

87-研(十)

現有結構物安全評估及維護研究

台灣省政府交通處

港灣技術研究所

台中 梧棲

中華民國八十七年六月

現有結構物安全評估及維護研究

執行單位：港工材料組

計劃主持人：陳桂清

共同主持人：饒 正

參與人員：張道光 羅建明 陳正義 何木火
李昭明 林隆貞 王培源

摘 要

結構物之安全評估與維修是整體一致性的工作，目前結構物之現況，大都以使用非破壞性檢測之方法，進行評估與維修。此法為一早期性具簡便、迅速、可行性高且為有效評估結構體是否安全的方法之一。而近年來電化學技術應用於防治或維修 R. C. 與鋼材結構物之腐蝕、劣化.. 等方面已有相當成效，不但能縮短維修工時，節省改建費用，更可延長結構體使用年限與安全。

本計畫第二年度主要研究重點分別為(1)電化學去鹽試驗(2)花蓮港區內結構物及東防波堤等設施調查研究，包括結構物非破壞性檢測、混凝土構造物鹼質與粒料反應之調查分析等(3)高雄港區內海生物附著港工構材與腐蝕之相關試驗調查。

現有結構物安全評估及維護研究

目錄

摘 要.....	I
目 錄.....	II
表目錄.....	III
圖目錄.....	IV
一、研究計劃概述.....	1
二、電化學維修方法研究—去鹽法之試驗.....	4

表目錄

表 1 試體配合設計比.....	15
表 2 電化學交流阻抗試驗結果(未通電處理).....	16
表 3 電化學交流阻抗試驗結果(通電處理後).....	17
表 4 腐蝕電流密度與鋼筋腐蝕狀況之關係表.....	18
表 5 腐蝕電流密度與鋼筋表面厚度損失速率之關係表.....	18
表 6 超音波脈動速率量測結果(1).....	19
表 7 超音波脈動速率量測結果(2)	19
表 8 試鉋試驗結果.....	20
表 9 貫入儀試驗結果.....	21
表 10 混凝土內離子分佈情形.....	22
表 11 陽極槽內 Cl^- 濃度(通電 14 天內).....	24
表 12 陽極槽內電解液中之總氯離子去除量.....	25
表 13 通電電量與去除 Cl^- 之關係.....	26

圖目錄

圖 1 研究內容及階段時程圖.....	3
圖 2 混凝土試體與鋼筋配置圖.....	27
圖 3 電化學去鹽系統裝置.....	27
圖 4 XRD 分析結果.....	28

一、研究計畫概述

近幾十年來交通建設等重大公共工程建設，均大量採用鋼筋混凝土結構興建，由於鋼筋混凝土材料甚具耐久性，因此甚少需要維護，但受使用環境(諸如腐蝕性的環境)及超負載...等等因素之影響，結構甚易受到損壞，其耐久性與安全性日益受到質疑與堪慮。

我國工程結構是否安全堪用，必需明確的瞭解，俾採必要之防範措施，基於此一要求，急需進行結構物安全評估工作，國外針對新舊結構物均有建立結構檢測方法及完善評估制度，使結構物達到安全，經濟、有效益之維護，增長使用壽命之目的。國內尚未建立結構物評估制度，並無統一的測試方法，故鋼筋混凝土結構物之檢測技術研究有其必要性。

結構物之維修是為確保安全，使用功能及延長使用年限，目前我國工程與設施較注重興建，或全面維修，對於平常之維護均認為是例行公事，僅編列少數維護經費，做低效益、無專業技術之表面粗淺之維護工作。而英、美、日等先進國家則均依環境腐蝕特性，規劃一套完整之維護計劃，不但使維護經費做最有效之運用，並可杜絕龐大維護費用之浪費，且對人、社會及環境造成最低之衝擊。目前電化學之理論及技術已開始被應用於防治 R.C. 結構物及金屬(鋼)構物腐蝕，成效顯見。強化港灣結構物之維修技術中陰極防蝕法、電化學去鹽法....等新技術與應用均為重要之研究課題。

1-1 計劃全程概述

本計劃研究時程規劃為五年，自民國85年7月1日起至民國90年6月30日止，研究期間將依實務需要，逐一執行各階段之研究重點，相關之研究內容及時程如圖1所示。

1-2 實施方法

1. 相關研究文獻之蒐集及分析研究

2. 蒐集及建立現有結構物基本建造資料庫
3. 建立非破壞性檢測技術方法
 - (1) 建立非破壞性檢測試驗步驟
 - (2) 建立非破壞性檢測規範
4. 探討電化學技術應用於R. C. 結構物及鋼構物維修與腐蝕防治之可行性
 - (1) 陰極防蝕法試驗
 - (2) 電化學去鹽法試驗
 - (3) 電化學還鹼法試驗
5. 蒐集及建立港區內水文、海生物與結構物腐蝕之相關資料
 - (1) 調查各港區內海生物之種類及棲息環境等變化
 - (2) 分析各港區結構物腐蝕之狀況
 - (3) 分析各港區內海水水質變化
 - (4) 建立港區內各種鋼材在海水中之腐蝕狀況

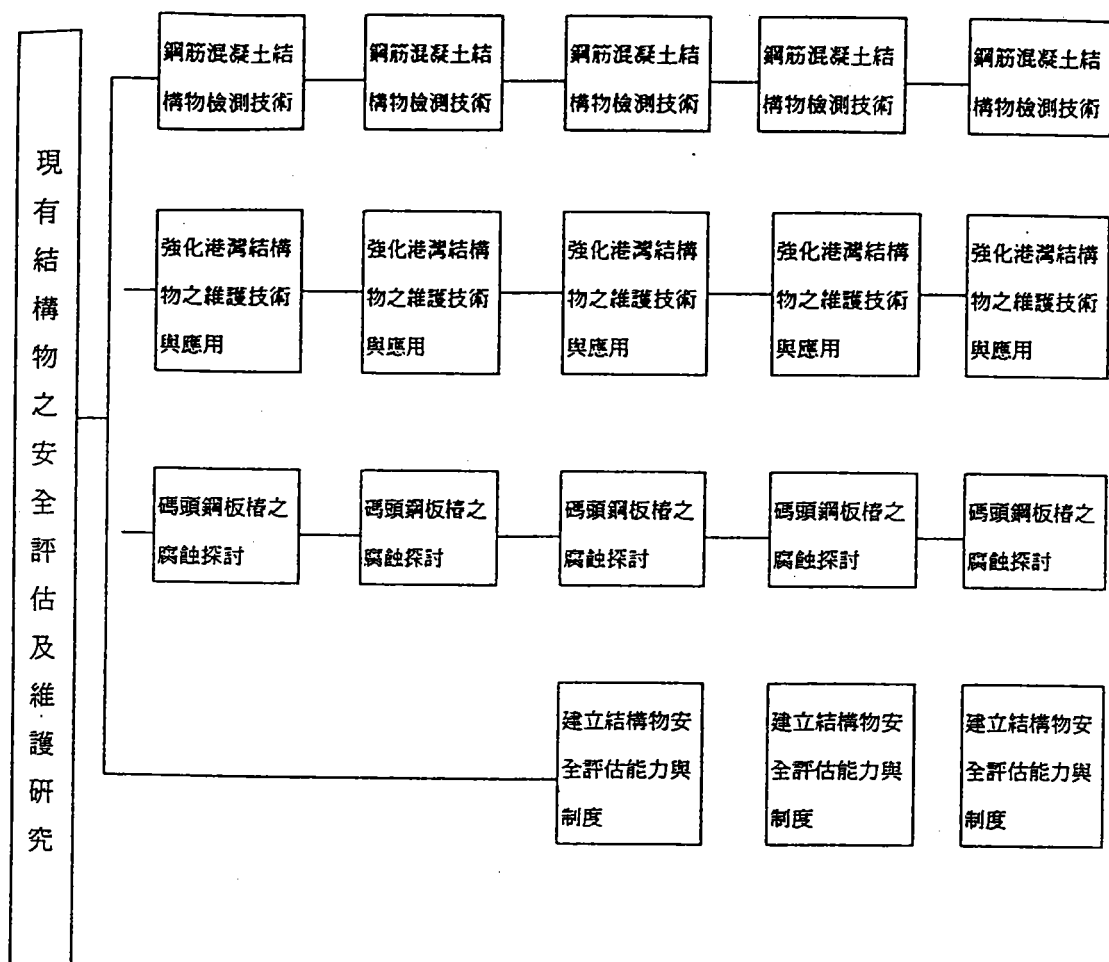
1-3 預期成果

1. 建立非破壞性檢測技術與規範
2. 建立結構物陰極防蝕規範
3. 建立電化學維修技術、工法
4. 建立鋼板樁碼頭腐蝕防治基本資料庫
5. 建立港區內水文、海生物附著對結構體(鋼構物、R. C. 構物等)腐蝕之相互關係

1-4 本年度計畫執行重點：

1. 電化學去鹽試驗 — R. C. 結構物維修工法之研究
2. 花蓮港區內結構物及東防波堤等設施調查研究，包括結構物非破壞性檢測、混凝土構造物鹼質與粒料反應之調查分析等
3. 高雄港區內海生物附著港工構材與腐蝕之相關試驗調查
4. 基隆、蘇澳、花蓮等港區碼頭鋼板(管)腐蝕調查(包括陰極

防蝕陽極塊放電效應、腐蝕電位、鋼板樁厚度、...等量測)



執行年度： |—86 年度—| |—87 年度—| |—88 年度—| |—89 年度—| |—90 年度—|

圖 1. 研究內容及階段時程圖

二、電化學維修方法研究—去鹽法之試驗

2-1 前言

電化學去鹽法技術之主要目的，乃是要從已有發生鋼筋腐蝕劣化之混凝土中將 Cl^- 去除，以達到鋼筋不再受 Cl^- 侵蝕之防蝕效應。基本上這種方式是藉著外加電力之驅動力，將混凝土內孔隙溶液中之 Cl^- 輸送到混凝土表面外。

本方法最初於西元 1975 年時，Lankard, et al. 曾經進行以電化學方法，從 R. C. 結構物內去除鹽份的試驗工作，經過多次的試驗，最後得到初步的結論是電化學去鹽方法，能將有害的氯離子移出結構體外，爾後歷經一二十年之改良，此技術已近趨成熟，目前此技術已獲許多國家專利並廣泛應用於歐洲地區，成效良好。電化學去鹽技術為一非破壞性而且對檢測結構體並沒有大小、尺寸之限制。這種驅勢大大地增加了吾人對混凝土內部鋼筋腐蝕機理之基本了解及研究之方便性、準確性及時效性。因此電化學方法提供了在實驗室或現場試驗時最有價值的研究工具，同時開創了對現有結構物檢測(偵測)的可行性。有鑑於此，最近幾年來英、美、日、北歐等許多國家之研究人員均紛紛投入研究，以電化學方法來處理混凝土結構物劣化腐蝕的問題，其研究之規模與應用之領域有逐漸增加趨勢。這是一種非破壞性的方法，不但可在短時間內完成修護工作，更可大量減低結構物維修成本，不過至目前為止，這些電化學處理方法雖然相當有效應，但仍有許多未知的變因，可能影響混凝土品質的因素存在，有待克服。因此電化學處理方式是非常有效率、有前景的修護方法之一，值得引進國內使用。

2-2 試驗規劃

1. 試體材質設計

配比設計：

- a. 水灰比：0.53 (相當於強度為 280Kg/cm^2)
- b. 水泥種類：第一型普通波特蘭水泥
- c. 骨材最大粒徑：20mm
- d. 細粒料：河川砂
- e. 鋼筋：省產一般竹節鋼筋(#3，直徑為 10mm)
- f. 鹽份含量：3.0%(以水泥用量為準)

相關骨材物性及詳細之配比設計，請參閱表 1。

2. 試體尺寸與數量：

30cm×30cm×10cm 70 個

3. 鋼筋配置：

試體保護層厚度為 4 公分，鋼筋為上下(縱、橫向)搭接，以電焊處理接點，排列方式如田字型，詳細配置如圖 2 所示。

4. 輔助陽極材料

使用 Elgrade coated titanium mesh 為輔助陽極

5. 試驗參數

(1)通電電流密度

0、1、3、6、9 A/m³、...
(依試驗需求做適當調整)

(2)通電時間

4、8、16、24 天、...

(依試驗需求做適當調整)

(3) 試體環境

乾燥及飽和狀態

(4) 鋼筋腐蝕抑制劑

NaNO_2 、 NaHPO_4

(5) 電解液

0.5M NaOH 、0.1M Ca(OH)_2

6. 試驗裝置：

電化學去鹽裝置，請參閱圖3所示。

7. 試驗項目如下：

- 混凝土強度
- 混凝土電阻變化量測
- 超音波脈動速率量測
- 貫入深度量測
- Cl^- 含量分佈量測
- 鋼筋腐蝕電位之量測
- 鋼筋腐蝕速率(電流)之量測
- SEM 及 XRD 分析試體內部晶相及化性變化
- 孔徑分析(MIP)

8. 試驗所需設備及分析儀器

- 直流電源供給器

- 量測鋼筋腐蝕電位計
- 電化學偵測儀器(恆電位儀、頻率反應儀)
- 現場非破壞性檢測儀器(包括試錘、貫入儀、電阻量測儀...)
- MIP、SEM & XRD 儀器
- 輔助陽極材料(鈦金屬網)
- 其它

9. 試驗步驟：

鋼筋通電流部份(鋼筋為陰極時)，

- (1) 未通電流前，量測鋼筋腐蝕電位、混凝土電阻係數、 Cl^- 濃度(由控制組試體量測即可)。
- (2) 施以通電一定時期後，斷電之，由於系統仍處於非平衡狀態，內部鋼筋仍處於極化狀態，因此試體應靜置一些時後，俟鋼筋電位非恢復自然電位時，再進行量測鋼筋腐蝕電位、混凝土電阻等數據後，並將試體鑽心取樣，做 Cl^- 濃度、透水、抗壓、XRD、MIP、SEM 等分析。

鋼筋混凝土試體上面圍槽內，外加 NaNO_2 、 NaH_2PO_4 等抑制鋼筋生銹之輸送劑之試驗，其試驗過程比照上述過程處理之。

10. 各項試驗數據檢測過程

(1) 混凝土表面強度檢測

依據 BS 1881 part 202 規範，以試錘(test hammer)在 $30 \times 30 \text{ cm}^2$ 之範圍內敲擊表面，每一敲擊點至少間距 2cm，讀取 12 點數據平均之，可換算出表面強度。檢測之表面必需平滑、乾淨、乾燥。

(2) 電阻量測

以 Wenner four-probes 探針式之電組量測儀器或利用 AC 交流阻抗儀器，於試體未通電前量測一次電組，試體結束通電後再量測一次電組，即可關測電阻變化。以 Wenner four-probes 量測時，探針所產生之信號(電子)路徑必需僅量避開鋼筋。

(3)混凝土內部溫度變化量測

試體內部埋置有溫度感應計，於通電前記錄溫度，通電期間每隔定時記錄溫度變化。以 CR-10 之 data logger(數據擷取器)。

(4)Cl⁻含量分佈量測

通電後之試體，經鑽心取樣後，依不同之深度(約 1cm)切片，研磨成粉末狀，依 ASTM C114 或 AASHTO T-260 規範進行分析。

(5)鋼筋腐蝕電位量測

由於系統斷電後，短時間內仍處於非平衡狀態，內部鋼筋之腐蝕電位仍處於極化狀態，因此試體應靜置一些時後，俟鋼筋電位恢復自然電位時，再以 Cu/CuSO₄ 或 Ag/AgCl 參考電極進行量測腐蝕電位。

(6)SEM 及 XRD 分析

將電化學處理過之試體研磨成粉末，觀測內部結構及化學成份變化。

(7)鋼筋腐蝕速率量測

量測鋼筋腐蝕速率一般常用有下列兩種方式：

(a)線性極化電阻法(DC 法)

極化方式在量測鋼筋腐蝕速率有很大的優點。例如利用極化電阻通常在幾分鐘內即可測得腐蝕速率，而如果使用傳統的重量損失方式來量測時則須花掉數天或更久的時間。極化方式具高靈敏性，屬於非破壞性可重覆量測多次而不損壞原有狀況。

在極化過程中於自然腐蝕電位 E_{corr} 附近，亦即電位在 $\pm 10\text{mv}$ 範圍之間，其極化曲線約呈直線關係，亦即外加電流(I)與極化電位變化量(e)是直線關係。因此 I/E 即為直線之斜率，由 I/E 之關係可求出 R_p (極化電阻)，因此稱為線性極化電阻法。

$$R_p = E/I \quad \text{或} \quad dE/dI \quad \text{at} \quad I=0$$

R_p 與腐蝕電流(I_{corr})成反比，依 Stern-Geary 關係式如下：

$$I_{\text{corr}} = B/R_p$$

B ：為常數可由 tafel 曲線之斜率求得

$B = \beta_a \beta_c / 2.303(\beta_a + \beta_c)$ ， β_a ， β_c 分別為陽、陰極 tafel 曲線之斜率。在混凝土環境下 B 為 25mv (鋼筋在活化狀態)，或 50mv (鋼筋在鈍態狀態)。

鋼筋腐蝕電流密度關係如下：

$$i = I_{\text{corr}}/A$$

i ：腐蝕電流密度

A ：鋼筋受到擾動之面積

此法有一些技術上之困難，必需考慮之：

- 系統平衡時間可能需要較長的量測時間，如量測時間較短時，倉

促的量測會造成不正確的腐蝕速率。

- 混凝土表面上之輔助電極與鋼筋間，由於混凝土之電阻極高，因此量測極化電阻(R_p)時，可能造成明顯的誤差，除非從 R_p 中扣除混凝土電阻。
- B 值之決定必需先知到鋼筋的狀態。
- 必需假設鋼筋為均勻腐蝕。
- A 面積不易確定
- 某一位置之鋼筋腐蝕速率不能視為平均腐蝕速率，因為混凝土之周遭之溫度、濕度、...及氧的含量，可能造成顯著瞬間腐蝕速率。

(b)交流阻抗法(AC 法)

AC 阻抗分析技術，屬於實驗室內擾動電化學方法，擾動式電化學技術乃是對腐蝕界面給予小幅度的干擾信號，得到一反應變化，直接地可量測鋼筋腐蝕速率。早期這方法並沒有發展使用於現場量測，然而近年來已有趨向應用於現場定期的腐蝕速率量測。

AC 法之優點如下：

- 能獲得離子或電子之擴散速率(diffusion rates)及鈍態膜存在之相關資料。因此 AC 是非常好的工具用來探討不同混凝土材質與鋼筋界面間之腐蝕機理與腐蝕速率之關係。
- 對極化電阻之量測(如使用很小之電位於鋼筋時)，所產生之交流脈動可提供任何有意義的影響，在局部鋼筋表面之環境變化。

AC 法之缺點如下：

- 系統之等效電路必需知道，一般在混凝土環境下大都並無適當的等效電路關係。
- 在選擇最適當的等效電路以前，簡單的等效電路並不足於描述所有的混凝土結構物。

2-3 結果與討論

1. 鋼筋腐蝕電位值

試體經過 28 天適當養生後取出，靜置於大氣中約 3 個月後，在開始通電除鹽前，先量測試體內部之鋼筋自然腐蝕電位值，量測結果如表 2 所示，大都介於 -300mV 至 -400mV 之間(以 Ag/AgCl 電極量測)，相當於 $-350\sim-450\text{mV}(\text{Cu}/\text{CuSO}_4)$ ，意指內部鋼筋應有 90% 生銹機率。表 3 為經過不同通電期間後，俟系統回復到穩定自然電位後，所量測得之結果。表中看出，試體內部之鋼筋自然腐蝕電位值，明顯上升至 -50mV 附近甚至趨向於正電位值方向，顯示通電去鹽後，內部因 Cl^- 濃度降低，大大減少攻擊鋼筋的數量及機率。因此鋼筋電位值驅向於低概率發生腐蝕之區域範圍。

2. 鋼筋腐蝕電流

通電前各試體內之鋼筋腐蝕電流值如表 2 所示。鋼筋腐蝕電流值均大於 $1.0\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ，屬於高腐蝕速率範圍，依據 K. C. Clear (1989 年)發表之研究報告換算，顯示此鋼筋材料預期在 2 至 10 年內發生腐蝕，腐蝕電流與腐蝕等級(狀況)之相關性如表 4 與表 5 所示。鋼筋腐蝕電流值隨著通電時間之增長及電流密度之增加下，呈明顯遞降的現象，亦及鋼筋腐蝕速率遞減。顯然通電去鹽之方法可有效降低鋼筋之腐蝕速率。但是在一定通電期間後，其遞減之效應不彰，呈停滯狀態，顯然去鹽效應已達一定極限。換言之，再增長通電期間或加大電流密度下，再去鹽已不易，且可能產生負面影響。

3. 混凝土電阻變化

表 2 中亦顯示在通電除鹽前混凝土之電阻係數值較低，約介於 $10\sim15\text{K}\Omega\cdot\text{cm}$ ，爾後隨著施加不等通電期間處理後，混凝土電阻值可增至 $20\text{K}\Omega\cdot\text{cm}$ 左右(如表 3 所列)，通電處理前後約增加 0.5~1.0 倍左右。混凝土電阻值之增加，意指混凝土內部離子較不易游離，加上 Cl^- 已去除甚多，因此距鋼筋附近之 Cl^- 已不易再接近鋼筋表

面，因此在高電阻之環境下，可降低內部鋼筋發生腐蝕之機率與速率。

4. 超音波脈動速率量測

試體通電去鹽前，超音波脈動速率約為 3.8~4.3 km/s(如表 6 所示)，通電去鹽後所測得之超音波脈動速率結果列於表 7。試體經電化學處理後，超音波脈動速率有略為下降現象(分別下降 0.04~0.8 km/s 不等)。顯示混凝土品質變化微小，仍屬於良好品質範圍。

5. 試鉗量測

表 8 為通電後試體表面試鉗量測結果。強度約為 270~320 kg/cm² 與控制組試體(未通電處理)之抗壓強度 294kg/cm² 相近。顯示通電後並未損壞混凝土材質品質。

6. 貫入試驗分析

試體通電處理後，貫入之深度約為 2.30~3.00mm 之間，如表 9 所示，相對於試體表面硬度約為 280~300kg/cm²。此結果與抗壓試驗所得結果相近，顯然混凝土材質尚無明顯變化。

7. 混凝土內 Cl⁻ 含量分佈

分析結果顯示，經電化學處理過之試體，在距頂端 0~5cm 之部份，Cl⁻ 不易被去除，推究其原因乃此區域並無構成電(流)荷通路，因此並無受電場作用之效應。在距頂端 6~10cm 之部份(位於陰陽兩極之間之區域)，為有效電力作用範圍，Cl⁻ 被去除之效應甚佳，且去除效率之增加隨通電之時間及電流密度之增加而增加。但在一定通電期間後，去除效應明顯停滯。一般而言，去鹽效率可達 60~70% 以上。相關 Cl⁻ 之分佈及去除量(率)則列於表 10 至表 13。

8. XRD 成份分析

圖 4 為試體通電後截取試體上端、鋼筋附近、下端處之漿體，經乾燥及研磨處理後，進行 XRD 分析所得之結果。圖中顯示鋼筋附近的氫氧化鈣化合物含量有增加的趨勢，而下端底部區域之氫氧化鈣則有減少的現象。由此可以證明，在經過電化學處理之後，於鋼筋附近會有氫氧化鈣反應物產生，而與陽極電解液接觸的試體底部，其氫氧化鈣成份則會因為陽極電解液的酸化，而逐漸地被析出。

9. 孔徑分析

混凝土在經過通電處理後，內部漿體的孔隙可能會產生變化。為此，特於通電試體，取其鋼筋附近與試體底部接近陽極電解液的混凝土漿體，進行 MIP 的孔徑分析。依據文獻中的定義，孔隙依其孔徑大小區分為三種不同的孔隙：大毛細孔隙(孔徑介於 10 到 $0.05\ \mu\text{m}$ 之間)、中毛細孔細(孔徑介於 0.05 到 $0.01\ \mu\text{m}$ 之間)以及膠體孔隙(孔徑介於 0.01 到 $0.0025\ \mu\text{m}$ 之間)。一般而言，毛細孔隙對於混凝土的抗壓以及滲透性的性質會有較大的影響，而膠體孔隙則對混凝土的乾縮與潛變作用有較大影響。

分析結果顯示，鋼筋附近混凝土的孔隙，以毛細孔隙所佔的比率最多，且其毛細孔隙的比例，隨著電流密度的增加，而有增加的趨勢。另一方面，膠體孔隙的比例，則是隨著電流強度的遞增，而呈現一個遞減的趨勢。由此我們可以證明在鋼筋附近的混凝土漿體，在進行電化學去鹽作用之後，整個漿體的孔隙有增大的趨勢，使得孔隙中以毛細孔隙的比率最高。這樣的現象對於混凝土而言，可能會導致鋼筋的握裹強度降低、鋼筋周圍混凝土的抗壓強度下降以及滲透性上升等等不利的影響。

試體底部之漿體，膠體孔隙比率明顯比鋼筋附近為高，同時，大毛細孔隙的比例也明顯地減少，整體的孔隙率亦較鋼筋附近為低。此外，若與未通電的試體相比較，可以發現彼此的差異並不大。

綜合以上的討論，我們可以發現，鋼筋周遭的混凝土，由於直接接觸到強烈的電化學反應，加上反應進行時會釋放出高熱，使得混凝土漿體可能會遭受到破壞，而使得孔隙結構產生明顯的變化。不過，除了鄰近鋼筋的區域外，電化學的作用對於混凝土孔隙結構的變化情形似乎並不顯著。

2-4 參考文獻

1. John P. Broomfield, "Corrosion of steel in concrete", 1st ed., E & FN SPON, London, UK, 1997.
2. J. Glanville and A. Neville, "Prediction of Concrete Durability", 1st ed., E & FN SPON, London, UK, 1997.
3. J.H. Bungey and S.G. Millard, "Testing of concrete in structures", Blackie Academic & Professional, 3rd. ed., E & FN SPON, London, UK, 1997.
4. A. Bentur, S. Diamond and N.S. Berke, "Steel corrosion in concrete", 1st ed., E & FN SPON, London, UK, 1997.
5. J.E. Bennett and T.J. Schue, "Electrochemical chloride removal from concrete: a SHRP contract status report", paper no.316, CORROSION 90, April 23-27, 1990.
6. Josef Tritthart, Karin Pettersson and Birgit Sorensen, "Electrochemical removal of chloride from hardened cement paste", Cement and Concrete Research, Vol.23, pp1095-1104, 1993.
7. C. Ary, Q. Sa'id-Shawqi, P.R.W. Vassie, "Factor influencing electrochemical removal of chloride from concrete", Cement and Concrete Research, Vol.26., no.6, pp851-860, 1996.

表 1 試體配合設計比

設計強度=280kg/cm ²	設計坍度=10cm	
水灰比(W/C)=0.53	最大粒徑=2.0cm	
細骨材物性	粗骨材物性	
細度模數(FM)=2.9	乾搗實重=1549kg/m ³	
乾比重=2.6	乾比重=2.6	
吸水率=1.2%	吸水率=0.83%	
含水率=4.4%	含水率=1.0%	
配合設計比：	水泥：細骨材：粗骨材=1:2.1:2.5	
單位重：	2309kg/m ³	
每立方混凝土材料配合量(kg)：		
材料	設計量	調整量*
水泥	379.874	3.444
水	175.212	1.222
細骨材	799.805	12.34
粗骨材	954.339	##

(*調整量為坍度每加減 1cm 之修正量)

表 2 電化學交流阻抗試驗結果(未通電處理)

試體編號	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9
鋼筋電位值(V)	-0.387	-0.365	-0.393	-0.378	-0.402	-0.364	-0.360	-0.333	-0.315
通電去鹽時間(天)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Rs(Ohm-cm ²) 混凝土電阻	10941	11165	10812	12011	11674	10764	13426	13325	14606
Rp(Ohm-cm ²) 鋼筋極化電阻	10342	9692	10812	9187	11580	11097	9685	10093	10005
C(F), e ⁻⁵ 界面電容值	7.48	7.78	6.62	7.32	10.3	6.41	6.14	6.50	6.57
I _{corr} (μA/cm ²) 鋼筋腐蝕速率	2.51	2.38	2.40	2.83	2.27	2.48	2.68	2.58	2.60

註：sample 表面潮濕

鋼筋極化面積 20cm², Applied AC 50mV,

Cover=4~5cm, FRA sweep range 20k ~ 0.1Hz or 1M ~ 0.1Hz

表 3 電化學交流阻抗試驗結果(通電處理後)

試體編號	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9
鋼筋電位值(V)	-0.025	-0.034	+0.023	-0.024	+0.033	+0.028	-0.051	-0.018	-0.041
通電去鹽時間(天)	4	8	16	4	8	16	4	8	16
Rs(Ohm-cm ²) 混凝土電阻	19521	20911	18927	25678	28549	27167	28837	26740	22359
Rp(Ohm-cm ²) 鋼筋極化電阻	36111	34666	28008	19020	19062	22536	35135	50980	30952
C(F), e ⁻⁵ 界面電容值	6.79	9.34	6.82	8.14	9.47	7.04	6.95	6.18	7.23
I _{corr} (μA/cm ²) 鋼筋腐蝕速率	0.72	0.75	0.81	0.68	0.55	0.53	0.74	0.51	0.84
ΔI _{corr} (μA/cm ²) 腐蝕速率降低	1.79	1.63	1.59	2.15	1.72	1.95	1.94	2.06	1.76

註：sample 表面潮濕

通電 4 天之試體已靜置 13 天，通電 8 天之試體已靜置 10 天，通電 16 天之試體已靜置 3 天

$\Delta I_{corr} = I_{corr}(\text{通電處理前}) - I_{corr}(\text{通電處理後})$

表 4 腐蝕電流密度與鋼筋腐蝕狀況之關係表

$I_{corr}(\mu A/cm^2)$	鋼筋腐蝕狀況	預估結構體內鋼筋 發生銹蝕之時間
<0.1	鈍化狀態	沒有腐蝕之預期
$0.1\sim0.5$	低~中等腐蝕	10~15 年內
$0.5\sim1.0$	中等~高腐蝕	2~10 年內
>1.0	高腐蝕	2 年內

表 5 腐蝕電流密度與鋼筋表面厚度損失速率之關係表

$I_{corr}(\mu A/cm^2)$	鋼筋斷面厚度損失 速率($\mu m/yr.$)	鋼筋表面銹層厚度 成長速率($\mu m/yr.$)
0.1	1.1	3
1.0	11.5	34
5.0	57.5	173
10	115	345

表 6 超音波脈動速率量測結果(1)

試體編號	超音波讀數(μs)					平均值 (μs)	脈動速率 (km/s)	混凝土 品質
No. 1	23.7	23.2	23.4	23.4	24.0	23.5	4.26	正 常 範 圍 內
No. 2	23.1	23.4	24.3	23.8	24.1	23.7	4.22	
No. 3	23.0	23.5	24.0	23.7	23.8	23.6	4.22	
No. 4	23.5	24.3	23.6	24.7	24.2	24.1	4.15	
No. 5	23.5	23.2	23.1	22.5	22.8	23.0	4.35	
No. 6	23.2	25.2	27.3	24.8	25.0	25.1	3.98	
No. 7	28.0	28.3	27.5	27.7	28.1	27.9	3.58	
No. 8	25.3	25.5	24.7	26.6	26.2	25.7	3.89	
No. 9	26.4	27.2	26.3	25.8	26.3	26.4	3.78	

註：試體尚未通電 (87.02.23)

表 7 超音波脈動速率量測結果(2)

試體編號	超音波讀數(μs)					平均值 (μs)	脈動速率 (km/s)	混凝土 品質
No. 1	23.3	24.2	24.0	23.6	24.3	23.9	4.18	正 常 範 圍 內
No. 2	25.0	24.8	24.2	24.0	24.5	24.5	4.08	
No. 3	23.4	23.8	24.6	24.2	23.9	24.0	4.17	
No. 4	25.2	24.0	25.0	24.5	25	24.7	4.05	
No. 5	24.3	23.8	23.6	22.8	23.2	23.5	4.26	
No. 6	24.3	26.0	28.4	25.2	25.4	25.9	3.86	
No. 7	28.3	28.9	27.9	28.5	28.5	28.4	3.52	
No. 8	25.8	25.3	25.9	25.4	25.6	25.6	3.91	
No. 9	27.0	28.0	26.5	26.3	27.2	27.0	3.70	

註：試體通電後(87.03.06)

表 8 試鉗試驗結果

試體編號	試鉗讀數												平均值	表面硬度	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		kg/cm ²	psi
No.1	38	40	38	40	38	36	42	38	37	38	36	37	38.2	322	4600
No.2	38	32	32	34	40	38	34	38	34	30	31	34	34.6	270	3857
No.3	36	40	36	34	34	34	34	30	36	36	30	36	34.7	271	3871
No.4	34	36	36	36	38	36	32	34	36	34	36	38	35.5	283	4042
No.5	36	36	36	34	38	36	32	34	35	34	36	38	35.4	282	4028
No.6	40	38	30	32	36	38	38	36	34	36	32	38	35.7	286	4085
No.7	36	32	38	32	30	38	38	38	36	32	32	34	34.7	271	3871
No.8	40	38	36	34	32	40	38	36	40	38	36	36	37.0	306	4371
No.9	32	32	40	34	32	38	38	32	30	36	38	32	34.5	268	3828

註：依據 BS 1881：part 202 規範

表 9 貫入儀試驗結果

試體 編號	測微器讀數(in.)										積數平 均值(in)	表面硬度		貫入深度 (mm)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		psi	kg/cm ²	
No.1	0.893	0.873	0.880	0.945	0.895	0.892	0.859	0.870	0.897	0.861	0.8865	3927	275	2.81
No.2	0.918	0.878	0.872	0.888	0.908	0.885	0.906	0.904	0.880	0.903	0.8942	4026	282	2.69
No.3	0.883	0.877	0.875	0.934	0.913	0.884	0.887	0.893	0.883	0.890	0.8919	3998	280	2.76
No.4	0.922	0.920	0.904	0.910	0.904	0.894	0.910	0.913	0.910	0.904	0.9091	4236	297	2.30
No.5	0.896	0.886	0.915	0.906	0.905	0.870	0.875	0.894	0.907	0.912	0.9006	4110	288	2.54
No.6	0.934	0.893	0.905	0.880	0.897	0.880	0.875	0.905	0.890	0.906	0.8965	4063	284	2.63
No.7	0.918	0.861	0.876	0.880	0.883	0.924	0.895	0.913	0.905	0.876	0.8931	4012	281	2.71
No.8	0.960	0.913	0.848	0.907	0.908	0.919	0.882	0.900	0.863	0.873	0.9070	4208	295	2.36
No.9	0.913	0.898	0.892	0.879	0.906	0.876	0.875	0.884	0.898	0.887	0.8908	3984	279	2.77
No.10	0.891	0.879	0.879	0.868	0.912	0.919	0.947	0.930	0.943	0.919	0.9087	4233	296	2.32
No.11	0.900	0.891	0.890	0.850	0.870	0.886	0.884	0.863	0.895	0.906	0.8835	3879	272	2.97
No.12	0.97	0.893	0.901	0.883	0.904	0.909	0.907	0.916	0.908	0.895	0.9086	4230	296	2.32
No.13	0.941	0.885	0.907	0.856	0.857	0.906	0.886	0.903	0.870	0.913	0.8924	4000	280	2.41
No.14	0.885	0.885	0.908	0.880	0.961	0.908	0.908	0.900	0.893	0.921	0.9049	4180	293	2.41
No.15	0.874	0.916	0.867	0.906	0.896	0.873	0.877	0.897	0.881	0.900	0.8887	3950	277	2.83

表 10 混凝土內離子分佈情形

試體編號	總通電量 (A-hr./m ²)	深度(cm)	取樣克數	Cl ⁻ 濃度 (kg/m ³)	NO ₂ ⁻² 濃度 (kg/m ³)	備註 (鋼筋位置)
1-4	576	0~1.5	3.012	6.88		3.0~5.0 cm 處
		1.5~3.0	3.06	7.91		
		5~6.5	3.054	6.30		
		6.5~8.0	3.111	4.97		
		8.0~9.5	3.034	5.17		
2-4	1008	0~1.5	3.066	8.26		5.0~7.0 cm 處
		1.5~3.0	3.063	6.17		
		3.0~4.0	3.002	6.07		
		4.0~5.0	3.117	5.59		
		7.0~8.5	3.049	4.46		
		8.5~10	3.042	3.88		
3-5	1656	0~1.5	2.936	6.71		4.5~7.0 cm 處
		1.5~3.0	2.966	6.15		
		3.0~4.5	3.049	5.61		
		7~8	3.161	3.23		
		8~9	3.398	2.28		
		9~10	3.075	2.81		
4-4	864	0~1.5	3.128	7.19		4.5~6.0 cm 處
		1.5~3.0	2.949	7.51		
		3.0~4.5	3.249	5.55		
		6~7.5	3.055	4.16		
		7.5~9	3.026	5.06		
		9~10	2.974	3.15		
5-5	1440	0~1.5	3.242	5.86	5.64	5.0~7.0 cm 處
		1.5~3.0	2.843	8.25	0.87	
		3~4	2.803	6.83		
		4~5	3.045	4.67		
		7~8.5	3.086	2.14		
		8.5~10	3.111	2.53		

表 10 混凝土內離子分佈情形(續)

試體編號	總通電量 (A-hr./m ²)	深度(cm)	取樣克數	Cl ⁻ 濃度 (kg/m ³)	NO ₂ ⁻² 濃度 (kg/m ³)	備註 (鋼筋位置)
6-5	2304	0~1.5	3.189	4.80	5.66	4.5~6.0 cm 處
		1.5~3.0	2.981	6.42	1.07	
		3.0~4.5	3.203	5.42		
		6~7.5	2.913	2.22		
		7.5~9	2.914	2.39		
		9~10	3.025	2.36		
7-4	1152	0~1.5	3.213	4.74		4.5~5.0 cm 處
		1.5~3.0	3.082	7.19		
		5~6.5	3.106	5.49		
		6.5~8.0	3.047	5.26		
		8~9.5	3.143	5.08		
		9.5~10.5	3.235	3.49		
8-4	1872	0~1.5	2.995	5.21		4.5~6.0 cm 處
		1.5~3.0	3.011	8.29		
		3.0~4.5	3.087	5.56		
		6~7.5	3.105	3.05		
		7.5~9	2.909	3.69		
		9~10	2.959	4.16		
9-5	2952	0~1.5	3.112	6.09		5.5~7.5 cm 處
		1.5~3.0	3.191	7.24		
		3.0~4.5	2.975	6.45		
		4.5~5.5	2.976	4.53		
		7.5~8.5	3.282	3.93		
		8.5~9.5	3.012	3.44		
		9.5~10.5	3.190	2.05		

表 11 陽極槽內 Cl⁻濃度(通電 14 天內)

編號	No.1		No.2		No.3		No.4		No.5		No.6		No.7		No.8		No.9	
	ppm	kg/m ³	ppm	kg/m ³	ppm	kg/m ³	ppm	kg/m ³	ppm	kg/m ³	ppm	kg/m ³	ppm	kg/m ³	ppm	kg/m ³	ppm	kg/m ³
1	155.5	0.09	130.2	0.08	143.7	0.08	190.7	0.11							196.3	0.12		
2	221.1	0.13	185.7	0.11	198	0.12	293	0.17					225.5	0.13	418.5	0.25		
3	654.4	0.39	541.1	0.32	544.4	0.32	527.7	0.31			221.3	0.13	543.9	0.32	868.9	0.51	280.9	0.17
4	761	0.45	680.7	0.40	689	0.41	744.8	0.44	215.3	0.13	521.3	0.31	702.5	0.41	656.5	0.39	609.2	0.36
5			789.9	0.47	840.2	0.49			510.2	0.30	831.8	0.49					730.7	0.43
6									656	0.39	888	0.52					908.4	0.53
7					1324.8	0.78			802.1	0.47	1293.9	0.76					1215.2	0.72
8			1094.8	0.64	1238.9	0.73			1056.4	0.62	1416.9	0.83			1064	0.63	1302.6	0.77
9					1290.9	0.76					1440.7	0.85					1364.9	0.80
10											1519.9	0.90					1420.2	0.84
11					1357	0.80					1566.6	0.92					1453.1	0.86
12																		
13																		
14					1501.2	0.88					1716.6	1.01					1541.1	0.91

註：濃度為每立方混凝土中被驅出之 Cl 量(kg/m³)

表 12 陽極槽內電解液中之總氯離子去除量

試驗 參數 試體 編號	通電電流密/通電時間															總通電量 (A-hr./m ²)	混凝土內驅 出之Cl ⁻ 總量 (kg/m ³)		
	第一階段					第二階段													
	3A/m ²					3A/m ²					6A/m ²							9A/m ²	
	4天	8天	14天	4天	6天	9天	4天	6天	9天	4天	6天	9天	4天	6天	9天				
No. 1	0.45			0.467												576	0.917		
No. 2		0.64			0.478											1008	1.118		
No. 3			0.88			0.534										1656	1.414		
No. 4	0.44						0.584									864	1.024		
No. 5		0.62								0.723						1440	1.343		
No. 6			1.01								0.792					2304	1.742		
No. 7	0.41											0.721				1152	1.131		
No. 8		0.63											0.812			1872	1.442		
No. 9			0.91												0.921	2952	1.822		

註：總通電量(A-hr./m²)=通電電流密度(A/m²)×通電時間(天數)×24小時/天
混凝土內驅出之Cl⁻總量(kg/m³)=第一階段驅出量+第二階段驅出量

表 13 通電電量與去除 Cl^- 之關係

試體 編號	電通量 (A-hr./m ²)	(1) 驅出濃度 (kg/m ³)	(2) 驅出之 重量(g)	(3) 實際檢測 驅出(%)	(4) 殘留濃度 (kg/m ³)	(5) 試體內殘 留重量(g)	(6) 實際檢測 殘留(%)	(7) 應殘留 (%)	(8) 相對殘留 (%)差距
No. 1	576	0.917	8.25	26.5	5.48	24.7	79.3	73.5	+5.8
No. 2	1008	1.118	10.06	32.3	4.17	18.8	60.4	67.7	+7.35
No. 3	1656	1.414	12.73	40.9	2.77	12.48	40.1	59.1	-19.0
No. 4	864	1.024	9.22	29.6	4.12	18.6	59.7	70.4	-10.7
No. 5	1440	1.343	12.09	38.8	2.34	10.5	33.7	61.2	-27.5
No. 6	2304	1.742	15.68	50.3	2.32	10.45	33.5	49.7	-16.2
No. 7	1152	1.131	10.18	32.7	4.83	21.73	69.8	67.3	+2.5
No. 8	1872	1.442	12.98	41.7	3.63	16.35	52.5	58.3	-5.8
No. 9	2952	1.822	16.40	52.6	3.14	14.13	45.4	47.4	-2.0

註：(1)：相當於每 m³ 混凝土內被驅出之重量

(2)：每一試體內被驅出之重量

(3)：(2)÷31.15，未通電前每一試體內之重量約為 31.15g

(4)：相當於每 m³ 混凝土內實際殘留之重量

(5)：每一試體內實際殘留之重量

(6)：(5)÷31.15

(7)：100%-(3)

(8)：(6)-(7)

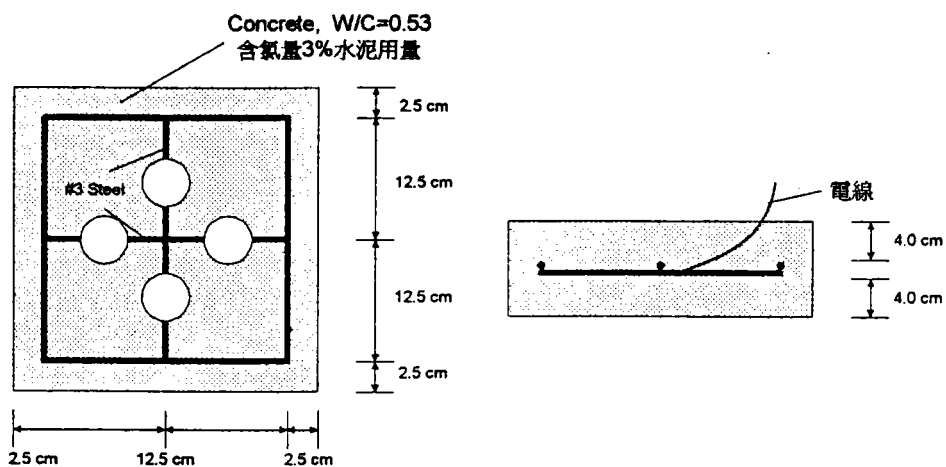


圖 2. 混凝土試體與鋼筋配置圖

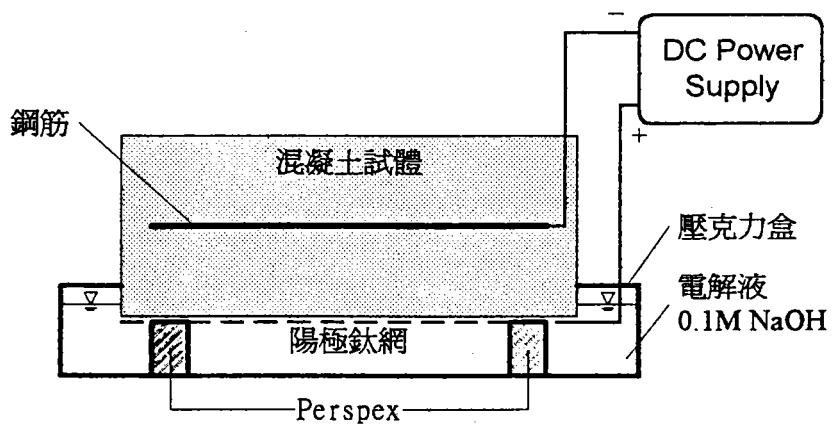


圖 3. 電化學去鹽系統裝置

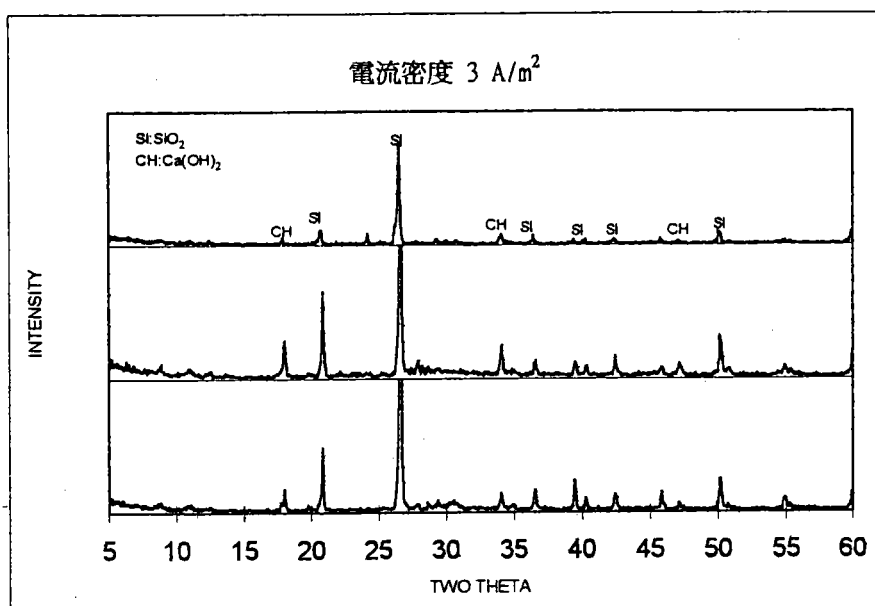


圖 4. XRD 分析結果

花蓮港區混凝土構造物鹼質與粒料反應之調查研究

委 託 單 位：台灣省交通處港灣技術研究所
執 行 單 位：國立中央大學土木系

中華民國八十七年六月

花蓮港區混凝土構造物鹼質與粒料反應之調查研究

委 託 單 位：台灣省交通處港灣技術研究所

執 行 單 位：國立中央大學土木系

計畫主持人：李 釗

研 究 人 員：許書王、黃書猛、簡坤葦、李鴻
柯正龍、羅一傑、陳登義

港研所參與人員：饒正、張道光、陳桂清

中華民國八十七年六月

摘要

本調查報告係由台灣省政府交通處港灣技術研究所，委託本校進行花蓮港區混凝土構造物鹼質與粒料反應之現況調查與研究。經於八十六年九月三日及四日由本計畫主持人等會同委託單位港灣技術研究所港工組人員，前往花蓮港務局權管之花蓮港區域，並在花蓮港務局人員協助下，進行花蓮港區混凝土構造物鹼質與粒料反應之現況調查。

鹼質與粒料反應係指混凝土中之鹼質與活性粒料產生作用，其結果主要會造成混凝土龜裂、起泡、爆裂，嚴重時甚至會造成構造物的崩毀，對於混凝土之耐久性有相當深遠的影響，由於混凝土構造物發生鹼質與粒料反應之判測不能僅由目測作為唯一之依據，確實結果必須經由相關規範進行實驗後始能確定，因此目視調查僅作為進行實驗初步之依據，故本校復於民國 86 年 9 月 30 日至 10 月 2 日進行現場詳細之各項測試及取樣，調查結果顯示花蓮港區混凝土構造物，部份有鹼質與粒料反應，此外從粒料產源之木瓜溪及月眉溪所取得之粒料經以化學法及砂漿棒法試驗並佐以岩相分析並與文獻比對具活性粒料的岩石包括了砂岩、板岩、片岩、安山岩等，而從港區鑽心經地質專家檢視其中具活性粒料包括了安山岩、石英岩、.....。

就整體研究結果而言，花蓮港區混凝土構造物確有鹼質與粒料反應的情形，如依嚴重性可依次分為消波塊、防波堤。由於鹼質與粒料反應有長時間發展的特性，因此部份實驗包括現場裂縫監測、實驗室鑽心試體膨脹量量測均無法在幾個月中得到較佳之結果，初步確認鹼質粒料反應的方式包括外部徵候、粒料岩相分析、化學法、砂漿棒法、微觀。

目錄

摘要	I
表目錄	V
圖目錄	VI
第一章 緒論	1-1
1-1 研究動機	1-1
1-2 研究目的與範圍	1-2
第二章 文獻回顧	2-1
2-1 混凝土材料對鹼質與粒料反應的影響	2-1
2-1-1 水	2-1
2-1-2 水泥	2-1
2-1-3 粒料	2-1
2-1-4 附加劑	2-1
2-2 混凝土構造物劣化之原因	2-2
2-2-1 氯離子	2-2
2-2-2 硫酸鹽侵蝕	2-2
2-2-3 碳化(中性化)	2-2
2-2-4 鹼質與粒料反應	2-2
2-3 混凝土構造物發生鹼質與粒料反應之原因	2-3
2-3-1 電化學去鹽法	2-3
2-3-2 電化學還鹼法	2-3
2-3-3 在去冰鹽的環境中	2-3
2-3-4 在有水的環境中	2-4
2-3-5 其它	2-4
2-4 鹼質與粒料反應的機理	2-4
2-4-1 鹼質與粒料反應的種類	2-4
2-4-2 鹼質與粒料反應之機理(鹼-氧化矽反應)	2-4
2-5 硬固混凝土鹼質與粒料反應之徵候判測	2-7
2-5-1 混凝土構造物外部徵候	2-7
2-5-2 混凝土構造物內部徵候	2-11
2-6 硬固混凝土鹼質與粒料反應之改善方法	2-11
2-6-1 混凝土產生鹼質與粒料反應的維修方法	2-12

2-7 混凝土鹼質與粒料反應之檢測方法	2-13
2-7-1 ASTM C289	2-13
2-7-2 ASTM C227	2-14
2-7-3 ASTM C295	2-14
2-7-4 混凝土陵柱體試驗	2-15
第三章 研究規劃與流程	3-1
3-1 研究流程	3-1
3-2 試驗設備及分析儀器	3-1
3-2-1 現場量測設備	3-1
3-2-2 試驗室研究設備	3-1
3-3 調查方法	3-3
3-3-1 目視調查	3-3
3-3-2 現場非破壞性檢測	3-3
3-3-3 鑽心取樣試驗	3-4
3-3-4 花蓮木瓜溪及月眉溪砂石取樣	3-8
3-3-5 國內水泥含鹼量調查	3-9
第四章 結果與討論	4-1
4-1 現場目視調查	4-1
4-1-1 混凝土道路部份	4-1
4-1-2 防波堤及消波塊部份	4-1
4-1-3 建築物部份	4-3
4-2 現場非破壞性檢測	4-3
4-2-1 電阻值	4-3
4-2-2 反彈錘試驗	4-3
4-2-3 中性化試驗	4-9
4-2-4 裂縫量測	4-9
4-3 鑽心取樣試驗	4-14
4-3-1 鑽心試體抗壓強度	4-14
4-3-2 X光繞射分析 (XRD)	4-14
4-3-3 鑽心試體斷面之粒料判測	4-15
4-3-4 SEM觀測結果	4-16
4-3-5 鑽心試體試驗室膨脹量量測	4-17
4-4 木瓜溪及月眉溪粒料取樣結果	4-20
4-5 國內 I 型水泥含鹼量調查	4-20

第五章 結論及建議事項	5-1
5-1 結論	5-1
5-2 建議事項	5-2
第六章 參考文獻	6-1
附錄一 現場非破壞性檢測位置圖	附錄一

表目錄

表 2-1	水泥砂漿棒試驗各粒徑粒料重量百分比	2-14
表 2-2	混凝土稜柱體試驗（一般）	2-15
表 4-1	花蓮港區混凝土構造物電阻實驗值	4-4
表 4-2	電阻係數與鋼筋腐蝕速率之關係	4-4
表 4-3	反彈錘測試結果（東堤堤身）	4-7
表 4-4	反彈錘測試結果（東堤路面）	4-7
表 4-5	反彈錘測試（西堤堤身、消波塊）	4-8
表 4-6	反彈錘測試結果（西堤路面）	4-8
表 4-7	花蓮港港區混凝土構造物中性化檢測結果	4-10
表 4-8	花蓮港港區混凝土結構物裂縫深度量測	4-13
表 4-9	花蓮港區混凝土構造物鑽心試體強度試驗值	4-14
表 4-10	XRD 試驗各點位置及可能具活性之成份	4-15
表 4-11	鑽心試體斷面之粒料判測	4-16
表 4-12	月眉溪與木瓜溪砂石樣品試驗結果	4-21

圖目錄

圖 2-1 鹼質與粒料反應在平面混凝土所造成典型的小裂縫和 大裂縫型式 -----	2-8
圖 2-2 鹼質與粒料反應引起裂縫的典型型式 -----	2-8
圖 2-3 橋樑護欄鹼質與粒料反應之表面裂縫情形 -----	2-9
圖 2-4 鹼質與粒料反應構造物爆裂情形 -----	2-9
圖 2-5 鹼質與粒料反應造成之膨脹裂縫對載重樑的影響 ----	2-10
圖 3-1 研究流程 -----	3-2
圖 4-1 花蓮港東堤堤身混凝土電阻值 -----	4-5
圖 4-2 花蓮港西堤堤身混凝土電阻值 -----	4-6
圖 4-3 花蓮港東堤堤身混凝土反彈錘測試結果 -----	4-7
圖 4-4 花蓮港東堤路面混凝土反彈錘測試結果 -----	4-7
圖 4-5 花蓮港西堤、消波塊堤身混凝土反彈錘測試結果 ----	4-8
圖 4-6 花蓮港西堤堤身混凝土反彈錘測試結果 -----	4-8
圖 4-7 花蓮港港區混凝土結構物裂縫深度量測位置 (1) ---	4-11
圖 4-8 花蓮港港區混凝土結構物裂縫深度量測位置 (2) ---	4-12
圖 4-9 鑽心試體試驗室四個月膨脹量量測結果 (置於 100%RH 環境中) -----	4-18
圖 4-10 鑽心試體試驗室四個月膨脹量量測結果 (置於 1N NaOH 溶液中) -----	4-19
圖 4-11 ASTM C289 實驗結果示意圖 -----	4-22
圖 4-12 國內水泥含鹼量比較圖 -----	4-23

第一章 緒論

近年來國內建設如火如荼的進行，粒料需求量大增，因此品質優良之粒料被大量使用，造成優良粒料日漸減少，再加上主要砂石產地相繼遭到禁採，未來使用次級或劣質粒料的機率相對大增。國內有關鹼質與粒料反應的研究報告中，顯示台灣東部等地區有具活性的粒料，及發現有疑似鹼質與粒料反應的混凝土構造物，尤其以花蓮地區最為顯著，由於鹼質與粒料反應會造成混凝土劣化，影響混凝土構造物耐久性和使用的功能與安全。近年來國際上已普遍重視此一問題，除了許多國家正努力尋求解決之道外，並定期舉辦國際性的研討會，以1996年在澳洲舉辦的混凝土鹼質與粒料反應研討會為例，該會中所發表的論文即有132篇之多。

由於混凝土發生鹼質與粒料反應(AAR)，將造成混凝土劣化，包括表面龜裂、起泡爆裂等現象，導致強度折損，嚴重時將造成混凝土崩毀影響安全至鉅，由於鹼質與粒料反應其作用期甚長，一般在工程施工完成甚至於驗收使用後均不易察覺，若未能在施工前針對混凝土材料做全面的詳細檢驗，或即使針對混凝土中之水泥進行品管檢驗，但混凝土中含有活性粒料，且構造物所處的環境具誘發性(高鹼性、去冰鹽環境等等)，亦可能發生鹼質與粒料反應。由於鹼質與粒料反應具有相當的長期性、複雜性、及不確定性，本項調查研究，將對花蓮港區的混凝土構造物，有關鹼質與粒料反應之相關徵候盡力進行調查研究，期望所得之成果，能提供港區有關單位參考運用。

1-1 研究動機

國內由於經濟發展，需求各項建設陸續展開，為建設所用之相關材料其需求隨之大增，其中以混凝土材料為大宗，因此使用於混凝土之粒料需求量相對增加，問題是目前國內良性及適合開發的粒料蘊藏量已日趨缺乏，未來使用劣質粒料的機會勢必大增，而且在國內相關文獻中也提及花蓮地區某些可能用於營建之河川砂石粒料具有活性，已經使用的、即將使用的、或是未來無可避免必須使用活性粒料，該如何應對？應是相當重要的課題。

海砂屋事件！所造成的不僅僅是單純的工程問題而是社會問題。事實上鹼

質與粒料反應所造成的問題將遠大於海砂屋，因為鹼質與粒料反應對混凝土所造成的影響相對於海砂屋而言，其損壞情形或損壞的影響將對社會造成更巨大的衝擊，像防波堤因鹼質與粒料反應影響致使其功能嚴重衰退，甚至導致崩毀造成海水倒灌，像水壩若因鹼質與粒料反應而坍塌，所造成的物質上與精神的損失將難以估計。國內目前已經有活性粒料的相關報告，有鑑於近年來混凝土需求量遽增，以及國內粒料產量銳減，任意盜採砂石嚴重，和國人對混凝土鹼質與粒料反應可能導致之問題有認知上的差距，造成使用劣質粒料的機率相對大增，因此吾人有必要和有責任針對混凝土構造物使用之粒料來源加以瞭解，並有需要對使用中之混凝土構造物進行檢測，尤其花東地區目前已發現有疑似鹼質與粒料反應之情事。有鑑於發生鹼質與粒料反應可能導致的嚴重性危害，以及東部地區已有活性粒料報告，所以本系與港灣技術研究所前瞻性的提出此研究案。

1-2 研究目的與範圍

1940年國外便已有鹼質與粒料反應之報告，之後相當多的國家包括日本、丹麥、加拿大、南非...等相當多的國家，陸續有鹼質與粒料反應案例的報告，發生鹼質與粒料反應之混凝土構造物包括了橋樑、水壩、擋水構造物、剛性鋪面.....等等相當多的混凝土構造物，而且這些混凝土構造物，經過試驗證實，有鹼質與粒料反應之現象。

由於前述之構造物如果發生鹼質與粒料反應，產生混凝土劣化而崩損，或因此再加上常態性的載重、衝擊甚或地震，則人人均可瞭解其嚴重性會大到何種程度。本調查研究主要的訴求重點即在於混凝土構造物，發生鹼質與粒料反應如未能及時察覺，其造成的後果將不堪設想，例如因鹼質與粒料反應而起泡爆裂、裂縫加劇，尤其是混凝土構造物常常會因鹼質與粒料反應不察覺的情況下損壞或弱化，本調查研究即針對花蓮港港區混凝土構造物進行調查研究，藉以瞭解花蓮港區混凝土構造物鹼質與粒料反應之現狀，供作有關單位參採。

第二章 文獻回顧

2-1 混凝土材料對鹼質與粒料反應的影響

混凝土材料主要包括了水、粒料、水泥以及附加劑，就鹼質與粒料反應而言，各材料均為產生鹼質與粒料反應的因素，其中又以水、粒料、水泥為最主要的因素^(1,2)，茲分述如下：

2-1-1 水

使用於混凝土的拌合水，如果水質不良會增加混凝土中的總含鹼量，則將增加混凝土構造物發生鹼質與粒料反應的機率。此外在有水的環境下，亦是造成混凝土構造物發生鹼質與粒料反應的重要原因之一，通常若環境濕度在85%以上就構成發生鹼質與粒料反應的要件^(3,4)。

2-1-2 水泥

水泥是釋出鹼質最主要的材料，增加水泥的用量將增加混凝土構造物的含鹼量，因而增加發生鹼質與粒料反應的機會，因此針對防止混凝土發生鹼質與粒料反應，ASTM規定混凝土中所使用的水泥其總含鹼量不得超過0.6%，而英國則規定混凝土中總含鹼量不得超過 $3\text{kg}/\text{m}^3$ 。目前國內產製的水泥有部份已經超過0.6%的規定，此外高水泥用量的混凝土總含鹼量，即使其水泥含鹼量未超過0.6%，亦有可能超過英國 $3\text{kg}/\text{m}^3$ 的規定⁽⁸⁾。

2-1-3 粒料

混凝土中的粒料如具有活性的性質，再加上高鹼量與潮濕的環境，則產生鹼質與粒料反應的機率相對增大，因此粒料的良劣與否是發生鹼質與粒料反應甚為重要的關鍵，在未來粒料需求日益殷切而優良粒料日益減少的情況下，使用劣質粒料的機率將大為增加⁽²⁾。

2-1-4 附加劑

由於混凝土的性質可藉由添加附加劑，做相當範圍的改善，以符合實際需求，因此目前已有為數甚多的附加劑運用在混凝土中。針對混凝土鹼質與粒料反應的特性而言，由於鹼矽膠體會因吸水而膨脹，因此添加適量的輪氣劑所造成的混凝土孔隙，將可釋放以及舒緩混凝土內部的膨脹壓力⁽¹⁴⁾。

西元1996年之混凝土鹼質與粒料反應研討會中，Y. Ohama, k. Demura and D. Suzuki 於其抑制鹼質與粒料反應的浸泡實驗報告中⁽¹⁴⁾，提出浸泡 LiNO_2 或加減水劑或加輸氣劑有助於抑制鹼質與粒料反應。

2-2 混凝土構造物劣化之原因

2-2-1 氯離子

假如混凝土構造物內有配置鋼筋，由於混凝土本身的高鹼性質（pH值約13），鋼筋表面會生成一層鈍態保護膜（ Fe_2O_3 ），使鋼筋不至於生鏽，惟若混凝土之pH值降低至10以下時，此時若有氯離子侵入則將造成鋼筋腐蝕，而鋼筋腐蝕將使鋼筋體積增加進而導致混凝土體龜裂。

2-2-2 硫酸鹽侵蝕

硫酸鹽侵蝕的反應過程甚為複雜，比較可以確定的是硫酸鹽離子的濃度及鋁酸三鈣之間的關係，當發生硫酸鹽侵蝕時將使得水泥漿體積膨脹形成內應力導致混凝土構造物龜裂，西元1936年美國墾務局出版的混凝土結構手冊以已警告說土壤中可溶性硫酸鹽濃度超過0.1%（水中含 SO_4^{2-} 150mg/l）會危及混凝土，以及在土壤中含0.5%以上（水中含 SO_4^{2-} 超過2000 mg/l）將具嚴重影響。

2-2-3 碳化（中性化）

一般混凝土構造物其pH值約在13左右，當混凝土中的氫氧化鈣與空氣中的二氧化碳結合產生碳酸鈣，將導致混凝土pH值降低稱之為混凝土中性化，其將導致混凝土內部的鋼筋易受侵蝕而腐蝕，進而使混凝土劣化。

2-2-4 鹼質與粒料反應

當混凝土中含有足夠的活性矽與鹼量時，在有水的環境下會產生鹼質與粒料反應，導致混凝土龜裂甚或崩毀。目前文獻中所報導的混凝土鹼質與粒料反應，絕大部分係指鹼-氧化矽反應，最早是於西元1940年由美國學者Stanton所提出。由於混凝土鹼質與粒料反應係受到混凝土中孔隙溶液的影響，其鹼質與粒料反應的發生是局部的，在同一混凝土構造物其所發生的鹼質與粒料反應會有不同的範圍、不同的面積，主要原因係混凝土中的粒料其分佈並非均勻，因此其活性粒料之分佈也非均勻，而且各孔隙中的孔隙溶液也不相同之故⁽²⁰⁾。

2-3 混凝土構造物發生鹼質與粒料反應之原因

混凝土構造物發生鹼質與粒料反應有三個條件必須同時存在，因此除了混凝土本身的條件外其與所處的環境及對於混凝土構造物的處理有極大的關連，茲分述如下：

2-3-1 電化學去鹽法

電化學去鹽法主要係針對已有鋼筋腐蝕現象之鋼筋混凝土，將其內部的氯離子移出，使鋼筋不再受氯離子的侵蝕而達到防止鋼筋腐蝕的效果，當氯化物解離時係因電化學的驅動使氯離子被移出至混凝土構造物外，而帶正電的鈉、鉀、鈣等離子將使得混凝土的pH值增加，因此即使原混凝土中的含鹼量未達產生鹼質與粒料反應的水準，也會因電化學去鹽而產生較高的含鹼量，此時在混凝土具活性粒料及有水的環境下，鹼質與粒料反應於焉產生。

2-3-2 電化學還鹼法

還鹼最主要的目的係將已中性化的混凝土構造物，運用電化學的方式予以改善，恢復高鹼性的性質以保護鋼筋，一般使用於還鹼工法的電解液有 $(\text{Ca}(\text{OH})_2, \text{Na}_2\text{CO}_3, \text{NaNO}_2, \dots)$ ，基本上電化學還鹼工法由於係將混凝土構造物內部環境改善為高鹼性的環境，因此將造成孔隙溶液中鹼金屬離子的增加，若混凝土構造物本身具有活性粒料及在有水的環境下，將使得發生鹼質與粒料反應的機率大增⁽¹⁷⁾。

2-3-3 在去冰鹽的環境中

西元1996年混凝土鹼質與粒料反應研討會中R. G. Sibbick and C. L. Page發表的文章中指出在鹽溶液的浸泡實驗中，發生鹼質與粒料反應的混凝土 Na_2O 的含量即使是比UK提出的最低含量每立方米還要少3公斤，或即使是20年的老混凝土構造物，假如其仍暴露在去冰鹽中，則因鹼質與粒料反應的膨脹仍持續發展⁽¹¹⁾，而 NaCl 與混凝土中之 C_3A 扮演著相當重要的角色，其中在水泥中 C_3A 含量較低與較高的試驗中，因鹼質與粒料反應所發生的膨脹量相對而言，含 C_3A 較高的試體其膨脹量較高。

2-3-4 在有水的環境中

由於水是混凝土發生鹼粒料的三項必備條件之一，因此當混凝土本身具有活性粒料以及高鹼環境，則在有水的環境下將會產生具危害的鹼質與粒料反應。

2-3-5 其它

其它如乾濕循環、凍融循環、曝露於較高溫度的環境等，也會造成或加劇鹼質與粒料反應，因此同樣的混凝土在不同的環境下，其所發生的鹼質與粒料反應程度、大小也不同，因而反應的程度也無法定量。

在一項快速試驗中指出⁽²⁰⁾，混凝土試體因鹼質與粒料反應而發生的膨脹量取決於浸泡溶液進入試體的速率以及浸泡溶液中氫氧根離子的濃度，而且在溫度愈高的情況下會有比較大的膨脹量。

2-4 鹼質與粒料反應的機理

2-4-1 鹼質與粒料反應的種類

2-4-1-1 鹼-氧化矽反應 (Alkali-silica reaction)，詳如2-4-2。

2-4-1-2 鹼-矽酸鹽反應 (Alkali-silicate reaction)

混凝土發生鹼矽酸鹽反應，主要係由於使用如phyllites、grey-wacks、argillites、granitic等岩石所製成的粒料，而此種反應的速率比鹼-氧化矽的速率慢，ASTM C227 及 ASTM C289規範無法有效鑑定此種粒料的活性。

2-4-1-3 鹼-碳酸鹽反應 (Alkali-carbonate reaction)

使用夾雜有黏土的含鎂石灰石 (dolomitic limestone, $MgCO_3/CaCO_3$) 做為混凝土粒料，可能是造成鹼碳酸鹽反應的原因，但是其機理目前尚未完全瞭解。

2-4-2 鹼質與粒料反應的機理 (鹼-氧化矽反應)

2-4-2-1 機理^(4,8,18,19)

鹼質與粒料反應的機理目前仍有多種說法，其中較易瞭解的機理如圖一所

示，當水泥水化後其混凝土孔隙溶液中會產生鈉（帶一個正電荷）、鉀（帶一個正電荷）、鈣（帶二個正電荷）、氫氧根（帶一個負電荷）等離子，若混凝土中含有活性粒料，氫氧根離子會打斷粒料中結合能量較低的矽氧鍵結（結晶不完整），產生帶負電的-Si-O⁻： $-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-\text{Si}-\text{O}-\text{H}+\text{OH}^- \rightarrow -\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-\text{Si}-\text{O}-\text{H}_2\text{O} + \text{O}^{2-}$ 帶負電的-Si-O⁻基於平衡原則須與帶正電的陽離子結合，形成穩定的反應產物，在此反應過程中，鈉和鉀離子因帶一個正電且原子比鈣小較易和-Si-O⁻先結合成鹼矽膠體（alkali-silica gel）。此種鹼矽膠體在有水的情況下會吸水而膨脹，因而造成混凝土內部產生膨脹壓力，當混凝土本身無法承受此內部壓力時，混凝土的體積會增加，進而龜裂以釋放內部壓力。

鹼矽膠體在形成初期，由於尚未吸水為較乾的膠狀體，在吸水後除會造成體積膨脹外，膠體的黏度亦會降低，若持續吸水，膠體會變成流體狀的物質，流至混凝土中的孔隙，而降低鹼矽膠體的膨脹壓力。

鹼矽膠體在形成後若周圍有足夠的鈣離子，鈣離子會取代鹼矽膠體中的鈉、鉀離子，形成含鈣的鹼矽膠體（lime-alkali-silica gel），而鈉、鉀離子釋放出來後，會在進入混凝土孔隙溶液中繼續與活性粒料反應生成鹼矽膠體，含鈣的鹼矽膠體其吸水後的膨脹壓力小於不含鈣的鹼矽膠體，亦即鹼矽膠體吸水膨脹的能力會受其組成成分及環境因素（溫度、濕度）的影響，Diamond在一項為期四個月的密閉環境中發現膠體的膨脹量並不固定，較不活潑的膠體其膨脹量小於2%，而較活潑的膠體其膨脹量高達63%。

