

80—研(九)

## 港灣鋼筋混凝土結構物耐久性研究

執行期間：民國七十五年七月至八十年六月

計劃主持人：林維明

協同主持人：陳桂清

顧問：施漢章、陳振川、蔡明谷、黃兆龍、郭一羽

研究人員：饒正、黃永光、吳信昇、柯正龍、徐如娟

陳正義、何木火、王培源、林隆貞

台灣省交通處參與研究人員：張碧森、吳斐然

港務局參與研究人員：林坤田、楊義忠、呂芳甫、楊永德、嚴文裕

台灣省政府交通處港灣技術研究所

中華民國八十年六月三十日編印

# 目 錄

目 錄	I
圖目錄	II
表目錄	VII
致 謝	X
摘 要	XI
壹、研究工作概述	林維明 1-1
貳、腐蝕機理	林維明 2-1
參、調查試驗之規劃	林維明 3-1
肆、海氣象調查分析	林維明 4-1
伍、海水化性分析	吳信昇 5-1
陸、現場腐蝕調查	吳信昇 6-1
柒、曝露試驗	陳桂清 7-1
捌、利用電化學方法量測混凝土內鋼筋之腐蝕速率	饒 正 8-1
玖、中性化試驗	黃永光 9-1
拾、混凝土氯離子擴散試驗	柯正龍 10-1
拾壹、結論與建議	林維明 11-1
附錄一：The Primary Sea Water Composition Analysis of Five Major Harbors in Taiwan by W.M.Lin, K.C. Chen. C.Rau and S.S. Wu	
附錄二：Corrosion of Harbor Reinforced Concrete Structures in Taiwan by Wei-Ming Lin and Kuei-Ching Chen	
附錄三：Corrosion of Reinforced Concrete Structures in Taiwan by Wei-Ming Lin and Tzy-Wang Jou	

# 圖目錄

- 圖2-1 鐵之電位-pH圖
- 圖2-2 鐵之電位-pH圖(不含Cl<sup>-</sup>情況)
- 圖2-3 鐵之電位-pH圖(Cl<sup>-</sup>=335ppm)
- 圖2-4 腐蝕速度之分極行為
- 圖2-5 混凝土中鋼材之巨大腐蝕現象
- 圖2-6 鋼筋混凝土中巨大電池模式
- 圖2-7 混凝土主要腐蝕因子
- 圖2-8 氯化物濃度、pH值與腐蝕速率間之關係
- 圖2-9 氯化物與鋼筋腐蝕環境下之pH值的關係
- 圖2-10 C<sub>3</sub>A含量與龜裂寬度的關係
- 圖2-11 單硫酸水化物與鈣氫石之微觀圖
- 圖2-12 濕氣含量對氧氣擴散速率之影響性
- 圖2-13 溶解氧在飽和水混凝土中之擴散情形
- 圖2-14 水灰比對混凝土電阻之影響性
- 圖2-15 矽灰含量對混凝土電阻之影響性
- 圖2-16 濕氣含量對混凝土電阻之影響性
- 圖3-1 鋼筋凝土結構物發生腐蝕，耐力降低損壞經過
- 圖3-2 鋼筋凝土結構物代表性劣化現象與使用性能降低關係
- 圖3-3 港灣RC結構物耐久性研究流程圖
- 圖3-4 ASTM E632預測使用年限程序
- 圖3-5 基隆港現有碼頭平面佈置及取樣位置圖
- 圖3-6 台中港現有碼頭平面佈置及取樣位置圖

- 圖3-7 高雄港現有碼頭平面佈置及取樣位置圖
- 圖3-8 花蓮港現有碼頭平面佈置及取樣位置圖
- 圖3-9 蘇澳港現有碼頭平面佈置及取樣位置圖
- 圖3-10 橋墩式碼頭構造圖
- 圖3-11 混凝土方塊擁壁式碼頭斷面圖
- 圖3-12 代表性棧橋式碼頭斷面圖
- 圖3-13 代表性重力式碼頭斷面圖
- 圖3-14 沈筋消波式碼頭斷面圖
- 圖3-15 代表性沈筋式碼頭斷面圖
- 圖3-16 鑽心試體依深度切割之簡圖
- 圖4-1 臺灣地區地形圖
- 圖4-2 基隆港全年風玫瑰圖(1971~1980)
- 圖4-3 基隆港各月風玫瑰圖(1971~1980)
- 圖4-4 基隆港各月風玫瑰圖(1971~1980)
- 圖4-5 台中港全年風玫瑰圖(1971~1980)
- 圖4-6 台中港各月風玫瑰圖(1971~1980)
- 圖4-7 台中港各月風玫瑰圖(1971~1980)
- 圖4-8 高雄港全年風玫瑰圖(1971~1980)
- 圖4-9 高雄港各月風玫瑰圖(1971~1980)
- 圖4-10 高雄港各月風玫瑰圖(1971~1980)
- 圖4-11 花蓮港全年風玫瑰圖(1971~1980)
- 圖4-12 花蓮港各月風玫瑰圖(1971~1980)
- 圖4-13 花蓮港各月風玫瑰圖(1971~1980)
- 圖4-14 宜蘭全年風玫瑰圖(1971~1980)
- 圖4-15 宜蘭各月風玫瑰圖(1971~1980)
- 圖4-16 宜蘭各月風玫瑰圖(1971~1980)
- 圖4-17 氣候站分佈圖

- 圖6-25 蘇澳港 10 號碼頭飛沫帶鑽心試體化學成份含量與深度關係
- 圖6-26 蘇澳港 10 號碼頭潮汐帶鑽心試體化學成份含量與深度關係
- 圖7-1 海水循環水槽之位置圖
- 圖7-2 海水循環水槽之平面與斷面圖
- 圖7-3 試體內鋼筋銹蝕相關位置簡示圖
- 圖8-1 Tafel圖
- 圖8-2 線性極化電阻圖
- 圖8-3 交流阻抗測試原理
- 圖8-4 電阻、電容匹配圖
- 圖8-5 以圖8-4為等效電路測試之AC圖
- 圖8-6 試驗配置圖
- 圖8-7 試片示意圖
- 圖9-1 中性化深度與鋼筋銹蝕程度關係圖
- 圖9-2 混凝土結構物中性化與其壽命關係圖
- 圖9-3 (9-1)式與(9-2)式中性化深度之比較
- 圖9-4 各種試體在加速箱內與大氣中之中性化速度比較
- 圖9-5 不同水泥型態試體的中性化速度比較
- 圖9-6 不同水灰比試體的中性化速度比較
- 圖10-1 氯離子擴散試驗裝置示意圖
- 圖10-2 I型水泥，水灰比=0.4Cl<sup>-</sup>擴散量與時間關係圖
- 圖10-3 I型水泥，水灰比=0.5Cl<sup>-</sup>擴散量與時間關係圖
- 圖10-4 I型水泥，水灰比=0.7Cl<sup>-</sup>擴散量與時間關係圖
- 圖10-5 II型水泥，水灰比=0.4Cl<sup>-</sup>擴散量與時間關係圖
- 圖10-6 II型水泥，水灰比=0.5Cl<sup>-</sup>擴散量與時間關係圖
- 圖10-7 II型水泥，水灰比=0.7Cl<sup>-</sup>擴散量與時間關係圖

- 圖5-8 花蓮港20號碼頭海水水質分析
- 圖5-9 蘇澳港3號碼頭海水水質分析
- 圖5-10 蘇澳港10號碼頭海水水質分析
- 圖6-1 基隆港結構物鑽心試體骨材描繪圖
- 圖6-2 台中港結構物鑽心試體骨材描繪圖
- 圖6-3 高雄港結構物鑽心試體骨材描繪圖
- 圖6-4 花蓮港結構物鑽心試體骨材描繪圖
- 圖6-5 蘇澳港結構物鑽心試體骨材描繪圖
- 圖6-6 基隆港15號倉庫鑽心試體化學成份含量與深度關係
- 圖6-7 基隆港30號倉庫鑽心試體化學成份含量與深度關係
- 圖6-8 基隆港西15號碼頭飛沫帶鑽心試體化學成份含量與深度關係
- 圖6-9 基隆港西15號碼頭潮汐帶鑽心試體化學成份含量與深度關係
- 圖6-10 基隆港東2號碼頭飛沫帶鑽心試體化學成份含量與深度關係
- 圖6-11 基隆港東2號碼頭潮汐帶鑽心試體化學成份含量與深度關係
- 圖6-12 台中港11號倉庫鑽心試體化學成份含量與深度關係
- 圖6-13 台中港23號碼頭飛沫帶鑽心試體化學成份含量與深度關係
- 圖6-14 台中港23號碼頭潮汐帶鑽心試體化學成份含量與深度關係
- 圖6-15 高雄港3號倉庫鑽心試體化學成份含量與深度關係
- 圖6-16 高雄港10號倉庫鑽心試體化學成份含量與深度關係
- 圖6-17 高雄港38號碼頭飛沫帶鑽心試體化學成份含量與深度關係
- 圖6-18 高雄港38號碼頭潮汐帶鑽心試體化學成份含量與深度關係
- 圖6-19 高雄港中州碼頭飛沫帶鑽心試體化學成份含量與深度關係
- 圖6-20 高雄港中州碼頭潮汐帶鑽心試體化學成份含量與深度關係
- 圖6-21 花蓮港2號倉庫北面牆鑽心試體化學成份含量與深度關係
- 圖6-22 花蓮港2號倉庫東面牆鑽心試體化學成份含量與深度關係
- 圖6-23 花蓮港4號碼頭飛沫帶鑽心試體化學成份含量與深度關係
- 圖6-24 蘇澳港9號碼頭飛沫帶鑽心試體化學成份含量與深度關係

- 圖4-18 雨量站分佈圖
- 圖4-19 全年等溫線圖
- 圖4-20 一月等溫線圖
- 圖4-21 四月等溫線圖
- 圖4-22 七月等溫線圖
- 圖4-23 十月等溫線圖
- 圖4-24 平均氣溫月變化圖 (1971~1985)
- 圖4-25 全年等降水量線圖
- 圖4-26 一月等降水量線圖
- 圖4-27 四月等降水量線圖
- 圖4-28 七月等降水量線圖
- 圖4-29 十月等降水量線圖
- 圖4-30 平均雨量變化圖 (1971~1985)
- 圖4-31 年平均相對濕度
- 圖4-32 平均相對濕度變化圖 (1971~1985)
- 圖4-33 台灣地區秋季期間 (74.9.~74.11.) 雨水 pH 值等濃度圖
- 圖4-34 台灣地區冬季期間 (74.12.~75.2.) 雨水 pH 值等濃度圖
- 圖4-35 台灣地區春季期間 (75.3.~75.5.) 雨水 pH 值等濃度圖
- 圖4-36 台灣地區夏季期間 (75.6.~75.8.) 雨水 pH 值等濃度圖
- 圖4-37 各種潮位及潮差
- 圖5-1 基隆港西1號碼頭海水水質分析
- 圖5-2 基隆港西14號碼頭海水水質分析
- 圖5-3 台中港5號碼頭海水水質分析
- 圖5-4 台中港8號碼頭海水水質分析
- 圖5-5 高雄港2號碼頭海水水質分析
- 圖5-6 高雄港30號碼頭海水水質分析
- 圖5-7 花蓮港15號碼頭海水水質分析

# 表 目 錄

- 表1-1 港灣RC結構物耐久性研究預定進度表
- 表2-1 標準電極位(氫電極為基準)
- 表2-2 北海耐久性混凝土十大重要的法則
- 表3-1 鋼筋混凝土結構物耐久性與惡化現象
- 表3-2 臨海混凝土結構物鹽害影響要因
- 表3-3 各港口碼頭結構體鑽心取樣之背景資料
- 表3-4 基隆港現有碼頭概況
- 表3-5 台中港現有碼頭概況
- 表3-6 高雄港現有碼頭概況
- 表3-7 花蓮港現有碼頭概況
- 表3-8 蘇澳港現有碼頭概況
- 表4-1 五大港口天文潮統計資料
- 表5-1 基隆港西1號碼頭水質分析表
- 表5-2 基隆港西14號碼頭水質分析表
- 表5-3 台中港5號碼頭水質分析表
- 表5-4 台中港8號碼頭水質分析表
- 表5-5 高雄港2號碼頭水質分析表
- 表5-6 高雄港20號碼頭水質分析表
- 表5-7 花蓮港15號碼頭水質分析表
- 表5-8 花蓮市20號碼頭水質分析表
- 表5-9 蘇澳港3號碼頭水質分析表
- 表5-10 蘇澳港10號碼頭水質分析表

- 表6-1 基隆港結構物概況
- 表6-2 台中港結構物概況
- 表6-3 高雄港結構物概況
- 表6-4 花蓮港結構物概況
- 表6-5 蘇澳港結構物概況
- 表6-6 五大港碼頭倉庫鑽心試體物理性質
- 表6-7 基隆港15號倉庫鑽心試體化學成份分析
- 表6-8 基隆港30號倉庫鑽心試體化學成份分析
- 表6-9 基隆港西15號碼頭飛沫帶鑽心試體化學成份分析
- 表6-10 基隆港西15號碼頭潮汐帶鑽心試體化學成份分析
- 表6-11 基隆港東2號碼頭飛沫帶鑽心試體化學成份分析
- 表6-12 基隆港東2號碼頭潮汐帶鑽心試體化學成份分析
- 表6-13 台中港11號倉庫鑽心試體化學成份分析
- 表6-14 台中港23號碼頭飛沫帶鑽心試體化學成份分析
- 表6-15 台中港23號碼頭潮汐帶鑽心試體化學成份分析
- 表6-16 高雄港3倉庫鑽心試體化學成份分析
- 表6-17 高雄港10倉庫鑽心試體化學成份分析
- 表6-18 高雄港38碼頭飛沫帶鑽心試體化學成份分析
- 表6-19 高雄港38碼頭潮汐帶鑽心試體化學成份分析
- 表6-20 高雄港中州碼頭飛沫帶鑽心試體化學成份分析
- 表6-21 高雄港中州碼頭潮汐帶鑽心試體化學成份分析
- 表6-22 花蓮港2號倉庫北面鑽心試體化學成份分析
- 表6-23 花蓮港2號倉庫東面鑽心試體化學成份分析
- 表6-24 花蓮港4號碼頭飛沫帶鑽心試體化學成份分析
- 表6-25 蘇澳港9號碼頭飛沫帶鑽心試體化學成份分析
- 表6-26 蘇澳港10號碼頭飛沫帶鑽心試體化學成份分析
- 表6-27 蘇澳港10號碼頭潮汐帶鑽心試體化學成份分析

- 表6-28 基隆港結構物腐蝕電位值
- 表6-29 台中港結構物腐蝕電位值
- 表6-30 高雄港結構物腐蝕電位值
- 表6-31 花蓮港結構物腐蝕電位值
- 表6-32 蘇澳港結構物腐蝕電位值
- 表6-33 腐蝕電位與鋼筋內部之腐蝕機率關係
- 表6-34 氯離子含量與腐蝕機率關係
- 表7-1 一年期曝露試體腐蝕電位分析結果(潮汐帶)
- 表7-2 二年期曝露試體腐蝕電位分析結果(潮汐帶)
- 表7-3 一年期曝露試體腐蝕電位分析結果(水中帶, 試體養生7天)
- 表7-4 一年期曝露試體腐蝕電位分析結果(水中帶, 試體養生28天)
- 表7-5 一年期曝露試體腐蝕電位分析結果(潮汐帶, 試體養生7天)
- 表7-6 一年期曝露試體腐蝕電位分析結果(潮汐帶, 試體養生28天)
- 表7-7 海水循環水槽內曝露試體編號
- 表9-1 試體之配比及編號
- 表9-2 中性化之深度
- 表9-3 各型水泥中性化達4cm所需時間
- 表10-1 I型水泥, 水灰比=0.4Cl<sup>-</sup>擴散數量(ppm)
- 表10-2 I型水泥, 水灰比=0.5Cl<sup>-</sup>擴散數量(ppm)
- 表10-3 I型水泥, 水灰比=0.7Cl<sup>-</sup>擴散數量(ppm)
- 表10-4 II型水泥, 水灰比=0.4Cl<sup>-</sup>擴散數量(ppm)
- 表10-5 II型水泥, 水灰比=0.5Cl<sup>-</sup>擴散數量(ppm)
- 表10-6 II型水泥, 水灰比=0.7Cl<sup>-</sup>擴散數量(ppm)
- 表10-7 Cl<sup>-</sup>擴散數量

# 致 謝

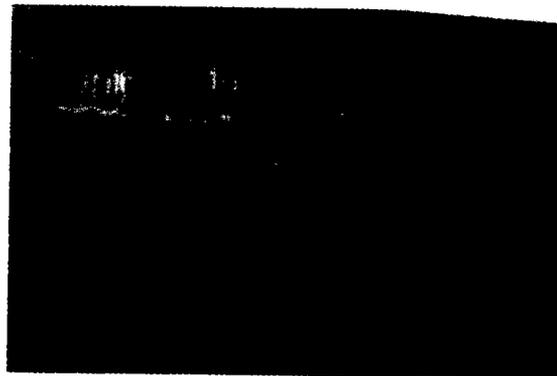
本研究期間採取海水樣品，鑽心取樣及蒐集各港資料方面，承蒙各港務局派交通船及研究人員支援，不勝感激，尤其高雄港務局楊隊長義忠、基隆港務局林副處長坤田、台中港務局呂芳甫先生、花蓮港務局楊永德先生及蘇澳港分局嚴文裕先生參與研究，使本計劃更為順利，同時感謝國立清華大學材料科學工程學系研究所施漢章教授、台泥公司蔡明谷先生、國立台灣技術學院營建工程學系黃兆龍教授、國立交通大學土木工程研究所郭一羽教授及國立台灣大學土木工程研究所陳振川教授等專家學者親臨指導，使得本研究內容更為充實，亦為結合學術界與工程界共同研究，使技術昇級之一大研究計劃。在此衷心感謝各位參與人員之付出與努力之辛勞與投入。

台灣省交通港灣技術研究所  
港工材料組組長 林維明  
中華民國八十年六月三十日

# 港灣鋼筋混凝土結構物腐蝕現象



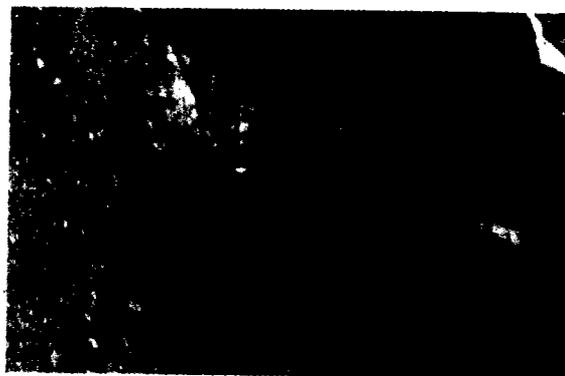
基隆港之碼頭



蘇澳港之沉箱



花蓮港之消波胸牆



花蓮港之東堤



基隆港倉庫



花蓮港倉庫

# 摘 要

林 維 明 \*

混凝土在一般環境下為極具耐久性之材料。然而港灣鋼筋凝土結構因長年在海洋嚴酷的腐蝕條件作用下，極易受到海水中鹽份之侵入，使其品質發生劣化、龜裂、剝落及鋼筋腐蝕等現象，時間一久，將危及安全，縮短使用年限。

本研究乃以台灣地現有五大港（基隆、台中、高雄、花蓮、蘇澳）之 RC 碼頭結構物為調查現象。調查方法為蒐集海、氣象資料及實際取海水樣進行化性分析，瞭解各港之腐蝕環境特性。並使用現場目測、拍照、非破壞儀器檢測如試錘測混凝土表面強度，鋼筋探測儀測量鋼筋鋼筋保護層厚度，現場腐蝕電位測定儀測量鋼筋腐蝕電位分佈情形。並用鑽孔設備鑽取碼頭 RC 結構物之混凝土試體，攜回試驗室進行物性及化性分析各港 RC 結構物發生腐蝕之原因。並進行長期曝露試驗，混凝土中性化及氯離子滲透擴散等加速試驗，綜合以上調查與試驗結果，可得到下列初步結論：

1. 在強風、多雨、氣溫變化大，相對濕度高之地區如蘇澳及基隆較易發生腐蝕。
2. 台中港潮差大，海水中含氯化物含量高是腐蝕之主因。
3. 蘇澳港海水含硫酸鹽及氯離子量最高，高港 30 號碼頭位於火力發電廠排水口處都是容易發生腐蝕原因，花蓮港污染不嚴重所以腐蝕現象較少。
4. 碼頭之混凝土強度，水密性都比倉庫為高，中性化以倉庫較大，有害離子如  $MgO$ ， $SO_3^{2-}$ ，及  $Cl^-$  等較易侵入碼頭，骨材呈扁平狀、級配不良等為結構體之抗壓強度低，透水係數高之主因，使用健性優良之骨材有助於耐久性。
5. 保護層厚度不足，水灰比高及製作時施工不良等因素為 RC 試體銹蝕之原因。
6. 中性化深度隨時間增加而遞增，在加速箱之試體中性化速率較快。
7. 卜特蘭 I 型水泥之中性化速率最慢，水灰比高則將增加其中性化速率。

---

\*台灣省交通處港灣技術研究所研究員兼港工材料組組長

8. 卜特蘭 II 型水泥有抑制氯離子侵入之效果。擴散係數隨水灰比增加而遞增，飛灰填加量在 20-40% 範圍，可有效地抑制氯離子之侵入。

綜合上述各種分析資料，研判鋼筋混凝土碼頭結構物劣化的原因可能是鋼筋保護層不足，設計，施工時未遵照規範造成混凝土品質不佳，再加上海水中  $\text{Cl}^-$  侵入結構物，為引起鋼筋腐蝕的主因。建議在港灣 R.C. 結構物設施工時必須使用海洋混凝土設計與施工規範，設計時應考慮海洋特殊腐蝕環境，對使用材料配比和結構型態作適當之選擇，嚴格控制施工品質及按照規範施工，使用期間不得有超負荷，平時多作檢查，發現腐蝕惡化時應及早作維修等處理，可確保結構物之耐久性。

# 壹、研究工作概述

林維明\*

一般鋼筋混凝土結構物建造後，承受各種自然環境力（受環境之氣體或液體之侵蝕）及人為因素作用等之影響。尤其是在海洋環境下，由於常年受海水乾濕反覆作用及海風之凌虐，因此海洋腐蝕因子如氯化物、硫化物、氧氣、濕氣等容易侵入結構體，致使鋼筋及混凝土逐年產生化學上之變質和物理性之變形等惡化現象，持續地進行，將使結構體發生損壞。尤其當設計、材料及施工不當或使用條件及環境條件太過於惡劣，將會從結構物上的弱點處開始發生腐蝕惡而出現損傷現象，因此會使結構體的材料特性改變，而危及結構物的安全性、持久性及降低使用功能或可能隨時有發生崩毀之現象。

因此鋼筋混凝土的腐蝕為目前世界各國遇到最為棘手的問題，所以許多先進國均投入大量的人力和財力進行有關腐蝕的原因和防止對策之研究，雖然迄今已有一些明顯的研究成果，但大部份仍在進行長期試驗中。由於台灣屬於熱帶海島型氣候，因此一般的腐蝕情況較大陸型氣候更為嚴重，尤其是濱海地區，更為顯著。故這方面的研究日益受到重視，本人曾經主辦過四次的研討會(1-4)，邀請國內外專家學者探討這方面的研究心得和個人的看法，相信對國內工程界如何防止或降低鋼筋腐蝕的作法，已經有一些初步的認識。

本計劃研究動機為港灣RC結構物，由於受到含有腐蝕因子之海洋環境侵襲，因此容易發生銹蝕影響其持久性。為了分析惡化致因，提供維修良策，因此激發本研究計劃。

本研究目的為對港灣RC結構物持久性，提供良好之設計與施工規範。以為日後建港對材料選用之依據，並對目前各港之RC結構物之腐蝕特性作一通盤性之了解，可提供防蝕良策，以供進行維修之參考。

本研究計劃共計五年，自75年7月至80年6月止，其工作進度表1所示。現就各項目概述如下：

---

\*港灣技術研究所研究員兼港工材料組組長

- (一)文獻蒐集：儘量派員出國參加國際會議及至各先進國家研究考察並蒐集許多國內無法蒐集到之資料，以作為研究參考，提昇國內研究層次及成果。本人曾於75年9月19日~10月2日奉派出席1986年海洋混凝土國際會並赴劍橋大學，曼徹斯特大學腐蝕防治中心、丹麥腐蝕中心、丹麥Aalborg大學土木系等單位訪問考察，並於民國78年4月7日~5月11日出席美國防蝕工程師協會年會發表三篇論文，並參加陰極防蝕及資料處理短期課程並赴美國佛羅里達大西洋大學、拉貴腐蝕技術中心、美國標準與技術研究院、日曹專精營建公司、日本港灣技術研究所、日產化學工業株式會社、安治川鐵工建設公司等單位研究考察，同年11月並赴日本出席「嚴酷環境下材料性能評估」國際會議發表論文一篇。而饒正助理研究員亦曾選派於76年6月赴香港參加「海洋環境下混凝土性能改善」之國際會議及赴丹麥腐蝕中心研習RC腐蝕研究技術，蒐集不少相關資料供研究參改。
- (二)現場觀測：了解結構物使用之材料，並以NDT（非破壞性檢查技術）法量測結構物目前之腐蝕情形。
- (三)腐蝕環境調查：在台灣五大港進行長期之海氣象、水文資料調查並作海水取樣分析水質特性，以了解腐蝕環境之變化情形。
- (四)曝露試驗：以不同之材質（包括不同之水泥種類、水灰比、保護層厚度、鋼筋防銹、摻料等）製成曝露試體，放置於現場作長期之曝露試驗，並與試驗室之試體作比對。
- (五)腐蝕速率量測（DC法）：在試驗室內，就不同材質之試體，以直流電化學方法量測其鋼筋之腐蝕速率，可知其材質與腐蝕速率之關係。
- (六)鑽心試體：在現場之結構物鑽取試體，攜回試驗室進行基本性質測定並作SEM（掃描式電子顯微鏡），XRD（X光繞射）等微觀之定性定量分析。
- (七)腐蝕速率之量測（AC法）：在試驗室內，就不同材質之試體，以電化學方法（交流阻抗法），量測其鋼筋之腐蝕速率，並與

DC法之方法與結果作一比較。

(八) 中性化試驗：以不同材質之混凝土試體放入中性化試驗箱內，量測其中性化之程度，了解材質與中性化之關係。

(九) 氯離子滲透試驗：不同材質之混凝土試體，作透水性試驗及氯離子之滲透速率之量測，了解材質在海洋環境下之耐久性。

(十) 報告撰寫：每年就試驗狀況及結果作一概述，等試驗全部完成後撰寫總報告。

## 參考資料

1. “ 港灣鋼筋混凝土結構物防蝕技術研討會資料彙刊 ”，台灣省交通處港灣技術研究所專刊第 23 號 ( 1985 )。
2. “ 材料與腐蝕研討會資料彙刊 ”，ibld.,專刊第 26 號 ( 1986 )。
3. “ 海洋混凝土工程研討會資料彙刊 ”，ibld.,專刊第 38 號 ( 1987 )。
4. “ 鋼筋混凝土結構物防蝕技術研討論文集 ”，ibld.,與國立中興大學土木工程研究所、國科會工程科技推展中心等合辦 ( 1989 )。

表1-1 港灣RC結構物耐久性研究預定進度表

工作項目	年75 月7	76 7	76 7	77 7	77 7	78 7	78 7	79 7	79 7	80 7	80 7
1.文獻蒐集											
2.現場觀測											
3.腐蝕環境調查											
4.曝露試驗											
5.腐蝕速率量測(D C法)											
6.鑽心試驗											
7.中性化試驗											
8.腐蝕速率量測(A C法)											
9.氯離子滲透試驗											
10.報告撰寫											

# 貳、鋼筋混凝土結構物 腐蝕機理之研討

林 維 明\*

## 摘 要

在海洋環境下之鋼筋或預力混凝土結構物，容易因腐蝕可造成鋼筋鏽蝕及膨脹，混凝土發生龜裂與剝落現象。其發生惡化的過程為一種電化學反應，影響腐蝕因子如氯化物、二氧化碳、含氧量等，現可利用混凝土最新技術加以控制。本文檢討腐蝕機理、腐蝕因子、北海工程經驗及腐蝕監視與控制等。期望能使海洋混凝土結構物之使用壽命能達耐久。

## 一、前 言

混凝土結構物，鋼筋發生腐蝕為一遍佈全世界各地的共同問題，輕微者會破壞美觀，嚴重情況，則將導致結構物的毀壞。由於其重要性，現已普遍引起重視，近年來有相當多的國際性會議在先進國家召開，而且國內亦於最近五年來在積極進行研究中，且亦有不少研討會探討這方面之科技發展。

一般混凝土結構物建造後，承受各種自然環境力（受環境之氣體或液體之侵蝕）及人為因素作用等影響。尤其是在海洋環境下，由於常年受海水乾濕反覆作用，海風之凌虐海洋腐因子如氯化物、硫化物、氧氣和濕氣等容易侵入結構體，因此逐年產生化學上之變質和物理性之變形等惡化現象繼續進行，因而造成損壞。特別當設計、材料及施工不當（有錯誤）或使用條件及環境條件太過於惡劣，則會從結構物上的弱點處開始發生惡化而出現損傷現象，因此使結構體的材料特性改變，因而影響結構物的安全性、耐久性及使用功能降低或可能隨時有發生崩毀之現象。

混凝土結構物生鋼筋腐蝕，需將混凝土視為一電解質系統。若鋼筋之鈍態被氯化物作用或鹼性降低等現象所破壞，電阻及含氧量為發生腐蝕的主要控制因素，在本文

---

\*省交通處港灣技術研究所研究員兼港工材料組組長

中將討論這些影響因素。

應用過傳統性的施工方法，可能使用期間不到五年，就會發生鋼筋腐蝕問題。然而在北海的外海混凝土平台應用最新的施工技術，則使用期間雖然已經超過二十年，但尚未發現有任何腐蝕現象之發生，因此可應用這些技術抑制腐蝕之進行。而如何使用適當之方法在現場偵測 RC 及 PC 結構物內鋼筋之腐蝕範圍及腐蝕速率，現已有現場腐蝕電位偵測及交流阻抗儀器可供應用，這些都是本文探討的重心。

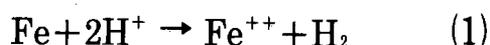
## 二、鋼筋混凝土結構物之腐蝕機理

### (一) 鋼材腐蝕的電化學基本原理

腐蝕 (Corrosion) 是指材料和其周圍環境發生化學或電化學反應而毀壞或性質退化之現象。由於物理作用所造成的毀損不稱為腐蝕。

金屬具有其能量的最穩定狀態，除少數貴重金屬，如金 (Au)、白金 (Pt) 或銀 (Ag) 等外，金屬的能量最穩定狀態通常以化合物存在。自由能變化量為決定能量穩定狀態的關鍵，可藉以判定反應的方向。在腐蝕的電化學反應中，反應進行時的自由能變化量難以直接測量，然而，我們可量得反應的電位能 (Potential energy)，藉電位能和自由能變化之間的一定關係，以判定腐蝕反應之方向。即電位能變化量  $\Delta E > 0$  為自發反應。

每一組電化學反應，均有其反應電位，此電位即為上述之電位能。反應電位沒有絕對的數值，只有比較值，通常以氫電極的半電池反應電位定為零，其它電化學反應則取其與氫半電池電位的比較值。以鐵在酸性液中腐蝕的電化學反應為例，其反應式為如下：



上式中，反應的電位差  $\Delta E$  為 +0.44 Volts，大於零，所以是自發反應。即鐵在酸中會發生自然腐蝕，因為  $\text{Fe}^{++}$  的能量狀態較 Fe 為穩定。

$\Delta E$  的量測通常是以氫半電池為電極，取預知其電位的另一半電池。在濃度為 1 莫耳 (M)，25°C 時，所量得的電位為標準氧化還原電位  $E_0$ ，表 2-1 列出一些已量得的標準氧化還原電位值，可供腐蝕電化學反應的參考。影響電位值的變數為溫度及濃度，因此將電位就不同的溫度及濃度作一修正如下式：

$$E = E_0 + 2.303 \frac{RT}{nf} \log \left[ \frac{\text{反應物}}{\text{生成物}} \right] \quad (2)$$

上式即為Nernst方程式<sup>(1)</sup>。

式中 $E_0$ ：25°C時的標準電位

R：氣體常數 = 8.314 J/mole°K

T：絕對溫度 = 273 + 攝氏溫度

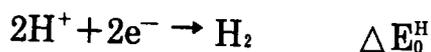
n：移轉電子莫耳數

F：法拉第常數

反應物：反應物的濃度乘積

生成物：生成物的濃度乘積

以氫半電池反應為例，其反應式為：



利用Nernst方程式，可求得任意溫度及濃度下的電位為：

$$E^H = E_0^H + 2.3 \frac{RT}{nF} \log [H^+]^2 \quad (3)$$

整理式(3)，並代入 $R = 8.314 \text{ J/mole, } ^\circ\text{K}$ 、 $F = 96500 \text{ 庫倫}$ 及 $n = 2$ ，則可得：

$$E^H = E_0^H + 0.000198 \cdot T \cdot \log [H^+] \quad (4)$$

因電解質之酸鹼度（pH值）定義為 $\text{pH} = -\log [H^+]$ ，所以：

$$E^H = E_0^H - 0.000198 \cdot T \cdot \text{pH} \quad (5)$$

若考慮常溫（25°C）下的反應，則式(5)中， $\Delta T = 298^\circ\text{K}$ 代入可得：

$$E^H = E_0^H - 0.059 \text{pH} \quad (6)$$

本文係以氫半電池為例說明Nernst方程式之應用，由式(6)可見電位的變經常和pH值成線之關係。在一腐蝕環境下，可將所有可能發生的電化學反應，製成E-pH圖，此為M.Poubaix在1966年首先提出使用<sup>(2)</sup>，故稱之為Poubaix diagram，其在腐

蝕研究上極具參考價值。

爲能充份了解被腐蝕之金屬，在腐蝕環境下的反應行爲。首先必須知道所可能進行的化學反應，再將每道反應式代入 Nernst 方程式，利用上述之方法導出 E-pH 之關係式。圖 2-1 爲鐵與純水腐蝕系統的 Pourbaix 圖，圖中每一條實線，即表示一道和鐵有關的化學平衡反應式。例如實線 1 表示的是鐵氧化爲亞鐵離子的平衡， $\text{Fe} = \text{Fe}^{++} + 2e^-$  在線 1 以下鐵 (Fe) 是安定的，而在線 1 以上的亞鐵離子 ( $\text{Fe}^{++}$ ) 是安定的，其餘的線 2~7 道理相同。如此可發現每一化學變化 (如 Fe、 $\text{Fe}^{++}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ...) 都有其安定狀態區，其中  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  和  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  是固體沉澱物，會附著於鐵金屬表面，形成鈍態膜 (Passive film)，即一層氧化保護膜，被稱爲鈍態區。另外  $\text{Fe}^{++}$ 、 $\text{Fe}_3^+$  和  $\text{FeO} \cdot (\text{OH})^-$  是離子狀態，鐵金屬在這些區會優先溶解，也就是發生腐蝕，稱爲腐蝕區。在鐵 (Fe) 的安定區域內，腐蝕不會發生，亦不生成鈍態膜，此區稱爲免銹區或不活性區 (Immunity)。每一金屬的腐蝕都可分成以上三區，如圖 2-2 所示。

觀察圖 2-2 中，鐵在鹼性環境中 (如 pH=10)，若不是沒有發生腐蝕 (在免疫區內) 就是生成鈍態膜 (在鈍態膜區內)，此時如果鈍態膜被破壞，馬上會再生成鈍態膜，因此防蝕效果良好。但是若在弱酸性的環境中 (如 pH=6)，由於在部份電位區間內已進入腐蝕區，因此鐵金屬便會發生腐蝕反應，因爲其氧化反應爲自發性，故未加任何防範措施的話，則會自然發生腐蝕，電位更高的鈍態區，若鈍態膜受破壞，鐵金屬會先進行腐蝕，然後再生成鈍態膜，在此環境下鐵已沒有良好的防蝕效果。一旦當鐵在強酸的環境 (pH<2)，由圖 2-2 可明顯地發現鐵爲材料，則必須有適當的防蝕措施。

圖 2-1 中有二條平行虛線。此爲與水有關的平衡反應式，虛線 a 爲表示氫氣化的平衡式  $\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2e^-$ ，在虛線 a 以下是氫氣 ( $\text{H}_2$ ) 的安定區域，以上是氫離子的安定區域；而虛線 b 是氧氣的反應， $\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 4e^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$ ，虛線 b 以上是氧氣 ( $\text{O}_2$ ) 的安定區域，以下是水 ( $\text{H}_2\text{O}$ ) 的安定區域。因此，當鐵氧化成亞鐵離子時，氫氣會伴隨著產生，氫氣對金屬性質常有不良的影響，產生所謂氫氣化的問題 (Hydrogen embrittlement)。金屬鐵腐蝕時，氫脆問題不大，因爲電位很快會升到水安定的區域內，但在防蝕工程中，我們常要迫使鐵還原 (陰極防蝕法)，此時雖然解決了腐蝕的問題，但必須特別注意是否有過多的氫氣產生，會導致鐵氫脆化而降低其延展性。

不同的金屬在不同的環境中，會有不同的 Poubaix 圖，要了解腐蝕，進而控制腐蝕，必須具有完備的 Poubaix 圖。綜合 Poubaix 圖意義，可知其功用為：

1. 預測不同環境中的腐蝕行為，例如：鐵在酸性溶液中會腐蝕，而在鹼性溶液中會生成保護膜。
2. 預知反應生成物，例如：可得知氫氣的產生，或是何種氧化膜的形成等。
3. 提供防蝕的方法：以鐵為例，Poubaix圖提供了三個主要的防蝕方法：(1)降低電位至免銹區內（陰極防蝕法）。(2)在弱酸環境中，使電壓進入鈍態區（陽極防蝕法）。(3)使環境成鹼性。

製作 Poubaix 圖，必須知道所有的化學反應，圖一為純水系統，在自然環境中，有些在水中解離的離子（如  $\text{Cl}^-$ ），會嚴重破壞鈍態膜，圖 2-3 為在含氯化物環境下之 Poubaix 圖範例。

以上就腐蝕熱力學得知預測腐蝕反應方向的方法（由  $\Delta E$  決定），再由 Nernst 方程式製成了實用的 Poubaix 圖，對腐蝕行為有進一步的了解。但是熱力學只是探討化學反應平衡狀態。在實際的腐蝕反應過程中，陰、陽極間由於平衡電位不同，而互相產生驅動力，破壞原有的平衡，解釋此一最令人關心的腐蝕速率問題，須藉助電極動力學探討。

一道平衡反應，由於“外在的因素”破壞其平衡狀態稱之為極化（Polarize）現象，這“外在的因素”可由外界輸入電壓，或與另一不同電極聯接而產生額外的電壓，此電壓稱為電壓（Overpotential）。產生氧化者為陽極（Anode），發生還原者稱為陰極（Cathode），過電壓會改變二極的反應速率，此種速率和電流密度間成正比的關係。

過電壓各反應電流密度間為半對數正比關係即 Tafel 方程式。繪製 Tafel 圖（即 E-logi 圖，極化曲線圖）如圖 2-4 所示，可由實驗求得。

利用混合電極原理可求得腐蝕電流密度、腐蝕電壓及各電極的反應特性，且可和 Poubaix 圖配合決定防蝕的方法。

## (二) 鋼筋混凝土的腐蝕機構

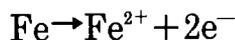
根據 Wheat<sup>(3)</sup> 分析水泥中含有 0.6M 的 KOH、0.2M 的 NaOH 和 0.001M 的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ，因而使得混凝土維持極高的鹼性（ $\text{pH}=12.5$ ）。由圖 2-2 鐵在水中的 Poubaix 圖中，可看出混凝土對其中鋼筋提供良好的防蝕環境。在混凝土的高鹼性環境下

，鋼筋表面生成鈍態膜（Passive film），不會繼續氧化。但是混凝土中的孔隙水會溶有二氧化碳容易和氫氧離子作用，消耗氫氧離子，而使混凝土中的pH值降低成弱鹼性，甚至中性（pH=8.5）<sup>(4)</sup>。圖2-2可知，若僅受二氧化碳作用引起混凝土中性化，不致對鋼筋造成很大的危害，因此一般的結構物只要設計正確，施工養護良好，並不會發生腐蝕問題。但是一些暴露在海洋環境下的結構物，卻因為氯離子之侵入，改變了鐵在水中的反應行爲，亦即改變 Poubaix 圖，如圖2-3所示。圖2-2比較，鐵的安全區域縮小很多。在自然趨勢下，即使氯離子侵入，但混凝土若維持在高鹼性，則使氯離子侵入，但混凝土若維持在高鹼性，則鋼筋仍然是位於完全鈍態區內（圖2-3）<sup>(5)</sup>，而受到保護。但二氧化碳造成中性化，將使鋼筋進入腐蝕區或孔蝕區（圖2-3），而促使發鋼筋腐蝕現象。因此有二個主要因素使混凝土中的鋼筋開始腐蝕，即：

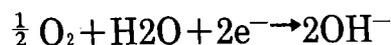
1. 二氧化碳造成混凝土的中性化，而降低混凝土的鹼性。
2. 氯離子的侵入，造成鋼筋發孔蝕現象。

若鋼筋產生腐蝕，腐蝕生成物（鐵銹）的體積比原來的大2~6倍。腐蝕進行中，生成物不斷堆積，而對混凝土產生張應力，此應力約為2200psi，遠超過一般混凝土的抗張強度（500psi左右）<sup>(6)</sup>，而使混凝土的產生裂縫及剝落現象。混凝土的破壞不僅使結構物的強度降低，同時引進了更多的腐蝕因子，如：水、氯離子、氧氣等，而更加速鋼筋的腐蝕速率。

腐蝕是一種電化反應，有產生氧化反應的陽極，和發生還原的陰極。在混凝土中鋼筋的腐蝕，陰、陽極都在鋼筋表面，陽極是鋼筋的氧化反應；主要有四種反應<sup>(7)</sup>：



陰極是和氧作用之還反應<sup>(7)</sup>：



電子經由鋼筋傳遞，電流則經由混凝土為電解質傳遞，電流則經由混凝土為電解

質傳遞。如此在鋼筋混凝土內形成一巨大電池，如圖 2-5<sup>(8)</sup>所示，形成巨大電池的原因是由於在鋼筋表面，鋼筋本身或是環境的性質有所不同，而產生了極化電位，使鋼筋表面不同地方有電位差，電位上升之處形成陽極，降低之處，則形成陰極。造成如此性質差異的可能原因為<sup>(9)</sup>：

1. 鋼筋表面的氧氣濃度不同。
2. 鋼筋表面的氯離子濃度不同。
3. 鋼筋表面的 pH 值不同。
4. 鋼筋表面性質不同，如銲接，或鈍化膜破損。

巨大電池模式可由圖 2-6 所示：

由圖 2-6 的巨大電池模式中可見在高滲透性的地方容易有腐蝕情形發生，因此在混凝土破裂的地方應該最易腐蝕。現雖然有規範建議一些容許龜裂寬度以作為設計、檢查的參考，但尚未有理論或實驗可解釋龜裂寬度和腐蝕間之關係。因此即使結構物的裂縫寬度符合規範要求，仍須考慮周圍環境，作適當的防蝕措施。

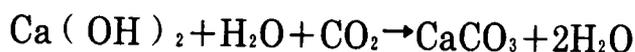
預力混凝土結構物上之腐蝕所引起之破壞和鋼筋混凝土的腐蝕未盡相同。預力混凝土一般使用較高強度的混凝土，滲透性小，所以腐蝕因子不易進入，混凝土破壞剝落的情形較少。但是由於預力混凝土內的鋼筋承受極大的預拉應力，發生鋼筋腐蝕時，有效斷面縮減，可能會導致鋼筋破壞，因此更需要特別注意防範腐蝕問題。

### 三、混凝土腐蝕因子之檢討

圖 2-7 示凝土之主要腐蝕因子，說明如下：

#### (一) 混凝土中性化

中性化係混凝土中氫氧離子，與溶於孔隙水中或由外界侵入的二氧化碳作用形成碳酸鹽。以氫氧化鈣為例，其反應式如下：



由於是二氧化碳所造成的中性化，因此亦稱為碳化 (Carbonation)。一般而言，在常溫、大氣壓情況下，中性化會使混凝土的 pH 值由 12.5 降到 8.5 左右。但是二氧化碳的溶解度很大 (約是氧溶解度的 40 倍)<sup>(10)</sup>，如果保持高濕度並供應充足的二氧化碳，則混凝土會更一步地碳化，反應式如下：



而將 pH 值再降到 6、7 之間<sup>(10)</sup>。

雖然單純由於混凝土的中性化所造成鋼筋腐蝕的情形並不常見；即使是混凝土嚴重碳化後，如果鋼筋表面的氧化膜沒有被破壞，則依然位於 Pourbaix 圖（圖 2-2）的鈍態區內。但是對受氯離子侵害的結構物，因為混凝土的中性化，才使得鋼筋開始腐蝕。因此必須探討混凝土的碳化行為。

影響混凝土中性化的原因有：

### 1. 環境因素：

- (1) 相對濕度：根據實驗觀察，相對濕度 55% 時，中性化速率最快<sup>(4)</sup>。
- (2) 二氧化碳含量：二氧化碳含量愈大，中性化速率愈快，且可能再發生碳化。

### 2. 內在因素<sup>(11)</sup>：

- (1) 水泥含鹼量：含鹼量愈高，愈不容易中性化。
- (2) 水泥含量：水泥含量愈高，則中性化速率愈低。
- (3) 水灰比：水灰比愈小，則中性化速率愈慢。
- (4) 混凝土強度：高強度混凝土較不容易發生中性化。

因此在嚴重腐蝕環境下，施工時應選擇高水泥含量，低水灰比和高強度的混凝土。

## (二) 氯離子侵入

氯離子侵入混凝土，大都是因為座落於海邊或海上的結構物環境中所含氯離子濃度高，自然滲透侵入混凝土內。在冰凍地區，灑鹽除冰劑（Deicing agent）的橋樑也引進了大量的氯離子；另外在許多海島國家在拌合水及骨料中含有氯離子，或使用早強摻料（ $\text{CaCl}_2$ ）亦為氯離子可能之來源。

氯離子對鋼筋腐蝕的影響性，近年來有三種理論解釋即：氧化膜理論，吸附理論及短暫錯合理論〔4〕，分述如下：

### 1. 氧化膜理論（The Oxide Film Theory）

氯離子經孔隙穿透鋼筋表面的氧化膜，並將氧化膜破壞，使鋼筋暴露，不斷發生氧化反應。

## 2. 吸附理論 ( The Oxide Film Theory )

氯離子吸附在鋼筋表面，促使鐵離子不斷和水化合，使鋼筋不斷地溶出鐵離子。

## 3. 短暫錯合理論 ( The Transitory Complex Theory )

氯離子與鐵離子形成鐵氯錯合離子，此錯合離子穿透氧化膜將之破壞，使錯合反應持續進行，而錯合離子在遠離鋼筋表面後即分解，而使氫氧化二鐵沉澱下來。此現象可在鋼筋處發現一淡綠色半固體反應生成物，暴露空氣先變為黑銹再轉為紅銹。

這三個理論說明了鋼筋表面的氧化膜，如何因氯離子的侵入而破壞。由圖 2-3 為含氯離子之 pourbaix 圖，可以很清楚地看出氯離子使得鋼筋不容易形成氧化膜。

氯離子的侵入改變了極化曲線，如圖 2-4 中之陽極極化曲線，因氯離子侵入而使其斜率改變，且不形成鈍態膜；而陰極極化曲線因氧氣供應不及而有極限電流密度產生。同時由圖 2-4 可發現含氯離子的腐蝕電流密度  $I_B'$ ，遠大於不含氯離子時的腐蝕電流密度  $I_B$ ，表示氯離子的侵入將增加鋼筋的腐蝕速率。

氯化物為造成鋼筋腐蝕的主要原因，而混凝土施工中亦常無法避免會含相當的氯化物。因此，必須了解氯化物含量和腐蝕速率之關係，進而制定氯化物的容許含量供設計依據。許多研究報告指出<sup>(7,12,13)</sup>，氯化物容許量和 pH 值間有一定之關係，由圖 2-8 可見 pH 值小於 11.5 時，即使沒有氯離子，腐蝕同樣會發生；pH 值大於 11.5 時，則因 pH 增大，則在某一腐蝕速率下的容許氯含量將愈大。氯離子濃度和氫氧離子濃度比 ( $Cl^-/OH^-$ ) 大於 0.6 則容易發生腐蝕，如圖 2-9 所示<sup>(7)</sup>。然而，真正影響氯化物含量容許值的因素目前還在研究之中。目前規範中訂有氯化物含量的容許值僅供參考。關於氯化物含量的表示法，常用的有二種，是因為測驗方法不同異。分別為：

1. 水容量 ( Water soluble )：溶於水中氯化物的重量百分比。

2. 酸容量 ( Acid soluble )：溶於硝酸中氯化物的重量百分比。

許多單位都訂有氯化物含量的規範例如<sup>(4)</sup>：

ACI 318 中以氯化物水容量計，規定容量為：

預力混凝土中：	0.06 %
暴露於氯化物環境中的混凝土：	0.15 %
乾燥或受保護的混凝土：	1.00 %
其它混凝土：	0.30 %

英國規範中以氯化物酸容量計，其容許量為：0.35%

ASTM 中以氯化物酸容量計，其建議值如下：

預力混凝土中：	0.08%
一般混凝土中：	0.20%

在文獻7及12~14中指出，在水泥中加入鋁酸三鈣（ $C_3A$ ）會降低鋼筋的腐蝕程度。原因是鋁酸三鈣會和早強摻料  $CaCl_2$  形成無害的“Friedel鹽”（ $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 12H_2O$ ），Friedel鹽因為體積不會膨脹，所以不會使混凝土破壞，如圖2-10所示， $C_3A$  含量愈高，則混凝土破壞程度愈低，但在參考文獻14中的實驗數值顯示當  $C_3A$  含量超過12.5%時， $C_3A$  容易和硫酸鹽形成針狀的鈣鈣石（ $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ ）（圖2-11），此鈣鈣石生成物體積膨脹會破壞混凝土，在規範中同時亦規定水泥中 $C_3A$ 的含量的限制，然而水密性高之混凝土則不受限制。

雖然氯離子的侵入嚴重地破壞氧化膜，而使鋼筋生銹，但是由圖2-4可知鋼筋的腐蝕速率係由氧氣供給速率所控制，因此若氧氣供給速率降低，或是減少水份進入混凝土鋼筋，則在高氯離子濃度下腐蝕速率有可能較低。此為海中區的RC結構物，不易發生腐蝕的主因。

### (三) 氧氣含量

可獲得的氧氣含量住許多因素而定，在空氣中之氧氣濃度約為200ml/l，而在水中的氧氣濃度最大值為5-10ml/l，氧氣擴散之速率亦與氧氣是否在氣體狀況或溶解於水中有關。混凝土的滲透性和保護層厚度都會影響到可獲得之氧氣含量如圖2-12所示<sup>(15)</sup>，水飽和程度似乎是一大控制因素。

氧氣參與電化學陰極反應必須是處於溶解狀態，直到幾年前，在溶解氧侵入混凝土的擴散特性之決定既沒有資料亦無試驗技術、對飽和水的混凝土如圖2-13所示<sup>(16)</sup>，混凝土保護層對溶解氧之侵入速率僅有相當微量之影響。例如水灰比0.4之混凝土保護層厚度由10mm增至70mm，則氧氣之流入量僅增加約2.6倍，此資料提供外海重力式混凝土平台之保護層厚度自7公分降至5公分供作證明為正當的處理方式的根據<sup>(17)</sup>。以相同的水灰比而言，圖中亦說明溶解氧通過水泥砂漿之數量較混凝土為低。亦可看見通過水灰比0.6的泥砂漿數量較通過水灰比為0.4的混凝土情況為低。這些數據都說明滲透性之重要性。

Gj  $\phi$  rv<sup>(18)</sup>最近的研究經驗指出氧氣擴散大部份的阻抗是在混凝土與鋼筋間微小

的轉換相。此一轉換相 ( Transition Phase ) 當作氧氣侵入之屏障，因此更加降氏保護層厚度關係到溶解氧氣之獲取量多寡的重要性。

#### (四) 混凝土電阻

因為電流以帶電離子通過混凝土，所以假設電阻，離子濃度和滲透性有密切之關係是合理的，圖 2-14 表示水灰比與電阻之關係<sup>(19)</sup>。將水灰比自 0.7 降至 0.5，在水泥砂漿的電阻增大為二倍，而混凝土則僅有微量之影響。若以水灰比 0.5 而言，水泥砂漿之電阻約為混凝土情況下的三倍，這些資料反映出這兩種材料的滲透性差異。

波索蘭材料例如矽灰出現，不僅影響混凝土的滲透性而且亦影響孔隙溶液的離子濃度，如圖 2-15 所示矽灰含量對電阻有很大的影響<sup>(20)</sup>。

在上述離子傳送的機構中，混凝土中飽和水的程度亦為一重要因素，如圖 2-16 所示，飽和水的程度似乎對電阻具有優勢之影響，將相對濕度自 100% 降至 18%，電阻則自  $7 \times 10^3$  歐姆公分增加至  $6 \times 10^8$  歐姆公分<sup>(19)</sup>。

從現有混凝土結構物觀測結果顯示如果電阻超過臨界值  $(50-70) \times 10^3 \Omega\text{cm}$ ，則埋設鋼筋之腐蝕幾乎不是實際上的問題<sup>(21)</sup>，即使鋼筋的鈍態被破壞，若混凝土結構物處於乾燥環境下亦不會發生腐蝕，然而增加濕氣含量到完全水飽和，混凝土電阻將不再是腐蝕的一個限制因素，此時腐蝕將可由氧氣含量的多寡加以控制。

## 四、最新海洋混凝土結構物設計與施工規範建議

由國內的海洋混凝土結構物惡化實例<sup>(22-24)</sup>，以及一些國外之實例<sup>(25)</sup>可得到一些教訓及施工經驗如下：

1. 混凝土之透水性為耐久性之關鍵。水密性高，則海水侵入混凝土與水化水泥漿起化學反應之生成物，僅能侷限於混凝土表面，不會侵至鋼筋處造成鋼筋銹蝕現象。
2. 造成水密性差之原因為：
  - (1) 混凝土配比設計不適當之骨材級配。
  - (2) 施工控制不良：保護層不足，拌合不完全，夯實不良，施用過量之拌合水等。
  - (3) 混凝土龜裂：使用期間由於沉陷，未硬化前即施加負荷、超載、碰撞和巨積混凝土內溫差變化等。
3. 在結構體不同部位，受海洋不同暴露條件作用其惡化形態與嚴重性並不一致。大氣區，潑濺區易受乾濕反覆作用及海水作用較為嚴重，而海中區缺氧，故鮮見腐

蝕現象。

4. RC 由旆施工時控制不良形成微裂，使用時，因某些原因使龜裂擴大，海水浸入，乾燥時水份蒸發，鹽份留在孔隙中，乾濕反覆作用，使龜裂與腐蝕互制，導致結構物破壞。
5. 使用波索蘭材料對巨積混凝土可減低水化熱及早期強度減少體積變化，抗鹽害能力強，增加工作度，防止材料析離及增加水密性。

北海自1972至今，共建21座外海混凝土重力式平台，由於暴露在極大之海洋動力及壓力差下，不僅需巨大的抗壓強度且能耐浮冰磨損及撞擊，因此需巨型鋼筋和預力鋼鍵加強，為確保防蝕要求，為確保防蝕要求，透水係數必須相當地低，在現場施工經驗有助於提昇製作高強度及水密性佳之混凝土技術。表2-2列出十大耐久性重大法則<sup>(26)</sup>補充說明如下：

### 1. 選擇高品質的施工材料

- (1)水泥：高強度、適度鋁酸三鈣（ $C_3A=5\sim 8\%$ ）中等鹼性含量及均勻品質。
- (2)骨材：校核堅固及無不純物，控制細骨材粒徑小於0.3mm，以確保在高坍度及均勻級配之穩定性。
- (3)摻料：選擇有效的減水劑，三聚氰胺基產品在高用量下可得較少之緩凝。在修正拌合計量過程中加輸氣劑有利於高坍度之工作性。

### 2. 正確的配比設計

- (1)水灰比必須小於0.45（潑濺區小於0.4）。
- (2)水泥含量必須大於 $380\text{kg}/\text{m}^3$ ，在裂縫和接頭處能有自行填塞縫隙之能力。
- (3)在高坍度下拌合穩定，需控制砂的級配及摻料之高用量。
- (4)使用少量的矽灰（小於5%）對強度及穩定性有利，用量大，則對可施工性有害。
- (5)在選用配比前，絕對必須現場作全尺度之試驗。

### 3. 使用現代的自動拌合廠

- (1)有效的拌合。
- (2)電腦控制，可減少誤差。
- (3)每一用量均由電腦表中輸出（100%控制）
- (4)瓦特計量計（Watt meter）校核工作度。

4. 發展健全的施工程序
  - (1) 在紮筋前，考慮灌注混凝土。
  - (2) 確保有備用的拌合廠與施工材料。
  - (3) 若有疑問時，需進行測試或大模型試驗
  - (4) 在規劃施工程序時，需由相關人員共同參與。
  - (5) 經驗及技術之轉移。
5. 混凝土夯實充分
  - (1) 以正確的方法，使用高頻率之振動棒。
  - (2) 在上層的混凝土需再多加振動以增加強度和減少埋設之鋼筋下有空隙現象發生（再振動為使用滑動模板必須增加的工作）。
  - (3) 確保鋼筋上的混凝土保護層完全地夯實（若需要時，可使用直徑漸減的振動棒夯實）。
6. 保證鋼筋上有足夠的混凝土保護
  - (1) 主鋼筋上至少有五公分的保層。
  - (2) 保護層的品質如同厚度一樣的重要。
  - (3) 滲透試驗顯示一般水滲透深度小於 2.5 公分而隨時遞減（滲透係數為  $K=1 \times 10^{-13} \sim 1 \times 10^{-14} \text{ m/sec}$ ）。
  - (4) 氯化物侵入試驗結果，一般顯示在距曝露表面 2 公分以外處，氯化物的濃度相當地微量（小於混凝土重量的 0.05%）。
  - (5) 不足的保護層，可使用水泥基塗裝（保護層厚度 3~5 公分）或環氧樹脂裝（0~3 公分之保護層）補足，在 Statfjord A 平台上之支柱使用環氧樹脂塗裝，據報導經過十年之曝露仍處於良好之狀況。
  - (6) 在後拉式預力鋼鍵錨碇隱蔽處及紮鋼筋處必須特別注意有足夠的混凝土保護。
7. 注意施工接縫
  - (1) 清除乳皮（Laitance），在大面積上之表面加緩凝劑及有效的沖水清洗。
  - (2) 在接縫處使用富配比及充分地振動。
  - (3) 並不贊成使用環氧樹脂作握裹用，除非能控制施工孔洞的壽命，環氧樹脂會阻止在接縫處之自癒。
  - (4) 不需用塑膠的止水設備（PVC water stops）。

(5)使用滑動模板施工，可得到如巨石般的整片牆壁而無施工縫之存在。

#### 8. 容許有溫度之變化

(1)避免養生溫度之變化

(2)避免在斷面有過度的溫度差。

(3)在厚斷面通常每 100 公斤的水泥，溫度上升約  $12^{\circ}\text{C}$ ，所以不贊成使用較高的水泥含量。

(4)啓始溫度可使用冰塊指代部份拌合水，有效地可得到降低結果。（ $8\text{kg}/\text{m}^3$ 的冰塊量可降低溫度 $1^{\circ}\text{C}$ ）。

(5)在曝露前，需觀測正常養生需求的規範。

(6)除非確定後拉式預力導管中無冰，則不要灌漿於管內。

#### 9. 保持設計簡單

(1)斷面易於澆注混凝土。

(2)圓的和光滑的表面可阻止表面衰退。

(3)避免在結構外形上有突變之斷面。

(4)避免使用巨大鋼筋而其間距太小。

(5)使用 T 頭鋼筋可減少箍筋之擁擠。

(6)曝露鋼筋作陰極防蝕處理時，必須容許電流可流向埋設之鋼筋處。

#### 10. 雇用已接受訓練或熟練的操作員。

只有執行工作的操作者，才能在製作時有效及連續地影響所製作混凝土結構體的品質，因此必須使用接受訓練過的或熟練的技術操作人員才可能有效地控制品質。

## 五、腐蝕監視與控制

根據經驗顯示鋼筋及預力混凝土海洋結構物，可維持耐用一段長時期而很少需作維修工作。而因為有許多因素可影響結構物的性能及耐久性。而且可能不易根據其他結構的經驗用到一特殊之結構物上。因此在嚴酷環境下所有結構物的安全及性能相當重要的地方，必須定期進行腐蝕偵斷與控制工作。

在腐蝕達到相當發展的階段，可能在混凝土表面，和用目視檢查看不見混凝土裏面所埋設鋼筋發生腐蝕的情況。在水面上的混凝土結構物上會銹斑，混凝土龜裂或剝

落等現象，若腐蝕發生在水線下，該處較缺氧，而根據經驗顯示即使腐蝕達到相當進展的階段，可能未發現有任何混凝土龜裂及剝落跡象出現。

當 1985 年時 Gewertz 等學暫<sup>(21)</sup>曾使用半電池電位的技術沿混凝土表面定期診斷埋於混凝土內之鋼筋腐蝕可能性，在腐蝕診斷方面已向前邁進了一大步。在現場亦曾發展沿著混凝土表面量測電阻之技術<sup>(27)</sup>。然而至今這些技術還未能在水下的測量上應用，因此最近已經有一些研究者努力研究發展及作過一些嘗試應用比較一般性的腐蝕偵斷技術於混凝土結構物上。目前已有的技術如 Keldsen<sup>(28)</sup>使用電阻探測器 (Electrical resistance probes) 或使用超音波探測器 (Ultrasonic probes)<sup>(29)</sup> 量測油管之腐蝕<sup>(30)</sup> 以及現已發展使用交流阻抗之技術<sup>(31)</sup> 等。

為求較完整的評估及控制外海混凝土結構物之鋼筋腐蝕。Gj  $\phi$  rv<sup>(32)</sup> 曾發展一種新的探測器，可提供埋設與曝露鋼筋間電氣接觸的腐蝕狀況資料。包括埋設鋼筋之鈍態電阻，含氧量和腐蝕速率等，將此探測器埋於結構物可能發生腐蝕的地方，可自動監視與控制結構物的腐蝕行為。

## 六、結 論

在海洋環境下，混凝土結構物發生惡化的各種過程中關係到耐久性與安全的不是混凝土本身之分解，而是埋設鋼筋的電化學腐蝕反應。

根據過傳統式之施工方法，可能使用期間不到五年就發生鋼筋腐問題，然而在北海的外海混凝土平台應用最新的技術，則使用期間已超過 15 年，並未發現有腐蝕跡象，因此似乎混凝土內之埋設鋼筋可適當的使用現有的知識加以控制。

## 參考文獻

1. Alberty R.A, "Physical Chemistry", John Wiley & Sons, 1987.
2. Pourbix M., "Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions" - ,Pargmoia Press, 1966, pp.307-321
3. Wheat H.G. and Z. Eliezer, "Some Electrochemical Aspects of Corrosion of Steel in Concrete" ,Corrosion NACE, Vol.41, 1985, PP.640-645.
4. ACI Manual of Concrete Practce Practce, 1987, Part 1.
5. Heuze B., "Cathodic Protection on Concrete Offshore Platforms" ,Mater-

ials Performance, May 1980, pp.24-33.

6. Hahin C., "Corrosion Resistant Design Guidelines for Portland Cement Concrete" ,Materials Performance, April,1984. pp.44-46.
7. Popovics S.,Y. Simenove,G.Bozhinow and N.Barovsky, "Durability of Reinforced Concrete in Sea Water " in "Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction" ,Ellis Horwood Limited,1983,pp.19-38.
8. Okada K.,W.,Koyanagi and T.Miyagawa, "Chloride Corrosion of Reinforcing steel in Cracked Concrete" in "Performance of Concrete in Marine Environment" ACI SP-65,1980,pp.237-254.
9. Cady P.D., "Corrosion of Reinforcing Steel" ,ASTM STP 169B,1983.
10. Gonzalez J.A.,C. Alonso and C.Andrade, "Corrosion Rate of Reinforcements During Accelerated Carbonation of Mortar Made with Different Type of Cement" in "Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction" Ellis Horood Limited,1983,pp.159-174.
11. Treadaway K.W.J.,G. Macmillan,P.Hawtins and C.Fontenay, "The Influence of Concrete Quality of Carbonation in Middle Eastern Condition-A Preliminary Study" ,ibid,pp.101-118.
12. Arup H., "The Mechanisms of the Protection of Steel by Concrete" ,ibid,p p.151-157.
13. Holden W.R.,C.L.Page and N.R.short, "The Influence of Chlorides and Sulphates on Durability" ,ibid,pp.145-150.
14. Klieger P., "Durability Studies at the Portland Cement Association in "Durability of Building Materials and Components" ,ASTM STP691,1980.
15. Tuutti K., "Corrosion of Steel in Concrete" ,Report No.4-82,Cement and Concrete Research Institute,Stockholm,1982.
16. Gj  $\phi$  rv O.E.,Vennesland  $\phi$  .and El-Bidsidy,A.H.S. "Diffusion of Dissolved Oxygen through Concrete" ,Materials Performance,Vol.25, No.12 1986, pp. 38-44.
17. Det norske Veritas, "Rules for Design,Consruction and Inspection of Fixed

- Offshore Structures” ,Oslo,1976.
18. Gj  $\phi$  rv O.E.and Vennesland  $\phi$  ., “Cathodic Protection of Steel in Offshore Concrete Platforms” Materials Performance, Vol.19,May,1980,pp.49-52.
  19. Gj  $\phi$  rv O.E.,Vennesland, $\phi$  and El-Busaidy, A.H.S., “Electrical Resistivity of Concrete in the Oceans” ,Paper OTC 2803,OffshoreTechnology Conference.1977,May 1977 ,Houston, Texas,pp.581-588.
  20. Vennesland  $\phi$  . and Gj  $\phi$  rv, O.E., “Silica Concrete-Protection Against of Embedded Steel” ,Fly ash, Silica Fume,Slag and Other Mineral By-Products in Concrete, ACI publication SP.79 Vol. II. V.M. Malhotia (Ed.),1983,pp.719-729.
  21. Gewertz M.W.,Tremper B.,Beatom J.L and Steatfull R.F., “California Bridge due to Corrosion of Reinforcing Steel In a Marine Environment” , Highway Research Board,Bulletin182,1958,pp.41.
  22. 林維明、饒正 “澎湖跨海大橋腐蝕調查研究” 港灣技術研究所專刊第41號，台中，1987。
  23. 林維明等 “鋼筋混凝土結構物腐蝕研究” 港灣技術研究所專刊第43號，台中，1978。
  24. 林維明等 “濱海鋼筋混凝土結構物腐蝕特性與防蝕對策” 第二屆軍事工程研討會論文集第89-115頁，1990。
  25. 林維明 “海洋混凝土結構物耐久性之新展望” 民國78年度防蝕工程學會年會論文集第81-87頁，1989。
  26. Moksnes J., “Oil and Gas Concrete Platform in the North Sea-Reflection on Two Decades of Experience” ,International Experience with Durability of Concrete in Marine Environment, University of California, Berkeley,California,1989.
  27. Spellman P.L. and Stratfull R.F., “Concrete Variables and Corrosion Testing” , Highway Research Record,No.423,27 Washington,1973.
  28. Keldsen J. T., “ Measuring Steel-in-Concrete Corrosion with an Electrical Resistance Probe ” , NACE Corrosin 78, Paper No.123, Houston, Texas,

6-10, March, 1978.

29. Andrade C. and Gonzales, J.A., "Prediction of Potential Corrosivity of Concrete Additives by the Joint Determination of Pitting Potential and Polarization Resistance", Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento, Report No.33, Madrid, June, 1978, 45p.
30. "Dangerous to Ignore the Corrosion Structures", Offshore Engineer, Jan, 1977, pp.43-44.
31. Dawson J.L., Callow L. M., Hladky K. and Richardson J.A., "Electrochemical Impedance Measurements Applied to the Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete", NACE Corrosion 78, Paper No.125, Houston, Texas, 6-10, March, 1978, 19P.
32. Gjølrv O.E. and Vennesland Ø "A New Probe for Monitoring Steel Corrosion in Offshore Concrete Platforms," Materials Performance, Vol.21, Jan., 1982, pp.33-35.

