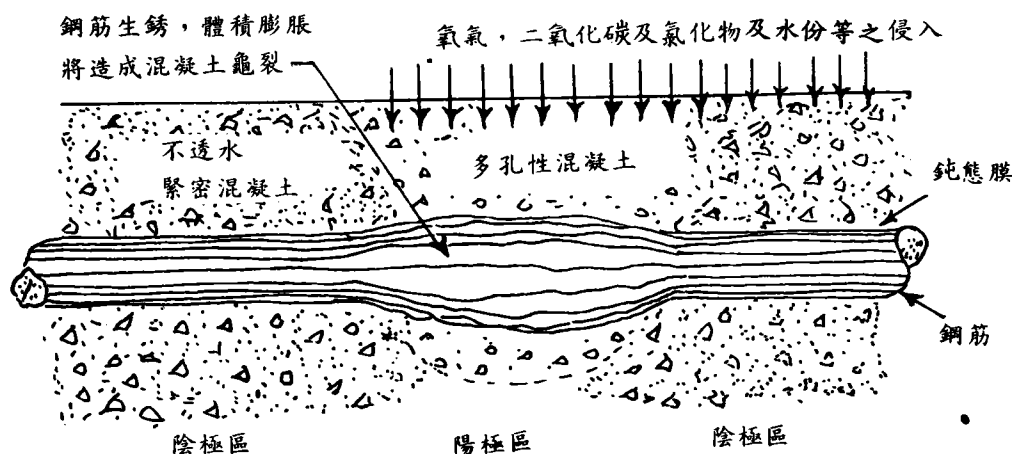


澎湖跨海大橋

腐蝕調查研究

THE CORROSION SURVEY OF PENGHU BRIDGE



鋼筋腐蝕(Steel Corrosion)

行政院科技顧問組

中華民國七十七年三月

THE SCIENCE AND TECHNOLOGY ADVISORY GROUP

THE EXECUTIVE YUAN

REPUBLIC OF CHINA

MARCH 1988

“澎湖跨海大橋腐蝕調查研究”勘誤表

頁 數	位 置	誤	正
VII	第26行	厚不足	厚度不足
7	第 4行	Renforcing	Reinforcing
7	第17行	[5]	[14]
9	第12行	掃瞄電子	掃瞄式電子
9	第15行	鈣矾石	鈣矾石
11	第 3行	鈣矾石	鈣矾石
11	第 8行	Vustite	(Vustite)
11	第 9行	鐵鏽在有	鐵鏽有
11	第17行	Tederation	Federation
35	第17行	測波器	示波器
36	第22行	公司研究試驗室	公司研究室
36	第24行	評鑑介紹	詳細介紹
40	第12行	乾濕	乾結
41	第 2行	抗硫酸水泥	抗硫酸鹽水泥
41	第13行	如是橋樑	如受橋樑
43	第21行	[34]	關掉
44	第10行	[34]	關掉
89	第 8行	海水極易	海水極
92	第13行	(1785)	(1985)
92	第17行	condition	Condition
92	第22行	ACT	ACI
92	第23行	field and Labratory	Field and Laboratory
94	第12行	research laboratories	Research Laboratories

卷 首 語

政府因鑒於進步的材料科技，是達成我國發展經貿任務，配合國防及工業需要之原動力。民國七十年將材料列為我國八大重點科技之一，年來積極推動工作，包括人才羅致及培育，研究機構之成立，近期及長期研究計劃之規劃及執行，以及材料技術之提昇等，已奠定良好之發展基礎。但材料發展現況及應行興革事項，亟待調查研究，以供學術界、工業界及政府有關部門選擇重點，推動發展之參考。

台灣四面環海，屬腐蝕嚴重區域，橋樑及海域鋼筋混凝土結構物腐蝕問題，不但每年耗損龐大維修費用，甚至導致使用安全，澎湖跨海大橋腐蝕問題，即為一實例。為進一步研擬適當因應措施，本組委請台灣省交通處港灣技術研究所，展開研究調查工作，承相關專家學者，群策群力，提出結論及建議，至深感佩。

該大橋所處環境特殊，設計建造之初，尚未熟悉該地區空氣及海水對建造物腐蝕之問題，致腐蝕情形，相當嚴重，除降低使用年限外，主管單位為行車安全，不得已採取將兩端低橋部份，改建為路堤之補救措施。今後為有效掌握防蝕技術，宜考慮在重要地點裝設腐蝕偵測系統，準確記錄橋堤工程所受當地海象及業務運作影響，加以研究評估，以期即早發現其潛藏之問題，持續追蹤檢查。

本報告之結論與建議，均係經由實地調查及研析結果而得，雖因人力、物力及時間所限，未盡完整，但足以顯示海島地區潛藏腐蝕問題之嚴重性，除供專業單位參考外，亦盼能提醒國人在新建鋼筋混凝土結構物時所需預採防蝕之措施；對舊有建造物，亦可助其提高防蝕警覺，採取適當對策，以策安全，亦節省物力，充分發揮材料科技之功能有厚望焉！

吳 伯 楨 謹識

中華民國七十七年三月三十一日

目 錄

卷首語

目 錄.....	I
圖之目錄.....	III
表之目錄.....	VI
摘要(中文).....	VII
摘要(英文).....	XI
致謝.....	XIX
澎湖跨海大橋概況.....	XX

一、緒言..... 1

- (一)調查動機
- (二)調查目的
- (三)調查研究方式範圍
- (四)預期成果

二、研究背景..... 4

- (一)跨海大橋腐蝕沿革及初期處理經歷
- (二)混凝土中鋼筋腐蝕因素
- (三)鋼筋混凝土腐蝕鑑定技術
- (四)微觀觀測腐蝕的技術
- (五)海洋結構物耐久性規範

三、調查與試驗..... 34

- (一)前言
- (二)澎湖大橋歷年腐蝕資料之蒐集
- (三)海洋環境資料及海水樣品蒐集

(四)現場非破壞性檢查	
(五)結構體混凝土鑽心取樣	
(六)試驗室分析	
四、研究結果分析與討論.....	39
(一)橋樑相關資料之蒐集，分析與討論	
(二)海氣象資料及水質分析	
(三)現場非破壞性試驗	
(四)混凝土結構體之鑽心取樣	
(五)試驗室分析	
五、結論與建議.....	88
(一)結論	
(二)建議	
六、參考文獻.....	92
七、附錄.....	95
(一)座談會紀錄	

圖之目錄

圖 1-1	澎湖跨海大橋腐蝕調查研究流程圖.....	3
圖 2-1	現有澎湖跨海大橋位置、平面及斷面圖.....	12
圖 2-2	混凝土內鋼筋腐蝕的可能因素示意圖.....	13
圖 2-3	水灰比對水泥漿體水份滲透性的影響.....	14
圖 2-4	水灰比與水泥漿體氯離子滲透性的關係.....	14
圖 2-5	水泥砂漿滲透係數與碳化作用深度的關係.....	14
圖 2-6	在水泥漿溶液中氯化物的濃度隨時間及C ₃ A的含量增加而減低.....	15
圖 2-7	C ₃ A含量對鋼筋腐蝕造成混凝土裂縫的影響作用.....	15
圖 2-8	氯化物對鋼筋腐蝕環境酸鹼值的影響.....	16
圖 2-9	造成鋼筋腐蝕所需之氯離子濃度隨水泥漿體PH鹼性之增加而昇高.....	16
圖 2-10	金屬的腐蝕.....	17
圖 2-11	鋼筋相對腐蝕率與保護層及水灰比之關係.....	17
圖 2-12	高水灰比且鋼筋上有空氣袋之混凝土內鋼筋腐蝕的示意圖.....	18
圖 2-13	保護層厚度對沉陷裂縫的影響.....	18
圖 2-14	水泥漿體SEM顯微晶相示意圖.....	19
圖 2-15	水化一天之卜特蘭水泥漿體之SEM微觀圖片.....	19
圖 2-16	部份水化矽酸三鈣之SEM微觀圖片.....	20
圖 2-17	水化10天之矽酸三鈣SEM微觀圖片.....	20
圖 2-18	磨光及未磨光之C-S-H和矽酸三鈣微觀圖片.....	20
圖 2-19	水化的矽酸三鈣水化物沿氫氧化鈣節理拆裂面之SEM微觀圖.....	21
圖 2-20	水泥漿體在CaSO ₄ 溶液中產生六角形鋁酸鈣水化物.....	21
圖 2-21	水化三天及含有CaCl ₂ 之矽酸三鈣水化物C-S-H之外觀.....	21
圖 2-22	鈣氫鋁化物之六角板狀晶體及網狀C-S-H(含Cl ⁻)外形.....	22
圖 2-23	惡化海堤試體內之鈣矾石及Thaumasite之EDX結果.....	22
圖 2-24	氫氧化鈣的溶解和二次石膏的形成之微觀圖片.....	22
圖 2-25	碳化產物之EDX.....	23

圖 2-26 暴露海水中二天及十四天之Brucite層的結晶.....	24
圖 2-27 浸泡於海水中之纖維混凝土中鋼纖表面之腐蝕生成物微觀圖片.....	24
圖 3-1 現場橋樑33孔及59孔進行非破壞性檢測及大橋下之海水水質調查.....	37
圖 3-2 26、30、74孔PC樑及76孔RC樑進行非破壞性檢測及鑽心取樣.....	38
圖 4-1 澎湖跨海大橋簡圖.....	54
圖 4-2 複合斷面型之U型橋設計，樑底與版底與橋墩相接(大甲溪橋).....	55
圖 4-3 一體成型之日本東北新幹線之鐵路U型橋.....	55
圖 4-4 澎湖地區風玫瑰圖(1971-1980).....	56
圖 4-5 澎湖地區月平均相對濕度圖(1971-1980).....	57
圖 4-6 澎湖地區氣溫月平均變化圖(1971-1980).....	57
圖 4-7 澎湖地區月平均降雨量變化圖(1971-1980).....	58
圖 4-8 第66孔大樑現場觀測腐蝕狀況描繪圖.....	59
圖 4-9 防蝕處理後仍出現之腐蝕現象.....	60
圖 4-10 大樑龜裂比率與橋樑高程關係圖.....	61
圖 4-11 隔樑龜裂比率與橋樑高程關係圖.....	62
圖 4-12(a) 76孔R.C.樑試錘數值.....	63
圖 4-12(b) 76孔R.C.樑試錘強度分佈圖.....	63
圖 4-12(c) 76孔R.C.樑腐蝕電位分佈圖.....	63
圖 4-12(d) 76孔R.C.樑腐蝕電位值.....	63
圖 4-13(a) 74孔R.C.樑試錘數值.....	64
圖 4-13(b) 74孔R.C.樑試錘強度分佈圖.....	64
圖 4-13(c) 74孔R.C.樑腐蝕電位分佈圖.....	64
圖 4-13(d) 74孔R.C.樑腐蝕電位值.....	64
圖 4-14(a) 26孔P.C.樑試錘強度分佈圖.....	65
圖 4-14(b) 26孔P.C.樑腐蝕電位分佈圖.....	65
圖 4-14(c) 26孔P.C.樑腐蝕電位值.....	65
圖 4-15 59孔P.C.樑試錘強度分佈圖.....	66

圖 4-16(a) 59孔橋板試錘強度分佈圖.....	67
圖 4-16(b) 59孔橋板試錘強度數值.....	67
圖 4-17 74及76孔大樑鑽心位置圖.....	68
圖 4-18 鑽心試體外觀圖.....	69
圖 4-19(a) 74孔大樑鑽心試體抗壓強度與N.D.T值關係圖.....	70
圖 4-19(b) 76孔大樑鑽心試體抗壓強度與N.D.T值關係圖.....	71
圖 4-20 鑽心試體、水泥、粗、細骨材含量比率圖.....	72
圖 4-21 鑽心試體氯離子含量與深度關係圖.....	73
圖 4-22 X光繞射分析圖.....	74
圖 4-23 74-02-40 試體SEM圖.....	75
圖 4-24 74-02-55 試體SEM圖.....	75
圖 4-25 74-03-38 試體SEM圖.....	76
圖 4-26 76-2-外 試體SEM圖.....	77
圖 4-27 76-2-中 試體SEM圖.....	77
圖 4-28 76-6-外 試體SEM圖.....	77

表之目錄

表 2-1	澎湖跨海大橋防蝕處理記錄.....	25
表 2-2	混凝土品質對碳化作用之影響.....	26
表 2-3	水泥漿養護時間對滲透性之影響($w/c = 0.51$).....	26
表 2-4	硬固卜特蘭水泥漿體之組成.....	26
表 2-5	海洋混凝土結構物耐久性規範.....	27
表 2-5	海洋混凝土結構物耐久性規範.....	28
表 2-5	海洋混凝土結構物耐久性規範.....	29
表 2-5	海洋混凝土結構物耐久性規範.....	30
表 2-5	海洋混凝土結構物耐久性規範.....	31
表 2-6	第二種防蝕法相關規範.....	32
表 2-7	耐久性偵測使用之技術.....	33
表 4-1	美國混凝土協會(ACI Committee 224)對破裂寬度限制之建議.....	78
表 4-2	英國(British Standard Institue)及其他設計規範對破裂寬度之限制...	78
表 4-3	澎湖潮位分析.....	78
表 4-4	澎湖西嶼東側海域表面水質分析.....	79
表 4-5	澎湖跨海大橋第61孔海水水質分析.....	79
表 4-6	大樑與間隔樑龜裂統計表.....	80
表 4-7	鑽心試體觀察情形.....	81
表 4-8	74孔大樑鑽心試體抗壓強度表.....	82
表 4-9	76孔大樑鑽心試體抗壓強度表.....	83
表 4-10	鑽心試體比重與孔隙率.....	84
表 4-11	鑽心試體配比分析.....	85
表 4-12	鑽心試體氯離子檢驗報告表.....	86
表 4-13	76孔大樑鑽心試體X光繞射結果之礦物成份表.....	86
表 4-14	現場取樣鋼筋試驗報告.....	87

摘要

澎湖跨海大橋於民國59年底完工，60年通車，64年起陸續發現腐蝕，73年基於行車安全，將低橋位部份改建為路堤，於76年 8月完工，高橋位部份73年臨時以塗料作防蝕處理以防惡化並觀測防蝕效果，為安全計亦將改建為路堤，行政院科技顧問組為剖析本大橋腐蝕原因，提醒國人對預力與鋼筋混凝土腐蝕之重視，特委託港灣技術研究所進行本項研究計劃。

本次現場調查先目視全部大橋並描繪腐蝕龜裂發生位置，同時進行海水取樣及水質分析工作，然後選擇腐蝕較嚴重之33孔及59孔之橋樑內、外海側及橋面底版，使用超音波及試錘量測結構體之混凝土表面強度、R-Meter測保護層厚度，並拖吊26、30、及74孔三支PC樑及76孔一支RC樑，除進行前三項非破壞調查外，並用Pathfinder測量腐蝕電位及鑽心取樣及鋼筋取樣，送回試驗室進行混凝土試體外觀描繪與研判使用配比是否適當..等；並測定混凝土比重、孔隙率、抗壓強度、水泥及粗細骨材含量、氯離子侵入擴散情形及使用 X光繞射分析(XRD)及掃描式電子顯微鏡(SEM)微觀混凝土結構體病變特徵及鋼筋物性試驗了解鋼筋惡化狀況等工作。

根據現場調查與試驗室分析結果剖析可發現下列現象：

1. 現場腐蝕情形PC樑較RC樑嚴重，T型預力樑較箱型懸臂式預力拱樑嚴重，橋面距海水面低者之情況腐蝕較嚴重。
2. 本大橋面向外海方向為西北，全年主風向NNE佔41%，平均風速 $>10 \text{ m/sec}$ 者，全年有123天，在如此強風直接吹襲下，海風挾帶海鹽容易侵入結構體，而且橋面設計高程太低，波浪容易潑濺至橋面底版和主樑、隔樑上，外海側首當其衝，故外海側腐蝕情況較為嚴重。
3. 本地區之氣溫大於 30°C 者，全年有123天，每天溫差達 11.9°C ，乾旱季節長，容易造成混凝土結構發生乾濕反覆作用，再加上使用期間常有超載現象，而且本地區因為沒有河川稀釋，所以海水中含鹽量較高，一旦混凝土有龜裂現象，海水中所含氯離子容易侵入而造成腐蝕。
4. 鋼筋保護層厚不足，僅 30-47mm，由試體外觀描繪結果可知骨材多呈扁平狀，由於施工時搗實及振動不良，故易造成材料析離及泌水性高，骨材界面停滯許多氣泡無

法排除，透水性強，粗骨材佔25-67%為多漿配比，易產生乾燥收縮。

5. 水泥粗細骨材含量及水泥量不均，抗壓強度相差大，顯然為施工不良所致。

6. 由氯離子分佈可知為外界侵入。

7. 由 X光繞射分析結果顯示混凝土已礮化，由 SEM微觀照片可得出混凝土已受海水侵蝕，及鋼筋銹蝕惡化變化。

8. 高橋部份雖使用六種防蝕方法維修，然而腐蝕因子早已侵入而未能完全清除，故未盡抑制腐蝕效果。

9. 由龜裂比率統計分析發現，大樑中央部位發生機率較高，係因超應力所致，同時統計分析亦發現低橋位龜裂比率要比高橋位高出很多，其原因係超載及腐蝕兩者惡性循環之結果。

(一) 結論

因此對於本大橋發生嚴重腐蝕致因可得出下列結論：

1. 海洋環境太惡劣

強風、巨浪、乾旱、含鹽量高等。

2. 未使用海洋混凝土設計與施工規範

在本報告中列出日本、美國、挪威、法國等先進國家所訂之海洋混凝土耐久性規範，現各國均在研擬中。

3. 設計時缺乏海洋結構經驗者參與

如橋面距離海面太低，未使用ASTM第二種水泥及採用何種結構型態在海洋環境下比較容易發生腐蝕等現象，均未能在設計中加以考慮。

4. 使用不適當之混凝土組成材料

例如使用扁平狀骨材、水泥量不均勻、多漿配比等。

5. 施工品質控制不良，未按規範施工

現場鋼筋保護層厚度，超音波及試錘量測結果顯示品質不均勻，鑽心試體分析結果亦顯示抗壓強度相差太大及粗、細骨材與水泥含量不均勻等均為施工品質不良之明証。

6. 使用期間，未限制車輛載重

經常有超載現象發生，因此大樑容易發生撓曲及龜裂現象。

7. 維修時，未先研判混凝土惡化及鋼筋銹蝕程度與範圍

平時缺乏檢查，發現腐蝕時亦未先進行非破壞性檢驗及鑽取試體分析方法剖析混凝土惡化及鋼筋銹蝕程度與範圍，以供評估維修方法及使用材料之依據並及早作維修處理，而僅依據目測結果評估，致使維修方法與使用材料未盡抑制之效。

(二) 建議

由本澎湖跨大橋腐蝕個案研究結果獲知，為確保濱海橋樑結構物避免發生腐蝕，建議今後在腐蝕研究應加強之工作，設計與施工控制及維修保養應採行之措施如下：

1. 腐蝕研究

(1) 國內應找個濱海結構物續作下列研究：

- 詳細調查惡化實況(發生部位, 歷時變化)。
- 以非破壞性方法及鑽心取樣試驗結果，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，探討中止腐蝕或減緩惡化方法。

(2) 發展及推廣現場調查與試驗室分析之技術。

(3) 定期舉行學術研討會，檢討腐蝕調查研究及實務報告。

2. 設計與施工控制方面

(1) 政府單位儘速參酌國內外腐蝕資料及規範，擬訂海洋混凝土結構物設計與施工規範。

(2) 海洋混凝土工程設計施工時，須注意下列各項：

- 設計時考慮氣象與海洋環境因素。
- 保護層厚度之決定及維持。
- 設計應考慮橋樑動態行為及形態。
- 混凝土強度要夠，水灰比應依規範儘量低，水泥用量要適當。
- 使用Type II 及Type V 水泥或加上波索蘭材料。
- 混凝土中拌用防蝕劑之使用。
- 應使用之骨材粒度佳，吸水率較小者。
- 表面塗封材料之選用。
- 混凝土橋樑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。
- 採取防止海風及海浪挾帶鹽霧侵入混凝土結構體之措施。

3. 濱海混凝土結構物維修保養應採行措施

- 施工完成後定期檢查，作成病歷表，並繼續進行腐蝕之研究。
- 發現惡化，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。
- 適當選擇補修方法及使用材料。
- 修補後追蹤檢查抑制效果。
- PC樑之龜裂，應使用富柔性、防水、耐久之塗膜材料修補。
- 嚴格限制車輛超載行駛。
- 政府寬列防蝕預算。
- 調查及維修工作，應有防蝕經驗人員參與。
- 必要時委託學術單位研究試驗，評估維修方法及材料選用。
- 研究發展建立檢查及補修設計基準。

Abstract

Peng-Hu bridge was built in the end of 1970, and began in service next year. Unfortunately, it was found corrosion in the bridge after 4 years in service. For the traffic safety, the low level parts of the bridge deck were rebuilt to road embankment from July 1984 to August 1987. But the high level parts of the bridge deck, there were six types of repair materials had been chosen, the constructive method and the performance of these repair materials were compared after one and two years service. Finally, these parts will be rebuilt as an road embankment, too. In order to diagnose the corrosion problems of Peng-Hu bridge and taking great concern about the corrosion problems of prestressed and reinforced concrete structures, Science and Technology Advisory Group, The Executive Yuan R.O.C had entrusted us, Institute of Harbor and Marine Technology, with this research project.

In this in - Situ investigation had included visual surveying and recording the whole of deterioration situation of this bridge for statistis analysis; taking seawater samples and chemical nature analysis of the sea water; diagnostic surveying the corrosion extent of spans No.33 and No. 59, by using NDT technigue i.e, Ultrasonic Pulse velocity meter, test hammer and rebar-meter testing, etc. For detailed examination of the main reasons that caused corrosion, three PC beams of the 26th, 30th and 74th bridge opeaning and one RC beam of No. 76 bridge opeaning were trailed to be examined. The detailed survey employs a comprehensive range of NDT techniques to establish the quality

of concrete cover layer and the corrosion state of the embedded steel, concrete samples were also obtained, such samples were analyzed by a wide range of technique available in the laboratory i.e. visual appearance of core samples, compressive strength and chloride penetration test, chemical analysis, microstructure analysis (XRD, SEM) and physical analysis of the corrosive steel etc.

Based on the results of in-situ survey and laboratory testing, the following phenomenon could be concluded:

1. There were more severe corrosion situation in PC-girders than in RC-girders; in PC-girders of type than in PC-girders of boxed, arched & cantilever type. And the lower level of the bridge deck had more severe corrosion situation shown.
2. The offshore side of this bridge is facing NE direction. From the analysis of the recorded information of Peng-Hu meteorological station, the annual dominating wind direction is NNE direction with frequency of 40% and the annual frequencies for wind speed exceeding 10 m/sec is 123 days. Exposed on these marine environment, the strong wind contains seawater vapor can easily penetrate into the interior of concrete. Besides, the design elevation of bridge deck is too low that wind waves are easily splashing to the superstructure of the bridge. Therefore, the corrosion situation is more severe in the offshore side of the bridge.
3. The air temperature is higher in this area. The average daily air temperature over 30°C is about 123 days in a year. The daily temperature difference is about 11.9°C and drought season is very long too. In this situation, the concrete structure

is suffered dry-wet cycle and over-loading action. Once the concrete cracks, the seawater can easily penetrate into the interior of concrete and a progressively escalating cycle of cracking-corrosion-more cracking begins, eventually lead to complete deterioration of concrete.

4. Inadequate cover layer to reinforcement, they are only 30 to 47 mm by measured data. According to the analysis of external appearance of core specimen, the coarse aggregates are almost flat. The construction technique i.e. vibration and compacting were not controlled well during the mixing and placing stage, and causing the aggregates segregation, bleeding, water and air entrapped around rebar or other embedded material, higher permeability and more void exists in the concrete. The mix proportion of the coarse aggregates are 25-67 %, also the mortar proportions are too much, these phenomena of improper material usage are the reasons causing drying shrinkage.
5. Due to the facts of composition of aggregates and cement are not uniform, and the compressive strength of concrete is much different in the concrete texture. It is obvious the construction technique and mix design were not quality controlled well.
6. From the distribution of chloride content of core samples analyzed in the laboratory, it was revealed that Cl^- penetrated from the exterior marine environment.
7. Based on the results of X-ray diffraction pattern analysis, it is shown the concrete surface had already been carbonated, and the SEM morphologies show that the concrete was attacked by sea water and the embedded steel had been severely corroded.
8. Owing to the corrosion agents has already entered the interior

of the structure, therefore, even through there were six kinds of repair materials & methods used in the maintenance of spans No. 32-71, but the apparent deterioration phenomenon still exist.

9. The statistic analysis of damaged position revealed the crack concentrated majorly on the portion of beams and next to two sides, such phenomena explained overload might occur. Comparing with the probability of crack occurred, it is shown that the low level part of the bridge deck is higher than that of the high level part. It appears the results of over-loading and corrosion interaction.

(I) Conclusion

The main reason that caused serious corrosion situation of Peng-Hu bridge can be concluded as follows:

1. It is exposed in the worst corrosive marine environment condition: strong wind, high waves, drought weather, high salt content,.....etc.
2. There are not any specification of design and construction for marine concrete structures could be followed during that time. In this report there are some recent guidance note for marine concrete structures listed.
3. Design of this marine bridge structure is not suitable: i.e. the clearance between highest wave crest to the beams bottom of this bridge is too low, also T type PC beams design is improper for long span structures in marine area etc.
4. Improper concrete mix design & unsatisfactory quality of the constituent: such as using flat aggregates, nonuniform content cement, coarse & fine aggregated and high mortar ratio, ASTM

type II or V should be used instead of type I in this marine environment.

5. Inadequate control of concrete practice: i.e. in sufficient cover layer to steel, the concrete strength is nonuniform. It shows poor compaction ; workmanship & inefficient curing, etc.
6. The traffic loading are unlimited, and overload & overspeed might occur.
7. Insufficient understanding of the exact concrete deterioration processes and extent of steel corrosion before repairing.

(II) Recommendations:

Based on the results obtained by the case study on Peng-Hu bridge and for the sake of ensuring the coastal bridge structures prevented from being corroded, recommendations for further work are listed as in the following;

1. Study on corrosion

(1) Finding a coastal RC & PC structure to proceed the following research work:

- . Investigate the situation of deteriorated structure detailedly(i.e. damaged location, time history variation).
- . Assessing the critical values of deterioration parameters from the lab. analysis of retrieved core sample and N.D.T. data.
- . Loading testing and proceeding dynamic analysis in order to realize the factors that causing cracks and assessing the servicing life of the structure.
- . Measuring the contents of sea salt carried by wind and wave penetrated into the concrete. Calculating the rates

of penetration of deleterious materials i.e. Cl^- , CO_2 , SO_4^{2-} etc.

. Performance testing and evaluating the suitable repair materials & repair system which are structurally acceptable for preventing corrosion or to decrease deterioration rate.

(2) Developing and promoting the techniques for in-situ investigation and lab. testing.

(3) Symposium periodically to discussing and exchange idea & the results of reseach and engineering practice.

2. Design and quality controlled under construction aspect.

(1) The authority should be comprehensively reviewed the existing guidance and established the criteria of design and construction on marine concrete structures as soon as possible.

(2) Planning a marine concrete structures project, the following factors should be considered during design and construction stage :

. Meteorological and oceanographic environments.

. Cover layer of embedded steel.

. Bridge dynamic beheavier and response.

. Concrete strength should be enough, lower water cement ratio, and appropriate cement content used in concrete structure.

. Using cement of ASTM Type II and Type V or mixing with pozzlind.

. Adding corrosion inhibitors in concrete.

- . Using appropriate fineness modulus and lower absorption of aggregate.
 - . Selection of suitable surface coating materials.
 - . Placing the concrete should follow the criteria in order to obtaining sufficient watertightness and soundness.
 - . Surface coating consideration for preventing seawater and salt penetration.
 - . The corrosion protection on electric wires or metal appendage on the bridge should be considered.
 - . Taking preventing measures for the ingress of salt carried by wind & waves into the concrete structures.
3. The procedures selected for repair and maintenance on coastal concrete structures are as in the following :
- . Examining the structures periodically and tracing the deterioration historically and proceeding the corrosion research work.
 - . Repairing as early as possible if deterioration occurred.
 - . Using N.D.T. methods to investigate detailedly the situation of derioration, corroded extent and scope before taking wholly repairing work.
 - . Selecting the appropriate methods and materials for repairing.
 - . Tracing and checking the effects of repair system after repairing.
 - . Using flexible, waterproofing, and durable coating materials for repairing the cracks of PC-girders.
 - . Restriction rigidly on overloading in traffic.

- . Budget granted by authority for corrosion prevention should be adequate.
- . When undertaking the corrosion investigation and maintenance, it should be done by experienced corrosion specialists.
- . Entrusting academic groups to executing the experiment and to assessing the methods and materials for maintenance.
- . Researching, developing and establishing the design criteria for diagnosing and repairing the concrete structures.