鹼質與粒料反應在同一結構上，會發生的反應是局部的，包括不同大小的地圖形面積、範圍，其發生取決於孔隙溶液的性質，即其局部的反應成分，當混凝土中的粒料是低吸收性時，孔隙溶液大部分被侷限在粒料之外的孔隙中，而假如粒料為多孔性，則粒料中的孔隙亦會有孔隙溶液的存在，就轉換區而言由於其相對於粒料及漿體的多孔性，高鹼性的孔隙溶液易充滿其中，因此粒料的比表面積，在相同粒料孔隙率的情形下，對於發生鹼質與粒料反應的速率而言，就顯得相當重要。文獻中亦指出較大的反應粒料，發生鹼質與粒料反應相對於較小的粒料較遲緩，而僅有較細的反應性粒料存在時，其鹼質與粒料反應的速率相對較快，太細的反應性粒料摻配於混凝土中，其鹼質與粒料反應甚至於快到在水化時期就已完成。

此外在定鹼溶液的環境中，鹼質與粒料反應與反應性粒料的尺寸有極大的

相關，然而由前述之討論，一般預期鹼質與粒料反應的位置會在粒料與漿體的交接面，而事實上並不一定，因為具高鹼性的溶液有可能進入已經存在的活性粒料裂縫內或活性粒料的溝槽內。

2-4-2-2 鹼金屬的來源

混凝土中鹼金屬主要的來源為水泥材料，在產製水泥高溫燒結時，鹼金屬會揮發出來，其若未隨廢氣排入大氣，會在廢熱回收和預熱系統中循環，與硫酸鹽結合成硫酸鈉、硫酸鉀或兩者的固溶液 (solid solution)，此種鹼金屬的硫酸鹽為水溶性，通常在混凝土拌和時即會溶解出來，此外在燒結水泥時部份的鹼金屬會進入水泥單礦物，以固溶液的型態存在於水泥中，一般鈉會取代鋁酸三鈣 (C_3A) 中的鈣形成 NC_3A_3 ；鉀會取代矽酸二鈣 (C_2S) 中的鈣形成 $KC_{23}S_{12}$ 。在水泥水化後，單礦物中大部分的鹼金屬會隨水化過程釋放出來進入孔隙中，參與鹼質與粒料反應。此外在使用為混凝土材料中的水、附加劑、海水、去冰鹽、含鹼鹽的粒料等也有可能為混凝土中鹼金屬的來源，不幸的是目前並沒有規範規定這些材料的最低鹼含量。

鹼金屬的種類與膠體的膨脹量有關，Davis指出氫氧化鉀所生成的膠體比氫氧化鈉在早期而言反應較快，但是晚期總膨脹量氫氧化鈉所生成的膠體較大。

對於總含鹼量以下式計算之

$$(Na_2O)_{eq} = Na_2O \% + 0.658 (K_2O) \%$$

equivalent weight of sodium oxide = sodium oxide content + 0.658 % potassium oxide content

2-4-2-3 活性粒料

活性粒料與一般正常粒料的差異，主要在其結晶構造，一般正常的粒料結晶完整，其原子間的鍵結能量高，不易被氫氧根離子打斷產生鹼質與粒料反應，而活性粒料的結晶不完整，其原子排列散亂，矽-氧間的鍵結易被氫氧根離子打斷，而造成鹼質與粒料反應。

一般可能會產生鹼質與粒料反應的活性粒料包括⁽⁸⁾：

- (1) 結晶不良或含水的矽質粒料
- (2) 含玻璃質或半結晶的粒料

- (3) 微細結晶或半結晶的石英
- (4) 曾受極大應力發生結晶變形的石英

2-4-2-4 環境對於鹼質與粒料反應的影響

混凝土張應變的能量通常在150-200us，極少超過500us，而有鹼質與粒料反應之混凝土構造物其張應變可達400-600us⁽¹⁰⁾，因而導致混凝土構造物龜裂，其龜裂寬度從0.1-15mm不等，Hobbs指出有鹼質與粒料反應的混凝土其裂縫深度自混凝土表面計起約25-150mm，而過低的溫度例如在4°C時，砂漿棒一年的膨脹量約僅為20°C時的30%，因此在寒冷的地區混凝土發生鹼質與粒料反應的時間會延後。

在下列環境中所發生的異常膨脹與龜裂與鹼質與粒料反應不同⁽⁸⁾：

1. 混凝土所處的環境下其濕度在85-90%以下。
2. 在粒料中僅有很小比例的活性粒料例如質量比小於0.4%或較大百分比的不活性砂。
3. 在粒料中有相當高比率的活性砂，而其混凝土之鹼含量小於5kg/m³、水泥量少於500kg/m³。
4. 構造物受壓超過4-5N/mm²。

2-5 硬固混凝土鹼質與粒料反應之徵候判測

2-5-1 混凝土構造物外部徵候

一般而言在凍融循環、乾濕循環以及硫酸鹽侵蝕、氯離子侵蝕等情況下，也可能會造成混凝土構造物表面的龜裂，純混凝土構造物在發生鹼質與粒料反應之後，其表面也會有裂縫，比較特殊的是其裂縫呈不規則的地圖狀裂縫，如圖2-3、2-5所示。而且在環境沒有改變的情況下，這些裂縫會隨時間而變寬。混凝土構造物發生鹼質與粒料反應時，由於混凝土中粒料分佈的不規則性，其裂縫的生成始於活性粒料較集中的地方，並形成焦點中心，如圖2-1所示⁽⁸⁾，仔細觀察可發現有數條不同走向的裂痕併交會於焦點中心，在近混凝土表面活性粒料產生鹼質與粒料反應，混凝土表面甚至會有起泡爆裂的現象，如圖2-4所示⁽²¹⁾，在沒有受到磨蝕與沖刷的情形下，從混凝土表面裂痕處可觀察到滲出的反應物（膠體）^(6,7)，呈透明、白色或濕點狀。

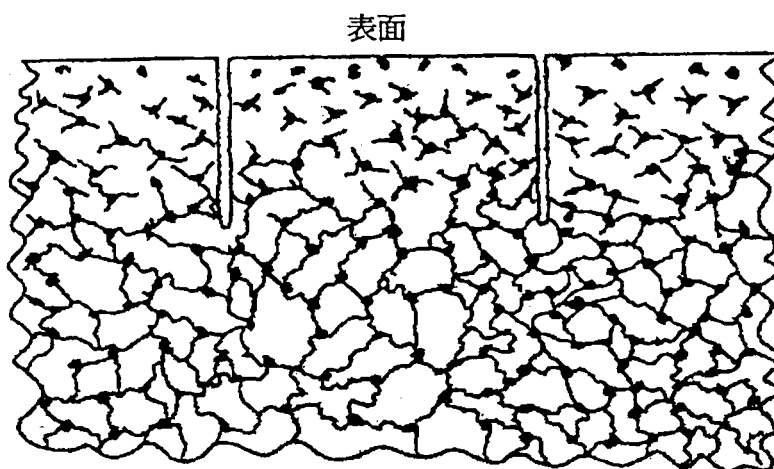


圖2-1 鹼質與粒料反應在平面混凝土所造成典型的小裂縫和大裂縫型式

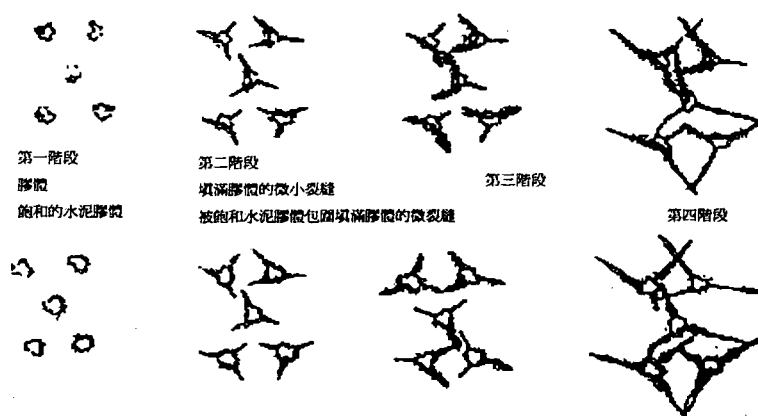


圖2-2 鹼質與粒料反應引起裂縫典型模式

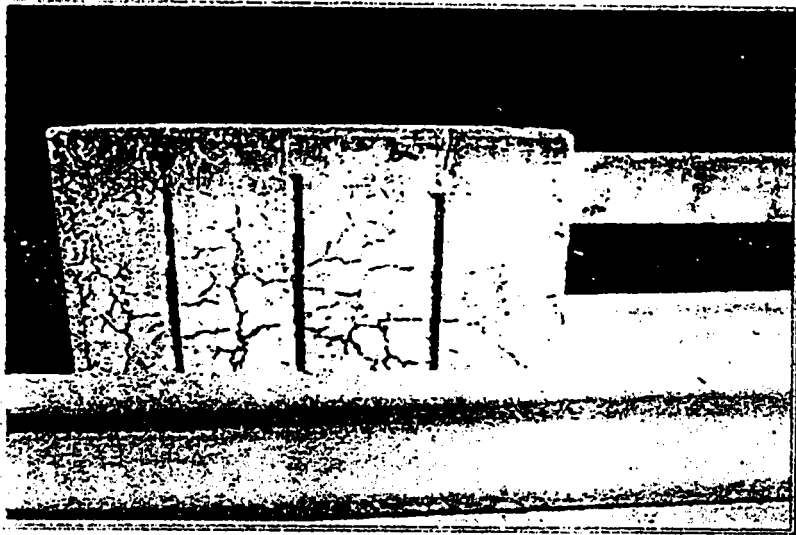
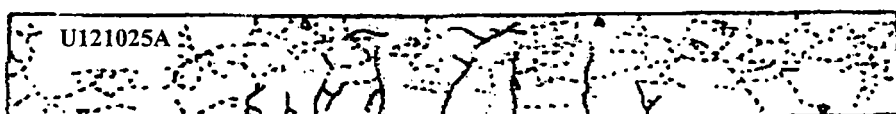


圖2-3 橋樑護欄鹼質與粒料反應之表面裂縫情形⁽²¹⁾



圖2-4 鹼質與粒料反應構造物爆裂情形⁽²¹⁾

鹼質與粒料反應



無鹼質與粒料反應



鹼質與粒料反應



..... 鹼質與粒料反應引起之裂縫
 ———— 載重所造成之裂縫

圖2-5 鹼質與粒料反應造成之膨脹裂縫對載重樑的影響⁽⁸⁾

2-5-2 混凝土構造物內部徵候

當混凝土發生鹼質與粒料反應時，其內部徵候包括微細裂縫、膠體反應產物、粒料周圍有暗色的反應圈等現象⁽⁴⁸⁾，由於混凝土構造物發生鹼質與粒料反應時，其外部徵候中顯現出地圖形的裂縫，而此種裂縫係由內部生成逐漸擴散至混凝土表面，因此混凝土內部有微細裂縫是確認鹼質與粒料反應重要的現象之一，而由於混凝土中，因為活性矽與水泥中的鹼金屬形成鹼矽膠體，並因為吸水而膨脹導致混凝土構造物龜裂，甚或從混凝土表面可看到呈透明、白色或濕點狀的物質，而此物質是由混凝土內部所生成，因混凝土龜裂而流出，故在檢驗混凝土鹼質與粒料反應時，其內部會有膠體反應物的存在，此外由於鹼矽膠體係由於水泥中的鹼金屬與活性粒料中的活性矽所形成，而其首先發生反應的部位，當然是在粒料周圍然後逐次進入粒料內部，因此當混凝土發生鹼質與粒料反應時，混凝土構造物內部之粒料周圍有否暗色的反應圈，亦是判定鹼質與粒料反應的重點之一。

2-6 硬固混凝土鹼質與粒料反應之改善方法

當混凝土構造物發生鹼質與粒料反應時，其表面會有地圖狀的裂縫嚴重時甚至起泡爆裂，因此將影響混凝土原有的設計功能，其強度將會大大的降低，甚至造成構造物崩毀，因此瞭解混凝土構造物有無鹼質與粒料反應為硬固混凝土鹼質與粒料反應改善方法的第一步，當已經確認混凝土構造物有鹼質與粒料反應，而尚不影響結構物安全時應進行下列步驟：

- (1) 利用可行的方法知悉此構造物是否尚合乎原設計需求。
- (2) 考慮是否可能移除環境中的水份，以減緩鹼質與粒料反應的持續作用。
- (3) 進行裂縫填補。
- (4) 進行表面覆層工作。
- (5) 擬訂監測方法，進行定期監測。

目前文獻中對於工地改善混凝土發生鹼質與粒料反應的方法，主要為填補裂縫以及覆層的方法，惟此種施工方式會因材料的品質、施工的良劣以及外在環境的影響與材料的壽命和維修材料與混凝土相容性等問題，而影響其成效。

以覆層方式進行混凝土發生鹼質與粒料反應時之維修機理，主要著眼於混凝土構造物發生鹼質與粒料反應有三項必備因素：

- (1) 混凝土中有足夠的鹼含量
- (2) 混凝土中有足夠的活性矽
- (3) 足夠的水

前述三個要件缺一不可，在已經存在的混凝土構造物中，目前文獻中指出最可行的方法為排除或斷絕混凝土中的水份^(8,11)，而最有效的方法則為表面封阻，因此使用於表面封阻的材料，便是改善混凝土鹼質與粒料反應最重要的因素，其它尚在實驗室研究所提出之方法，尚未見於工地有明顯的成效或是成本昂貴，如電化學法、添加化學藥劑等方法。

2-6-1 混凝土產生鹼質與粒料反應的維修方法

就混凝土構造物產生鹼質與粒料反應的現象而言，水份滲入混凝土內部是一項重要而關鍵的因素，因此阻止水份進入混凝土內部，會是混凝土產生鹼質與粒料反應後，維修方法的一項重要指標，目前混凝土發生鹼質與粒料反應的維修方法包括了下列幾種：

2-6-1-1 表面被覆法

由於水份進入混凝土內部，在鹼質與粒料反應而言是一項重大的指標，因為在鹼質與粒料反應所生成的膠體，會因為吸水而膨脹，導致混凝土構造因為內部壓力無法自行吸收，進而膨脹造成構造物龜裂以釋放內部壓力，因此採行表面封阻法，對於已經產生鹼質與粒料反應的混凝土構造物，在反應初期而言對於防止混凝土劣化有其成效，然而當混凝土因鹼質與粒料反應已經使構造物強度急遽下降及彈性模數降低時，即使表面封阻已有成效，但是結構上的安全考量會是最重要的指標，也就是結構上的安全評估以符合要求後，再行評估改善的可行性，始有成效。目前表面封阻法所使用的材料在文獻中以環氧樹脂以及高分子材料加水泥漿居多，厚度由0.7mm以上不等，惟其成效並不彰顯，資料顯示表面封阻法僅能因為水的隔絕，使鹼質與粒料反應趨緩或致終止，而當水份在進入時，鹼質與粒料反應又行恢復，因此表面封阻的有效性以及封阻材料的耐久性是重要關鍵。

2-6-1-2. 裂縫封阻法

當混凝土構造物由於鹼質與粒料反應，其於混凝土表面會產生裂縫，本法係以加壓的方法將封阻材料灌入裂縫中，其目的之一為防止水份進入混凝土構造物內部，以免內部之膠體吸水而膨脹，此外本法對於已降低之混凝土構造物

之強度，有提升的作用，目前文獻中大部分使用的裂縫封阻材料包括下列幾種：

- (1) 環氧樹脂 (Epoxy)
- (2) 高分子水泥漿 (Polymer cement paste)
- (3) 兩液型或單液型填縫膠

2-6-1-3 裂縫封阻法與表面被覆法合併使用

本法係以前述兩種方法合併使用，先行以灌入的方法將裂縫填塞，再以覆面材料將表面被覆，使用的材料亦如前述，由於封阻和被覆同時施做，因此對於防止水份得進入有較佳的效果，但是在環境中既成的構造物如橋板、橋墩等，其RH值無法有效降低，因此維修材料的耐久性、相容性以及施工品質亦是重要的成效指標，此外使用HMWM (high weight molecular methacrylate)，可延長鋪面構造物的使用年限。

2-6-1-4 其它材料可能抑制的方法

目前有文獻提出以添加鋰化物來抑制鹼質與粒料反應，值得進一步研究。實驗室試驗中有以鋰合物浸泡方式改善鹼質與粒料反應膨脹的行為持續發生，其主要的機理在於雖然鋰和鈉、鉀一樣會和活性矽作用，但是鋰和活性矽作用後所形成之產物，為不溶的性質，因此此化合物不會溶解也不會吸水，當然也就不會有膨脹性的反應，此外在構造物其損壞情況已經到了無法修復或不符合經濟效益時則必須敲除重做，因此混凝土構造物鹼質與粒料反應之調查評估為主要的先期作業。

2-7 混凝土鹼質與粒料反應之檢測方法

2-7-1 ASTM C289

本規範主要係檢測粒料中是否具有與鹼質之反應，分別測定矽濃度 Sc 與氫氧化鈉消耗量 Rc ，再由兩者依所附化學法判斷之標準圖座標位置判別是否為有害、潛在性有害或是無害，如果 Sc 大於 Rc 而 Rc 超過70，則該粒料樣品屬於潛在活性，如果 Sc 大於 $35 + (Rc/2)$ 而 Rc 小於70，則該粒料樣品屬於潛在活性，惟本法並非於所有狀況下均可信賴，另可藉由ASTM C227（砂漿棒法）及ASTM C295

(岩相分析法)綜合評估之。中國國家標準(CNS)粒料之潛在鹼質與二氧化矽反應性試驗法(化學法)總號13618、類號A3354，已於民國85年6月21日施行，主要係引用本法。

2-7-2 ASTM C227

本法係以製作砂漿棒定期量測其伸長量據以與規定之數據比較判斷粒料是否具有活性，其配比如表2-1所示。

表2-1 水泥砂漿棒試驗各粒徑粒料重量百分比

篩 號		佔試驗粒料總重量之百分比(%)
通 過	停 留	
#4 (4.75mm)	#8 (2.36mm)	10%
#8 (2.36mm)	#16 (1.18mm)	25%
#16 (1.18mm)	#30 (600 μ m)	25%
#30 (600 μ m)	#50 (300 μ m)	25%
#50 (300 μ m)	#100 (150 μ m)	15%

試驗時須使用絕乾粒料，其水：水泥：粒料之重量百分比為 0.5：1：2.25，試體之尺寸為25*25*285mm，蒸汽養置24小時後拆模，後置於RH 100% RH、溫度為38℃之養置室中，其膨脹判測標準為3個月大於0.05%、六個月大於0.1%，則視為粒料具有潛在活性。中國國家標準(CNS)水泥與粒料之組合潛在鹼質反應性試驗法(砂漿棒法)總號13619、類號A3355，已於民國85年6月21日施行，主要係引用本法。

2-7-3 ASTM C295

岩相分析主要係利用岩石礦物之偏光特性，依各岩石之光譜、偏光角、晶相及組成成分之不同，藉由偏光顯微鏡再單偏光系統及正交偏光系統進行觀察分析，可將粒料進行分類並判斷其礦物組成，試驗時需將岩石磨製成薄片其製成概述如下

- (1) 將岩石切割成20*30*2 mm的大小。
- (2) 依次用#400、#600、#850、#1000的金鋼砂片將切下的小塊磨

平。

(3) 將載玻片加熱後塗膠並置上已磨平加熱之小塊後，將兩者之氣泡擠出壓平。

(4) 將小塊之岩石面磨平至0.03 mm 止。

粒料中具有鹼質與矽氧礦物反應者詳如下述：

反應礦物：蛋白石、方英石、鱗英石、酸類、中性類、基性火山玻璃、玉髓燧石、隱晶質、粗晶質、大顆粒且結晶格子扭曲或富次生包體之石英、微石英。其反應岩種包括頁岩、砂岩、矽化碳酸岩、燧石、流紋岩、英安岩、玄武岩、千枚岩、板岩、安山岩、石英岩、石英雲母片岩、片麻岩、片麻狀片麻岩、長石砂岩、粉砂岩、火山岩、泥質板岩、粗屑岩、花崗岩、花崗閃石岩、，此外白雲石則為鹼碳酸岩反應岩類。

中國國家標準(CNS)水泥與粒料之組合潛在鹼質反應性試驗法(砂漿棒法)總號13617、類號A3353，已於民國85年6月21日施行，主要係引用本法。

2-7-4 混凝土稜柱體試驗

目前在國外有許多混凝土稜柱體試驗的方法，其試驗方法，條件不一，茲摘錄部份如后⁽⁸⁾：

表2-2 混凝土稜柱體試驗（一般）

	加拿大	南非	英國	水泥混凝土協會
水泥含鹼量	1.25%	1.3%	1%	1%
試體尺寸	75*75*350	75*75*300	75*75*200	50*50*250
養置溫度	38°C	38°C	20%	23°C
養置環境	100%RH	密封養置	100%RH	100%RH
觀測時間	1年		1年	6個月

除前述方法外在丹麥、日本、美國、中國大陸等亦有加速方法，主要係以浸泡溶液或增溫或增壓等方式提早提出判測結果，其中包括砂漿棒以及混凝土稜柱試驗法。

整體而言，混凝土稜柱體的粒料較大，粒料的級距也較不同，因其配比與一般混凝土構造物相同，較接近於實務模擬，惟由於其為混凝土試體因此需要有較大之儲存空間。

第三章 研究規劃與流程

3-1 研究流程

研究流程圖詳圖 3-1所示。

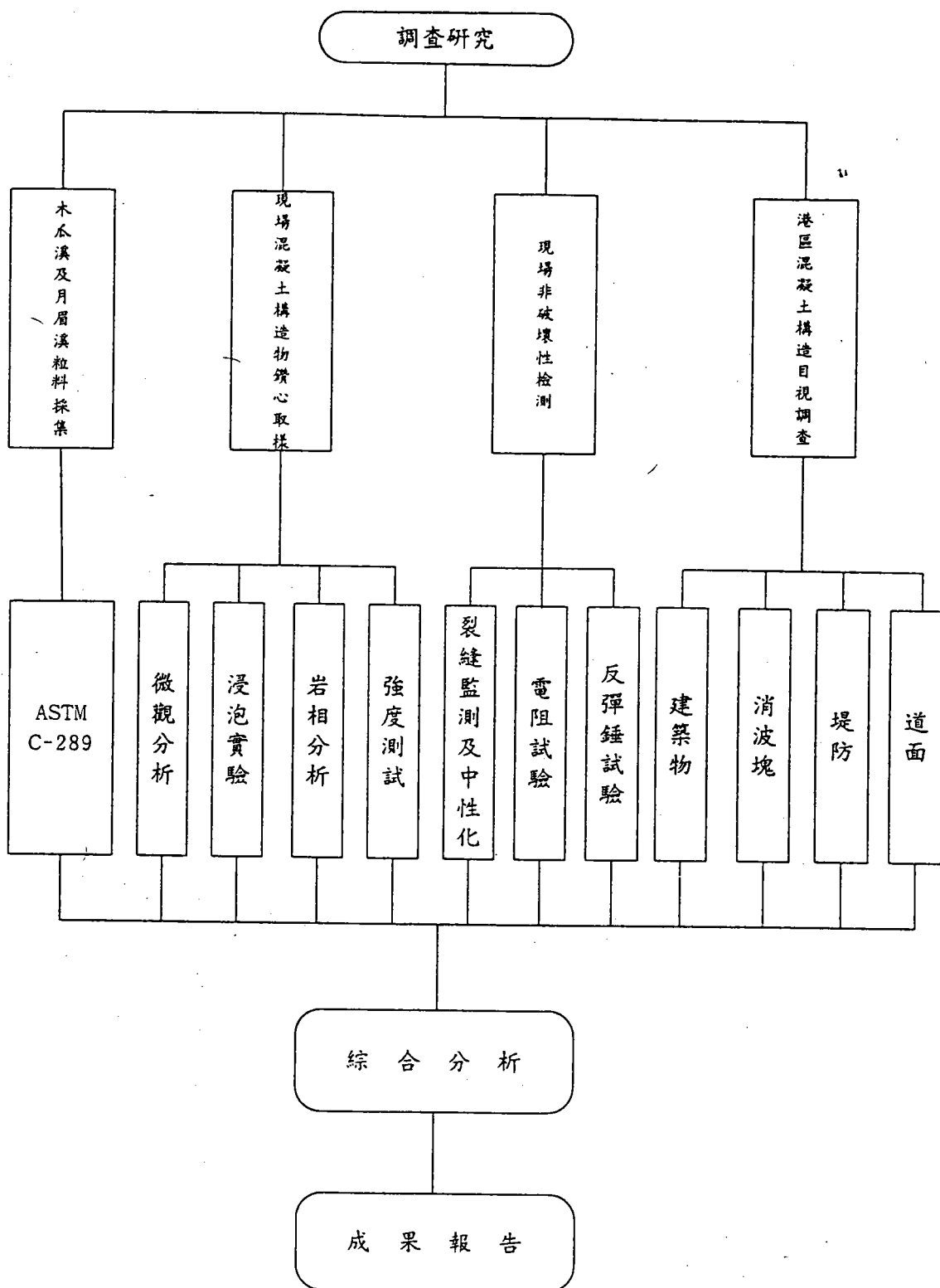
3-2 試驗設備及分析儀器

3-2-1 現場量測設備

1. 混凝土鑽心機
2. 混凝土電阻量測儀
3. 反彈鎚
4. 超音波試驗儀
5. 混凝土中性化試驗設備
6. 照像機

3-2-2 試驗室研究設備

1. 數位式比長儀。
2. 灌置砂漿棒用模具。
3. 壓克力儲存槽。
4. 溫、溼度控制室。
5. 數字型分光光度計。
6. 蒸餾水及去離子水製造機。
7. 電子天平，精度分別為0.01、0.001、0.0001克，均具有自動歸零及校準裝置。
8. 大型及小型鄂碎機。
9. X光繞射分析儀 (XRD)。
10. 掃描式電子顯微鏡 (SEM)。



3-3 調查方法

混凝土中鹼質與粒料反應，主要有三個必備因素包括：(1) 反應系統中含有足夠的鹼量、(2) 含有具活性之粒料、及(3) 周圍環境有足夠的濕度，其機理主要在於水泥水化時會溶出鹼金屬以及氫氧根離子，此時若粒料具有活性則其矽氧鍵結將會遭到氫氧根離子的攻擊而破壞，並因電荷平衡使鹼金屬與矽產生結合生成鹼矽膠體，此種鹼矽膠體在有水的環境下會吸水而膨脹，造成混凝土內部產生膨脹壓力，當此內部膨脹壓力超出混凝土所能承受的範圍時，將會造成混凝土表面產生地圖狀的裂縫，或起泡爆裂的現象，因此鹼質與粒料反應可由混凝土表面徵候進行初步判測。

3-3-1 目視調查

由於鹼質與粒料反應可從混凝土構造物表面的徵候初步判測，因此本研究首先對混凝土構造物的表面進行初步目視調查。鹼質與粒料反應的徵候在無筋混凝土表面主要包括：地圖狀的裂縫、起泡爆裂、以及可能有白色或無色濕點狀的滲出物；在鋼筋混凝土部份則會產生平行於主鋼筋的裂縫，亦會有白色或無色濕點狀的滲出物。本研究在調查前動員相當人力，進行訓練後才對花蓮港區混凝土構造物進行全面性的目視檢測，範圍包括新舊東堤、西堤、碼頭、路面及倉庫辦公大樓。研究流程圖如圖3-1所示，其結果詳後述。

3-3-2 現場非破壞性檢測

為求研究之嚴謹，本研究經目視調查後，篩選新、舊東堤及西堤等，在現場進行多種非破壞性檢測，詳細位置如附錄一所示。檢測種類及目的詳如下述：

3-3-2-1 強度測試錘

本項試驗之目的，主要係藉由強度測試錘所得之數據，初步瞭解港區混凝土構造物之表面硬度，除了與原始設計強度進行分析比較外，並與鑽心試體之抗壓強度試驗結果進行研究探討，藉以瞭解混凝土強度變化和鹼質與粒料反應間之可能關係。

3-3-2-2 電阻試驗

由於混凝土構造物內部，若含水量增加和離子濃度增加，混凝土的電阻會隨之降低，若有微細裂縫時，其所測之電阻值與無微細裂縫混凝土構造物所測之電阻值不同，因此藉量測混凝土的電阻值可間接印證鹼質與粒料反應。

3-3-2-3 埋設裂縫監視測點

鹼質與粒料反應如前所述會造成混凝土表面產生裂縫，而且在反應條件未改變的環境下，其原來所生成的裂縫寬度會隨時間增加，直至其裂縫完全釋放混凝土內部鹼矽膠體所生成的膨脹壓力為止，因此藉由裂縫寬度監測可瞭解混凝土中鹼質與粒料反應的發展情況，進而併同其他試驗進行較嚴謹的研判。

3-3-2-4 混凝土中性化試驗

本項試驗主要係探討混凝土構造物其中性化的程度，並藉此與其他試驗相互比較分析，本實驗方法主要係利用電鑽或鐵鎚敲取混凝土結構體表面小塊試體，以酚太指示劑噴灑觀測並量取其中性化深度進行判測之。

3-3-3 鑽心取樣試驗

為補各項非破壞性檢測之不足，本項試驗主要目的在於現場進行鑽心取樣，並將試體攜回實驗室進行相關之試驗，期與非破壞性試驗所得之結果相互印證。取樣位置詳如第四章結果與討論表4-9中所標示。

鑽心試體實驗室試驗項目詳如下述：

3-3-3-1 岩相分析

粒料具有活性為混凝土鹼質與粒料反應的必要條件之一，本項分析主要係針對花蓮港區混凝土構造物擇要進行鑽心，並將鑽心試體攜回實驗室進行切片，並委請地質專家學者鑑定該批鑽心試體中之岩石種類，並與已有活性粒料記錄或證實為活性粒料之岩石種類進行比對，藉以瞭解試體中之粒料是否有具活性的情形，並配合其他相關實驗彙整探討。粒料中具有活性成分會與鹼金屬反應者包括：

- (1) 蛋白石 (opal)
- (2) 鱗石英 (tridymite)
- (3) 矽質 (siliceous)
- (4) 部份中性火成玻璃 (intermediate volcanic glass)
- (5) 燧石 (chert)
- (6) 玻璃質至隱晶質酸性火成岩 (glassy to cryptocrystalline acid volcanic rocks)
- (7) 合成矽質玻璃 (synthetic siliceous glasses)
- (8) 泥板岩 (argillites)
- (9) 千枚岩 (phyllite)
- (10) 變質硬砂岩

- (11) 片岩 (schist)
- (12) 片麻岩 (gneiss)
- (13) 片麻狀花崗岩 (gneissic granite)
- (14) 脈石岩 (vein quartz)
- (15) 石英岩 (quartzite)
- (16) 砂岩 (sandstone)

3-3-3-2 抗壓試驗

由於花蓮港區的新建、舊有混凝土構造物均有之，兩者已使用時間相隔達數十年之久，因此擬藉由本項試驗瞭解其強度變化情形，並進一步探討其是否已受鹼質與粒料反應的影響，同時並與強度測試錘所得的表面硬度資料進行探討分析。

3-3-3-3 X光繞射分析 (XRD)

一般X光繞射分析係應用Bragg公式，以X光發射管發出一已知波長之X光射線，經狹縫過濾形成夾角很小的平行光，使其照射於試體上，並利用接收器配合測角器，量測獲得最大X光射線強度時之角度，再由公式算出結晶體之格子面間隔距離 d ，即可根據此一關係探討結晶體之構造特性，並進行礦物鑑別及定性分析。藉由XRD分析可鑑定混凝土化性（化合物）變化，諸如有害物的形成...等，進一步探討可能病變原因。

3-3-3-4 掃描式電子顯微鏡分析 (SEM)

掃描式電子顯微鏡 (Scanning electron microscopy，簡稱SEM)，係利用電子槍發射高能量聚焦電子光束，以磁力線圈的作用有系統的將電子光束在試體表面來回掃描，當電子光束撞擊試體表面時會在附近產生很多訊號，這些訊號基本上是低能階之次光電子，此刻若以偏壓訊號收集器來偵測訊號，則可將訊號傳輸顯現於陰極射線管上，如此可以得到試體表面外形或晶像之外觀，即所謂外觀型態 (Morphology)。藉由SEM分析可微觀混凝土孔隙結構分佈、晶相變化，以鑑定可能病變原因。

3-3-3-5 ASTM C289 化學法粒料活性檢測

ASTM C289主要係檢測粒料中是否具有與鹼質反應的活性，分別測定矽濃度 Sc 與氫氧化鈉消耗量 Rc ，首先先製作檢量曲線，之後將欲進行試驗之粒料篩取沖洗烘乾後分置於耐鹼耐熱之反應容器中，並注入1N氫氧化鈉25ml後密封，經依規定之存放時間及環境後取出冷卻，並分別使用鉬酸鉍及草酸溶液充分混勻各量瓶中之試液再由兩者依ASTM C289所附化學法判斷之標準圖座標位置判別是否為有害、潛在性有害或是無害，如果 Sc 大於 Rc 而 Rc 超過70，則該粒料樣品屬於潛在活性，如果 Sc 大於 $35 + (Rc/2)$ 而 Rc 小於70，則該粒料樣品屬於有害。

粒料以氧化鈉溶出之矽離子於酸性溶液中(特別是 pH1.2~1.5)會與鉬酸子反應而生成黃綠色之鉬酸矽醋鹽，此化合物之色澤深深淺與矽成分在一定濃度下大致成一正比例關係，因此利用光線吸收度的原理，事先配置已知矽濃度之多種溶液，以分光光度計測定光線吸收度，製作出一條檢量曲線(Calibration curve)，試體中溶出之矽濃度即可以分光光度計配合檢量曲線求出，氫氧化鈉之消耗量則是以滴定方式測定。

(1) 檢量曲線製作

- a. 以矽酸鈉溶於水中，配製二氧化矽標準溶液(濃度為 10mmol/l)。
- b. 溶解 10g 之鉬酸鉍 $((\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O})$ 於 100ml 之水中。
- c. 溶解 10g 含兩個結晶水之草酸於 100ml 之水中。
- d. 於 100ml 量瓶中，分別加入定量之二氧化矽標準溶液，配製成一系列不同濃度之二氧化矽溶液，濃度範圍由 0.0-0.05 mmol/l。
- e. 各個量瓶中，分別加入 2ml 之鉬酸鉍溶液及 1ml(1+1)濃鹽酸溶液，以圈旋方式搖晃量瓶將試液均勻混溶之。於室溫下將溶液靜置 15 分鐘後，加入 $1.5 \pm 0.2\text{ml}$ 之草酸溶液，再以蒸餾水稀釋至 100ml，然後充分混合各量瓶中之試液。靜置 5.0 ± 0.1 分鐘後，分別注入於波長為 410nm 之分光光度計吸槽內，分別測定其光線吸收度。
- f. 將各已知濃度之矽溶液與其光線吸收度製作成檢量曲線。

(2) 量測矽濃度(Sc)

- a. 將粗粒料粒料利用小型顎碎機打碎減小粒料粒徑，以通過標稱孔寬為 4.75mm(#4)之試驗篩。再以類似篩砂之方式篩分打碎之粗粒料，截取粒徑大於 $150\mu\text{m}$ (#100)之部分，而篩除通過 $150\mu\text{m}$ 之部份。為確保所有粒徑小於 $150\mu\text{m}$ 之細料均已篩除，須將樣品於標稱孔徑為 $150\mu\text{m}$ 之試驗篩上沖洗，沖洗後之樣品以 1055°C 之溫度烘乾 20 ± 4 小時。
- b. 稱取三份各 $25 \pm 0.05\text{g}$ 具代表性之試樣，分置於只耐鹼、耐熱的反應容器中，以吸管各加入 25ml(1N 濃度)之氫氧化鈉溶液，而於第四只反應容器中，亦用吸管注入 25ml 相同濃度之氫氧化鈉溶液充當空白試驗組，將四只容器封蓋，並緩

緩旋搖容器使溶液中之空氣逸出。容器封蓋後立即將其置於 $80 \pm 1.0^{\circ}\text{C}$ 之恆溫水槽中，經過 $24 \pm 1/4$ 小時後，將反應容器由恆溫水槽中移出，以流動之自來水沖浸冷卻 15 ± 2 分鐘，使反應容器溫度降低至 30°C 以下。

- c. 反應容器冷卻後立即將其打開，以過濾器及適當之濾紙過濾濾液，分離粒料殘渣。打開抽氣器調整其真空度至大約 51Kpa ，過濾之操作宜至濾液濾出之速率慢至大約每 10 秒 1 滴止，過濾完成後，立即攪拌濾液以確保其均勻性，然後以吸管抽取 10ml 之濾液至 200ml 之量瓶內，並以去離子水將其稀釋至 200ml ，此溶液稱為甲溶液。
- d. 於約含半滿純水之 100ml 量瓶中加入甲溶液 10ml ，分別加入 2ml 之鉬酸鉍溶液及 1ml 之 $(1+1)$ 濃鹽酸溶液，以圈旋方式搖晃量瓶混溶之。於室溫下將溶液靜置 15 分鐘後，加入 $1.5 \pm 0.2\text{ml}$ 之草酸溶液，再以去離子水稀釋至 100ml ，然後充分混勻各量瓶中之試液。靜置 5.0 ± 0.1 分鐘後，放入波長為 410nm 之分光光度計之吸收槽內，分別測定其光線吸收度。
- e. 與刻度典曲線比對，求出二氧化矽濃度 C ，並計算 S_c 。若試液之透光度低於 30% 或高於 50% 時，則所抽取甲溶液之量，須分別使用較少或較多於 10ml 之量。
- 甲溶液中所含溶解二氧化矽濃度，可依下式計算。

$$S_c = 20 \times (100/V) \times C$$

式中

S_c ：甲溶液中二氧化矽之濃度(mmol/l)

V ：甲溶液之量(ml)

C ：由分光光度計測得甲溶液中二氧化矽之濃度(mmol/l)

(3) 量測溶液消耗之鹼量(R_c)

a. 試驗步驟

以吸管吸取甲溶液 20ml ，移入一只 125ml 之三角燒瓶內，加入 2 或 3 滴之酚酞指示劑(試液顏色為紅色)，以 0.05N 濃度之鹽酸溶液滴定至滴定終點(紅色消失)止。

b. 溶液消耗鹼量之計算

$$R_c = (20 \times N/V_1)(V_3 - V_2) \times 1000$$

式中

R_c ：溶液消耗之鹼量(m mol/l)

N ：鹽酸滴定液之濃度($0.05N$)

V_1 ：甲溶液吸取量(20ml)

V_2 ：試樣達滴定終點所耗用鹽酸之體積(ml)

V_3 ：空白試驗組達滴定終點所耗用鹽酸滴定溶液之體積(ml)

將上述試驗所測得之 Sc 與 R_c 值，繪於 ASTM C 289 所附之化學法判斷標準圖上，由 Sc 與 R_c 之交叉座標點落於圖中之區域，即可判斷粒料是否具鹼反應性。

3-3-3-6 加速浸泡實驗

為瞭解花蓮港區混凝土構造物將來可能的膨脹情形，本研究將鑽心試體放入不同的環境加速其鹼質與粒料反應。鑽心試體進行適當裁切後，在其表面粘設測點並量得其長度初始值後，將試體置於攝氏38度100%RH的環境中以及1N NaOH的溶液中，定期分別量測試體之長度變化，藉以進行分析研究，其設置之方法及目的如下述：

(1) 置於38°C 100%RH環境

依混凝土發生鹼質與粒料反應的環境條件而言，主要係在一定的環境濕度以上，而以100%RH之環境為最，因此本試驗利用從花蓮港取回之鑽心試體進行裁切，並於試體表面黏置測點，分別以其置放前之長度與置放後一個月、三個月、六個月、一年進行試體伸長量之分析，瞭解試體伸長量變化的情形，其置放環境溫度並固定在38°C。

(2) 浸泡於1N NaOH溶液中

有鑑於花蓮港區混凝土構造物有的已經使用數十年，其鹼質與粒料反應可能已經達到相當的程度，例如鹼矽膠體已可自由滲出而不致於讓試體再因膠體產生的膨脹壓力導致於試體有明顯的伸長，因此本項研究嘗試以加速的方式，即將試體裁切並黏貼測點後，浸泡於38°C 1N NaOH的溶液中，嘗試以較高之鹼性環境促使試體之鹼質與粒料反應加速進行。

3-3-4 花蓮木瓜溪及月眉溪砂石取樣

依據花蓮港務局全力協助中所提供之資料顯示，花蓮港混凝土構造物所使用之粒料，絕大部份係由木瓜溪及月眉溪取得，因此本調查研究亦針對此兩溪之砂石進行採樣，進行實驗室之試驗研究，主要目的在於瞭解該兩溪經取樣之砂石是否具有活性，供作研析判測，本項實驗依據ASTM C289進行，並配合岩相分析以求嚴謹。

3-3-5 國內水泥含鹼量調查

國內目前水泥製造廠頗多，且並非集中於一地區，所使用之設備也非一致，對於所產製之水泥其含鹼量是否超過ASTM C150規定(eq. $\text{Na}_2\text{O} < 0.6\%$)，為研究鹼質與粒料反應者所必須瞭解，本項調查擬就目前台灣地區各水泥廠之一型水泥進行含鹼量調查及分析，期望藉此瞭解國內發生鹼質與粒料反應之可能性。

第四章 結果與討論

4-1 現場目視調查

本項研究之現場目視調查部份為期兩天，從民國八十六年九月三日至八十六年九月四日止共兩日，經進行實地調查、拍照後攜回學校進行比對，結果詳下述：

4-1-1 混凝土道路部份

花蓮港區混凝土道路主要為堤防下之混凝土道路及碼頭鋪面，經調查損壞情形，其破壞型態包括了橫向裂縫、縱向裂縫、角裂縫、崩裂、坑洞、毛裂、拱起、碎裂等模式，經整理除了碎裂係由海浪拍打撞擊所造成者外，其餘之損壞模式經分析均與設計及施工有極大之相關性，本項損壞雖與本研究主題無極大相關，但是為港區維護安全，茲簡述大略之維修方法建議供作參考（詳第五章、結論及建議事項）。

本年因颱風所造成的破壞，主要係在新東堤堤身部份，現場明顯可見 PC 胸牆整齊斷裂及消波室隔艙鋼筋遭拉斷的痕跡，其破壞模式經研判應屬施工縫斷裂及拉力破壞所致，亦即 PC 分層灌築時未做剪力樺外，設計之強度不足以承受如此的外力，也是造成部份堤防傾倒原因之一，撞及堤面導致堤面有破裂等現象以及道路緣石毀損的情形，部份遭海浪撞擊損毀之巨大胸牆混凝土塊，存留於道路上其餘均掉落海中，現場情況相當嚇人，所幸並未釀成巨災，惟應已足以讓人心生警惕，當然如果因 ASR 先導致混凝土弱化的情況，進而因巨浪之衝擊力引發破壞，則在未來進行復舊規劃時或新建設計上宜加以考量。

4-1-2 防波堤及消波塊部份

4-1-2-1. 新東堤

新東堤屬於港務局第四期擴建部份，其建造時間自民國 67 年 7 月至民國 80 年 12 月止，全長共 1837 公尺，其損壞模式包括了伸縮縫損壞，不規則裂

縫圖形狀裂縫等，其中與本研究有關之裂縫徵候者，新東堤部份不在少數，可以很清楚的看到其混凝土表面圖形狀的裂縫狀況，部份亦有白色的滲出物，基本上與 ASR 之表面徵候極為相符，由於在全區進行目視調查後，經比較以本區有可能為 ASR 的機率及範圍最大，因此後續的各項檢測也以此區最多。

4-1-2-2 舊東堤

舊東堤前段（即 $0^K + 000 \sim 0^K + 200$ ）係日據時期民國 26 年所製造，中段（即 $0^K + 200 \sim 0^K + 000$ ）係民國 83 年起分四年全部翻修加固，尾段（即 $1^K + 000 \sim 1^K + 330$ ）除胸牆係民國 69 年加高外，沉箱仍為日據時期所建造。整體而言比起新東堤其龜裂範圍似較輕微，但是部份區域仍有地圖形之裂縫然其滲出物較為明顯，基於其所處環境相同條件下研判舊東堤有 ASR 的範圍應較小，然而必須注意的是該區混凝土老化的現象。

4-1-2-3 西堤

西堤亦屬於港務局第四期擴建部份，其建造時間自民國 69 年 4 月至民國 78 年 1 月止，全長共 1050 公尺，其堤身間或有部份之裂痕但整體而言並不嚴重，本次調查研究亦取得西堤部份鑽心試體待實驗結果再做判斷。

4-1-2-4 消波塊部份

港區消波塊在本次調查中其破壞型態，明顯看到有地圖形的裂縫，與鹼質與粒料反應的徵候頗為相符，而且其裂縫寬度大小不一，亦顯示其裂縫有成長的趨勢，而且西堤全區 10 噸鼎型塊及 20 噸雙 T 塊有圖形狀之裂縫者為數不少，部份甚至有滲出物的情形，值得注意的是部份裂損相當嚴重，基於消波塊的功能性，誠然消波塊損壞了可以置新，站在經濟的觀點如果使用時間未達設計年限豈不可惜，此外站在維護港區安全而言，如果過多的消波塊有相當嚴重的裂損，在較大的風浪中分離降低了消波功能，造成堤防崩損進而影響港區的安全則將得不償失。再者依據花蓮港務局近五年主要工程維修統計表得知，曾製拋 496 個無筋之 30 噸林克塊，其目的在補充歷年流失之災損，其使用之水泥為波特蘭二型水泥，砂石來源為木瓜溪，強度為表列各處維修中之最高（ 280kg/cm^2 ），該型林克塊係民國 85 年 5 月間所吊放，施工位置接近堤端（即 $0^K + 847 \sim 0^K + 945$ 之間）其顏色與西堤原吊排之 20 噸雙 T 型消波塊有別，根據目視研判原吊排之 20 噸雙 T 型消波塊裂損相當嚴重而且

且其裂損徵候與 ASR 極為符合，因此本區亦特別鑽心取樣進行實驗室試驗。

4-1-3 建築物部份

花蓮區漁會建築物，在本次調查中所發現的損壞，包括了鋼筋外露，圖形狀龜裂、保護層剝落等現象，其中鋼筋外露與保護層剝落較屬施工等因素，而圖形狀龜裂則有屬於 ASR 的可能，倉庫建物損壞情形較舊辦公區輕微，此外新辦公大樓部份由於係屬新建築物，其損壞跡象並不明顯。

4-2 非破壞性檢測

依據非破壞性檢測實驗結果，茲分析如下：

4-2-1 電阻值

本次量測電阻值的混凝土構造物包括西堤堤身、新東堤堤身以及舊東堤堤身。西堤共進行五組之電阻檢測，結果如表 4-1 所示，其電阻值除了編號 W11 為 8.6 外其餘均超過 10，而舊東堤堤身之電阻測試值則均超過 10，比起新東堤而言該兩地區之堤身為使用較久之構造物，而新構築之新東堤堤身本身電阻值則顯現頗大的高低差異，在十組測試值中小於 10 的佔有八組，依據圖一混凝土電阻測試值大小的性質來看，新東堤雖然是較新構築之混凝土構造物，但是電阻值相對較小，顯示其電阻值較小之原因得討論，對照表 4-9 花蓮港區混凝土構造物鑽心試體強度試驗值，亦可看出舊東堤堤頂的混凝土鑽心試體強度，較新東堤的鑽心試體强度高。

4-2-2 反彈錘試驗

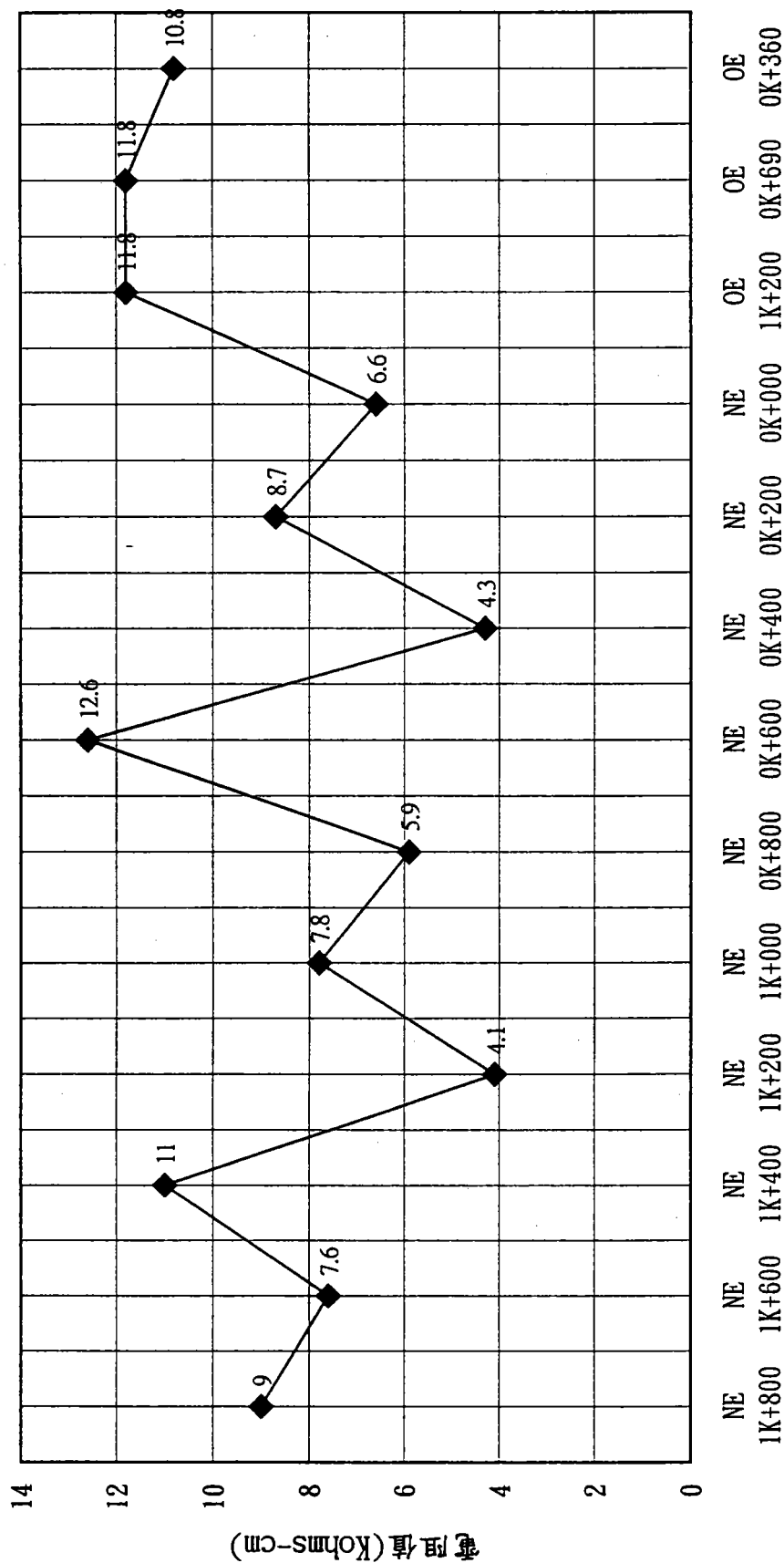
本項實驗主要係施測於東堤及西堤兩處，其中包括東堤堤身、東堤下路面、西堤堤身、西堤堤頂、消波塊等處，結果如表 4-3～表 4-6 所示，以東堤而言舊東堤堤身以及其堤下路面之表面硬度有偏低的情形，西堤部份其堤身大致維持在設計強度 (210Kg/cm^2) 以上，而西堤堤面則有偏低的情形五處檢測位置有四處僅為設計之 85% 或更低此現象亦有可能是因為堤面較易積存含有鹽分的水，使混凝土表面易受到風化和侵蝕，導致反彈錘此種偏重混凝土表面硬度的試驗產生誤差。消波塊部份其強度則屬正常值以上。

表 4-1 花蓮港區混凝土構造物電阻實驗值

	位置	電阻值 (KΩ-cm)
新 東 堤	NE 1 ^K +800	9
	NE 1 ^K +600	7.6
	NE 1 ^K +400	11
	NE 1 ^K +200	4.1
	NE 1 ^K +000	7.8
	NE 0 ^K +800	5.9
	NE 0 ^K +600	12.6
	NE 0 ^K +400	4.3
	NE 0 ^K +200	8.7
	NE 0 ^K +000	6.6
舊 東 堤	OE 1 ^K +200	11.8
	OE 0 ^K +690	11.8
	OE 0 ^K +360	10.8
西 堤	W1	19.9
	W7	10.8
	W11	8.4
	W19	17.5
	W22	12.9
備註	NE—新東堤 OE—舊東堤 W —西堤	

表 4-2 電阻係數與腐蝕速率之關係

電阻係數 (KΩ-cm)	鋼筋腐蝕速率
<5	非常高
5-10	高
10-20	較低
>20	非常低



檢測位置

圖4-1 花蓮港東堤身混凝土電阻值

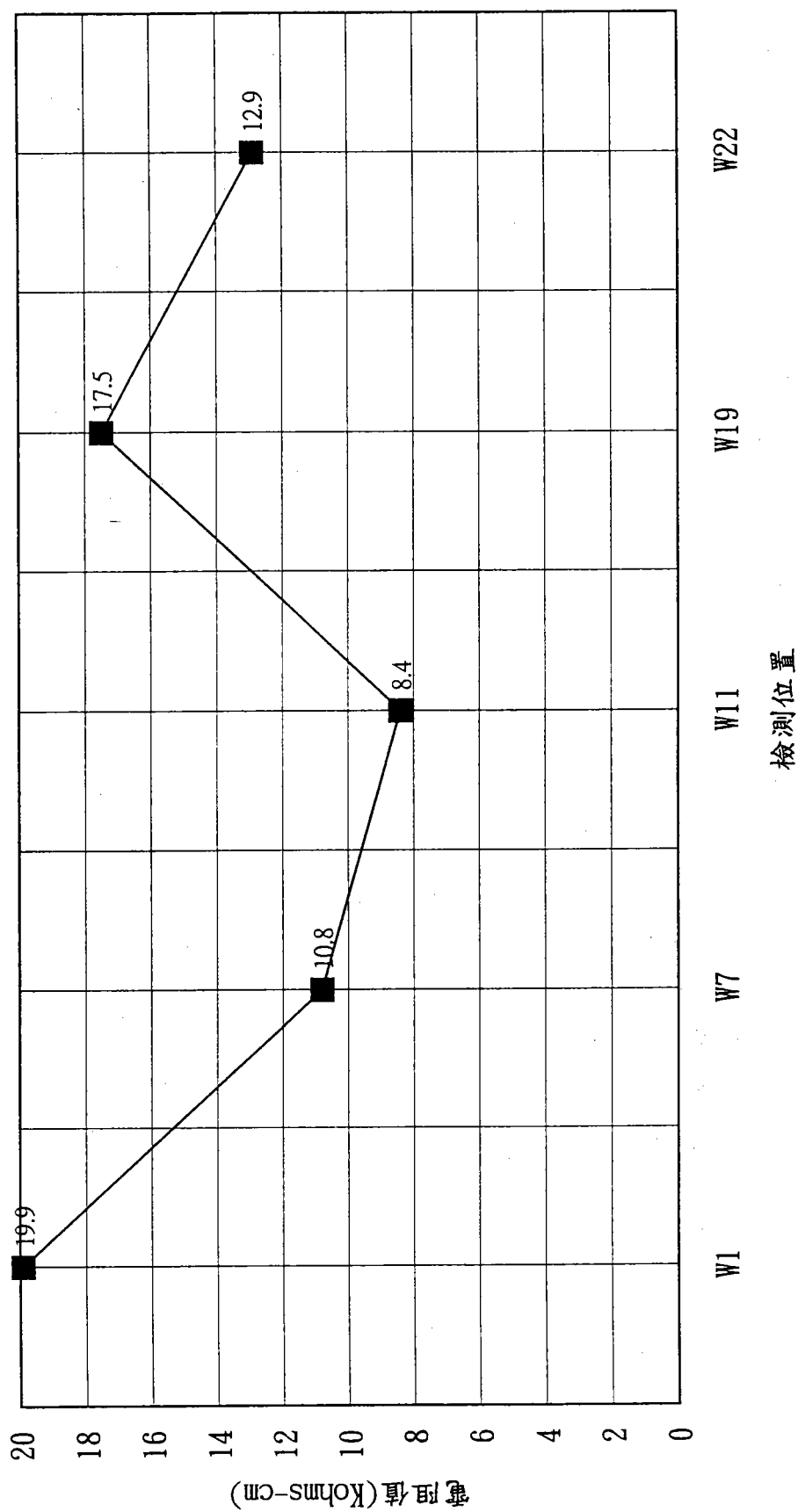


圖4-2 花蓮港西堤堤身混凝土電阻值

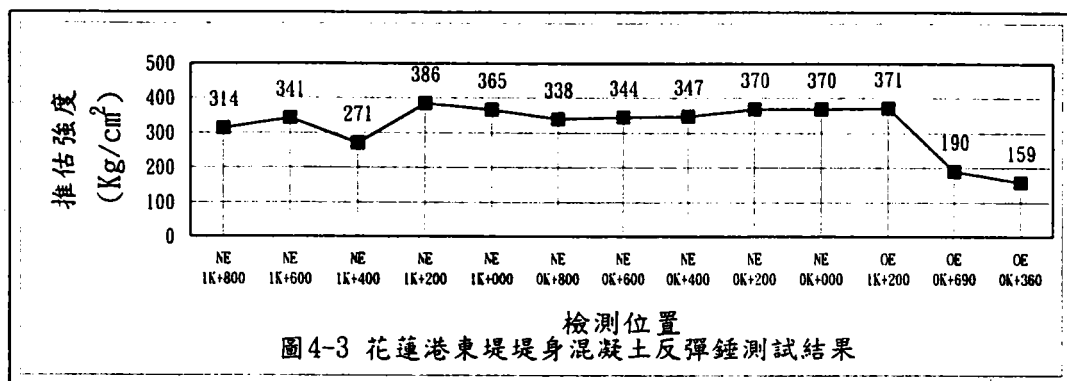


表 4-3 反彈錘測試結果(東堤堤身)

檢測位置	NE 1K+800	NE 1K+600	NE 1K+400	NE 1K+200	NE 1K+000	NE 0K+800	NE 0K+600	NE 0K+400	NE 0K+200	NE 0K+000	OE 1K+200	OE 0K+600	OE 0K+360
反彈值	37.52	39.93	34.63	42.17	40.89	39.16	39.55	39.75	41.17	41.17	41.23	28.92	26.75
推估強度 Kg/cm ²	314	341	271	386	365	338	344	347	370	370	371	190	159

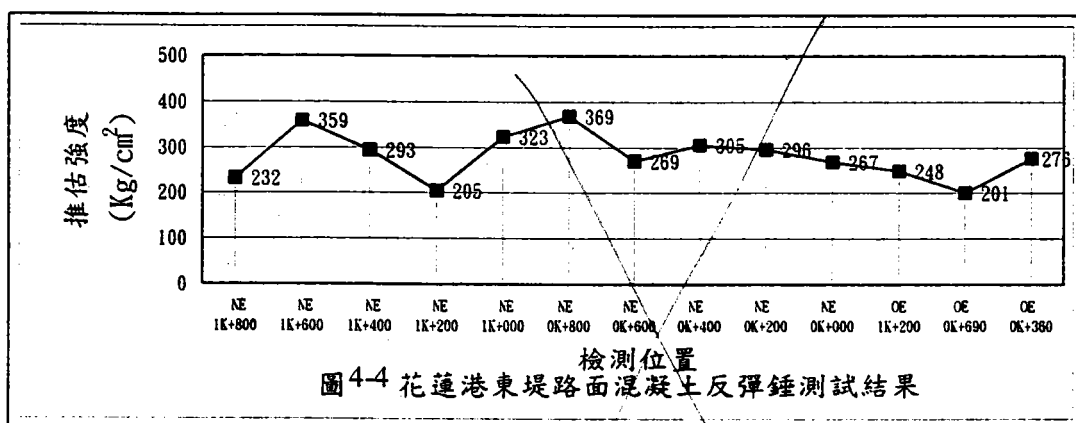


表 4-4 反彈錘測試結果(東堤路面)

檢測位置	NE 1K+800	NE 1K+600	NE 1K+400	NE 1K+200	NE 1K+000	NE 0K+800	NE 0K+600	NE 0K+400	NE 0K+200	NE 0K+000	OE 1K+200	OE 0K+600	OE 0K+360
反彈值	31.9	40.5	36.2	30	38.1	38.1	41.1	34.5	36.9	36.3	34.4	29.7	35
推估強度 Kg/cm ²	232	359	293	205	323	369	269	305	296	267	248	201	276

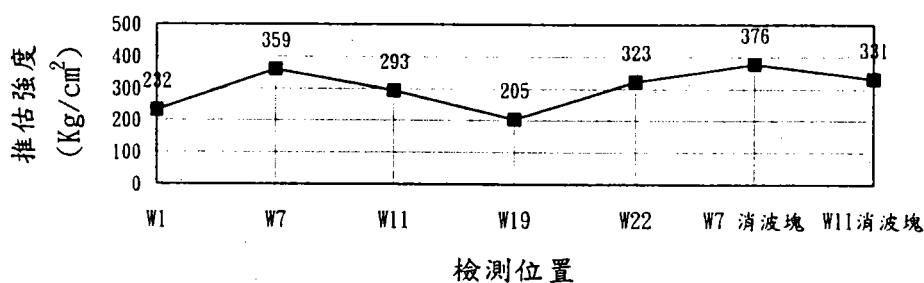


圖4-5 花蓮港西堤堤身、消波塊混凝土反彈錘測試結果

表 4-5 反彈錘測試結果(西堤堤身、消波塊)

檢測位置	W1	W7	W11	W19	W22	W7 消波塊	W7 消波塊
反 彈 值	31.9	40.5	36.2	30	38.1	41.5	38.7
推估強度 Kg/cm ²	232	359	293	205	323	376	331

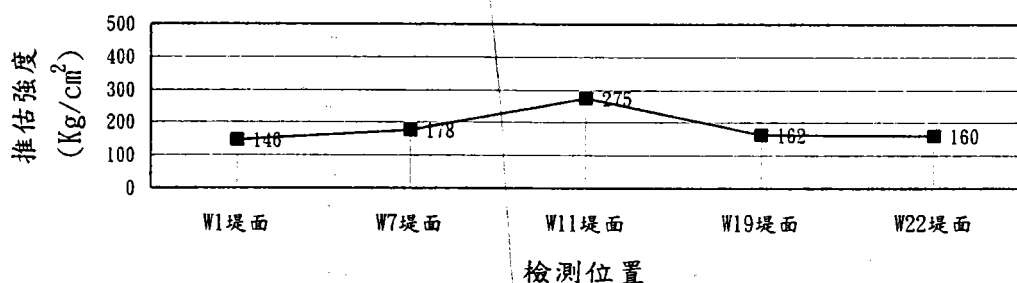


圖4-6 花蓮港西堤堤面混凝土反彈錘測試結果

表 4-6 反彈錘測試結果(西堤堤面)

檢測位置	W1	W7	W11	W19	W22
反 彈 值	25.2	27.8	35	26.5	26.3
推估強度 Kg/cm ²	146	178	275	162	160

4-2-3 中性化試驗

花蓮港區混凝土構造物中性化程度經試驗結果詳如表 4-7 所示，整體而言防波堤堤身之中性化程度較路面為高，若以位置區分，新東堤之中性化程度較舊東堤嚴重，而且新東堤 0^k+800 至 1^k+800 之間堤身中性化深度小則 4mm 大至 10 mm，比起蘇澳港中性化程度約 2 mm 而言有兩倍以上的差距，雖然本次實驗中性化深度最大者僅為 10 mm 尚不屬最嚴重，但是以建造時間觀察，新東堤屬較新之構造物，而其中性化深度卻相對最深，此現象值得注意。

4-2-4 裂縫量測

4-2-4-1 裂縫深度量測

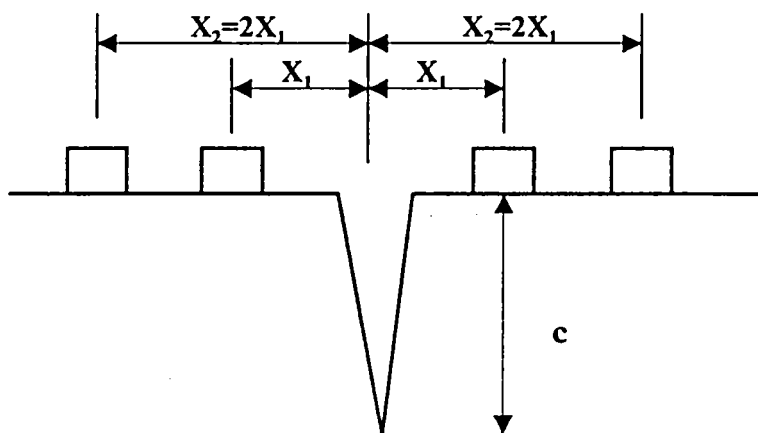
本研究嘗試以超音波儀器進行裂縫深度量測，量測位置如圖 4-7、4-8 所示，整體而言裂縫深度量測值最小在 1.2 公分，最大在 11 公分左右，如表 4-8 所示，基本上鹼質與粒料反應其裂縫圖徵並不單純，除外部有不規則的圖形狀裂縫外，內部亦會有許多微細裂縫，因此所測得的裂縫資訊以鹼質與粒料反應而言，值得更深一層之研究與解析，以確實能將此項檢測技術實際運用於鹼質與粒料反應之構造物上。

4-2-4-2 裂縫寬度量測

本次研究所做之現地裂縫寬度量測，經分析其結果無法解析其寬度變化情形，可能原因包括測點產生不正常的鬆動，部份因鹼質與粒料反應所產生之裂縫寬度已達到足以釋放內部產生的應力，以及各次量測時環境溫度所產生之影響等。

表 4-7 花蓮港港區混凝土構造物中性化檢測結果

類別 位置	中性化深度 (單位: mm)			平均值 (mm)	備註
NE 0k+000	2	4	4	3.33	堤身
	2	2	4	2.67	路面
NE 0k+200	3	4	3	3.33	堤身
	2	3	2	2.33	路面
NE 0k+400	10	3	5	6.00	堤身
	4	3	4	3.67	路面
NE 0k+600	3	2	2	2.33	堤身
	2	2	2	2.00	路面
NE 0k+800	12	11	7	10.0	堤身
	9	8	3	6.67	路面
NE 1k+000	6	3	4	4.33	堤身
	5	4	8	5.67	路面
NE 1k+200	4	4	4	4.00	堤身
	2	3	3	2.67	路面
NE 1k+400	5	5	6	5.33	堤身
	4	1	2	2.33	路面
NE 1k+600	5	5	5	5.00	堤身
	5	4	4	4.67	路面
NE 1k+800	5	6	4	5.00	堤身
	3	3	3	3.00	路面
NE 0k+430	3	3	3	3.00	路面破壞處
OE 0k+360	2	1.5	0.5	1.33	堤身
	1	0.5	0.5	0.67	路面
OE 0k+690	3	2	3	2.67	堤身
	2	2	2	2.00	路面
OE 1k+200	4	3	4	3.67	堤身
	4	5	4	4.33	路面
W1	10	4	5	6.33	堤身
	2	5	8	5.00	堤面
W7	2	2	2	2.00	堤身
	2	10	2	3.67	堤面
W11	3	2	3	2.67	堤身
	3	2	2	2.33	堤面
W19	10	10	5	8.33	堤身
	7	8	8	7.67	堤面
W22	5	6	4	5.00	堤身
	5	2	3	3.33	堤面



裂縫深度：

$$C = X_1 \sqrt{\frac{4T_1^2 - T_2^2}{T_2^2 - T_1^2}}$$

說明：C=裂縫深度

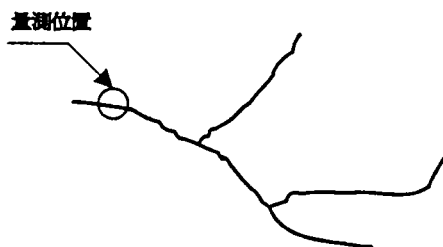
X_1 =第一次量測時探頭與裂縫之距離(cm)

T_1 =第一次量測時超音波傳遞時間(sec)

X_2 =第二次量測時探頭與裂縫之距離(cm)

T_2 =第二次量測時超音波傳遞時間(sec)

NE 0K+370 胸牆



NE 0K+360 堤頂

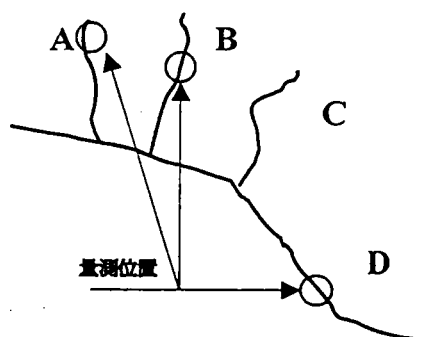
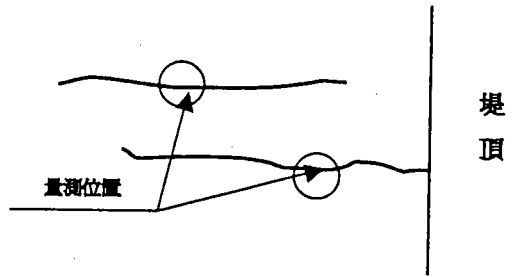
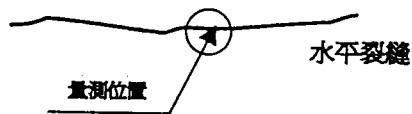


圖4-7 花蓮港港區混凝土結構物裂縫深度量測位置(1)

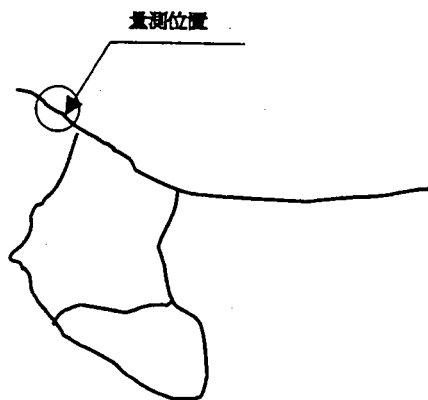
NE 0K+500 堤頂轉角



NE 0K+350 胸牆



西堤 W5 消波塊



西堤 W7 胸牆

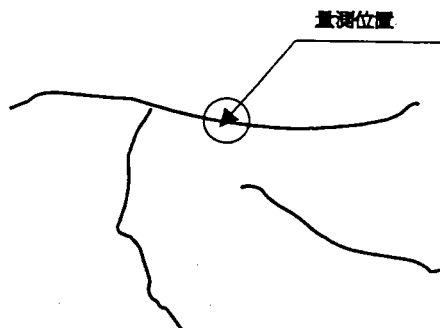


圖4-8 花蓮港港區混凝土結構物裂縫深度量測位置(2)

表4-8花蓮港港區混凝土結構物裂縫深度量測

位置	$X_1(\text{cm})$	$T_1(\text{s})$	$X_2(\text{cm})$	$T_2(\text{s})$	裂縫深度 (cm)	備 註
NE 0K+370胸牆	5	92.1	10	113.8	10.8	
NE 0K+360堤頂A點上30cm處	5	89.2	10	122.4	7.7	
NE 0K+360堤頂D點	5	97.5	10	153.4	5.1	
NE 0K+360堤頂註記處	5	75.5	10	136.7	2.8	
NE 0K+500堤頂轉角1	5	85.2	10	116.4	7.8	
NE 0K+500堤頂轉角2	5	39	10	72.6	2.3	
NE 0K+350胸牆水平裂縫	5	102.5	10	138.6	8.1	
西堤W7胸牆	5	47.3	10	92.6	1.2	
西堤消波塊	5	92.2	10	173.2	2.2	