表 2-1 標準電極位 ( 氫電極為基準 )

金 屬	電位(伏特)
金 ( Gold )	+1.489
白金 ( Platinum )	+1.229
銀 ( Silver )	+0.799
銅 ( Copper )	+0.337
氫 ( Hydrogen )	0.000
鉛 ( Lead )	-0.126
錫 ( Tin )	-0.136
鐵 ( Iron )	-0.440
鋅 ( Zinc )	-0.763
鋁 ( Aluminum )	-1.662
鎂 ( Magnesium )	-2.363
鈉 ( Sodium )	-2.714
鉀 ( Potassium )	-2.925

表 2-2 北海耐久性混凝土十大重要的法則

1. 選擇高品質的施工材料
2. 正確的配比設計
3. 應用最新的自動拌合廠
4. 發展健全的施工程序
5. 混凝土搗實充分
6. 確保有足夠的鋼筋保護層厚度
7. 注意施工接縫
8. 容許溫差之變化
9. 保持設計簡單
10. 雇用經訓練或熟練的操作員

# 玖、混凝土中性化實驗

黃永光\*

## 一、前言

混凝土是一種使用廣泛之建材，它具有經濟性、耐久性、可任意成形、施工方便、可場鑄或預鑄之特性，但混凝土亦有其缺點，如抗拉力不足、延展性低……等等，為彌補其缺點，遂引入抗張力強、延展性良好之鋼筋，形成複合材料即通稱之鋼筋混凝土。在正常的環境下，良好品質的混凝土構造物，其鋼筋受保護層之隔絕不與空氣接觸，且混凝土中含有約 25% 之氫氧化鈣使之維持鹼性，以穩定鋼筋表面的鈍態保護膜，保護鋼筋不致銹蝕。但由於溫度及濕度之變化、載重使用情形、有害化學物質（如酸、氯離子、二氧化碳等等）侵入、維護不佳等因素，均造成混凝土之性能衰減而不能滿足原設計之需求。由於大氣中含有二氧化碳，故混凝土之中性化作用隨時都在進行，在工業區及市區因燃煤、油及汽機車大量排放廢氣，因而使大氣中之二氧化碳上昇，混凝土長期在高濃度之二氧化碳之下，中性化速度更加速進行，不斷的吸收二氧化碳與氫氧化鈣反應生成碳酸鈣，其酸鹼度由高鹼性漸漸變為中性，當中性化深度深達保護層厚度時，便破壞了鈍態膜，而失去保護鋼筋之功能，使鋼筋銹蝕之機率大增，如圖9-1<sup>(1)</sup>所示，鋼筋混凝土構造物之壽命會因而縮短。本文首先探討國內外先進學者對中性化之研究，再就本所之中性化加速試驗結果，作一比較分析。

## 二、中性化作用之反應機理

中性化作用依混凝土所在位置，可分為大氣區和浸泡區的中性化作用，其反應機理分述如下：

### (一) 浸泡區

混凝土位於水面以下，其性質受水中所溶之化學物質之影響。在工業化之社

---

\*港灣技術研究所港工材料組助理

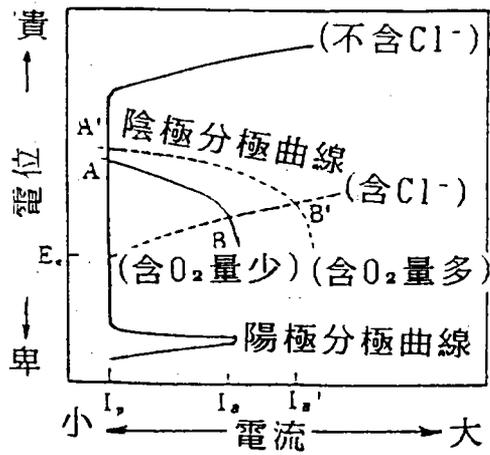


圖 2-4 腐蝕速度之分極行為 (5)

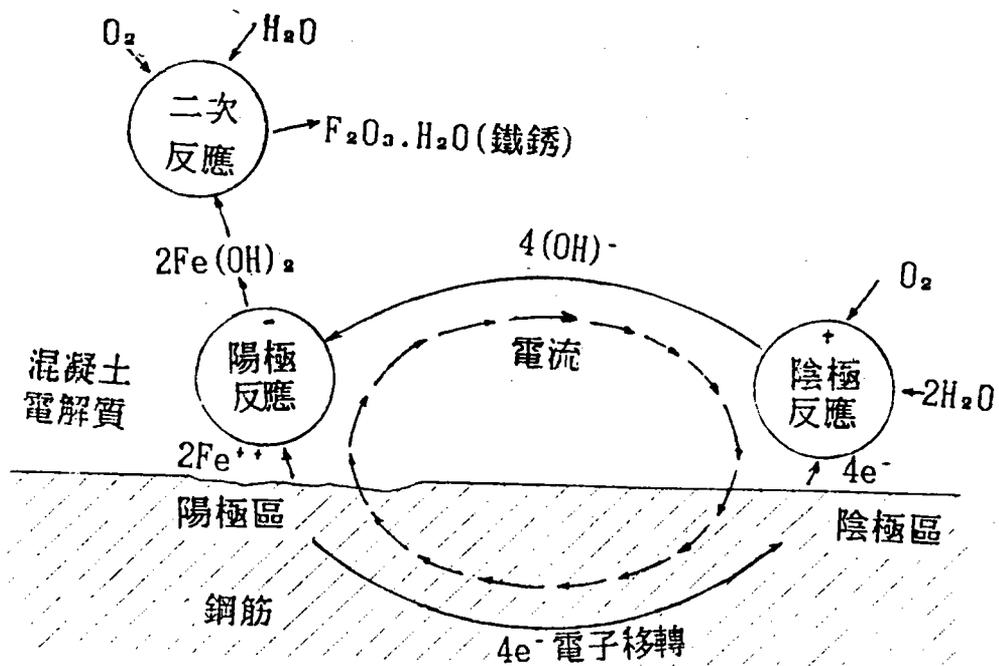


圖 2-5 混凝土中鋼材之巨大腐蝕現象 (8)

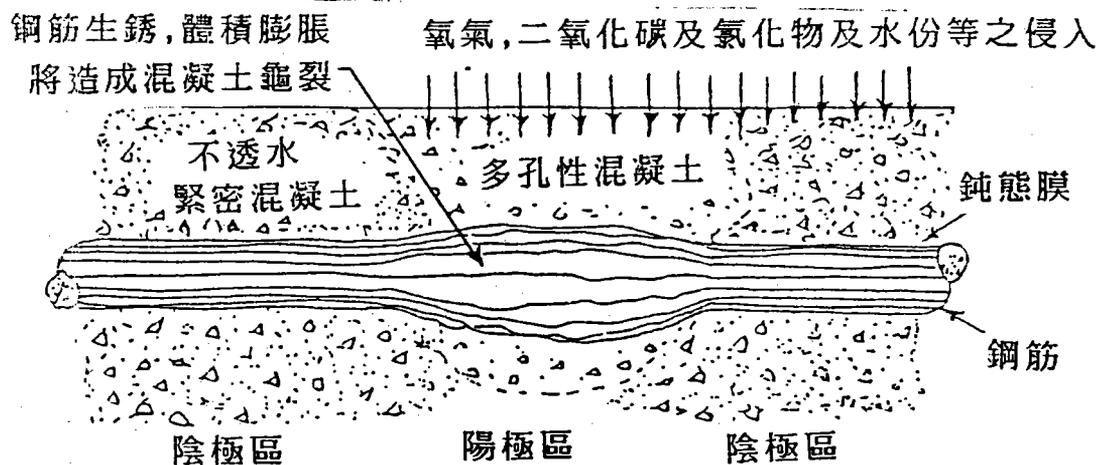


圖 2-6 鋼筋混凝土中巨大電池模式 (8)

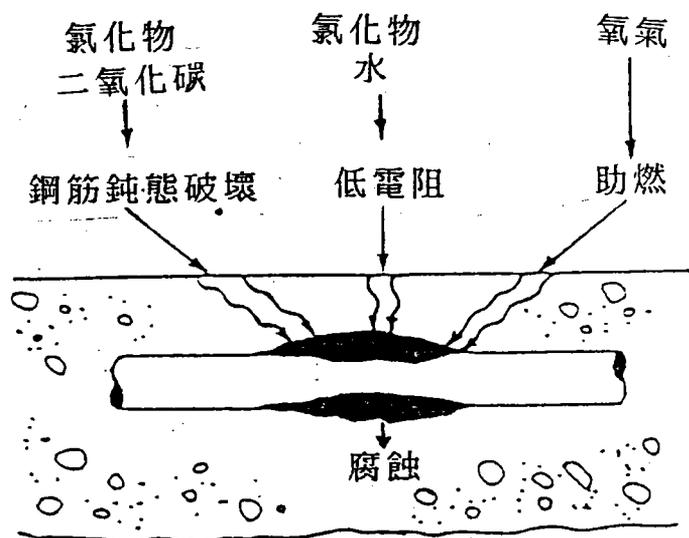


圖 2-7 混凝土主要腐蝕因子 (9)

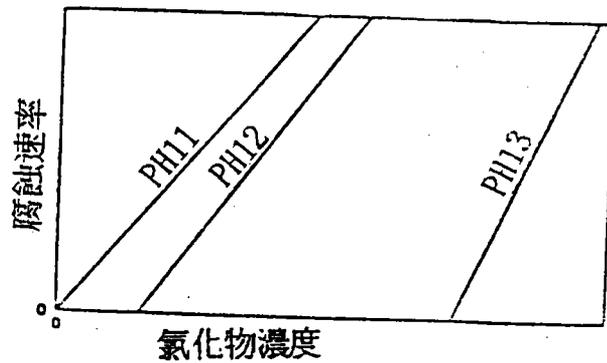


圖 2-8 氯化物濃度, PH值與腐蝕速率間之關係。(7)

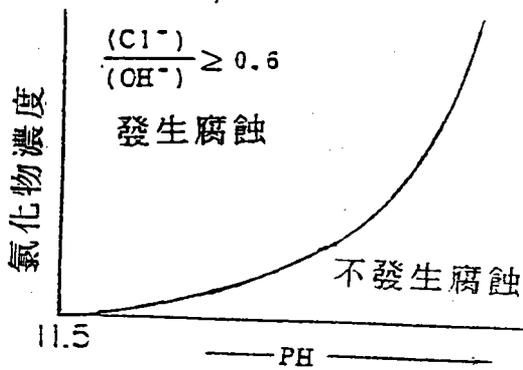


圖 2-9 氯化物與鋼筋腐蝕環境下之PH值的關係 (12)

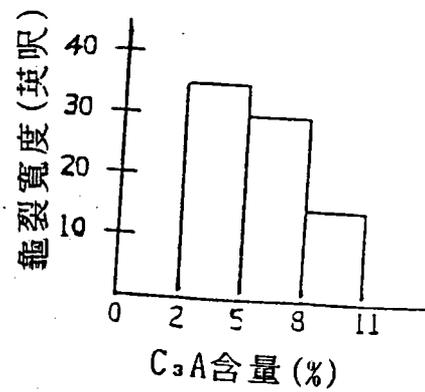


圖 2-10 C<sub>3</sub>A含量與龜裂寬度的關係 (7)



圖 2-11 單硫酸水化物與鈣矾石之微觀圖 (14)

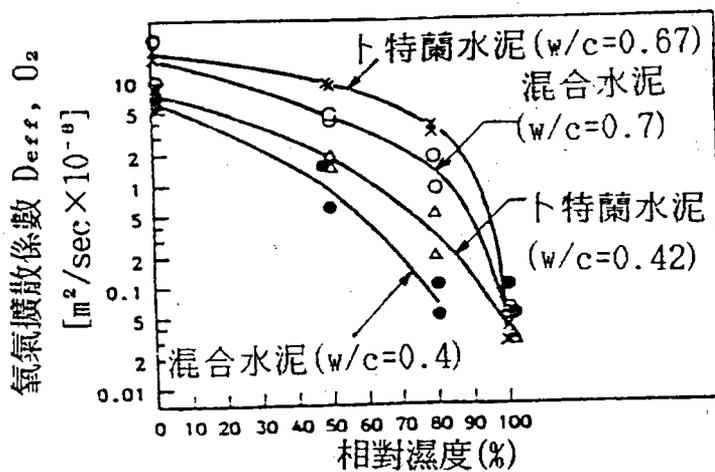


圖 2-12 濕氣含量對氧氣擴散速率之影響性 (15)

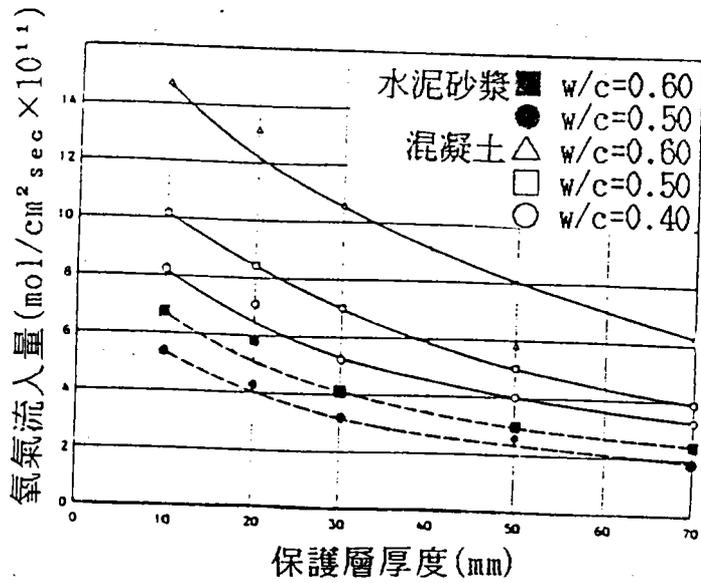


圖 2-13 溶解氧在飽和水混凝土中之擴散情形。(16)

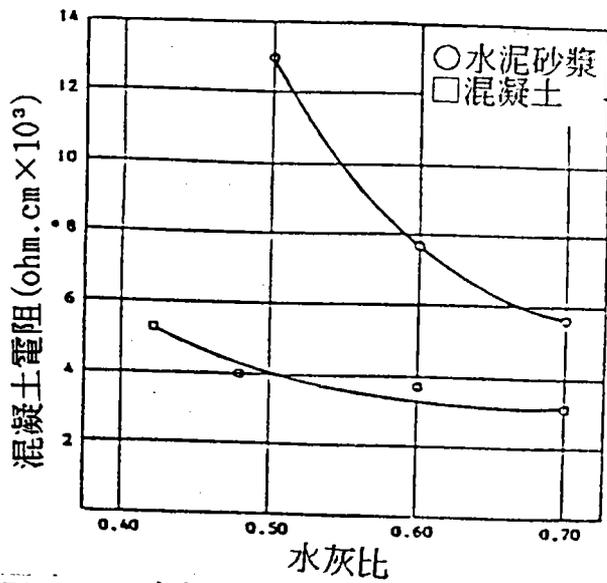


圖 2-14 水灰比對混凝土電阻之影響性。(19)

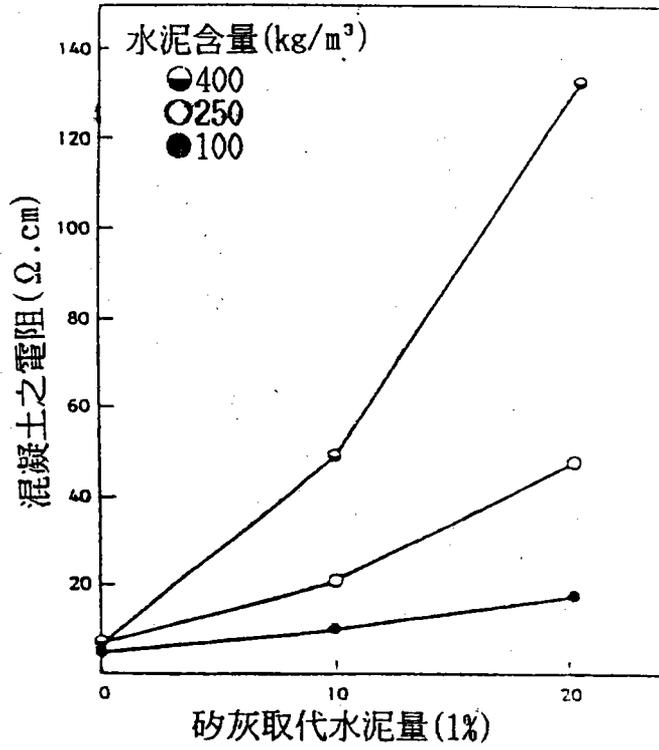


圖 2-15 砂灰含量對混凝土電阻之影響性 (19)

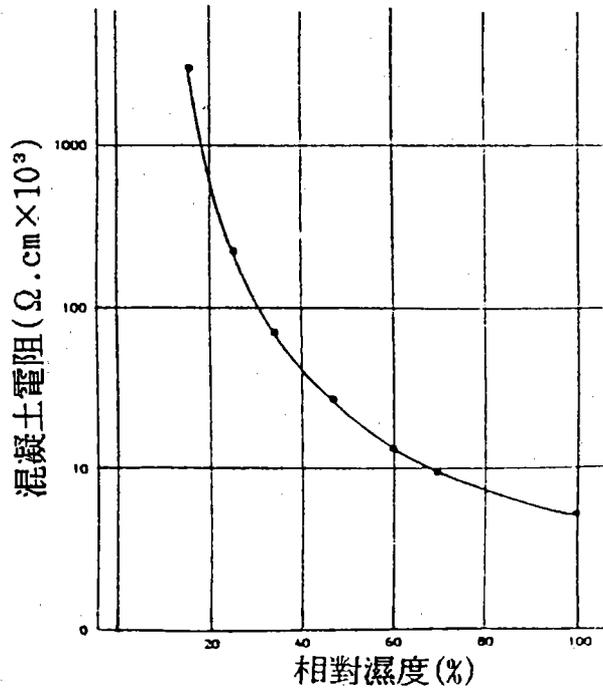


圖 2-16 濕氣含量對混凝土電阻之影響性。(19)

# 叁、調查試驗之規劃

林 維 明\*

## 3-1 概述

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

混凝土中有孔隙存在，而水泥水化作用產生氫氧化鈣及氯化鈉、氯化鉀等鹼性物質，所以酸鹼度大都維持在12.5左右。鋼材在此種強鹼性之環境下，其表面呈現不動態膜，即20-60Å厚之氧化鐵（ $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ）之薄膜，因此呈現不動態而受保護。如果設計、施工及使用材料正確之優良品質混凝土結構物，其中之鋼材應不至於發生腐蝕，然而由於施工中拌合有害成份或外界腐蝕因子如氯離子（ $\text{Cl}^-$ ）硫酸根離子（ $\text{SO}_4^{2-}$ ），硫化物（ $\text{S}^-$ ），二氧化碳（ $\text{CO}_2$ ）等侵入，因此使混凝土鹼性降低，破壞鋼材之不動態，而使鋼材變為活性態而易於發生腐蝕，而這些有害物中以氯離子之作用最為厲害。氯離子侵至鋼材附著於不動態膜，慢慢地作用造成鋼材發生孔蝕現象，引起鋼材由局部腐蝕破壞，造成混凝土龜裂，使氯離子更易侵入，引起腐蝕範圍之擴大。有些結構物可能使用3-5年後，就發生很明顯的腐蝕現象，如圖3-1所示，腐蝕因子侵入保護層到達鋼筋處為第一階段，然後鋼筋開始腐蝕到造成混凝土龜裂為第二階段，腐蝕持續進行到耐久力降低至超過應力極限而使構物崩壞為第三階段

而影響RC或PC結構物之腐蝕因子，惡化現象及造成使用功能降低之現象如表3-1所示。由於混凝土配合比不當，養生、夯實不良，使用海砂或海水拌合，或結構物乾濕或凍融反覆作用因而 $\text{CO}_2$ ， $\text{Cl}^-$ ， $\text{SO}_4^{2-}$ 等腐蝕因子侵入結構體，同時，受海氣象如波浪、風、氣溫、相對濕度等之影響，因而使混凝土惡化，鋼筋腐蝕，龜裂，不但影響美觀，而且造成剛性降低，強度不足，有使用之安全顧慮，其相關性如圖3-2所示。

而臨海地區之鋼筋混凝土或預力混凝土例如港灣結構物或混凝土公路橋樑、鐵道橋、建築物等承受鹽害較為嚴重，其主要影響因素如表3-2所示，本章將概述本研究

---

\*省交通處港灣技術研究所研究員兼港工材料組組長

所進行之調查與試驗工作之規劃情形。

### 3-2 研究範圍

本研究範圍所包括之項目如圖 3-3 所示，概述如下：

1. 由於港灣鋼筋混凝土結構物長年浸漬於海洋腐蝕惡劣的環境下，混凝土結構物極易受到海鹽份、硫酸鹽及空氣中之二氧化碳等有害物質的侵入，導致混凝土品質開始劣化，發生龜裂，剝落、鋼筋腐蝕、…等不良現象，若惡化持續進行，最後將危及結構物之安全及縮短使用年限。因此蒐集海象氣象資料及現場取海水作化學分析，可評估腐蝕環境之影響性。
2. 本研究係以台灣本島現有五大港（基隆港、台中港、高雄港、花蓮港、蘇澳港）老舊碼頭結構物為調查研究對象，進行現場目測觀察，非破壞性試驗（N.D.T.）及鑽心取樣，並配合試驗室內做化學成份與物理性質的分析，同時並採用精密微觀儀器，諸如掃描式電子顯微鏡（Scanning Electron Microscopy 簡稱 SEM）分析、能量消散法（Energy Dispersive X-Ray Spectrometry，簡稱 DEX）及 X-光繞射（X-Ray Diffraction，簡稱 XRD）分析，微觀混凝土結構物劣化之生成物成份。綜合上述各種分析資料，可研判混凝土結構物目前的品質狀況，以及發生腐蝕劣化的可能因素，並預估鋼筋混凝土構造物中鋼筋開始腐蝕生銹的時間。
3. 評估一混凝土試體在海洋環境下之性能，可使用加速試驗及曝露試驗加速試驗包括氯離子滲透，中性化及使用直流或交流阻抗測量腐蝕速率等都是使用海水進行試驗。而且製作一些試體曝露在台中港貯木池及本所之海水循環水槽中，定期測試，由加速試驗和現在使用條件長期試驗結果間之關係必須使用數學模式建立。

為提供耐久性試驗方法，美國材料試驗學會（ASTM）曾經發展一套建材使用壽命預測之方法，其架構如圖 3-4 所示，現已廣受許多試驗室所採用。

### 3-3 結構物概要

本研究係以台灣本島現有五大港的老舊結構物為調查對象，各港的碼頭平面佈置及鑽心取樣（Core Drilling）之相關位置如圖 3-5 至圖 3-9 所示。各港口鑽心取樣之碼頭其簡略背景資料如表 3-3 所示。各港現碼頭型式如表 3-4 至表 3-8 所示，代表性之碼頭型式斷面如圖 3-10 至圖 3-15 所示。

### 3-4 調查與試驗

#### (一) 調查方法

##### 1. 海水取樣地點與調查

海水的化學成分種類繁多，由於含有對港灣結構物造成腐蝕的因子，因此易使之發生銹蝕現象，影響其耐久性與安全。故本研究針對本省五大港，依各港的碼頭分佈不同，做適當之定點取樣，在基隆港選擇六處，台中港五處，高雄港七處，花蓮港六處，蘇澳港五處。在現場利用自動海水化性測定儀，測量海水之 pH 值，導電度，溶氧量及水溫等數據，75 年 11 月至 76 年 10 月曾分別在水面上，水面下（水深）1 公尺，及水面下 2 公尺及高低潮時各量測一次，同時採集海水試樣。各港灣定點採樣位置佈置如圖 3-5 至 3-9 所示，其結果如附錄 1 所示，而為求有完整性資料自 79 年 2 月至 80 年 1 月，每月採水樣一次，詳見第五章

##### 2. 現有結構物腐蝕惡化調查與分析

為探討結構物可能發生劣化、腐蝕的原因及其影響性，因此必須進行非破壞性之試驗及鑽心取樣並在實驗室進行化性及物性分析。

#### (1) 現場非破壞性試驗 (In Situ Nondestructive Testing)

##### ① 現場實地觀測 (Field Observation)

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

##### ② 試驗錘試驗 (Test Hammer Test)

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

##### ③ 鋼筋測定儀試驗 (Rebar Meter Test)

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

#### ④腐蝕電位測定

本試驗係按 ASTM C-876 之規範執行。

混凝土中鋼筋發生腐蝕為一種電化學化反應，在鋼筋表面有陰極（鈍態）和陽極（正腐蝕中）之發展，因此各位置有不同之電位及電流形態產生，有效地量測某一範圍之電位，則可評估在鋼筋表面上發生腐蝕之現象。本研究使用英國 Colebrand 牌腐蝕電位測定儀 Pathfinder 可快速定出 R.C 結構物上鋼筋腐蝕之電位。然而腐蝕參數很多，必須有較多之實測值，才能決定各地的腐蝕臨界條件，本試驗所得之數據僅可供腐蝕電位分佈及腐蝕機率之參考。

#### (2) 混凝土結構體鑽心取樣 (Core Test)

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

### (二) 試驗室分析

試驗室分析工作包括下各項：

#### 1. 鑽心試體描繪

將試體表面展開描繪，由此資料粗略地看出當時使用的混凝土配比是否適當、老化現象…等情形。

#### 2. 抗壓試驗 (Compressive Strength Test)

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

#### 3. 透水試驗 (Permeability)

本試驗之目的在測定混凝土之透水係數，間接檢定混凝土之水密性。試驗原理是依美國墾務局之建議，使用圓柱型鑽心試體將一定壓力之水，在單位時間內，自單位面積流出水量的多寡，利用 Darcy 定理，可求得

透水係數。

4. 中性化試驗 ( Carbonation Depth Test )

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

5. 比重試驗 ( Gravity Test )

依 ASTM C-624 規範執行。

6. 吸水率試驗 ( Absorption Test )

依 ASTM C642 規範執行。本試驗目的在了解混凝土結構物吸水狀況。

7. 水泥含量分析 ( Cement Content Analysis )

各港口鑽取之試體依 ASTM C85-66 之規範處理，測定其水泥含量。

8. 化學成份分析 ( Chemical Analysis )

各港口鑽取之試體，直徑 3 英吋，深度約為 15-20 公分，試體從表面 ( 亦即與海水接觸面 ) 算起，依次以深度 1 公分、2 公分、3 公分、3 至 5 公分、5 至 10 公分等切割之，如見圖 3-16 所示。將切割後之每一深度試體，依 ASTM C114-85，規範進行  $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{SO}_3^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$  含量之化學分析。

9. 掃描式電子顯微鏡 ( Scanning Electron Microscopy )，X 光繞射析分儀 ( X-Ray Diffractory ) 及能量分散儀 ( Energy Dispersive X-ray Spectrometry ) 等微觀儀器分析各試體劣化之生成物、成份。

本研究結果在第六章詳述，部份結果曾在 1989 年美國防蝕工程師協會年會中發表，並獲選刊登其出版之「材料性能」雜誌上，詳見附錄二及附錄三。

### 3-5 混凝土試體曝露試驗

本研究於民國 76 年初規劃曝露試驗工作，並邀請各界專家學者研商，同年 10 月陸續投入龐大的人力製作試體。試體擺放情形如下：

1. 本所海水循環水槽：海中區擺置 1305 個試體，潮汐帶擺放 1017 個試體。
2. 台中港 3 號碼頭 ( 貯木池碼頭斜坡上 ) 潮汐帶擺放 81 個試體。
3. 本所試驗大樓三樓平房屋頂上，距台中港碼頭約 250 公尺處之大氣區，共擺放 270 個試體。

本研究仍在初期執行階段，現階段試驗數據有限，曝露試驗之規劃工作要項概述

如下：

1. 試體大小：直徑為 15 公分，高度 30 公分之圓柱體。
2. 保護層厚度：在圓柱試體上配置三支鋼筋，其保護層厚度分別為 2 公分、4 公分及 7 公分。
3. 鋼筋：有些試體不加鋼筋而埋設鋼筋者採用直徑 1 公分、長度 27 公分，表面刨光之圓型鋼筋，其兩端亦加工磨光並以丙酮清洗鋼筋表面之油脂及稱重。
4. 水灰比：採用 0.4、0.5 及 0.7 三種。
5. 水泥種類：卜特蘭水泥 ASTM 一型，兩型及五型三種。
6. 摻料：加飛灰（20%）、矽灰（10%）或不添加任何摻料。
7. 混凝土配比與澆置依美國混凝土學會及美國材料與試驗學會（ASTM）之規範執行。澆置完成後之試體置於養生室控制溫度在  $23 \pm 0.7^\circ\text{C}$  下，經 28 天後，再置於大氣養生 4 至 5 天後，在試體兩端上下各約 2 公分及底側均塗上環氧樹脂，避免海水由兩底端滲進混凝土試體，密封完成後將試體搬運至試驗大樓屋頂上及海水循環水槽水槽或台中港擺放。
8. 測試：將擺放於曝露現場之試體，按時取回至試驗室分析腐蝕速率，劈裂試體以便觀測腐蝕形態並以複製膜求出腐蝕面積，而以鋼筋軸向兩側各 12 公分共 24 公分之範圍為量測區域。將鋼筋表面之鐵銹以化學藥品清洗，稱重並與試驗前磨光無銹之鋼筋比較，可得鋼筋銹蝕之重量損失量。

另外沿混凝土試體面往內 1，2，3，3-5，5-10，10-15 公分之深度切割，每一段試體依 ASTM 規範磨成細粉，測定各段所含之氯離子含量，因此可推算氯離子之滲透速率。

經過長期曝露，按時試驗分析結果則可研判使用何種保護厚度、水灰比、水泥種類和摻料等參數對鋼筋混凝土銹蝕之影響性。第七章將檢討初步試驗結果。

### 3-6 混凝土試體加速試驗

#### 1. 中性化試驗

本試驗之規劃工作概述如下：

##### (1) 試體之製作

##### ① 材料之選擇

- ①粗骨材取自大甲溪榮工處碎石場之標準級配，篩取料徑不大於 1.25 mm 之粒料。
- ②細骨材為大甲溪之河砂，其細度模數 F.M. = 2.71。
- ③水泥使用台泥公司之卜特蘭 I、II、V 型水泥及台電公司之飛灰取代 20%，中鋼公司之爐石取代 50% 及矽灰取代 10% 之 I 型水泥。
- ④拌合水使用適合飲用之自來水，水灰比取 0.4、0.5、0.7 三種。

## ② 試體澆灌及編號

以前述六種水泥配合三種水灰比共製成 18 種配比、依序編號為 A、B、C...P、Q、R，依 ACI 規範 2.11.1-81 之規定，拌合後灌製 7.5cm × 15cm 之圓柱試體各為 18 個，依序編為 1~18 號，共製作 324 個試體。

## ③ 養生

試體澆灌後 24 小時拆摸，並移至濕度 100% 之養生室養護 28 天。

- ④部份碳化速度較快之試體以不透氣之環氣樹脂塗滿試體之側面，使碳化反應僅能由上下面侵入。

## (2) 試驗設備

加速試驗箱為一密閉之容器 ( 185cm × 129cm × 76cm )，可容 7.5cm × 15cm 之試體約 400 個。內置空氣循環風扇及溫度、溼度、二氧化碳濃度控制器，其使用範圍如下：

- ①溫度自 1°C 至 50°C。
- ②相對濕度自 40 至 90%。
- ③二氧化碳濃度自 0 至 20%。

試驗設定二氧化碳濃度為 3.0% ± 0.2%，溫度為 30% ± 1°C，相對濕度為 60% ± 10%。

## (3) 試驗步驟

- ①將各種配比之混凝土試體 1-9 號放置於 CO<sub>2</sub> 加速箱內為甲組、另 10~18 號放置於室外屋簷不滴水處為乙組、每次實驗以三個試體之平均值為結果，差異甚大時，則由 3 個試體取得之數值，篩取有效數據以供分析之用。

- ②於試體齡期1, 3, 6個月時, 自甲、乙、丙組之各種配比各取3個試體, 經劈裂後以試劑塗抹剖開面, 量測未變色之厚度為已碳化之區域, 中央部份呈鮮艷粉紅色為未碳化區域。

有關中性化實驗之結果與討論, 詳見第九章。

## 2. 氯離子擴散現象加速試驗

本試驗規劃工作概述如下:

本研究對不同水泥種類(卜特蘭 I 型, II 型)在不同之水灰比時, 添加不同比例之飛灰以取代部份水泥之水泥砂漿硬化體進行擴散試驗, 以評估外界氯離子侵入時, 抑制擴散速率的效果, 作為防止混凝土中鋼筋腐蝕, 增加混凝土構造物耐久年限之參考。

使用之粗細骨材, 水灰比與中性化之試驗情況相同, 水泥僅使用卜特蘭 I 型及 II 型兩種, 摻料使用0、20、40及60%之飛灰, 試體製作, 養生與中性化試驗相同, 試驗準備情形為

- (1)試片準備: 將養護齡期達28天之試體取出後以切割機截取直徑7.5cm, 厚約0.5~1.0cm之薄片、並用研磨機研磨平整。
- (2)將試片置於擴散試驗裝置內。
- (3)容器室左邊添加1000ml之蒸餾水, 右邊則加入1000ml之1N NaCl溶液進行擴散試驗。
- (4)擴散時間達14天、40天及80天時, 自蒸餾水槽取出10ml溶液, 再取蒸餾水10ml入蒸餾水槽。
- (5)將取出之溶液以硝酸銀法滴定氯離子濃度試驗。

有關本試驗之結果與分析, 請參見第十章。

## 3. 腐蝕速率之量測

以重量減輕法量測腐蝕速率, 經常得不到完全滿意的結果, 本研究係以電化學方法量測。採用Solartron之1286型Electrochemical Interface及1250型之頻率反應分析儀, HP7470型繪圖儀並應用IBM PC經由GPIB作全自動化處理。拌合使用蒸餾水, 砂使用大甲溪之河砂, 水泥使用台泥公司製作之卜特蘭 I、II、V型水泥並有20%之飛灰及使用中鋼公司之高爐石, 以1:3之砂灰比及0.4, 0.5及0.7三種水灰比製作40×40×160mm之立

方體試體。應用 Tafel 外推法、線性極化電阻法及交流阻抗法進行腐蝕速率之試驗，第八章將詳述。

表 3-1 鋼筋混凝土結構物耐久性與惡化現象

影 響 因 素	RC 惡 化 現 象	使用功能降低
① 外在環境因素 · 乾濕或凍融反覆作用 · 海塩作用 · 空氣中所含侵蝕性物質作用 (如 $CO_2$ 、 $SO_2$ ) · 環境、氣溫、相對濕度之作用 ② 內在因素 · 混凝土材料配合比設計不當 · 養生、夯實不良 · 水密性不佳 · 使用海水、海砂或第一種水泥	· 混凝土中性化 · 硫酸塩侵蝕及塩害 · 混凝土龜裂、剝落 · 混凝土表面劣化 · 混凝土強度降低 · 鋼筋腐蝕、銹斑 · 降低剛性 · 透水性增大、變形	· 耐力 · 美觀 · 變形 · 防水性 · 剛性降低

表 3-2 臨海混凝土結構物鹽害影響要因

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

表 3-3 各港口碼頭、倉庫結構體鑽心取樣

結構體編號	建造日期	使用材料	碼頭型式
基隆港15號倉庫	民國 10 年	R C	——
基隆港30號倉庫	民國 55 年	R C	——
基隆港西15號碼頭	民國 10 年	R C	方塊擁壁式
基隆港東2號碼頭	民國 57 年	R C	鋼板樁
台中港11號倉庫	民國 71 年	R C	——
台中港23號碼頭	民國 72 年	R C	沉箱式
高雄港3號倉庫	民國 52 年	R C	——
高雄港10號倉庫	民國26年(或更早)	R C	——
高雄港38號碼頭	民國 57 年	R C	鋼板樁
高雄港中州碼頭	民國 60 年	R C	RC 板樁
花蓮港2號倉庫	民國 20~ 28年	R C	——
花蓮港4號碼頭	民國 48 年	R C	鋼板樁
蘇澳港9號碼頭	民國 66 年	R C	方塊達恩塊重力式
蘇澳港10號碼頭	民國 66 年	R C	基樁棧橋式

表3-4 基隆港現有碼頭概況

碼頭編號	長度 (公尺)	深度 (公尺)	碼頭型式	泊船總噸 (公噸)
西 1	149.10	- 8.00	橋墩式	5,000
西 1 <sup>B</sup>	90.90	- 9.00	" "	3,000
西 2	204.50	- 9.00	井筒式 橋墩式	10,000
西 3	183.00	- 9.00	橋墩式	" "
西 4	167.00	- 9.00	" "	"
西 5	54.50	- 9.00	基樁式	5,000
西 6	131.00	- 9.00	" "	5,000
西 7	106.00	- 9.00	混凝土擁壁式 基樁式	"
西 8	136.42	- 8.00	基樁式	"
西 9	136.42	- 8.00	基樁式 擁壁式	"
西 10	136.42	- 8.00	基樁式	"
西 11	167.80	- 5.50 - 6.50	重力式 構架式	3,000
西 12	170.00	- 6.50	構架式	"
西 12 <sup>B</sup>	251.00	- 6.50 - 9.00	方塊擁壁式	10,000
西 14	172.40	- 9.00	方塊擁壁式 基樁式	"

表3-4 基隆港 (續)

碼頭編號	長度 (公尺)	深度 (公尺)	碼頭型式	泊船總噸 (公噸)
西 15	148.30	- 9.00	方塊擁壁式 基樁式	10,000
西 16	154.50	- 9.00	" "	"
西 17	209.00	- 10.00	基樁式	15,000
西 18	215.50	- 10.00	方塊擁壁式 基樁式	"
西 18 <sup>B</sup>	85.50	- 4.50	方塊擁壁式	3,000
西 19	264.00	- 2.00 - 10.00 - 11.00	擁壁式 基樁式	20,000
西 20	221.65	- 10.50 - 12.50	鋼管樁式	30,000
西 21	236.60	- 10.00	Z-38 鋼板樁	20,000
西 22	190.00	- 11.00	" "	30,000
西 23	210.00	- 11.00	井筒式 Z-45 鋼板樁	"
西 24	240.00	- 13.00	井筒式鋼板樁	"
西 25	300.00	- 13.00	" "	"
西 26	210.00	- 11.00	" "	"
西 27	150.00	- 7.00	Z-25 鋼板樁	5,000
西 28 <sup>A</sup>	69.50	- 3.50	雙壁L型塊式	500

表3-4 基隆港 (續)

碼頭編號	長度 (公尺)	深度 (公尺)	碼頭型式	泊船總噸 (公噸)
西 28 <sup>B</sup>	103.50	- 3.50	雙壁 L型塊式	500
西 29	178.00	- 4.50 - 6.50	L 型塊式	3,000
西 30	180.00	- 10.50	沈箱擁壁式	20,000
西 31	165.00	- 10.50	" "	"
西 32	165.00	- 11.00	" "	"
西 33	210.00	- 11.50	沈箱擁壁式 排樁式	30,000
西 33 <sup>B</sup>	95.80	- 6.50	排樁式 方塊、L型塊式	3,000
海濱公園碼頭	297.27	- 3.64	混擬方塊擁壁式	
東 1	108.00	- 4.50	L 型塊式	500
東 2	200.00	- 9.00	Z - 38 鋼板樁	20,000
東 3	170.00	- 9.00	" "	10,000
東 4	306.30	- 9.00	" "	"
東 5	169.20	* - 9.00	" "	"
東 6	180.00	- 9.00	" "	20,000
東 7	178.00	- 9.00	" "	10,000

表3-4 基隆港 (續)

碼頭編號	長度 (公尺)	深度 (公尺)	碼頭型式	泊船總噸 (公噸)
東 8	180.00	- 9.00	Z - 38 鋼板樁	10,000
東 9	180.00	- 9.00	" "	"
東 10	300.00	- 12.00	排樁棧橋式	30,000
東 11	200.00	- 12.00	" "	"
東 12	50.00	- 5.00	方塊式	3,000
東 14	116.00	- 5.00	" "	300
東 15	198.00	- 3.00	方塊式 板樁式	"
東 16	259.00	- 3.00	方塊重力式 板樁式	"
東 17	150.00	- 5.00	L 型塊式	500
東 19	220.00	- 9.00	方塊式 棧橋式	15,000
東 20	120.00	- 6.00	L 型消波式	3,000
東 21	113.00	- 9.00	沈箱式	5,000
東 22	113.00	- 9.00	" "	"

表3-5 台中港現有碼頭概況

碼頭編號	長度 (公尺)	深度 (公尺)	碼頭型式	泊船總噸 (公噸)
1	250	-13	沈箱式	50,000
2	250	-13	沈箱式	50,000
3	250	-13	沈箱式	50,000
4	220	-11	沈箱式	30,000
4A	185	-9	沈箱式	12,000
5A	220	-11	PC樁	30,000
5	200	-11	L型塊式	30,000
6	200	-11	PC樁 L型塊式	30,000
7	200	-11	PC樁 L型塊式	30,000
8	200	-11	PC樁	30,000
8A	260	-11	L型塊式	30,000
9	260	-14	PC樁 L型塊式	60,000
10	320	-13	PC樁 L型塊式	50,000
11	320	-13	PC樁 L型塊式	50,000
12	200	-11	PC樁 L型塊式	30,000
13	200	-11	PC樁 L型塊式	30,000
14	180	-10	PC樁 L型塊式	20,000

表3-5 台中港 (續)

碼頭編號	長度 (公尺)	深度 (公尺)	碼頭型式	泊船總噸 (公噸)
15	180	-10	PC 樁	20,000
23	180	-10	沈箱式	20,000
24	180	-10	沈箱式	20,000
25	200	-11	沈箱式	30,000
26	200	-11	PC 樁	30,000
27	200	-11	PC 樁	30,000
28	145	-11	PC 樁	30,000
29	250	-14	PC 樁	60,000
31			PC 樁	
32	300	-14	PC 樁	60,000
W1	300	-13	沈箱式	50,000
W2	250	-13	PC 樁	50,000
	250	-14		60,000

表3-6 高雄港現有碼頭概況

碼頭編號	長度 (公尺)	深度 (公尺)	碼頭型式	泊船總噸 (公噸)
1	260	-9	棧橋式 (鋼管樁)	8,000
2	137	-9	方塊式	8,000
3	150	-9	方塊式	8,000
4	150	-9	方塊式	8,000
5	150	-9	方塊式	8,000
6	150	-9	方塊式	8,000
7	150	-9	方塊式	8,000
8	150	-9	棧橋式 (P、C樁)	8,000
9	142	-9	棧橋式 (P、C樁)	8,000
10	150	-9	棧橋式 (P、C樁)	8,000
11	161	-9	鋼板樁	8,000
12	156	-9	鋼板樁	8,000
13	150	-9	棧橋式	8,000
14	150	-9	棧橋式	8,000
15	150	-9	棧橋式	8,000

表3-6 高雄港 (續)

碼頭編號	長度 (公尺)	深度 (公尺)	碼頭型式	泊船總噸 (公噸)
16	180	-9	棧橋式	8,000
17	150	-9	棧橋式	8,000
18	150	-9	R、C板樁	8,000
19	151	-9	R、C板樁	8,000
20	151	-9	R、C板樁	8,000
21	123	-5	R、C板樁	1,000
30	189	-5 -10	R、C板樁	3,000
31	200	-10.5	棧橋式	15,000
32	200	-10.5	棧橋式	15,000
33	200	-10.5	棧橋式	15,000
34	200	-10.5	鋼板樁	15,000
35	215	-10.5	鋼板樁	15,000
36	200	-10.5	鋼板樁	15,000
37	200	-10.5	鋼板樁	15,000
38	200	-10.5	鋼板樁	15,000

表3-6 高雄港 (續)

碼頭編號	長度 (公尺)	深度 (公尺)	碼頭型式	泊船總噸 (公噸)
39	200	-10.5	鋼板樁	15,000
40	214	-10.5	鋼板樁	15,000
41	204	-10.5	鋼板樁	15,000
42	242	-10.5	鋼板樁	15,000
43	188	-10.5	鋼板樁	15,000
44	199	-10.5	鋼板樁	15,000
45	200	-10.5	鋼板樁	15,000
46	200	-11	鋼板樁	15,000
47	200	-11	鋼板樁	15,000
48	260	-10.5	棧橋式 (P、C樁)	15,000
49	200	-10.5	棧橋式 (P、C樁)	15,000
50	200	-10.5	棧橋式 (P、C樁)	15,000
51	200	-10.5	棧橋式 (P、C樁)	15,000
52	200	-10.5	棧橋式 (P、C樁)	15,000
53	200	-10.5	棧橋式 (P、C樁)	15,000

表3-6 高雄港 (續)

碼頭編號	長度 (公尺)	深度 (公尺)	碼頭型式	泊船總噸 (公噸)
54	200	-10.5	鋼板樁	15,000
55	200	-10.5	鋼板樁	15,000
56	200	-10.5	鋼板樁	15,000
57	184	-10.5	鋼板樁	15,000
58	306	-4.5 -10.5	鋼板樁	5,000
61	230	-10.5	鋼板樁	17,000
62	230	-10.5	鋼板樁	17,000
63	275	-12	鋼板樁	30,000
64	245	-12	鋼板樁	30,000
65	244	-12	鋼板樁	30,000
66	255	-12	鋼板樁	30,000
67	185	-12	鋼板樁	30,000
68	320	-14	鋼板樁	70,000
69	320	-14	鋼板樁	70,000
70	320	-14	鋼板樁	70,000



表3-7 花蓮港現有碼頭概況

碼頭編號	長度 (公尺)	深度 (公尺)	碼頭型式	泊船總噸 (公噸)
1	123	-7.5	重力式	6,000
2	153	-7.5	重力式	6,000
3	134	-7.5	重力式	6,000
4	160	-9.5	鋼板樁	12,000
5	160	-9.5	鋼板樁	12,000
6	150	-8.5	鋼板樁	10,000
7	120	-6.5	重力式	4,000
8	220	-10	鋼板樁	15,000
9	103	-9.5	重力式	500
10	183	-9.5	重力式	12,000
11	185	-9.5	重力式	10,000
12	150	-7.5	重力式	7,000
13	185	-9.5	重力式	10,000
14	185	-9.5	重力式	10,000
15	100	-9.5	重力式	15,000



表3-8 蘇 澳 港 現 有 碼 頭 概 況

碼 頭 編 號	長 度 (公尺)	深 度 (公尺)	碼 頭 型 式	泊 船 總 噸 (公噸)
1	210	- 4.5~ - 11.0	方 塊 重 力 式	6,000
2	175	- 11.0	沈 箱 消 波 式	20,000
3	215	- 11.0	" "	30,000
4	300	- 11.0	沈 箱 重 力 式	"
5	200	- 11.0	" "	"
6	290	- 15.0	鋼 管 樁 橋 墩 式	80,000
7	240	- 13.0	" "	50,000
8	124	- 7.5	方 塊 達 恩 塊 重 力 式	6,000
9	124	- 7.5	" "	"
10	175	- 9.0	基 樁 棧 橋 式	12,000
11	175	- 9.0	" "	12,000
12	200	- 9.0	" "	12,000
13	180	- 9.0	" "	12,000

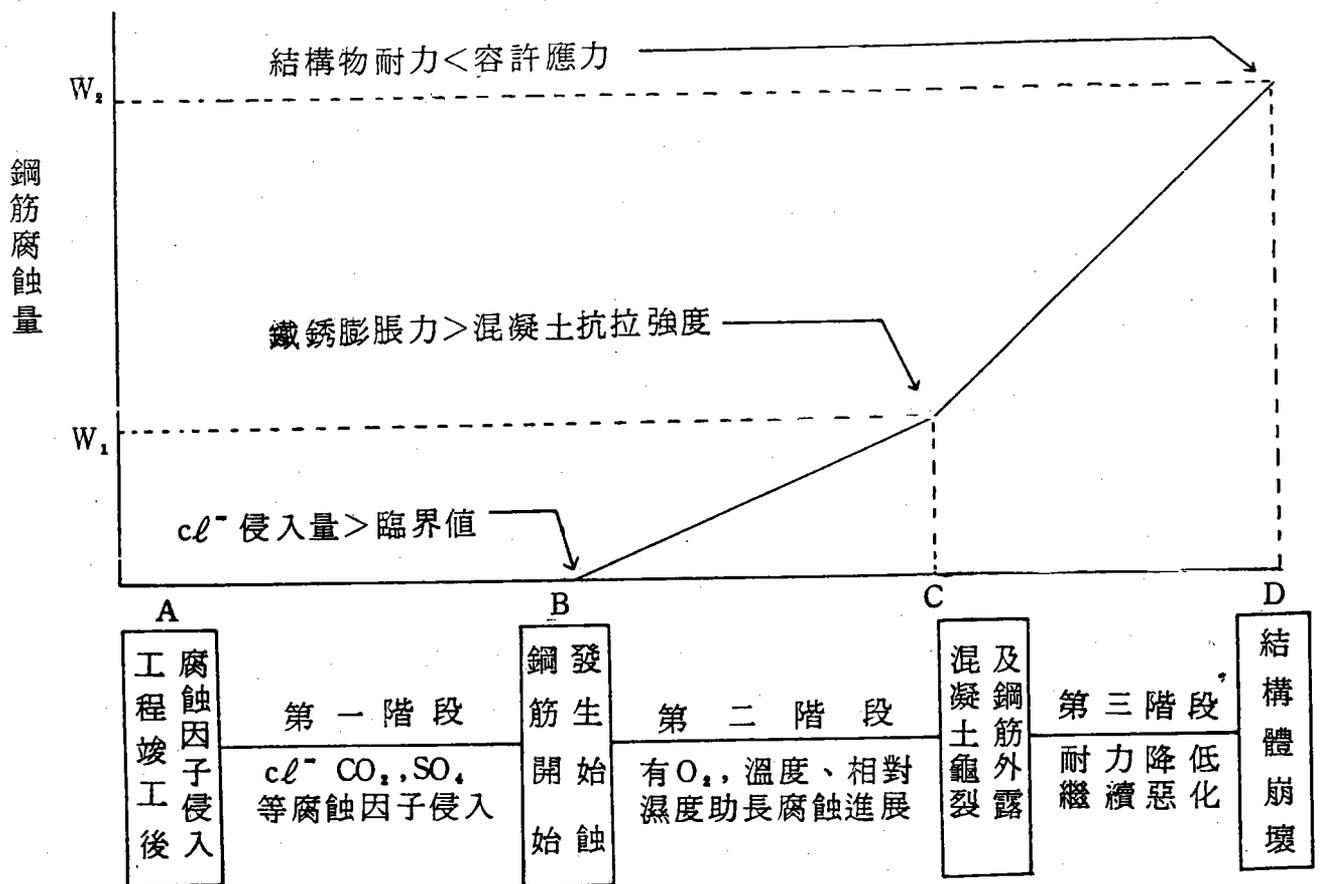


圖3-1 鋼筋混凝土結構物發生腐蝕，耐力降低損壞經過

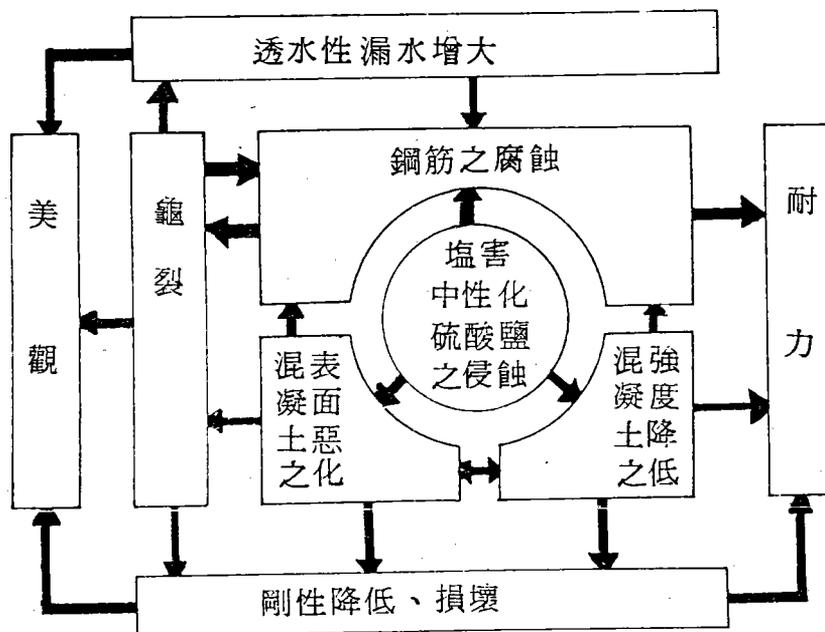


圖3-2 鋼筋混凝土結構物代表性劣代現象與使用性能降低關係

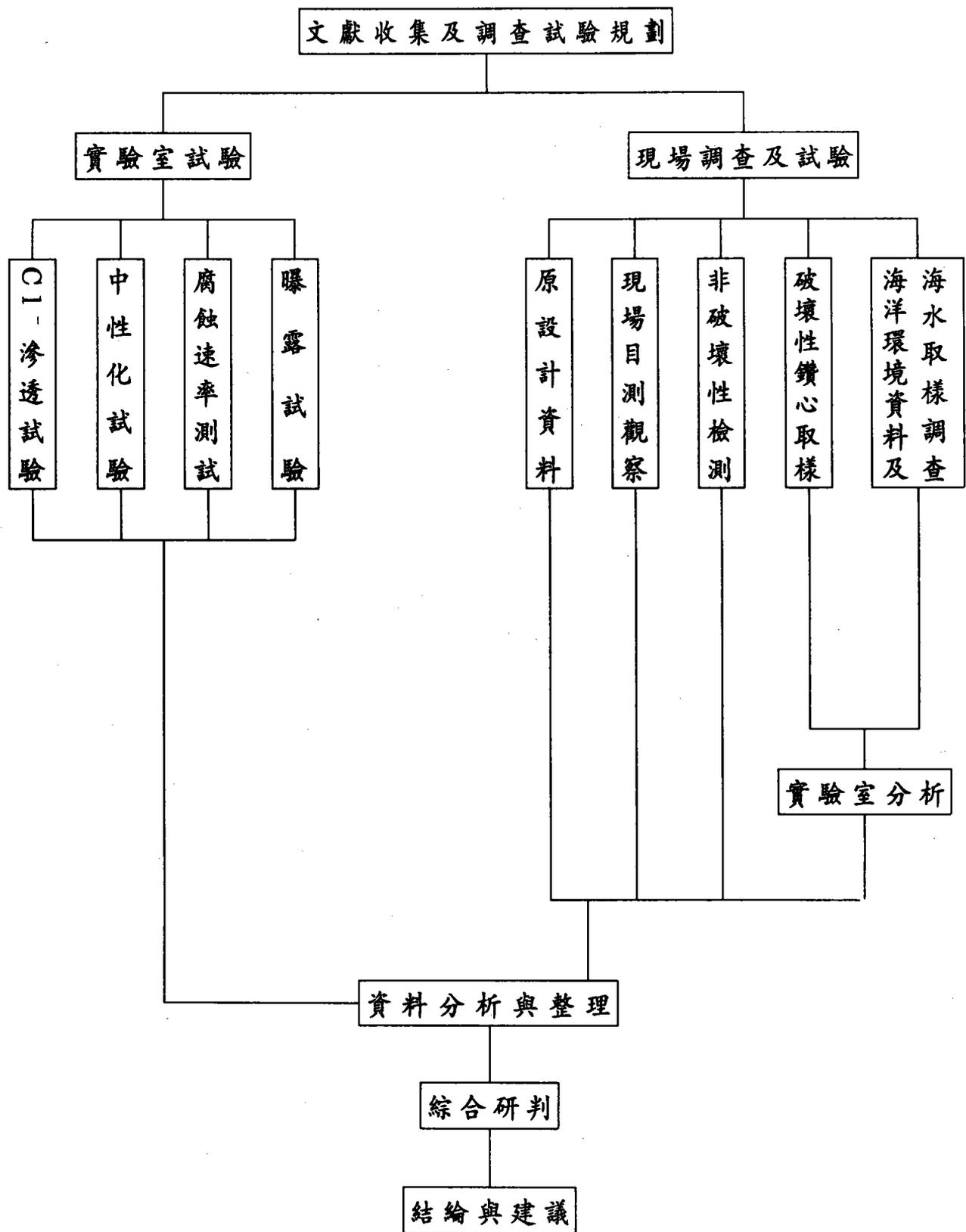


圖 3-3 港灣 RC 結構物耐久性研究流程圖

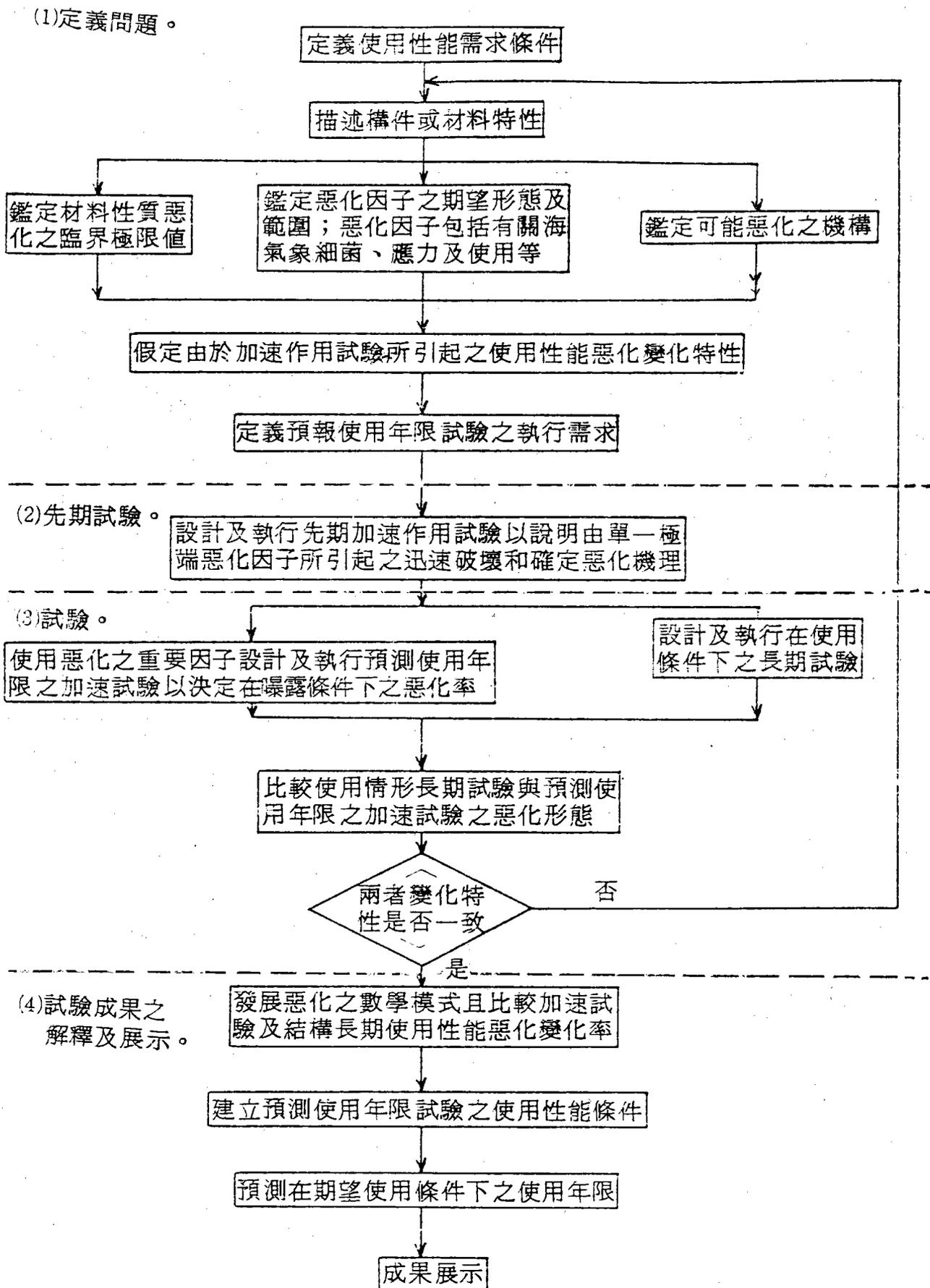
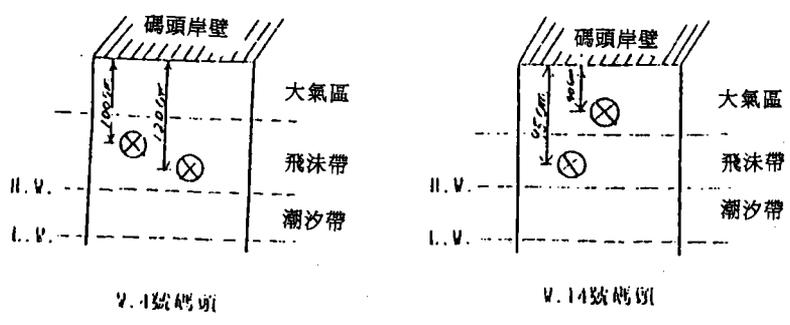


圖 3-4 ASTM E632 預測使用年限程序

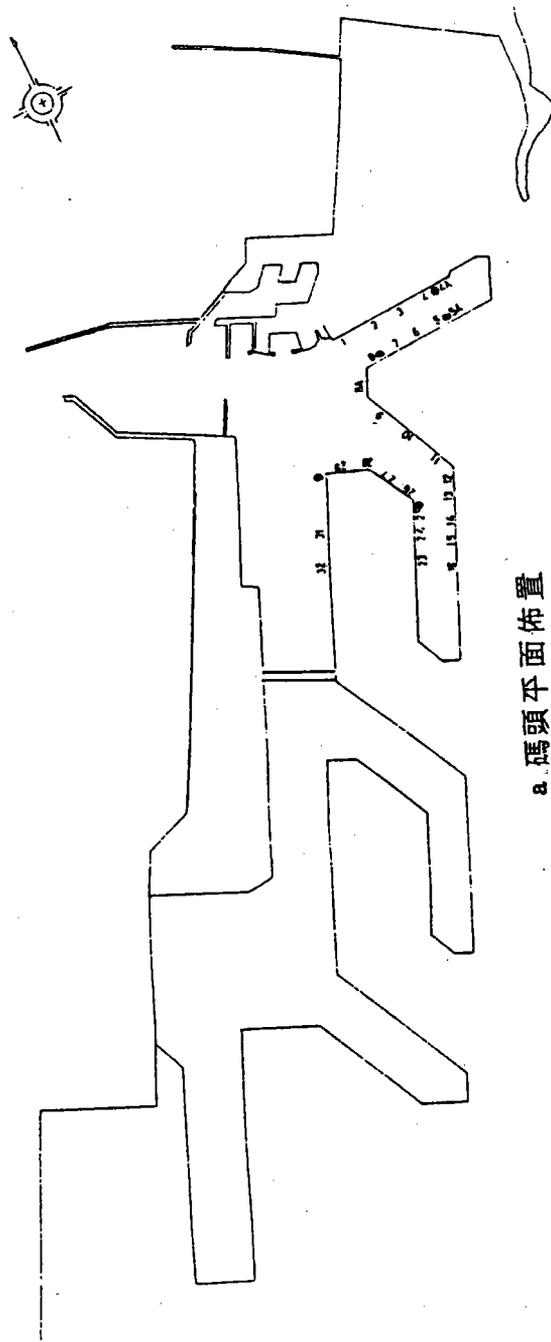


(a) 碼頭平面佈置

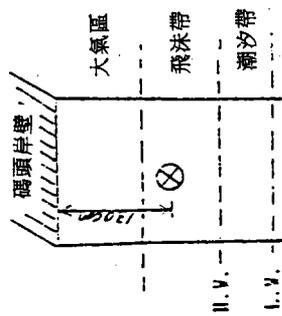


(b) 鑽心取樣位置

圖 3-5 基隆港現有碼頭平面佈置及取樣位置圖



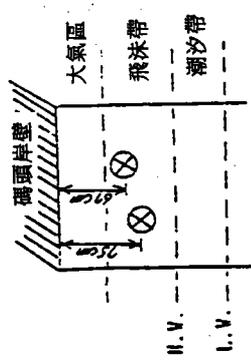
a. 碼頭平面佈置



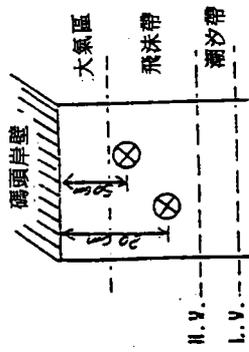
3號碼頭

(b) 鑽心取樣位置

圖 3-6 台中港現有碼頭平面佈置及取樣位置圖

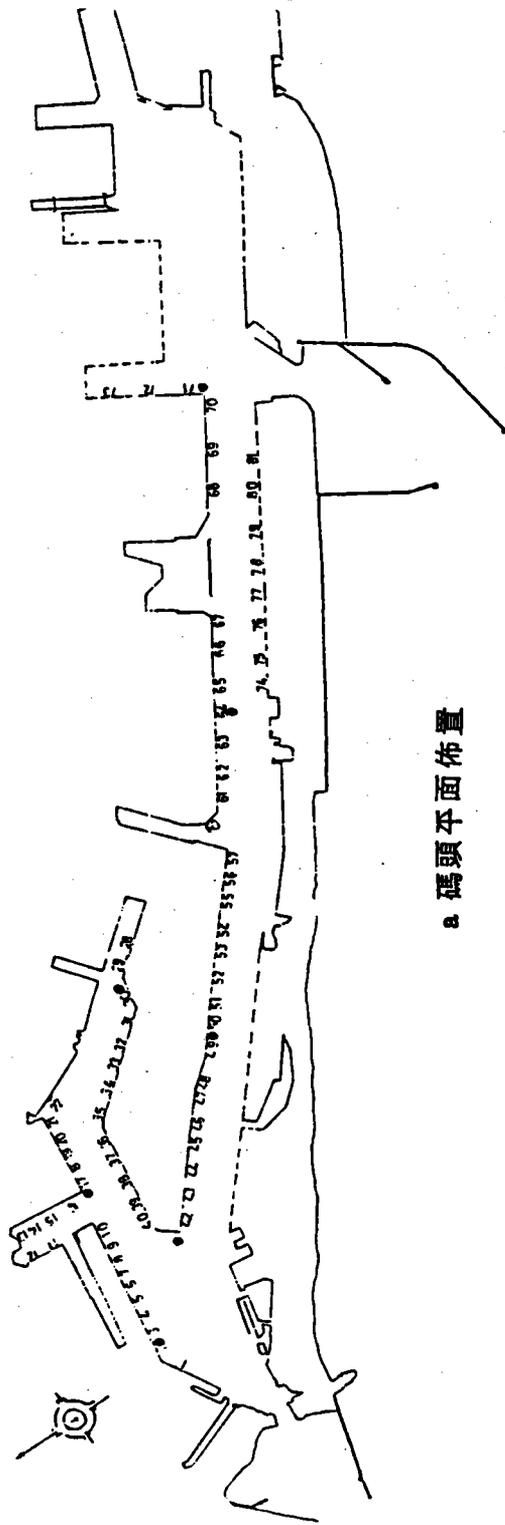


第四船渠碼頭



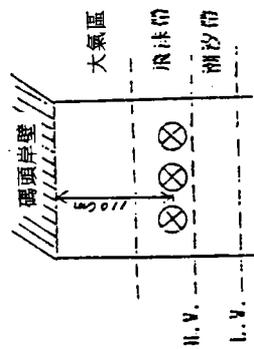
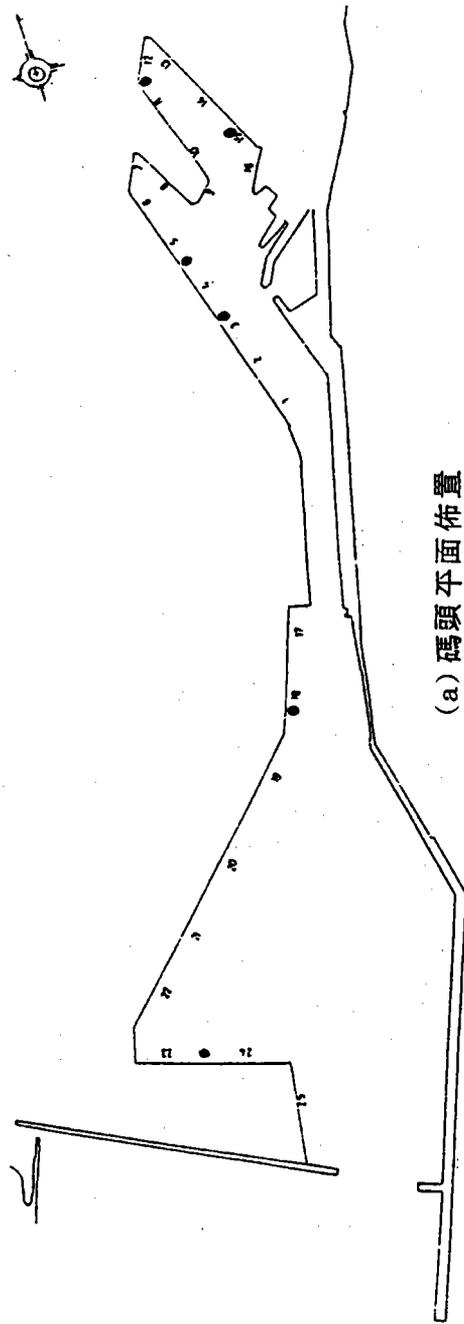
第九船渠碼頭

(b) 鑽心取樣位置



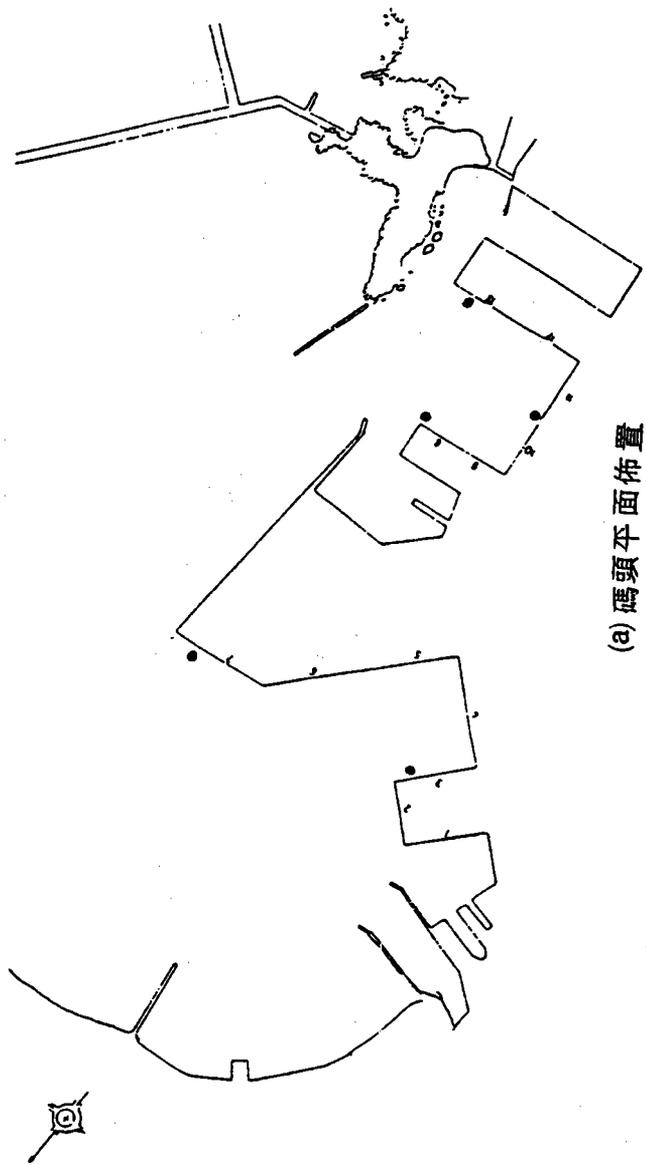
a 碼頭平面佈置

圖 3-7 高雄港現有碼頭平面佈置及取樣位置圖

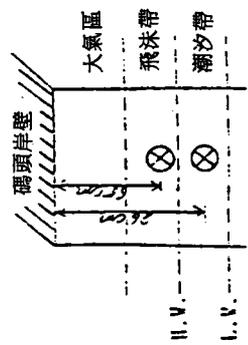


3號碼頭

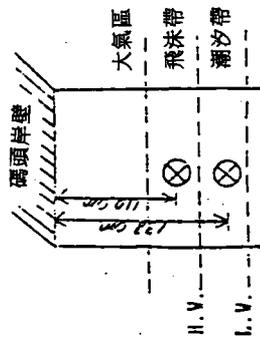
圖 3-8 花蓮港現有碼頭平面佈置及取樣位置圖



(a) 碼頭平面佈置



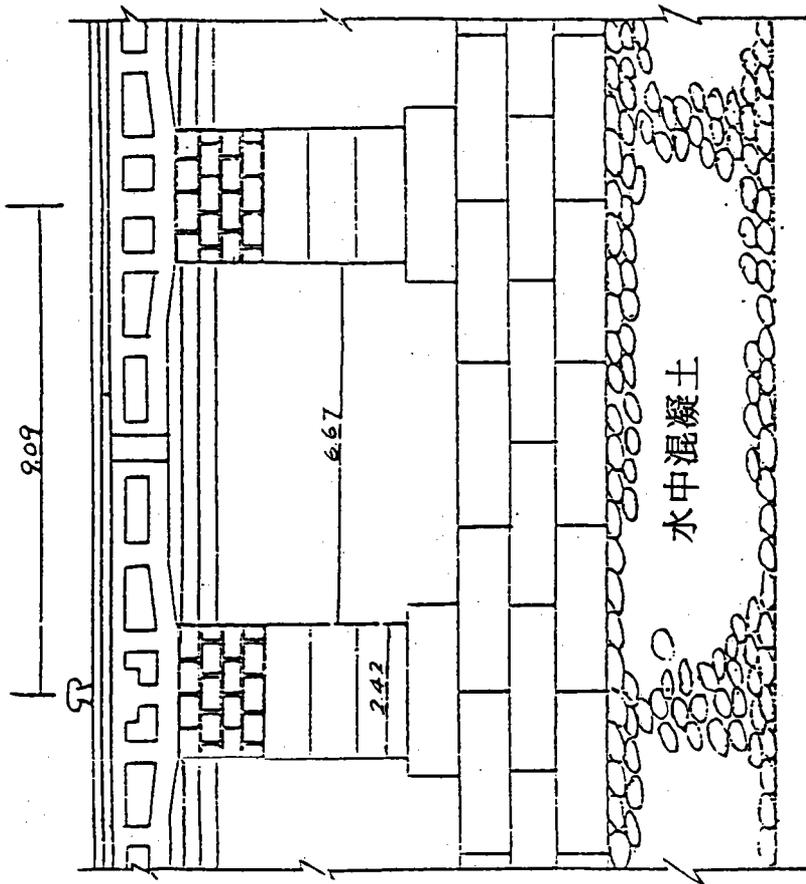
2號碼頭



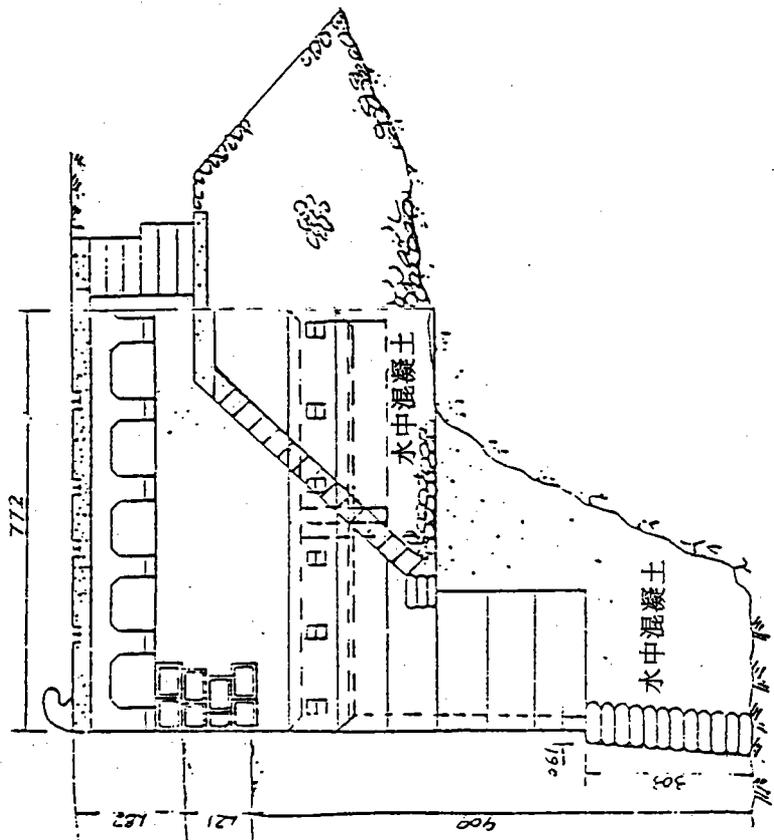
10號碼頭

(b) 預心取樣位置

圖 3-9 蘇澳港現有碼頭平面佈置及取樣位置圖

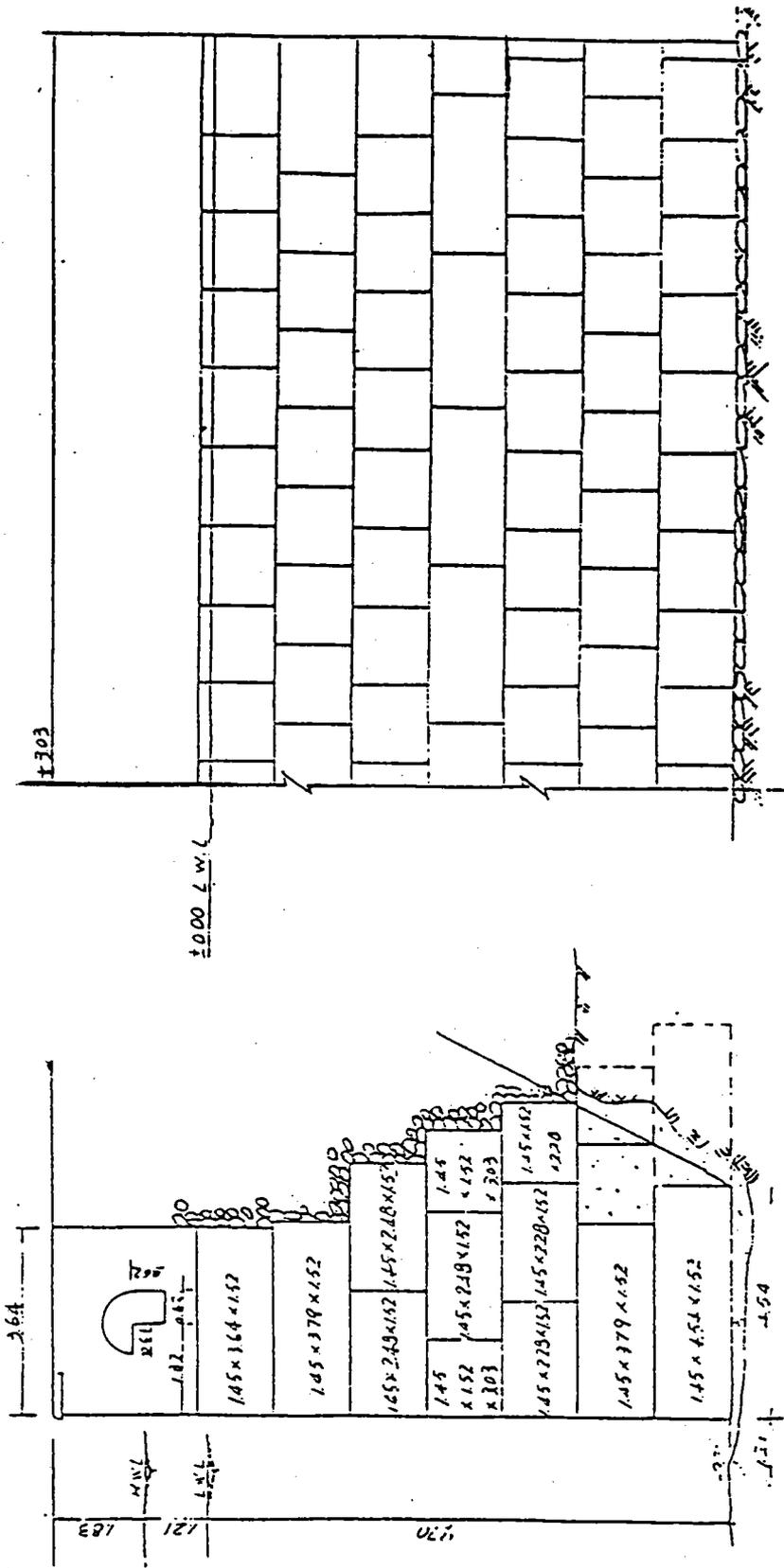


正面圖



剖面圖

圖 3-10 橋墩式碼頭構造圖



正面圖

剖面圖

圖 3-11 混凝土方塊擁壁式碼頭斷面圖





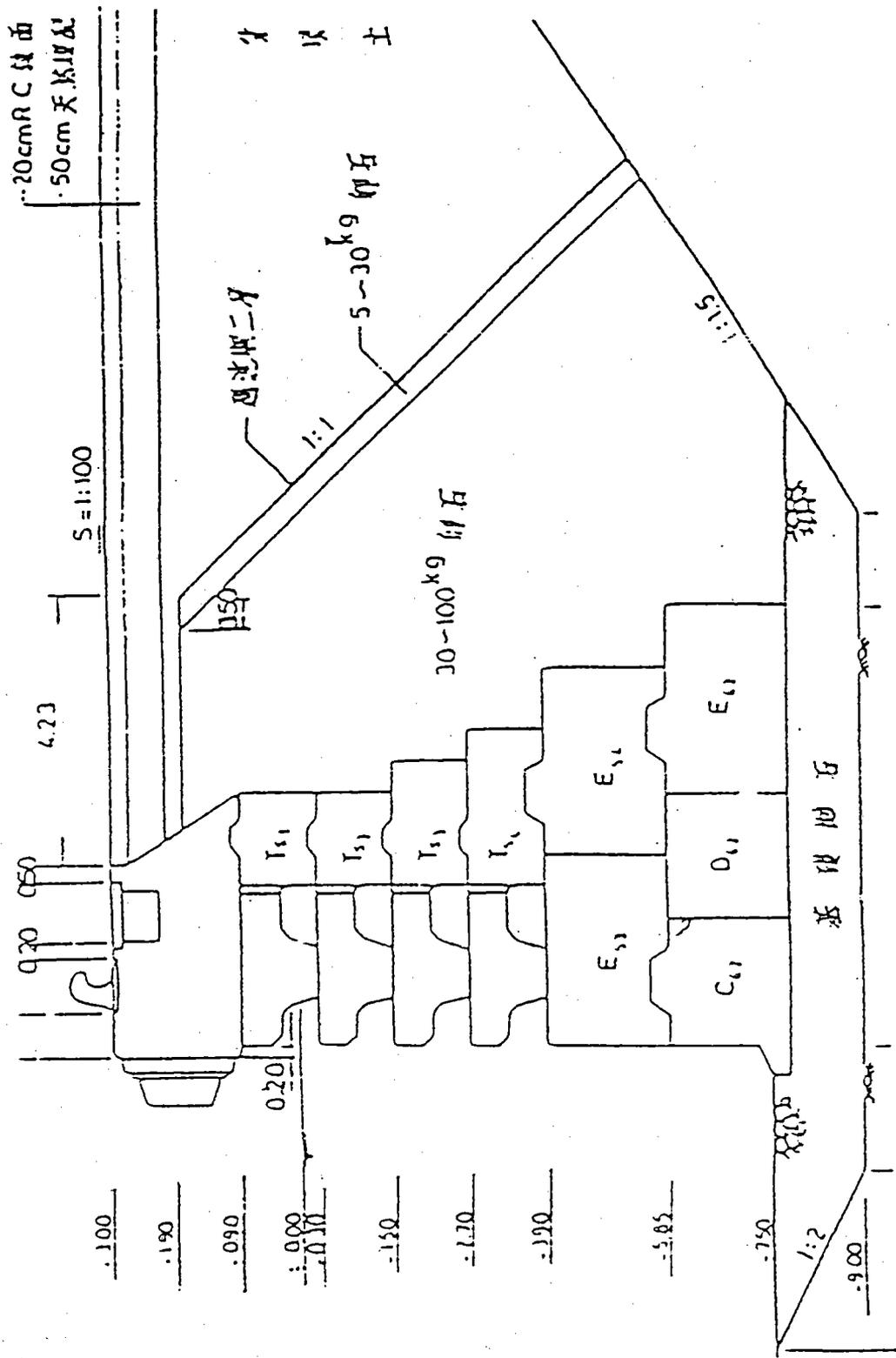


圖 3-14 沉箱消波式碼頭斷面圖

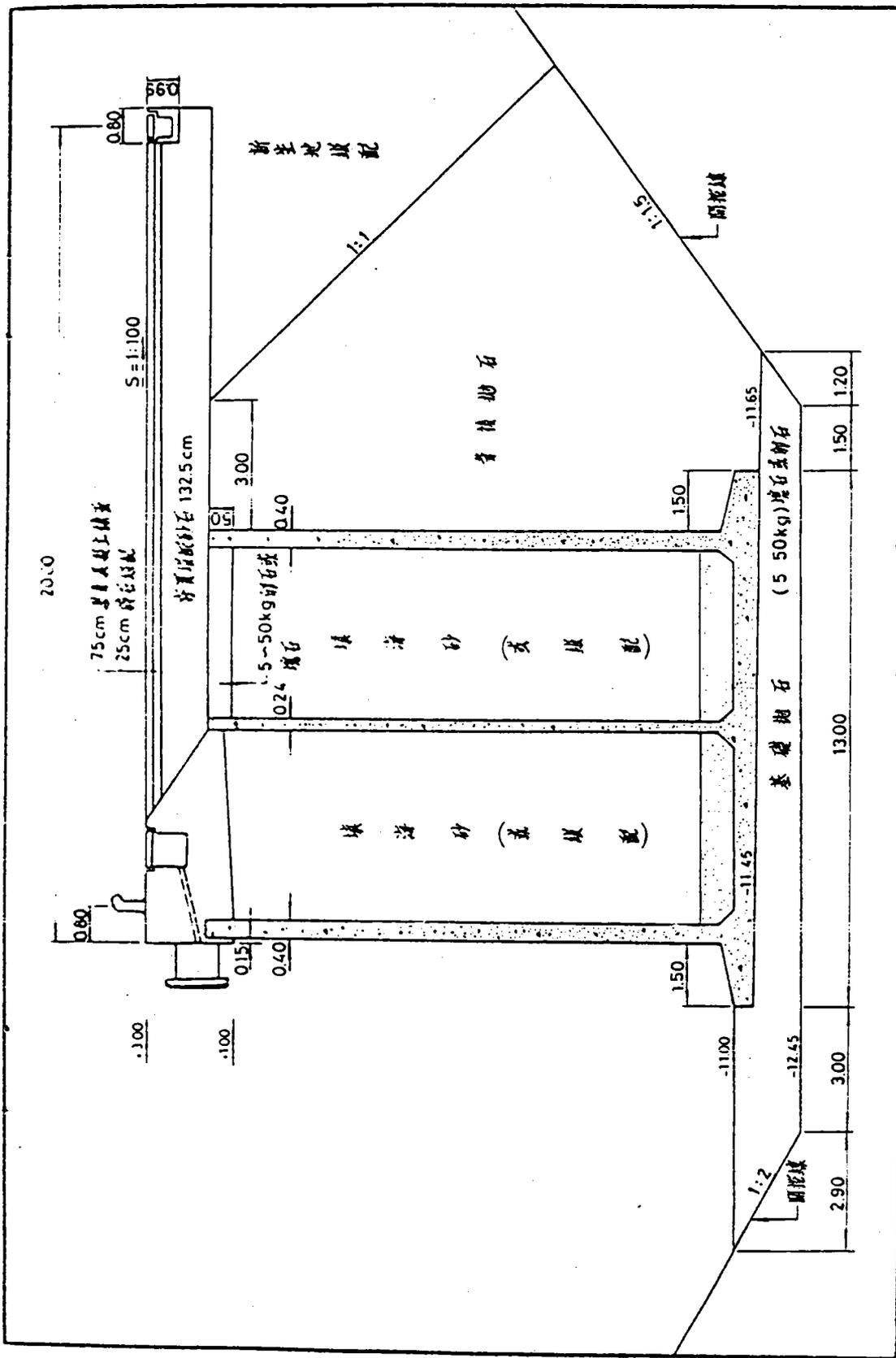


圖 3-15 代表性沈箱式碼頭斷面

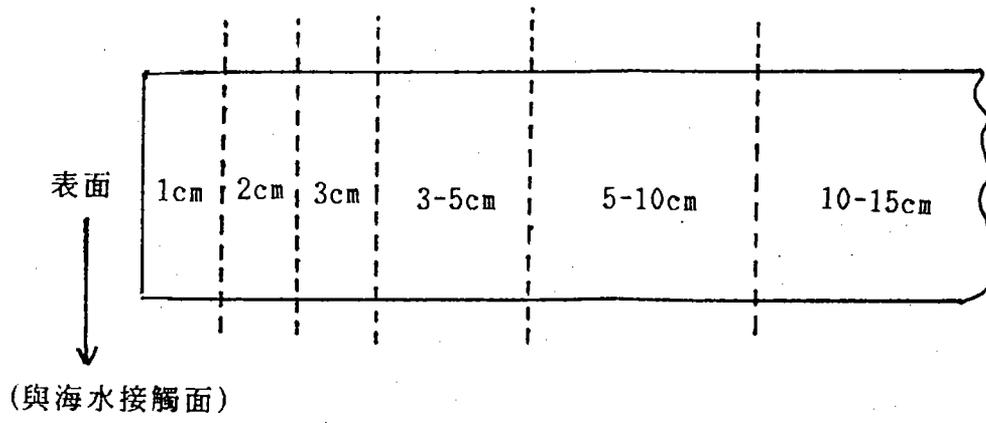


圖 3-16 鑽心試體依深度切割之簡圖

# 肆、海氣象調查分析

林維明\*

港灣鋼筋混凝土因曝露在海洋環境下，而大氣中含有氧氣、水分、CO<sub>2</sub>與其他易導致腐蝕之因子。氣候影響因子包括太陽之輻射、溫度、濕度、風及空氣中所含污染物等而海洋之潮位變化亦影響結構物之乾濕交替作用，受波浪沖擊將造成表面磨耗、沖刷、孔蝕等現象，因此本調查工作主要考慮氣象因子如風、溫度、濕度、雨量，雨水中pH值、潮位等資料，分述如下：

