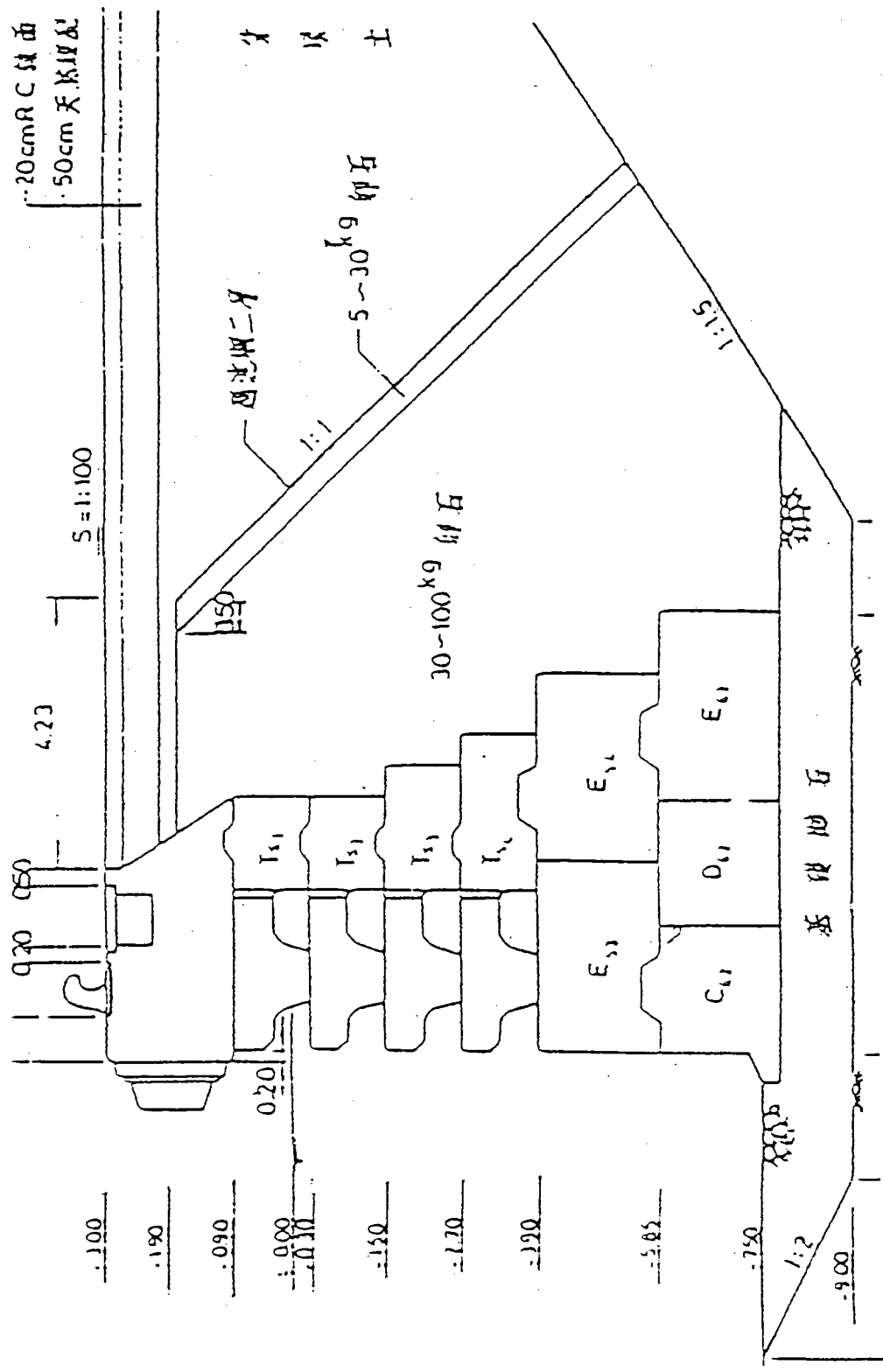
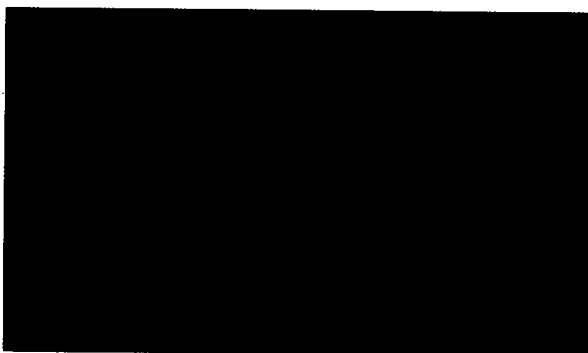
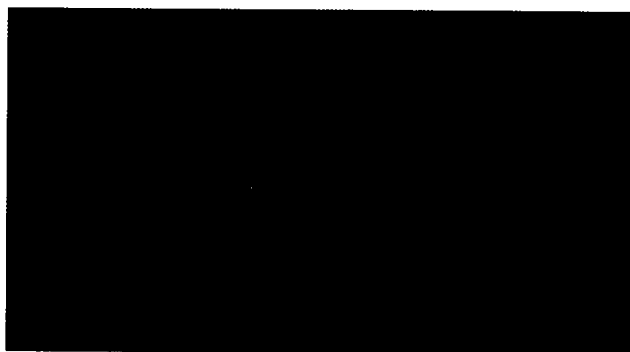


圖 4-10 沉箱消波式碼頭斷面圖



基隆港W.4號碼頭鑽心試體



基隆港W.14號碼頭鑽心試體



台中港3號碼頭鑽心試體



高雄港第四船渠碼頭鑽心試體

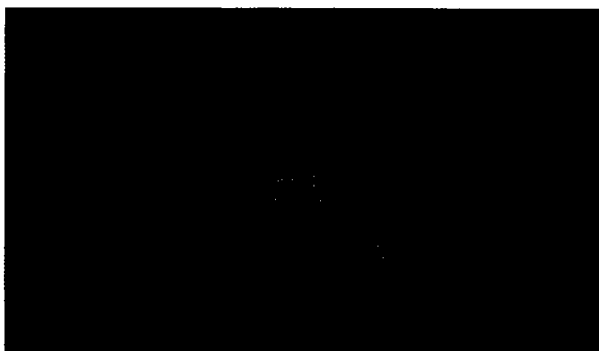


高雄港第九船渠碼頭鑽心試體



花蓮港3號碼頭鑽心試體

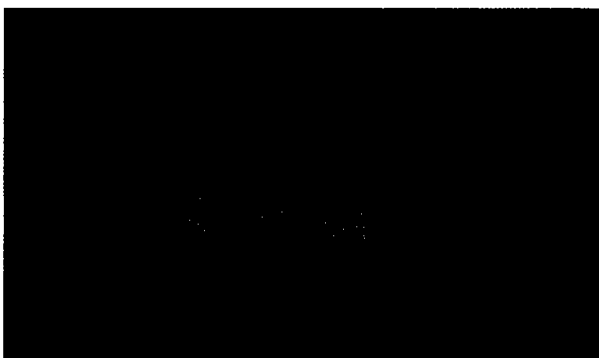
圖 4-11 各港口碼頭鑽心試體之照片



花蓮港舊東堤鑽心試體



蘇澳港2號碼頭鑽心試體



蘇澳港10號碼頭鑽心試體

圖 4-12 各港口碼頭鑽心試體之照片(續)

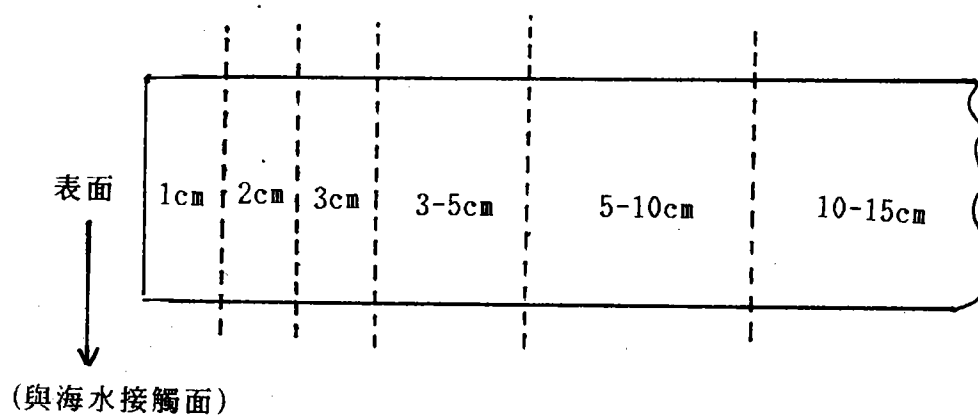
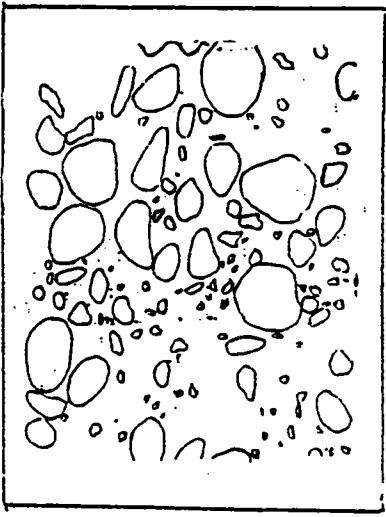
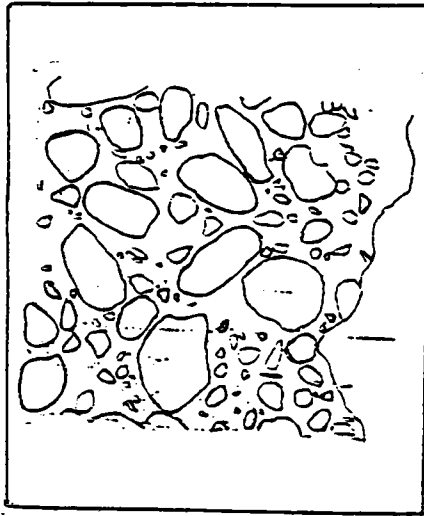