說明：使用儀器：超音波量測儀

4-3 鑽心取樣試驗

4-3-1 鑽心試體抗壓強度

本項實驗係將取回之直徑為 10 公分、長度約為 30 公分之圓柱鑽心試體，進行裁切成為直徑為 10 公分、長度為 20 公分之試體，經以石膏蓋平後，依據 ASTM C39-93a 之試驗規範進行試體抗壓強度試驗，藉以瞭解混凝土目前之強度狀況，鑽心取樣堤身約為 160 公分高之位置、堤面及消波塊則以隨機取樣的方式進行，試驗結果如表 4-9 所示，整體而言所有之混凝土試體強度均超過 $210\text{Kg}/\text{cm}^2$ ，而且大部分超過 $280\text{Kg}/\text{cm}^2$ ，顯示其混凝土構造物強度並未有明顯的弱化跡象，但是從各點強度值發現舊東堤之抗壓強度比新東堤試體之強度高，此現象值堪玩味，由於混凝土構造物的形成在不同時間、不同施工環境與不同料源及不同的設計條件下，基本上就比較難以判測，但是就所得資料研判其強度之差異，應與材料料源品質和施工有重要關係。此外本項實驗試驗前在裁切時發現部份試體內部有明顯之裂痕，經與 SHRP-C/FR-91-101 ASR 識別手冊中之圖片比對頗為符合，因裂縫明顯此部份並未列入抗壓測試，

表 4-9 花蓮港區混凝土構造物鑽心試體強度試驗值

	位址編號	抗壓強度值 Kg/cm^2	備註
新東堤堤身	NE 0 ^K +255	385.19	
	NE 0 ^K +360	327.35	
	NE 0 ^K +800	375	
	NE 1 ^K +200	365.52	
	NE 1 ^K +250	306.85	
舊東堤堤身新維修處	OE N	240	
舊東堤堤頂	OE 0 ^K +000	423.98	
新東堤堤頂	NE 0 ^K +360	252.62	
颱風破壞之斷面	NE1 ^K +625 V 牆身	407.45	
	NE 1 ^K +625 L	249.68	
新東堤下路面	NE 1 ^K +625	419.17	

4-3-2 X 光繞射分析 (XRD)

本項檢驗係將花蓮港港區混凝土構造物，擇要十五處之鑽心試體經由抗

壓實驗所得之碎片，按照各處試體壓碎之碎片分袋，並予任意取出部份依規定研磨，進行 XRD 實驗，經比對可能具有活性之成分如表 4-10 所示。

表 4-10 XRD 試驗各點位置及可能具活性之成分

	位置	可能具活性之成分
N01	NE 0 ^K +255	Tridymite Cristobalite
N02	NE 0 ^K +360	Tridymite Cristobalite Opal (蛋白石)
N03	NE 0 ^K +800	Tridymite Cristobalite
N04	NE 1 ^K +200	Tridymite
N05	NE 1 ^K +250	Tridymite
N06	NE1 ^K +625 牆身	Tridymite
N07	NE 1 ^K +625v	Tridymite (鱗英石)
N08	NE1 ^K +625 路面	Tridymite 白雲石 Dolomite
N09	堤頂 NE0 ^K +360	Tridymite
N010	堤頂 NE0 ^K +300	Tridymite
N011	OE N	Tridymite Cristobalite (方英石)
N012	OE O	Tridymite
N013	W11A	Tridymite
N014	W11B	Tridymite
N015	消波塊	Tridymite

4-3-3 鑽心試體斷面之粒料判測

本研究委請中央地質調查所與中原大學兩位地質專家進行岩石種類目視判別，經分析整理並比對其岩石種類，其中具活性粒料包括石英岩、砂岩、頁岩、板岩、安山岩等詳表 4-11 所示，與西部砂石比較花蓮地區所使用之砂石粒料其岩種相對要多出許多，而且根據取自港區砂石產源區即木瓜溪與月眉溪之粒料，經進行 ASTM C-289 試驗結果，木瓜溪砂石樣品為有害而月眉溪為無害但極接近有害區，經將兩溪粒料分類發現木瓜溪樣品具活性粒料比率極相近於月眉溪樣品，為求慎重所取回之樣品已進行 ASTM C-227 砂漿棒法試驗中，惟依據目前現有研究結果顯示木瓜溪及月眉溪之粒料確有活性粒料之成分是無庸置疑的。

表 4-11 鑽心試體斷面之粒料判測

	NE OK 255-1	NE OK +800-1	NE OK+360	OE OK +360-1	NE 1k +200-1	NE 1k +625V-1	NE 1k +625L-1	NE 1k +625-1	OE 0k+000	OE1 舊	OE1 新	消波塊 西堤	W11-2A	W11-1 B2
大理石	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
石英岩	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
片岩	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
砂岩	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
板岩	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
石灰岩	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
頁岩	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
安山岩	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
備註	相關之反應岩石種類： 1. 具有蛋白石的岩石：頁岩、砂岩 2. 酸類中性類及基性岩：安山岩、凝灰岩等 3. 含有約 95% 矽氧的岩石，如不含蛋白石但具玉髓或微石英的石英脈、石英岩 4. 有隱晶質及微晶質的板岩、花崗岩、片麻岩 5. 反應礦物為白雲石者													

4-3-4 SEM 觀測結果

SEM 晶相觀測可以直接看到混凝土內部物質的微觀構造及變化，對於試驗結果提供更有力的佐證。

一般而言，活性粒料和鹼性物質反應所生成的產物可分為 3 大類：

1. 無定形膠體組織(Amorphous)：一般為顆粒狀、海綿狀或葉狀的聚集膠體 (Massive gel)組織，以 1500 倍到 3000 倍放大倍數可以清楚地發現；一般處於粒料周圍的水泥漿裂縫孔隙中，或者是古時裂縫或混凝土表面滲出物，從而在粒料的周圍生成白環(white rim)。
2. 結晶化產物(Crystalline)：形狀如玫瑰花瓣、薄片、纖維或細絲狀，與聚集膠體比較下，其組成成份包括鹼、矽、鈣、鋁和鈉。
3. 次等產物(Secondary Products)：伴隨著鹼-粒料反應的第二種共存反應，可能是鈣礬石(Ettringite)，而鈣礬石可能存在於水泥漿中或孔隙中。

在消波塊部份，其內部有微細裂縫清晰可見，而且在裂縫邊緣有海綿狀體之膠結物，與前述之第一類相符屬於活性粒料和鹼性物質反應所

生成的產物，新東堤部份，其形狀包括了海綿狀體之膠結物、細絲狀等，而西堤部份有海綿狀體之膠結物，顯示其組成成份包括鹼、矽、鈣、鋁和鈉之膠體，此與外觀徵候之調查相互印證結果應可知悉有鹼質與粒料反應之生成物存在。

4-3-5 鑽心試體試驗室膨脹量量測

本研究係將鑽心試體於埋置測點及量取初始值後分別置於 100%RH 環境及 1N NaOH 溶液中，觀測四個月的膨脹量變化情形，結果如圖 4-9 及圖 4-10 所示。各鑽心試體在 100%RH 環境中均有膨脹的情形，而且在 NaOH 溶液中，其膨脹量均明顯較大，由於鹼質與粒料反應其行為發展屬長期性，目前尚無法遽以評斷。國外文獻多針對單一粒料岩種進行鹼質與粒料反應之研究，為落實本土化研究，特取東部木瓜溪及月眉溪之粒料，發現粒料岩種繁多，無法與國外文獻逕行比對。

置於100%RH環境中

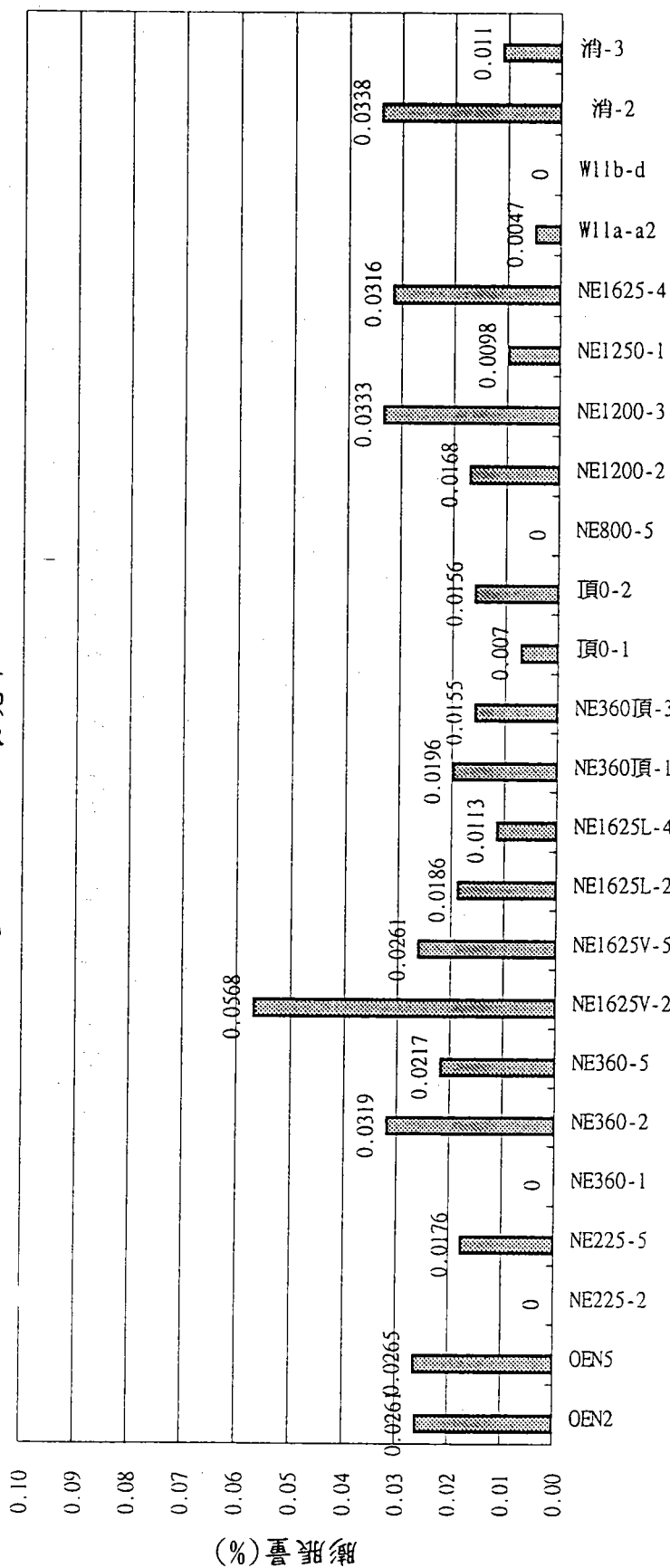
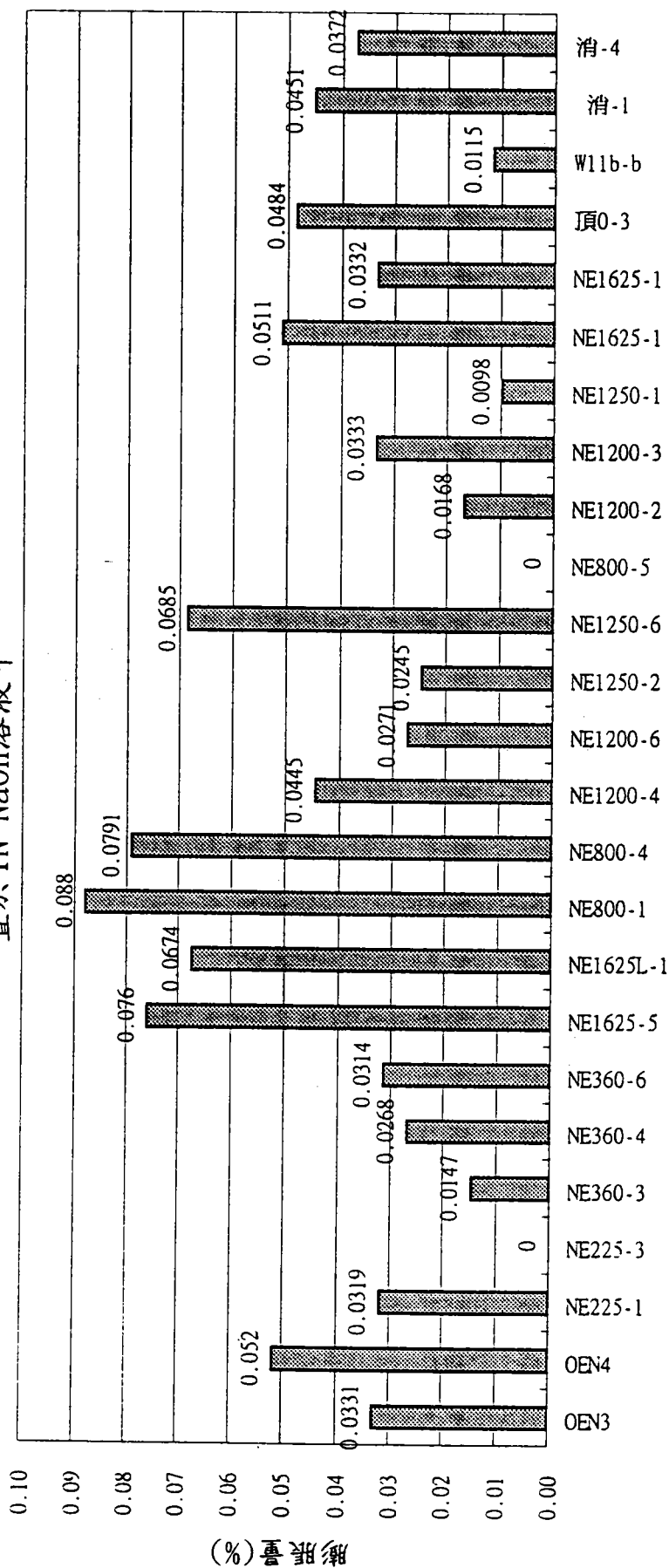


圖4-9 鑽心試體試驗室四個月的膨脹量量測結果(置於100%RH環境中)

置於1N NaOH溶液中



試體代號

圖4-10 鑽心試體試驗室膨脹量測量測結果(置於1N NaOH溶液中)

4-4 木瓜溪及月眉溪粒料取樣試驗

本計畫自花蓮溪及月眉溪所取之砂石樣品，經依原樣進行 ASTM C289 實驗，結果木瓜溪砂石樣品落入有害區，而月眉溪樣品為無害，經將該兩批砂石樣品依顏色分類，並商請專家鑑識岩石種類結果如表 4-12 所示，其分色之 C289 結果亦如表內第六欄及圖 4-11 所示。結果顯示木瓜溪及月眉溪之砂石樣品中均含有活性粒料，因此即使月眉溪之 C289 為無害並不代表均為無害，為更趨嚴謹本項試驗分別將各色石料製作成砂漿棒，依 ASTM C227 所規定方式監量。

4-5 國內一型水泥含鹼量調查

為預防混凝土構造物發生鹼質與粒料反應，ASTM C150 規定水泥中的鹼金屬當量應低於 0.6%，經蒐集國內各廠牌 I 型水泥含鹼量比較如圖 4-12 所示，發現國內絕大部份的 I 型水泥其含鹼量均超過此一規定，顯示台灣在四周環海環境潮濕的情況下，若使用活性粒料則混凝土構造物發生鹼質與粒料反應的機會已無庸置疑，而其中部份水泥的鹼金屬當量已達 0.8% 甚至逼進 1%，未來基於環保問題水泥中的含鹼量可能更將有增無減，就預防鹼質與粒料反應的方向而言，儘速的思考解決之道應是極正確的方向。

表 4-12 月眉溪及木瓜溪 ASTM C289 試驗結果

		月眉溪(分色 比率%)編號 R (Rc, Sc)	木瓜溪(分色 比率%)編號 B (Rc, Sc)	顏色	文獻記載 活性岩石	ASTM C289 檢測結果 R B		ASTM C227
A	大理石 或白雲石	12.24% (20, 24)	11.47% (20, 22)	白色 B4 R6	無	無	無	監測中
B	大理石	29.08% (27.2, 47.5)	13.98% (35, 94.5)	灰色 R4 B3	無	無	有	監測中
C	變質砂岩 或 砂質片岩	9.18% (80.42, 50.25)	12.9% (70, 40)	黃色 R3 B6	有害	無	無	監測中
D	安山岩	10.71% (1197, 400)		灰黑色 R1	有害	潛在 有害		監測中
E	大理石	13.26% (70, 34)	24.01% (60, 32)	白灰色 B1 R2	無	無	無	監測中
F	凝灰岩 或片岩	4.59% (65, 220)	10.39% (25, 30)	綠色 B5 R5	有害	有	無	監測中
	其他	9.69%	14.69% (內含板岩)	含黑色				
	可能活性 比率(依文 獻載計)	24.48%以上	23.29%以上					
	ASTM C289	無害	有害					
	ASTM C227	監測中	監測中					
備 註								

木瓜溪

B1 大理石

B2 板岩

B3 石灰岩或大理石

B4 白雲石

B5 綠色片岩

B6 變質砂岩

綜合料：Rc-26.09 Sc-90.6

月眉溪

R1 輝石安山岩

R2 大理石

R3 砂質片岩

R4 大理石

R5 變質凝灰岩

R6 大理石

Rc-59.23 Sc-46.92

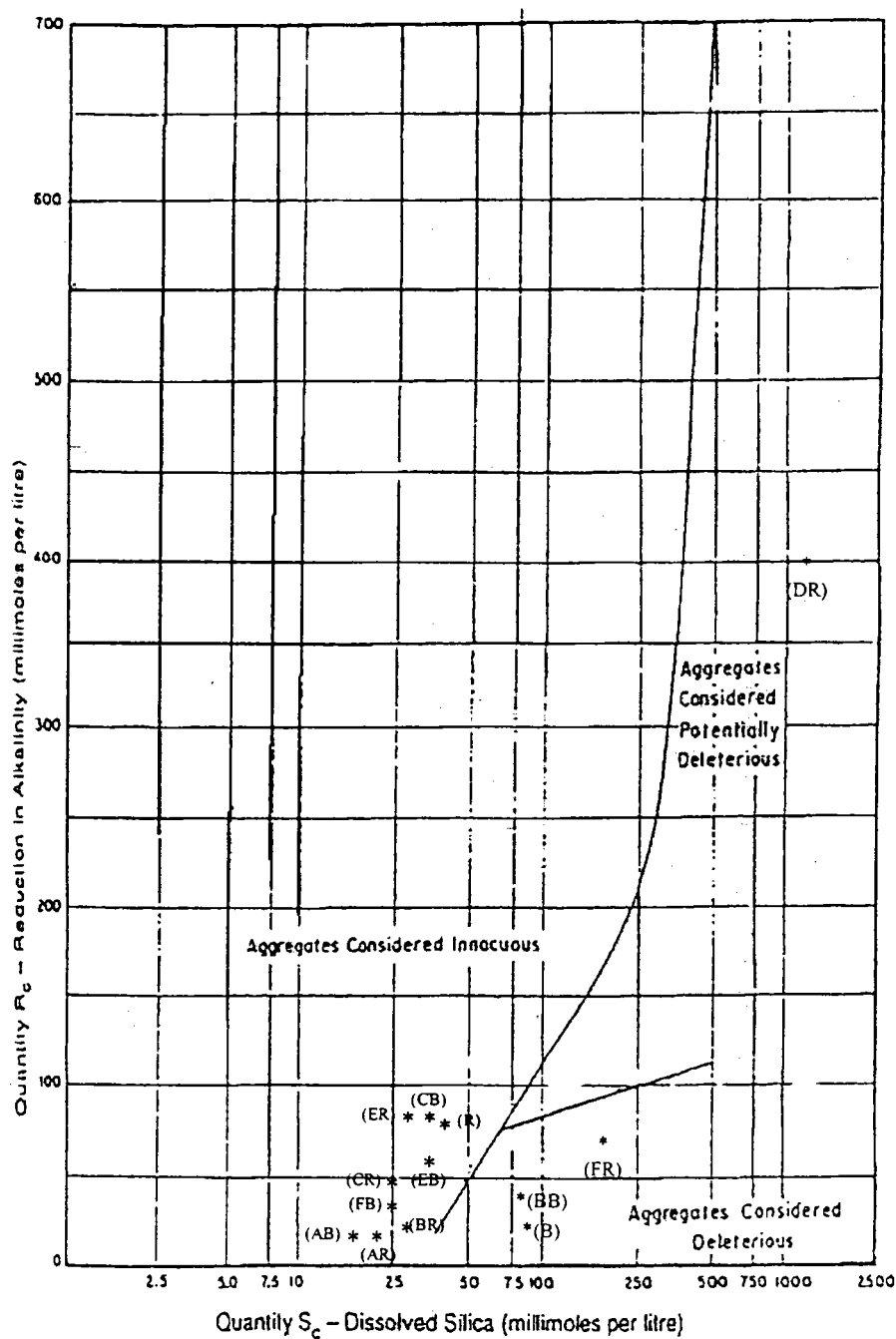


Illustration of Division Between Innocuous and Deleterious Aggregates on Basis of Reduction in Alkalinity Test

圖4-11 ASTM C289實驗結果示意圖

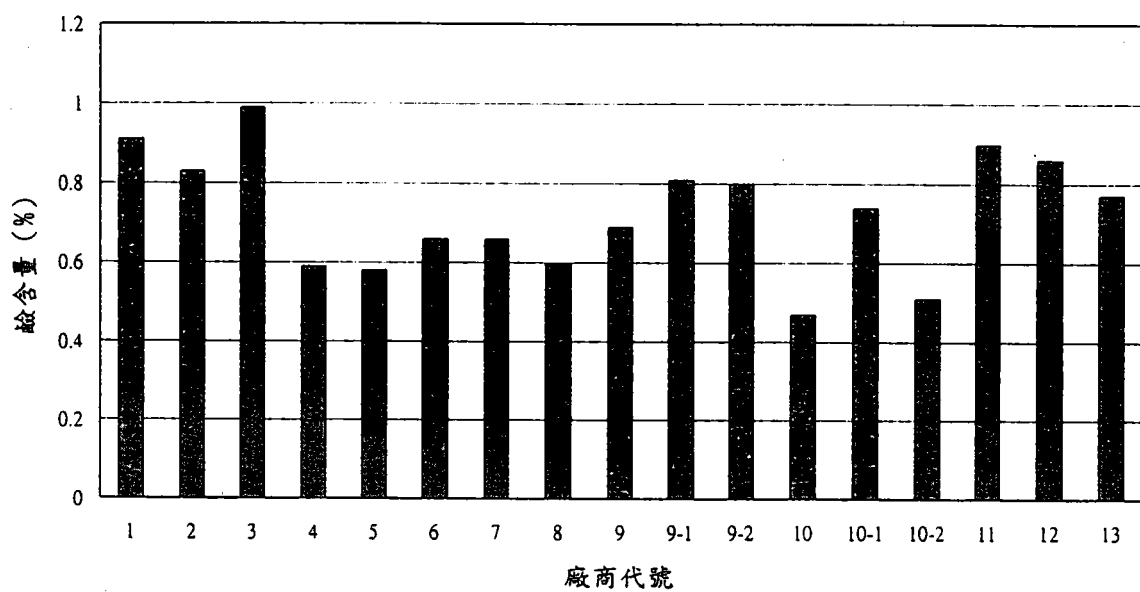


圖 4-12 國內水泥鹼含量比較圖

第五章 結論與建議事項

5-1 結論

1. 水泥含鹼量的調查結果顯示，國內一型水泥之含鹼量，就鹼質與粒料反應而言有較高的情形。
2. 依鹼質與粒料反應的濕度條件，花蓮港區混凝土構造物中之消波塊與防波堤屬於高危險區。
3. 由鑽心試體中之岩石種類經比對文獻，確定試體中確有活性粒料的存在，因此推斷花蓮港區之消波塊與防波堤均有鹼質與粒料反應的可能，只是其反應程度隨著粒料活性的程度、活性粒料的多寡、含水量的高低以及構造物的孔隙等而有不同程度的膨脹反應。
4. 由於鹼質與粒料反應有長時間發展的特性，也可能因為花蓮港區混凝土構造物絕大部分均為數年前或數十年前興建的事實，其因鹼質與粒料反應產生的裂縫寬度已發展至一定的程度而趨緩，因此利用裂縫監測（埋設測點）的方式似無法定量的討論（所生成的裂縫足以讓內部的壓力進行釋放），或可能監測的時間不足，而致裂縫監測無一定之成效。
5. 部份建物成鋼筋外露的現象，應為初期施工時保護墊層不足所造成。
6. 雖然在現場裂縫寬度變化監測的結果無法定量分析，但將鑽心試體在試驗室內置於100%RH和1N NaOH溶液等加速反應的環境下，各試體均有明顯的膨脹現象，顯示花蓮港的混凝土構造物確實受鹼質與粒料反應的威脅。
7. 從本次調查結果顯示，為鹼質與粒料反應所造成的破壞似乎有批段性，尤以消波塊最為明顯。
8. 新東堤混凝土構造物其中性化程度較其它地區高，長期而言對混凝土之功能性可能會有影響。
9. 根據本次調查結果經整理出港區混凝土道面的破壞模式，除了鹼質與粒料反應之外，比較特殊的是其破壞成因，部份係個案之強烈海浪及船隻撞擊因素，其餘損壞幾乎均與設計及施工有極大相關，也就是絕大部份的破壞成為「早期因素」。
10. 本次研究結果有關電阻部份，新東堤電阻值相對於西堤及舊東堤較小，顯示新東堤本身的混凝土品質有較大的差異性，相對應於鑽心強度的結果亦呼應之勢。

5-2 建議事項

1. 基本上無筋混凝土道面，由於其有熱脹冷縮的特性以及施工段落的因素，因此一般在設計時均在每隔一定的間距設有『縫』，如果設計不當單一版塊過大，則僅日夜溫差的因素就足以讓版塊一分為二，此種損壞宜在裂損處將裂縫稍加鋸寬，灌注填縫料防止水分進入即可。此外在施工時由於於模版邊緣過渡震動搗實或過早拆模，導致版塊邊緣的崩裂部份，依崩裂之大小以填縫料或原設計之混凝土材料進行維修即可，此外邊角裂損則應考慮該裂損處是否有汲水現象，否則維修將於事無補。再者施工時所造成的塑性收縮，短時間不會對道面使用造成重大影響，惟若能在混凝土初凝前加以表面再處理，並予以適當、適時養護，將可改善塑性收縮的情況。整體而言進行剛性道面維修時，應注意破損斷面的清潔程度、維修材料與原道面材料的相容性，以及足夠的養護條件，當然愈早維修其維修成效愈佳。
2. 有關港區混凝土構造物的維修時機，應建立例行性之檢測及評估，避免在未察覺下造成損壞才進行維修，以免釀成巨災以及耗費過多的維修成本。
3. 各項工程施工之材料料源，宜事先先進行周密的檢測，以免使用後造成災害及浪費。對有關 AAR 的預防，目前中國國家標準中列有混凝土岩相分析指引（總號 13617，類號 A3353）、水泥與粒料之組合潛在鹼質反應性試驗法（水泥砂漿棒法總號 13619，類號 A3355）、粒料之潛在鹼質與二氧化矽反應性試驗法（化學法總號 13618，類號 A3354）、碳酸鹽質岩石用作混凝土粒料之潛在鹼質反應性試驗法（總號 13620，類號 A3356），列供參採。
4. 由於事先預防鹼質與粒料反應，其方法會隨著水泥含鹼量之高低、所處的環境、粒料的活性程度、添加抑制材料的種類性質等而有所不同，因此建議施工前應先擇取文獻中所提之相關試驗，採取較可行、較經濟的方法施作，以取得最佳成效。
5. 針對本次調查結果，建議應對現有混凝土結構物進行維護之評估工作，以確保或延長結構物的使用壽命，其實施之方法以施作裂縫填塞以及表面覆層為主，初期宜先對於較嚴重之消波塊進行材料及施工方法評估，俟有成效後，針對結構物進行經濟性的審酌，據以確定施作的方法、使用的材料以及施作的對象而進行維護。

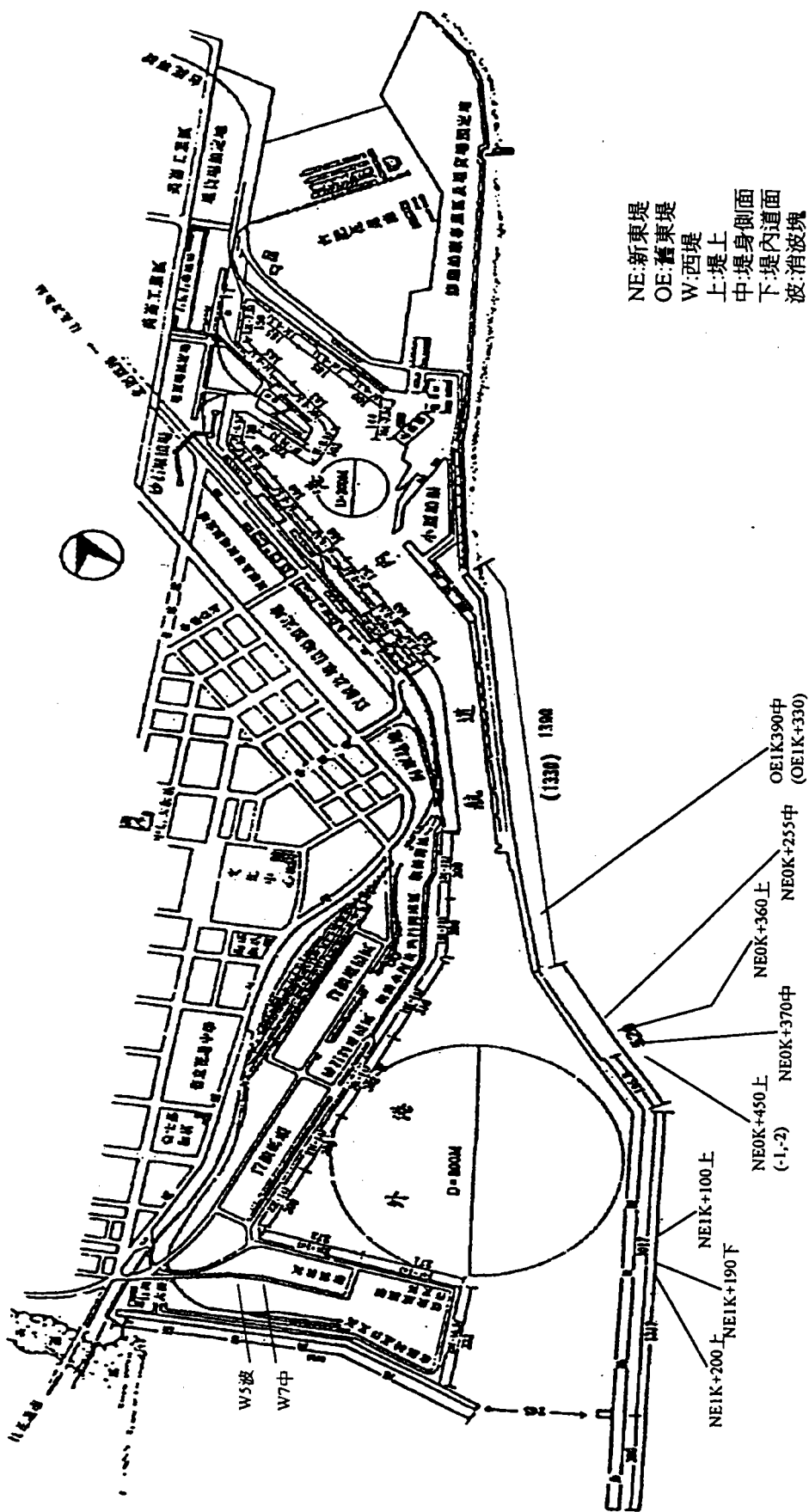
6. 目前依據國外文獻摻配 25%（水泥重量比）飛灰，對於抑制鹼質與粒料反應頗有成效，惟各地粒料活性成份與飛灰化學性質均不相同，因此建議應詳加檢測後再行應用。

第六章 參考文獻

1. 王櫻茂，「制訂混凝土耐久性試驗方法及規範研究」內政部建築研究所籌備處專題研究計畫成果報告，MOIS840018。
2. 儲炳麟、顏聰、盧俊寬，「台灣西部地區砂石料源鹼質反應調查研究」交通部國道新建工程局研究報告，1994年3月。
3. 李釗，許書王，陳桂清，「由破裂之消波塊探討鹼骨材反應」港灣報導，PP. 30-40，1996年10月。
4. Chau Lee，"Available Alkalis in Fly and Their Effects on Alkali-Aggregate Reaction"，PHD Disseratation，Iowa State University，1986.
5. K. Okada，Nishibayashi S.，and Kawamura M.，"Alkali-Aggregate Reaction"，ICAAR，8th International Conference，1989.
6. Sidney Mindess and Young J. F.，"Concrete，" Prentice-Hall，Inc，1981.
7. P. K. Mehta，"Concrete Structure，Properties，and Meterials"，Prentice-Hall，Inc，1986.
8. D. W. Hobbs，"Alkali-Silica Reaction in Concrete"，Thomas Telford London，1988.
9. G. M. Idorn，"Fear of Flying?"，AAalborg Portland，Denmark，ppl-10，1978.
10. Jaw-Chang Laiw，"Structural Integrity and Protection of Concrete Related to Chloride Penetration and ASR"，PHD Disseratation，Sheffield University. 1992.
11. Sibbick R. G.，Page C. L.，"Effects of Sodium Chloride on the Alkali-Silica Reaction in Hardened Concretes"，ICAAR，10th International Conference. 1996.
12. J. Duchesne，Berube M. A.，"Effect of Deicing Salt and Sea Water on ASR New Considerations Based on Experimental ate"，ICAAR，10th International Conference，1996.

10th International Conference , 1996.

13. M .Kawamura , Takeda T. , Takeuchi K. , “Role of Gypsum in Expansion of Mortars Containing Reactive Aggregate in NaCl Solution” , ICAAR , 10th International Conference , 1996.
14. Y. Ohama , Demura K , Suzuki D. , “Evaluation of Alkali-Silica Reaction Inhibitors by Partial Immersion Test of Concrete in 2.5% NaCl Solution” , ICAAR , 10th International Conference , 1996.
15. J. Wang , Humphrey M. , Bayer D. , “Concrete of ASR Expansion by Coatings” , ICAAR , 10th International Conference , 1996.
16. M. Kawamura , Torii K. , Takeuchi K. , Tanikawa S. , “Long-Term ASR Expansion Behaviour of Concrete Cubes in Outdoor Exposure Conditions” , ICAAR , 10th International Conference , 1996.
17. T.K.M. Al-Kadhimi , Banfill P.F.G. , “The Effect of Electrochemical Re-Alkalisisation on Alkali-Silica Expansion in Concrete” , ICAAR , 10th International Conference , 1996.
18. Z. Shu. , Deng M. , “Alkali-Silica Reaction in The Cement Concrete Pavements of Airport” , ICAAR, 10th International Conference , 1996.
19. SHRP-C-342 , “Alkali Silica Reactivity: An Overview of Research” , Strategic Highway Research program , 1993.
20. SHRP-C-343. , “Eliminating or Minimizing Alkali-Silica Reactivity” , Strategic Highway Research Program , 1993.
21. SHRP-C/FR-91-101 Hanbook For The Identification Of Alkali-Silica Reactivity In Highway Structures“ , Strategic Highway Research Program , 1991.



花蓮港港區混凝土構造物裂縫監測測點分布圖

高雄港港工結構材海生物腐蝕與對策研究

執行單位：國立中山大學

委託單位：台灣省交通處港灣技術研究所

中華民國八十七年六月

高雄港港工結構材海生物腐蝕與對策研究

研究計劃主持人：李賢華

協同研究人員：宋克義、羅俊雄

研究助理人員：王珮文、余宗鴻

港研所參與人員：饒正、陳桂清、張道光、羅建明

執行單位：國立中山大學

委託單位：台灣省交通處港灣技術研究所灣

中華民國八十七年六月

摘要

本研究計畫目的為調查高雄港區內的港工結構材發生海生物附著之種類並檢討其對港灣常用材料如碳鋼及混凝土等之腐蝕影響以及使用飛灰混凝土與安裝犧牲陽極材料，對於防制海生物附著及材料腐蝕之效果。

於85年1月安裝海洋曝露試驗架於高雄港10號、14號、33號及51號四座碼頭的水深0、3及6公尺處進行試驗，使用四種材質分別為一般鋼材SS41、在其上安裝鋁犧牲陽極塊者、二型水泥與添加飛灰水泥砂漿試體，共進行八次採樣。

今年度的兩次採樣結果顯示大多數的附著生物其數量與覆蓋面積在不同的試片材質與處理中沒有顯著差異。不同碼頭與不同水深，附著生物其數量、面積與重量皆有顯著差異。藤壺、二枚貝、與管蟲分別在#10、#14與#51有最高的數量與覆蓋面積，因此反映出不同碼頭有不同的生物組成比例。在向光面附著生物的數量、覆蓋面積與重量皆顯著大於背光面。在附苗的季節性調查方面，以管蟲、藤壺、藪枝蟲與苔蘚蟲的附著密度較高。管蟲全年皆有著苗，並沒有一個明顯的季節性變化；藤壺在9月時較高的著苗量，而藪枝蟲與苔蘚蟲在4月與7月~11月有較高的著苗量。較特殊的是，藤壺在駁三碼頭85年11月時有一極高的著苗量；而二枚貝在駁三碼頭86年7月時有一極高的著苗量。其他的附著生物的著苗量皆很小，出現的頻率也很低。因此，在高雄港中，不同碼頭有不同的生物組成，且同一生物在各個碼頭會有不同的著苗密度，此現象可能是因為高雄港內不同碼頭有不同的環境所致。

現場浸漬結果顯示，在相同浸漬點浸漬28個月後，試片腐蝕速率的再現性良好；SS41碳鋼的自由腐蝕速率在#51最大(0.3463 mm/y)，#14最小(0.2566 mm/y)，而#10與#33腐蝕速率相當(分別為0.285與0.286 mm/y)；對陰極保護試片而言，試片的腐蝕速率雖然隨放置地點有些許差異〔由大至小依序為：#10，#51，#33，與#14〕，但是碼頭與碼頭間的腐蝕速率相差極微；試片的腐蝕速率與水深變化無明顯特定關係；若將高雄港區視

為一個海域，自由腐蝕試片的腐蝕速率有隨浸漬水深的增加而遞增的趨勢，而陰極防蝕試片則有隨浸漬水深的增加而減緩的趨勢，但不論增加或減少，腐蝕速率的變化僅在 0.02-0.04 mm/y 之間，差異極小；不論是自由腐蝕試片或陰極防蝕試片，試片的腐蝕速率在浸漬初期隨著曝露時間的增加而遞增，於第七個月時到達最大，隨後隨著曝露時間的增長而遞減；陰極保護試片之腐蝕速率較自由腐蝕試片之腐蝕速率為小；長期浸漬鋁犧牲陽極塊重量損失率的變化，可能是因金屬表面海生物掉落以致金屬再裸露於海水中或是為了克服海生物附著所引起的局部腐蝕現象。

特定海生物現場浸漬結果顯示，碳鋼試片在各海生物附著的情形下並無鈍化行為產生；金屬試片在#14 的瞬間腐蝕速率，會因藤壺的附著而降低；但於#75，各試片的瞬間腐蝕速率並無因置放的水深與附著海生物的不同而有顯著的差異；根據瞬間腐蝕速率與平均腐蝕速率計算結果，管蟲對試片腐蝕速率的影響較藤壺及其他海生物為大；現場浸漬試片因金屬表面泥垢、腐蝕產物或附著海生物種類的不同，會在金屬表面形成非均勻性被覆，此被覆的厚度、透水性與緻密性可能影響金屬的腐蝕行為，造成 Bode plots 中最低頻率相位角的改變。

僅依據八次採樣調查結果，對於海生物附著對不同水深鋼材腐蝕之影響，不足以做定量之判定，至於此海垢生物之附著與腐蝕機制之形成、及其關係則有待進一步之研究來加以瞭解。故長時期的現場暴露試驗，應與實驗室內之模擬試驗配合進行，以瞭解海生物與鋼材腐蝕間的關係，進而建立資料庫，發展防治形成此一腐蝕機制之對策。

目錄

第一章 研究主旨(研究動機、緣起與目的)	1
第二章 問題之性質與背景	7
2.1 腐蝕作用與電池類型	7
2.2 鋼材構架之腐蝕機制	8
2.3 鋼筋混凝土之腐蝕作用	10
2.4 海垢生物及細菌腐蝕之介紹	11
2.5 台灣各港區之海氣象資料	13
2.6 台灣各港區之水質狀況	15
2.7 台灣各港區之海垢生物以及研究概況	16
2.8 各種腐蝕防治之對策	18
第三章 研究方法與實驗過程	27
3.1 現場施放腐蝕試驗	27
3.2 實驗室試驗及分析	30
3.3 現場施放生物附苗試驗	31
3.4 現場特定海生物附苗試驗	31
第四章 試驗結果分析與討論	39
4.1 海生物附著現場調查結果與討論	39
4.2 現場海生物著苗試驗結果與討論	47
4.3 試片腐蝕試驗現場浸漬結果與討論	48
4.4 特定海生物附苗試驗	52
第五章 結論	127
第六章 參考文獻	129

表目錄

表 3-1 現地試驗試片重量表(1).....	33
表 3-1 現地試驗試片重量表(2).....	34
表 3-1 現地試驗試片重量表(3).....	35
表 3-1 現地試驗試片重量表(4).....	36

圖目錄

圖 1-1 鋼板樁碼頭受海水腐蝕情形.....	5
圖 2-1 異物堆積造成氧濃差電池現象.....	21
圖 2-2 氧濃差電池造成水線腐蝕現象.....	21
圖 2-3 孔蝕作用造成之金屬腐蝕	22
圖 2-4 金屬晶粒間沿晶間侵蝕破壞情形	22
圖 2-5 台灣各大港區四季溫度變化情形	23
圖 2-6 台灣各大港區四季雨量變化情形	23
圖 2-7 台灣各大港區四季溼度變化情形	24
圖 2-8 台灣各大港區四季酸雨 pH 值變化情形	24
圖 2-9 台灣各大港區四季海水 pH 值變化情形	25
圖 2-10 台灣各大港區四季海水溶氧量變化情形	25
圖 2-11 台灣各大港區四季海水水溫變化情形	26
圖 3-1 台灣各港區典型棧橋式碼頭.....	37
圖 3-2 高雄港區試片架現場施放位置圖	38
圖 4-1 附著生物在四種不同材質上的覆蓋面積	56
圖 4-2 附著生物在四種不同材質上的覆蓋面積	57
圖 4-3 附著生物在四種不同材質上的覆蓋面積	58
圖 4-4 附著生物在不同碼頭的覆蓋面積.....	59
圖 4-5 附著生物在四種不同材質上的覆蓋面積	60
圖 4-6 附著生物在四種不同材質上的覆蓋面積	61
圖 4-7 附著生物在不同水深的覆蓋面積.....	62
圖 4-8 附著生物在不同水深的覆蓋面積.....	63
圖 4-9 附著生物在不同水深的覆蓋面積.....	64
圖 4-10 附著生物在向光面與背光面的覆蓋面積	65
圖 4-11 附著生物在向光面與背光面的覆蓋面積	66
圖 4-12 附著生物在向光面與背光面的覆蓋面積	67

圖 4-13	附著生物在四種不同材質的附著密度	68
圖 4-14	附著生物在四種不同材質的附著密度	69
圖 4-15	附著生物在四種不同材質的附著密度	70
圖 4-16	附著生物在不同碼頭的附著密度	71
圖 4-17	附著生物在不同碼頭的附著密度	72
圖 4-18	附著生物在不同碼頭的附著密度	73
圖 4-19	附著生物在不同水深的附著密度	74
圖 4-20	附著生物在不同水深的附著密度	75
圖 4-21	附著生物在不同水深的附著密度	76
圖 4-22	附著生物在向光面與背光面的附著密度	77
圖 4-23	附著生物在向光面與背光面的附著密度	78
圖 4-24	附著生物在向光面與背光面的附著密度	79
圖 4-25	附著生物在四種不同材質的總乾重與總溼重	80
圖 4-26	附著生物在不同碼頭的總乾重與總溼重	81
圖 4-27	附著生物在不同水深的總乾重與總溼重	82
圖 4-28	附著生物在向光面與背光面的總乾重與總溼重	83
圖 4-29	#10 不同水深管蟲的覆蓋面積變化 (向光面)	84
圖 4-30	#14 不同水深管蟲的覆蓋面積變化 (向光面)	85
圖 4-31	#33 不同水深管蟲的覆蓋面積變化 (向光面)	86
圖 4-32	#51 不同水深管蟲的覆蓋面積變化 (向光面)	87
圖 4-33	#10 不同水深藤壺的覆蓋面積變化 (向光面)	88
圖 4-34	#14 不同水深藤壺的覆蓋面積變化 (向光面)	89
圖 4-35	#33 不同水深藤壺的覆蓋面積變化 (向光面)	90
圖 4-36	#51 不同水深藤壺的覆蓋面積變化 (向光面)	91
圖 4-37	駁三碼頭管蟲的著苗量變化	92
圖 4-38	#51 管蟲的著苗量變化	92
圖 4-39	駁三碼頭藤壺的著苗量變化	93

圖 4-40	#51 藤壺的著苗量變化	93
圖 4-41	駁三碼頭二枚貝的著苗量變化	94
圖 4-42	#51 二枚貝的著苗量變化	94
圖 4-43	駁三碼頭海葵的著苗量變化	95
圖 4-44	駁三碼頭單體水螅的著苗量變化	95
圖 4-45	#51 單體水螅的著苗量變化	96
圖 4-46	駁三碼頭群體水螅的著苗量變化	96
圖 4-47	駁三碼頭苔蘚蟲的著苗量變化	97
圖 4-48	#51 苔蘚蟲的著苗量變化	97
圖 4-49	駁三碼頭海鞘的著苗量變化	98
圖 4-50	#51 海鞘的著苗量變化	98
圖 4-51	駁三碼頭蕨枝蟲的著苗量變化	99
圖 4-52	#51 蕨枝蟲的著苗量變化	99
圖 4-53	駁三碼頭纓鰓蟲的著苗量變化	100
圖 4-54	#51 纓鰓蟲的著苗量變化	100
圖 4-55	自由腐蝕試片在各碼頭浸漬 28 個月後不同水深之腐蝕速率	101
圖 4-56	陰極保護試片在各碼頭浸漬 28 個月後不同水深之腐蝕速率	101
圖 4-57	自由腐蝕試片平均腐蝕速率與放置地點的關係	102
圖 4-58	陰極防蝕試片平均腐蝕速率與放置地點的關係	102
圖 4-59	自由腐蝕 SS41 碳鋼試片在各碼頭不同水深之腐蝕速率	103
圖 4-60	陰極防蝕 SS41 碳鋼試片在各碼頭不同水深之腐蝕速率	103
圖 4-61	自由腐蝕試片平均腐蝕速率與放置水深的關係	104
圖 4-62	陰極防蝕試片平均腐蝕速率與放置水深的關係	104
圖 4-63	自由腐蝕試片平均腐蝕速率與浸漬時間的關係	105
圖 4-64	陰極防蝕試片平均腐蝕速率與浸漬時間的關係	105
圖 4-65	歷次於高雄港四座碼頭三個水深採樣試片的平均腐蝕速率與曝露 時間的關係	106

圖 4-66 鋁犧牲陽極塊在各碼頭不同水深之重量損損失速率	106
圖 4-67 試片在#14 號碼頭水深 0m 處之動電位極化曲線	107
圖 4-68 試片在#14 號碼頭水深 3m 處之動電位極化曲線	107
圖 4-69 試片在#14 號碼頭水深 6m 處之動電位極化曲線	108
圖 4-70 試片在#75 號碼頭水深 0m 處之動電位極化曲線	108
圖 4-71 試片在#75 號碼頭水深 3m 處之動電位極化曲線	109
圖 4-72 試片在#75 號碼頭水深 6m 處之動電位極化曲線	109
圖 4-73 試片在#14 號碼頭各水深之瞬間腐蝕速率	110
圖 4-74 試片在#75 號碼頭各水深之瞬間腐蝕速率	110
圖 4-75 試片在#14 號碼頭各水深之平均腐蝕速率	111
圖 4-76 試片在#75 號碼頭各水深之平均腐蝕速率	111
圖 4-77 試片在#14 號碼頭水深 0m 處之 Bode plots	112
圖 4-78 試片在#14 號碼頭水深 3m 處之 Bode plots	112
圖 4-79 試片在#14 號碼頭水深 6m 處之 Bode plots	113
圖 4-80 試片在#75 號碼頭水深 0m 處之 Bode plots	113
圖 4-81 試片在#75 號碼頭水深 3m 處之 Bode plots	114
圖 4-82 試片在#75 號碼頭水深 6m 處之 Bode plots	114

相片目錄

相片 4-1	#14 水深 0m 處之海生物附著(Sealives)試片	115
相片 4-2	#14 水深 0m 處之藤壺附著(Barnacles)試片	115
相片 4-3	#14 水深 0m 處之管蟲附著(Tubeworms)試片	116
相片 4-4	#14 水深 0m 處之無海生物附著(None)試片	116
相片 4-5	#14 水深 3m 處之海生物附著(Sealives)試片	117
相片 4-6	#14 水深 3m 處之藤壺附著(Barnacles)試片	117
相片 4-7	#14 水深 3m 處之管蟲附著(Tubeworms)試片	118
相片 4-8	#14 水深 3m 處之無海生物附著(None)試片	118
相片 4-9	#14 水深 6m 處之海生物附著(Sealives)試片	119
相片 4-10	#14 水深 6m 處之藤壺附著(Barnacles)試片	119
相片 4-11	#14 水深 6m 處之管蟲附著(Tubeworms)試片	120
相片 4-12	#14 水深 6m 處之無海生物附著(None)試片	120
相片 4-13	#75 水深 0m 處之海生物附著(Sealives)試片	117
相片 4-14	#75 水深 0m 處之藤壺附著(Barnacles)試片	117
相片 4-15	#75 水深 0m 處之管蟲附著(Tubeworms)試片	118
相片 4-16	#75 水深 0m 處之無海生物附著(None)試片	118
相片 4-17	#75 水深 3m 處之海生物附著(Sealives)試片	119
相片 4-18	#75 水深 3m 處之藤壺附著(Barnacles)試片	119
相片 4-19	#75 水深 3m 處之管蟲附著(Tubeworms)試片	120
相片 4-20	#75 水深 3m 處之無海生物附著(None)試片	120
相片 4-21	#75 水深 6m 處之海生物附著(Sealives)試片	121
相片 4-22	#75 水深 6m 處之藤壺附著(Barnacles)試片	121
相片 4-23	#75 水深 6m 處之管蟲附著(Tubeworms)試片	122
相片 4-24	#75 水深 6m 處之無海生物附著(None)試片	122

第一章 研究主旨(研究動機、緣起與目的)

台灣為一四面環海之島國，沿海除了有海港碼頭、防波堤等港工設施外，鑽油平台、跨海大橋等皆處於海洋環境中。而近年來一遇颱風來襲則造成重大損失，如民國八十三年提姆、道格颱風過境，造成花蓮港、蘇澳港、龍洞遊艇港及高雄港等各港口，多處港工設施之破壞、沈陷等重大損害⁽¹⁾。顯示出相當部分的港工設施，已面臨或提早到達設計之年限，究其原因，各港工結構面臨險惡之海洋環境而被腐蝕、侵襲，造成材料之彈性疲乏，強度損失，以致使用年限大為縮短應為重要因素之一。

港工結構所使用的材料，除了石料之外、主要為鋼構材料及混凝土或鋼筋混凝土材料為主。其中鋼構材料如鋼板樁、鋼管樁及配合使用之拉絨鋼纜等各型鋼料，材質均有不同。而混凝土材料之使用則更為廣泛，其中如重力式碼頭結構包括各型混凝土塊、各種沈箱式結構，基樁式及棧橋式碼頭結構所使用之 PC 樁、RC 樁等均為混凝土、鋼筋混凝土或預力混凝土所組成。此兩大項之港工構材，其腐蝕之現象，及造成腐蝕的原因便有所不同。以下便以此兩大類之港工構材，就其腐蝕之現象及造成腐蝕的原因分別說明之。

首先就鋼構材料而言，根據港研所所做相關研究報告中指出^{(2),(3)}，目前在台灣各大港口中，使用鋼構材料的碼頭主要包括有：基隆港西二十二...至西二十七號碼頭，以及東二號碼頭至東九號碼頭。其中大多為鋼板樁式。高雄港則有十一、十二號碼頭，三十號至四十七號碼頭，以及五十四號至七十號碼頭等，其中大部分亦為鋼板樁型式組成。其餘如花蓮港及蘇澳港也有部分碼頭為鋼構材料所組成。目前台灣各大港口鋼板樁腐蝕的情形，有些已相當嚴重（如圖 1-1）；如基隆港西十五號及東二號碼頭，壁面有海生物附著且有孔蝕現象，基隆港東七號、西二十二號、西二十七號等碼頭，均發現其鋼板樁有嚴重破損、穿孔之腐蝕現象，以致部分碼頭壁後砂石掏空，岸肩沈陷，已嚴重影響碼頭之結構安全。蘇澳港之駁船碼頭，鋼板樁年腐蝕率超過 0.20 mm/yr。其他各港口亦有類似現象，惟年腐蝕率較低，

而且是在一公尺範圍內，假設其為均勻腐蝕所測得，其中是否有嚴重孔蝕則無從得知。

造成鋼構材料腐蝕的原因有許多，最主要的為電化學作用所形成的金屬銹損。電化學作用則是陽極的金屬材料失去電子，而形成正離子為氧化反應；而海水中或水面之氧則吸收此負離子，形成氫氧離子是為陰極反應。然後該金屬離子與氫氧離子結合為氫氧化合物或氧化物，沈澱於於原金屬表面是為銹損。鋼構材料腐蝕後，主要的影響造成構材斷面縮小，性質改變，整體結構變化及至最終強度損失，無法承擔外力的作用。另一造成腐蝕的原因則為海洋生物的附著作用，此部分的影響則是雙方面的：其一，海生物附著對構材造成腐蝕，原因可能為海生物排放黏液中所含細菌分解出酸性物質，或海生物附著下造成厭氧環境，厭氧菌釋出酸性物質等而造成腐蝕。其二，海生物附著於構材上，將增加構材之重量，在結構受力時，其慣性載重將相對增大，再加上海生物所留滯的水量（Trapped Water），亦將增加“外加質量”（Added Mass）之值。因此在力學分析上討論時，海生物附著之影響將是雙重的，也就是除了腐蝕造成斷面損失、強度降低之外，也將使得荷重及慣性作用力增大，以致整體結構之安全因子亦相對降低，對耐久性、安全性之負面影響不可忽略。

其次就與混凝土有關之構材而言，根據前面所提以及相關研究報告⁽⁴⁾可知，目前在台灣各大港口中，使用混凝土有關之構材的碼頭相當多其中如：基隆港西一號...至西十九號碼頭，西二十八號A...至西三十三號B碼頭，以及東十二號碼頭至東二十二號碼頭。其中包括有重力式、沈箱擁壁式、沈箱式、橋墩式及基樁式等。台中港之碼頭結構則大部分為混凝土有關之構材所組成，其中主要包括有沈箱式、以及預力混凝土樁與L型塊所組成之結構形式。高雄港則有二號至十號碼頭為方塊混凝土式及預力混凝土樁棧橋式，十三號至三十三號碼頭則為棧橋式及鋼筋混凝土板裝式，以及四十八號至五十三號碼頭為預力混凝土樁棧橋式。花蓮港則大部分為重力式碼頭；蘇澳港則包括有沈箱重力式及基樁棧橋式等組成。目前各大港口鋼筋混凝土結構物，於海洋環境下之腐蝕情形亦有報告提出；如高雄港

中洲碼頭，保護層厚度僅剩兩公分，而且經現地取樣作化學分析後，發現混凝土中氯離子含量高達 2.33%，顯示內部鋼筋可能已嚴重腐蝕。

就與混凝土有關之構材而言，腐蝕之產生主要位於鋼筋或預力鋼纜部分。其腐蝕機制以及影響腐蝕之因素，較之鋼構結構之腐蝕更為複雜。主要的原因則在於混凝土之影響，以及其與鋼材間之交互作用；除了化學機制外，應力及物理機制也扮演相當重要的角色。鋼料之腐蝕如前所述，由於電化學之作用而造成。但不同於純粹鋼構材料者，則在於鋼筋混凝土結構外層為混凝土被覆，阻絕了大部分電化學作用之機制或反應要素。若此外層混凝土被覆，先有了瑕疵、或受外在環境影響而破壞後，鋼筋之腐蝕便有利於發生。一旦鋼筋開始腐蝕後，其腐蝕生成物膨脹而向外擴張，造成結構構件之內應力，作用於此被覆層混凝土上。而此被覆層混凝土，外有環境外力作用，內有腐蝕生成物膨脹造成之內應力作用，更形加速其破壞。被覆層混凝土破壞加速後，自然鋼筋之保護便降低，鋼筋之腐蝕也更為加速，形成惡性循環，導致最終整個結構體的破壞。

造成被覆層混凝土破壞的主要因素有許多；如環境變化之影響包括溫度之變化、乾濕交替之影響、海浪外力之作用等。化學作用之影響如混凝土本身化學性質之變化，被覆於混凝土外海洋生物以及其衍生菌類之影響，混凝土之初始品質等等，皆可能為覆層混凝土破壞的影響因素。一如對鋼構結構物之腐蝕中所探討；被覆於混凝土外層、海洋生物以及其衍生菌類之影響可能是雙重的。也就是除了造成構件有效斷面的損失之外，整體結構之衍生質量也將增加，進而造成荷重的增加。當然由於大部分的混凝土港工構造物為重力式，所以結構衍生質量增加對混凝土港工構造物的影響可予忽略。但是構造物一旦被海洋垢生物覆蓋後，除非到相當嚴重的地步，其破壞情形則不易被發覺。

根據相關的研究調查中，台灣各港區碼頭中均發現有海生物附生的問題，較早的調查報告中，如民國七十年宋克義等在海軍相關計劃中⁽⁵⁾即曾作過左營軍港、高雄及基隆港等水垢生物之附著研究。而近來的研究中如台電興達港之調查報告⁽⁶⁾指出，使用防污塗料後仍有海生物附著，如藤壺

(barnacle)、管棲多毛蟲 (polychaet)、苔蟲 (hydrozon) 等等。其他如基隆港、蘇澳港、台中港等也多有調查報告^{(7),(8),(9)}，至於高雄港區，近年來則鮮有相關的調查。高雄港除了為台灣第一大港，亦為國際重要商港，現則規劃為亞太營運中心之重要據點，其重要性不言可喻。因此在本研究中，將集中於被覆於混凝土或鋼構結構外層、海洋垢生物以及其衍生菌類，對此二類材料腐蝕影響之探討，並將以高雄港區為主要研究地區。另外並將針對生物附著造成之腐蝕提出對策檢討，重點則包括如何防止生物附著，以及附著後如何防止或減緩其腐蝕作用。

本研究針對生物附著腐蝕現象及對策方案規劃為下列幾個重點：

(1)了解港區不同地點針對不同材質之構材其海洋附生物附著情形，包括種類、數量、附生速率以及著苗季節等。此一部份必須長期進行，目前研究的結果，將與前一階段之結果，相互結合並共同分析，方能獲知代表性意義。

(2)了解各種不同材質構材在海洋生物附著後其材質變化情形，以及不同之防蝕處理後其海洋附生物附生之變化如何等。

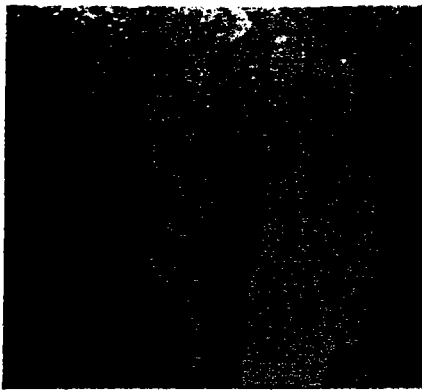
(3)認識海洋附生物附著後對構材造成腐蝕之腐蝕機制 (Corrosion Mechanism)，並依此發展出防治措施及對策方法。基於構材之多樣性，細菌作用之複雜性，此部分工作必須長期進行，並從事相關生物之培養，在時間的考量上必須做長久規劃。



(一)



(二)

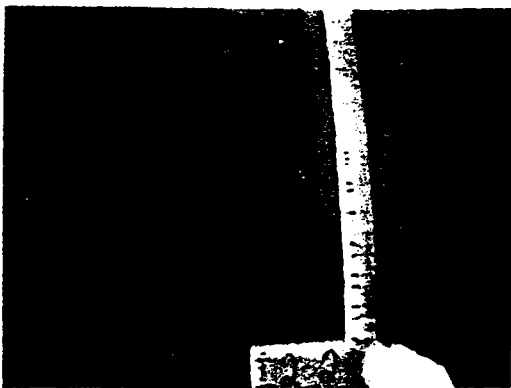


(三)



(四)

基隆港西22號碼頭鋼板樁之破損情形



量測破損狀況



去除海生物附著物後之厚度量測點

圖 1-1 鋼板樁碼頭受海水腐蝕情形

第二章 問題之性質與背景

如前所述，台灣為一四面環海之島國，沿海除了有海港碼頭、防波堤等港工設施外，鑽油平台、跨海大橋等皆處於海洋環境中。而近年來一遇颱風來襲則造成重大損失，如民國八十三年提姆、道格颱風過境，造成花蓮港、蘇澳港、龍洞遊艇港及高雄港等各港口，多處港工設施之破壞，沈陷等重大損害。顯示出相當部分的港工設施，已面臨或提早到達設計之年限，究其原因，各港工結構面臨險惡之海洋環境而被腐蝕、侵襲，造成材料之彈性疲乏，強度損失，以致使用年限大為縮短應為重要因素之一。

港工結構所使用的材料，主要為鋼構材料及混凝土或鋼筋混凝土材料為主。其中鋼構材料如鋼板樁、鋼管樁及配合使用之拉絳鋼纜等各型鋼料，材質均有不同。而混凝土材料之使用則更為廣泛，其中如重力式碼頭結構包括各型混凝土塊、各種沈箱式結構，棧橋式碼頭結構所使用之 PC 樁、RC 樁等均為混凝土、鋼筋混凝土或預力混凝土所組成。因此、就此兩大項之港工構材，其腐蝕之現象及造成腐蝕的原因便有所不同。以下便以此兩大類之港工構材，就其在海洋環境中之腐蝕機制及造成腐蝕的原因分別說明之^{(10),(11)}，並就生物以及細菌腐蝕之部分，加以介紹。

2.1 腐蝕作用與電池類型

參與腐蝕反應的主要電池型態有三種類型⁽¹⁰⁾：相異電極電池 (dissimilar electrode cells)、濃度差異電池 (concentration cells) 及溫度差異電池 (differential temperature cells)。

相異電極電池 (乾電池) (dissimilar electrode cells)

此類型之電池可以乾電池解釋之，如碳棒與鋅處於 NH_4Cl 溶液中，則鋅氧化反應失去電子，碳極則發生還原反應。金屬與其他金屬之介面間，將具有導電不純性，如銅管與鐵管相接合時、冷軋鋼相互焊接時，而形成此一型態之腐蝕電池。

濃度差異電池 (concentration cells)

濃度差異電池可分為鹽度集中電池 (salt concentration cells 或鹽度差異電池)，及氧集中電池 (differential aeration cells 或氧差異電池)。如兩銅片置於濃度相異的硫酸銅溶液中時，在濃度較低一端之銅片將溶解釋出電子，而濃度較高一端之銅，則將被附上溶液中還原之銅，此即為鹽度差異電池。在腐蝕反應中扮演更重要角色的，則為氧濃差電池，其為造成間隙腐蝕 (crevice corrosion) 及孔蝕 (pitting) 之重要反應機制。如圖 2-1 金屬表面被腐蝕生成物堆積後，被區分為與空氣接觸之高氧區與異物堆積下之低氧區，由於電位不同，低氧區將形成腐蝕。而當結構物處於海中時，如圖 2-2 之情形，在水與空氣交會之介面，則將金屬構材區分為與空氣接觸之高氧區，與水面下之低氧區，而形成氧濃差電池，導致水線腐蝕 (water-line corrosion) 現象。

溫度差異電池 (differential temperature cells)

溫度差異電池的產生為，金屬同時處於不同溫度環境中，形成電極之兩部份，浸漬於具同樣組成之電解液中而發生時。其實用上之重要性及基本原理，與前面濃差電池相較之下則較少被提及。

2.2 鋼材構架之腐蝕機制

港工構造中較常使用之結構鋼料有 SS330(SS34), SS400(SS41), SS490(SS50), SS540(SS55) 為結構用鋼，SY24, 30, 40 等為鋼板樁用鋼，預力混凝土用鋼線則有 SWPR1, SWPD1, SWPR2, SWPD3, SWPR7A, SWPR7B, SWPR19 等。因此就這幾型碳鋼材料，其在海洋環境中之腐蝕概可分為以下幾種型態^{(10),(11),(12),(13)}

1. 均勻腐蝕(uniform attack)

腐蝕作用發生時，金屬表面無特定之陰極及陽極區，金屬表面之腐蝕較為均勻，如鐵之表面銹蝕 (rusting of iron)、銀器變晦暗 (silver tarnishing)、金屬在高溫下的氧化現象等均為其中例子。腐蝕速率的估計一

般有年穿透率如 mm/y (millimeters penetration per year), ipy (inches penetration per year), mils (0.001 in. per year) 或重量損失如 gmd (grams per square meter per day), mdd (miligrams per square decimeter per day) 。鋼鐵材料在海水中之均勻腐蝕速率約為 0.13 mm/y, 2.5 gmd, 25 mdd 或 0.005 ipy 。金屬均勻腐蝕之情形可由圖 2-1 示意之。

2. 孔蝕作用(pitting)

孔蝕作用為局部的腐蝕作用，當部分區域的腐蝕速率大於其他區域時則稱為孔蝕。孔蝕的深度有時以孔蝕因子(pitting factor) 來表示；定義為最大穿透深度與平均穿透深度之比值。當孔蝕因子(pitting factor) 之值為一單位值時，則代表腐蝕狀態為均勻腐蝕。

許多的腐蝕現象，均可歸類為孔蝕作用的一種，如金屬在高速相對運動環境中，形成之孔蝕現象，或歸類為沖蝕 (impingement attack, or corrosion-erosion)；又如金屬在較低速相對運動環境中，形成之孔蝕現象，或歸類為侵蝕性腐蝕 (fretting corrosion)；穴蝕或漩渦腐蝕 (cavitation corrosion) 造成蜂巢狀之孔蝕現象，亦為其中一種。金屬受穴蝕作用腐蝕之情形可由圖 2-2 示意之。

3. 伽凡尼腐蝕 (galvanic corrosion)

不同的兩種金屬或合金，置於電解液中時，還原電位較低的金屬將發生氧化作用，而造成腐蝕；還原電位較高的金屬則受到腐蝕保護。此種腐蝕主要因為金屬間不同的電位差而導致，各種金屬與合金在海水中之化學活性，可以伽凡尼系列 (galvanic series) 表示之，故稱為伽凡尼腐蝕 (galvanic corrosion)。

4. 間隙腐蝕(crevice corrosion)

間隙腐蝕主要因為濃度差異電池的產生而引起。若一金屬被分割成兩個區域，此兩個區域具有濃度不同的離子、或溶解之氣體於溶液中，在濃較低的一端，將發生金屬腐蝕作用。由於此種腐蝕現象，通常發生於金屬接合之間隙中，於是稱為間隙腐蝕。金屬受間隙腐蝕作用之情形可由圖 2-3

示意之。

5. 顆粒間腐蝕 (intergranular corrosion)

顆粒間腐蝕（或侵蝕）亦屬局部性腐蝕之一，發生於金屬顆粒邊界、性質不一致時，通常造成材料強度 (strength) 及延展性 (ductility) 之損失。通常在有限面積之顆粒邊界 (granular boundary) 為陽極，其他相接觸之大面積之顆粒則為陰極。此型態之侵蝕作用通常迅速、而且穿透性極為嚴重。金屬受顆粒間腐蝕作用破壞之情形可由圖 2-4 示意之。

6. 應力腐蝕破裂 (stress corrosion cracking)

應力腐蝕破裂為，處於腐蝕環境中時，雖然作用於材料上之應力較小，未達破壞應力，但裂縫仍然發生。作用於材料上之應力，在此一形式的腐蝕時，通常為固定，如材料製作過程中產生之殘餘應力 (residual stress)，固定載重下之拉應力 (tensile stress) 等。

7. 疲勞腐蝕 (corrosion fatigue)

疲勞腐蝕有時也歸納為應力腐蝕之一種，其與應力腐蝕之主要區別為，疲勞腐蝕時、作用於材料上之應力為週期性、往覆作用。例如、在海水腐蝕環境中，鋼料若承受一自然頻率為 $N_f = 10 \times 10^7$ 之應力作用時，其破壞應力減少了四倍之多。理論上、在非腐蝕環境中，材料受到往覆應力作用時，有一疲勞應力極限 (fatigue limit, or endurance limit)，當作用應力低於此極限值時，無論其週期為何，材料均不至破壞；但若處於腐蝕環境時，此一疲勞應力極限 (fatigue limit) 則不再存在。

2.3 鋼筋混凝土之腐蝕作用

由於製成混凝土之水泥中含有鉀(K^+)、鈉(Na^+)、鈣(Ca^{++})等離子，使得混凝土為鹼性體 (PH=12.5)，因此鋼筋表面在強鹼環境中生成一鈍態保護膜 (passive film)。但另一方面則因二氧化碳與氫氧離子作用，生成碳酸根離子，使得混凝土環境趨向中性化或稱碳酸化作用 (carbonation)；而此中性

化作用則不利於鋼筋鈍態保護膜(passive film)的產生。其次在海洋環境中因有濃度極高的氯離子存在，一旦侵入混凝土中，則將造成鋼筋之孔蝕作用⁽¹⁴⁾。一旦鋼筋開始腐蝕後，其腐蝕生成物膨脹而向外擴張，造成結構構件之內應力(應力之大小可超過 2,000psi)，此應力則作用於被覆層混凝土上。而此被覆層混凝土，外有環境外力作用，內有腐蝕生成物膨脹造成之內應力作用，更形加速其破壞。而使得整個混凝土構件外層產生裂縫以及剝落現象。被覆層混凝土破壞加速後，自然鋼筋之保護便降低，鋼筋之腐蝕也更為加速，形成惡性循環，導致最終整個結構體的破壞。

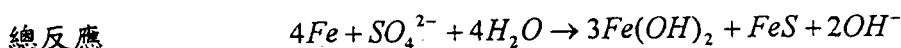
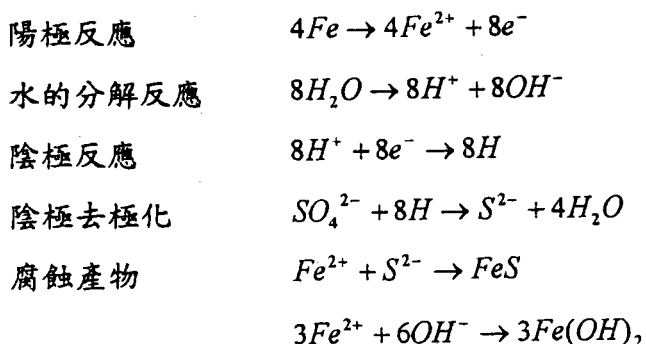
2.4 海垢生物及細菌腐蝕之介紹

海垢生物及細菌對港工構造物所造成之腐蝕，一般認為可能原因為海垢生物排放黏液中所含細菌分解出酸性物質，或海垢生物附著下造成厭氧環境，厭氧菌如硫酸還原菌將硫酸還原為硫化物等酸性物質而造成腐蝕。或者因海垢生物分泌之黏膜附著於金屬表面，造成氧差及濃度差異電池，形成孔蝕作用。然而根據最近的研究中指出^{(15),(16)}：由 Von Wolzogen Kuhr 及 van der Vlugt 所提出之硫酸還原菌的理論，偏向於無氧環境之探討；而實際上若干耗氧菌及微生物，在腐蝕過程中也扮演極重要的角色。因此根據美國工程師學會⁽¹⁷⁾ (National Association of Corrosion Engineers, NACE International) 將影響金屬腐蝕之菌種歸納為四類：