## 4-1 台灣地區氣候概述

台灣本島之山地佔全面積之64%（圖4-1），因地處中低緯度而為最大海洋（太平洋）與最大陸地（中國大陸）間之大島，故屬亞熱帶季風氣候，島內縱貫台灣中部偏東之中央山脈與冬夏盛行風斜交。冬季受大陸高壓之影響，屬東北季風型天氣；春夏間有連綿陰雨之梅雨期；夏季受西南季風及副熱帶高壓迴流影響，屬濕熱多雨型天氣；夏秋兩季常遭受颱風侵襲。

一般而言，台灣地區全年降雨量堪稱充足，但季節與地區分配不均勻；逐年異差亦大；以溫度而言，冬季南北溫差較大，而夏季則相差極微；冬季盛行之東北季風較為強勁，而夏季西南季風及迴流東南風均較緩和，但當颱風來襲或鋒面南下時，則風力狂暴，常有災情發生。

## 4-2 風速、風向分佈

海風常狹帶含有鹽份之水汽侵蝕結構體，因此一般向風面易發生腐蝕，根據中央氣象局之資料繪製五大港的風速、風向玫瑰圖，按1971~1980年十年期間全年平均風玫瑰圖及各月份之風玫瑰花圖分別繪製如圖4-2至圖4-6。所示，由這些圖可見五大港之風速、風向分佈之變化性大，因此腐蝕特性亦隨之而變以整體優勢風向而言，台中港主要吹北風，基港為東北風，高港分佈於東北至西北間而東部地區則分散在東北與西南風。

---

\*省交通處港灣技術研究所研究員兼港工材料組組長

### 4-3 溫度、雨量之氣候分布

台灣地區正式最早保存的氣象資料起自 1896 年，專用氣象站紀錄大多起自 1956 年，論時間可謂相當長久，現有之測站共有 900 餘站，論數量亦可謂相當的多，照理資料相當充份，應可繪成非常詳細之氣候圖，然而事實不然，其原因甚多，包括氣象站分佈不均勻，紀錄年代長短不一，紀錄中斷，觀測儀器更動，觀測人員素質不良等原因，因此氣象資料完整性及一致性均頗有問題。

氣象資料之來源有二種：一為中央氣象局所屬 25 個測站之氣象觀測資料；另一為台灣省水利局，台灣糖業公司，台灣電力公司，台灣省糧食局，台灣省菸酒公賣局，台灣省林務局及各地農田水利會等三十餘個單位所設置的雨量站，農業氣象站，氣候站等專用氣象觀測站之資料。

根據世界氣象組織之建議，1901-1930，1931-1960 及 1961-1990 每 30 年為計算氣候標準平均值之統計期間，其他任何連續三十年之統計值則為準平均值，因此中央氣象局 1991 年所出版台灣地區氣候圖集係選擇資料最完整的 1956-1985 年作為統計期間，因此氣候站有 281 站（圖 4-17）雨量站有 1293 站（圖 4-18）可供溫度、雨量之氣候分析。

#### (一) 溫度方面

##### 1. 全年平均氣溫（圖 4-19）

- (1) 溫度分佈隨着緯度、地形有明顯差異。
- (2) 在中央山脈、東部海岸山脈、西北部大屯山附近的氣溫較低。
- (3) 台中以南、新竹地區、宜蘭平原、東部海岸等地方的氣溫在 22°C 以上，其中高雄及台東地方更達 24°C。

##### 2. 冬季（一月）平均氣溫（圖 4-20）

- (1) 山地與平地大致以 14°C 等溫線加以區別。
- (2) 在平地地區、嘉義以南、南投、東部縱谷及海岸地區的氣溫均大於 16°C。

##### 3. 春季（四月）平均氣溫（圖 4-21）

- (1) 山地與平地大致以 20°C 等溫線區別。
- (2) 西部地區 22°C 是南北分界溫度。

##### 4. 夏季（七月）平均氣溫（圖 4-22）

- (1) 山地與平地大致以 26°C 之等溫線區別。

(2)等溫線分佈呈南北方向，即平行中央山脈之分布。

#### 5. 秋季（十月）平均氣溫（圖4-23）

(1)南北方向可以 $24^{\circ}\text{C}$ 等溫線區別。

(2)平地與山地大致以 $22^{\circ}\text{C}$ 等溫線區別。

(3)東部地區與前面各季分佈不同。

溫度影響混凝土之熱脹冷縮，造成混凝土劣化而使腐蝕因子容易侵入，根據中央氣象局15年之資料繪製五大港的平均氣溫變化如圖4-24所示。由圖中可見在夏季各港之氣溫變化較小，而在冬季則較大。

### (二) 雨量方面

#### 1. 全年平均降雨量（圖4-25）

(1)山區雨量多，平地雨量少。

(2)若以超過4000公厘而言，有五個地區，即台灣北部山區，宜蘭南方山區，瑞穗西邊山區，阿里山及南部山區等之雨量最多。

#### 2. 冬季（一月）平均降雨量（圖4-26）

以北部、東北部之山區雨量較多，中部、南部雨量較少。

#### 3. 春季（四月）平均降雨量（圖4-27）

中央山脈西邊雨量多，平均在100公厘以上，中部、南部及東南部雨量較少。

#### 4. 夏季（七月）平均降雨量（圖4-28）

山區雨量較多，平地雨量較少，尤其是南部山區平均降雨量達800公厘以上。

#### 5. 秋季（十月）平均降雨量（圖4-29）

北部山區及中央山脈以東地區，雨量較多，其中以宜蘭到花蓮山區為最多（超過1000公厘）。

雨量多，則較為潮濕，為易於發生腐蝕之條件，經整理中央氣象局15年之平均降雨量資料，繪製五大港之平均降雨量如圖4-30所示。由圖中可見在冬秋兩季以基隆為最高，花蓮與蘇澳次之，而春季則以台中港較高，高雄港次之，而夏季則以高雄港較多與上述之全省雨量分佈相當一致。

### 4-4 相對濕度分佈

混凝土之透水性與相對濕度有關，而且鋼筋之腐蝕速率亦受相對濕度之影響，根據中央氣象局15年之資料繪製五大港之相對濕度如圖4-31~4-32。由圖中可見蘇

澳港之相對濕度一直是最高，基隆港次之，而冬季時高雄為最低，這與基隆及蘇澳地區多雨及靠山邊有關。

#### 4-5 酸雨

根據台灣電力公司電力研究所委託國立台灣大學環境工程學研究所所作之台灣酸雨調查研究報告指出經統計四季之雨水中 pH 值等濃度圖如圖 4-33 至圖 4-36 所示，所得之結論如下：

1. 就各地雨水之 pH 值言，臺灣地區之酸雨現象相當普遍可見，尤其是民國 75 年夏季之雨水，各區之 pH 平均值均在 4.74 以下，而且在夏季降雨中有 76% 場雨之 pH 值在 5.6 以下，即臺灣各地每 100 場雨有 76 場雨為酸雨，值得注意。
2. 以不同季節而言，pH 值低於 5.6 之機率以秋季最低（46%），夏季最高（76%）。就不同氣候分區而言，東海岸區為最低（33.5%），而東北及北部地區為最高（分別為 64.5% 及 68.5%）
3. 就空間之差異性而言，臺灣地區雨水 pH 值以臺北及高雄地區較低，可能因兩地工商業繁榮，鄰近地區工廠林立，交通運輸頻繁，污染排放量較大所致。另外在蘇澳地區則因石灰岩礦之開採，因此灰塵濃度較高，雨水中 pH 值有偏高之趨勢。
4. 臺灣地區之雨水之水質與世界各國比較，發現  $\text{Na}^+$  與  $\text{Cl}^-$  之濃度有偏高之現象，此結果與英國之情況類似，因兩地均為海島之故，就  $\text{SO}_4^{2-}$  而言，臺灣地區與世界各國相當， $\text{NO}_3^-$  則略偏低，可能是臺灣地區汽車數量較國外為少之故；至於  $\text{Ca}^{2+}$ ， $\text{Mg}^{2+}$  則有偏高之現象。

綜合上述，可見五大港之酸雨現象相當普通，此現象將對結構物之腐蝕構成威脅。

#### 4-6 潮位

潮位有下列各種名稱，如圖 4-37 所示。定義如下：

- (一) 大潮：在朔望附近時之潮汐。
- (二) 大潮高潮面：大潮時之滿潮面，或稱朔望滿潮面。
- (三) 大潮低潮面：大潮時之低潮面，或稱朔望低潮面。
- (四) 小潮：在上下弦附近之潮汐。

(五)大潮升：從基準水面（在亞洲以印度洋最低潮位作基準）量到大潮高潮面。

(六)小潮升：基準水面量到小潮高潮面。

以上所述為天文潮位（Astronomical tide），可自我國海軍海道測量局出版之潮汐表，查得本省各主要港口資料。根據各港之實測資料得出五大港口之天文潮統計資料如表4-1所示。由表可見台中港之潮差為最高，因此在潮汐帶容易發生乾濕循環作用，使得結構物提早惡化。

## 參考文獻

1. 中央氣象局（1991）台灣地區氣候圖集。
2. 中央氣象局“氣象年報”（1972-1985）。
3. 台灣電力公司“台灣地區酸雨調查研究(二)期末報告”，台電75年度研究發展專題編號118。
4. 幼獅文化事業公司“公路橋樑設計規範”，民國76年出版第134頁。
5. 中央氣象局氣象統計資料（1970-1990）。
6. 湯麟武“海岸工程規劃設計”，農復會特刊新二號，民國60年第208頁。
7. 基隆港務局蘇澳港工程處“蘇澳港興建工程”上册，民國72年11月，第89頁。

圖4-1 臺灣地區地形圖

1. Topography of Taiwan Area



蒲福風級

> 7

4 - 6

1 - 3

頻率百分比

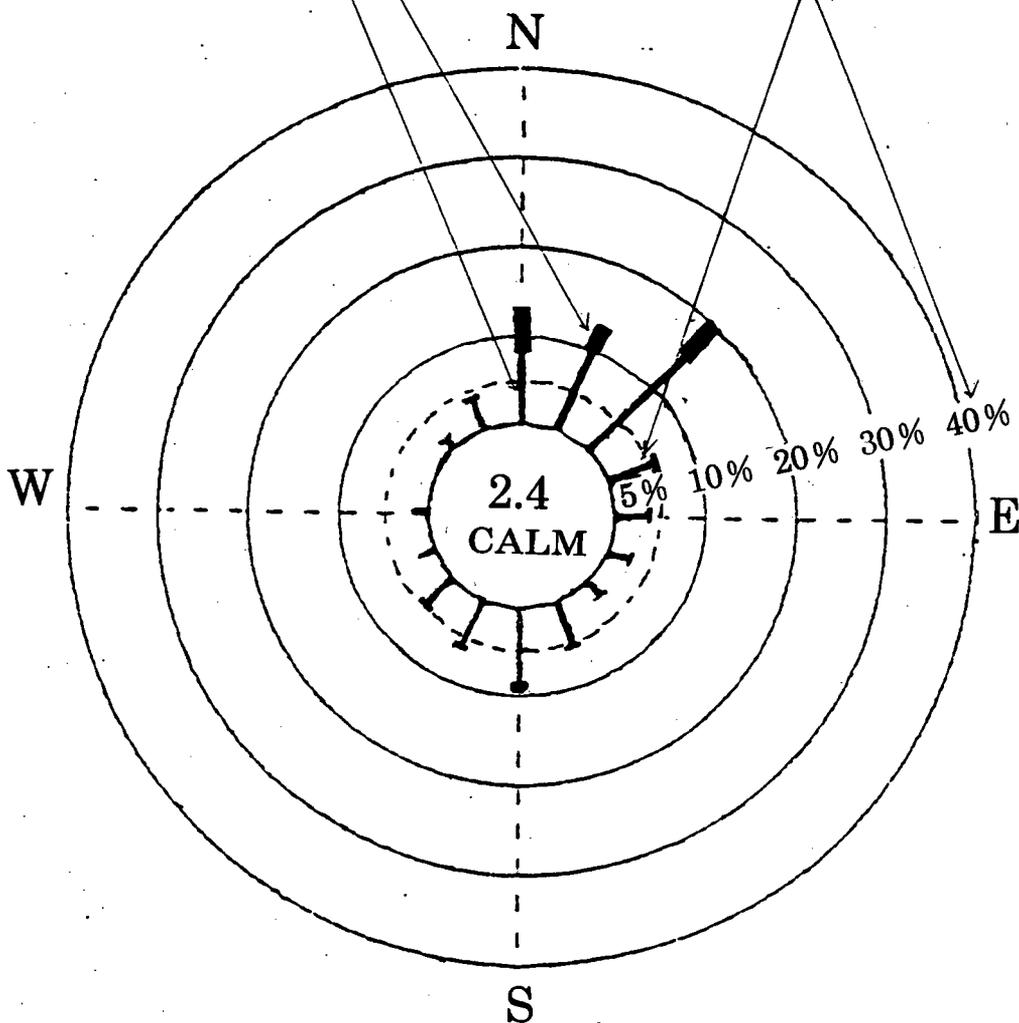


圖 4-2 基隆港全年風玫瑰圖 ( 1971 ~ 1980 )

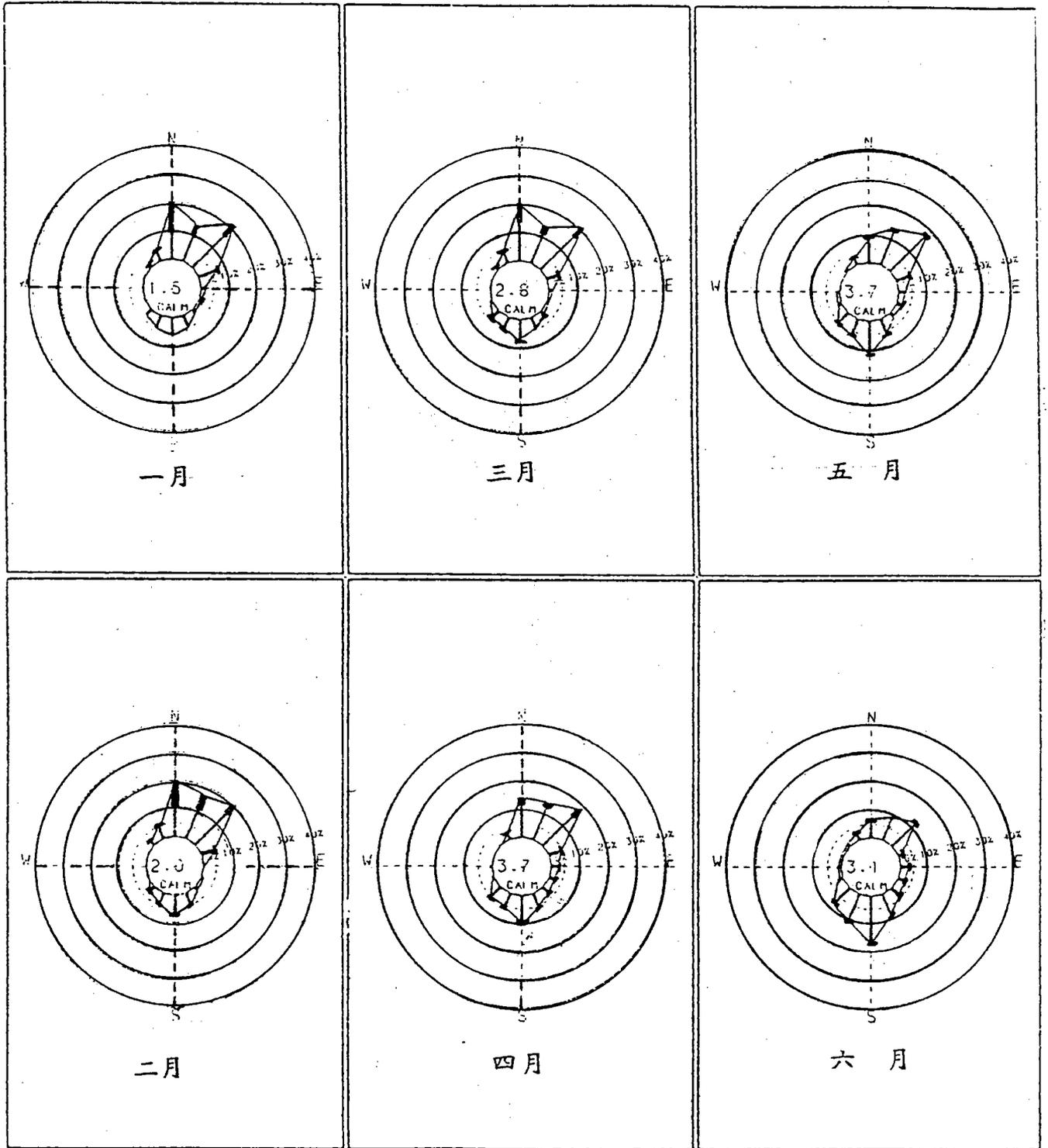


圖 4-3 基隆各月風玫瑰圖 (1971 ~ 1980)

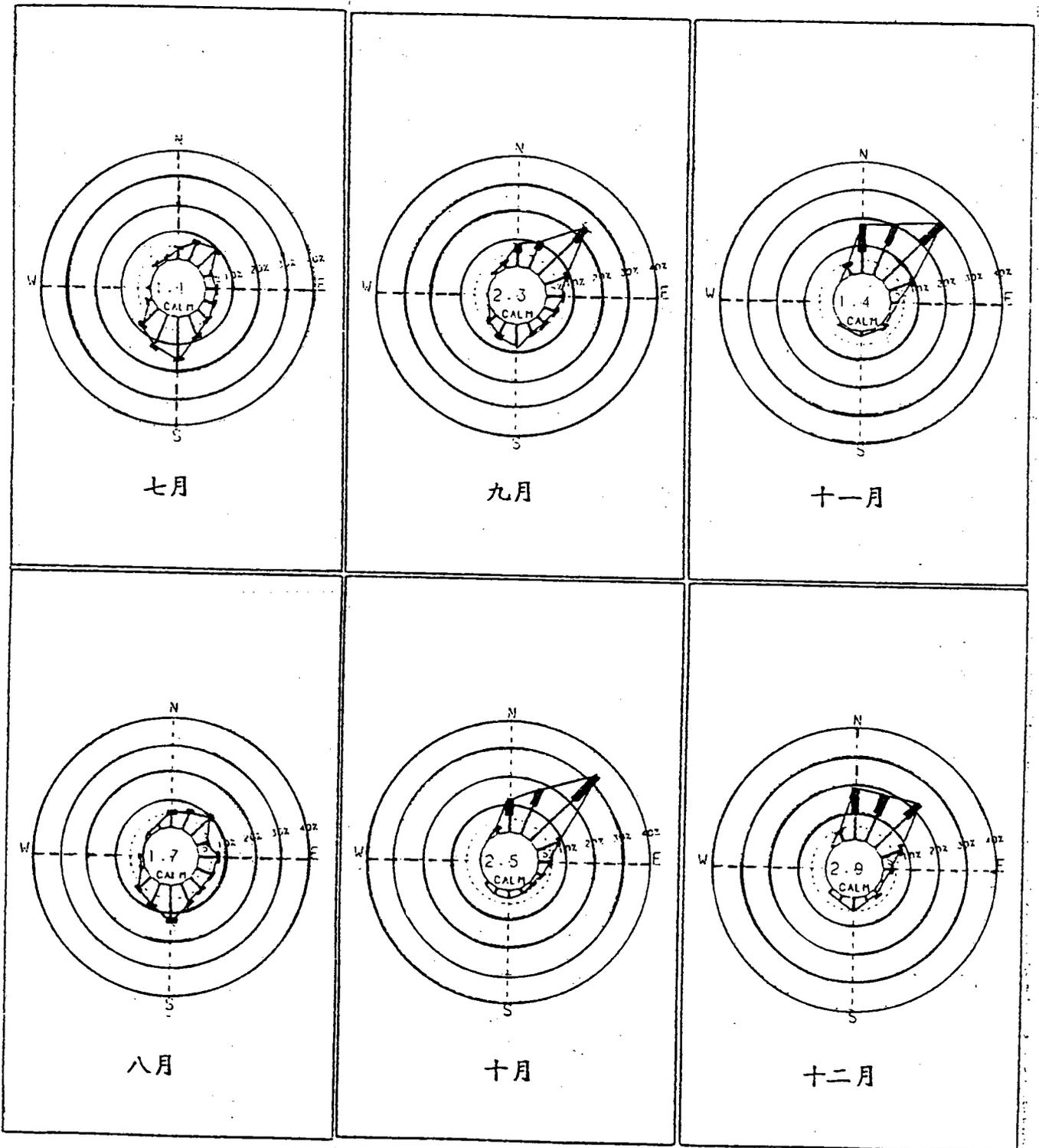


圖 4-4 基隆各月風玫瑰圖 (1971 ~ 1980)

蒲福風級

> 7

4 - 6

1 - 3

頻率百分比

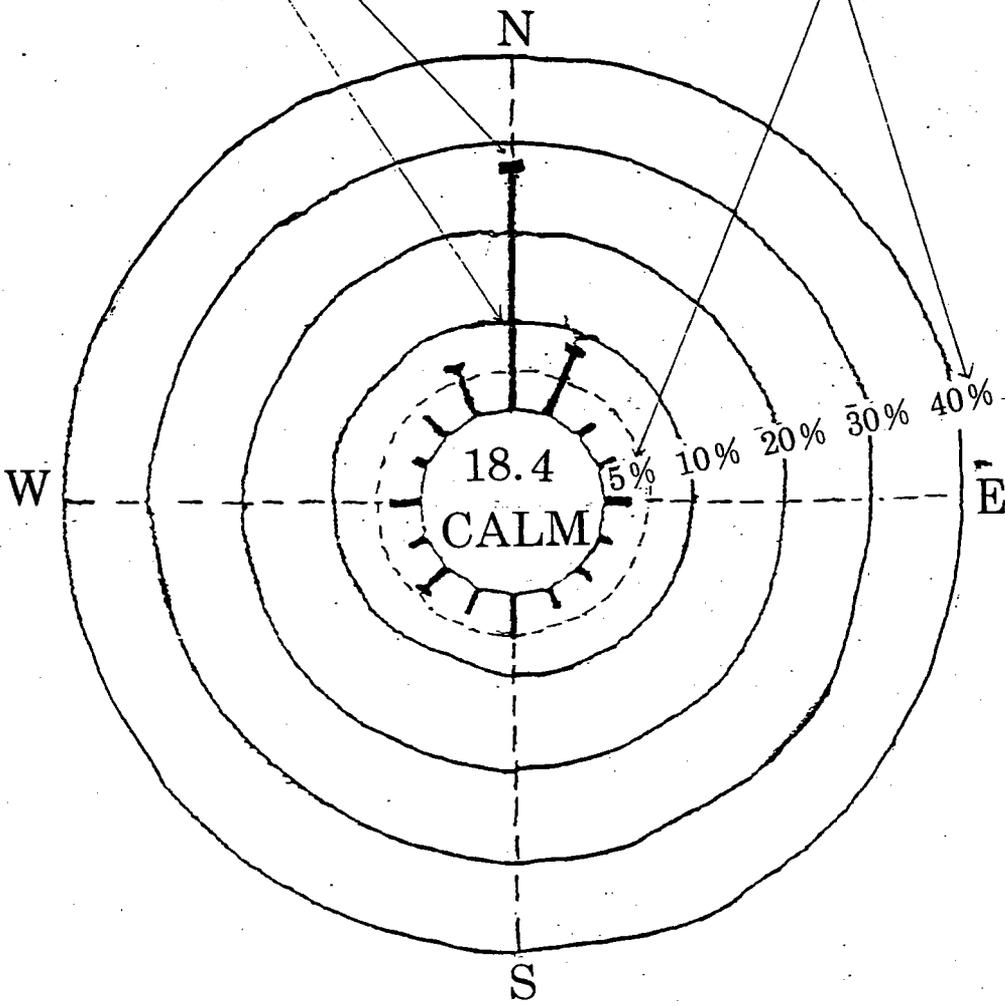


圖 4-5 台中港全年風玫瑰圖 ( 1971 ~ 1980 )

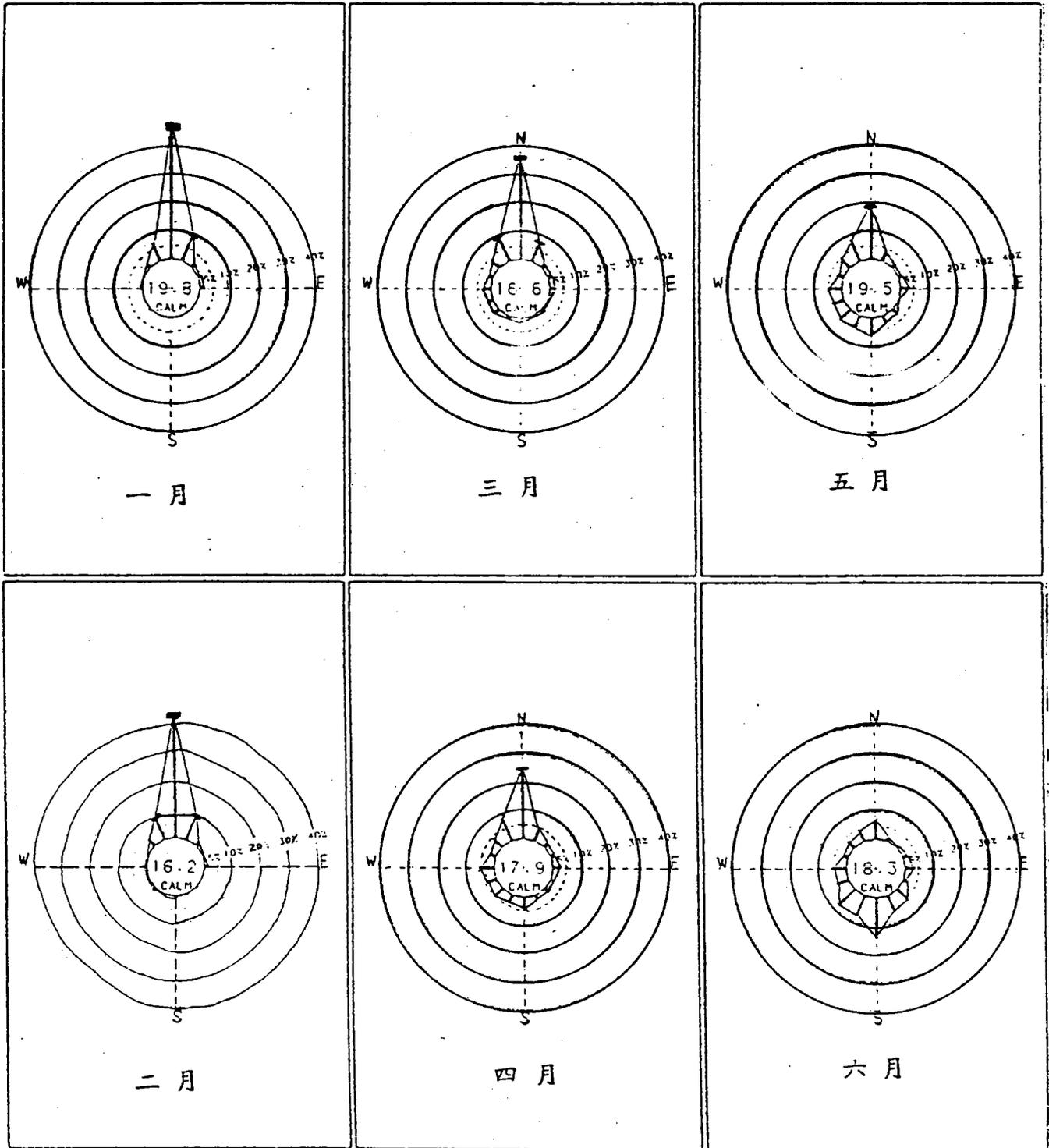


圖 4-6 台中港各月風玫瑰圖 (1971 ~ 1980)

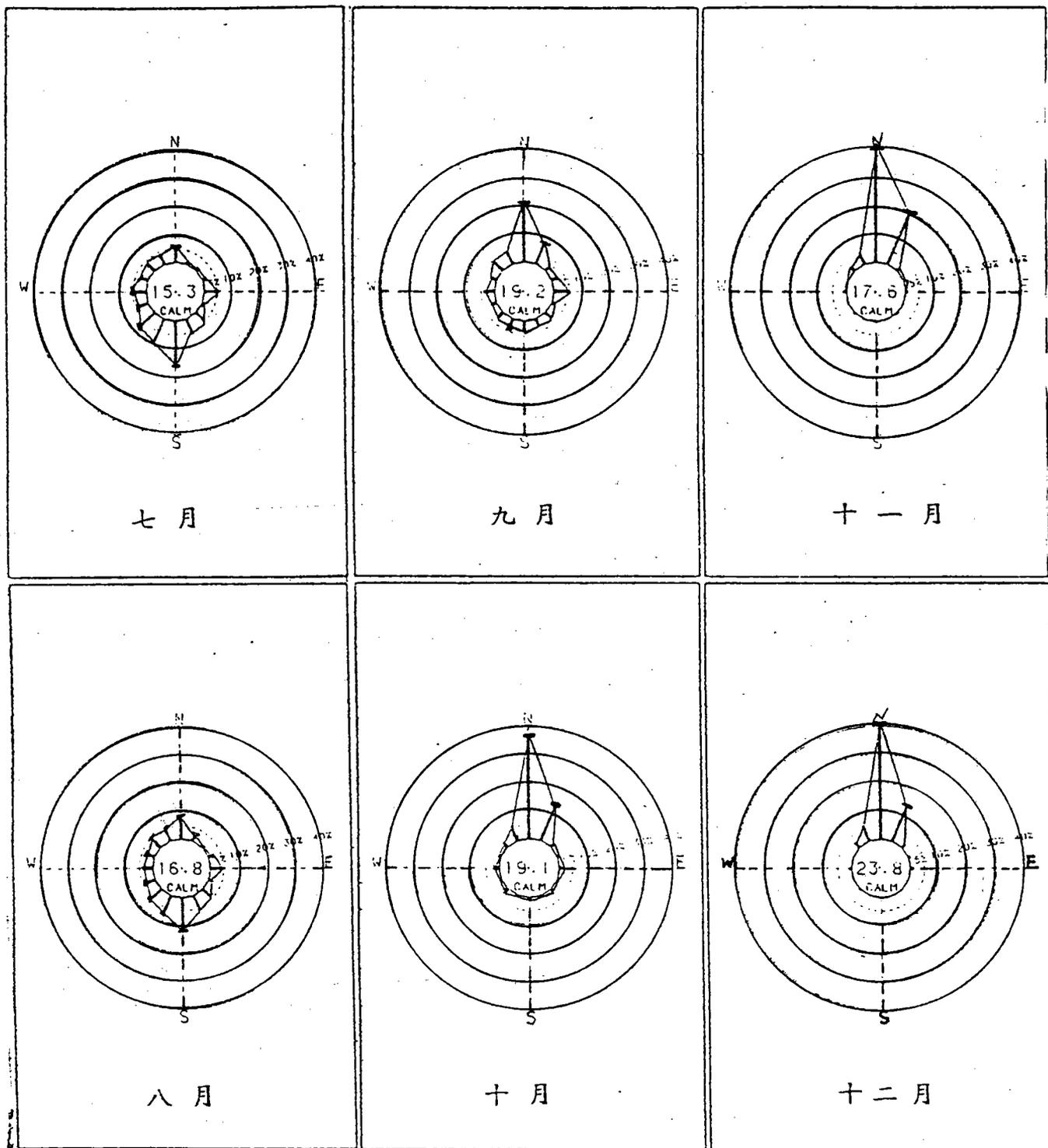


圖 4-7 台中港各月風玫瑰圖 (1971 ~ 1980)

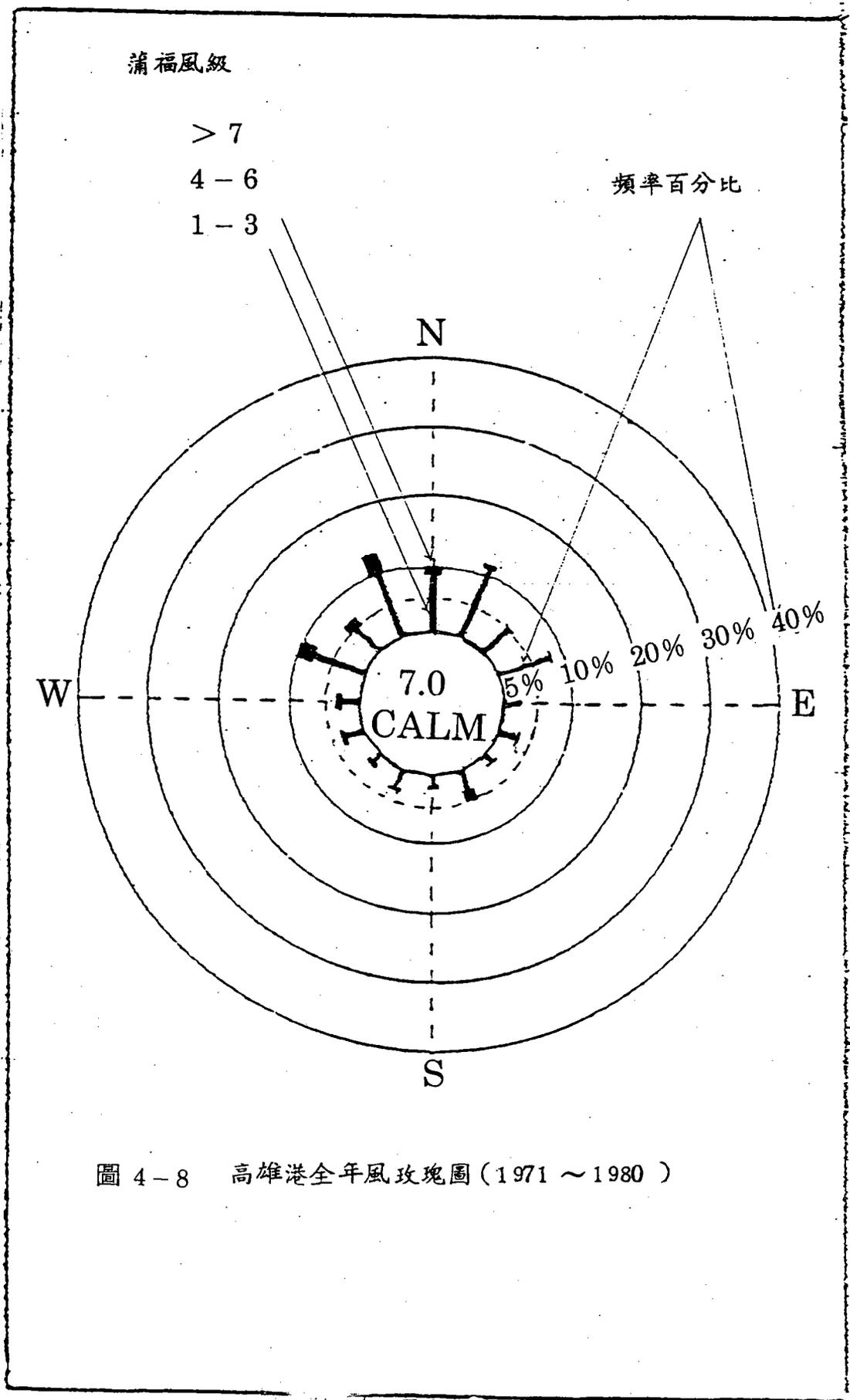


圖 4-8 高雄港全年風玫瑰圖(1971 ~ 1980 )

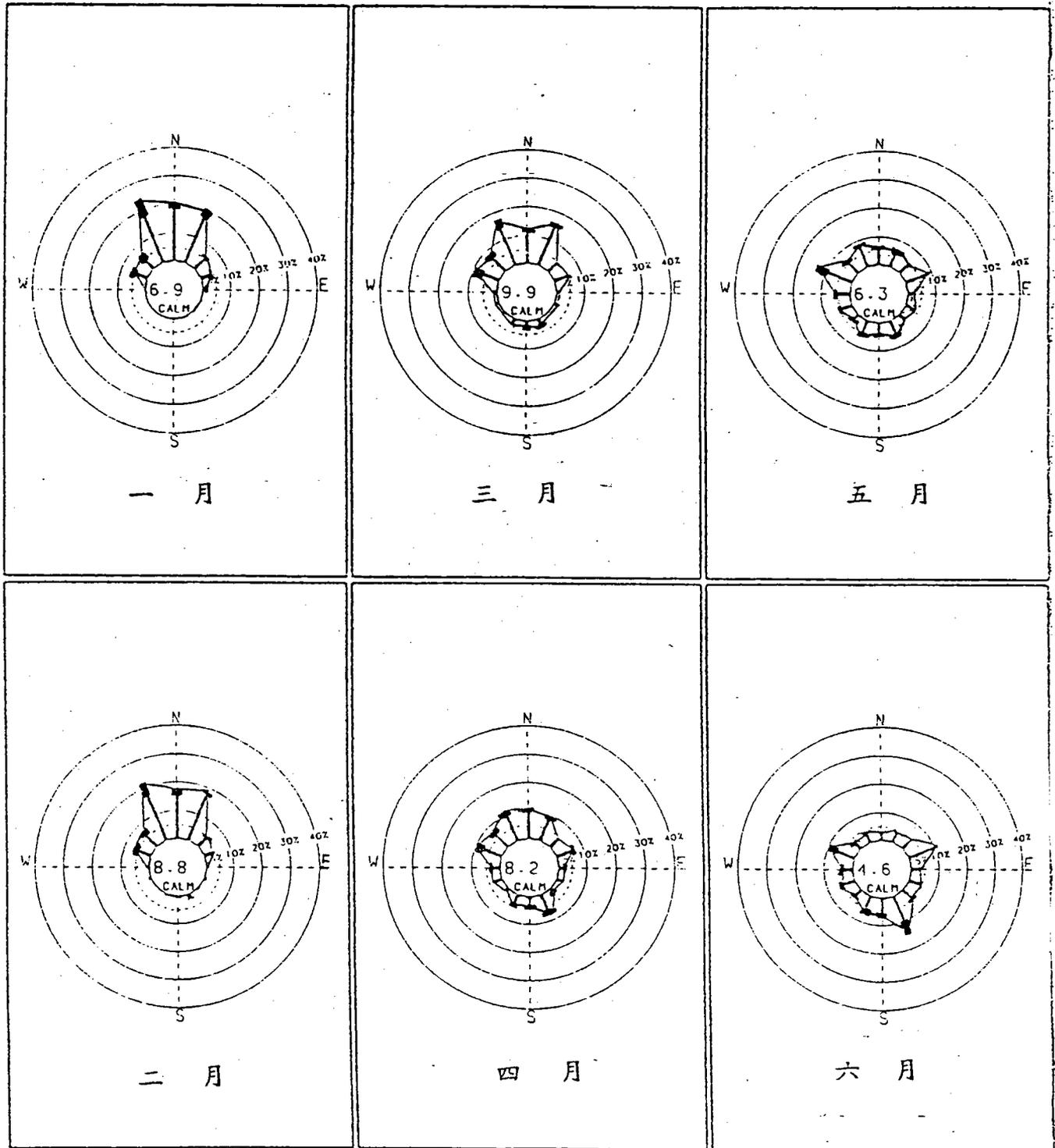


圖 4-9 高雄港各月風玫瑰圖 (1971 ~ 1980)

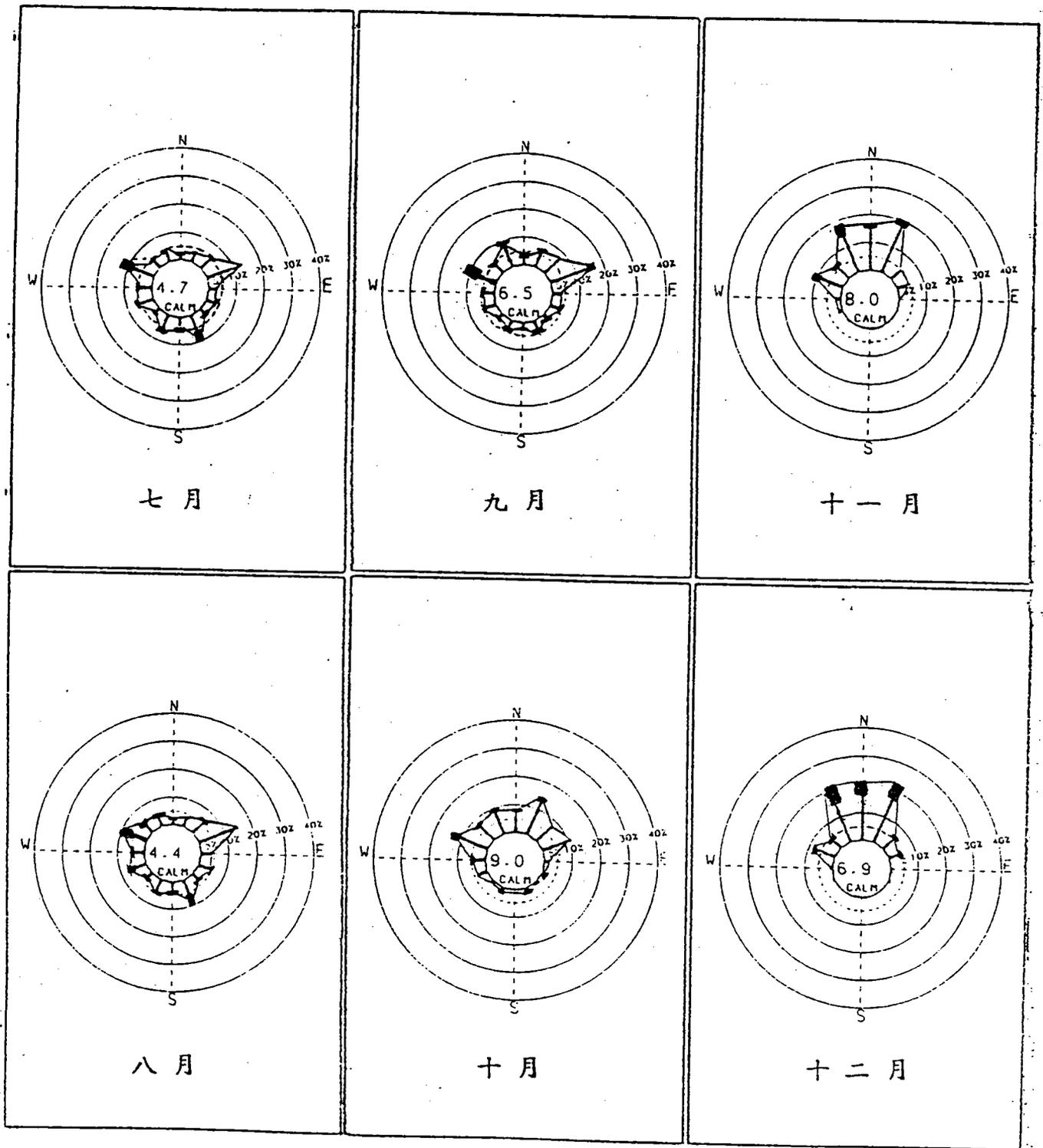
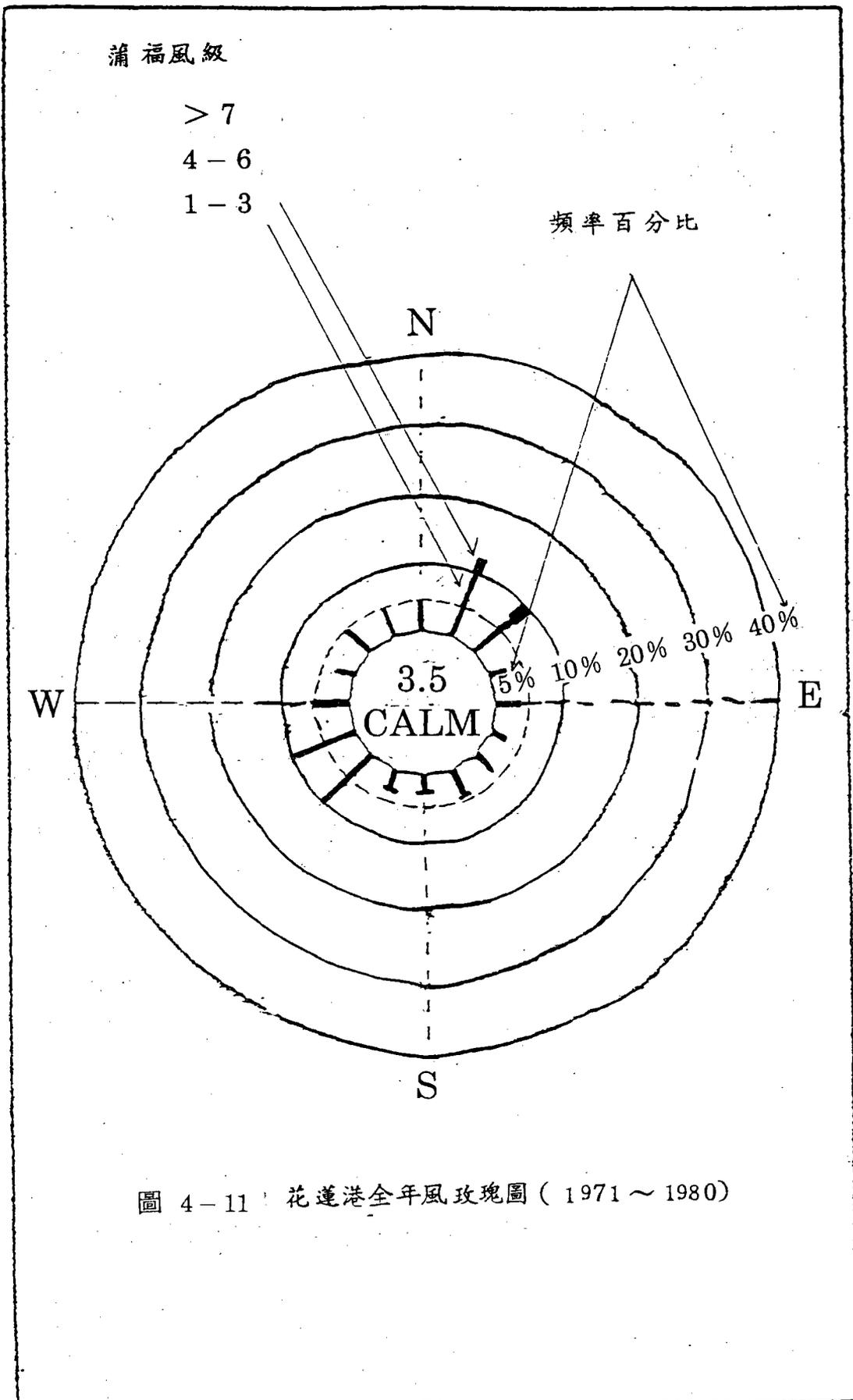


圖 4-10 高雄港各月風玫瑰圖 (1971 ~ 1980)



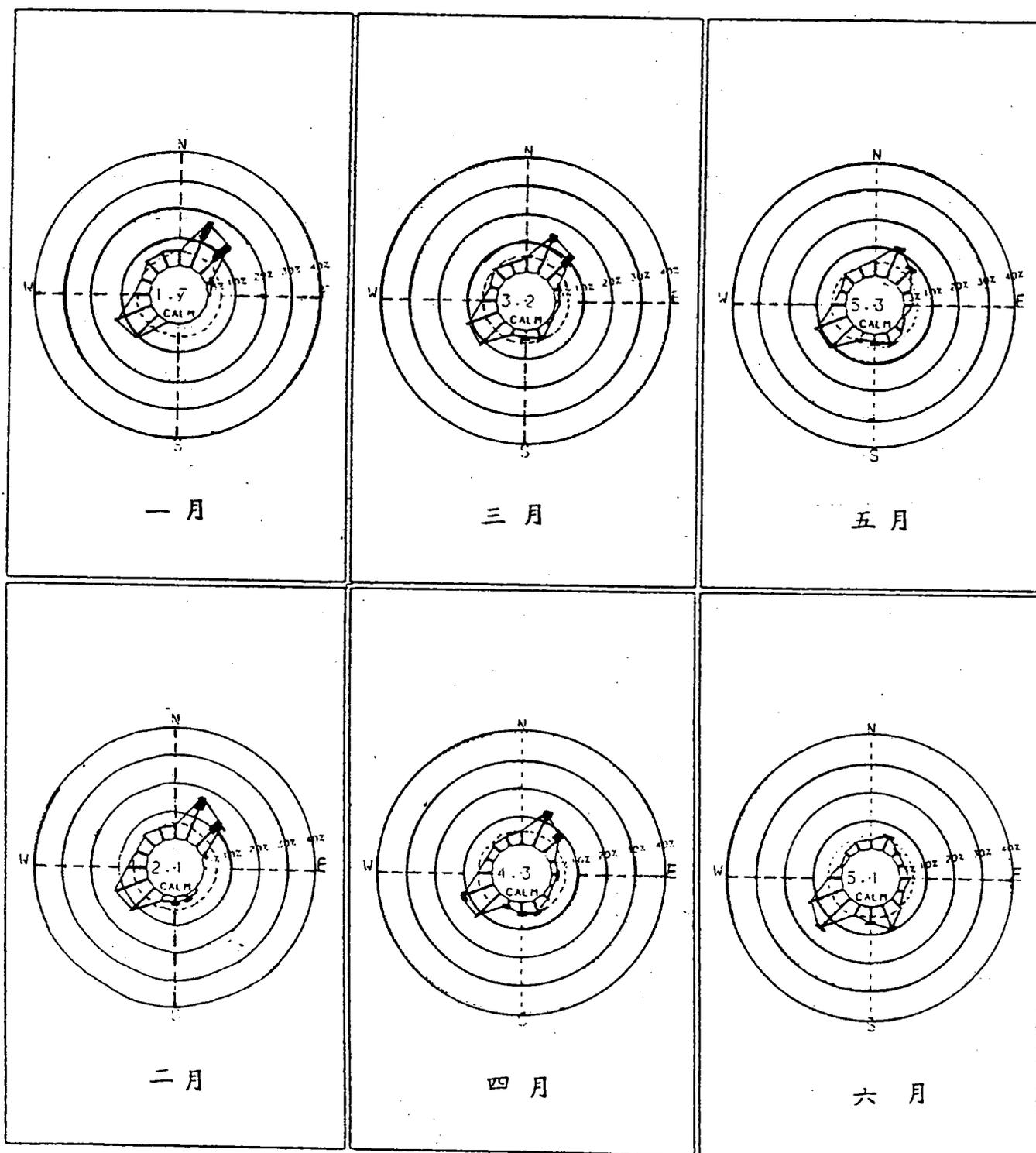


圖 4-12 花蓮港各月風玫瑰圖 (1971 ~ 1980)

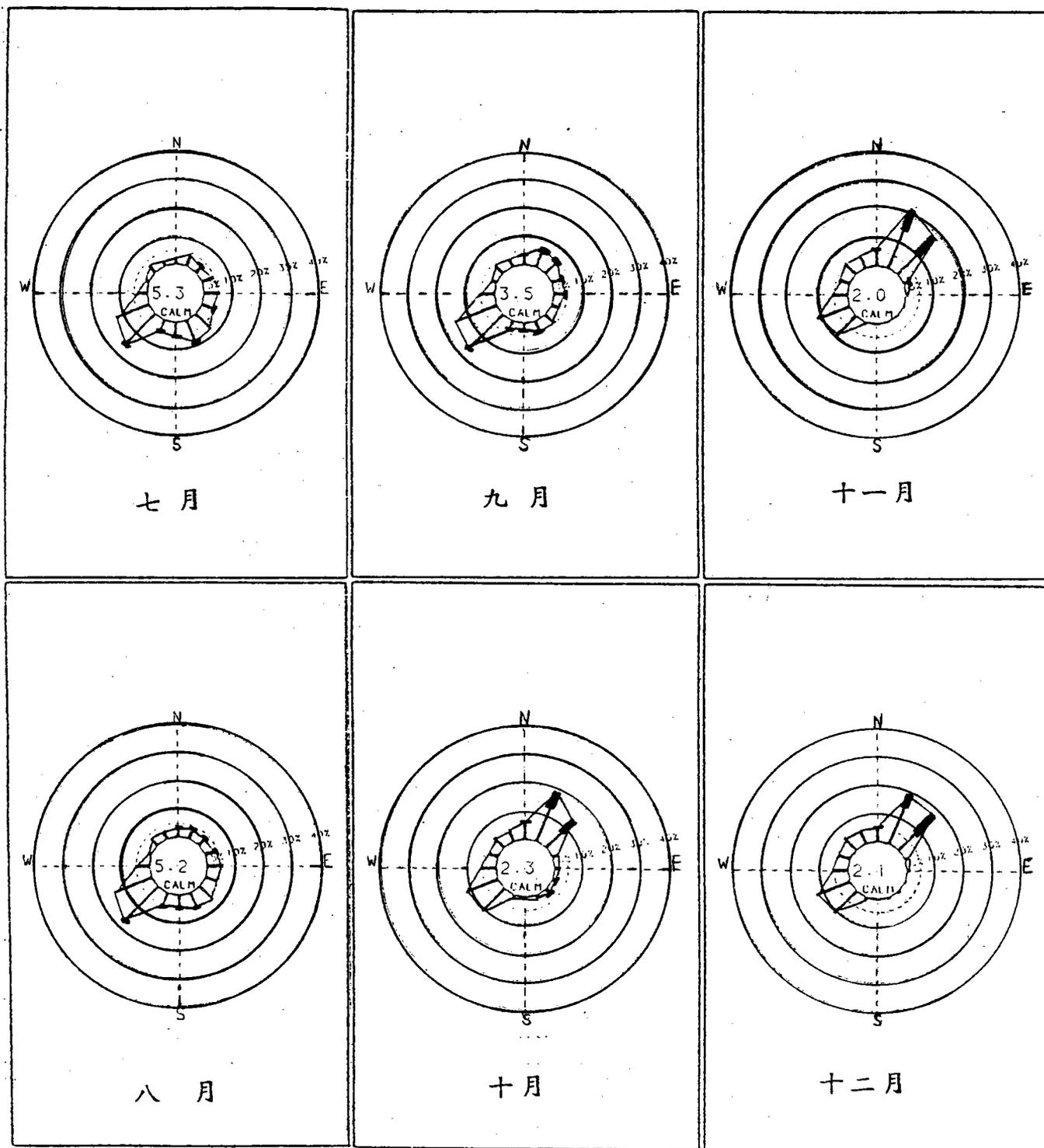


圖 4-13 花蓮港各月風玫瑰圖 (1971 ~ 1980)

蒲福風級

> 7

4 - 6

1 - 3

頻率百分比

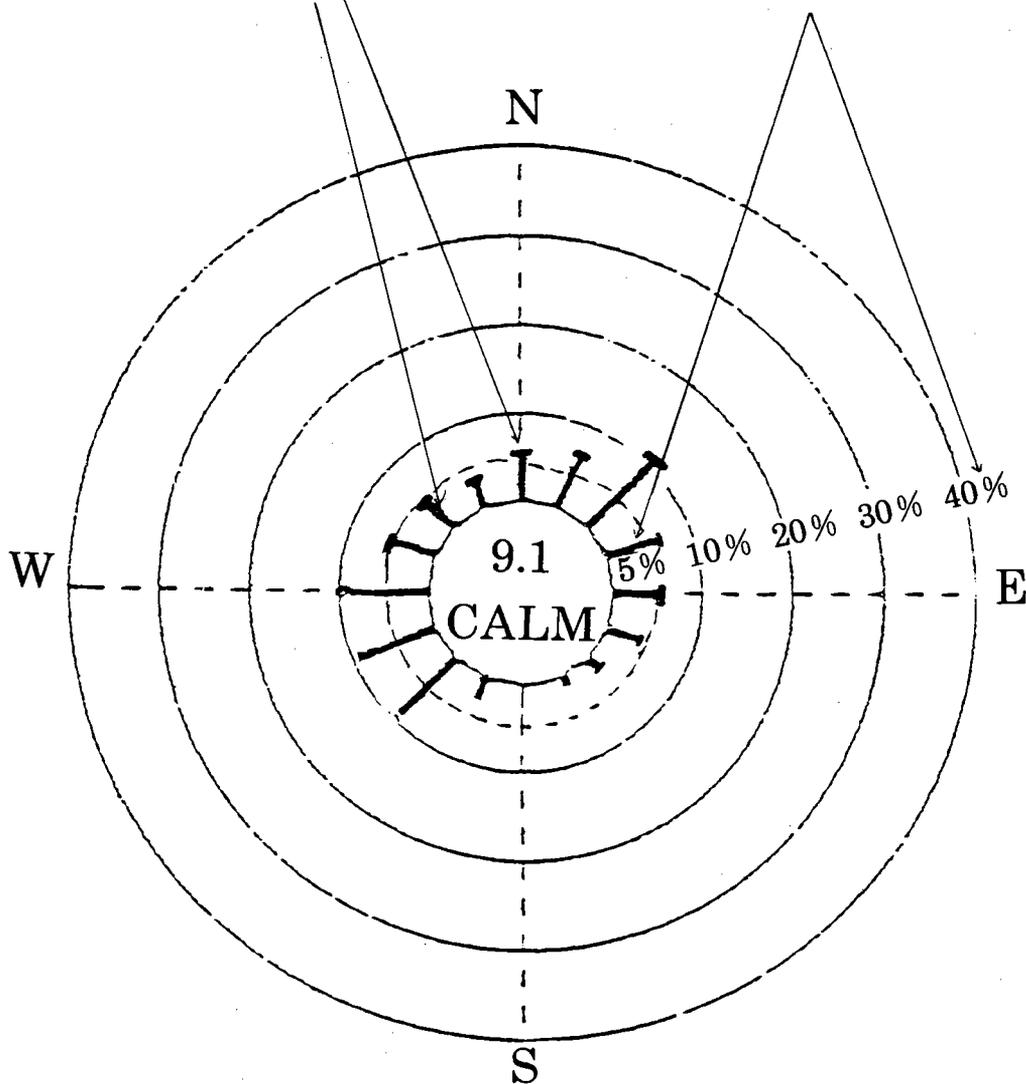


圖 4-14 宜蘭全年風玫瑰圖 ( 1971 ~ 1980 )

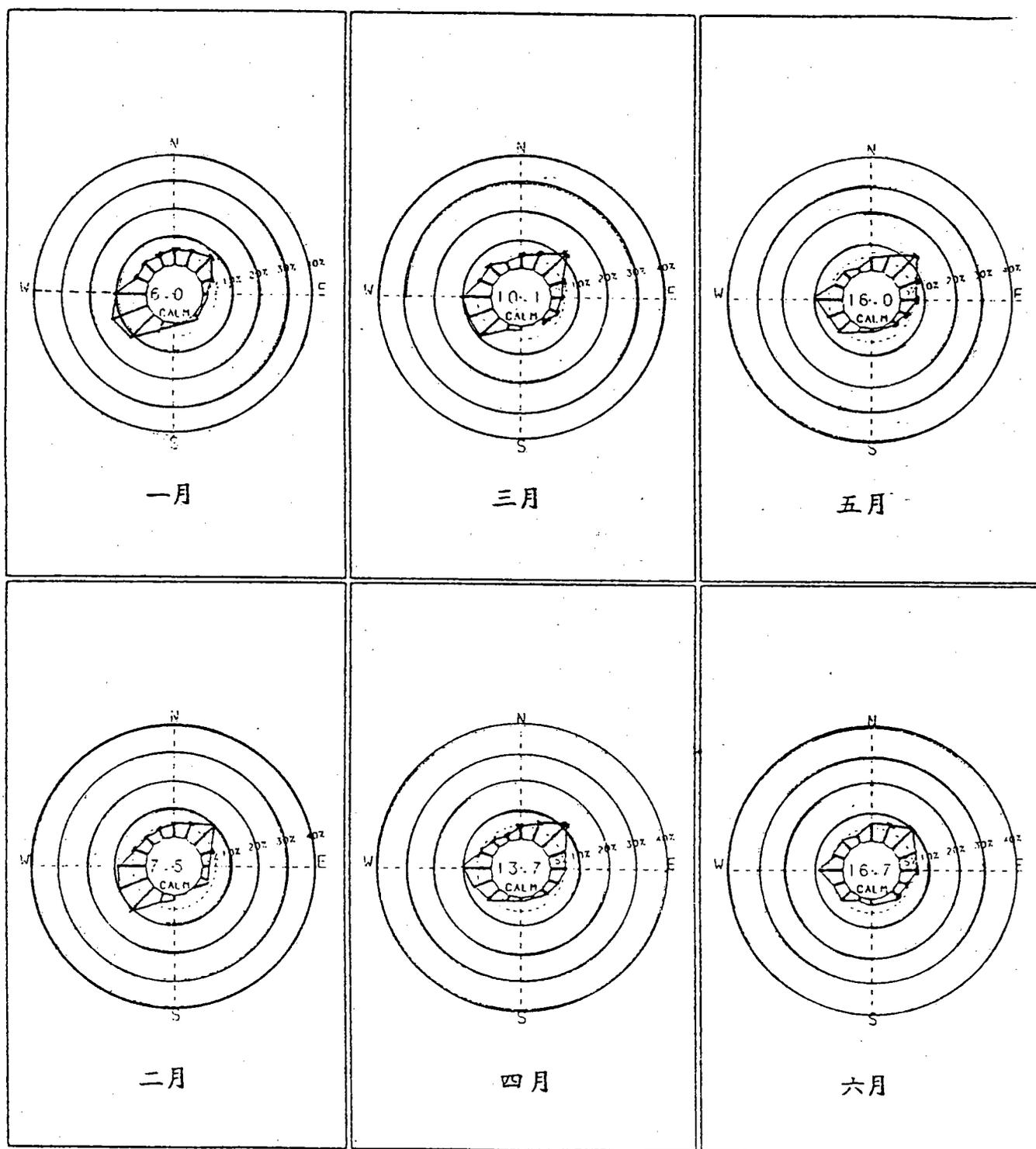


圖 4-15 宜蘭各月風玫瑰圖 ( 1971 ~ 1980 )

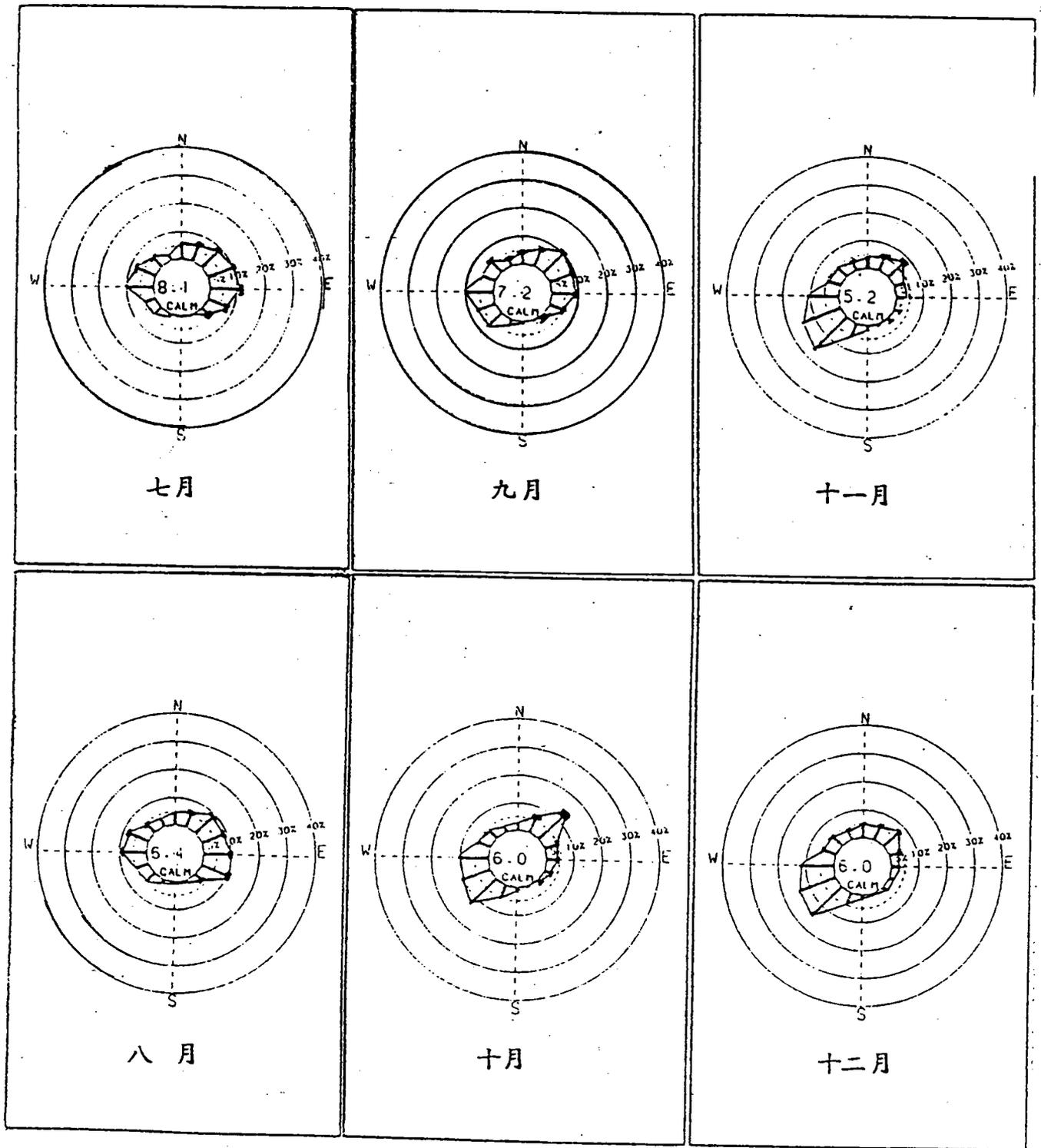


圖 4-16 宜蘭各月風玫瑰圖 (1971 ~ 1980)

圖4-17 臺灣島分佈圖

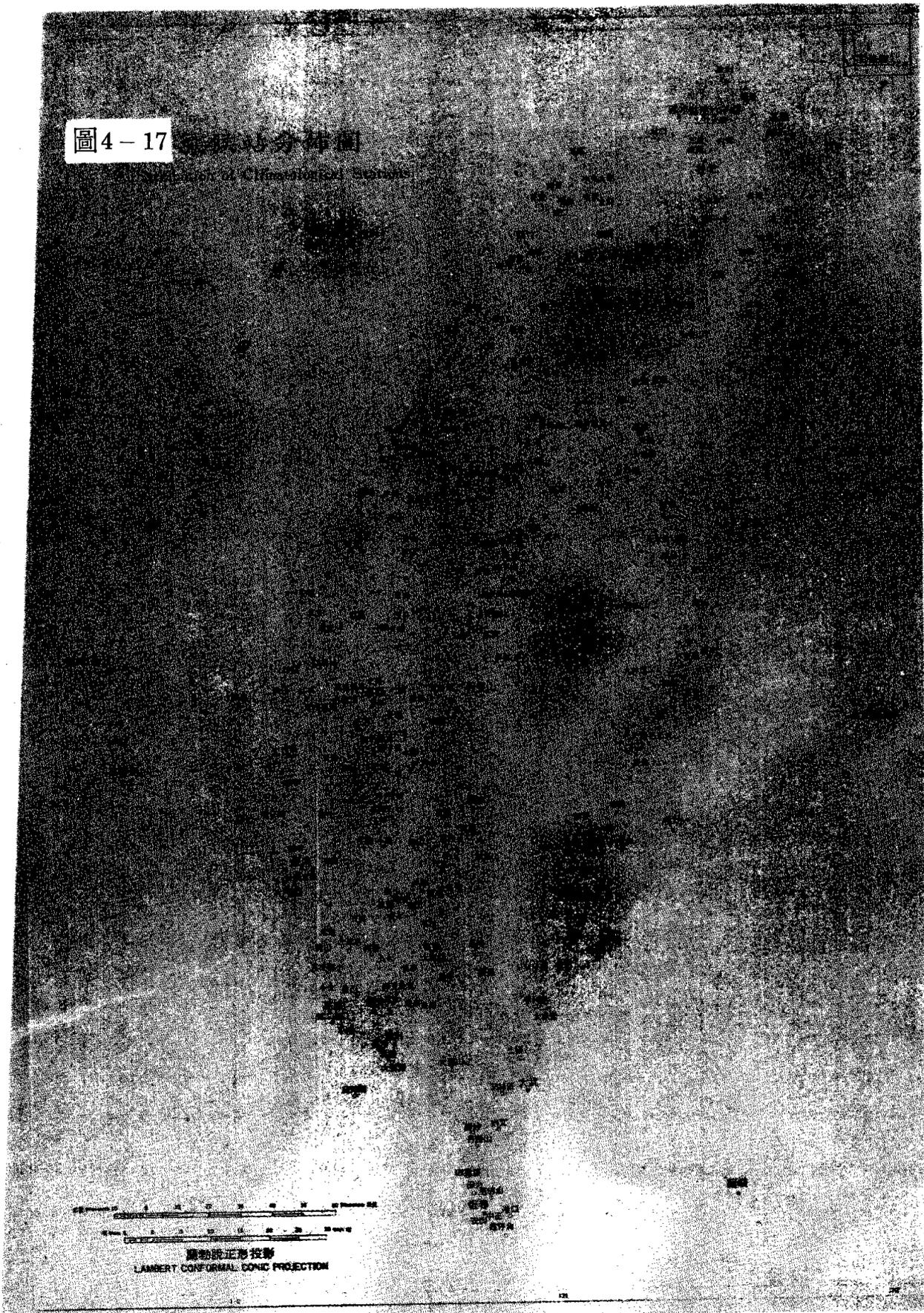
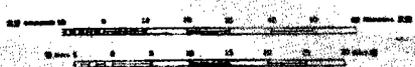