圖 4-13 鑽心試體依深度切割之簡圖



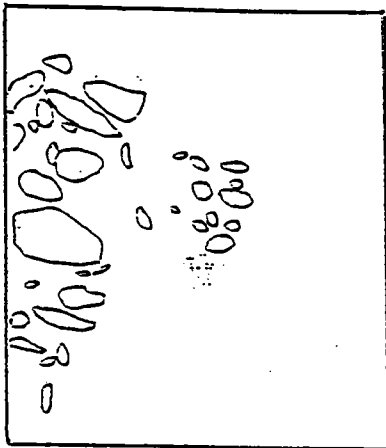
基隆港V.4號碼頭



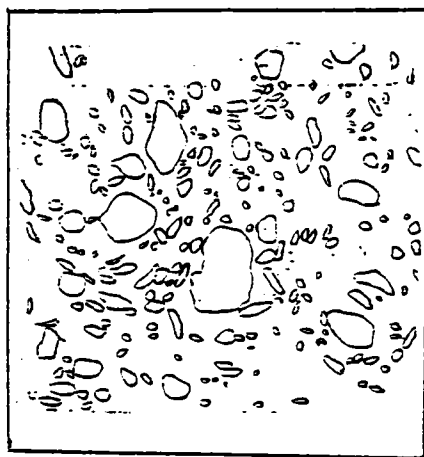
基隆港V.14號碼頭



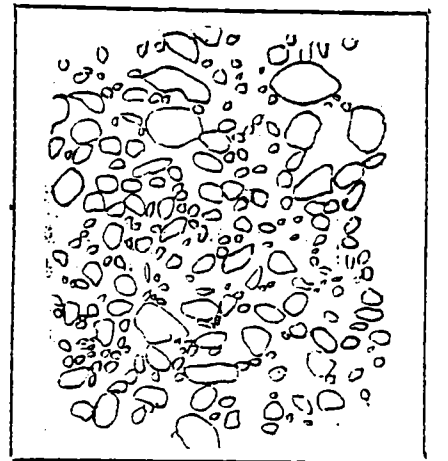
台中港3號碼頭



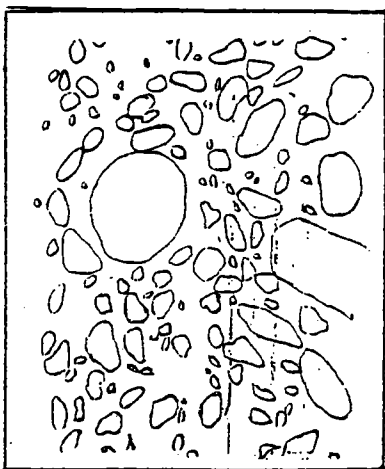
高雄港第四船渠碼頭



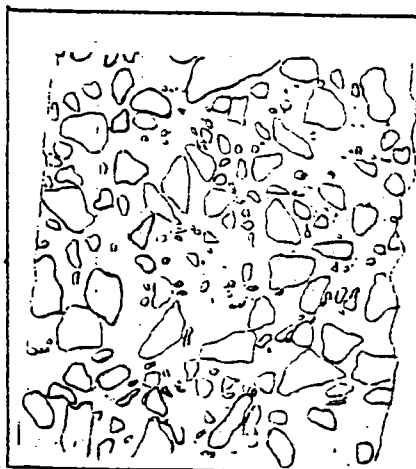
高雄港第九船渠碼頭



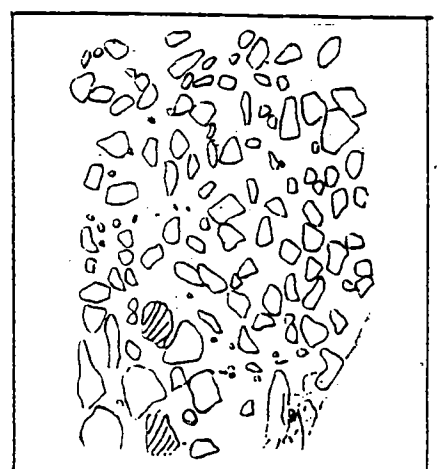
花蓮港3號碼頭



花蓮港舊東堤



基隆港2號碼頭



基隆港10號碼頭

圖 4-14 鑽心試體外觀描繪圖

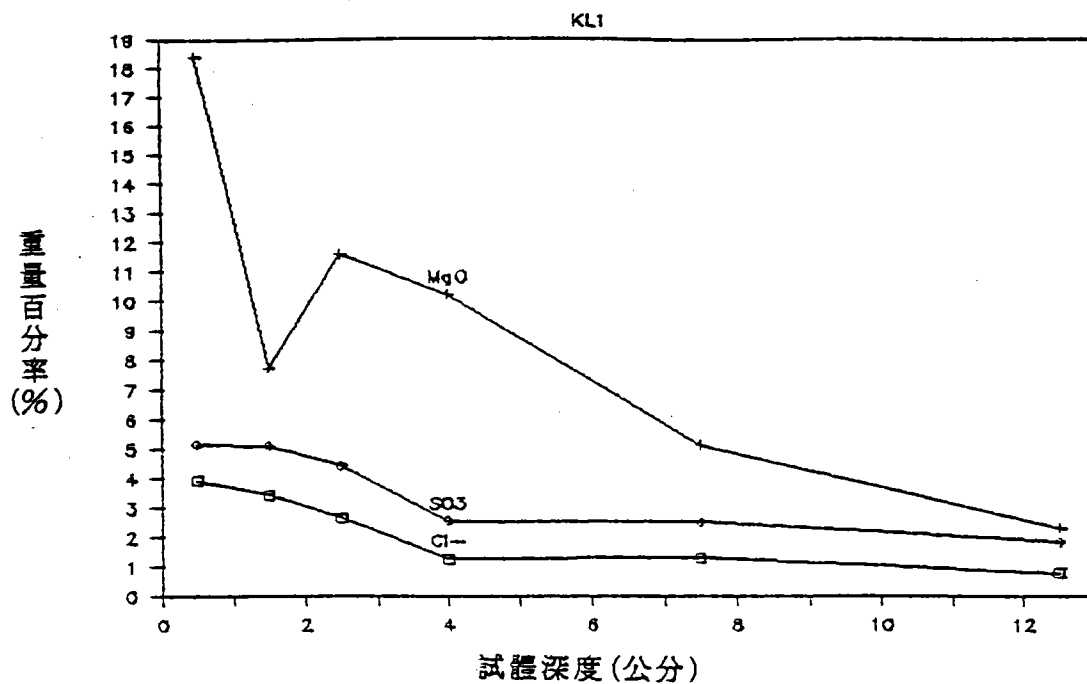


圖 4-15 基隆港W.4號碼頭鑽心試體化學成份含量與深度關係

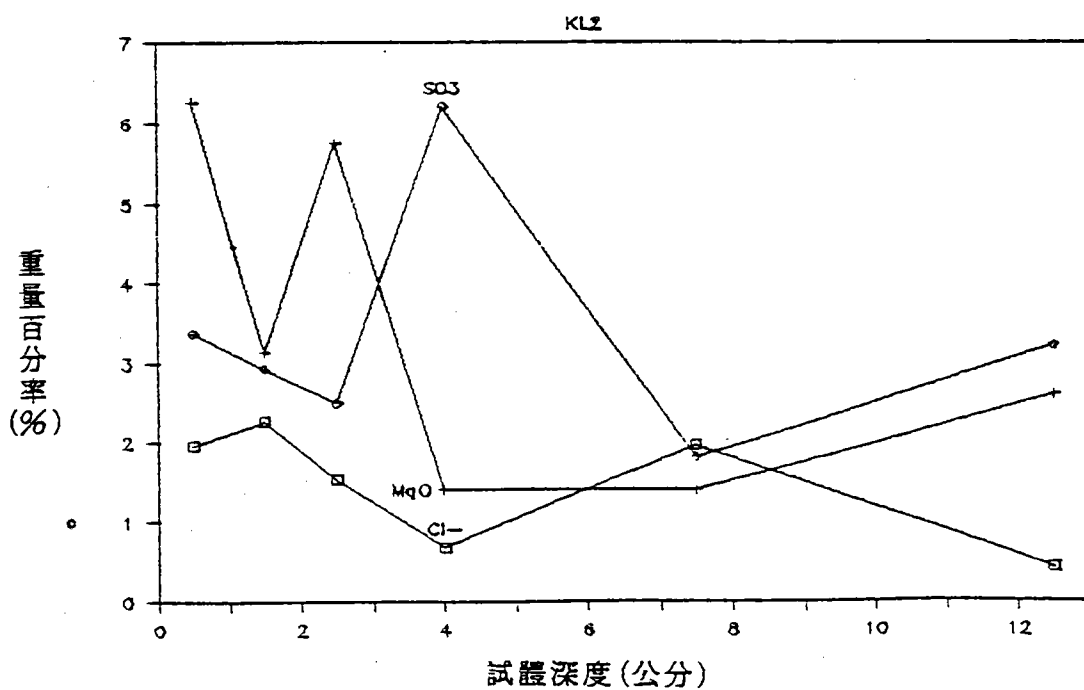


圖 4-16 基隆港W.14號碼頭鑽心試體化學成份含量與深度關係

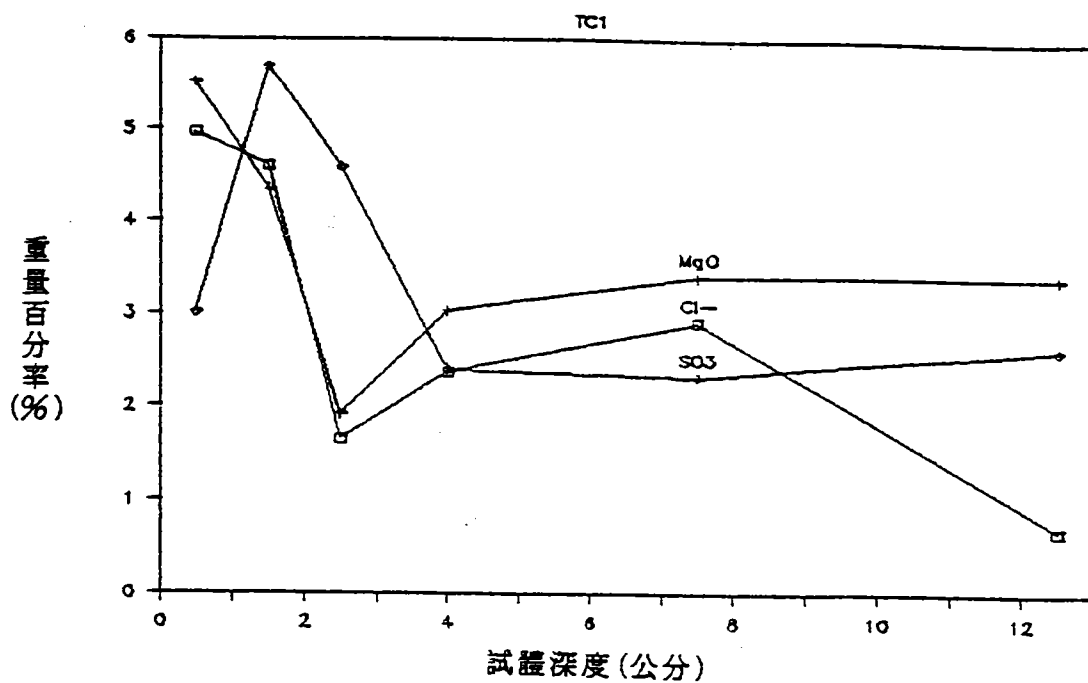


圖 4-17 台中港3號碼頭鑽心試體化學成份含量與深度關係

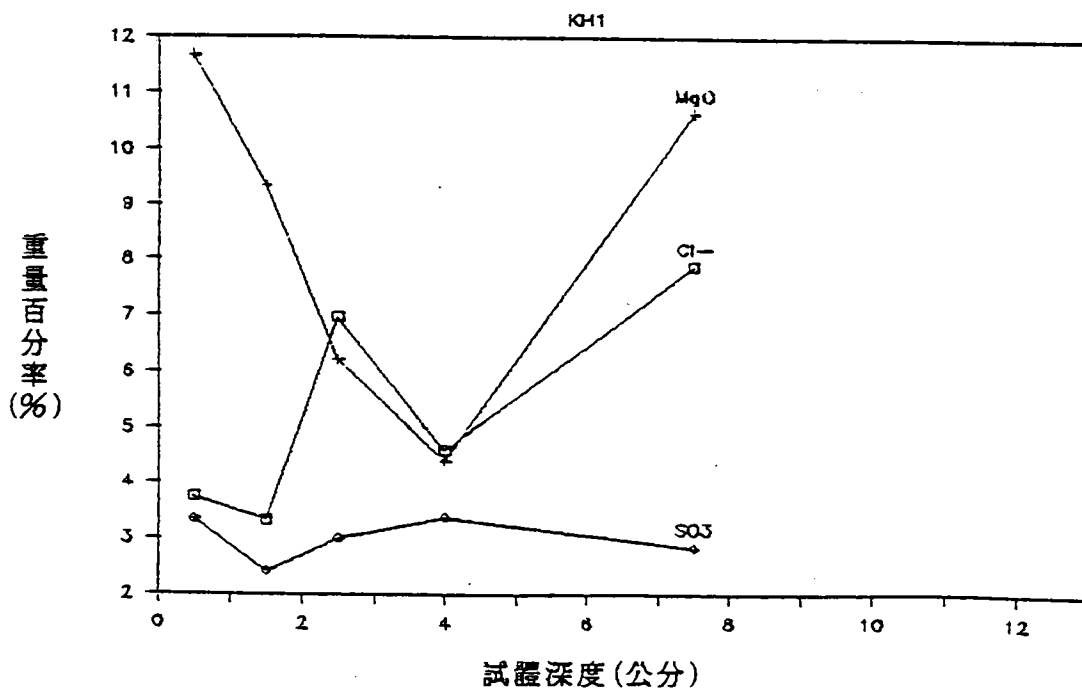


圖 4-18 高雄港第四船渠碼頭鑽心試體化學成份含量與深度關係

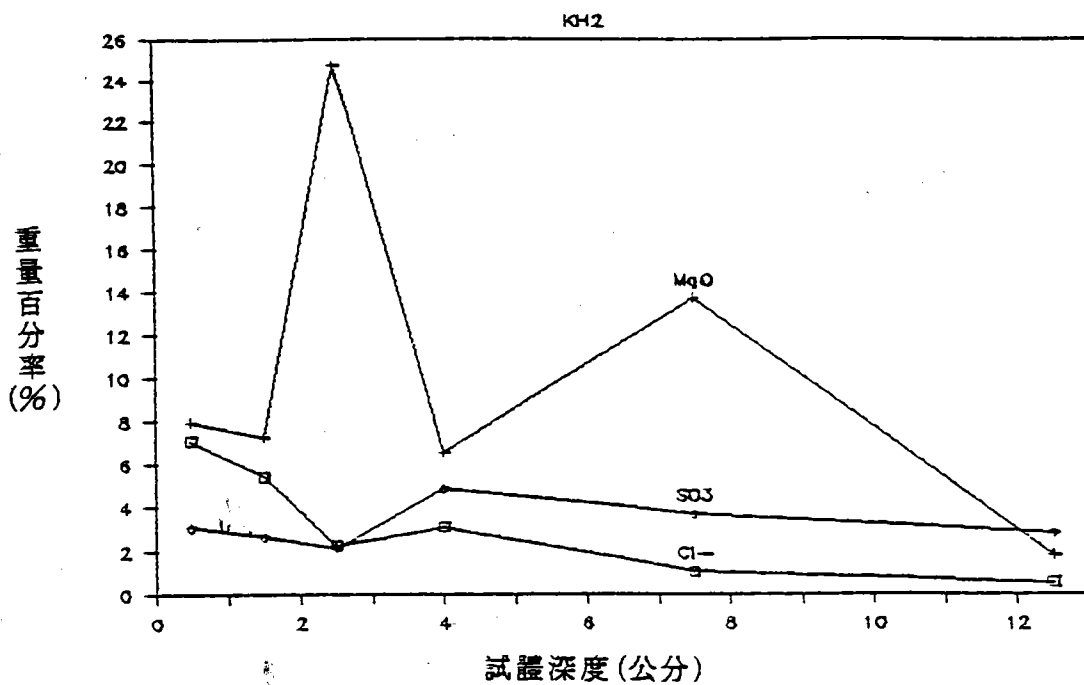


圖 4-19 高雄港第九船渠碼頭鑽心試體化學成份含量與深度關係

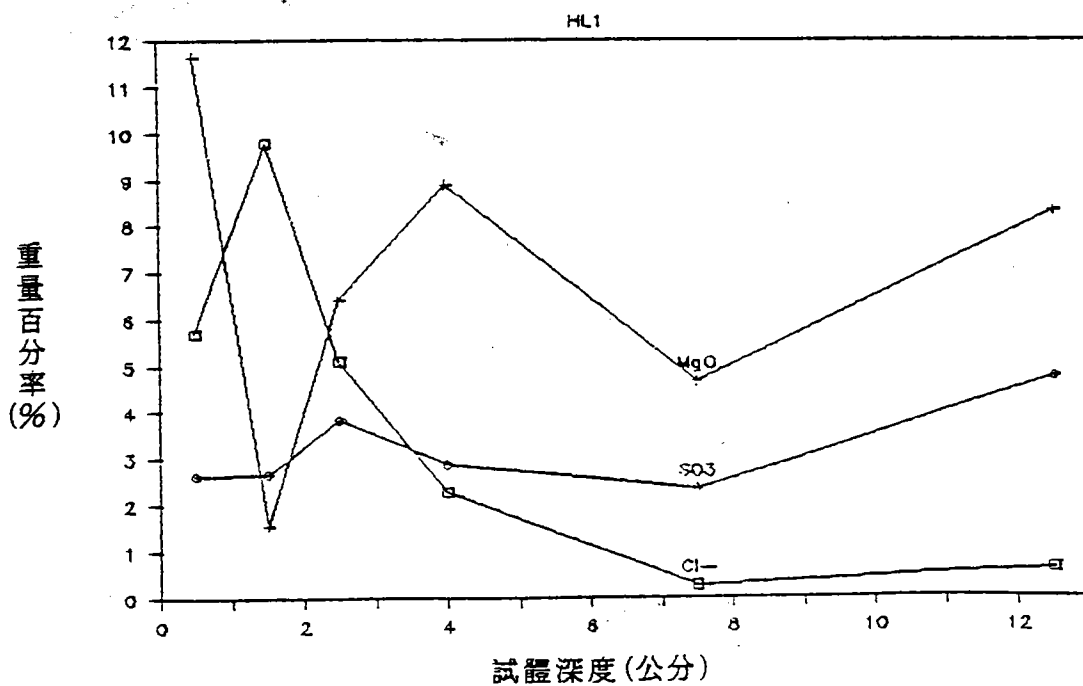


圖 4-20 花蓮港3號碼頭鑽心試體化學成份含量與深度關係

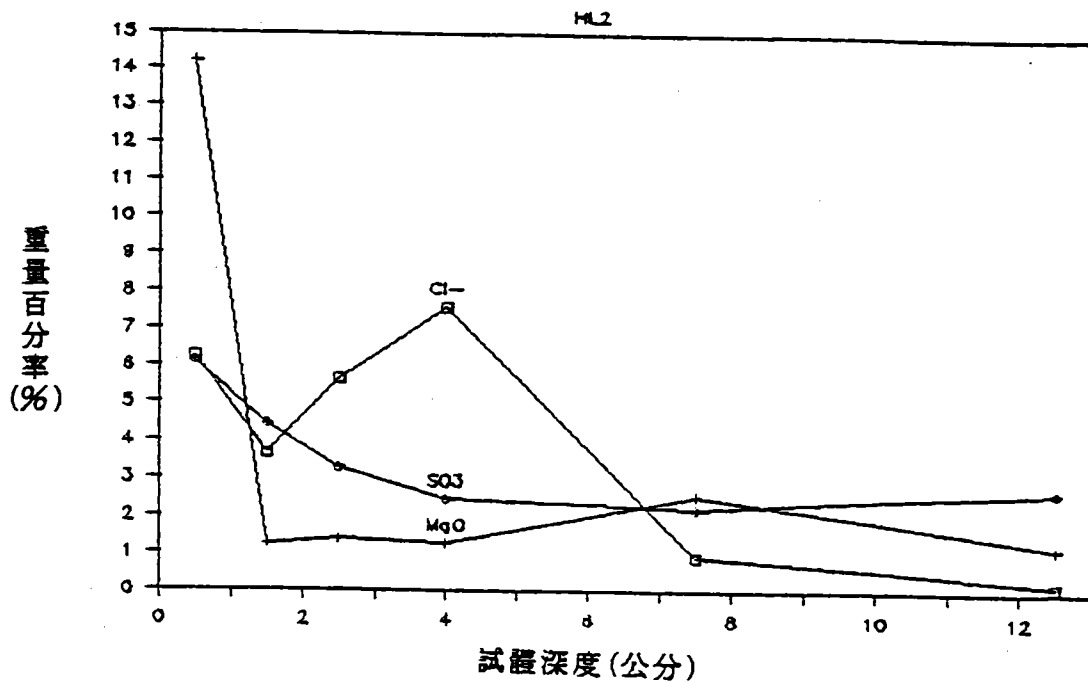


圖 4-21 花蓮港舊東堤鑽心試體化學成份含量與深度關係

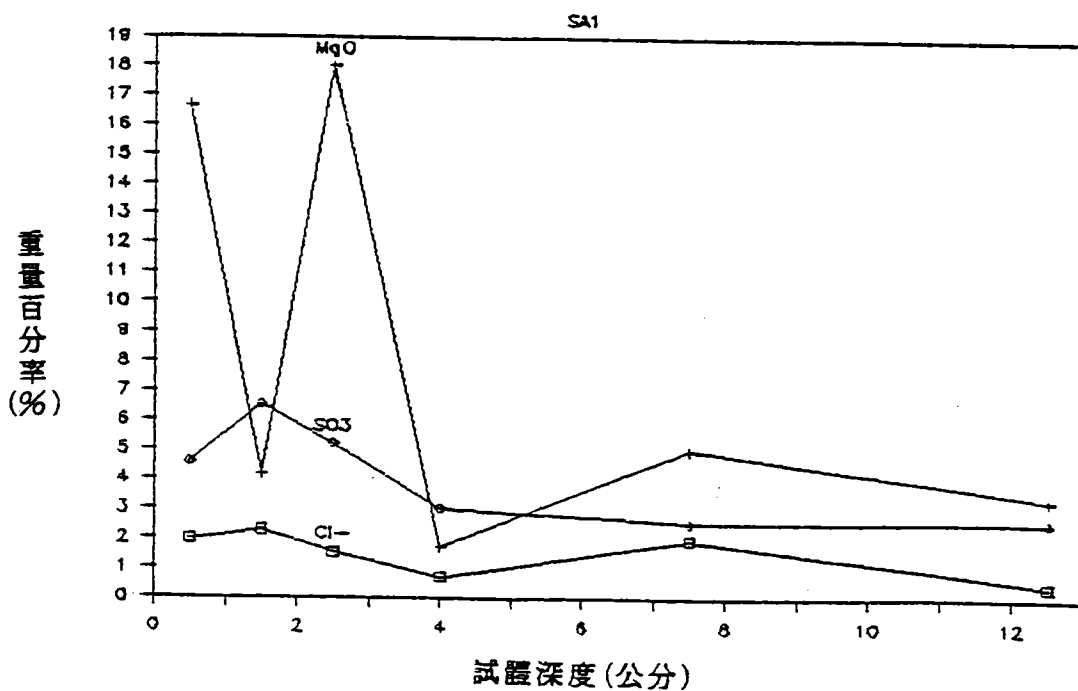


圖 4-22 蘇澳港2號碼頭鑽心試體化學成份含量與深度關係

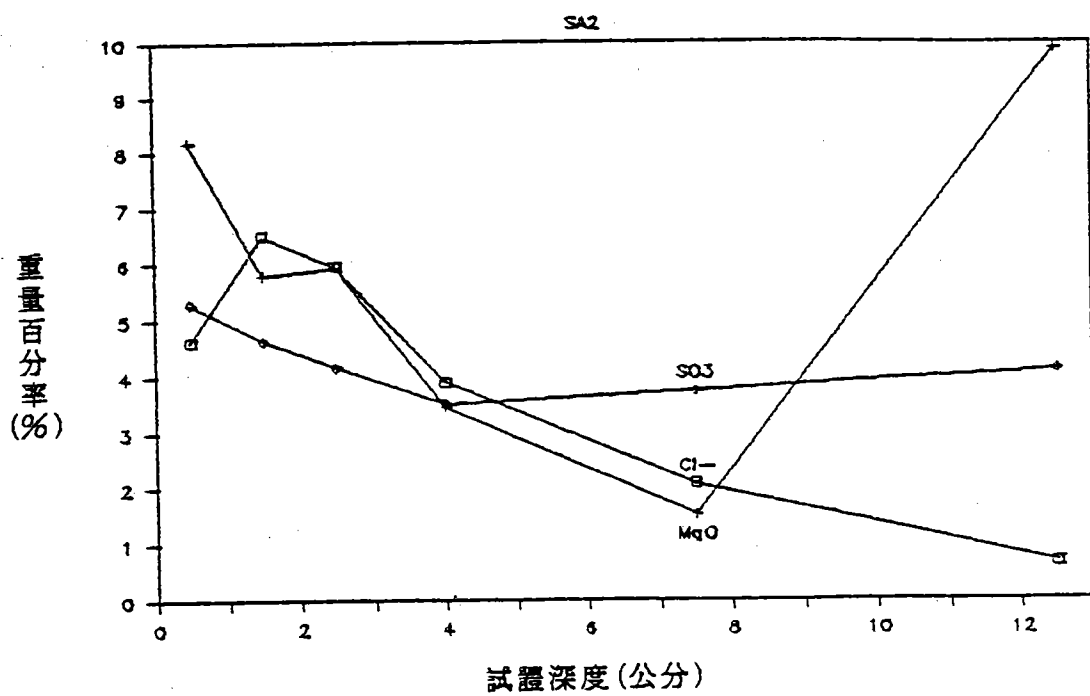


圖 4-23 蘇澳港10號碼頭鑽心試體化學成份含量與深度關係

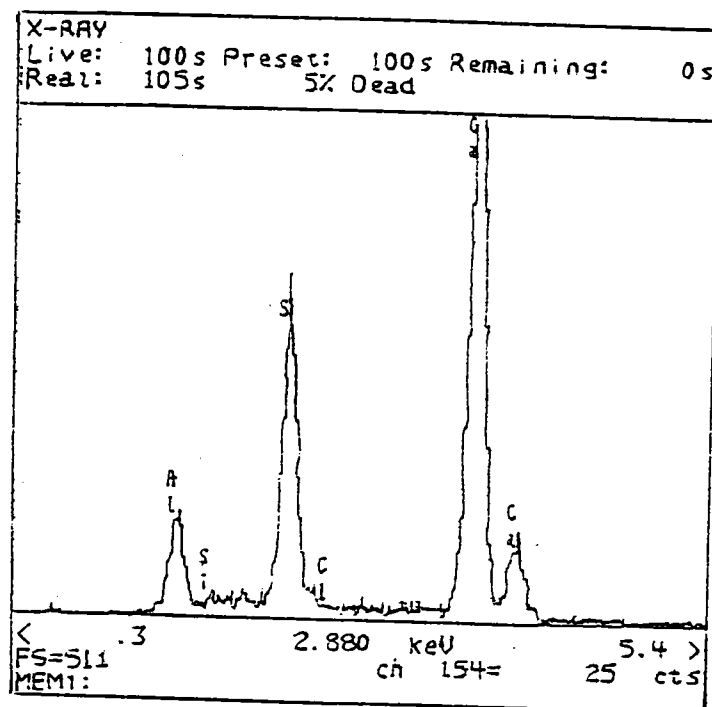


圖 4-24 基隆港7.4號碼頭鑽心試體 SEM 圖

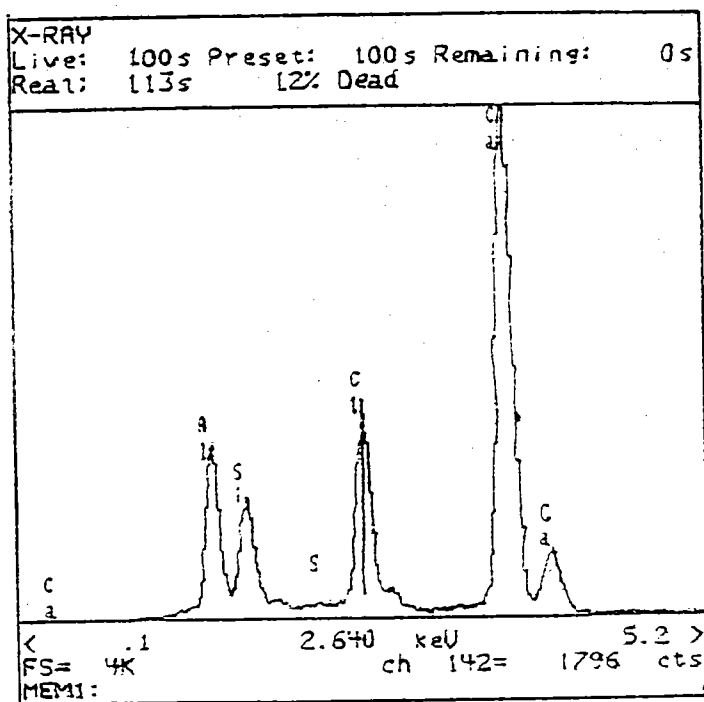


圖 4-25 基隆港V.14號碼頭鑽心試體 SEM 圖

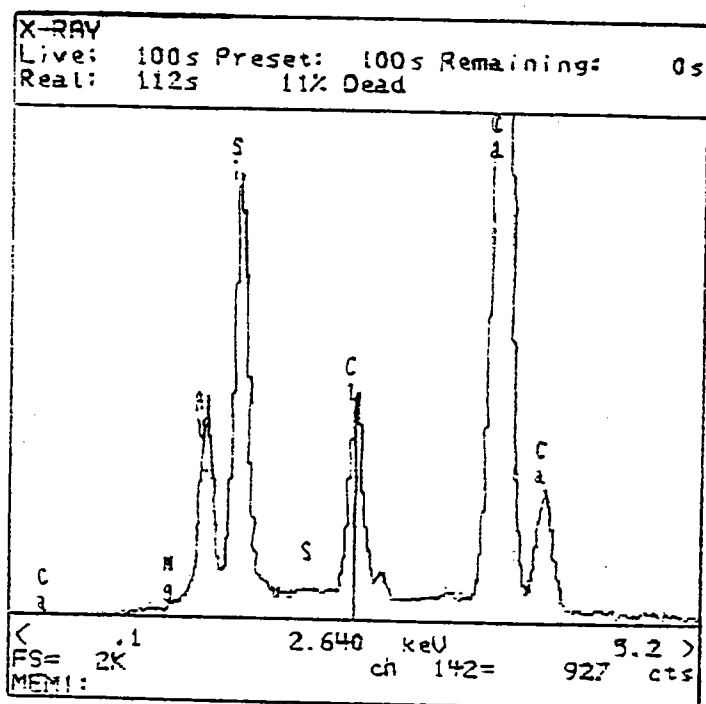


圖 4-26 基隆港W.14號碼頭鑽心試體 SEM 圖

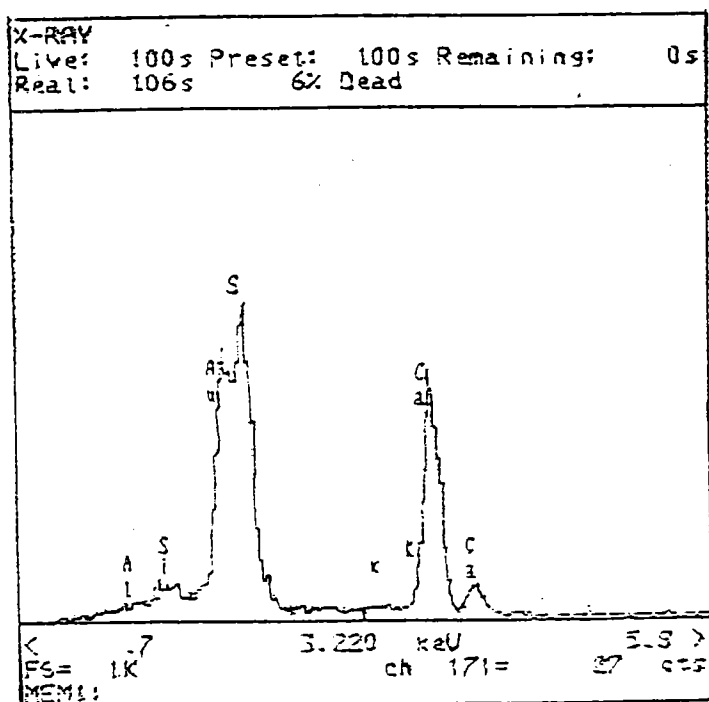
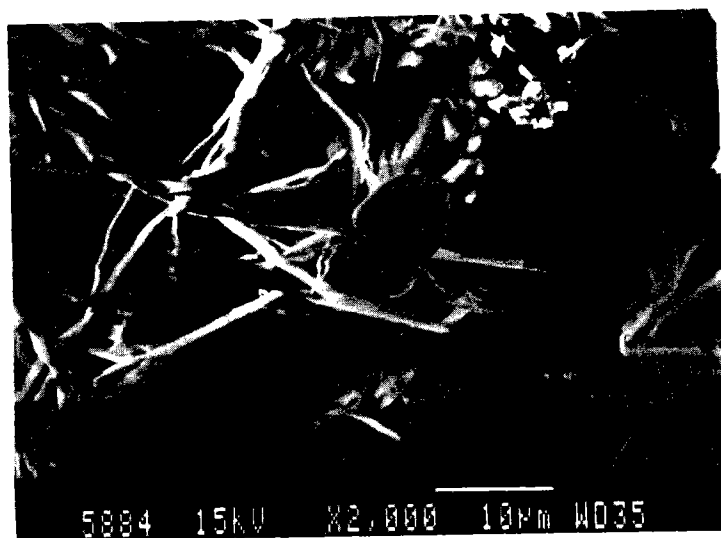


圖 4-27 基隆港W14號碼頭鑽心試體 SEM 圖

表 4-1 各港口碼頭結構體鑽心取樣之背景資料

碼頭編號	長度(m)	深度(m)	碼頭型式	建造日期	使用材料	承載量
基隆港W.4號	167	- 9.0	橋墩式	民國元年	RC	2.50T/m ²
基隆港W.14號	172.4	- 9.0	方塊擁壁式	民國17年	RC	2.50T/m ²
台中港3號	250	- 13	重力沉箱式	民國65年	RC	3.0 T/m ²