1. 硫酸還原菌(sulfate-reducing bacteria, SRB)

硫酸還原菌為厭氧性細菌，需要在無氧狀態下進行繁殖。一般有關細菌腐蝕的研究中指出，其可造成碳鋼的孔蝕，並產生黑色硫化鐵的產物。其主要的機理為硫酸還原菌利用硫酸鹽(sulfate)，作為最終的電子接受者。進而產生大量的硫化物(sulfide)，此硫化物則將金屬陽極去極化產生硫化鐵(iron sulfide)沈積在陽極表面。在陽極去極化的過程中，陰極表面產生的氫氣被硫化還原菌消耗，加速陰極的去極化而導致金屬腐蝕。

在含有硫酸還原菌的環境中，碳鋼與周圍環境的電化學反應式為：

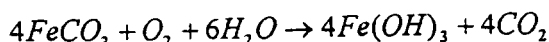


2. 黏稠性細菌膜生成菌(slime-forming bacteria)

凡是細菌細胞具有黏稠性者，一般皆可歸納為此類菌種。此類細菌可產生黏稠性的細胞膜，而且有好氧的特性，在金屬腐蝕過程中，常會形成氧差和濃度差異電池。NACE 的報告中指出、此類細菌除可能造成孔蝕問題之外，在細菌膜與金屬界面間，亦能產生無氧環境，是合硫化還原菌之生存，造成混合性的細菌腐蝕。

3. 鐵氧化菌(iron-oxidizing bacteria)

鐵氧化菌為好氧性菌種，但仍可在含氧量極低的環境中分裂(<0.5 ppm)，其與金屬腐蝕的關係為，鐵氧化菌能將二價的鐵離子氧化為三價的鐵離子：



沈積在金屬表面，形成穩定的被覆層。此被覆層與黏稠性細菌膜混合時，可構成氧差電池，並產生無氧環境而有利厭氧菌的繁殖。

4. 其他藻類、草類及海洋垢生物

藻類和草類進行光合作用和新陳代謝時，間接提供其他好氧與厭氧性細菌生存的環境，使金屬局部孔蝕易於發生。至於海洋垢生物與其衍生細菌之關係；如不同海洋垢生物所產生之菌種其差別性為何？各不同菌種間其對金屬腐蝕之影響為何？或者僅就各不同海垢生物、新陳代謝所造成之

腐蝕環境，整體性之影響為何？以上各個問題由於其複雜性及多樣性，到目前為止甚少具體且完整的報告可資參考。再加上海洋環境之影響具有特殊的區域性，廣泛且系列性的探討實屬必要。

2.5 台灣各港區之海氣象資料

港工結構暴露在海洋環境下，港區及其附近地區之大氣狀態、海象條件，如：溫度變化、濕度交替、潮位、風浪條件、空氣中除濕氣以外之腐蝕因子等，對於港工結構物的腐蝕都會造成影響。因此在本節中將針對台灣地區之風速、風向，溫度、雨量變化，相對濕度，潮位變化作一介紹^{(18),(19)}。

1. 風速及風向分佈

根據中央氣象局之資料，台灣各大港區之風速、風向變化可以由風玫瑰圖表示之。以十年之風速及風向資料為例，基隆港主要吹的為東北風，佔全年 20% 強，其次為北風，風速則有接近三分之一為 4-6 級。台中港區則以北風為主，約佔全年風向 30% 左右，風速則大部分為 1-3 級。高雄港區則較分散，其範圍從西北西至東北東風，約佔全年風向 60% 以上，風速則大部分為 1-3 級，4-6 級風速則出現於偏向西北風時。花蓮則以東北風及西南風為主，約佔全年風向 60% 左右，風速則大部分為 1-3 級，4-6 級風速則出現於西南風時。蘇澳港的風速與風向分佈則與花蓮港類似，但東北風較為偏東、西南風則較為偏西，風速則大部分為 1-3 級。

2. 溫度及雨量

台灣各大港區之溫度及雨量變化及分佈，受到台灣地區整體氣候及地形的影響，大體來說台灣的氣候分佈以台中為分界點，分為南北兩種形式。因此，五大港區中除了高雄港有較明顯的差異之外，其餘四個港區的溫度變化及分佈的情形可說大同小異。一年四季中冬季溫度最低，其中基隆、蘇澳、台中各港區可低達攝氏十六度左右；而花蓮港區約為攝氏十八度，高雄港區則可達到攝氏十九度多。夏季月均溫較高，各港區均可高達攝氏二十八度，不同的在於，高雄港區從五月後直到接近十月，均維持攝氏二

十六度以上，而且除夏季以外，比起其他港區高雄港月均溫均高約二至三度。各大港區之平均月溫度變化情形可參考圖 2-5。

各大港區之雨量變化一如溫度變化，也受到台灣地區整體氣候及地形的影響。雨量較多則較潮濕，較利於腐蝕之發生。各大港區之平均雨量變化圖 2-6、其中可看出在秋、冬兩季以基隆港最高，花蓮與蘇澳次之，春季亦以基隆港較高。至於夏季為颱風季節，中南部雨量較為豐沛，因此高雄及台中則佔較大雨量。不過近兩三年以來，由於全球性氣候變遷之影響，中南部地區一直有雨量不足的現象，因此氣候的影響有較大的不穩定因素。

3. 相對濕度分佈

相對濕度對於腐蝕亦是重要的影響因素之一，尤其是對於鋼筋混凝土，乾濕的差異、對混凝土尺度相關的特性 (dimensional properties) 將造成影響。各大港區的濕度變化，則與各港區之雨量變化及附近地形息息相關。台灣各大港區中，以蘇澳及基隆港之濕度變化最大，尤其蘇澳港年平均相對濕度值達 85%。而實際上，台灣各大港區年平均相對濕度值均偏高，一般均高達 75% 以上。台灣各大港區年平均相對濕度變化情形可參考圖 2-7。

4. 潮位變化

台灣各大港口之潮位變化，以台中港變化最大。根據各港口天文潮統計資料歸納，台中港的年平均高潮位接近五公尺，年平均低潮位約零點八公尺，潮差則接近四公尺。花蓮港及蘇澳港的潮差類似，約為一公尺，基隆港潮差則較小，約為零點五公尺。高雄港的潮差則接近零點七公尺。

5. 酸雨

台灣各大都會區由於工廠林立，汽機車輛成長快速，二氧化碳排放量也增大，因此降雨中含較低的 pH 值，變成全台灣普遍的一種現象。根據以往作過酸雨相關的調查報告中⁽²⁰⁾指出，台北及高雄都會區降雨中之 pH

值最低。若以季節而言、在夏季時降雨中含較低 pH 值的現象最容易發生。圖 2-8 中表示各大港區在一年四季中 酸雨之 pH 值濃度分佈圖。

2.6 台灣各港區之水質狀況

對於港工結構物腐蝕的影響因子中，除了港區及其附近地區之大氣狀態、海象條件之外；海水水質之影響更不能忽略，其中如 pH 值、氯離子含量、硫酸根離子含量、溶氧量、水溫變化，以及其他可能影響港工結構物腐蝕的污染物質。以下就港研所於 79 至 80 年間，在各港區所做水質調查之結果作一概述⁽⁴⁾。

1. pH 值

台灣各大港區海水 pH 值均相當接近，約介於 8.0 至 8.2 之間。即使如高雄港區部分碼頭，因靠近台電大林埔火力發電廠，受到電廠排水影響，港區水質之 pH 值稍低，但仍然接近 8.0。各大港區海水 pH 值較詳細情形可參考圖 2-9。

2. 溶氧量

海水中之溶氧量除了對腐蝕過程產生影響之外，亦將影響海生物之生存，而溶氧量大小又與海洋環境之污染關係密切。台灣各大港區中海水溶氧量，以東部海域之花蓮及蘇澳港較高，其中花蓮高達約 5.8 mg/l，而又以高雄港最低，其溶氧量值為 2.0 mg/l。其可能原因為高雄港區附近有左營、小港、林園等工業區，中洲污水排放管，高屏溪，東港溪沿岸工廠養豬戶廢水排放等等，對港區水質造成嚴重影響，各大港區海水溶氧量可參考圖 2-10。

3. 平均水溫

台灣各港區海水水溫，除了有南北區域性差別之外，主要受到季節性的影響。全年港區海水月均溫變化，基隆港從冬季最低攝氏十七度，到夏季最高約二十七度，台中港從冬季最低攝氏十八度，到夏季最高約攝氏二

十九度多。花蓮港及蘇澳港港區水溫溫度變化則較為緩和，從冬季最低約攝氏二十二度，到夏季最高約攝氏二十六度多。高雄港水域溫度變化，從冬季最低攝氏二十四度，到夏季最高約攝氏三十度多。各港區海水水溫變化情形依四季分佈，可參考圖 2-11。

4. 氯離子含量

港區海水中氯離子含量之高低，對於鋼筋混凝土構造之港工結構物，將影響其混凝土被覆層之耐久性，進而造成內部鋼筋之腐蝕。而一般海水中氯離子含量均高，台灣各港區中亦不例外，其氯離子含量變化值約介於 17,000 ppm 到 20,000 ppm 之間。

5. 硫酸根離子含量

硫酸根離子存在於海水中，對於鋼筋混凝土、以及部分細菌形成之腐蝕均有影響。在台灣各港口中，硫酸根離子於海水中的含量大致類似，介於 2,200 ppm 至 2,600 ppm 之間。

6. 其他污染物質

各港區海域水質，除了以上所介紹與物理、或無機化學性質相關者之外，有機化學相關的物質，對於海垢生物影響，更不能忽略，其中如大腸菌、礦物性油脂、酚類等。如以最新公佈之調查報告中⁽²¹⁾(高屏溪東港溪口及南灣附近海域海水水質監測計劃 83 年 9 月至 84 年 6 月)顯示，高雄港附近海域受到礦物性油脂及酚類之污染甚為嚴重。因此在高雄港區進行港工構材海洋附生物之調查，則更具挑戰性及重要性。

2.7 台灣各港區之海生物以及研究概況

海生物 (fouling organism) 附著是所有海洋工程面臨的重要問題之一，在海洋環境中任何固體物質均會被海生物所附著，而海洋工程的進行提供許多海生物可附著的底質，物體浸在海水中經由物理、化學及生物上的各種不同因子作用後，附著於底質形成複雜的海生物層。海洋生物附著會造成結構物之局部腐蝕及荷重增加。

一般最為常見的海生物有藤壺、管蟲、苔蘚蟲、海鞘及海葵等，這些著生性的生物都具有浮游期幼生，幼生受到水流的帶動散播後，著生於新的環境中。海生物的繁殖受海水深度、溫度、光度及營養物影響，也因季節及潮汐變化而異，幼生的著生（settlement）或者是迴流（recruitment）在族群結構上扮演著重要的角色^{(22),(23),(24)}（Keough 1984, Roughgarden et al. 1985, Menge & Sutherland 1987），而不同種間對底質的競爭及遭掠食者的掠奪，同樣也是影響族群結構的重要因素（Connell 1985, Fairweather 1988）。

幼生在浮游期間需要一些適當的誘引（inducer）才會著生，這些誘引包括水流速度、底質表面的輪廓（Sebens 1983a, Wethey 1986, Pawlik et al. 1991）、光照及化學誘因（Morse 1991, Hadfield & Pennington 1990），如果缺乏相關的誘引，幼生則可能會延後著生（Jensen & Morse 1984, Highsmith & Emlet 1986, Coon et al. 1990a）。許多幼生需直接接觸誘引物質才會著生（Morse & Morse 1984, Pawlik 1986, Raimondi 1988），水流可以協助幼生靠近底質接觸到誘引物質觸發其著生；此外水流的快慢也會影響幼生著生，多毛類 *Phragmatopoma lapidosa* 的幼生在水流緩慢時會浮游於水體中，當水流快速時幼生則會落到底質上（Pawlik et al. 1991）；藤壺的幼生則對於附著面的輪廓會有選擇性（Hannan 1984, Wethey 1986, ）。許多誘引幼生著生的化學物質是從幼生著生後的底質上所發現的，這些物質有三個主要的來源，（1）同種個體（Highsmith 1982, Burke 1984, Jensen & Morse 1984, Pawlik 1986）。浮游幼生受到已著生成體釋放的誘引物質吸引，這種機制不僅能增加釋放於水中的配子受精的機率，也是一中有效的防禦機制（Bernstein et al. 1981, Pawlik 1986）。（2）微生物層（Maki et al. 1989, Bonar et al. 1990, Pearce & Scheibling 1991）。主要的有矽藻、細菌等。（3）食物（Barlow 1990, Hadfield & Pennington 1990）。

不同的海生物其幼生的著生特性不盡相同，了解各種海生物的著生特性及幼生出現的時間，有助於海洋工程進行中減少海垢生物附生；而對於

長久的港灣結構，在設計上也可以針對該海域海生物的特性而有不同的措施。

在台灣沿岸港口曾經進行過的海生物研究不多，以海軍海洋測量局 1981 年在三個港口⁽⁵⁾（左營、高雄、基隆）的研究為例，利用不同附苗板（包含不同防垢漆），在不同季節的著苗種類、數量，以及短期生長有了初步資料。根據上述報告主要的附著生物為多毛類、藤壺、牡蠣、苔蘚蟲。在這些附著生物中附苗的季節並非都是一致的，例如：旋管蟲（*Spirorbis* sp.）之主要附苗季節在夏季，半個月的附著數量即可達 800ind./25cm²，一個月則可附著多達 1600ind./25cm²，秋季著生數量降低，均在 100ind./25cm² 以下，冬季為附苗最低潮，其附苗數量幾乎可以忽略，僅有零星的分佈。但多毛類中的管蟲（*Hydroides norvegica*）主要附苗季節在冬季。此外旋管蟲的著苗分佈在密度較高時與逢機分佈有顯著差異，傾向於均勻分佈（海軍測量局 1981）。在採樣板之兩面，附著生物之數量亦有顯著差異，向陽面之藻類附著較多，生長較快，且管蟲之生長及附著量亦較陰面為快且多；旋管蟲則在陰面之著生數量較多。附著生物之乾重受管蟲及藻類之數量左右，均為向陽面較重，相差可達 70 倍（11.28~2.27）。季節季變化，則在秋季達一次高峰（0.65g/25cm²），冬季有一最高峰，重達 2.4 公克。

2.8 各種腐蝕防治之對策

港工結構材料之防蝕方法，一般而言包括有電氣防蝕工法，塗覆裝工法，鏽蝕餘裕法等，若針對海生物附著之防蝕方法則有塗覆裝工法，鏽蝕餘裕法以及毒性物質殺菌法等。若構材為混凝土材料時，有耐蝕混凝土，或使用添加劑（摻料）的方式處理。各方法之間、何者可行？何者具有較大爭議性？若僅針對港工結構物，哪一種方法較適合？這些議題都值得探討。因此、以下就上面所提各工法作較完整的介紹：

1. 鋼構材料與電化學腐蝕之防治對策

若港工結構物為鋼構材料組成時，一般的防蝕方法包括有電氣防蝕工法、塗覆裝工法、銹蝕餘裕法等。其中又以電氣防蝕工法中之犧牲陽極法，使用最為普及。犧牲陽極法主要在易於鏽損的金屬上，加上適當的、腐蝕電位較高（或還原電位較低）的金屬塊，此金屬塊則替代原構材上之金屬，失去電子為氧化作用，而為犧牲之陽極；而被替代的、原構材上之金屬得以被保護，不易於氧化鏽損。電氣防蝕工法若使用於非浸漬於液體中之金屬物質，則只能局部性發揮作用，對於體積龐大的海洋或港工結構物，在使用上對於犧牲陽極之設計及監測必須更加謹慎。在國內則多有採用塗覆裝工法，來加以保護。其中有使用防鏽漆者，或混凝土材料者；如花蓮港即使用混凝土材料，塗覆於裸露於水面之鋼構材料表面。其目的在於隔絕鋼構材料、與溼氣和空氣的相互作用而不至腐蝕。一般塗覆裝工法之保固年限較短，檢查及重複施工的頻率較高。其中若使用混凝土材料塗覆時，對於其內保護材料之腐蝕現象，在檢視時須格外慎重。至於銹蝕餘裕法，則是在工程設計時，即預先將未來一定時間內，構材可能的銹蝕情況，事先加以考慮，並預先將構材尺寸加大來設計。若使用銹蝕餘裕法時，由於設計時構材尺寸加大，將增加整體結構的重量以及慣性作用力，尤其在使用年限、及銹蝕速率評估時，更須格外慎重。當然除了個別工法之外，複合式將以上介紹各工法一起應用，亦為可行。

2. 鋼筋混凝土腐蝕之防治對策

鋼筋混凝土腐蝕的防治，可以從兩方面來加以考量：

（一）混凝土品質的改善，尤其是對於混凝土的水密性(water resistancy)及耐久性 (durability)。鋼筋於混凝土中發生腐蝕，主要因為外部混凝土保護層未充分發揮效用，以致於氯離子、水及空氣能滲透至保護層內，而造成鋼筋腐蝕。改善混凝土的水密性(water resistancy)及耐久性，首先、在混凝土設計時，除了強度、工作度的考量之外，可適度添加砂灰、或飛灰來增加混凝土的水密性；若欲改善工作度時，儘量使用減水劑以替代增加

用水量；骨料的級配務必均勻，細骨料應小於 0.3 mm 。其次則在於施工方法的改善及施工品質之控制，如均勻拌和與充分夯實、健全施工程序、施工接縫切實密合、水化熱之控制等，均有助於混凝土品質的改善。

(二) 鋼筋本身的防蝕措施，為避免一旦腐蝕因子侵入時，造成鋼筋腐蝕，其措施上有：鋼筋鈍態保護膜、鋼筋外表盡量光滑、混凝土中添加防蝕劑等方法。其中若使用腐蝕抑制劑 (corrosion inhibitors) 拌和於混凝土中，對於內部鋼筋之銹蝕，可能產生保護作用。另外、在混凝土與鋼筋接觸層間，增加其厚度亦為可行方法。

3. 海生物及細菌腐蝕之防治對策

海生物的附著作用，對構材造成腐蝕的影響是雙方面的，在力學分析上討論時，除了腐蝕造成斷面積、強度降低之外，也將使得荷重及慣性作用力增大，以致整體結構之安全因子亦相對降低，對耐久性、安全性有負面影響。因此在針對海生物及細菌腐蝕的防治上，除了前面所提的防治方法之外，另外尚有包括細菌腐蝕的監測、腐蝕的控制等。而在腐蝕的控制上⁽²²⁾如使用殺菌劑 (biocides)、細菌膜處理劑 (biodispersants)、腐蝕抑制劑 (corrosion inhibitors)、沈積物控制劑 (deposit control agents) 等，例如在船舶外殼塗以有機錫、或無機錫以起殺菌效果，或以氯氣殺菌等。然而港工構材所處環境為一開放海港，使用有毒物質來殺菌，一則影響環境生態，二則效果可能有限，並非理想方法。因此在針對海生物及細菌腐蝕從事防治工作，仍具有相當大的挑戰性，最好能依結構組成材料作相對思考。

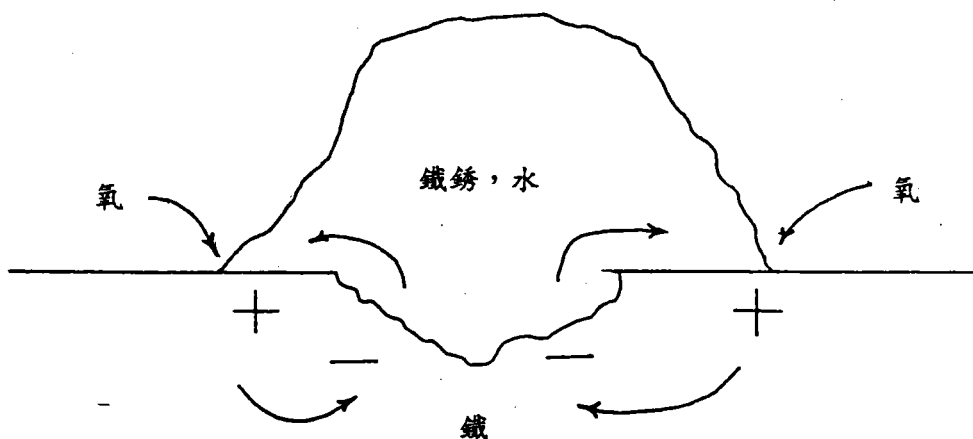


圖 2-1 異物堆積造成之氧濃差電池現象

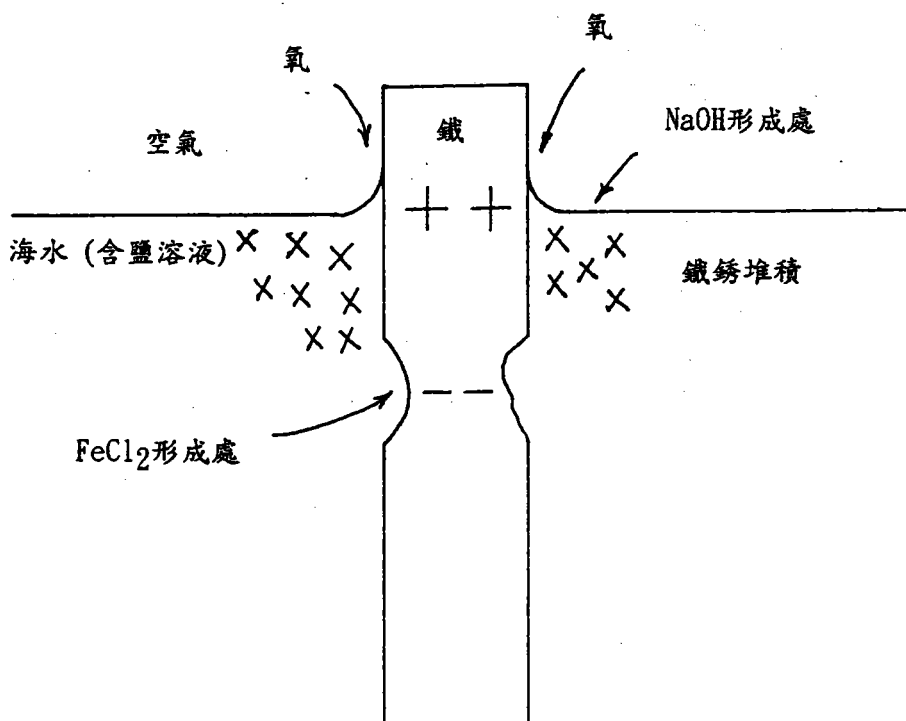


圖 2-2 氧濃差電池造成之水線腐蝕現象

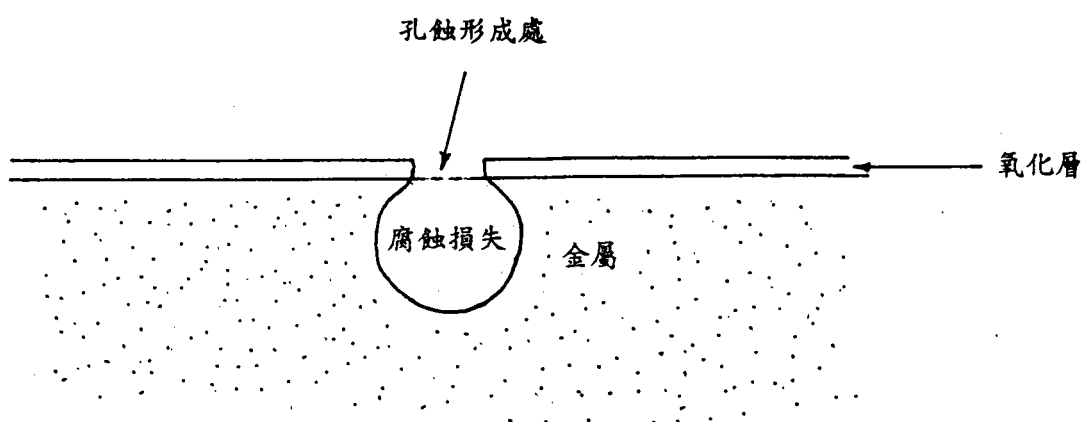


圖 2-3 孔蝕作用造成之金屬腐蝕

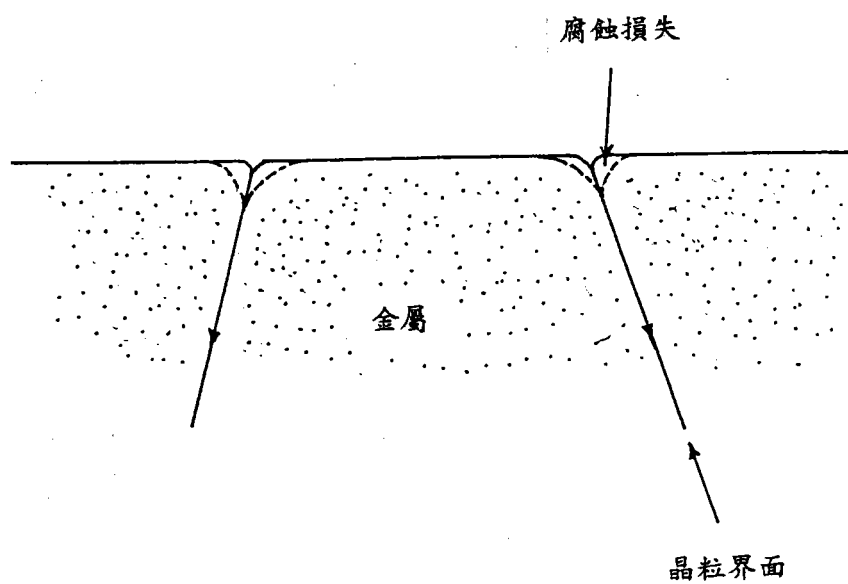


圖 2-4 金屬晶粒間沿晶侵蝕破壞情形

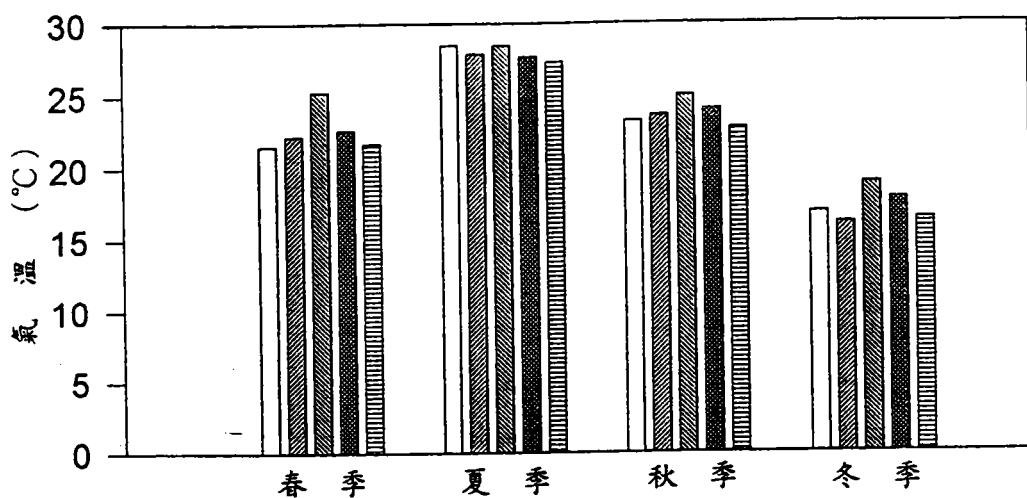


圖 2-5 台灣各大港區四季溫度變化情形

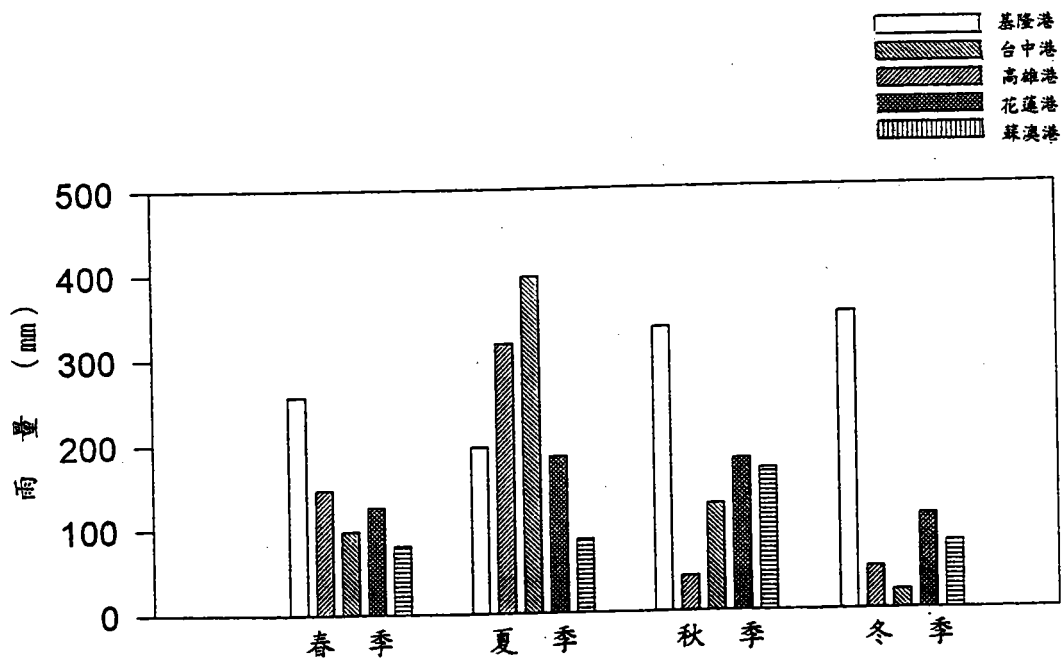


圖 2-6 台灣各大港區四季雨量變化情形

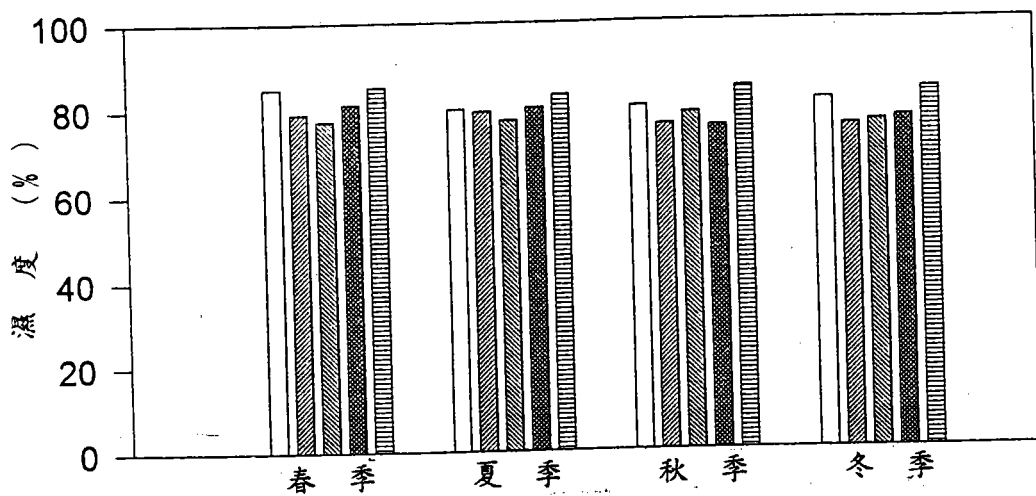


圖 2-7 台灣各大港區四季濕度變化情形

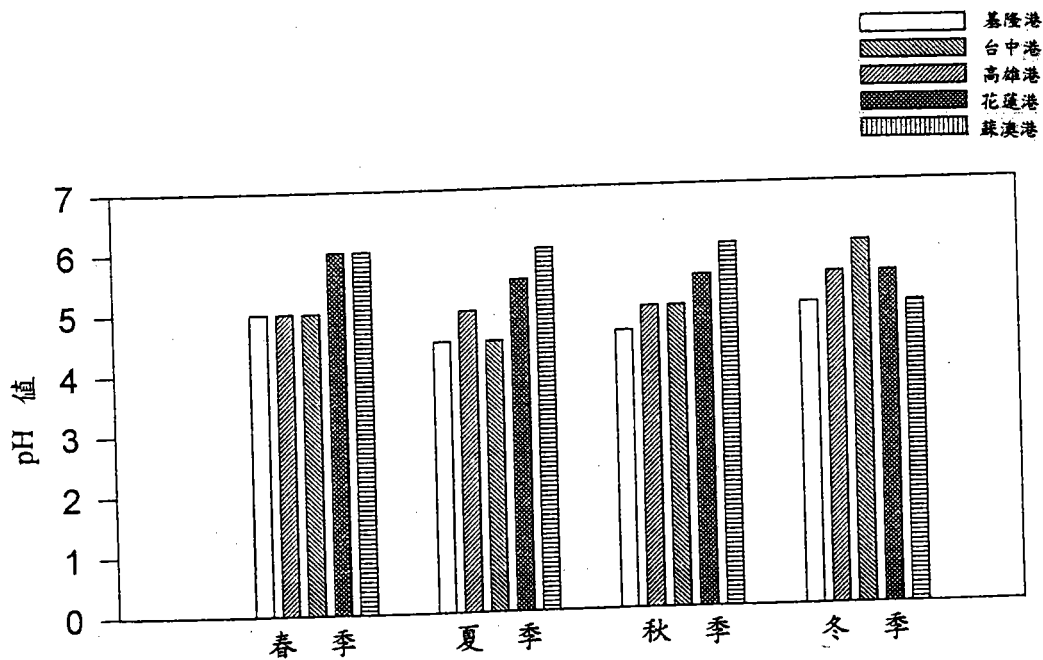


圖 2-8 台灣各大港區四季酸雨 PH 值分佈情形

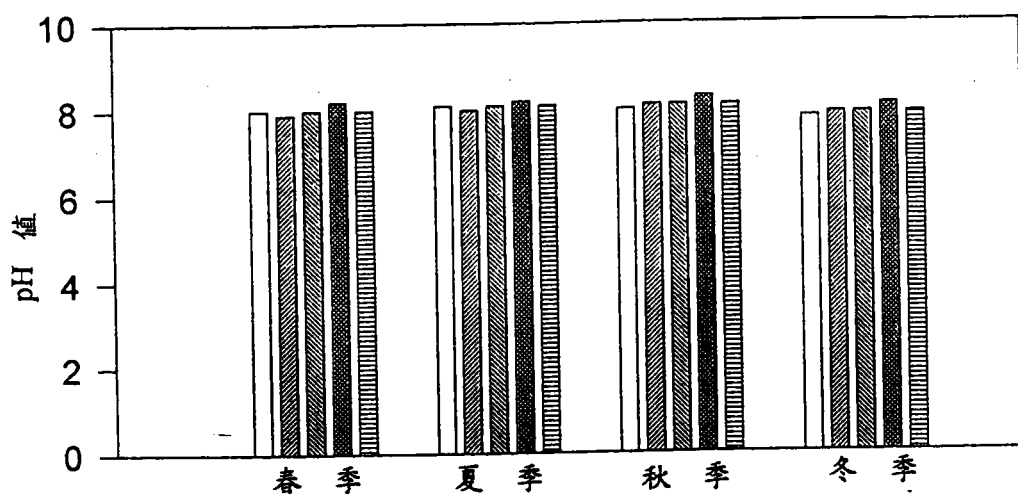


圖 2-9 台灣各港區四季海水 PH 值變化情形

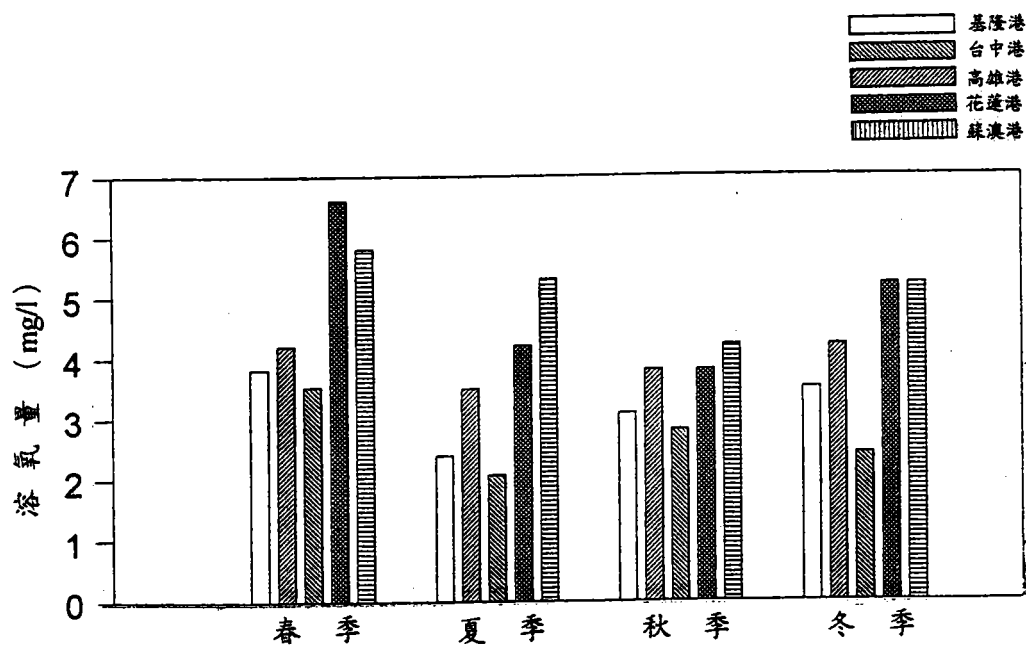


圖 2-10 台灣各港區四季海水溶氧量變化情形

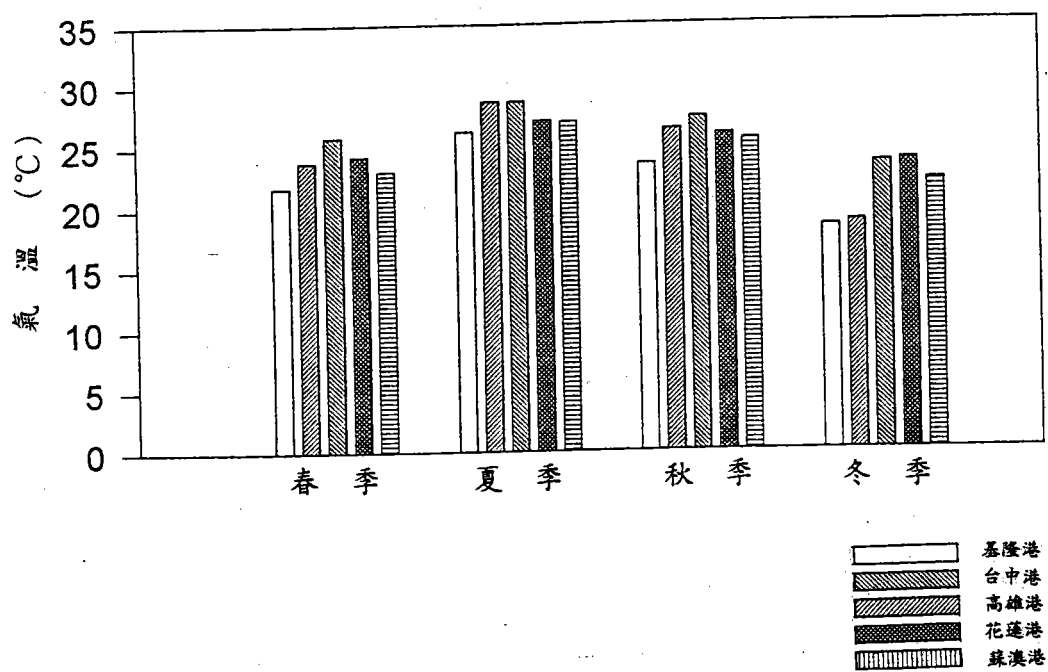


圖 2-11 台灣各港區四季海水水溫變化情形

第三章 研究方法與實驗過程

因目前國內從事相關性之研究甚少，除了港研所於基隆港區正進行之計劃外，其他如中油公司委託工研院所作之研究，則與港工材料有所區分，故資料蒐集不甚容易。本章中依所規劃之研究目標，及相關資料之整理歸納為以下各項工作目標：

- (1)了解港區不同地點、針對不同材質之構材，其海附生物附著情形（包括種類、數量、附生速率等）。
- (2)了解各種不同材質構材在海生物附著後，其材質變化情形，以及不同之防蝕處理後，其海洋附生物附生之可能變化。
- (3)認識海生物附著後，對構材造成腐蝕之可能腐蝕機制(Corrosion Mechanism)。

3.1 現場施放腐蝕試驗

在本工作項目中試片決定、試片架之設計，試片架之安放工作、以及各階段分批取樣均已順利完成。今分述如下：

1. 試片及試片架之設計

- (1) 試片採用傳統港工使用之軋鋼材質，及混凝土材料為主。各構材除了原材料之外，並各有一組經適當防蝕處理作為比對。針對港工使用之軋鋼材質 SS41 (ASTM A36)，則以陰極防蝕工法處理（加裝適當鋁塊為犧牲陽極），並與未處理之對照組作比對。至於混凝土材料製成之試片則添加適量飛灰為混合劑，考慮其增進水密性所能達成之耐蝕效果，並與未處理之對照組作比對。
- (2) 試片之大小，為適合海中附生物之附著，面積太小則將不具代表性。目前軋鋼材質及混凝土材料試片大小均為 20cm × 20cm，厚度則分別為 1cm 及 3cm。

- (3) 試片架之設計為配合當地港工結構之條件，設計為夾具型式，其中須考慮者如穩定性，試片置放，及取樣之易否等。現試片架的型式設計為三層，每層各兩片組合板，上置試片 42 片，相互組合於棧橋式碼頭之混凝土樁上。

2. 現場施放地點調查及試片架安裝

試片架之安裝、經於高雄港區實地堪查，並參照碼頭原設計圖，如圖 3-1 為典型之棧橋式碼頭，選定北港區船隻進出較不妨礙之四座碼頭為安裝地點。分別為#10（十號碼頭）、#14（十四號碼頭）、#33（三十三號碼頭）及#51（五十一號碼頭），其位置如圖 3-2 所標示。此四座碼頭除了共通為棧橋式碼頭之外，亦各有特點。如#10 為各種散裝貨輪停靠最為頻繁者；#14 則正位於愛河出海口之交接處，其由愛河帶入之污染源為造成港區污染之重要原因；#33 則位於高雄港加工出口區內側，愛河出海口左側，屬於較封閉的位置；#51 則位於高雄港加工出口區外側，與#33 比較，屬於較開放區域，停靠者亦散裝貨輪為主。試片架安裝時則以吊車配合潛水人員施工而順利完成。

除此之外，試片於組裝於試片架之前，則必須完成試片之磨光、浸漬、稱重、腐蝕電位測量及基本性質實驗。SS41（ASTM A36）結構用軋鋼依美國 ASTM 標準須使用 ASTM G17.7.2 之浸漬程序處理。各試片在安裝於試片架之前之基本性質如表 3-1 所示。

施工之同時，並由海洋生物專門之潛水人員，至置放處先做海生物之初步採集及分析，初步發現其海生物附著種類與基隆港有所不同。在高雄港區以水肺潛水方式，調查#31（三十一號碼頭）及#51 鋼板樁之海生物，發現這些鋼板樁表面附著生物附著約 1~3cm 厚；且有大量的泥砂覆蓋其上；主要種類為藤壺（*Balanus amphitrite*）、紫孔雀蛤（*Sepeifer virgatus*）、多毛類、海鞘、苔蘚蟲。從#31 不同水深之初步觀察，發現有明顯的差別，由淺到深主要的生物分別為藤壺、紫孔雀蛤、多毛類。

3. 現場浸漬試片（試體）定期採樣分析

在第三年度計畫中，每六個月一次，於現場將試片架撈起，海生組至現場作樣品收集、拍照等必要之配合工作，材料組則於現場同時進行腐蝕電位測量，並將海生物附著之試片一同攜至實驗室作進一步分析。

（1）海生物樣品分析

本研究於民國 85 年 1 月 10 日，在高雄港之#10、#14、#33、#51 擺放試架，每處有三個深度。每個試架有四種不同材質或處理，分別為軋鋼材質試片以陰極防蝕工法處理（加裝上適當鋁塊為犧牲陽極，代號為 SS/CP）和未加犧牲陽極處理之對照組（代號為 SS）、添加適量飛灰為混合劑之混凝土材料試片（代號為 HP）和未飛灰處理之對照組（代號為 CM）。施工之同時，以水肺潛水方式至置放處先做海生物之初步採集及分析。

於民國 85 年 3 月取出第一批試片，5 月取出第二批試片，8 月取出第三批試片，11 月取出第四批試片，86 年 2 月取出第五批試片，86 年 5 月取出第六批試片，86 年 11 月取出第七批試片，87 年 5 月取出第八批試片，浸泡時間分別為 2 個月、4 個月、7 個月、10 個月、13 個月、16 個月、22 個月及 28 個月。試片取出後皆依下列步驟進行採樣工作：

- 《1》將每個試片分別拍照，以便比較各個試片上附著物覆蓋之面積。
- 《2》鑑定和計算每個實驗材質表面上的附著生物。除了藤壺只計算試片左上角 25cm^2 外，其它皆計算整個試片。
- 《3》將每個實驗材質表面上的附著生物，以刮刀刮取整個試片。
- 《4》將刮刀刮取下的樣品置於電子秤上秤取溼重。後置於 60°C 之定溫烘箱，連續烘乾數天，待其重量穩定後，秤取乾重。

（2）試片表面腐蝕分析

試片採樣後、試片表面腐蝕分析之處理步驟可分述如下：

- 《1》採樣時於現場測量各試片之開路電位（腐蝕電位）並拍攝海生物附著與試片腐蝕之情況。
- 《2》於實驗室中除去海生物後，依據 NACE Standard TM-01-69 方法，

以濃鹽酸 + 50 g/l SnCl_2 + 20 g/l SbCl_3 溶液，在室溫下浸泡 SS41 碳鋼試片，達到除銹效果，並稱重以量測其重量損失。

〈3〉鋁犧牲陽極，則利用 70% HNO_3 溶液，在室溫下浸泡 2-3 分鐘，除去其腐蝕產物後稱重，藉由重量損失來估算其腐蝕速率。

3.2 實驗室試驗及分析

此部分的工作配合現場採樣之試樣分析來規劃實驗室試驗，希望能探討、分析出影響試片受到海水腐蝕的個別因素。除先前靜態浸漬試驗與動態浸漬試驗外，目前則進行循環水槽浸漬試驗，以其能更確切模擬現場之狀況。試驗對象則與現場施放試驗之試片相同，儀器設備包括各型電腦設施、腐蝕電位連續量測儀相關儀器、及各型化學分析儀器和相關之化學藥品。具體之實驗方法分述如下：

〈1〉試片準備

實驗室模擬試驗之試片材質與現場施放試驗試片之材質相同，為港工使用之碳鋼材料 SS41 (ASTMA36)，其化學組成 (Wt %) 為 C : 0.26 max, P : 0.04 max, S : 0.05 max。試片形狀為正方形，大小為 $20\text{mm} \times 20\text{mm} \times 0.5\text{mm}$ ，金屬試片暴露面積為 4 cm^2 。試驗前以 #220、#500、及 #800 號砂紙研磨，再以丙酮清洗，放入超音波振盪器內振盪清洗。

〈2〉電化學分析

金屬試片的開路電位 (腐蝕電位) 以伏特計測量。交流電阻抗分析是利用 Zplot 軟體 (Scribner Associate Inc.) 控制 Solartron 1250 頻率反應分析儀與 Solartron 1286 EI 恆電位儀，在開路電位下測試；所施加之 AC 訊號振幅為 10 mV，頻率範圍自 5 mHz 至 10 KHz。直流電極化電阻為利用 Corrware 軟體 (Scribner Associate Inc.) 控制 Solartron 1286 EI 恆電位儀，進行動電位極化曲線掃瞄，其掃瞄速率為 1 mV/sec，掃瞄範圍為開路電位之 $\pm 30\text{ mV}$ 之間。

《3》實驗步驟

本實驗為動態循環浸泡實驗，目的在比較各碼頭之海水於水槽內以固定流速循環狀況下對 SS41 金屬試片的影響，試片準備完成後立即置於水槽中，水槽內為高雄港#10、#14、#33 與#51 之天然海水，水槽中的流速經超音波流速計量測控制在 $25 \pm 1.5 \text{ cm/s}$ 。每日量測記錄各試片之開路電位，並進行交流電阻抗分析與直流電極化電阻測量。於試驗結束後，拍攝試片之腐蝕狀況。

3.3 現場施放生物附苗試驗

為了解各種不同海生物於不同季節之附苗及生長情形，本計劃在第二及第三年度的工作中，則增加了現場施放的海生物附苗試驗。

附苗季節性的調查方法如下：以透明粗磨的壓克力板作為附著板的材料，大小為 $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ 。在高雄港內選取兩個地點，一為停靠駁三號的碼頭，一為 51 號碼頭，將著苗板放至水下 3 米處，每一個點放三塊，每半個月（農曆初五、二十）收放板子一次。將收回的板子帶回實驗室，計算板子上海垢生物的數量。計算方法分為兩種，一為乾計，即直接計算整塊板子上藤壺及管蟲的數量；另一種為溼計，將壓克力板置於水中，計算其他海垢生物的數量（如海葵、水螅、多毛類、二枚貝、苔蘚蟲、海鞘等），計算的方式為選取壓克力板上中間及邊角的位置，並在此兩個位置取大小為 $3\text{cm} \times 3\text{cm}$ 的正方形，計算此正方形中海垢生物。

3.4 現場特定海生物附苗試驗

為瞭解特定海生物對 SS41 碳鋼試片腐蝕機制之影響，選定計畫執行迄今生長豐度最大之藤壺（*Balanus albicostatus*）及管蟲（*Hyroides elegans*）兩種海生物作試驗，位置則以 14 號碼頭和 75 號碼頭為試片施放地點（此二地較不易受駁輪工作影響而導致試片遺失）。

施放時間為民國 87 年 1 月 7 日，施放時並記錄溶氧量、pH 值、溫度和鹽度。SS41 碳鋼試片大小為 10cm×10cm，厚度 1cm，施放前依原施放試片之處理原則先行磨光稱重。試片分為四種形式：

- (1)試片 A，只留藤壺生長。
- (2)試片 B，只留管蟲生長。
- (3)試片 C，將所有附著海生物刮除。
- (4)試片 D，任由海生物生長，不做刮除。

每個碼頭分別置放三組試片，每組試片於水下 0m、3m、6m 處各有四種處理形式之試片吊掛。吊放試片後，每隔二週前往現場將試片取上岸，依不同處理方式以塑膠製器具對試片進行刮除工作。

四種處理方式試片中，試片 A 及試片 B 有助於瞭解特定海生物(藤壺、管蟲)對於腐蝕機制之影響，而試片 C 及試片 D 則可提供相對試片 A、B 之對照背景。(藉由試片 D 亦可初步比較分屬第一港口及第二港口不同水域之海生物附著情形)

表3-1現地試驗試片重量表(1)

#10之試體重量表

單位：公克

號碼	第一層				第二層				第三層			
	SS	CM	SS/CP	HP	SS	CM	SS/CP	HP	SS	CM	SS/CP	HP
1	3180	2473	3148/319.3	2890	3180	2522	3172/318.1	2952	3182	2731	3146/322.0	2640
2	3165	2990	3073/316.3	2527	3198	2618	3190/317.2	2593	2711	2595	3178/323.3	2754
3	3179	2374	3192/319.4	2825	3176	2870	2642/315.5	3008	3188	2580	3141/317.1	2604
4	3174	2746	3158/315.3	2761	3172	2847	3178/318.5	2584	3178	2562	3124/317.6	2469
5	3171	2668	3184/315.9	2513	3178	2504	2705/322	2447	3136	2550	3142/317.8	2800
6	3172	2417	3156/330.6	2568	2731	2796	3070/321.1	2753	3108	2440	3162/314.1	2865
7	3160	2800	2703/321.8	2616	3183	2377	3090/320.3	2312	3152	2496	3189/315.7	2367
8	3178	2754	3181/321.7	2814	3160	2175	3134/314.2	2666	3205	2638	3147/312.8	2673
9	3150	2586	3184/322.4	2547	3219	2678	3129/313.6	2511	3158	2624	3157/317.2	2576
10	3165	2725	3158/322.7	3000	3150	2531	3063/308.9	3086	3160	2872	3167/315.4	2647
11	3152	2618	3168/301.7	2498	3181	2657	3170/315.6	2786	3197	2658	3084/328.5	2754
12	3150	3035	3148/315.6	2657	3111	2620	3134/317.3	2700	3186	2741	3144/315.6	2503
13	3179	2852	3128/321.0	2591	3188	2712	3151/318.0	2547	3181	2704	3149/323.0	2744
14	3178	2649	3180/313.2	2587	3169	2790	3188/321.8	3403	2696	3122	3144/310.8	2460
15	3180	2767	3170/324.1	2575	3183	2470	3160/317.8	2658	3188	2600	3146/314.7	2933
16	2721	2702	3183/318.7	3126	3133	2438	3166/328.6	2618	3193	2532	3157/315.7	2477
17	3186	2675	3140/318.1	2535	3202	2592	3147/313.7	2606	3182	2713	3125/315.4	2583
18	3179	2632	3169/336.8	2398	3177	2709	3122/317	2591	3205	2514	3132/315.5	2562
19	3177	2879	3174/309.5	2457	3196	2707	3153/322	2664	3174	2548	3118/316.9	2807
20	3175	2733	3162/324.1	2623	3192	2504	3149/316	2422	3200	2670	3079/316.6	2610

符號說明：

SS：一般鋼材

CM：普通水泥砂漿體

SS / CP：鋼材 / 陰極防蝕

HP：高性能水泥砂漿體

表3-1現地試驗試片重量表(2)

#14之試體重量表

單位：公克

	第一層				第二層				第三層			
號碼	SS	CM	SS/CP	HP	SS	CM	SS/CP	HP	SS	CM	SS/CP	HP
1	3114	2674	3176/310.5	2475	3162	2725	3164/311.6	2777	3163	2457	3117/315.2	2730
2	3157	2643	3157/311.2	2415	3122	2846	3065/318.0	2529	3150	2540	3127/314.5	2460
3	3176	2622	3166/326.0	2392	2694	2969	3144/321.6	2681	3100	2563	3084/317.6	2549
4	2682	2673	2689/312.8	2452	3159	2774	3133/314.5	3144	3180	2608	3164/316.5	2770
5	3171	2530	3119/312.0	2454	3155	2562	3149/324.7	2991	3164	2496	3117/318.7	2619
6	2695	2585	3140/312.0	2607	3141	2706	3109/317.6	2624	3171	2700	3100/311.6	2369
7	3162	2474	3123/313.0	2727	3166	2418	3167/309.4	2440	2692	2516	3133/311.0	2436
8	3150	2870	3147/318.0	2407	3161	2416	3101/310.0	2483	3164	2563	3129/318.5	2451
9	3126	2713	3140/318.1	2693	2697	2505	3039/317.7	2490	3199	2487	2702/316.0	2704
10	2678	2705	3140/315.0	2570	3057	2688	3101/316.0	2618	3130	2712	3150/318.0	2717
11	3180	2485	3105/315.0	2789	3167	2902	3164/322.1	2573	3176	2639	3152/319.0	2424
12	3155	2770	3110/321.8	2620	3157	2604	3151/318.2	2466	3161	2440	3170/314.0	2504
13	2706	2750	3107/322.0	2469	2695	2385	3153/315.4	2514	3160	2528	2690/315.0	2973
14	3159	2331	3132/318.8	2439	2699	2600	3143/313.1	2547	3141	2560	3153/312.0	2411
15	3106	2641	3164/319.0	2787	3152	2688	3159/318.5	2762	3174	2633	3150/314.1	2327
16	3169	2620	3127/312.9	2419	2673	2537	2688/316.3	2533	3114	2465	3167/322.0	2676
17	3176	2335	3170/315.0	3016	3054	2563	3163/319.3	2684	3124	2512	3132/318.4	2593
18	3149	2791	3114/320.4	2692	2689	2473	3156/318.0	2431	3154	2613	2678/316.0	2608
19	3140	2724	3145/315.6	2703	3143	2806	3137/315.6	2609	3169	2595	2676/317.2	2918
20	3147	2622	3162/313.0	2812	3066	2692	3035/313.0	2746	3129	2435	3130/314.2	2799

符號說明：

SS：一般鋼材

CM：普通水泥砂漿體

SS / CP：鋼材 / 陰極防蝕

HP：高性能水泥砂漿體

表3-1現地試驗試片重量表(3)

#33之試體重量表

單位：公克

號碼	第一層				第二層				第三層			
	SS	CM	SS/CP	HP	SS	CM	SS/CP	HP	SS	CM	SS/CP	HP
1	3222	2551	3175/314.7	2307	3172	2625	3077/322.0	2582	3144	2687	3059/315.4	2902
2	3154	2670	3176/318.5	2477	2717	2372	3108/319.8	2657	3153	2333	3136/315.6	2536
3	3171	2739	3170/325.4	2739	3173	2800	3090/322.7	3165	3106	2566	3201/322.2	2509
4	2730	2934	3112/322.0	2377	3175	2535	3154/323.2	2650	3126	2538	3179/316.1	2516
5	3166	2280	3157/321.0	2854	3165	2613	3128/321.6	2687	3180	2419	3130/326.0	2871
6	3066	2275	3164/317.7	2346	3130	2678	3184/323.2	2664	3142	2539	3169/323.0	2515
7	3122	2764	3061/329.4	2596	3162	2798	3187/315.2	2604	3139	2477	3115/316.2	2810
8	2713	2631	3169/324.4	2574	3178	2669	3170/320.5	2803	3177	2424	3201/323.1	2470
9	3170	2466	3187/316.5	2648	3189	2511	2707/320.0	2527	3209	2791	3127/322.1	2582
10	3150	2641	3162/317.7	2551	3195	2918	3167/322.8	2603	3195	2431	3164/316.8	2611
11	3140	2482	3151/317.5	2783	3167	2327	3115/317.4	2978	3199	2710	3176/320.1	2221
12	2694	2561	3152/316.3	2676	2693	2815	3170/316.8	2968	3186	2634	3088/317.8	3044
13	3153	2747	3165/323.6	2434	3186	2395	3098/315.5	2725	3160	2989	3120/314.7	2671
14	3159	2509	3169/319.6	2852	3129	2532	3160/320.4	2719	3164	2253	3144/316.3	2514
15	3148	2537	3158/322.0	2904	3126	2368	3052/321.5	2543	3152	2405	3119/319.5	2710
16	3177	2639	3135/319.8	2742	3186	2609	3063/319.8	2668	3150	2840	3171/325.8	2560
17	3169	2404	3135/311.4	2417	3136	2540	3149/320.4	2569	3153	2695	3137/321.2	2779
18	2705	2640	3159/314.7	2653	3148	2616	3165/321.1	2771	3179	2726	3154/320.0	2642
19	2697	2761	2699/317.8	2723	3131	2363	3203/316.5	2695	3176	2618	3192/318.9	2428
20	3183	2748	3151/316.2	2562	3149	2803	2694/312.0	2915	3179	2801	3128/322.5	2916

符號說明：

SS：一般鋼材

CM：普通水泥砂漿體

SS / CP：鋼材 / 陰極防蝕

HP：高性能水泥砂漿體

表3-1現地試驗試片重量表(4)

#51之試體重量表

單位：公克

	第一層				第二層				第三層			
號碼	SS	CM	SS/CP	HP	SS	CM	SS/CP	HP	SS	CM	SS/CP	HP
1	3175	2484	2695/312.0	2731	2709	2582	2704/316.0	2566	2718	2962	3134/313.2	2450
2	3139	2561	3131/318.1	2445	2691	2577	3176.5/316	2738	3178	2602	3093/320.0	3167
3	3159	2565	3082/312.3	2732	3086	2820	3164/319.0	2617	3187	2718	2697/316.0	2397
4	3181	2483	2712/317.0	3020	3105	2758	3172/317.0	2320	3156	2613	3133/312.0	2642
5	2696	2495	3152/316.0	2659	3164	2622	2699/316.0	2721	3191	2575	3110/317.8	2821
6	3133	2551	3156/316.8	2356	3178	2609	3143/313.0	2196	2703	2506	3176/326.0	2657
7	3170	2613	3134/321.0	2721	2700	2592	3136/316.0	2580	3143	2878	3123/317.0	2558
8	3157	2588	3086/320.1	2453	3170	2673	3134/317.8	2473	3187	2690	3104/314.0	2685
9	3134	2490	3134/318.4	2807	3182	2900	2702/324.0	2767	3175	2805	3101/317.0	2900
10	2739	2483	3192/317.0	287	3200	2852	2698/318.0	2990	3163	2840	3159/315.0	3064
11	3157	2555	3125/317.0	2577	3177	2860	3136/318.0	2520	3170	2533	2713/318.0	2665
12	2697	2601	3158/316.0	2765	3181	2637	2685/323.0	2645	3153	2583	3111/318.0	3152
13	3182	2536	3190/312.0	2973	3170	2958	3177/316.0	2688	3133	2628	3169/318.1	2401
14	2715	2814	3175/313.0	2600	2742	2725	3157/313.0	2540	3182	2544	3163/313.8	3006
15	3165	2528	3182/321.0	2779	3174	2328	3138/315.0	2486	3128	2809	3176/312.0	2463
16	3198	2579	3185/316.0	2703	2720	2785	3184/317.0	2586	3098	2679	2703/313.0	2447
17	3135	2487	3124/318.0	2593	3166	2648	3165/318.0	2314	3125	2783	3173/322.0	2787
18	3138	2473	2700/320.1	2591	3180	2640	3151/313.0	2437	2689	2454	3177/307.0	2564
19	3171	2566	3136/364.0	2503	3178	2710	3129/312.0	2386	2705	2700	3156/321.0	2914
20	3167	2645	3174	2523	3134	2935	2710/317.0	2569	3160	2651	3094/316.0	2784

符號說明：

SS：一般鋼材

CM：普通水泥砂漿體

SS / CP：鋼材 / 陰極防蝕

HP：高性能水泥砂漿體

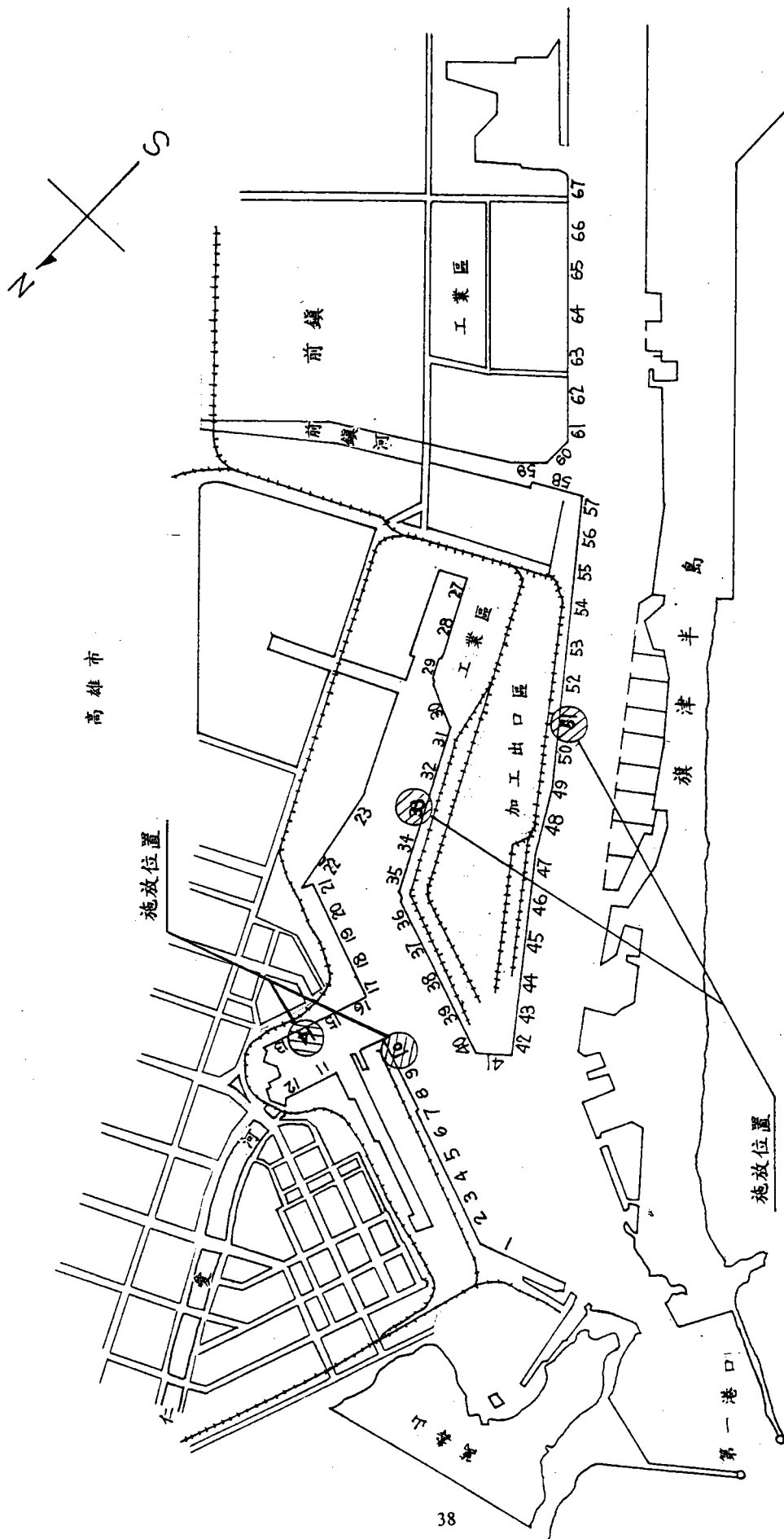


圖3-2 高雄港區試片架現場施放位置圖

第四章 試驗結果分析與討論

對港口固定設施而言，因放置水中時限長，中途不可能上塢維修，長期的生物附著對港工結構物的腐蝕，造成一定程度的影響，應毋庸置疑。但其形成機制、影響層面、以及與時間的關係，則仍是有待探討的課題。至於短期的生物附著變異是否會對長期腐蝕的程度有重大影響仍不清楚。但若確實如此，則對港灣工程施工的季節可能要有所選擇，因為海垢生物的附苗有季節性，不同季節放下的附苗板第一層附上去的生物（直接與表面接觸）會有所不同。不同深度中海洋附著生物常有垂直分層的現象，這是否會造成腐蝕速率的差異，而在港灣設施材質或厚度上需有所調整是值得研究的。棧橋式碼頭的鋼板樁，靠外者受光較強，靠內者則長期處於比較暗的環境中海垢生物的差異應很明顯，但對腐蝕速率是否造成差異有待實際比較。因此，本研究計劃針對高雄港定期採集不同地點、不同深度、不同材料試片之附著生物樣本，攜回實驗室，進行附著生物之歸類鑑定及豐度計量，以了解附著生物之種類差異，與各種附著生物之滋生速度，以期能完整了解高雄港附著生物之種類及其變化。

4.1 海生物附著現場調查結果與討論

此部份針對 86 年 11 月及 87 年 5 月在高雄港四個碼頭的採樣結果進行討論。每個碼頭各取回三個不同深度，四種不同材質的試片各兩片，依其在水中試架上的固定方向分為向光面(Light)及背光面(Dark)，記錄每片試片上附著生物的種類、數量、生物覆蓋面積、總乾重及總溼重，浸漬時間分別為 22 及 28 個月。

1. 附著生物覆蓋面積

(1) 試片材質與處理之差異

86 年 11 月取回的試片中，在 CM 材質上，藤壺有最大的覆蓋面積，

平均值為 $64 \pm 10\text{cm}^2$ (Mean $\pm$ S.E.)；在 HP 材質上，二枚貝與纓鰓蟲有最大的覆蓋面積，平均值分別為 $62 \pm 14\text{cm}^2$ 與 $20 \pm 6\text{cm}^2$ ；而管蟲在 SS/CP 材質上有最大的覆蓋面積，平均值為 $276 \pm 11\text{cm}^2$ 。附著生物（二枚貝、管蟲、藤壺、纓鰓蟲、苔蘚蟲）覆蓋面積於軋鋼材質試片（SS,SS/CP）和混凝土材質試片（CM,HP）兩類材質四種試片間沒有顯著的差異

（ $p>0.05$ ）。在相同材質不同處理（有無防鏽處理與有無飛灰處理）下，兩類材質均沒有顯著差異（ $p>0.05$ ）。在 87 年 5 月取回的試片上，牡蠣在 CM 材質上有最大的覆蓋面積，平均值為 $10 \pm 3\text{cm}^2$ ；苔蘚蟲與二枚貝在 HP 材質上有最大的覆蓋面積，平均值分別為 $40 \pm 5\text{cm}^2$ 與 $62 \pm 17\text{cm}^2$ ；群體海鞘在 SS 在材質上有最大的覆蓋面積，平均值為 $8 \pm 2\text{cm}^2$ ；藤壺與管蟲在 SS/CP 材質上有最大的覆蓋面積，平均值分別為 $104 \pm 12\text{cm}^2$ 與 $276 \pm 12\text{cm}^2$ 。附著生物（藤壺、纓鰓蟲、苔蘚蟲、牡蠣）覆蓋面積於軋鋼材質試片（SS,SS/CP）和混凝土材質試片（CM,HP）兩類材質四種試片間沒有顯著的差異（ $p>0.05$ ）；而管蟲、二枚貝與群體海鞘在四種試片間有顯著的差異（ $p<0.05$ ）。在相同材質不同處理（有無防鏽處理與有無飛灰處理）下，管蟲與群體海鞘在有無防鏽處理間（SS 與 SS/CP）有顯著差異（ $p<0.05$ ）（圖 4-1、4-2、4-3）。

(2) 置放地點之差異

比較#10、#14、#33、#51，四個不同碼頭置放地點間，試片上附著生物（二枚貝、管蟲、藤壺、纓鰓蟲、苔蘚蟲、牡蠣、群體海鞘）覆蓋面積之差異。86 年 11 月取回的試片所得的數據顯示，藤壺與纓鰓蟲在#10 覆蓋面積最高，平均值分別為 $104 \pm 9\text{cm}^2$ 與 $26 \pm 2\text{cm}^2$ ；二枚貝在#14 覆蓋面積最高，平均值為 $151 \pm 11\text{cm}^2$ ；而管蟲在#51 覆蓋面積最高，平均值為 $287 \pm 12\text{cm}^2$ 。不同點間的覆蓋面積均有顯著差異（ $p<0.05$ ）。在 87 年 5 月取回的試片所得的數據顯示，藤壺、纓鰓蟲、牡蠣、群體海鞘與苔蘚蟲，在#10 覆蓋面積最高，平均值分別為 $136 \pm 12\text{cm}^2$ 、 $99 \pm 12\text{cm}^2$ 、

17 ± 3cm²、10 ± 2cm²與 50 ± 6cm²；二枚貝在#14 覆蓋面積最高，平均值為 102 ± 11cm²；而管蟲在#51 覆蓋面積最高，平均值為 275 ± 11cm²。不同碼頭間，不同生物的覆蓋面積均有顯著差異（ $p < 0.05$ ）（圖 4-4、4-5、4-6）。