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；遂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。

研究期間承蒙國立台灣工業技術學院營建系教授黃兆龍博士在現場取樣與試驗室試驗分析方面之鼎力幫助，在力學方面之剖析得力於國立台灣大學土木工程研究所教授陳振川博士之努力；同時國立中興大學土木工程研究所教授兼所長顏聰博士亦曾親臨現場對計劃之執行提供寶貴意見；特藉此向學術界學者之參與及努力貢獻致十二萬分之謝意。

現場調查方面承蒙省公路局第三區工程處第六工務段林段長岡照先生之鼎力相助，施吊四支大樑放置平坦地點以利現場分析及鑽心取樣工作，對於現場交通工具的支援、檢視工作架及搭架工作的支援亦相當盡力，而且提供一些經常性檢查及維修記錄。鑽心取樣工作方面得力於公路局材料試驗所黃博仁先生之幫忙；原施工報告、設計書及岸谷教授調查報告喜獲省公路局養工處道路工程課長張嘉德先生及交通工程課長莊秋明先生等之不吝提供。又蒙中華民國防蝕學會理事長陳文源先生提供香港 MOTT HAY & ANDERSON FAR EAST公司之目視檢查報告等寶貴資料。在此一併致謝。

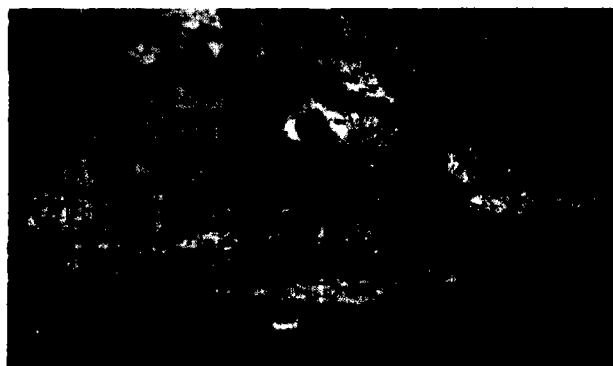
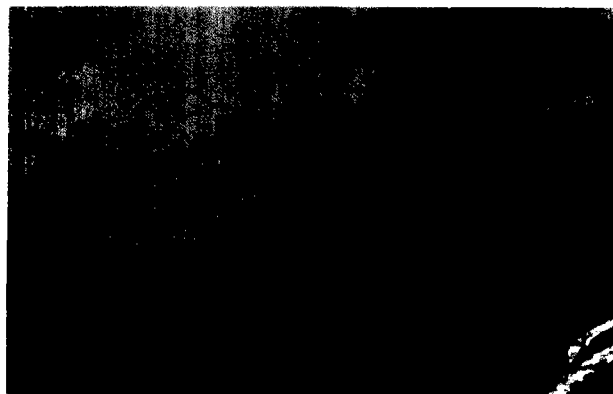
本計劃能獲得如此寶貴之結果，實應歸功於本計劃之協同主持人饒正先生之負責不懈及窮理好學之精神，以及本所港工材料組全體同仁蘇瑞榮先生、吳信昇先生、曾文傑先生、何木火先生、徐如娟小姐、李小萍小姐，及大地工程組李延恭先生、李春榮先生、張阿平先生，冒著危險經由工作架至橋底檢查底板及大樑等腐蝕狀況，由於本橋樑地處環境惡劣，賴同仁共同發揮團隊精神，克服一切困難完成本次調查工作，同時整理並分析調查數據以完成本研究報告，本人藉此致意，以表謝忱。

台灣省交通處港灣技術研究所

港工材料組組長 林維明

中華民國七十六年十二月三十一日

澎湖跨海大橋概況



一、結 言

(一) 調查動機

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暴露在此環境下極易銹蝕。根據國外資料顯示〔1〕，每年因腐蝕所造成金錢損失約為國民生產毛額之2%以上，其中大部份為腐蝕損失。一般工程材料中鋼筋混凝土的使用最為廣泛，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，如此才能據以決定防蝕及維修之正確方法。

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數年即報廢之例，甚為可惜，是否其它橋樑亦有此隱憂亦不得而知。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秘書吳伯楨先生即指示本所梁所長負責有關澎湖跨海大橋腐蝕初步調查研究，未久即展開本調查工作。

(二) 調查目的

1. 剖析澎湖跨海大橋腐蝕原因，以提醒國人對腐蝕之重視。
2. 建立腐蝕調查及研究之邏輯，供國內交通橋樑及主要公共措施定期腐蝕調查與安全評估偵測之參考。

3. 提供澎湖跨海大橋中間段在改建路堤工程未完工前，原橋樑應作修補工作之建議並提供新建工程防蝕對策。

(三) 調查研究方式及範圍

本調查研究方式及範圍如圖 1-1 所示之流程圖。

(四) 預期成果

1. 充份了解澎湖跨海大橋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。
2. 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。
3. 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。
4. 提供修補及防蝕對策，以延續橋樑之服務效能。

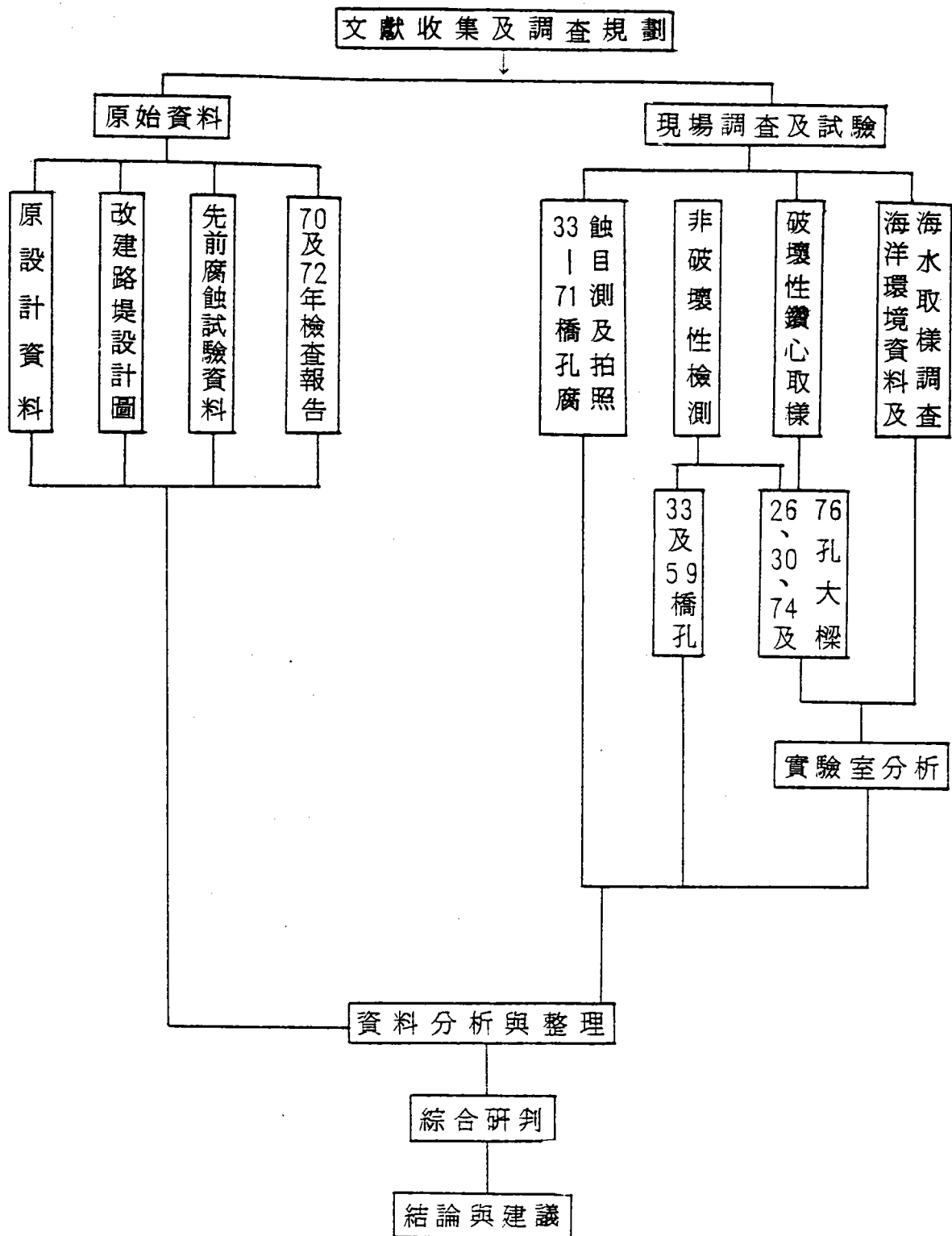


圖1-1 澎湖跨海大橋腐蝕調查研究流程圖

二、研究背景

(一) 澎湖跨海大橋腐蝕沿革及初期處理經歷

澎湖跨海大橋(圖 2-1)於民國六十年通車後初期由澎湖縣政府維護[19]，迨至六十七年移交公路局接管後曾因第十六孔嚴重腐蝕，而依傳統方式打除重建。其餘各孔經選定第一至廿八孔以化學塗抹材料塗裝，於七十年及七十二年分別逐孔檢查結果發現其腐蝕發展隨外表蝕傷而加速損壞[22]，其中第十二、十三及七十五等三孔嚴重腐蝕危及交通安全，故於該三孔中央加建支柱以防橋樑斷落，發生意外。其餘各孔則為安全計已逐段改建中，以腐蝕最嚴重之低窪橋樑(第1-31孔及 72-76孔)先改建為路堤。此工程第 32 至 71孔在中央段高程較高之橋樑，其腐蝕情況較輕，亦於 73年9月間分別由國內雍真、中道、昭林、弘璋、南寶及柏林等六家廠商引用中、日、美等國之不同防蝕材料進行整修，並約定五年內逐年檢查及整修，完工後第二年(民國 75年)檢查結果如表2-1所示，即已發現腐蝕，為安全及國防需要，此段四十孔橋樑仍比照前述方案，自 76年度起逐步改建為路堤，當可永久確保交通安全。

日本東京大學岸谷孝一教授 [21] 赴現場勘察所提出之調查報告建議，為明瞭大樑之腐蝕損壞情形，必須蒐集有關資料以作日後設計及維護參考，應將舊壞大樑至少拖運一根到橋頭空地作詳細檢查，澎湖跨海大橋於75年4月間拆除部份原橋橋面，吊出26孔、30孔及74孔三支 PC樑及 76孔一支 RC樑以供詳細檢查。

(二) 混凝土中鋼筋腐蝕因素

鋼筋在鹼性混凝土環境中受到高鹼性保護作用，其鈍化氧化膜不容易受到侵蝕，因此在品質良好的混凝土內，鋼筋腐蝕發生的機率是極少的，然而由於混凝土由材料準備至施工完成、養護等作業過程均容易受到人為、自然及氣候的影響，以致混凝土預定品質受損，產生裂縫等 [1,2]，所以增加腐蝕或者潛在腐蝕發生的機率。圖 2-2 所示即為影響混凝土內鋼筋腐蝕的可能因素。

以下選擇其中較具影響性的因素加以討論。

1. 混凝土材料

混凝土材料若影響到鹼性物之含量或水、氧氣和氯化物的擴散，均將影響鋼筋腐蝕。這些因素主要因水灰比 (W/C)，骨材，水泥成分和摻料而異。

(1) 水灰比 (Water - Cement ratio)

水灰比嚴重影響混凝土品質，也決定水及氯化物的滲透性，圖 2-3 及圖 2-4 顯示出水灰比愈大則水與氯化物的滲透性愈大 [6]。同時良好品質混凝土對碳化作用的遏阻作用可由表 2-2 看出 [7]，滲透性愈小，碳化作用的深度愈少，見圖 2-5 [8]。

(2) 骨材

骨材對鋼筋腐蝕的影響主要仍是其對滲透性的影響，骨材粒徑愈大則滲透性愈大，其原因係由於一般骨材常較水泥漿有 10 至 1000 倍大的滲透性係數 [9]，骨材的級配倘若造成泌水及析離的影響，則將由於形成水、氯化物、氧氣及二氧化碳等有害鋼筋性質之侵入通道，而促進腐蝕的進展。骨材若取自海岸線或挖自堆積場，則可能含有氯化物而有害鋼筋，甚至對混凝土可能會有損害。

(3) 水泥

水泥對鋼筋的腐蝕影響是被忽略。但若由物理性或化學性作用來考慮，它仍然是甚具影響性的，譬如泌水、鹼性環境、鹼骨材反應，特別是 C、A 的含量對 Cl^- 的吸附作用，此將使鋼筋的腐蝕性減少，見圖 2-6 [10] 及 2-7 [11]。但若 C、A 含量過高，則在使用海砂等含 SO_4^{2-} 離子的骨材狀況下，可能會造成混凝土由於鈎鈣石 (Ettringite) 的膨脹破壞而損及混凝土品質。

(4) 摻料

使用在混凝土中的摻料種類甚多，基本上大多數係有機質材料，對鋼筋無腐蝕的影響，然而若考慮如減水劑、強塑劑和輸氣劑等利用減水功能而降低水灰比 (W/C) 時，摻料即有遲滯鋼筋腐蝕的功用。高爐熟料及飛灰等火山灰 (Pozzolans) 材料會與氫氧化鈣結合而降低鹼性強度 (PH 值)，理論

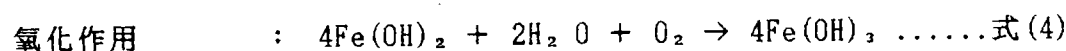
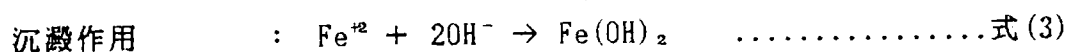
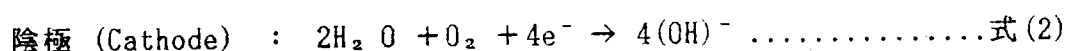
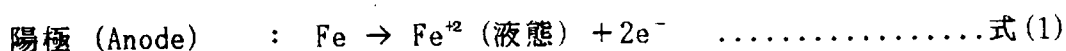
上腐蝕會增加，然而事實上由於火山灰反應而增加混凝土緊密程度，使滲透性減低，因而減低腐蝕性。早強摻料如 CaCl_2 ，有助於寒天施工，但由於 Cl^- 的含量，將對混凝土內鋼筋造成嚴重腐蝕的威脅，見圖2-8及 2-9 [6]。

(5) 鋼筋

鋼筋品質對腐蝕的影響並無明確的文獻可查。只有可能因混凝土未澆置前鋼筋本身之鐵銹可能影響握裹效果而已 [6]。但是鋼筋所受應力是支配腐蝕速率的因子，因此對於預力混凝土其含氯量必須加以限制，以免腐蝕過劇。

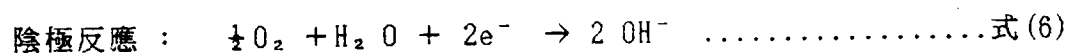
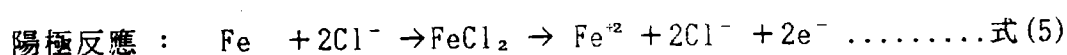
2. 含水量

濕氣或含水量的存在是滿足電化腐蝕的必要條件，也是決定腐蝕速率的重要因子 [4]。倘若無濕氣的存在，則腐蝕將終止，參閱圖 2-10及式(1)~(4)，一般腐蝕影響最嚴重者乃空氣中的濕氣，因為同時俱有水及氧氣，若鋼筋混凝土長期浸泡水中則腐蝕反而減少 [2]。



3. 氯離子

氯離子對鋼筋腐蝕的影響主要視含水量和陰極極化所需氧的含量而定 [2]，其影響可由式 (5) 及式 (6) 看出。



氯離子的含量除非水泥中有相當的 C_3A 含量否則均應限制。一般 PH 值為 12.5 至 13.2 的鹼性環境下，氯含量規定不得超過 0.2 至 2.8 Kg/m^3 混凝土 [3]，見圖 2-3。這些氯離子的來源主要為摻料、水、骨材或暴露於海水所致。

4. 混凝土施工作業

任何施工作業步驟若助長水、氯化物、氧氣和二氧化碳等的移動速率者，均將促使鋼筋腐蝕速率的加快。其中以鋼筋保護層、搗實和養護的影響性最鉅。

(1) 鋼筋保護層 (Cover of Reinforcing Steel)

鋼筋保護層一般設計上均由規範加以規定，故應視為無問題，然而事實上施工時常由於施工者未按圖施工，或者保護層間距控制器滑脫或破壞以致保護層厚度不足，此將造成鋼筋腐蝕的擴展，圖2-11所示即為鋼筋保護層對鋼筋腐蝕的影響 [12]，品質愈佳，則保護層厚度可以愈薄。

(2) 搗實 (Consolidation)

施工作業時搗實的技術常會造成對鋼筋腐蝕的影響。因為搗實不足，常會有蜂巢 (Honeycombing) 現象的發生 [1]，而搗實過度則又可能有過大的泌水及析離，此將造成鋼筋週遭的空氣袋，而有害鋼筋，此例子則有如圖2-12所示。搗實的程度亦受混凝土工作性的影響，一般施工作業應視混凝土坍度而決定搗實的工具。

(3) 養護 (Curing)

養護對滲透性有相當的影響，養護時間愈長，則水密性愈佳，表 2-3 所示即為養護時間對滲透性之影響 [5]。而水中養護較蒸氣養護有較佳之抗腐蝕能力。

5. 工人的技術 (Workmanship)

良好的施工技術、工人士氣、情緒等對混凝土品質有相當影響；當然合理的管理、獎懲政策等對品質亦有甚大的影響，進而影響鋼筋的腐蝕抵抗力 [13]。

6. 鋼筋混凝土的裂縫

鋼筋混凝土由於施工過程、材料耐久的問題、載重狀況、基礎的沉陷等原因，均將造成混凝土的破裂 [1]，這些裂縫的形狀、方向及大小對鋼筋腐蝕有相當的影響 [12]。因為混凝土一旦破裂，則外界之濕氣或氯化物等將直接與鋼筋接觸，造成鋼筋快速腐蝕。當然裂縫的寬度是決定腐蝕程度的因素，寬度愈大腐蝕也會愈加速，不幸的一般研究文獻僅限於以混凝土面上裂縫大

小而甚少考慮實際鋼筋面上大小之問題〔12〕。裂縫與鋼筋之方向對鋼筋腐蝕程度之關係至鉅，因為裂縫若與鋼筋垂直，則腐蝕的發生一般可估計為 3 倍直徑寬度；然而若與鋼筋平行則鋼筋的鈍化保護膜將全面喪失，造成嚴重的腐蝕現象。前者即為一般載重不當，甚至 RC 設計時即已假設此部份為混凝土張力破裂區，而後者為混凝土施工澆置過程的塑性收縮(Plastic Shrinkage)裂縫或沉陷裂縫(Settlement Cracking)所造成〔12〕。避免塑性收縮裂縫的方式通常為施工時注意水氣蒸發速率〔1〕，而沉陷裂縫主要仍應增加保護層厚度〔17〕，見圖 2-13所示。

(三) 鋼筋混凝土腐蝕鑑定技術

混凝土中鋼筋的腐蝕要項與一般金屬之腐蝕雖然相同，然而由於鹼性環境和被混凝土包封，所以鋼筋腐蝕的症狀在初期並不易檢測出來，然而一旦混凝土成梯狀破裂或表面鼓起時，鋼筋基本上已產生甚嚴重之腐蝕了，進而可能有損結構體的安全性。為了避免鋼筋的腐蝕，事前的防範遠重於事後的處置，但既有結構物腐蝕的鑑定，則有助於責任的區分或往後施工時的鏡誡，因此鑑定技巧的瞭解相當重要。

1. 外觀觀測

「有諸於內，形諸於外」內部鋼筋的腐蝕，除非初期的腐蝕，否則一般表面沿鋼筋方向混凝土會有局部鼓起或棕色鐵銹水沿裂縫滲出的外觀，因此仔細「眼觀」鋼筋混凝土外表，檢查是否有異狀是一般鑑定所必須採行的步驟。

2. 腐蝕電位測定

利用手提式電位測定器，如 Pathfinder，可以量測出電位變化的分佈，預測腐蝕發生部位及程度。

3. 鋼筋測定器(R-meter)

此為一種非破壞性電磁儀器(Nondestructive Magnetic Device)，用以量測鋼筋保護層之厚度，瞭解施工技術優良與否，並及早決定保護層不足時應採行之相應措施，如表面塗封等方式。

4. 表面混凝土強度分析

可利用試驗錘之反彈數值，推斷混凝土結構體表面混凝土之強度狀況。

5. 結構體混凝土品質之狀況分析

可利用超音波測儀量測其傳播速度，以判定該結構體混凝土品質之良窳及穩定性。

6. 鑽心取樣

當有鋼筋腐蝕的疑慮，而無法合理解釋時，此時可直接利用鑽機鑽取可能有問題處之混凝土及鋼筋。鑽心取樣可觀察初步的鋼筋腐蝕即為棕色鐵銹，量計碳化深度，氯離子含量，評估混凝土品質，和量測保護層實際厚度等用途。必要時該試體亦可用電子顯微鏡觀察腐蝕的晶相成份及混凝土其他耐久性問題的構成因子，或以X—光繞射分析判斷形成物質，以為分析之依據。

7. 掃描電子顯微鏡 (Scanning Electron Microscope) 檢視

用來分析及檢視鋼筋腐蝕鐵銹來源，基本上此法可判定工廠熱處理之銹皮 (Mill Scale) 即一氧化鐵 (FeO , Wustite) 或腐蝕之鐵銹即赤鐵礦 (Fe_2O_3 , Hematite) [19]。主要目的為可觀察外界有害物 SO_4^{2-} 所造成的鈣矽石或孔隙變化，間接評估造成腐蝕及裂縫的原因。

8. X—光繞射分析儀 (X—ray diffractory) 分析

可用來鑑別鋼筋在空氣中所生的 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 和混凝土中之氧化鐵膜 ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$), 黑銹 (Fe_3O_4) 及紅銹及 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 等, 當然也可以辨出混凝土有害物質及碳化物的成份。

(四) 微觀觀察腐蝕的技術

掃描式電子顯微鏡主要為觀測試體外觀 (Morphology), 通常 10K (1 萬倍) 左右即可看出微觀晶相，若配備以 EDX 或 WDX 的X光分析器則可以在微小點上作定性 (Qualitative) 或定量 (Quantitative) 分析。運用掃描電子顯微鏡於 R.C 腐蝕研究上，首先須瞭解各種反應 (包括水泥水化、鹼骨材反應、硫酸鹽侵蝕及腐蝕反應等) 的可能生成物 (Products) 及其相應 SEM 晶相外形和X光光譜，同時

必須取得隨機代表性高之試體並經適當之處理，如此才可正確研判出鋼筋腐蝕的原因及改善防蝕技術。

1. 鋼筋混凝土銹蝕可能SEM 晶相

(1) 混凝土的水化產物

混凝土中水泥水化產物隨時間、水泥成分、環境而不同，見圖 2-14 [14]，但基本上可區分為五大類，即 C-S-H * 膠體、毛細管孔、氫氧化鈣、鈣鋁水化物及未水化之核心，見表 2-4 [15]。圖 2-15 為顯示水化 1 天之卜特蘭水泥水泥漿 SEM顯微鏡照片，圖上明顯可看出六角棒狀的鈣矾石 (Ettringite, $C_3A \cdot 3\bar{C}\bar{S} \cdot 32H$) 一刺球狀之 C-S-H 膠體 (gel) 和黑色孔洞之孔隙部分。圖 2-16 可看出刺球包裹之未水化核心 (Unhydrous Core)，C-S-H 刺球及孔隙。水化十天，仍可看觀查出 C-S-H 之刺球，氫氧化鈣大量形成，核心隨之減少，見圖 2-17；對於成熟的水泥漿體，基本上已無法區分出 C-S-H 膠體，除非磨平並加以浸水侵蝕處理，不過 CH 則隨處可見，見圖 2-18、圖 2-19 及圖 2-20分別顯示由 CH面裂開之 CH 晶相和玫瑰花狀之六角形鋁酸鈣水化物。

(2) 有害物質侵入混凝土之產物

① 氯化物

混凝土內含有氯化物，將造成 C-S-H 的多孔網狀外觀，見圖 2-21[14]，而外界氯化物可能與鋁酸三鈣 (C_3A) 形成六角板狀的鈣氯鋁化物 (Calcium Chloroaluminate, $C_3A \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$)，但此並不常見，因為在混凝土內的量太少了，見圖 2-22[16]。

② 硫酸鹽類

硫酸鹽類的侵蝕，將造成膨脹性的鈣矾石，其結晶為六角柱狀體，倘若遇到活性大的二氧化碳和矽化物，則鈣矾石會轉變成纖維狀的 Thaumate-site ($CC \cdot C\bar{S} \cdot CS \cdot 15H$)，一般目測無法分辨這種海域環境下的產物，

* 水泥化學簡寫符，S-SiO，C-CaO，H-H₂O，A-Al₂O₃， $\bar{S}$ -SO₃， $\bar{C}$ -CO₂，CSH，石膏， $C_3A \cdot 3\bar{C}\bar{S} \cdot 32H$ -鈣矾石， $C_3A \cdot C\bar{S} \cdot 12H$ -單硫型鋁酸鈣水化物。

必需借助 EDX 來偵測，見圖 2-23 [16]。硫酸鹽的侵蝕通常需透過氫氧化鈣的溶解及二次石膏的形成，如此才可能進一步與 C₃A 組合成局部破壞性之鈣鈣石，見圖 2-24 [16]。海水侵蝕作用下，鎂離子 (Mg^{12}) 將組成 Argonite 而堆積在方解石 (Calcite) 之附近，當然富 Mg^{12} 的 $Mg(OH)_2$ (Brucite) 亦會在如海膽的 Argonite 附近形成，見圖 2-25 [17]。詳細 Brucite 的結晶可由圖 2-26 看出 [17]。

(3) 鋼筋的腐蝕產物

鋼筋在混凝土澆置前可能會有製造時的高溫氧化物 Wustite, FeO ，但在混凝土中此種氧化鐵層太薄而甚難查覺。一般常見的鐵銹在有 Hematite, Fe_2O_3 ，及 $Fe(OH)_3$ 等，這種產物很容易與混凝土中水泥產物及其它有害物質分辨出來。圖 2-27 為腐蝕的一種產物 (圓形粒子) [5]。腐蝕發生之初期，靠近金屬周界之混凝土水泥漿之外觀晶相會相應改變，此可用來分辨出腐蝕與否之依據。

(五) 海洋結構物耐久性規範

有關海洋混凝土結構物之規範茲羅列於表 2-5，此表係收集日本土木學會、港灣協會及海事學會，美國混凝土工程學會 (American Concrete Institute ACI) 歐洲國際預力聯盟 (International Federation of Prestressing 簡稱 FIP) 英國驗證學會 (British Veritas) 及挪威 DNV 驗證學會 (Det Norske Veritas) 等有關之鋼筋混凝土及預力混凝土保護層厚度、裂縫控制、抗壓強度、混凝土施工材料包括水泥、骨材、水、混合劑、氯化物含量，有關配合比事項如混凝土之單位水泥量、水灰比、空氣含量及 P.C. 套管灌水泥漿，有關施工事項及檢查有關事項在不同之暴露條件即海面上，潑濺區及海水中等各國均有訂出規範，可由表 2-6 中加以比較。

表 2-5 為第一種加強耐久性之防蝕方法，另外第二種防蝕法相關之規範如表 2-6，這此規範都正在研究發展中。混凝土之試驗工作之研究方法根據 ACI 規定，其相關耐久性偵測使用之技術篇如表 2-7 所示。

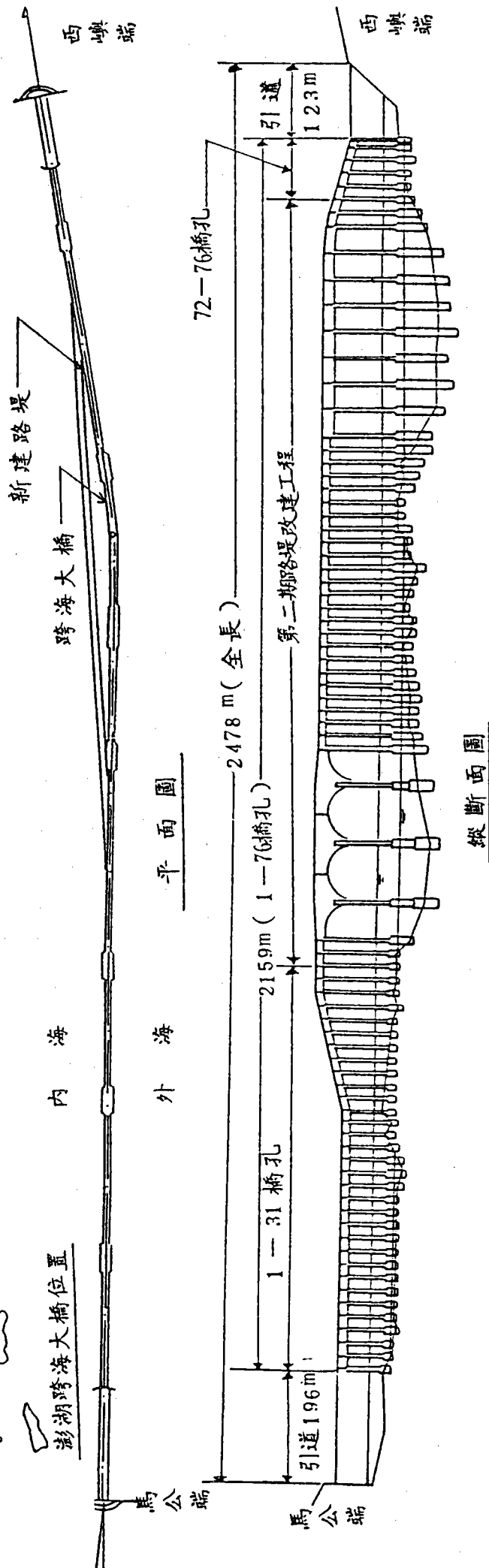


圖 2-1 現有澎湖跨海大橋位置、平面及斷面圖

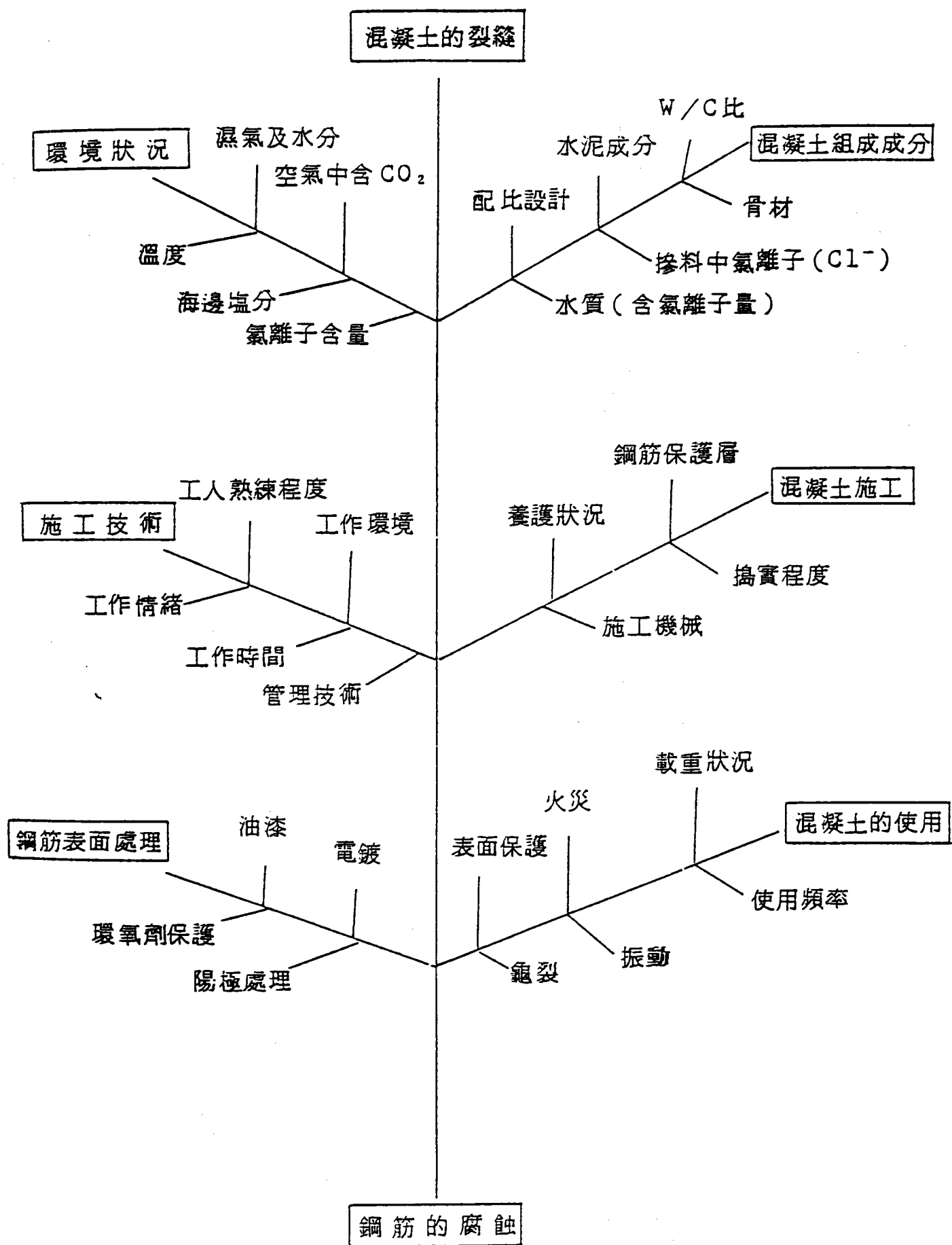


圖 2-2 混凝土內鋼筋腐蝕的可能因素示意圖 [8]

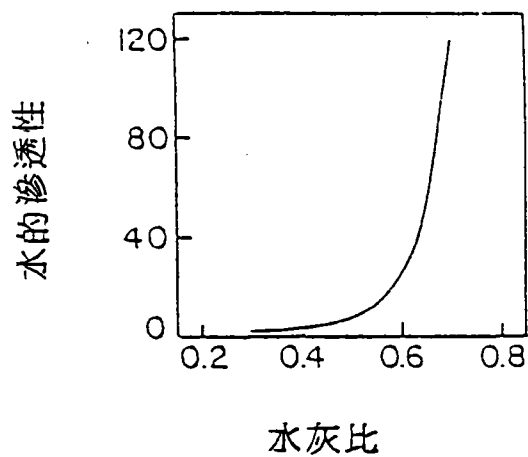


圖 2-3 水灰比對水泥漿體水份滲透性的影響 [1]

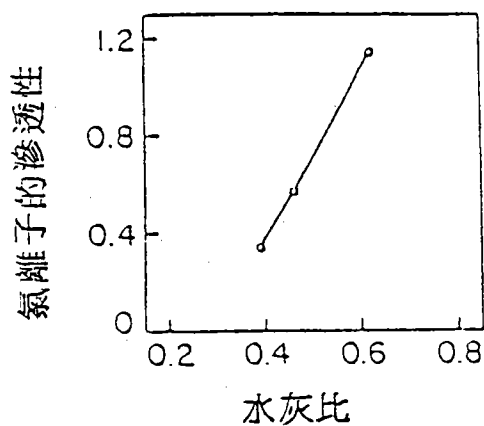


圖 2-4 水灰比與水泥漿體氯離子滲透性的關係 [1]

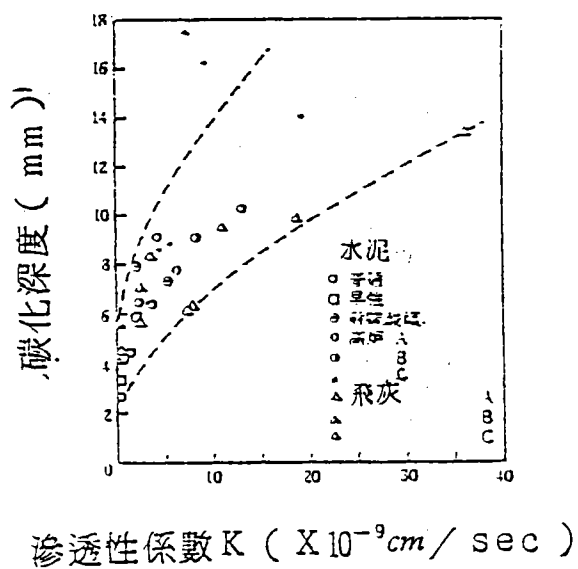


圖 2-5 水泥砂漿滲透係數與碳化作用深度的關係 [12]