高雄港第四船渠	185	- 9.0	—	民國48年	RC	—
高雄港第九船渠	155	- 9.0	—	民國59年	RC	—
花蓮港3號	150	—	重力沉箱式	民國20年	PC	2.48T/m ²
花蓮港舊東堤	1330	- 7.0	—	民國20年	PC	—
蘇澳港2號	175	-11.0	沉箱消波式	民國70年	RC	4.0T/m ²
蘇澳港10號	175	- 9.0	基樁棧橋式	民國66年	RC	4.0T/m ²

表 4-2 各港口碼頭鑽心試體物理性質

混凝土結構 體試體編號	透水率 (m/sec)	試錘讀數 N	比 重	吸水率 (%)	抗壓強度 (kg/cm ²)
基隆港W.4號碼頭	—	30	—	—	219
基隆港W.14號碼頭	2.03×10^{-11}	34	2.25	5.07	198
高雄港第四船渠碼頭	—	28	—	—	126
高雄港第九船渠碼頭	5.95×10^{-10}	38	2.30	5.78	262
花蓮港3號碼頭	4.61×10^{-10}	34	2.55	2.36	207
花蓮港舊東堤	2.61×10^{-11}	32	2.41	2.80	96
蘇澳港2號碼頭	6.48×10^{-10}	31	2.30	7.04	150
蘇澳港10號碼頭	6.00×10^{-9}	35	2.35	4.45	—

表 4-3 試錘數值與混凝土品質關係

試錘數值	預估強度 (kg/cm ²)	混凝土品質
< 25	170	差
25~35	170~330	平均值以下
>35	330	好

表 4-4 各港口鑽心試體水泥含量及中性化深度

混凝土結構 體試體編號	混凝土中水 泥含量 (%)	中性化 深度 (mm)	碳化係數 (mm ² /年)
基隆港W.4號碼頭	6.80	2.5	4.06×10^{-2}
基隆港W.14號碼頭	5.98	3.0	7.50×10^{-2}
高雄港第四船渠碼頭	5.17	20	6.89
高雄港第九船渠碼頭	—	3.0	2.50×10^{-1}
花蓮港3號碼頭	8.39	4.0	1.40×10^{-1}
花蓮港舊東堤	10.59	11.0	1.06
蘇澳港2號碼頭	10.08	3.9	1.08

表 4-5 基隆W.4號碼頭鑽心試體化學成份分析

試體深度(mm) (從表面算起)	CaO %	MgO %	SO ₃ ⁻² %	Cl ⁻ %	其 他
0-10	65	18.44	5.13	3.92	1.水泥含量: 6.80% 2.中性化深度: 2.5mm 註: MgO %, SO ₃ ⁻² %, Cl ⁻ % 之表示均以CaO 佔水泥重量65 %為基準。
10-20	65	7.74	5.10	3.44	
20-30	65	11.58	4.43	2.66	
30-50	65	10.25	2.55	1.26	
50-100	65	5.15	2.52	1.29	
100-150	65	2.32	1.84	0.77	

表 4-6 基隆W.14號碼頭鑽心試體化學成份分析

試體深度(mm) (從表面算起)	CaO %	MgO %	SO ₃ ⁻² %	Cl ⁻ %	其 他
0-10	65	6.26	3.38	2.89	1.水泥含量: 5.98% 2.中性化深度: 3.0mm 註: MgO %, SO ₃ ⁻² %, Cl ⁻ % 之表示均以CaO 佔水泥重量65 %為基準。
10-20	65	3.14	2.92	8.45	
20-30	65	5.74	2.49	11.29	
30-50	65	1.40	6.21	7.49	
50-100	65	1.40	1.81	4.88	
100-150	65	2.59	3.23	3.46	