圖4-18

臺灣島地形圖

中華民國政府出版



蘭伯特正形投影  
LAMBERT CONFORMAL CONIC PROJECTION

圖 4-19

全年等溫線圖

Annual Temperature, Annual

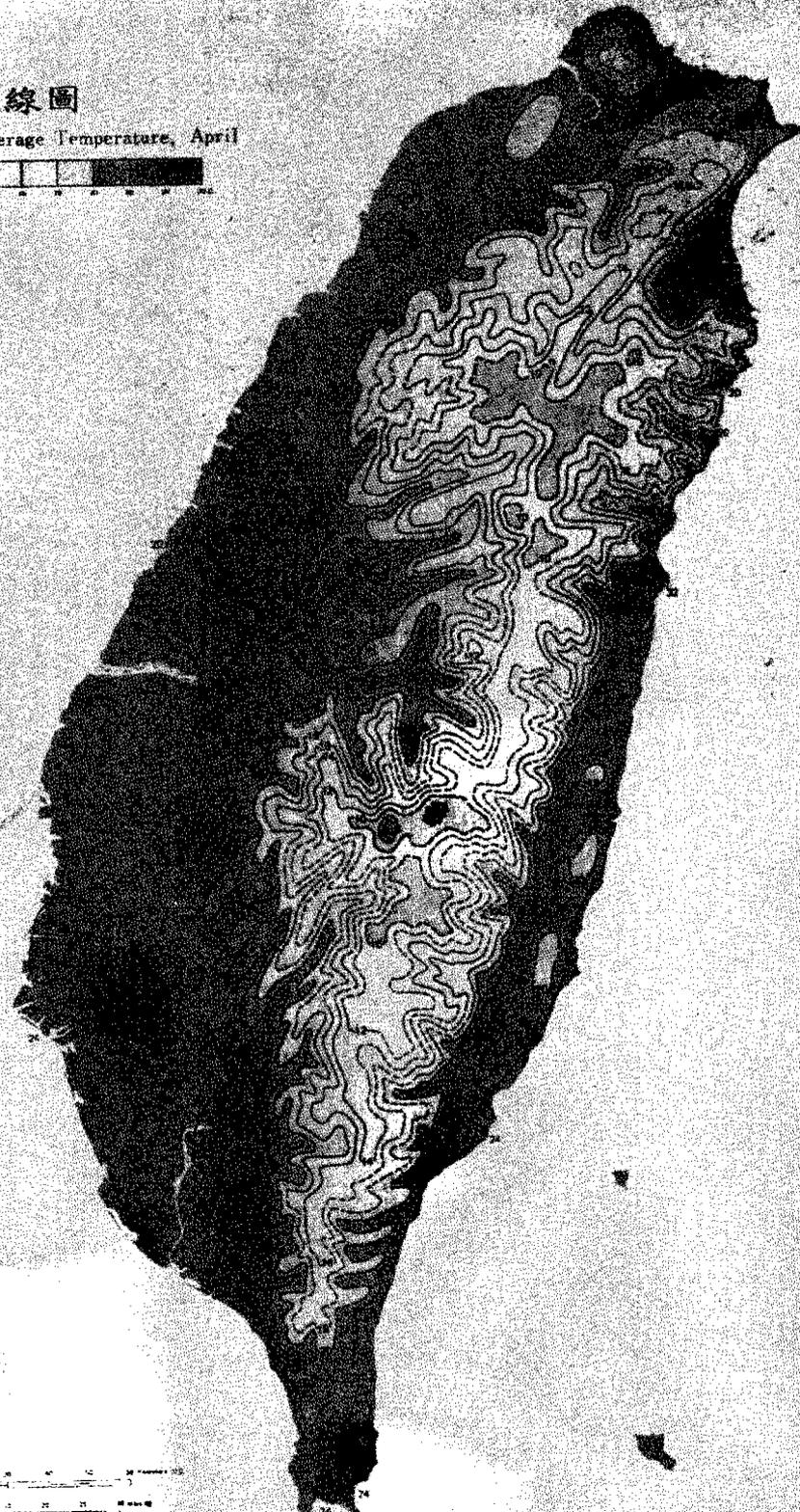


圖4-20



圖4-21 四月等溫線圖

Normal Daily Average Temperature, April



蘭勃脫正形投影  
LAMBERT CONFORMAL CONIC PROJECTION

圖4-22



圖4-23

十月平均溫度線圖  
October Monthly Average Temperature, October



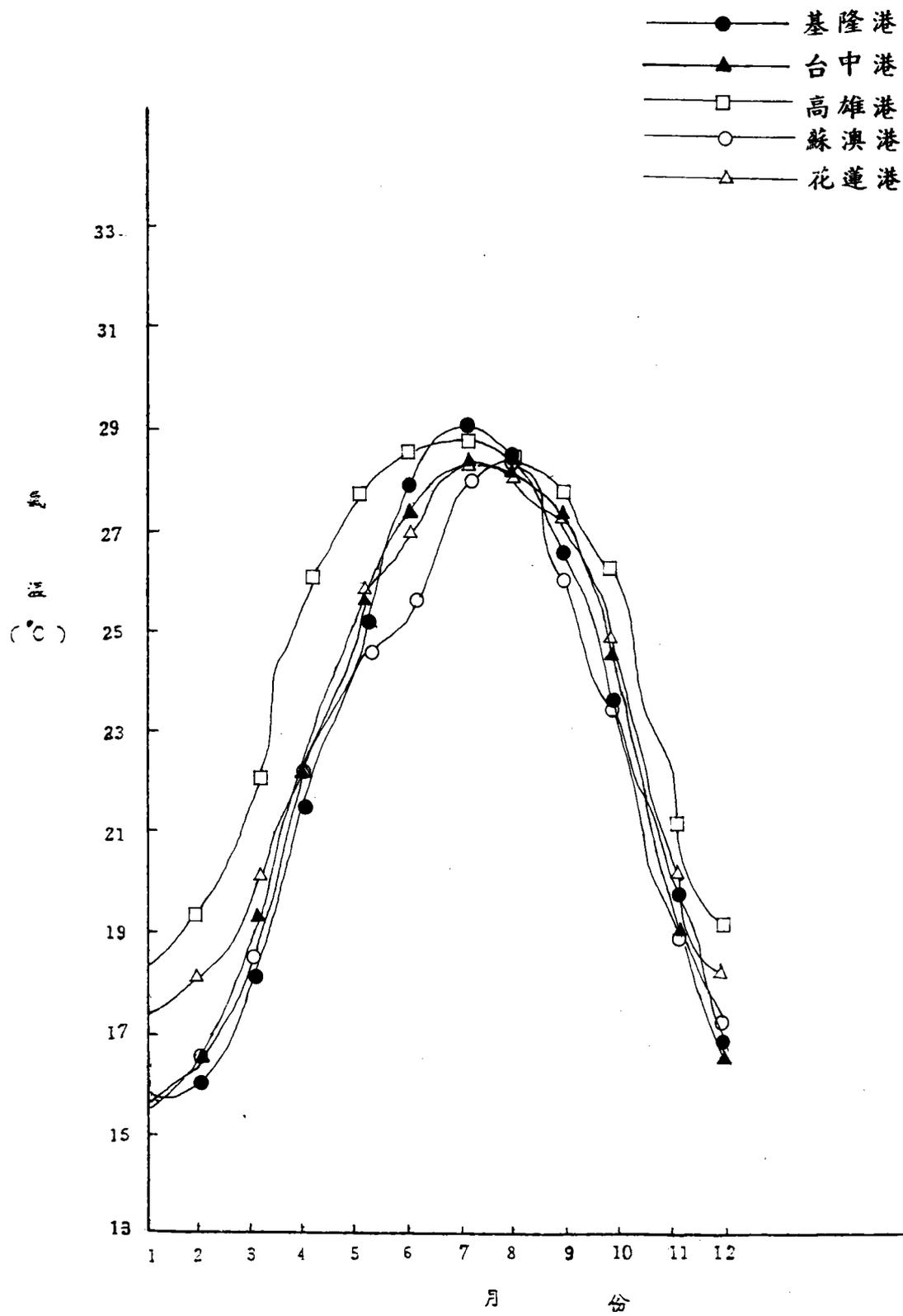


圖 4-24 平均氣溫月變化圖 (1971~1985)

圖 4-25 全年等降水量線圖

Normal Annual Total Precipitation



圖4-26



圖 4-27

四月等降水量線圖  
April Monthly Total Precipitation Map



圖 4 - 28

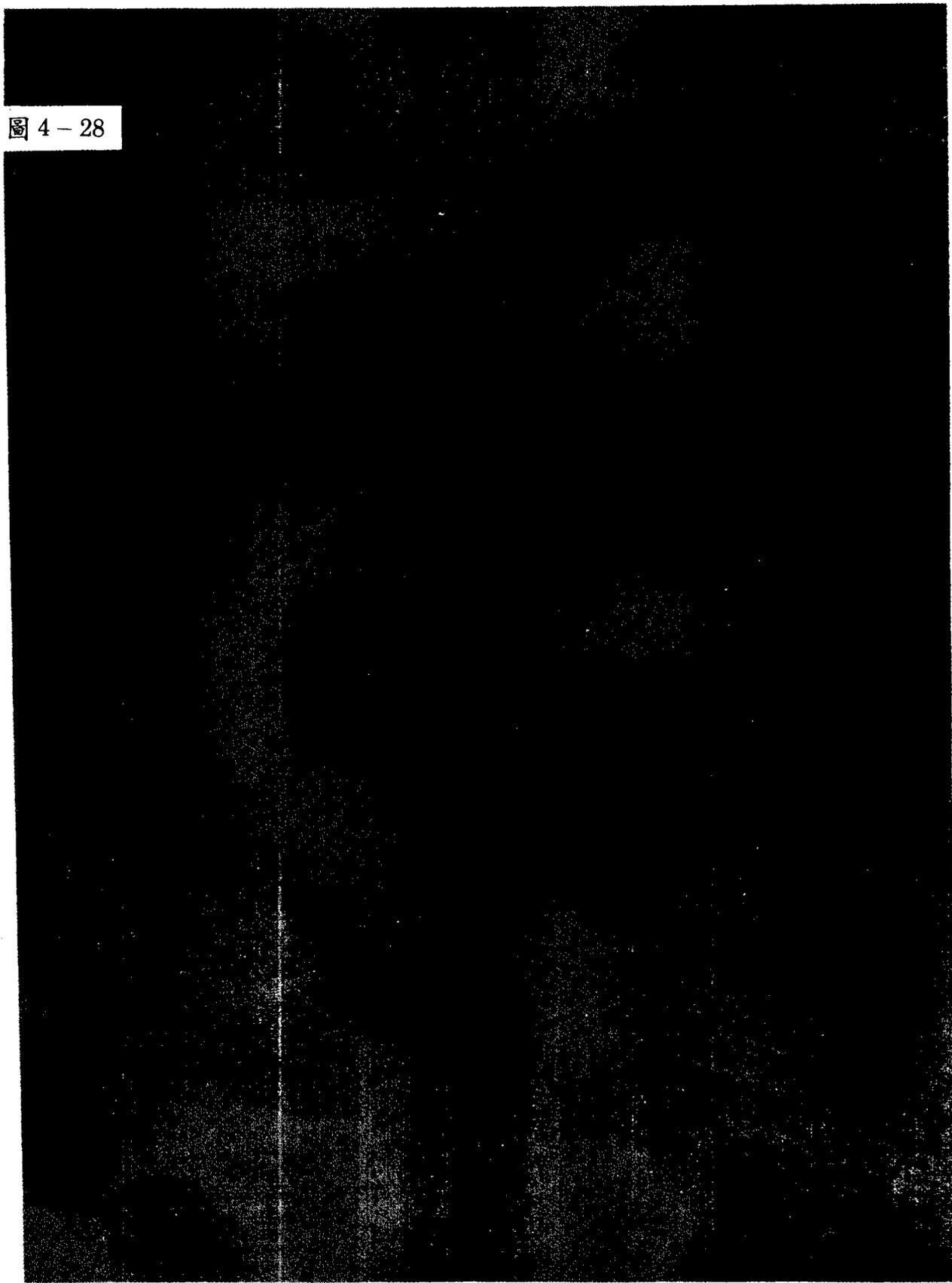
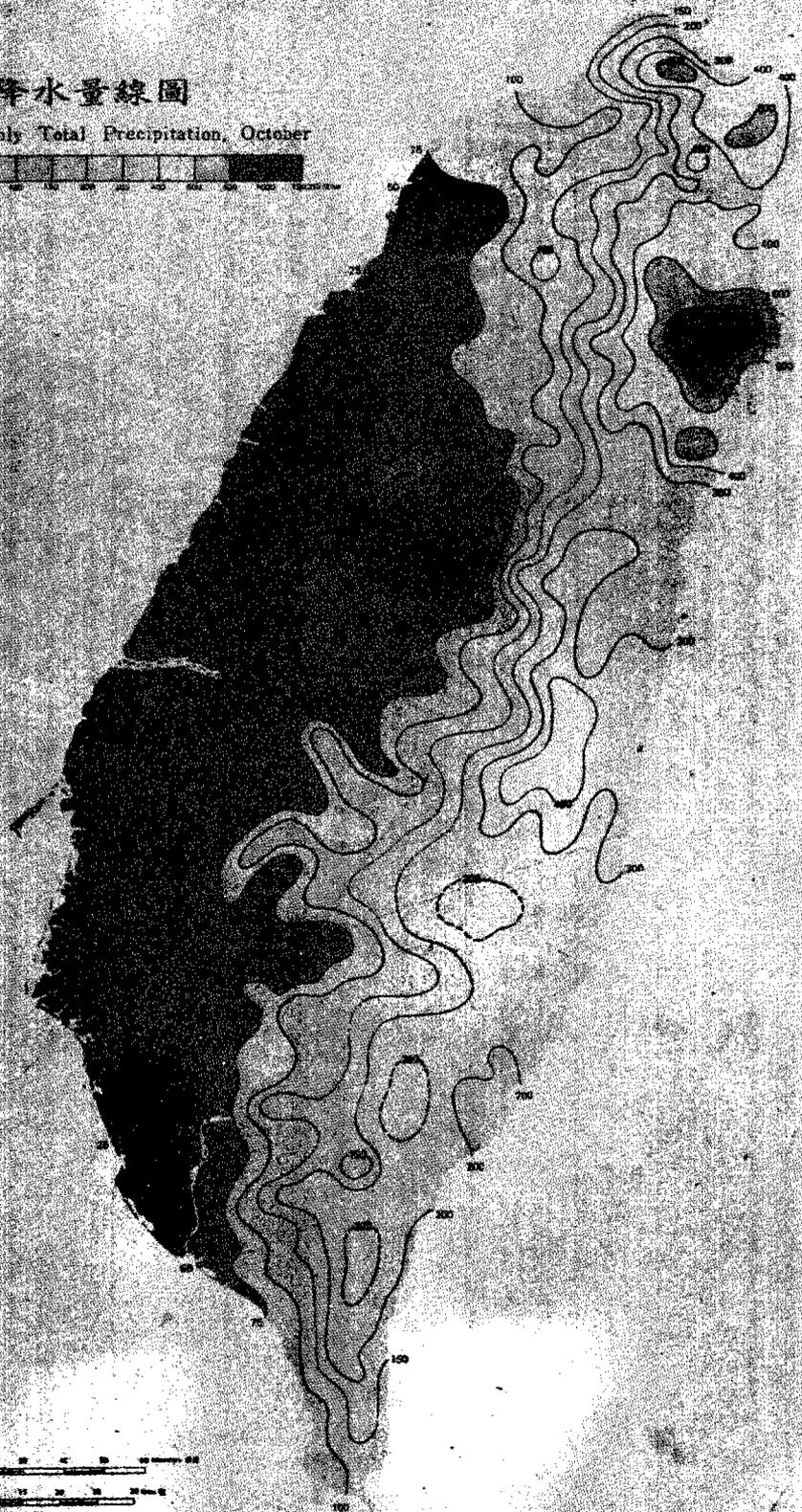


圖 4-29

十月等降水量線圖

Normal Monthly Total Precipitation, October



蘭伯特正形投影  
LAMBERT CONFORMAL CONIC PROJECTION

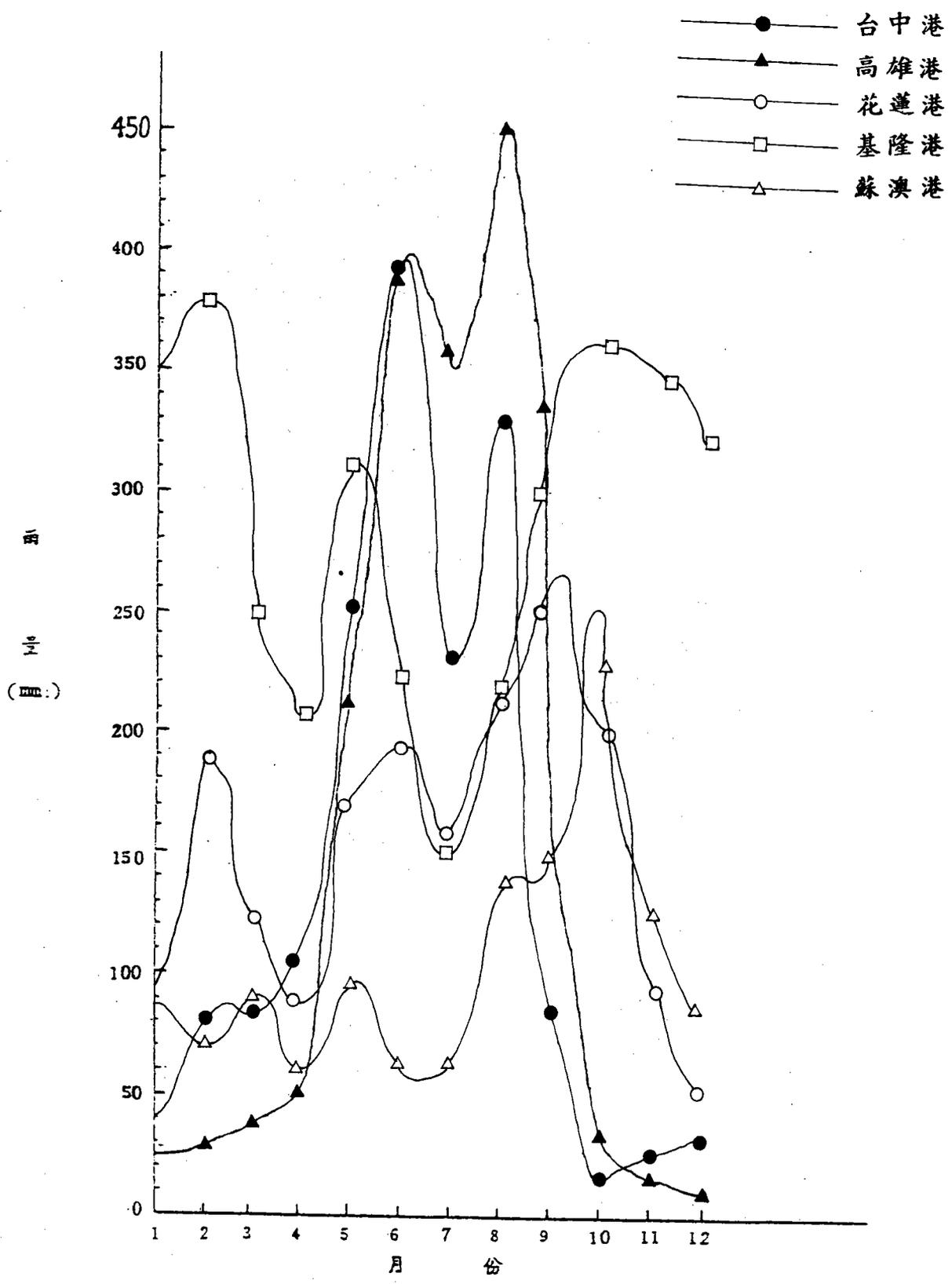


圖 4-30 平均雨量變化圖 (1971~1985)

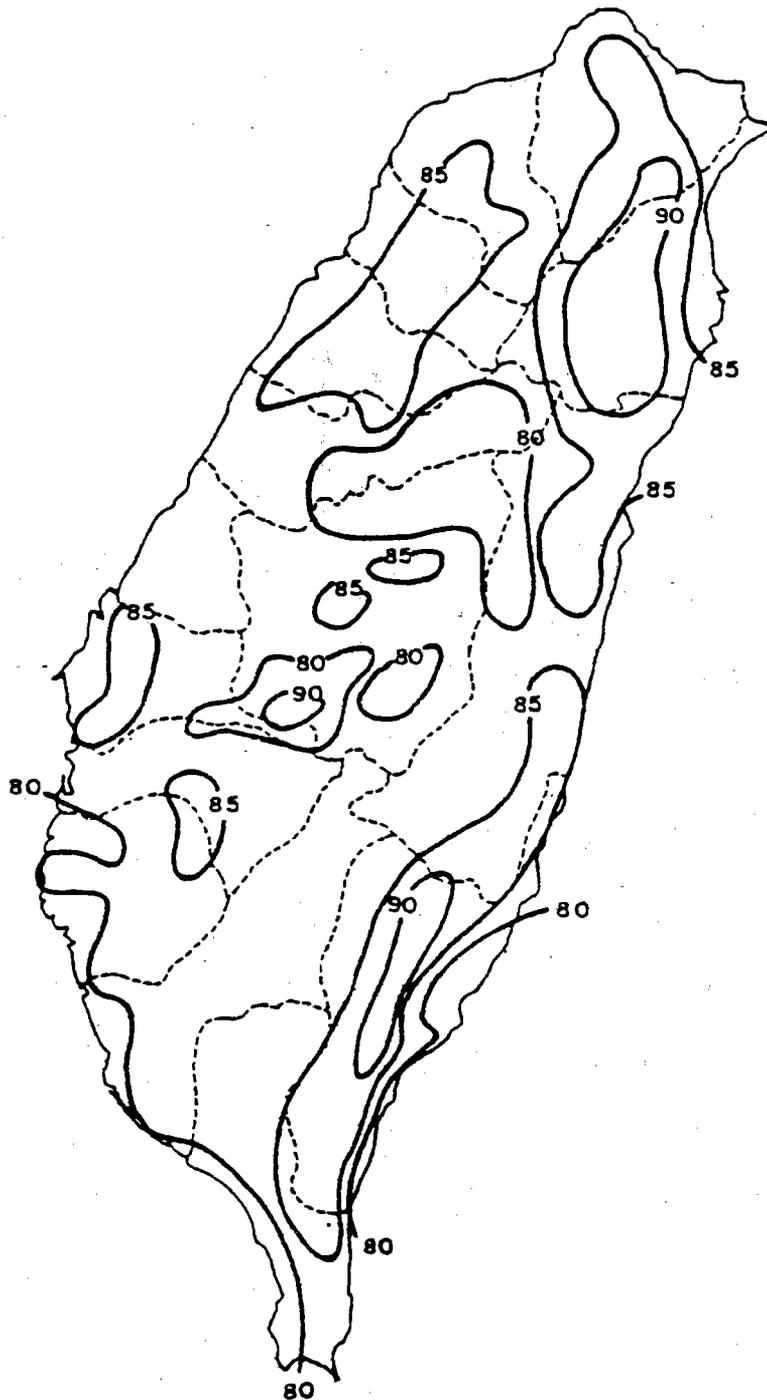


圖 4-31 年平均相對濕度 (單位：%)

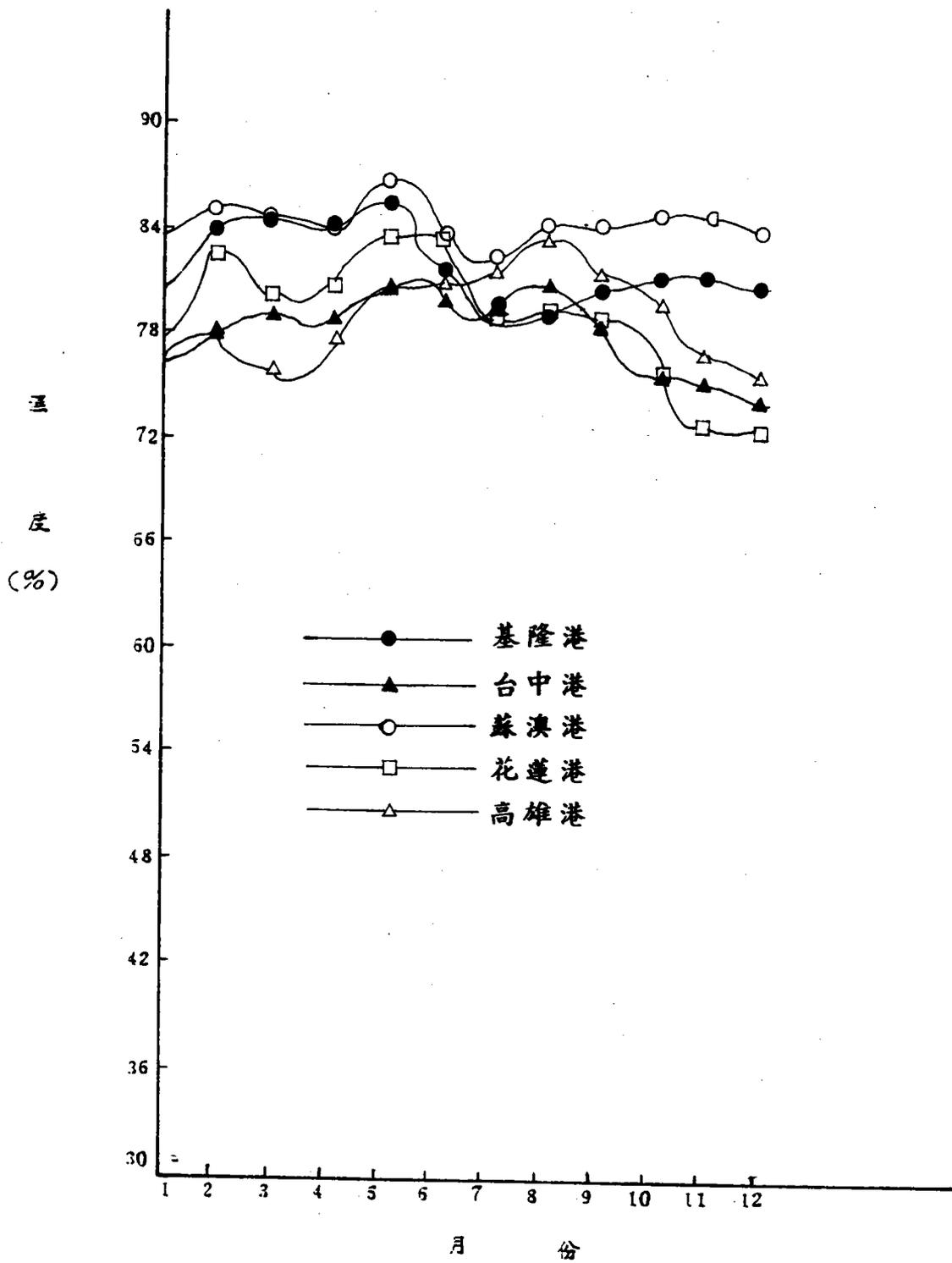


圖 4-32 平均相對濕度變化圖 (1971~1985)



圖4-34 台灣地區冬季期間(74.12.~75.2.)  
雨水PH值等濃度圖

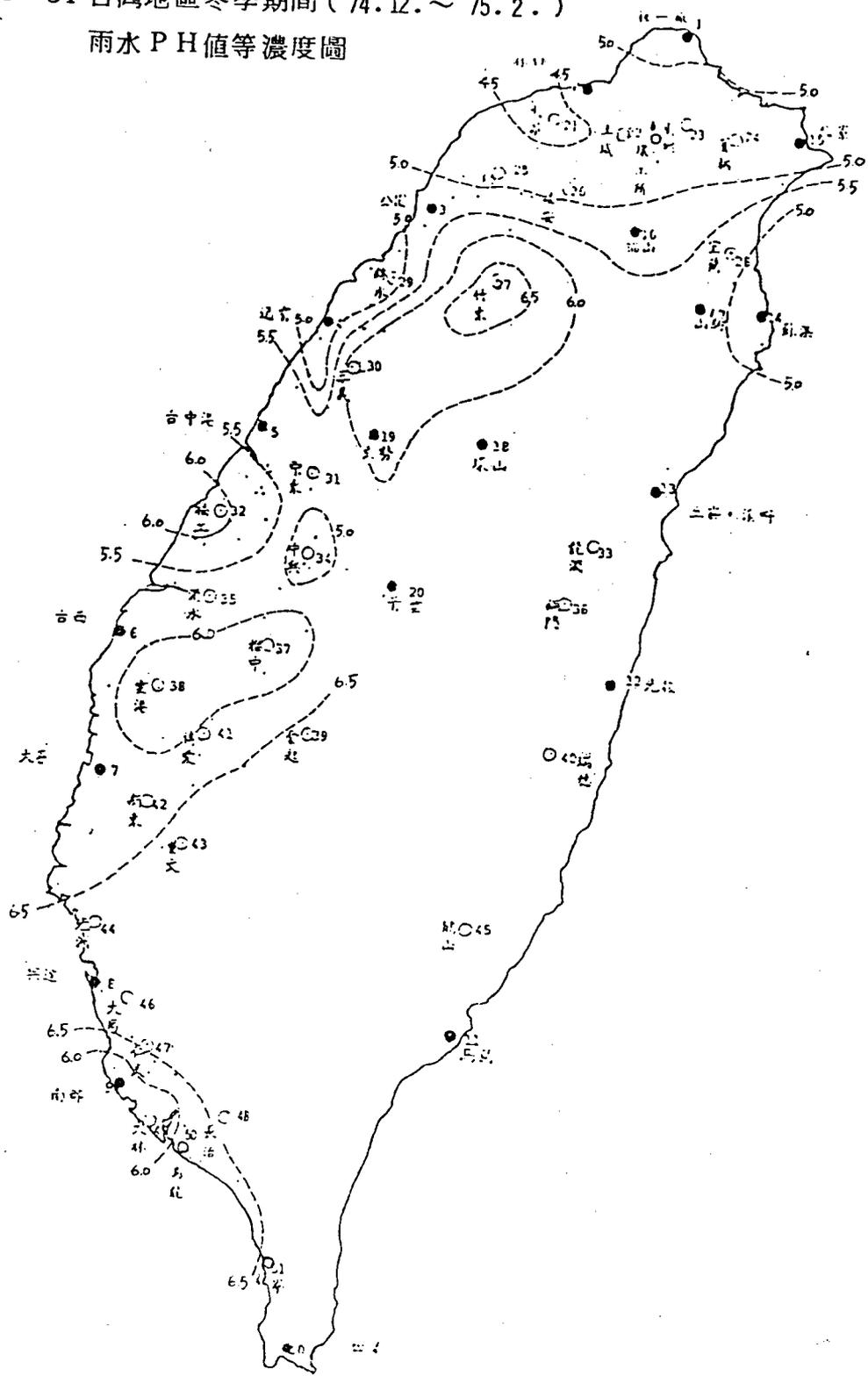
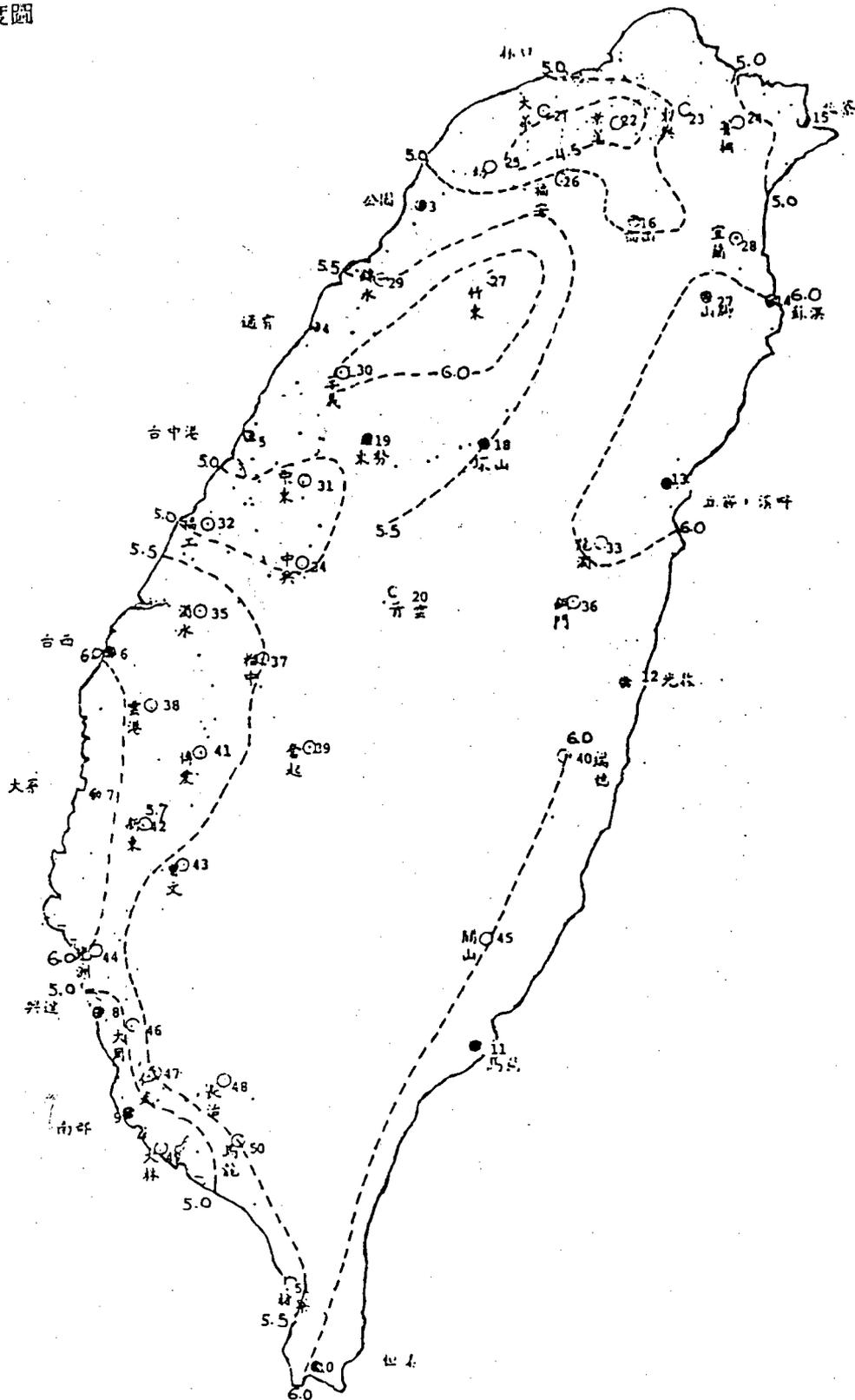


圖 4-35 臺灣地區春季期間 (75.3 ~ 75.5) 雨水 pH 值等  
濃度圖





已往最高潮位 (氣象潮及其他因素)

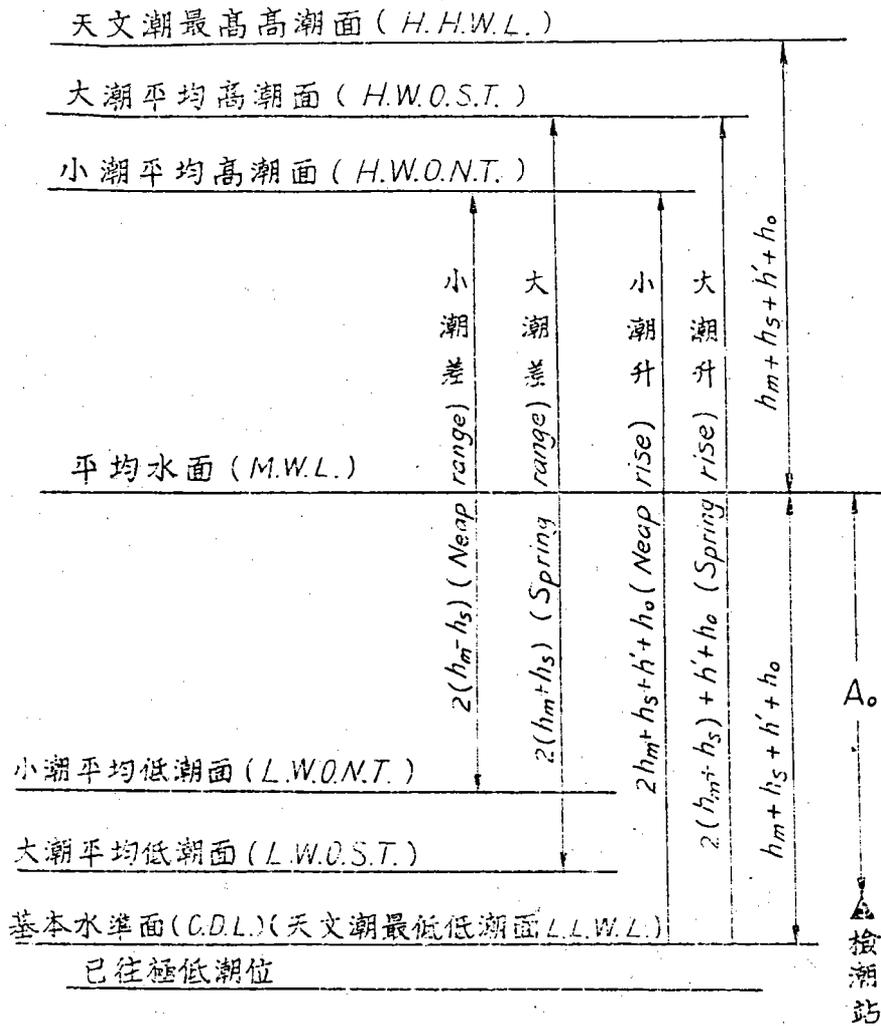


圖 4-37 各種潮位及潮差

表 4-1 五大港口天文潮統計資料

潮位 \ 港名	基隆	台中	高雄	花蓮	蘇澳
最高潮位	2.31	5.07	1.70	2.55	1.68
平均高潮位	1.13	4.45	1.13	1.31	1.27
平均潮位	0.88	2.57	0.74	0.83	0.80
平均低潮位	0.65	0.79	0.42	0.34	0.33
最低潮位	-0.22	-0.13	0.07	-0.78	-0.20
潮差	0.48	3.66	0.71	0.97	0.94

本表單位：公尺

統計資料來源：基隆港：民國 64 年～70 年  
 台中港：民國 70 年～75 年  
 高雄港：民國 55 年～64 年  
 花蓮港：民國 40 年～63 年  
 蘇澳港：參考文獻 7

# 伍、海水水質分析

吳 信 昇\*

## 一、前 言

海水的化學成份種類繁多，其主要離子含量在開放的海水中幾乎維持一定比例，但在靠近海岸或港池內的水，因受到河水沖淡，工廠排放廢水或船舶污染……等影響，則其離子濃度會有不同差異，因此，本研究乃針對本省五大港口碼頭設施附近之海水，進行化性分析，探討各港海水在一年中變化情形，其海水化性的變化情形，以便將來對港灣結構物之耐久性設計與施工參考，並提供防蝕良策，減低港灣結構物設施的損壞及延長使用年限。

## 二、調查方法與取樣地點

本研究調查時間從79年2月至80年1月止有一年時間，每月採水樣一次，於高低潮位時同時採水及量測。採水使用採水器從水面至海床每隔一公尺採集100C.C海水，攜回實驗室利用離子分析儀分析其 $\text{Cl}^-$ 及 $\text{SO}_4^{2-}$ 含量。在現場同時使用自動海水測定儀，測量每間隔一公尺水深之海水pH值、溶氧量、導電度及水溫等數據。取樣地點分別在基隆港西1號、西14號，台中港5號、8號，高雄港2號、30號，花蓮港15號、20號，蘇澳港3號、10號等鋼筋混凝土碼頭附近進行。

## 三、試驗結果與比較

### 1. 各港平均pH值

各港差異不太大，一般pH值介於8.0~8.2之間，除高雄港30號碼頭，因位於台電公司火力發電廠溫排水口處，其pH值偏低，年平均pH值為7.8。而花蓮港15號、20號碼頭之年平均pH值8.2較其它各港為高。

---

\*台灣省交通處港灣技術研究所研究助理

## 2. 各港平均溶氧量

以花蓮港 20 號碼頭之平均值為 5.8mg / l 為最高，因其位於台灣東部近太平洋，又其海洋污染情況少，故其溶氧量高。又以高雄港 30 號碼頭平均值為 2.0mg / l 為最低，可能是污染嚴重之故。

## 3. 各港平均導電度

各港平均約在 9,000~10,000 $\mu$  mho 之間，變化不大，若換算一般常用電阻值，則為 111~100 $\Omega$ cm。

## 4. 各港平均水溫

因係港池海水，水深較淺，所以水溫常隨季節變化而變，然而差異不大。而值得注意的是高雄港 30 號碼頭，因位於火力電廠溫排水口處，故其水溫較其它港口為高。

## 5. 各港氯離子含量

以蘇澳港 3 號碼頭平均 18,700ppm 為最高，台中港 5 號碼頭 17,500ppm 為最低。氯離子含量愈高，對港灣 R.C. 結構物之耐久性構成之威脅性很大。

## 6. 各港硫酸根離子含量

以蘇澳港 3 號碼頭平均 2,482ppm 為最高，基隆港西 1 號碼頭平均 2,318ppm 為最低。

綜合上述以蘇澳港處於較嚴重腐蝕環境下，所以其日後在建造港灣結構物，防蝕處理...等工程時應注意其惡劣水質問題。另外高雄港 30 號碼頭位於台電公司火力發電廠溫排水口處附近造成海水 pH 值降低，溶氧量減少、水溫升高，其種種原因將對港灣 RC 結構物腐蝕造成影響，實有深入探討的必要。

表 5-1 基隆港西 1 號碼頭水質分析表

項目	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月	年平均值
pH值	數值	7.6	8.1	8.1	8.1	8.2	8.1	8.2	8.2	8.2	8.0	8.1	
	最高值	7.5	8.0	8.0	7.9	8.0	8.0	8.1	8.0	8.0	7.9	8.0	8.0
	最低值	7.2	7.7	7.8	7.6	7.7	7.8	7.6	7.9	7.7	7.7	7.5	7.9
溶氧量 (mg/l)	最高值	3.2	6.1	7.0	4.3	2.4	2.2	3.9	3.5	3.5	2.2	2.8	
	平均值	2.7	5.6	6.3	3.2	1.9	2.5	1.7	3.0	3.1	2.0	2.1	3.1
	最低值	1.7	5.0	5.1	1.1	1.3	2.2	1.0	1.4	2.2	1.6	1.5	
導電度 ( $\mu$ mho)	最高值	11,040	9,570	9,640	9,610	9,490	9,700	9,640	9,550	9,540	9,740	9,680	
	平均值	10260	9,170	9,210	9,160	8,910	9,190	9,300	9,340	9,120	9,590	9,430	9,310
	最低值	7900	8,280	7,800	7,460	7,730	8,000	8,540	8,640	8,220	8,900	8,600	
水溫 ( $^{\circ}$ C)	最高值	17.7	18.6	18.2	22.3	26.6	27.5	28.2	26.4	25.7	21.7	20.1	
	平均值	17.4	17.8	16.9	22.2	26.2	26.7	27.4	25.6	25.1	21.3	20.0	22.7
	最低值	17.3	17.6	16.5	22.1	25.9	26.2	27.1	25.3	24.9	21.2	19.8	
Cl <sup>-</sup> (ppm)	最高值	18740	18,160	20,530	19,970	17,800	17,960	19,840	18,390	16,440	20,190	17,270	
	平均值	17800	16,780	19,660	18,660	17,310	17,230	18,870	16,960	15,840	18,550	16,980	17,610
	最低值	10605	13,430	18,330	16,510	16,700	16,020	16,910	14,780	15,580	17,010	16,200	
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> (ppm)	最高值	2,792	2,598	2,445	2,325	2,220	2,106	2,856	2,672	2,407	2,537	2,404	
	平均值	2,652	2,320	2,312	2,174	2,131	2,052	2,522	2,462	2,355	2,242	2,336	2,318
	最低值	2,318	1,622	2,161	1,904	1,943	1,987	2,079	1,914	2,283	1,979	2,179	

表5-2 基隆港西14號碼頭水質分析表

項目	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月	年平均值
pH值	數值	7.7	8.2	8.2	8.2	8.3	8.1	8.3	8.2	8.3	8.1	8.1	
	最高值	7.7	8.1	8.1	8.2	8.2	8.1	8.2	8.2	8.3	8.0	8.1	8.1
	最低值	7.5	8.0	8.0	7.8	8.0	8.2	8.0	8.0	8.1	8.2	7.8	7.8
溶氧量 (mg/l)	最高值	3.8	7.5	8.8	5.5	4.3	3.8	4.2	4.0	4.1	2.8	3.5	
	平均值	3.5	7.0	8.2	4.7	3.8	3.4	3.9	3.6	3.9	2.3	3.1	4.2
	最低值	3.1	6.6	7.8	3.6	3.5	2.9	3.0	3.4	3.1	3.6	2.0	1.9
導電度 ( $\mu$ mho)	最高值	11,060	9,630	9,740	9,660	9,640	9,640	9,630	9,550	9,620	9,800	9,780	
	平均值	10,700	9,470	9,580	9,540	9,490	9,520	9,440	9,370	9,490	9,730	9,670	9,630
	最低值	10,240	9,130	9,200	9,280	9,290	9,260	9,210	9,000	9,210	9,480	9,540	
水溫 (°C)	最高值	17.6	18.4	17.3	22.5	26.4	27.4	28.1	26.3	26.1	25.3	21.6	20.2
	平均值	17.4	17.7	16.7	22.3	26.1	26.8	27.5	25.7	25.9	25.1	21.4	20.1
	最低值	17.3	17.5	16.5	22.1	25.8	26.2	27.3	25.0	25.7	24.9	21.3	19.9
Cl <sup>-</sup> (ppm)	最高值	20480	18,160	21,030	20,530	18,900	18,920	20,630	19,670	18,610	19,750	17,750	
	平均值	19,020	17,140	18,470	19,840	18,510	18,260	18,910	18,350	18,400	17,720	18,450	18,380
	最低值	18,570	14,520	14,780	19,340	17,990	17,220	18,190	17,030	18,000	17,130	15,240	17,210
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (ppm)	最高值	2,822	2,585	2,602	2,398	2,177	2,196	2,551	2,681	2,354	2,451	2,498	
	平均值	2,679	2,463	2,481	2,307	2,111	2,149	2,502	2,363	2,326	2,360	2,326	2,376
	最低值	2,512	2,336	2,375	2,203	2,038	2,102	2,445	2,188	2,277	2,280	2,053	2,345

表 5-3 台中港 5 號碼頭水質分析表

項目	數值	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月	年平均值
pH值	最高值	7.8	7.9	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.2	8.2	8.2	8.1	8.2	
	平均值	7.6	7.8	7.8	7.9	7.9	7.9	8.0	8.1	8.1	8.1	8.0	8.2	8.0
	最低值	7.3	7.7	7.7	7.8	7.8	7.8	7.9	8.1	8.0	8.0	8.0	8.0	
溶氧量 (mg/l)	最高值	5.2	5.8	4.5	5.2	4.7	3.6	4.2	3.9	4.0	4.3	4.5	5.2	
	平均值	4.5	4.5	3.9	4.1	4.2	3.4	3.9	3.6	3.7	3.9	4.1	3.8	4.0
	最低值	4.2	3.2	3.3	3.0	4.0	3.2	3.6	3.2	3.4	3.0	3.1	3.4	
導電度 ( $\mu$ mho)	最高值	10,840	9,550	9,600	9,660	9,330	9,160	9,230	9,190	9,500	9,800	9,750	9,900	
	平均值	10,140	9,440	9,400	9,320	9,190	8,980	8,920	8,360	9,230	9,480	9,620	9,610	9,310
	最低值	9,500	9,200	8,970	8,910	8,110	8,660	8,540	6,750	9,000	9,300	9,500	9,100	
水溫 ( $^{\circ}$ C)	最高值	18.1	20.0	21.1	24.6	26.6	29.4	29.4	28.9	29.9	28.2	22.7	20.0	
	平均值	18.0	18.6	20.6	24.1	26.2	29.2	28.9	28.7	29.4	27.7	22.6	19.5	24.5
	最低值	17.9	18.4	20.4	23.8	25.9	29.1	28.5	28.6	29.1	27.4	22.5	19.3	
Cl <sup>-</sup> (ppm)	最高值	19,780	17,710	17,100	18,810	18,540	19,810	18,240	18,010	19,110	19,430	19,880	18,040	
	平均值	17,510	16,580	16,420	16,700	16,300	17,500	17,930	17,480	18,850	18,800	18,840	17,100	17,500
	最低值	16,150	14,630	14,600	15,940	14,980	16,260	17,630	16,010	18,300	17,770	17,880	14,860	
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (ppm)	最高值	2,738	2,409	2,421	2,479	2,423	2,173	2,438	2,728	2,619	2,513	2,446	2,502	
	平均值	2,574	2,368	2,376	2,401	2,331	2,098	2,409	2,664	2,507	2,403	2,371	2,468	2,414
	最低值	2,326	2,143	2,308	2,249	2,284	2,061	2,386	2,629	2,387	2,299	2,281	2,404	

表 5-4 台中港 8 號碼頭水質分析表

項目	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月	年平均值
pH值	數值	7.9	8.0	8.0	8.0	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.0
	最高值	7.9	8.0	8.0	8.0	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.3
	平均值	7.7	7.9	7.8	8.0	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.2
溶氧量 (mg/l)	數值	7.6	7.7	7.7	7.8	8.0	8.0	7.9	8.0	8.0	8.0	8.1	
	最高值	5.8	5.6	4.6	5.3	5.1	4.9	5.1	4.7	4.8	5.0	4.5	
	平均值	4.9	4.5	4.1	4.6	4.2	4.4	4.5	4.4	4.4	4.3	4.1	4.3
導電度 ( $\mu$ mho)	數值	4.4	3.7	3.5	3.7	3.9	3.9	3.8	3.8	4.2	3.9	3.8	3.2
	最高值	11,040	9,630	9,660	9,710	9,790	9,600	9,510	9,360	9,520	9,880	9,840	9,970
	平均值	10,100	9,460	9,440	9,500	9,520	9,300	9,200	9,120	9,330	9,660	9,790	9,910
水溫 (°C)	數值	9,850	8,840	9,270	9,130	9,220	8,850	8,510	8,310	9,020	9,450	9,710	9,800
	最高值	18.7	19.3	21.0	24.7	27.0	29.4	29.3	28.9	30.1	28.3	22.5	20.2
	平均值	18.5	18.9	20.7	24.0	26.5	28.9	28.6	28.2	29.5	27.9	22.3	19.8
Cl <sup>-</sup> (ppm)	數值	18.1	18.6	20.5	23.5	25.7	28.4	28.2	27.5	28.9	27.4	22.2	19.3
	最高值	19,700	17,910	17,110	18,340	17,910	17,730	18,620	19,120	19,090	19,000	20,310	18,410
	平均值	17,660	16,160	16,780	16,990	17,030	16,940	17,830	18,280	18,050	18,660	18,920	17,240
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (ppm)	數值	16,920	13,570	16,350	15,430	16,700	15,860	16,650	17,300	17,180	17,020	17,790	15,190
	最高值	2,749	2,434	2,412	2,391	2,543	2,270	2,459	2,489	2,458	2,512	2,418	2,676
	平均值	2,578	2,386	2,376	2,352	2,406	2,137	2,408	2,266	2,402	2,389	2,360	2,552
最低值	2,132	2,332	2,330	2,273	2,349	2,031	2,206	2,019	2,325	2,345	2,289	2,433	
													2,384

表 5-5 高雄港 2 號碼頭水質分析表

項目	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月	年平均值
pH值	數值	7.6	8.1	8.2	8.1	8.2	8.0	8.2	8.2	8.0	8.1	8.2	
	最高值	7.6	8.0	8.1	7.9	8.1	8.2	8.0	8.2	8.0	8.0	8.2	8.0
	最低值	7.5	7.8	7.9	7.6	7.8	8.3	7.9	7.8	8.0	7.9	7.8	8.1
溶氧量 (mg/l)	數值	2.1	5.0	8.6	5.0	5.3	4.6	3.0	4.3	4.3	3.2	2.2	
	最高值	2.0	4.5	6.1	3.7	4.4	4.0	2.4	3.0	3.7	2.7	2.1	3.5
	最低值	1.7	4.0	5.2	1.9	3.8	3.6	1.9	1.8	3.4	1.9	2.0	
導電度 ( $\mu$ mho)	數值	11,060	9,730	9,900	9,960	9,740	9,310	9,520	8,860	9,510	9,790	9,820	
	最高值	11,008	9,700	9,821	9,550	9,492	8,485	9,325	8,009	9,402	9,719	9,763	9,490
	最低值	10,980	9,660	9,620	8,280	9,090	7,400	9,130	6,830	9,190	9,680	9,750	
水溫 (°C)	數值	24.8	23.8	25.8	25.3	28.0	30.5	30.4	29.5	29.8	25.6	23.1	
	最高值	23.5	23.7	25.3	25.0	27.2	28.9	29.7	28.7	29.3	25.5	23.0	26.5
	最低值	22.3	23.7	25.0	24.8	26.5	28.2	28.8	28.1	29.1	25.4	22.9	
Cl <sup>-</sup> (ppm)	數值	18,470	19,250	18,710	21,500	18,840	17,550	20,790	15,930	17,580	18,020	19,530	
	最高值	17,987	19,097	18,368	19,051	17,915	15,516	18,300	14,727	16,796	17,641	18,669	17,710
	最低值	17,530	18,950	17,660	15,470	16,960	14,020	16,900	13,840	15,840	17,080	18,010	
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> (ppm)	數值	2,767	2,675	2,633	2,693	2,549	2,387	2,611	2,191	2,513	2,560	2,619	
	最高值	2,450	2,658	2,520	2,384	2,356	2,188	2,396	1,998	2,329	2,515	2,541	2,396
	最低值	2,235	2,623	2,464	2,175	2,238	2,048	2,175	1,916	2,092	2,417	2,462	

表 5-6 高雄港 30 號碼頭水質分析表

項目	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月	年平均值
pH值	數值	7.6	8.1	8.0	7.9	8.2	8.2	7.9	8.3	8.0	8.0	8.2	
	最高值	7.5	7.9	7.8	7.7	8.0	8.0	7.4	8.1	7.8	7.8	8.0	7.8
	最低值	7.2	7.5	7.2	7.3	7.8	7.7	6.9	7.8	7.2	7.3	7.4	
溶氧量 (mg/l)	最高值	2.0	4.0	3.1	1.3	4.2	2.7	1.3	4.6	3.8	2.5	2.2	
	平均值	1.3	3.3	2.3	0.8	3.9	1.5	0.8	3.1	2.1	1.8	1.5	2.0
	最低值	0.5	2.7	1.7	0.0	3.4	0.5	0.4	1.2	1.4	0.7	0.6	
導電度 ( $\mu$ mho)	最高值	11,040	9,730	9,900	9,930	9,740	9,530	8,880	9,620	9,770	9,770	9,830	
	平均值	10,770	9,527	9,624	9,463	9,517	8,742	8,179	9,398	9,485	9,549	9,663	9,440
	最低值	10,560	9,000	8,770	6,370	9,160	8,080	7,030	9,110	8,610	8,910	9,270	
水溫 ( $^{\circ}$ C)	最高值	26.8	27.0	29.2	27.0	29.0	34.5	33.2	32.9	31.6	26.9	27.0	
	平均值	24.2	24.7	25.7	25.3	27.4	30.8	29.8	30.1	28.9	26.3	24.1	27.3
	最低值	22.3	23.9	24.6	24.8	26.4	29.0	29.0	29.1	29.2	28.1	25.7	23.4
Cl <sup>-</sup> (ppm)	最高值	18,230	18,990	19,270	21,760	19,570	17,700	19,720	16,610	19,880	17,680	19,460	
	平均值	17,771	18,469	18,575	19,346	17,961	15,872	18,393	14,959	16,614	18,141	17,007	17,630
	最低值	17,280	18,010	17,430	15,240	15,980	13,930	17,100	13,580	15,700	16,620	16,660	
SO <sub>4</sub> <sup>+</sup> (ppm)	最高值	2,664	2,656	2,547	2,597	2,502	2,643	2,547	2,221	2,656	2,466	2,640	
	平均值	2,438	2,637	2,459	2,354	2,390	2,185	2,266	2,025	2,425	2,380	2,510	2,369
	最低值	2,255	2,620	2,297	1,856	2,244	1,910	2,010	1,929	2,023	2,102	2,244	

表5-7花蓮港15號碼頭水質分析表

項目	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月	年平均值
pH值	數值	7.9	8.3	8.2	8.3	8.2	8.2	8.4	8.4	8.3	8.2	8.4	
	最高值	7.8	8.2	8.2	8.2	8.1	8.1	8.4	8.3	8.3	8.2	8.2	8.2
	最低值	7.7	8.1	8.2	8.2	8.1	8.0	8.3	8.3	8.2	8.2	8.2	8.2
溶氧量 (mg/l)	最高值	4.6	8.3	8.5	7.8	7.4	4.2	3.9	4.3	5.1	4.2	5.2	
	平均值	4.0	7.4	7.6	6.8	5.7	5.1	3.8	3.8	3.7	3.3	3.9	4.9
	最低值	3.4	4.7	6.3	5.9	4.7	4.8	3.3	3.2	3.5	2.8	2.4	2.8
導電度 ( $\mu$ mho)	最高值	11,050	9,570	9,780	9,990	9,630	9,720	9,300	9,260	9,690	9,780	9,880	
	平均值	10,630	9,230	9,600	9,700	9,150	8,760	9,160	8,950	9,020	9,740	9,820	9,420
	最低值	10,090	8,820	9,060	8,910	8,290	7,190	8,140	8,600	8,580	9,620	9,500	
水溫 ( $^{\circ}$ C)	最高值	23.5	23.7	22.9	24.8	27.0	29.3	27.5	27.1	27.2	24.7	24.0	
	平均值	23.2	23.4	22.4	24.4	26.0	26.9	27.8	27.1	26.8	24.6	23.7	25.3
	最低值	22.2	22.9	21.0	24.3	25.7	25.9	27.1	26.6	26.4	24.2	23.1	
Cl <sup>-</sup> (ppm)	最高值	17,160	21,070	20,010	19,220	18,490	17,220	19,440	22,480	17,130	19,800	18,370	
	平均值	16,510	19,340	19,010	18,520	17,410	16,760	18,020	19,220	16,290	18,500	17,980	17,810
	最低值	15,630	16,940	16,830	17,210	15,430	16,320	15,320	16,620	15,760	17,160	17,440	
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> (ppm)	最高值	2,617	2,586	2,512	2,489	2,338	2,279	2,405	2,640	2,317	2,416	2,646	
	平均值	2,414	2,364	2,458	2,346	2,233	2,209	2,203	2,229	2,225	2,313	2,552	2,319
	最低值	2,235	2,028	2,122	2,200	2,057	2,099	2,178	2,004	2,146	2,284	2,476	

表 5-8 花蓮港 20 號碼頭水質分析表

項目	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月	年平均值
pH值	數值	7.9	8.3	8.3	8.3	8.2	8.2	8.4	8.4	8.3	8.2	8.3	8.3
	最高值	7.9	8.3	8.3	8.3	8.2	8.2	8.4	8.4	8.3	8.2	8.3	8.3
	平均值	7.8	8.2	8.3	8.3	8.2	8.1	8.1	8.4	8.3	8.2	8.2	8.2
溶氧量 (mg/l)	數值	7.6	8.0	8.2	8.2	8.0	7.9	8.3	8.2	8.2	8.1	8.0	8.0
	最高值	4.9	10.1	9.7	8.2	8.9	6.3	4.6	5.9	5.7	5.2	5.8	5.8
	平均值	4.1	8.5	8.2	7.4	7.0	5.5	4.1	5.1	3.6	4.3	5.1	5.8
導電度 ( $\mu$ mho)	數值	3.4	7.9	7.3	6.7	6.1	4.7	3.7	4.6	2.8	3.7	3.2	3.2
	最高值	11,030	9,670	9,920	10,080	9,830	9,710	9,780	9,670	9,420	9,740	9,850	9,950
	平均值	10,500	9,480	9,710	9,960	9,380	9,050	9,480	9,130	9,270	9,500	9,820	9,900
水溫 ( $^{\circ}$ C)	數值	10,100	8,880	9,090	9,700	7,930	8,190	8,710	8,970	8,770	9,770	9,780	9,780
	最高值	24.2	23.9	23.5	24.9	26.8	28.9	29.2	27.6	26.9	27.0	24.6	23.8
	平均值	24.0	23.7	22.5	24.5	26.1	27.0	27.0	27.1	26.8	26.9	24.6	23.7
Cl <sup>-</sup> (ppm)	數值	23.8	23.0	21.6	24.2	25.6	26.4	25.8	26.7	26.6	24.5	23.5	23.5
	最高值	19,190	21,260	22,070	21,810	18,710	17,440	19,730	17,410	16,350	18,990	18,190	19,290
	平均值	18,070	19,250	19,960	18,880	17,050	16,390	18,170	16,330	15,950	17,490	17,620	18,250
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (ppm)	數值	16,990	16,670	16,610	18,010	13,940	15,010	14,930	13,680	15,390	16,270	17,360	17,800
	最高值	2,835	2,629	2,469	2,818	2,389	2,360	2,484	2,900	2,220	2,485	2,374	2,752
	平均值	2,652	2,447	2,421	2,527	2,232	2,250	2,328	2,314	2,135	2,360	2,345	2,594
數值	2,318	2,015	2,335	2,030	2,024	2,152	2,095	1,851	2,046	2,171	2,304	2,478	2,478

表 5-9 蘇澳港 3 號碼頭水質分析表

項目	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月	年平均值
pH值	數值	7.7	8.2	8.1	8.1	8.3	8.1	8.3	8.3	8.3	8.0	8.1	
	最高值												
	平均值	7.6	8.0	8.0	8.1	8.2	7.8	8.2	8.2	8.2	8.0	8.1	8.0
溶氧量 (mg/l)	最低值	7.3	7.1	7.4	7.6	7.9	6.7	7.9	7.9	8.1	7.9	7.8	
	最高值	5.7	8.7	9.5	8.9	7.1	5.8	5.9	5.4	4.5	5.5	3.1	
	平均值	4.7	7.9	8.2	6.3	5.7	5.2	4.5	4.5	4.0	3.9	2.9	5.3
導電度 ( $\mu$ mho)	最低值	3.9	7.4	7.2	4.7	5.1	4.5	3.9	3.8	3.5	2.5	2.8	
	最高值	11,030	9,680	9,950	9,930	9,830	9,710	9,730	9,700	9,630	9,900	9,930	
	平均值	10,100	9,140	9,720	9,480	9,400	9,480	9,480	9,600	9,440	9,700	9,870	9,590
水溫 (°C)	最低值	9,980	4,850	8,950	7,250	7,550	8,270	9,300	8,840	9,230	8,800	9,710	
	最高值	21.6	22.6	21.8	23.8	24.5	31.0	27.7	27.0	26.9	23.7	22.9	
	平均值	21.4	22.2	21.5	23.4	24.2	28.1	27.1	26.7	26.8	23.4	22.7	24.5
Cl <sup>-</sup> (ppm)	最低值	21.3	20.8	20.9	22.0	23.5	26.5	26.4	26.2	26.6	22.8	22.5	
	最高值	20,580	21,110	21,650	21,040	19,250	18,790	19,700	20,280	19,330	20,160	19,860	18,700
	平均值	19,260	19,300	19,530	19,380	17,470	17,610	18,580	19,080	18,810	19,240	18,060	18,700
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> (ppm)	最低值	18,910	17,110	16,150	18,430	13,280	16,750	18,530	18,400	17,650	15,800	14,960	
	最高值	2,865	2,801	2,721	2,578	2,556	2,480	2,785	2,511	2,791	2,942	2,882	
	平均值	2,744	2,653	2,615	2,334	2,213	2,344	2,398	2,578	2,384	2,476	2,630	2,482
最低值	2,631	2,591	2,523	2,145	1,785	2,109	2,204	2,375	2,288	2,237	2,203	2,476	

表 5-10 蘇澳港 10 號碼頭水質分析表

項目	數值	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月	年平均值
pH值	最高值	7.8	8.3	8.2	8.2	8.3	8.4	8.1	8.3	8.1	8.2	8.1	8.2	8.2
	平均值	7.7	8.1	8.1	7.8	8.1	8.2	8.0	8.2	8.0	8.1	8.0	8.1	8.0
	最低值	7.5	7.8	7.9	6.9	7.6	7.7	7.7	7.9	7.9	7.8	7.9	7.4	7.9
溶氧量 (mg/l)	最高值	5.1	8.0	7.9	7.7	5.8	5.1	5.5	4.2	3.8	5.3	5.3	2.9	2.9
	平均值	3.7	7.4	6.8	5.7	4.9	4.5	4.9	3.9	3.5	4.3	4.5	2.5	4.7
	最低值	2.4	6.5	6.5	3.4	3.9	4.0	4.1	3.4	3.0	3.2	3.8	2.0	2.0
導電度 ( $\mu$ mho)	最高值	11,060	9,700	9,950	9,830	9,830	9,750	9,730	9,710	9,680	9,670	9,910	9,950	9,950
	平均值	10,630	9,280	9,790	9,470	9,280	9,130	9,490	9,500	9,450	9,540	9,670	9,800	9,590
	最低值	10,060	8,390	9,400	8,550	8,620	6,100	8,910	8,880	8,500	9,210	9,000	9,640	9,640
水溫 (°C)	最高值	21.5	22.9	22.0	23.8	25.0	27.4	30.6	27.7	27.1	26.9	23.9	22.7	22.7
	平均值	21.3	22.5	21.6	23.3	24.6	25.9	28.1	27.3	26.7	26.5	23.6	22.5	24.5
	最低值	21.1	22.1	21.0	22.6	24.2	24.9	26.9	26.8	26.3	26.0	23.3	22.3	22.3
Cl <sup>-</sup> (ppm)	最高值	20,700	21,250	22,540	21,480	18,640	18,050	19,710	20,510	20,010	19,300	18,840	18,350	18,350
	平均值	18,980	18,630	19,010	19,690	16,790	17,280	18,490	17,500	19,050	18,200	17,560	17,850	18,250
	最低值	17,990	14,430	13,600	16,980	14,930	16,550	17,840	16,530	17,910	17,110	15,910	17,360	17,360
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (ppm)	最高值	2,935	2,888	2,789	2,434	2,365	2,420	2,474	2,857	2,503	2,409	2,364	2,647	2,647
	平均值	2,667	2,588	2,521	2,321	2,182	2,277	2,341	2,528	2,439	2,358	2,205	2,506	2,411
	最低值	2,311	2,346	2,356	2,163	2,043	2,190	2,188	2,325	2,355	2,268	1,919	2,366	2,366

基隆港西1號碼頭PH值

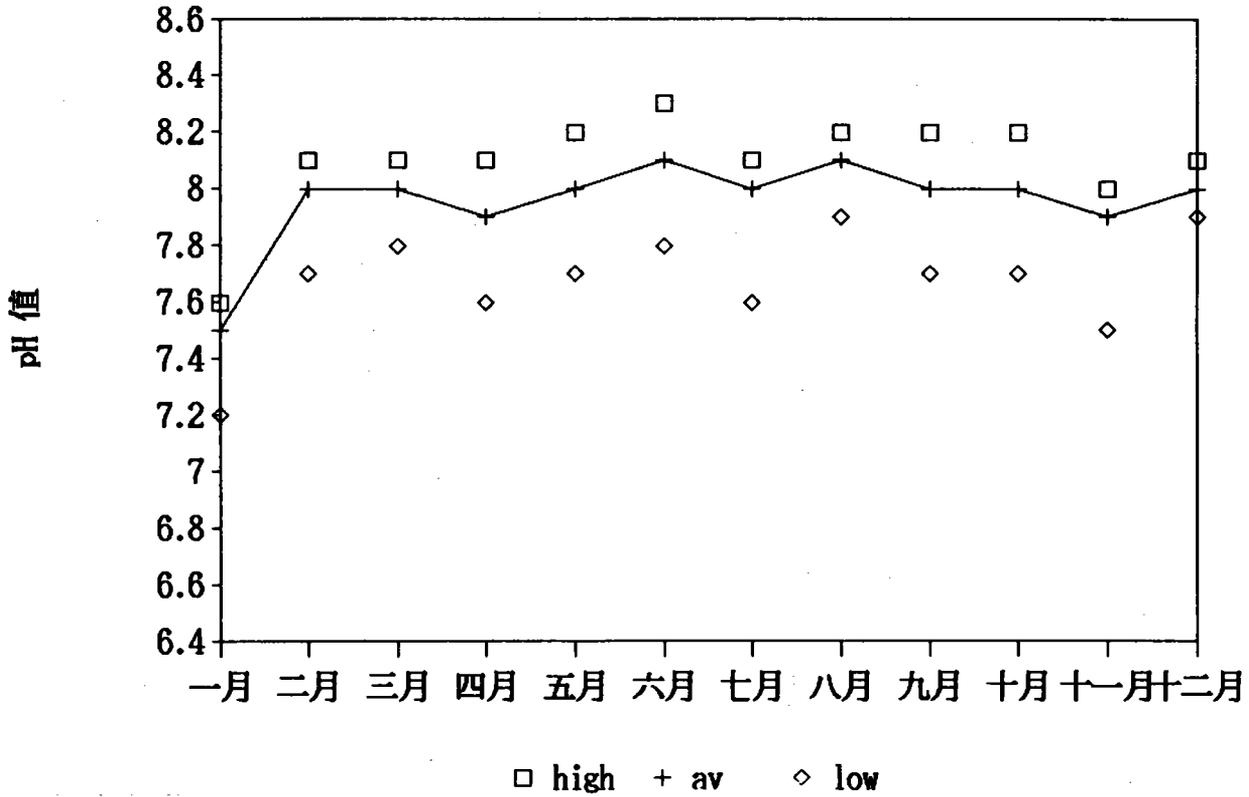


圖 5-1 基隆港西1號碼頭海水水質分析 (a)

基隆港西1號碼頭溶氧量

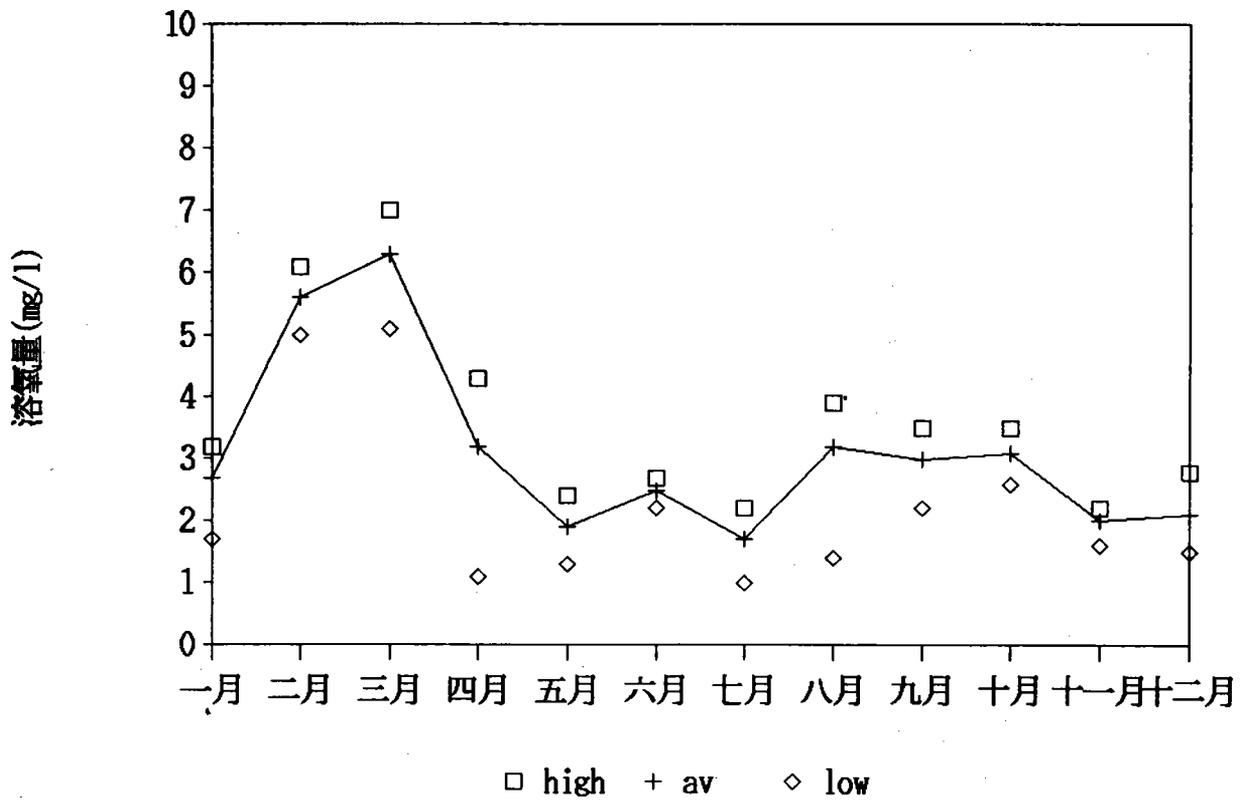


圖 5-1 基隆港西1號碼頭海水水質分析 (b)

基隆港西1號碼頭導電度

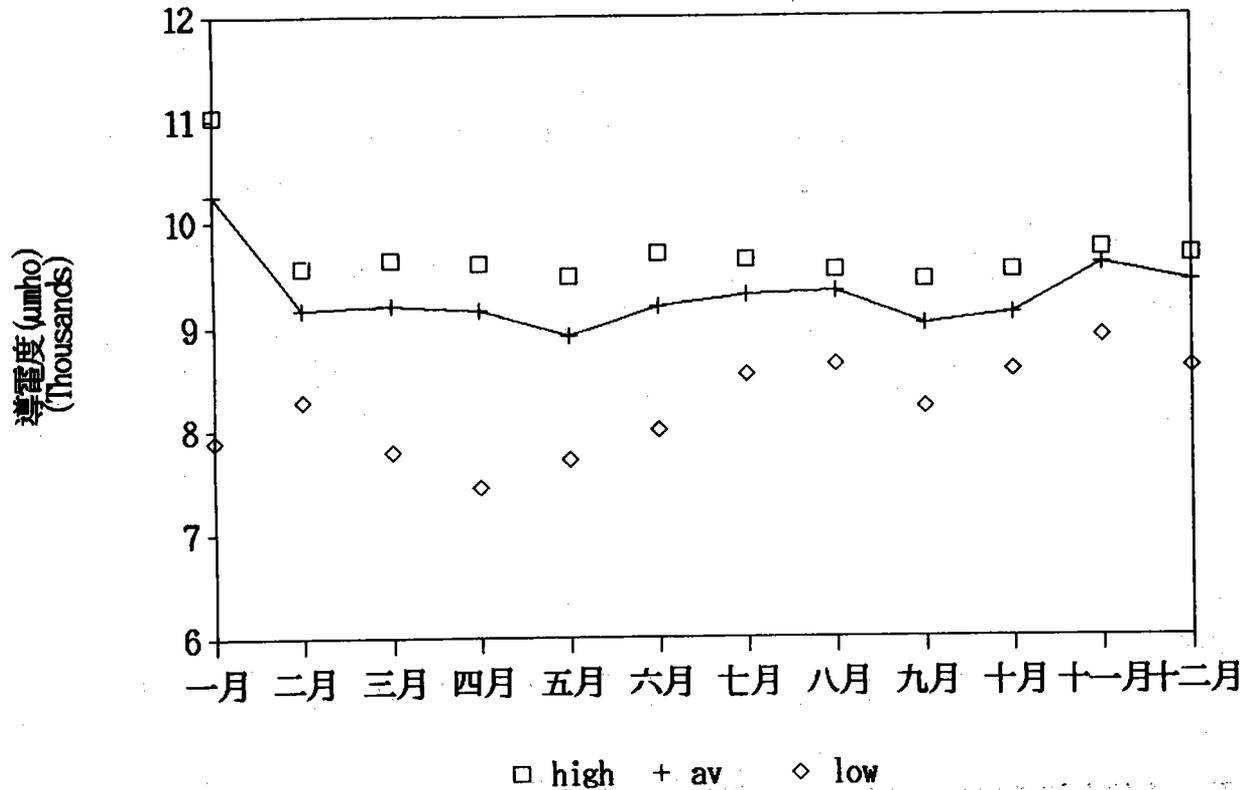


圖 5-1 基隆港西1號碼頭海水水質分析 (c)