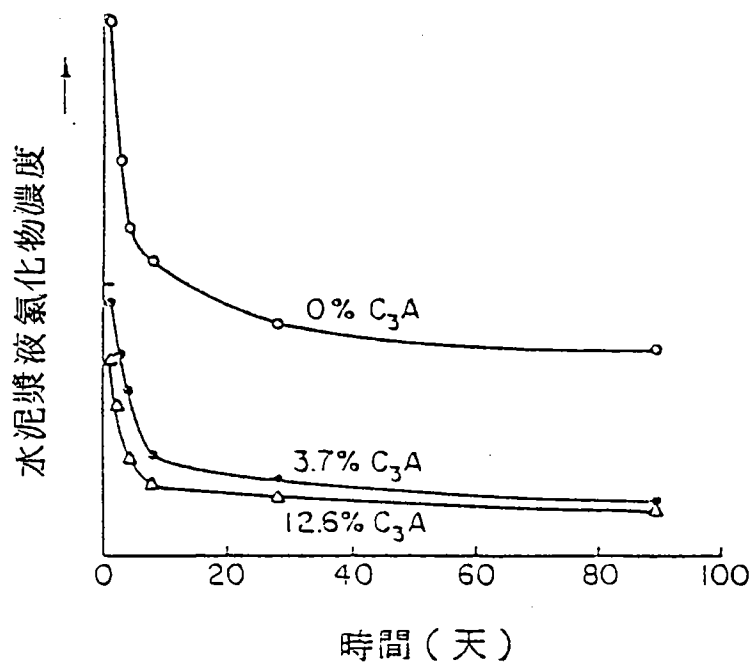


圖 2-6 在水泥漿溶液中氯化物的濃度隨時間
及 C_3A 的含量增加而減低〔14〕

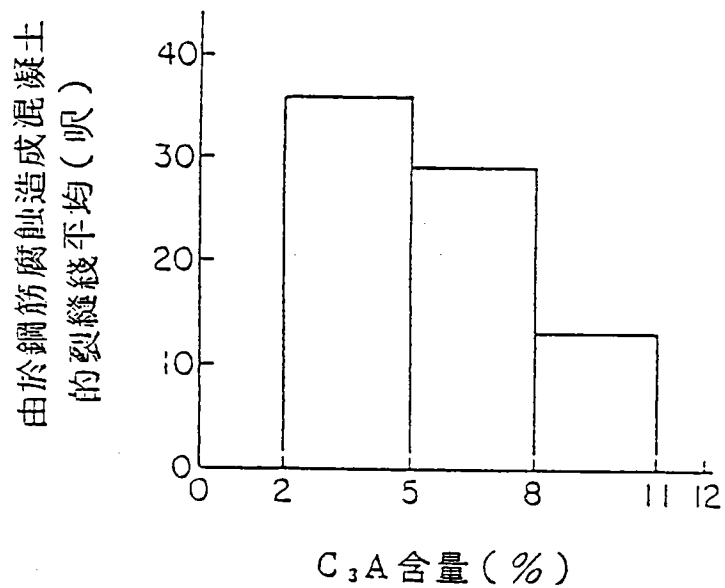


圖 2-7 C_3A 含量對鋼筋腐蝕造成混凝土裂縫的影響作用〔15〕

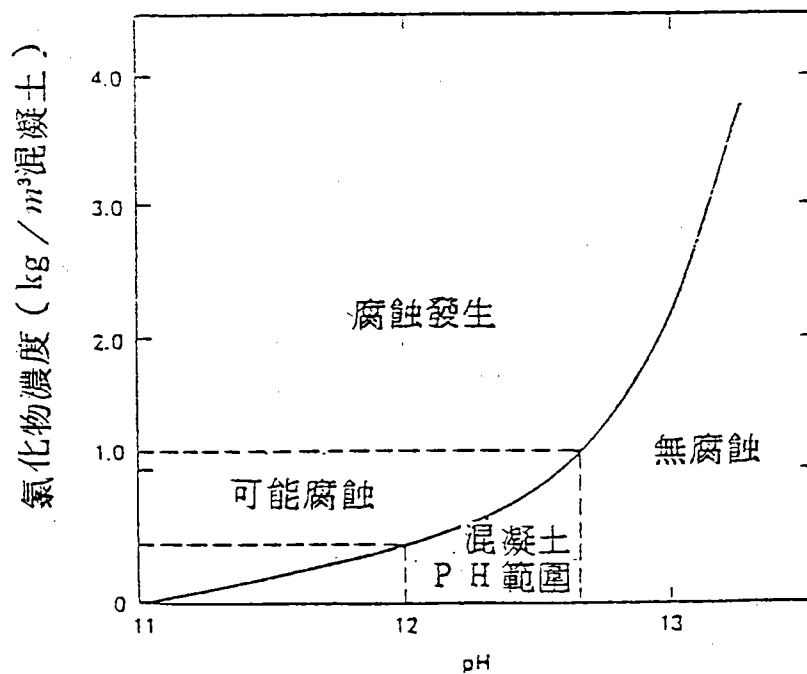


圖 2-8 氯化物對鋼筋腐蝕環境酸鹼值的影響

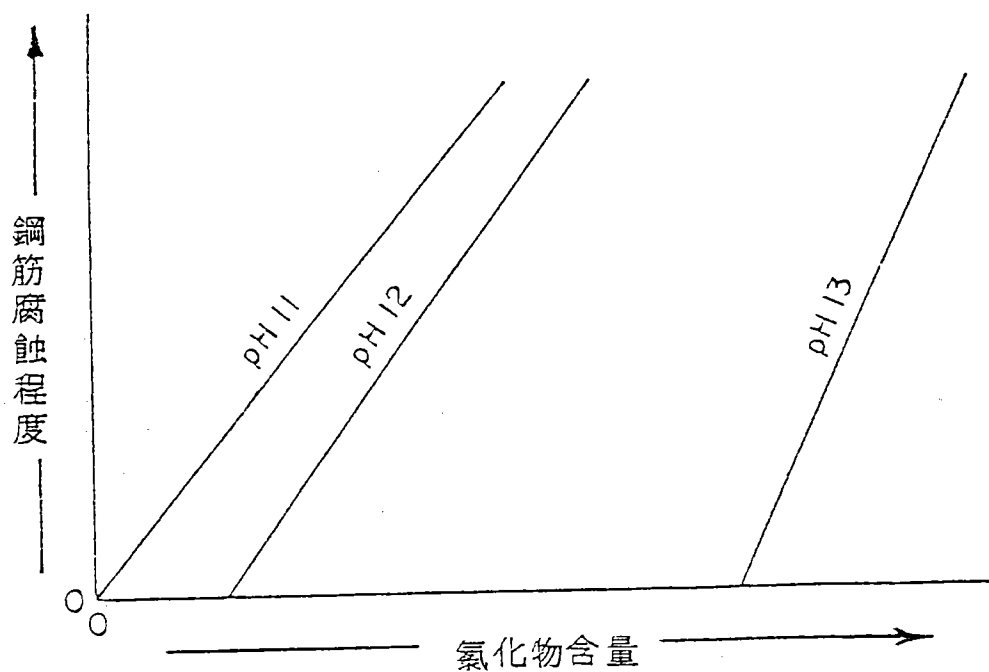


圖 2-9 造成鋼筋腐蝕所需之氯離子濃度隨水泥漿體PH鹼性之增加而昇高〔6〕

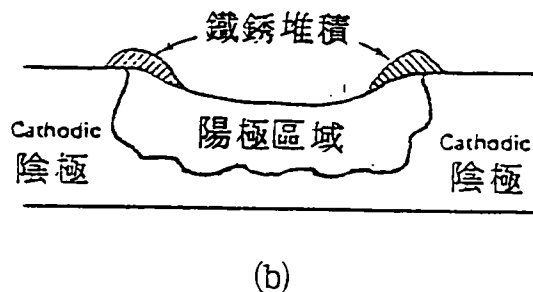
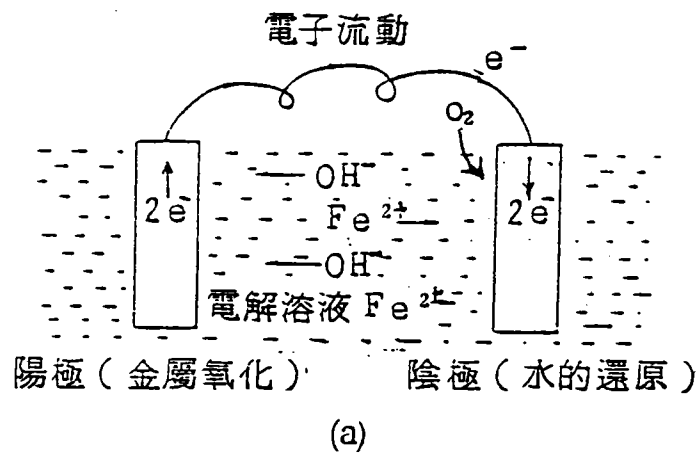


圖 2-10 金屬的腐蝕 (a) 電化腐蝕基本條件 (b) 單一鋼筋的生銹

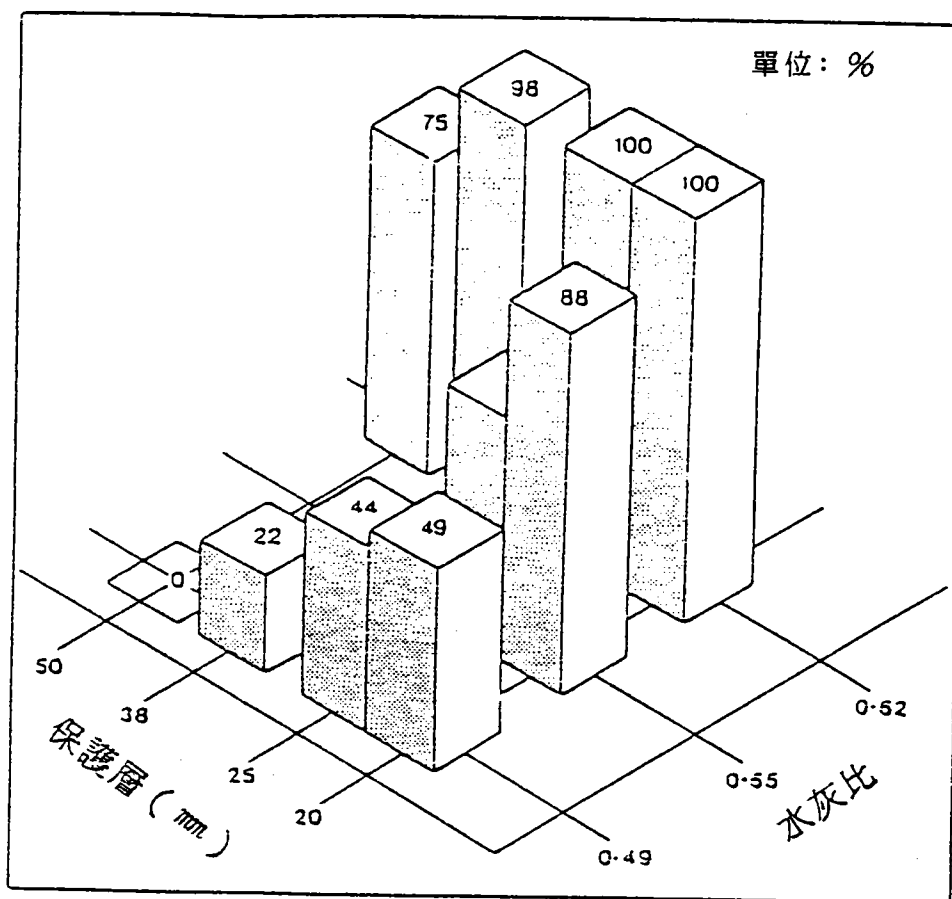


圖 2-11 鋼筋相對腐蝕率與保護層及水灰比之關係 [16]

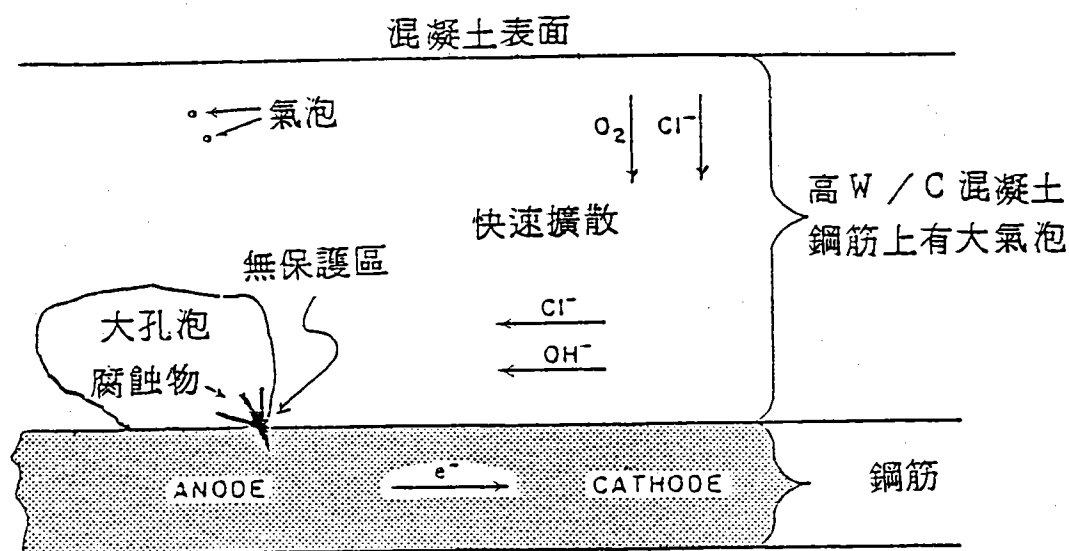


圖 2-12 高水灰比且鋼筋上有空氣袋之混凝土內鋼筋腐蝕的示意圖

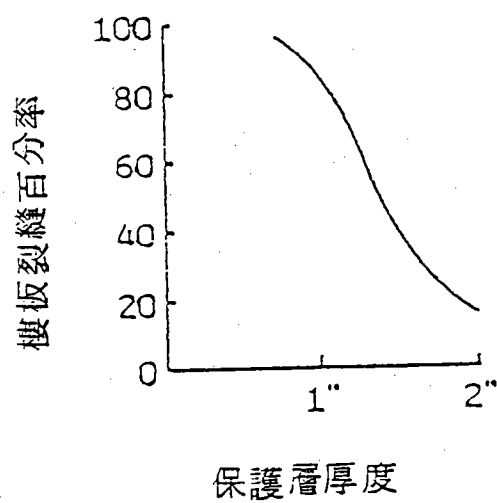


圖 2-13 保護層厚度對沉陷裂縫的影響 [17]

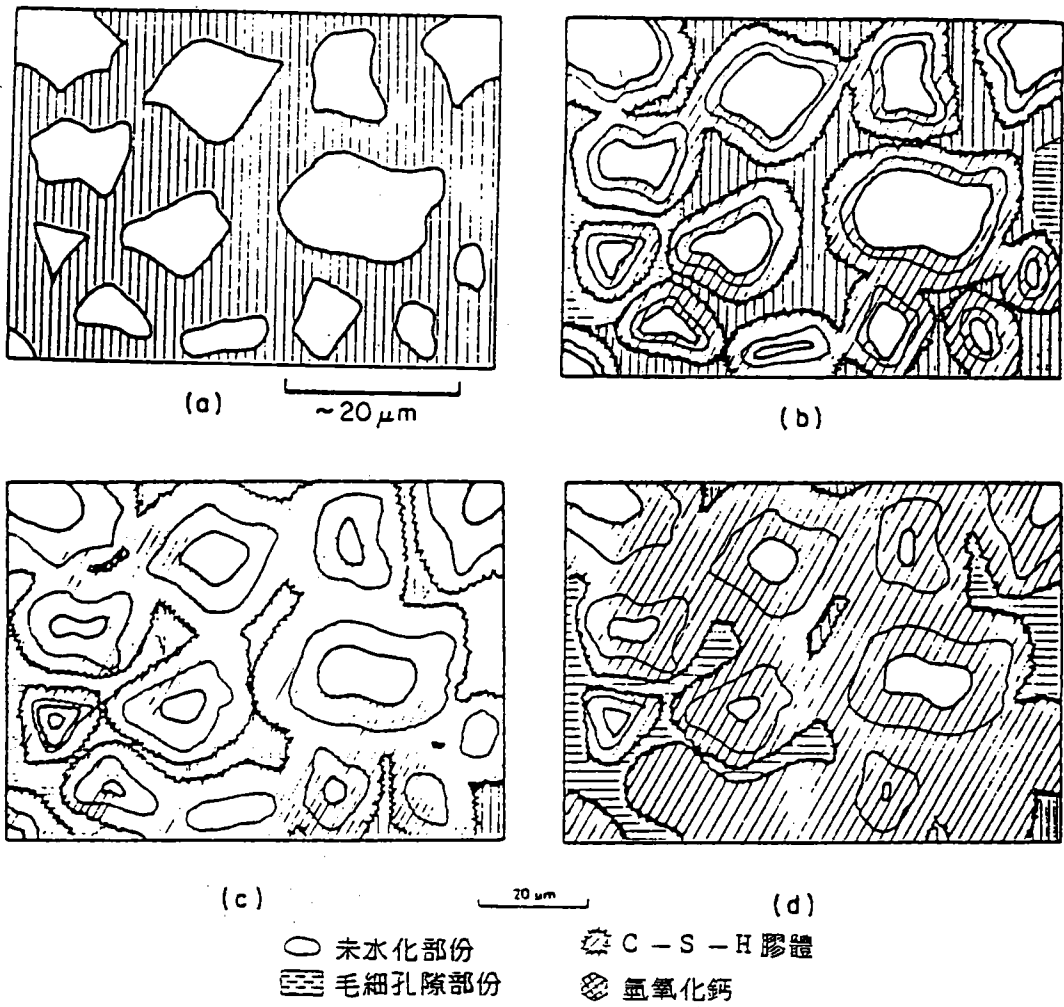


圖 2-14 水泥漿體SEM顯微晶相示意圖
 (a) 初拌 (b) 7天 (c) 28天 (d) 90天齡期

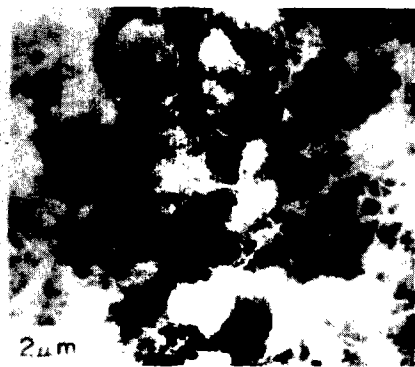


圖 2-15 水化一天之卜特蘭水泥漿體之SEM 微觀圖片 [15]



圖 2-16 部份水化矽酸三鈣之SEM 微觀圖片，
顯示包裹未水化核心之C-S-H 膠體 [15]

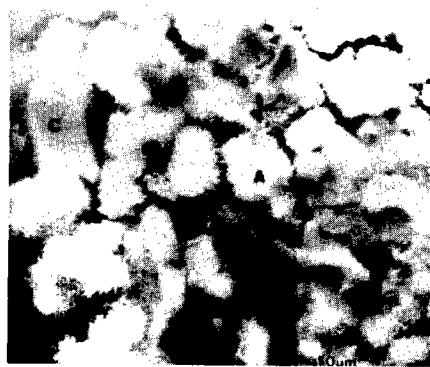
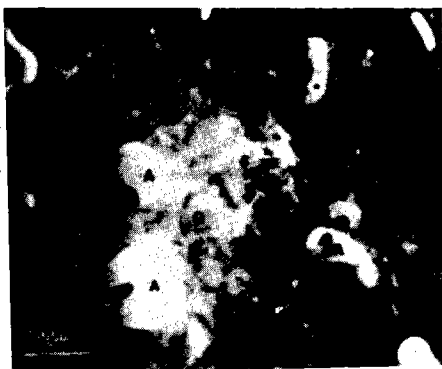
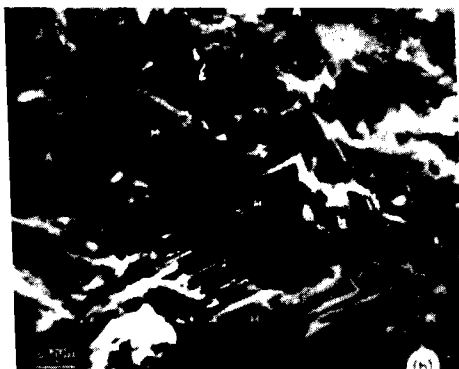


圖 2-17 水化10天之矽酸三鈣SEM 微觀圖片，
顯示氫氧化鈣結晶體(C) 填充孔隙空間及未
水化核心(A) 在水化物(刺球狀)之中心 [15]



(1)



(2)

圖 2-18 (1)磨光且浸蝕的矽酸三鈣水化物顯示水化核心
(A)深植在水化物母體中。深灰色者為C-S-H(G)
淡灰色者為氫氧化鈣(H) (2)未磨光的折裂矽酸
三鈣水化物亦可看出水化核心(A)和氫氧化鈣
(H) [15]



圖 2-19 水化的矽酸三鈣水化物沿氫氧化鈣
節理拆裂面之SEM 微觀圖〔15〕



圖 2-20 水泥漿體在 CaSO_4 溶液中產生
六角形鋁酸鈣水化物〔15〕



(1)



(2)

圖 2-21 (1)水化三天(2)含有 CaCl_2 之矽酸三水化物
C-S-H 之外觀



Fig. 4 : (x) Crystals of monochloroaluminate and reticular C-S-H containing Cl^- ions.

圖 2-22 (X)顯示為鈣氯鋁化物之六角板狀晶體及網狀 C-S-H (含Cl⁻) 外形 [16]



圖 2-24 (1)氫氧化鈣的溶解和(2)二次石膏的形成(小短柱狀體) [16]

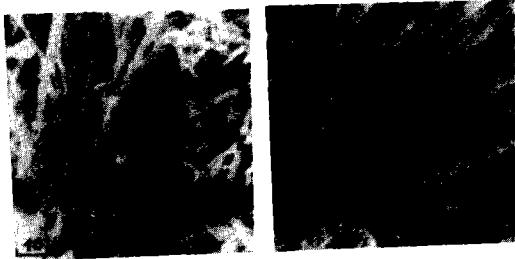
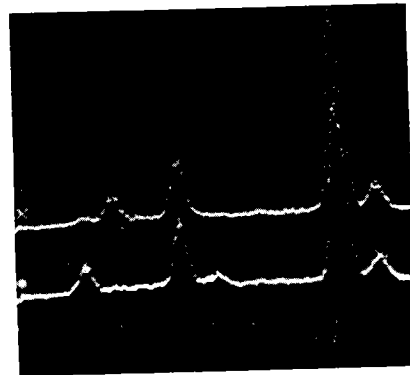


圖 2-23 由惡化的海堤試體內之鈣矽石(O)和Thaumacite (X) , 以能量消散(EDX) X光分析所得之結果如左圖, 鈣矽石(O)含Al, S, Ca, 而 Thaumacite 含Si, S, Ca [16]





(a)



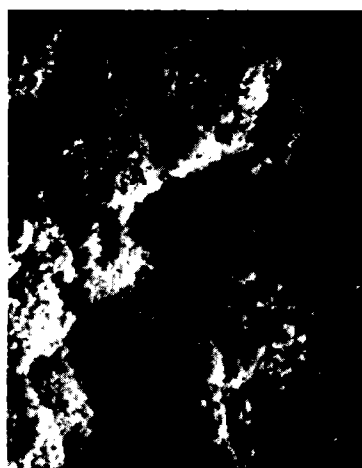
(b)

2 μ m



(c)

3 μ m



(d)

2 μ m

圖 2-25 礦化產物 (a) 水中養護在水面上形成的方解石及 Aragonite (b) 置於海水中二天 (c) 七天 (d) 14 天後海膽放射狀的 Aragonite 分佈於 Brucite 層面上 A-Aragonite, B-Brucite, C-Calcite [17]

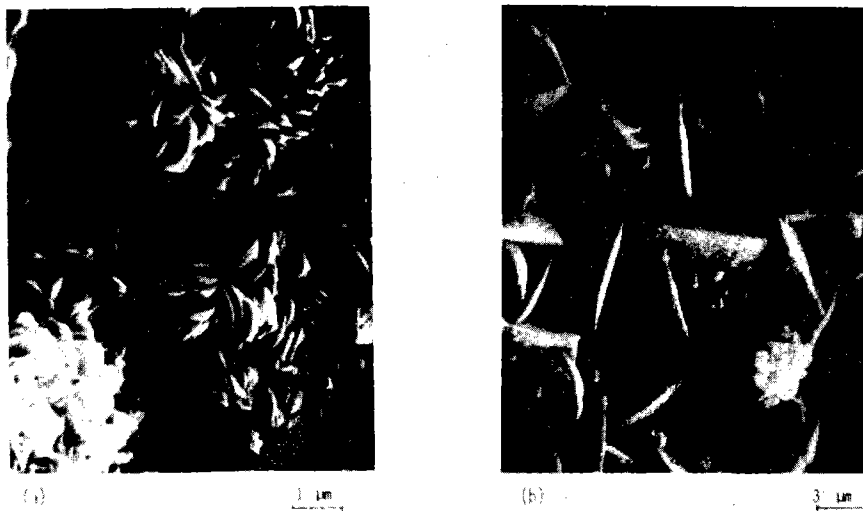


圖 2-26 Brucite層的結晶 (1)暴露海水中二天 (2)十四天 [17]

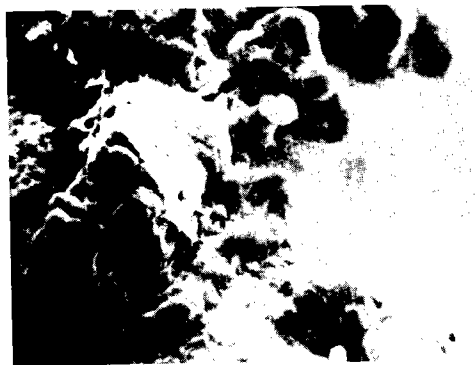


圖 2-27 浸泡於海水中之纖維混凝土
中鋼纖表面之腐蝕生物(圓形粒子)

表 2-1 澎湖跨海大橋防蝕處理記錄

狀況	孔號	32	33	34	35	35	30	30	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
斑跡		●	●				●		●	■	●				●					●
吐銹			●	●	●		●		■	■	■	■	■	■	■		■	■	■	■
發生細裂縫										×	●			×		●				×
修補處再裂		●	●	●			●				●	●	■	×	■		■	●		×
塗料剝落																				
片狀剝離															×		×	×	●	
施工法		A	A	A	B	C	D	E	A	B	B	B	B	B	B	B	C	C	C	C

狀況	孔號	51	52	53	54	55	50	57	58	59	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11
斑跡		●		■				●			●	●				●	●	●	●	●	●	●
吐銹				■	■		●	●	●	●		×	■	■	■	×	×	■	■	■	■	■
發生細裂縫			●			●	●	●	●			●	●	●	●							
修補處再裂		×	×	■	×	●						■	■	■			×					
塗料剝落																						
片狀剝離			×	×	×							×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
施工法		C	D	D	D	D	E	E	E	E	F	F	A	B	C	D	D	E	E	F	F	F

施工法：

A：雅真
B：中道
C：昭林
D：弘璋
E：南寶
F：柏林
●：1986檢查
×：1987檢查

表2-2 混凝土品質對碳化作用之影響

二十八天強度	碳化深度(mm)【11】			
	二年後	五年後	十年後	五十年後
20 N/mm ²	5	8	12	25
40 N/mm ²	0.5	1	2	4

表2-3 水泥漿養護時間對滲透性之影響(W/C=0.51)

齡期(天)	滲透係數範圍
新拌水泥漿	10 - 5
1	10 - 8
3	10 - 9
4	10 - 10
7	10 - 11
14	10 - 12
28	10 - 13
100	10 - 16
240	10 - 18

表2-4 硬固卜特蘭水泥漿體之組成 [15]

組成	備註 (SEM 外觀)
C-S-H膠體	包括微孔 (< 26 Å 直徑), 刺球狀至不可解晰物
毛細管孔	中孔及巨孔, 黑色孔泡
氫氧化鈣 (CH)	結晶物質, 無孔層理片狀
鋁酸鈣水化物	細長六角晶狀之鈣矾石 (Ettringite), 六角薄板至不規則玫瑰狀之單硫型鋁酸鈣水化物
未水化核心	無晶相

表 2-5 海洋混凝土結構物耐久性規範

名	稱	海濱混凝土構造物設計施工指南(1977)	港灣設施之技術基準及解說(1979)	港灣設施之建設、改良、維護情況下適用。	日本土木學會	日本港灣協會	預力混凝土平底箱蓋單(1975)	Guide for the Design and Construction of Fixed Offshore Concrete Structure (1978)	Recommendation for the Design and Construction of Sea structures (1977)	FIP	BV	DNV	Rules for the Design Construction and Inspection of Offshore Structures (1977)	Guidelines for the Design Construction and Classification of Floating Concrete Structure (1978)
制定機關	範圍	海洋混凝土構造物設計及施工情況下適用	日本土木學會	日本港灣協會	日本港灣協會	預力混凝土平底箱蓋單材料設計及施工適用。	船側及船底外週部 75 mm 以上 上述以外部份 45 mm 以上	(1)厚 50 cm 以上 50 cm 以下 部材 50 mm 以上 65 mm 以上 50 mm 以上 用註 2) 中之最大値。 (2)厚 0.5 mm 使 用者料最大尺寸之 1.5 倍且最大鋼筋直徑之 1.5 倍以上	ACI	海洋混凝土構造物設計及施工適用	鋼製或混凝土製海底平台之施工及船殼鑑定適用	鋼製及混凝土製之海洋結構物適用	鋼製及混凝土製之海洋結構物適用	鋼製及混凝土製之海洋結構物適用
適用範圍	大氣中	5 cm 以上	50 mm 以上	船側及船底外週部 75 mm 以上 上述以外部份 45 mm 以上	船側及船底外週部 100 mm 以上 上述以外部份 45 mm 以上	船側及船底外週部 75 mm 以上 上述以外部份 45 mm 以上	船側及船底外週部 75 mm 以上 上述以外部份 45 mm 以上	(1)厚 50 cm 以上 50 cm 以下 部材 50 mm 以上 65 mm 以上 50 mm 以上 用註 2) 中之最大値。 (2)厚 0.5 mm 使 用者料最大尺寸之 1.5 倍且最大鋼筋直徑之 1.5 倍以上	ACI	海洋混凝土構造物設計及施工適用	鋼製或混凝土製海底平台之施工及船殼鑑定適用	鋼製及混凝土製之海洋結構物適用	鋼製及混凝土製之海洋結構物適用	鋼製及混凝土製之海洋結構物適用
有腳設	大氣中	5 cm 以上	50 mm 以上	船側及船底外週部 75 mm 以上 上述以外部份 45 mm 以上	船側及船底外週部 100 mm 以上 上述以外部份 45 mm 以上	船側及船底外週部 75 mm 以上 上述以外部份 45 mm 以上	船側及船底外週部 75 mm 以上 上述以外部份 45 mm 以上	(1)厚 50 cm 以上 50 cm 以下 部材 50 mm 以上 65 mm 以上 50 mm 以上 用註 2) 中之最大値。 (2)厚 0.5 mm 使 用者料最大尺寸之 1.5 倍且最大鋼筋直徑之 1.5 倍以上	ACI	海洋混凝土構造物設計及施工適用	鋼製或混凝土製海底平台之施工及船殼鑑定適用	鋼製及混凝土製之海洋結構物適用	鋼製及混凝土製之海洋結構物適用	鋼製及混凝土製之海洋結構物適用
計劃事項	裂縫的控制	有裂縫不發生 大集中 0.15 mm 以下 分散性 0.15 mm 以下 海水 0.2 mm 以下 且裂縫寬度的推定，供海濱洋前指物設計基準（日本港灣協會）指示，計算之	容許裂縫寬度： (1)海水直接接觸部份，潮沙帶、飛沫帶 0.15 mm (2)上述以外部份 0.20 mm 可應用公式 $W = 16C\sigma_p \phi D / E_s$ W：裂縫寬度 C：混凝土級數強度與鋼筋張力強度之比 比對曲率上側之鋼筋 九鋼 = 1.2，異形鋼 = 0.6 對曲率下側之鋼筋 九鋼 = 0.8，異形鋼 = 0.4 σ_s ：裂斷而後鋼筋之應力 (kg/cm^2) ϕ ：鋼筋混凝土製造之斷面係數 D：鋼筋之斷面積 (cm^2) E _s ：鋼筋之彈性模數 (kg/cm^2) E _s ：E _s = $2.1 \times 10^4 \text{ kg}/\text{cm}^2$	港灣設施之建設、改良、維護情況下適用。	日本港灣協會	日本港灣協會	預力混凝土平底箱蓋單材料設計及施工適用。	船側及船底外週部 75 mm 以上 上述以外部份 45 mm 以上	(1)厚 50 cm 以上 50 cm 以下 部材 50 mm 以上 65 mm 以上 50 mm 以上 用註 2) 中之最大値。 (2)厚 0.5 mm 使 用者料最大尺寸之 1.5 倍且最大鋼筋直徑之 1.5 倍以上	ACI	海洋混凝土構造物設計及施工適用	鋼製或混凝土製海底平台之施工及船殼鑑定適用	鋼製及混凝土製之海洋結構物適用	鋼製及混凝土製之海洋結構物適用

表 2-5 (續)