表 4-7 台中港3號碼頭鑽心試體化學成份分析

試體深度(mm) (從表面算起)	CaO %	MgO %	SO ₃ ⁻² %	Cl ⁻ %	其 他
0-10	65	5.51	3.01	4.96	1.水泥含量: — 2.中性化深度: — 註: MgO %, SO ₃ ⁻² %, Cl ⁻ % 之表示均以CaO 佔水泥重量65 %為基準。
10-20	65	4.34	5.69	4.59	
20-30	65	1.92	4.58	1.66	
30-50	65	3.04	2.40	2.38	
50-100	65	3.41	2.33	2.92	
100-150	65	3.41	2.64	0.68	

表 4-8 高雄港第四船渠碼頭鑽心試體化學成份分析

試體深度(mm) (從表面算起)	CaO %	MgO %	SO ₃ ²⁻ %	Cl ⁻ %	其 他
0-10	65	11.68	3.35	3.77	1.水泥含量: 5.17% 2.中性化深度: 20mm 註: MgO %, SO ₃ ²⁻ %, Cl ⁻ % 之表示均以CaO 佔水泥重量65 %為基準。
10-20	65	9.32	2.41	3.33	
20-30	65	6.21	3.00	6.96	
30-50	65	4.37	3.36	4.56	
50-100	65	10.65	2.84	7.90	
100-150	—	—	—	—	

表 4-9 高雄港第九船渠碼頭鑽心試體化學成份分析

試體深度(mm) (從表面算起)	CaO %	MgO %	SO ₃ ²⁻ %	Cl ⁻ %	其 他
0-10	65	7.97	3.07	7.10	1.水泥含量: 7.78% 2.中性化深度: 3.0mm 註: MgO %, SO ₃ ²⁻ %, Cl ⁻ % 之表示均以CaO 佔水泥重量65 %為基準。
10-20	65	7.28	2.65	5.46	
20-30	65	24.70	2.11	2.23	
30-50	65	6.60	4.89	3.11	
50-100	65	13.76	3.69	1.03	
100-150	65	1.79	2.82	0.48	

表 4-10 花蓮港3號碼頭鑽心試體化學成份分析

試體深度(mm) (從表面算起)	CaO %	MgO %	SO ₃ ²⁻ %	Cl ⁻ %	其 他
0-10	65	11.64	2.61	5.71	1.水泥含量: 8.39% 2.中性化深度: 4.0mm 註: MgO %, SO ₃ ²⁻ %, Cl ⁻ % 之表示均以CaO 佔水泥重量65 %為基準。
10-20	65	1.56	2.64	9.78	
20-30	65	6.40	3.84	5.08	
30-50	65	8.88	2.86	2.26	
50-100	65	4.64	2.33	0.25	
100-150	65	8.29	4.73	0.61	

表 4-11 花蓮港舊東堤鑽心試體化學成份分析

試體深度(mm) (從表面算起)	CaO %	MgO %	SO ₃ ⁻² %	Cl ⁻ %	其 他
0-10	65	14.21	6.12	6.26	1.水泥含量: 10.59% 2.中性化深度: 11mm 註: MgO %, SO ₃ ⁻² %, Cl ⁻ % 之表示均以CaO 佔水泥重量65 %為基準。
10-20	65	1.26	4.46	3.67	
20-30	65	1.37	3.29	5.64	
30-50	65	1.27	2.46	7.57	
50-100	65	2.55	2.21	0.92	
100-150	65	1.20	2.70	0.15	

表 4-12 蘇澳港2號碼頭鑽心試體化學成份分析

試體深度(mm) (從表面算起)	CaO %	MgO %	SO ₃ ⁻² %	Cl ⁻ %	其 他
0-10	65	16.67	4.55	1.96	1.水泥含量: 10.08% 2.中性化深度: 3.9mm 註: MgO %, SO ₃ ⁻² %, Cl ⁻ % 之表示均以CaO 佔水泥重量65 %為基準。
10-20	65	4.13	6.52	2.26	
20-30	65	18.01	5.20	1.52	
30-50	65	1.71	3.01	0.68	
50-100	65	4.97	2.52	1.96	
100-150	65	3.30	2.55	0.42	

表 4-13 蘇澳港10號碼頭鑽心試體化學成份分析

試體深度(mm) (從表面算起)	CaO %	MgO %	SO ₃ ⁻² %	Cl ⁻ %	其 他
0-10	65	8.17	5.29	4.63	1.水泥含量: — 2.中性化深度: — 註: MgO %, SO ₃ ⁻² %, Cl ⁻ % 之表示均以CaO 佔水泥重量65 %為基準。
10-20	65	5.80	4.64	6.49	
20-30	65	5.94	4.15	5.97	
30-50	65	3.45	3.50	3.89	
50-100	65	1.52	3.75	2.08	
100-150	65	9.90	4.12	0.66	

表 4-14 各港口碼頭結構體鑽心試體有害形成物之 SEM 分析

試體深度 (mm) 試體 編號	0~10	10~20	20~30	30~50	50~100	100~150
基隆港W.4 號碼頭	Portlandite Calcite	Portlandite Calcite Ettringite Monochloro- aluminate		Portlandite Calcite Ettringite	Portlandite Calcite Ettringite	Portlandite Calcite Ettringite
基隆港W.14 號碼頭		Portlandite Calcite Brucite	Portlandite Calcite Brucite Ettringite Monochloro- aluminate	Portlandite Calcite Ettringite	Portlandite Calcite Monochloro- aluminate	Portlandite Calcite Brucite
台中港3號 碼頭				Portlandite Calcite	Portlandite Gibbsite	Portlandite Calcite Monochloro- aluminate
高雄港第四 船渠碼頭			Portlandite Calcite Ettringite	Portlandite Calcite Ettringite Monochloro- aluminate	Portlandite Calcite Ettringite	
高雄港第九 船渠碼頭	Portlandite Calcite Ettringite Monochloro- aluminate	Portlandite Calcite	Portlandite Calcite	Portlandite Calcite Brucite Ettringite Monochloro- aluminate	Portlandite Ettringite	
花蓮港3號 碼頭		Portlandite Calcite Brucite Ettringite Gibbsite	Portlandite Calcite Ettringite Monochloro- aluminate	Portlandite Calcite	Portlandite Calcite Ettringite	Monochloro- aluminate
花蓮港舊 東堤	Portlandite Calcite Ettringite	Portlandite Calcite Ettringite				
蘇澳港2號 碼頭	Portlandite Calcite		Portlandite Ettringite		Portlandite Ettringite	
蘇澳港10號 碼頭	Portlandite Calcite Ettringite	Portlandite	Portlandite Calcite Ettringite Monochloro- aluminate		Portlandite Calcite Gibbsite	

註: Portlandite
Calcite
Brucite
Ettringite
Monochloroaluminate
Gibbsite

$[\text{Ca}(\text{OH})_2]$
 $[\text{CaCO}_3]$
 $[\text{Mg}(\text{OH})_2]$
 $[\text{C}_3\text{A}, \text{ACaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}]$
 $[\text{C}_3\text{A}, \text{ACaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}]$
 $[\text{Al}(\text{OH})_3]$

伍、建築物腐蝕調查

周祖望※

由於臨海地區之建築物受到海風及雨水中所夾帶之鹽份等侵入，易使結構物中之混凝土發生龜裂、剝落及軟化，進而造成鋼筋的腐蝕。若再加上材料使用不當、設計或施工不良，更將加速鋼筋混凝土之惡化過程，使得結構物之安全使用年限大為降低。有鑑於此，本所針對東西海岸之港口建築物及近海地區建築物進行腐蝕調查，期能對建築物混凝土中侵入之有害物質有所了解，並預估其擴散速率以供爾後設計、施工之參考。

一、調查概要

於民國76年11月至12月間，對高雄港、花蓮港、基隆港及台南近海地區安南國中之建築物進行抽樣調查。調查包括目測、拍照和混凝土鑽心取樣，並於實驗室進行物性和化性分析。其中物性分析有：抗壓強度、透水、吸水率及比重等試驗；化性分析有：水泥含量測定、中性化試驗、氯離子、亞硫酸根離子及氧化鎂等含量測定。各試驗步驟及方法分別於前面章節已有所敘述。

二、調查對象

高雄港經選定為9-1號碼頭倉庫，花蓮港為3號碼頭倉庫，基隆港為西16號碼頭倉庫，安南國中為一廢棄老舊倉庫。進一步詳細資料分別敘述如下：

(一)高雄港 9-1號碼頭倉庫

- 建造年代：約民國27年；
- 位置：如圖 5.1所示；
- 結構型式：2層 RC建築；
- 設計強度： $f_y = 40 \text{ kps}$, $f_c' = 3000 \text{ psi}$.

※ 省交通處港灣技術研究所助理研究員

(二)花蓮港 3號倉庫

- 建造年代：約民國38年；
- 位置：如圖 5.2所示；
- 結構型式：2層 RC建築(參照片 5.1)；
- 設計強度：不詳。

(三)基隆港西16號倉庫

- 建造年代：約民國 9年；
- 位置：如圖 5.3所示；
- 結構型式：2層 RC建築；
- 設計強度：不詳。

(四)安南國中倉庫

- 建造年代：民國 47年 9月；
- 位置：台南市安中路 3段 252號；
- 結構型式：鋼筋加強磚造平房(參照片 5.2)；
- 設計強度：不詳。

三、調查結果與分析

各建築物之混凝土中有害物質侵入之分佈狀況分別列於表 5.1, 5.2, 5.3, 5.4 及繪於圖5.4, 5.5, 5.6, 5.7。其物性之分析結果亦列於表 5.5。

(一)氯離子侵入

為模擬實際氯離子侵入混凝土中之分佈狀況，依據 Fick's[1]第二擴散定律，氯離子濃度(C)之控制方程式(Governing equation)為：

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial X^2} \quad (5.1)$$

再代入邊界條件：

1. $X = 0$, $C = C_0$;
2. $X \rightarrow \infty$, $C \rightarrow 0$.

可解得此偏微分方程式之特殊解為：

$$C(X,t) = C_0 [1 - 2 \operatorname{Erf}(X / \sqrt{2Dt})] \quad (5.2)$$

式中 C_0 ：氯離子表面濃度，

X ：深度，

D ：有效擴散係數，

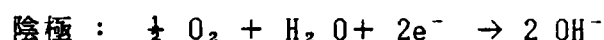
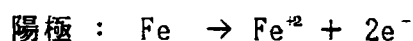
t ：時間，

Erf ：誤差函數 (Error function)，其定義為

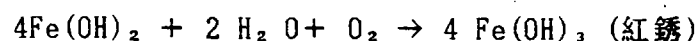
$$\operatorname{Erf}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x \exp(-y^2 / 2) dy.$$

根據公式 (5.2) 及實測氯離子分佈結果 (表 5.1, 5.2, 5.3, 及 5.4) 經由電腦程式分析計算得各建築物之表面氯離子濃度及有效擴散係數分別列於表 5.6 中。模擬之氯離子分佈曲線 (fitting curve) 與實測曲線亦分別繪於 圖 5.8, 5.9 及 5.10。

由於氯離子對鋼筋混凝土之影響主要在於會提高鋼筋之腐蝕活性 (corrosion activation)，而促進鋼筋之氧化作用。其化學反應原理如下：



當 Cl^- 與 OH^- 之比值大於 0.6 時，鈍態膜將會發生破裂氧化成為紅鐵銹 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ，即



Van Daveer [3] 研究鋼筋混凝土橋面版受除冰鹽侵蝕之影響中，指出當混凝土中氯離子與水泥之重量百分比大於 0.4 % 時，鋼筋開始活性化，亦即氧化反應將開始發生。因此依據公式 (5.2) 模擬分析可算出高雄港 9-1 號倉庫混凝土中氯離子於第 1 年、10 年、50 年及 100 年侵入濃度小於 0.4 % 之臨界深度分別為 1.2 公分、3.9 公分、8.8 公分、及 12.4 公分 (圖 5.11)。同樣地，氯離子侵入第 1 年、第 10 年、第 50 年及第 100 年之臨界深度，花蓮港 3 號倉庫為 0.4 公分、

1.5公分、2.8公分及4.0公分(圖5.12);基隆港西16號倉庫為0.6公分、2.0公分、4.5公分及6.3公分(圖5.13)。

(二) 中性化深度

由於混凝土為一多孔性材料，因此空氣中之 CO_2 藉由孔隙進入混凝土內部，而與水泥中之 Ca(OH)_2 作用產生 CaCO_3 ，使得PH值降至9以下，鋼筋表面之鈍態膜受到侵蝕易發生氧化。根據 Klopfer[2]， CO_2 之滲透深度可表示為：

$$X = \sqrt{2Kt} \quad (5.3)$$

式中 X ：中性化深度，

K ：碳化係數，

t ：時間。

經藉由酚酞指示劑，我們可測出混凝土之中性化深度。依照公式(5.3)，可分析得花蓮港3號倉庫及基隆港西16號倉庫之碳化係數(表5.7)。其混凝土之中性化過程亦經模擬分析繪於圖5.14。

四、結論

(一)由圖 5.8及5.10中氯離子之分佈狀況，發現在混凝土表層處之氯離子濃度並非最大。此原因可能是由於表層裂縫較多而受到雨水沖洗致使濃度減低。至於安南國中的氯離子分佈狀況(圖5.7)，可能是當初混凝土骨材已受到氯化物的污染，再加上混凝土品質業已嚴重惡化龜裂所致。

(二)在圖5.9中，當愈深入混凝土內部時，氯離子之濃度逐漸趨近一定值(0.16%)，由此推測花蓮港 3號倉庫混凝土所使用之骨材當初可能已受到氯化物污染。經扣除此原污染含量後，發現氯離子之分佈狀況與理論更為符合(圖5.15)。

(三)根據圖5.12, 5.13及表 5.7，花蓮港 3號倉及基隆港西16號倉庫混凝土中目前氯離子之臨界深度分別為27.7mm (39年)、52.3mm (68年)及中性化深度分別為20mm、45mm，可發現在臨海地區之鋼筋混凝土受氯離子的影響較中性化為大。

(四)若考慮建築物之安全使用年限為50年時，氯離子侵入之臨界深度於高雄港 9-1號倉庫、花蓮港 3號倉及基隆港西16號倉庫分別為 8.8公分、3.1公分及4.5公

分(已扣除水泥粉刷之厚度)。而根據海洋混凝土構造物施工規範(1977年), 鋼筋保護層厚度為 5公分以上, 顯然並不十分保守, 故施工時嚴格要求此一低限是十分必要的。

五、參考文獻

1. Barrer, R.N., " Diffusion in and through solids ", Second edition, Cambridge University press.
2. Klopfer, H., " The carbonation of external concrete and how to combat it", One day conference on the repair of concrete structures, Imperial College, London 1981.
3. Van Daveer, J.R., " Techniques for evaluating reinforced concrete bridge decks ", Journal of the American Concrete Institute, 1975, PP.697-704.