基隆港西1號水溫

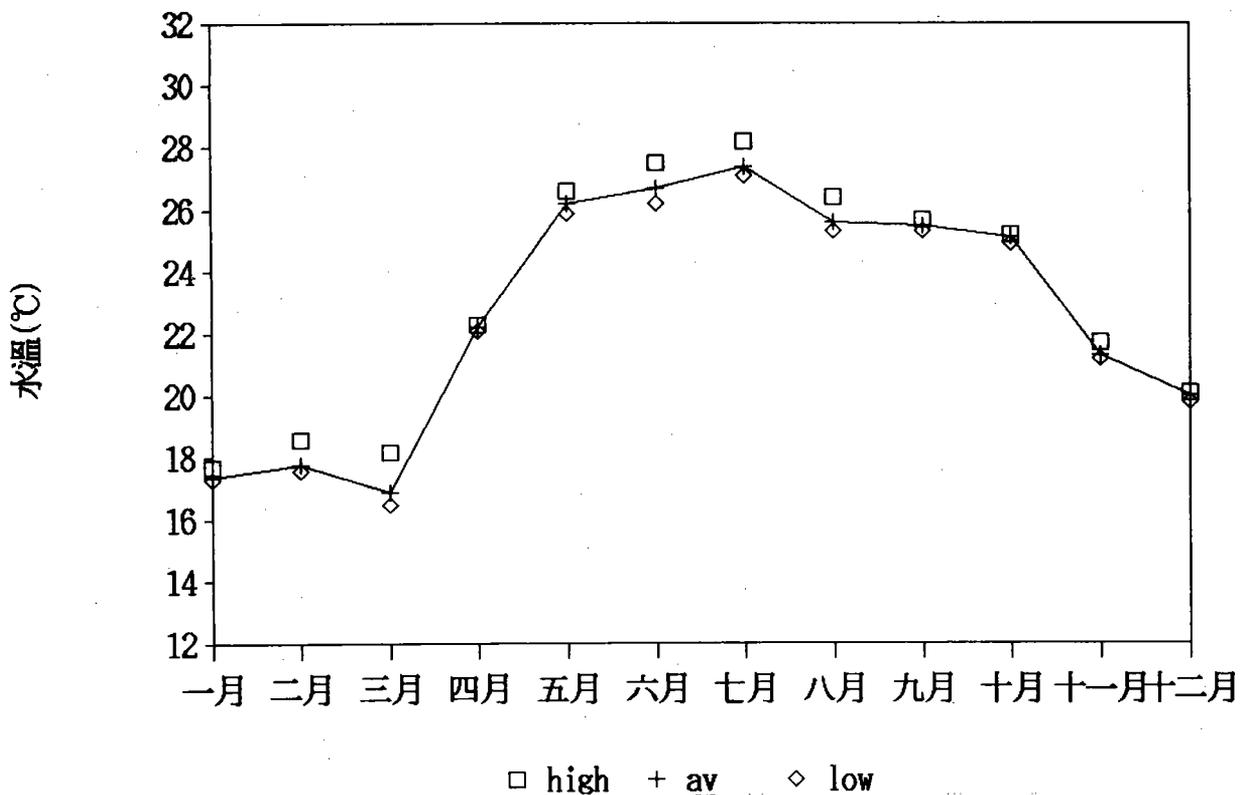


圖 5-1 基隆港西1號碼頭海水水質分析 (d)

基隆港西1號碼頭氯離子

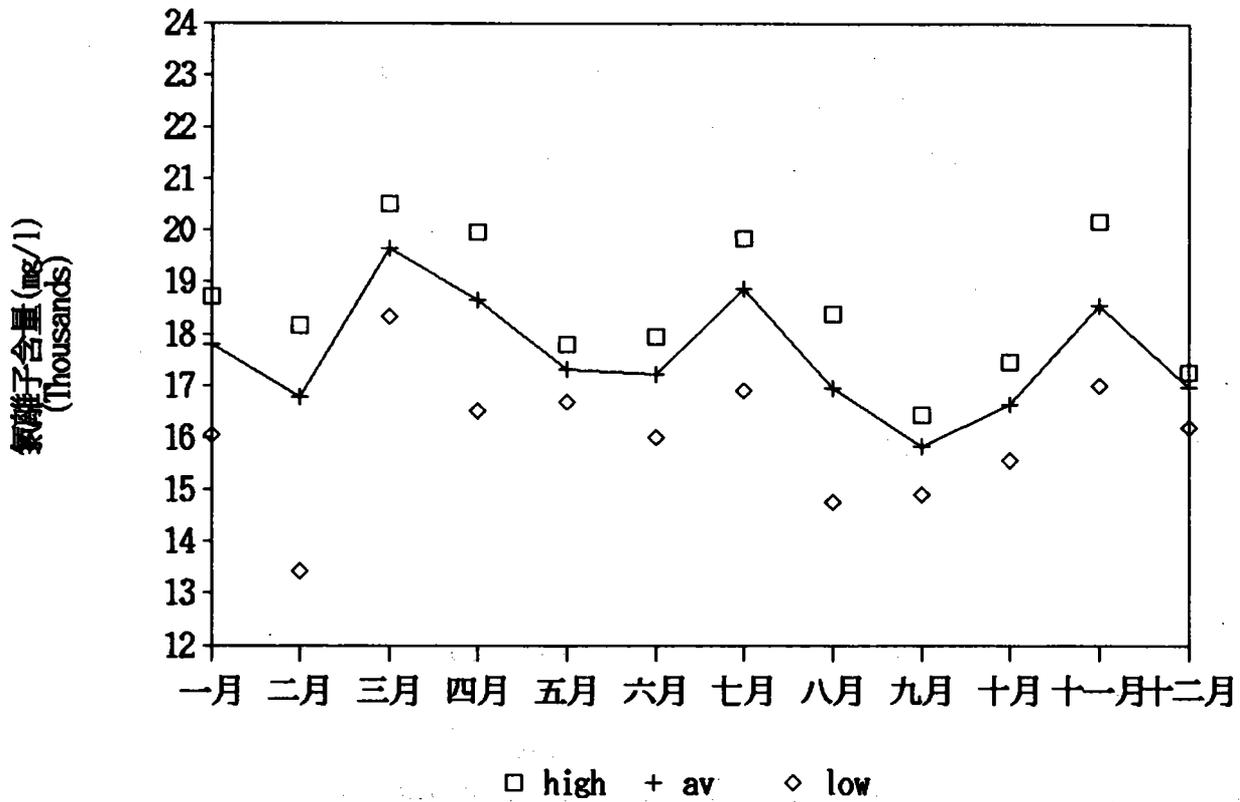


圖 5-1 基隆港西1號碼頭海水水質分析 (e)

基隆港西1號碼頭硫酸根離子

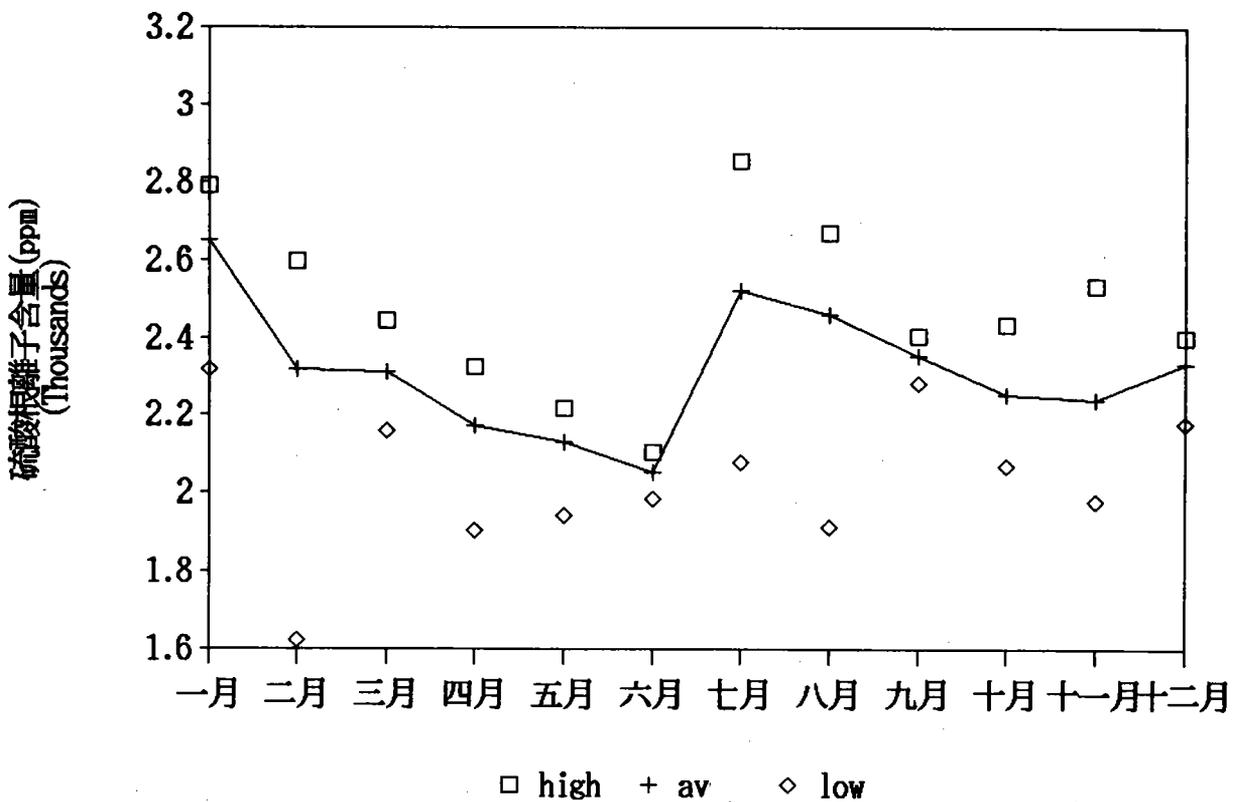


圖 5-1 基隆港西1號碼頭海水水質分析 (f)

基隆港西14號碼頭PH值

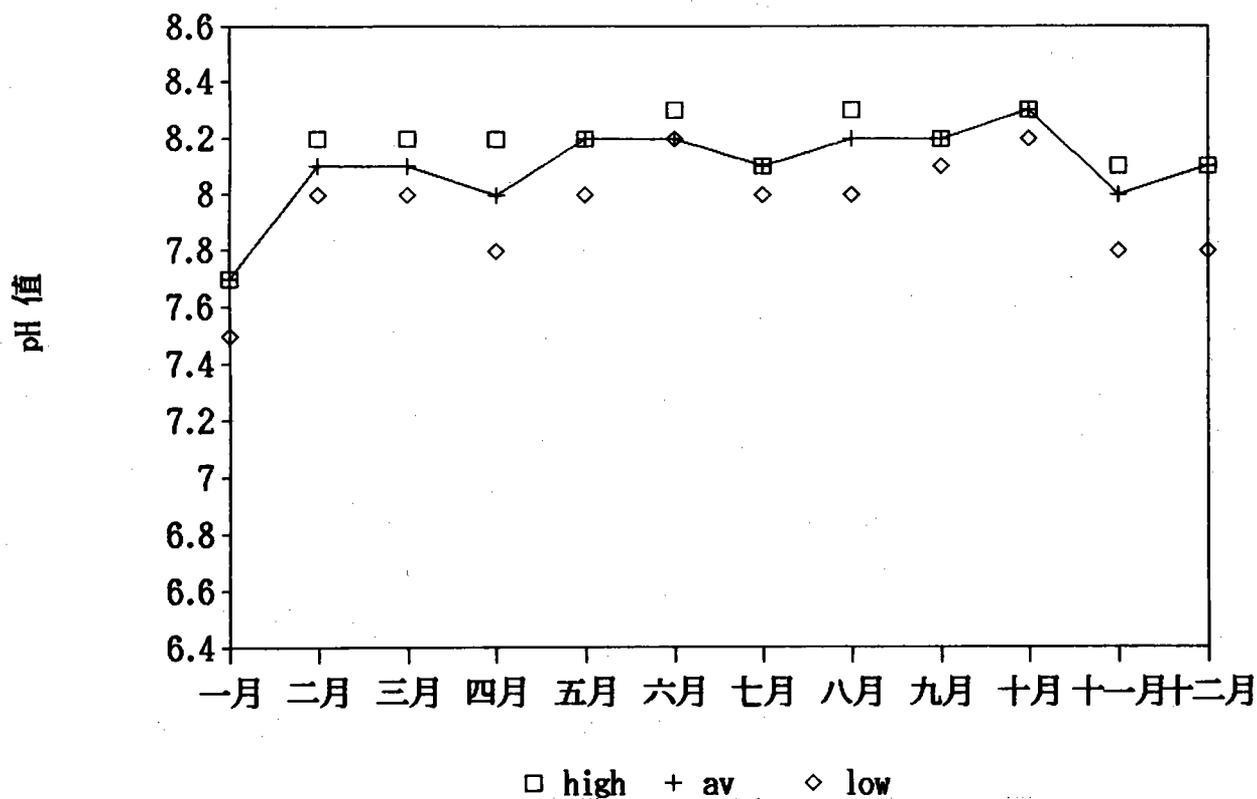


圖 5-2 基隆港西14號碼頭海水水質分析 (a)

基隆港西14號碼頭溶氧量

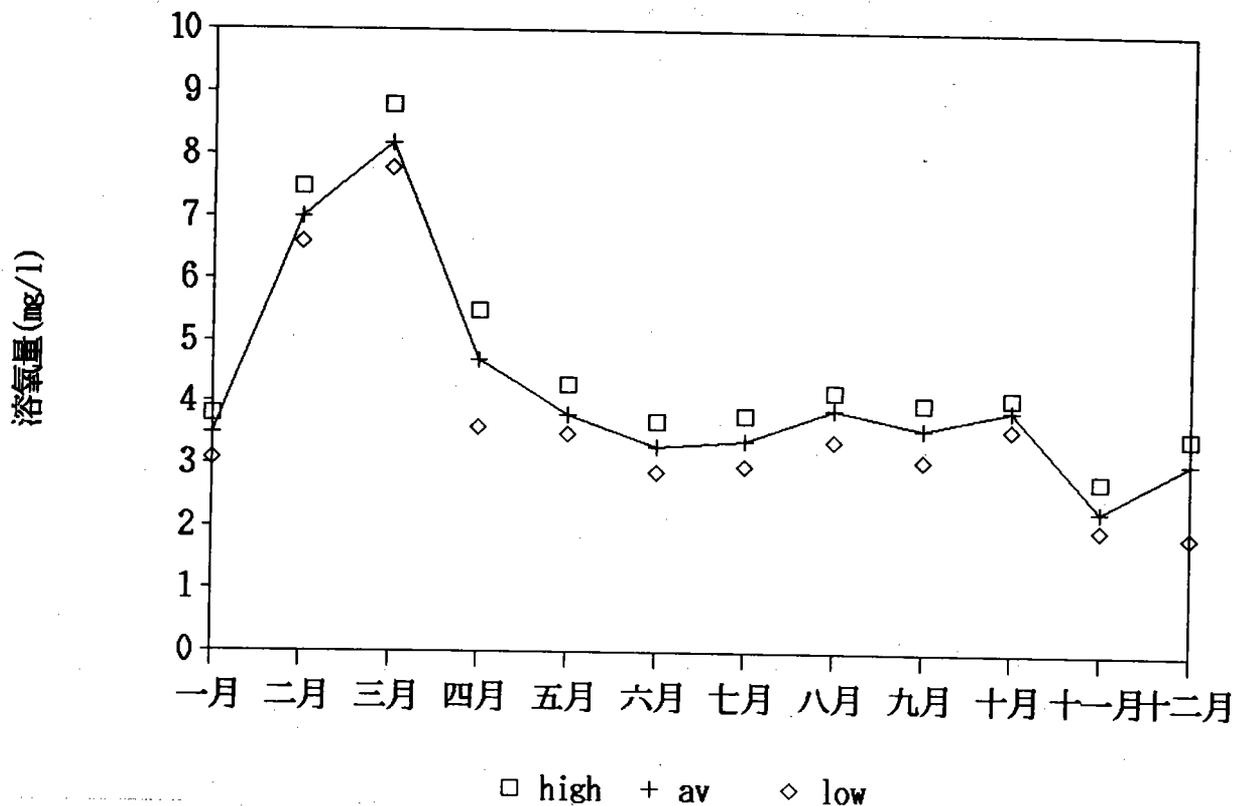


圖 5-2 基隆港西14號碼頭海水水質分析 (b)

基隆港西14號碼頭導電度

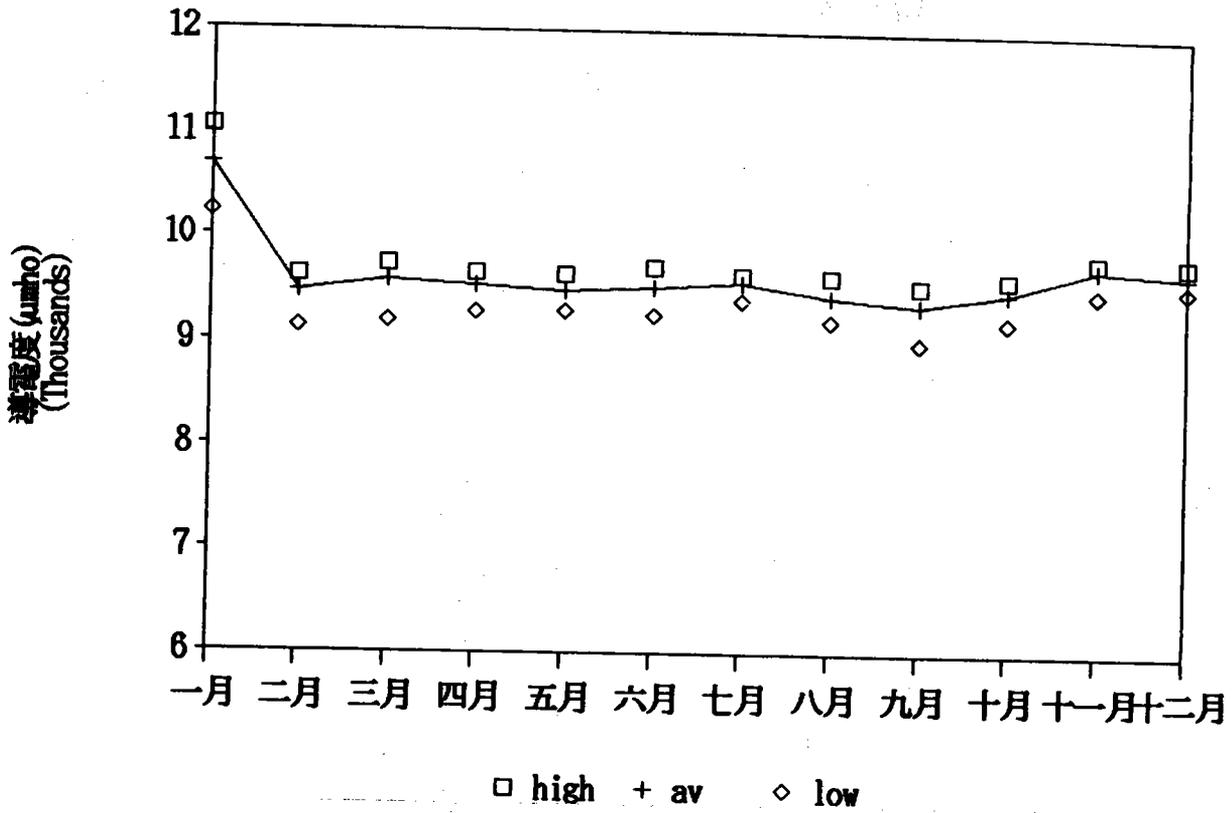


圖 5-2 基隆港西14號碼頭海水水質分析 (c)

基隆港西14號碼頭水溫

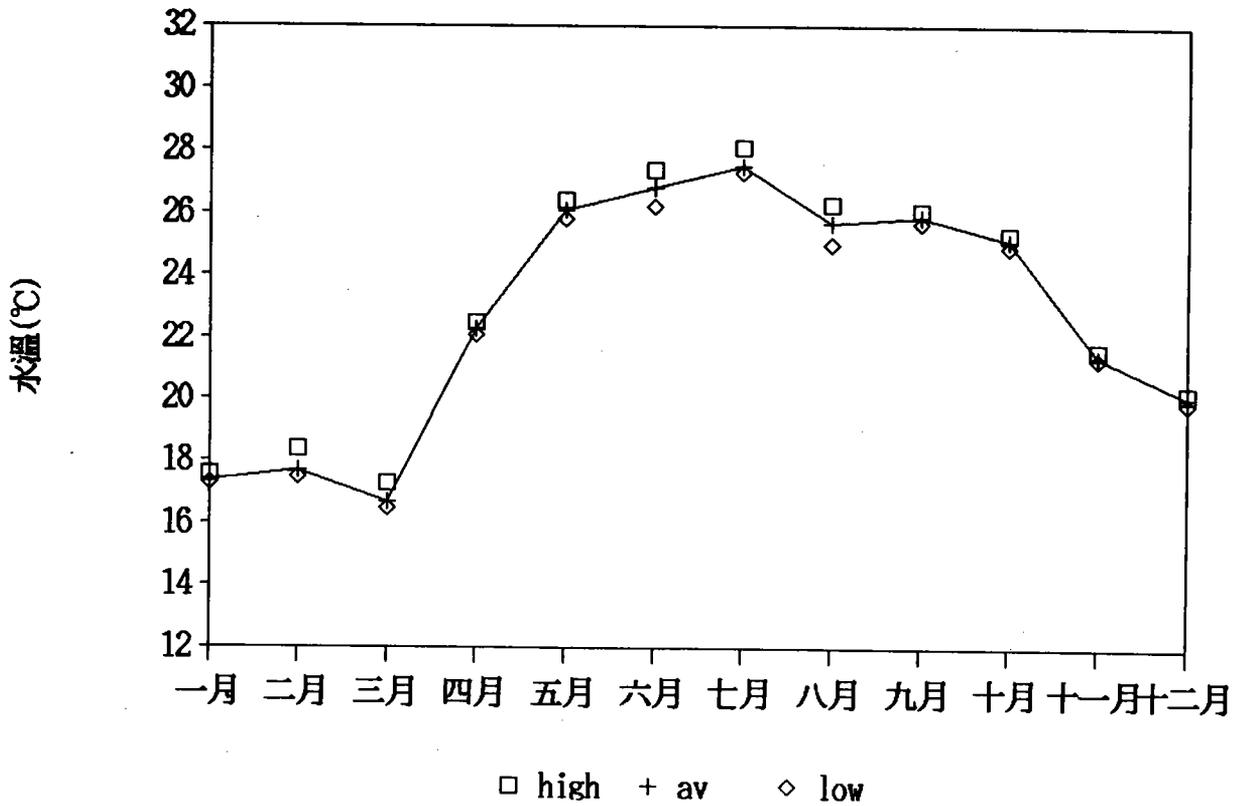


圖 5-2 基隆港西14號碼頭海水水質分析 (d)

基隆港西14號碼頭氯離子

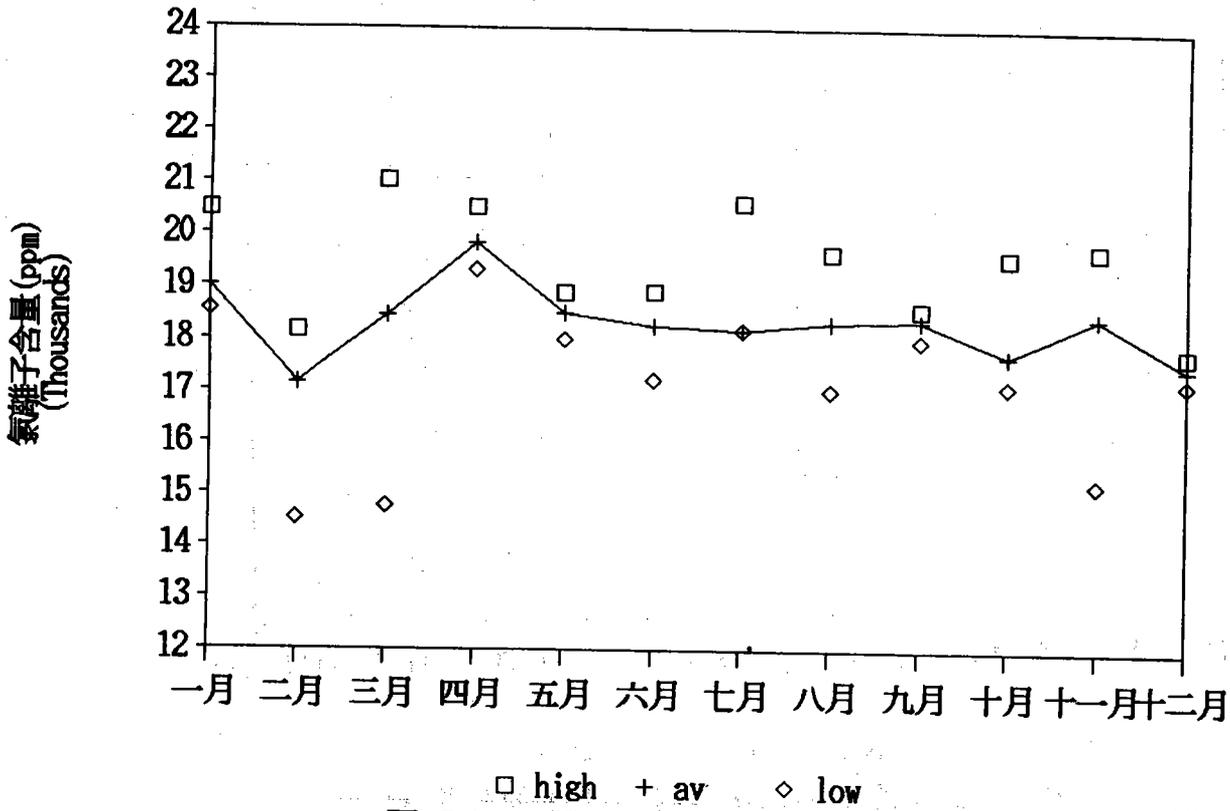


圖 5-2 基隆港西14號碼頭海水水質分析 (e)

基隆港西14號碼頭硫酸根離子

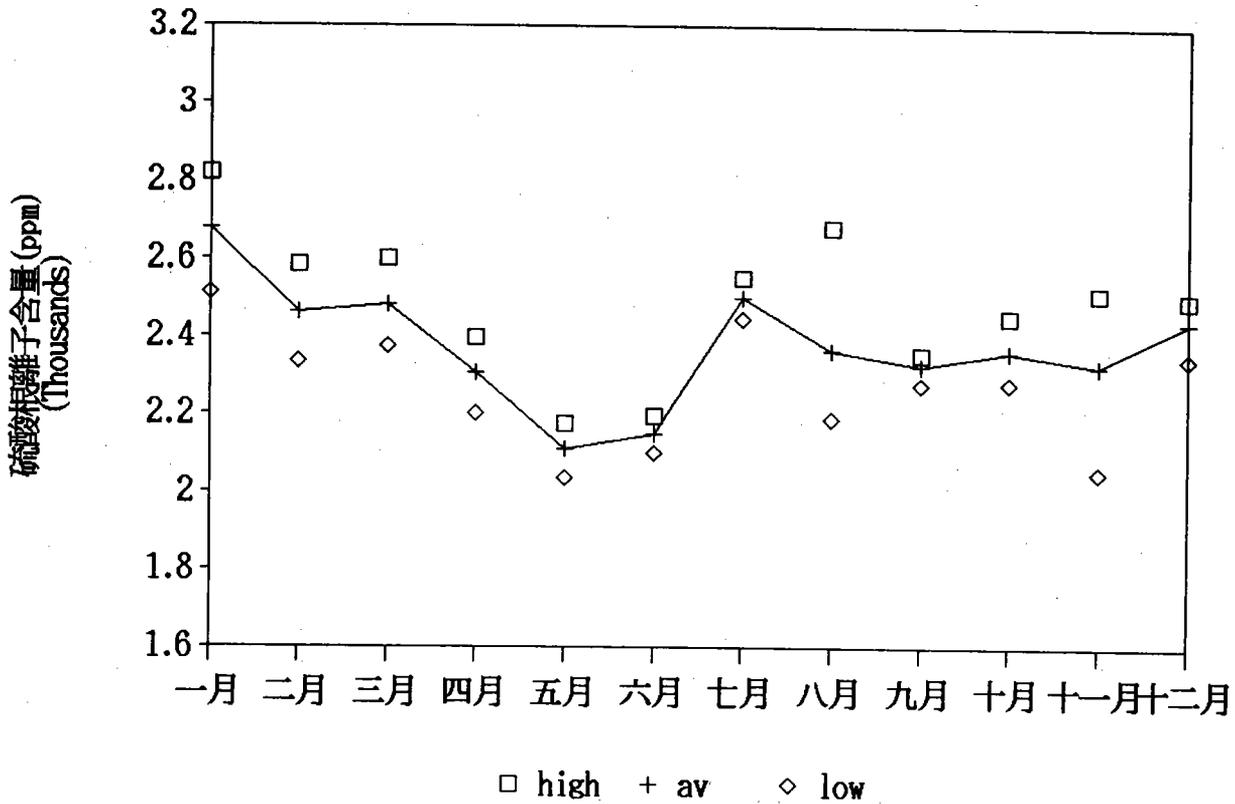


圖 5-2 基隆港西14號碼頭海水水質分析 (f)

台中港5號碼頭PH值

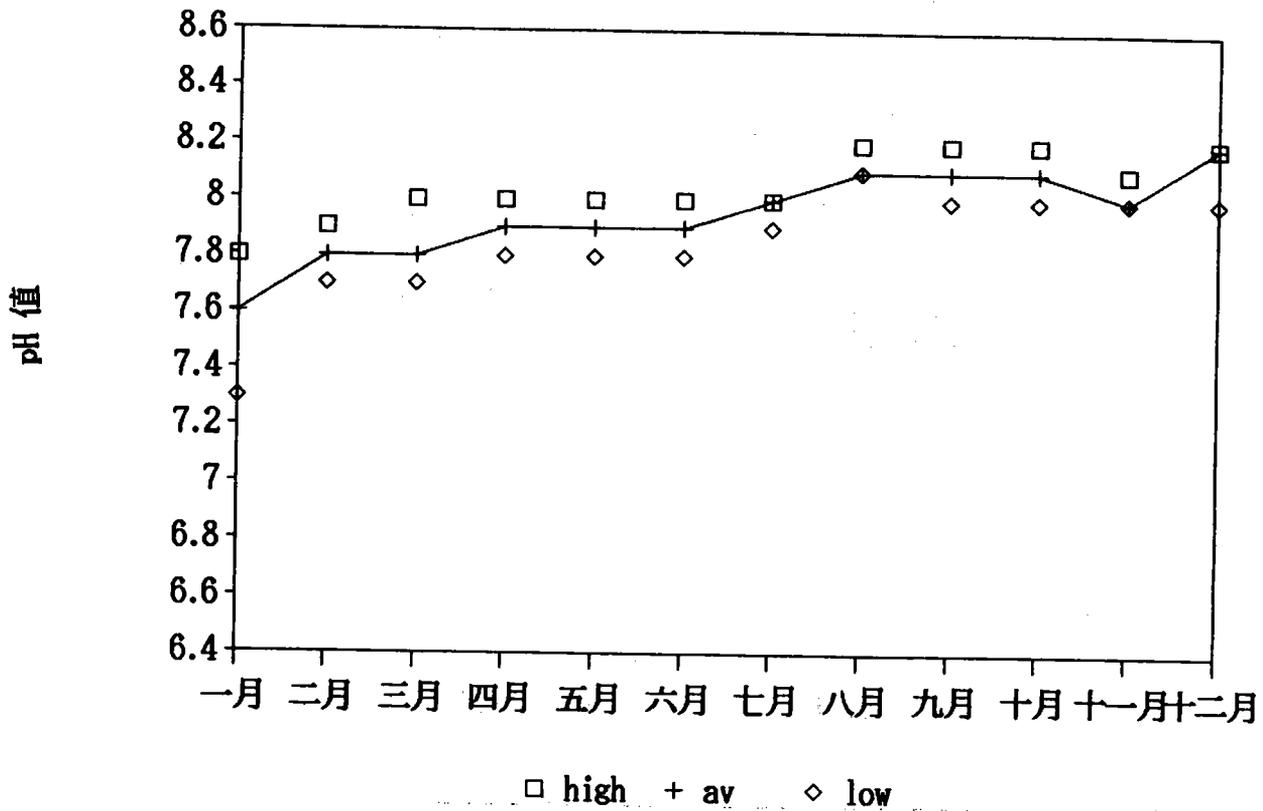


圖 5-3 台中港5號碼頭海水水質分析 (a)

台中港5號碼頭溶氧量

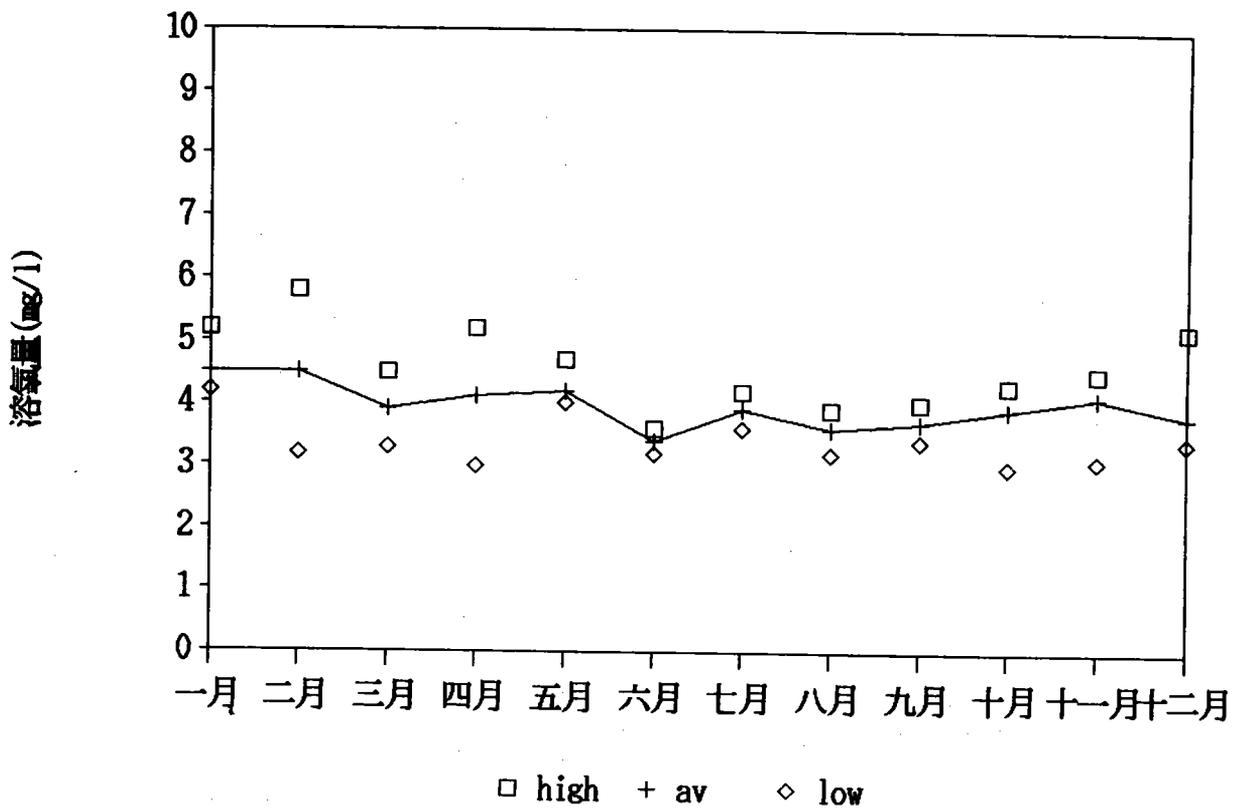


圖 5-3 台中港5號碼頭海水水質分析 (b)

台中港5號碼頭導電度

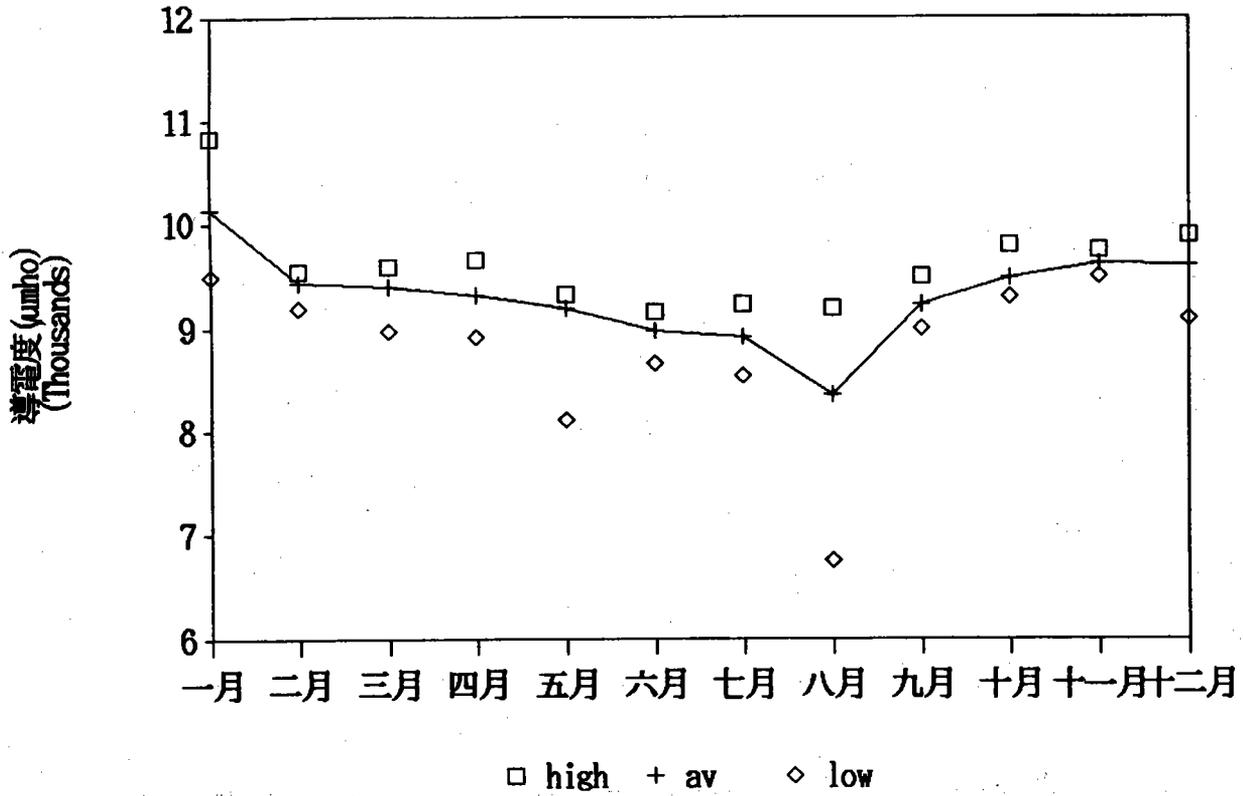


圖 5-3 台中港5號碼頭海水水質分析 (c)

台中港5號碼頭水溫

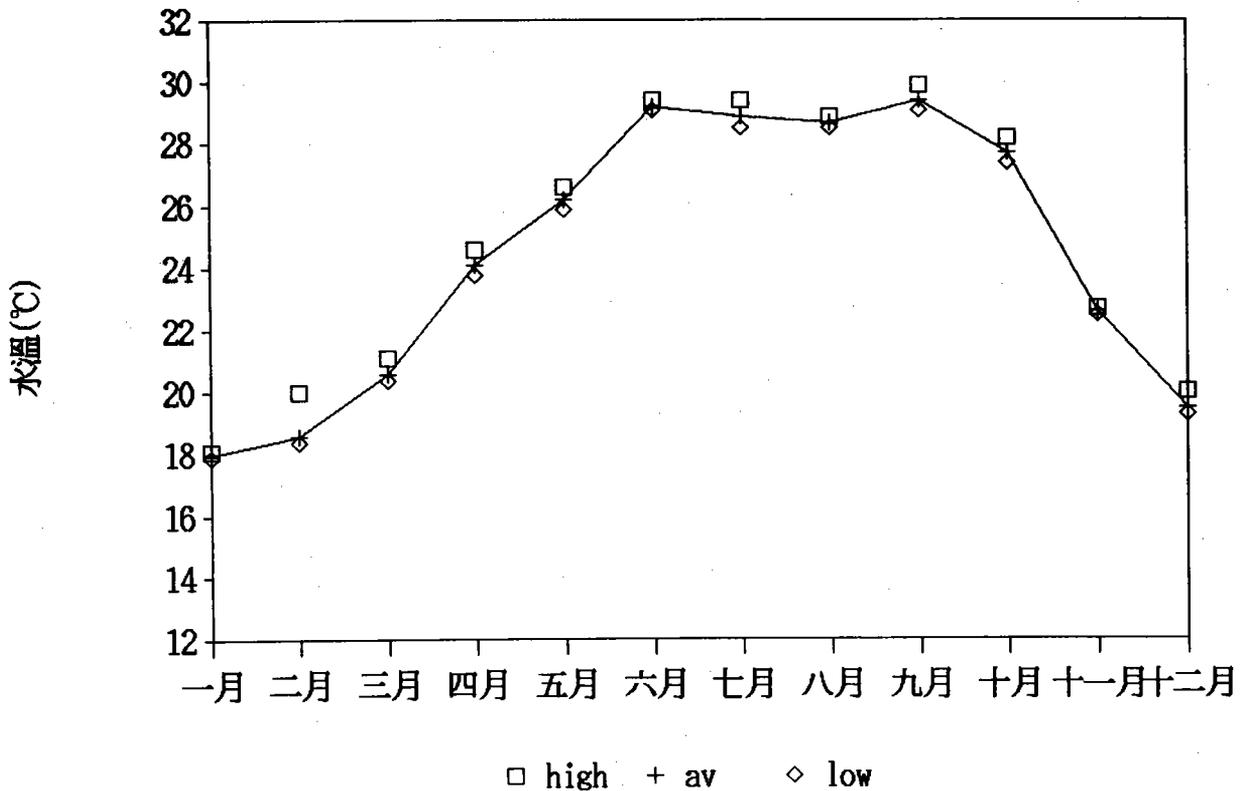


圖 5-3 台中港5號碼頭海水水質分析 (d)

台中港5號碼頭氯離子

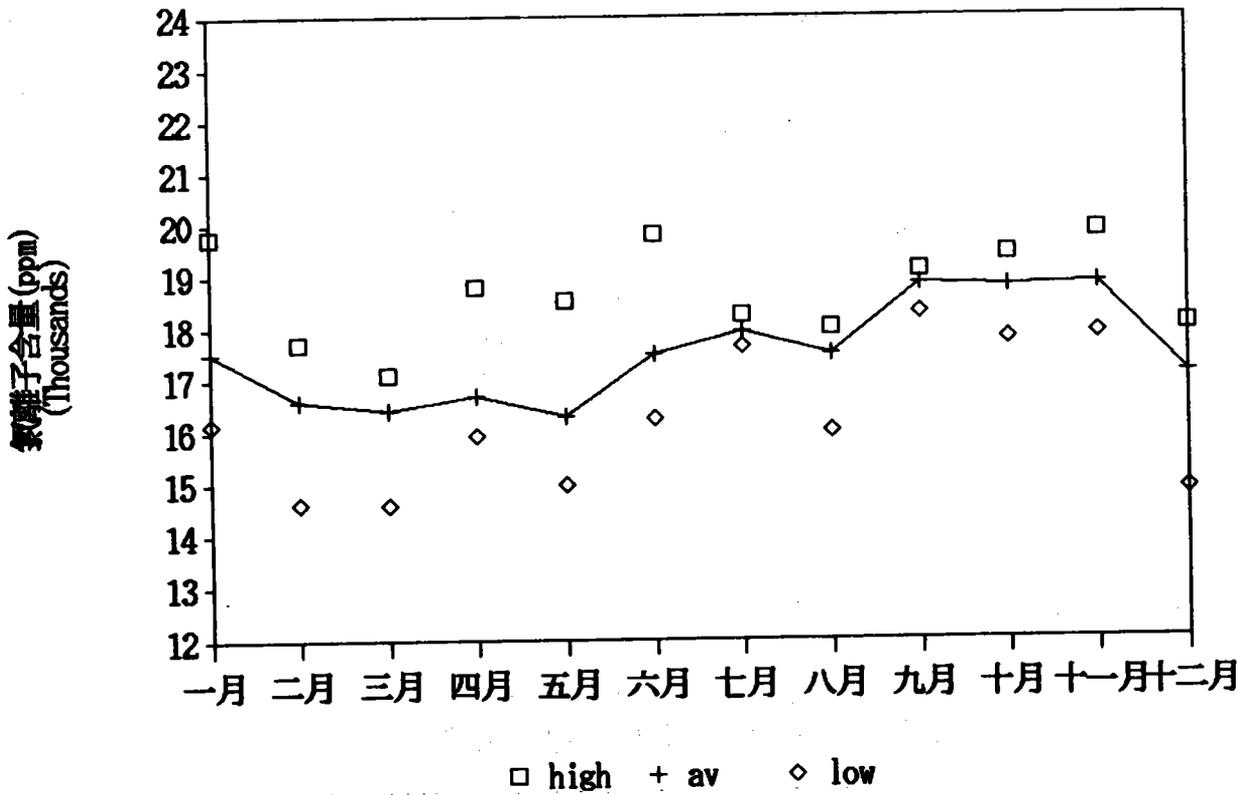


圖 5-3 台中港5號碼頭海水水質分析 (e)

台中港5號碼頭硫酸根離子

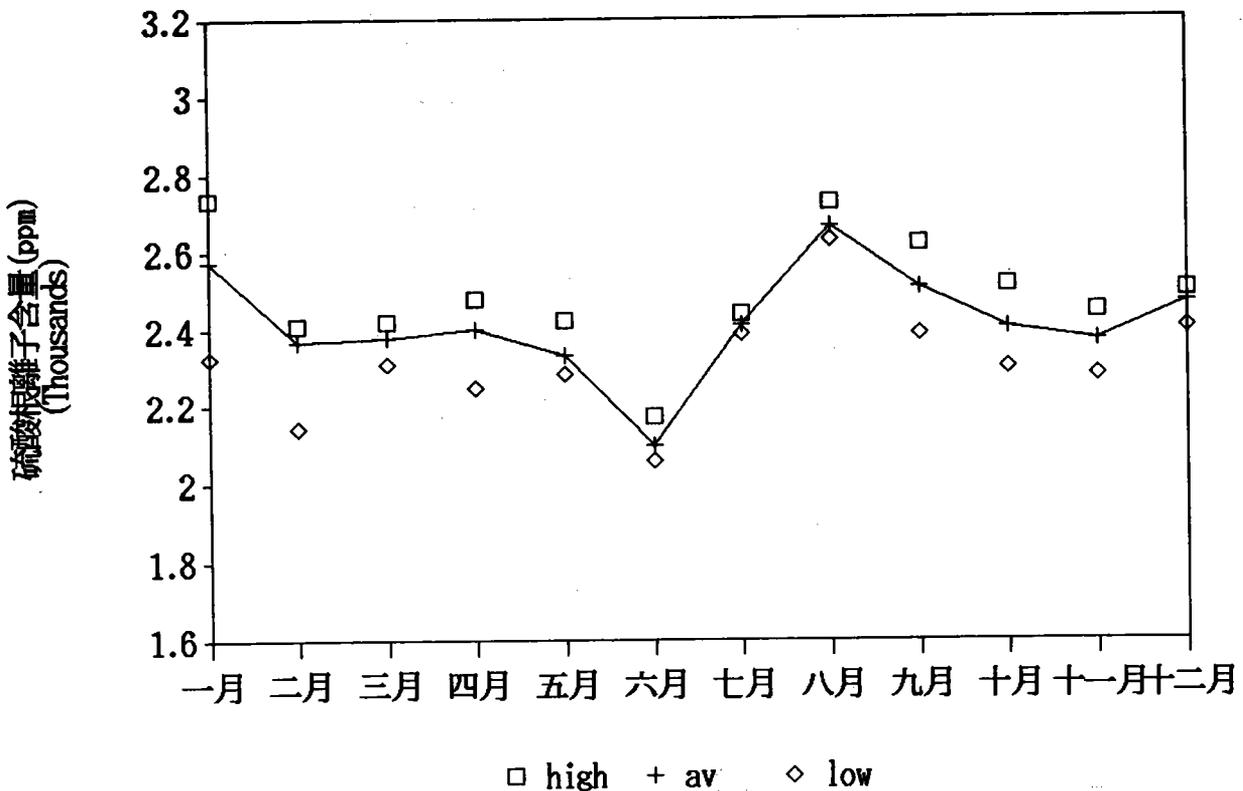


圖 5-3 台中港5號碼頭海水水質分析 (f)

台中港8號碼頭pH值

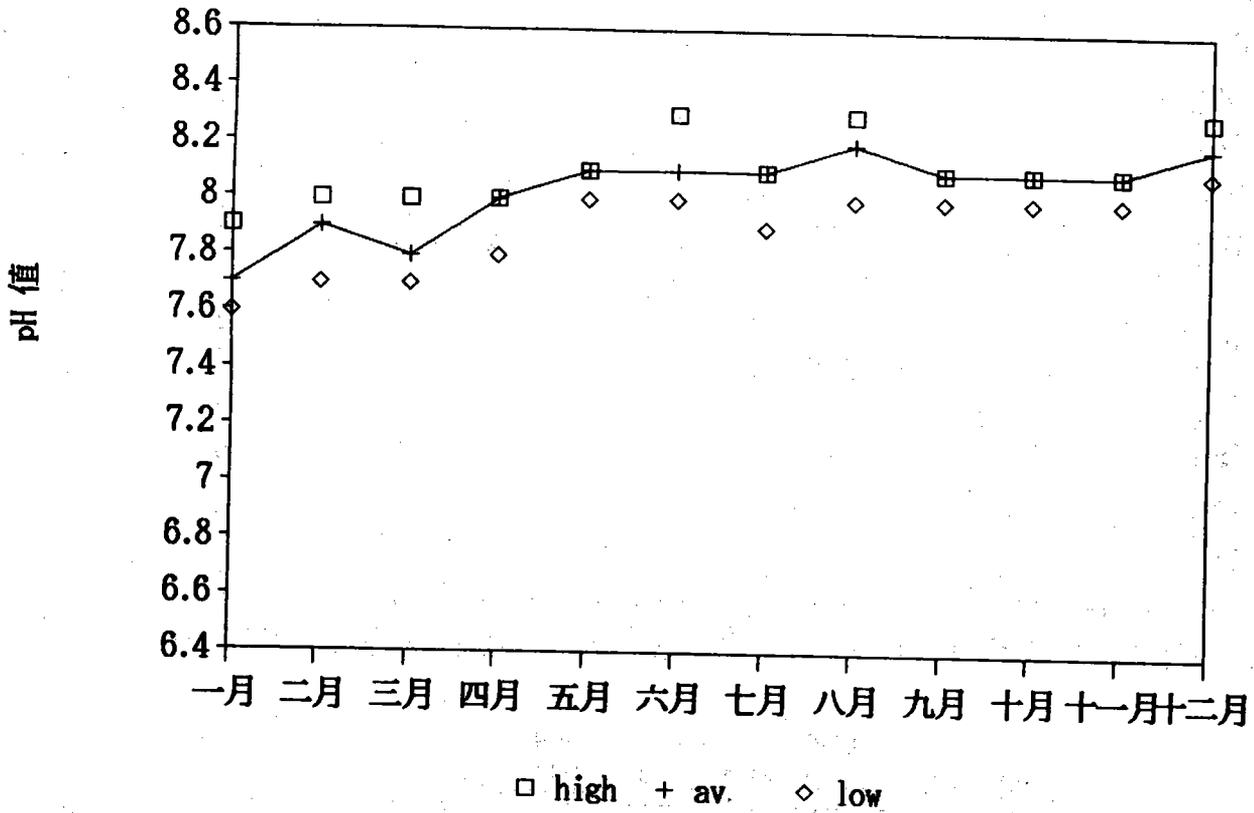


圖 5-4 台中港8號碼頭海水水質分析 (a)

台中港8號碼頭溶氧量

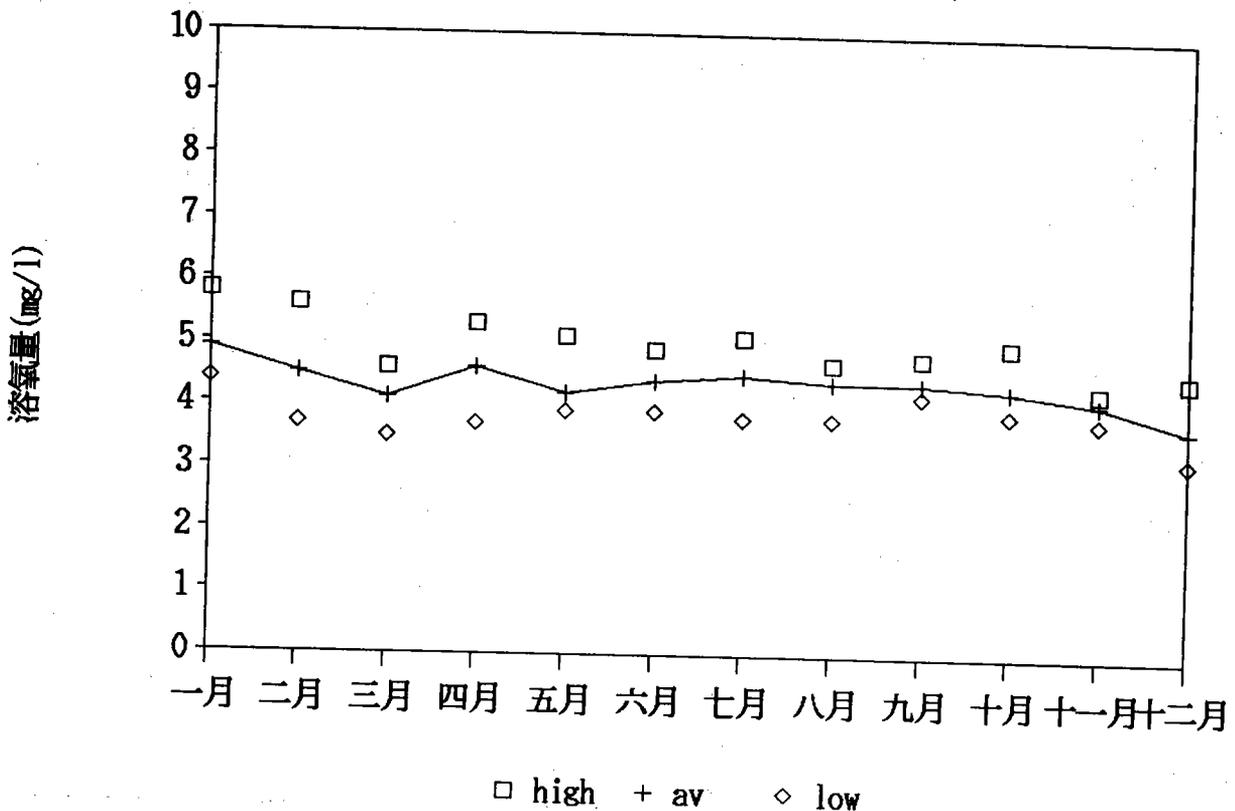
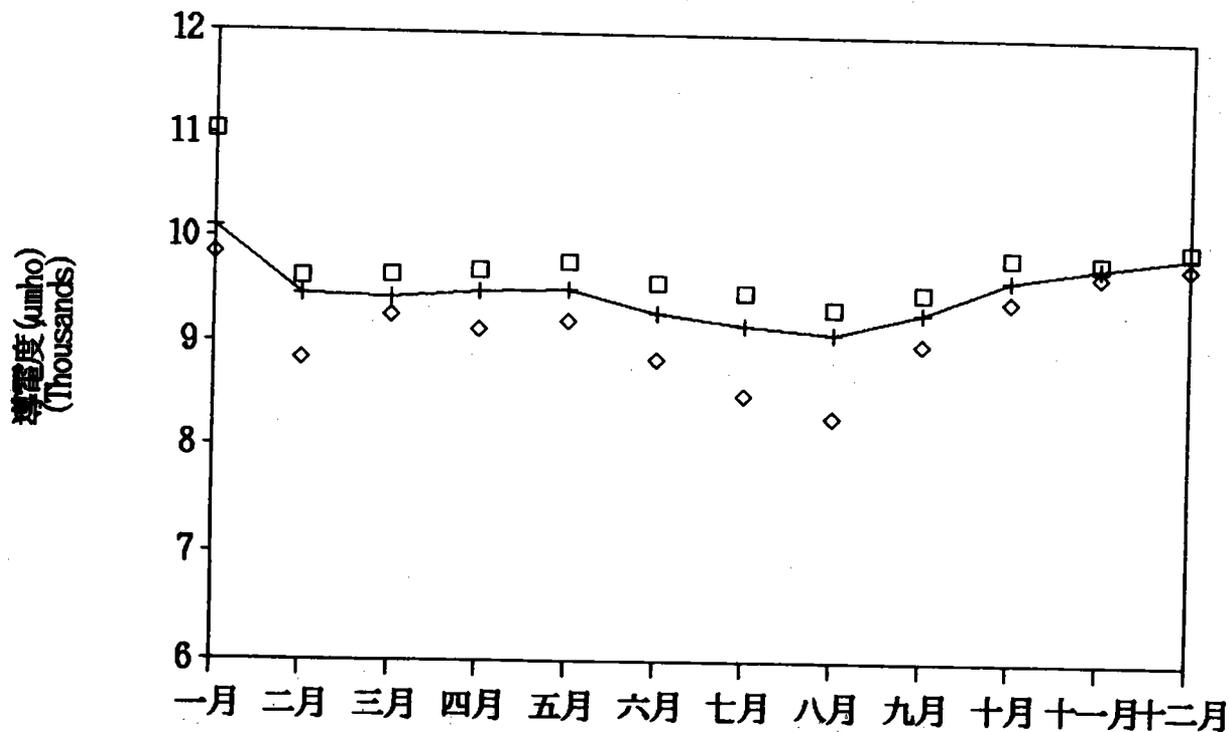


圖 5-4 台中港8號碼頭海水水質分析 (b)

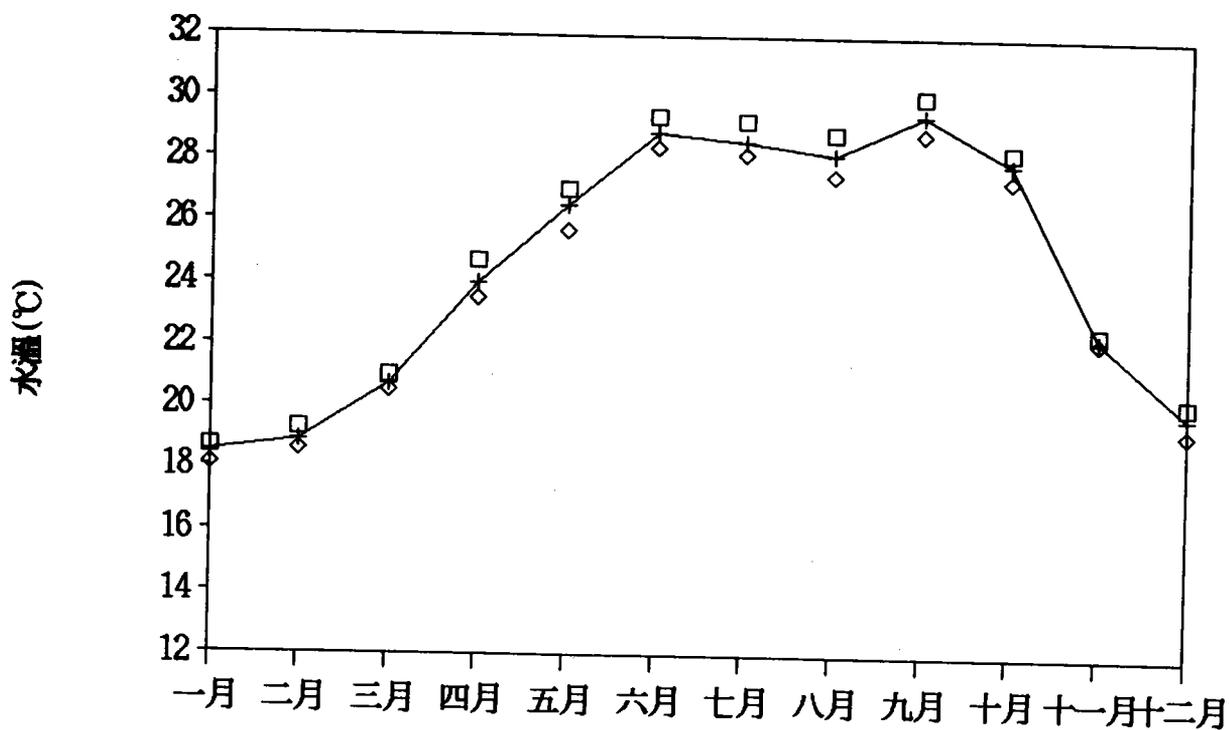
台中港8號碼頭導電度



□ high + av    ◇ low

圖 5-4 台中港8號碼頭海水水質分析 (c)

台中港8號碼頭水溫



□ high + av    ◇ low

圖 5-4 台中港8號碼頭海水水質分析 (d)

台中港8號碼頭氯離子

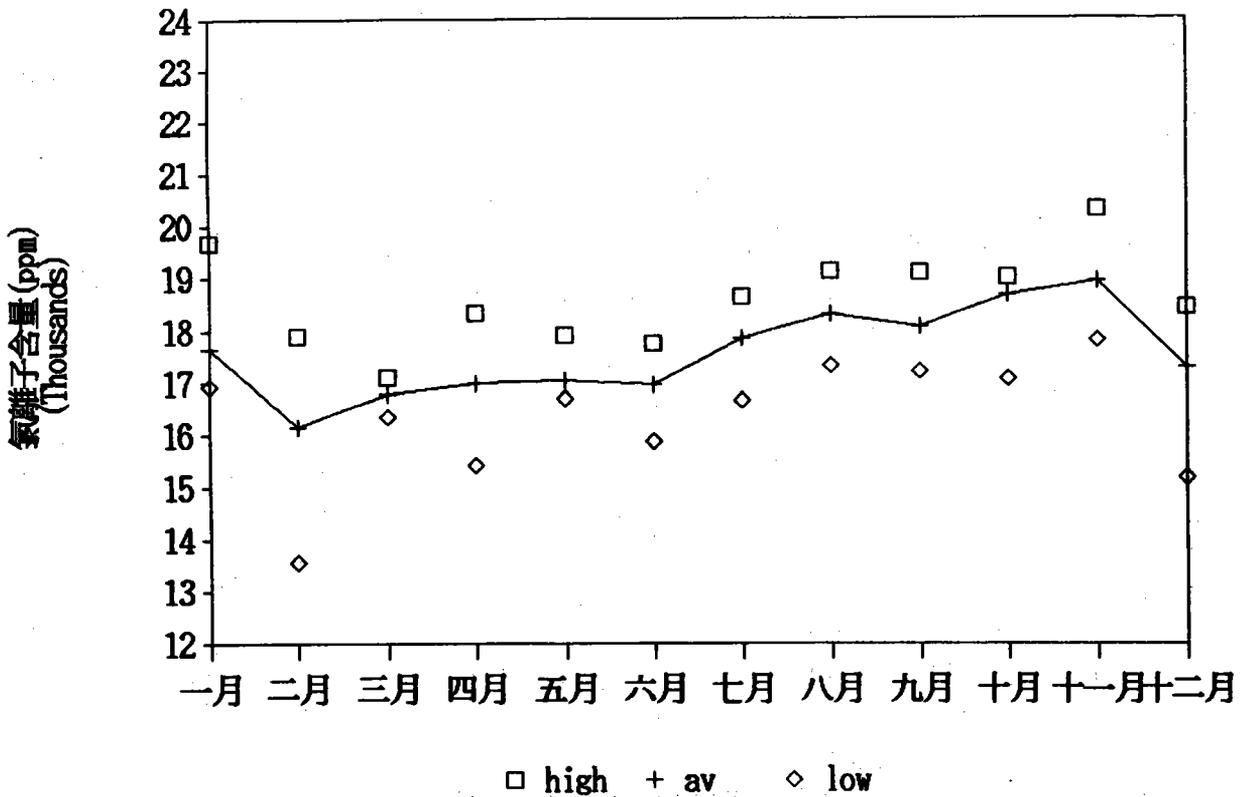


圖 5-4 台中港8號碼頭海水水質分析 (e)

台中港8號碼頭硫酸離子

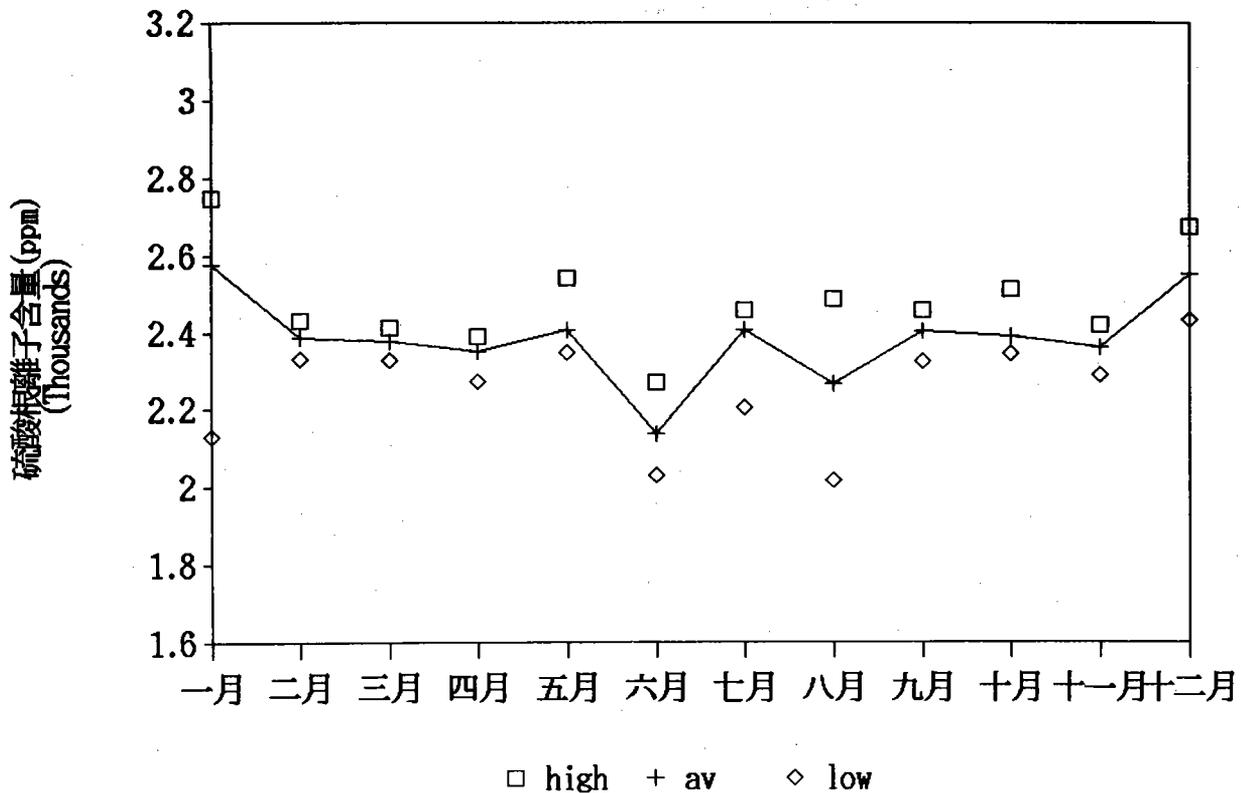
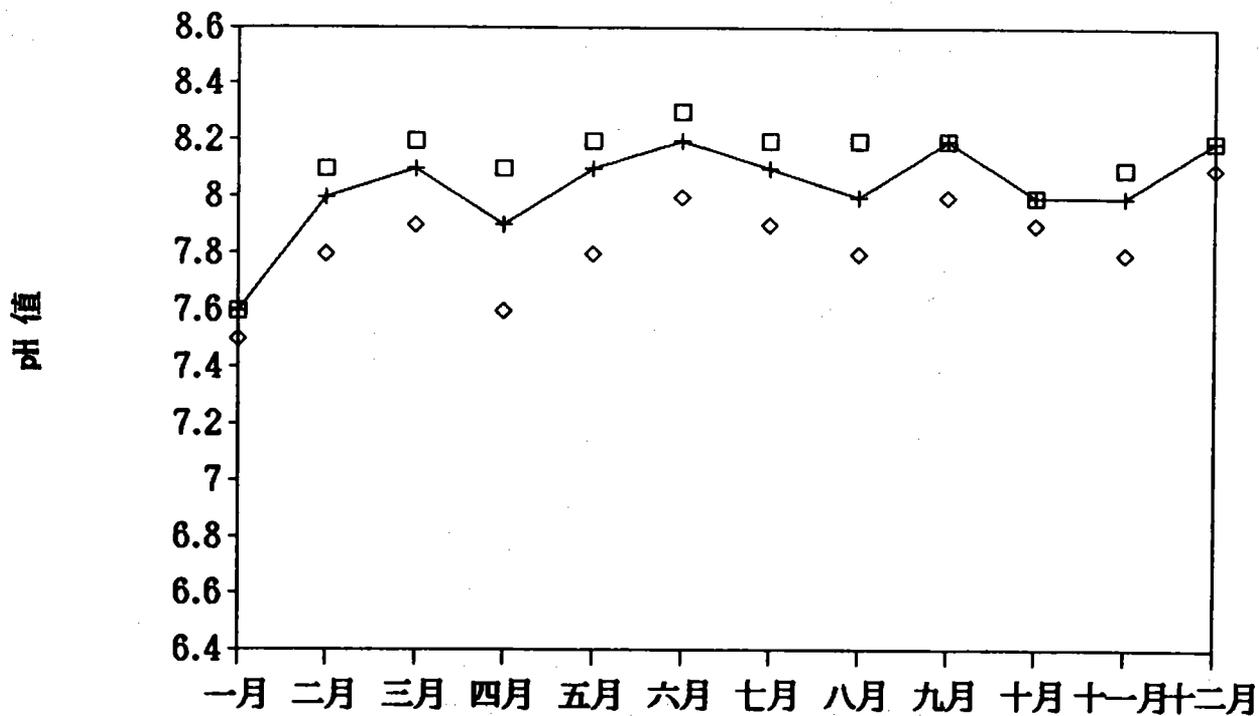


圖 5-4 台中港8號碼頭海水水質分析 (f)

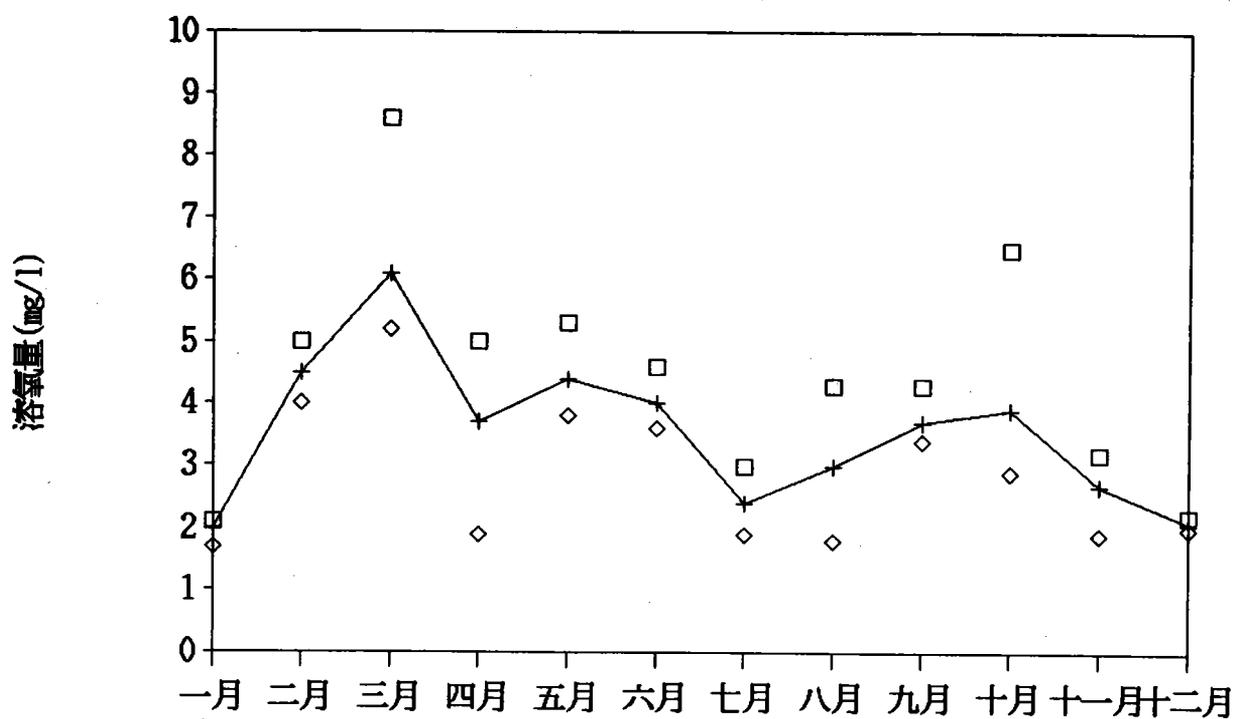
高雄港2號碼頭PH值



□ high + av    ◇ low

圖 5-5 高雄港2號碼頭海水水質分析 (a)

高雄港2號碼頭溶氧量



□ high + av    ◇ low

圖 5-5 高雄港2號碼頭海水水質分析 (b)

高雄港2號碼頭導電度

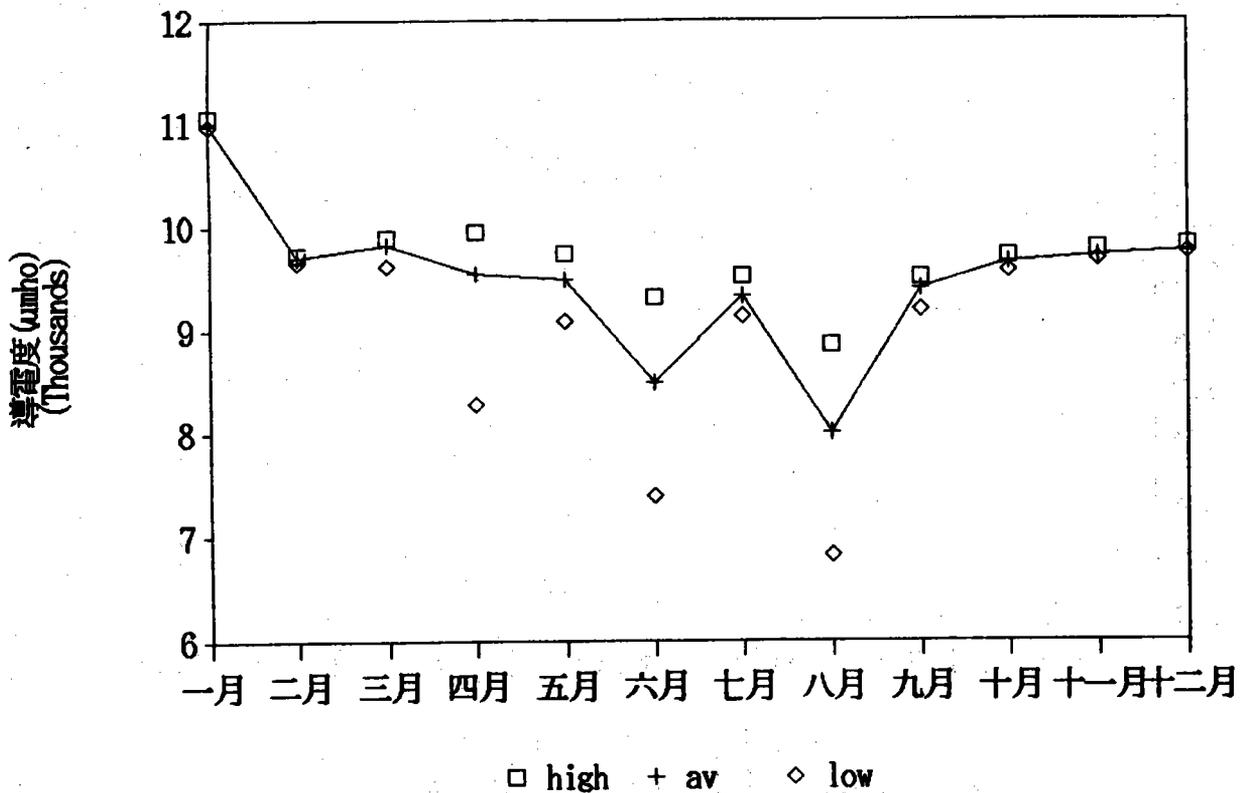


圖 5-5 高雄港2號碼頭海水水質分析 (c)