名 稱	海洋混凝土構造物設計施工指南 (1977)	港灣設施之技術基準及解說 (1979)	預力混凝土平版橋標準 (1975)	Guide for the Design and Construction of Fixed Offshore Concrete Structure (1978)	Recommendation for the Design and Construction of Sea structures (1977)	Rules and Regulations for the Construction and Classification of Offshore Platforms (1975)	Rules for the Design Construction and Inspection of Offshore Structures (1977)	Guidelines for the Design Construction and Classification of Floating Concrete Structure (1978)
大 中 小 系 船 港 水 泥	對於 RC 無規定 對於 PC 之規定 先拉式：350 kg/cm ² 以上 後拉式：300 kg/cm ² 以上	無筋混凝土 135 ~ 180 kg/cm ² 鋼筋混凝土 240 kg/cm ² 以上 預力混凝土： 先拉式：350 kg/cm ² 以上 後拉式：300 kg/cm ² 以上	先拉式：大於 400 kg/cm ² 後拉式：大於 350 kg/cm ²	352 kg/cm ² 以上 若有滿沙時，422 kg/cm ² 以上	408 kg/cm ² 但是未直接接觸海洋環境時，306 kg/cm ² 以上 408 kg/cm ² 以上 嚴重滿沙時，459 kg/cm ² 以上	360 kg/cm ² 以上	由 R ILM 施行的 $\phi 1.5$ cm $\times$ 30 cm - 28 日材料強度為基準。 材料 28 日以後，隨材料之強度增長而考慮。 28 日材料強度尚重時，依其實際測定強度。	數值示明時應使用 $\phi 1.5$ cm $\times$ 30 cm 的 28 日材料強度 " " 關於抗力強度依 "offshore Rules" 之附錄 D4 " 為準。
水 泥	卜特蘭水泥 (4 種類) 高強水泥、砂質水泥、飛灰水泥，合乎 JISP, R5210, R5211, R5212 及 R5213 之規定	需符合 IIS 規定	卜特蘭水泥 (3 種類)： 高強水泥、飛灰水泥、砂質水泥。	卜特蘭水泥 (ASTM C 150, C 595) C, A 含量：4 ~ 10 % 使用於油槽時，需減少 C, A 使用量。	卜特蘭水泥：耐硫酸鹽水泥，配合水泥，合乎各國規範。C, A 含量 12 % 以下。	符合法蘭規格 C, A 含量 8 % 以下。	普通、改良、早強、低熱、耐硫酸鹽、高強、卜特蘭水泥 (ASTM I, II, III, IV, IS 及 IP)	"offshore Rules" 7-2, 7-12, 7-13 (註3) ***
骨 材	骨材須具備條件如下： 不可含有不純物，有害物，海砂中的氯化物為絕乾重量之 0.1 % 以下。	不可使用易碎的，龜裂性的，強度小的，吸水率高的，有膨脹性的。對鋼筋混凝土，避免使用海砂。	不可含有不純物	硬度若合乎 ASTM C 33 及 C 330 之規定海砂必須比淡水洗淨。	不可含有水泥存在而有質的水泥反應物質，海砂中分層，其數量在容許值以下。	不可含有有害物。SO ₂ 化合物在 0.1 % 以下。不純物 (粘土) 在 2 % 以下	強度足夠，耐久性，適當之程度。 不可含有產生化學反應之物質及有害物。	依據 "offshore Rules"
水	禁止使用含有害物質之海水	禁止使用海水 (無筋混凝土，允許使用海水)	禁止使用含有害物質之海水	RC { Cl ⁻ - 水泥重量 $\times$ 0.07 % 以下 SO ₄ ²⁻ - 水泥重量 $\times$ 0.09 % 以下 PC { Cl ⁻ - 水泥重量 $\times$ 0.04 % 以下 SO ₄ ²⁻ - 水泥重量 $\times$ 0.09 % 以下	不可使用海水	含鹽量低於 2g/l 飲用水級之水質。	不可含有汚濁物	依據 "offshore Rules"
混 凝 土 材 料	須使用良好海水泥，AE 劑，火山灰等之使用須由主任技師判斷。	減水劑，AE 劑須符合土木學會規格。	受本協會承認的良質物	火山灰試驗結果而使用	不可使用含有 0.1 % 以上的氯素離子之氯化鈣配合劑及顏料	不得含有塩份	須經本協會承認	依據 "offshore Rules"
氯化物含量	依材料別限制	由材料別限制	由材料別限制	RC: Cl ⁻ - 水泥重量 $\times$ 0.10 % 以下 PC: Cl ⁻ - 水泥重量 $\times$ 0.06 % 以下	由材料別限制	由材料別限制	禁止使用 CaCl ₂	依據 "offshore Rules"

表 2-5 (續)

[illegible]

表 2-5 (續)

名 稱	檢 查 有 關 事 項	海洋混凝土建造物設計施工指南 (1977)	港灣設施技術基準及解說 (1979)	預力混凝土平蓋船基準 (1975)	Guide for the Design and Construction of Fixed Offshore Concrete Structure (1978)	Recommendation for the Design and Construction of Concrete Sea structures (1977)	Rules and Regulations for the Construction and Classification of Offshore Platforms (1975)	Rules for the Design Construction and Inspection of Offshore Structures (1977)	Guidelines for the Design Construction and Classification of Floating Concrete Structure (1978)
		特別檢查	混凝土標準施工說明書標準	無記載	無記載	無記載	每四年後船殼更新 實施檢查： (1) 漆面區損壞 (2) 裝置、設備	發現事故損傷時，通知船主	每 4 年實施 檢查範圍： (1) 0.2mm 以上的裂縫 (2) 混凝土劣化 (3) 鋼筋的腐蝕 (4) 防銹系統 檢查位置： (1) 漆面區 (2) 接頭部位 (3) 補修區 (4) 應力集中處
備 考	與類 2 條 防銹方法有關 之措施	受壓損斷裂等的剝離作用 部份要以通常材料保護其 表面或須要增加鋼筋保護 層或斷面	無記載	無記載	事故、損傷、劣化發現時 ，構造物受定有影響部份 材料變更之時，諸條件變 更時。	對被覆之聚合物及永久等 腐蝕之特別防銹施工時可 以底和被覆施工	無記載	可使用保護膜，亞鉛 鍍金，漆面防銹。 不可使用異質的 PC 鋼材之否則可能引起 電蝕。	依據 "Offshore Rules"

(註 1) * 星塔接 (star lap) 厚度 50mm 以上部材時的垂直 13mm 以上。

(註 2) ** (1) 骨材最大尺寸之 1.5 倍。

(2) 鋼筋最大尺寸之 1.5 倍。

(3) 20mm 以上。

(註 3) *** "Offshore Rules" 乃指 Rules for the Design, Construction and Inspection of Offshore structures (1977)。

表 2-5 (續)

(1) 凍結融解時常反覆之地域混凝土水灰比要求

構造物 露出狀態	斷面 薄情況 (1)	普通 情況 (2)	厚 場合 (3)
(a) 發 磯 區	50	55	55
(b) 潮 汐 區	45	50	55
(c) 海 水 中	55	60	65

情況 (1) 斷面厚度 20 cm 程度以下構造部份。
 情況 (2) 不屬於 (1) 及 (3) 之部份。
 情況 (3) 巨積構造物的表面部份。

注：附表 1 為由耐久性而定的 A E 混凝土之
 最大水灰比 (%)。

[附表 2] 最大水灰比 (%)

(2) 稀有變成冰點下氣溫之地域混凝土水灰比要求

構造物 露出狀態	斷面 薄情況 (1)	普通 情況 (2)	厚 情況 (3)
(a) 發 磯 帶	55	60	65
(b) 潮 汐 帶	45	50	55
(c) 海 水 中	55	60	65

構造部份	凍結程度 材料	受凍結融 解的地區	不受凍結融 解的地區
繫船直柱、基礎、胸牆		60	65
繫船岸上結構		60	65
無底沈箱，# 分格式，L 形		55	55
錨 碇 板		60	60

表 2-6 第二種防蝕法相關規範

第 2 種 防蝕方法	名 稱	制 定 機 關
樹脂含浸 混凝土 樹脂塗裝 鋼筋	* Special specification Polymer Impregnated for Concrete slabs * Standard Specification for Epoxy Coated Steel Reinforcing Bars * Material Specification for Epoxy Coated Steel Reinforcement * Material Specification for Epoxy Coated Steel Reinforcement * 使用亞鉛鍍金鋼筋的鋼筋混凝土設計施工指針 * 使用亞鉛鍍金鋼筋的鋼筋混凝土設計指針	Texas Highway Department specification 412 (1975) ASTM (draft) NACE (draft) Ministry of Transportation and Communication 1442 - 1 (1987) 土木學會 日本建築學會
電氣防蝕	* Cathodic Protection of Steel in Reinforced Concrete (recommend practice)	NACE (draft)
防 銹 劑	* 鋼筋混凝土防銹劑 * 含有鹽分的混凝土中的補強，用棒鋼之促進腐蝕試驗方法（及同解說）。	日本工業規格 JISA6205 日本工業規格（案）

表 2-7 耐久性偵測使用之技術

	-	特 性 檢 驗	試 驗 技 術	其 他 考 慮
力 學 特 性	現 場	混凝土表面品質	試驗錘讀數	由於表面硬化、裂紋或層剝引起之誤差
	試驗室	抗壓、抗張強度	鑽心試驗	
化 學 特 性	現 場	碳 化 氯、硫水份含量	利用酚酞噴霧量測碳化深度 利用衝擊鑽孔機蒐集 10.-25.mm 條狀之受污染試體	依據 B S 4550 方法分析結果之曲線可得到穿透常數
	試 驗 室	混凝土配合比例 水泥種類 原始水灰比 組成材料礦質	依據 B S 1881 P 76 硬化混凝土分析法 鋁鐵比例 利用 x - ray 繞射法	普通波特蘭水泥 (opc) : 鋁 : 鐵 > 1.5 抗硫波特蘭水泥 (SRPC) : 鋁 : 鐵 < 0.9
物 理 特 性	現 場	鋼筋埋置情況 " " " 保護層之情況	電化學電位法 電阻抗量測法 超音波法 (非直接法) 利用內視鏡觀測鋼筋埋置情形。 利用 R-Meter 探測保護層鋼筋號數間距等	依據 A S T M c876 與其他非破壞性試驗所得結果之關係, 小心解釋 基於土壤阻抗量測 利用變化探頭間距與最適線間距對時間之關係以計算傳遞速度 保護層超過 100mm 及鋼筋搭接處較有問題。
	試 驗 室	保護層滲透性 熱擴張係數 混凝土密度/孔隙 一般性 (鋼筋與混凝土)	水滲透性、氧擴散常數 常觀及微觀測試	通常利用透水試驗量測, 以確定骨材來源, 爐石, 火山灰及飛灰之存在否。

三、調查與試驗

(一) 前言

本研究之重點如下：

1. 橋樑歷年調查資料之蒐集。
2. 海洋環境資料及海水樣品蒐集。
3. 現場非破壞性試驗。
4. 結構體混凝土鑽心取樣。
5. 實驗室試驗。

(二) 澎湖大橋歷年調查資料之蒐集

歷年腐蝕記錄之蒐集及分析目的，係供給初步診斷所需，用來引導後續分析試驗之參考及判斷可能產生腐蝕之原因。腐蝕資料將整理成統計圖表，可用來初步診斷腐蝕原因之可能性，如此才可供現場鑽心試驗及微觀印證時之參考。

(三) 海洋環境資料及海水樣品蒐集

跨海大橋處於海洋環境下，可能受到海象，氣象因素之影響因此特蒐集中央氣象局在民國 60~69年期間所作的氣象資料 [28]，在潮汐及波浪方面蒐集中華顧問工程司，國立台灣大學海洋研究所及台南水工試驗所之研究報告 [27, 29, 30, 40] 而在海水水質化性分析除蒐集台大海洋所調查分析資料 [27] 外，亦在本大橋現場採集海水作化學分析。

(四) 現場非破壞性試驗

鋼筋混凝土橋樑耐久性問題產生之原因甚多，包括保護層厚度不足，混凝土施工品質不佳，硫酸鹽侵蝕造成龜裂或剝落，因此加速海水中氯化物及二氧化碳和濕氣的侵入而造成腐蝕，為探討可能腐蝕致因及其影響性，必須進行非破壞性試驗及鑽心取樣分析。

本研究在現場第33橋孔及59橋孔內外海側之大樑及橋底面版各用超音波，試驗錘測量混凝土強度，R-Meter 量測保護層厚度；又在公路局所拖吊在大橋兩側陸上空地之 26孔、30孔及 74孔三支 P.C樑及 76孔一支 R.C.樑等進行試驗錘，超音波測試混凝土強度，R-Meter測量保護層厚度，並用 Pathfinder測量腐蝕電位。

現場搭架及試驗情形如圖 3-1及圖 3-2所示。

本研究進行之現場非破壞試驗如下：

1.現場觀察裂縫分佈(Field Observation) 試驗

僱用漁船巡視各橋孔底面實際損壞情形，並拍照繪圖紀錄，參考 ACI 201, 1R-68 規範辦理，〔8〕。

2.試驗錘(Test Hammer) 試驗

本試驗按 ASTM C805規範執行，混凝土之強度與其硬度成相對比率，而試驗錘係利用衝錘(Impact Hammer)撞擊混凝土表面，發生反彈作用，根據反彈力推導混凝土可能強度，繪成強度曲線，測知各橋孔表面腐蝕的可能分佈概況。

3.超音波(Pulse Velocity Throught Concrete)測定

本試驗係按 ASTM C-597 之規範執行，利用超音波脈動傳入混凝土中，並以測波器測定在混凝土中之傳播速度，據此估算混凝土強度及品質狀況。

4.鋼筋測定儀(R-Meter) 試驗

此種儀器原理為鋼筋受磁場偏離，可測知鋼筋位置，辨別保護層之厚度，同時可供鑽心取樣位置選定之參考。

5.腐蝕電位測定

本試驗係按 ASTM C-876 之規範執行。

混凝土腐蝕為一種電化學反應，在鋼筋表面有陰極(鈍態)和陽極(正在腐蝕中)之發展，因此各位置有不同之電位及電流形態，有效地測量某一範圍之電位則可評估在鋼筋表面上發生腐蝕之過程。本測定使用英國 Colebrand 牌腐蝕電位測定儀Pathfinder可快速定出R.C 結構物上腐蝕電位。

然而本試驗值因地點而變，必須實測才能決定各地之腐蝕臨界條件，本試驗所得之數據僅可供腐蝕電分佈及程度之參考。

(五) 混凝土結構體鑽心取樣

澎湖跨海大橋民國60年完工至今已使用16年，經過這些年來常久暴露在海洋環境下，混凝土之狀況將改變，這種狀況依海鹽侵入程度與當時拌合配合比之品質而定，為瞭解混凝土惡化致因必須鑽心取樣作詳細之物理及化學性分析。本研究利用公路局材料試驗所之鑽機在 26孔、30孔及 74孔三支 P.C樑及76孔一支 R.C樑各鑽取代表性之試樣及套管內砂漿帶回試驗室作試驗。並取回混凝土內鋼筋回試驗室進行試驗。

(六) 試驗室分析

為了解 P.C 樑及R.C樑之混凝土施工品質及氯離子侵入之含量本研究所作之試驗室分析工作包括下列各項〔32〕：

1. 鑽心試體描述

將試體表面展開描繪，由此資料可研判當時使用之混凝土配合比是否適當、老化現象……等。

2. 抗壓試驗、比重及孔隙測定

試樣作超音波、試驗錘及抗壓試驗，比較分析抗壓強度，並按 ASTM C-64之規範量測比重及孔隙率。

3. 水泥及粗細骨材含量

為了解現場灌漿工作之均勻性，按 ASTM C-85之規範測定其水泥之含量及粗細骨材之比率。

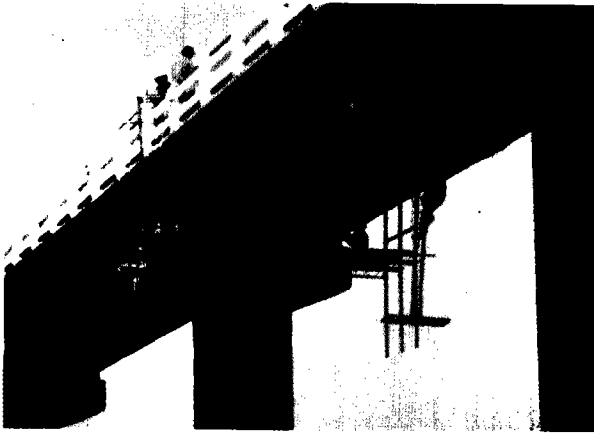
4. 氯離子含量

為了解海水中所含氯離子侵入混凝土中或摻用海砂、海水等，委請台灣水泥公司研究試驗室進行氯離子分析。

5. X光繞射試驗(XRD)及掃描式電子顯微鏡(SEM)分析，可剖析混凝土成份及惡化現象在研究背景中已評細介紹。

6. 鋼筋之物理試驗

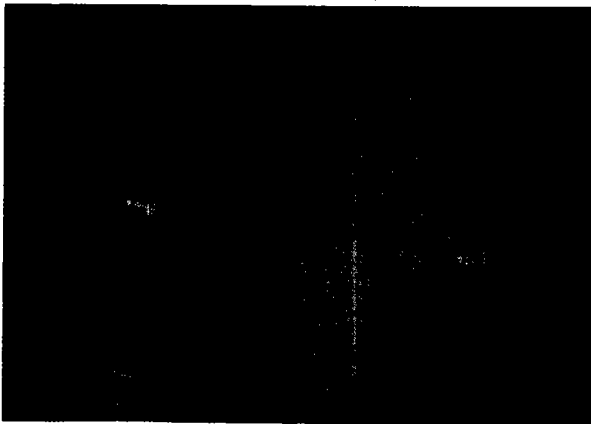
鋼筋試樣作降伏強度，抗拉強度，伸長率……等試驗，以了解目前該大橋樑內鋼筋惡化之狀況。



(a) 搭測量工作架



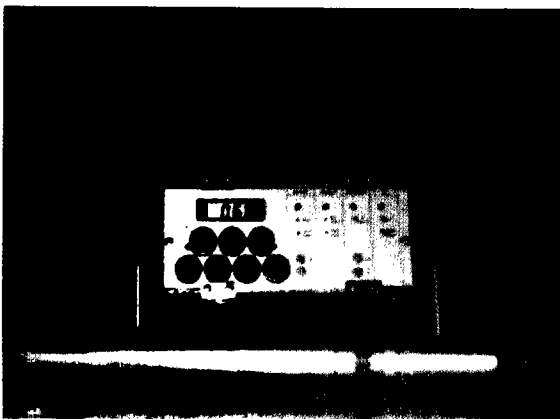
(b) 標定測量位置



(c) 混凝土強度測定 (試驗錘)



(d) 鋼筋保護層測量 (R-meter)



(e) 海水水質分析儀器

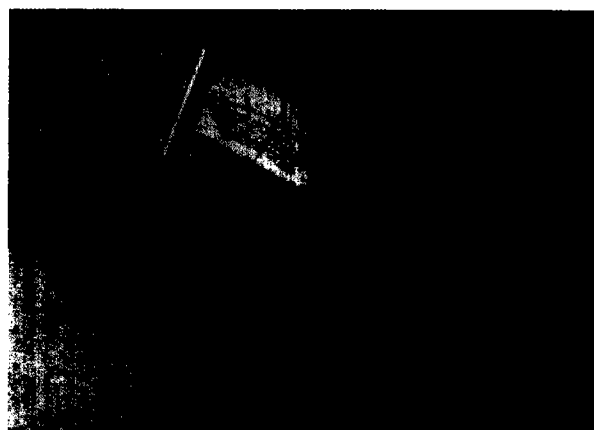


(f) 海水取樣水質調查

圖 3-1 現場橋樑33孔及59孔進行非破壞性檢測及大橋下之海水水質調查



(a) 超音波測定



(b) R-meter 測定



(c) 試驗錘測定



(d) 腐蝕電位測量



(e) Pathfinder 腐蝕電位測定儀



(f) 鑽心取樣

圖 3-2 26、30、74 P.C.樑及76孔 R.C.樑進行非破壞性檢測及鑽心取樣

四、研究結果分析與討論

(一) 橋樑相關資料之蒐集、分析與討論

1. 工程設計

- (1) 澎湖跨海大橋全長共 76 孔，如圖 4-1，其中除 34-37 孔係 320M 二鉸四孔懸臂式預力箱型連續樑橋，76 孔以 R.C. 樑施工外，其餘各孔均以預力 T 型大樑佐以隔樑為主要結構，又可分為 1-33 孔，38-61 孔，70-75 孔是 23.10 M，62-69 孔是 44.6 M 長跨徑預力混凝土樑〔18〕，每孔大都二根大樑，而為加強安全在三個 23.1m 兩端各有兩孔為三根大樑（兩橋頭除外），另在 1-33 孔三分點亦有兩橋孔為三根大樑，而在 38-61 孔中央有三孔為四根大樑。
- (2) 本橋係依 AASHTO Std 1. 13. 10 最大承載荷重而設計〔18〕，目前仍為國內公路橋樑設計之主要規範〔39〕，預力均採後拉式施工法，設計時已考慮衝擊作用、混凝土潛變、乾縮與鋼線鬆弛等預力損失 15 % 等項目，可是未包括動力結構分析，而設計方法亦與內陸橋樑相同，並未特別針對跨海橋樑及海島之特殊惡劣天候及海洋環境做修正設計。
- (3) 在氣候環境惡劣之海島區域是否仍適用 AASHTO H-20 來設計是值得探討的，〔18，34〕，根據設計書所述依最大承載荷重設計所考慮混凝土龜裂強度設為 $0.14f_c'$ 時，則活載重約增加一倍，但採用 $0.14f_c'$ 稍嫌太大，就混凝土海域結構設計時，為安全起見，若將混凝土之龜裂強度視為零，在此狀況下，活載重僅能增加約 13 % 而已，但即使依混凝土龜裂強度採用 $0.14f_c'$ ，按照 AASHTO H-20 設計，在車輛超速的衝擊下，其結果是否保守仍十分值得探討〔33〕，因此對特殊地區，如濱海地區... 等的橋樑工程，應先就環境要求作進一步之研究，如橋樑混凝土龜裂的控制，須對車輛行進所產生之衝擊進行動力分析，並考慮往後震動產生的疲勞破壞。
- (4) 本橋之主要橋樑型式均採用完全預力混凝土 (Fully Prestressed) 設計，使用此設計觀念之優點應可歸納為 (A) 適合長達 44M 之長跨度 (B) 與 R.C.

結構比較，樑斷面可較小，重量較輕，適合在惡劣環境下施工（如拖吊作業等）（C）成本可降低。相對的，其缺點為（A）樑斷面慣性值較小，對活載重與衝擊載重所產生之振幅較大，（B）施工與材料品質須較嚴謹，（C）環境對結構設計考慮影響較大，例如混凝土之乾縮，裂縫、潛變、鋼鍵之鬆弛與腐蝕損傷.....等。

2. 工程施工與使用

(1) 該工程使用之材料均來自當地，拌合用料粒均為碎石，採石地點距工地約12公里之牛礁尾，砂採用黃色之海砂，拌合用水採自距工地30公里之山水，〔21〕。

砂比重為2.525，石料比重為2.78，粗細粒料之粒度差，而吸水率較大〔21〕。

(2) 本橋基礎施工因顧及體積龐大，乃採用預疊混凝土，內摻有飛灰，可增長混凝土耐久性與壽命，而其助注劑中之鋁粉，使預疊混凝土之漿液在乾濕時體積膨脹，故無收縮龜裂之現象〔19〕，其漿液之配合比為水泥：飛灰：砂：水 = 50kg：13kg：63kg：31kg。使用之助注劑 RGA為水泥與飛灰和之 0.03%。

(3) 其每立方公尺之混凝土配合表如下〔19〕，

（骨材最大粒徑為 25mm，設計強度 350kg/m³）

水灰比	水泥量	用水量	坍度	絕對細骨材比
39 %	460 kg	180 kg	5-7 cm	38 %

粗骨材量	細骨材量	Pozzolanth #10
1085 kg	665 kg	4.60 kg

(4) 摻加波索蘭（pozzolith）為提高混凝土早期強度，經試驗二天養治即可達到預期之強度。該橋使用卜特蘭普通水泥 ASTM Type I 製作，混凝土較易龜裂，而該橋位於海洋環境下，易受海水或含有鹽分之水汽滲入導

導致鋼筋或鋼線腐蝕，引起保護層裂開而剝落〔21〕，在海洋環境下，未使用含 C₃A 量少之第二型或第五型抗硫酸水泥，選用材料不當應為該橋嚴重腐蝕主因之一。

- (5) 依原配比知其強度設計為 350kg/cm^2 ，惟建於海岸地區受海水腐蝕環境之橋樑而言，該強度似乎較低，尤其在混凝土本身之密實性不足之情況下，應該採用設計強度為 450Kg/cm^2 之混凝土〔21〕。
- (6) 使用預力大樑，在材料選用與施工上必須嚴謹，可是在施工時鋼筋之混凝土保護層厚度不易控制，難免有厚薄不均之處，且灌注混凝土時，搗實不足亦將增加混凝土內部之空隙，如有這種現象發生，則將使鋼筋及預力鋼線之腐蝕機率增加〔21,33〕，若鋼筋保護層不足，則將從該鋼筋開始發生腐蝕，由於電化學作用，終將波及結構體全部鋼筋發生腐蝕現象〔21〕。
- (7) 該橋鋼筋保護層約 5 公分，惟受海水作用影響之地方至少應有十公分以上之保護層厚度為宜〔21〕，如是橋樑本身載重之限制而無法加厚其保護層時，鋼筋表面應先作防蝕處理。
- (8) 混凝土橋裂縫可因混凝土內或環境溫度與濕度差異，材料與施工品質不佳（例如：粗骨材扁平多角，易引致應力集中，而產生界面裂縫），或超載...等產生〔1〕〔31〕。裂縫之產生，影響混凝土結構體耐久性甚鉅，裂縫寬度大小，更可直接或間接影響結構物之壽命，美國混凝土協會（ACI）與英國 BSI（British Standard Institute）均對混凝土在各種情況下之容許裂縫寬度有所限制，如表 4-1 及表 4-2。預力混凝土結構之限制比一般鋼筋混凝土嚴格，而處於惡劣環境下（例如受潮汐循環作用或海浪潑濺），要比一般情況嚴格。預力混凝土樑一旦有裂縫產生，其斷面彎矩慣性值（Moment Inertia）將急速下降，而導致撓度之增加，遂造成腐蝕—撓曲—裂縫擴大之等惡性循環作用〔34〕。
- (9) 該橋如果施工完成時結構符合設計書規定，且在合理使用狀況與一般環境下應為十分安全。然而結構體何以仍產生損害，究其原因可能是車輛超速造成衝擊，或因超載而引起結構內部產生應力而導致裂縫產生，另外，超

速往往會引起橋體上下之震動（須由動力分析判定），亦會對結構體造成不利之傷害。根據日本東京大學岸谷孝一教授之針對澎湖跨海大橋腐蝕調查報告指出〔21〕，該橋裂縫大者幾達5mm以上遠超過表4-1及4-2 0.3mm之限制，其原因不外施工不良，及超載超速之惡性循環所致，這也是該橋嚴重腐蝕原因之一。

3. 維修與重建

(1) 本橋於民國 59年底完工通車，至民國 75年底共16年，其維修費用共花費4900多萬元。在民國 64年之整修工程即花費 300多萬元，民國 66年，自第 1孔至 28孔逐孔補洞及全面刷塗漆料之工程花費 440多萬元；民國 67年，第 75孔作孔洞填補及表面防銹處理之試驗性工作，花費 19萬元；民國 67年第 16孔大樑連同橋面打除重建，花費 113萬多元；民國 72年，第 12、13、75孔下加建支座，花費 198萬多元；民國 73年，在第 32-71孔作防蝕處理，使用六種工法共花費 3000多萬元。

(2) 民國 73年起將 1-31及72-76孔改建成路堤花費 2億多元。

(3) 根據所有之維修紀錄〔20〕橋樑在維修以前並未先作整體調查以了解其內部鋼筋銹蝕程度及範圍，均只是以目視觀察，在有裂縫或剝落混凝土處作維修處理，如此維修後，內部鋼筋繼續腐蝕，以致雖然花了大筆的維修費用與時間，但並未見到效果。

(4) 澎湖地區之一般民間房屋，其密鋼筋部位之樓版及屋樑，所用混凝土海砂均未經洗滌處理，但室內樓版使用多年，較之跨海大橋完成時間數以倍計，均未發生嚴重銹損情形，可能係大部份民房在內陸地方，距海較遠，含鹽海風較不易進入室內，以及室內裝潢或塗刷漆之結果，混凝土表面被遮或孔隙被填塞所致〔23〕，亦即在未發生腐蝕前，即已作塗裝保護之防蝕措施。因此建議在濱海地區之結構物施工完工後應即時塗刷防蝕塗料。

(5) 根據上述(1)之資料顯示，該橋在建造三年後就開始整修，五年後即發生嚴重腐蝕現象，而使整孔(16孔)橋樑打除，照原設計重建，而重建後五年亦開始發現腐蝕跡象，根據資料顯示〔35〕，澎湖跨海大橋建造完成5-8年

，混凝土表面即出現腐蝕斑跡，再過3-4年混凝土龜裂剝落，再過3-4年主鋼鍵銹損，再過2-3年主鋼鍵半數銹斷，再過一年橋樑已不堪使用，因此概估該橋在該環境下之正常壽命應為14-20年間，亦即該橋如不重建，最遲至民國80年即將報廢。

(6)現在該橋之改建型式係採用路堤式，至於少數漁船通道則採用拱橋〔26〕，現就各種應用之橋樑結構型式提出討論〔34〕

(A)預力混凝土結構

仍應為最佳選擇之一，唯施工時應特別針對惡劣環境與防止超載上努力，並應注重施工與材料品質，設計時應加強裂縫之防止，務必確保樑底在任何狀況與任何時間下之絕對壓力狀態。並可考慮採用部份預力混凝土之設計法，在樑中央底部增加普通鋼筋以期減少撓度、防止或分散裂縫。

(B)U型預力樑結構

U型樑之設計已在國內大甲溪、大度溪等鐵路橋樑中使用〔圖4-2〕。使用本型式橋樑至少三項優點：(1)大樑之底部高程可與路面高程相近，可增加橋底至海水面之距離(依大甲溪橋之經驗，可增加淨高約1公尺)，減少鹹海水汽或波浪之潑濺所引致之腐蝕；(2)U型橋底部平坦類似箱型橋，則底部通風不易集聚濕氣(澎湖大橋原設計即有此問題)，可減少腐蝕機率；(3)大樑與橋面板所結成之複合斷面，因橋板在U型斷面底部，則斷面中性軸(Neutral Axis)明顯下降(指與原U型結構物比較)。就防止結構底部產生張應力導致破壞而言，U型橋將更為經濟且更有效。圖4-2所示即為大甲溪U型斷面鐵路橋，惟該橋係採用複合斷面法，為避免濕氣從接縫直接侵入，宜採用一體成型之設計(如圖4-3)。

(C)普通混凝土橋

對防止疲勞或減少撓度方面具有優點，然不適合大跨距之海洋結構(例如44m之孔距)，因其樑深太大，樑自重太大，且易於產生裂縫為其缺點。

(D)拱橋

可確保橋樑底部處在壓應力之狀態，然其施工成本較高；海底之深度應適當，且當跨距與高度太大時，即失去拱橋之意義。

(E) 堤岸

對防蝕與維護觀點頗佳，但對景觀及海域生態環境會造成影響，且施工費用頗高。

(F) 拉索式橋 (Cable-Stayed Bridge)

目前跨海長橋多採用此種型式，主要因取外型簡單、美觀且跨度可增至甚大，減少橋墩、海域施工困難。著名之例子包括連接美國與加拿大之 Alex Fraser Bridge，其最大跨度達 465m，本型式橋樑之施工與設計所需知識與技術層次較高。吊橋之優缺點亦類似於拉索式橋。

(G) 箱型懸臂式預力連續樑橋

澎湖大橋在 34-37 孔即採用 320 公尺長二鉸四孔連續式箱型預力橋。此種橋型設計，可使箱型樑底承受壓應力，而讓張應力發生在接近橋墩支撐點之頂端，頗為有效的可防止裂縫腐蝕而發生之設計。從現場觀察，這些橋孔之樑仍不免遭受少許腐蝕作用侵襲，其發生位置多在大樑之兩邊。然而其龜裂數量與其它各簡支預力樑比較則較少，這些龜裂分佈較散亂，主要腐蝕破壞可能係施工、外界環境等影響所致。

綜合上述討論得知，原設計 T 型預力樑腐蝕因子易從樑兩側侵入，水汽易滯留於橋面版底側而造成相對濕度高，因而腐蝕機率高〔35〕如欲以預力混凝土橋樑型式建造，則宜採用 U 型式預力橋，可達經濟與安全之目的。然而必須做好排水，避免水滲透進入混凝土結構體。拱橋不適合長跨度構造，原箱型懸臂式預力連續樑亦可採用，惟應加強施工品管，如以景觀而言，則以拉索式橋為佳。可是目前採用之堤岸建造成本較高，且對景觀及海域生態環境將可能會造成影響。