照片 5.1 花蓮港 3號倉庫



照片 5.2 安南國中倉庫

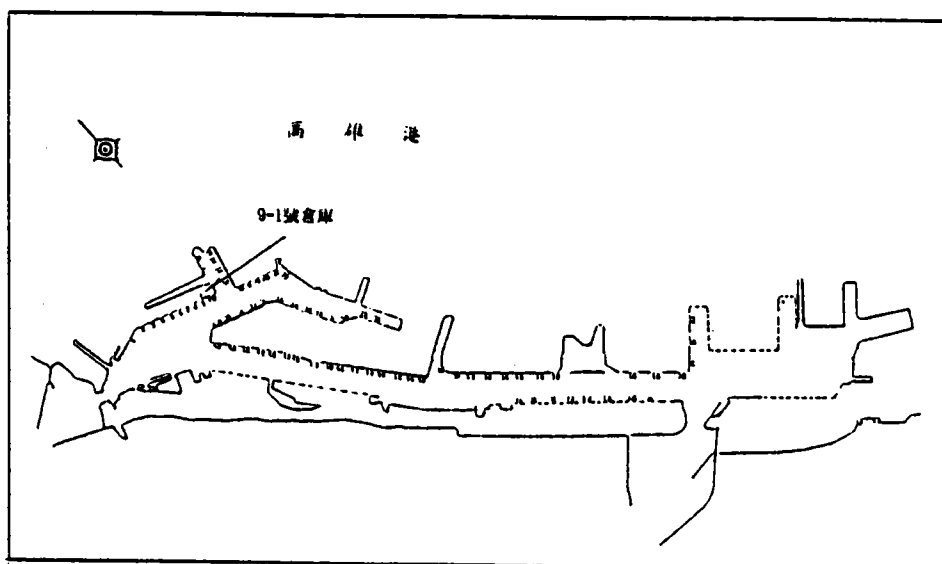


圖 5.1 高雄港 9-1號倉庫位置圖

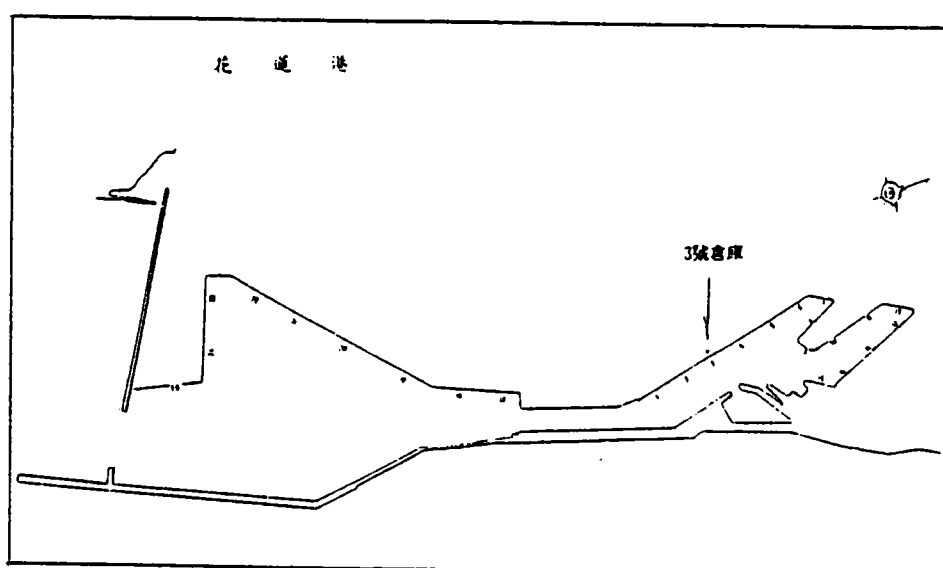


圖 5.2 花蓮港 3號倉庫位置圖

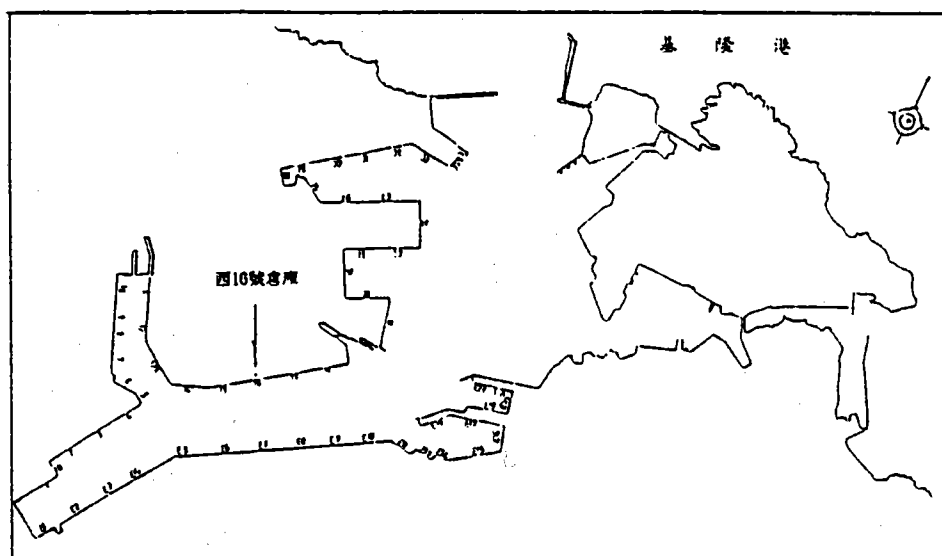


圖 5.3 基隆港西 16號倉庫位置圖

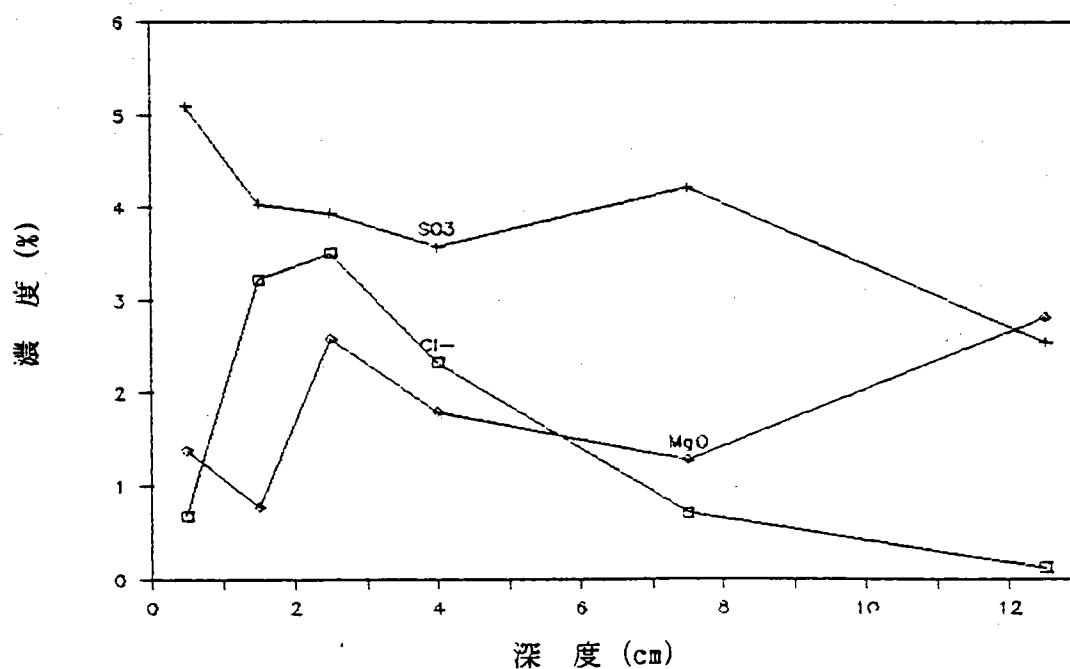


圖 5.4 高雄港 9-1號倉庫混凝土中有害物質侵入分佈

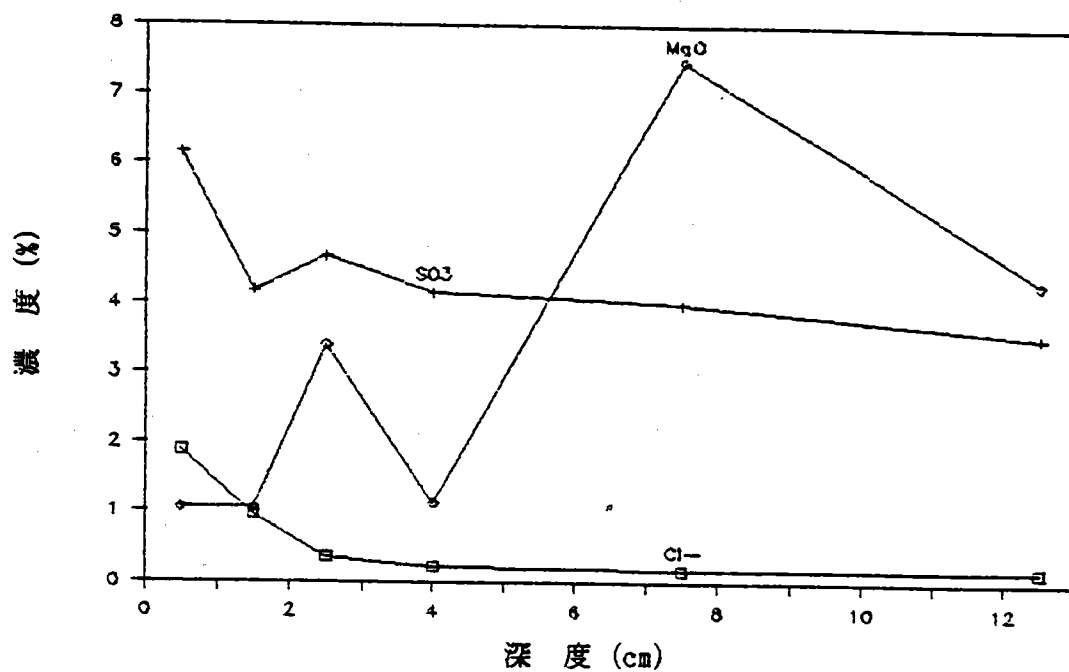


圖 5.5 花蓮港 3號倉庫混凝土中有害物質侵入分佈

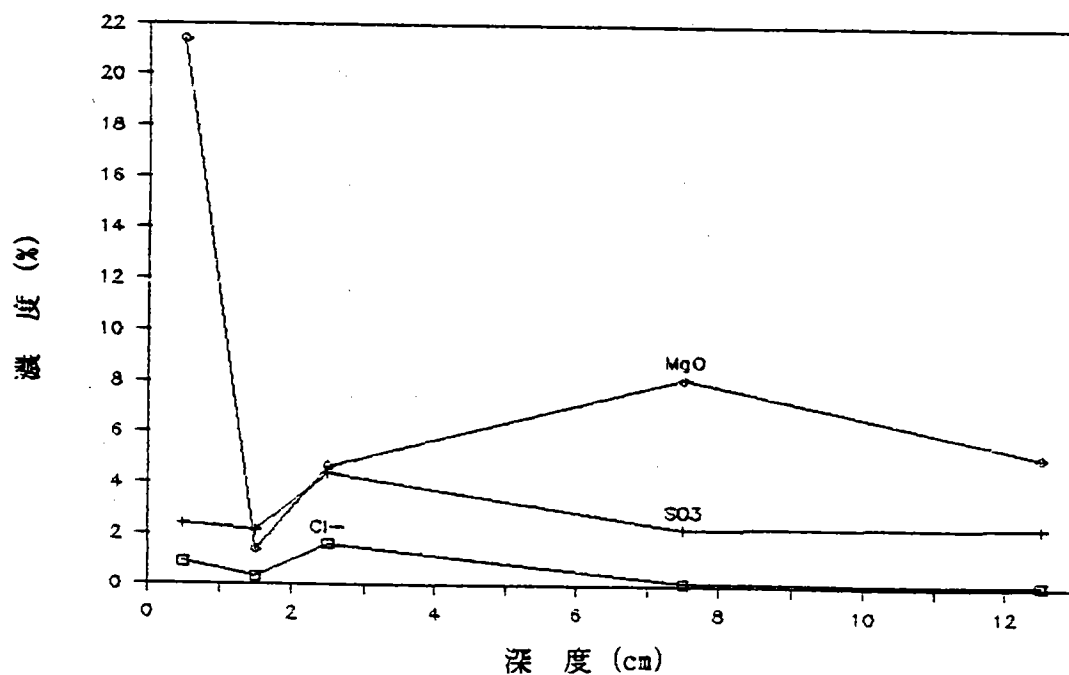


圖 5.6 基隆港西 16號倉庫混凝土中有害物質侵入分佈

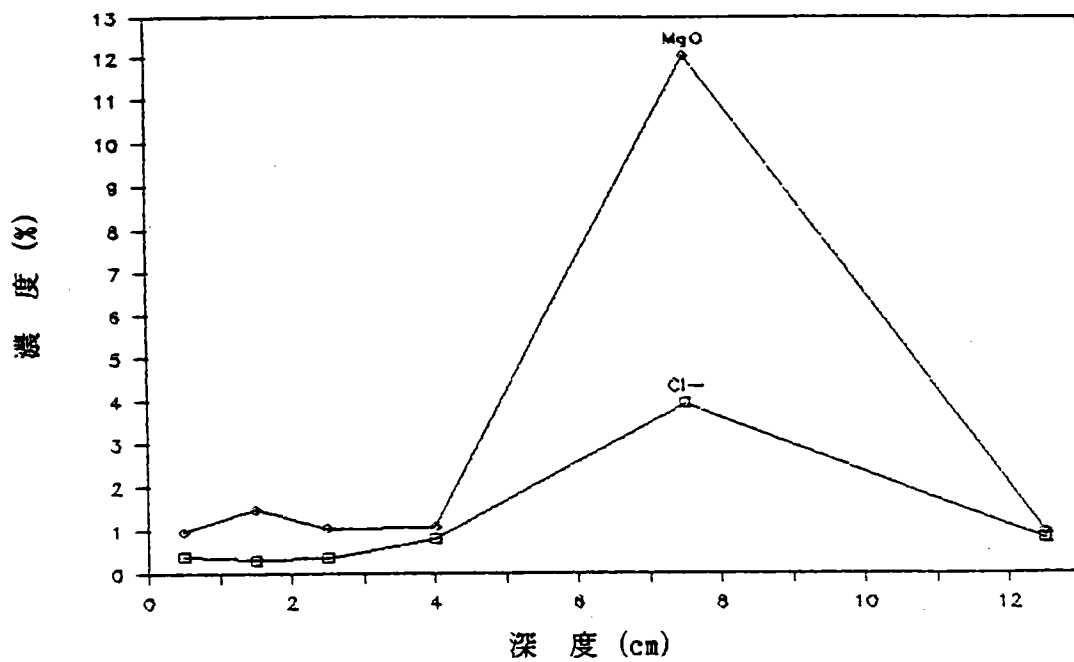


圖 5.7 安南國中倉庫混凝土中有害物質侵入分佈

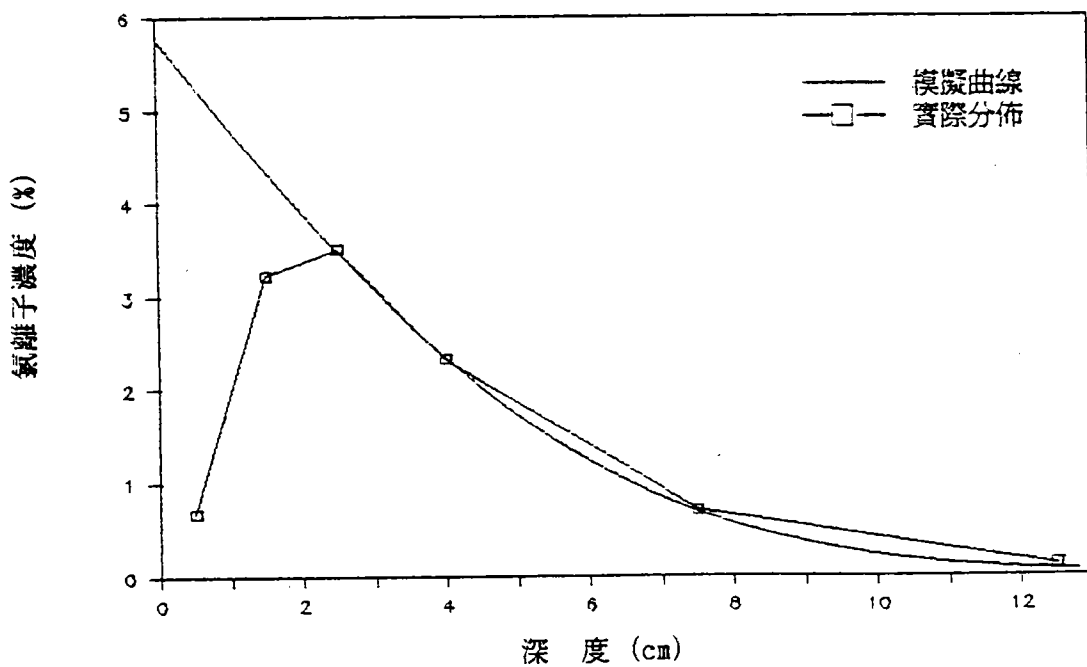