高雄港2號碼頭水溫

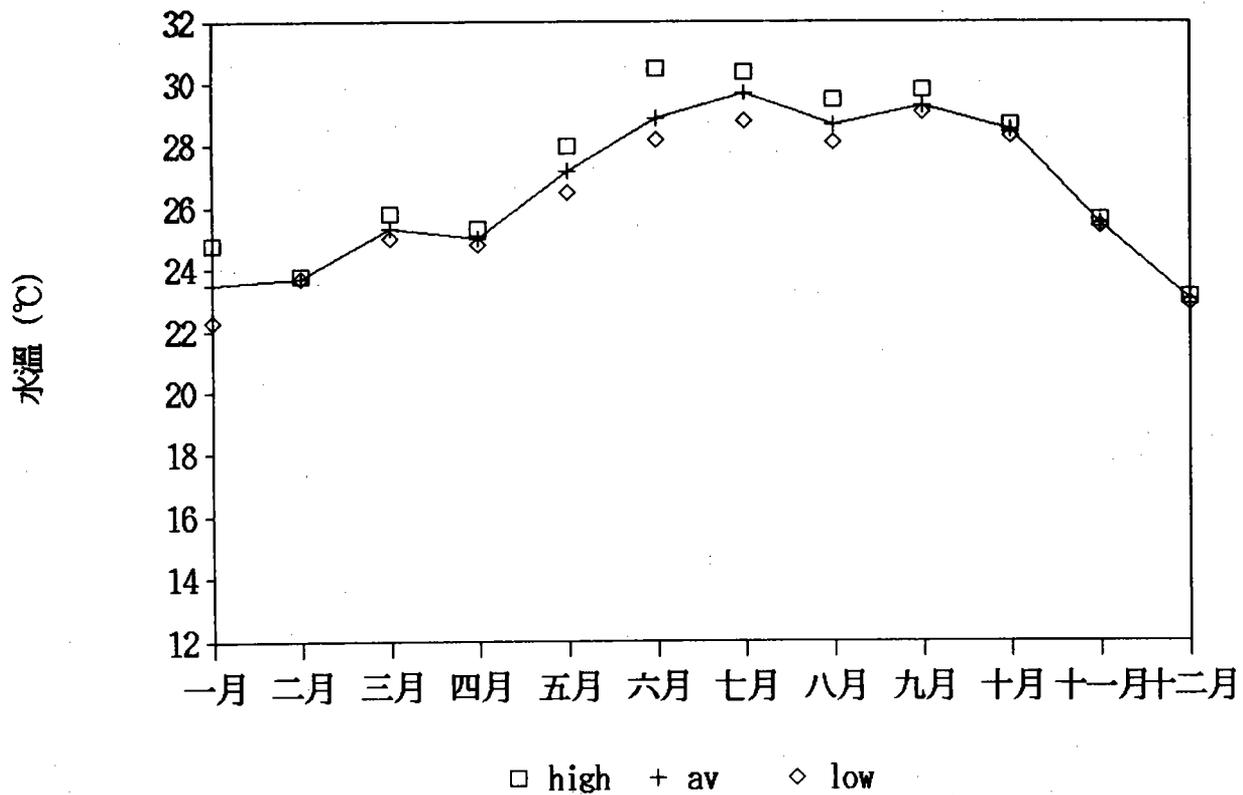


圖 5-5 高雄港2號碼頭海水水質分析 (d)

高雄港2號碼頭氮離子

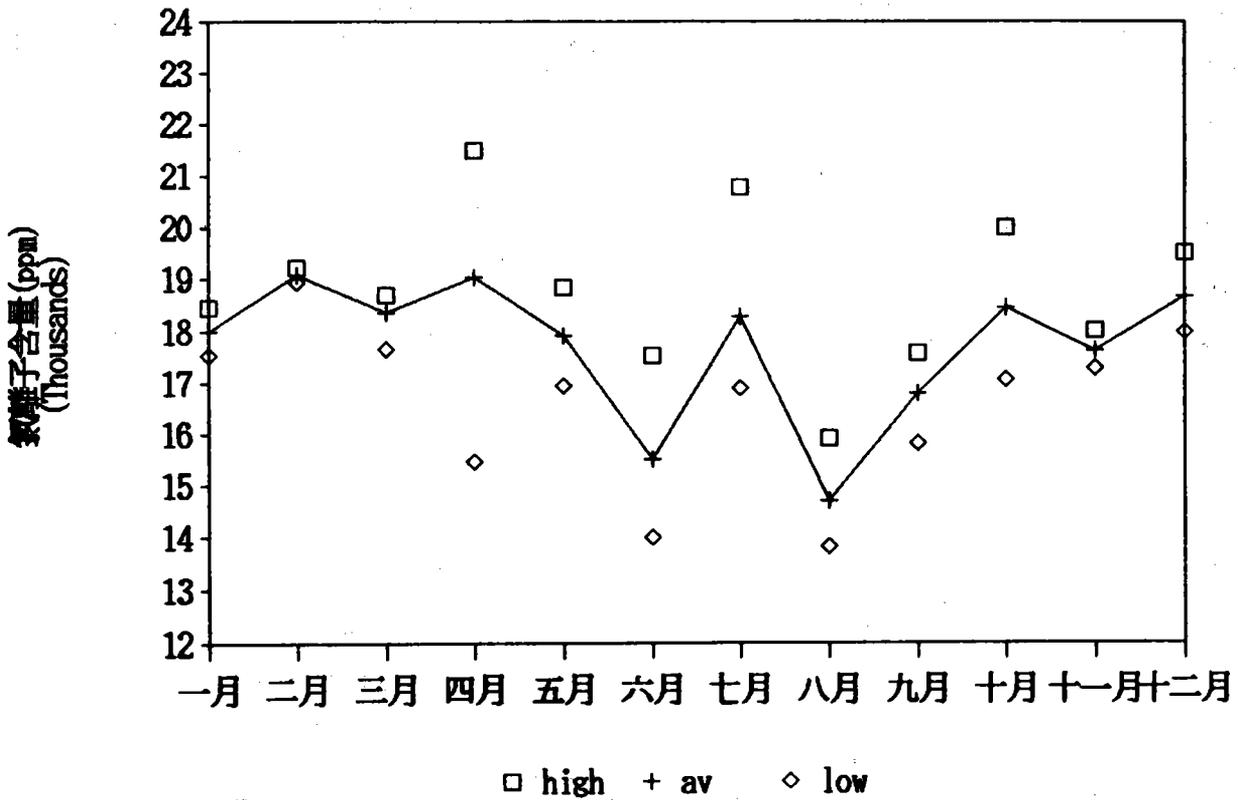


圖 5-5 高雄港2號碼頭海水水質分析 (e)

高雄港2號碼頭硫酸根離子

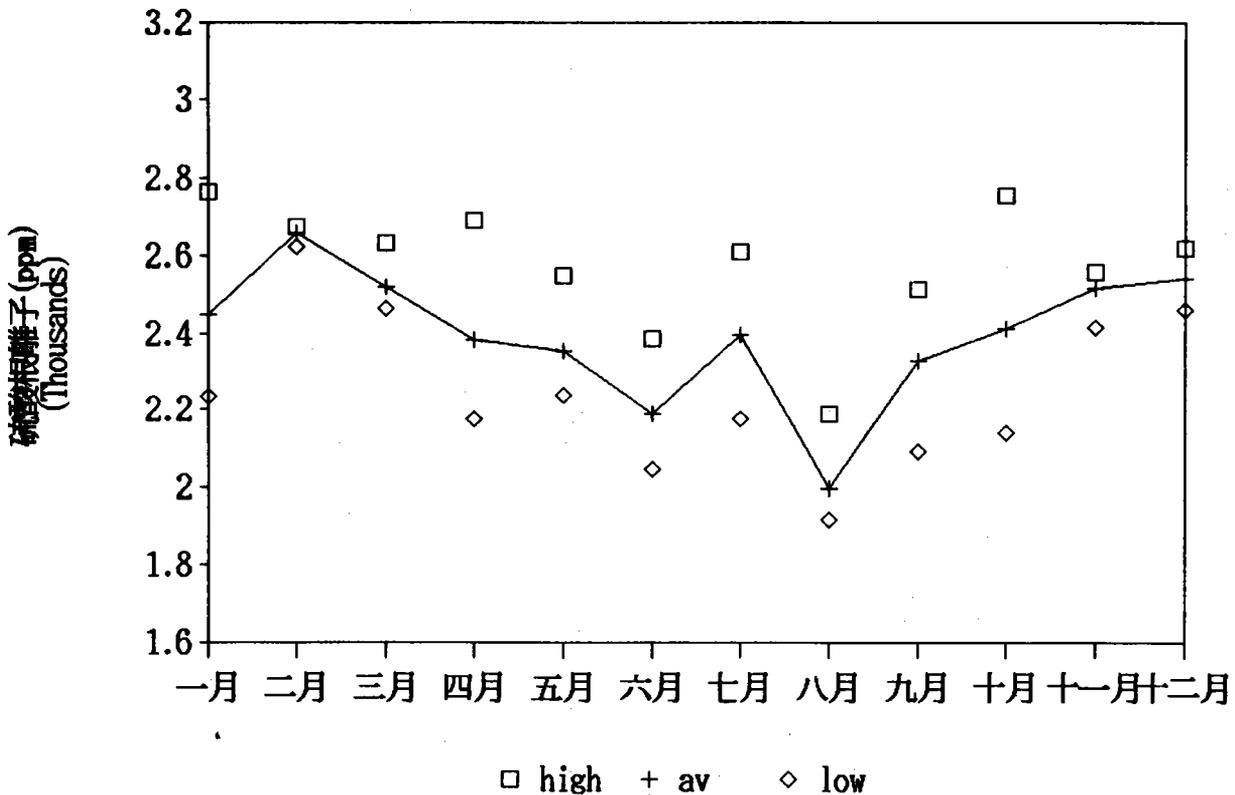


圖 5-5 高雄港2號碼頭海水水質分析 (f)

高雄港30號碼頭PH值

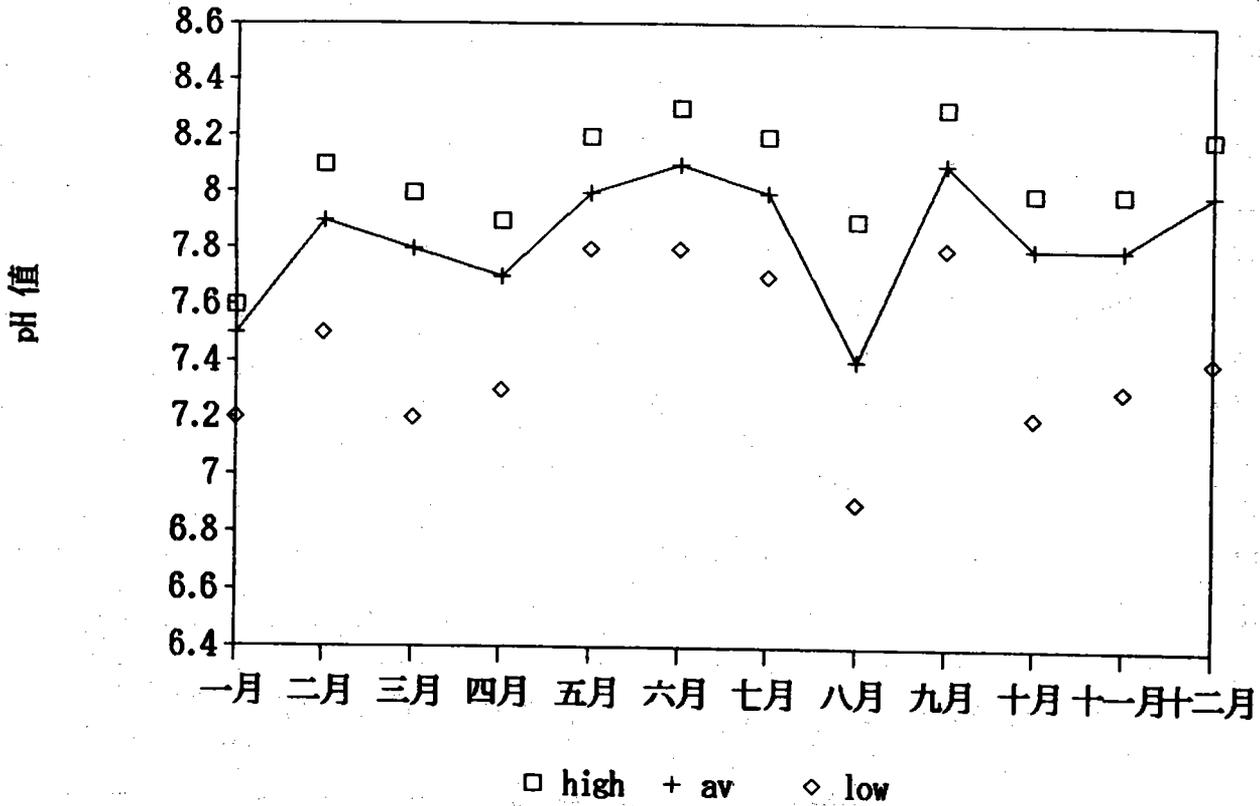


圖 5-6 高雄港30號碼頭海水水質分析 (a)

高雄港30號碼頭溶氧量

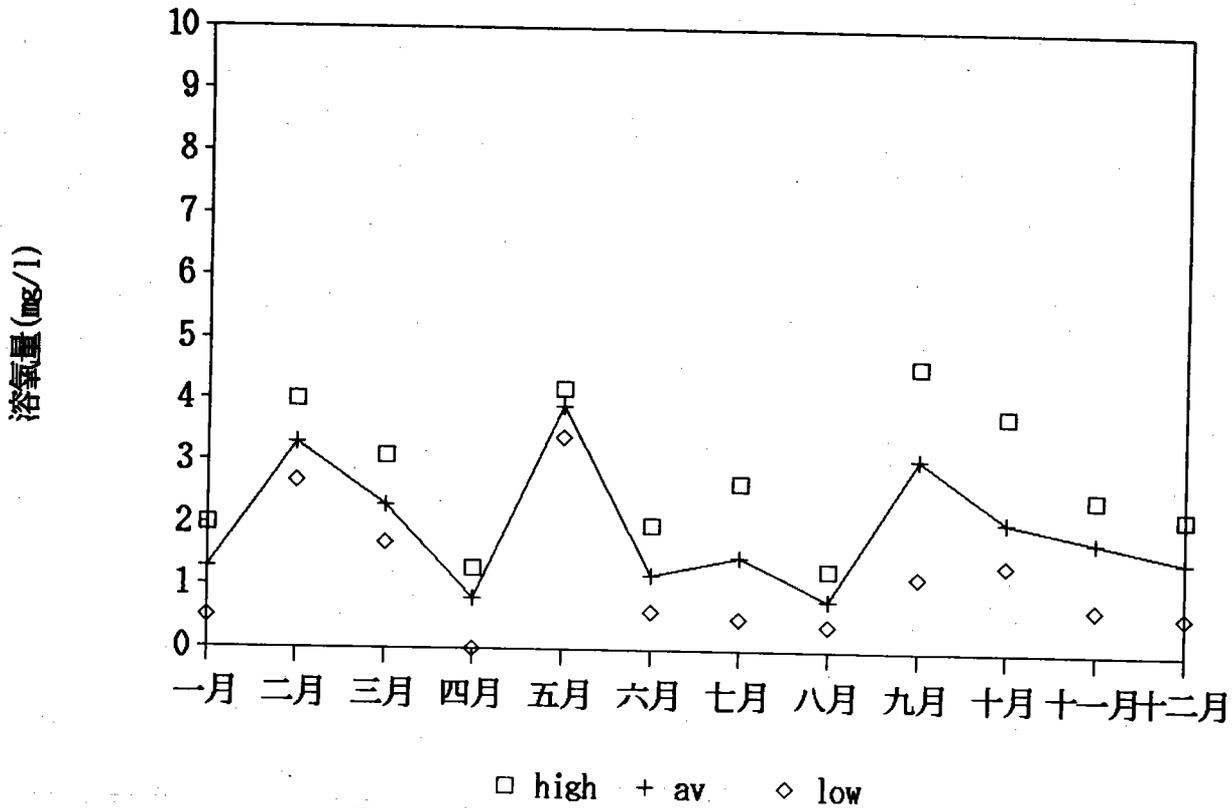
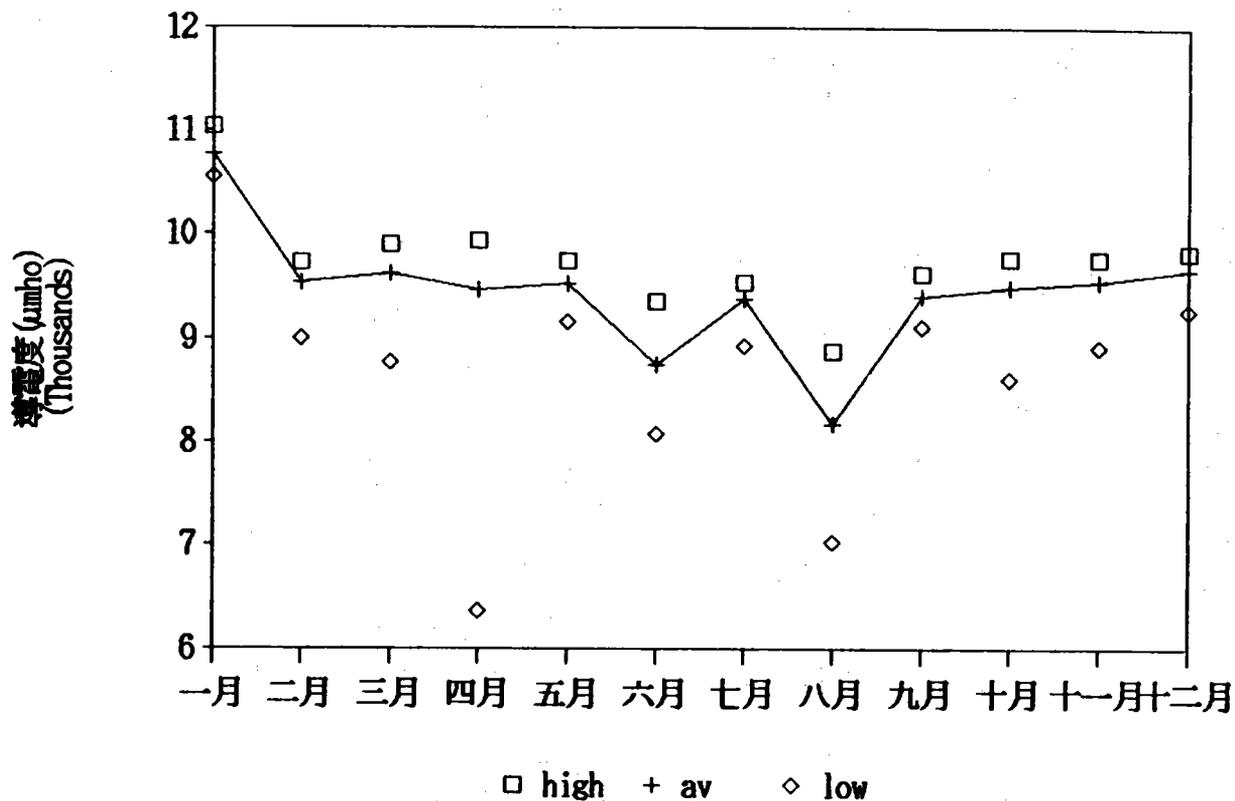


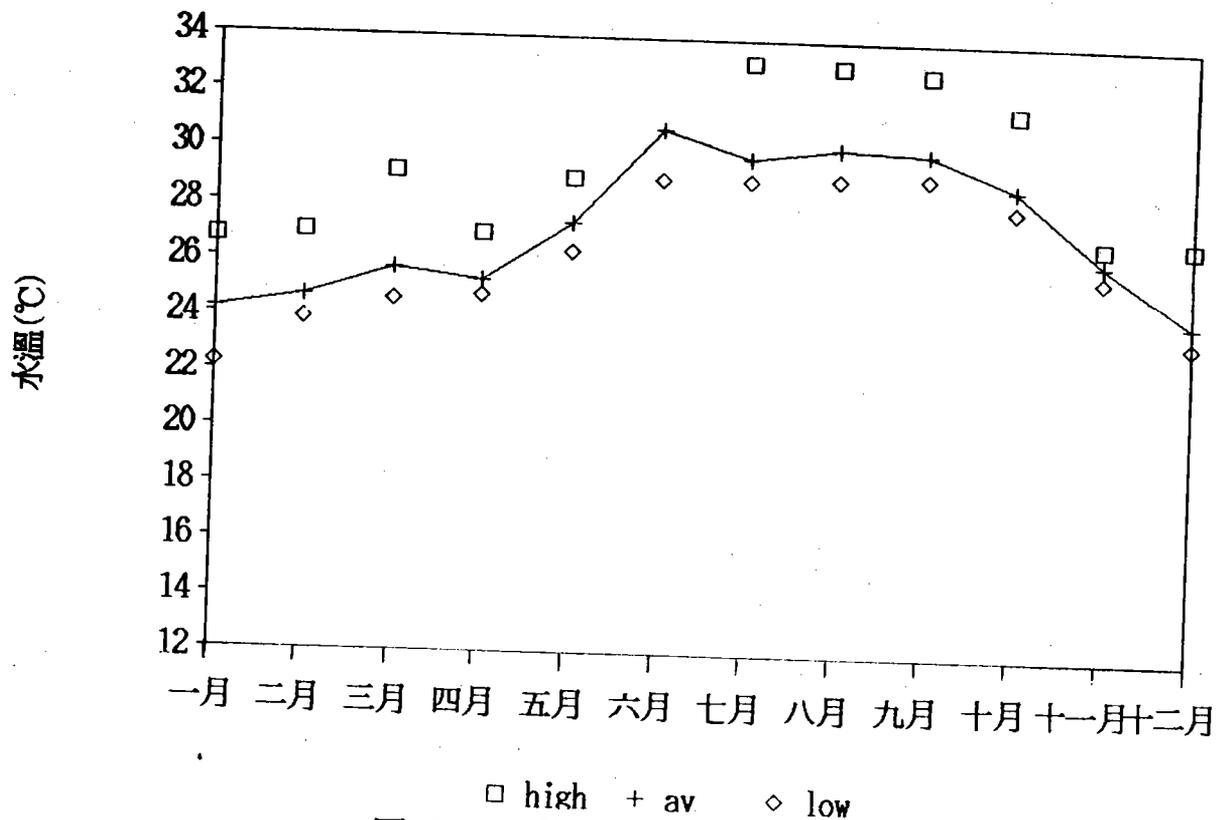
圖 5-6 高雄港30號碼頭海水水質分析 (b)

高雄港30號碼頭導電度



□ high + av    ◇ low  
圖 5-6 高雄港30號碼頭海水水質分析 (c)

高雄港30號碼頭水溫



□ high + av    ◇ low  
圖 5-6 高雄港30號碼頭海水水質分析 (d)

高雄港30號碼頭氯離子

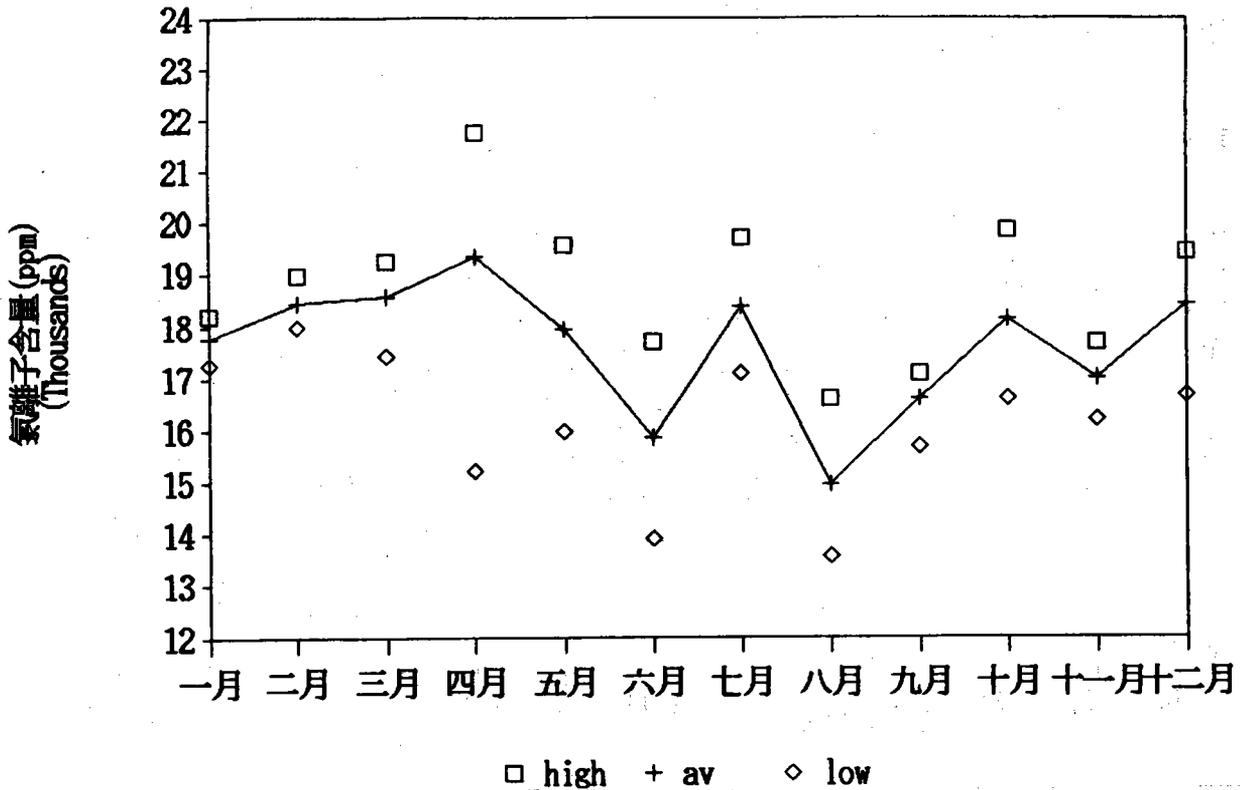


圖 5-6 高雄港30號碼頭海水水質分析 (e)

高雄港30號碼頭硫酸根離子

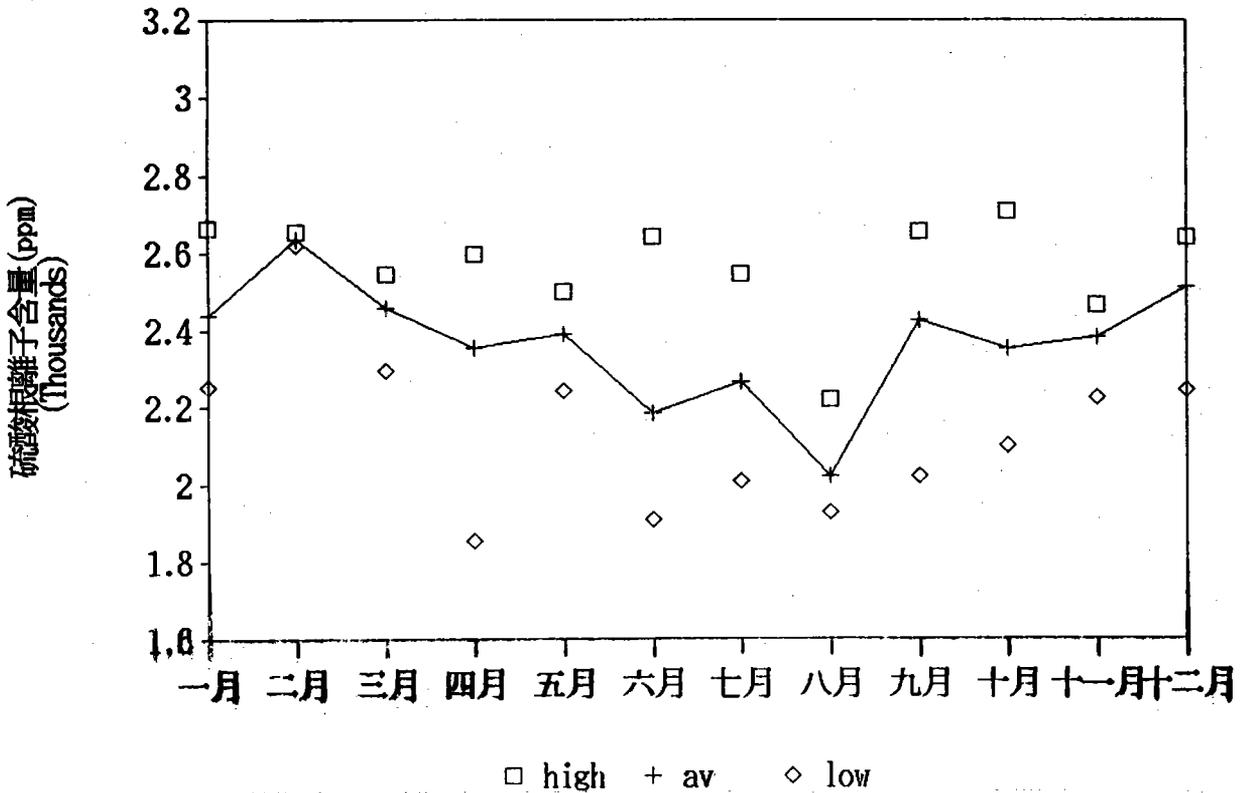
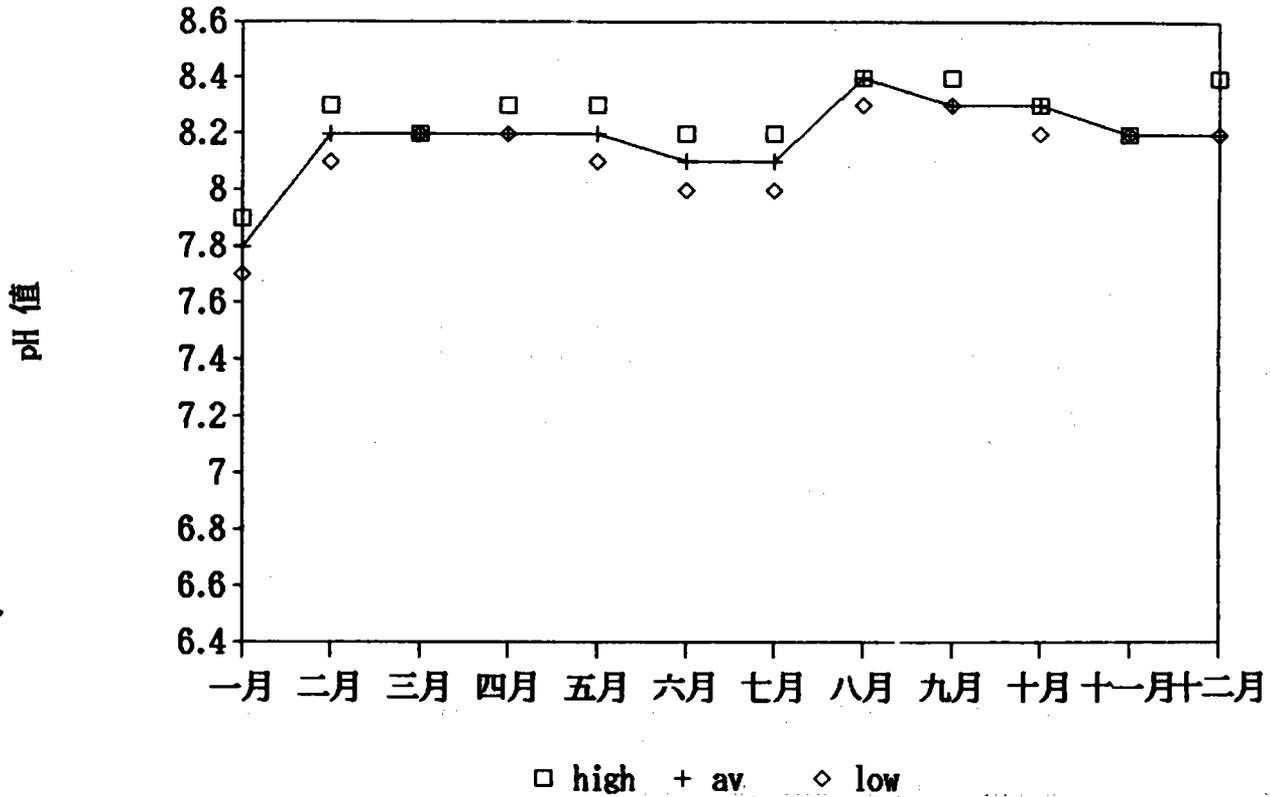


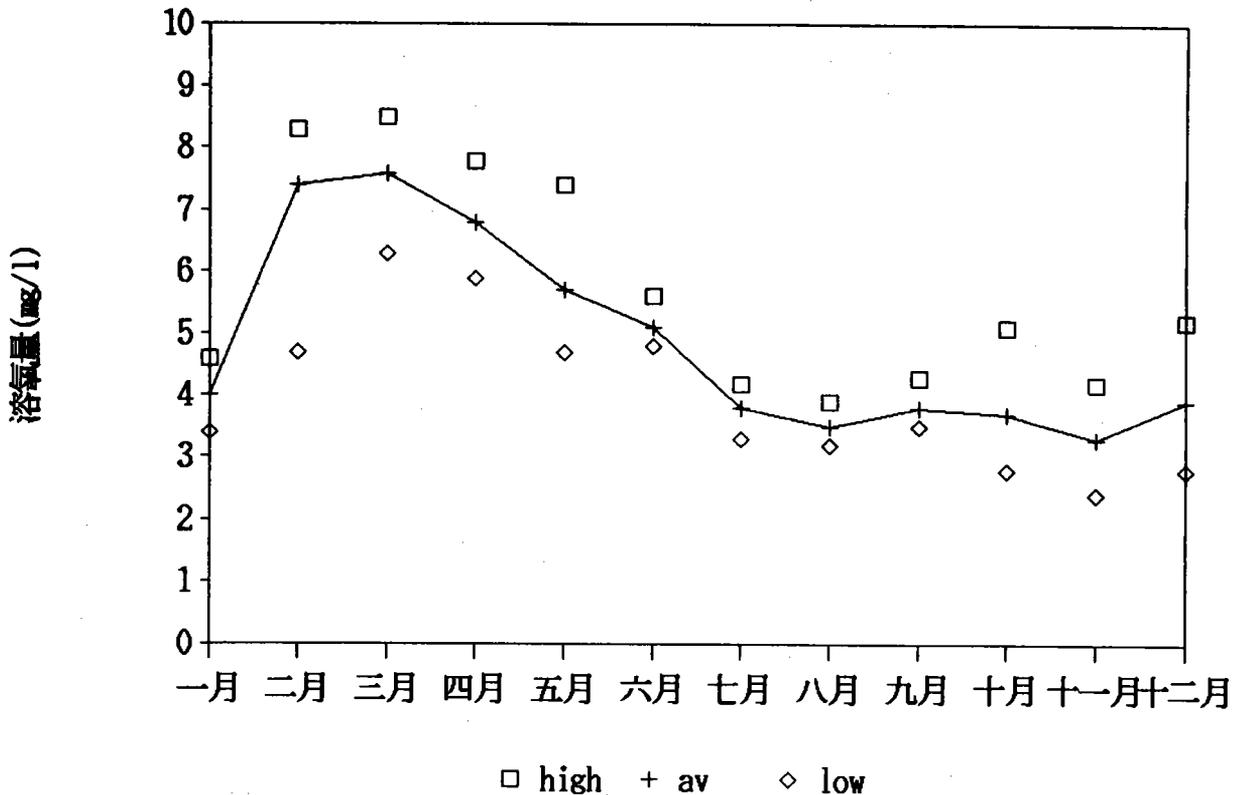
圖 5-6 高雄港30號碼頭海水水質分析 (f)

花港15號碼頭PH值



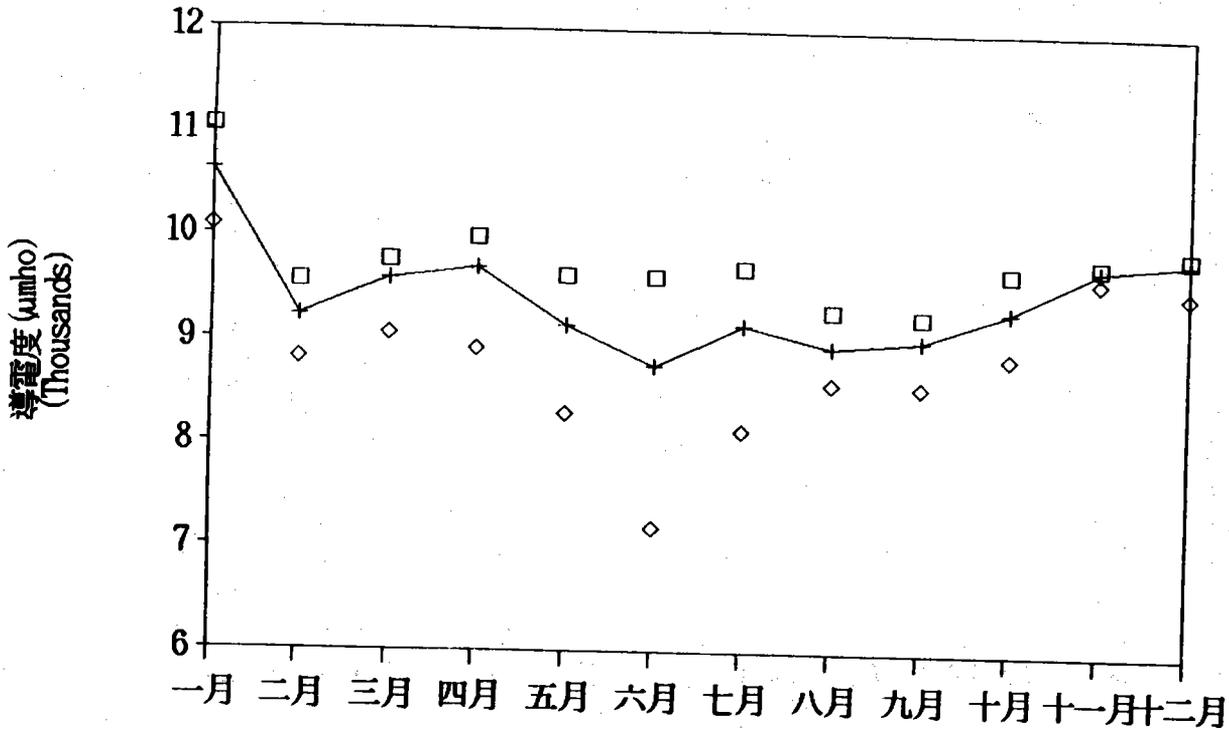
□ high + av    ◇ low  
圖 5-7 花蓮港15號碼頭海水水質分析 (a)

花蓮港15號碼頭溶氧量



□ high + av    ◇ low  
圖 5-7 花蓮港15號碼頭海水水質分析 (b)

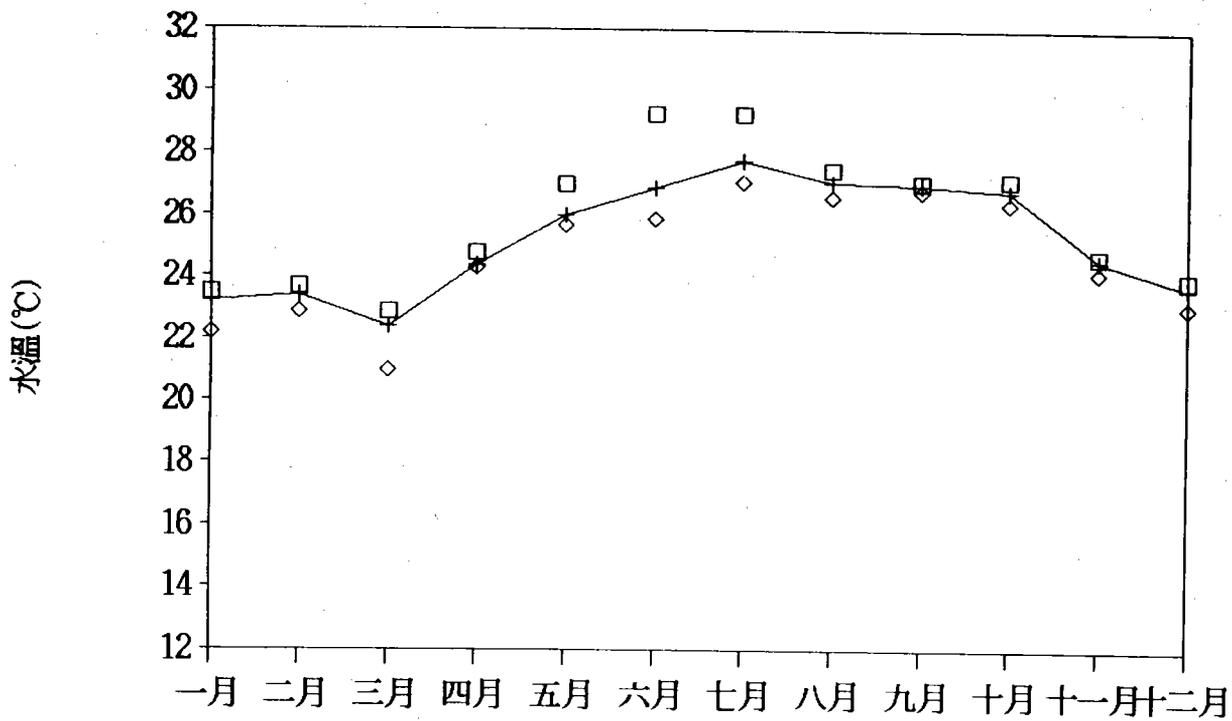
花蓮港15號碼頭導電度



□ high + av    ◇ low

圖 5-7 花蓮港15號碼頭海水水質分析 (c)

花蓮港15號碼頭水溫



□ high + av    ◇ low

圖 5-7 花蓮港15號碼頭海水水質分析 (d)

花蓮港15號碼頭氯離子

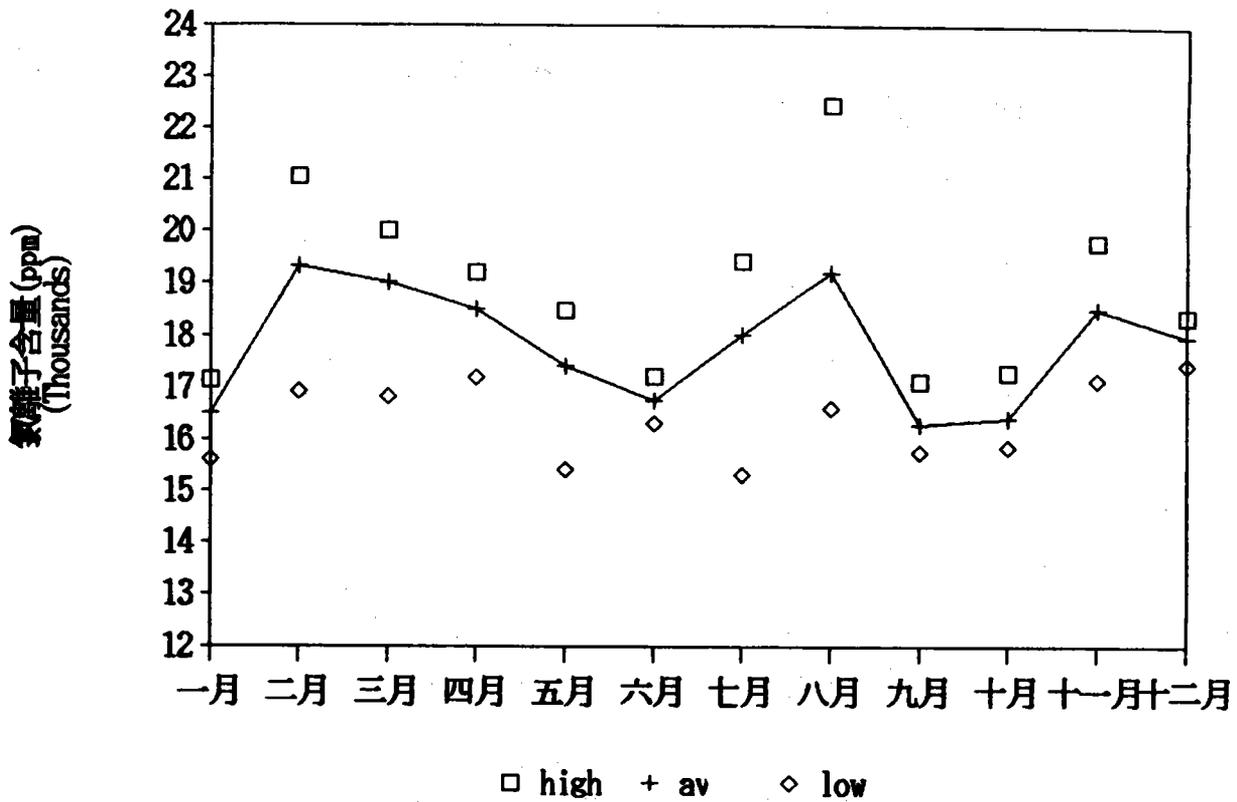


圖 5-7 花蓮港15號碼頭海水水質分析 (e)

花港15號硫酸根離子

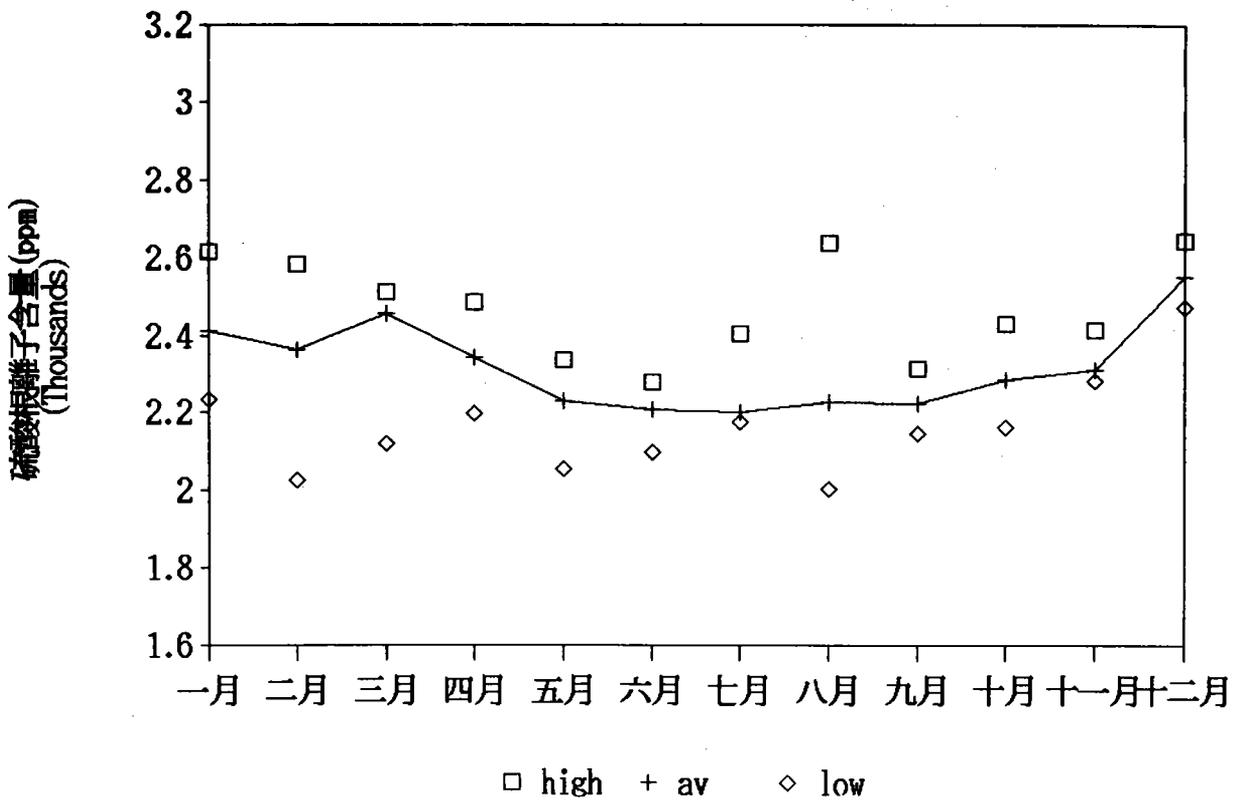
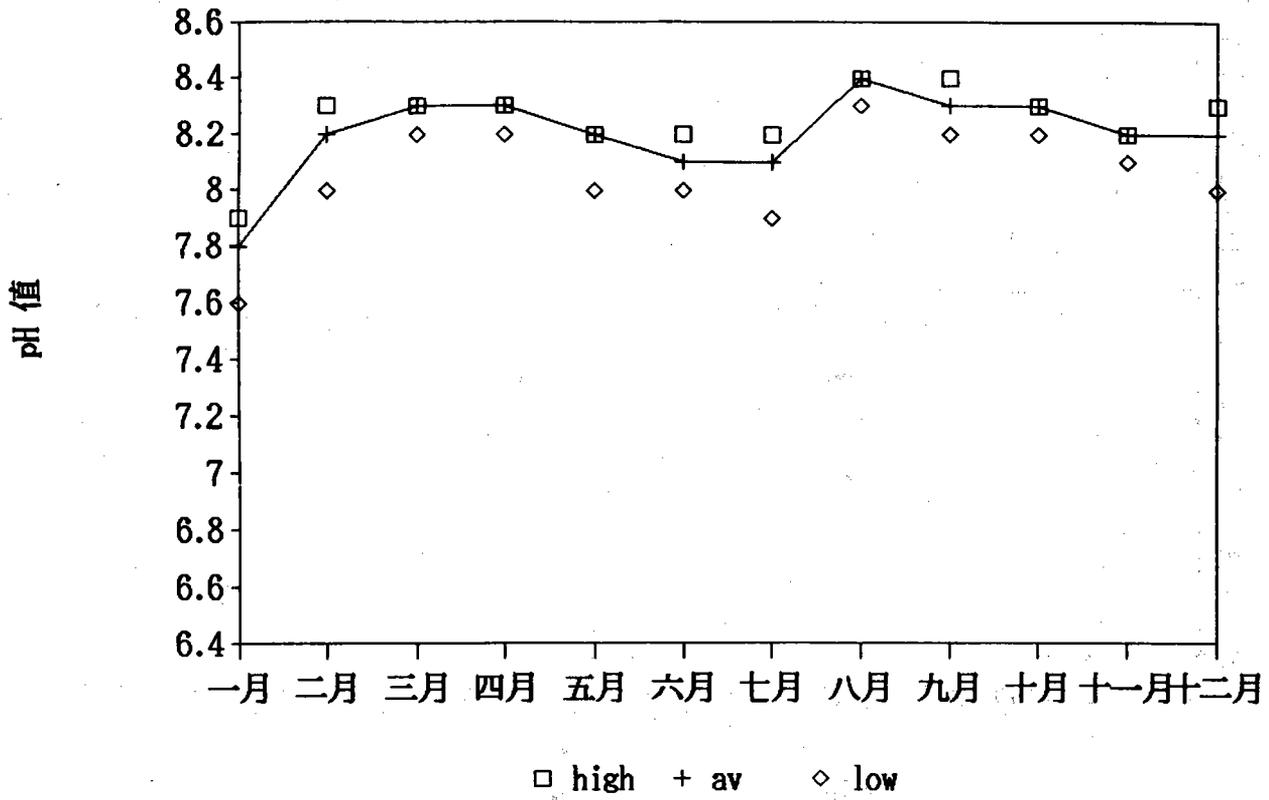


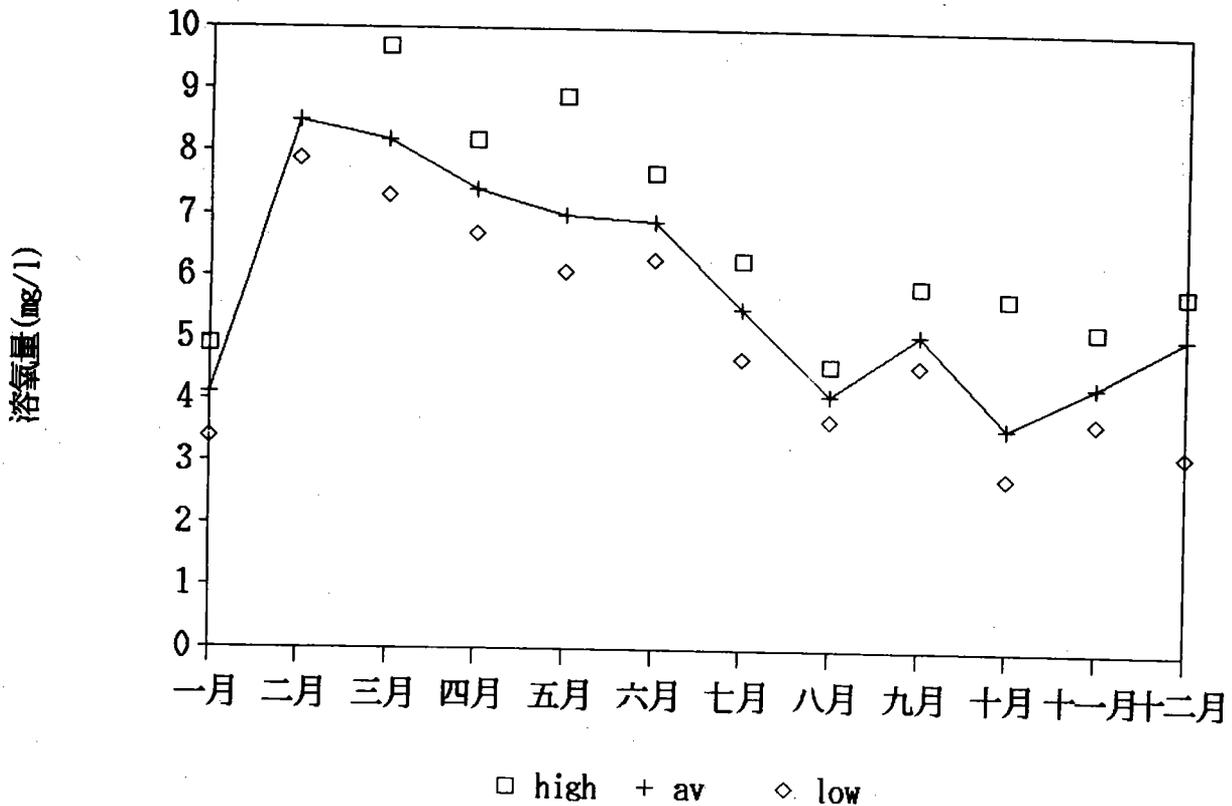
圖 5-7 花蓮港15號碼頭海水水質分析 (f)

花蓮港20號碼頭PH值



□ high + av    ◇ low  
圖 5-8 花蓮港20號碼頭海水水質分析 (a)

花蓮港20號碼頭溶氧量



□ high + av    ◇ low  
圖 5-8 花蓮港20號碼頭海水水質分析 (b)

花蓮港20號碼頭導電度

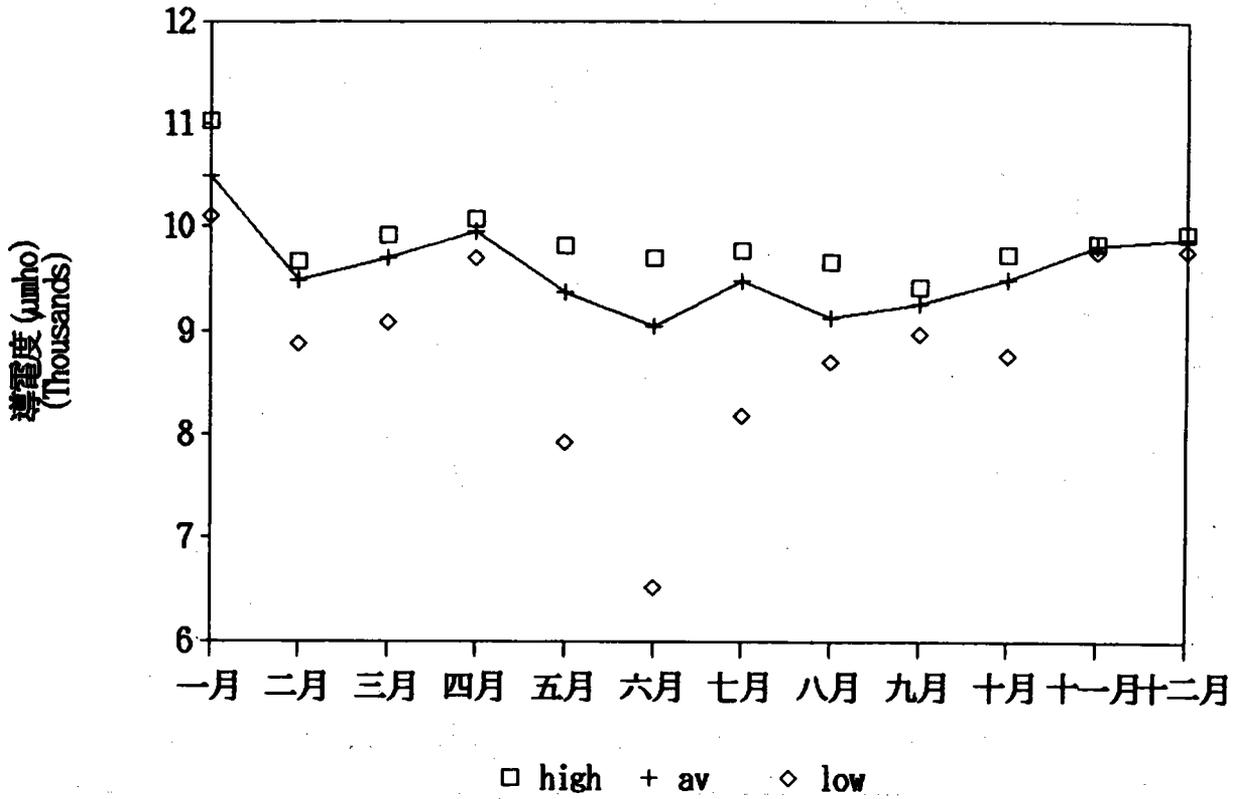


圖 5-8 花蓮港20號碼頭海水水質分析 (c)

花蓮港20號碼頭水溫

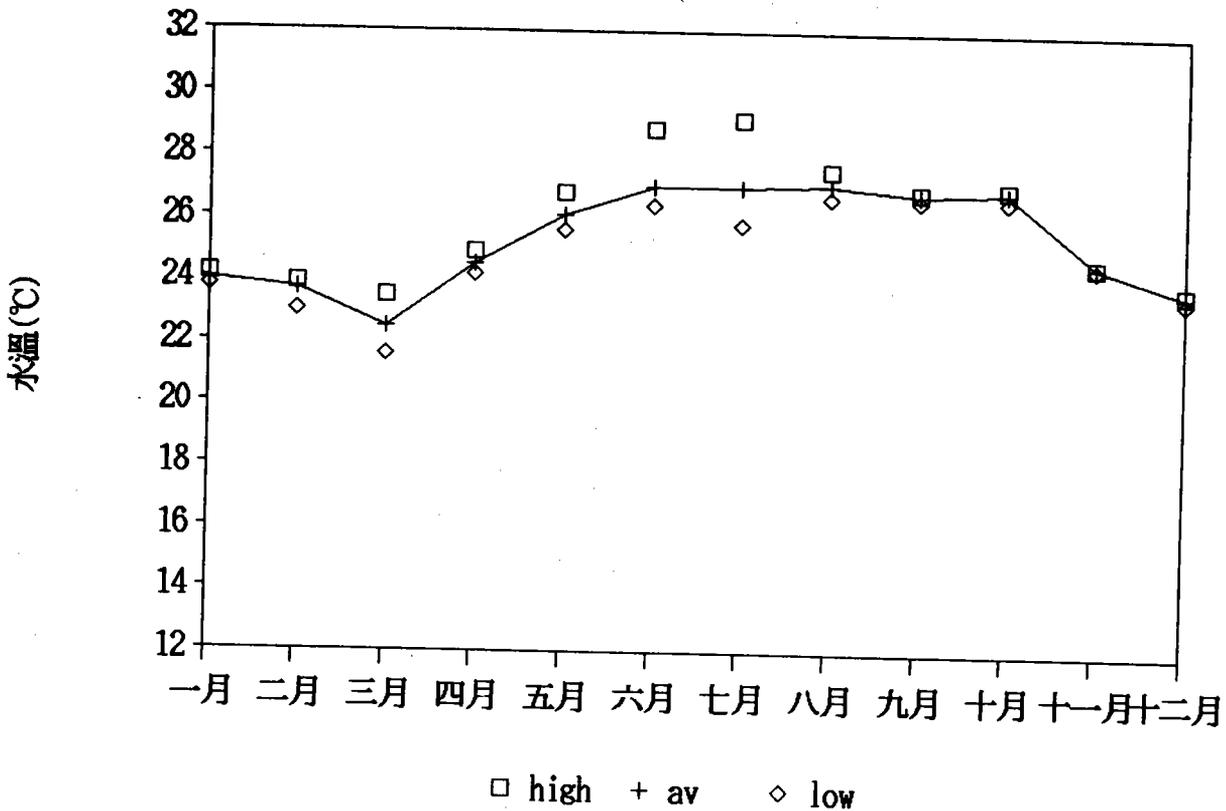
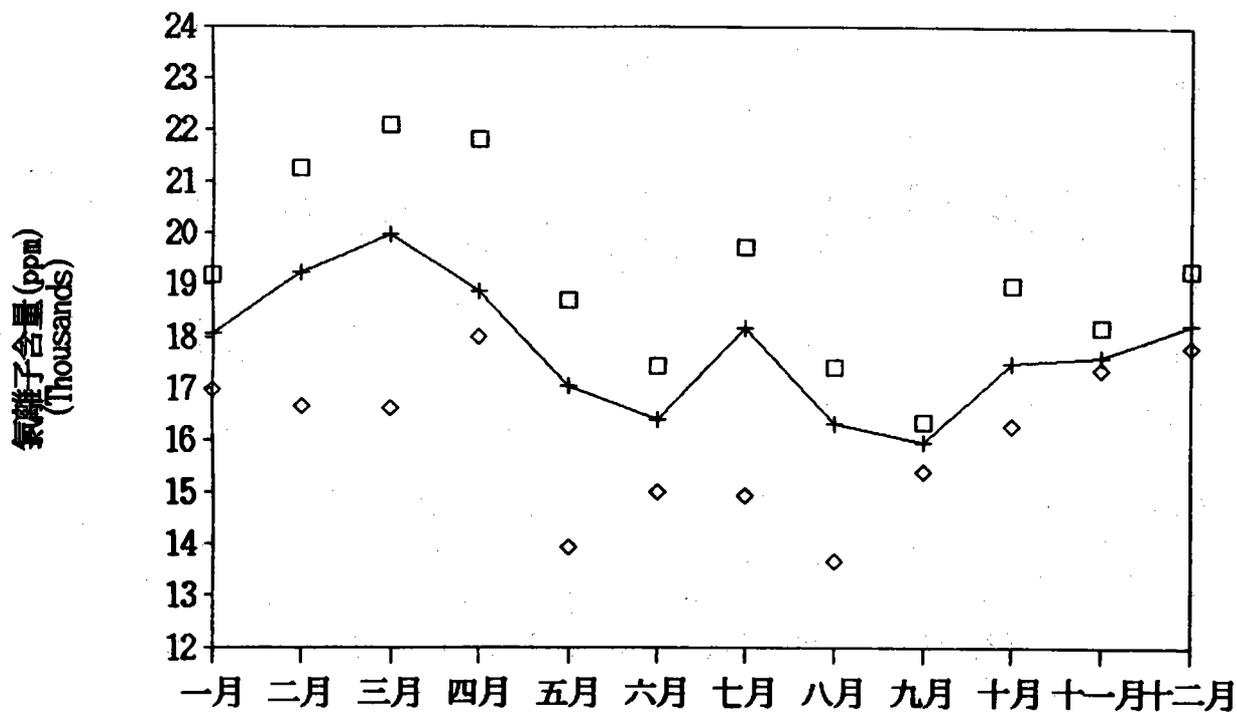


圖 5-8 花蓮港20號碼頭海水水質分析 (d)

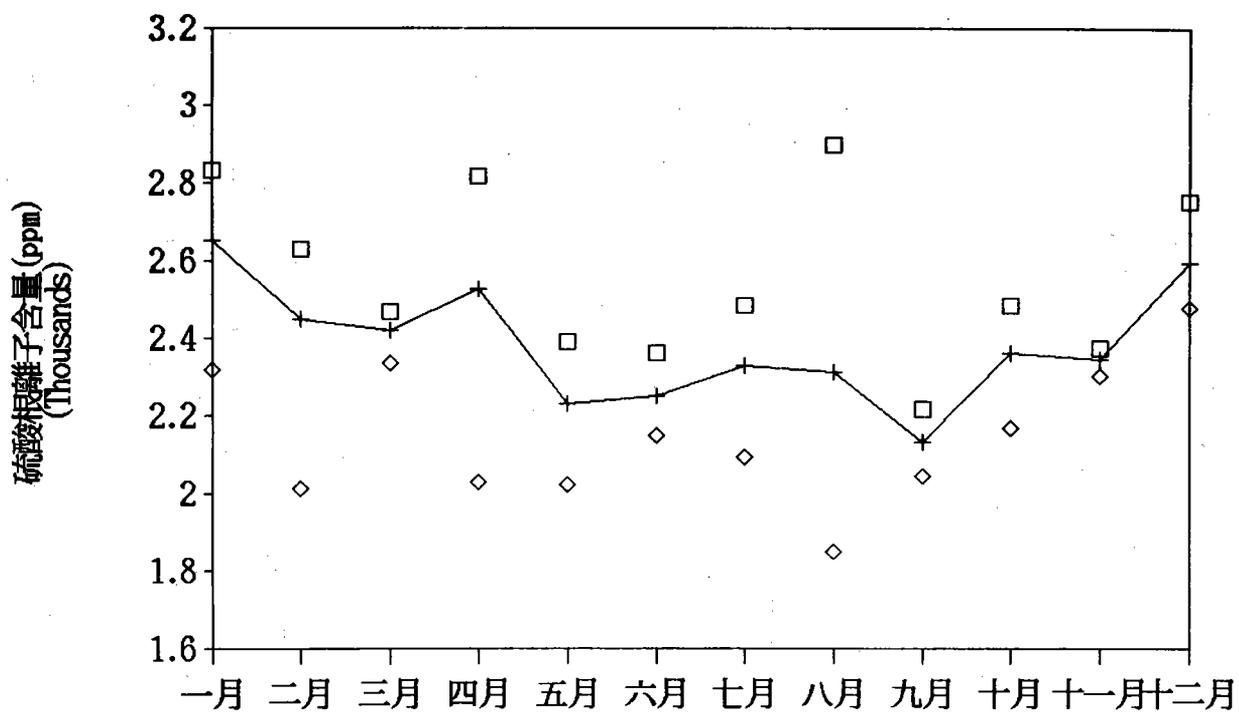
花蓮港20號碼頭氯離子



□ high + av    ◇ low

圖 5-8 花蓮港20號碼頭海水水質分析 (e)

花蓮港20號碼頭硫酸根離子



□ high + av    ◇ low

圖 5-8 花蓮港20號碼頭海水水質分析 (f)

蘇澳港3號碼頭PH值

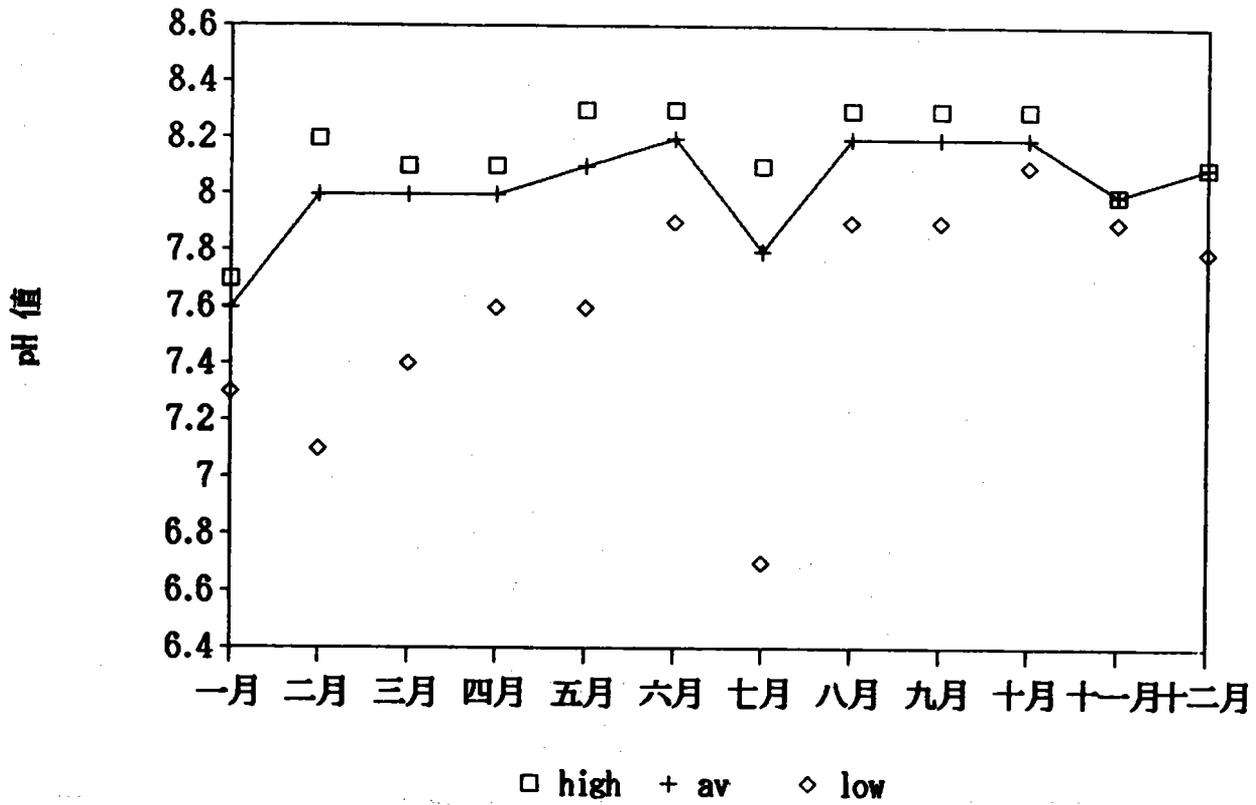


圖 5-9 蘇澳港3號碼頭海水水質分析 (a)

蘇澳港3號碼頭溶氧量

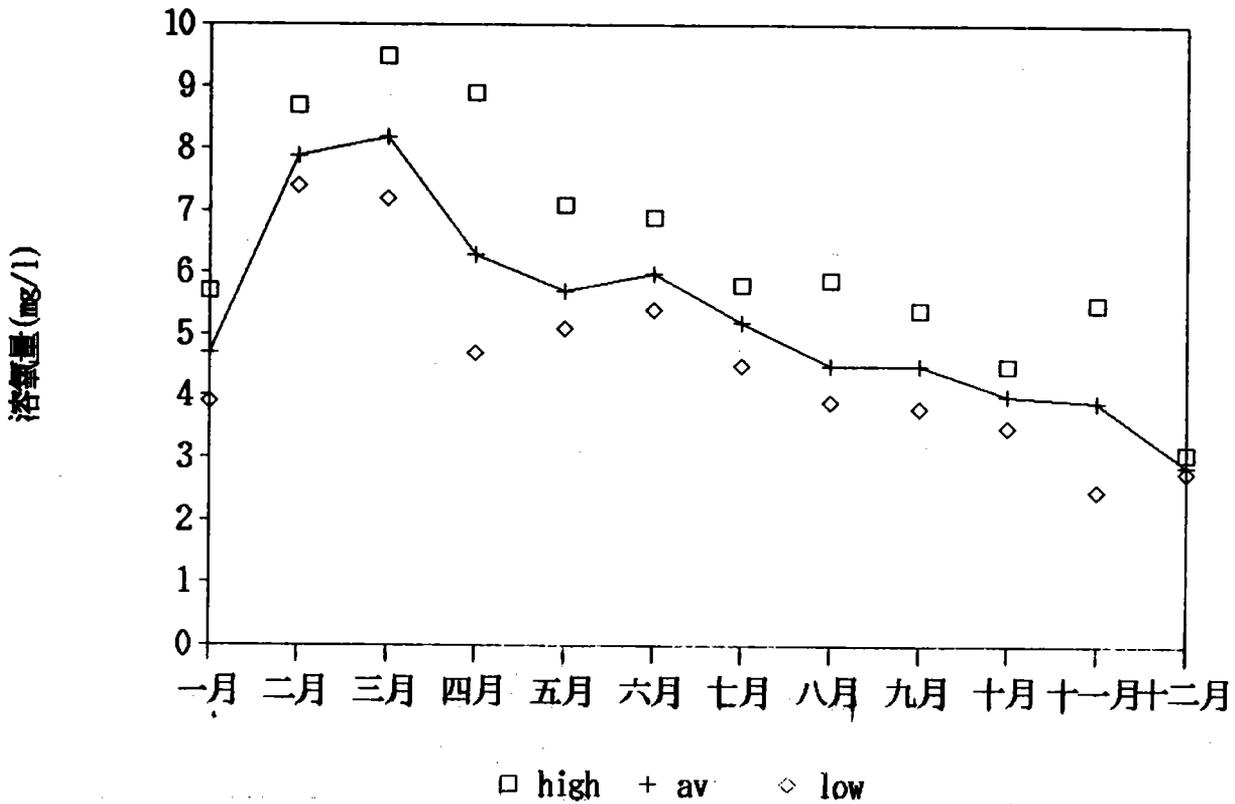


圖 5-9 蘇澳港3號碼頭海水水質分析 (b)