(二) 海氣象資料及水質分析

1. 海象

- (1) 台灣電力公司為辦理澎湖火力發電廠，曾於民國75年委託國立成功大學台南水工試驗所進行潮位與暴潮推算〔29〕，所得暴潮偏差值為 1.89m，而中華顧問工程司接受台灣省公路局委託進行本大橋改建路堤工程，曾在通標漁港檢測潮位資料並進行天文潮及暴潮位之分析〔40〕如表 4-3所示，因此中華顧問工程司採用復現期50年之設計水位 = 平均高潮位 + 暴潮偏差 = 1.85m + 1.46m = EL. + 3.31m，原始設計資料採用之高水位為 0M，低水位為 -3.0m(圖4-1)〔19〕。
- (2) 台南水工試驗所曾受公路局委託於民國 54年 12月澎湖跨海大橋橋址波浪及波力推算，根據報告〔30〕指出澎湖北端之通標，西嶼間之海面有效波波浪方向（直接由深海傳播之方向）為 N 轉 WNW歷年颱風波浪推算深海波示性波高 $H_s = 5.21\text{m}$ ， $T_s = 8.5 \text{ sec}$ 方向為 NNW按通標西嶼之波浪折射係數為 0.53，故波浪進至橋址處之波浪減為 2.76m 以下與平常季節風浪近似。其他方向之風浪可能較該為大，但因地形關係不可能進入至橋址一帶之淺海，故不予考慮，因此設波浪可採用 2.76m。然而根據中華顧問工程司推算結果，復現期50年之深海設計波高為 7.7公尺橋址地方，淺化後因水深及位置不同，示性波高為 3.6-7.2公尺，而最大波高在 5.3-12.1公尺範圍。
- (3) 在考慮跨海橋樑設計時，橋面底版必須比平均高潮位加上設計波高值為大，本橋樑第1- 20孔之橋面高程僅為 +5.5m，樑底高程為+4.15公尺，根據原設計潮位+0.0m，樑底僅距高潮位4.2公尺，按中華顧問之分析結果不考慮暴潮，僅取平均高潮位+1.85公尺再加上最小的示性波高 3.6m之半，即為 +3.65公尺，很顯然樑底之高程太低，因此波浪容易潑濺至橋面底版和主樑上，而靠近外海側首當其衝故容易發生腐蝕。

2. 氣象

- (1) 澎湖全年及各月之風玫瑰圖如圖 4-4，〔28〕，本大橋樑面向外海之方向為西北，由於澎湖無山岳之阻擋，因此北北東及北風可直接吹至本橋樑，而全年除 6月- 8月有西南季風外，都是受東北季風之侵襲，年平均風向頻率以主風向 NNE 佔 41%，尤其 10-1月高達 63-73%，風向頻率以蒲福

風級 4-6級(5.5-13.8m)發生機率為最高，平均風速達每秒10公尺以上者，全年有 123天，在如此強風直接吹襲橋樑結構物上，海風挾帶含有腐蝕性之海鹽，容易侵入結構體，因此使得靠外海側之橋面及樑所發生之腐蝕情況比澎湖灣側者更為嚴重。

(2)澎湖地區 1971-1980年每月平均相對濕度分佈如圖4-5，〔28〕，濕氣為碳化反應所必須者，在相對濕度 50-75%情況下發生碳化反應最快，相對濕度低於50%，相當乾燥水汽膜不易在孔隙表面形成，因此電化學反應通路中斷，而使腐蝕現象中止，而在相對濕度大於75%情況下則水飽和，阻塞孔隙，因此氧氣無法侵入，腐蝕反應亦無法進行，同時二氧化碳亦受水之阻塞，致使侵入速率較慢，故不易發生碳化，本地區之相對濕度仍以 50-70%之發生機率最大，故易發生碳化反應。

(3)澎湖地區 1971-1980年之每月平均氣溫變化如圖 4-6，〔28〕，本地區之氣溫大於 30℃情況，全年有 123天，每天之氣溫差達 11.9℃，因為溫差變化大，因此結構體易受乾濕反覆作用而造成龜裂現象。

(4)澎湖地區1971-1980年每月平均雨量及降雨日數如圖4-7〔28〕根據資料顯示年平均雨量為 977mm，年降雨量最多為1972年之1458.4mm，最少為1980年之531.3 mm，年降雨天數僅 89天，澎湖降雨多集中在5-9月，每日或每月之降雨量變化很大，不降雨之天數居多，每年乾旱季節長，雨量稀少又缺乏河川致無陸上河川排水稀釋海水，致使海水含鹽量高。

3. 海水水質分析

(1)根據台灣大學所測之資料顯示 表 4-4，〔27〕在本海域之海水鹽度範圍約在32.7~35.1‰。屬於高鹽度之海水，鹽度受水深之變化不大，例如75年 9月9日在通樑實測水深 0、3、5、8、10及15m下鹽度均為34.1‰不變。海水之酸鹼度(PH值)隨水溫及鹽度不同而異，這種影響主要是由於碳酸含量之改變所致。西嶼海域之PH值變化多在7.8 - 8.4 之間，受季風之影響性不大。西嶼附近海域(灣內)之海水溶氧量介於4.3 - 8.0 mg/l之間，冬季水溫較低，故溶氧量較高，而夏季正好相反，溶氧量會影響到鋼筋

混凝土結構物之腐蝕速率。

- (2)由實測資料如表4-5 顯示本地區水質中 Na^+ 含量較約為 25,289~28,664 ppm較一般外海之10,760ppm為高，而 Cl^- 含量15,962~17,304ppm 比一般外海之19,353ppm為低，其他鎂(Mg^{+2})及鈣(Ca^{+2})，硫酸根(SO_4^{+2})離子等，亦顯然較一般外海為低，而海水中之鎂，硫酸根及氯離子等均易與水泥水化物產生化學反應，而造成結構體之劣化。

(三)現場非破壞性試驗

(In-Situ Non-Destructive Test)

1.現場觀測

- (1)現場觀測各孔之預力混凝土大樑龜裂、剝落、吐銹之情形，如圖 4-8所示，由圖中可看出各樑在未作塗裝維修前與維修後，其龜裂及剝落.....等腐蝕現象相同，即維修並未能阻絕腐蝕之繼續發生。圖 4-9係此次調查所拍之已經使用六種防蝕工法作維修處理後，但仍出現腐蝕現象之照片。
- (2)跨海大橋之上部結構普遍腐蝕，但橋墩均不見有明顯之腐蝕情形，R.C.樑較 P.C.樑之腐蝕程度低，拱型箱式預力樑亦較 T型預力樑之腐蝕程度為低，這是與橋樑距海面之高程及橋樑之結構不同之關係所致。
- (3)第 76孔之 R.C.樑雖較完好，可是其面版之腐蝕最為嚴重 [35]，34-37孔之箱型樑之面版底側不如其它 T型樑腐蝕嚴重，而外海北側腐蝕較內海南側腐蝕嚴重，這與受風壓力之位置與大小及其氣流消散能力有關。
- (4)就現場觀測之大樑龜裂統計表如 表4-6；圖4-10及4-11所示，由圖中可知其主要龜裂均發生在大樑之中央部份，且與該橋之高程有密切關係，如70孔以後其高程較低則裂縫百分比亦較高，這係由於橋樑無法承受日益增加之反覆載重，而首先在中央處發生撓曲裂縫，導致海水及濕氣之侵入，加速腐蝕反應，接著順著鋼筋之走向發生龜裂，使鋼筋保護層剝落，在缺乏保護層及混凝土中性化之狀況下，使預力鋼鍵腐蝕斷裂，嚴重地影響結構體之安全。

2. 試錘試驗 (Test Hammer)

- (1) 試錘試驗觀測知其混凝土表面之品質，由該橋設計資料知其混凝土之強度為 $350\text{Kg}/\text{cm}^2$ 以上，而試錘試驗之結果會受混凝土表面之狀況如濕度、溫度、中性化等之影響而有變化，〔36〕又根據文獻指出其試驗數值與混凝土表面之品質之關係〔37〕如下表，

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

根據以上之資料及混凝土之狀況可知，中性化會使試驗數值增加50%〔36〕。本研究試驗時間係夏季乾熱，又受中性化影響故以其設計強度 $350\text{Kg}/\text{cm}^2$ ，作為評定標準，甚為合理。

- (2) 以 $350\text{Kg}/\text{cm}^2$ 之數值，為下限數值，劃出其強度分佈圖，在陸上之76孔、74孔、26孔及橋上之59孔，其大樑之試錘強度分佈圖如圖4-12，圖4-13、圖4-14、圖4-15陰影處為強度不足部份，極可能為鋼筋腐蝕最嚴重之區域，本試驗與腐蝕電位試驗之結果配合可知研判鋼筋發生嚴重腐蝕之部位。
- (3) 由圖4-12b可看出76孔之R.C樑其兩邊之表面混凝土品質不良，而由圖4-13b可看出74孔大樑之兩邊及中央區下部之表面混凝土品質不良，再由圖4-14a可看出26孔整支大樑之表面混凝土品質均差，另由圖4-15可看出在現場之第59孔靠外海側之大樑，其第二、三腹部之下部品質不良，而靠外側樑之內側則較外側品質不良，靠內海側之大樑，其外側中央下部之品質不良。
- (4) 由(3)所述之結果可知，因腐蝕之影響靠外海側之大樑較內海側之大樑腐蝕較嚴重，而外海側之大樑其內側又較外側腐蝕嚴重。亦即NDT試驗結果與現場觀看結果相同。
- (5) 圖4-16係現場第59孔之橋版表面混凝土品質之強度分佈圖，由圖中可看出其第一塊版及第二塊版均嚴重腐蝕，亦可看出含有鹽份之水汽駐留，因而引起橋面底版及樑內側發生嚴重之腐蝕現象。

3. 鋼筋保護層厚度

- (1) 利用鋼筋探測器 (R-Meter) 量測第 26孔、74孔預力樑樑腹，其保護層平均厚約 30-40mm，

	等一節	等二節	等三節	等四節
26孔	30mm	36 mm	33mm	30mm
74孔	38mm	38 mm	45mm	36mm

- (2) 第59孔大樑之底部保護層平均厚度約30~47mm，

	第一節	第二節	第三節
59孔 (外海測)	28mm	38mm	49mm
59孔 (內海測)	31mm	31mm	32mm

由上表可看出其底部保護層厚度，約僅 3公分，亦即保護層厚度不足，使得有害物質很快地侵蝕鋼筋及鋼鍵，因而造成腐蝕。

- (3) 第76孔R.C.樑，其腹部保護層平均厚度約 5公分，而底部僅 3公分左右。
- (4) 由以上結果可知，該大橋之大樑保護層均不足，這與施工不良有密切之關係。原設計已嫌不足〔21〕，再加上施工不良，使得鋼筋保護層厚度未控制好，致使有害物質迅速侵蝕鋼筋，造成目前該大橋之嚴重腐蝕，這應該是主因。建議爾後對於P.C.樑之施工，應嚴格品管。

4. 超音波量測

- (1) 在陸上之 26、30及 74孔三支 P.C.樑及76孔一支R.C.樑均係平擺在地上，故超音波量測，僅能在平面上作兩點量測，亦即量測之結果僅係混凝土之表面情形，其數值約是 3060m/s，根據文獻〔8〕指出，超音波數值超過 4000m/s時，其混凝土品質係優良 (Good Quality Cover)，3000m/s以下係品質不良 (Poor Quality Cover)。由以上之數顯示該橋之26、30、74、76孔表面混凝土均在不良品質之邊緣。
- (2) 在現場之 59 孔及 33 孔大樑，在樑之兩側相對地作超音波量測，其腹部數值大致相同，均在 2000m/s左右，底部在 5000m/s左右，(底部鋼筋密

佈，其超音波均沿鋼筋傳過，故數值高，但並不表示混凝土品質優良），這可能係其表面有作塗裝保護影響試驗數值，建議日後再作本試驗時應將塗裝保護膜去除。

5. 腐蝕電位量測

(1) 根據ASTM C-876規範指出可由腐蝕電位值預測內部鋼筋之腐蝕程度如下表：

	ASTM	Van Daeveer
E < -350 mV	腐蝕機率 > 90%	> 95%
-350 mV < E < -200 mV	腐蝕機率 > 50%	> 50%
E > -200 mV	腐蝕機率 < 10%	< 5%

(2) 本研究針對在陸上之第 74、26及、76等孔大樑作試驗，而現場第 59孔及 33 孔因有塗裝維修，導電不良無法試驗，建議應該在 59孔樑上將塗裝部份除掉，另作腐蝕電位量測，並將該樑吊至陸上，將混凝土除去，比對腐蝕電位與實際鋼筋腐蝕之狀況，以作為日後我國訂定檢驗標準之參考。

(3) 圖 4-13c、d，係 74孔大樑之腐蝕電位及分佈圖由圖中可看出其腐蝕電位均小於 -350mV以上，即其腐蝕機率在 95%以上，由圖 4-12b、圖4-13b、圖 4-14a之表面混凝土強度分佈，與圖4-12c、4-13c、4-14b 之腐蝕電位分佈圖可看出，其表面強度較差之位置亦即是腐蝕電位分佈曲線梯度較大之位置，也就是說可能是鋼筋腐蝕最嚴重之地區〔38〕。

(四) 混凝土結構體之鑽心取樣

本研究在陸上之第74、30、26、76孔利用鑽機取樣回試驗室作物理性及化學性之分析。

(五) 試驗室分析

1. 鑽心試體外觀描繪

(1) 鑽心試體之外觀描繪結果如圖 4-18，及表 4-7 可知其施工不良係造成其混凝土結構體之不良原因。

(2) 根據 ACI 配比設計法，粗骨材最大粒徑為 25mm 時，粗骨材用量約 65%

，其設計配比表只佔 49%，而根據鑽心試體之分析，粗骨材佔整個混凝土比率僅在 40%~57% 之間，屬於多漿配比，易產生乾燥收縮，且級配不良，骨材分佈不均造成混凝土脆弱面，又粗骨材料多呈扁平狀，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，加速濕氣及氯離子之滲入擴散，增加腐蝕速率，這亦是該大橋使用材料不當及施工不良，造成腐蝕之原因之一。

2. 試體之比重，孔隙及抗壓強度試驗

- (1)表4-8 表4-9係鑽心試體之抗壓強度，超音波數值，現場試錘數值。
- (2)由表4-8，表4-9及圖4-19可看出抗壓強度值與超音波數值成正比關係，亦即由現場之非破壞性檢驗值可印證其抗壓強度值與品質之穩定度。
- (3)表4-10係各試體之比重與孔隙值，在各試體之比重約在 2.60~2.77之間。其孔隙在14.02 ~19.64 %之間，由表4-8可知，抗壓強度在314~518 kg/c m²之間，大部份均合乎規定(350 kg/c m²之設計強度)，部份抗壓強度很高，但試錘強度很低如 圖4-19,可以顯示靠外部鋼筋已腐蝕膨脹，造成混凝土保護層被擠而鼓起，然而內部混凝土仍完好。

3. 水泥含量及粗細骨材比率測定

- (1)鑽心試體之水泥含量，粗細骨材比率，係委託台泥公司研究室分析，其結果如表4-11及圖4-20。
- (2)由圖 4-20b可看出水泥之含量非常之不均勻且含量甚低，較配比設計之460 kg/m³ 少了許多，74孔及 76孔均在 350kg/m³ 以下，而 26孔有一試樣高達 705 kg/m³ 其餘在 170 - 210 kg/m³ 之間；30孔，一試樣 710 kg/m³ ,657 kg/m³ 其餘在 148 ~345 kg/m³ 之間，水泥量不足，亦是造成水密性不好，容易腐蝕之原因之一。
- (3)由 圖4-20a亦可看出其粗骨材之比率約 6.25%~57.92 %之間不合乎ACI之規範，而非常不均勻，係混凝土品質不穩定之明證。
- (4)以上之分析結果，可能係實驗誤差所造成，但至少可看出其混凝土之品質甚不穩定，亦即是施工之品質不良，造成材料析離而加速鋼筋之腐蝕。

4. 氯離子含量

(1) 氯離子之含量如表4-12所示

- (2) 由表4-12及圖4-21可知在混凝土表面氯離子含量約14000ppm，而在距表面約6公分處，其氯離子含量亦達6000ppm左右，超過1200ppm之規範，由此可知其混凝土已受氯離子之滲入，而破壞鋼筋鈍化膜，加速鋼筋腐蝕其滲入原因可能係混凝土產生裂縫，如圖中之76-01試樣，在距表面3公分處之含量較表面還多，由圖4-18試體外觀圖可看出有裂縫存在，使氯離子積存在內，而裂縫產生之原因可能係施工不良及超載、超速.....等引起。
- (3) 迎風面混凝土內氯離子含量較背風面多，樑中央處大於兩側，樑底部大於內部，係由於樑中央發生撓曲裂縫，使大量氯離子滲入。
- (4) 建議本項試驗應求出其擴散速率，可預估在該環境下氯離子到達鋼筋之時間，以作為設計及維修之參考。

5. X光繞射試驗及掃描式電子顯微鏡之混凝土病變分析

(1) X-ray 繞射分析圖如圖4-22

- (2) 表4-13係76孔鋼筋混凝土樑X-ray繞射結果之礦物成份表，由表中可知鋼筋混凝土表層，普遍發生碳化現象，使混凝土失去鹼性，喪失對鋼筋的保護作用，再加上混凝土本身多氣泡造成高透水性，乾縮及撓曲所造成的裂縫，使氯離子及濕氣更易侵入，破壞鋼筋表面的氧化膜，加速腐蝕，76-07，76-06，76-01，均有氯化物侵蝕反應。

(3) 我們可從微觀照片找到混凝土受到碳化及氯化物侵蝕的證據。

圖4-23明顯可看出 Calcite結晶，可看出混凝土已發生碳化現象。

圖4-23中在骨材界面處生成大量具有膨脹破壞性的Ettringite為受海水硫酸鹽侵蝕的證據。

圖4-24(a) 多孔狀刺球為 C-S-H 受到氯化物侵蝕的生成物。(b) 左上角為未受硫酸侵蝕 Monosulfate 結晶。(c) 可看出受到少許硫酸鹽侵蝕再度形成的 Ettringite。

圖4-25大量 Ettringite 生成物。(b) Ettringite與 C-S-H (Cl^-) (c)

沿著骨材界面有大量碳化產物。

圖4-26可看出 76-2內外均出現大量 Ettringite，顯出受硫酸鹽嚴重侵蝕的現象。

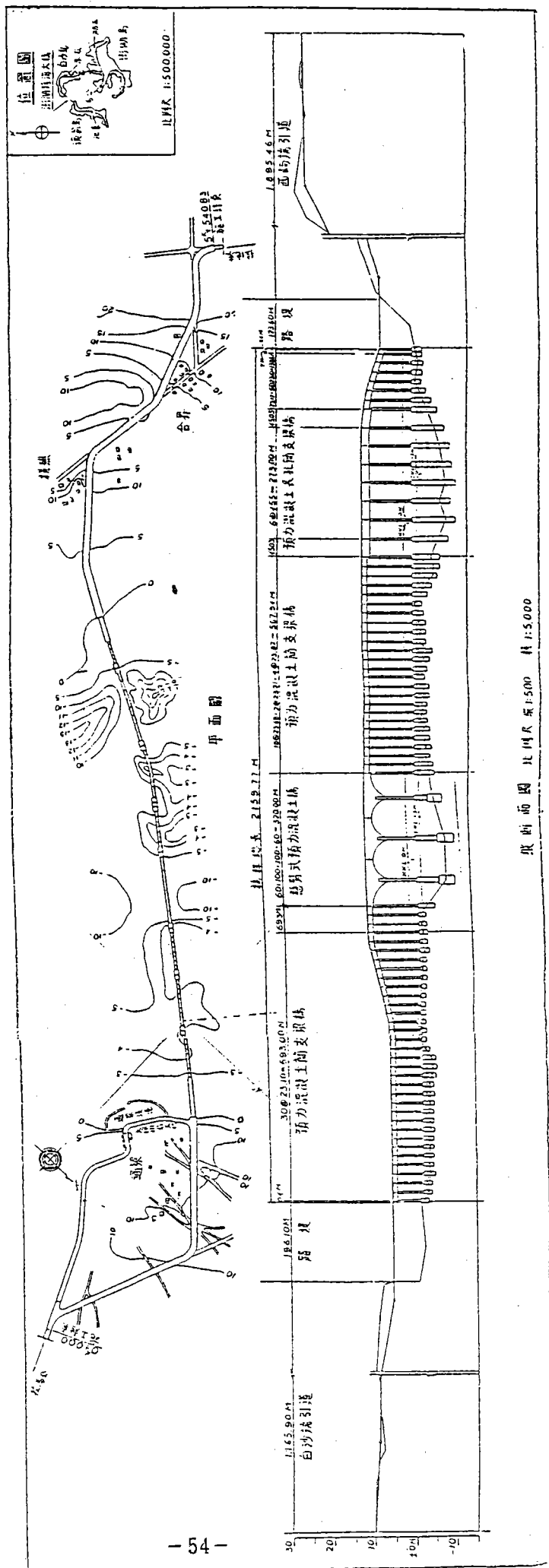
圖4-28生成大量 Ettringite及Calcite，可看出混凝土表面碳化及受硫酸鹽侵蝕的嚴重性。

(4)由以上 X-ray 繞射分析及 SEM 微觀照片相互印證結果，我們可得知混凝土受侵蝕的程度及鋼筋快速腐蝕的真正原因。

6. 鋼筋之物理性試驗

(1)其試驗結果如表4-14，包括單位重，直徑，剖面積，降伏強度，抗拉強度及破斷伸長率。

(2)由表中可看出部份鋼筋因銹蝕，使斷面積縮小，而使降伏強度降低，無法達到設計強度，影響結構物之安全。



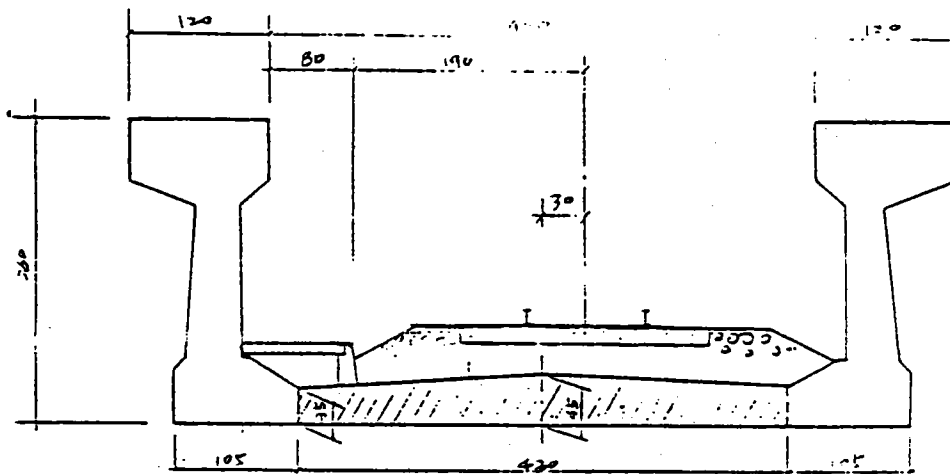


圖 4-2 複合斷面型之U型橋設計，樑底與版底與橋墩相接（大甲溪橋）

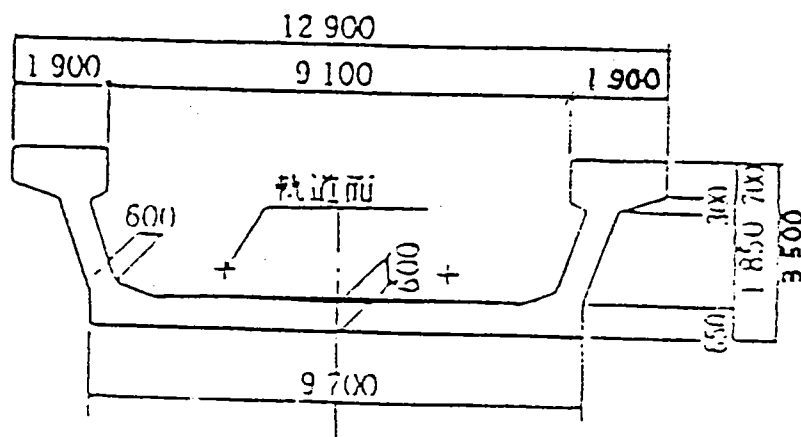


圖 4-3 一體成型之日本東北新幹線之鐵路U型橋

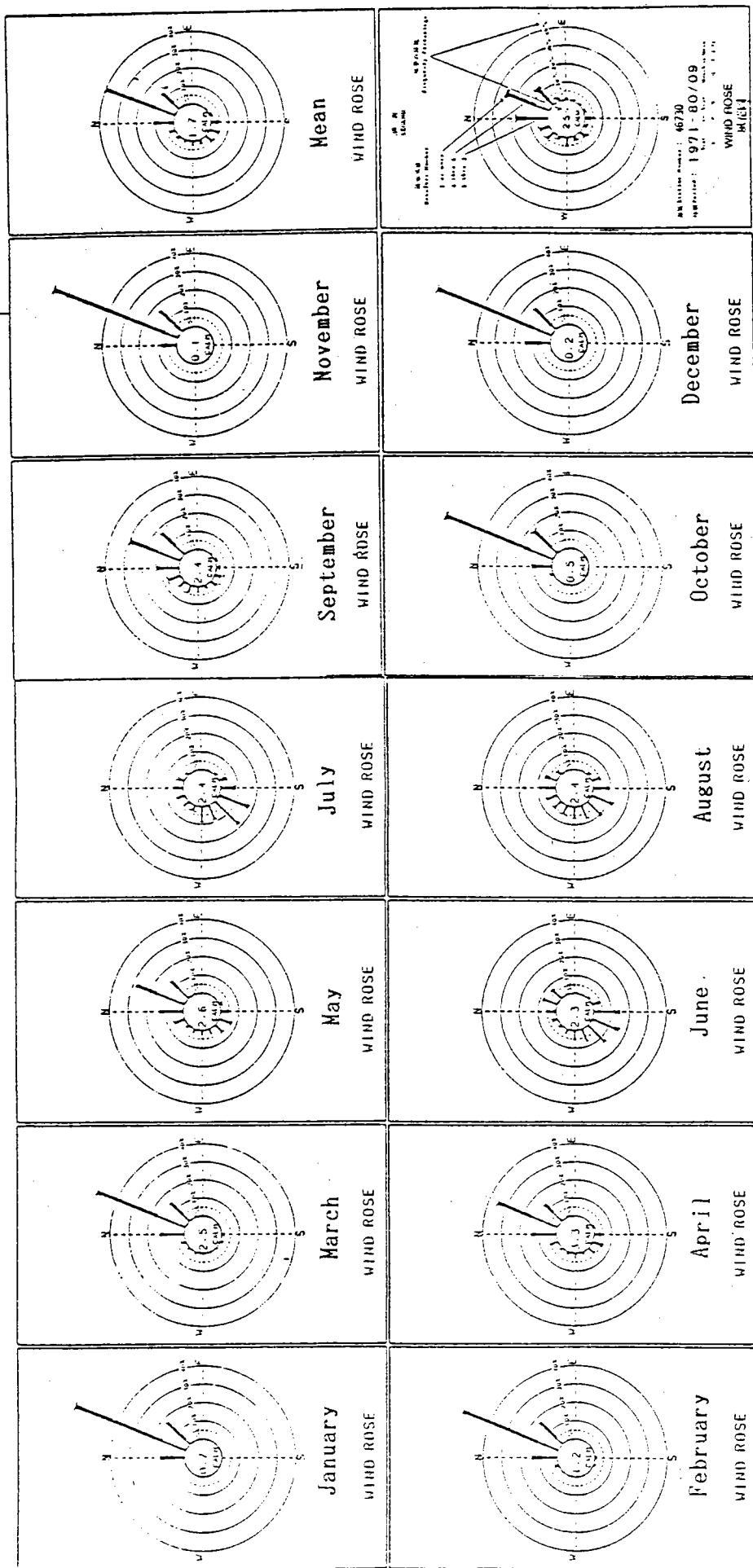


圖 4-4 澎湖地區風玫瑰圖 (1971-1980)

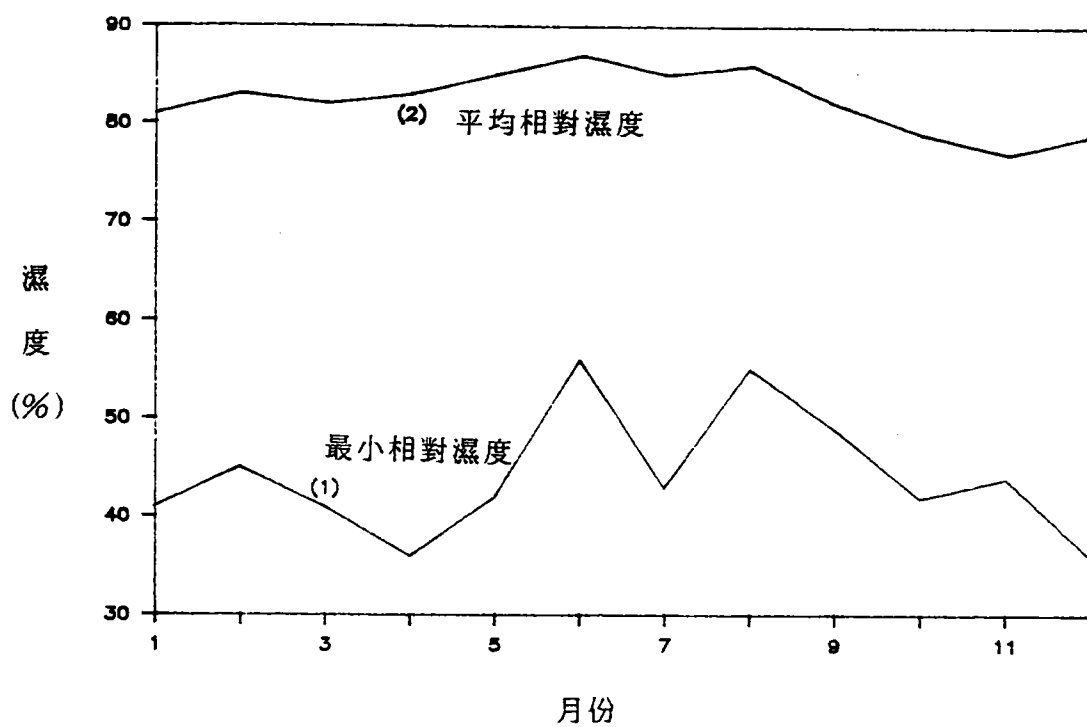


圖 4-5 澎湖地區月平均相對濕度圖 (1971-1980)

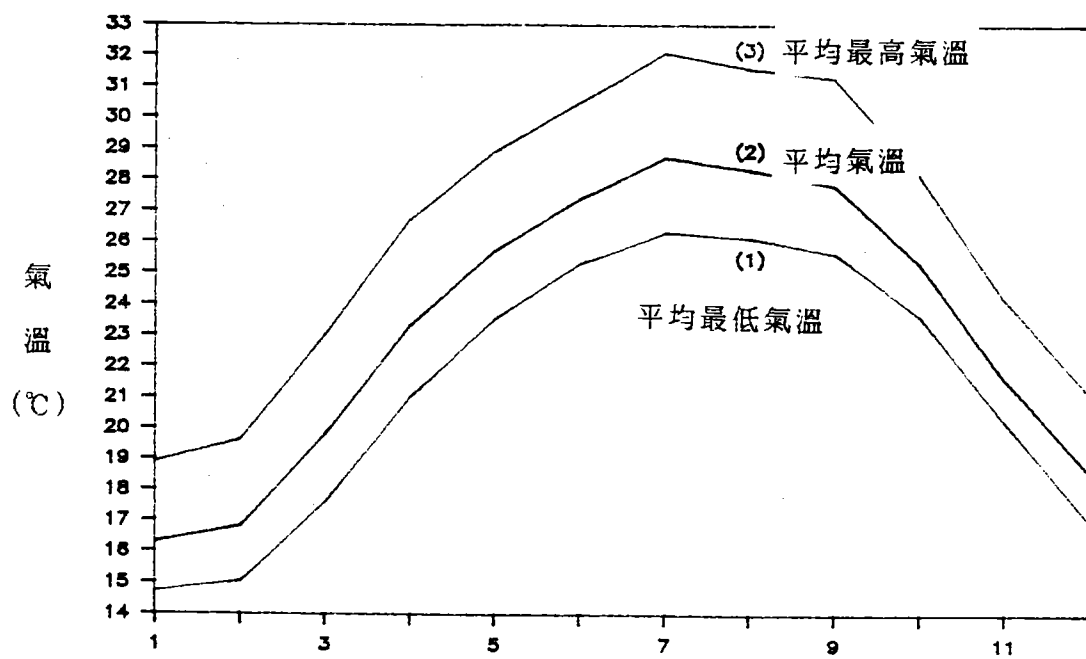


圖 4-6 澎湖地區氣溫月平均變化圖 (1971-1980)