(3)離碼頭面深度差異

比較各點置於 0、3、6 公尺不同水深的試片。在 86 年 11 月取回的試片，藤壺在 0 公尺覆蓋面積最高，平均值為 68 ± 8cm²；而管蟲與纓鰓蟲在水深 3 公尺覆蓋面積最高，平均值分別為 200 ± 13cm² 與 23 ± 4cm²。苔蘚蟲覆蓋面積在不同的水深沒有顯著的差異（ $p > 0.05$ ），但二枚貝、管蟲、藤壺、纓鰓蟲的覆蓋面積在不同水深有顯著的差異（ $p < 0.05$ ）。在 87 年 5 月取回的試片中，二枚貝在 0 公尺覆蓋面積最高，平均值為 43 ± 9cm²；而管蟲在水深 3 公尺覆蓋面積最高，平均值為 274 ± 12cm²；藤壺、苔蘚蟲、群體海鞘、纓鰓蟲與牡蠣在水深 6 公尺覆蓋面積最高，平均值分別為 122 ± 12cm²、44 ± 5cm²、9 ± 2cm²、97 ± 10cm² 與 18 ± 2cm²。所有的附著生物覆蓋面積皆有顯著的差異（ $p < 0.05$ ）（圖 4-7、4-8、4-9）。

(4)試片向光面與背光面的比較

比較試片向光面與背光面附著生物的覆蓋面積發現，在 86 年 11 月取回的試片中，藤壺、管蟲、二枚貝與纓鰓蟲在向光面有較高的的覆蓋面積，平均值分別為 63 ± 7cm²、177 ± 13cm²、39 ± 6cm²、與 17 ± 2cm²。二枚貝與藤壺覆蓋面積在向光面與背光面間有顯著差異（ $p < 0.05$ ），此兩種生物其向光面附著生物覆蓋面積均顯著大於背光面。在 87 年 5 月取回的試片中，藤壺、管蟲、苔蘚蟲、群體海鞘、二枚貝與纓鰓蟲在向光面有較高的覆蓋面積，平均值分別為 104 ± 8cm²、264 ± 10cm²、40 ± 3cm²、6 ± 1cm²、39 ± 6cm² 與 85 ± 7cm²。二枚貝、苔蘚蟲、管蟲與纓鰓蟲覆蓋面積在向光面與背光面間有顯著差異（ $p < 0.05$ ），所有生物在向光面的

覆蓋面積均顯著大於背光面（圖 4-10、4-11、4-12）。

2. 附著生物數量

(1) 試片材質或處理之差異

86 年 11 月取回之試片，管蟲在 CM 材質上，有最高的數量，平均值為 91 ± 10 隻/400cm²；二枚貝與纓鰓蟲在 HP 材質，有最高的數量，平均值分別為 45 ± 10 隻/400cm² 與 2 隻/400cm²。藤壺在 SS/CP 材質上，有最高的數量，平均值為 39 ± 5 隻/400cm²。藤壺、纓鰓蟲、苔蘚蟲、牡蠣數量於軋鋼材質試片和混凝土材質試片兩類材質四種試片間沒有顯著的差異（ $p > 0.05$ ）。在相同材料不同處理分析結果方面，經過防鏽處理與未經防鏽處理的軋鋼材質試片管蟲之數量有顯著的差異（ $p < 0.05$ ）。經過防鏽處理的試片管蟲數量顯著大於未經防鏽處理的試片。87 年 5 月取回之試片，藤壺在 CM 材質上，有最高的數量，平均值為 31 ± 6 隻/400cm²；二枚貝與管蟲在 HP 材質上有最高的數量，平均值分別為 5 ± 2 隻/400cm² 與 135 ± 13 隻/400cm²；纓鰓蟲在 SS 材質上，有最高的數量，平均值為 13 ± 4 隻/400cm²。藤壺與管蟲的數量於軋鋼材質試片和混凝土材質試片兩類材質四種試片間有顯著的差異（ $p < 0.05$ ）。在相同材料不同處理分析結果方面，經過防鏽處理與未經防鏽處理的軋鋼材質試片管蟲之附著密度有顯著的差異（ $p < 0.05$ ）。經過防鏽處理的試片管蟲數量大於未經防鏽處理的試片（圖 4-13、4-14、4-15）。

(2) 置放地點之差異

比較#10、#14、#33、#51，四個不同碼頭置放地點間，試片上附著生物數量之差異。從 86 年 11 月攜回的試片，藤壺在#10 有最高的數量，平均值為 74 ± 6 隻/400cm²；二枚貝與纓鰓蟲在#14 有最高的數量，平均值分別為 116 ± 11 隻/400cm² 與 5 隻/400cm²；管蟲在#51 有最高的數量，平均值為 158 ± 11 隻/400cm²。二枚貝、管蟲、藤壺、纓鰓蟲在不同地點間的數量均有顯著差異（ $p < 0.05$ ），而苔蘚蟲在不同地點的數量沒有顯著

差異 ($p>0.05$)。在 87 年 5 月取回之試片中，纓鰓蟲、藤壺、與牡蠣在 #10 有最高的數量，平均值分別為 26 ± 4 隻/ 400cm^2 、 40 ± 7 隻/ 400cm^2 與 1 隻/ 400cm^2 ；二枚貝在 #14 有最高的數量，平均值為 22 ± 3 隻/ 400cm^2 ；管蟲在 #51 有最高的數量，平均值為 167 ± 12 隻/ 400cm^2 。二枚貝、管蟲、藤壺、纓鰓蟲、與牡蠣在不同地點間的數量均有顯著差異 ($p<0.05$)，而苔蘚蟲與群體海鞘在不同地點的數量沒有顯著差異 ($p>0.05$) (圖 4-16、4-17、4-18)。

(3) 離碼頭面深度差異

比較各點置於 0、3、6 公尺不同水深試片上的附著生物數量。在 86 年 11 月攜回的試片中，二枚貝與藤壺在 0 公尺位置數量最高，平均值分別為 54 ± 9 隻/ 400cm^2 與 45 ± 6 隻/ 400cm^2 ；管蟲在 3 公尺位置數量最高，平均值為 109 ± 11 隻/ 400cm^2 ；纓鰓蟲在 6 公尺位置數量最高，平均值為 3 隻/ 400cm^2 。苔蘚蟲與纓鰓蟲數量在不同水深無顯著差異 ($p>0.05$)，但二枚貝、管蟲、藤壺與牡蠣有顯著差異 ($p<0.05$)。在 87 年 5 月取回之試片中，二枚貝與藤壺在 0 公尺位置數量最高，平均值分別為 9 ± 2 隻/ 400cm^2 與 37 ± 6 隻/ 400cm^2 ；管蟲與纓鰓蟲在 3 公尺位置數量最高，平均值分別為 129 ± 11 隻/ 400cm^2 與 16 ± 3 隻/ 400cm^2 ；牡蠣在 6 公尺位置數量最高，平均值為 1 隻/ 400cm^2 。苔蘚蟲與管蟲數量在不同水深無顯著差異 ($p>0.05$)，但二枚貝、纓鰓蟲、藤壺、群體海鞘與牡蠣的數量在不同水深有顯著差異 ($p<0.05$) (圖 4-19、4-20、4-21)。

(4) 試片向光面與背光面的比較

比較試片向光面與背光面附著生物的數量發現，在 86 年 11 月攜回的試片中，二枚貝、藤壺、管蟲與纓鰓蟲在向光面有較大的數量，平均值分別為 45 ± 8 隻/ 400cm^2 、 48 ± 5 隻/ 400cm^2 、 86 ± 8 隻/ 400cm^2 與 3 隻/ 400cm^2 。二枚貝、藤壺、牡蠣在向光面與背光面的數量有顯著差異

($p < 0.05$)，二枚貝與藤壺向光面數量均顯著大於背光面；而牡蠣向光面數量顯著小於背光面；在 87 年 5 月取回之試片中，二枚貝、藤壺、管蟲與纓鰓蟲在向光面有較大的數量，平均值分別為 7 ± 2 隻/400cm²、 33 ± 5 隻/400cm²、 137 ± 9 隻/400cm² 與 13 ± 2 隻/400cm²。二枚貝、藤壺、管蟲在向光面與背光面的數量有顯著差異 ($p < 0.05$)。二枚貝、藤壺、管蟲與纓鰓蟲向光面數量均顯著大於背光面；而群體海鞘與牡蠣向光面數量顯著小於背光面 (圖 4-22、4-23、4-24)。

3. 附著生物的總乾重與總溼重

(1) 試片材質與處理之差異

從 86 年 11 月攜回的試片所得的數據顯示，在 HP 材質上總乾重與總溼重最大，平均值分別為 56 ± 6 (g) 與 118 ± 9 (g)。在軋鋼材質試片和混凝土材質試片兩類材質四種試片間附著生物的總乾重與總溼重均沒有顯著的差異 ($p > 0.05$)。在相同材質不同處理 (有無防鏽處理與有無飛灰處理) 下，兩類材質附著生物的總乾重與總溼重均沒有顯著差異 ($p > 0.05$)；而 87 年 5 月取回的試片所得的數據顯示，在 SS 材質上總乾重與總溼重最大，平均值分別為 55 ± 6 (g) 與 89 ± 9 (g)。在軋鋼材質試片和混凝土材質試片兩類材質四種試片間附著生物的總溼重沒有顯著的差異 ($p > 0.05$)，而總乾重有顯著的差異 ($p < 0.05$)。在有無防鏽處理間 (SS, SS/CP)，附著生物的總乾重與總溼重均有顯著差異 ($p < 0.05$) (圖 4-25)。

(2) 置放地點之差異

比較 #10、#14、#33、#51，四個不同碼頭置放地點間，附著生物的總乾重與總溼重差異。在 86 年 11 月攜回的試片中，#10 總乾重與總溼重最大，平均值分別為 71 ± 5 (g) 與 118 ± 8 (g)。附著生物總乾重與總溼重在不同的碼頭有顯著差異 ($p < 0.05$)；而在 87 年 5 月取回的試片中，#10 總乾重與總溼重最大，平均值分別為 81 ± 8 (g) 與 137 ± 11 (g)。附著生物

總乾重與總溼重在不同的碼頭均有顯著差異 ($p<0.05$) (圖 4-26)。

(3)離碼頭面深度差異

比較各點置於 0、3、6 公尺不同水深的試片。在 86 年 11 月攜回的試片中，0 公尺水深總乾重與總溼重最大，平均值分別為 $54 \pm 5(g)$ 與 $114 \pm 8(g)$ 。不同深度的附著生物總乾重與總溼重皆無顯著差異 ($p>0.05$)。而在 87 年 5 月取回的試片中，6 公尺水深總乾重與總溼重最大，平均值分別為 $56 \pm 8(g)$ 與 $88 \pm 12(g)$ 。結果顯示在不同深度的附著生物總乾重與總溼重皆有顯著差異 ($p<0.05$) (圖 4-27)。

(4)試片向光面與背光面的比較

比較試片向光面與背光面附著生物總乾重與總溼重。在 86 年 11 月攜回的試片中，向光面附著生物的總乾重與總溼重較大，平均值分別為 $65 \pm 5(g)$ 與 $131 \pm 7(g)$ 。向光面與背光面附著生物總乾重與總溼重均有顯著差異 ($p<0.05$)；而在 87 年 5 月取回的試片中，向光面附著生物的總乾重與總溼重較大，平均值分別為 $50 \pm 4(g)$ 與 $86 \pm 7(g)$ 。向光面與背光面附著生物總乾重與總溼重均有顯著差異 ($p<0.05$) (圖 4-28)。

4.管蟲覆蓋面積的季節性變化

在所有的附著生物中，以管蟲的生物量最高，因此我們將管蟲在不同時間（附著板浸泡在水中的時間），不同碼頭，不同水深的覆蓋面積做分析。由於管蟲的覆蓋面積在不同的附著板材質上沒有顯著差異，且向光面的附著量顯著大於背光面，因此我們將不同材質的資料合併，並只取向光面的數據來分析管蟲覆蓋面積的季節性變化。結果在#10，水下 0m 與 6m 管蟲最大的覆蓋面積皆出現在 87 年 5 月，平均值分別為 290 ± 45 隻/400cm² 與 209 ± 30 隻/400cm²；水下 3m 處在 87 年 2 月管蟲最大的覆蓋面積，平均值為 295 ± 28 隻/400cm²。在#14，水下 0m 與 3m 管蟲最大的覆蓋面積

皆出現在 87 年 5 月，平均值分別為 188 ± 58 隻/400cm² 與 260 ± 39 隻/400cm²；水下 6m 處在 86 年 11 月時，管蟲有最大的覆蓋面積，平均值為 167 ± 41 隻/400cm²。在#33，水下 0m 與 3m 管蟲最大的覆蓋面積皆出現在 87 年 5 月，平均值分別為 165 ± 55 隻/400cm² 與 315 ± 37 隻/400cm²；水下 6m 處在 86 年 2 月時，管蟲有最大的覆蓋面積，平均值為 267 ± 34 隻/400cm²。在#51，水下 0m 與 3m 管蟲最大的覆蓋面積皆出現在 87 年 5 月，平均值分別為 270 ± 43 隻/400cm² 與 351 ± 17 隻/400cm²；水下 6m 處在 86 年 11 月時，管蟲有最大的覆蓋面積，平均值為 350 ± 12 隻/400cm²（圖 4-29、4-30、4-31、4-32）。整體看來，管蟲的覆蓋面積並沒有隨著附著板浸泡在水中的時間增加而增加，而是呈現不規則的變動。因此管蟲的覆蓋面積有季節性的變化。

5. 藤壺覆蓋面積的季節性變化

分析藤壺覆蓋面積的季節性變化，結果在#10，水下 0m 處在 86 年 2 月藤壺最大的覆蓋面積，平均值為 158 ± 37 隻/400cm²；水下 3m 與 6m 藤壺最大的覆蓋面積皆出現在 87 年 5 月，平均值分別為 106 ± 14 隻/400cm² 與 246 ± 19 隻/400cm²。在#14，水下 0m 處藤壺最大的覆蓋面積出現在 87 年 5 月，平均值為 88 ± 21 隻/400cm²；水下 3m 處藤壺最大的覆蓋面積出現在 86 年 2 月，平均值為 131 ± 62 隻/400cm²；水下 6m 處在 85 年 11 月時，藤壺有最大的覆蓋面積，平均值為 61 ± 23 隻/400cm²。在#33，水下 0m 與 3m 藤壺最大的覆蓋面積皆出現在 85 年 11 月，平均值分別為 90 ± 24 隻/400cm² 與 125 ± 82 隻/400cm²；水下 6m 處在 87 年 5 月時，藤壺有最大的覆蓋面積，平均值為 112 ± 30 隻/400cm²。在#51，水下 0m 處在 86 年 2 月時，藤壺有最大的覆蓋面積，平均值為 192 ± 82 隻/400cm²；水下 3m 與 6m 藤壺最大的覆蓋面積皆出現在 87 年 5 月，平均值分別為 24 ± 7 隻/400cm² 與 62 ± 14 隻/400cm²（圖 4-33、4-34、4-35、4-36）。整體看來，藤壺的覆蓋面積並沒有隨著附著板浸泡在水中的時間增加而增

加，而是呈現不規則的變動。

4.2 現場海生物著苗試驗結果與討論

附苗季節性調查所觀察到的附著生物如下：管蟲（*Hydroides elegans*）、藤壺（*Balanus albicostatus*）、海鞘（單體）、單體水螅、群體水螅、纓鰓蟲、及苔蘚蟲各一種。調查的時間為 85 年 10 月至 87 年 5 月。駁三碼頭管蟲的附苗量在 87 年 3 月 19 日最高，平均值為 861 ± 36 隻/ 100cm^2 ；而 #51 在 87 年 12 月 4 日，管蟲有最高的附苗量，平均值為 821 ± 95 隻/ 100cm^2 （圖 4-37、4-38）。藤壺的附苗量，駁三碼頭在 85 年 11 月 30 日最高，平均值為 1490 ± 235 隻/ 100cm^2 ；#51 在 86 年 9 月 21 日時藤壺附苗量最高，平均值為 634 ± 83 隻/ 100cm^2 （圖 4-39、4-40）。二枚貝的附苗量，駁三與 #51 皆於 86 年 7 月 24 日有最高的附苗量（圖 4-41、4-42），平均值分別為 312 ± 96 隻/ 9cm^2 與 21 ± 17 隻/ 9cm^2 。海葵出現的次數與數量皆很少，在駁三碼頭最高的附苗量在 86 年 9 月 21 日，平均值為 6 ± 1 隻/ 9cm^2 （圖 4-43）。單體水螅在駁三碼頭的附苗量，以 86 年 8 月 7 日最高，平均值為 52 ± 21 隻/ 9cm^2 ；在 #51，85 年 12 月 16 日時最高，平均值為 7 ± 3 隻/ 9cm^2 （圖 4-44、4-45）。群體水螅在駁三碼頭在 86 年 11 月 19 日有最高附苗量出現，平均值小於 1 隻/ 9cm^2 （圖 4-46）。苔蘚蟲在駁三碼頭最高附苗量是在 87 年 4 月 1 日，平均值為 318 ± 52 隻/ 9cm^2 ；#51 最高附苗量也是在 87 年 3 月 21 日，平均值為 195 ± 33 隻/ 9cm^2 （圖 4-47、4-48）。海鞘在兩地出現的次數與數量皆很少，平均值皆小於 1.5 隻/ 100cm^2 （圖 4-49、4-50）。藪枝蟲在駁三碼頭最高附苗量是在 87 年 3 月 3 日，平均值為 706 ± 60 隻/ 9cm^2 ；#51 最高附苗量是在 87 年 4 月 18 日，平均值為 528 ± 76 隻/ 9cm^2 （圖 4-51、4-52）。駁三碼頭纓鰓蟲最高附苗量是在 87 年 3 月 3 日，平均值為 13 隻/ 9cm^2 ；#51 最高附苗量是在 87 年 3 月 21 日，平均值為 11 隻/ 9cm^2 （圖 4-53、4-54）。

綜合來說，大多數的附著生物其數量與覆蓋面積在不同的試片材質與

處理中沒有顯著差異。不同碼頭與不同水深，附著生物其數量、面積與重量皆有顯著差異。藤壺、二枚貝、與管蟲分別在#10、#14與#51有最高的數量與覆蓋面積，因此反映出不同碼頭有不同的生物組成比例。在向光面附著生物的數量、覆蓋面積與重量皆顯著大於背光面。在附苗的季節性調查方面，以管蟲、藤壺、藪隻蟲與苔蘚蟲的附著密度較高。管蟲全年皆有著苗，並沒有一個明顯的季節性變化；藤壺在9月時較高的著苗量，而藪隻蟲與苔蘚蟲在4月與7月~11月有較高的著苗量。較特殊的是，藤壺在駁三碼頭85年11月時有一極高的著苗量；而二枚貝在駁三碼頭86年7月時有一極高的著苗量。其他的附著生物的著苗量皆很小，出現的頻率也很低。因此，在高雄港中，不同碼頭有不同的生物組成，且同一生物在各個碼頭會有不同的著苗密度，此現象可能是因為高雄港內不同碼頭有不同的環境所致。

4.3 試片腐蝕試驗現場浸漬結果與討論

1. 試片腐蝕速率的再現性

為瞭解試片在同一浸漬點相同曝露時間的腐蝕速率是否一致，本次採樣〔試片浸漬時間為28個月〕將兩個試片自相同的放置點同時取出稱重，進行重量損失分析。根據腐蝕速率計算公式：

$$\text{mm/y} = 13.56W/DAT$$

式中 W =試片之重量損失(mg)， D =試片密度(7.87 g/cm³)， A =試片面積(880 cm²)， T =試片暴露時間(hr)，圖 4-55 與圖 4-56 分別為自由腐蝕試片與陰極防蝕試片在各碼頭浸漬 28 個月後之腐蝕速率(mm/y)與水深的關係；其中#14 水深 6m 處試片因被泥沙覆蓋，故無腐蝕資料。由圖可知，在相同採樣點，兩試片腐蝕速率的再現性良好；且對自由腐蝕試片而言，試片的腐蝕速率介於 0.13-0.20 mm/y 之間，而陰極保護試片則介於 0.01-0.05 mm/y 之間。

2. 碳鋼腐蝕速率與放置地點之關係

早期研究報告指出，金屬在海水中的腐蝕行為，會因海水中的 pH 值、氯離子濃度、溫度、溶氧量、水流速度、海生物附著、菌類活動、以及污染程度等參數的影響而產生不同的腐蝕現象⁽²⁴⁻²⁷⁾。高雄港區內，海水受鄰近河川污染與外海水團交換影響，各碼頭海水的化學性質與海生物生長的情況可能不同⁽²⁸⁾。為瞭解 SS41 碳鋼試片在#10，#14，#33，與#51 腐蝕速率的差異，今將歷次於各碼頭水深 0m、3m、6m 採樣試片的腐蝕速率平均，以此平均值代表碳鋼在該碼頭經過某一特定浸漬時間後的腐蝕速率，藉以推估相同浸漬時間內碳鋼腐蝕速率與放置地點的關係。圖 4-57 為自由腐蝕試片平均腐蝕速率與放置地點的關係。其中各個點分別為試片在各碼頭浸漬 2、4、7、10、13、16、22、28 個月後的平均腐蝕速率，而實線則是將各碼頭歷次浸漬結果予以平均後繪出的曲線。結果顯示，#10 與#51 試片的腐蝕速率散佈範圍較大，分別在 0.147-0.548 mm/y 與 0.152-0.598 mm/y 之間，而#14 與#33 較小，在 0.154-0.425 mm/y 與 0.176-0.416 mm/y 之間；故推論，碳鋼試片在#10 與#51 受環境、季節等因素的影響，其腐蝕速率變化可能較#14 與#33 為大。此外，根據各碼頭兩年內八次採樣平均結果（圖 4-57 中實線部份），SS41 碳鋼的腐蝕速率在#51 最大(0.3463 mm/y)，#14 最小(0.2566 mm/y)，而#10 與#33 腐蝕速率相當(分別為 0.285 與 0.286 mm/y)。

圖 4-58 為陰極保護試片平均腐蝕速率與放置地點的關係。圖中，各次採樣的平均腐蝕速率仍以#10 與#51 試片的腐蝕速率散佈範圍較廣，分別在 0.035-0.304 mm/y 與 0.020-0.251 mm/y 之間，而#14 與#33 則在 0.0321-0.165 mm/y 與 0.035-0.191 mm/y 之間。比較八次採樣平均結果（圖 4-58 中實線部份），試片的腐蝕速率雖然隨放置地點有些許差異（由大至小依序為：#10，#51，#33，與#14），但是碼頭與碼頭間的腐蝕速率相差極微，依序約為 0.01 mm/y。由此可知，對陰極保護試片而言，試片的腐蝕速率取

決於陰極防蝕的效果；即犧牲陽極塊若能持續的供給有效保護電流，則碳鋼的腐蝕速率並不會因試片吊放的位置不同而有明顯差異。

3、碳鋼腐蝕速率與放置水深之關係

圖 4-59~圖 4-60 分別為自由腐蝕試片與陰極防蝕試片浸漬在#10，#14，#33，與#51 號碼頭 2、7、13、22、28 個月後，試片腐蝕速率與水深的關係。一般而言，自由腐蝕試片的腐蝕速率在各碼頭均介於 0.105-0.588 mm/y 之間，而陰極防蝕試片則介於 0.011-0.281 mm/y 之間，且歷次採樣時，試片腐蝕速率與水深變化無明顯特定關係。如以自由腐蝕試片為例，在#10，除初期浸漬的試片〔曝露時間<7 個月〕其腐蝕速率隨水深增加而略增外，長期浸漬試片之腐蝕速率隨水深增加而略減；在#14，於不同採樣時間，試片在水深 3m 處之腐蝕速率可能大於亦可能小於在水深 0m 與水深 6m 處之腐蝕速率；在#33，試片在水深 6m 處的腐蝕速率則多大於試片在水深 0m 與水深 3m 處之腐蝕速率；而於#51，試片在水深 3m 處的腐蝕速率則略大於水深 0m 與水深 6m 處試片之腐蝕速率。

然而，為推估港區內碳鋼腐蝕速率與水深變化的關係，今分別將各碼頭於水深 0m、3m、6m 歷次採樣試片的腐蝕速率平均，以此平均值代表碳鋼在該碼頭不同水深的腐蝕速率。圖 4-61 與圖 4-62 分別為自由腐蝕試片與陰極防蝕試片平均腐蝕速率與放置水深的關係。其中各個點分別為試片在各碼頭相同深度八次採樣的平均腐蝕速率，而實線則是將相同水深不同碼頭浸漬結果予以平均後繪出的曲線。如所預期地，兩年浸漬結果，試片的腐蝕速率與水深變化無明顯特定關係。如自由腐蝕試片(圖 4-61)，在#33，試片於水深 6m 處的腐蝕速率最大，而在#51，試片於水深 3m 處的腐蝕速率則略大於水深 0m 與水深 6m 處試片之腐蝕速率；對陰極防蝕試片而言(圖 4-62)，在#10，試片於水深 0m 處的腐蝕速率最大，而在#14，試片於水深 3m 處的腐蝕速率最大。此外，若將高雄港區視為一個海域，碳鋼在此海域中的腐蝕速率與水深變化的關係可由圖 4-61 與圖 4-62 中實線部份看出：自由腐蝕試片的腐蝕速率有隨浸漬水深的增加而遞增的趨勢，

而陰極防蝕試片的腐蝕速率則有隨浸漬水深的增加而減緩的趨勢，但不論增加或減少，腐蝕速率的變化僅在 0.02-0.04 mm/y 之間，差異極小。

4、碳鋼腐蝕速率與浸漬時間之關係

為瞭解碳鋼腐蝕速率與浸漬時間之關係，今將四座碼頭歷次於水深 0m、3m、6m 採樣試片的腐蝕速率分別平均，以各平均值代表碳鋼在該水深經過某一特定浸漬時間後的腐蝕速率，藉以推估碳鋼腐蝕速率與浸漬時間的關係。圖 4-63 與圖 4-64 分別為自由腐蝕試片與陰極防蝕試片平均腐蝕速率與浸漬時間的關係。其中各個點分別為試片在歷次採樣時相同深度四座碼頭的平均腐蝕速率，而實線則是將相同浸漬時間內不同水深的腐蝕速率予以平均後繪出的曲線。顯然地，不論是自由腐蝕試片或陰極防蝕試片(圖中實線部份)，試片的腐蝕速率在浸漬初期隨著曝露時間的增加而遞增，於第七個月時到達最大(自由腐蝕試片=0.456 mm/y，陰極防蝕試片=0.201 mm/y)，隨後隨著曝露時間的增長而遞減，浸漬 28 個月後，自由腐蝕試片的腐蝕速率僅為 0.157 mm/y，而陰極防蝕試片為 0.032 mm/y。

其原因可能是因浸漬初期，試片與海水直接接觸，金屬的腐蝕速率受海水中的溶氧所控制，且海生物附生的緻密度較小，以致在金屬表面產生許多微小的氧差和濃度差異電池，造成試片腐蝕速率隨海生物覆蓋面積增加而增加；而長期浸漬後(曝露時間>7 個月)，金屬表面海生物附著鎮密，再加上腐蝕產物混合曝露環境中的泥垢，產生類似擴散阻礙，阻止海水中溶氧與氯離子等腐蝕因子進入金屬表面，促使腐蝕減緩，但金屬與海生物界面間的 pH、有機與無機物質則可能取代金屬腐蝕的控制因素，造成局部腐蝕。

5.自由腐蝕與陰極防蝕試片之比較

圖 4-65 為 SS41 自由腐蝕與陰極防蝕試片歷次於高雄港四座碼頭三個水深採樣的平均腐蝕速率與曝露時間的關係。由圖可知，陰極防蝕試片在經陰極防蝕處理後，試片的腐蝕速率顯然較自由腐蝕試片低；由此可見，

在此試驗期間內(28 個月)，附加鋁犧牲陽極塊確能有效地保護碳鋼試片。圖 4-66 為鋁犧牲陽極塊在不同浸漬時間內之重量損失率(g/month)和水深的關係。浸漬初期〔曝露時間=2 個月〕，犧牲陽極塊的重量損失率多大於長期浸漬結果，且在水深 3m 與 6m 的損失率大於水深 0m；而浸漬 28 個月後，各碼頭的重量損失率均相當。根據美國腐蝕工程師協會制定的 Standard RP-01-69 陰極防蝕方法中指出，犧牲陽極塊在對被保護金屬進行陰極保護時必須提供足夠的極化與保護電流，因此在保護之初或是金屬表面再裸露於腐蝕環境時，犧牲陽極塊的重量損失率將會增加。依此推論，長期浸漬鋁犧牲陽極塊重量損失率的變化，可能是因金屬表面海生物掉落以致金屬再裸露於海水中或是為了克服海生物附著所造成的局部腐蝕結果。

4.4 特定海生物附苗試驗

1. 海生物對碳鋼試片腐蝕之影響

為進一步瞭解海生物對碳鋼腐蝕之影響，SS41 金屬試片(大小為 100 mm × 100 mm × 10 mm，暴露面積為 200 cm²) 分別浸漬於高雄港#14 與 #75 水深 0m、3m、6m 處，浸漬時間自 87 年 1 月 7 日起至 87 年 5 月 1 日止共約四個月，其間每隔二週(14 日)分別將試片上的藤壺、管蟲、或所有海生物刮除，使同一碼頭、同一水深備有海生物附著、藤壺附著、管蟲附著、與無海生物附著等四種試片。浸漬試驗結束後，將現場試片儲存於天然海水中轉運至實驗室，以直流動電位極化曲線掃瞄(掃瞄速率為 1 mV/sec，掃瞄範圍為開路電位之 ± 30 mV 之間)，與交流電阻抗分析(在開路電位下施加之 AC 訊號振幅為 10 mV，頻率範圍自 0.03 Hz 至 1000 Hz) 等電化學分析技術，量測各試片的瞬間腐蝕速率；之後，再將各試片的海生物刮除，以濃鹽酸 + 50 g/l SnCl₂ + 20 g/l SbCl₃ 溶液，在室溫下浸泡試片，達到除銹效果，以重量損失計算其平均腐蝕速率。

相片 4-1 ~ 4-4 為試片在#14 號碼頭水深 0m 處海生物附著、藤壺附著、

管蟲附著、與無海生物附著等四種試片浸漬四個月後之情形；在海生物附著與藤壺附著的試片上，試片表面海生物種類相似，藤壺密集但無管蟲出現；在管蟲附著的試片上，無管蟲附著，但表面情況與無海生物附著之試片相似。相片 4-5 ~ 4-8 為試片在#14 水深 3m 處浸漬四個月後之情形；在海生物附著與藤壺附著的試片上，藤壺與管蟲附著密集；在管蟲附著的試片上，管蟲與少部分藤壺分佈在試片表面。於#14 水深 6m 處，各試片的表面幾無海生物附著，如相片 4-9 ~ 4-12 所示。比較#75 海生物附著的情形，水深 0m 處試片表面與#14 號碼頭水深 0m 處相似(如相片 4-13 ~ 4-16)，只有藤壺附生而管蟲極少。在水深 3m 處(相片 4-17 ~ 4-20)，除了無海生物附著的試片外，其餘試片表面均有藤壺與管蟲，且金屬表面有泥垢與腐蝕產物之混合物。水深 6m(相片 4-21 ~ 4-24)處，試片表面情況與水深 3m 處相似，海生物附著緻密，藤壺、管蟲、泥垢與腐蝕產物均出現在試片表面。

圖 4-67 ~ 4-69 與圖 4-70 ~ 4-72 為試片浸漬在#14 與#75 水深 0m、3m、6m 處海生物附著(Sealives)、藤壺附著(Barnacles)、管蟲附著(Tubeworms)、與無海生物附著(None)等情況下試片的動電位極化曲線掃描；如所預期地，碳鋼試片在各海生物附著的情形下並無鈍化行為產生，且其動電位極化曲線之趨勢與無海生物附著的試片相似。再者，根據量測所得的腐蝕電流密度，計算各試片的瞬間腐蝕速率(mm/y)，其結果如圖 4-73 與圖 4-74 所示。圖 4-73 中，金屬試片在#14 的瞬間腐蝕速率，會因藤壺的附著而降低；水深 0m 處，藤壺附著試片的腐蝕速率小於無海生物附著之試片，相差約為 0.05 mm/y；水深 3m 處，試片的腐蝕速率由小至大依序為藤壺附著、無海生物附著、海生物附著、與管蟲附著之試片，其中藤壺附著試片的腐蝕速率較管蟲附著試片的腐蝕速率小 0.5 mm/y；水深 6m 處，因各試片表面情形相似(如相片 4-9 ~ 4-12)，無海生物附著，瞬間腐蝕速率相當，其值在 1.47-1.70 mm/y 之間。於#75(如圖 4-74)，各試片的瞬間腐蝕速率均介於 0.92-1.22 mm/y 之間，並無因置放的水深與附著海生物的不同而有顯著的差異。由於金屬的瞬間腐蝕速率是代表金屬在某一特定

環境下的腐蝕速率，當相同材質金屬浸漬在不同水溶液中，或是不同處理的金屬浸漬在相同的水溶液中，其瞬間腐蝕速率自然不同；因此，各試片浸漬在#14與#75的瞬間腐蝕行為，會因附著海生物的種類與浸漬海水的不同而不同。此外，當金屬表面有藤壺附著時，成熟的藤壺是有膠質的外殼和板狀的石灰質甲殼，氧差電池可在藤壺的基底產生，然而藤壺死亡後，他們的甲殼會永久保留在附著位置上，若分佈緻密，可能阻擋海水中的溶氧擴散至金屬表面，降低試片的瞬間腐蝕速率。而管蟲，其生長與新陳代謝的產物可能在金屬表面產生氧差或濃度差異電池，造成局部腐蝕，然而死亡後，他們在金屬表面的附著能力不如藤壺，且無石灰質甲殼，以致動電位極化曲線掃描的結果，瞬間腐蝕速率大於藤壺試片。

海生物附著對試片平均腐蝕速率的影響可由重量損失計算得出，圖4-75與圖4-76分別為海生物附著、藤壺附著、管蟲附著、與無海生物附著四種試片在#14與#75平均腐蝕速率與水深變化的關係。一般而言，無海生物附著試片因每隔14日需將所有海生物刮除，金屬表面週期性地暴露於海水中，試片的平均腐蝕速率較海生物附著試片為大；而海生物附著、藤壺附著、管蟲附著的試片，在#75，3個水深的平均腐蝕速率分別為0.30 mm/y、0.365 mm/y與0.386 mm/y，顯示現場浸漬試片，管蟲對試片腐蝕速率的影響較藤壺及其他海生物為大，與瞬間腐蝕速率量測的結果相同。

圖4-77～圖4-79與圖4-80～圖4-82為利用交流電阻抗量測試片在#14與#75不同水深的Bode plots。Ailor⁽⁵³⁾曾指出，金屬表面在水溶液中的腐蝕行為，類似在一特定頻率下電阻與電容組合成的電路，可藉交流電阻抗予以量測分析，其結果以Bode plots表示。Mansfeld⁽⁵⁴⁾亦指出，金屬與水溶液界面間薄層的完整性，可由電路中的電容反應出，而電容變化可藉交流電阻抗中Bode plots的相位角瞭解。Luo⁽⁵⁵⁾也曾報告，當金屬表面有局部的不完整性，如細菌膜生成時，在最低頻率的相位角有逐漸改變的趨勢。本次試驗試片在#14號碼頭水深6m處（圖4-79），因其表面無海生物附著，故相位角對頻率的變化與其他有海生物附著的試片不同；此外，現場浸漬

試片因金屬表面泥垢、腐蝕產物或附著海生物種類的不同，可能在金屬表面形成非均勻性被覆，此被覆的厚度、透水性與緻密性將影響金屬的腐蝕行為，造成 Bode plots 中最低頻率相位角的改變；然而對於藤壺、管蟲、或其他海生物相互間在金屬表面附著相位角的改變，則有待進一步的探討。

2. 海生物防治建議

鋼材在海洋環境中會因海生物的附著而加速腐蝕與劣化，其控制因素除了環境中生存的海生物外，伴隨的厭氧環境及環境中存在的厭氧性菌類，其在金屬表面與好氧性菌類的交互代謝作用，更加速腐蝕。由於在海水中進行陰極保護時，金屬所在附近的水溶液 pH 值會升高，以致鈣質沉積產生；而海生物附著在金屬表面時，其代謝物產生的酸性環境〔金屬表面環境 pH 值降低〕卻有利於細菌與微生物的生長；故推論利用陰極保護時鈣質沉積生成的特性，應可減緩細菌、微生物腐蝕的行為，若再藉由混合式定電壓與定電流法，讓具保護性的鈣質沉積先均勻覆蓋在金屬表面，則海生物無法直接著苗於金屬表面。因此，陰極防蝕不失為取代防污塗料以對抗細菌與微生物腐蝕的一種方法。然此沉積生成之影響因素(如水流速度、溫度、海水化性等)與其是否能有效抑制海生物附著所產生的腐蝕，目前還鮮有文獻參考，其間相關技術的研究發展，實有探討的重要性。

再者，電解海水防污是一種簡單安全而長效的防污方法，在國外已逐漸取代了施加液氯與使用防污塗料的防污方式，大量船舶和濱海電廠、濱海結構物都已應用。若設計合理，可以同時防污防腐，且對於防污塗料無法施工的結構物或管道有特殊的防污效果。其原理為利用有效氯〔氯氣和次氯酸根〕的特性殺死海生物；即在銅陽極、鋁陽極或特製的陽極上通過直流電，電解海水，達到防污目的。自然，若能將此技術與陰極防蝕技術相結合，則對鋼板樁與鋼管樁等海洋結構物的腐蝕控制，有其經濟上的效益。

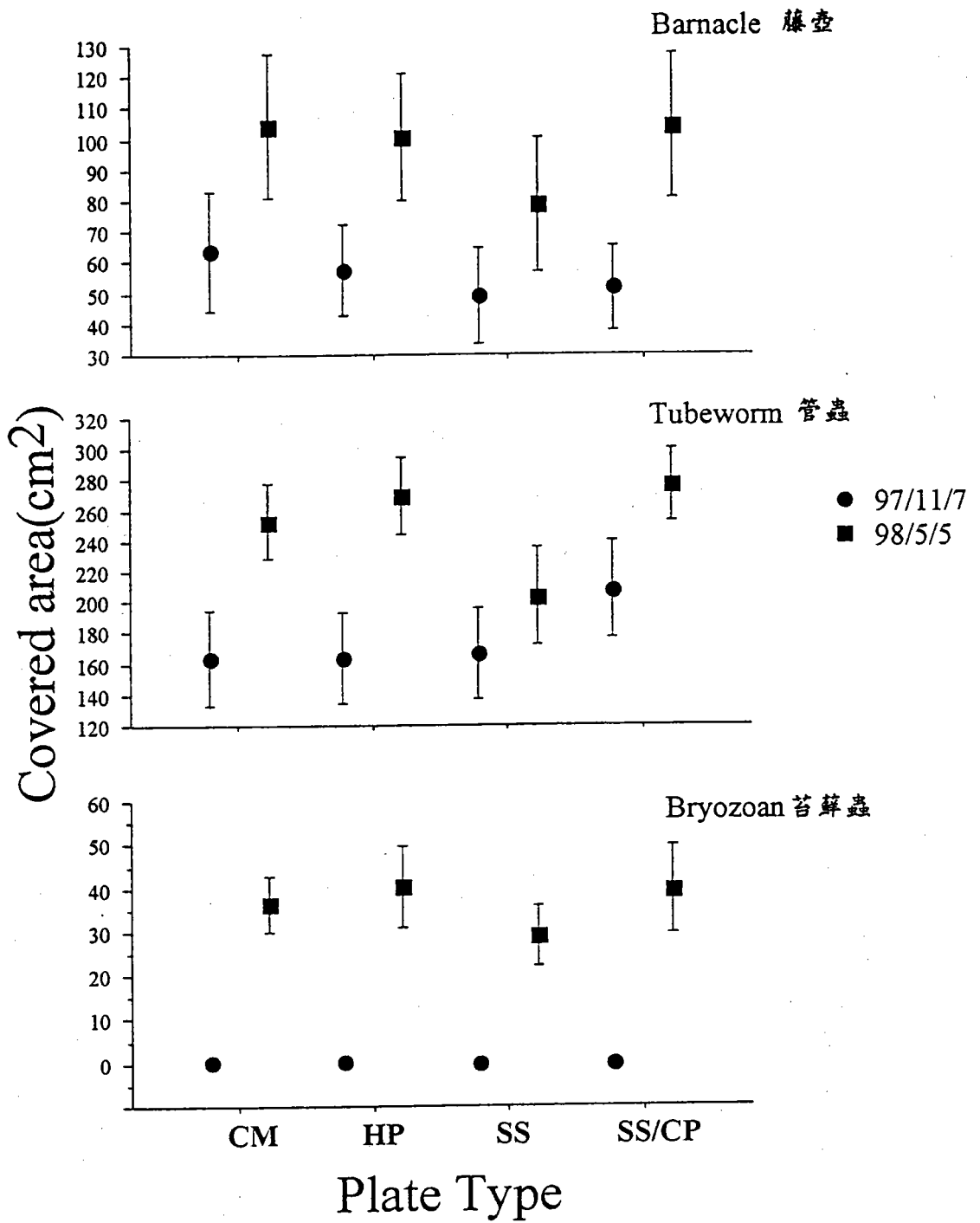


圖 4-1 附著生物在四種不同材質上的覆蓋面積
(誤差線為 95%的信賴界線)

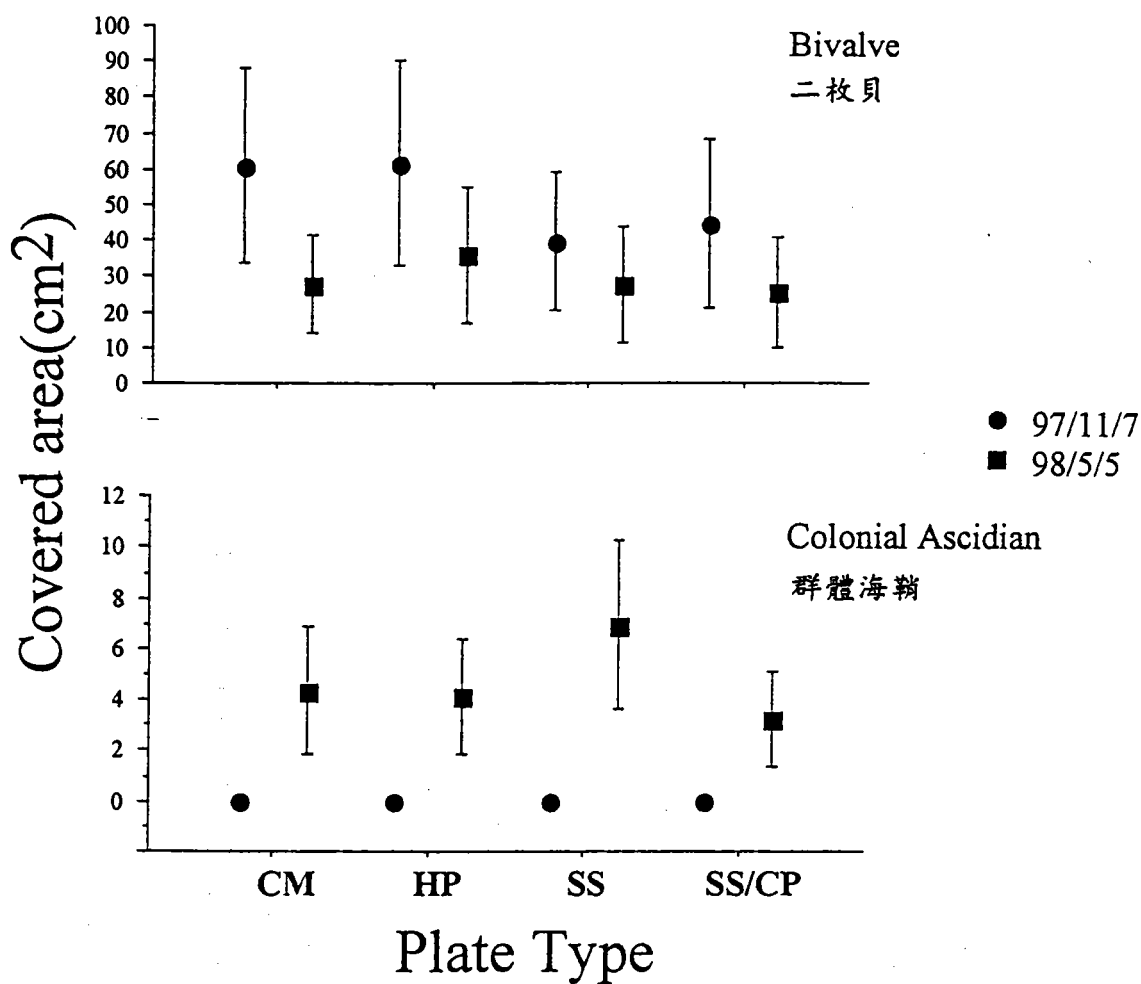


圖 4-2 附著生物在四種不同材質上的覆蓋面積
(誤差線為 95%的信賴界線)

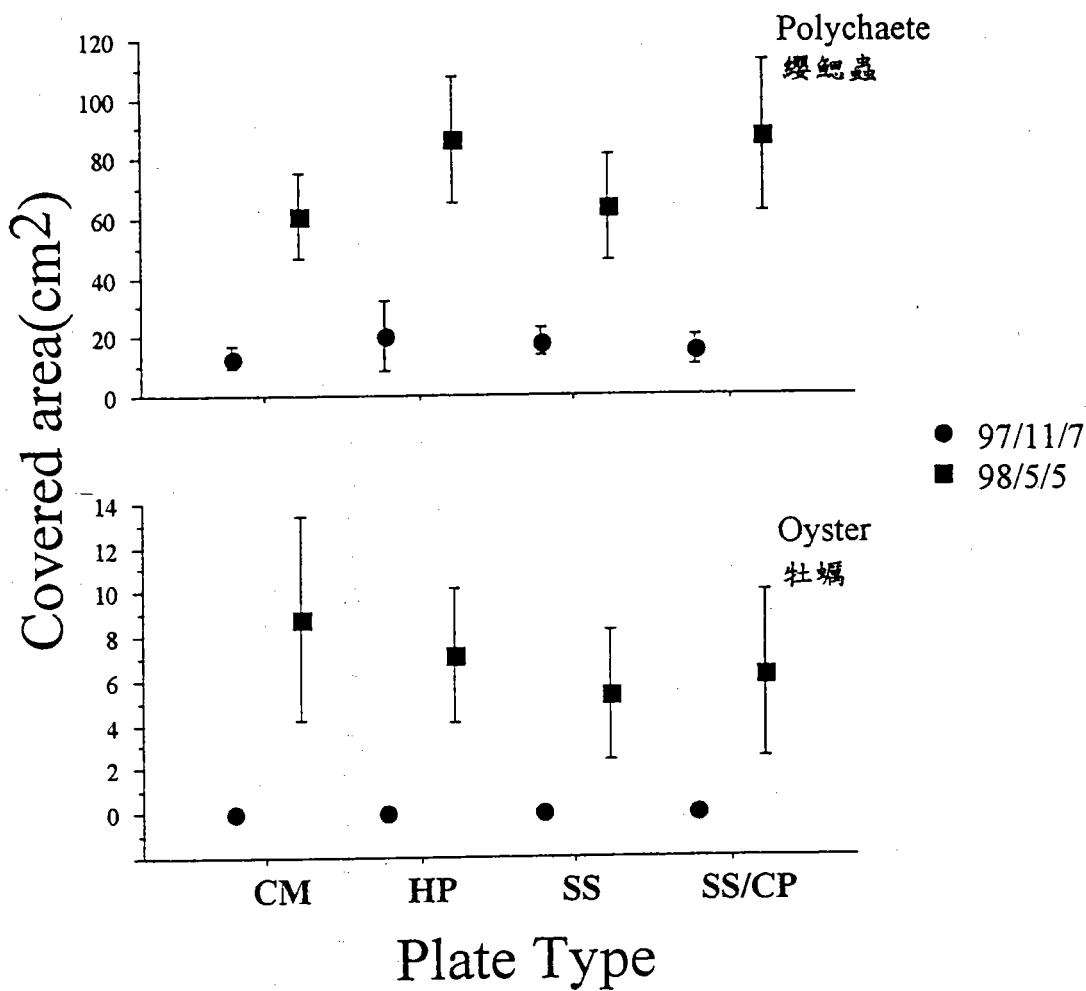


圖 4-3 附著生物在四種不同材質上的覆蓋面積
(誤差線為 95%的信賴界線)

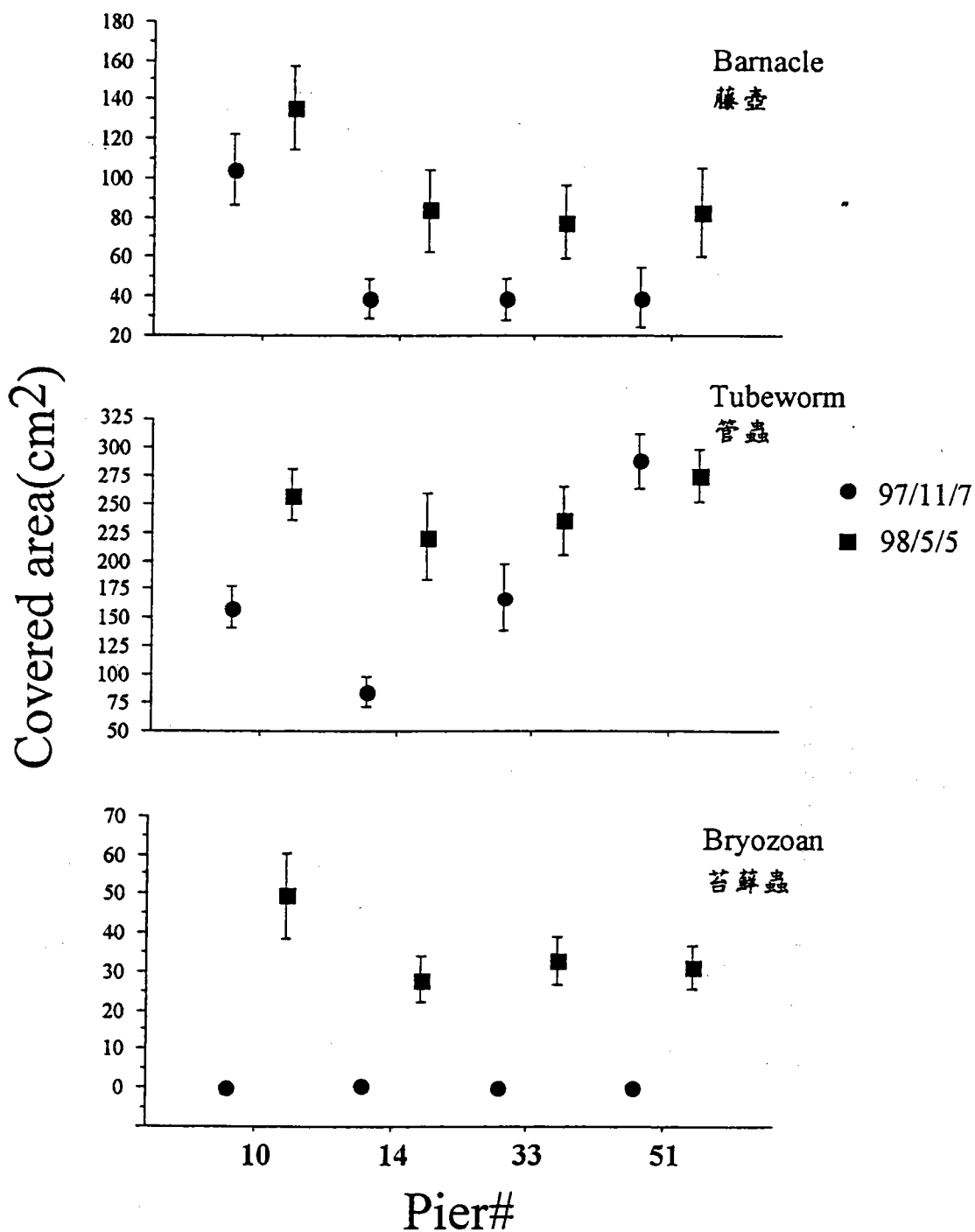


圖 4-4 附著生物在不同碼頭的覆蓋面積
(誤差線為 95%的信賴界線)

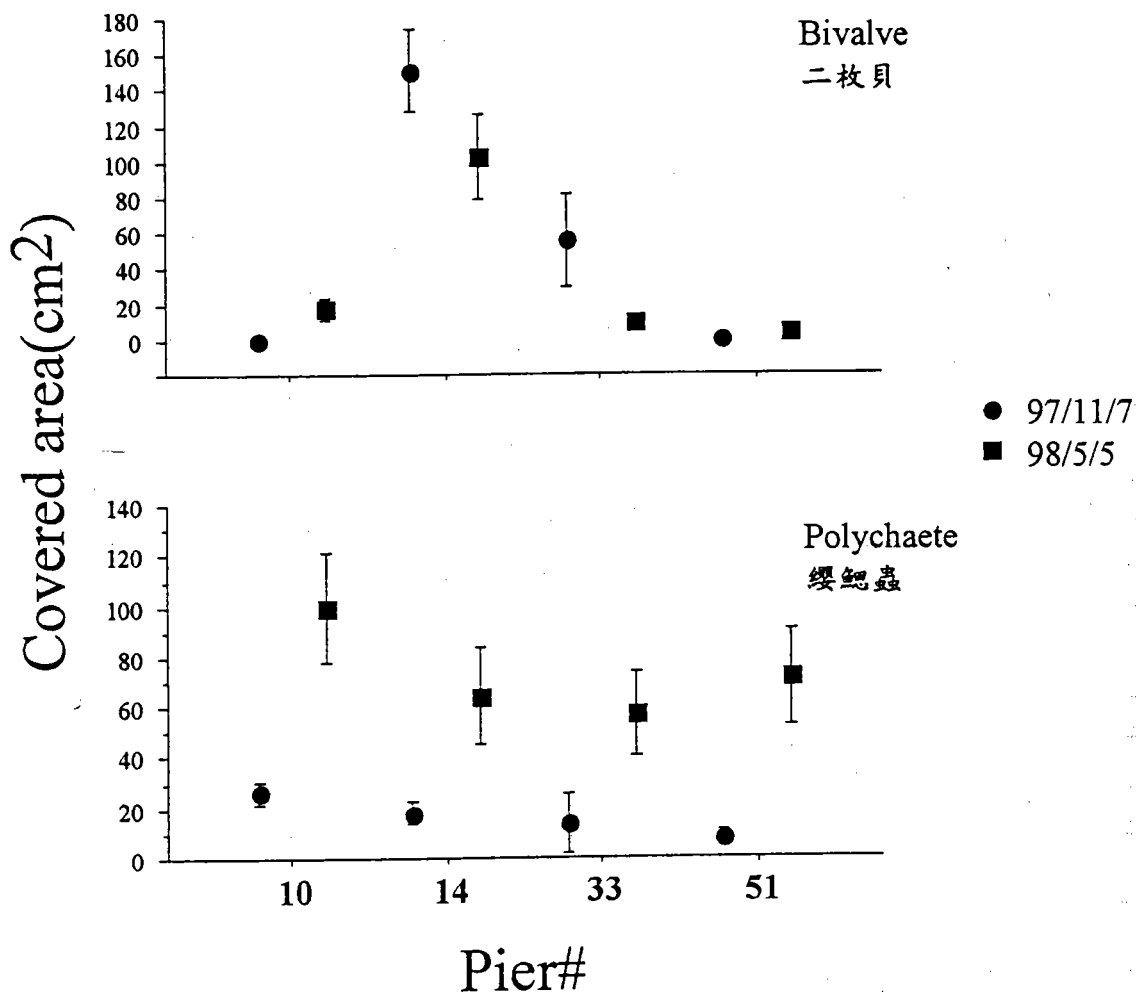


圖 4-5 附著生物在四種不同材質上的覆蓋面積
(誤差線為 95%的信賴界線)

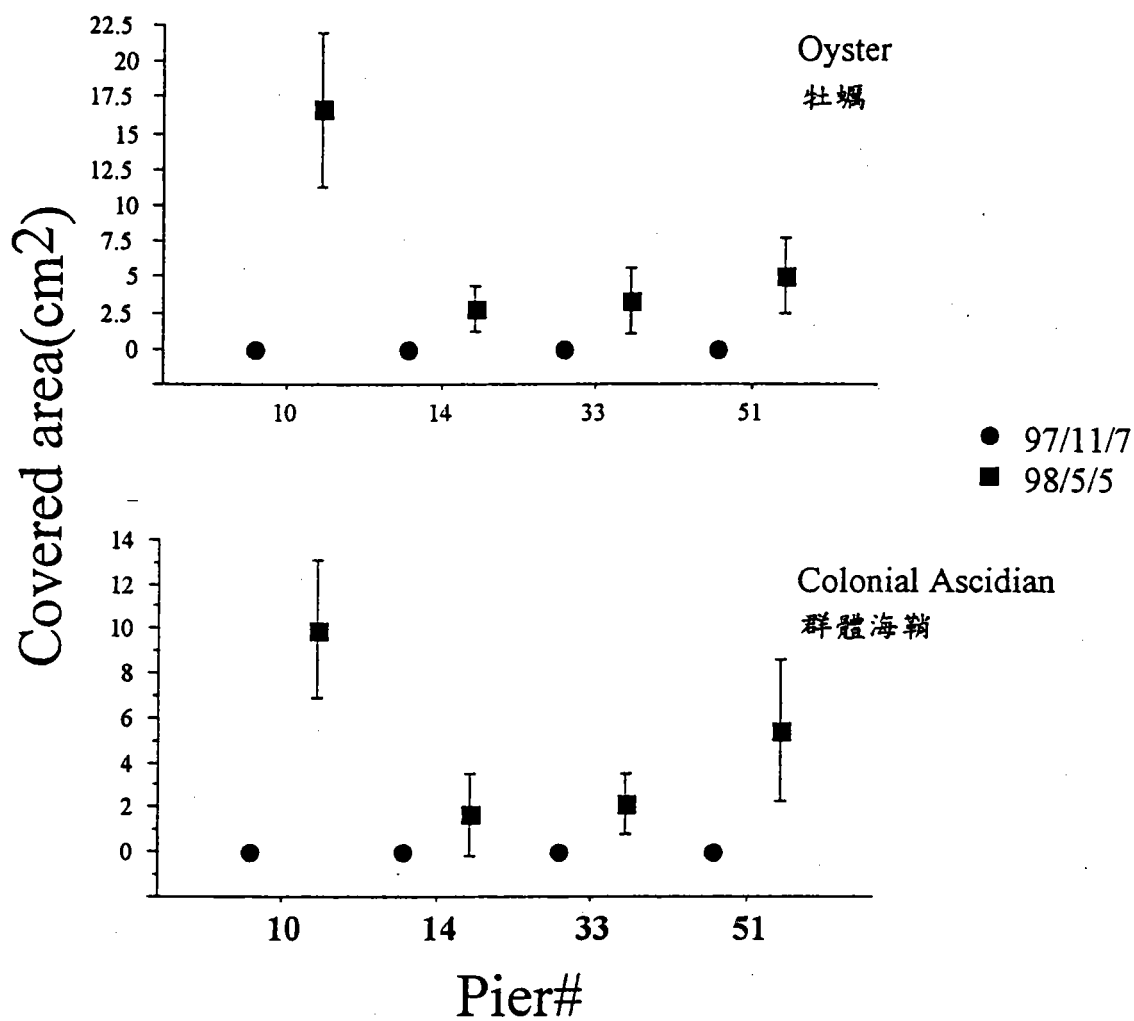


圖 4-6 附着生物在四種不同材質上的覆蓋面積
(誤差曲線為 95%的信賴區間)

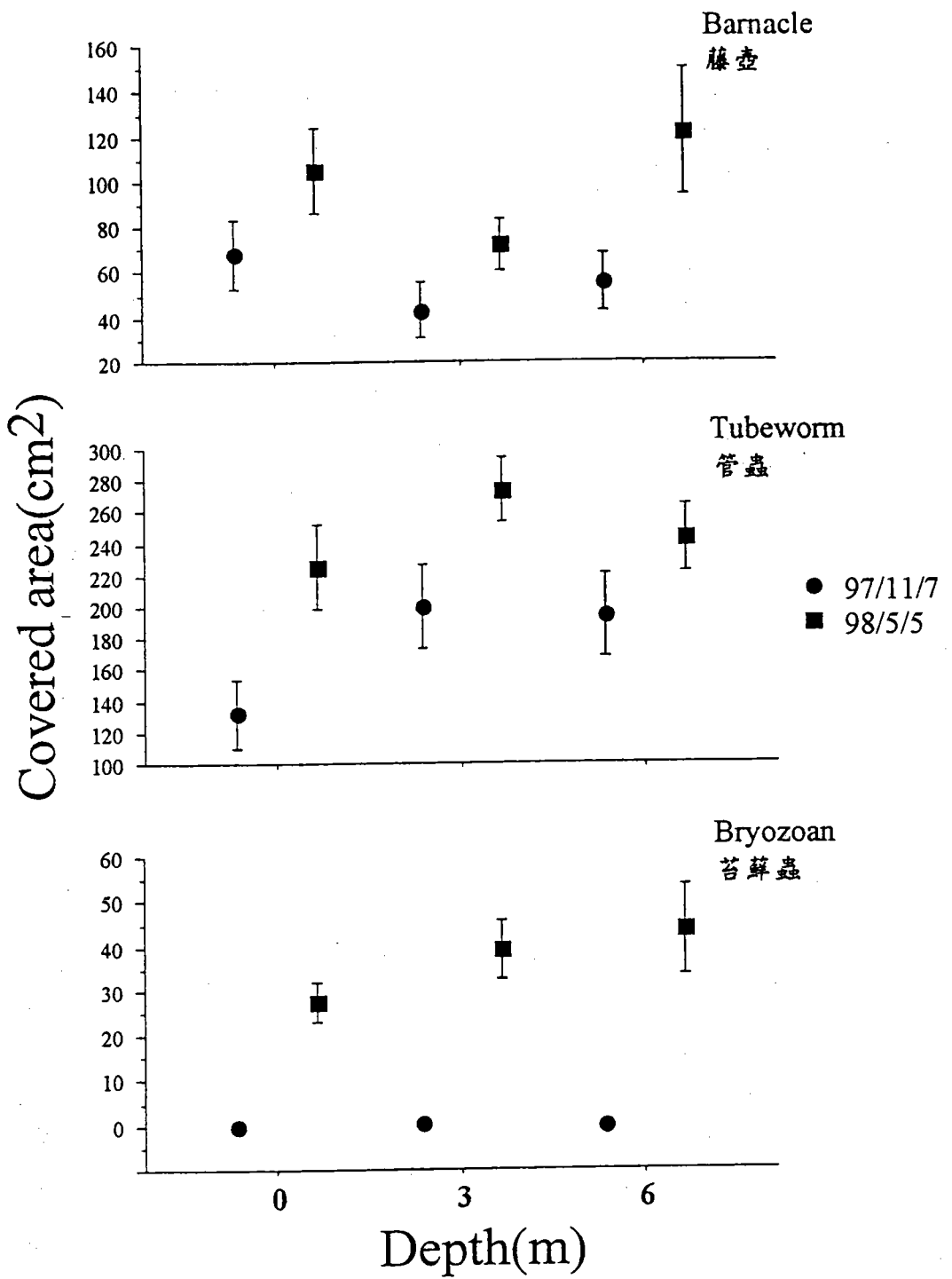


圖 4-7 附著生物在不同水深的覆蓋面積
(誤差線為 95%的信賴界線)

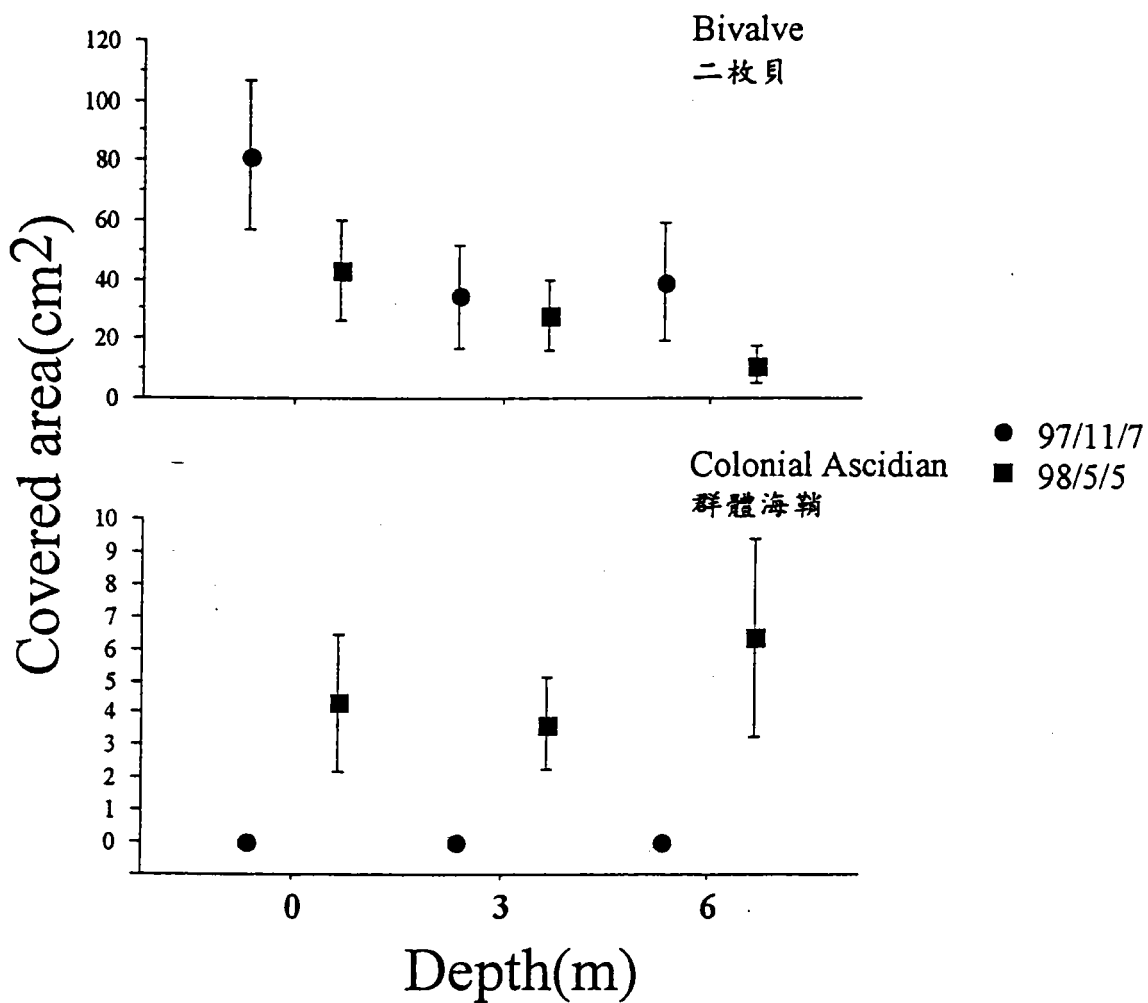


圖 4-8 附著生物在不同水深的覆蓋面積
(誤差線為 95%的信賴界線)

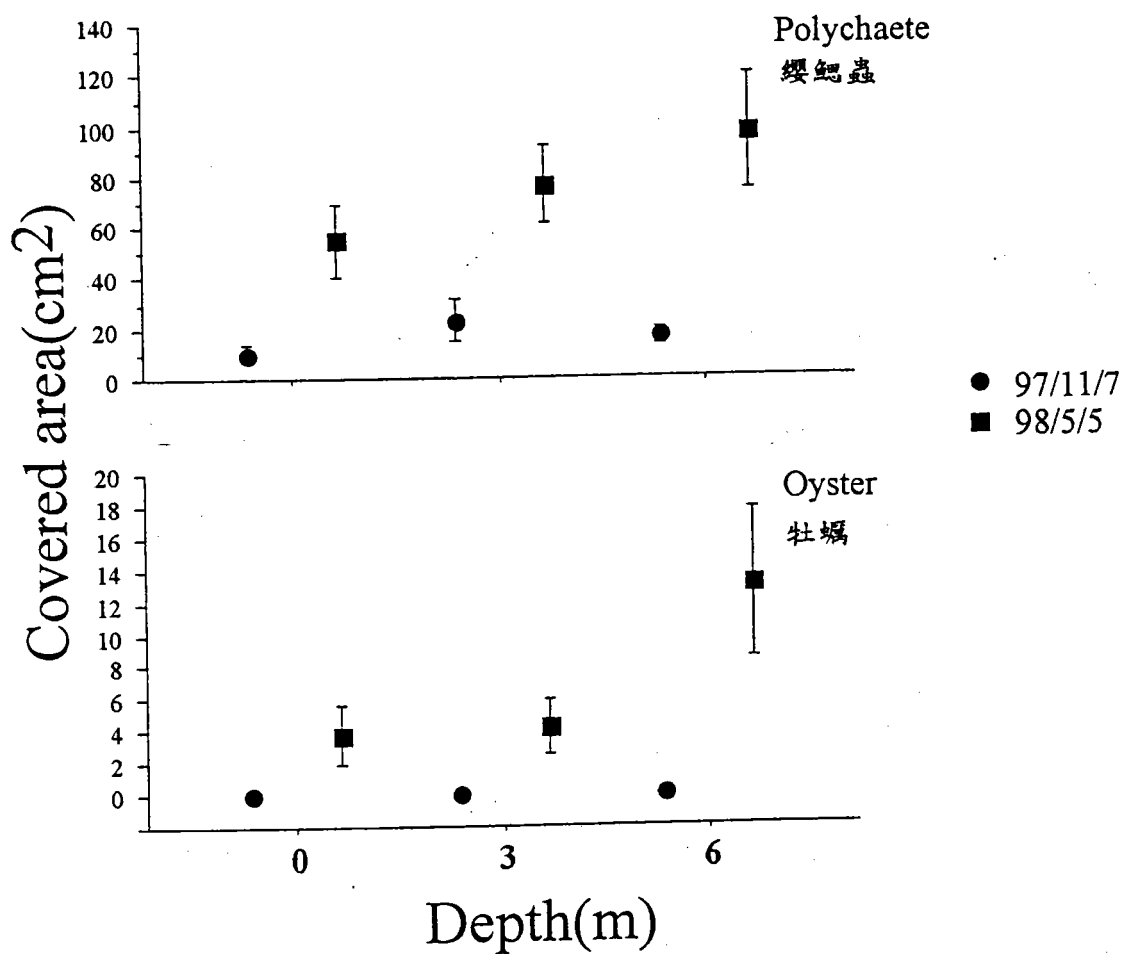


圖 4-9 附著生物在不同水深的覆蓋面積
(誤差線為 95%的信賴界線)