蘇澳港3號碼頭導電度

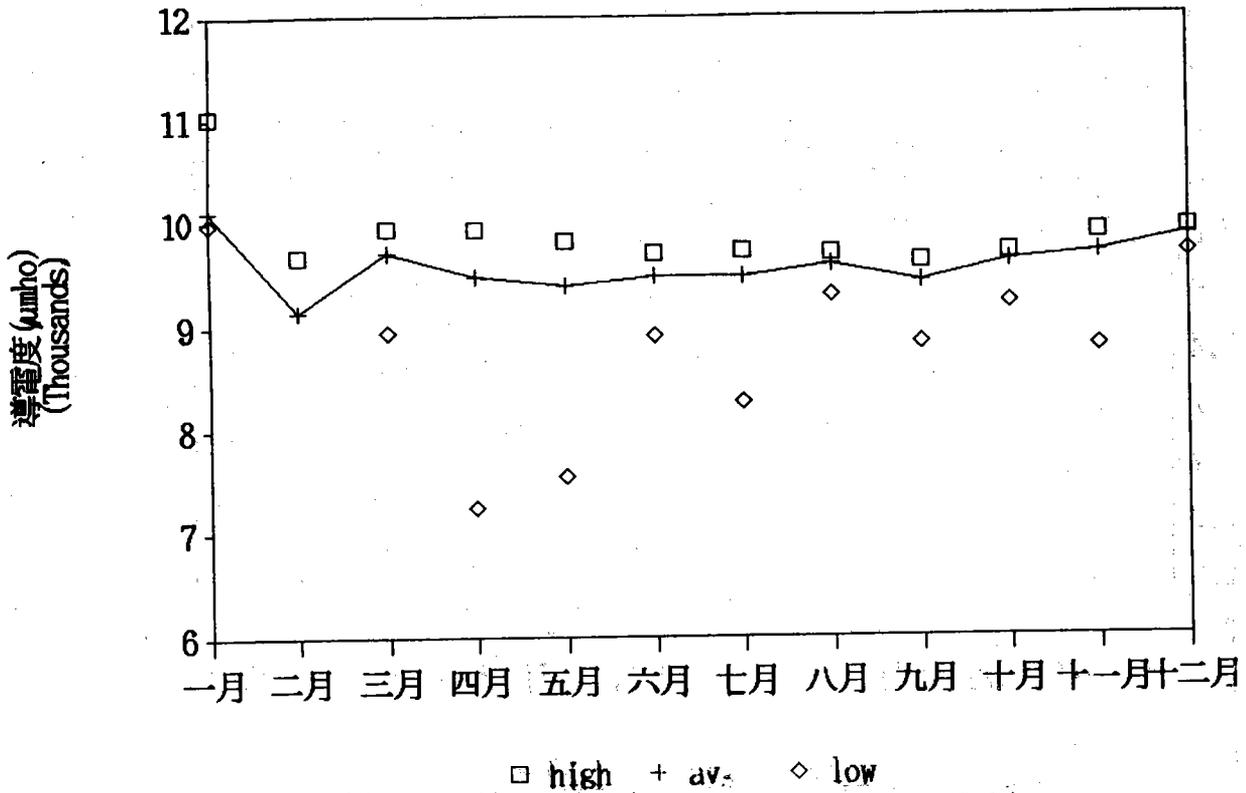


圖 5-9 蘇澳港3號碼頭海水水質分析 (c)

蘇澳港3號碼頭水溫

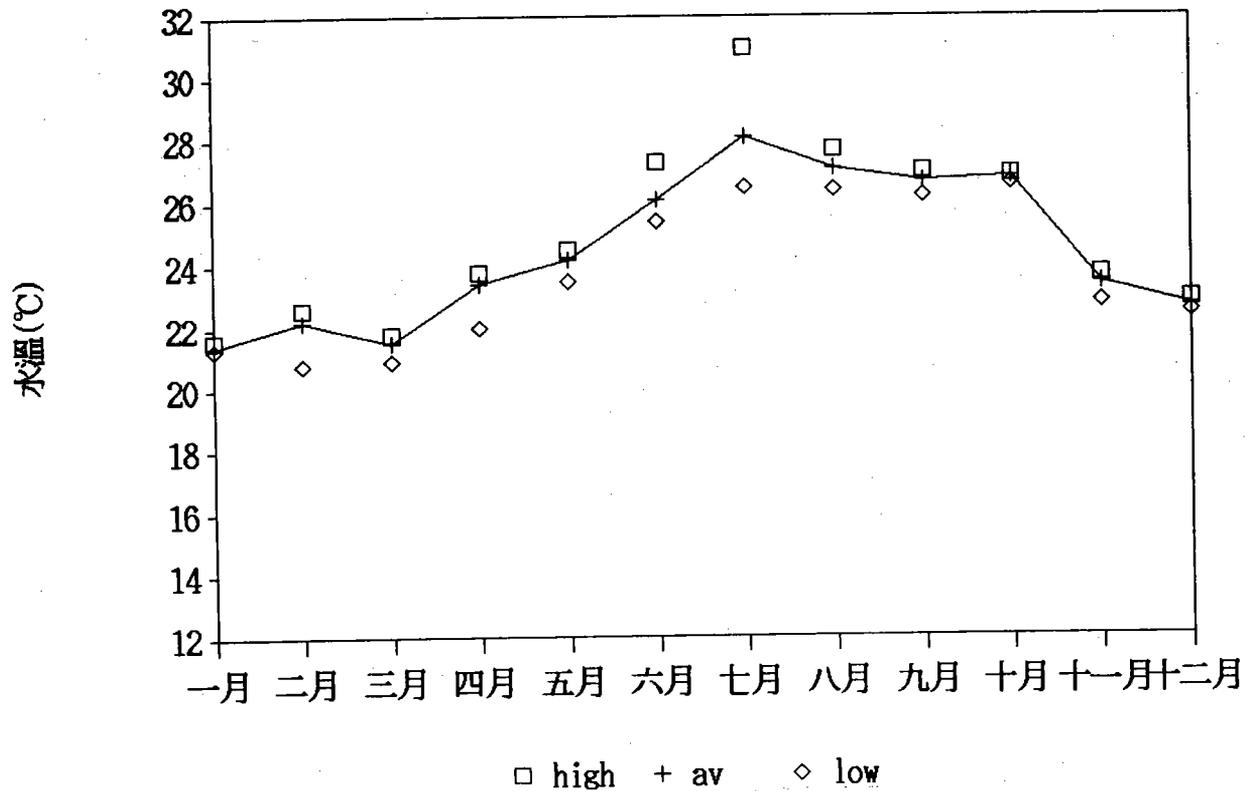


圖 5-9 蘇澳港3號碼頭海水水質分析 (d)

蘇澳港3號碼頭氯離子

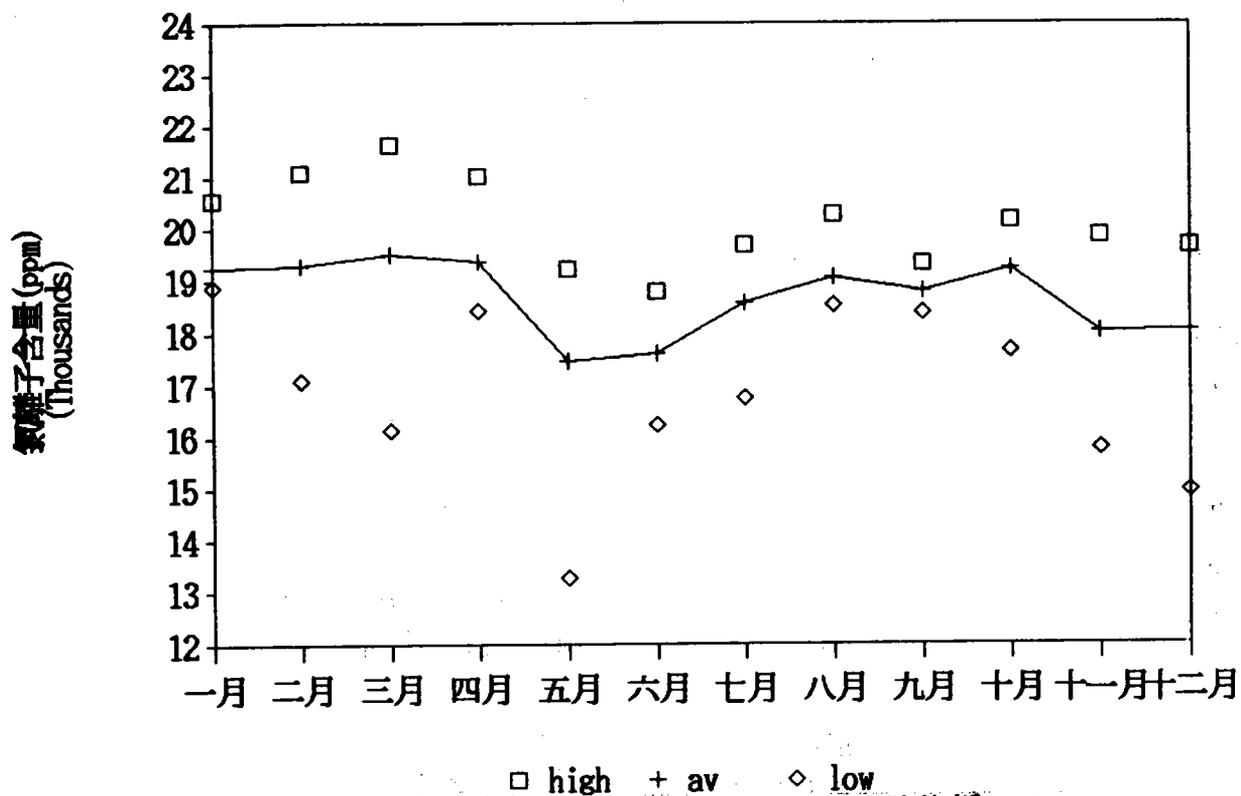


圖 5-9 蘇澳港3號碼頭海水水質分析 (e)

蘇澳港3號碼頭硫酸根離子

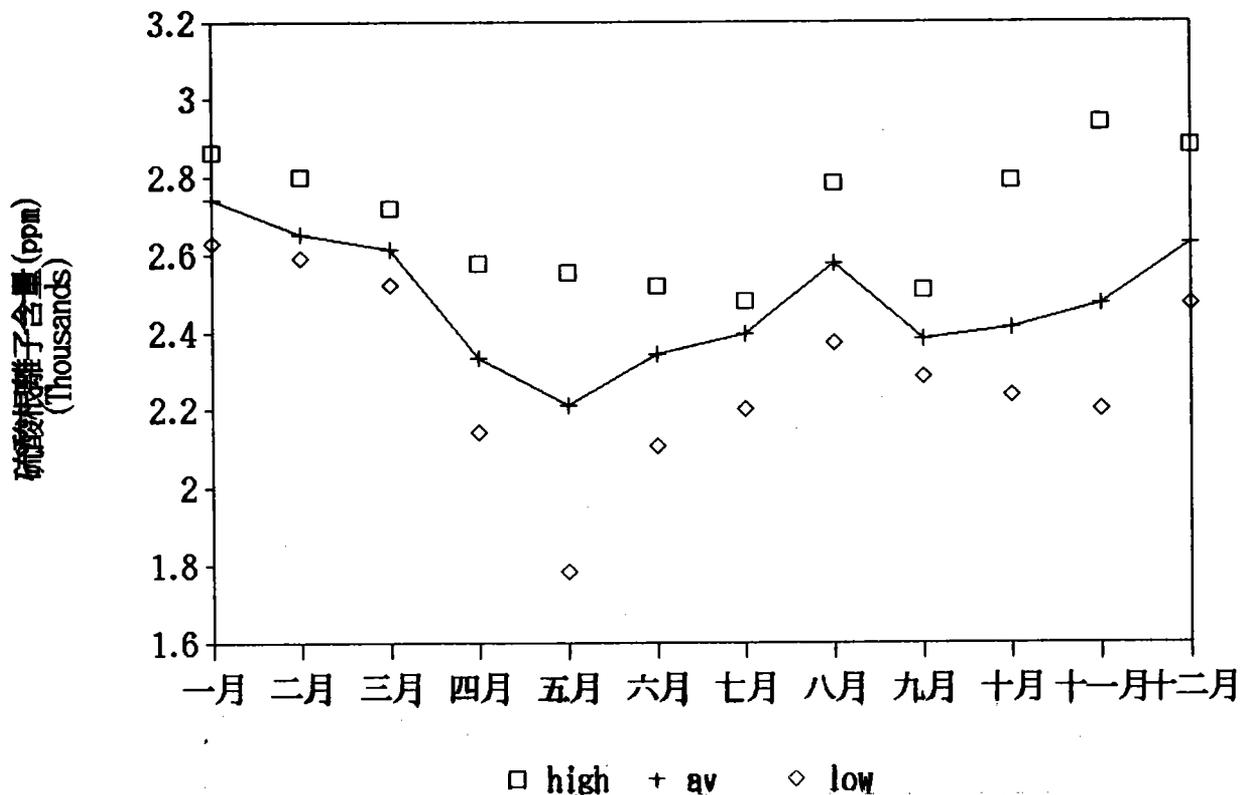
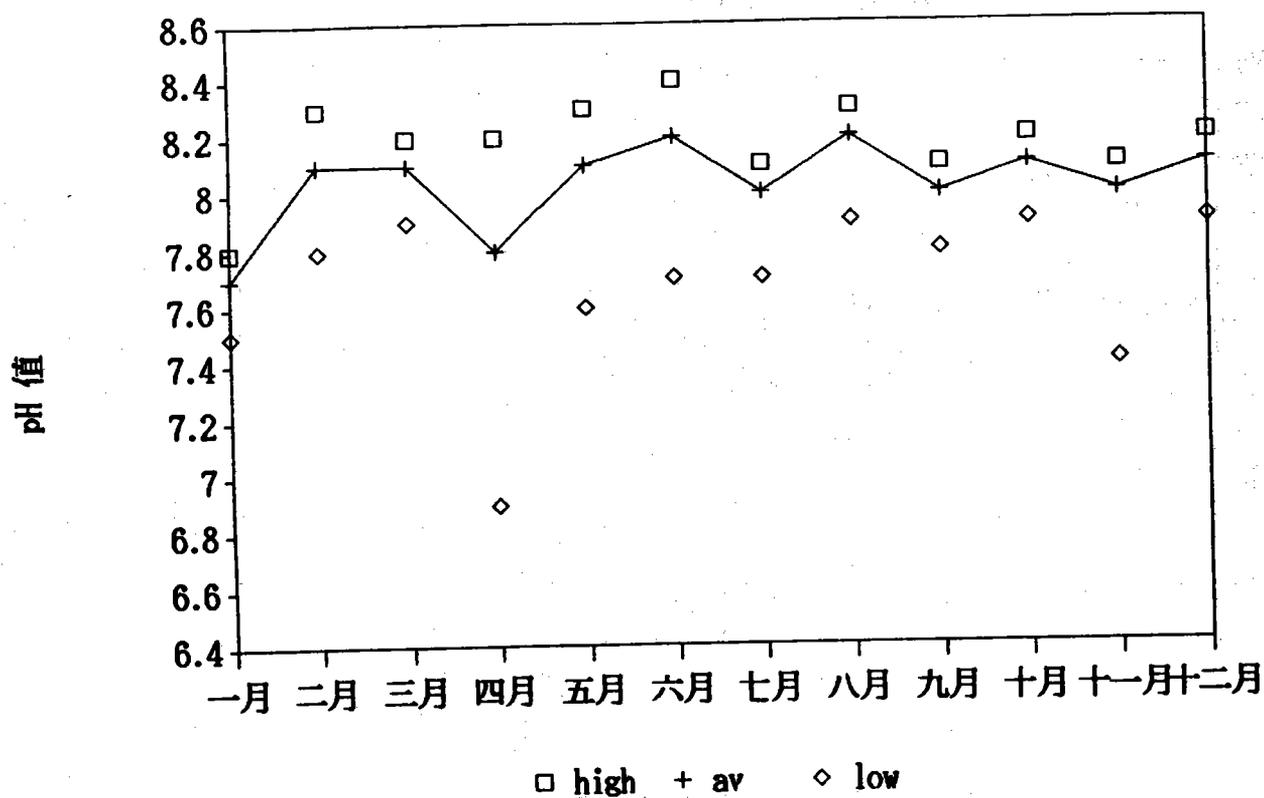


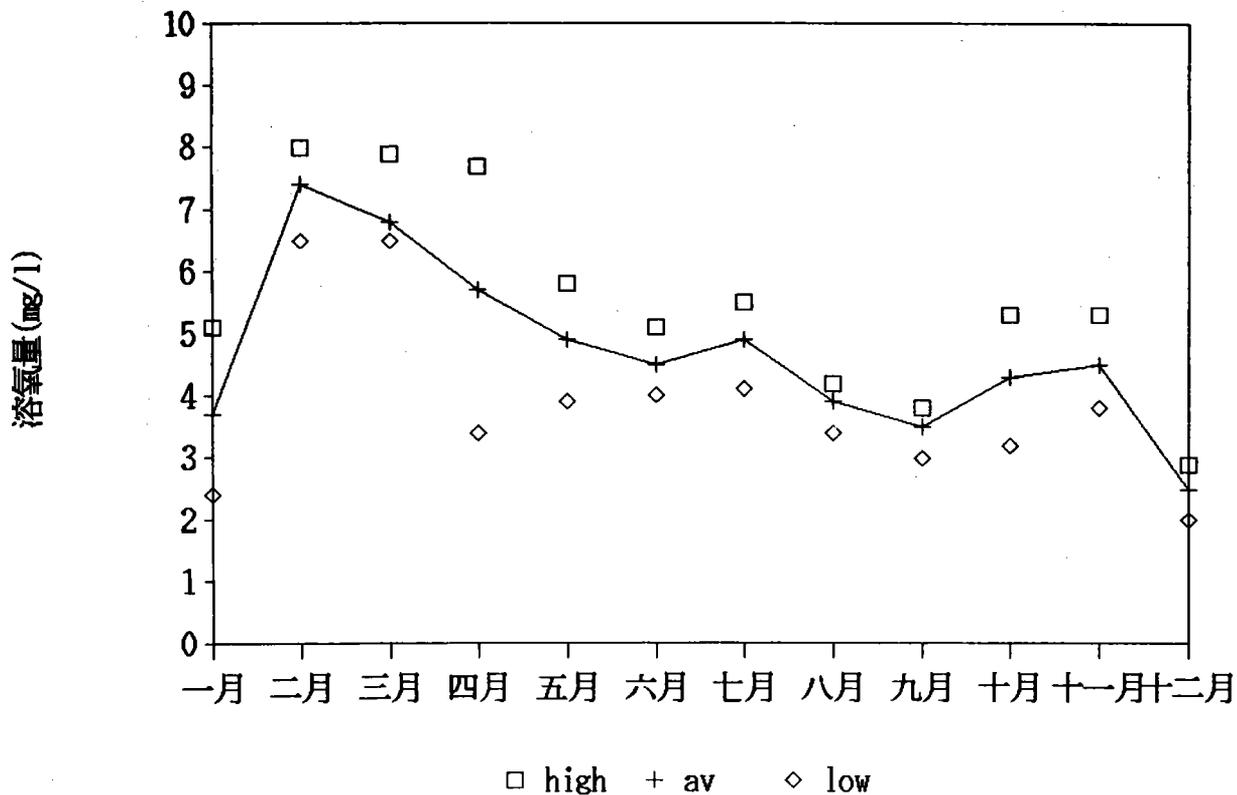
圖 5-9 蘇澳港3號碼頭海水水質分析 (f)

蘇澳港10號碼頭PH值



□ high + av    ◇ low  
圖 5-10 蘇澳港10號碼頭海水水質分析 (a)

蘇澳港10號碼頭溶氧量



□ high + av    ◇ low  
圖 5-10 蘇澳港10號碼頭海水水質分析 (b)

蘇澳港10號碼頭導電度

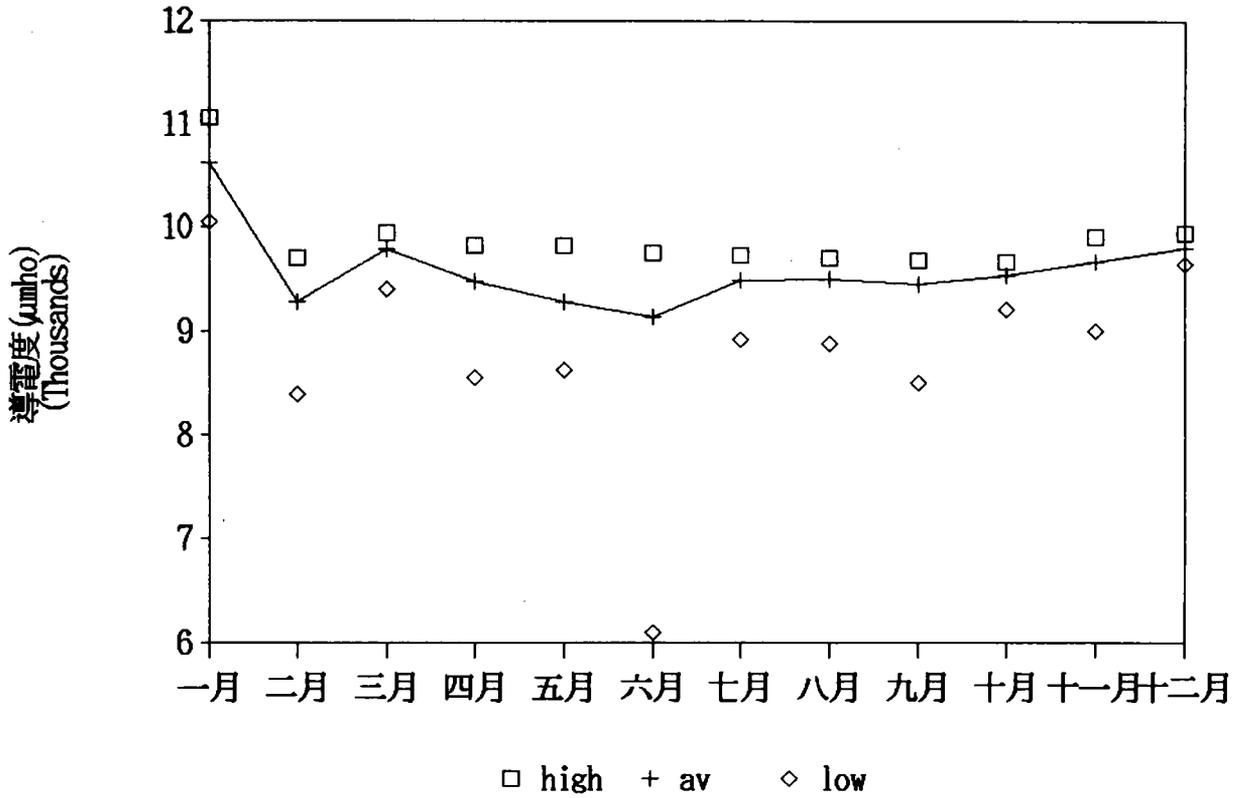


圖 5-10 蘇澳港10號碼頭海水水質分析 (c)

蘇澳港10號碼頭水溫

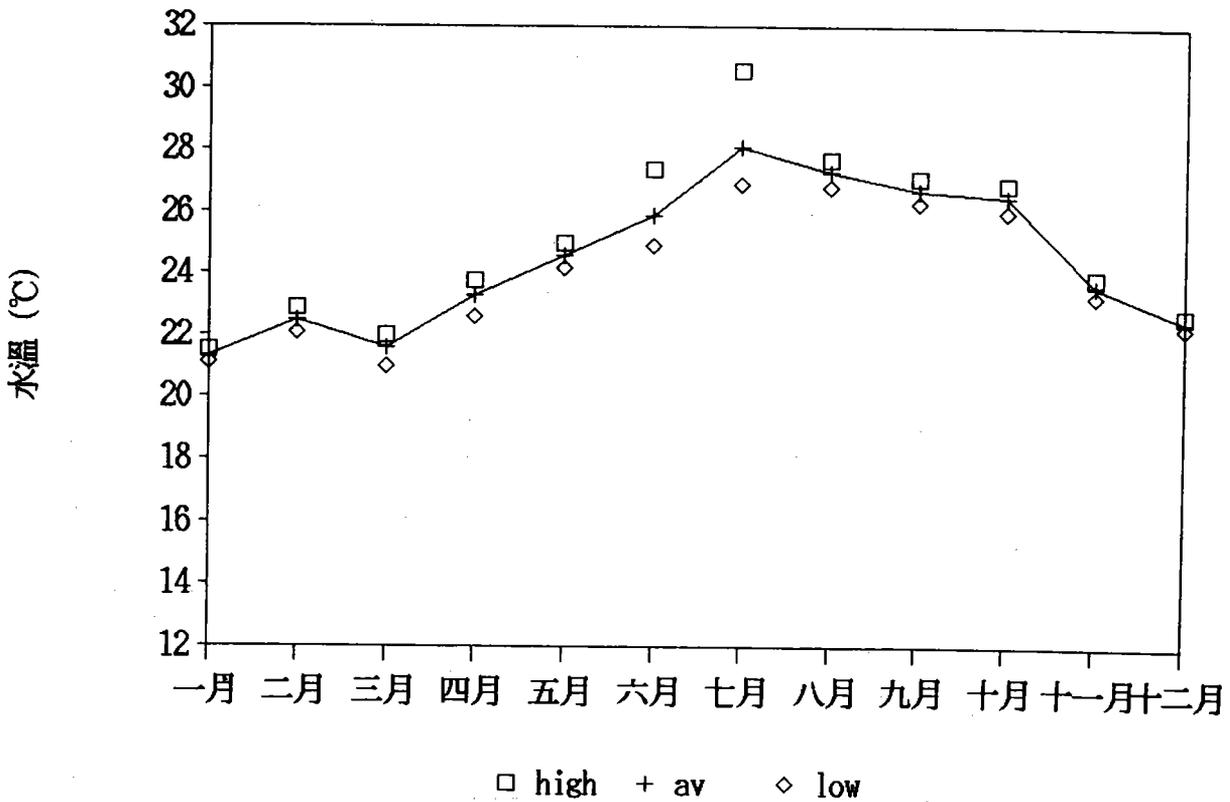


圖 5-10 蘇澳港10號碼頭海水水質分析 (d)

蘇澳港10號碼頭氯離子

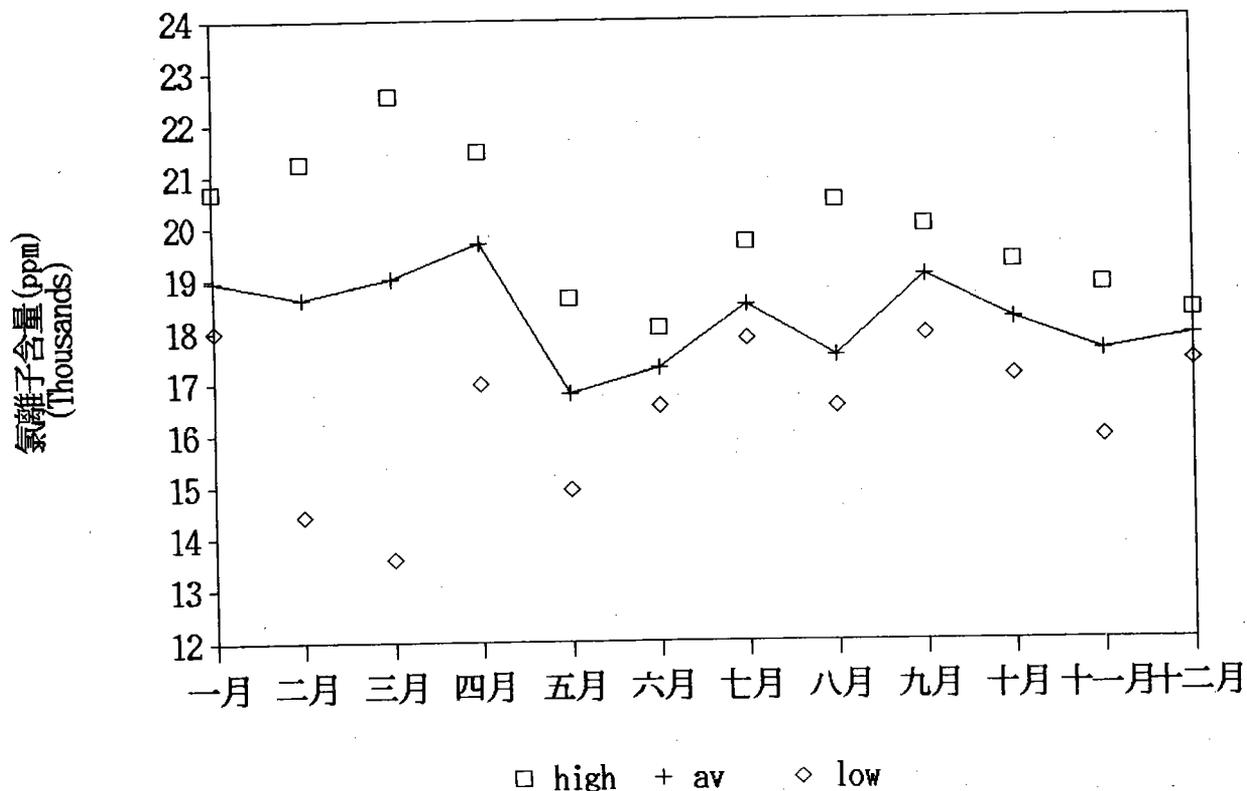


圖 5-10 蘇澳港10號碼頭海水水質分析 (e)

蘇澳港10號碼頭硫酸根離子

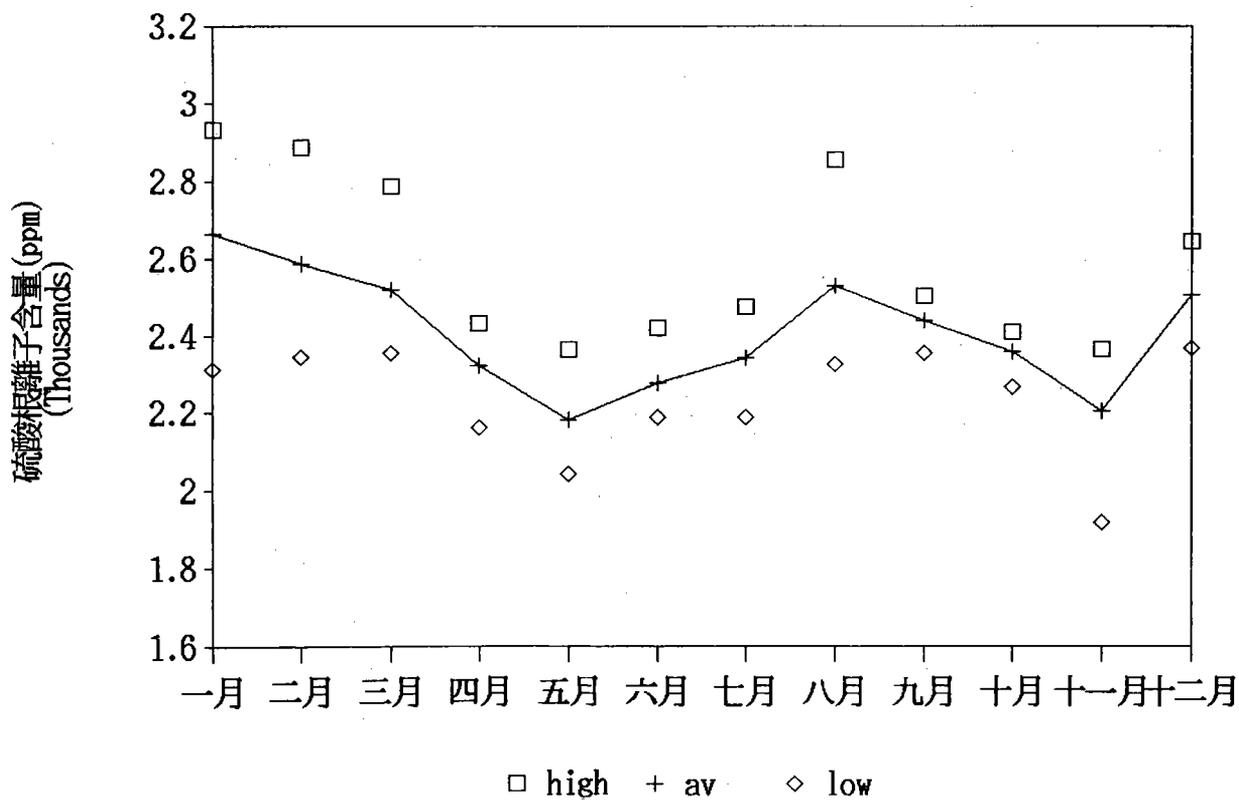


圖 5-10 蘇澳港10號碼頭海水水質分析 (f)

# 陸、現場腐蝕調查

吳 信 昇\*

## 一、前 言

本次調查係針對港灣R.C結構物長期暴露在海洋環境之下，容易受到海水鹽份，硫酸鹽類……等有害物質侵入，造成鋼筋腐蝕，導致鋼筋體積膨脹，鋼筋外之保護層裂開，加速有害物質侵入，危及整座結構物之安全性，縮短其使用年限。因此，對於港灣R.C結構物利用現場目測觀察，非破壞性試驗及鑽心取樣，並配合實驗室作其物理，化學等分析，以瞭解本省五大港口R.C結構物現存問題，發現其問題，設法解決問題，實已刻不容緩。

## 二、結構物調查位置

本次調查位置由各港務局提供，計在基隆港 15 號倉庫牆面、30 號倉庫牆面，西 1 5 號碼頭及東 2 號碼頭。台中港為 11 號倉庫、23 號碼頭。高雄港 3 號倉庫（柱）、10 號倉庫、38 號碼頭及中州碼頭。花蓮港 2 號倉庫東牆、北牆及 4 號碼頭，蘇澳港 9 號碼頭、10 號碼頭等進行調查。

## 三、調查與試驗方法

現場非破壞性調查試驗

### 1. 繪方格網

在所需要試驗調查混凝土面上，每間隔 20cm 劃上方格，以利日後在其上作試驗。

### 2. 試驗錘法 (Test Hammer Test)

在每一個 20cm 見方之方格內，利用試錘打擊混凝土面取三個數據平均，由其

---

\*台灣省交通處港灣技術研究所助理

數據大小以判定混凝土表面品質狀況。

### 3. 鋼筋探測器 ( R-Meter Test )

此種儀器原理及鋼筋受到磁場作用，致使由指針偏離，當磁力最強時，即為鋼筋位置，由鋼筋直徑，在儀器上可推算其保護層厚度。

### 4. 鋼筋腐蝕電位測定

是一種半電池電位法 ( Half-Cell Potential Measurment ) 本試驗採用 Pathfinder 試驗。混凝土中鋼筋之腐蝕為一種電化學反應過程，因此在鋼筋表面會發展出有陰極 ( 鈍態 ) 及陽極 ( 正在腐蝕中 ) 的現象。由於有兩極的產生，只要有一導線溝通，則在不同的位置或區域，即可建立不同之電位及電流流動之形態。

### 5. 貫入試驗 ( Penetration Method Test )

利用彈簧壓縮放鬆彈簧以驅動一合金鋼針進入混凝土面，造成面上一凹洞，利用測微計量得凹陷深度，查表即可得一強度值。

### 6. 混凝土電阻量測

利用低頻率定量交流電，驅動探針量測混凝土之電阻。

### 7. 超音波

量測一短脈振動經過試體，傳遞時間，由其時間大小可評估混凝土品質狀況。

## 四、試驗室分析

試驗室分析工作包括下列各項

#### 1. 鑽心試體描繪

將試體表面展開描繪，由此可粗略看出骨材級配合是否適當。

#### 2. 抗壓試驗 ( Compressive Strength Test )

本試驗依 ASTM C39-84 規範執行，若試體長度和直徑比不維持在 2.0 時，則需依本規範修正。

#### 3. 透水試驗

本試驗之目的在測定混凝土之透水係數，瞭解其水密性，因在 ASTM 內並無規定試驗方法，故所試驗結果為比較值，僅供參考用。其原理在單位時間內自單位

面積流出水量的多寡，利用 Darcy 定理，可求出透水係數。

#### 4. 中性化試驗 (Carbonation Test)

將鑽心試體劈裂後，利用化學指示劑(酚酞)，塗抹於試體劈裂面，觀測其顏色之變化，量出中性化深度。

#### 5. 比重、吸水率、孔隙率試驗

依 ASTM C64-82 規範執行。

#### 6. 水泥含量分析

依 ASTM C85-66 之規範執行，測定水泥含量。

#### 7. 化學成份分析

鑽取試體長度 15~20 公分，從表面算起，依次在深度 1 公分、2 公分、3 公分，3 至 5 公分、5 至 10 公分、10 至 15 公分等切割之。將切割後每一深度試體，取其水泥漿固體研磨成粉狀顆粒通過 200 號篩，此為化學分析之試樣，然後再依 ASTM C114-85 進行  $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{SO}_3^{-2}$ 、 $\text{Cl}^-$  含量之化學分析。

### 五、調查結果討論

各港之碼頭或倉庫結構物調查結果概況如表 6-1 至表 6-5 所示，表 6-6 為各碼頭倉庫鑽心試體之物性試驗結果，表 6-7 至表 6-27 為鑽心試體中之化學成份分析結果，表 6-28 至表 6-32 為腐蝕電位分佈量測結果，而圖 6-1 至圖 6-5 為鑽心試體表面骨材分佈描繪圖，圖 6-6 至圖 6-25 為  $\text{MgO}$ 、 $\text{SO}_3^{-2}$ 、 $\text{Cl}^-$  等侵入鑽心試體中之分佈情形，茲以各港之調查結果分別討論如下：

#### (一) 基隆港：

1. 物理性質：由表 6-6，以西 15 號碼頭其試驗錘平均讀數 37 抗壓強度 338.6、327.6  $\text{kg/cm}^2$  及透水係數  $1.1 \times 10^{-10}$  與  $1.5 \times 10^{-10} \text{m/sec}$  等均優於其它結構物，而倉庫混凝土強度均不足，水密性不佳，顯示一般設計或施工上對於主體結構物較為重視，而次要結構物常較為忽略。
2. 化學性質：在中性化深度以岸上 3 號及 10 號倉庫的 45mm 及 22mm 為最高，而其它碼頭結構物約在 2.0~2.5mm，由此可見常浸泡水中結構物較不受中性化影響。而  $\text{MgO}$ 、 $\text{SO}_3^{-2}$ 、 $\text{Cl}^-$  等離子含量以碼頭結構物較倉庫為高，顯示常年受水浸泡或潑濺帶，其有害離子滲入量均高於岸上結構物。

## (二) 台中港：

1. 物理性質：其抗壓強度平均在  $140\text{kg}/\text{cm}^2$  (2000psi)，23 號碼頭飛沫帶其透水係數  $1.2 \times 10^{-9}\text{m}/\text{sec}$  再根據試體表面骨材描繪圖可大略看出其級配不良，含有些扁平狀石料，致使孔隙增加，水密性欠佳。
2. 化學性質：中性化深度仍以岸上結構物高於水中結構物，而  $\text{MgO}$ 、 $\text{SO}_3^{-2}$ 、 $\text{Cl}^-$  等離子含量，以 23 號碼頭潮汐帶高於其它結構物，此以水密性不佳有關，另外如表 6-29 所示腐蝕電位值均超過  $-600\text{mV}$ ，顯示其內鋼筋均已達腐蝕狀態。

## (三) 高雄港：

1. 物理性質：抗壓強度，以 38 號碼頭潮汐帶  $268.9\text{kg}/\text{cm}^2$  及中州碼頭之飛沫帶  $22.4\text{kg}/\text{cm}^2$  較佳，試驗錘平均讀數 38 號碼頭為 38，而中州碼頭為 36 亦較佳。
2. 化學性質：而由於高雄港地處工業重鎮，港池內污染較重，致使因化學上影響混凝土內部劣化相對性地增大，由表 6-19 ~ 表 6-21 可看出其  $\text{MgO}$ 、 $\text{SO}_3^{-2}$ 、 $\text{Cl}^-$  等侵入混凝土內部之內含量明顯地增加，更以中州碼頭潮汐帶之  $\text{Cl}^-$  含量高達 2.23% 由表 6-34 所示，當混凝土內  $\text{Cl}^-$  含量超過 2.0% 以上，其腐蝕機率可確定鋼筋已達嚴重腐蝕，再配合腐蝕電位值如表 6-30 所示，均達  $-500\text{mV}$  以上，在在顯示其腐蝕之嚴重性，另外 38 號碼頭其  $\text{Cl}^-$  雖介於 1.0~2.0% 之間，然其腐蝕電位值更高，介於  $-700 \sim -850\text{mV}$  之間，相對岸上結構物如 3 號倉庫柱面較不受  $\text{MgO}$ 、 $\text{SO}_3^{-2}$ 、 $\text{Cl}^-$  等之滲入量較小，再配合腐蝕電位介於  $-5\text{mV} \sim -250\text{mV}$  之間，顯見其鋼筋腐蝕情形不嚴重。

## (四) 花蓮港：

1. 物理性質：地處台灣東部有較優良之骨材，混凝土具有比重大，透水係數小，孔隙率小，吸水率低等優點。
2. 化學性質：其 2 號碼頭北面牆之  $\text{MgO}$ 、 $\text{SO}_3^{-2}$ 、 $\text{Cl}^-$  含量均高於同座之東面牆，中性化深度均在 2mm 以下非常微小。

## (五) 蘇澳港：

1. 物理性質：其試驗錘平均讀數為 34，抗壓強度在 9 號碼頭為  $256.5\text{kg}/\text{cm}^2$ ，10 號碼頭為  $290.4\text{kg}/\text{cm}^2$  均高於  $210\text{kg}/\text{cm}^2$  (3000psi)，水密性也不錯。

2. 化學性質：根據表6-25~表6-27，可看出其中MgO、 $\text{SO}_3^{-2}$ 、 $\text{Cl}^-$ 含量相當高，尤其是9號碼頭深度1~2公分處之 $\text{Cl}^-$ 為2.03%，配合表6-32其腐蝕電位值，均高於-350mV以上，顯示已達嚴重腐蝕情況。另外亦可由海水水質分析得知，此港海水中 $\text{Cl}^-$ 及 $\text{SO}_3^{-2}$ 含量均較其它各港為高所致。

表 6-1 基隆港結構物概況

項目	15號倉庫 目前狀況	30號倉庫 目前狀況
1. 結構體外觀	少部份撞痕剝落	仍然完好
2. 試驗錘讀數	30	32 (牆壁面)
3. 保護層厚度	4.0cm	7.0cm
4. 抗壓強度	97.8kg / cm <sup>2</sup>	101.9kg / cm <sup>2</sup>
5. 水泥含量	—	—
6. 中性化深度	45mm	22mm
7. 化學成份	MgO、SO <sub>3</sub> <sup>-2</sup> 、Cl <sup>-</sup> 含量均有明顯變化	MgO、SO <sub>3</sub> <sup>-2</sup> 、Cl <sup>-</sup> 含量均有明顯變化
8. 透水係數	5.1 × 10 <sup>-10</sup> m / sec	透水量太大無法量測
9. 比重	2.15	2.26
10. 吸水率	7.2%	5.9%
11. 孔隙率	17.7%	13.4%

項目	西 - 15號碼頭 目前狀況	東 - 2號碼頭 目前狀況
1. 結構體外觀	仍然良好，壁面有貝類棲息， 略有孔蝕。	仍然良好，壁面有貝類棲息，略 有孔蝕。
2. 試驗錘讀數	37 (良好)	34 (良好)
3. 保護層厚度	此座碼頭無鋼筋	8.5cm (壁面至鋼版樁)
4. 抗壓強度	333kg / cm <sup>2</sup>	146kg / cm <sup>2</sup>
5. 水泥含量	—	—
6. 中性化深度	2.5mm	2.0mm
7. 化學成份	MgO、SO <sub>3</sub> <sup>-2</sup> 、Cl <sup>-</sup> 含量均有明顯變化	MgO、SO <sub>3</sub> <sup>-2</sup> 、Cl <sup>-</sup> 含量均有明顯變化
8. 透水係數	1.3 × 10 <sup>-10</sup> m / sec	4.3 × 10 <sup>-10</sup> m / sec
9. 比重	2.29	2.17
10. 吸水率	6.3%	8.2%
11. 孔隙率	15.4%	17.8%

表 6-2 台中港結構物概況

台中港 11 號倉庫及 23 號碼頭

項目	11號倉庫	23號碼頭飛沫帶
1. 結體體外觀	仍然完好	仍然完好
2. 試驗錘讀數	25.7	31.9
3. 保護層厚度	—	12公分
4. 抗壓強度	141.2 ( kg / cm <sup>2</sup> )	128.4 ( kg / cm <sup>2</sup> )
5. 水泥含量	3.57%	2.85%
6. 中性化深度	20mm	8mm
7. 化學成份	MgO、SO <sub>3</sub> <sup>-2</sup> 、Cl <sup>-</sup> 含量均有明顯變化	MgO、SO <sub>3</sub> <sup>-2</sup> 、Cl <sup>-</sup> 含量均有明顯變化
8. 透水係數	3.03 × 10 <sup>-10</sup> m / sec	1.18 × 10 <sup>-9</sup> m / sec
9. 比重	2.17	2.20
10. 吸水率	7.7%	5.8%
11. 孔隙率	17.6%	13.7%

表 6-3 高雄港結構物概況

項目	3號倉庫 目前狀況	10號倉庫 目前狀況
1. 結構體外觀	仍然完好	少部份撞痕剝落
2. 試驗錘讀數	39 (柱面)	23 (牆壁面)
3. 保護層厚度	4.5cm	2.5cm
4. 抗壓強度	103kg / cm <sup>2</sup>	136kg / cm <sup>2</sup>
5. 水泥含量		
6. 中性化深度	24mm	45mm
7. 化學成份	MgO、SO <sub>3</sub> <sup>-2</sup> 、Cl <sup>-</sup> 含量均有明顯變化	MgO、SO <sub>3</sub> <sup>-2</sup> 、Cl <sup>-</sup> 含量均有明顯變化
8. 透水係數	3.2 × 10 <sup>-10</sup> m / sec <sup>2</sup>	取樣試體有裂縫
9. 比重	2.19	2.07
10. 吸水率	6.2%	8.2%
11. 孔隙率	15.1%	20.2%

項目	38號碼頭 目前狀況	中州碼頭 目前狀況
1. 結構體外觀	仍然完好	仍然完好
2. 試驗錘讀數	38	36
3. 保護層厚度	8.5cm	2.0cm
4. 抗壓強度	233kg / cm <sup>2</sup>	198kg / cm <sup>2</sup>
5. 水泥含量		
6. 中性化深度	2.0mm	2.0mm
7. 化學成份	MgO、SO <sub>3</sub> <sup>-2</sup> 、Cl <sup>-</sup> 含量均有明顯變化	MgO、SO <sub>3</sub> <sup>-2</sup> 、Cl <sup>-</sup> 含量均有明顯變化
8. 透水係數	1.1 × 10 <sup>-10</sup> m / sec	5.85 × 10 <sup>-10</sup> m / sec
9. 比重	2.31	2.15
10. 吸水率	4.5%	5.7%
11. 孔隙率	11.4%	16.1%

表 6-4 花蓮港結構物概況

花蓮港 2 號倉庫

項目	北面牆 目前狀況	東面牆 目前狀況
1. 結構體外觀	仍然完好	仍然完好
2. 試驗錘讀數	29.4	30.9
3. 保護層厚度	6-7公分 (直接由試體量測)	6公分 (直接由試體量測)
4. 抗壓強度	123.5 (kg/cm <sup>2</sup> )	108.8 (kg/cm <sup>2</sup> )
5. 水泥含量	12.9%	4.92%
6. 中性化深度	2mm	2mm
7. 化學成份	MgO、SO <sub>3</sub> <sup>-2</sup> 、Cl均有明顯變化	MgO、SO <sub>3</sub> <sup>-2</sup> 、Cl均有明顯變化
8. 透水係數	3.17×10 <sup>-11</sup> m/sec	2.67×10 <sup>-10</sup> m/sec
9. 比重	2.30	2.35
10. 吸水率	4.4%	3.8%
11. 孔隙率	11.5%	9.5%

花蓮港 4 號碼頭飛沫帶	
項目	目前狀況
1. 結構體外觀	混凝土被船隻撞擊剝落嚴重
2. 試驗錘讀數	35.9
3. 保護層厚度	2公分 (由剝落處量取)
4. 抗壓強度	235.5kg/cm <sup>2</sup>
5. 水泥含量	5.53%
6. 中性化深度	2mm
7. 化學成份	MgO、SO <sub>3</sub> <sup>-2</sup> 、Cl含量均有明顯變化
8. 透水係數	2.08×10 <sup>-11</sup> m/sec
9. 比重	2.45
10. 吸水率	2.6%
11. 孔隙率	7.2%

表 6-5 蘇澳港結構物概況

蘇澳港 9 號、10 號碼頭飛沫帶

項目	9 號碼頭	10 號碼頭
1. 結構體外觀	完好	完好
2. 試驗錘讀數	32.9	34.1
3. 保護層厚度	8-9公分	8-10公分
4. 抗壓強度	256.5 ( kg / cm <sup>2</sup> )	290.4 ( kg / cm <sup>2</sup> )
5. 水泥含量	4.82%	4.11%
6. 中性化深度	1mm	3mm
7. 化學成份	MgO、SO <sub>3</sub> <sup>-2</sup> 、Cl-含量均有明顯變化	MgO、SO <sub>3</sub> <sup>-2</sup> 、Cl-含量均有明顯變化
8. 透水係數	1.21 × 10 <sup>-10</sup> m / sec	2.73 × 10 <sup>-10</sup> m / sec
9. 比重	2.10	2.21
10. 吸水率	8.9%	6.7%
11. 孔隙率	19.7%	15.3%

表 6-6 五大港碼頭倉庫鑽心試體物理性質

港灣名稱	結構體位置	試錘平均讀數	比重	吸水率 (%)	孔隙率 (%)	抗壓強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	透水係數 (m/sec)
基隆港	15號倉庫	30	2.15	7.2	17.7	97.8	$5.1 \times 10^{-10}$
	30號倉庫	32	2.26	5.1	13.4	101.8	—
	15號碼頭飛沫帶	37	2.14	6.5	16.0	338.6	$1.1 \times 10^{-10}$
	15號碼頭潮汐帶	37	2.17	6.1	14.8	327.6	$1.5 \times 10^{-10}$
	東2號碼頭飛沫帶	34	2.15	6.4	19.7	128.3	$4.5 \times 10^{-10}$
	東2號碼頭潮汐帶	34	2.19	6.9	15.9	163.8	$4.5 \times 10^{-10}$
台中港	11號倉庫	26	2.17	7.7	17.6	141.2	$3.0 \times 10^{-10}$
	23號碼頭飛沫帶	32	2.20	5.8	13.7	128.4	$1.2 \times 10^{-9}$
	23號碼頭潮汐帶	34	2.18	6.7	15.3	163.0	—
高雄港	3號倉庫	39	2.19	6.2	15.1	103.1	$3.2 \times 10^{-10}$
	10號倉庫	23	2.07	8.2	20.2	136.2	—
	38號碼頭飛沫帶	38	2.34	4.8	12.2	196.8	$1.2 \times 10^{-10}$
	38號碼頭潮汐帶	38	2.28	4.3	10.6	268.9	$1.0 \times 10^{-10}$
	中州碼頭飛沫帶	36	2.19	6.5	15.4	222.4	$5.8 \times 10^{-10}$
	中州碼頭潮汐帶	36	2.11	5.0	16.9	174.2	$5.9 \times 10^{-10}$
花蓮港	2號倉庫北面牆	29	2.30	4.4	11.5	123.5	$3.2 \times 10^{-11}$
	2號倉庫東面牆	31	2.35	3.8	9.5	108.8	$2.7 \times 10^{-10}$
	4號碼頭飛沫帶	36	2.45	2.6	7.2	235.5	$2.1 \times 10^{-10}$
蘇澳港	9號碼頭飛沫帶	33	2.10	8.9	19.7	256.5	$1.2 \times 10^{-10}$
	10號碼頭飛沫帶	34	2.21	6.7	15.3	290.4	$2.7 \times 10^{-10}$

表 6-7 基隆港 15 號倉庫鑽心試體化學成份分析

單位：%

試體深度 (mm) (從表面算起)	CaO	MgO	SO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	Cl <sup>-</sup>	其 他
0-10	65	0.03	1.82	0.12	1.水泥含量：7.30% 2.中性化深度：4.5mm  註：MgO, SO <sub>3</sub> <sup>-2</sup> , Cl <sup>-</sup> 含量 均以 CaO 佔水泥重 65% 為基準
10-20	65	0.16	1.61	0.18	
20-30	65	1.36	1.96	0.26	
30-50	65	0.09	1.96	0.43	
50-100	65	0.02	1.21	0.21	
100-150	65	1.95	1.93	0.20	

表 6-8 基隆港 30 號倉庫鑽心試體化學成份分析

單位：%

試體深度 (mm) (從表面算起)	CaO	MgO	SO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	Cl <sup>-</sup>	其 他
0-10	65	4.78	2.66	0.35	1.水泥含量：16.7% 2.中性化深度：22mm  註：MgO, SO <sub>3</sub> <sup>-2</sup> , Cl <sup>-</sup> % 含 量均以 CaO 佔水泥重 65% % 為基準
10-20	65	—	2.97	0.44	
20-30	65	—	2.53	0.37	
30-50	65	0.82	1.40	0.32	
50-100	65	0.16	1.32	0.27	
100-150	65	0.30	1.81	0.29	

表 6-9 基隆港西 15 號碼頭飛沫帶鑽心試體化學成份分析 單位：%

試體深度 (mm) (從表面算起)	CaO	MgO	SO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	Cl <sup>-</sup>	其 他
0-10	65	0.25	2.49	0.81	1. 水泥含量：18.0% 2. 中性化深度：2.5mm  註：MgO, SO <sub>3</sub> <sup>-2</sup> , Cl <sup>-</sup> 含量 均以 CaO 佔水泥重 65% 為基準
10-20	65	0.15	1.36	0.65	
20-30	65	0.21	1.56	0.65	
30-50	65	0.18	1.68	0.47	
50-100	65	—	0.90	0.28	
100-150	65	0.12	1.74	0.23	

表 6-10 基隆港西 15 號碼頭潮汐帶鑽心試體化學成份分析 單位：%

試體深度 (mm) (從表面算起)	CaO	MgO	SO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	Cl <sup>-</sup>	其 他
0-10	65	0.20	2.07	0.78	1. 水泥含量：22.0% 2. 中性化深度：2.5mm  註：MgO, SO <sub>3</sub> <sup>-2</sup> , Cl <sup>-</sup> 含量 均以 CaO 佔水泥重 65% 為基準
10-20	65	0.03	1.90	1.35	
20-30	65	0.03	2.53	1.31	
30-50	65	0.14	1.69	0.70	
50-100	65	0.15	1.59	0.28	
100-150	65	0.05	0.74	0.35	

表 6-11 基隆港東 2 號碼頭飛沫帶鑽心試體化學成份分析 單位：%

試體深度 (mm) (從表面算起)	CaO	MgO	SO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	Cl <sup>-</sup>	其 他
0-10	65	0.03	3.22	0.86	1.水泥含量：7.0% 2.中性化深度：2.0mm  註：MgO, SO <sub>3</sub> <sup>-2</sup> , Cl <sup>-</sup> 含量 均以 CaO 佔水泥重 65% 為基準
10-20	65	0.22	1.86	0.69	
20-30	65	0.09	1.15	0.58	
30-50	65	0.09	1.48	0.46	
50-100	65	0.06	1.65	0.34	
100-150	65	0.03	2.18	0.34	

表 6-12 基隆港東 2 號碼頭潮汐帶鑽心試體化學成份分析 單位：%

試體深度 (mm) (從表面算起)	CaO	MgO	SO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	Cl <sup>-</sup>	其 他
0-10	65	2.25	1.79	0.94	1.水泥含量：12.4% 2.中性化深度：2.0mm  註：MgO, SO <sub>3</sub> <sup>-2</sup> , Cl <sup>-</sup> 含量 均以 CaO 佔水泥重 65% 為基準
10-20	65	0.30	1.91	0.64	
20-30	65	9.98	1.46	0.34	
30-50	65	—	1.34	0.39	
50-100	65	—	1.03	0.32	
100-150	65	4.07	1.16	0.32	

表 6-13 台中港 11 號倉庫鑽心試體化學成份分析

單位：%

試體深度 (mm) (從表面算起)	CaO	MgO	SO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	Cl <sup>-</sup>	其 他
0-10	65	1.66	3.22	0.75	1.水泥含量：3.57% 2.中性化深度：20mm  註：MgO, SO <sub>3</sub> <sup>-2</sup> , Cl <sup>-</sup> 含量 均以 CaO 佔水泥重 65% 為基準
10-20	65	1.32	4.08	0.60	
20-30	65	1.33	2.08	0.62	
30-50	65	1.21	2.36	0.66	
50-100	65	1.70	2.27	0.52	
100-150	65	1.73	2.73	0.59	

表 6-14 台中港 23 號碼頭飛沫帶鑽心試體化學成份分析

單位：%

試體深度 (mm) (從表面算起)	CaO	MgO	SO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	Cl <sup>-</sup>	其 他
0-10	65	1.05	2.25	0.86	1.水泥含量：2.85% 2.中性化深度：8mm  註：MgO, SO <sub>3</sub> <sup>-2</sup> , Cl <sup>-</sup> 含量 均以 CaO 佔水泥重 65% 為基準
10-20	65	1.14	2.00	0.82	
20-30	65	0.72	1.73	0.48	
30-50	65	1.38	1.64	0.78	
50-100	65	1.34	1.99	0.31	
100-150	65	1.23	1.83	0.56	

表 6-15 台中港 23 號碼頭潮汐帶鑽心試體化學成份分析 單位：%

試體深度 (mm) (從表面算起)	CaO	MgO	SO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	Cl <sup>-</sup>	其 他
0-10	65	3.80	2.70	1.02	1.水泥含量：3.69% 2.中性化深度：5mm  註：MgO，SO <sub>3</sub> <sup>-2</sup> ，Cl <sup>-</sup> 含量 均以 CaO 佔水泥重 65% 為基準
10-20	65	1.14	2.47	1.02	
20-30	65	2.01	2.01	0.97	
30-50	65	1.25	2.29	0.93	
50-100	65	1.34	3.38	0.62	
100-150	65	1.43	2.64	0.36	

表 6-16 高雄港 3 號倉庫鑽心試體化學成份分析 單位：%

試體深度 (mm) (從表面算起)	CaO	MgO	SO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	Cl <sup>-</sup>	其 他
0-10	65	0.85	3.58	0.29	1.水泥含量：12.2% 2.中性化深度：24mm  註：MgO，SO <sub>3</sub> <sup>-2</sup> ，Cl <sup>-</sup> 含量 均以 CaO 佔水泥重 65% 為基準
10-20	65	0.43	4.18	0.18	
20-30	65	0.61	4.44	0.24	
30-50	65	1.54	2.06	0.18	
50-100	65	0.08	2.80	0.17	
100-150	65	0.02	0.19	0.07	

表 6-17 高雄港 10 號倉庫鑽心試體化學成份分析

單位：%

試體深度 (mm) (從表面算起)	CaO	MgO	SO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	Cl <sup>-</sup>	其 他
0-10	65	—	2.19	0.18	1.水泥含量：16.3% 2.中性化深度：45mm  註：MgO, SO <sub>3</sub> <sup>-2</sup> , Cl <sup>-</sup> 含量 均以 CaO 佔水泥重 65% 為基準
10-20	65	—	1.27	0.15	
20-30	65	0.23	1.04	0.12	
30-50	65	4.55	0.83	0.16	
50-100	65	1.11	1.02	0.10	
100-150	65	0.67	0.74	0.18	

表 6-18 高雄港 38 號碼頭飛沫帶鑽心試體化學成份分析

單位：%

試體深度 (mm) (從表面算起)	CaO	MgO	SO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	Cl <sup>-</sup>	其 他
0-10	65	—	3.36	0.75	1.水泥含量：20.0% 2.中性化深度：2.0mm  註：MgO, SO <sub>3</sub> <sup>-2</sup> , Cl <sup>-</sup> 含量 均以 CaO 佔水泥重 65% 為基準
10-20	65	0.73	2.17	0.61	
20-30	65	0.19	1.56	0.42	
30-50	65	10.82	2.37	0.46	
50-100	65	—	1.77	0.39	
100-150	65	—	3.21	0.33	

表 6-19 高雄港 38 號碼頭潮汐帶鑽心試體化學成份分析 單位：%

試體深度 (mm) (從表面算起)	CaO	MgO	SO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	Cl <sup>-</sup>	其 他
0-10	65	2.47	4.36	1.28	1.水泥含量：4.80% 2.中性化深度：2.0mm
10-20	65	1.21	4.34	1.36	
20-30	65	0.20	4.54	1.05	註：MgO, SO <sub>3</sub> <sup>-2</sup> , Cl <sup>-</sup> 含量 均以 CaO 佔水泥重 65% 為基準
30-50	65	0.50	4.09	0.86	
50-100	65	0.30	4.34	0.14	
100-150	65	0.30	4.16	0.24	

表 6-20 高雄港中州碼頭飛沫帶鑽心試體化學成份分析 單位：%

試體深度 (mm) (從表面算起)	CaO	MgO	SO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	Cl <sup>-</sup>	其 他
0-10	65	3.22	4.23	1.13	1.水泥含量：14.7% 2.中性化深度：2.0mm
10-20	65	3.33	2.93	1.29	
20-30	65	3.43	4.26	0.91	註：MgO, SO <sub>3</sub> <sup>-2</sup> , Cl <sup>-</sup> 含量 均以 CaO 佔水泥重 65% 為基準
30-50	65	1.20	2.80	0.68	
50-100	65	0.32	3.51	0.19	
100-150	65	4.86	4.46	0.34	

表 6-21 高雄港中州碼頭潮汐帶鑽心試體化學成份分析 單位：%

試體深度 (mm) (從表面算起)	CaO	MgO	SO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	Cl <sup>-</sup>	其 他
0-10	65	3.40	5.66	2.23	1.水泥含量：13.1% 2.中性化深度：2.0mm  註：MgO, SO <sub>3</sub> <sup>-2</sup> , Cl <sup>-</sup> 含量 均以 CaO 佔水泥重 65% 為基準
10-20	65	4.39	4.99	1.82	
20-30	65	0.23	3.02	1.15	
30-50	65	0.73	3.80	0.71	
50-100	65	ND	3.00	0.47	
100-150	65	2.79	2.45	0.17	

表 6-22 花蓮港 2 號倉庫北面鑽心試體化學成份分析 單位：%

試體深度 (mm) (從表面算起)	CaO	MgO	SO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	Cl <sup>-</sup>	其 他
0-10	65	0.84	0.48	0.91	1.水泥含量：12.9% 2.中性化深度：2mm  註：MgO, SO <sub>3</sub> <sup>-2</sup> , Cl <sup>-</sup> 含量 均以 CaO 佔水泥重 65% 為基準
10-20	65	3.26	1.28	1.24	
20-30	65	2.03	1.21	0.61	
30-50	65	3.29	1.62	1.32	
50-100	65	5.89	1.88	1.05	
100-150	65	2.75	1.45	1.04	

表 6-23 花蓮港 2 號倉庫東面鑽心試體化學成份分析

單位：%

試體深度 (mm) (從表面算起)	CaO	MgO	SO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	Cl <sup>-</sup>	其 他
0-10	65	3.00	1.74	0.52	1.水泥含量：4.92% 2.中性化深度：2mm  註：MgO, SO <sub>3</sub> <sup>-2</sup> , Cl <sup>-</sup> 含量 均以 CaO 佔水泥重 65% 為基準
10-20	65	2.76	1.82	0.71	
20-30	65	2.23	1.04	0.65	
30-50	65	3.33	2.52	0.94	
50-100	65	2.45	1.40	0.82	
100-150	65	3.25	1.54	0.66	

表 6-24 花蓮港 4 號碼頭飛沫帶鑽心試體化學成份分析

單位：%

試體深度 (mm) (從表面算起)	CaO	MgO	SO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	Cl <sup>-</sup>	其 他
0-10	65	1.75	2.95	1.46	1.水泥含量：5.53% 2.中性化深度：2mm  註：MgO, SO <sub>3</sub> <sup>-2</sup> , Cl <sup>-</sup> 含量 均以 CaO 佔水泥重 65% 為基準
10-20	65	1.78	1.10	1.24	
20-30	65	2.02	0.99	0.68	
30-50	65	2.41	1.02	0.56	
50-100	65	1.94	1.13	0.63	
100-150	65	1.40	1.96	0.58	

表 6-25 蘇澳港 9 號碼頭飛沫帶鑽心試體化學成份分析 單位：%

試體深度 (mm) (從表面算起)	CaO	MgO	SO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	Cl <sup>-</sup>	其 他
0-10	65	2.76	2.78	1.71	1. 水泥含量：4.82% 2. 中性化深度：1.0mm  註：MgO, SO <sub>3</sub> <sup>-2</sup> , Cl <sup>-</sup> 含量 均以 CaO 佔水泥重 65% 為基準
10-20	65	2.35	2.26	2.03	
20-30	65	2.51	2.30	1.74	
30-50	65	1.69	1.72	1.08	
50-100	65	1.59	2.41	1.26	
100-150	65	2.11	2.47	0.99	

表 6-26 蘇澳港 10 號碼頭飛沫帶鑽心試體化學成份分析 單位：%

試體深度 (mm) (從表面算起)	CaO	MgO	SO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	Cl <sup>-</sup>	其 他
0-10	65	5.07	3.12	0.83	1. 水泥含量：4.11% 2. 中性化深度：3mm  註：MgO, SO <sub>3</sub> <sup>-2</sup> , Cl <sup>-</sup> 含量 均以 CaO 佔水泥重 65% 為基準
10-20	65	4.49	1.97	0.90	
20-30	65	3.96	1.79	0.90	
30-50	65	3.75	1.45	0.61	
50-100	65	3.26	1.34	0.42	
100-150	65	5.57	1.60	0.34	

表 6-27 蘇澳港 10 號碼頭潮汐帶鑽心試體化學成份分析 單位：%

試體深度 (mm) (從表面算起)	CaO	MgO	SO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	Cl <sup>-</sup>	其 他
0-10	65	3.26	3.76	1.85	註：MgO, SO <sub>3</sub> <sup>-2</sup> , Cl <sup>-</sup> 含量 均以 CaO 佔水泥重 65% 為基準
10-20	65	2.39	1.55	1.61	
20-30	65	3.01	2.22	1.08	
30-50	65	1.45	1.47	0.90	
50-100	65	1.62	2.29	0.66	
100-150	65	1.77	2.99	0.32	

表 6-28 基隆港結構物腐蝕電位值

基隆港15號腐蝕電位值 (單位mV, 每一數值前加一負號)

290	275	305	355	345	340	240	215	220	400	365	345
425	435	455	300	300	310	285	275	255	350	345	340
425	440	465	285	275	275	350	245	295	340	330	320
385	425	440	270	260	255	430	405	400	305	300	290
355	405	425	365	255	245	380	375	415	275	270	265
330	360	390	280	255	250	365	350	360	250	235	235

基隆港30號倉庫腐蝕電位值 (單位mV, 每一數值前加一負號)

135	150	120	430	445	490	550	545	550	210	180	100
125	125	130	135	170	210	650	540	535	485	450	380
340	350	375	235	240	285	570	570	530	455	425	375
305	300	270	205	200	250	600	585	525	475	430	380
485	465	455	175	200	260	345	295	260	450	420	360
390	380	375	225	200	225	230	225	215	435	405	385
555	525	535	755	230	200	460	460	455	515	500	495

基隆港東2號碼頭腐蝕電位值 (單位mV, 每一數值前加一負號)

310	320	305	395	405	460	395	335	345	315	320	345	345	360	350	335	365	365
310	320	340	295	325	360	600	590	595	345	365	355	340	375	360	355	370	405
350	365	315	320	335	350	625	595	605	335	360	405	390	370	370	385	410	425
365	345	345	365	385	415	690	675	705	360	365	385	485	465	475	375	370	420
380	380	385	400	440	525	390	400	435	365	455	480	490	465	475	455	460	480

**表 6-29 台中港結構物腐蝕電位值**

台中港23號碼頭潮汐帶腐蝕電位值 單位 (mV, 每一數值前加一負號)

705	595	650	670	785	655	710	715	745	725	685	700	670	605	595	605
715	640	645	690	645	515	590	610	780	740	700	720	690	645	615	625
700	605	660	695	645	575	590	635	785	745	710	720	715	665	640	660
725	625	685	725	630	560	615	635	795	755	715	720	740	690	665	680

**表 6-30 高雄港結構物腐蝕電位值**

高雄港3號倉柱面 (單位mV)

005	045	075	020	020
015	045	095	055	015
025	065	135	065	025
015	065	085	050	035
025	060	070	075	040
040	075	100	065	045
060	080	105	075	040
075	100	130	120	080
145	200	200	225	025

高雄港3號倉庫柱面 (單位mV, 海潮面)

020	035	015
050	065	040
095	095	040
075	080	045
045	055	040
040	040	040
050	070	055
095	100	080
155	145	140

高雄港10號倉庫腐蝕電位值 (單位mV, 每一數值前加一負號)

70	80	80	85	90	105	130	140	140	150	165	200	230	235	250	270	400	460	485	435	485
80	90	85	90	95	110	135	145	145	160	180	225	280	260	245	280	405	425	420	410	425
105	115	110	110	120	130	155	155	170	185	205	240	285	270	255	285	390	425	400	405	440
170	175	170	170	150	170	195	195	200	210	230	255	275	265	270	305	380	435	415	420	415
240	230	245	250	255	250	270	270	275	280	305	330	340	370	370	380	405	385	380	425	430
305	325	345	330	325	340	380	380	395	390	405	415	440	445	435	435	430	395	410	400	405
400	430	415	415	410	435	450	450	460	470	475	475	505	490	475	480	490	495	495	455	410

高雄港38號碼頭腐蝕電位值 (單位mV, 每一數值前加一負號)

725	710	840	765	735	730	700	680	705	710	730	760	755	755	775	805	830	830	810	795	775	785	815	845
725	740	755	805	840	805	725	685	695	710	725	715	720	735	795	820	825	825	835	795	795	795	790	700
730	765	810	815	830	810	760	710	745	755	760	765	740	725	780	840	830	820	810	800	840	805	785	700
780	810	850	815	785	765	780	800	810	800	775	755	730	715	725	720	755	765	770	780	835	790	795	740
795	820	840	845	775	740	770	795	795	790	760	755	730	705	715	700	720	740	750	760	760	770	805	770

高雄港中洲碼頭電位值 (單位mV, 每一數值前加一負號)

510	525	530	530	525	520	520	535	545	540	540	540	530	565	565
515	525	520	525	520	520	515	535	535	540	550	565	565	555	560
520	535	525	520	515	520	525	535	530	515	540	560	560	550	555
520	535	525	520	520	510	535	550	555	555	560	555	555	540	550
525	535	530	530	525	525	545	550	555	540	530	540	545	525	540

**表 6-31 花蓮港結構物腐蝕電位值**

花蓮港2號倉庫北面牆腐蝕電位值 單位 (mV, 每一數值前加一負號)

290	310	340	355	355	355	315	355	350	330	325	330	295	280	265	270	290	335	340	330	335	325	255	240	265	255	255
320	310	320	350	350	365	310	330	360	330	310	320	280	275	375	265	285	320	325	325	305	315	255	225	250	270	275
315	315	305	305	340	345	320	355	350	345	325	320	120	120	115	110	110	305	325	305	305	310	275	235	260	305	250
295	320	325	325	385	335	395	380	375	370	360	340	260	290	285	280	280	325	315	290	355	460	345	305	310	285	295
315	340	395	395	350	335	385	385	400	385	375	415	330	320	320	330	310	350	360	355	365	420	435	410	435	375	330
350	415	390	390	385	415	420	415	430	435	460	530	435	400	430	440	440	465	450	430	405	460	450	450	495	505	460
450	535	500	500	515	535	575	540	520	520	550	605	555	565	555	540	530	570	535	515	510	525	570	535	575	550	550
605	630	605	605	575	605	625	615	595	575	595	605	595	595	605	610	620	620	595	595	585	595	630	585	585	595	595

花蓮港2號倉庫東面牆腐蝕電位值 單位 (mV, 每一數值前加一負號)

35	40	25	30	50	35	45	70	95	90	80	75	110	130	160	125	105	110	100	105
30	25	40	45	65	70	80	90	90	90	75	75	100	120	150	140	150	170	150	150
50	45	60	75	100	90	90	100	90	95	85	80	105	110	135	145	145	405	170	195
60	65	80	95	115	105	95	110	100	100	75	75	95	100	125	150	165	315	220	230
75	80	100	105	140	125	100	120	110	100	75	80	100	110	140	195	255	270	215	205
65	70	65	100	120	130	90	110	100	90	80	75	110	125	170	230	255	255	200	190
90	80	90	95	105	105	90	95	90	100	90	95	135	165	205	225	250	230	190	175
115	105	105	100	115	100	95	105	100	110	110	115	185	225	265	255	255	255	185	170
145	155	135	135	150	120	115	145	125	135	135	135	200	255	295	305	305	245	175	160

花蓮港4號碼頭飛沫帶腐蝕電位值 單位 (mV, 每一數值前加一負號)

295	305	295	320	345	335	345	350	380	385	360	350	335	330	310	285	290	285	320	345
300	305	300	330	370	345	365	380	430	455	445	375	340	335	310	275	280	275	310	335

**表 6-32 蘇澳港結構物腐蝕電位值**

蘇澳港號碼頭飛沫帶腐蝕電位值 單位 (mV, 每一數值前加一負號)

410	390	320	330	340	390	405	425	340	390	340	350	425	340	335	380	415	395	370	385
390	360	365	330	315	355	375	335	360	320	395	435	355	400	390	465	395	350	360	350
405	375	375	385	355	375	395	410	395	365	405	430	375	460	430	450	485	445	460	435
435	420	395	405	355	385	415	395	375	405	395	410	440	475	445	475	455	515	475	445
415	420	405	425	380	395	410	370	355	365	405	420	440	465	460	485	460	470	465	450

蘇澳港10號碼頭飛沫腐蝕電位值 單位 (mV, 每一數值前加一負號)

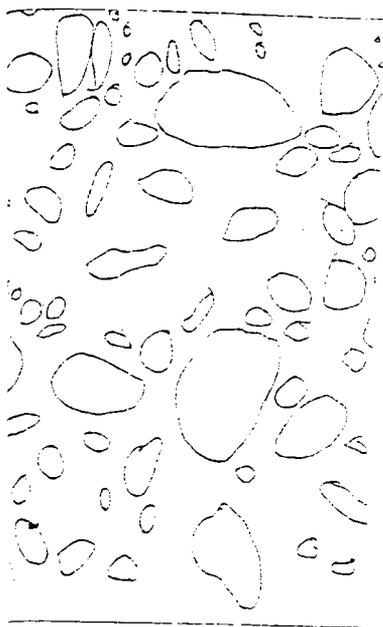
335	365	350	445	315	350	265	385	325	295	325	380	400	345	355	330	355	405	325	350
375	325	310	385	295	290	365	405	325	295	290	275	355	315	345	320	375	390	365	320
400	375	415	380	345	340	365	385	330	300	305	345	330	390	345	380	410	430	355	385
410	380	435	375	330	295	215	330	315	350	330	290	345	430	350	405	370	470	365	340

**表 6-33 腐蝕電位與鋼筋內部之腐蝕機率關係**

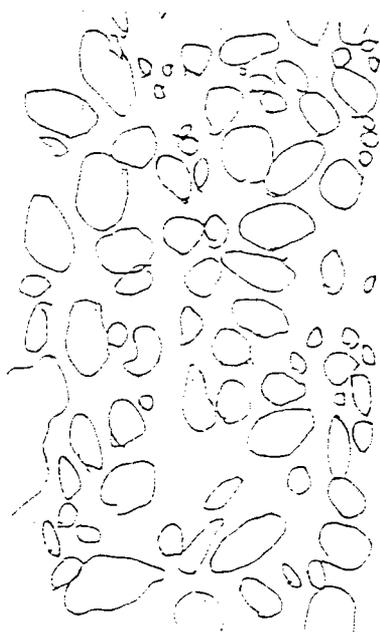
電位數值 (mV v.s. CSE)	腐 蝕 機 率	
	ASTM C-876	Van Daveer
> -200	<10%	<50%
-200 ~ -350	>50%	>50%
< -350	>90%	>95%

**表 6-34 氯離子含量與腐蝕機率關係**

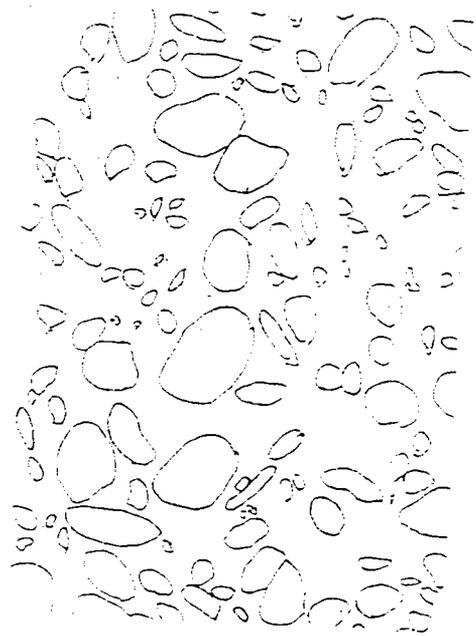
CHLORIDE CONTENT (wt% of CEMENT)	RISK OF CORROSION INITIATION
More than 2.0	CERTAIN
1.0 to 2.0	PROBABLE
0.4 to 1.0	POSSIBLE
Less than 0.4	NEGLIGIBLE