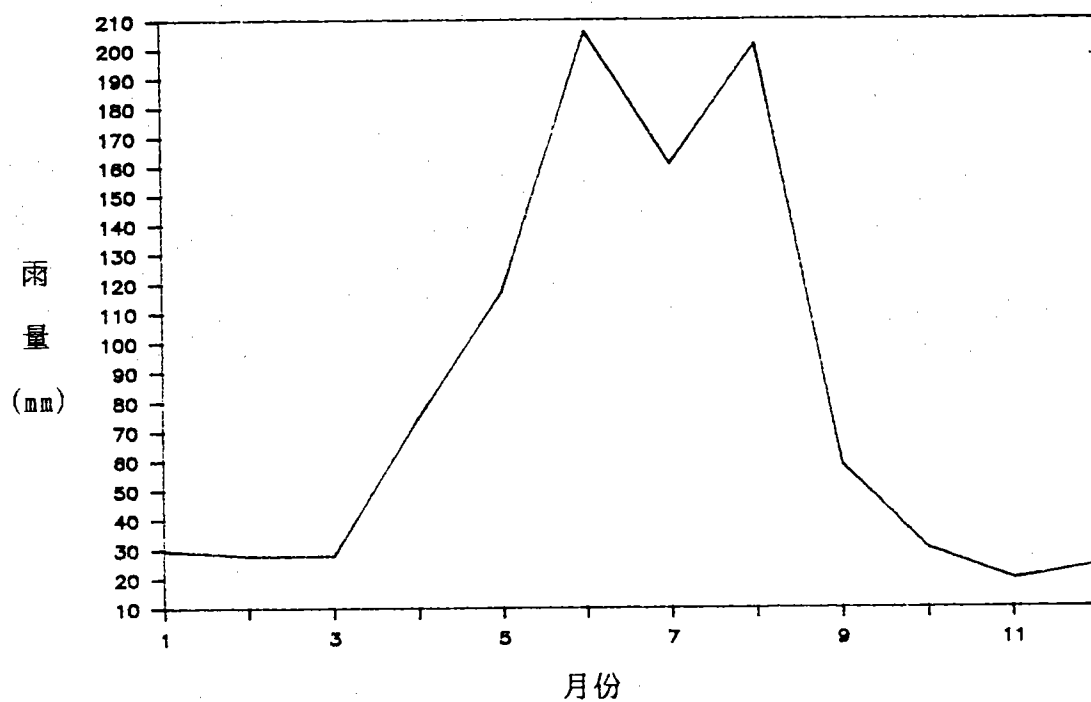
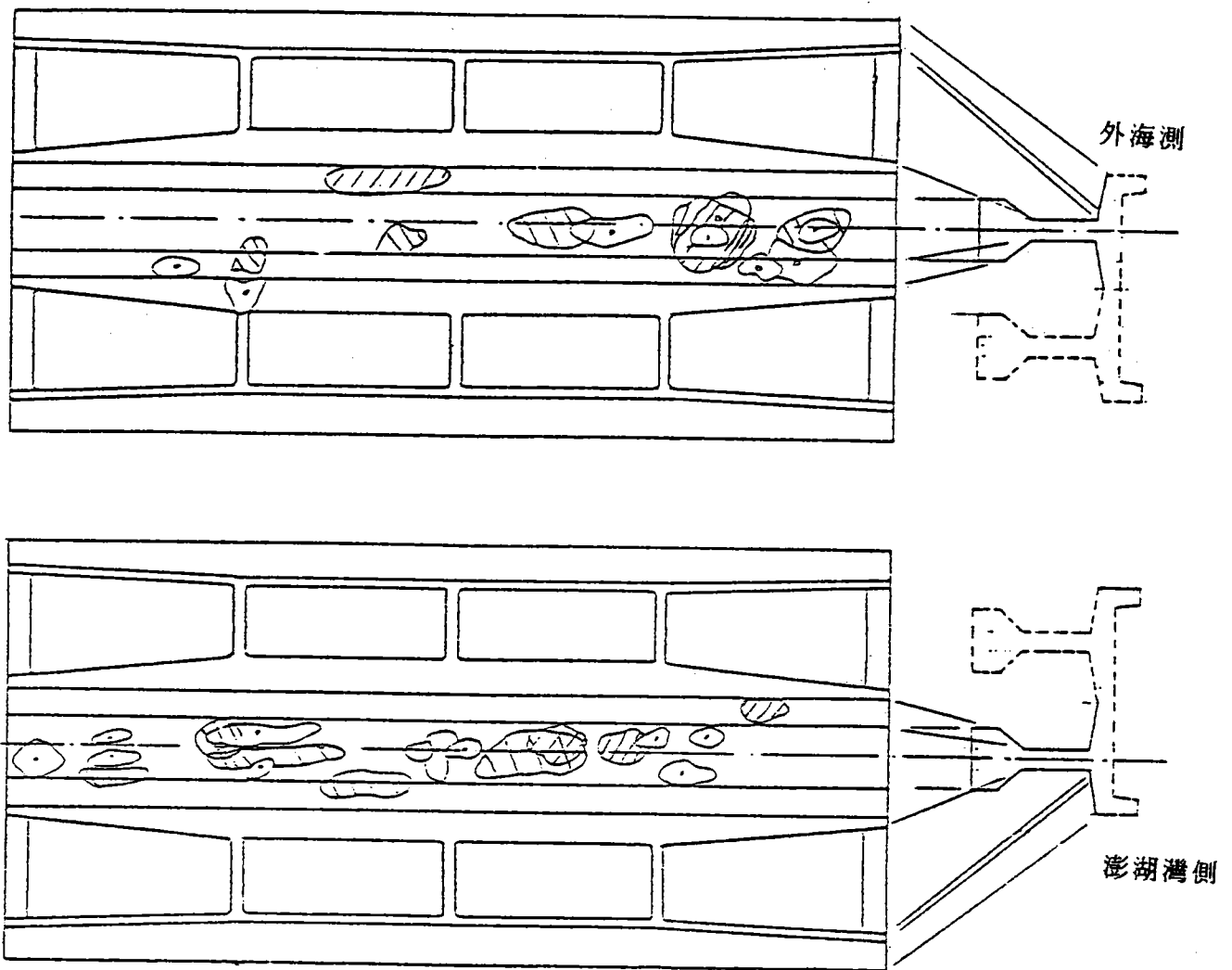


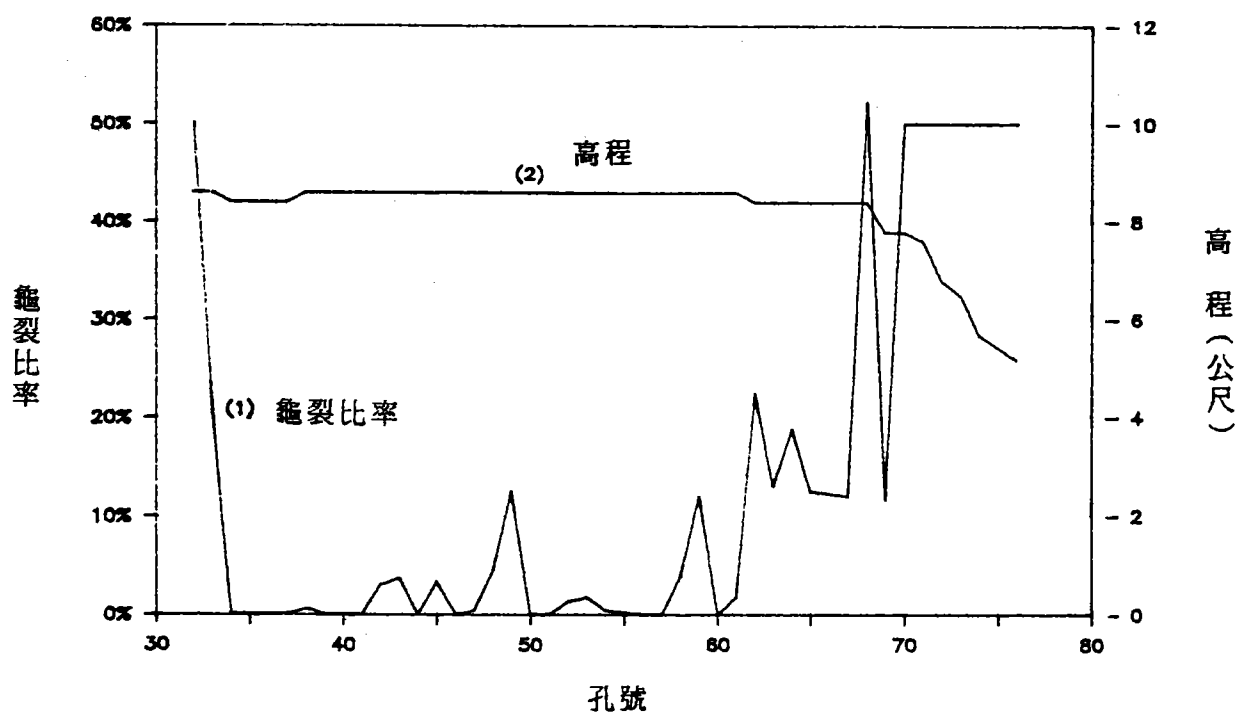
圖 4-7 澎湖地區月平均降雨量變化圖 (1971-1980)



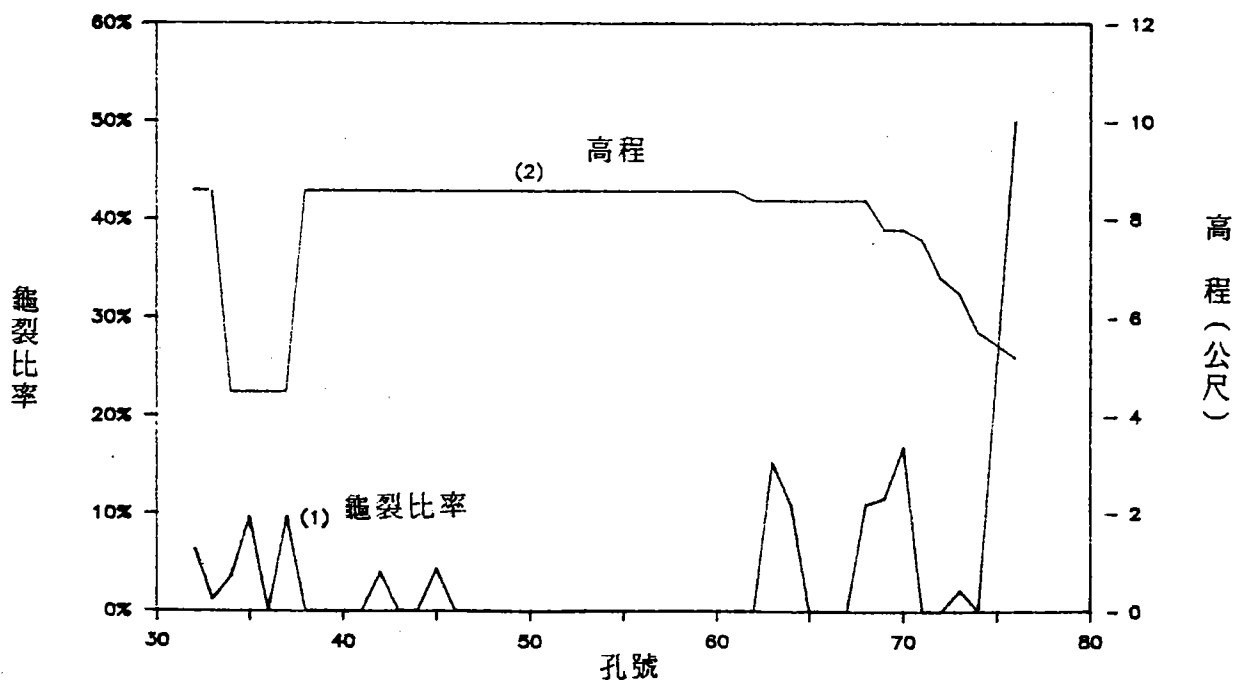
說明

檢查日期	1981	1983	1987
裂 縫			
剝 落			
吐 銹			

圖 4-8 第66孔大樑現場觀測腐蝕狀況描繪圖

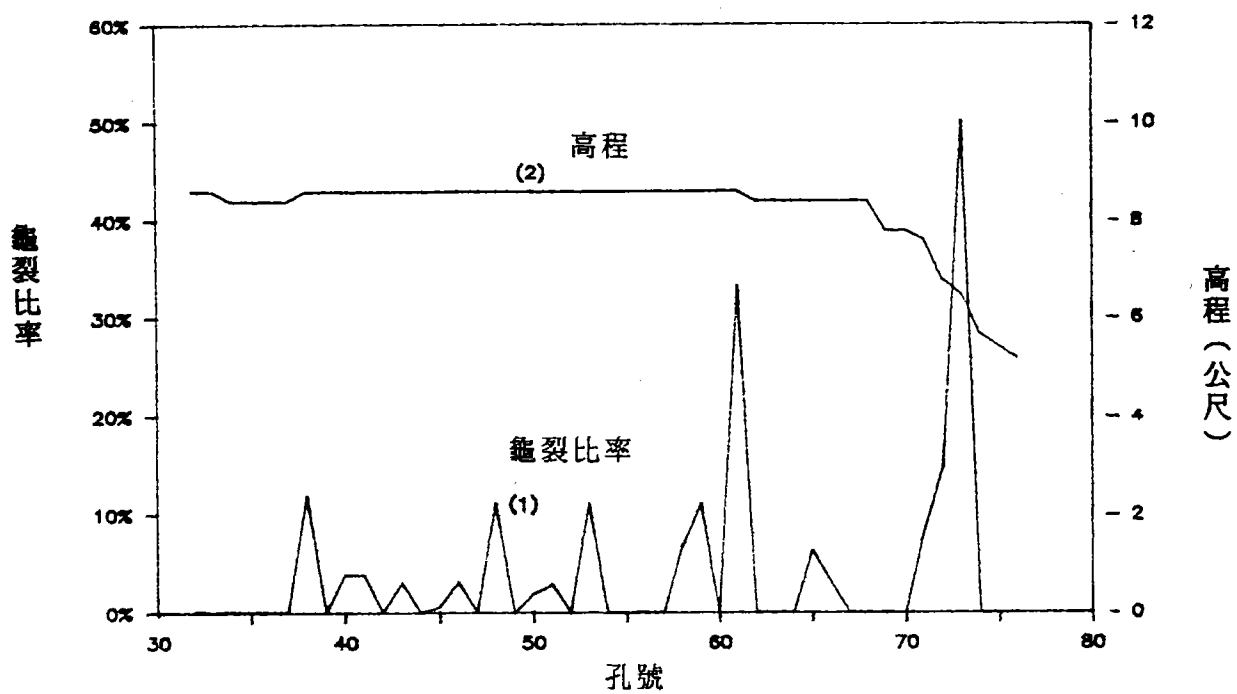


(a) 大樑中央部位

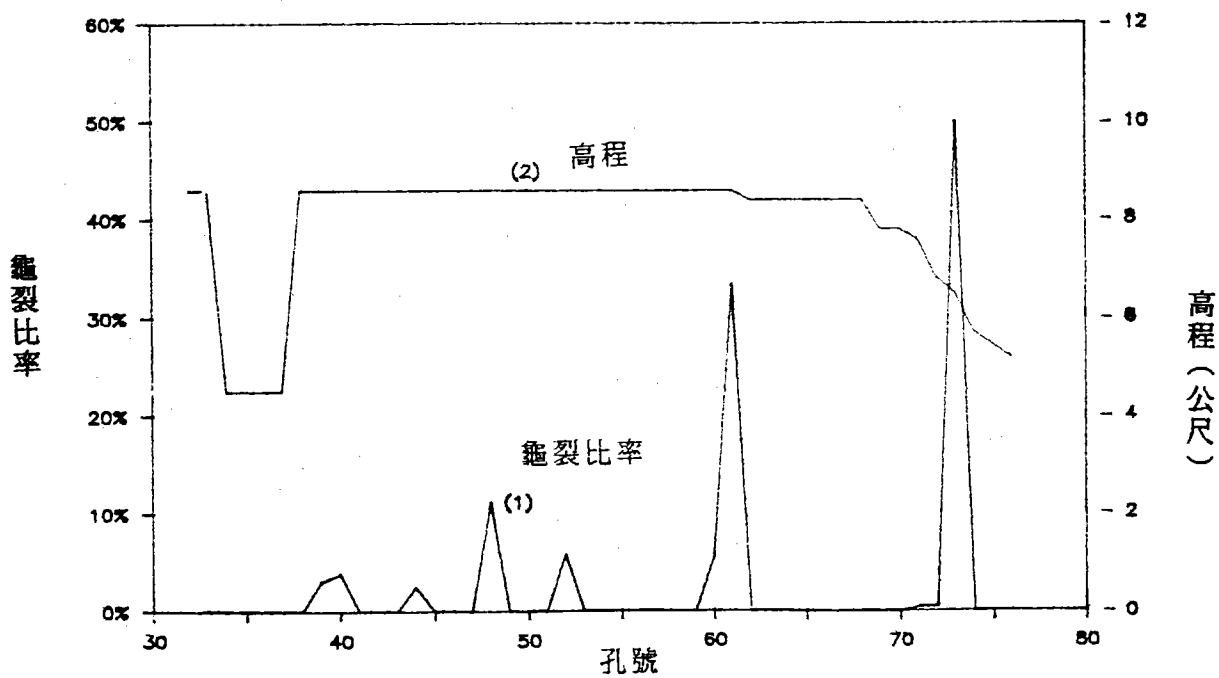


(b) 大樑兩端部位

圖 4-10 大樑龜裂比率與橋樑高程關係圖



(a) 大樑中央部位



(b) 大樑兩端部位

圖 4-11 隔樑龜裂比率與橋樑高程關係圖

外海側

46	44	46	30	41	38	45	49	39	45	42	53	40	38	48	40	40	37	43	46	49	43	40	42	29	21	39	54	51	54	41	33	
44	48	46	29	43	44	34	33	37	25	50	17	36	39	44	34	44	49	52	46	34	43	42	44	33	48	38	57	48	44	35	52	
50	46	37	46	47	37	59	41	36	47	46	45	44	43	46	44	43	38	37	42	50	37	43	55	39	44	46	29	40	44	40	36	51

馬公港

西側
外海側

圖4-12 (a) 76孔 R.C. 樑腐蝕變數值

0 20 40 60 cm
比例尺



圖4-12 (b) 76孔 R.C. 樑腐蝕變數值分佈圖

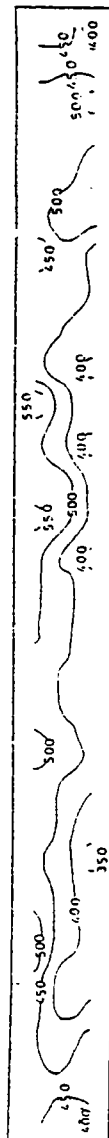


圖4-12 (c) 76孔 R.C. 樑腐蝕變數值分佈圖

-470	-480	-460	-470	-500	-505	-485	-460	-480	-525	-475	-480	-505	-515	-520	-550	-535	-500	-565	-455	-475	-470	-435	-470	-475	-190	-455	-445	-455	
-435	-450	-435	-385	-390	-425	-410	-425	-445	-445	-450	-440	-445	-460	-465	-445	-515	-520	-450	-475	-440	-445	-480	-470	-545	-485	-495	-480	-440	-460
-400	-485	-495	-410	-355	-380	-390	-345	-355	-415	-430	-425	-435	-425	-415	-400	-415	-445	-395	-405	-400	-415	-440	-435	-525	-530	-495	-500	-425	-385

圖4-12 (d) 76孔 R.C. 樑腐蝕變數值

12 20 6	33 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100	101 102 103 104 105 106 107 108 109 110 111 112 113 114 115 116 117 118 119 120 121 122 123 124 125 126 127 128 129 130 131 132 133 134 135 136 137 138 139 140 141 142 143 144 145 146 147 148 149 150 151 152 153 154 155 156 157 158 159 160 161 162 163 164 165 166 167 168 169 170 171 172 173 174 175 176 177 178 179 180 181 182 183 184 185 186 187 188 189 190 191 192 193 194 195 196 197 198 199 200
---------	---	---	---

圖4-13 (a) 74孔 P.C. 樑試鉅數值

圖 4-13 (a)

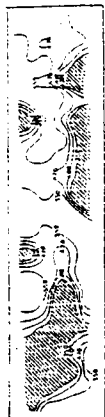
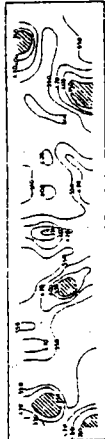


圖4-13 (b) 74孔 P.C. 樑試鉅強度分佈圖

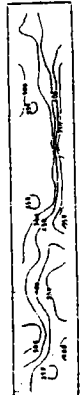
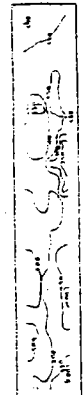


圖4-13 (c) 74孔 P.C. 樑腐蝕電位分佈圖

101 102 103 104 105 106 107 108 109 110 111 112 113 114 115 116 117 118 119 120 121 122 123 124 125 126 127 128 129 130 131 132 133 134 135 136 137 138 139 140 141 142 143 144 145 146 147 148 149 150 151 152 153 154 155 156 157 158 159 160 161 162 163 164 165 166 167 168 169 170 171 172 173 174 175 176 177 178 179 180 181 182 183 184 185 186 187 188 189 190 191 192 193 194 195 196 197 198 199 200	101 102 103 104 105 106 107 108 109 110 111 112 113 114 115 116 117 118 119 120 121 122 123 124 125 126 127 128 129 130 131 132 133 134 135 136 137 138 139 140 141 142 143 144 145 146 147 148 149 150 151 152 153 154 155 156 157 158 159 160 161 162 163 164 165 166 167 168 169 170 171 172 173 174 175 176 177 178 179 180 181 182 183 184 185 186 187 188 189 190 191 192 193 194 195 196 197 198 199 200	101 102 103 104 105 106 107 108 109 110 111 112 113 114 115 116 117 118 119 120 121 122 123 124 125 126 127 128 129 130 131 132 133 134 135 136 137 138 139 140 141 142 143 144 145 146 147 148 149 150 151 152 153 154 155 156 157 158 159 160 161 162 163 164 165 166 167 168 169 170 171 172 173 174 175 176 177 178 179 180 181 182 183 184 185 186 187 188 189 190 191 192 193 194 195 196 197 198 199 200	101 102 103 104 105 106 107 108 109 110 111 112 113 114 115 116 117 118 119 120 121 122 123 124 125 126 127 128 129 130 131 132 133 134 135 136 137 138 139 140 141 142 143 144 145 146 147 148 149 150 151 152 153 154 155 156 157 158 159 160 161 162 163 164 165 166 167 168 169 170 171 172 173 174 175 176 177 178 179 180 181 182 183 184 185 186 187 188 189 190 191 192 193 194 195 196 197 198 199 200
---	---	---	---

圖4-13 (d) 74孔 P.C. 樑腐蝕電位值



西
山
端

海
湖
側

馬
公
端

內
海
側



圖 4-14 (b) 26孔 P.C.樑腐蝕電位分佈圖

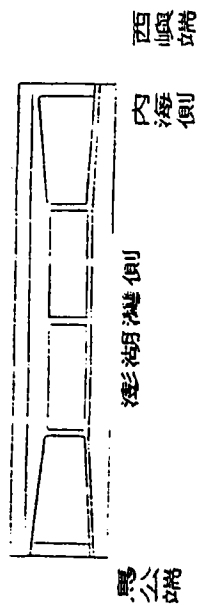
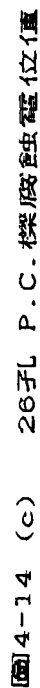


圖 4-15

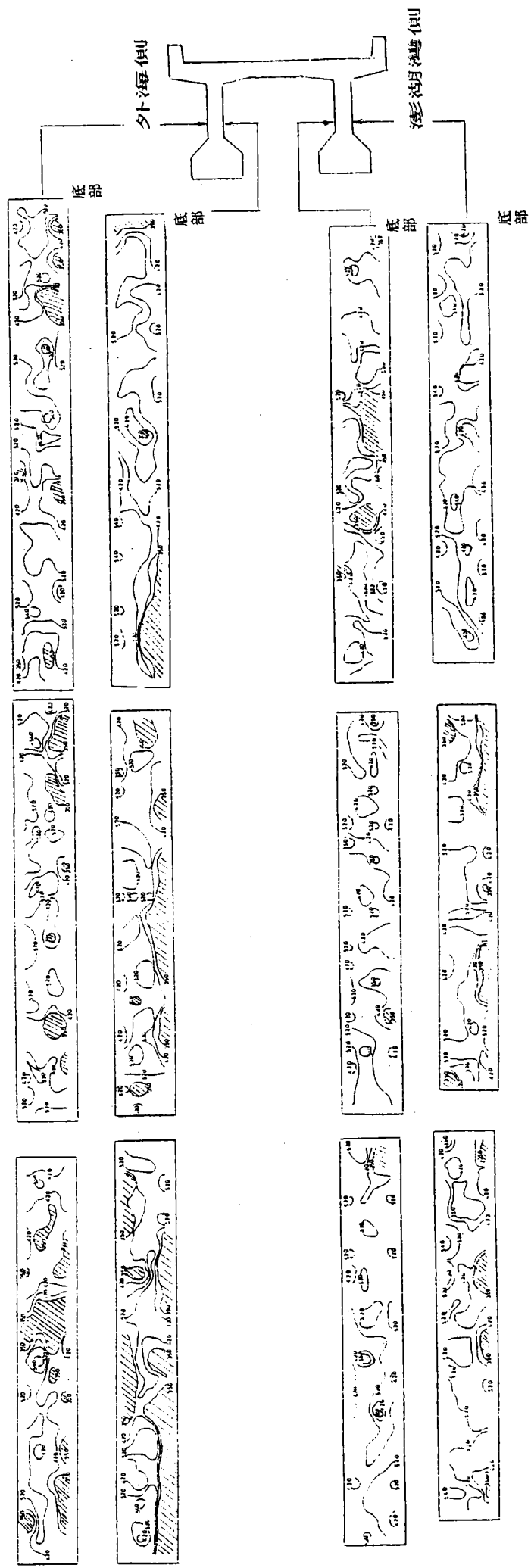


圖4-15 59孔 P.C. 梁試鉋強度分佈圖

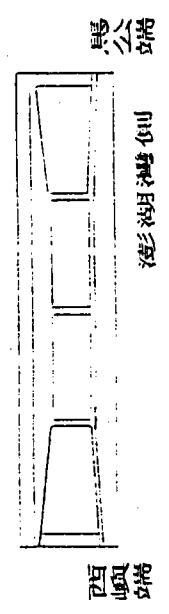




圖4-16 (a) 59孔橋板試鏈強度分佈圖

31	34	36	33	36	34	33	40	38	34	31	48	36	34	34	39	35	30	34	34	33	31	37
32	32	32	40	43	41	40	43	44	36	36	39	49	53	36	37	31	46	53	36	32	32	32
35	49	42	48	36	37	41	47	33	40	32	37	32	36	30	32	35	35	43	32	34	39	30
46	39	41	44	35	40	31	34	23	24	26	25	29	30	24	6	37	43	34	48	48	33	36
43	34	32	39	40	36	18	26	23	28	29	25	20	31	33	32	27	29	42	42	44	37	40
38	42	33	37	40	27	18	32	27	24	19	23	24	22	27	10	37	45	34	36	34	37	34
36	34	40	42	48	37	16	37	34	20	23	20	25	20	21	38	35	45	38	20	34	48	34
45	34	34	37	33	33	27	25	35	25	22	26	24	30	20	17	40	40	34	39	39	31	31
39	30	40	36	36	30	31	34	30	37	27	42	24	20	25	11	45	41	32	34	32	19	36
47	34	44	32	36	30	21	30	31	44	32	39	42	20	32	49	34	32	42	40	27	40	34
40	34	40	32	45	25	40	32	34	45	35	45	30	11									

西頭

31	34	35	47	32	31	32	37	31	36	48	46	36	32	31	22	52	46	41	30	44		
52	53	31	49	55	25	41	53	46	52	52	34	30	31	34	53	42	44	42	36	52	46	
55	49	40	31	34	36	36	34	31	53	30	31	36	46	34	54	50	46	20	46	30	46	
50	32	32	32	32	40	55	55	42	48	30	44	31	41	50	30	46	32	53	14	60		
22	56	55	36	34	34	48	56	36	39	34	46	32	46	40	36	40	42	40	55	30	48	
53	53	32	36	52	60	53	40	46	46	34	40	46	46	34	34	34	52	20	44	46	30	
54	46	46	36	48	39	53	53	45	52	45	46	46	32	56	44	31	36	46	20	44	40	
53	30	47	34	16	47	55	31	54	45	53	40	46	46	36	46	42	44	56	31	30		
50	52	35	49	34	52	56	48	43	36	34	46	46	46	44	40	46	46	44	17	46	51	
57	46	52	47	34	53	47	31	56	50	44	40	52	46	56	46	31	46	46	44	50	53	

外海側

6	49	43	53	53	30	52	52	31	54	36	34	34	34	34	34	40	40	43	32	45	46	34	41
42	46	50	34	34	30	52	47	36	53	31	41	33	36	42	43	44	37	44	43	32	31	62	
49	34	48	49	41	43	33	39	33	40	46	40	29	47	42	30	43	40	39	45	32	34	56	
40	34	49	46	44	31	33	36	36	53	36	44	22	17	55	43	41	20	49	44	27	53	29	
53	55	37	44	17	41	30	35	30	31	31	33	32	18	43	47	34	17	29	40	12	32	43	
24	37	43	36	25	31	37	52	56	56	40	44	42	30	30	40	36	30	42	22	10	36	43	
34	29	33	40	33	43	36	43	20	34	40	44	41	40	45	26	20	39	26	44	36	25	38	
44	33	26	32	46	41	56	53	53	45	48	41	47	45	40	31	35	41	24	34	32	28	57	
49	27	29	24	41	19	30	43	37	39	48	47	54	42	41	34	30	42	43	10	40	29	47	
37	26	34	27	40	53	53	53	34	54	32	32	54	40	40	40	50	32	29	30	12	23	45	
36	31	30	20	41	35	53	45	30	33	34	19	32	19	32	35	47	36	44	24	25	16	49	

西頭

澎湖側

圖4-16 (b) 59孔橋板試鏈強度數值

0 20 40 60

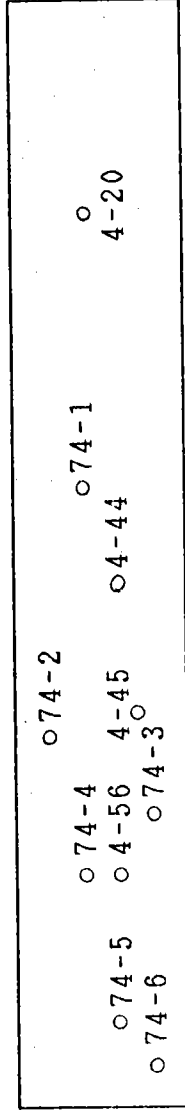
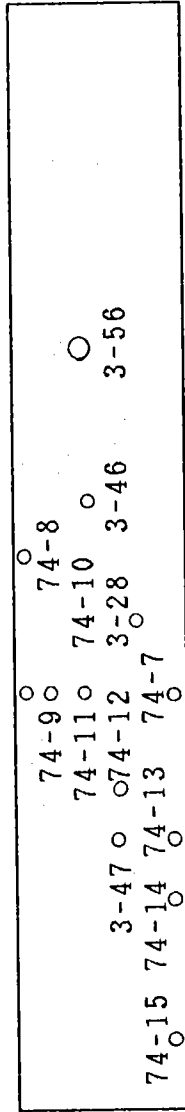
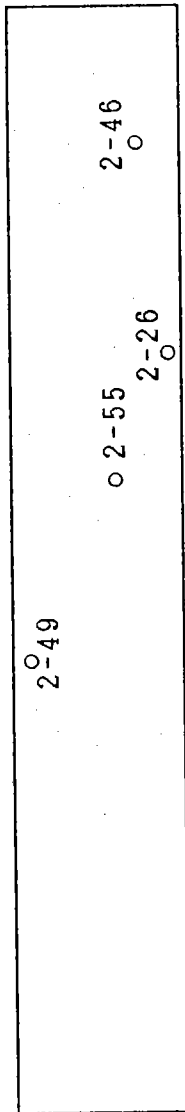
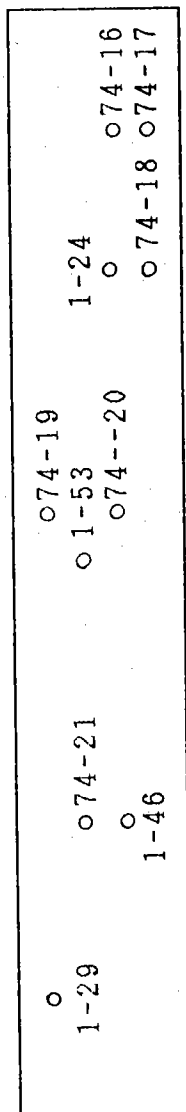