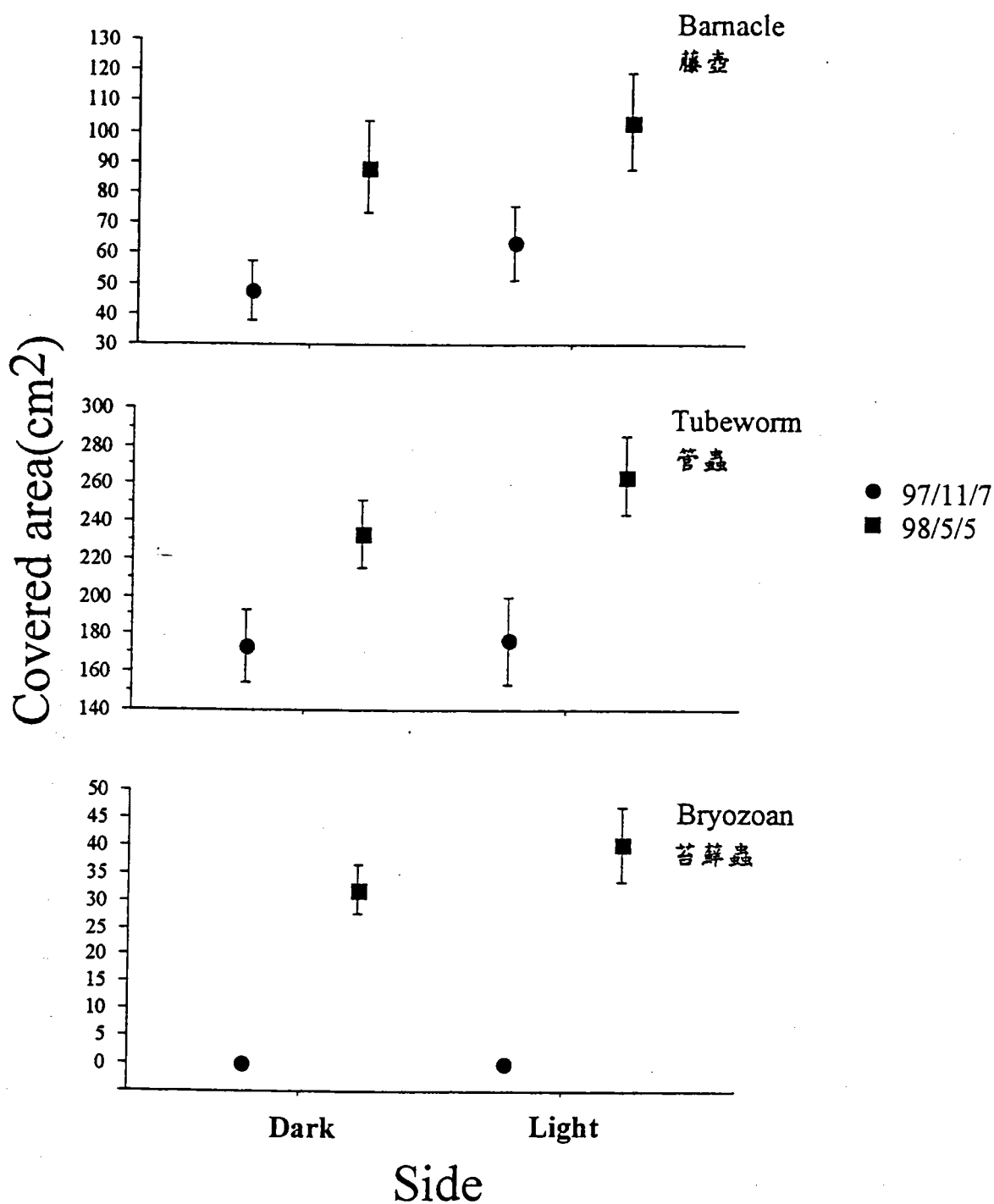


圖 4-10 附著生物在向光面與背光面的覆蓋面積
(誤差曲線為 95%的信賴區間)

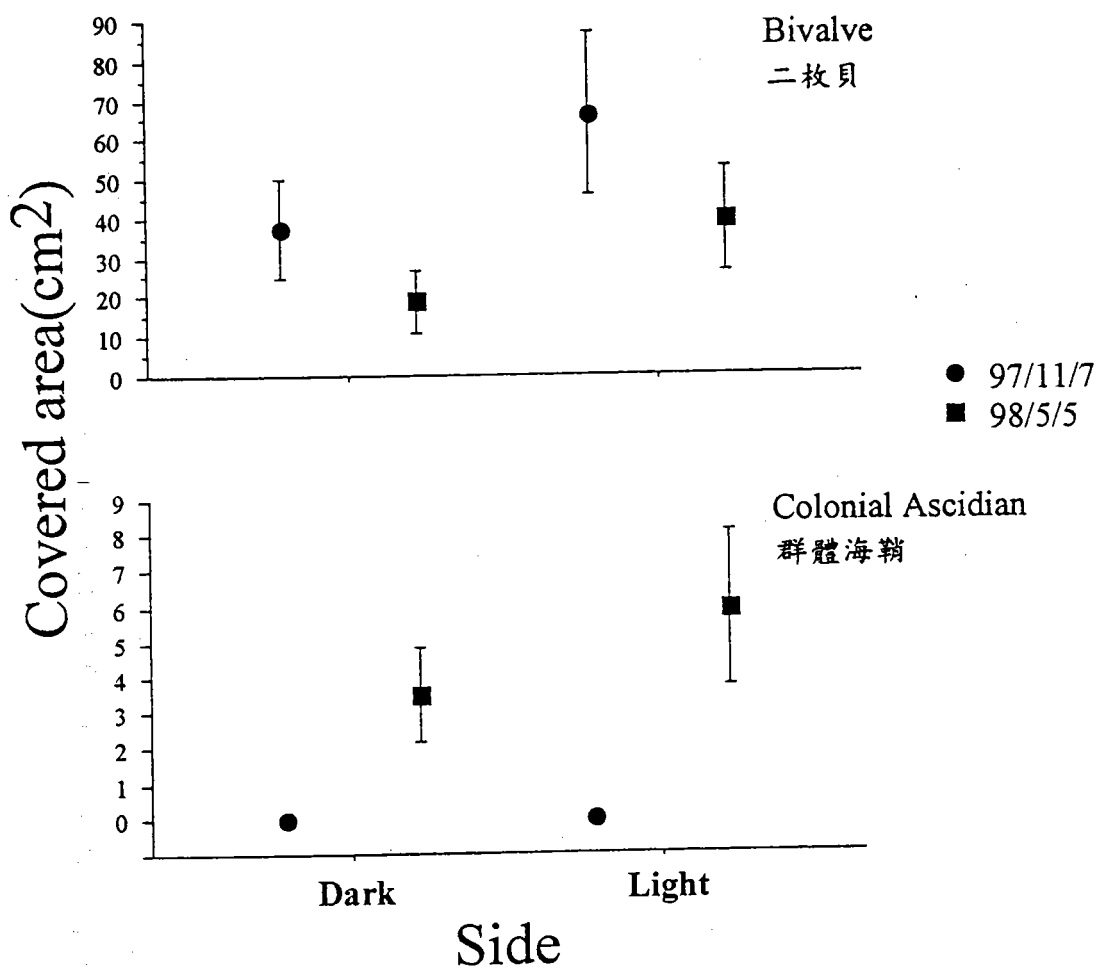


圖 4-11 附著生物在向光面與背光面的覆蓋面積
(誤差線為 95%的信賴界線)

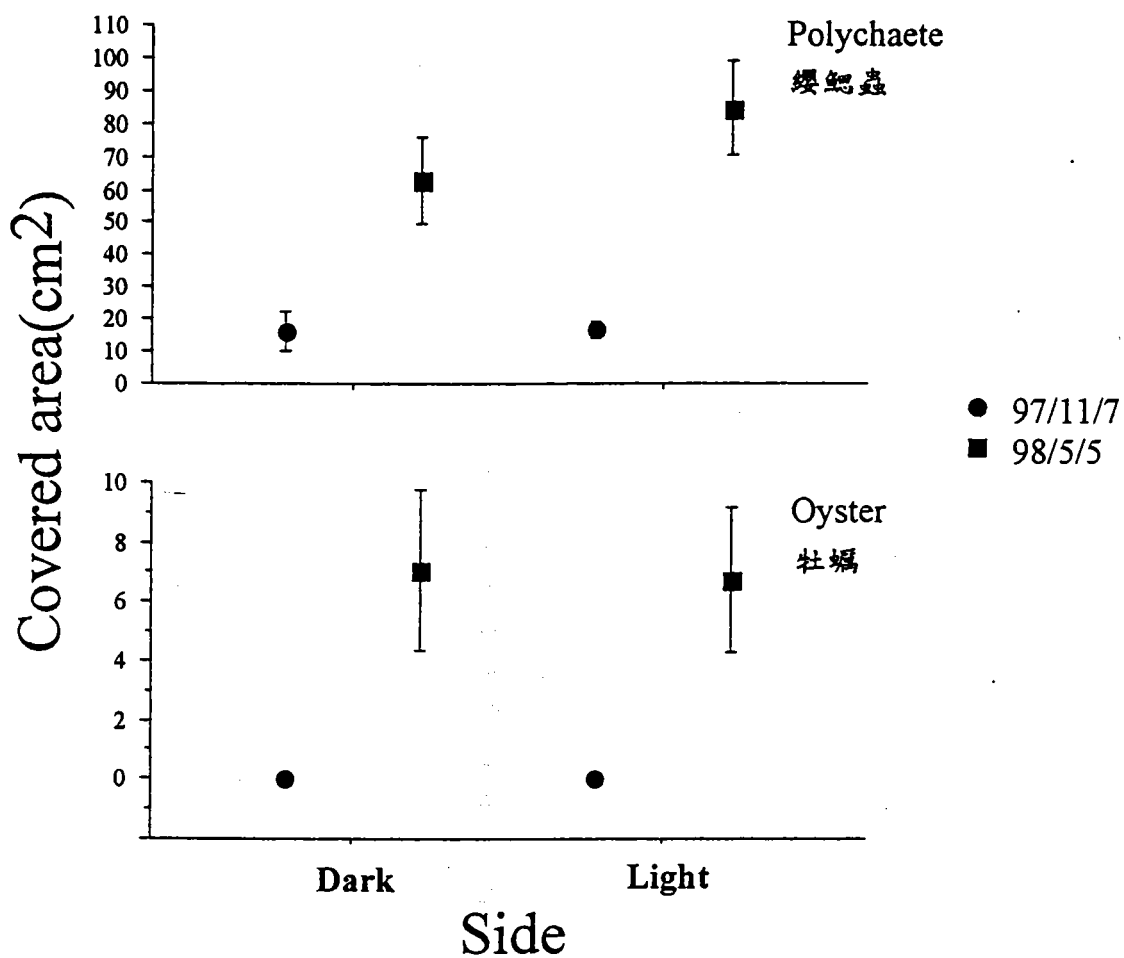


圖 4-12 附著生物在向光面與背光面的覆蓋面積
(誤差線為 95%的信賴界線)

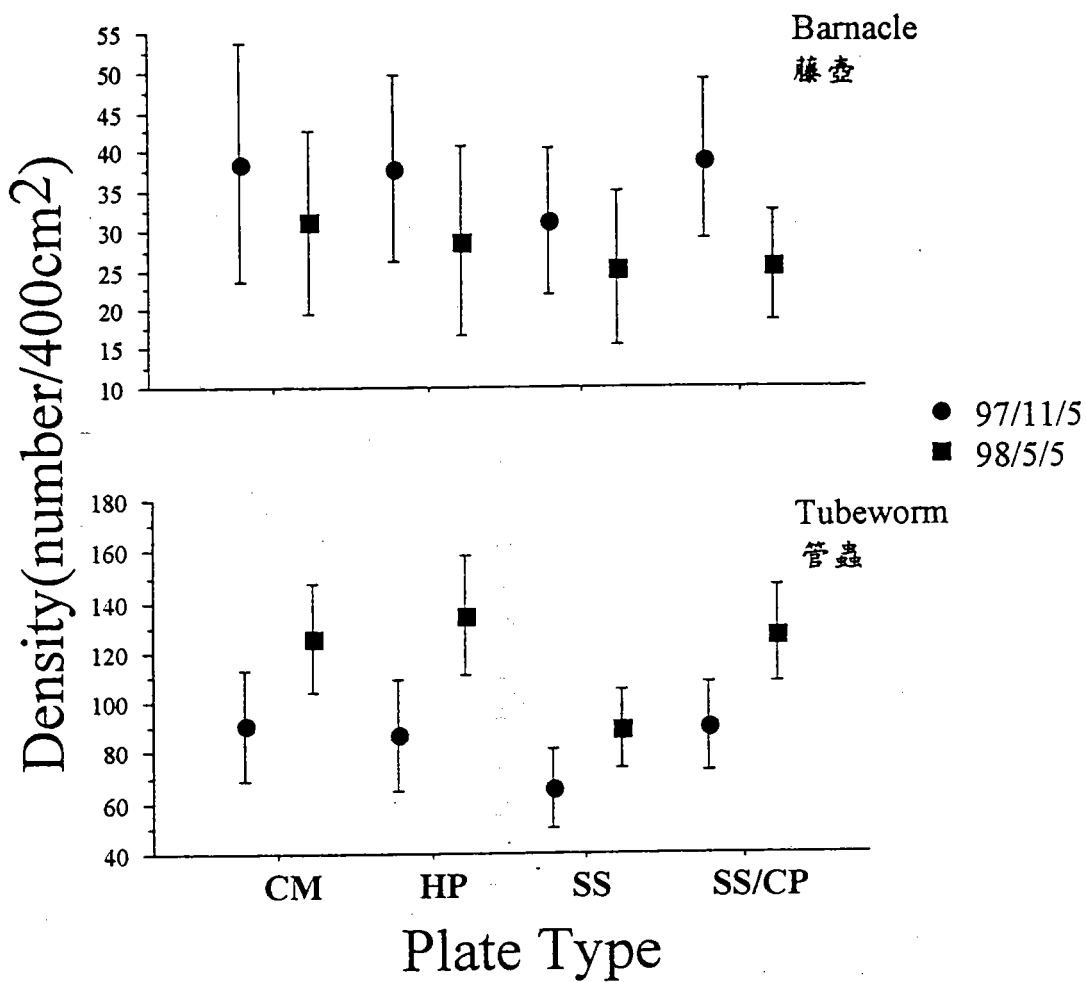


圖 4-13 附著生物在四種不同材質的附著密度
(誤差線為 95%的信賴區間)

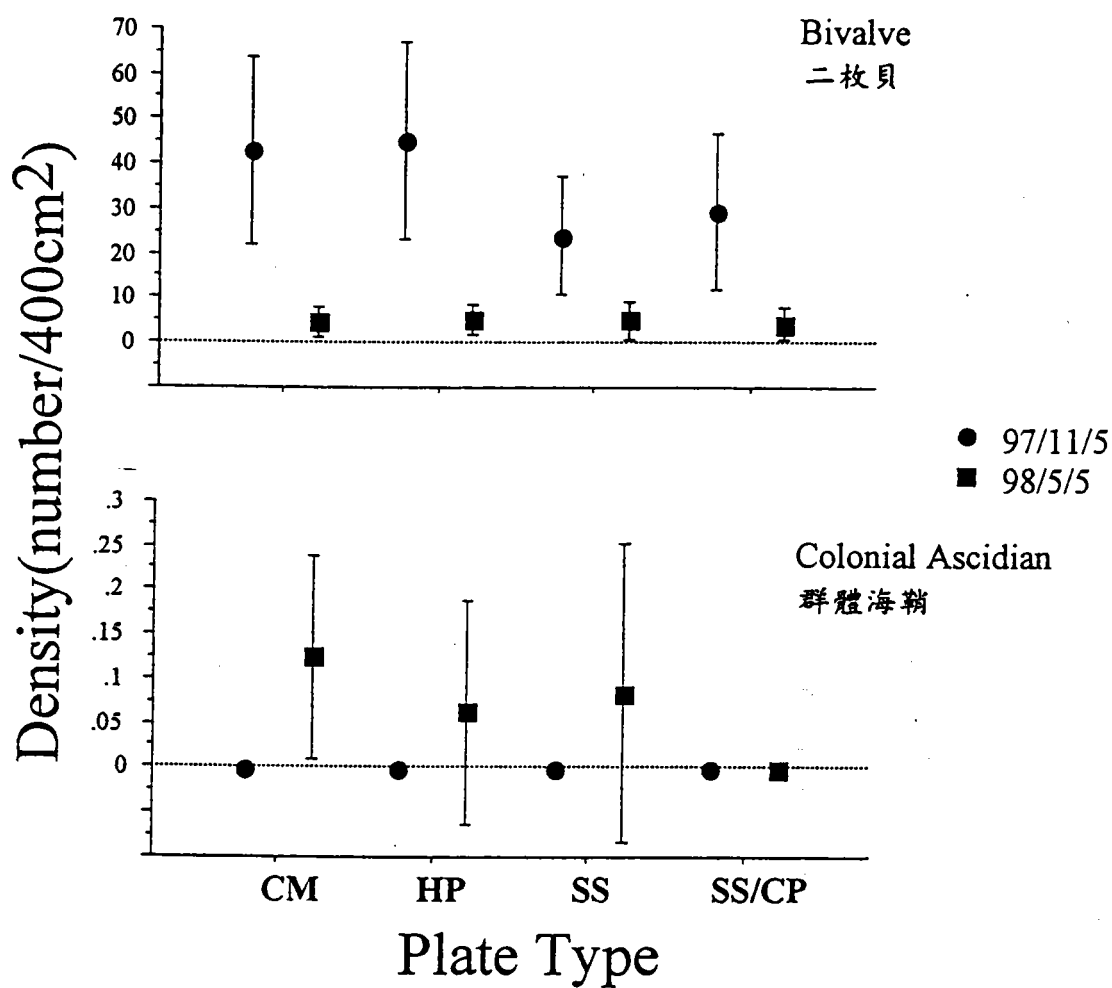


圖 4-14 附著生物在四種不同材質的附著密度
(誤差線為 95%的信賴界線)

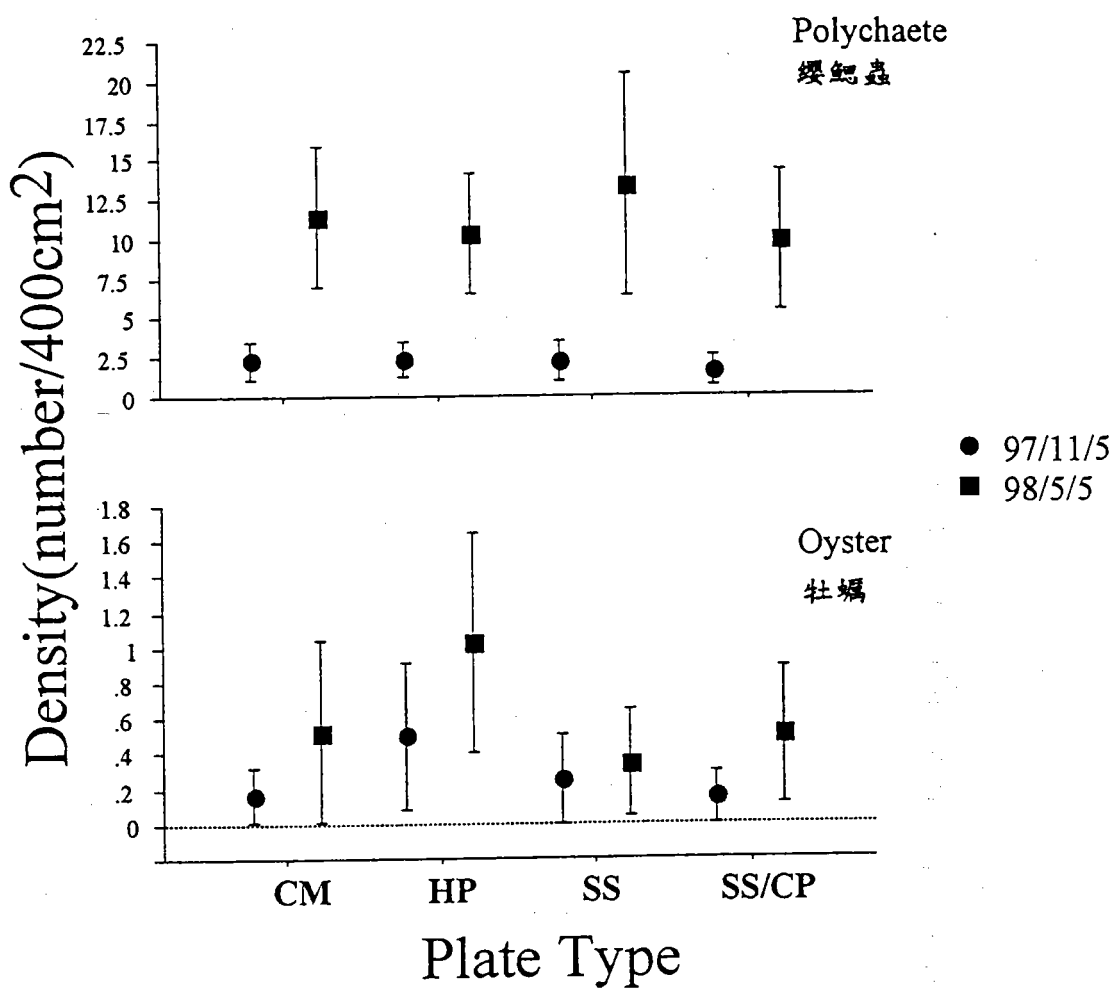


圖 4-15 附着生物在四種不同材質的附着密度
(誤差線為 95%的信賴界線)

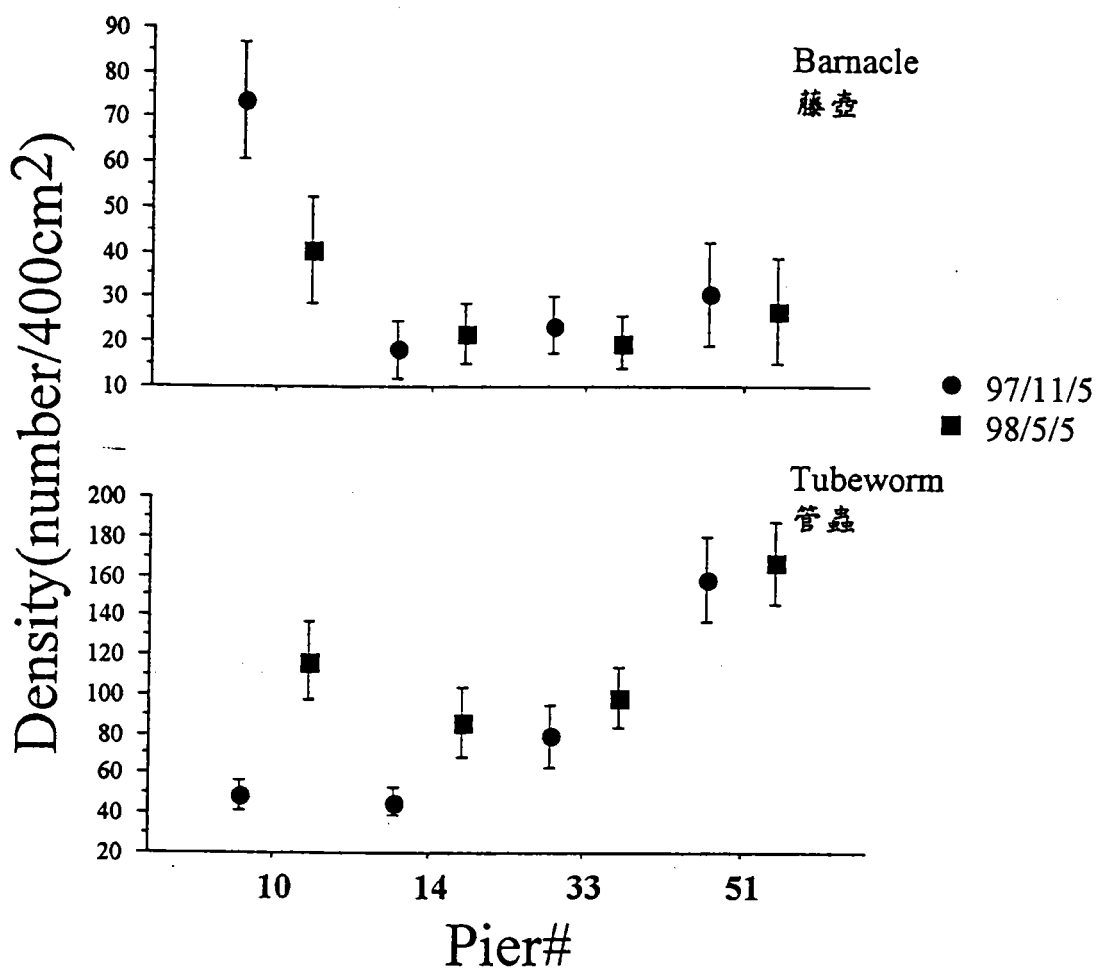


圖 4-16 附著生物在不同碼頭的附著密度
(誤差線為 95%的信賴區間)

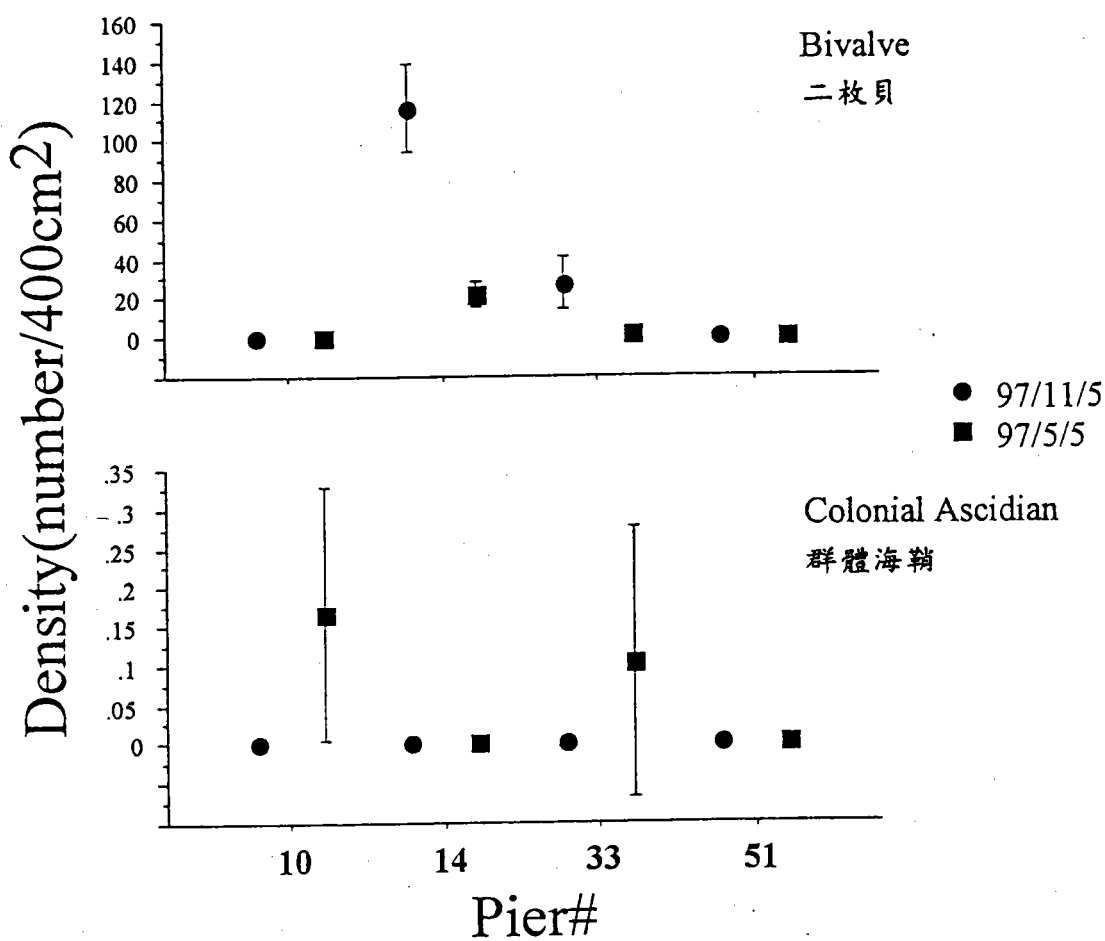


圖 4-17 附著生物在不同碼頭的附著密度
(誤差線為 95%的信賴區間)

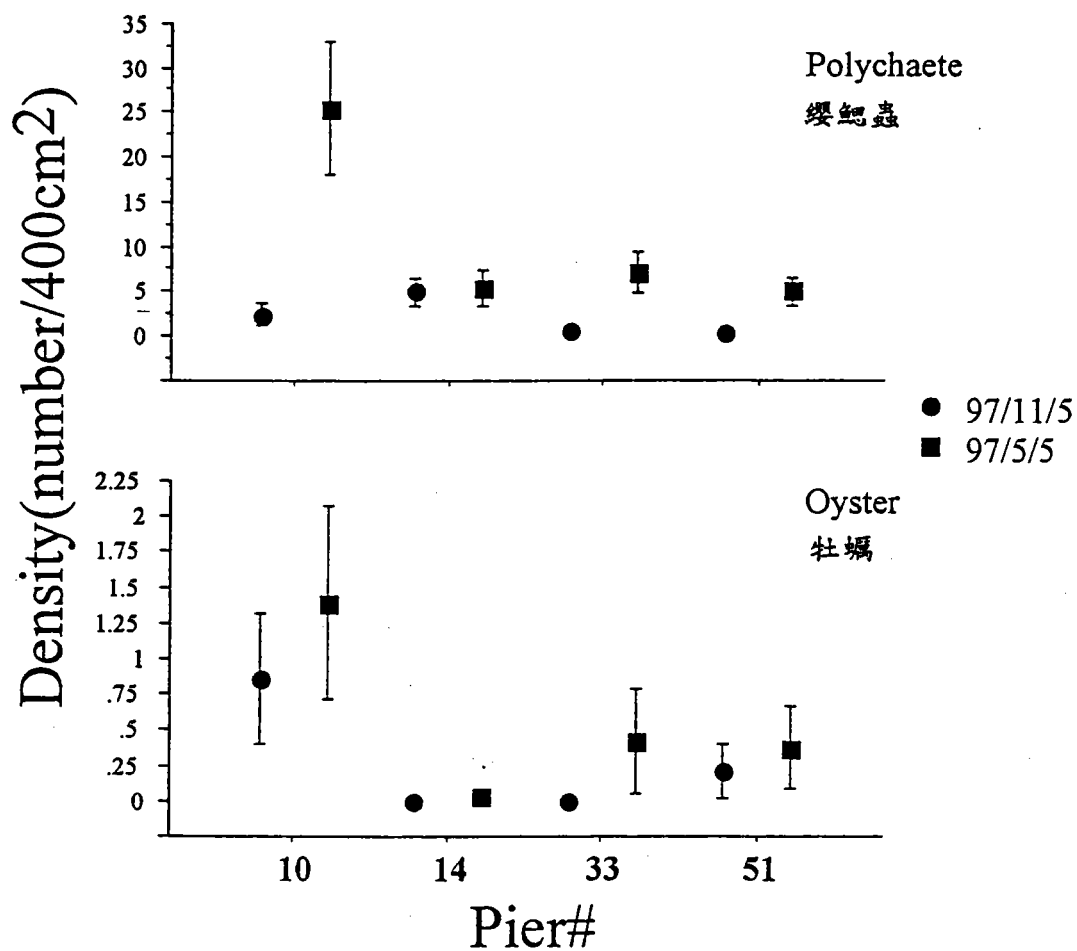


圖 4-18 附著生物在不同碼頭的附著密度
(誤差線為 95%的信賴區間)

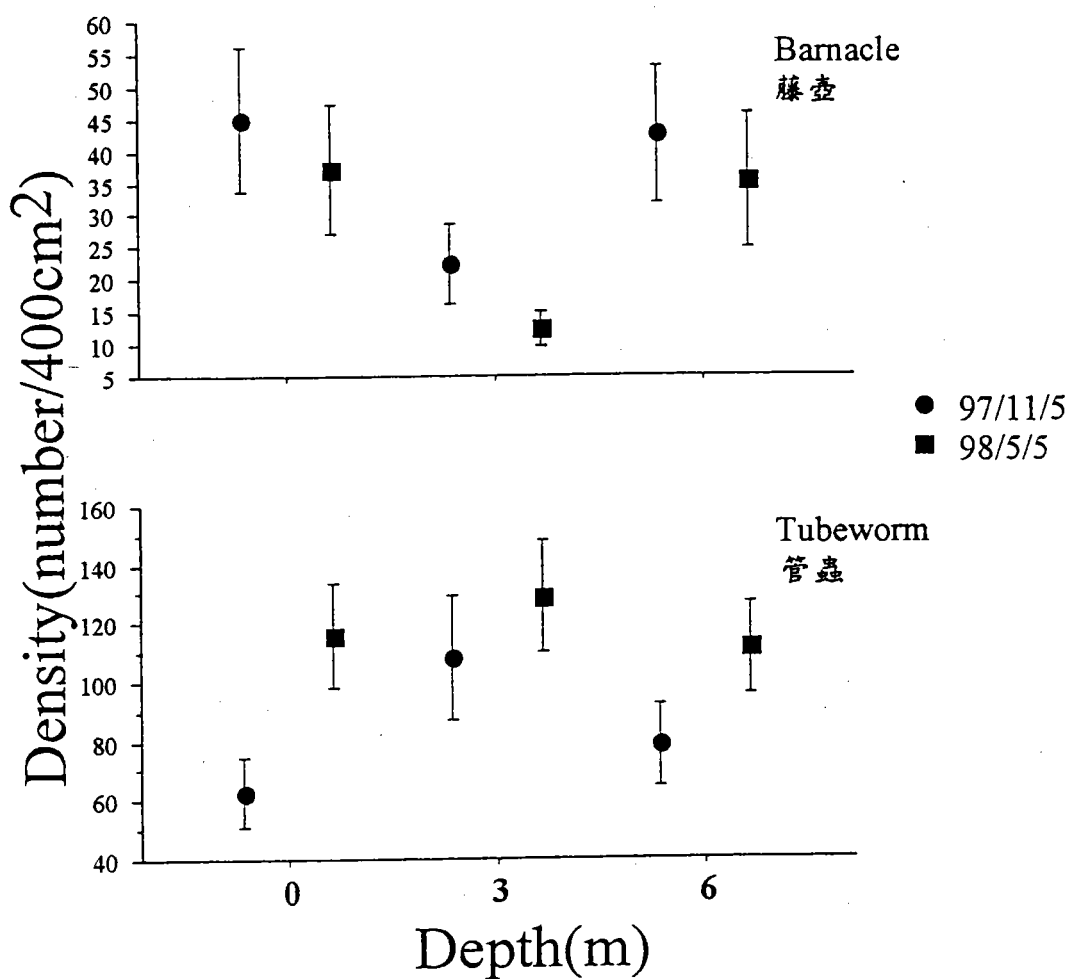


圖 4-19 附著生物在不同水深的附著密度
(誤差線為 95%的信賴區間)

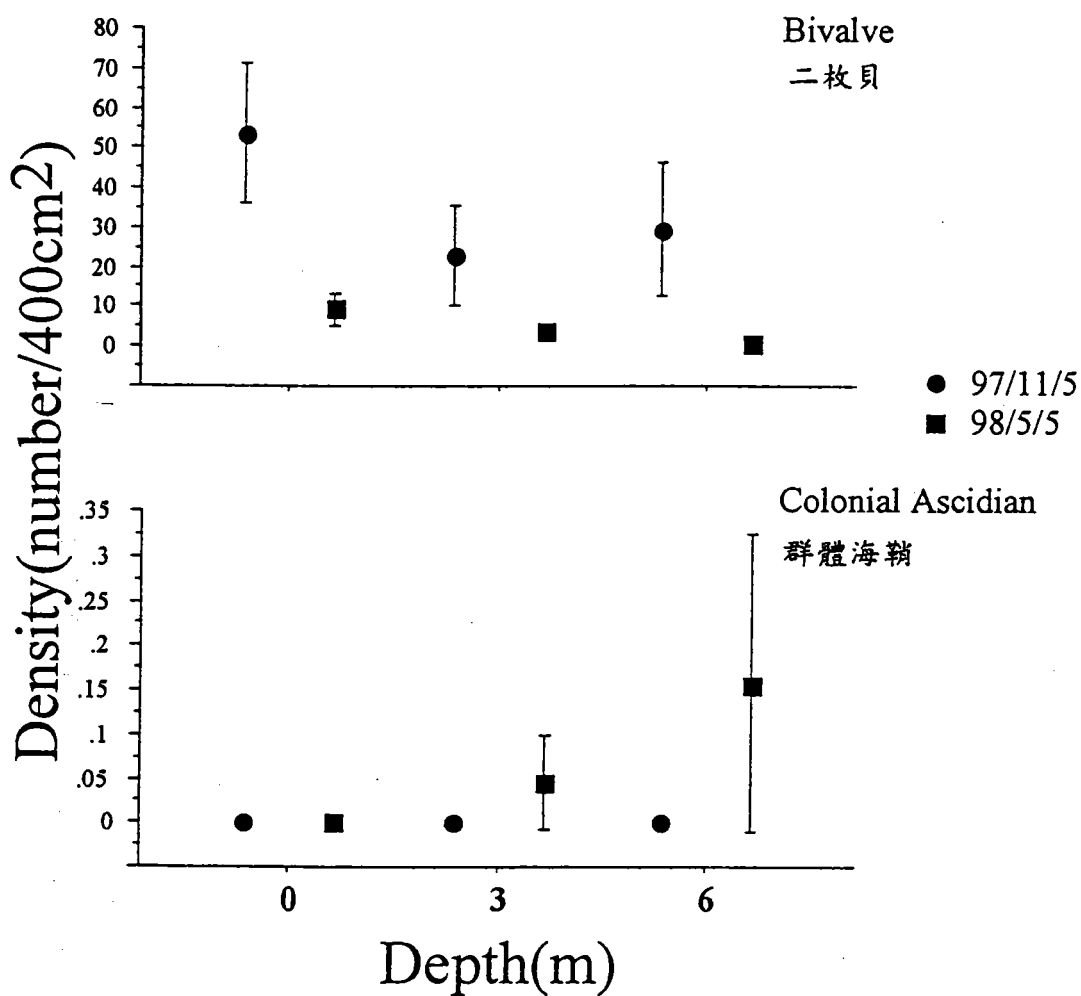


圖 4-20 附著生物在不同水深的附著密度
(誤差線為 95%的信賴界線)

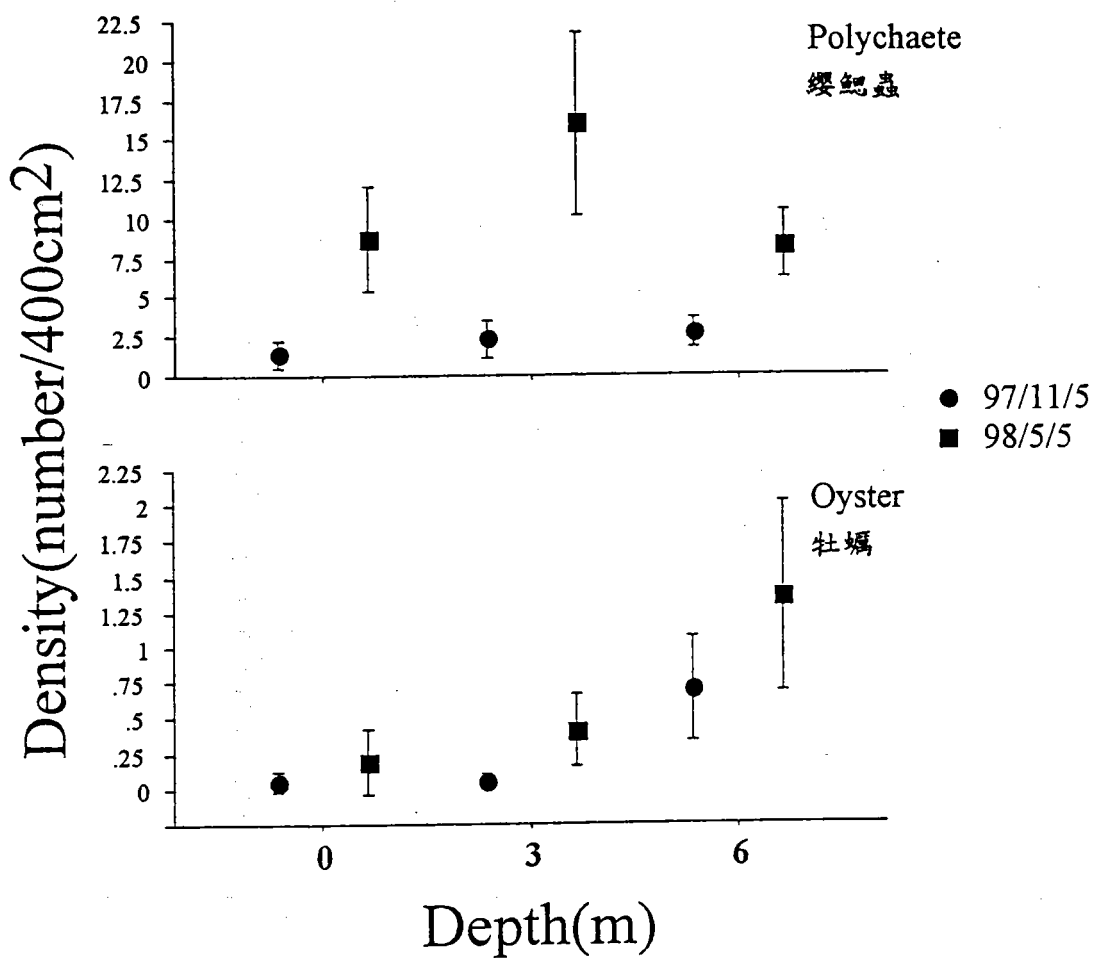


圖 4-21 附著生物在不同水深的附著密度
(誤差線為 95%的信賴界線)

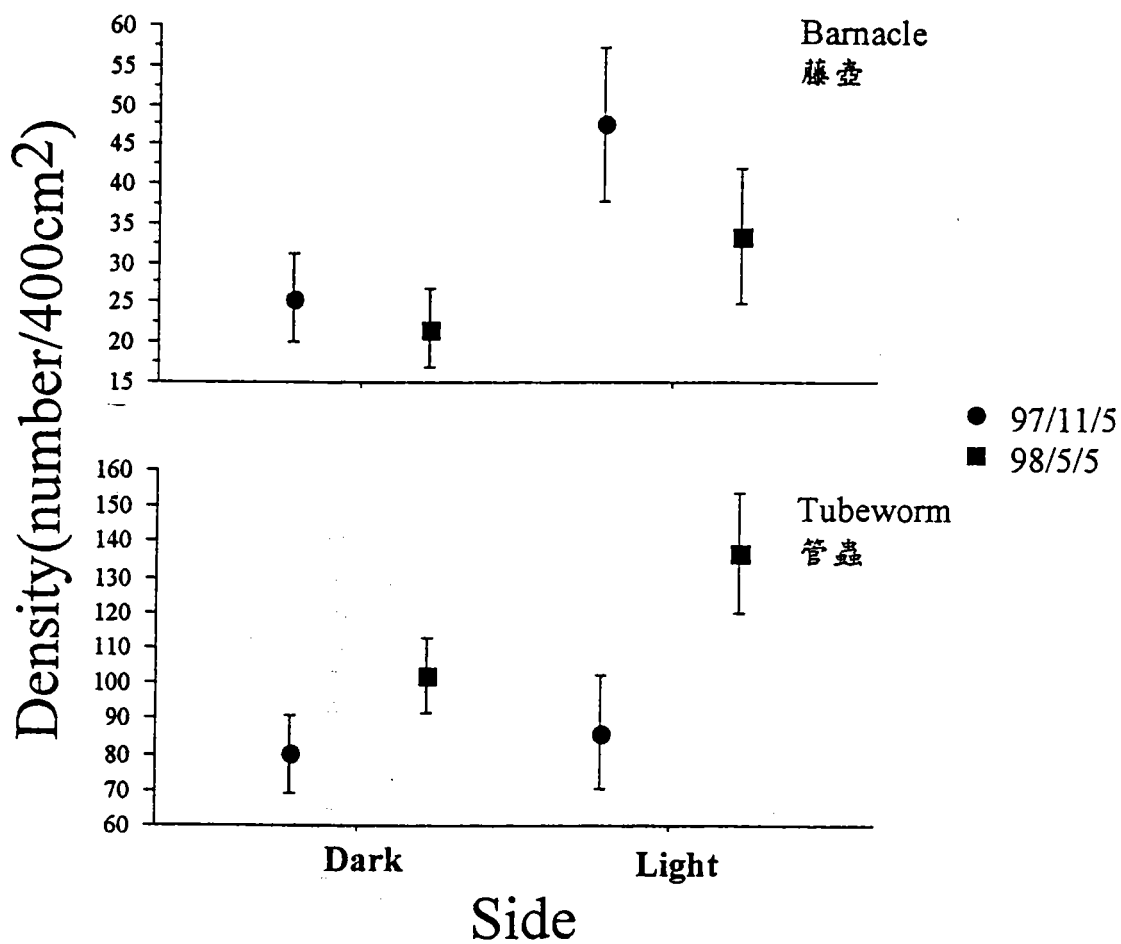


圖 4-22 附著生物在向光面與背光面的附著密度
(誤差線為 95%的信賴界線)

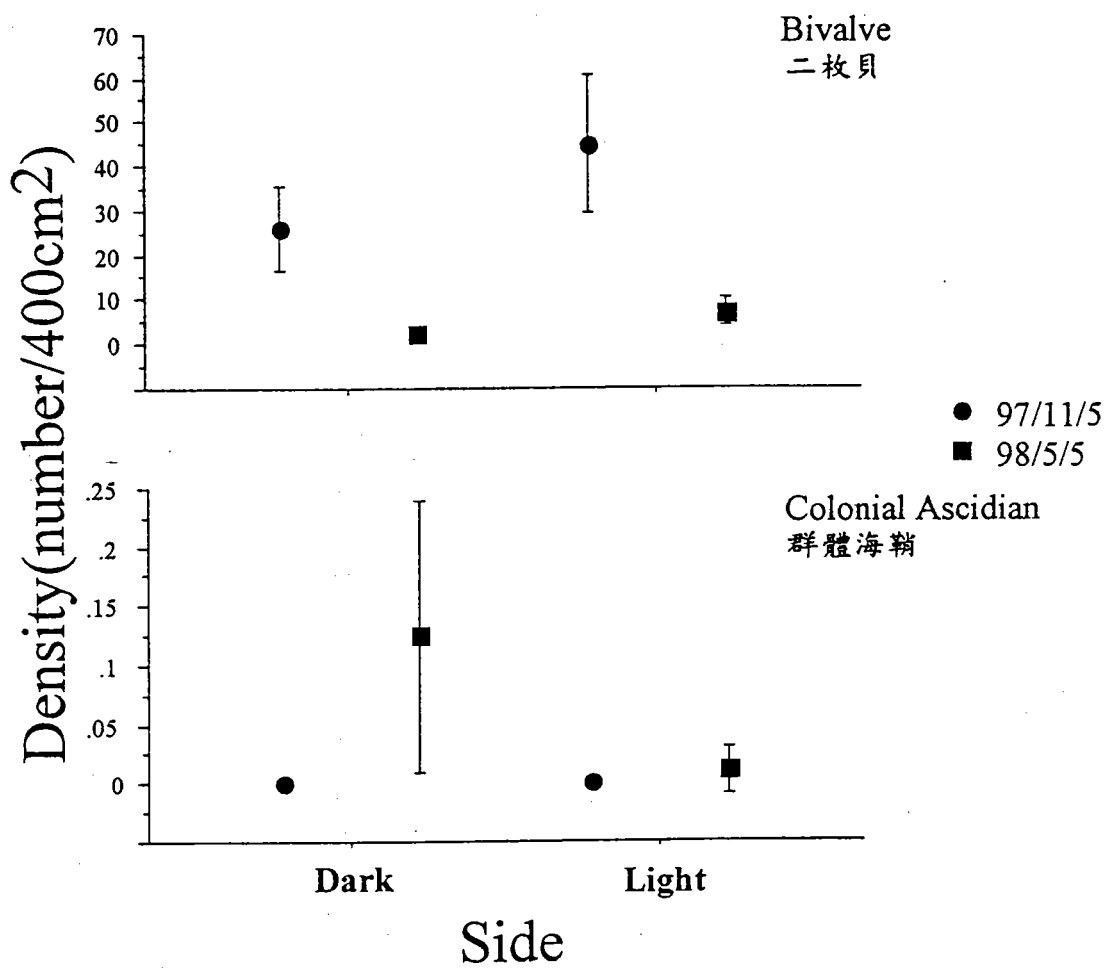


圖 4-23 附著生物在向光面與背光面的附著密度
(誤差線為 95%的信賴界線)

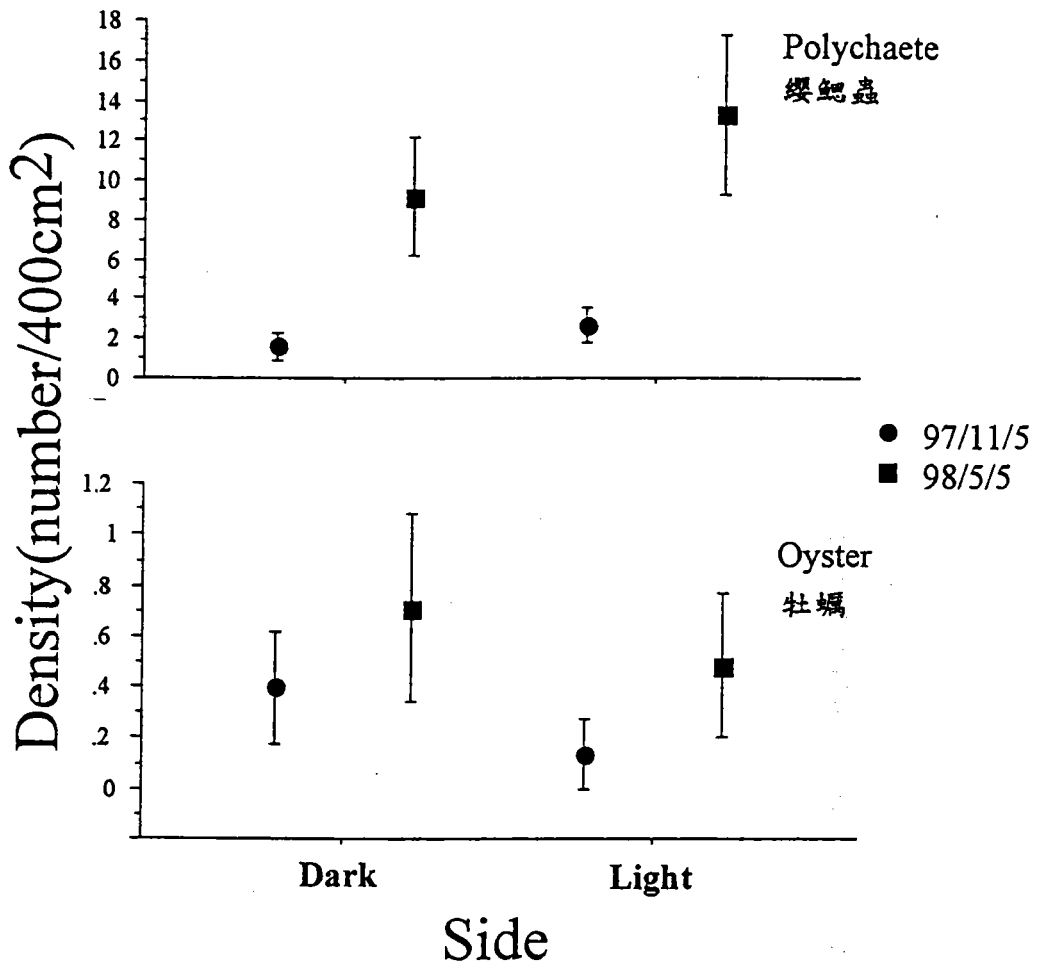


圖 4-24 附着生物在向光面與背光面的附着密度
(誤差線為 95%的信賴界線)

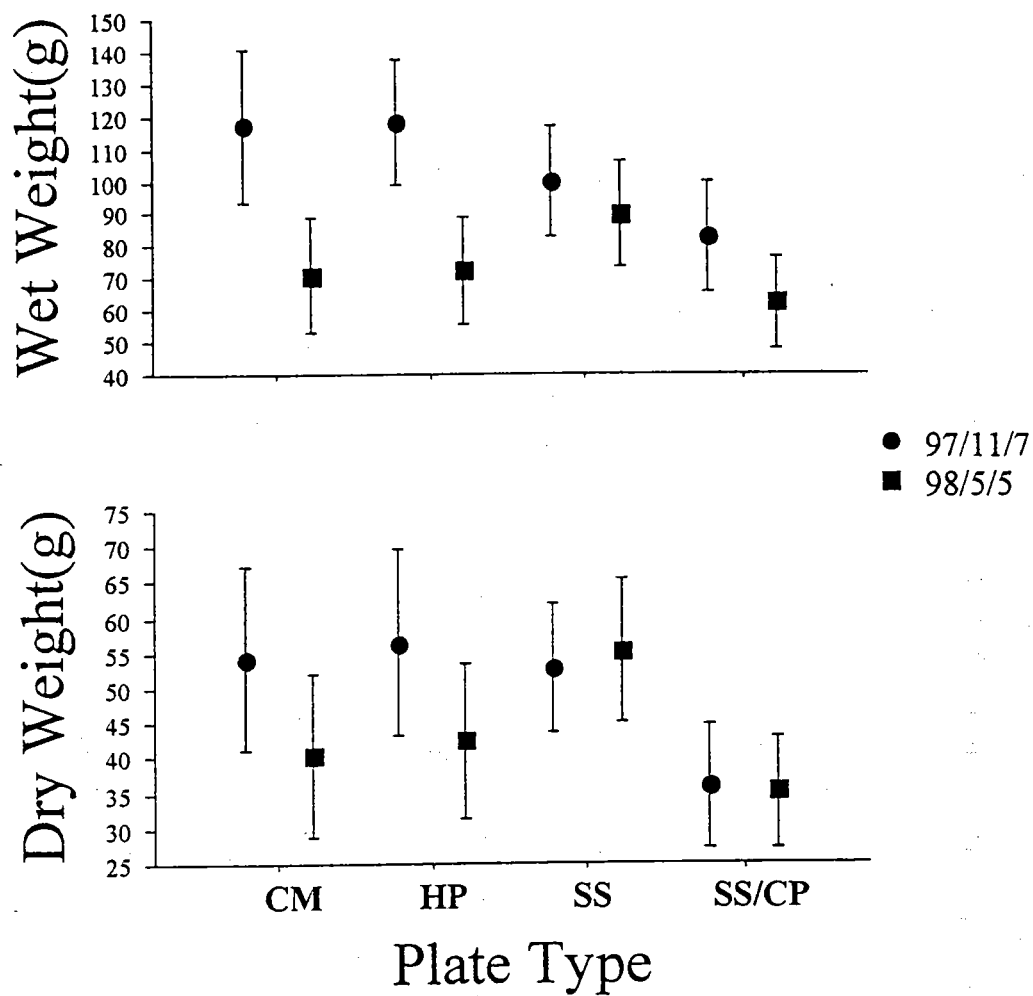


圖 4-25 附著生物在四種不同材質的總乾重與總溼重
(誤差線為 95%的信賴界線)

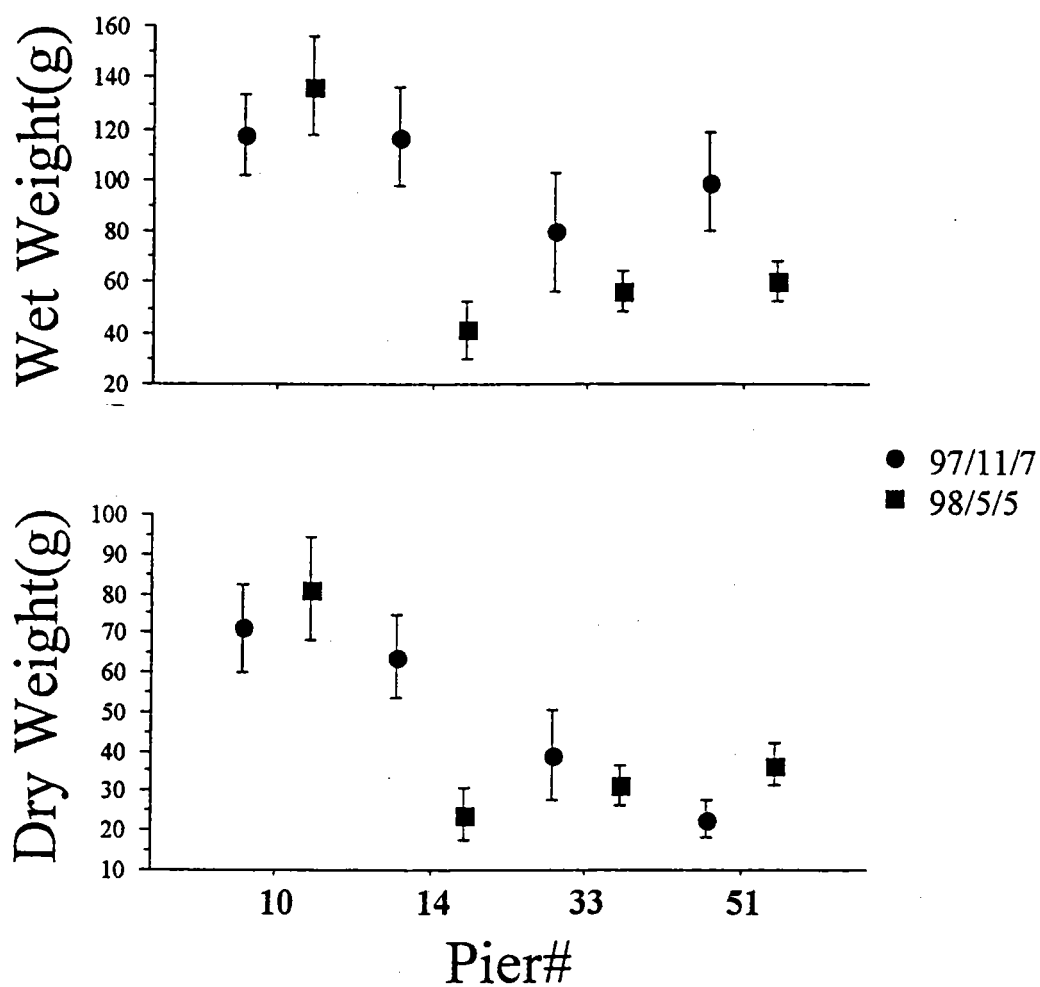


圖 4-26 附着生物在不同碼頭的總乾重與總溼重
(誤差線為 95%的信賴區間)

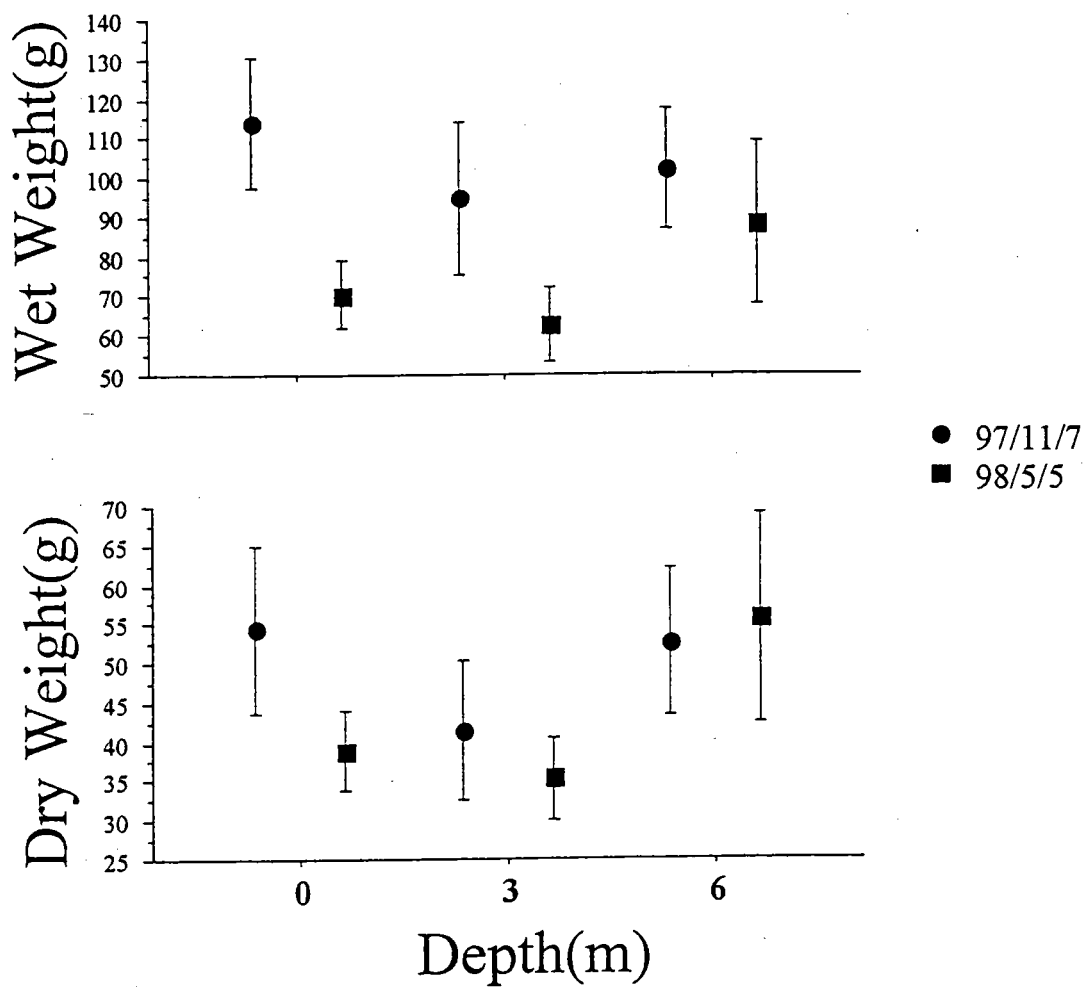


圖 4-27 附著生物在不同水深的總乾重與總溼重
(誤差線為 95%的信賴界線)

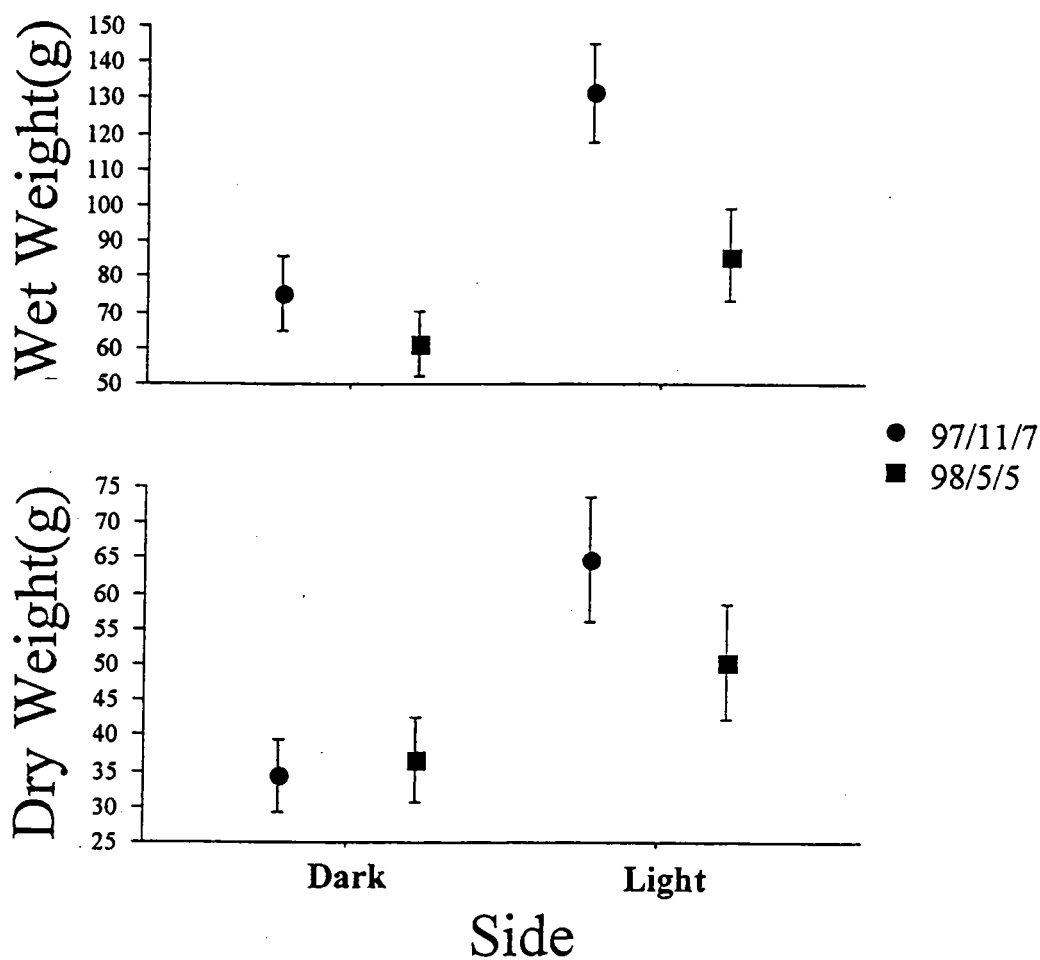


圖 4-28 附著生物在向光面與背光面的總乾重與總溼重
(誤差線為 95%的信賴界線)

Covered Area(cm²)

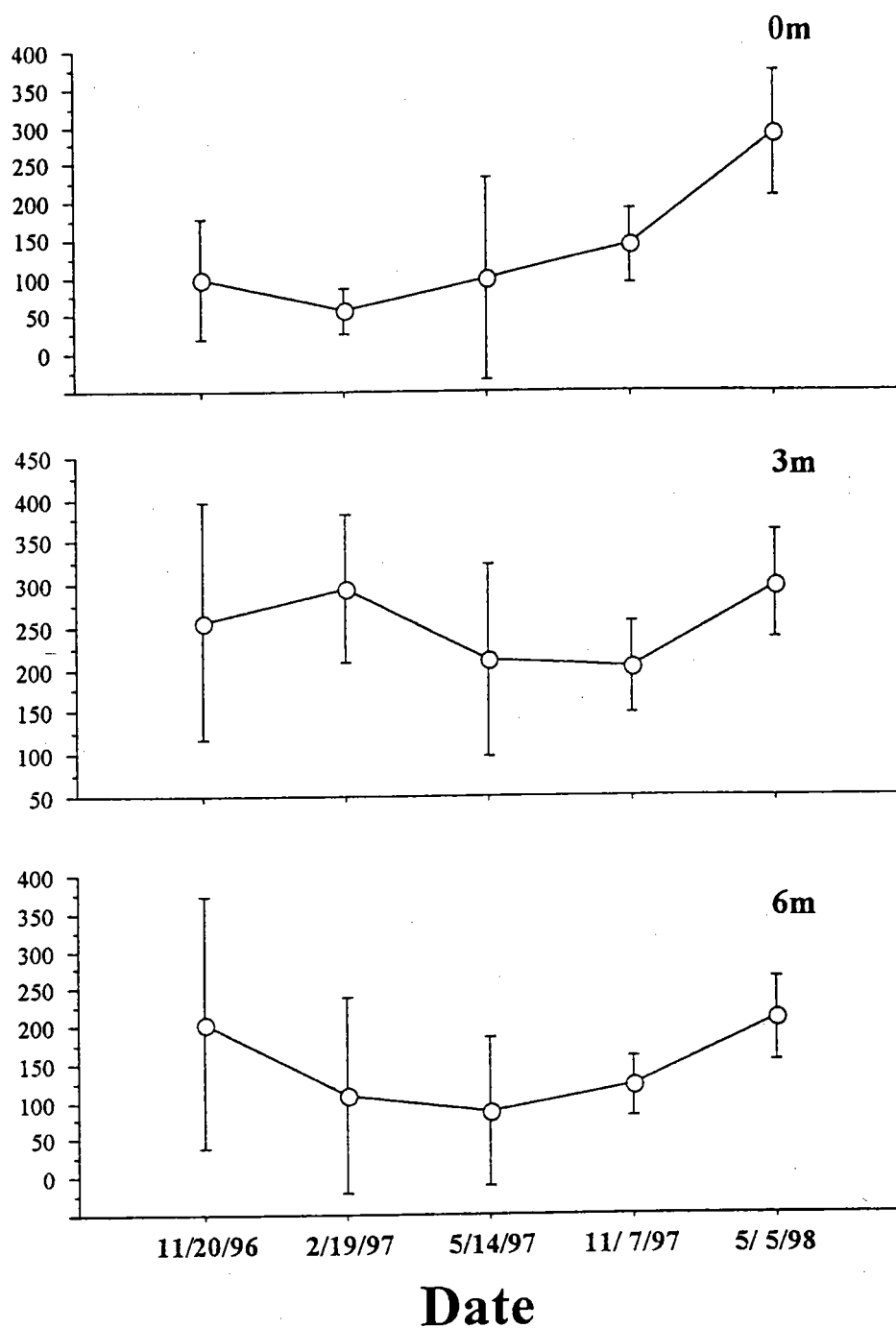


圖 4-29 #10 不同水深管蟲的覆蓋面積變化 (向光面)
(誤差線為 95%的信賴界線)

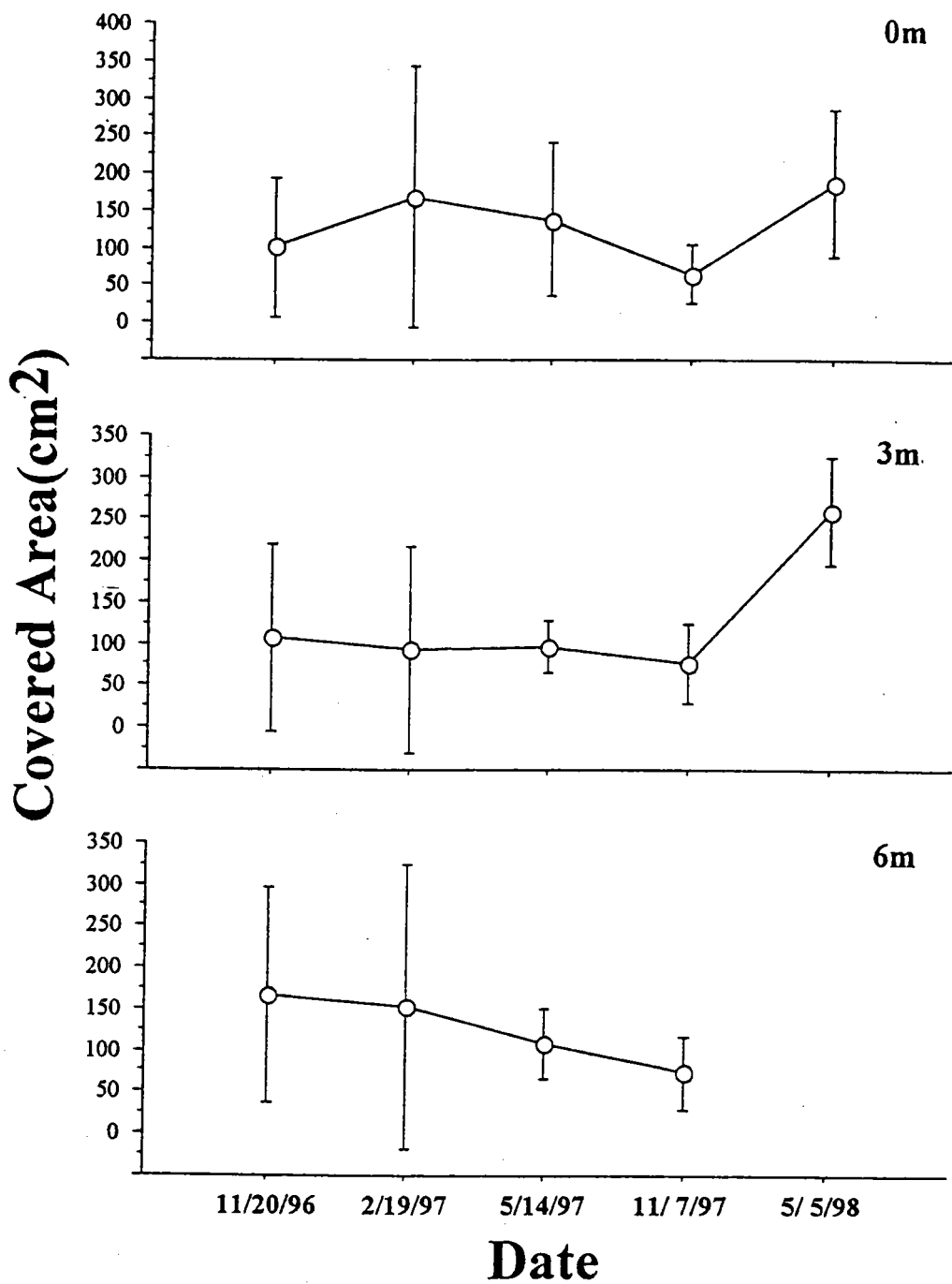


圖 4-30 #14 不同水深管蟲的覆蓋面積變化 (向光面)
(誤差線為 95%的信賴界線)