圖 5.8 高雄港 9-1號倉庫混凝土中氯離子分佈

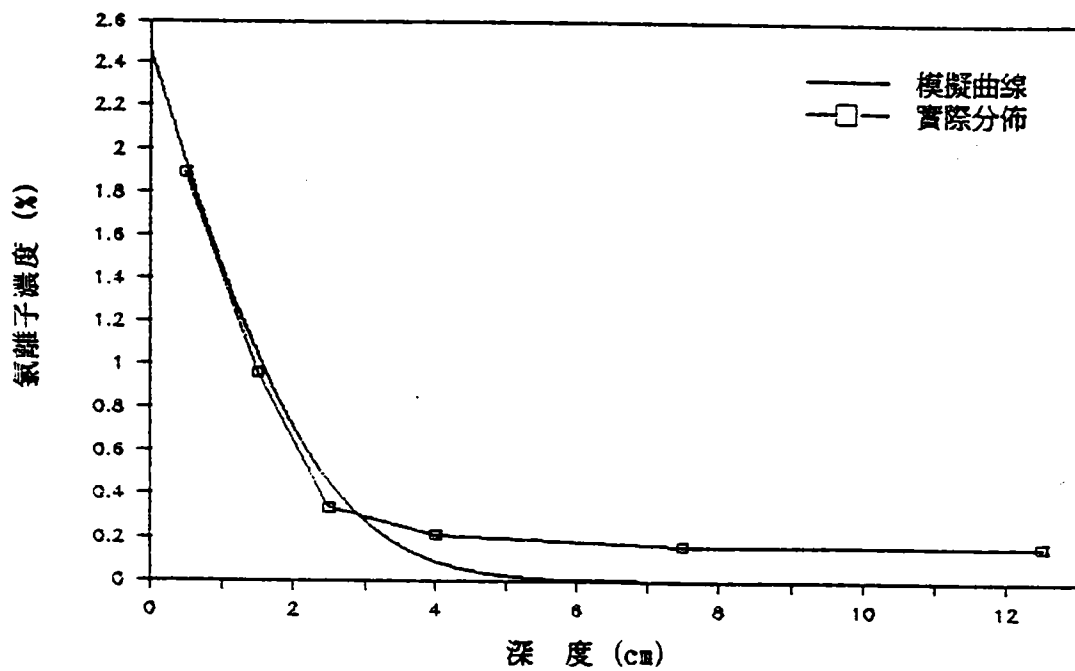


圖 5.9 花蓮港 3號倉庫混凝土中氯離子分佈

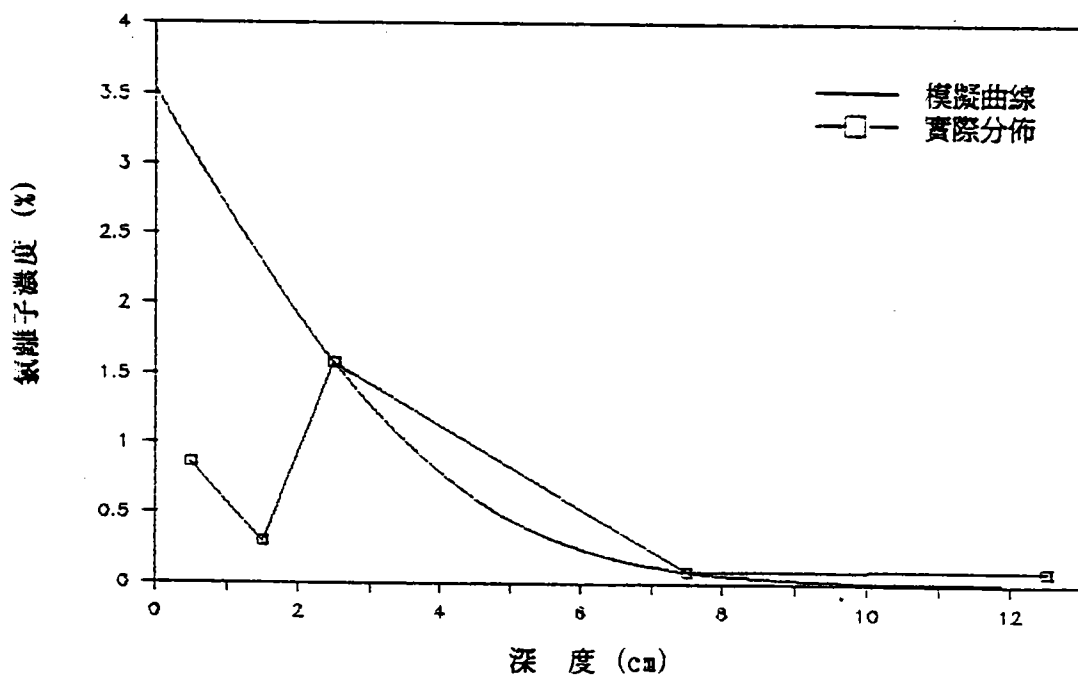


圖 5.10 基隆港西 16號倉庫混凝土中氯離子分佈

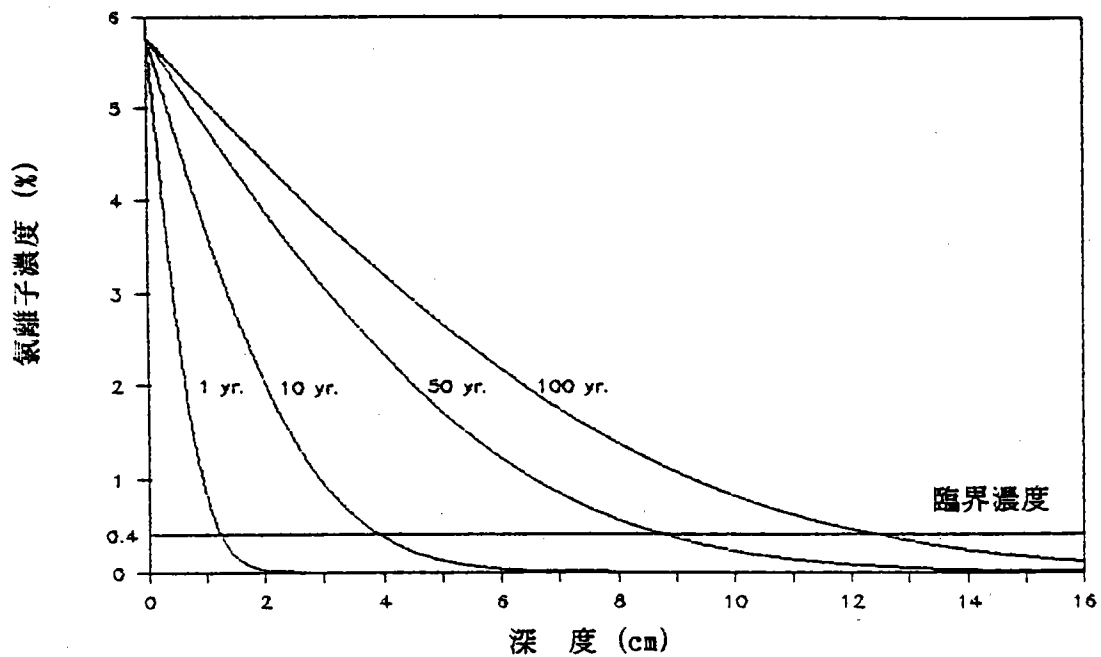


圖 5.11 高雄港 9-1號倉庫混凝土中模擬氯離子侵入與時間關係

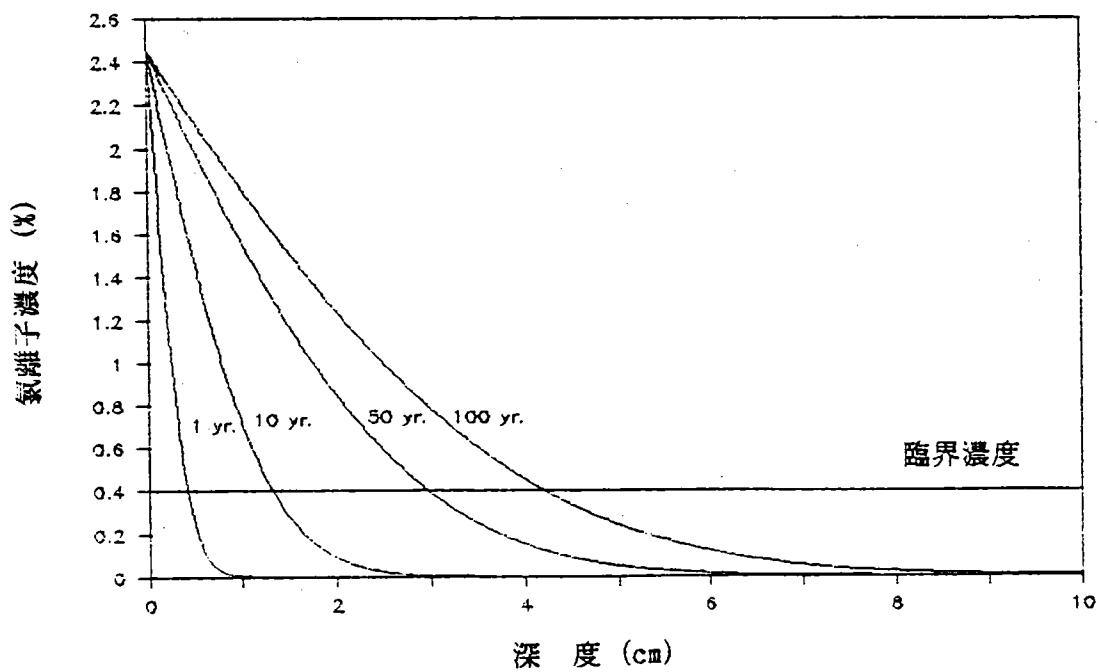


圖 5.12 花蓮港 3號倉庫混凝土中模擬氯離子侵入與時間關係

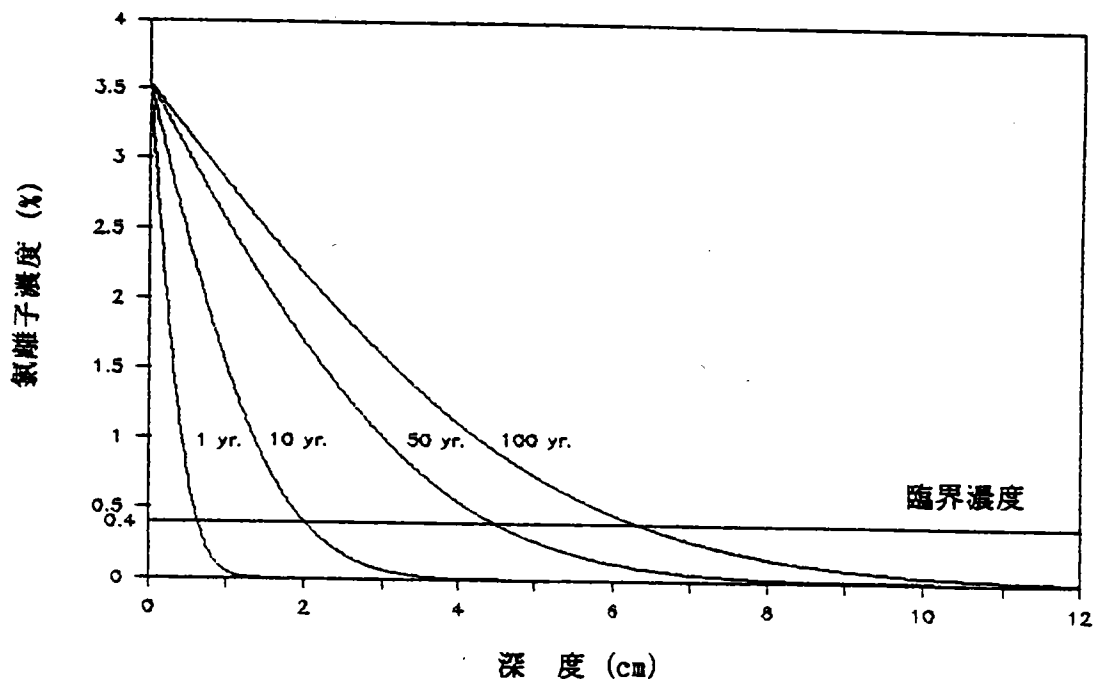


圖 5.13 基隆港西 16號倉庫混凝土中模擬氯離子侵入與時間關係

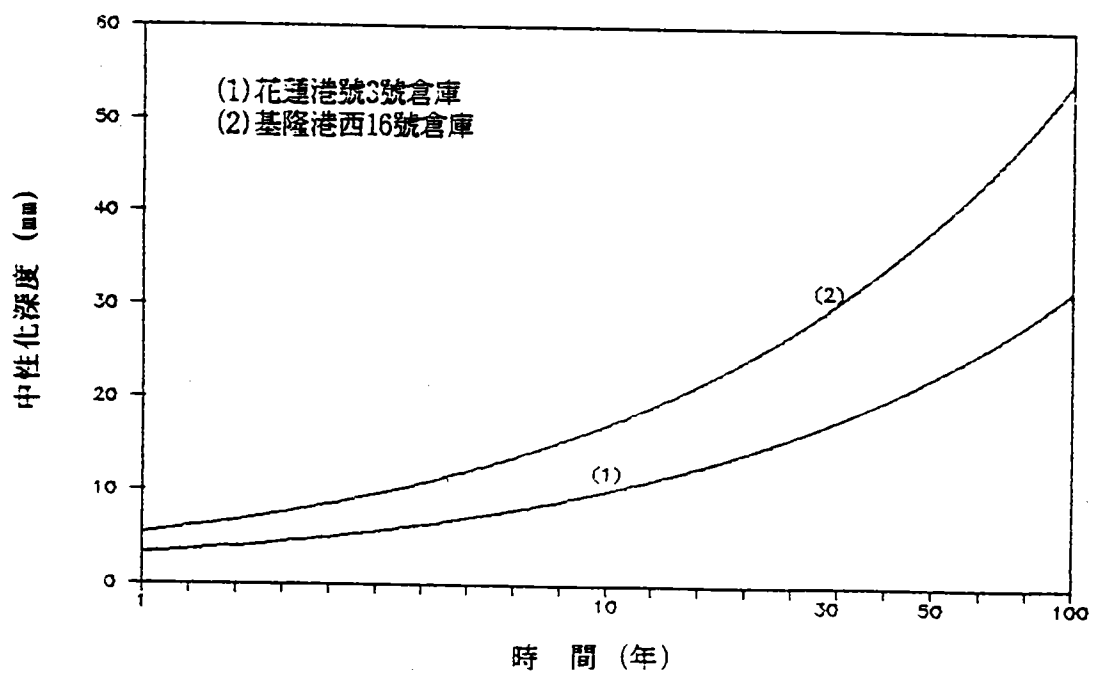


圖 5.14 中性化深度與時間關係

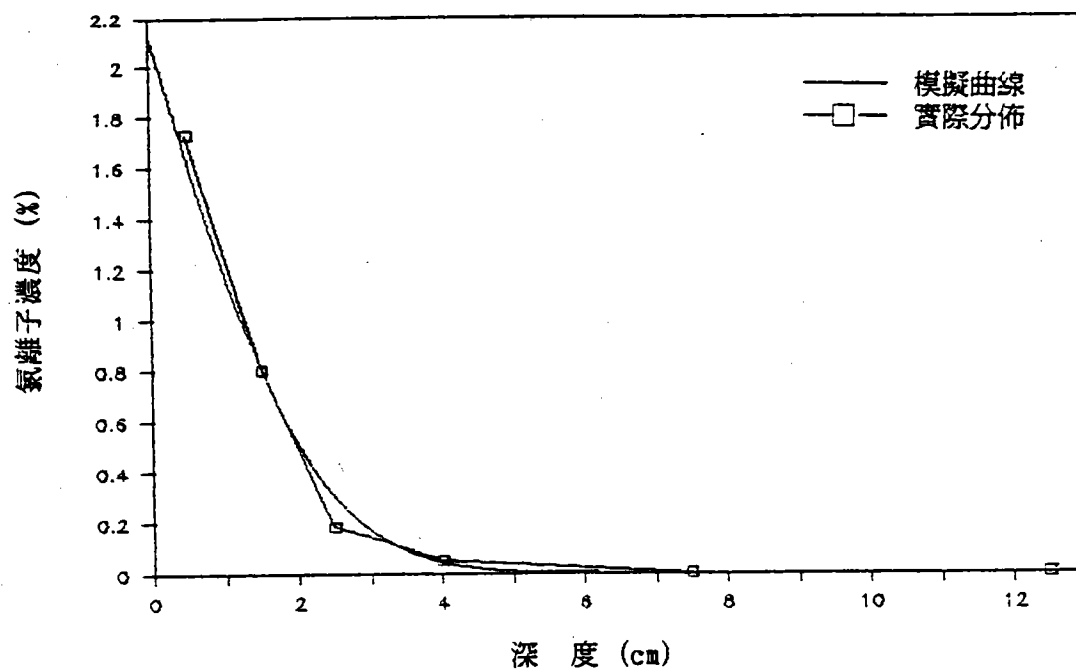


圖 5.15 花蓮港 3號倉庫混凝土中氯離子扣除原污染含量後之分佈

表 5.1 高雄港 9-1號倉庫有害物質侵入濃度 (%)