圖 4-17(a) 74孔鑽心位置圖

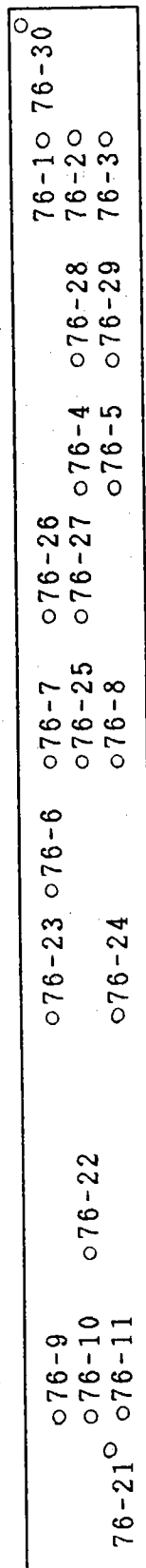
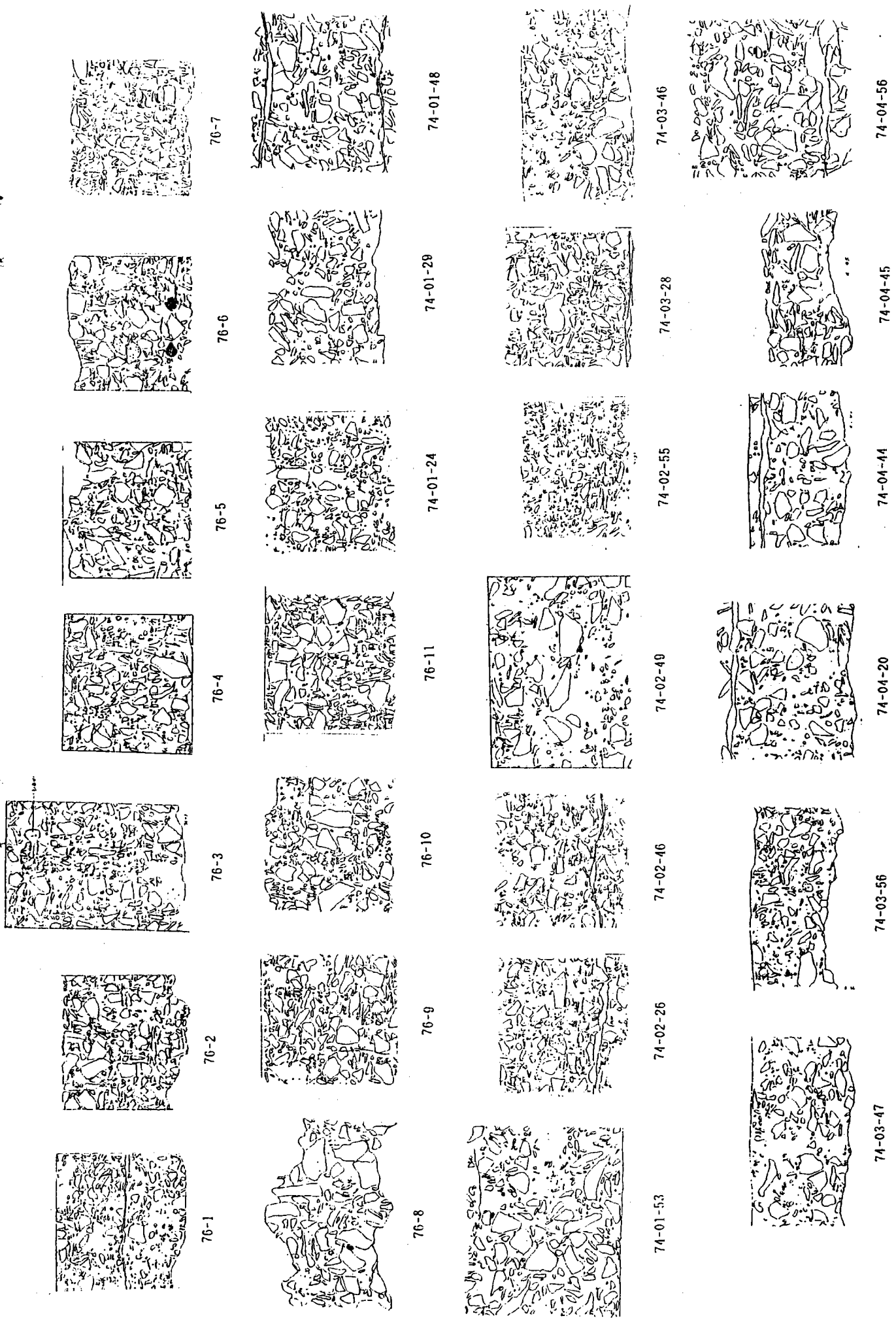


圖 4-17(b) 76孔鑽心位置圖



【圖】 4-18 金鋼心 金鋼心 金鋼心 金鋼心 金鋼心 金鋼心

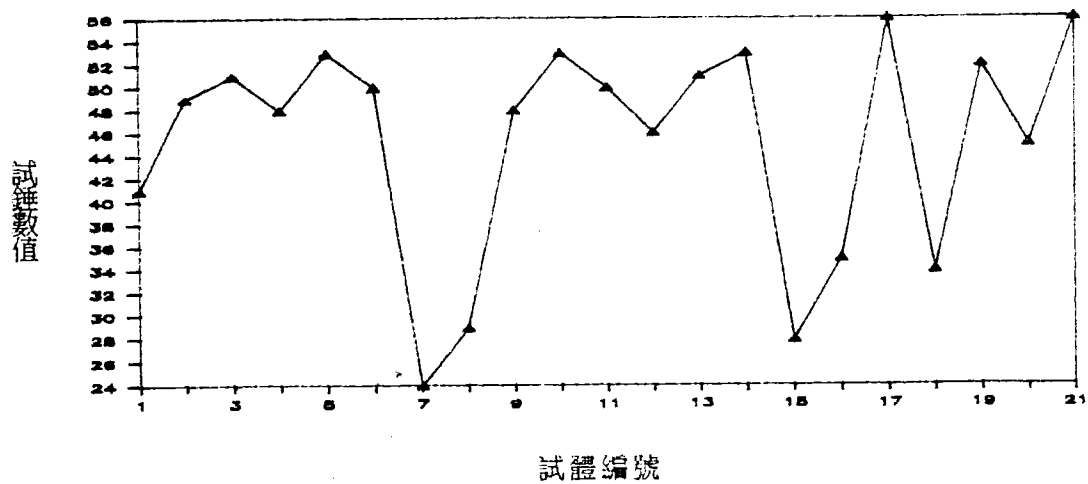
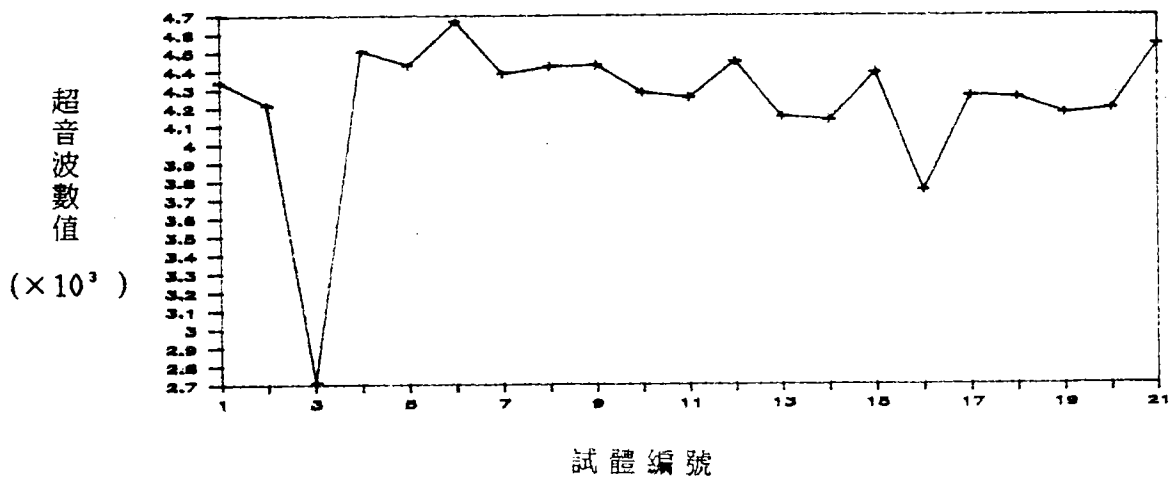
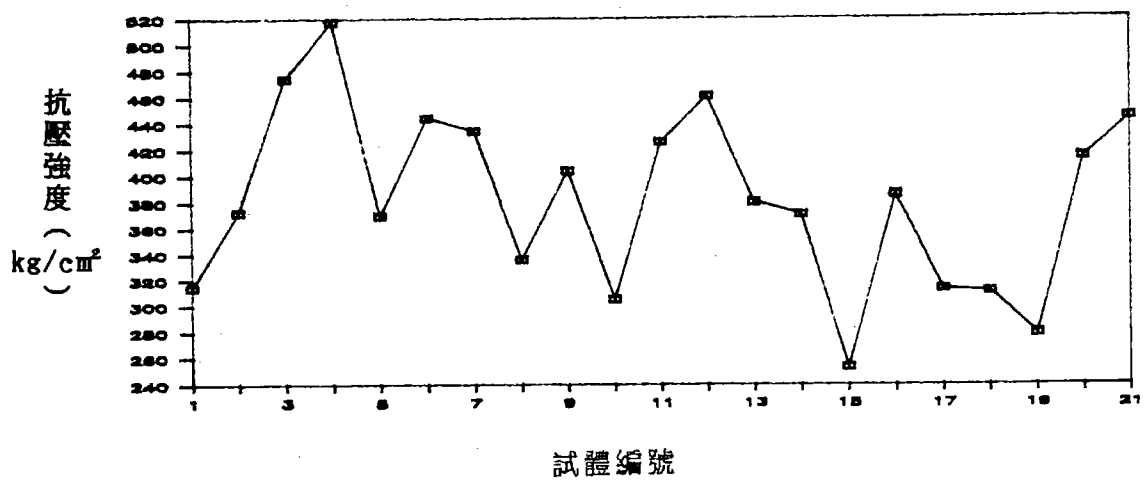


圖 4-19(a) 74孔大樑鑽心試體抗壓強度與N.D.T值關係圖

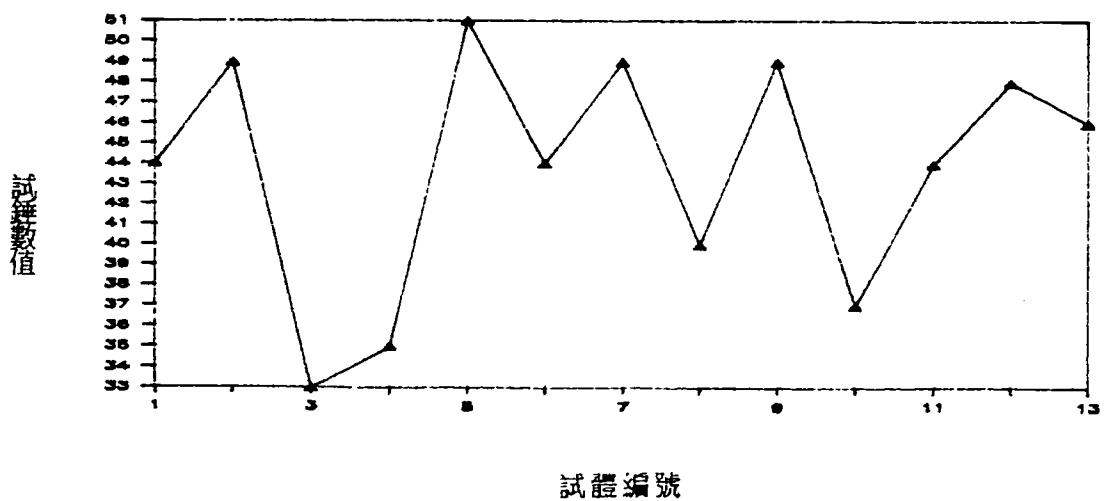
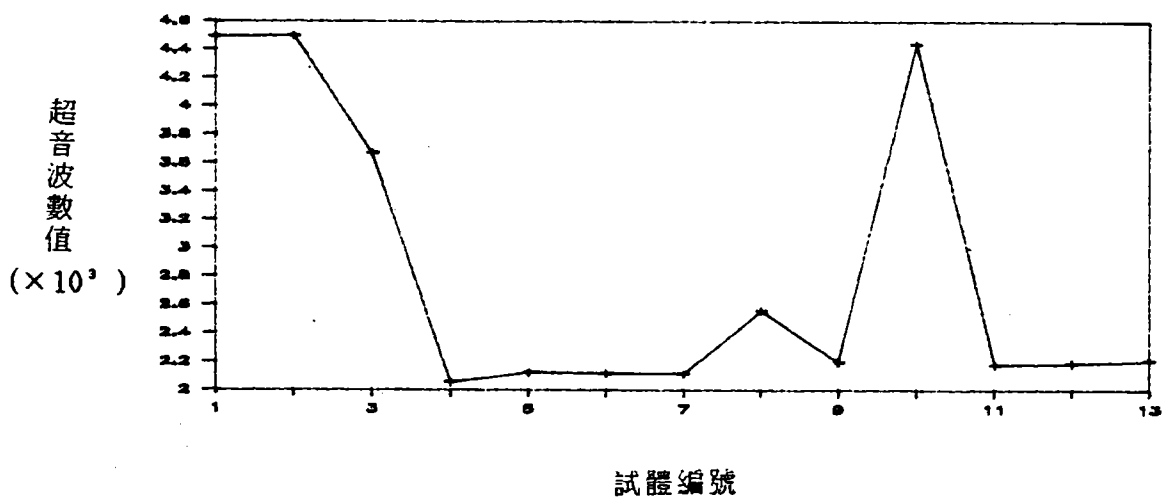
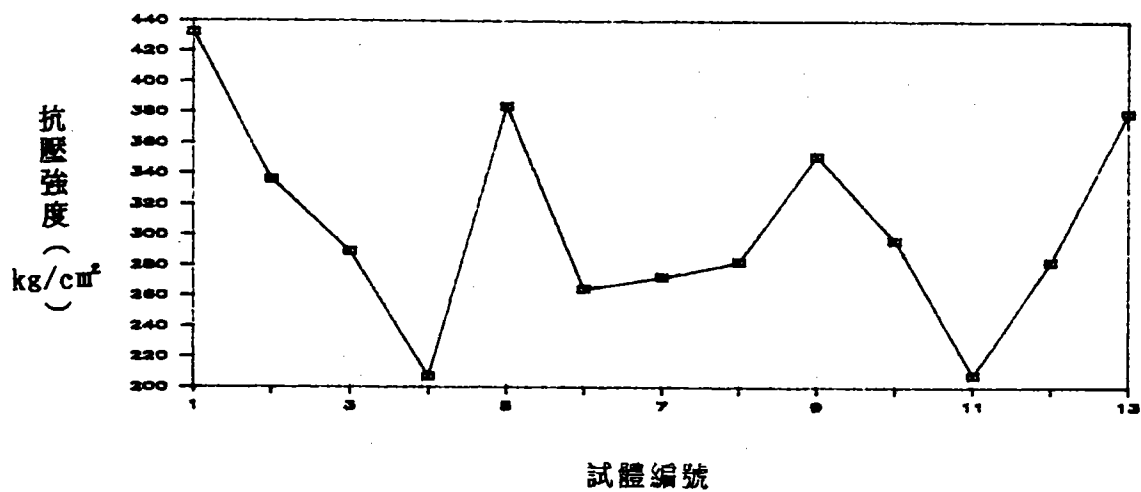


圖 4-19(b) 76孔大樑鑽心試體抗壓強度與N.D.T值關係圖

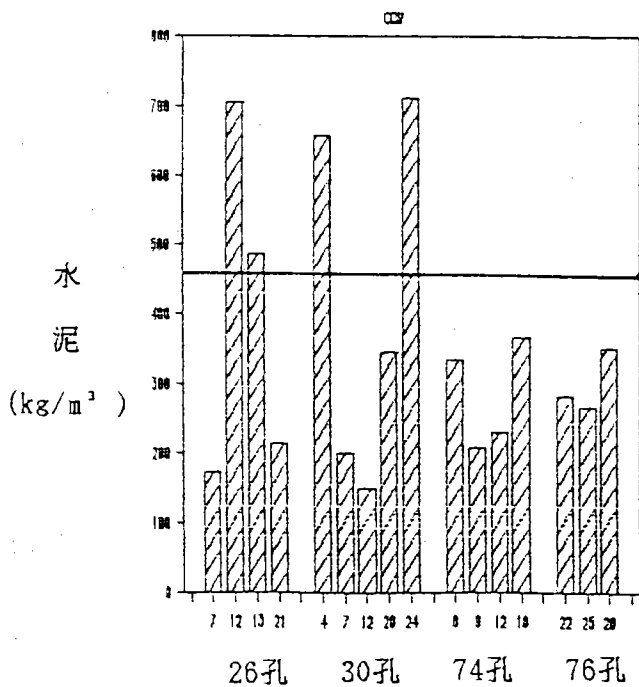
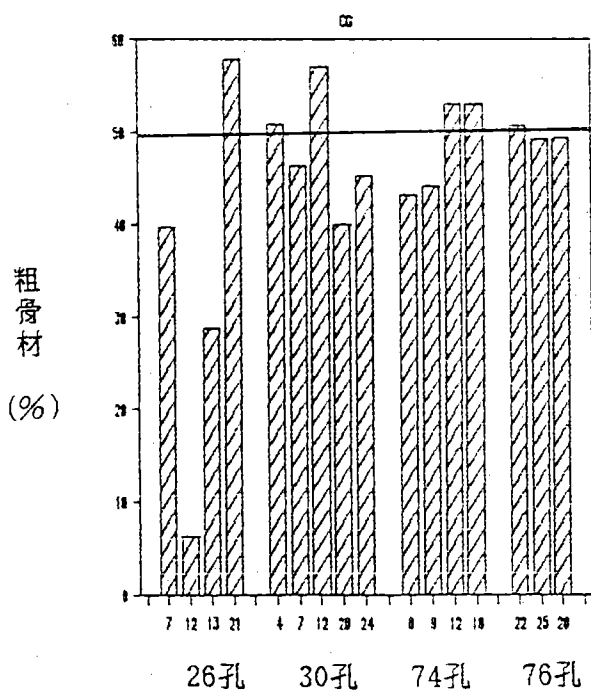
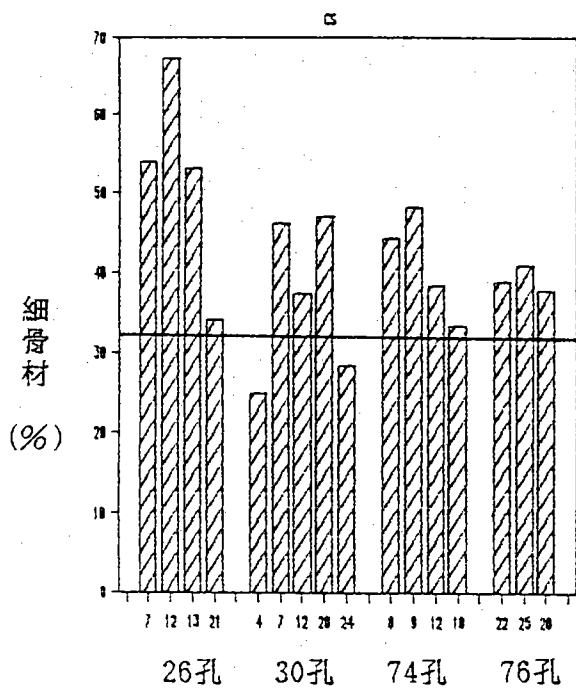
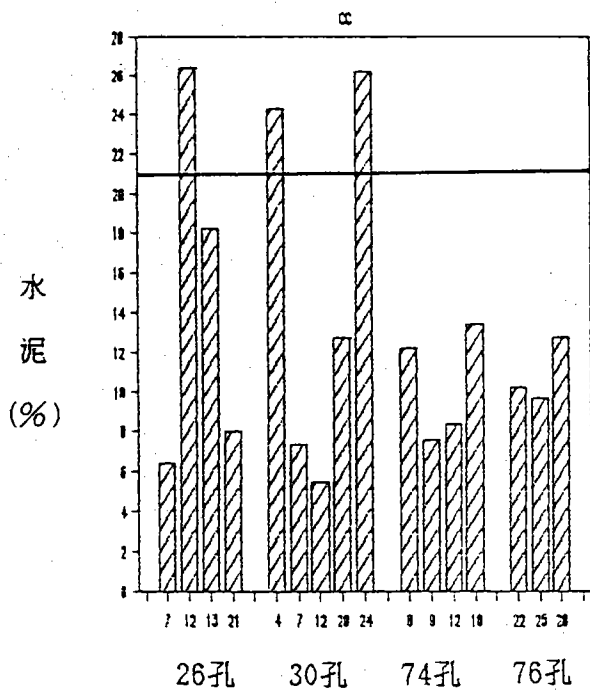


圖 4-20 鑽心試體、水泥、粗、細骨材含量比率圖

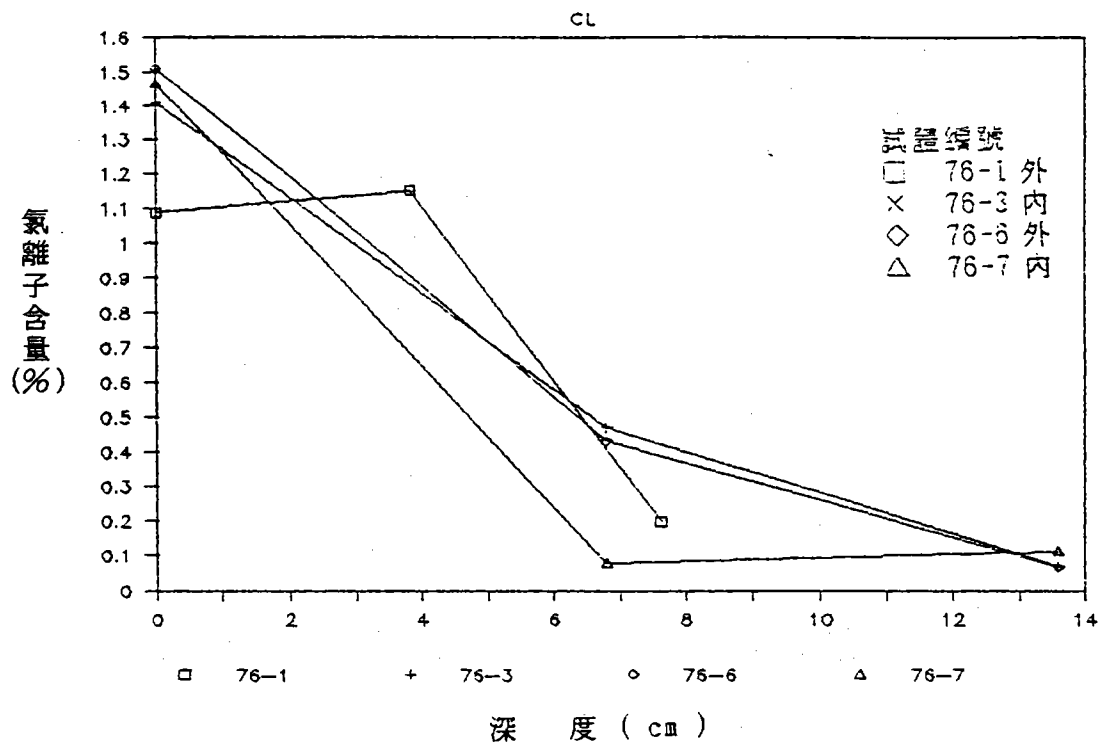


圖 4-21 鑽心試體氮離子含量與深度關係圖

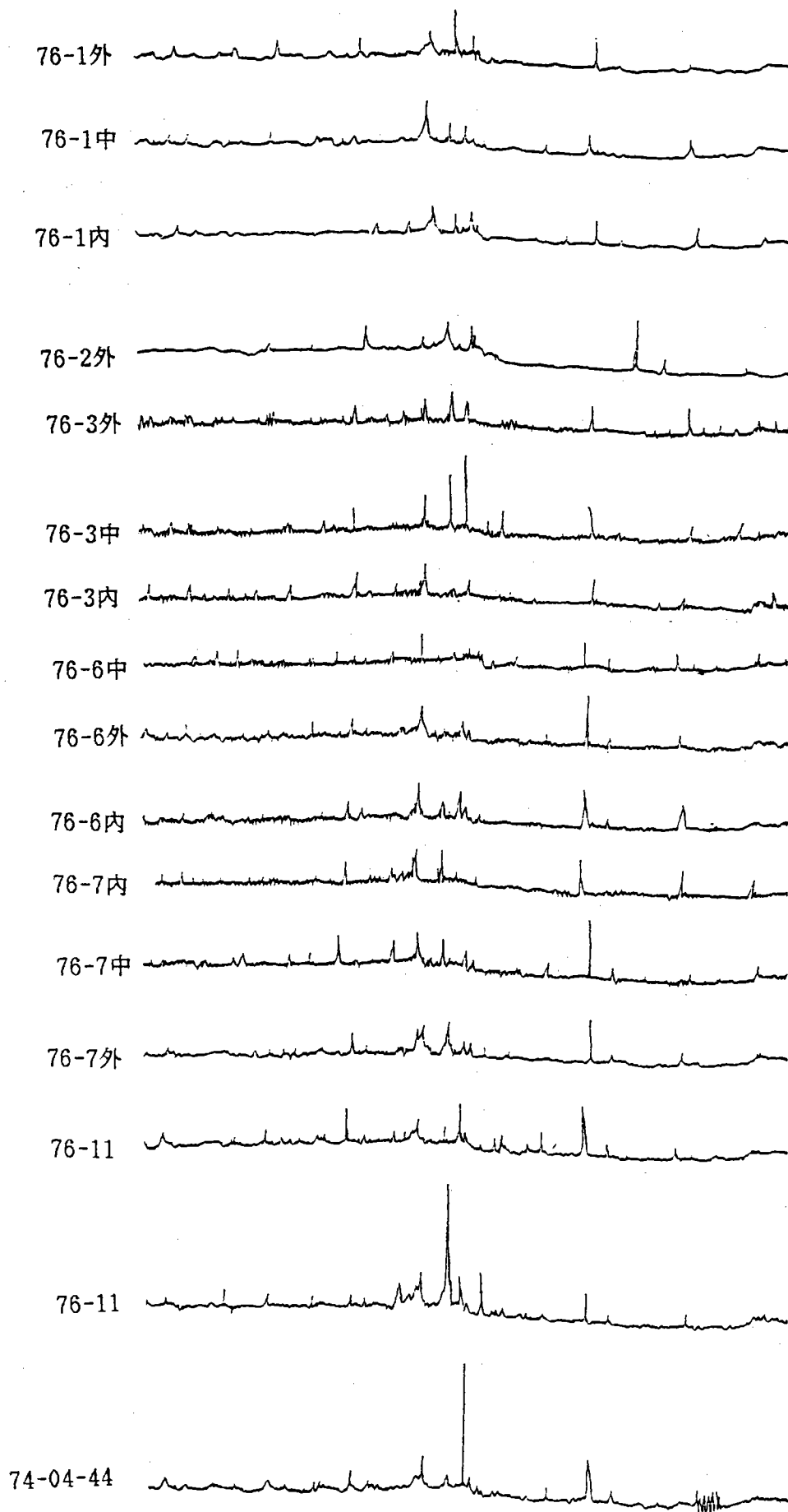
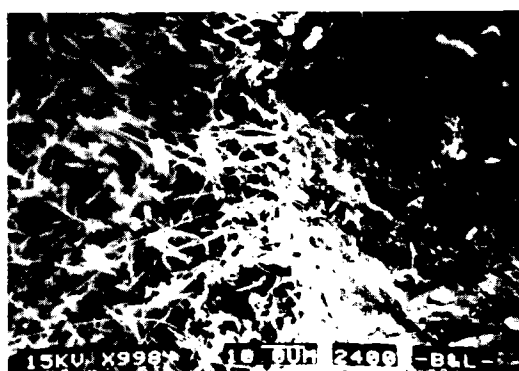


圖4-22 X光繞射分析圖

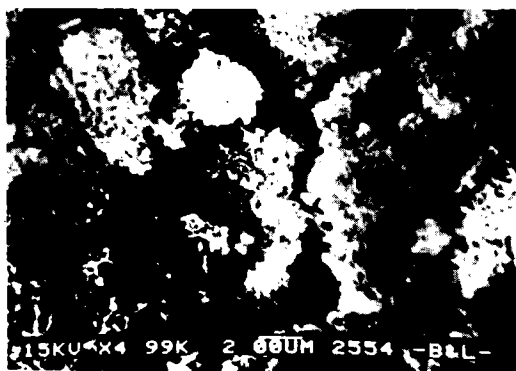


(a)



(b)

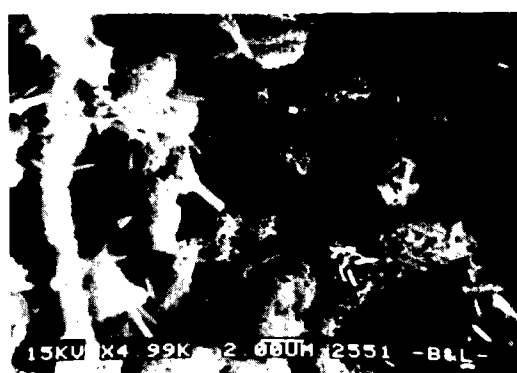
圖 4-23 74-02-40 試體 SEM 圖



(a)



(b)



(c)

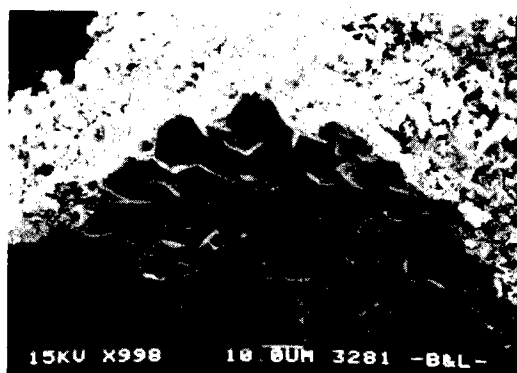
圖 4-24 74-02-55 試體 SEM 圖



(a)



(b)



(c)

圖 4-25 74-03-38 試體 SEM 圖



圖 4-26 76-2-外 試體SEM圖

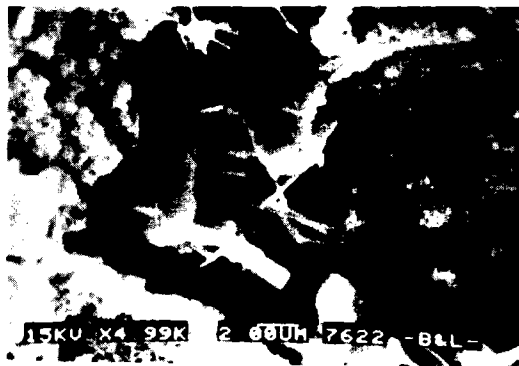
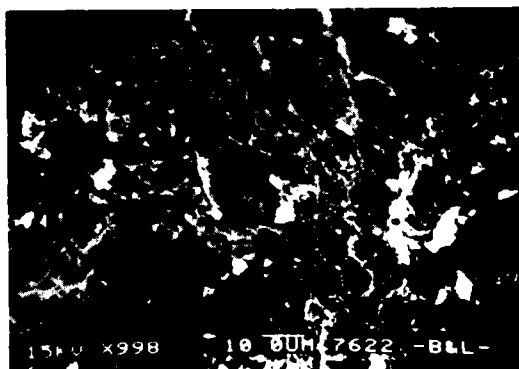
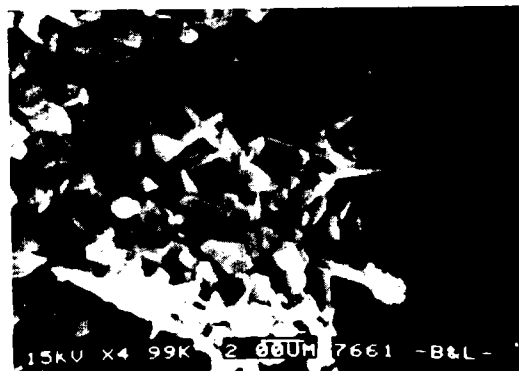


圖 4-27 76-2-中 試體SEM圖



(a)



(b)

圖 4-28 76-6-外 試體SEM圖

表 4-1 美國混凝土協會 (ACI Committee 224)
對破裂寬度限制之建議

結構物曝露周圍環境	最大容許破裂寬度
乾燥空氣或有薄膜保護層	0.4mm
潮濕或含水份之土壤	0.3mm
除冰用之鹽及化學藥品	0.18mm
浸濕於海水中或海水澆濺	0.15mm
儲水結構體	0.1mm