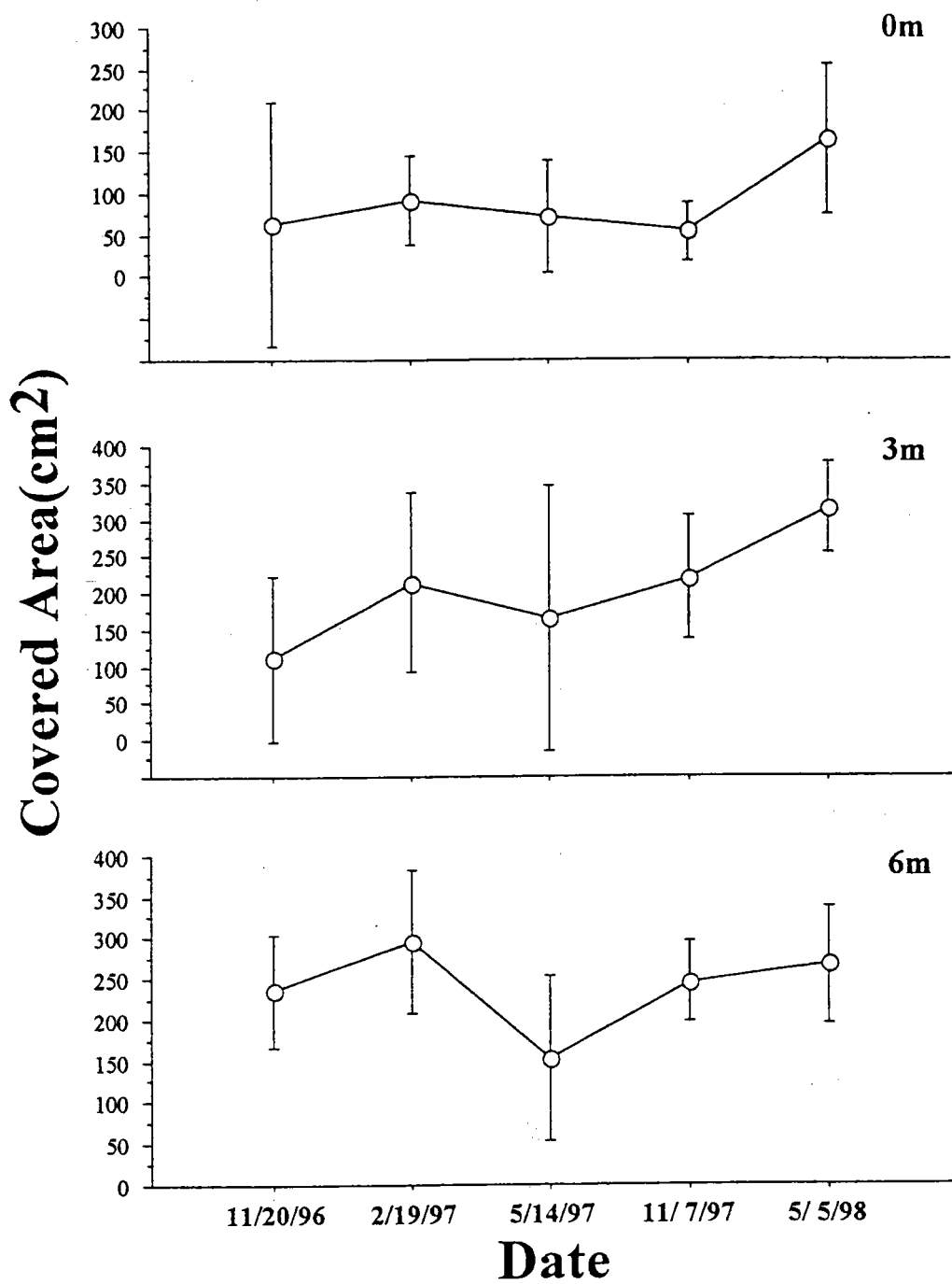


圖 4-31 #33 不同水深管蟲的覆蓋面積變化 (向光面)
(誤差線為 95%的信賴界線)

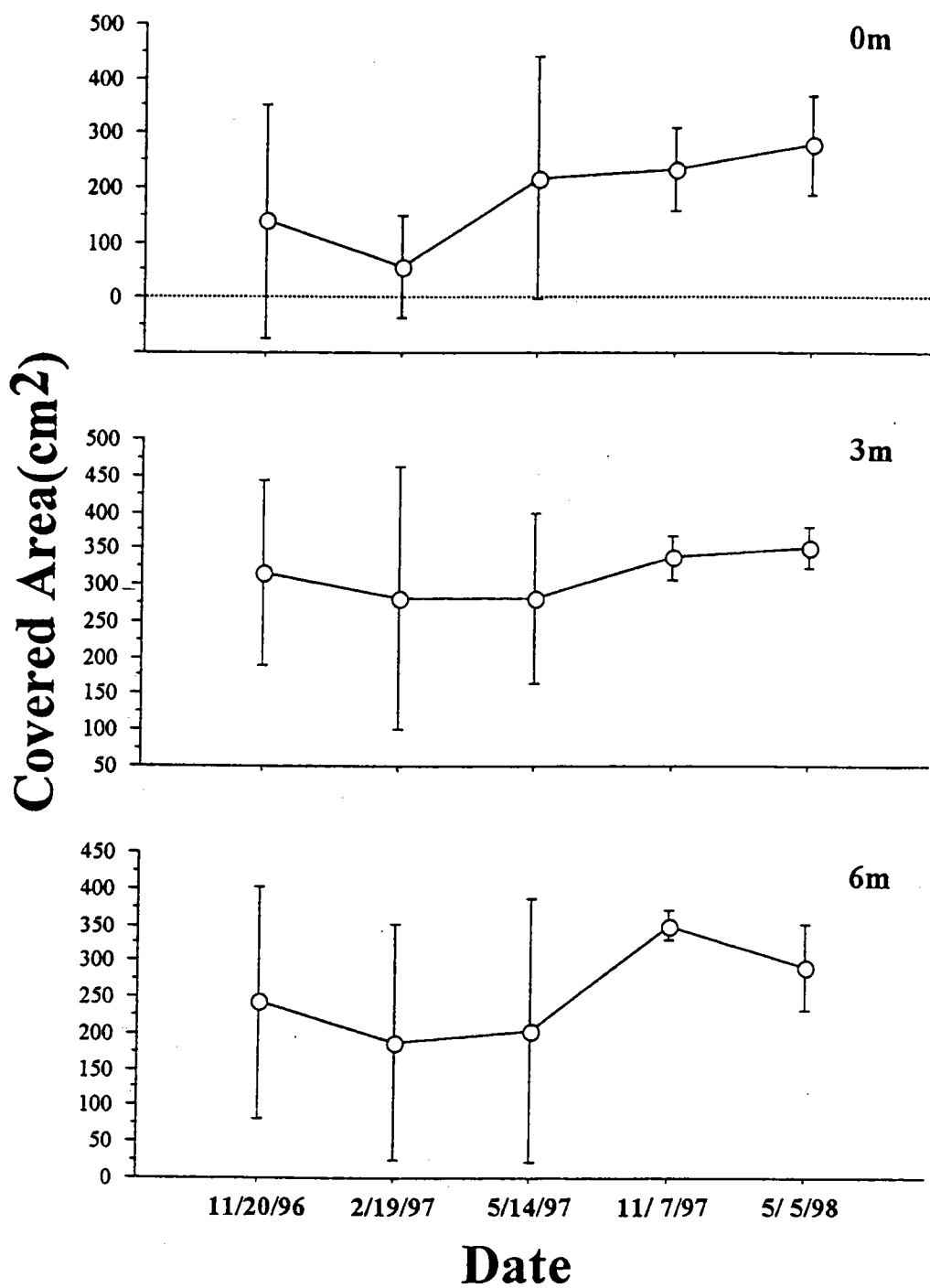


圖 4-32 #51 不同水深管蟲的覆蓋面積變化 (向光面)
(誤差線為 95%的信賴界線)

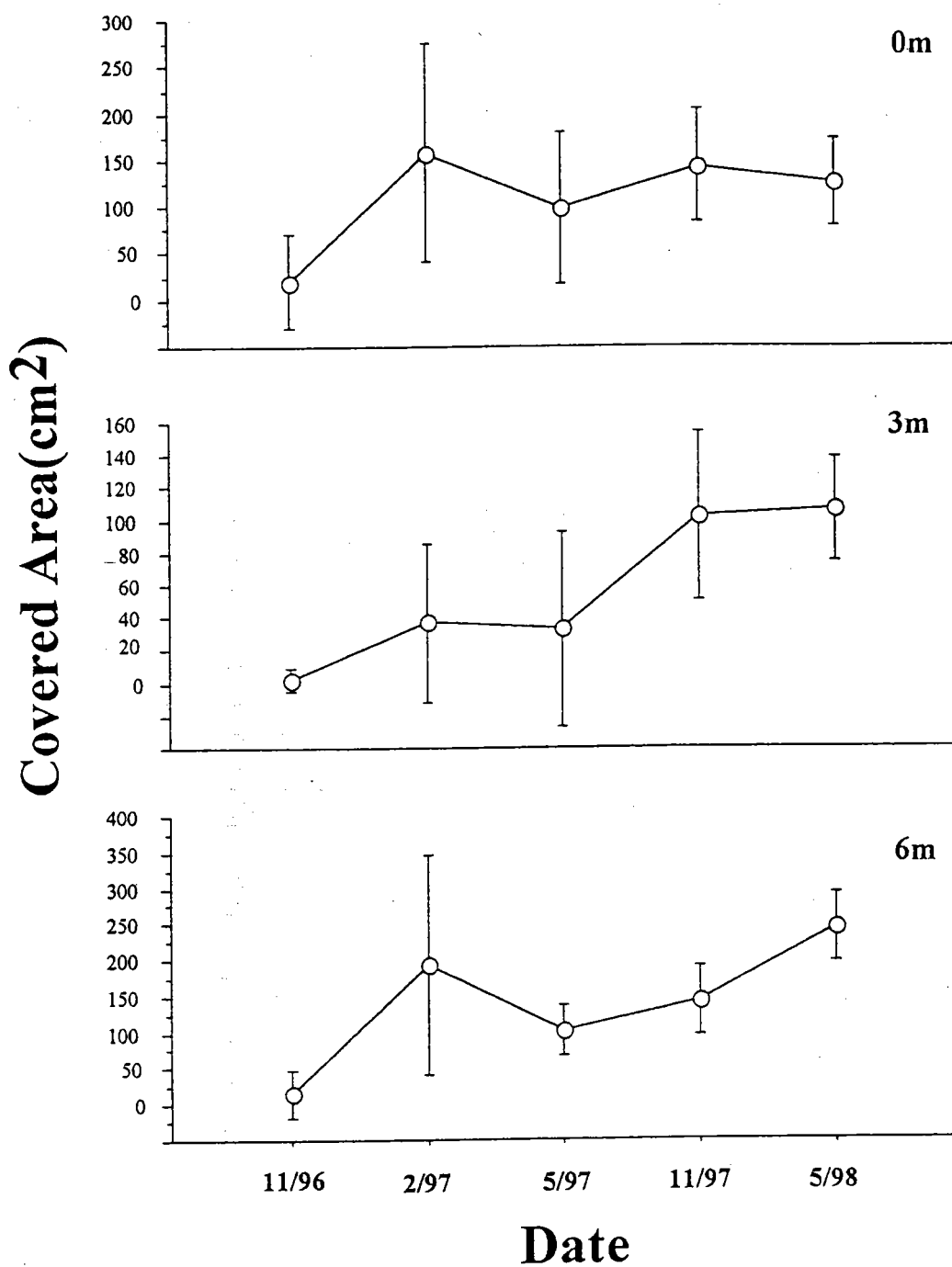


圖 4-33 #10 不同水深藤壺的覆蓋面積變化 (向光面)
(誤差線為 95%的信賴界線)

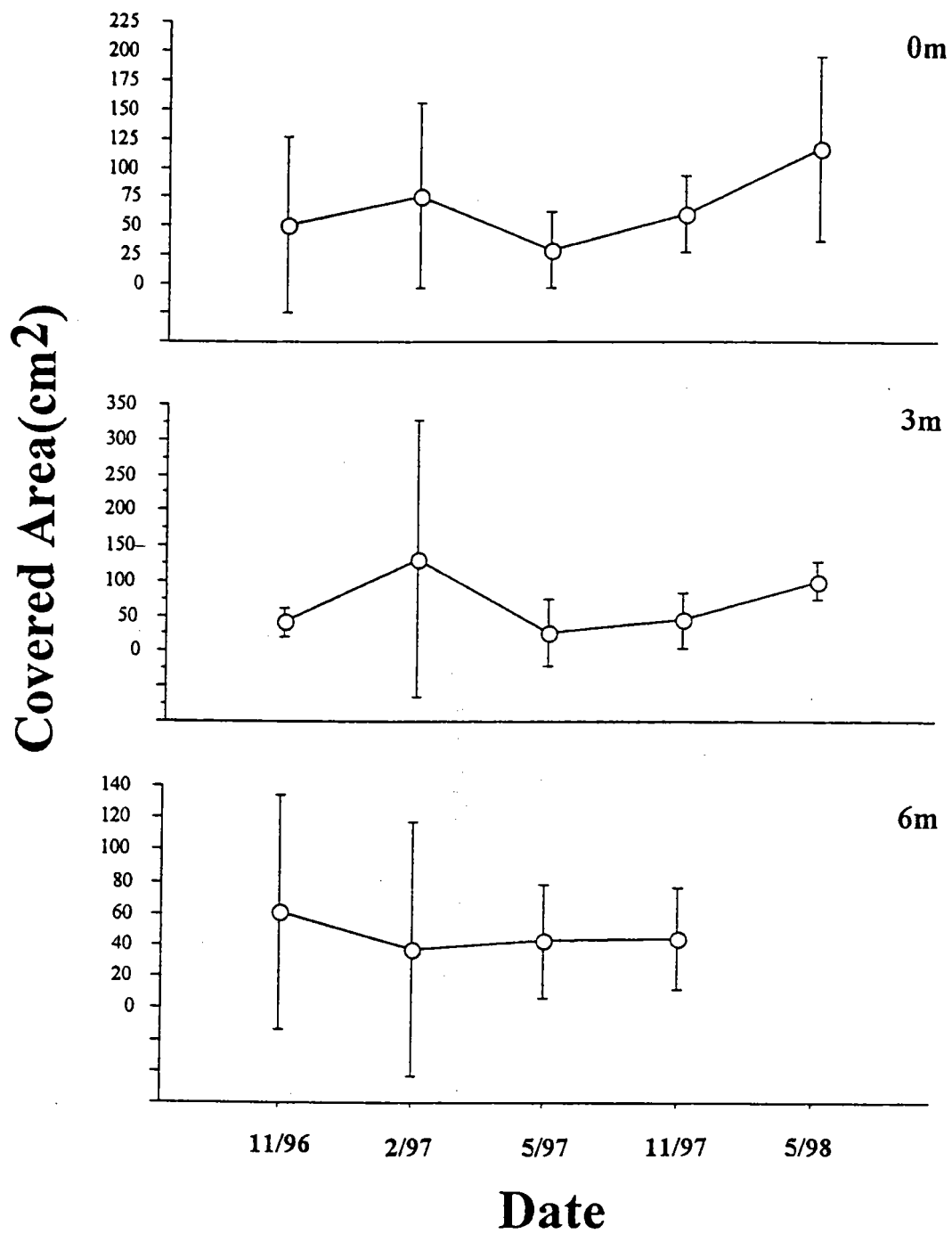


圖 4-34 #14 不同水深藤壺的覆蓋面積變化 (向光面)
(誤差線為 95% 的信賴界線)

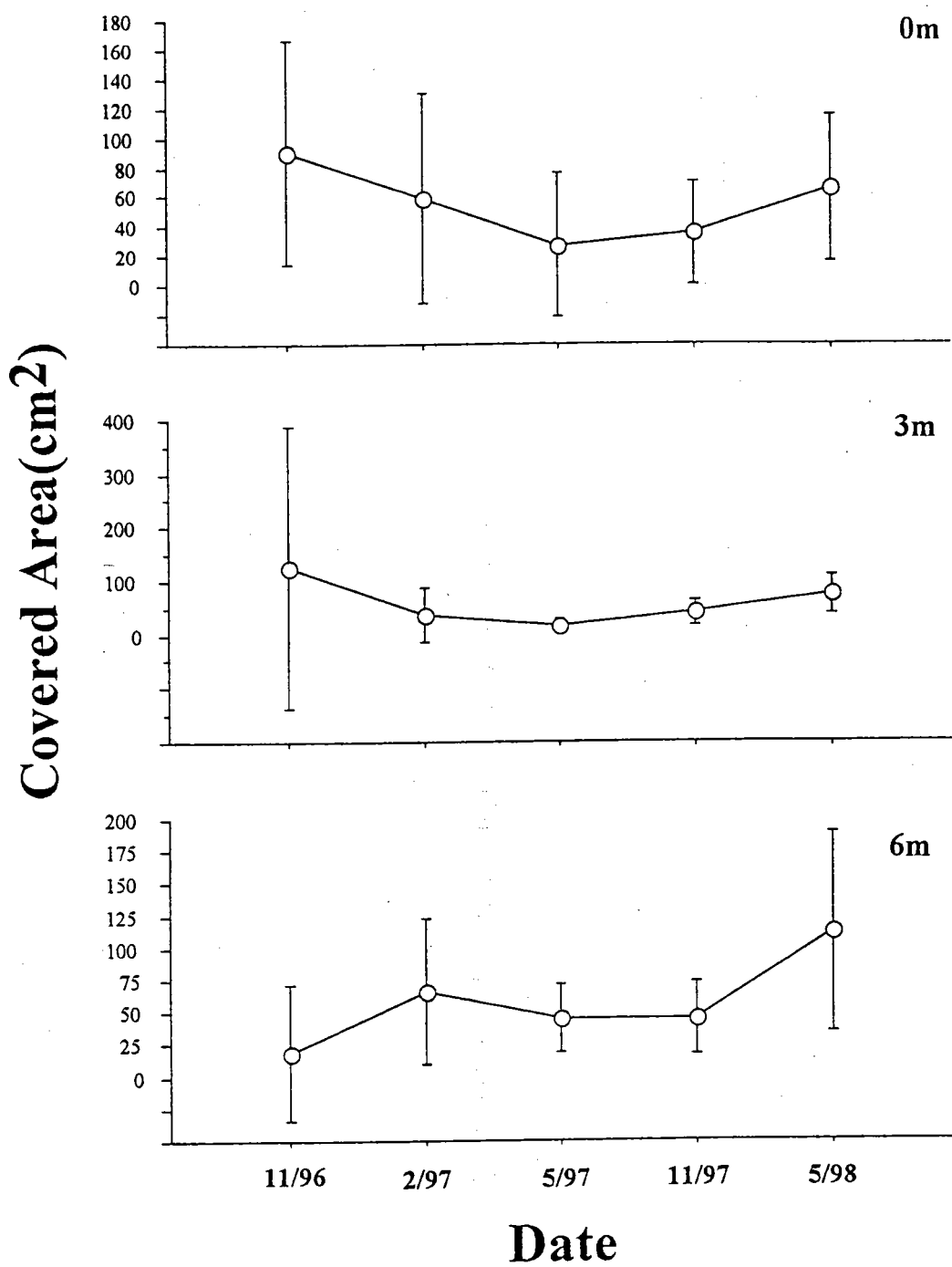


圖 4-35 #33 不同水深藤壺的覆蓋面積變化 (向光面)
(誤差線為 95%的信賴界線)

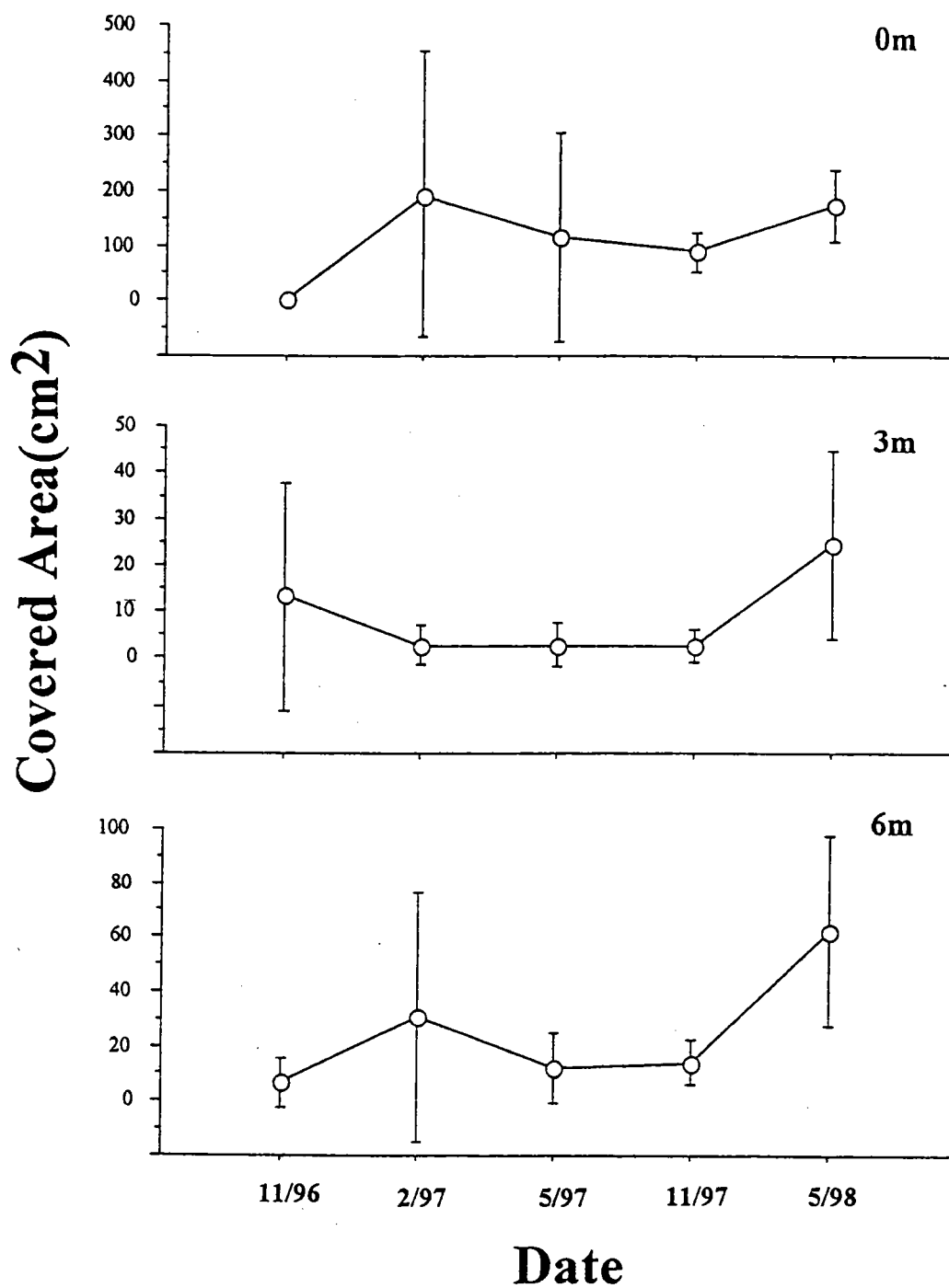


圖 4-36 #51 不同水深藤壺的覆蓋面積變化 (向光面)
(誤差線為 95%的信賴界線)

Density(No./100cm²)

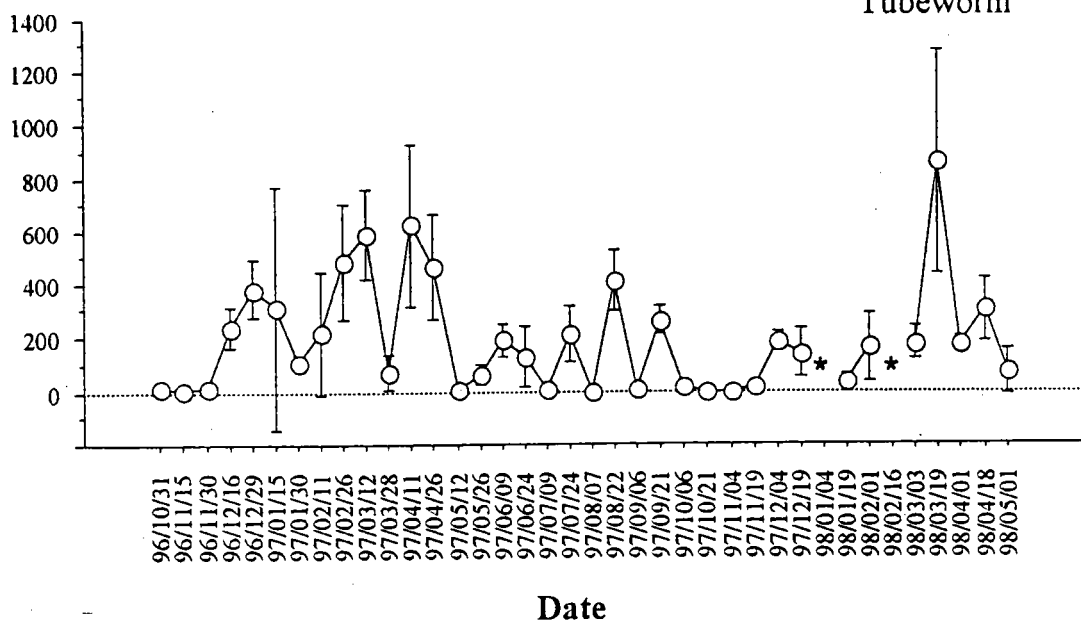


圖 4-37 駁三碼頭管蟲的著苗量變化
(誤差線為 95%的信賴界線，*為資料遺失點)

Density(No./100cm²)

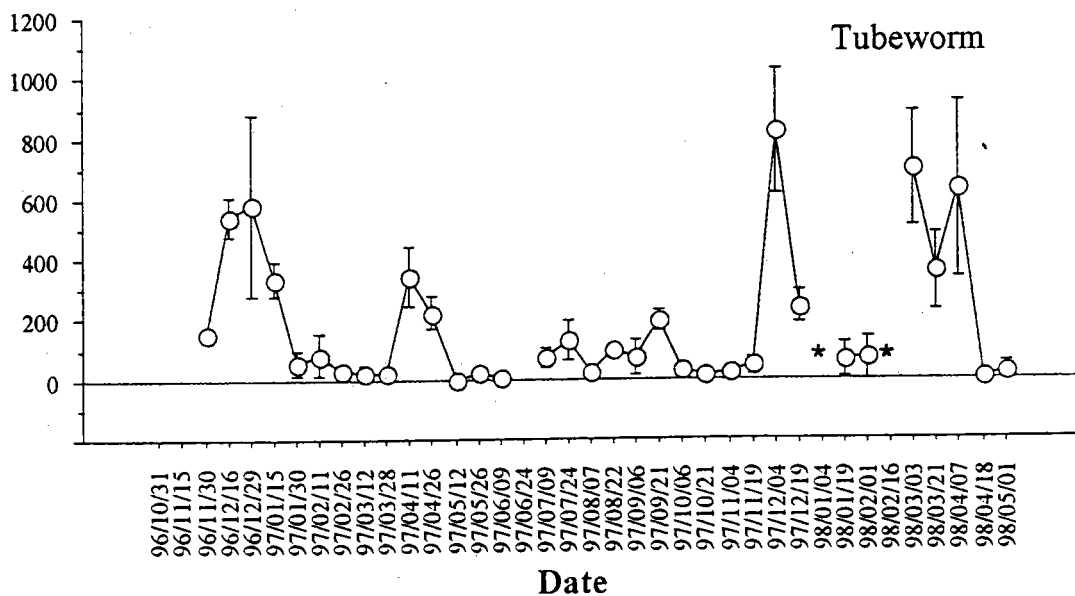


圖 4-38 #51 管蟲的著苗量變化
(誤差線為 95%的信賴界線，*為資料遺失點)

Density(No./100cm²)

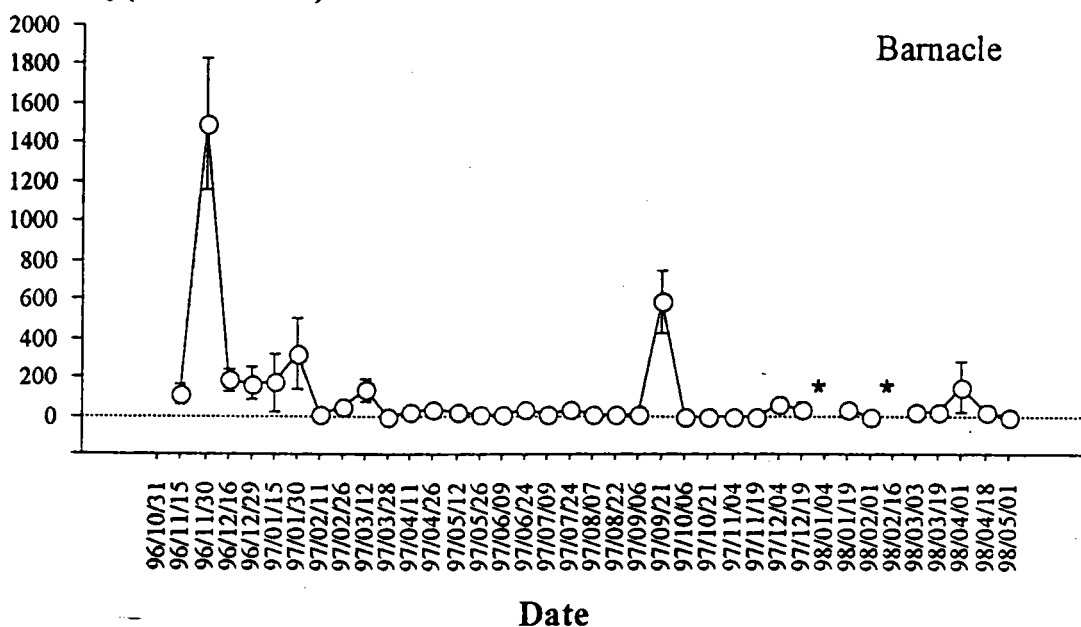


圖 4-39 駁三碼頭藤壺的著苗量變化
(誤差線為 95%的信賴界線，*為資料遺失點)

Density(No./100cm²)

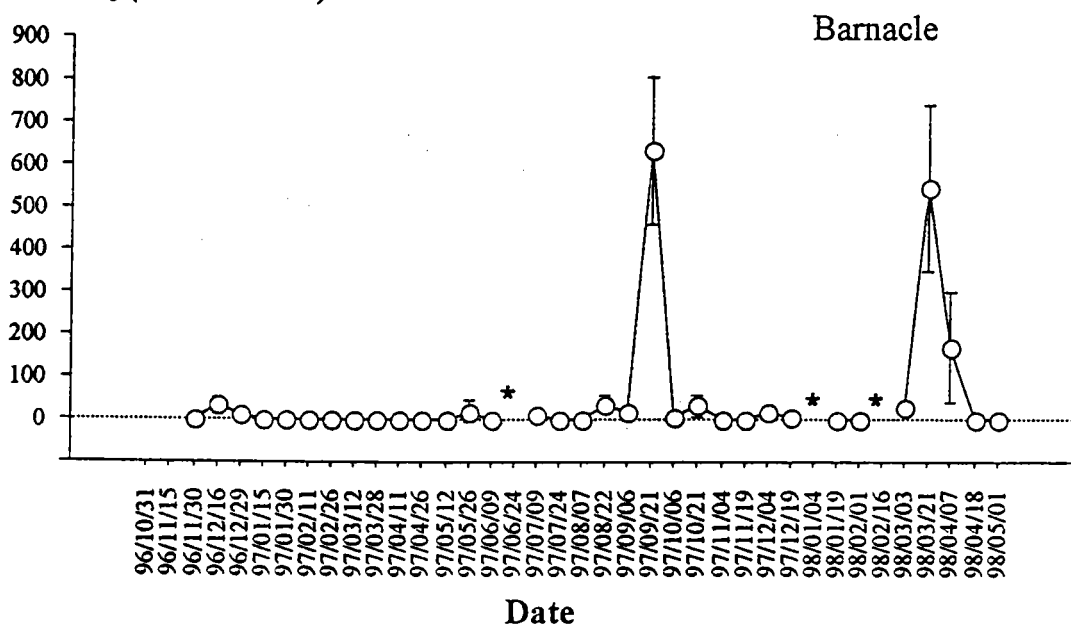


圖 4-40 #51 藤壺的著苗量變化
(誤差線為 95%的信賴界線，*為資料遺失點)

Density(No./9cm²)

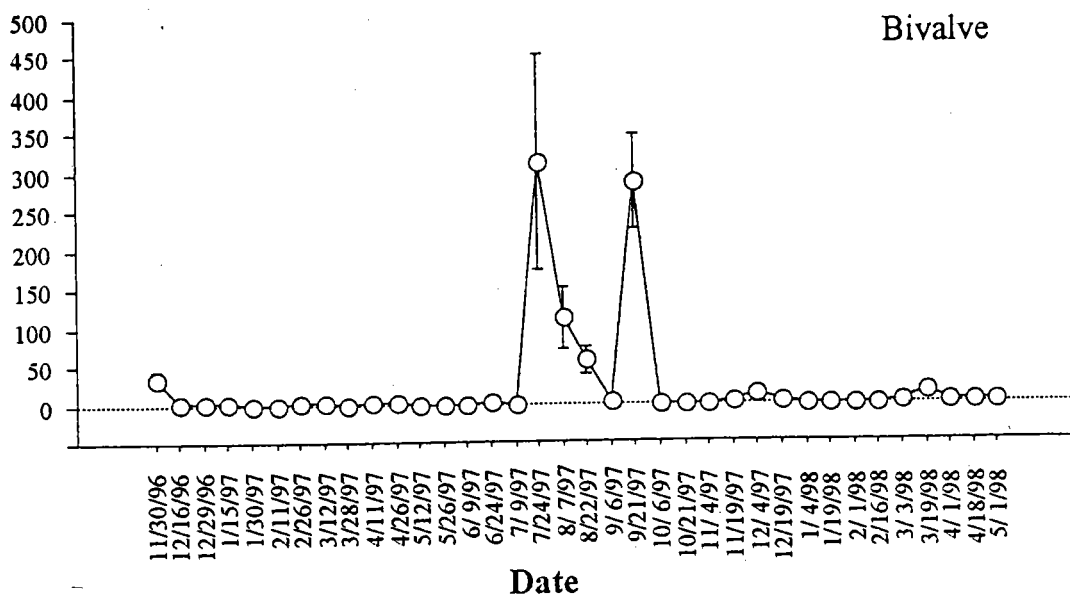


圖 4-41 駁三碼頭二枚貝的著苗量變化
(誤差線為 95%的信賴界線)

Density(No./9cm²)

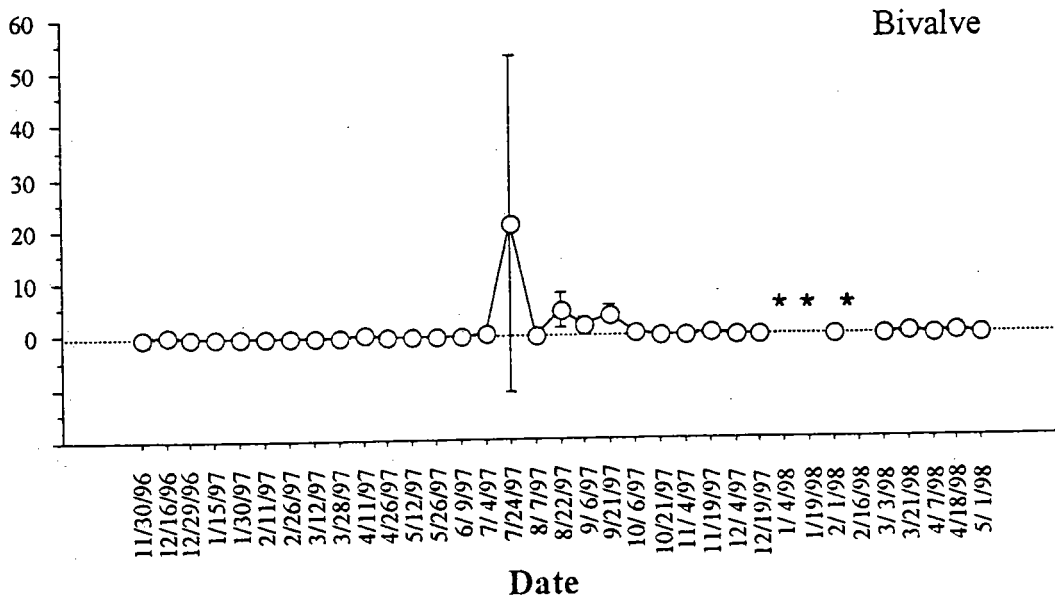


圖 4-42 #51 二枚貝的著苗量變化
(誤差線為 95%的信賴界線，*為資料遺失點)

Density(No./9cm²)

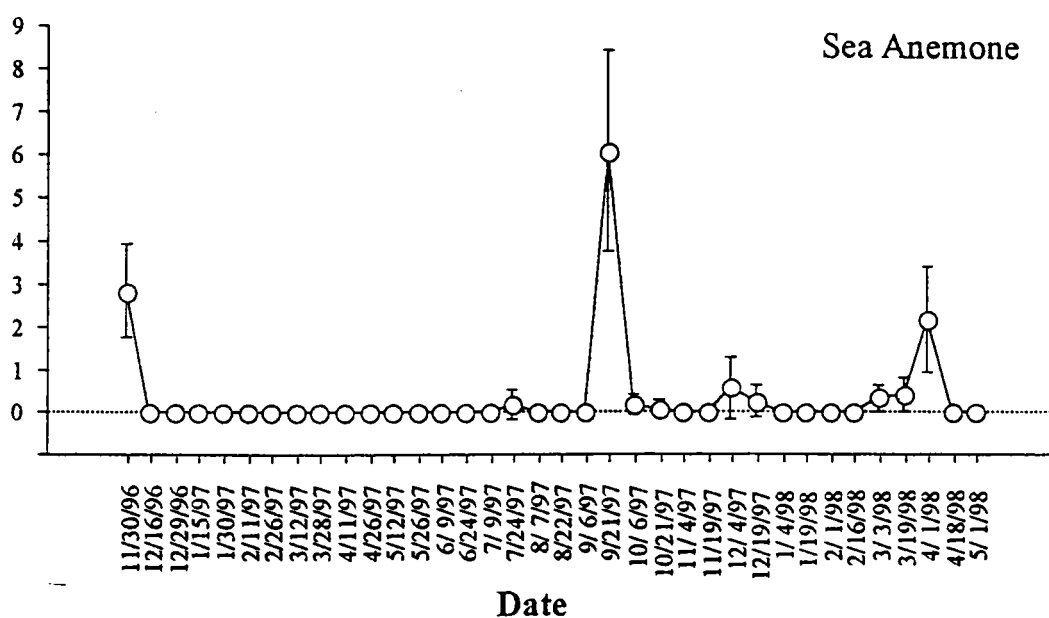


圖 4-43 駁三碼頭海葵的著苗量變化
(誤差線為 95%的信賴界線)

Density(No./9cm²)

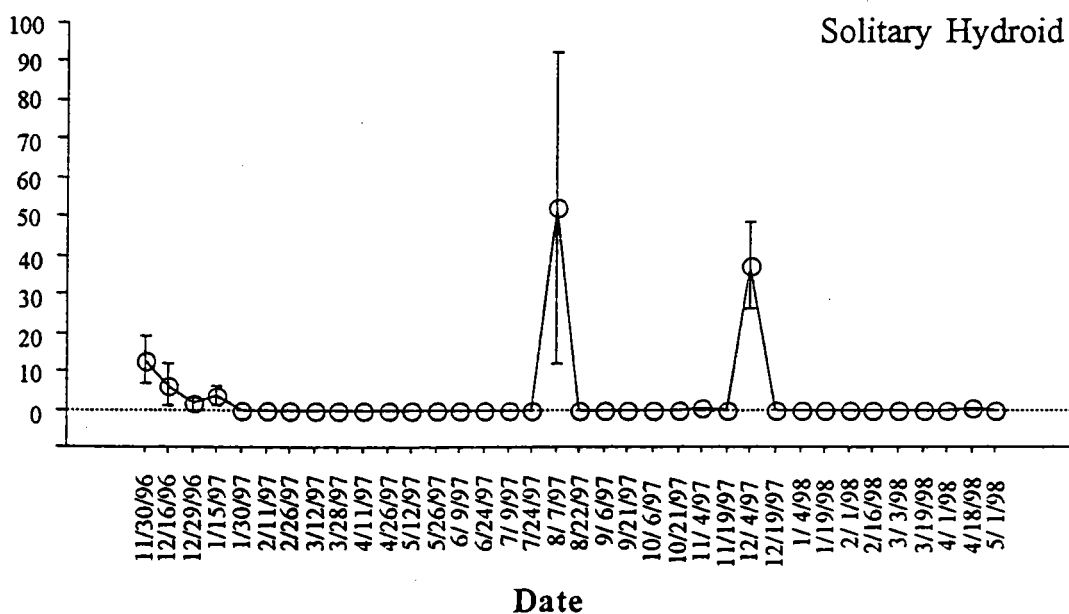


圖 4-44 駁三碼頭單體水螅的著苗量變化
(誤差線為 95%的信賴界線)

Density(No./9cm²)

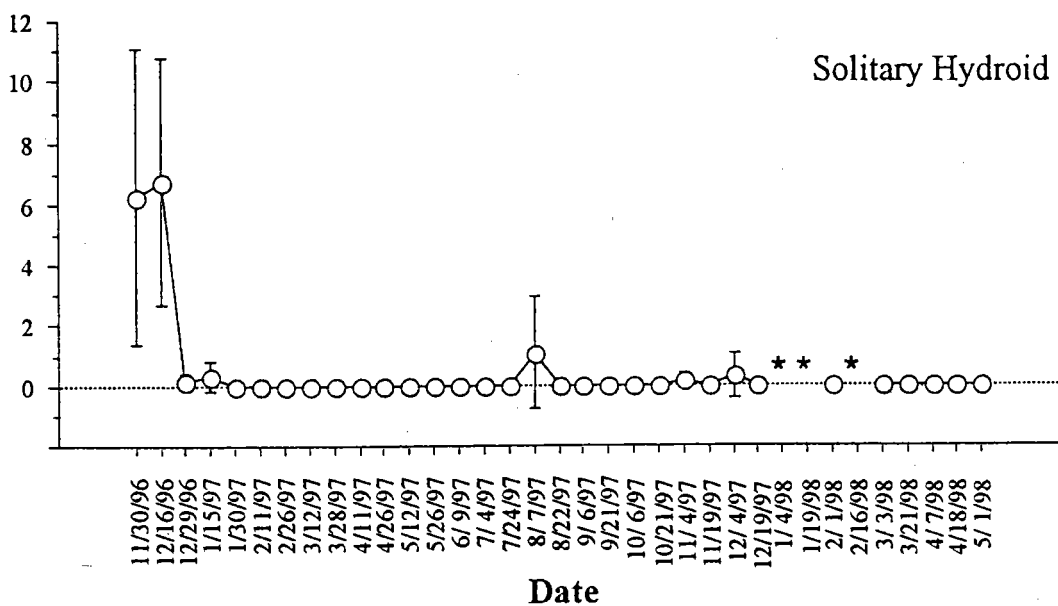


圖 4-45 #51 單體水螅的著苗量變化
(誤差線為 95%的信賴界線，*為資料遺失點)

Density(No./9cm²)

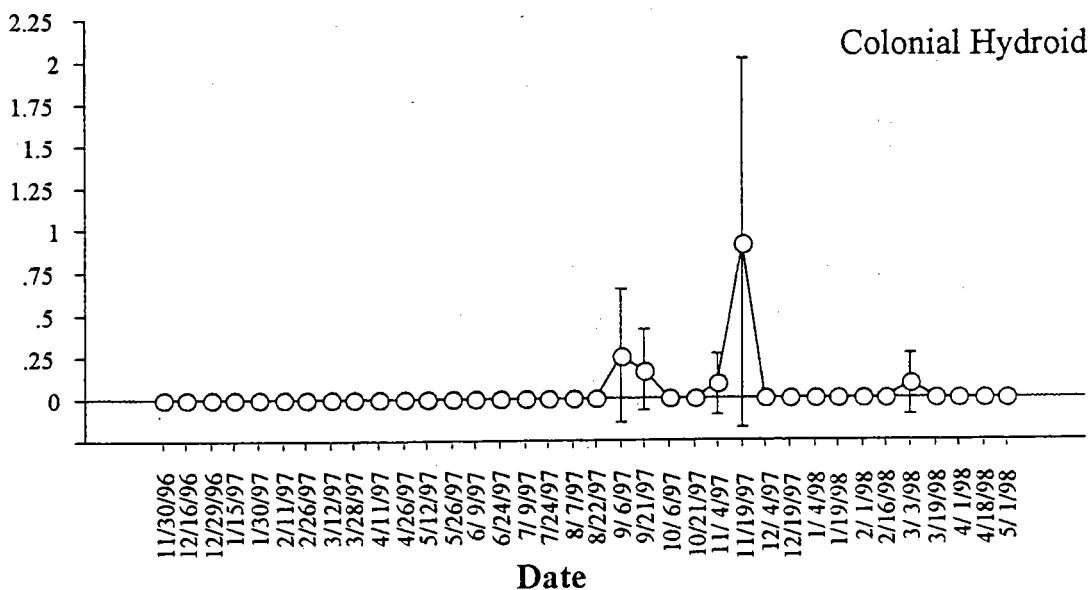


圖 4-46 駁三碼頭群體水螅的著苗量變化
(誤差線為 95%的信賴界線)

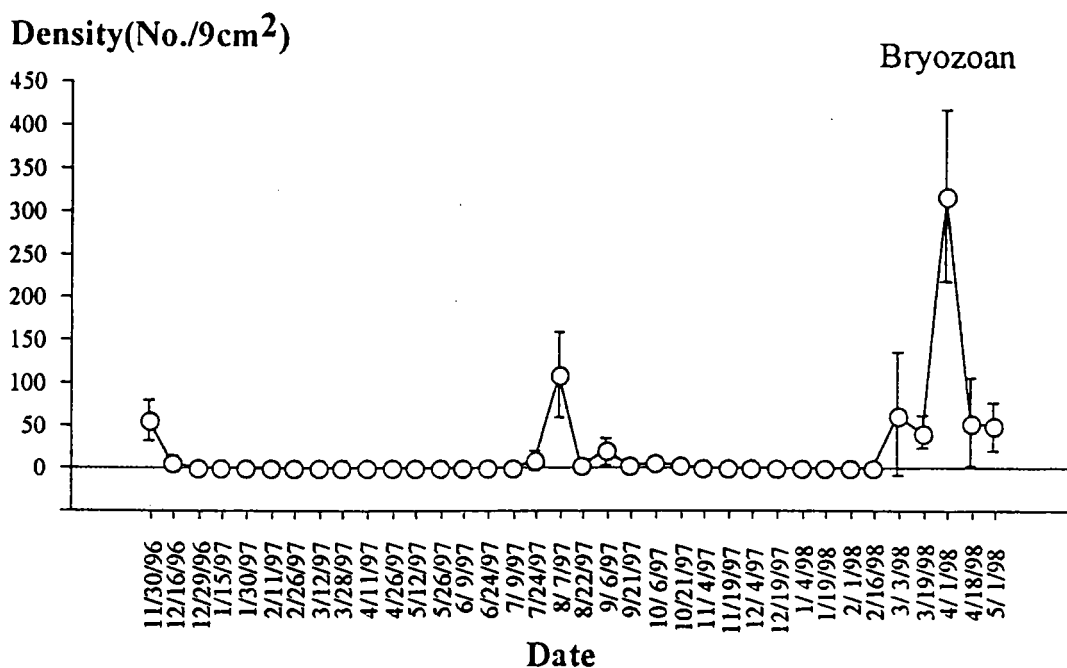


圖 4-47 駁三碼頭苔蘚蟲的著苗量變化
(誤差線為 95%的信賴界線)

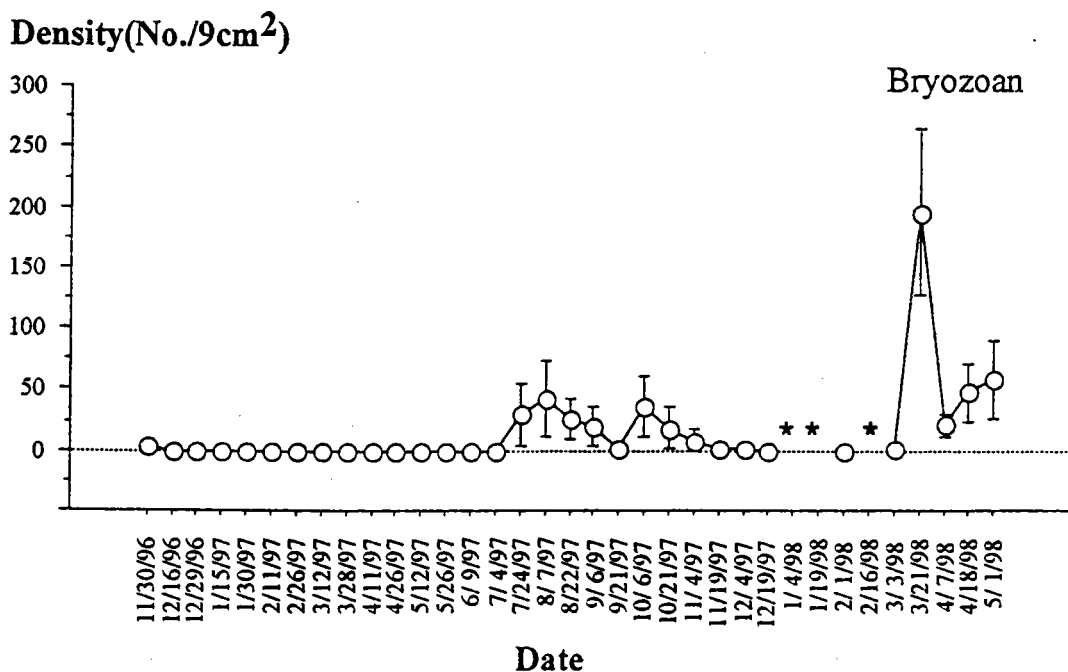


圖 4-48 #51 苔蘚蟲的著苗量變化
(誤差線為 95%的信賴界線，*為資料遺失點)

Density(No./9cm²)

Ascidian

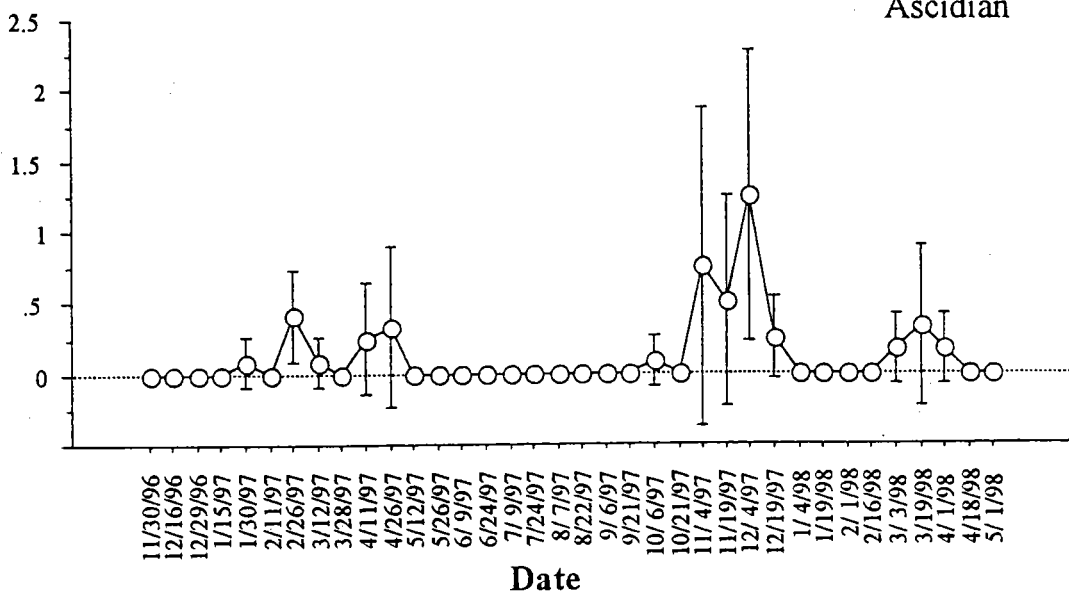


圖 4-49 駁三碼頭海鞘的著苗量變化
(誤差線為 95%的信賴界線)

Density(No./9cm²)

Ascidian

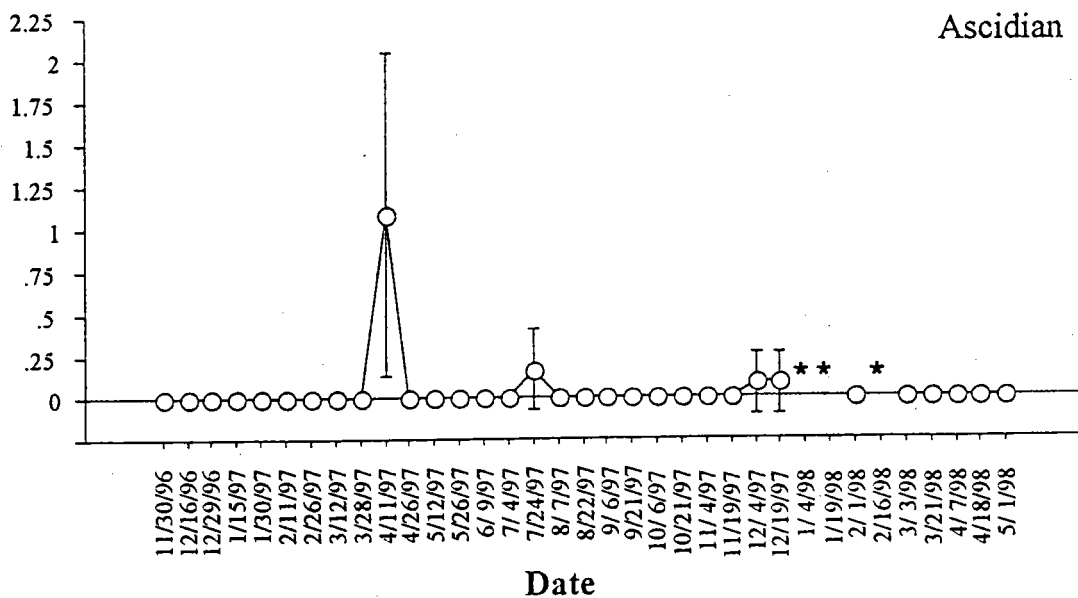


圖 4-50 #51 海鞘的著苗量變化
(誤差線為 95%的信賴界線，*為資料遺失點)

Density(No./9cm²)

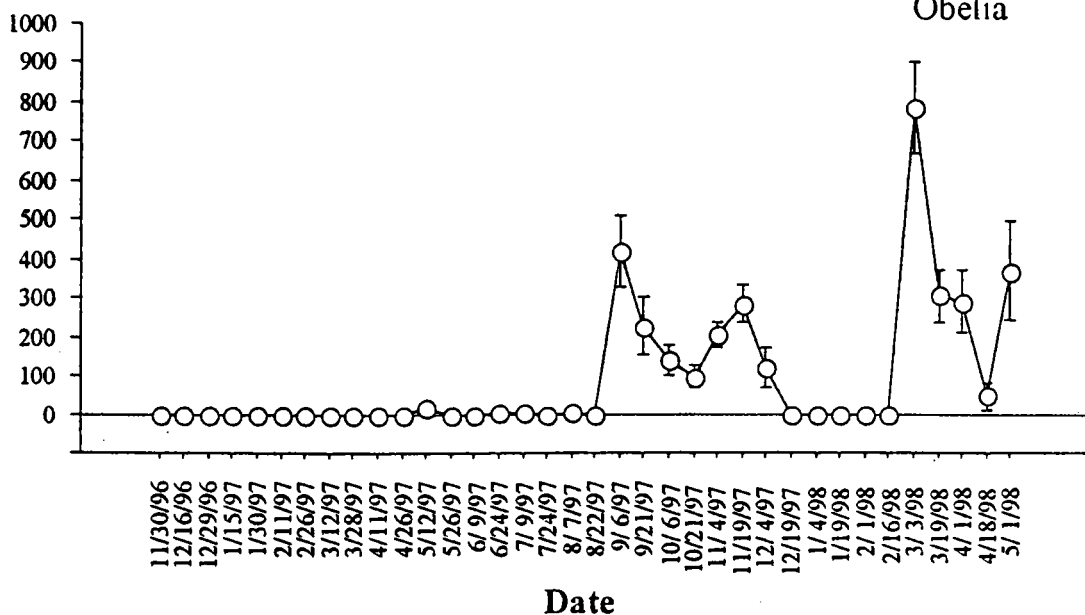


圖 4-51 駁三碼頭藪枝蟲的著苗量變化
(誤差線為 95%的信賴界線)

Density(No./9cm²)

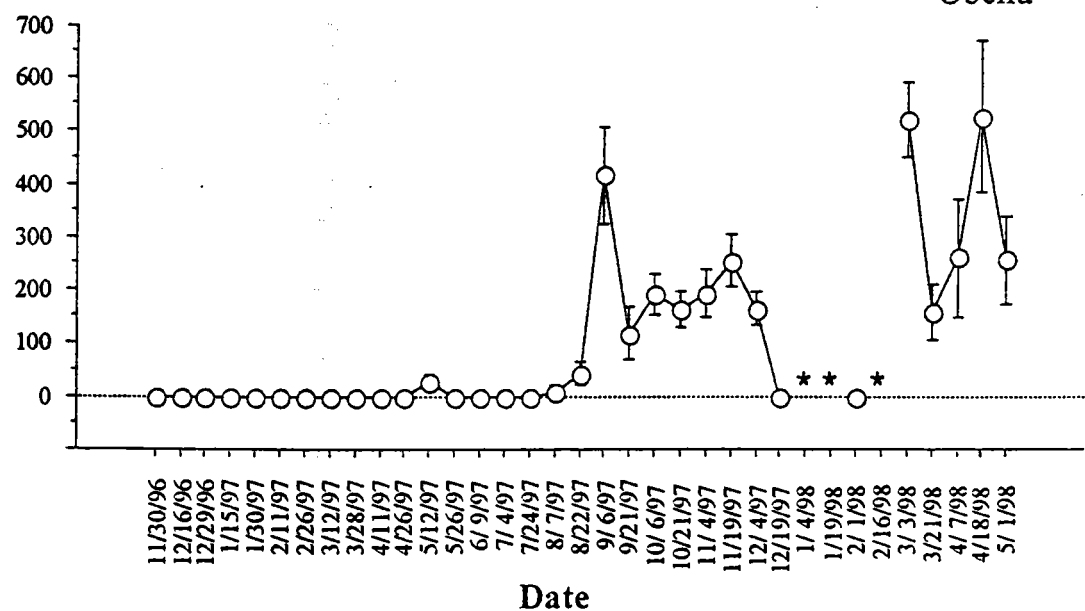


圖 4-52 #51 藪枝蟲的著苗量變化
(誤差線為 95%的信賴界線，*為資料遺失點)

Density(No./9cm²)

Polychaete

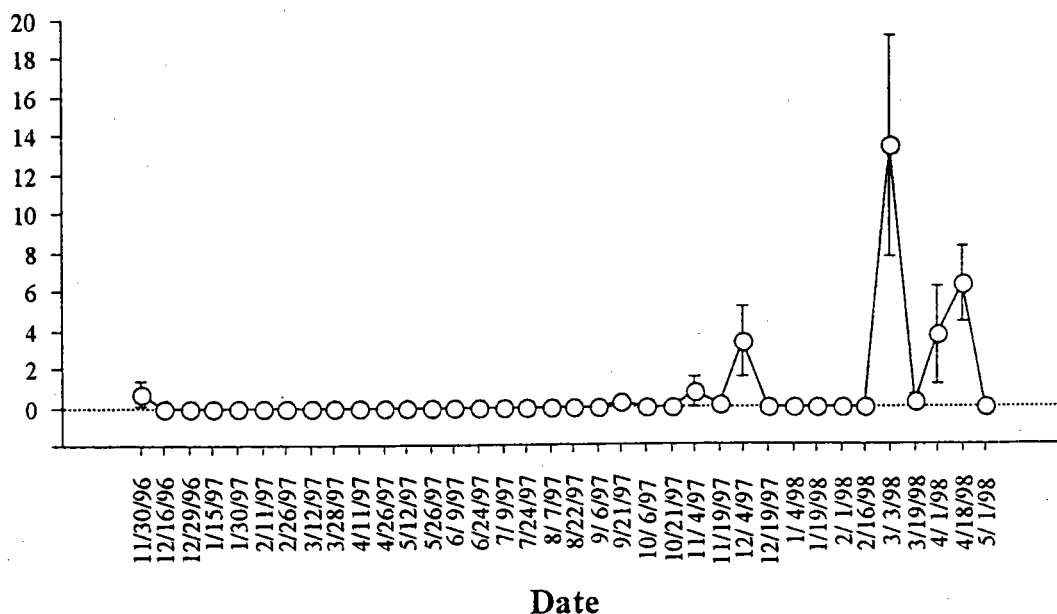


圖 4-53 駁三碼頭纓鰓蟲的著苗量變化
(誤差線為 95%的信賴界線)

Density(No./9cm²)

Polychaete

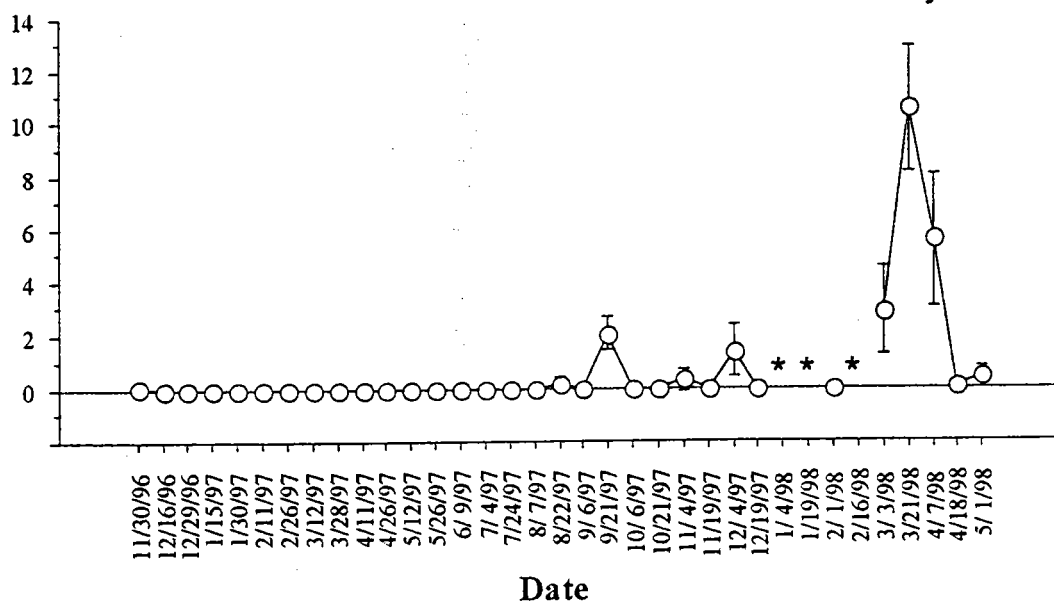


圖 4-54 #51 纓鰓蟲的著苗量變化
(誤差線為 95%的信賴界線，*為資料遺失點)