化 學 成 份	深 度 (cm)					
	0-1	1-2	2-3	3-5	5-10	10-15
Cl ⁻	0.68	3.23	3.51	2.33	0.71	0.11
SO ₄ ⁻²	5.1	4.04	3.94	3.57	4.22	2.54
MgO	1.39	0.78	2.59	1.8	1.28	2.82

表 5.2 花蓮港 3號倉庫有害物質侵入濃度 (%)

化 學 成 份	深 度 (cm)					
	0-1	1-2	2-3	3-5	5-10	10-15
Cl ⁻	1.89	0.96	0.34	0.21	0.16	0.16
SO ₄ ⁻²	6.15	4.18	4.67	4.15	4.0	3.53
MgO	1.06	1.06	3.39	1.13	7.46	4.29

表 5.3 基隆港西 16號倉庫有害物質侵入濃度 (%)

化 學 成 份	深 度 (cm)				
	0-1	1-2	2-3	5-10	10-15
Cl ⁻	0.86	0.3	1.58	0.08	0.09
SO ₄ ⁻²	2.4	2.12	4.36	2.27	2.4
MgO	21.42	1.36	4.64	8.19	5.15

(註：'侵入濃度'係相對於水泥之重量百分率，以CaO佔水泥重量65%為基準)

表 5.4 安南國中倉庫有害物質侵入濃度 (%)

化 學 成 份	深 度 (cm)					
	0-1	1-2	2-3	3-5	5-10	10-15
Cl ⁻	0.37	0.3	0.34	0.78	3.95	0.78
SO ₄ ⁻²	0	0	0	0	0	0
MgO	0.95	1.48	1.03	1.06	12.05	0.95

表 5.5 物性分析

建 築 物	抗壓強度 (kgf/cm ²)	透水係數 (m/sec.)	吸水率 (%)	比 重	水泥含量 (%)
高雄港 9-1號倉庫	—	9.72×10^{-8}	6.6	2.16	—
花蓮港 3號倉庫	141	3.6×10^{-8}	1.5	2.35	8.74
基隆港西 16號倉庫	55	—	—	—	8.42
安南國中 倉 庫	—	1.77×10^{-8}	6.4	2.25	—

表 5.6 氯離子表面濃度及有效擴散係數

建 築 物	年 齡 (年)	表面濃度 (%)	有效擴散係數 ($\times 10^{-8}$ cm ² /sec.)
高雄港 9-1號倉庫	50	5.77	0.74
花蓮港 3號倉庫	39	2.41	0.13
基隆港西 16號倉庫	68	3.52	0.25

表 5.7 中性化深度及碳化係數

建 築 物	年 齡 (年)	中性化深度 (mm)	碳化係數 (mm ² /年)
花蓮港 3號倉庫	39	20	5.13
基隆港西 16號倉庫	68	45	14.89

(註：'侵入濃度'係相對於水泥之重量百分率，以CaO佔水泥重量65%為基準)

附錄：電腦計算輸出

高雄港 9-1 號碼頭倉庫

Date: Feb. 20, 1988

t0 (Exposure Time) = 50.0 yr.
 C0 (Surface Concentration) = 5.76749 %
 D (Diffusion Coefficient) = .23459 cm²/yr.
 (.7439E-08 cm²/sec.)
 QC (Min. Accuracy Required) = .10E-07
 (DX(Erf) = .0500, No(Erf) = 10)
 Maximum Error in L.S.M. = .8434E-09

CL(X) & CL1(X) (N= 4):

X(cm)	CL(%)	CL1(%)	ERR(%)
2.50	3.5100	3.4936	.0164
4.00	2.3300	2.3583	-.0283
7.50	.7100	.7008	.0092
12.50	.1100	.0569	.0531

DIV (Sample Deviation of Fitting Curve) = .3640E-01 %

Chloride (.40%) Penetration Depths And Carbonation Depths
 At The Exposure Times Are:

Time(yr.)	Dcl(cm)	Dco(mm)
50.0	8.80	.00
1.0	1.24	.00
10.0	3.93	.00
50.0	8.80	.00
100.0	12.44	.00

K (Carbonation Coefficient) = .00000 mm²/yr.
 (.0000E+00 mm²/sec.)

The Effective Service Life (yr.) of Steel Cover :

DC(cm)	Tcl(yr.)	Tco(yr.)
5.00	16.2	*****

花蓮港 3 號倉庫

Date: Feb. 20, 1988

t0 (Exposure Time) = 39.0 yr.
 C0 (Surface Concentration) = 2.41410 %
 D (Diffusion Coefficient) = .04080 cm²/yr.
 (.1294E-08 cm²/sec.)
 QC (Min. Accuracy Required) = .10E-07
 (DX(Erf) = .0500, No(Erf) = 10)
 Maximum Error in L.S.M. = .3095E-10

CL(X) & CL1(X) (N= 6):

X(cm)	CL(%)	CL1(%)	ERR(%)
.50	1.8900	1.8812	.0088
1.50	.9600	.9667	-.0067
2.50	.3400	.3889	-.0489
4.00	.2100	.0602	.1498
7.50	.1600	.0001	.1599
12.50	.1600	.0000	.1600

DIV (Sample Deviation of Fitting Curve) = .1234E+00 %

Chloride (.40%) Penetration Depths And Carbonation Depths
 At The Exposure Times Are:

Time(yr.)	Dcl(cm)	Dco(mm)
39.0	2.47	20.00
1.0	.40	3.20
10.0	1.25	10.13
50.0	2.80	22.65
100.0	3.96	32.03

K (Carbonation Coefficient) = 5.12821 mm²/yr.
 (.1626E-06 mm²/sec.)

The Effective Service Life (yr.) of Steel Cover :

DC(cm)	Tcl(yr.)	Tco(yr.)
5.00	159.4	243.8

基隆港西 16 號倉庫

Date: Feb. 20, 1988

t0 (Exposure Time) = 68.0 yr.
 C0 (Surface Concentration) = 3.51591 %
 D (Diffusion Coefficient) = .08031 cm²/yr.
 (.2547E-08 cm²/sec.)
 QC (Min. Accuracy Required) = .10E-07
 (DX(Erf) = .0500, No(Erf) = 10)
 Maximum Error in L.S.M. = .1468E-10

CL(X) & CL1(X) (N= 3):

X(cm)	CL(%)	CL1(%)	ERR(%)
2.50	1.5800	1.5799	.0001
7.50	.0800	.0817	-.0017
12.50	.0900	.0005	.0895

DIV (Sample Deviation of Fitting Curve) = .6327E-01 %

Chloride (.40%) Penetration Depths And Carbonation Depths
 At The Exposure Times Are:

Time(yr.)	Dcl(cm)	Dco(mm)
68.0	5.23	45.00
1.0	.63	5.46
10.0	2.00	17.26
50.0	4.48	38.59
100.0	6.34	54.57

K (Carbonation Coefficient) = 14.88971 mm²/yr.
 (.4721E-06 mm²/sec.)

The Effective Service Life (yr.) of Steel Cover :

DC(cm)	Tcl(yr.)	Tco(yr.)
5.00	62.2	84.0

陸、鋼筋混凝土結構物之防蝕對策

饒 正*

一、前言

鋼筋之能與混凝土共同使用,除了它們有相似之熱膨脹性質外,最重要的是高鹼性的混凝土環境能在鋼筋表面生成穩定的保護膜,如果此氧化膜不生成或該膜無法保護鋼筋,則腐蝕就會產生,鋼筋之腐蝕會使結構物造成損傷或甚至損害。此保護膜會被以下三原因破壞:(1)混凝土無法完全包圍著鋼筋。(2)有害氣體之作用使鹼性減弱。(3)過多的氯離子或其它有害離子的侵入,如果以上條件存在,濕氣與空氣會與部份鋼筋接觸,則腐蝕就會產生。腐蝕之生成係電化學之作用,必須有電解質之環境,並在金屬面上有陽極陰極之生成,腐蝕才會發生,如果缺了其中一項,則腐蝕就不會發生。其他型式的腐蝕,如不同金屬材質之共同使用或迷走電流(DC Stray Currents)均會產生或加速腐蝕。

腐蝕之產生會對混凝土造成多種損害,如鋼筋之腐蝕生成物其體積會膨脹許多倍,這膨脹之壓力會對周圍之混凝土產生張力,使靠近鋼筋周圍之混凝土產生裂縫或剝落,鋼筋之初期腐蝕僅產生剝落,在鋼筋未被銹蝕到一定量時,結構體仍能保持完整。

當腐蝕發生在錨錠區域(Anchorage Zone)時,結構體會急速被破壞,握裹力(Bond Stress)和腐蝕張力之相加,會使混凝土保護層產生裂縫而剝落使得握裹力失去,保護層脫落亦會加速腐蝕。

混凝土內鋼筋之腐蝕在特定之環境內係非常嚴重的問題,其產生之主因係有足量的氯離子或其它有害離子附在鋼筋表面,目前停車場、橋樑、建築物、港灣結構物、混凝土管及其他鋼筋混凝土結構物正因鋼筋之腐蝕而產生損壞。這種因混凝土內鋼筋腐蝕及產生之裂縫、剝落所造成之損失非常大,而這些損失可因在設計及施工時考慮控制其腐蝕因子,而使損失減至最低。

* 省交通處港灣技術研究所助理研究員

二、現場環境之量測

首先吾人須考慮鋼筋混凝土結構物所在環境之情形，其產生腐蝕之趨勢如何而決定設計之規範，其應考慮之因素如下：

- (一)土壤：其係酸性或鹼性，係自然或回填之土壤，其電阻如何。
- (二)接觸到的水：其係自來水或鹽水、高潮位或在潑濺帶 (Splash Zone) 或受污染的水。
- (三)氣候：溫度及濕度之分佈如何。
- (四)大氣環境：是否受工業區之污染或海洋之影響。

三、腐蝕控制

(一)混凝土

1. 在惡劣之環境下，使用正確的混凝土材料，是抵抗腐蝕之最有利之利器之一。使用正確的水泥、摻料及配比是很重要的，在惡劣之土壤中PH值可能低於5.5，而硫酸鹽含量大於 1000ppm，或者水中含有之硫酸根離子含量大於150 ppm，吾人必須考慮使用正確之水泥種類，使用水泥之種類與硫酸根離子含量之關係如下：

水中硫酸根離子含量 (ppm)	土壤中硫酸根離子含量 (ppm)	應使用之水泥種類
150 以下	1000 以下	Type I
150~1000	1000~2000	Type II
1000 以上	2000 以上	Type V

在應使用 Type II 水泥之情況，若混凝土中摻用飛灰 (Fly Ash) 且取代水泥量不超過 20% 時，容許使用 Type I 水泥，但飛灰必須符合 ASTM C-618 之規範。高分子混凝土 (Polymer Concrete) 亦是有效防蝕之材料。

在土壤環境之PH值低於 5.5 時，必須使用 Type II 水泥，若必須使用 Type I 水泥時，則使用石灰岩 (limestone) 之骨材可抵抗酸性土壤。

- 2.適當之保護層厚度是非常重要的,5 - 7.5公分之保護層已夠符合規範之最低需求。
 - 3.混凝土之緻密度亦會影響鋼筋之腐蝕、緻密、低孔隙率、低水灰比(0.45)及富配比(Rich Mixture)能提供較好之防水性,在養生(Curing)中不致產生裂縫,其中很重要的一點係增加水泥用量是有極限的,因為和收縮(Shrinkage)有關。加入輪氧劑亦可減少透水性。使用飛灰、爐石 (Granulated Blast Furnance Slag)、矽灰(Silica Fume)及其他波索蘭(Pozzolans)材料亦能減少混凝土之透水率。
 - 4.使用防銹劑(Corrosion Inhibitors)亦為可行之方法,唯必須評估其在配比設計時其對腐蝕控制之有效性及與其它因子作用而對耐久性之影響。
 - 5.以上所提之水泥、骨材、摻料、用水....等材料必須合乎規範。
- (二)為了減少氯離或其它有害離子進入混凝土內,可考慮用以下之材料,當然需通過現場環境下之耐久性試驗才可。
- 1.液體之塗封(Sealer)可被應用於混凝土內以防止水之滲入。
 - 2.有機塗料(Organic Coatings)可作為混凝土之一種屏障,但它的薄膜不同於襯砌及塗膜(Membranes)。
 - 3.在混凝土表面以膠結性材料塗裝(Cementitious Coatings)作為保護。
 - 4.襯砌(Linings)及塗膜可應用於混凝土表面,唯其較厚之膜不同於有機塗料。
 - 5.以高分子之含浸(Polymer Impregnation)於硬化之混凝土表面可防止氯離子之滲入。

(三)鋼筋之塗裝及塗膜

減少鋼筋腐蝕最有效的方法之一係將鋼筋塗裝,由研究指出塗裝鋼筋與混凝土之握裹力相當好,當結構物位於惡劣環境下,尤其是氯離子極易滲入混凝土內時,塗裝鋼筋被極力推荐使用。

- 1.可應用鍍鋅之鋼筋,但其使用必須符合規範,尤其注意其脆化。
- 2.可應用溶附樹脂於鋼筋上,但必須符合規範。
- 3.其它之塗裝材料在評估後亦可使用。

(四)陰極防蝕法

陰極防蝕法係目前唯一證明可利用於新建及既存鋼筋混凝土結構物之最有效之防蝕法。可概分下列兩種：

1.犧牲陽極法

以鎂、鋅、鋁等較鐵電位低之金屬製成之陽極與之連接在一起，利用兩金屬間因電位差而產生之直流電為防蝕電流之方法。

2.外加電流法

由外界接受交流電力，將之變成低壓之直流電力，並使用難溶性之陽極以供應防蝕電流之方式，陽極一般使用高矽鑄鐵，鍍鉑鈦....等為主。

(五)腐蝕監測系統

腐蝕監測系統可埋入鋼筋混凝土內以監測所使用之防蝕系統之效果如何。監測系統之設備應包括下列幾項：

- 1.試驗用導電體，以金屬線連接於鋼筋上，同時接到檢查站的箱子內。
- 2.與鋼筋同材質且經特殊設計之試體埋入結構體之特定位置。
- 3.參考電極。
- 4.腐蝕速率探頭可用來量測腐蝕速率，是與鋼筋同一材質製成，裝放在特定之位置。
- 5.在裝置監測系統以前，所有之設備需經腐蝕專家或合格的專業工程師(Qualified Professional Engineer)檢查認可，結構體完成後亦同，且由他們來建立相關之資料(Baseline Data)及監測區間(Intervals)。