表 4-2 英國 (British Standard Institue)
及其他設計規範對破裂寬度之限制

設計規範	結構體荷重 及周圍環境	結構體 之形式	最大容許破 裂寬度 mm
BSI.CP110	一般結構及 荷重	RC PC	0.3mm 0.1mm
	腐蝕性之 環境	RC PC	0.004 * tc 0.1mm
BSI.DD55	結構體在正 常操作下之 荷重	RC RC PC	0.3mm * tc 0.004 * tc 0.1mm
FIP	海洋結構	RC PC	0.3mm * tc 0.004 * tc

*tc：保護層厚度

表 4-3 澎湖潮位分析

暴潮位偏差	1.46m
平均高潮位	+1.85m
平均水面	+0.59m
平均低潮位	-0.67m
最低低潮位	-1.39m

表 4-4 澎湖西嶼東側海域表面水質分析

月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
水溫(°C)	18.2	20.7	21.4	28.0	28.25	27.95	30.7	30.2	29.75	29.15
鹽度(‰)	—	35.0	34.28	34.9	35.1	32.8	33.6	34.2	33.8	32.7
PH值	8.44	8.01	8.2	8.2	8.3	8.2	8.1	7.9	8.0	7.8
溶氧量(mg/l)	8.0	7.1	6.2	4.7	4.55	4.3	4.55	4.55	7.7	5.3

表 4-5 澎湖跨海大橋第61孔海水水質分析

水深	PH值	溶 氧 (mg/l)	水溫 (°C)	SO ₄ ²⁻ (ppm)	CL ⁻ (ppm)	S (ppm)	Ca ²⁺ (ppm)	Mg ²⁺ (ppm)	K ⁺ (ppm)	Na ⁺ (ppm)
0 ■	8.5	4.6	21.3	2575	17304	0.0222	189	934	1095	25289
1 ■	8.5	4.6	21.3	2569	15962	0.0215	174	956	1355	26632
2 ■	8.5	4.6	21.3	2599	16489	0.0215	202	1083	1325	28664

表 4-6 大樑與間隔樑龜裂統計表

	孔數	大樑 (中央)	大樑 (兩邊)	間隔樑 (中央)	間隔樑 (兩端)
(1)	32	0.5	0.0652	0	0
	33	0.2087	0.0116	0	0
	34	0	0.0357	0	0
	35	0	0.0952	0	0
	36	0	0	0	0
	37	0	0.0952	0	0
	38	5.8×10^{-3}	0	0.1182	0
	39	0	0	0	0.0303
	40	0	0	0.0381	0.0381
	41	0	0	0.0381	0
	42	0.0304	0.0391	0	0
	43	0.037	0	0.03	0
	44	0	0	0	0.0242
	45	0.0326	0.043	6.06×10^{-3}	0
	46	0	0	0.0303	0
	47	3.7×10^{-3}	0	0	0
	48	0.04456	0	0.1111	0.111
	49	0.125	0	0	0
	50	0	0	0.0190	0
	51	0	0	0.0286	0
	52	0.013	0	0	0.0571
	53	0.0174	0	0.111	0
	54	3.7×10^{-3}	0	0	0
	56	0	0	0	0
	57	0	0	0	0
	58	0.0391	0	0.0667	0
	59	0.1196	0	0.1111	0
	60	0	0	0	0.0545
	61	0.0174	0	0.333	0.3333
	62	0.2239	0	0	0
	63	0.1304	0.152	0	0
	64	0.1875	0.1088	0	0
	65	0.125	0	0.0625	0
	67	0.1196	0	0	0
	68	0.522	0.109	0	0
	69	0.1174	0.1152	0	0
	70	0.5	0.167	0	0
	71	0.5	0	0.0833	4.35×10^{-3}
	72	0.5	0	0.148	4.35×10^{-3}
	73	0.5	0.0217	0.5	0.5
	74	0.5	0	0	0
	76	0.5	0.5	0	0
(2)	合計	79.4%	20.6%	66.6%	33.3%

(1) : $\frac{\text{損壞長度}}{\text{樑全長}}$

(2) : $\frac{\text{各位置的損壞比}}{\text{總損壞比}}$

表 4-7 鑽心試體觀察情形

編號	表面狀況	可能產生原因
74-01-24	內部有裂痕，邊有分離現象	
74-01-29	骨材下方嚴重泌水	水灰比高
74-01-48	玄武岩斷裂，界面泌水，泌水處有蜂窩現象	振動不良，骨材扁平，水灰比高。
74-01-53	邊有裂痕，骨材內部有裂痕，鋼筋保護層。	表面敲擊太大或鋼筋膨脹
74-02-26	嚴重泌水，骨材斷裂	水灰比太高，振動不良
74-02-46	泌水現象，非常多之氣孔	搗實不良
74-02-49	空隙深且大	搗實不良
74-02-55	陷氣（不規則形狀之氣泡）	搗實不良
74-03-38	表面修補斷裂，斷裂處有粉質土	修補面並無清洗，振動不良
74-03-46	泌水、氣泡多，裂面有粉質土	水灰比高，振動不良
74-03-47	保護層厚度5.5公分，鋼筋無銹蝕，界面良好，氣孔多，嚴重泌水，	水灰比高，振動不良
74-03-56	鋼筋無銹蝕，混凝土有爆開現象	
74-04-20	泌水現象，邊界斷裂，斷裂面顯示有粉質土，氣泡多	水灰比高，振動不良
74-04-44	界面泌水，骨材斷裂，氣泡多	骨材太細
74-04-45	鋼筋周界骨材折裂，鋼筋保護層7cm	鋼筋銹蝕
74-04-56	修補界面有嚴重泥漿，相當嚴重浮水，氣孔多	骨材扁平、不良
76-1	骨材處斷裂，鋼筋界面破裂，界面泌水	骨材形狀扁平，水灰比高
76-2	嚴重泌水，裂縫貫穿，已連至表面	水灰比高，應力最大處
76-3	嚴重泌水，骨材有裂縫，氣泡多	骨材拌合時裂，振動不良
76-4	嚴重泌水	振動不良
76-5	骨材周界多孔隙，產生泌水現象	搗實不均勻
76-6	骨材中多孔隙，泌水現象，界面少量腐蝕，鋼筋保護層6.5cm	快速冷卻或應力解除
76-7	多漿且泌水現象，骨材級配不良，形狀差	搗實不均勻
76-8	破裂面泌水現象，骨材級配不良	水灰比高
76-9	鋼筋保護層4.5cm，界面已銹蝕，裂痕沿骨材微弱面，氣孔多	骨材分佈不均勻，水灰比高
76-10	氣孔多，界面分離，骨材有裂痕	骨材扁平且大
76-11	孔隙多	搗實不良

表 4-8 74孔大樑鑽心試體抗壓強度

	抗壓強度 Kg/cm ²	超音波 M/S	試錘數值	備 註
74-2	314	4340	41	省公路局材試所資料
74-6	372	4218	49	〃
74-7	474	2715	51	〃
74-15	518	4512	48	〃
74-19	369	4434	53	〃
74-21	444	4672	50	〃
74-01-24	434	4389	24	工技學院營建系資料
74-01-29	335	4427	29	〃
74-01-48	403	4435	48	〃
74-01-53	305	4287	53	〃
74-02-26	425	4260	50	〃
74-02-46	460	4452	46	〃
74-02-55	379	4254	51	〃
74-02-49	370	4136	53	〃
74-03-28	253	4393	28	〃
74-03-46	385	3752	35	〃
74-03-56	313	4270	56	〃
74-04-20	311	4261	34	〃
74-04-44	279	4174	52	〃
74-04-45	414	4199	45	〃
74-04-56	444	4549	56	〃

表 4-9 76孔大樑鑽心試體抗壓強度

試體編號	抗壓強度 Kg/cm ²	超音波 M/S	試錘數值	備註
76-21	432	4492	44	省公路局材試所資料
76-26	336	4501	49	〃
76-1	289	3675	33	工技學院營建系資料
76-2	207	2060	35	〃
76-3	384	2125	51	〃
76-4	264	2118	44	〃
76-5	272	2118	49	〃
76-6	282	2556	40	〃
76-7	351	2194	49	〃
76-8	296	4444	37	〃
76-9	208	2179	44	〃
76-10	282	2186	48	〃
76-11	380	2208	46	〃

表 4-10 鑽心試體比重與孔隙率

試體編號	視比重	孔隙(%)	備 註
26-1	2.60	15.77	按ASTM C-642-82 規範試驗，省公路 材料試驗所提供
26-3	2.71	14.02	
26-4	2.76	15.22	
26-5	2.57	16.34	
26-16	2.63	17.49	
26-21	2.73	15.39	
平均	2.67	15.71	
30-1	2.72	18.75	
30-9	2.70	18.52	
30-13	2.67	18.35	
30-14	2.67	17.23	
30-16	2.69	18.96	
30-23	2.78	17.27	
平均	2.71	18.18	
74-1	2.77	17.69	
74-2	2.77	18.77	
74-3	2.75	19.64	
74-4	2.75	20.73	
74-17	2.76	18.84	
74-21	2.71	17.34	
平均	2.75	18.84	
76-21	2.77	18.05	

表 4-11 鑽心試體配比分析

試 體 編 號	水 泥 %	粗 砂 %	細 砂 %	水泥量 (Kg/m ³)	備 註
76-2	10.20	39.09	50.71	282.5	(1)按ASTM C-85規範試驗 (2)台泥公司 研究室提供
76-5	9.62	41.06	49.32	266.5	
76-8	12.73	37.83	49.44	352.6	
26-7	6.42	53.83	39.75	171.4	
26-12	26.42	67.33	6.25	705.4	
26-13	18.22	52.92	28.86	486.5	
26-21	8.00	34.08	57.92	213.6	
30-4	24.26	24.88	50.86	657.5	
30-7	7.40	46.25	46.35	200.5	
30-12	5.48	37.52	57.00	148.5	
30-20	12.75	47.10	40.15	345.5	
30-24	26.63	28.51	45.26	710.8	
74-8	12.20	44.49	43.31	335.5	
74-9	7.56	48.23	44.21	207.9	
74-12	8.40	38.57	53.03	231	
74-18	13.38	33.53	53.09	368	

表 4-12 氯離子檢驗報告表

編號	76-1外	76-1中	76-1內	76-2外	76-3內	76-3中	76-3內
離子濃度 (ppm)	10879	11503	2012	2737	14059	4730	705
編號	76-6外	76-6中	76-6內	76-7外	76-7中	76-7內	
離子濃度 (ppm)	14643	803	1142	15083	4339	674	
編號	砂	石					
離子濃度 (ppm)	606	404					

表 4-13 76孔大標鑽心試體X光繞射結果之礦物成份表

礦物	編號													
	76-1E	76-1C	76-1E1	76-2E	76-7E	76-7E1	76-7C	76-3E	76-3E1	76-3C	76-6E	76-6E1	76-6C	
Calcite	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	
Portlandite	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	
Etteingite	⊙	⊙			⊙				⊙				⊙	
Chloroaluminate			⊙		⊙	⊙							⊙	
Carboaluminate	⊙	⊙		⊙	⊙		⊙	⊙				⊙	⊙	
Vaterite				⊙					⊙					
Cacium Sillicute	⊙													
Residual Clink				⊙						⊙				
Brucite		⊙	⊙					⊙	⊙					

註：位置說明

鑽心試體



E：試體外端
C：試體中央
E₁：試體內端

表 4-14 現場取樣鋼筋試驗報告

樣 編	品 號	實測單位 重 (Kg/m)	直 徑 (mm)	剖面積 (mm ²)	降伏強度 (Kg/mm ²)	抗拉強度 (Kg/mm ²)	破斷伸長 率 (%)
74-R4-1		0.493	8.9	62.74	20.4	40.5	13.7
74-R4-2		0.727	10.9	92.65	33.2	47.7	22.5
74-R4-3		0.814	11.5	103.65	33.2	47.1	27.5
74-R4-4		0.834	11.6	106.30	34.0	46.1	27.5
30-R4-1a		0.683	10.5	87.02	14.9	24.6	9.8
30-R4-1b		0.683	10.5	87.02	28.5	41.1	14.7
30-R5-1		1.146	13.6	146.03	30.3	44.1	26.0
26-R4-1		0.657	10.3	83.64	21.3	29.6	11.8
26-R4-2		0.806	11.4	102.67	31.6	45.0	20.6
26-R5-1		1.161	13.7	147.87	29.9	43.3	23.6
76-R8-1a		4.726	27.7	602.09	30.6	44.9	33.3
76-R8-1b		4.307	26.4	548.71	26.8	36.1	
76-R8-2a		3.883	25.1	494.70	32.9	48.0	
76-R8-2b		3.397	23.5	432.78	31.0	44.6	15.7

五、結論與建議

(一) 結論

1. 澎湖跨海大橋於民國59年完工，60年開始通車，因暴露在距高潮位3~6公尺之海面上，長期受海水及鹽霧侵襲，因此通車不及十年就普遍發現大樑混凝土龜裂，保護層脫落，鋼筋銹斷，部份預力鋼索外露銹斷，雖儘力設法研究維修可是仍繼續腐蝕而嚴重影響行車安全，故已於民國73年7月開始改建路堤，使用壽命僅及14年，與一般橋樑設計期望值40年相差甚多，為剖析腐蝕調查研究方法，因此行政院科技顧問組委託本所（港灣技術研究所）進行本澎湖跨海大橋腐蝕調查研究工作。
2. 腐蝕災害之致因，工程師們至今仍在探索中，仍未明其因，其理由為混凝土係非均質材料，病變檢查方法有限，雖然目前已研發一些非破壞性及鑽心之儀器與技術，鑑定環境因子侵入程度及鋼筋混凝土腐蝕損害情形，然而相當有限，仍以目視為主。又目前之維修技術不彰，維修後可能隨時再度發生損壞，有些結構雖然目視尚未見到明顯的災害跡象，然而結構強度已日益降低，因此有關鋼筋混凝土耐久性之檢查工作，需經常作全面性檢查，並對嚴重腐蝕區作細部檢查，可提早作防範工作，延長使用壽命，免得發生嚴重損壞後再耗資巨額重修。
3. 本大橋耗資新台幣壹億零肆佰肆拾伍萬元，歷時五年，工程人員克服種種困難完成，然而臨海之鋼筋混凝土維護保養工作一直不受重視，因此當發現腐蝕後才作維修工作，但為時已晚，雖然花費四千多萬元之維修，仍無法達到防蝕之效果，假定設計者當初有防蝕觀念，能事先考慮防蝕對策，將可使橋樑之使用年限達到設計標準。
4. 目前本大橋低橋部份（即第1-31・72-76橋孔），花費近二億元改建兩側為混凝土擋土牆之路堤，長為1,218公尺，留有二個拱橋40公尺，而高橋部份（即32-71橋孔），在民國73年時以塗裝作防蝕處理以防惡化，並觀測其防蝕效益，而國防部為國防需要，建議高橋部份亦應改為路堤，工程費約需六億五千萬

元，雖然整座大橋花費約八億五仟萬元改建，但事實上並未解決橋樑之腐蝕問題，濱海公路橋樑之腐蝕問題仍然存在，因為在設計及施工時，均未考慮腐蝕問題及採用防蝕措施。

5. 從本腐蝕調查研究知該橋之損壞原因有四：

- (1) 在設計時未特別考慮該橋係建在高腐蝕區，經年累月受季節風及颱風之凌虐，海浪之潑濺，乾濕反復作用及含鹽量高之海水可能侵入結構體等因素，而僅使用一般橋樑設計準則，因此使得該橋極易發生腐蝕損壞。
- (2) 在施工時，搗實不良及振動不良致使材料析離及泌水性增高，所以海水極易滲入混凝土內，促成鋼筋腐蝕。
- (3) 使用期間，經常有超載現象發生，因此大樑易產生撓曲及裂縫，發現腐蝕時又未聘用防蝕專業人員及使用防蝕技術作適當之補救措施，因此使海水更易繼續滲入混凝土內，惡性循環，加速鋼筋之腐蝕。
- (4) 在該橋發現腐蝕時，並未應用本次調查工作所用之非破壞性檢驗，及鑽取試樣分析方法，研判混凝土惡化與鋼筋銹蝕程度及範圍，以供評估維修方法及使用材料之依據，並早作維修處理，而僅依據目測結果評估，致使得維修方法及使用材料未盡抑制腐蝕之效，因此逼得該橋走上必須重建之命運。

6. 港灣技術研究所此次受行政院重託辦理鋼筋混凝土腐蝕調查，主要目的係本所為海洋，港灣專業學術研究單位，能結合國內工程界專家，對此問題作深入之瞭解，以使理論與工程實務能結合在一起，本次之委託研究計劃除對澎湖跨海大橋腐蝕現況作一般專業性之瞭解外，並積極建立鋼筋混凝土結構物之腐蝕研究重點及方法，而且本所現亦正進行「港灣鋼筋混凝土耐久性研究」，調查台灣五大港口腐蝕狀況，並與中鋼公司、工業技術研究院工業材料研究所合作研究「台灣海域之腐蝕特性防蝕設計及材料之選用與開發」，致力於建立國內海洋結構物耐久性設計與施工規範及偵測，剖析現有海洋R.C及P.C結構物腐蝕致因，並願意協助工程單位偵測及剖析現有混凝土結構物腐蝕情況。

(二) 建議

1. 本島地處極易腐蝕之海岸環境下，但至今尚未建立海岸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。政府應結合工程單位及學術研究單位展開這方面之研究工作，港灣技術研究所願意負責策劃成立此項大型研究工作，而且應儘速引進有關防蝕技術、防蝕材料選用、現場非破壞性檢查方法及判斷技術等新科技，以提高國內鋼筋混凝土腐蝕之研究水準。

2. 在海域橋樑或港灣 R.C 及 P.C 結構物設計規劃時，必須作海域環境條件、防蝕材料選用及施工技術等之評估，並且預測海域 R.C 及 P.C 結構物可能發生破壞之原因，最適當的方法為施工時安裝腐蝕偵測系統，因此當發現銹蝕時，可即時作維修處理，並請政府機構寬列防蝕預算，才能達到抑制腐蝕之效果，否則將使結構物必須重建。
3. P.C 及 R.C 橋樑結構物調查及維修工作，應由有防蝕經驗的人員參與，才能把這些實際調查及維修經驗，偵測結果彙整剖析後，作為設計與施工之依據，並且可提昇國內橋樑防蝕之技術水準。
4. 在設計時必須考慮橋樑結構之動態行為，預估可能龜裂處採用柔性設計以抑制外界有害物之侵入，並調查本國車輛載重及輪胎間距，以為國內橋樑設計載重之依據。
5. 應提高我國之混凝土施工品質，在施工時必須嚴格遵循 ACI 318 之規定外，並需遵照海洋混凝土結構物設計與施工規範，以確保優良之混凝土品質及耐久性。
6. 橋樑設計時應預估未來交通量之需求，並且與未來交通量之需求相配合，而施工完成後及使用期間應嚴格限制車載重，平時對橋樑結構作定期非破壞性檢查工作，必要時，需委託學術單位研究試驗，評估維修方法及選用材料。
7. 從力學分析顯示當時使用 AASHTO H20 之設計並不適合當地運輸業載重之需求，而且在該址設計型式不宜採用 I 型，因為海水、大氣容易集中在橋樑底版上，造成相對濕度高，而易發生腐蝕，建議採用 U 型橋樑或於工程完工時，即全面性塗刷防蝕塗料，以防海水鹽份侵入。
8. 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，

確保工程結構物之安全。

9. 澎湖大橋之腐蝕研究初期工作已經完成，而目前第二期拓寬及改建工程正在施工中，必須進行後繼之研究工作，該研究應包括(1)在現有橋樑上選擇數支樑，將塗料除掉，作 NDT試驗及腐蝕電位量測，俟該樑拆除後吊至陸上，供研究驗對其數值與實際狀況，可作為日後我國評估結構物腐蝕調查之標準。(2)在現場作載重試驗，求其載重與車速對橋樑設計之關係，作為日後橋樑設計之依據。(3)調查及分析出現場氯離子侵入混凝土之滲透速率，並以數學模式方法，估算鋼筋開始發生銹蝕時間，以作為評估結構物之使用壽命之依據。

六、參考文獻

1. 黃兆龍, " 混凝土破裂原因分析及診治建議", 混凝土工程技術研討會, X1-1~34頁, 台灣營建研究中心, 台北(1985)。
2. Mehta, P.K., " Durability of Concrete in Marine Environment A Review", in Performance of Concrete in Marine Environment, ACI SP-65, PP.1~19 (1980).
3. Hausmann, D.A., " Steel Corrosion in Concrete" Materials Protection, Vol. 6 , No.11, PP. 19-23 (1967).
4. Cady , P.D., " Corrosion of Reinforcing Steel" , ASTM STP-169B, PP.275-299 (1978).
5. Lloyd, I.P., and Heidersbach, " Use of the Scanning Electron Microscope to Study Cracking and Corrosion in Concrete " , Concrete International, pp. 45-50 May (1985).
6. Verbeck, G.J. " Mechanisms of Corrosion of Steel in Concrete" ,in Corrosion of Metals in Concrete, ACI SP-49, PP.21-38 (1975).
7. " Repairs of Reinforced Concrete" , Concrete, (1982).
8. ACI Committee 201 " Guide for Making a condition Survey of Concrete in Service" ACI 201, 1R-68.
9. Bureau of Reclamation, U.S., Department of the Interior, " Concrete Manual" , 8th.ed., Superintendent of Documents, Washington, (1975).
10. Monforz, G.E. and Verbeck, G.J., " Corrosion of Prestressed Wire in Concrete" , ACT Journal, Proceedings, Vol. 57, No.5 , PP.491-561(1960).
11. Verbeck, G.J., " field and Laboratory Studies of the Sulphate Resistance of Concrete", Performance of Concrete-A Symposium in Honor of Thorbergur Thorvaldson, National Research Council of Canada and the American Concrete Institute (1967).
12. ACI committees 222 and 224, " Debate : Crack Width, Cover, and Corrosion" Concrete International, ACI, PP.20~35 (1985).

13. ACI 201, " Guide to Durable Concrete" , ACI, PP.17~24 (1977).
14. Mindess, S., and Young, J.F., " Concrete" , Prentice-Hall, N.J. (1981).
15. Young, J.F., " The Microstructure of Hardened Portland Cement Paste" , Chapter 1, Creep and Shrinkage in Concrete Structures, Edited by Bazant, Z.P., and Wittmann, F.H., John Wiley and Sons (1982).
16. Regourd, M. " Physic - Chemical Studies of Cement Pastes, Mortars, and Concretes Exposed to Sea Water ", in Performance of Concrete in Marine Environment, ACI SP-65, ACI, PP. 63-82 (1980).
17. Conjeaud, M. L., " Mechanism of Sea Water Attack on Cement Mortar ", in Performance of Concrete in Marine Environment, ACI SP-65, ACI, PP. 39-61 (1980)
18. " 澎湖跨海大橋設計書 ", 台灣省公路局澎湖大橋工程處編印, 民國60年3月。
19. " 澎湖跨海大橋施工報告 ", 台灣省公路局澎湖大橋工程處編印, 民國60年3月。
20. " PEHU HU BRIDGE INITIAL VISUAL INSPECTION " MOTT, HAY & ANDERSON FAR EAST, HONGKONG MAY 1984.
21. 岸谷孝一, " 澎湖跨海大橋腐蝕之調查報告 ", 民國71年8月。
22. 林岡照, " 澎湖跨海大橋檢查報告 ", 民國72年2月。
23. " 澎湖跨海大橋檢查資料表 ", 公路局第三區工程處第六工務段製, 民國71年2月。
24. " 澎湖跨海大橋檢查報告表 ", 公路局第三區工程處第六工務段製, 民國72年10月。
25. 澎湖跨海大橋腐蝕損壞照片, 民國70年及72年。
26. 省公路局, " 澎湖跨海大橋改建路堤計劃簡報 ", 民國75年5月。
27. 中華顧問工程司, " 澎湖跨海大橋改建路堤對漁業生態影響評估先期報告 ", 民國76年元月。
28. 中央氣象局, " 氣象報告彙編 ", 第四編1971~1980。
29. 台南水工試驗所, " 台灣電力公司澎湖火力發電廠暴潮及溯上推算研究報告 ", 民國75年12月。
30. 台南水工試驗所, " 澎湖跨海大橋橋址波浪及波力推算報告書 ", 民國54年12月。

- 31.陳振川, "環境溫、溼度對混凝土剛性路面影響:試驗與理論探討",第二屆路面工程學術研討會論文集, PP.139~162, 中經, 民國76年。
- 32.Katharine Mather "Evaluating Concrete in Structures" Concrete International, PP.33-41. Oct. 1985
- 33.莊秋明, "出國報告書" 民國66年。
- 34.陳振川, "澎湖跨海大橋腐蝕龜裂現象之力學觀點探討" 海洋混凝土工程研討會資料彙刊, 13/1~13/20頁, 港灣技術研究所, 梧棲, 民國76年。
- 35.林岡照, "從澎湖跨海大橋腐蝕探討海洋混凝土橋樑" 海洋混凝土工程研討會資料彙刊, 5/1~5/8頁, 港灣技術研究所, 梧棲, 民國76年。
- 36.ACI "Testing Hardened Concrete : Nondestructive Methods" M-9 PP.9-25, 1976.
- 37.Taylor Woodrow research laboratoies "Marine Durability Survey of the Tongue Sands Tower", Concrete in the Oceans Technical Report No.5, The Cement and Concrete Association, Wexham Springs, 1980.
- 38.Hans Arup "Electrochemical Monitoring of the Corrosion State of Steel in Concrete" The Danish Corrosion Centre, 1985.
- 39.交通部 "公路橋樑設計規範", 民國76年。

附 錄

鋼筋混凝土結構物腐蝕問題座談會會議紀錄

- 一、時 間：中華民國七十七年三月十八日下午二時三十分
- 二、地 點：北市和平東路二段一〇六號科技大樓四樓會議室
- 三、主持人：吳執行祕書伯楨
- 四、出席人員：

行政院經建會：范國俊

內政部營建署：周智中

交通部科技顧問室：周勝次、張秀明

交通部高速公路局：方文治、藍根深

台灣省交通處：留金虎、張富南

台灣省公路局：莊秋明

台灣省住宅都市發展局：胡文虎、廖雄明

基隆港務局：石裕儒、吳俊雄、林坤田

台中港務局：莊炳琪

高雄港務局：康乃恭、楊義忠

花蓮港務局：嚴子錚

中鋼公司：魏豐義

工業材料研究所：洪健龍、毛維雲

中華工程顧問司：鄭俊彥、李榮南

台大土木系：陳振川

成大化工系：毛天德

工技學院：黃兆龍

中央大學：李 釗

台北工專：樊其芬

中華民國防蝕工程學會：陳文源、吳鶯榮、蔡明谷、徐金泉、蕭勝彥

港灣技術研究所：梁乃匡、林維明、饒 正

本組：鮮研究員祺振、詹研究員武勳、黃副研究員榮傳

五、主席致詞：

台灣地區屬嚴重腐蝕環境，鋼筋混凝土結構物腐蝕問題，不但每年耗損龐大維修費用，甚至導致建造物使用安全問題，影響層面甚廣，今天會議邀請各位專家共同研討此問題之癥結，促請各界重視鋼筋混凝土結構物腐蝕問題，並藉過去寶貴之經驗、及防蝕研究及技術能應用到未來新建及改進之鋼筋混凝土工程上，對我國經建發展必有助益，現在先請港灣研究所及中華顧問工程司先提出書面報告後再請諸位提供寶貴建議。

六、簡報：

(一)港灣研究所簡報「澎湖跨海大橋腐蝕調查研究」(摘要)跨海大橋於民國五十九年完工通車，六十四年橋樑便發生腐蝕問題，以低橋部位較為嚴重，大樑混凝土龜裂，部份暴露之鋼筋銹蝕情形已達斷裂程度，雖經多次修護，但均未能抑制腐蝕之進行，嚴重影響橋樑使用安全，七十三年起進行第一期改進工程，將低橋部位改建成路堤。此次調查歸結出下述幾個造成大橋腐蝕之原因。1.氣候因素，海風強、鹽份重、溫差大；2.設計缺乏海洋結構防蝕技術；3.施工品質不良；4.超載使用；5.維修未達防蝕要求。

(二)中華顧問工程司簡報「澎湖大橋改進工程」

改建後之路堤寬為十三公尺，大部份為拋石及混凝土擋土牆式路堤，仍保留有廿公尺長之雙孔拱橋一座，開孔之目的為便於漁船通行。改建工程中所作之防蝕措施分述如下：

- 1.路堤部份因純為重力式設計，使用 TYPE I 水泥，因未使用鋼筋，故此部份無防蝕設計。
- 2.拱橋因承受壓縮應力，採用傳統鋼筋，及 TYPE II 水泥並添加防銹劑。
- 3.五十公尺跨距橋採箱型鋼樑設計，使用耐候鋼及塗覆環氧樹脂，並逐年作刷漆防蝕維護。
- 4.三十公尺跨距橋採用預力樑，將用防蝕處理鋼筋，混凝土外層塗防水漆。

七、綜合討論：

(一)台泥公司蔡明谷先生：

路堤混凝土中雖未使用鋼筋，仍應重視混凝土之選用。改建工程此部位選用

TYPE I 水泥為嚴重錯誤，在海域環境使用 TYPE II 及 TYPE V 水泥較適當。

(二)工技學院黃兆龍教授：

拱橋雖處於壓縮應力狀態，依然會發生腐蝕問題，請重視流水截面積縮減是否對漁業生態造成影響及航道安全、路堤沖蝕問題。

(三)中央大學李釗教授：

混凝土乾濕循環及硫酸鹽污染物是腐蝕另一主因，填土應重視緊密度及對橋墩之負磨擦效應(Negative Friction)。

(四)防蝕學會陳文源理事長：

原橋施工及使用管理維護是造成腐蝕之主因。新工程之混凝土表層採富彈性結著性強耐衝耐蝕塗裝，鋼筋可採用鍍鋅及環氧樹脂保護處理。

(五)成大毛天德教授：

陰極防蝕技術可有效防治鋼筋混凝土在海域中之腐蝕問題，許多國家均有成功之實例，具經濟效益。

(六)公路局莊秋明先生：

新工程應考慮使用環氧樹脂鋼筋，加厚保護層，注意水泥調配比例，提昇橋面距海面之高度。

(七)交通處張富南先生：

原橋使用玄武岩，材質較差，水質含鹽份高亦是腐蝕原因，本處亦積極推動防蝕工作，正研議建立防蝕工程設計及施工規範。

(八)台大陳振川教授：

中國土木水利工程學會正在編列海洋混凝土施工規範。應絕對避免超載。工程設計年限應先界定，對海洋結構物應寬列防蝕經費。

(九)中鋼魏豐義先生：

改建工程若使用耐候鋼，請注意耐候鋼種類之選用，防銹處理以及焊接等因素均需考慮。

(十)高速公路方文志先生：

交通部頒佈有公路橋樑設計施工及維護規範，惟缺少防蝕相關資料，建議日後修正規範增列之。

(十一)亞洲水泥公司徐金泉先生：

注意碎石粒度及本質，設計要強調砂石比率、加料程度及拌料時間。施工時氣溫亦為考慮因素。

(十二)交通部科技顧問室周勝次主任：

海域鋼筋混凝土腐蝕問題要重視，改建工程對海洋生態所造成之影響應做進一步之研究。

(十三)經建會范國俊技正：

此改建工程費用達八億新台幣，是否已列管，使用年限應有評估報告重視提昇營建工程規範、統一規範、對於過去工程缺失之改進需要求治本而非治標。

八、主席結論：

今天各位專家踴躍發言，探討出許多寶貴之經驗及技術，對澎湖大橋改建工程及其他結構物均有參考之價值，謹做下列總結：

(一)澎湖跨大橋腐蝕調查研究報告請港灣研究所儘速完成，本組會分送各有關單位參考，重視鋼筋混凝土腐蝕防治工作。

(二)促請有關行政部門儘速制定鋼筋混凝土防蝕設計、施工、維護規範。

(三)鋼筋混凝土腐蝕防治及陰極防蝕技術研究應用，可納入行政院應技小組材料指導小組重點工作加以整體性的推動。

(四)本次會議有關澎湖大橋改建工程建議事項分送交通部及交通處參考運用。

(五)大橋改建為路堤對海洋生態及海象所造成影響之評估報告請公路局分送有關單位參考。

澎湖跨海大橋腐蝕調查研究

委託單位：行政院科技顧問組

計劃主持人：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

顧問：國立中興大學土木工程研究所教授兼所長 顏 聰博士

國立台灣工業技術學院營建工程系教授 黃兆龍博士

國立台灣大學土木工程研究所副教授 陳振川博士

研究人員：蘇瑞榮、吳信昇、曾文傑、徐如娟

何木火、李小萍、董榮進

公路局參與人員：養路工程處交通工程課 莊課長秋明

第三區工程處第六工務段 林段長岡照

材料試驗所 黃博仁先生

時間：民國76年1月1日至76年12月31日共壹年