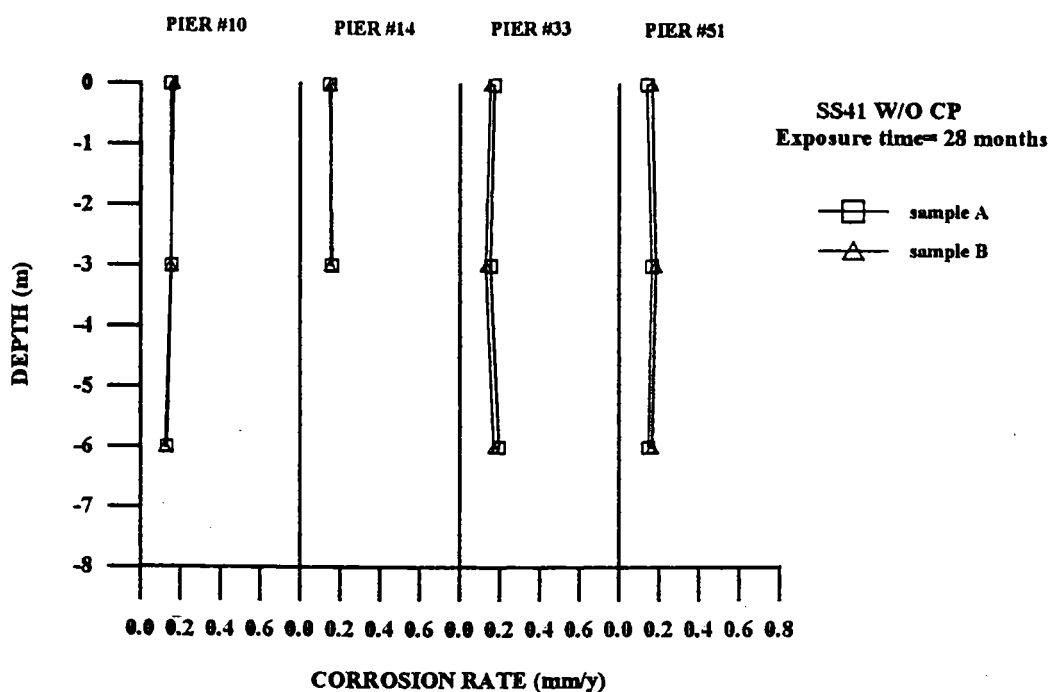


圖 4-55 自由腐蝕試片在各碼頭浸漬 28 個月後不同水深之腐蝕速率

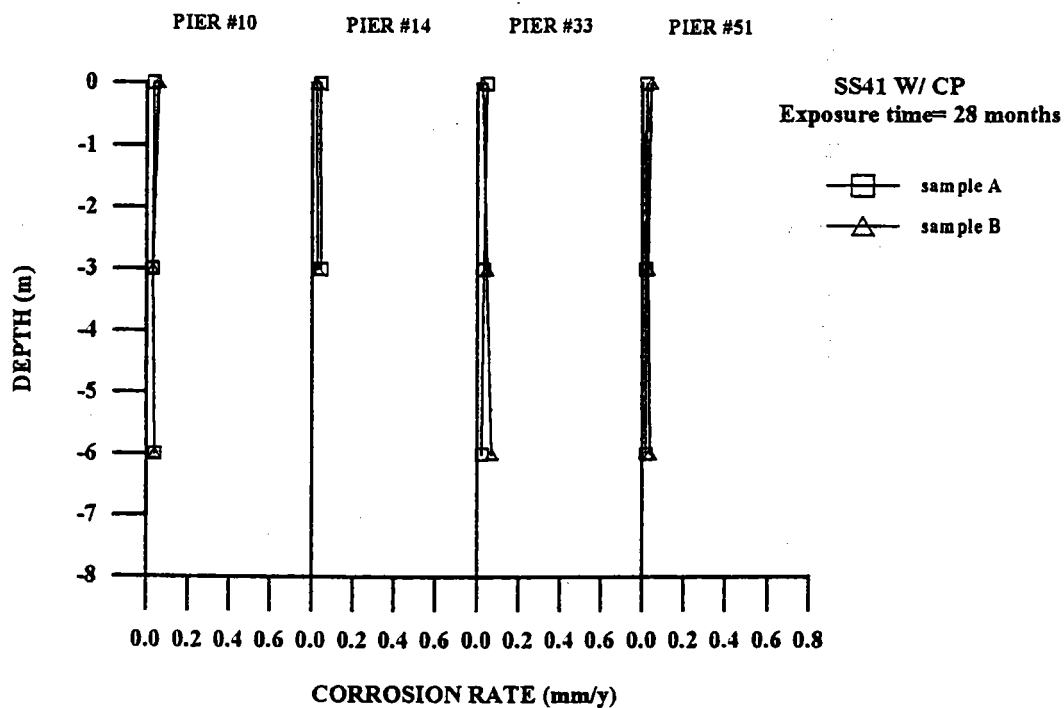


圖 4-56 陰極保護試片在各碼頭浸漬 28 個月後不同水深之腐蝕速率

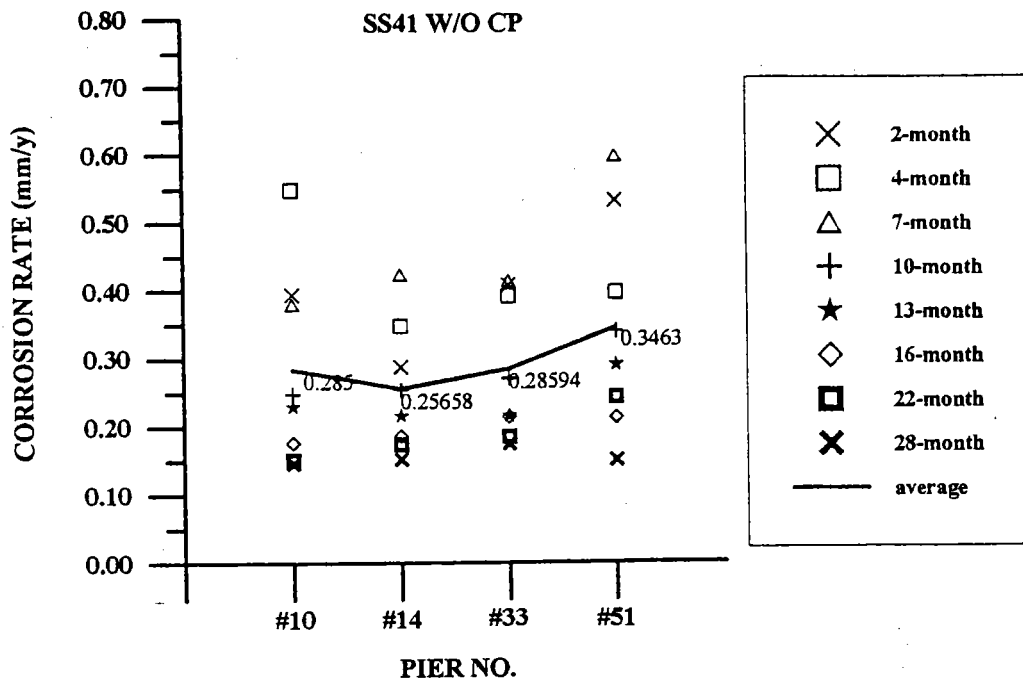


圖 4-57 自由腐蝕試片平均腐蝕速率與放置地點的關係

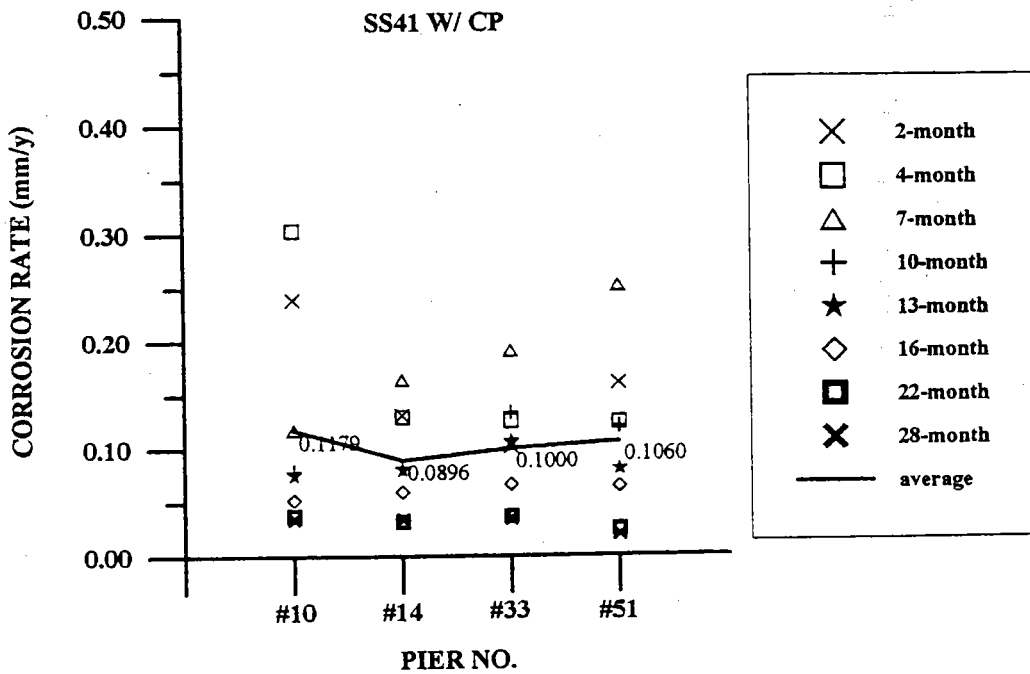


圖 4-58 陰極防蝕試片平均腐蝕速率與放置地點的關係

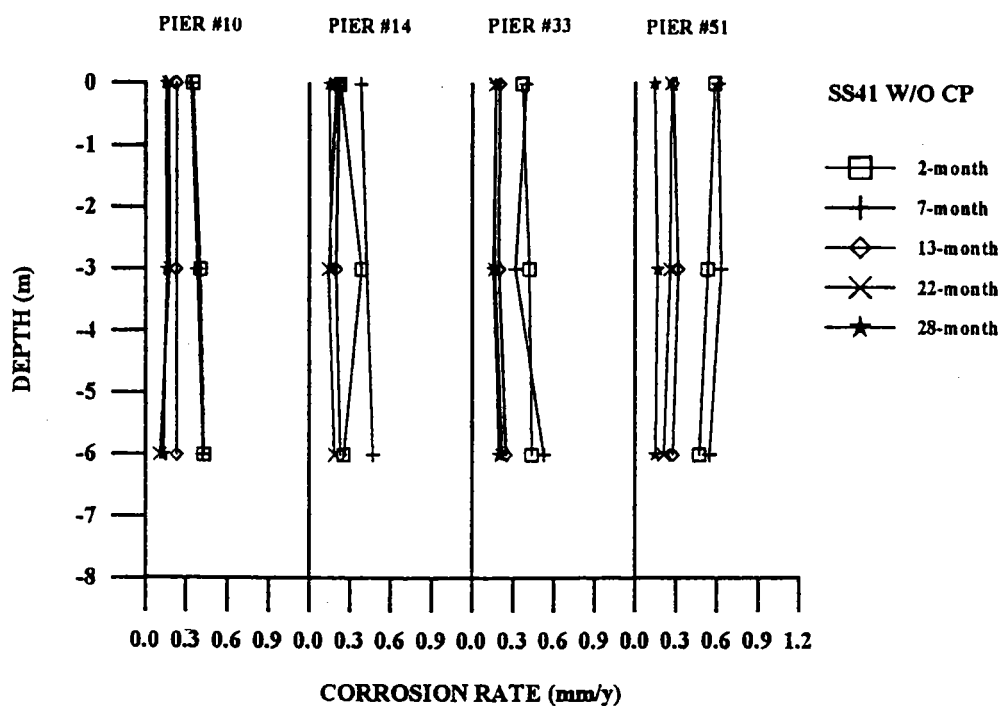


圖 4-59 自由腐蝕 SS41 碳鋼試片在各碼頭不同水深之腐蝕速率

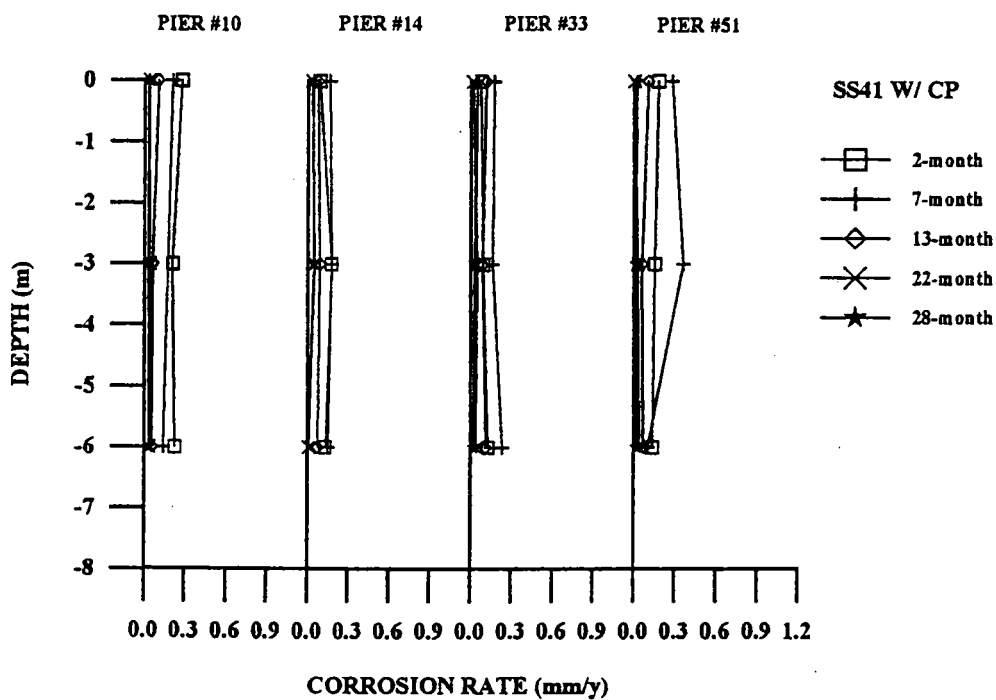


圖 4-60 陰極防蝕 SS41 碳鋼試片在各碼頭不同水深之腐蝕速率

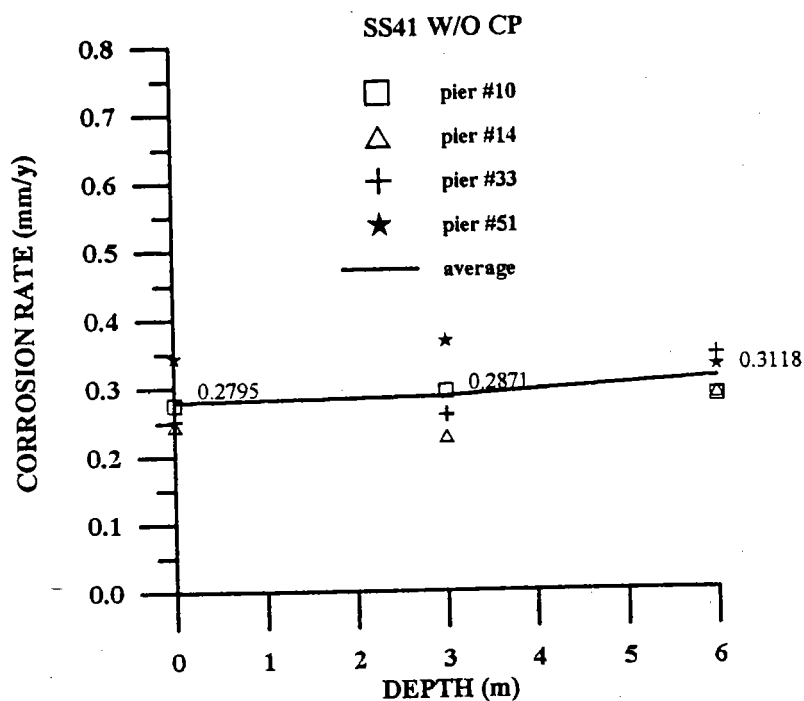


圖 4-61 自由腐蝕試片平均腐蝕速率與放置水深的關係

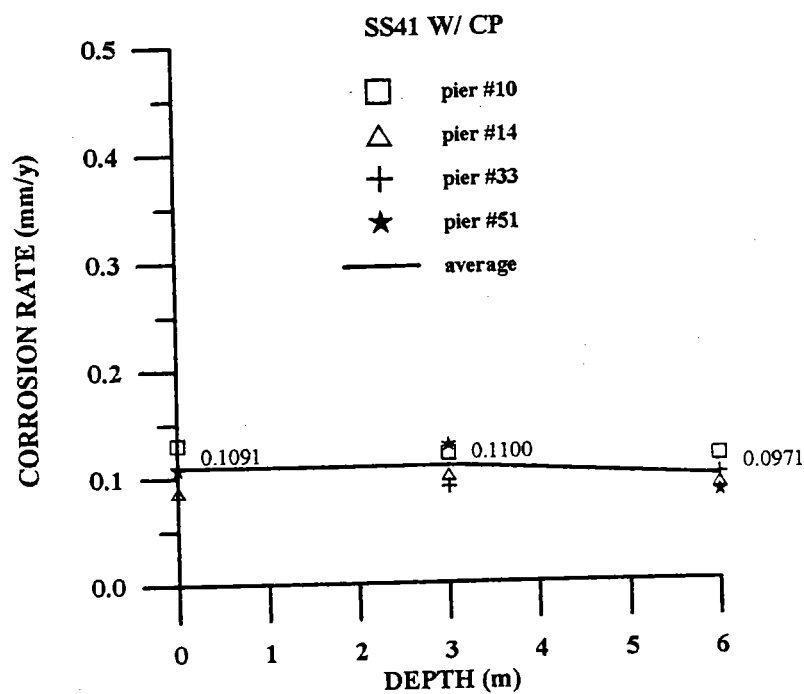


圖 4-62 陰極防蝕試片平均腐蝕速率與放置水深的關係

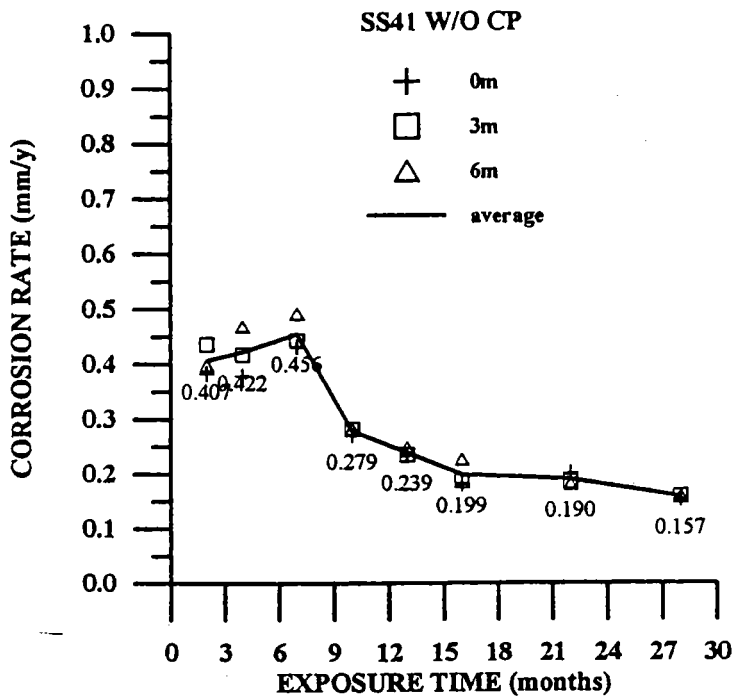


圖 4-63 自由腐蝕試片平均腐蝕速率與浸漬時間的關係

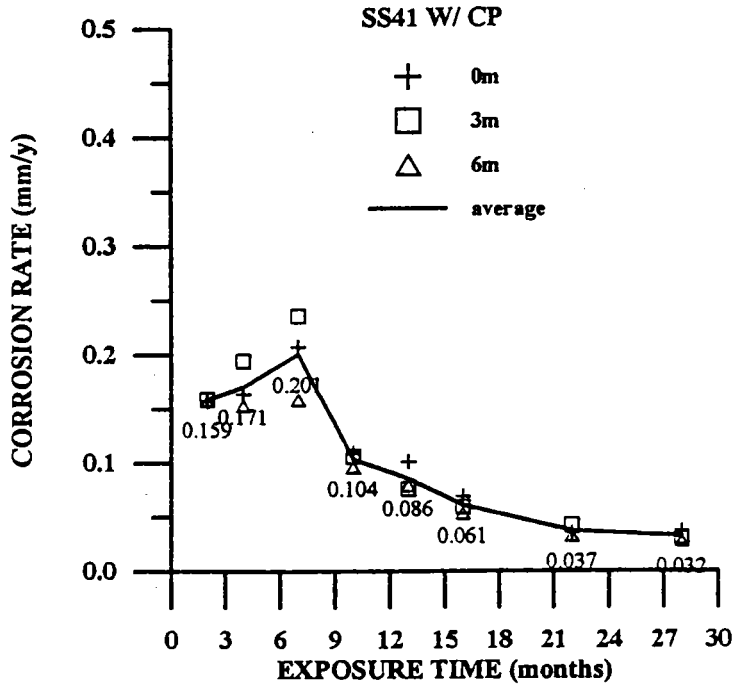


圖 4-64 陰極防蝕試片平均腐蝕速率與浸漬時間的關係

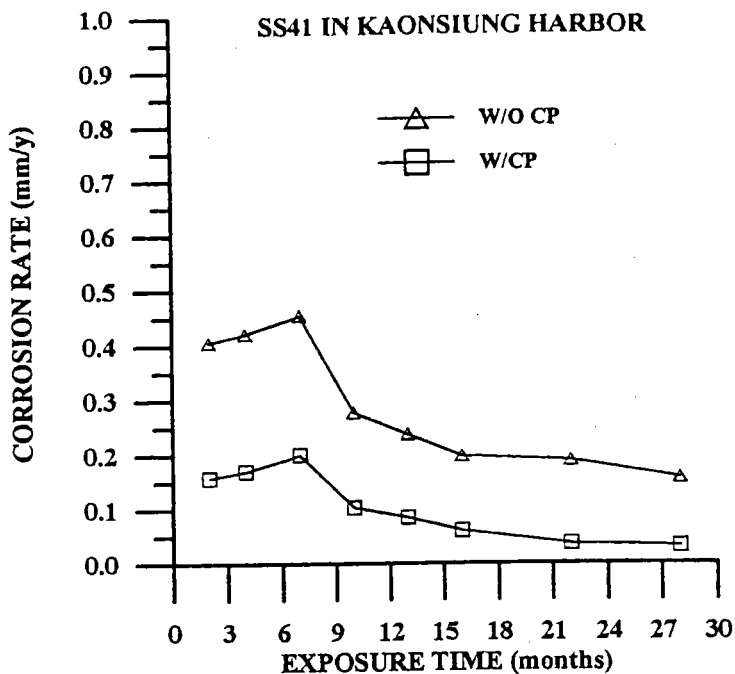


圖 4-65 歷次於高雄港四座碼頭三個水深採樣試片的平均腐蝕速率與曝露時間的關係

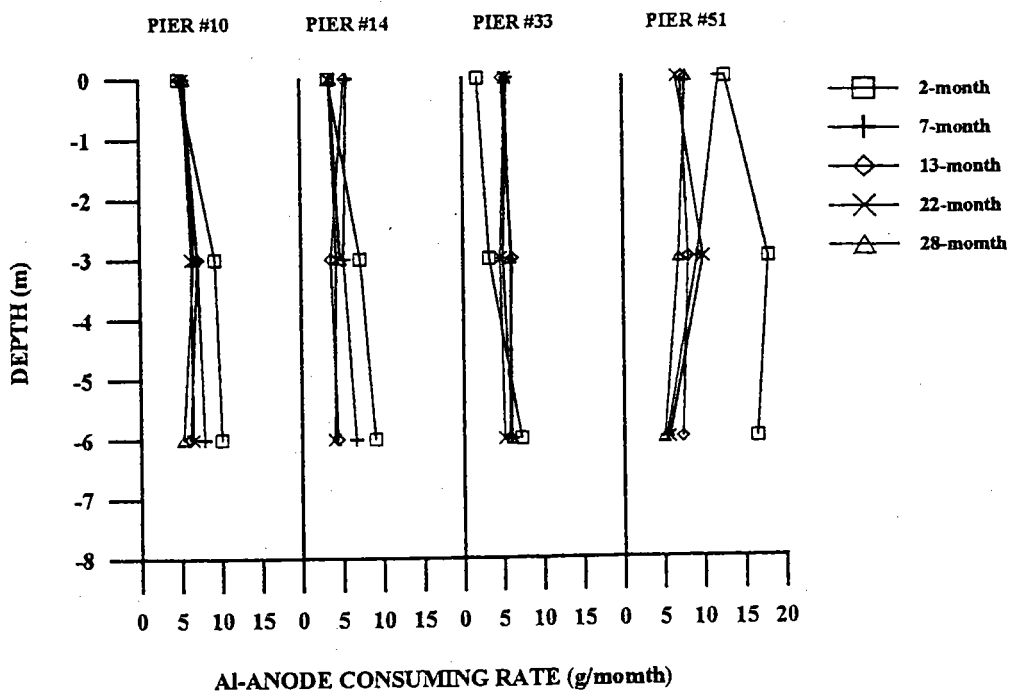


圖 4-66 鋁犧牲陽極塊在各碼頭不同水深之重量損損失速率

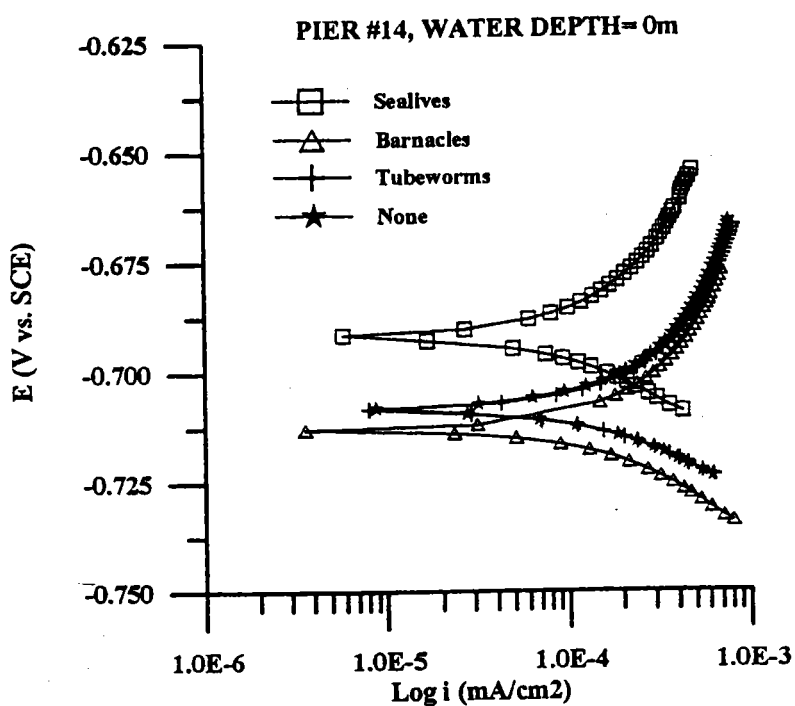


圖 4-67 試片在#14 號碼頭水深 0m 處之動電位極化曲線

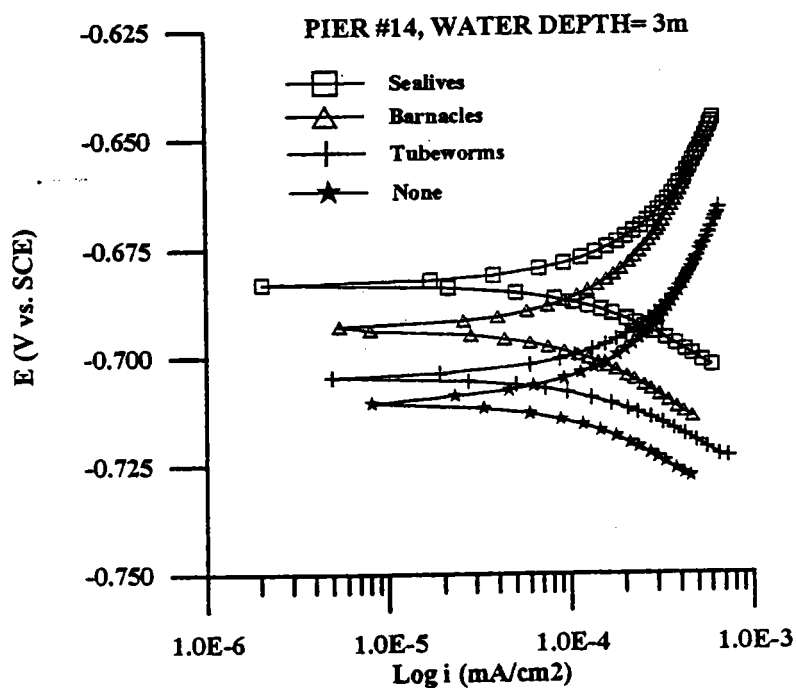


圖 4-68 試片在#14 號碼頭水深 3m 處之動電位極化曲線

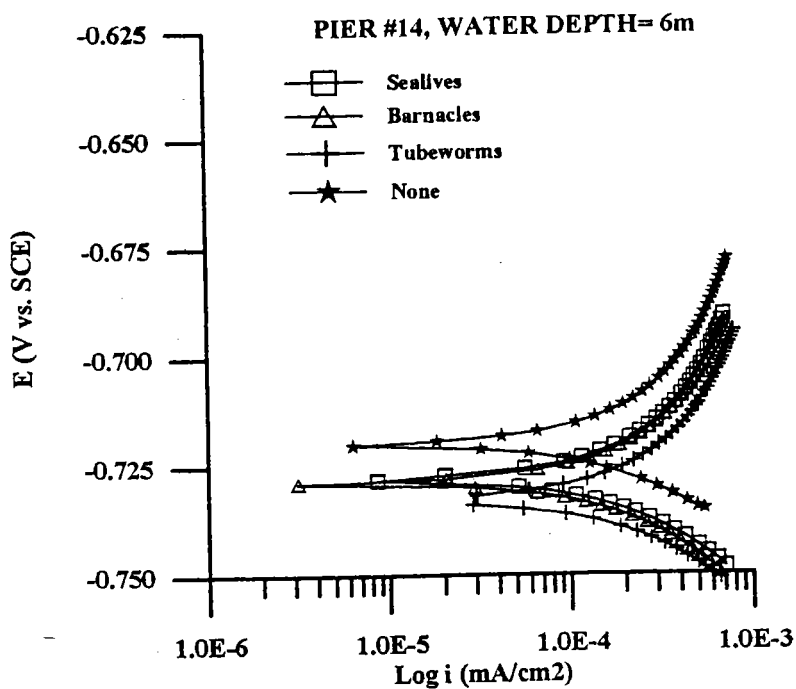


圖 4-69 試片在#14 號碼頭水深 6m 處之動電位極化曲線

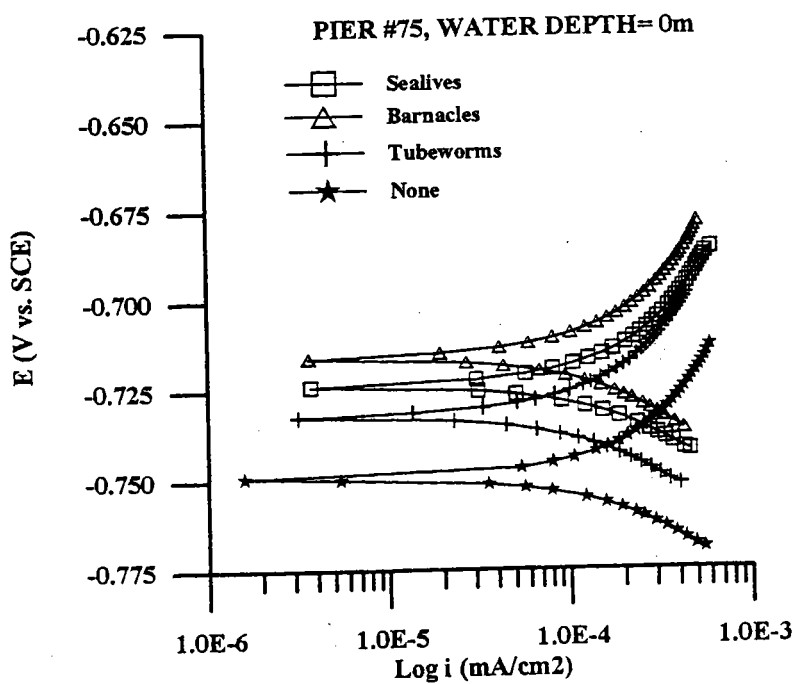


圖 4-70 試片在#75 號碼頭水深 0m 處之動電位極化曲線

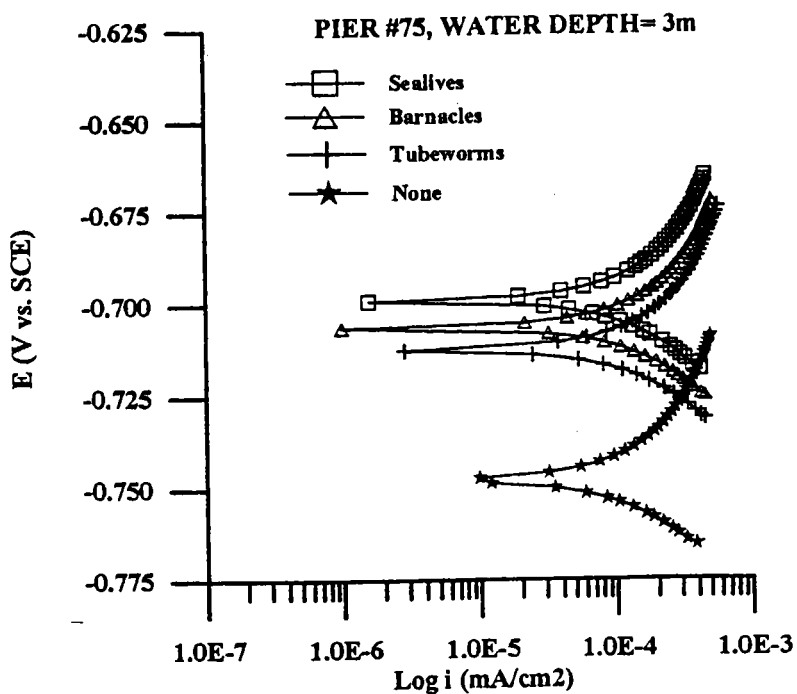


圖 4-71 試片在#75 號碼頭水深 3m 處之動電位極化曲線

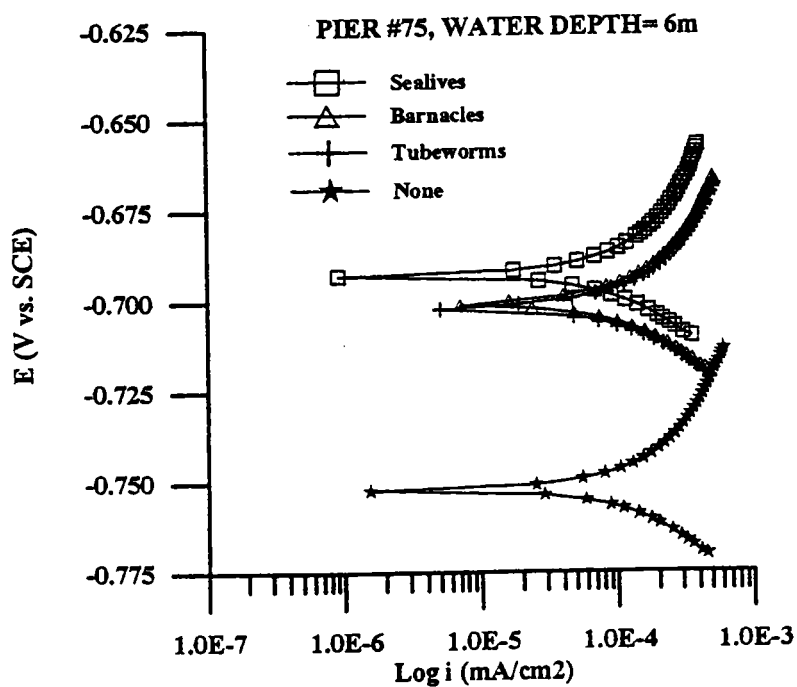


圖 4-72 試片在#75 號碼頭水深 6m 處之動電位極化曲線

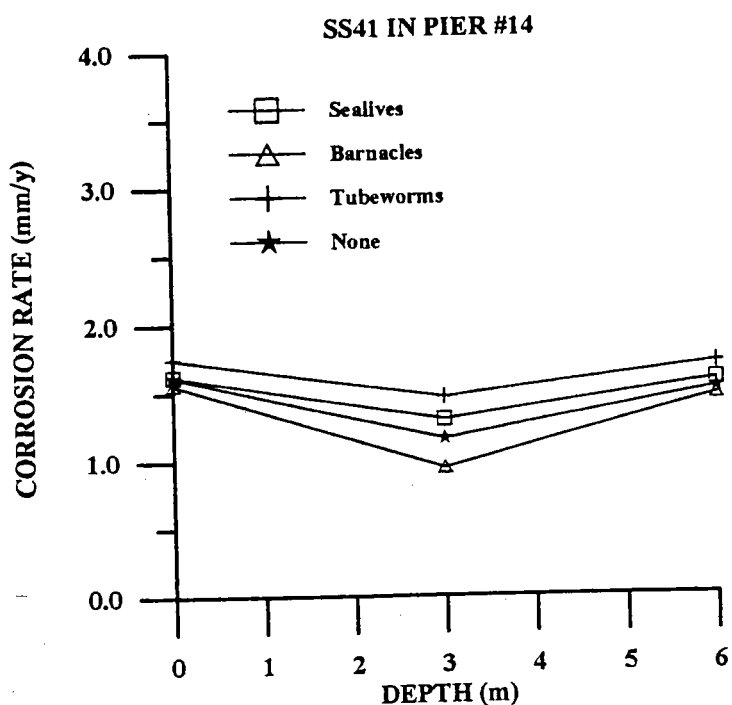


圖 4-73 試片在#14 號碼頭各水深之瞬間腐蝕速率(以動電位極化曲線計算)

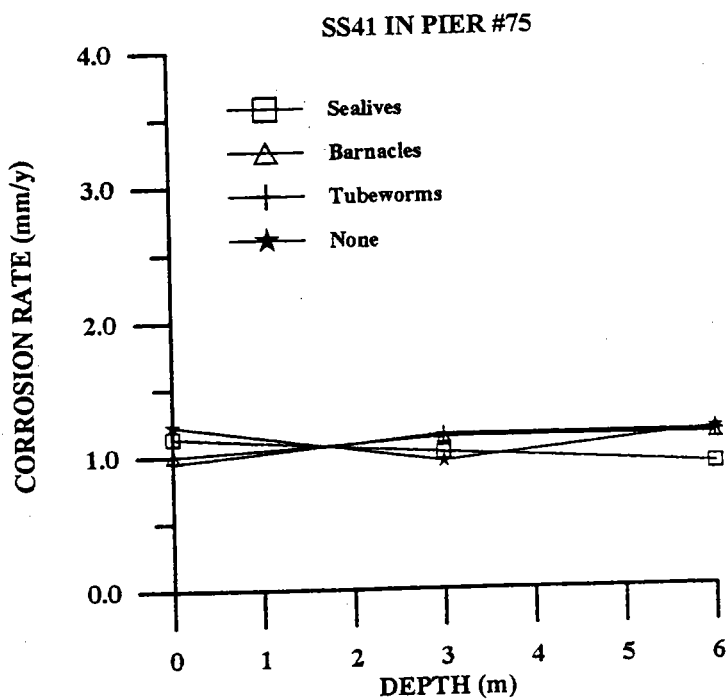


圖 4-74 試片在#75 號碼頭各水深之瞬間腐蝕速率(以動電位極化曲線計算)

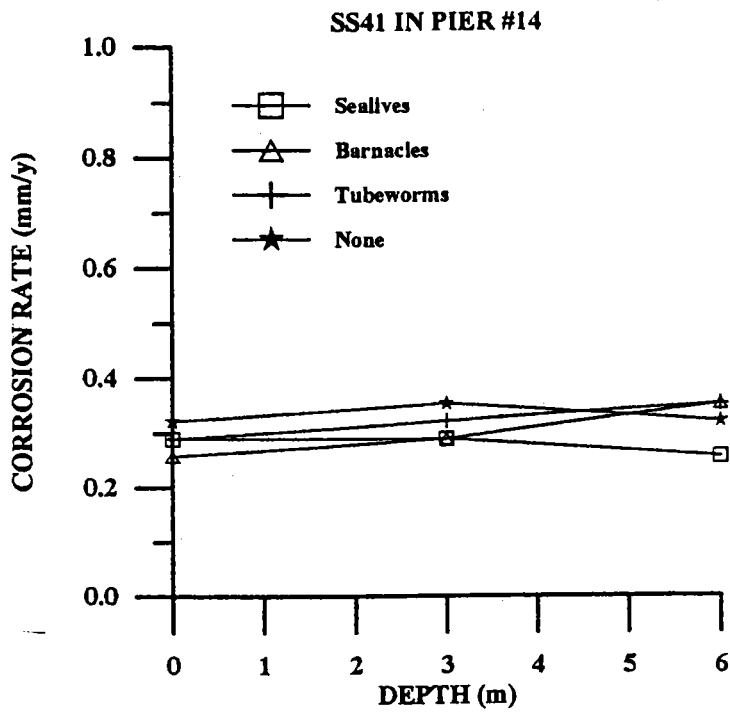


圖 4-75 試片在#14 號碼頭各水深之平均腐蝕速率(以重量損失法計算)

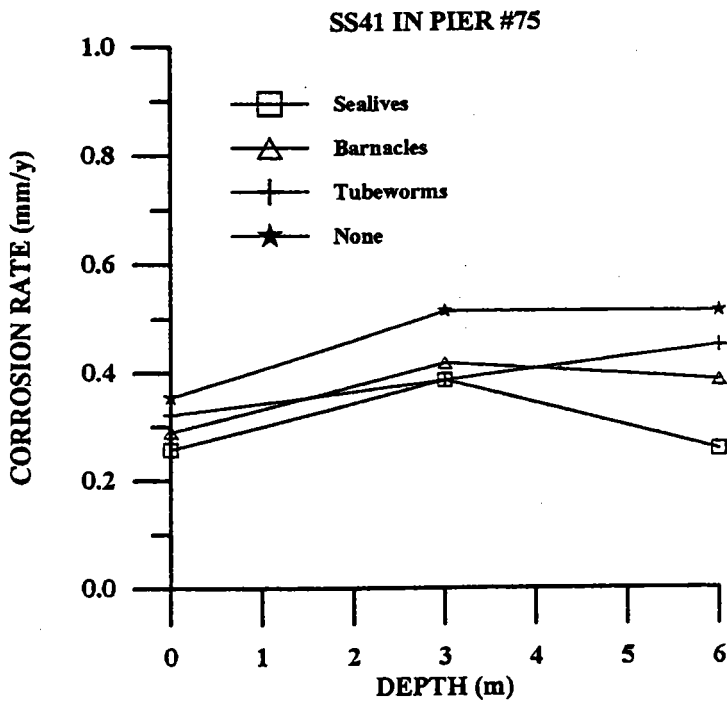


圖 4-76 試片在#75 號碼頭各水深之平均腐蝕速率(以重量損失法計算)

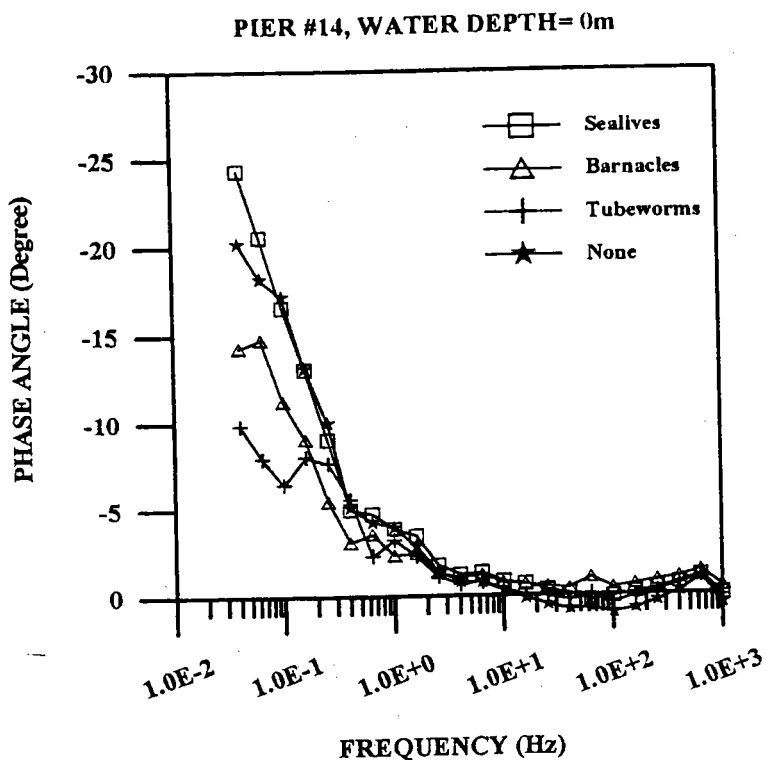


圖 4-77 試片在#14 號碼頭水深 0m 處之 Bode plots

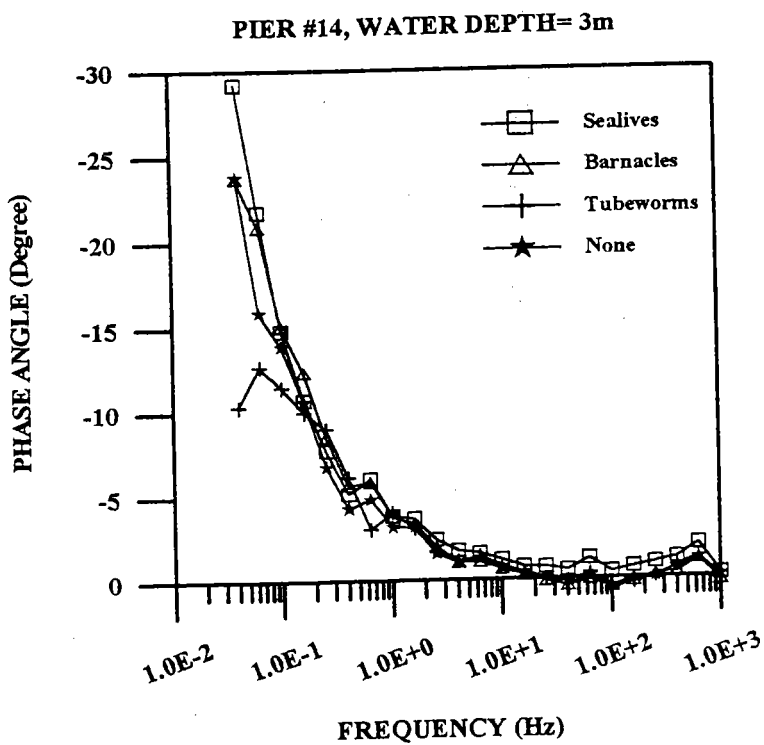


圖 4-78 試片在#14 號碼頭水深 3m 處之 Bode plots

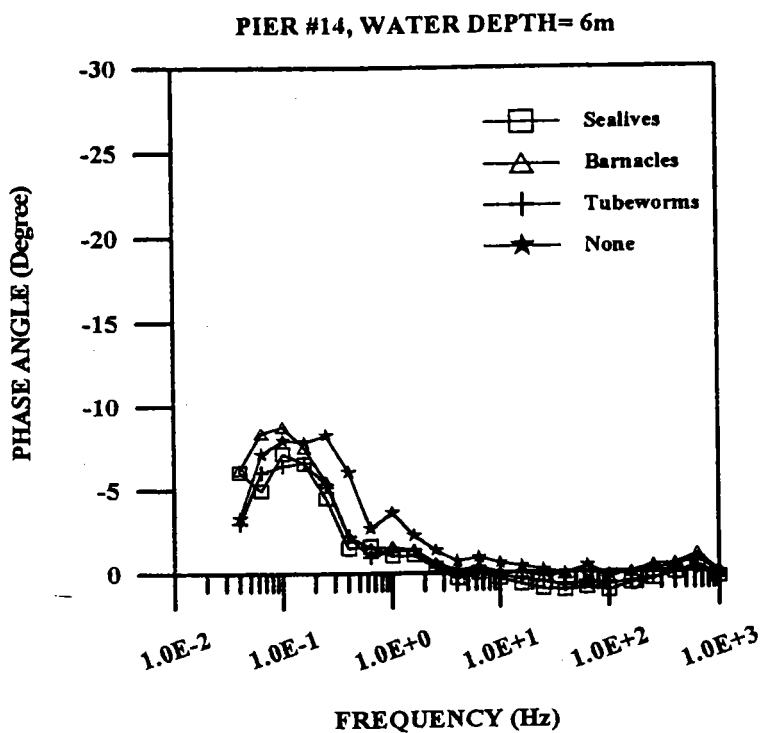


圖 4-79 試片在#14 號碼頭水深 6m 處之 Bode plots

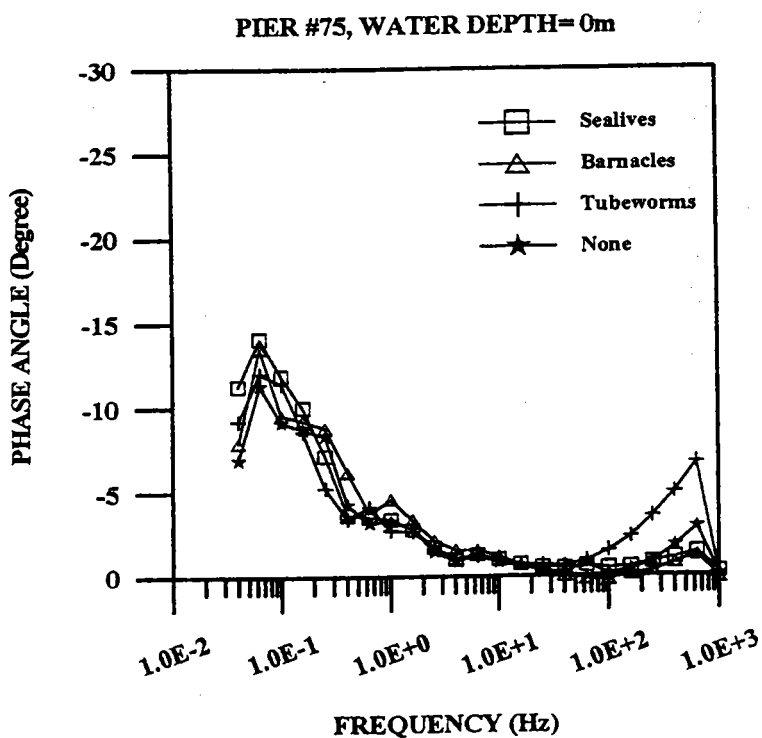


圖 4-80 試片在#75 號碼頭水深 0m 處之 Bode plots

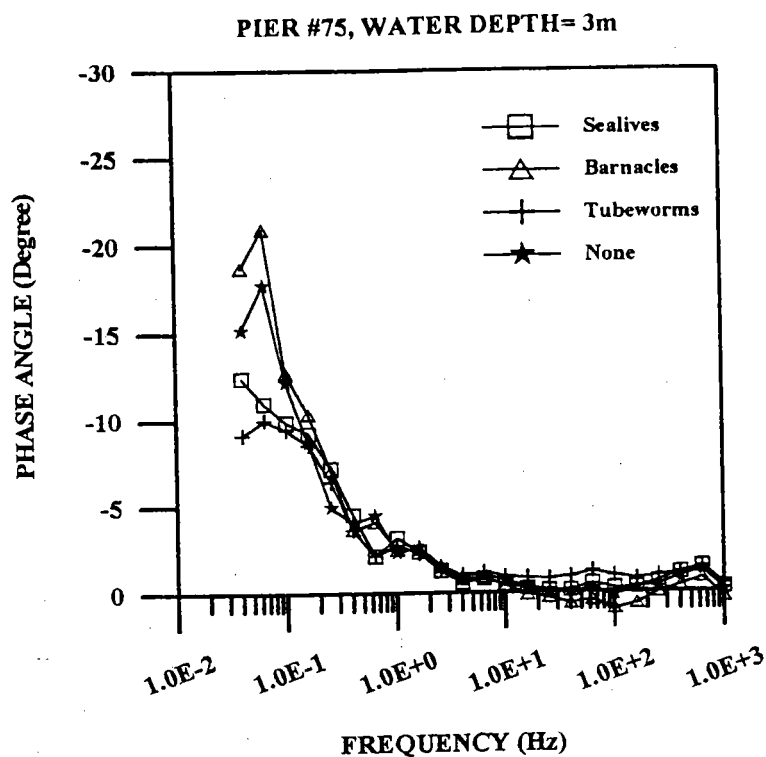


圖 4-81 試片在#75 號碼頭水深 3m 處之 Bode plots

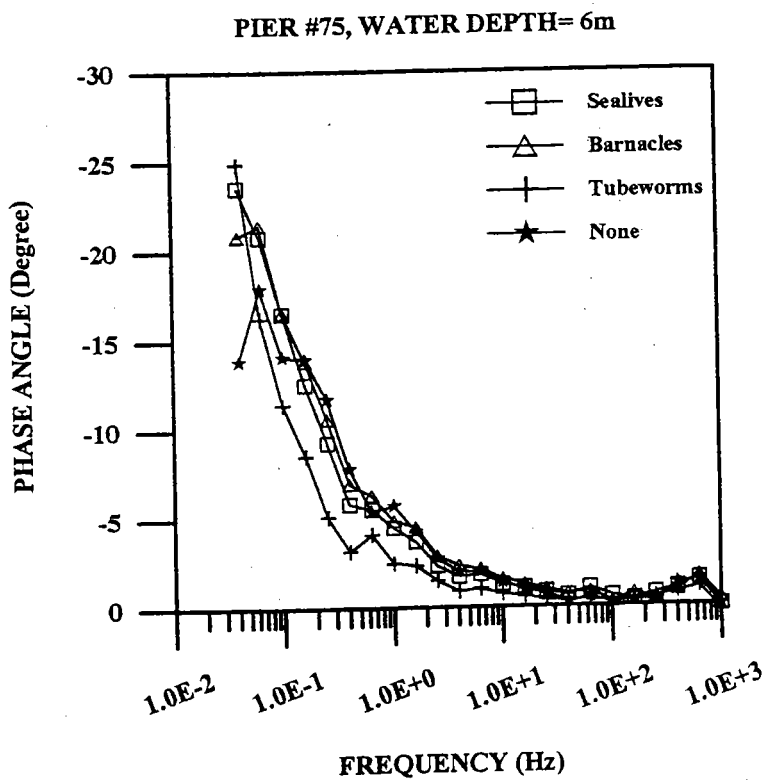
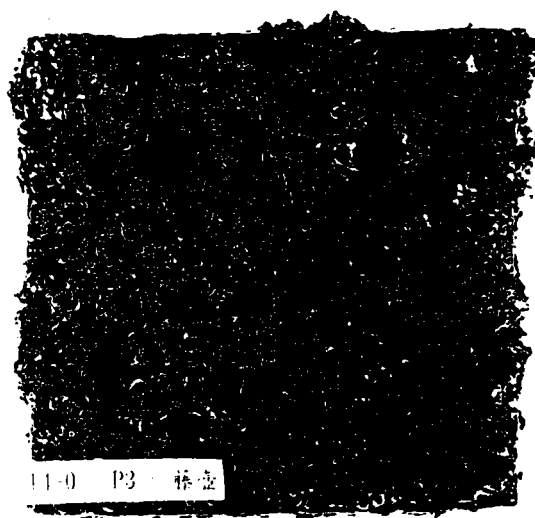


圖 4-82 試片在#75 號碼頭水深 6m 處之 Bode plots



相片 4-1 #14 水深 0m 處之海生物附著(Sealives)試片



相片 4-2 #14 水深 0m 處之藤壺附著(Barnacles)試片



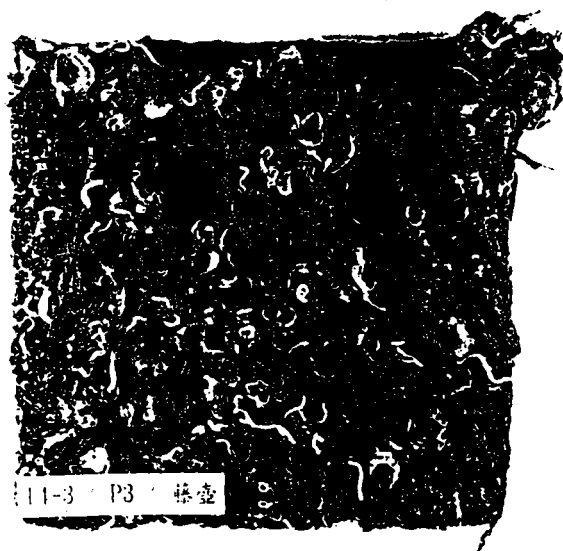
相片 4-3 #14 水深 0m 處之管蟲附著(Tubeworms)試片



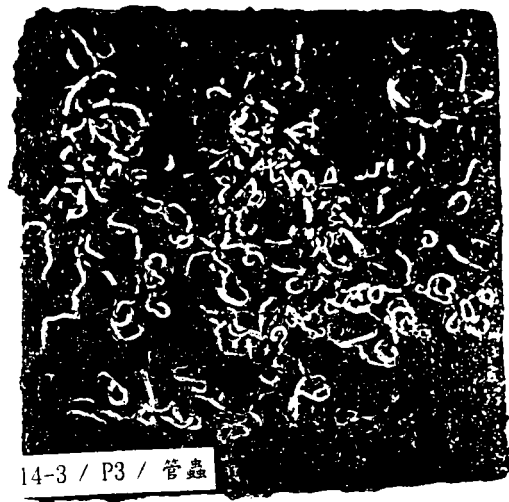
相片 4-4 #14 水深 0m 處之無海生物附著(None)試片



相片 4-5 #14 水深 3m 處之海生物附著(Sealives)試片



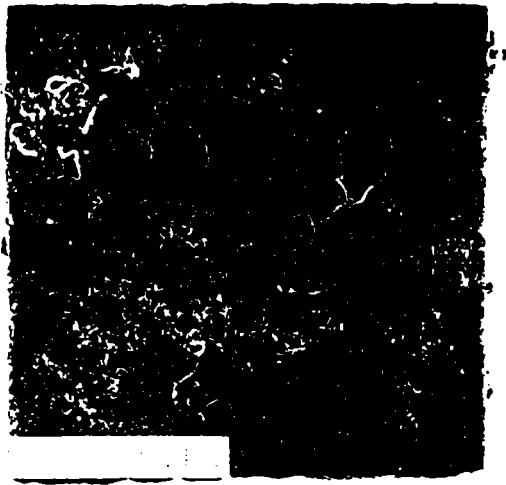
相片 4-6 #14 水深 3m 處之藤壺附著(Barnacles)試片



相片 4-7 #14 水深 3m 處之管蟲附著(Tubeworms)試片



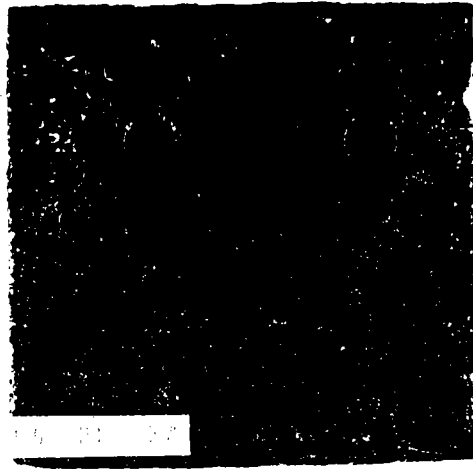
相片 4-8 #14 水深 3m 處之無海生物附著(None)試片



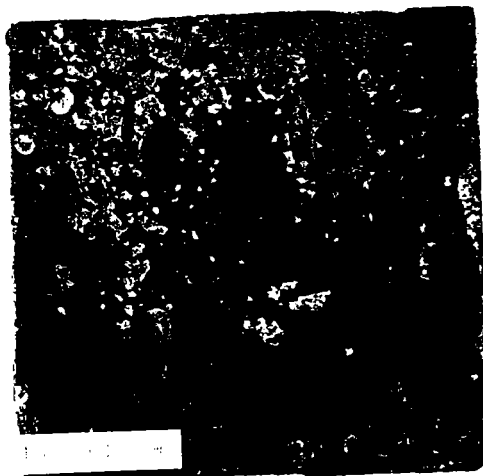
相片 4-9 #14 水深 6m 處之海生物附著(Sealives)試片



相片 4-10 #14 水深 6m 處之藤壺附著(Barnacles)試片



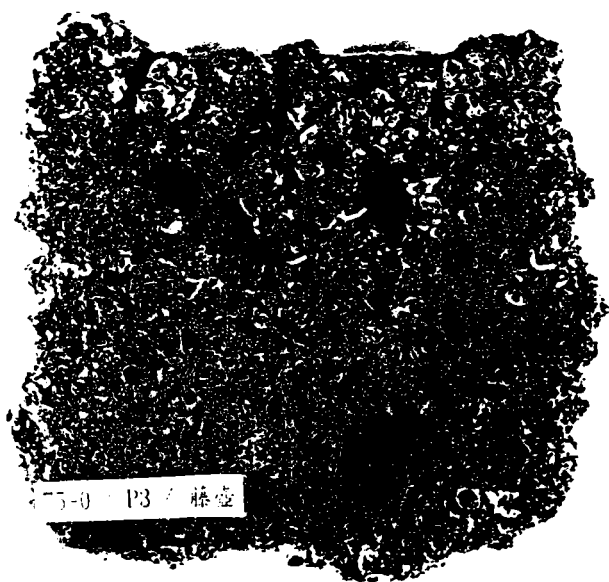
相片 4-11 #14 水深 6m 處之管蟲附著(Tubeworms)試片



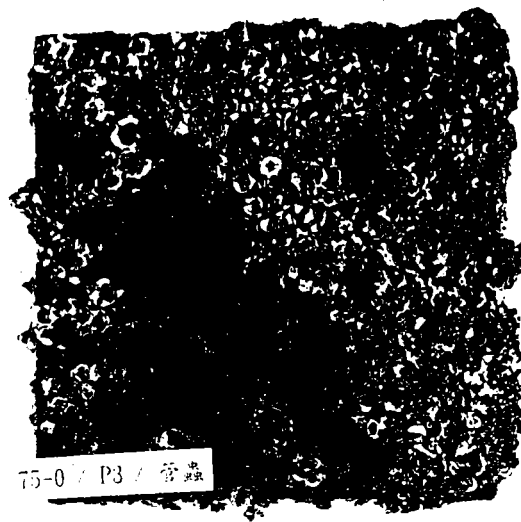
相片 4-12 #14 水深 6m 處之無海生物附著(None)試片



相片 4-13 #75 水深 0m 處之海生物附著(Sealives)試片



相片 4-14 #75 水深 0m 處之藤壺附著(Barnacles)試片



相片 4-15 #75 水深 0m 處之管蟲附著(Tubeworms)試片



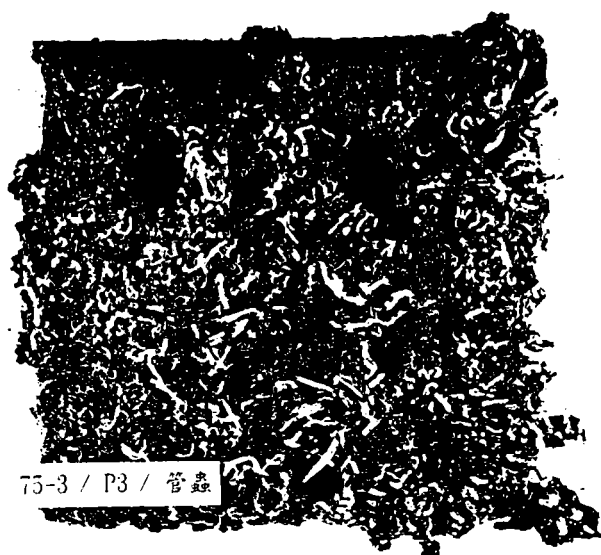
相片 4-16 #75 水深 0m 處之無海生物附著(None)試片



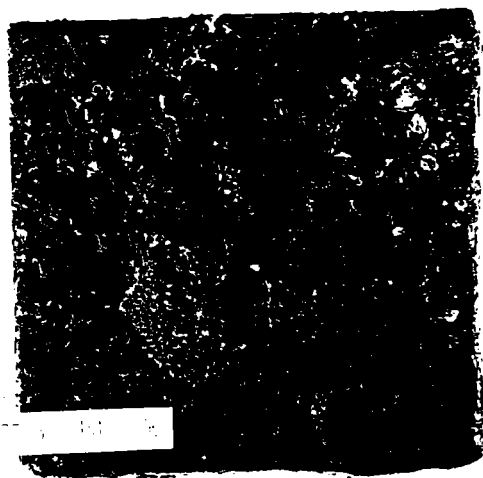
相片 4-17 #75 水深 3m 處之海生物附著(Sealives)試片



相片 4-18 #75 水深 3m 處之藤壺附著(Barnacles)試片



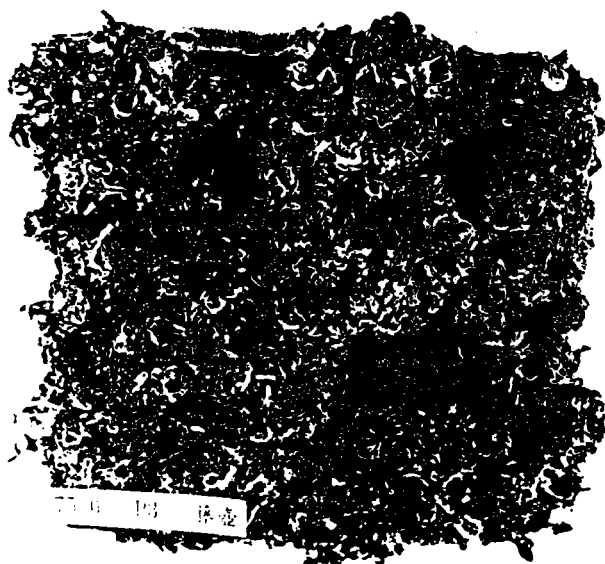
相片 4-19 #75 水深 3m 處之管蟲附著(Tubeworms)試片



相片 4-20 #75 水深 3m 處之無海生物附著(None)試片



相片 4-21 #75 水深 6m 處之海生物附着(Sealives)試片



相片 4-22 #75 水深 6m 處之藤壺附着(Barnacles)試片



相片 4-23 #75 水深 6m 處之管蟲附著(Tubeworms)試片



相片 4-24 #75 水深 6m 處之無海生物附著(None)試片

第五章 結論

以下僅就到目前為止八次採樣結果，歸納初步結論如下：

- 1、大多數的附著生物其數量與覆蓋面積在不同的試片材質與處理中沒有顯著差異。
- 2、不同碼頭與不同水深，附著生物的數量、面積與重量皆有顯著差異。
- 3、藤壺、二枚貝與管蟲分別在#10、#14與#51有最高的數量與覆蓋面積，反應出不同碼頭有不同生物組成比例。
- 4、向光面附著生物的數量、覆蓋面積與重量皆顯著大於背光面。
- 5、附苗季節性調查方面，以管蟲、藤壺、藪枝蟲與苔蘚蟲的附著密度較高。管蟲全年皆有著苗，並無明顯季節性變化；藤壺在9月時有較高的著苗量；藪枝蟲與苔蘚蟲在4月與7月～11月有較高的著苗量。其他附著生物的著苗量皆很小，出現的頻率也很低。
- 6、在相同浸漬點浸漬28個月後，試片腐蝕速率的再現性良好。
- 7、根據各碼頭兩年半內八次採樣平均結果，SS41碳鋼的自由腐蝕速率在#51最大(0.3463 mm/y)，#14最小(0.2566 mm/y)，而#10與#33腐蝕速率相當(分別為0.285與0.286 mm/y)。對陰極保護試片而言，試片的腐蝕速率雖然隨放置地點有些許差異〔由大至小依序為：#10，#51，#33，與#14〕，但是碼頭與碼頭間的腐蝕速率相差極微，依序僅為0.01 mm/y。
- 8、兩年半浸漬結果，試片的腐蝕速率與水深變化無明顯特定關係。若將高雄港區視為一個海域，自由腐蝕試片的腐蝕速率有隨浸漬水深的增加而遞增的趨勢，而陰極防蝕試片則有隨浸漬水深的增加而減緩的趨勢，但不論增加或減少，腐蝕速率的變化僅在0.02-0.04 mm/y之間，差異極小。
- 9、不論是自由腐蝕試片或陰極防蝕試片，試片的腐蝕速率在浸漬初期隨著曝露時間的增加而遞增，於第七個月時到達最大〔自由腐蝕試片=0.456 mm/y，陰極防蝕試片=0.201 mm/y〕，隨後隨著曝露時間的增

長而遞減。

- 10、陰極保護試片之腐蝕速率較自由腐蝕試片之腐蝕速率為小。
- 11、長期浸漬鋁犧牲陽極塊重量損失率的變化，可能是因金屬表面海生物掉落以致金屬再裸露於海水中或是為了克服海生物附著所引起的局部腐蝕現象。
- 12、碳鋼試片在各海生物附著的情形下並無鈍化行為產生。
- 13、金屬試片在#14的瞬間腐蝕速率，會因藤壺的附著而降低；但於#75，各試片的瞬間腐蝕速率並無因置放的水深與附著海生物的不同而有顯著的差異。
- 14、根據瞬間腐蝕速率與平均腐蝕速率計算結果，管蟲對試片腐蝕速率的影響較藤壺及其他海生物為大。
- 15、現場浸漬試片因金屬表面泥垢、腐蝕產物或附著海生物種類的不同，會在金屬表面形成非均勻性被覆，此被覆的厚度、透水性與緻密性可能影響金屬的腐蝕行為，造成 Bode plots 中最低頻率相位角的改變。

以上簡單結論，僅依據八次採樣調查結果，對於海生物附著對不同水深鋼材腐蝕之影響，不足以做定量之判定，至於此海垢生物之附著與腐蝕機制之形成、及其關係則有待進一步之研究來加以瞭解。故長時期的現場暴露試驗，應與實驗室內之模擬試驗配合進行，以瞭解海生物與鋼材腐蝕間的關係，進而建立資料庫，發展防治形成此一腐蝕機制之對策。

第六章 參考文獻

1. 中國時報報導 (八十三年一月二十四日)
2. 林維明、饒正, 1987。澎湖跨海大橋腐蝕調查研究, 港灣技術研究所專刊第 41 號。
3. 台灣省政府交通處港灣技術研究所, 1991。台灣海域之腐蝕特性, 防蝕設計及材料選用與開發。港灣技術研究所 80-研(10)研究報告。
4. 台灣省政府交通處港灣技術研究所, 1991。港灣鋼筋混凝土結構物耐久性研究。港灣技術研究所 80-研(9)研究報告。
5. 海軍海洋測量局, 1981。台海海洋環境研究、水垢生物之部(2)。刊物第二十一種之五, 海軍海洋測量局。
6. 鄭錦榮、白書禎、陳瑤湖, 1988, “防污塗料之效果評估研究試驗”, 台電工程月刊, No.484, pp59-80。
7. 楊盛行、洪秀埕、林義宗, 1991, “海生物之吸附調查研究”, 第二十九屆中國農化年會。
8. 楊盛行、黃哲崇、王瑋龍、林義宗, 1992。台灣地區港區之海生物著研究。中華生質能源學會會誌。11:42-66。
9. 台灣省政府交通處港灣技術研究所, 1995。水文及汙損生物對材料腐蝕之探討研究。港灣技術研究所 84-研(5)研究報告。
10. H. H. Uhlig and R. W. Revie 1991, in “Corrosion and Corrosion Control, An Introduction to Corrosion Science and Engineering”, 3rd Edition, John Wiley and Sons Inc. New York.
11. D. A. Jones, 1992, in: “Principles and Prevention of Corrosion”, 1st Ed. Macmillan Publishing Company, New York.
12. W. D. Callister, Jr., 1994, in “Materials Science and Engineering”, 3rd Edition, John Wiley and Sons Inc. New York.
13. M. F. Ashby and D. R. R. Jones, 1980, in “Engineering Material” Pergamon Press.

14. ACI Manual of Concrete Practice 1987, Part I.
15. T. Ford and R. Michael, 1990, in "Advances in Microbial Ecology", Vol. 11, Edi. K.C. Marshall
16. K.O. Stetter, R. Huber, E. Blochl, M. Kurr, R.D. Eden, M. Fleder, H. Cash and I. Vance, 1993, "Natural" Vol.365 pp.743.
17. NACE TPC3 Publication, 1990, in "Microbiologically Influenced Corrosion and Biofouling in Oilfield Equipment". pp.2
18. 中央氣象局台灣地區氣候圖集，1991。
19. 中央氣象局氣象年報，1975~1985。
20. 台灣電力公司，1986，“台灣地區酸雨調查研究”台電75年度發展專題編號118。
21. 國立中山大學海洋環境學系，1995。高屏溪、東港口及南灣附近海域海水水質監測計劃報告。國立中山大學海洋環境學系。
22. Keough, M. J. (1984) Dynamics of the epifauna of the bivalve *Pinna bicolor*: interactions among recruitment, predation, and competition. *Ecology* 65: 677-688.
23. Roughgarden, J., Iwasa, Y., Baxter, C. (1985). Demographic theory for an open marine population with space-limited recruitment. *Ecology* 66:54-67.
- Menge, B. A., Sutherland, J. P. (1987). Community regulation: variation in disturbance, competition, and predation in relation to environmental stress and recruitment. *Am. Nat.* 130:730-757.
24. LaQue, F. L., Marine Corrosion Causes and Prevention, John Wiley & Sons, New York, 1975.
25. Efrid, K. D., Materials Performance, NACE International, Vol. 15, No. 4, 1976.
26. Di Gregorio, J. S. and Fraser, J. P., "Corrosion Tests in the Gulf Floor", Corrosion in Natural Environments, ASTM STP 558, Philadelphia, 1974.
27. Phull, B. S., Pikul, S. J., and Kain, R. M., "Seawater Corrosivity Around the World: Results from Five Years of Testing", Corrosion Testing in Natural

Waters: Second Volume, ASTM STP 1300, 1997.

28. 高雄港工結構材料海生物附著與對策研究計畫報告，中山大學海洋環境系，1997年六月。
29. Connell, J. H. (1985). The consequence of variation in initial settlement vs. post-settlement mortality in rocky intertidal communities. *J. exp. mar. Biol. Ecol.* 93:11-45.
30. Fairweather, P. C. (1988). Consequence of supply-side ecology: manipulating the recruitment of intertidal barnacles affects the intensity of predation upon them. *Biol. Bull.* 175:349-354.
31. Sebens, K. P. (1983a). The larval and juvenile ecology of the temperate octocoral *Alcyonium siderium* Verril. I. Substratum selection by benthic larvae. *J. exp. mar. Biol. Ecol.* 71:73-89
32. Wetthey D. S. (1986). Ranking of settlement cues by barnacle larvae: influence of surface contour. *Bull. mar. sci.* 39:393-400
33. Pawlik, J. R., Butman, Ch. A., Starczak, V. R. (1991). Hydrodynamic facilitation of gregarious settlement of a reef-building tube worm. *Science* 251:421-424.
34. Morse, A. N. C. (1991). How do planktonic larvae know where to settle?. *Am. Scient.* 79:154-167
35. Hadfield, M. G., Pennington, J. T. (1990). Nature of the metamorphic signal and its internal transduction in larvae of the nudibranch *Phestilla sibogae* *Bull. Mar. Sci.* 46:455-464
36. Jensen, R. A., Morse, D. E. (1984). Intraspecific facilitation of larval recruitment: gregarious settlement of the polychaete *Phragmatopoma californica* (Fewkes). *J. exp. mar. Biol. Ecol.* 83:107-126.
37. Highsmith, R. C., Emlet, R. B. (1986). Delayed metamorphosis: effect on growth and survival of juvenile sand dollars (Echinoidea: Clypeasteroidea). *Bull. Mar. Sci.* 39:347-361.
38. Coon, S. L., Fitt, W. K., Bonar, D. B. (1990a). Competence and delay of metamorphosis in the Pacific oyster *Crassostrea gigas*. *Mar. Biol.*

39. Morse, A. N. C., Morse, D. E. (1984). Recruitment and metamorphosis of *Haliotis* larvae induced by molecules uniquely available at the surfaces of crustose red algae. *J. exp. mar. Biol. Ecol.* 75:191-215
40. Pawlik, J. R. (1986). Chemical induction of larval settlement and metamorphosis in the reef-building tube worm *Phragmatopoma lapidosa californica* (Sabellariidae: Polychaeta). *Mar. Biol.* 91:59-68.
41. Raimondi, P. T. (1988). Settlement cues and determination of the vertical limit of an intertidal barnacle. *Ecology* 69:400-407.
42. Hannan, C. A. (1984). Planktonic larvae may act like passive particles in turbulent near-bottom flows. *Limnol. Oceanogr.* 29:1108-1116.
43. Highsmith, R. C. (1982). Induced settlement and metamorphosis of sand dollar (*Dendraster excentricus*) larvae in predator-free sites: adult sand dollar beds. *Ecology* 63:329-337.
44. Burke, R. D. (1984). Pheromonal control of metamorphosis in the Pacific sand dollar, *Dendraster excentricus*. *Science* 225:442-443.
45. Bernstein, B. B., William, B. E., Mann, K. H. (1981). The role of behavioral responses to predators in modifying urchins (*Strongylocentrotus droebachiensis*) destructive grazing and seasonal foraging patterns. *Mar. Biol.* 63:39-49.
46. Maki, J. S., Rittschof, D., Schmidt, A. R., Snyder, A. G., Mitchell, R. (1989). Factors controlling attachment of bryozoan larvae: a comparison of bacterial films and unfilmed surfaces. *Biol. Bull.* 117:295-302.
47. Bonar, D. B., Coon, S. L., Walch, M., Weiner, R. M., Fitt, W. (1990). Control of oyster settlement and metamorphosis by endogenous and exogenous chemical cues. *Bull. Mar. Sci.* 46:484-498.
48. Pearce, C. M., Scheibling, R. E. (1991). Effect of macroalgae, microbial films, and conspecifics on the induction of metamorphosis of the green sea urchin *Strongylocentrotus droebachiensis* (Muller). *J. exp. Mar. Biol. Ecol.* 147:147-162.

49. Barlow, L. A. (1990). Electrophysiological and behavioral responses of larvae of the red abalone (*Haliotis rufescens*) to settlement-inducing substances. *Bull. Mar. Sci.* 46:537-554.
50. G. J. Licina, 1988, in "Sourcebook for Microbiologically Influenced Corrosion in Nuclear Power Plants" pp.8-4.
51. 張文中, "高雄港港灣污染整治成果報告", 港灣及海洋污染防治研討會論文集, April, 1996。
52. K.-L. Fan, C.-Y. Yu, "A study of water masses in the seas of southernmost Taiwan", *Acta Oceanogr. Taiwanica*, 12, 94-111, 1981.
53. W. H. Ailor, "Handbook on Corrosion Testing and Evaluation", John Wiley and Sons, Inc., New York, 1971.
54. F. Mansfeld, M. W. Kendig, and S. Tsai, "Evaluation of corrosion behavior of coated metals with AC impedance measurements", *CORROSION*, Vol. 38, No. 9, pp.478, 1982.
55. J. S. Luo, X. Campaignolle, and D. C. White, "MIC Accelerated Testing Using a Flow-Through System", *ASTM STP 1232*, pp. 283, 1994.