四、設計時之防蝕對策

(一)在非腐蝕之環境，一般之設計規範就可使用。

(二)當現場環境之量測結果指出可能腐蝕時，設計者必須考慮增加一些調整方法以減少該結構物因腐蝕所受到影響。

- 1.最基本之方法係將鋼筋隔絕於惡劣之環境，亦就是注意混凝土之品質，包括下列幾點：

- (1)增加混凝土保護層之厚度，因較厚之保護層可增加氯離子或其它有害離子到達鋼筋之時間，另外應特別控制因超負載、預力、收縮、潛變、溫度變化或基礎沉陷所產生之裂縫，細節請參考 ACI 318 規範。
 - (2)設計者應特別注意不可產生孔洞(Traps and Ponds)，因這些孔洞會含有液體且讓濕氣及有害離子進入混凝土內。結構物之表面積儘量小，尤其是橋樑，以免濕氣及鹽霧駐留。
 - (3)應注意施工之細節且製作出密實及均勻之混凝土，配比設計時可利用減水劑，以降低水灰比。無蜂窩、少無意義之空隙、高密度、無凝結裂縫、無材料析離或過多的浮水之低水灰比混凝土，會提供最高品質之保護。配比中摻入波索蘭(Pozzolans)亦可降低氯離子或其它有害離子之滲透率。
 - (4)在混凝土表面塗裝、襯砌等以阻擋氯離子或其它有害離子之滲入，但塗裝、襯砌....等材料需適當選擇，適合當地環境及能耐久。
- 2.當鋼筋無法隔絕於惡劣環境時，可考慮下列各點：
- (1)鋼筋使用溶附樹脂或其它有機非金屬塗裝，以使其在直接腐蝕環境下能受到保護，但是在漏漆的地方容易腐蝕，當塗裝鋼筋被使用時，建議混凝土內之鋼筋考慮全部都塗裝。
 - (2)鍍鋅鋼筋可因電化學之反應而防止腐蝕，但其有效性可能因氯離子或其它有害離子之滲入而降低。
 - (3)陰極防蝕法不管是犧牲陽極或外加電流，均能控制混凝土內鋼筋之腐蝕。
 - ①結構體預知受迷走電流干擾時，必須作防蝕措施。
 - ②對於預力混凝土之陰極防蝕須特別注意，因為所使用之塑膠套管或填縫水泥漿.....等不能將電流傳送給應力鋼線，以及其它之因素均會使陰極防蝕系統之設計較複雜。
 - ③在混凝土內之鋼筋或金屬材料必須能使電流連續，才能使陰極防蝕法達到其效果。
- 3.在混凝土內使用其它之金屬材料時須特別注意，如沒有採用陰極防蝕而使用不同之金屬連接在一起時，會加速腐蝕。任何不同金屬材料使用於混凝土內，同時暴露於腐蝕環境時，必須參考NACE PR0178-78 SEC. 3.2之規範。

4. 腐蝕抑制劑可被使用，唯必須評估其對混凝土之配比設計及耐久性之效果如何。
5. 如果現場環境量測知有迷走電流之存在時，則建議必須有專業防蝕專家參與工作。
6. 在腐蝕之環境下之結構物，特別是與公共安全有關時，設計者應考慮因為腐蝕造成結構物失敗之後果。在特定情況下，超靜定設計 (Structural Design Redundancy) 是需要的。

五、施工時之防蝕對策

(一) 在非腐蝕性環境下，可使用一般之施工規範。

(二) 但是當現場環境量測後，知其有腐蝕之趨勢時，為了減少及降低因腐蝕而對混凝土之影響，適宜之施工技術是必須考慮的。

(三) 混凝土

1. 為了確保混凝土之完整性及對塗裝鋼筋之損害減至最低，正確的澆製技術是必須的，鋼筋面上之混凝土保護層，在防蝕上扮演重要的角色，所以必須按照規範施工，並確保保護層之厚度及鋼筋之定位。
2. 在新拌及硬化混凝土之裂縫均能增加鋼筋腐蝕之趨勢，所以裂縫應儘量減少。
3. 為了減少不希望之孔隙，在搗實時應特別注意，正確之搗實可使混凝土較密實，而減少透水性，使混凝土品質優良，請按ACI Committee 307規範施工。
4. 混凝土之修飾是很重要的，應防止表面剝落，如果混凝土表面需塗裝時，適當之修飾是必需的。
5. 想要製造良質之混凝土，最重要之因素之一是正確之養生 (Curing)，而且要在澆製完成後就開始養生，有關之規定如下：
 - (1) ACI report 308 " 混凝土之養生 "
 - (2) ACI Committee report 305 " 熱天製作混凝土 "
 - (3) ACI report 306 " 冷天澆製混凝土 "
 - (4) ACI Committee 517 report " 在大氣壓力下之加速養生 "

(四)塗裝及塗膜

任何塗裝與塗膜之好壞與底材之品質及施工之技巧有關，必須按著製作者提供之規範施工，一般之注意事項如下：

- 1.在塗裝或塗膜以前，須確保底材之乾淨。
- 2.表面須清潔，且為了配合塗裝工作必須作表面處理。

(五)塗裝鋼筋

- 1.如果使用鍍鋅鋼筋，必須符合ASTM 767規範，如果須修補鍍鋅鋼筋時，按ASTM A780規範辦理。
- 2.如果使用樹脂溶附鋼筋，在運送時應注意不損壞其塗裝表面，相關之參考規範如下：
 - (1)ASTM A775 樹脂塗裝鋼筋規範。
 - (2)ASTM D3963 樹脂塗裝鋼筋規範。
 - (3)AASHTO M284811 樹脂塗裝鋼筋之臨時規範。
 - (4)NACE 樹脂塗裝鋼筋規範。
- 3.如果使用陰極防蝕法，則所有之塗裝鋼筋必須能使電流連接通過以達防蝕效果。
- 4.使用之塗裝材料必須符合其相關之規範才可。

(六)鋼筋之焊接必須符合規範。

(七)陰極防蝕

- 1.所有陰極防蝕及監測系統設備，在施工前需經專業腐蝕工程師認可，澆製及養生後亦同。
- 2.陰極防蝕系統需在專業腐蝕工程師之監督下安裝，而且需檢查是否符合設計及安裝之規範。
- 3.安裝完成後，專業腐蝕工程師應檢查並確定結構體是否在陰極保護下。

(八)檢查

檢查結構物之建造是否均合乎設計計劃與規範，及可能含產生腐蝕之因素是否完全被控制。

(九)必須訂定定期監測及保養其腐蝕控制系統之規範。

六、結論與建議

(一)鋼筋混凝土結構物之防蝕對策重點如下：

- 1.適當選擇混凝土材料，適當之設計，及正確之施工，因為這些因素能對鋼筋提供最好之保護環境。
- 2.在混凝土內加摻料或表面塗裝，以減少鋼筋腐蝕之可能性。
- 3.使用塗裝鋼筋。
- 4.陰極防蝕(Cathodic Protection)之裝置。
- 5.使用現場結構之腐蝕偵測系統，使得腐蝕一旦產生，吾人可即時知悉。

(二)在惡劣腐蝕環境下，新建結構物之防蝕，以採用塗裝鋼筋，增加保護層厚度，或陰極防蝕法最為有效。

(三)既有結構物之防蝕，以採用陰極防蝕法最為有效實用。

(四)目前國內鋼筋混凝土結構物之腐蝕問題，日趨嚴重，政府機關應儘速訂定適用之設計及施工規範，以供國人使用，並調查現有結構物之安全，以維護國人之生命安全。

(五)應提高國內施工技術之水準，使每位技術人員均能按規範正確施工，以達原設計之需求。

七、參考文獻

防蝕工程係專業之學問，鋼筋混凝土之防蝕在國內亦是起步階段，本所目前正積極投入大批人力及物力參與本項研究工作，茲就目前本所蒐集之重要相關文獻分列如下。

- 1.ACI " Manual of Concrete Practice " Part 1- 5
- 2.ACI " Manual of Concrete Inspection " SP-2
- 3.ACI " Formwork for Concrete " SP-4
- 4.ACI " Corrosion of Metals in Concrete " SP-49
- 5.ACI " Performance of Concrete in Marine Environment " SP-65
- 6.ACI " Sulfate Resistance of Concrete " SP-77

7. ACI " Fly Ash, Silica Fume, Slag and Other Mineral By-Products " SP-79
8. ACI " In Situ/Nondestructive Testing of Concrete " SP-82
9. ACI " Concrete Durability - Proceeding of Katharine and Bryant Mather International Symposium " SP-100
10. ACI " Corrosion, Concrete and Chloride " SP-102
11. ACI " Corrosion of Metals in Concrete " ACI 222R-85
12. ASTM " Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete " STP-713
13. ASTM " Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Material " STP-169B
14. ASTM " Corrosion of Rebars in Concrete " STP-906
15. ASTM " Laboratory Corrosion Test and Standards " STP-866
16. ASTM " Corrosion of Metals in Association with Concrete " STP-818
17. ASTM " Chloride Corrosion of Steel in Concrete " STP-629
18. ASTM " Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete " STP-713
19. ASTM " Durability of Building Materials and Components " STP-691.
20. ASTM " Electrochemical Corrosion Testing " STP-727
21. ASTM " Corrosion in Natural Environments " STP-558
22. NACE " Solving of Rebar Corrosion Problems in Concrete Proceedings " Sep. 1982
23. NACE " Corrosion Basics - An Introduction "
24. NACE " Cathodic Protection "
25. NACE " Concrete Reinforcing Steel Rebar Corrosion , 1976-1983
26. ICE " Corrosion in Civil Engineering "
27. " Seminar On Corrosion In Concrete Proceedings " May 1986 London, U.K.
28. " Concrete in Marine Environments Proceedings " Jun. 1987 Hong Kong
29. " Problems in Service Life Prediction of Building and Construction Materials Proceedings " Sep. 10-12 1984 Paris, France

- 30." Concrete in the Marine Environment Proceeding " Sep. 22-24 1986
London, U.K.
- 31." Concrete in the Oceans " Technical Report 1-6 Cement and Concrete
Association, Department of Energy, U.K.
- 32." Concrete Manual " 8th ed. U.S. Department of the Interior, U.S.A.
- 33." Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction " 1983 Ellis
Horwood Limited U.K.
- 34.F.D.Lydan " Developments in Concrete Technology - 1 " 1979 U.K.
- 35.技報堂"コンクリート 構造物の耐久性 ミリス" "
- (1)中性化 喜多達夫
- (2)化學的腐蝕 水上國男
- (3)鹽害(I) 大即信明
- 36.技報堂 " 鐵筋コンクリート 造建築物の耐久性向上技術 "
- 37." 海洋コンクリート 構造物の防蝕指針(案) " 日本 コンクリート 工學協會
- 38." 港灣鋼筋混凝土結構物防蝕技術研討會資料彙刊 " 港研所 民國74年 8月
- 39." 材料與腐蝕研討會資料彙刊 " 港研所 民國75年 6月
- 40." 海洋混凝土工程研討會資料彙刊 " 港研所 民國76年10月

柒、結論與建議

林維明※

一、結論

綜合本次對於港灣R.C.結構物、濱海公路橋樑、海線鐵路橋樑及建築物等所作之調查結果，可歸納造成鋼筋混凝土橋樑腐蝕之原因可能有下列因素：

(一)海洋環境太惡劣

根據港灣 R.C.結構物鑽心試體所作化性及微觀分析結果顯示，其中含有 Cl^- ， SO_4^{2-} 及MgO偏高，可見在海洋腐蝕環境下，腐蝕因子容易侵入R.C.結構體造成腐蝕現象，而濱海橋樑或建築物面向海之結構體吸附海風所挾帶之海鹽，因而容易造成混凝土惡化，鋼筋腐蝕之現象。

(二)未使用海洋混凝土設計與施工規範

國內至今尚未製訂海洋混凝土結構物之設計與施工規範，而僅使用陸上之規範，因為台灣處於易腐蝕之海洋環境下，為確保結構物之耐久性應儘速展開這方面之研訂工作，使工程設計與施工單位有規範所循。

(三)設計者考慮缺乏海洋結構之實際經驗

在濱海橋樑應考慮海洋環境之影性，例如澎湖跨海大橋就是橋面與海床之高程差太低，及未考慮動態分析而造成失敗。

(四)使用不適當之混凝土組成材料

例如粗細料或水泥之使用不當，在濱海或港灣結構物應使用TYPE II或TYPE V水泥較為適當。

(五)施工品質控制不良，未按規範施工

例如有些結構物之鋼筋保護層厚度不夠，或是夯實不佳，造成有蜂窩及孔洞之現象，因此水密性差，腐蝕因子容易侵入。

※省交通處港灣技術研究所研究員兼港工材料組組長

二、建議

建議今後在鋼筋混凝土結構物之腐蝕研究、設計與施工控制及維修保養等各方面應採行之工作分述如下：

(一)腐蝕研究

1.國內應找個濱海鋼筋及預力混凝土結構物續作下列研究：

- 詳細調查發生惡化實況(發生部位,歷時變化)。
- 以非破壞性偵測方法及鑽取結構體健全及惡化試體進行試驗,定出腐蝕惡化臨界參數。
- 作載重試驗以了解現況並作動力分析以明龜裂成因及評估使用壽命。
- 實測直接風吹鹽份量,並現場調查與分析混凝土含鹽量及滲透速率。
- 現場試驗各種可行防蝕方法,探討如何預防及中止腐蝕惡化持續發生。

2.發展及推廣現場腐蝕調查與試驗室分析結構體病變之技術。

3.定期舉行學術研討會,檢討腐蝕調查研究及實務報告。

(二)設計與施工控制方面

1.政府單位應儘速參酌國內外腐蝕資料及規範,擬訂濱海混凝土結構物防蝕設計與施工規範,若設計時所用之規範不當,則將鑄成大錯。

2.濱海混凝土結構物工程設計施工時,須注意下列各項：

- 設計時應考慮氣象與海洋環境因素之影響性。
- 鋼筋保護層厚度設計要足夠,施工時應嚴格控制在所訂之標準上。
- 設計應考慮橋樑動態行為及形態,降低撓度以防活載重造成龜裂現象。
- 混凝土配比要適當,強度要夠,水灰比應依規範儘量低,水泥用量要適當,使水密性高。
- 使用抗硫酸鹽之Type II 及Type V 水泥或添加波索蘭材料,降低C, A含量。
- 混凝土中拌合中使用防蝕劑以達防蝕效果。
- 應使用之骨材級配良好,吸水率小者,不含淤泥或鹽份。
- 應防止使用含有鹽份或腐蝕性之拌合水及細粗料或混凝土中NaCl含量不超過 0.1% 。

- 表面塗封材料之選用要適當。
- 混凝土使用摻料，其 Cl^- 含量必須在極限範圍內。
- 混凝土結構物施工澆鑄時應密實堅固，施工應嚴格遵循規範。
- 混凝土外層需全面性塗刷防水防鹽份之塗膜處理。
- 電線配管或固定架等金屬材料之選用亦應考慮防蝕措施。
- 採取防海風及海浪所挾帶之鹽霧措施。
- 需提高混凝土之施工技術水準。
- 應力集中處或轉角處或乾濕循環作用之潮汐帶應特別加強保護。
- 使用鍍鋅、環氧樹脂鋼筋或安裝陰極防蝕或使用特殊抗鹼性玻纖或不銹鋼取代鋼筋。
- 避免使用長而細薄之結構單元。
- 施工方法要簡便。
- 養生時間要充分。
- 增加監工人員素質。
- 鋼筋配筋設計要考慮間距，可確保作合適之灌漿與夯實工作。

(三)濱海混凝土結構物維修保養應採行措施

- 施工完成後應定期作檢查，製成病歷表，並繼續追蹤進行腐蝕研究。
- 發現惡化，應即早維修。
- 維修前應採用非破壞性方法詳細調查其惡化及銹蝕程度及範圍。
- 適當地選擇補修方法及使用材料。
- 修補後應追蹤檢查抑制效果。
- PC樑之龜裂，應採用富柔性、防水、耐久之塗膜材料修補。
- 公路橋樑應嚴格限制車輛超載行駛。
- 政府應寬列防蝕預算。
- 調查及維修工作，應有防蝕經驗人員參與。
- 必要時得委託學術單位研究試驗，評估維修方法及適當材料之選用。
- 應儘速積極研究發展建立檢查及補修設計基準。