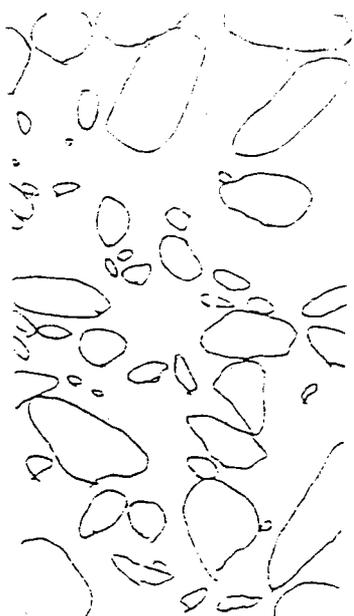
基隆港15號倉庫



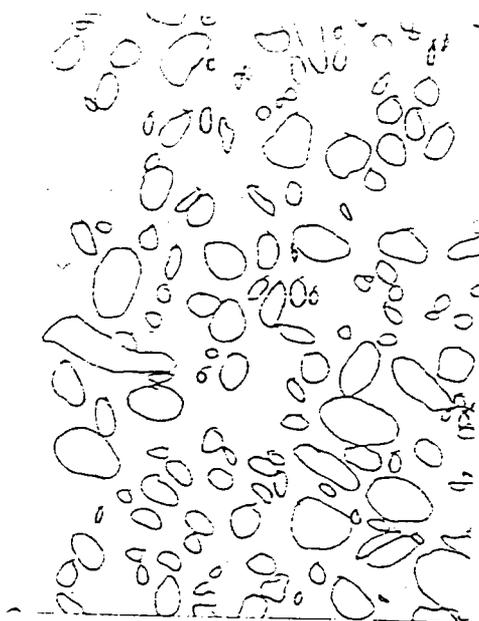
基隆港30號倉庫



基隆港西15號碼頭飛沫帶



基隆港西15號碼頭潮汐帶

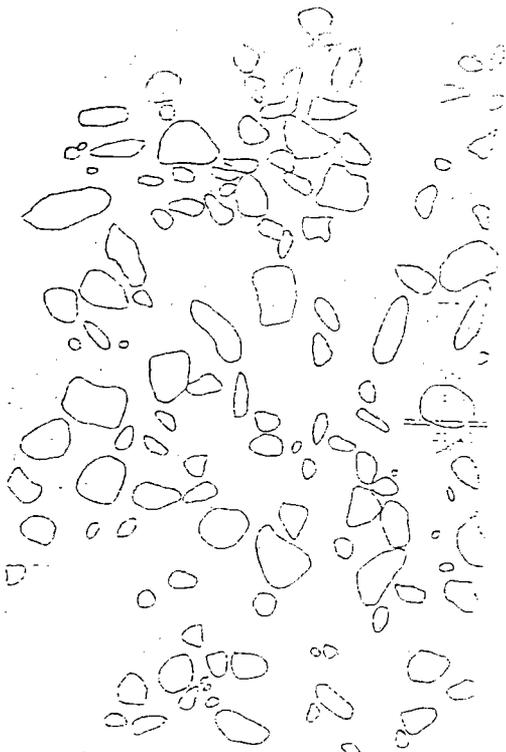


基隆港東2號碼頭飛沫帶

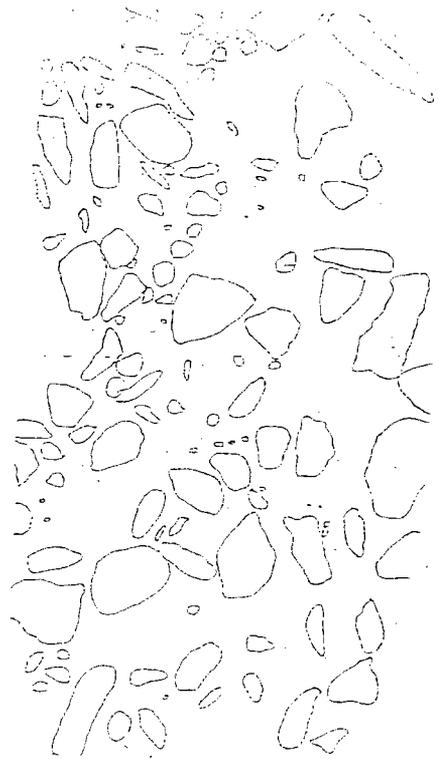


基隆港東2號碼頭潮汐帶

圖 6-1 基隆港結構物鑽心試體骨材描繪圖

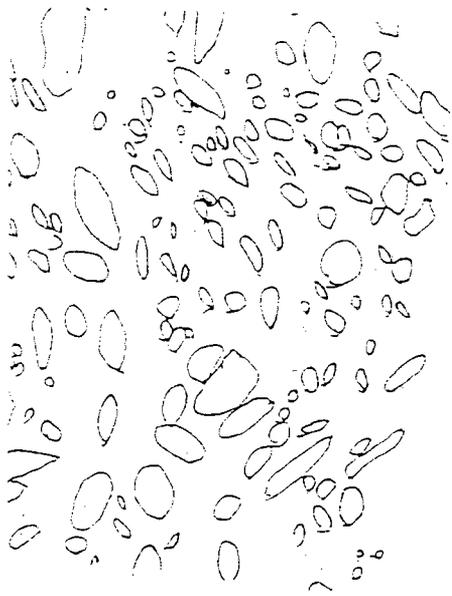


台中港11號倉庫

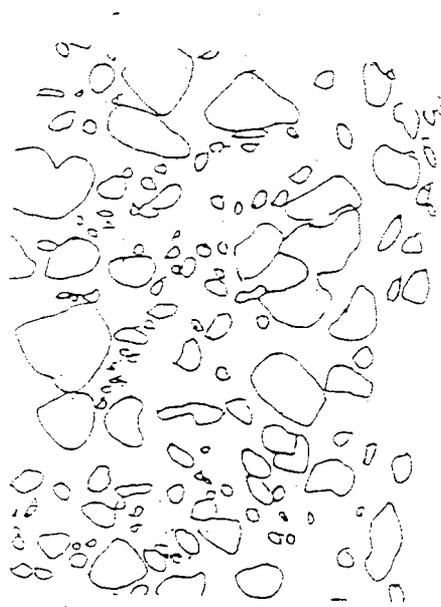


台中港23號碼頭飛沫帶

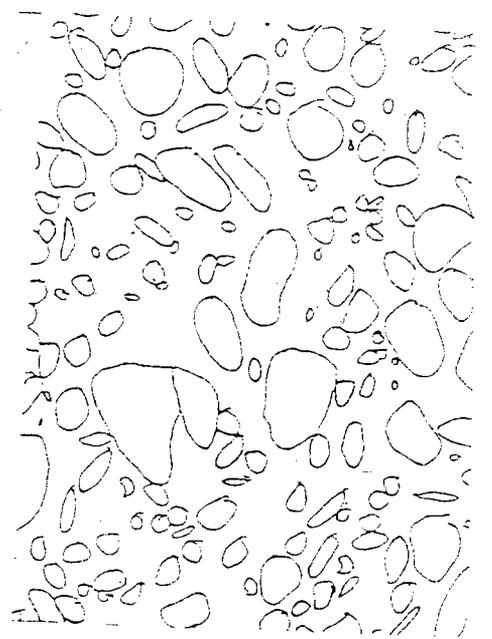
圖 6-2 台中港結構物鑽心試體骨材描繪圖



高雄港3號倉庫



高雄港10號倉庫



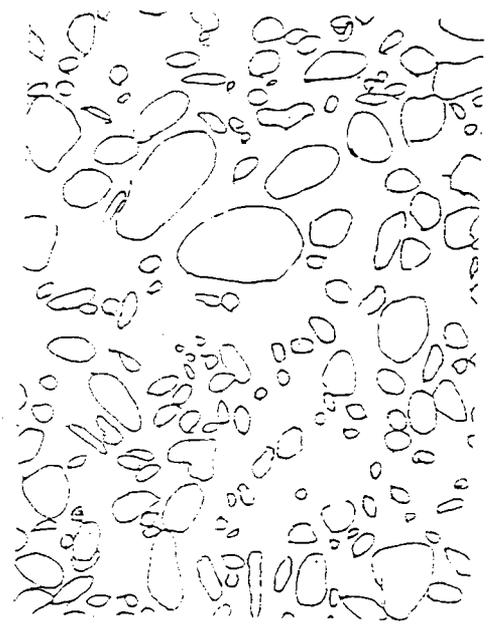
高雄港38號碼頭飛沫帶



高雄港38號碼頭潮汐帶

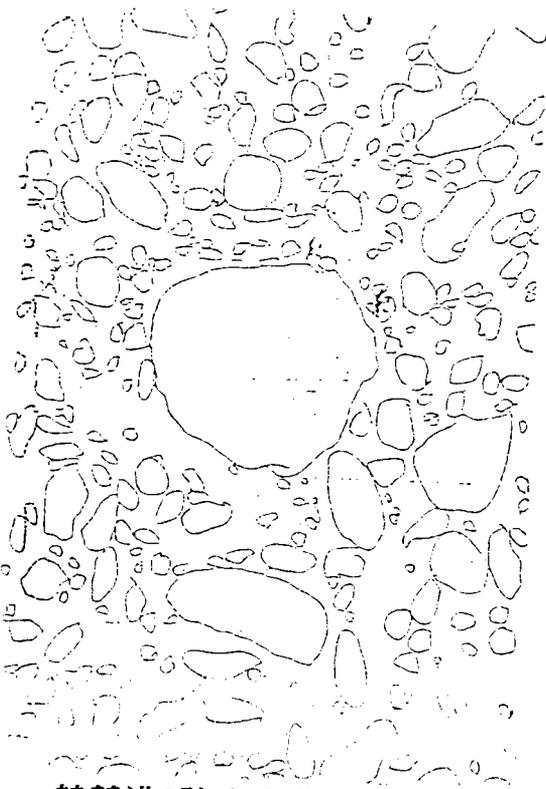


高雄港中州碼頭飛沫帶

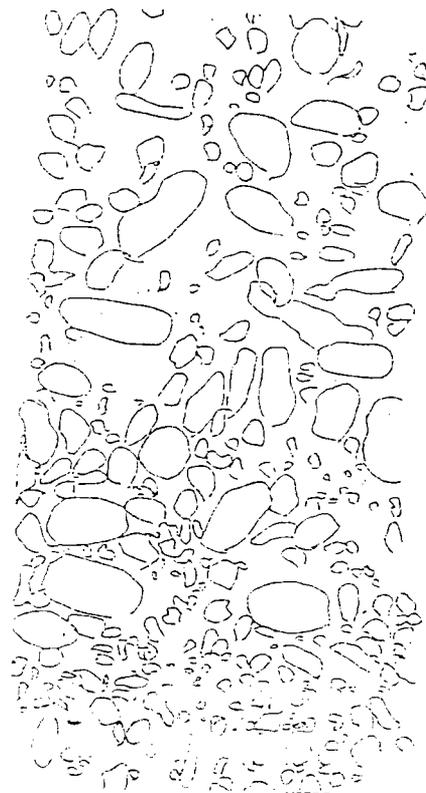


高雄港中州碼頭潮汐帶

圖 6-3 高雄港結構物鑽心試體骨材描繪圖

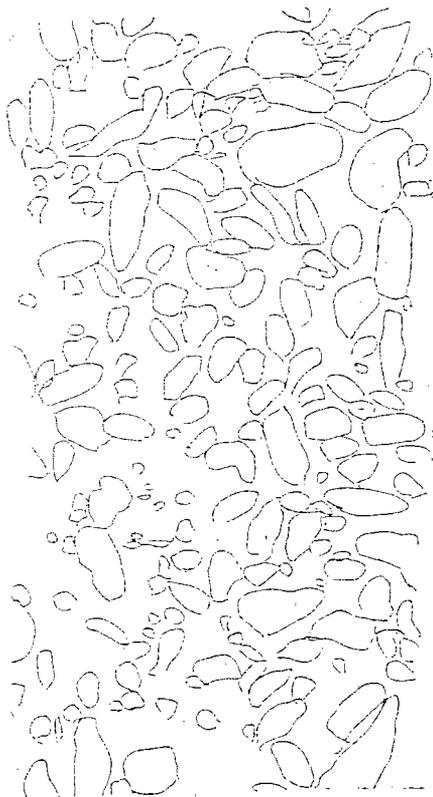


花蓮港2號倉庫北面牆

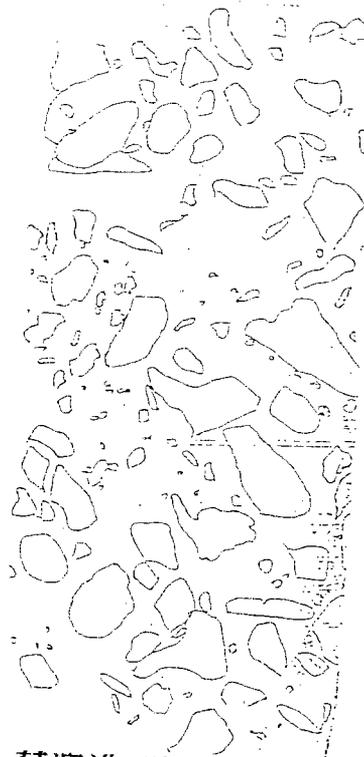


花蓮港2號倉庫東面牆

圖 6-4 花蓮港結構物鑽心試體骨材描繪圖



花蓮港4號碼頭飛沫帶



蘇澳港9號碼頭飛沫帶



蘇澳港10號碼頭飛沫帶



蘇澳港10號碼頭潮汐帶

圖 6-5 蘇澳港結構物鑽心試體骨材描繪圖

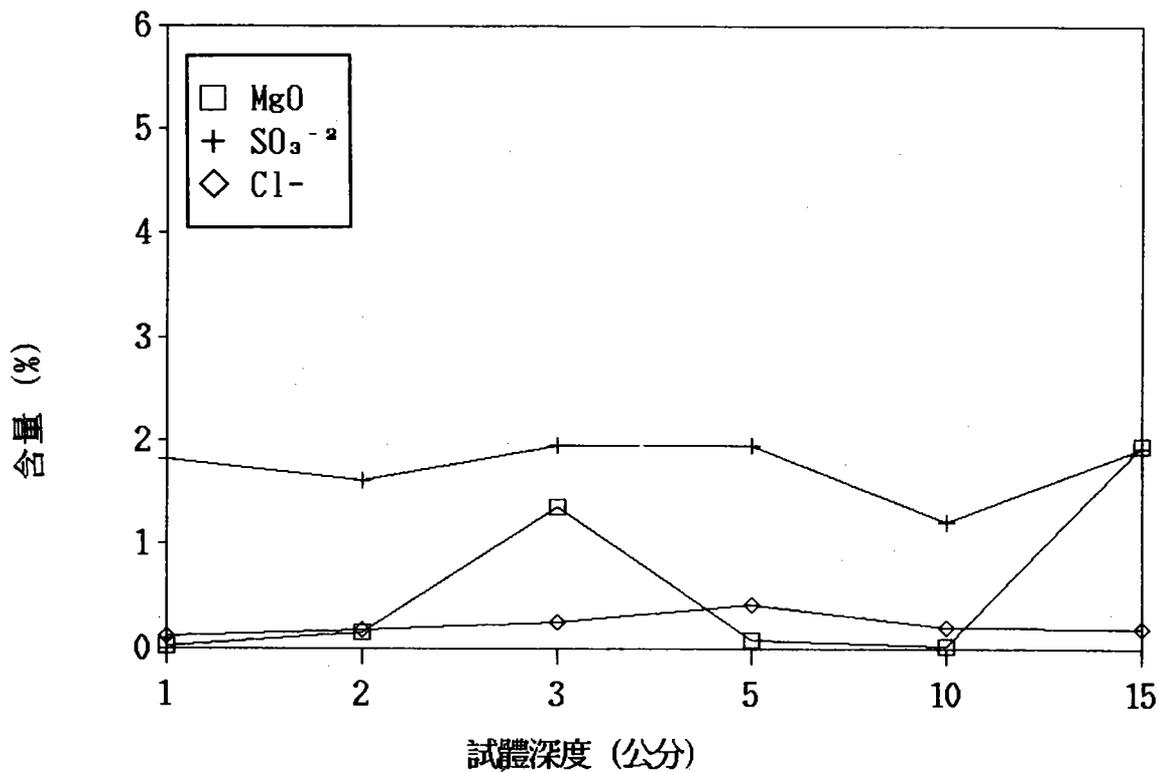


圖 6-6 基隆港15號倉庫鑽心試體化學成份含量與深度關係

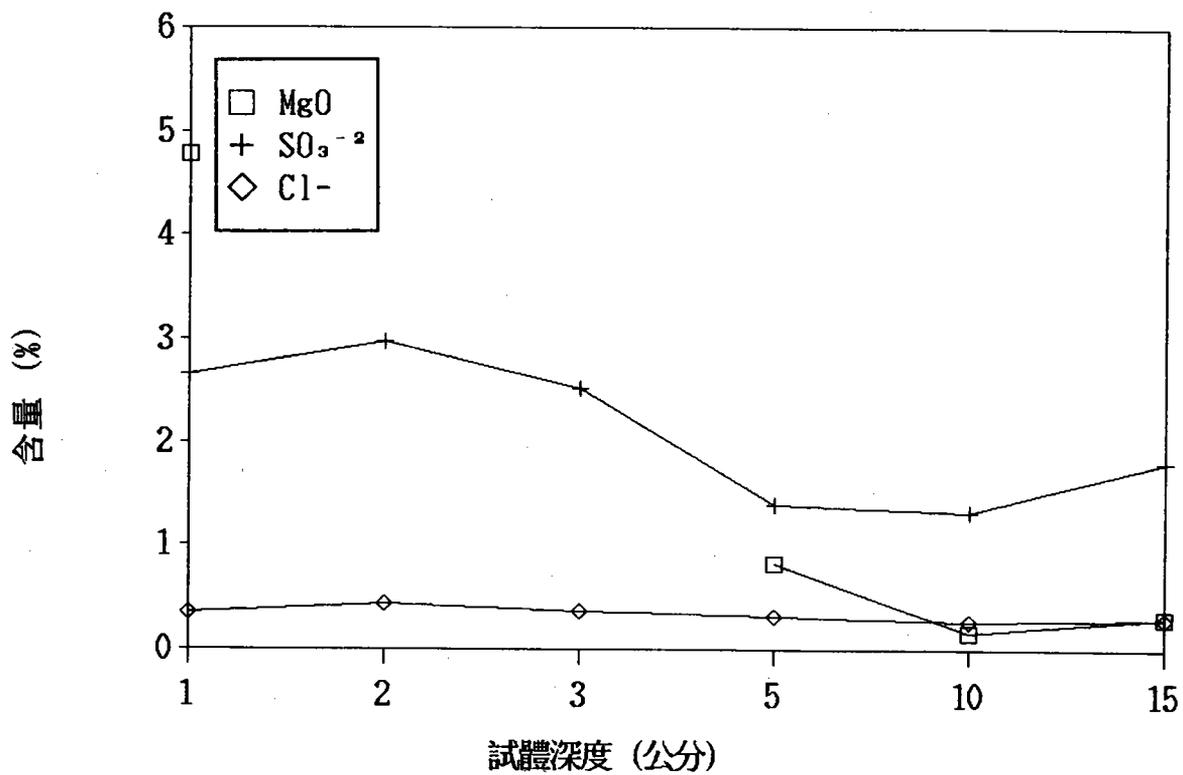


圖 6-7 基隆港30號倉庫鑽心試體化學成份含量與深度關係

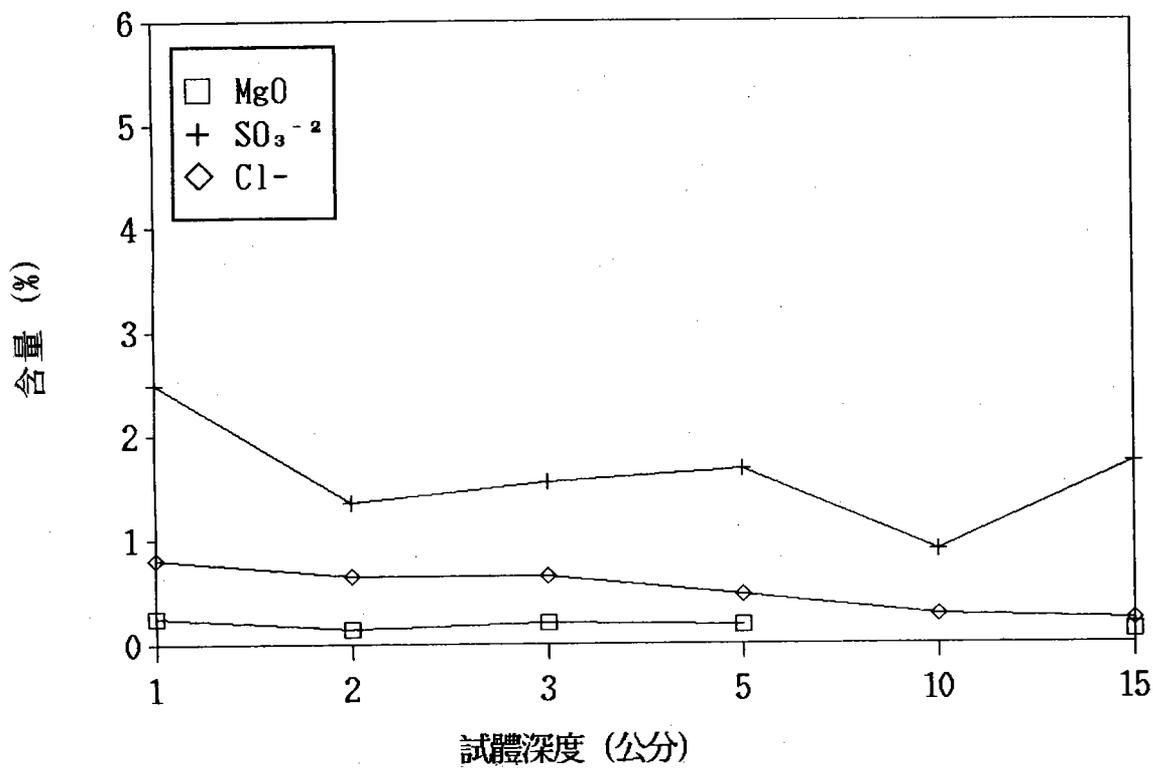


圖 6-8 基隆港西15號碼頭飛沫帶鑽心試體化學成份含量與深度關係

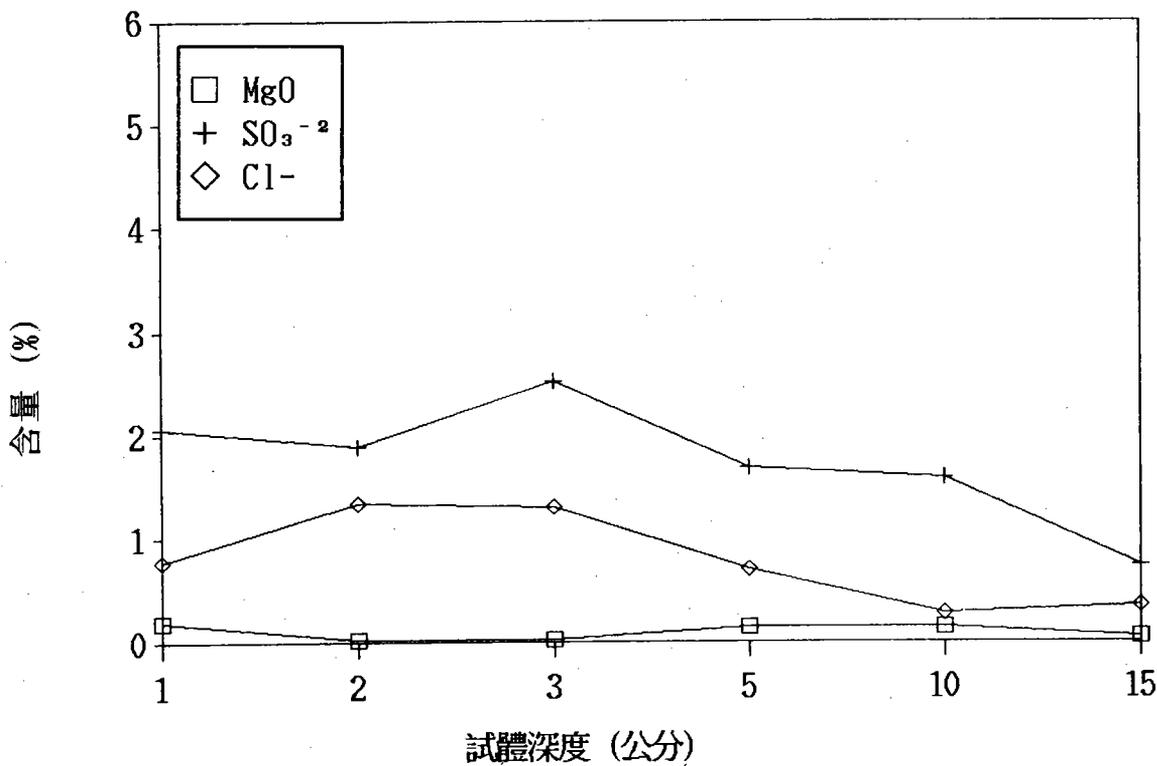


圖 6-9 基隆港西15號碼頭潮汐帶鑽心試體化學成份含量與深度關係

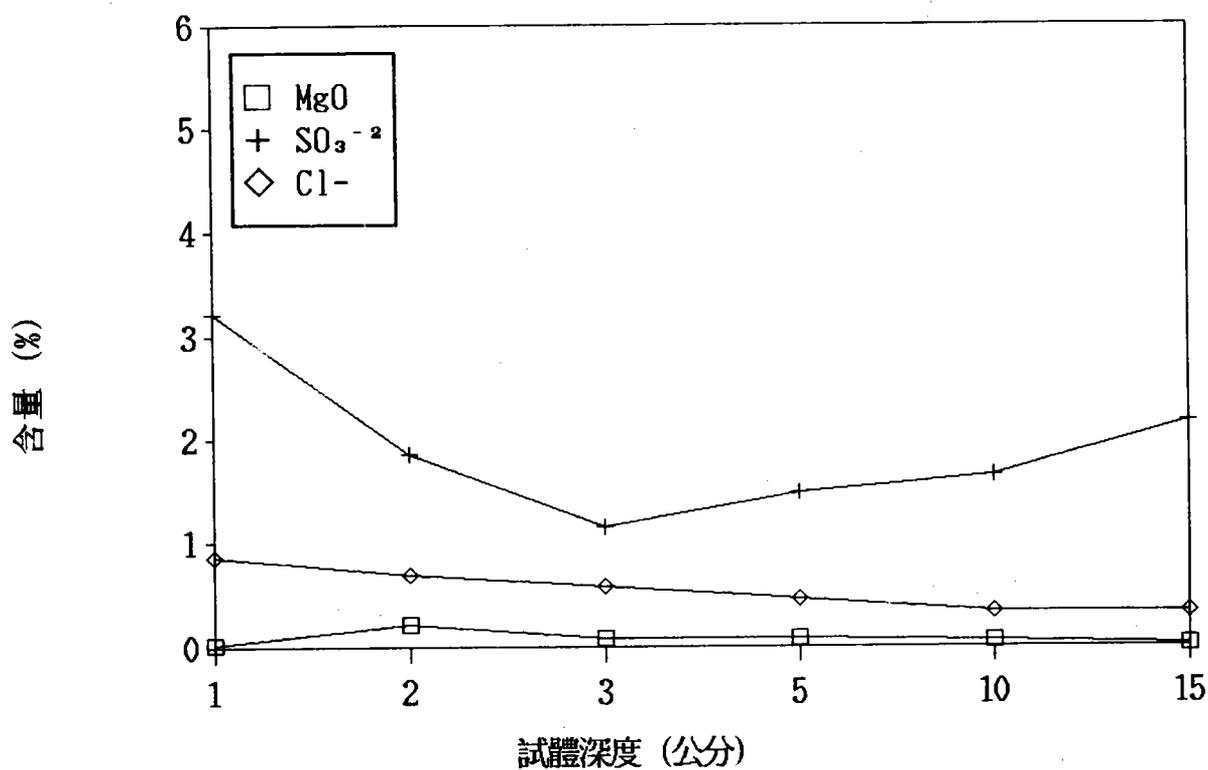


圖 6-10 基隆港東2號碼頭飛沫帶鑽心試體化學成份含量與深度關係

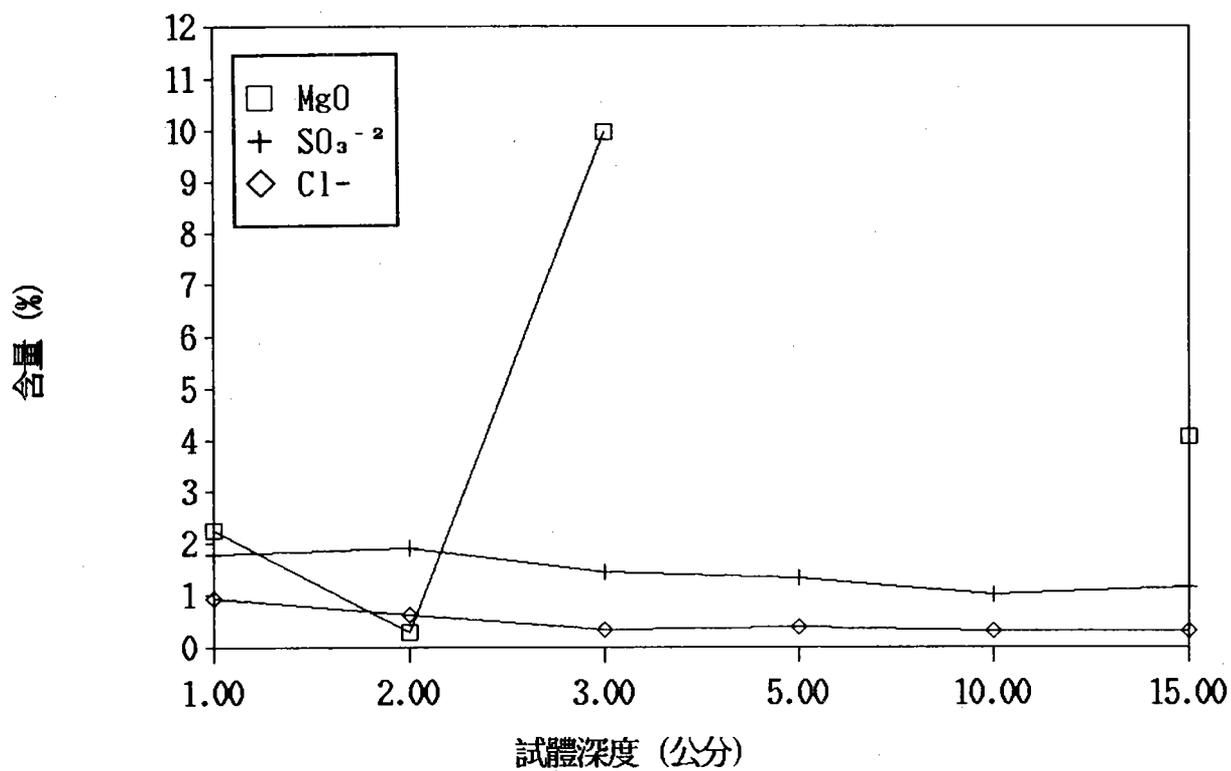


圖 6-11 基隆港東2號碼頭潮汐帶鑽心試體化學成份含量與深度關係

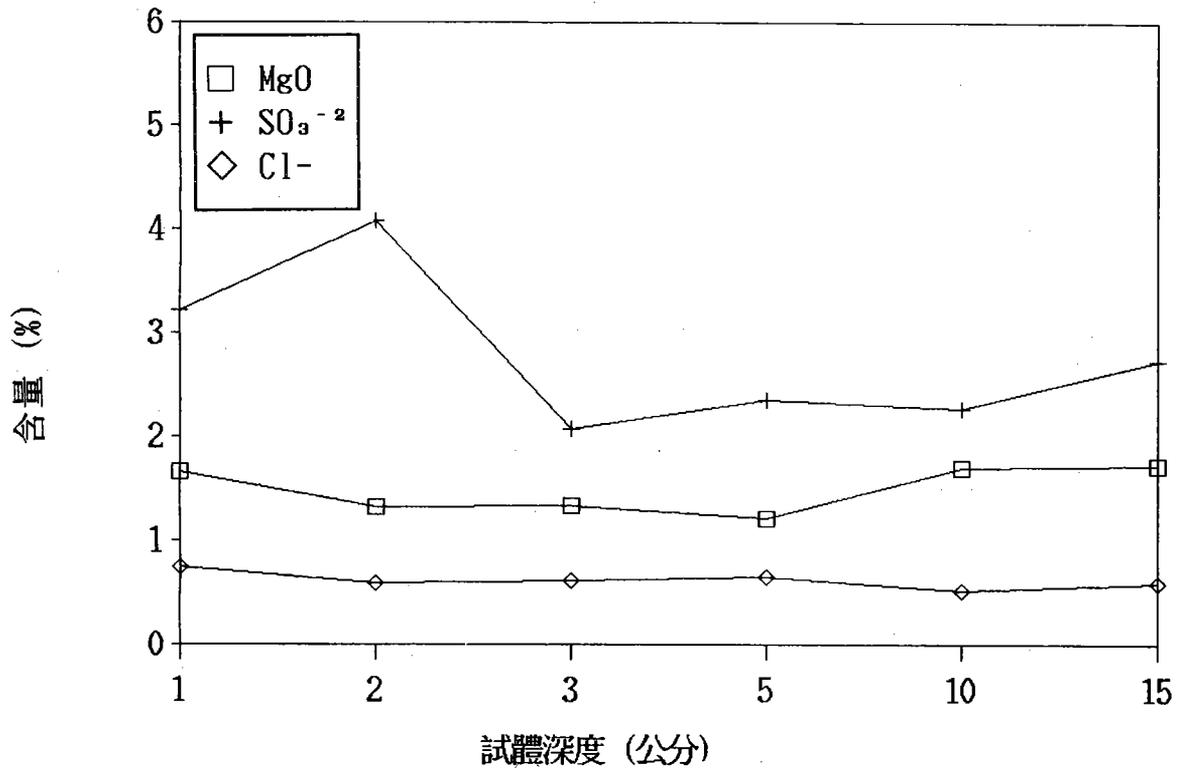


圖 6-12 台中港11號倉庫鑽心試體化學成份含量與深度關係

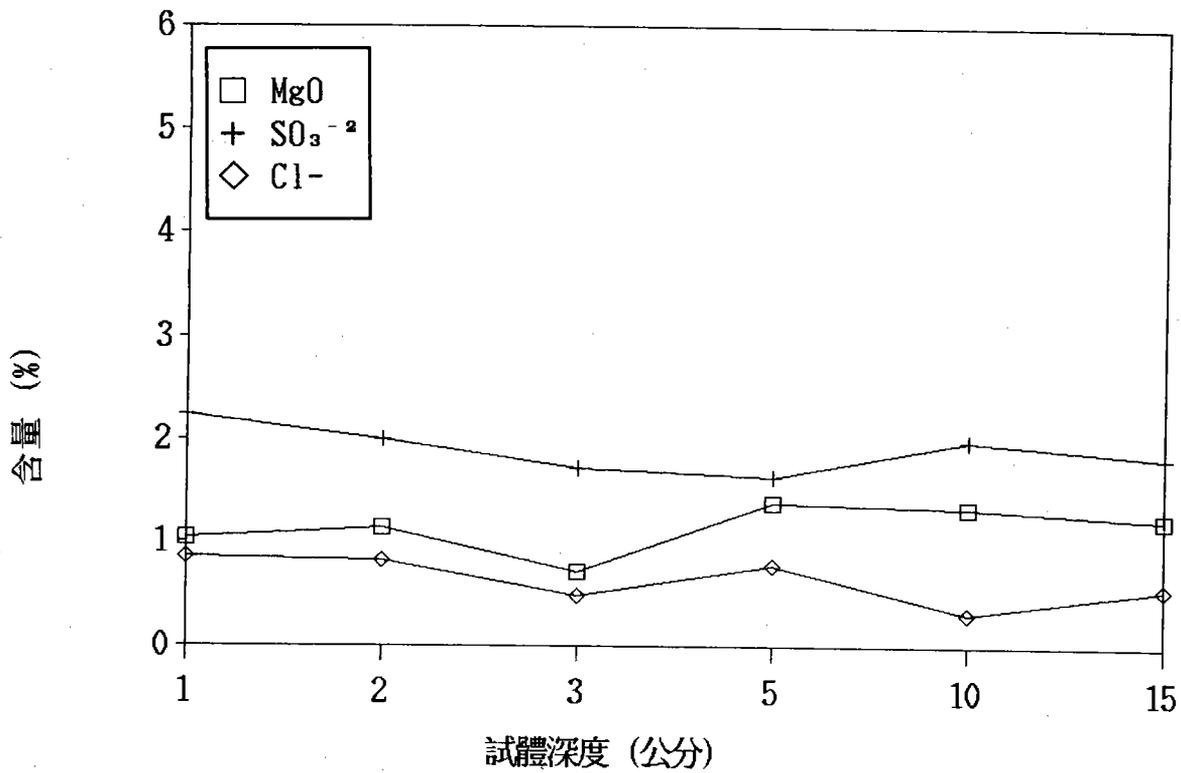


圖 6-13 台中港23號碼頭飛沫帶鑽心試體化學成份含量與深度關係

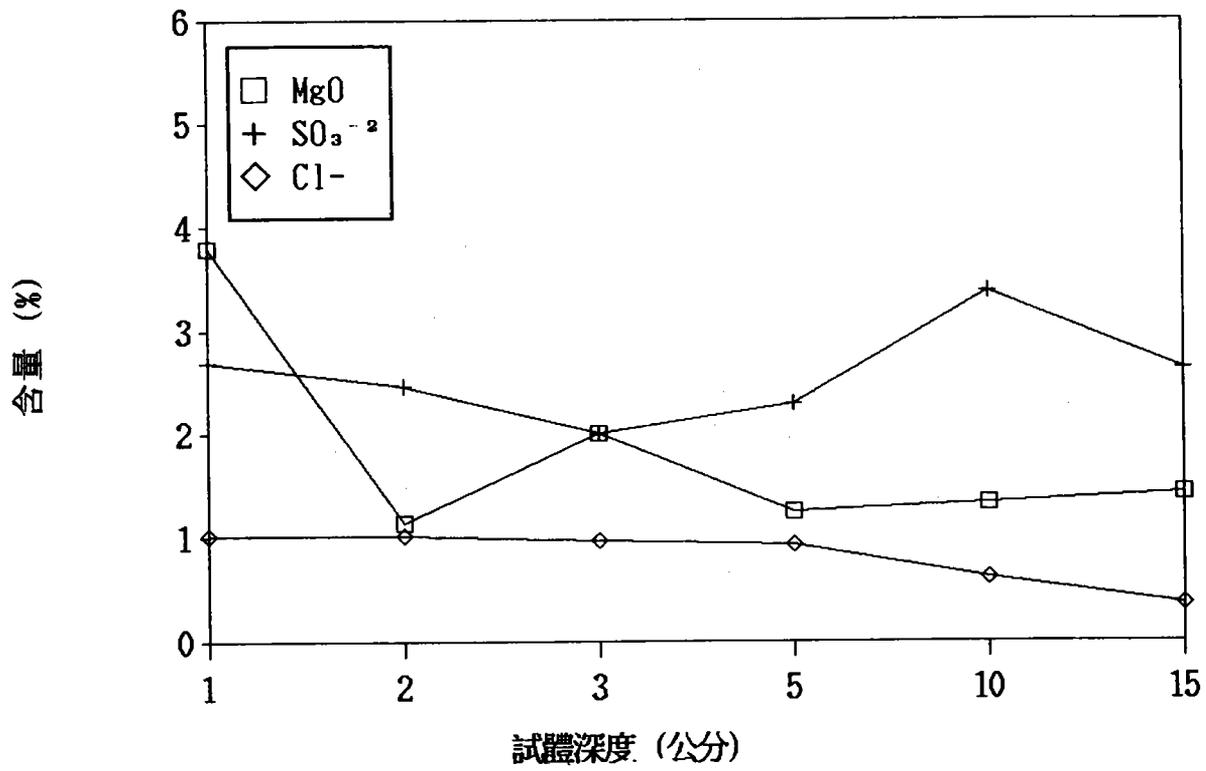


圖 6-14 台中港23號碼頭潮汐帶鑽心試體化學成份含量與深度關係

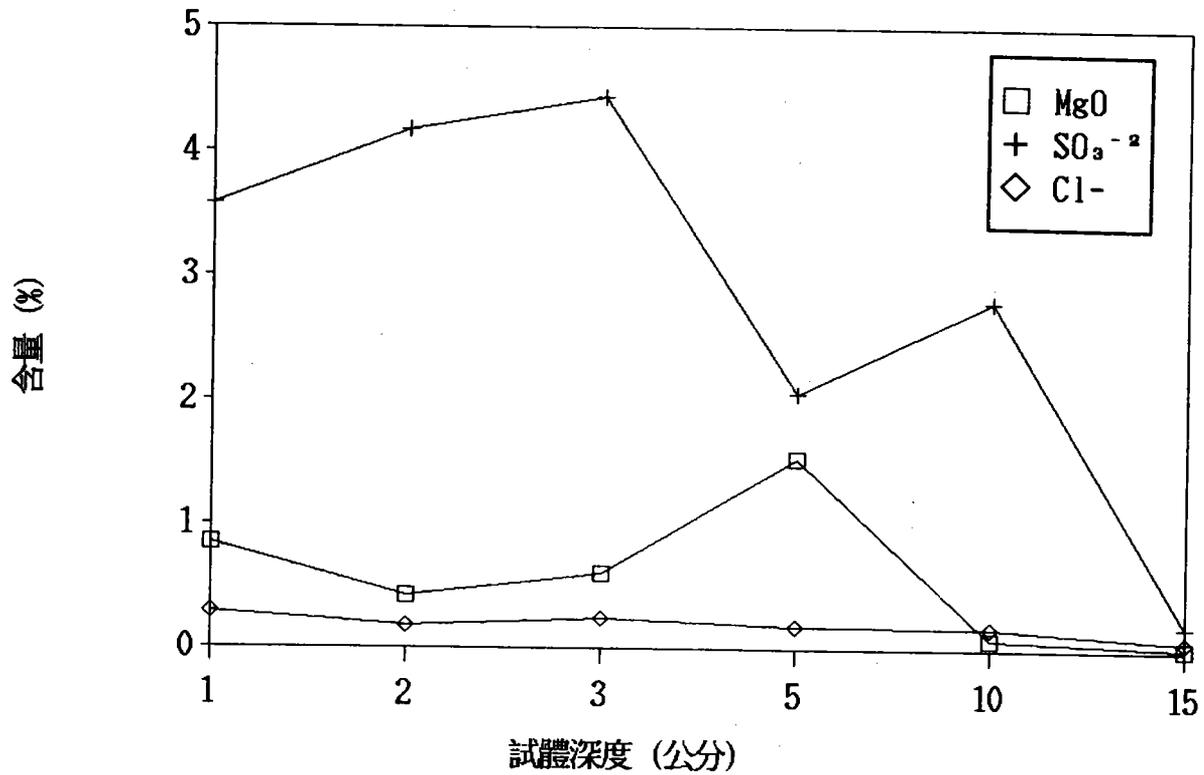


圖 6-15 高雄港3號倉庫鑽心試體化學成份含量與深度關係

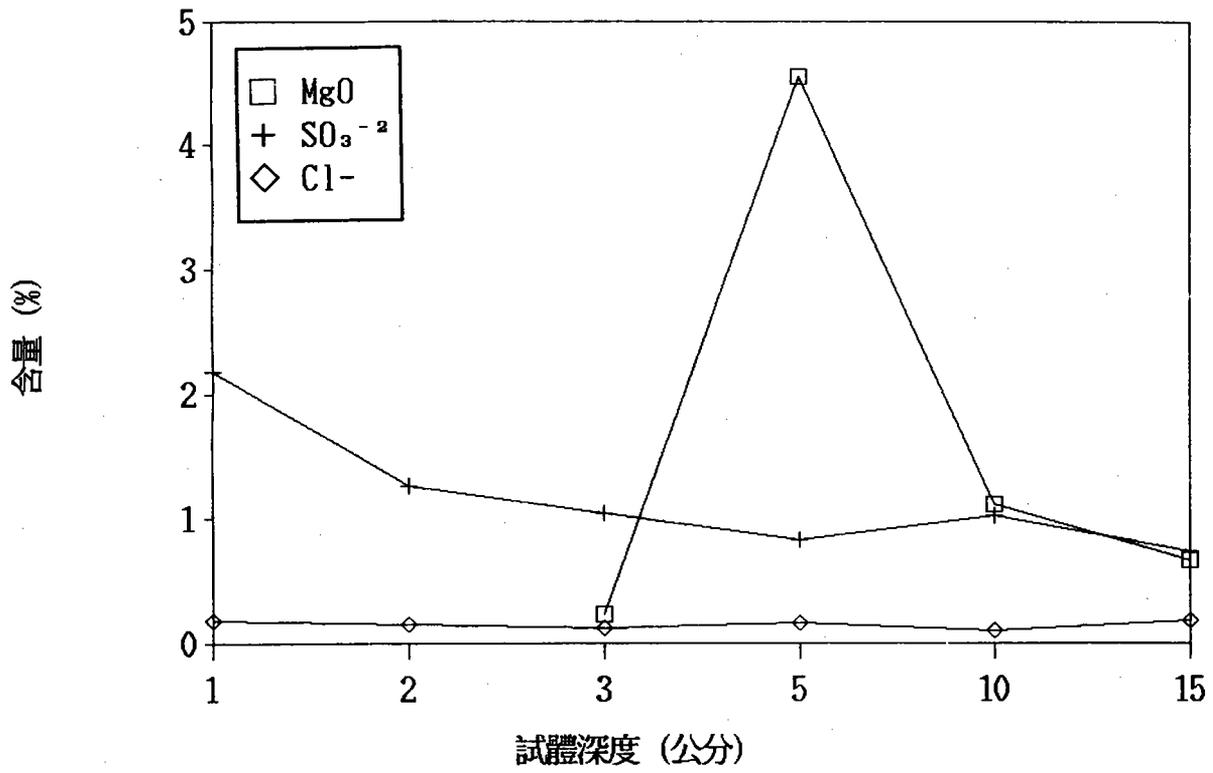


圖 6-16 高雄港10號倉庫鑽心試體化學成份含量與深度關係

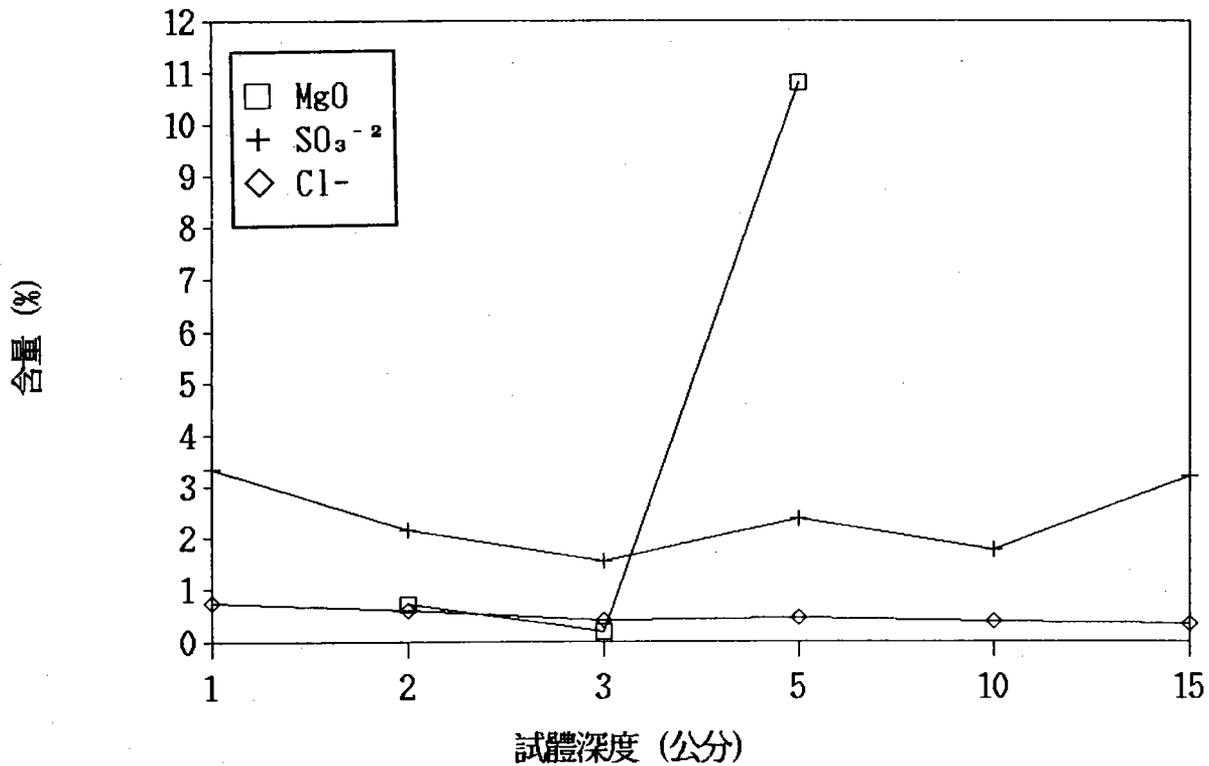


圖 6-17 高雄港38號碼頭飛沫帶鑽心試體化學成份含量與深度關係

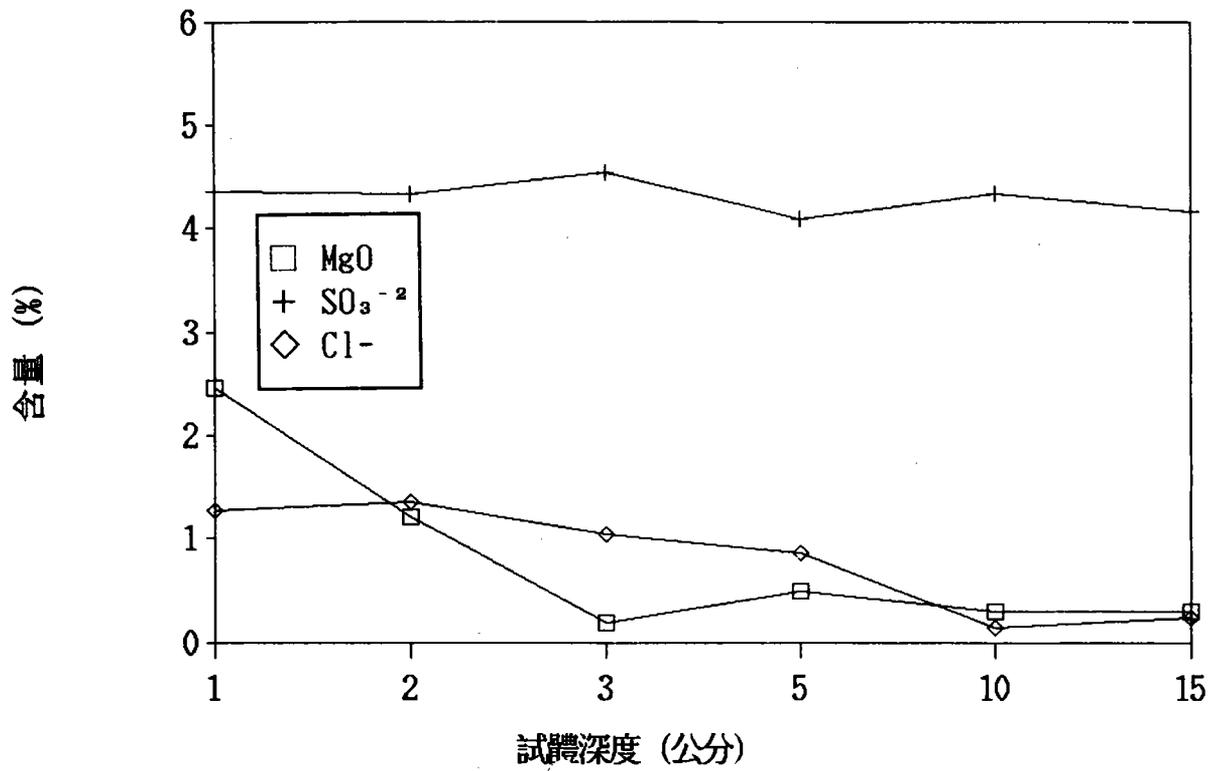


圖 6-18 高雄港38號碼頭潮汐帶鑽心試體化學成份含量與深度關係

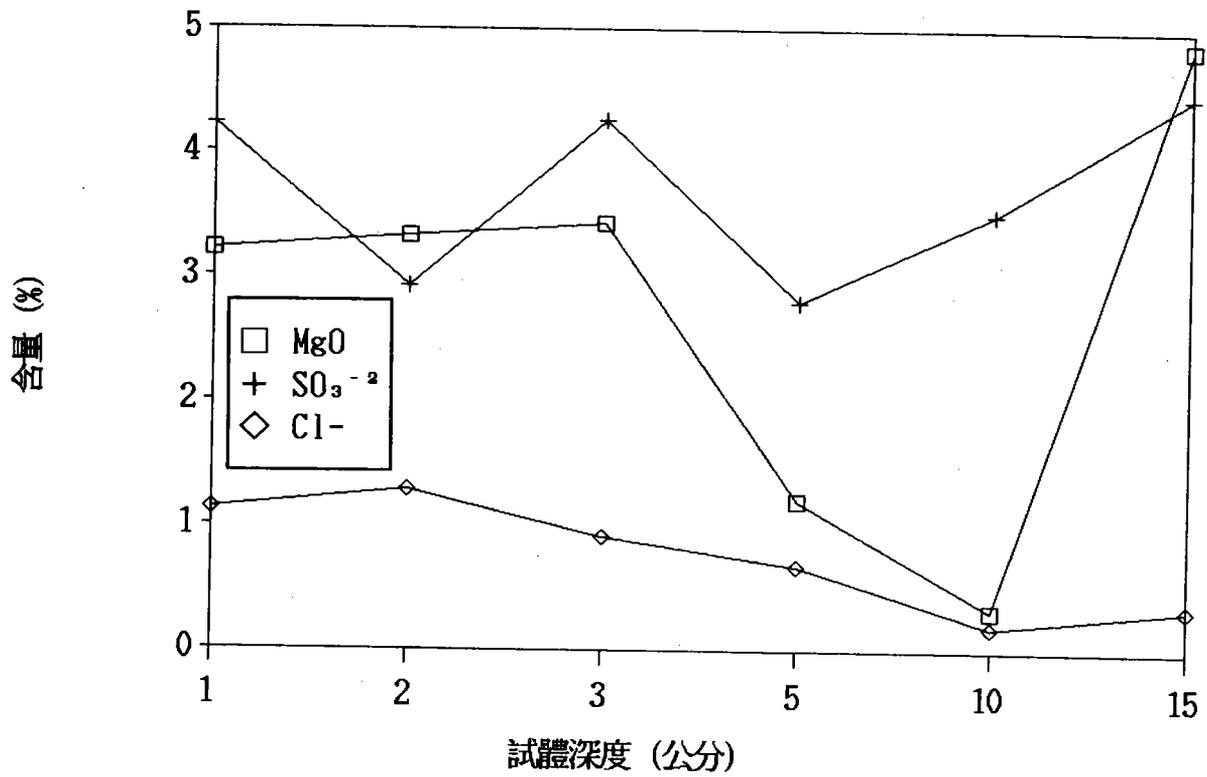


圖 6-19 高雄港中州碼頭飛沫帶鑽心試體化學成份含量與深度關係

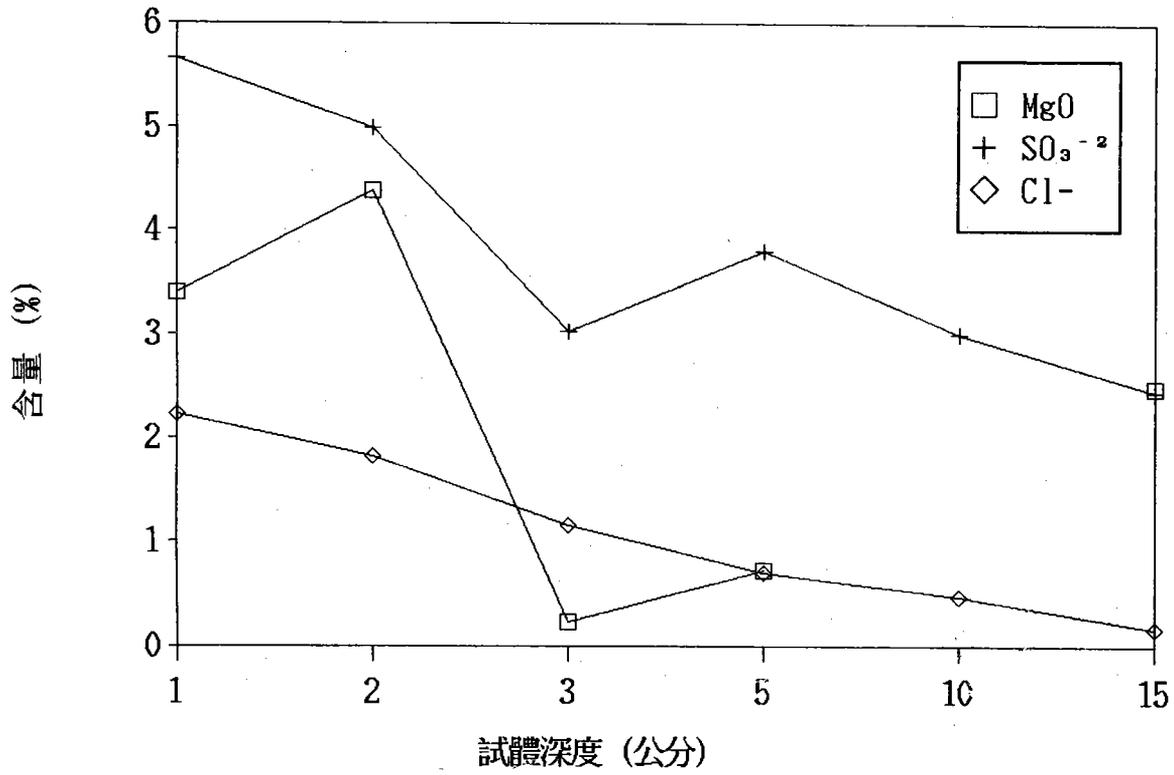


圖 6-20 高雄港中州碼頭潮汐帶鑽心試體化學成份含量與深度關係

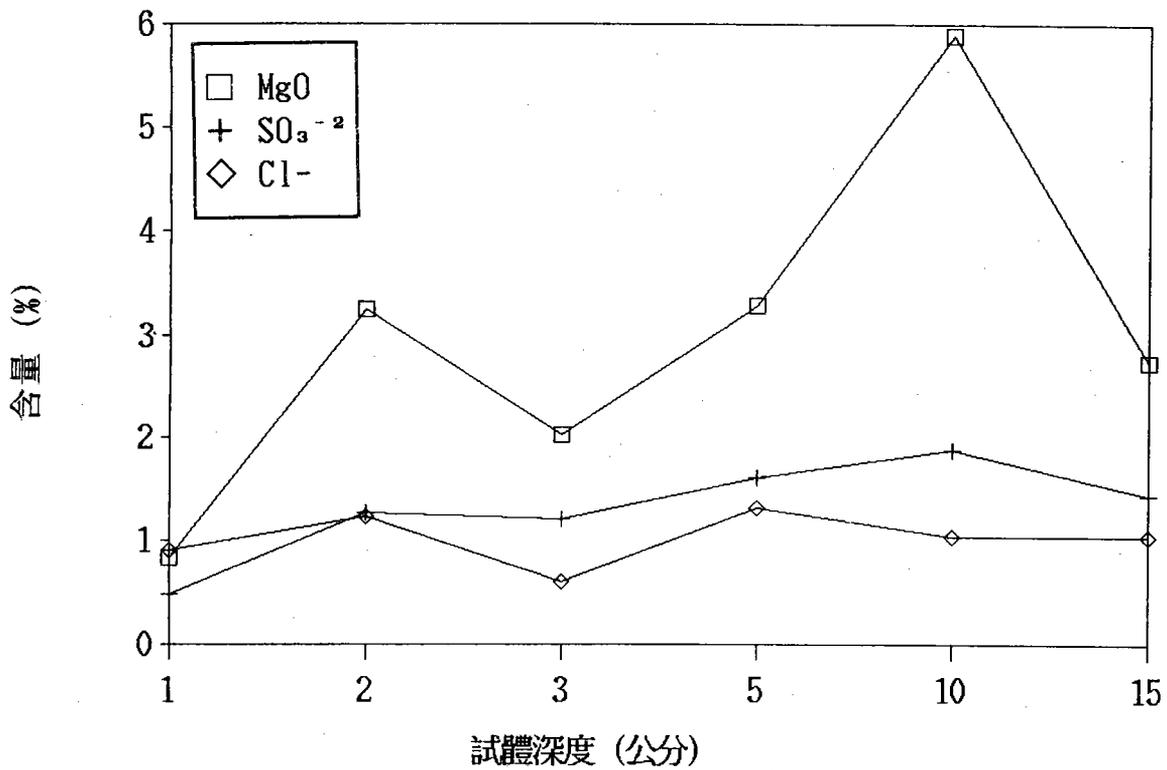


圖 6-21 花蓮港2號倉庫北面牆鑽心試體化學成份含量與深度關係

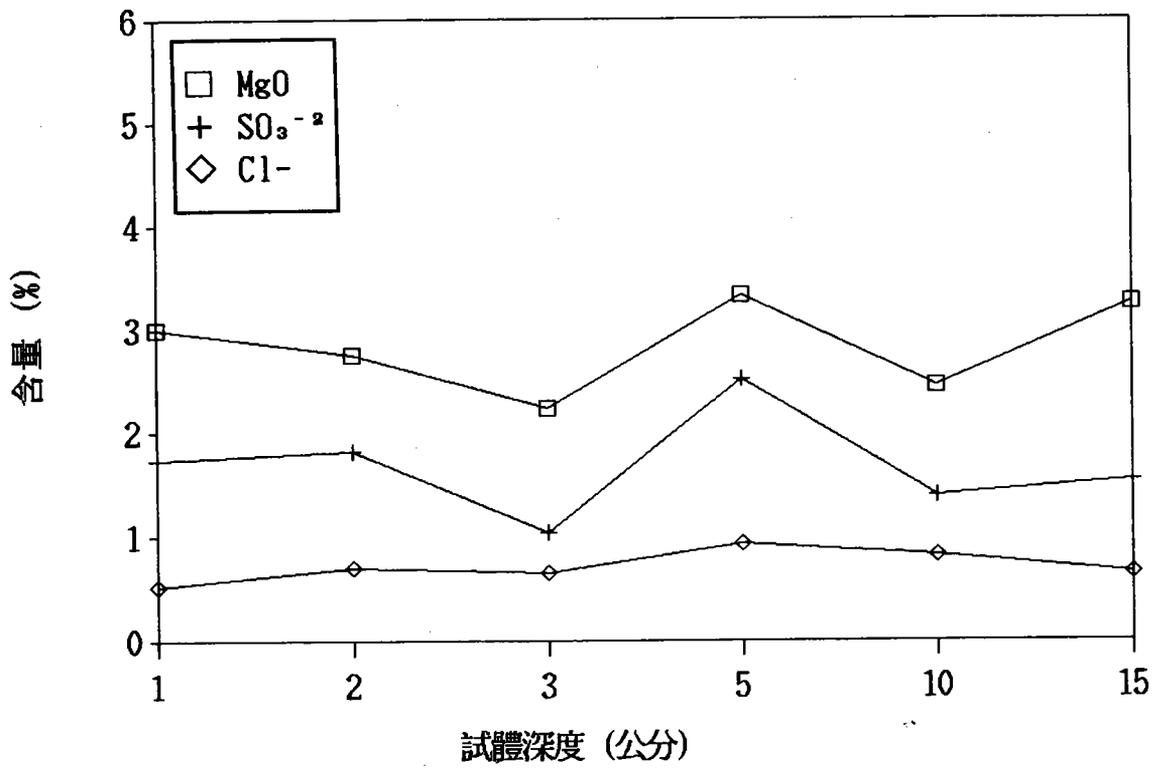


圖 6-22 花蓮港2號倉庫東面牆鑽心試體化學成份含量與深度關係

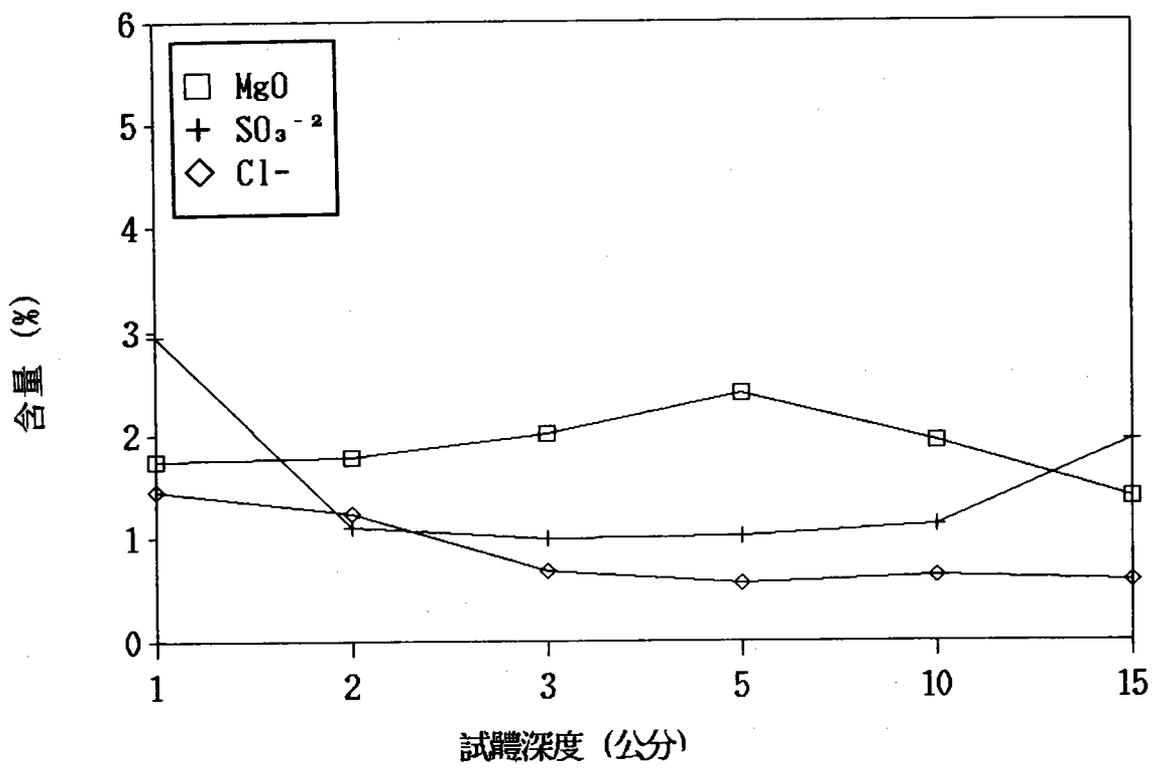


圖 6-23 花蓮港4號碼頭飛沫帶鑽心試體化學成份含量與深度關係

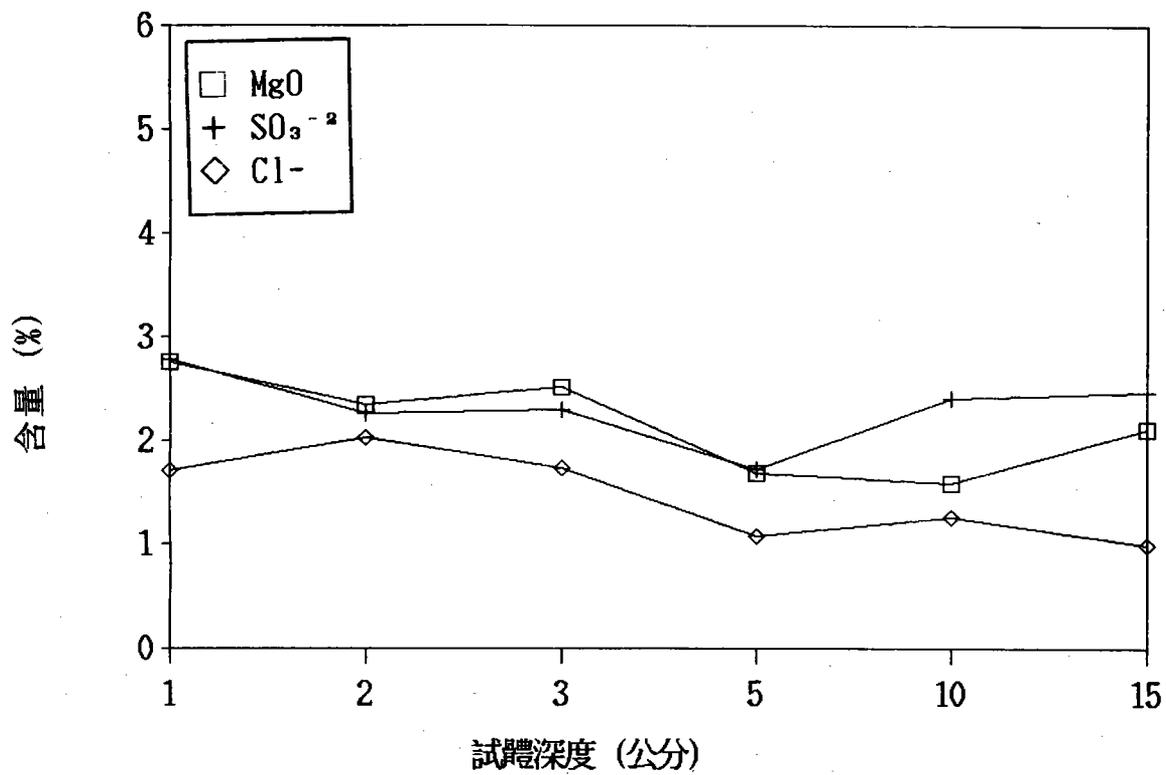


圖 6-24 蘇澳港9號碼頭飛沫帶鑽心試體化學成份含量與深度關係

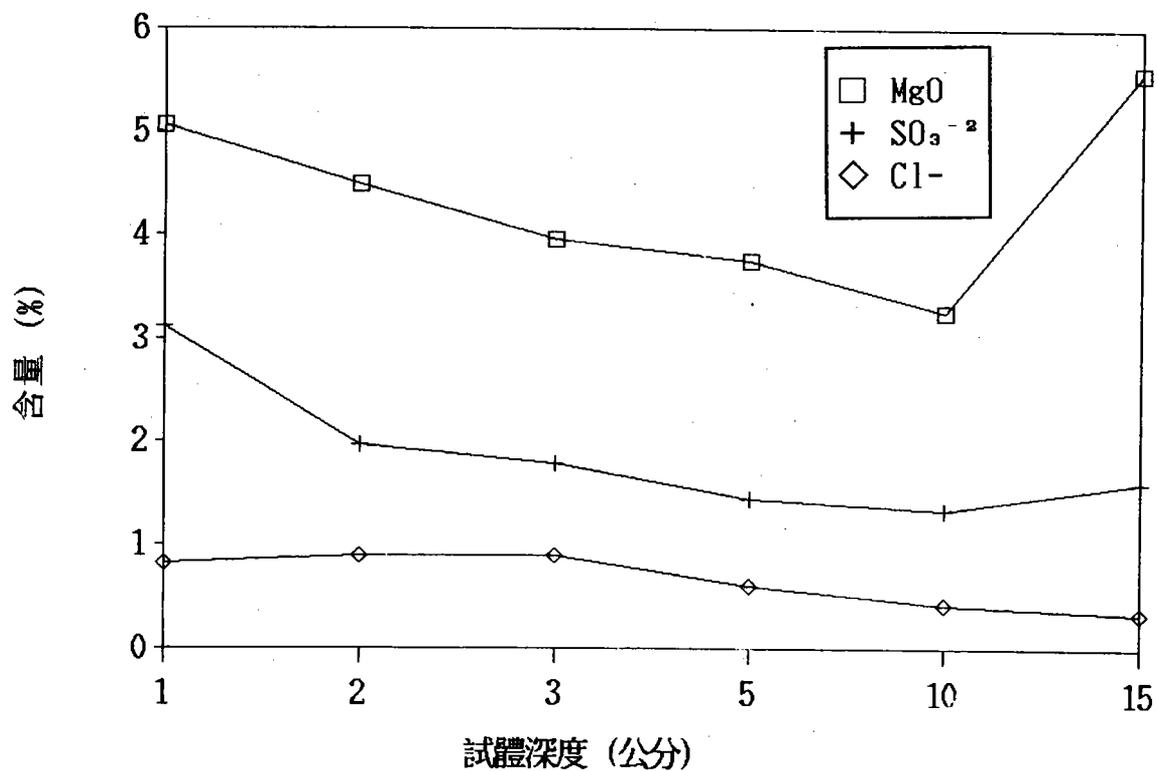


圖 6-25 蘇澳港10號碼頭飛沫帶鑽心試體化學成份含量與深度關係

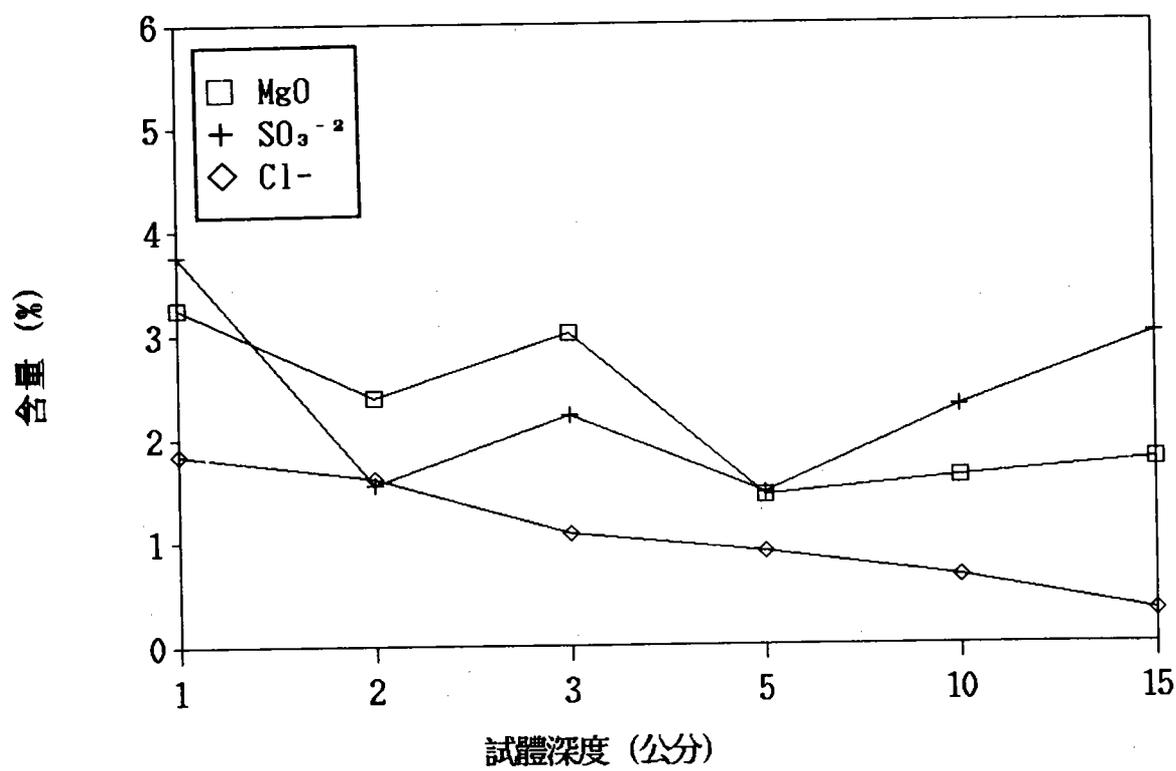


圖 6-26 蘇澳港10號碼頭潮汐帶鑽心試體化學成份含量與深度關係

# 染、曝露試驗

陳桂清\*

## 一、前言

本試驗起自民國76年7月至今(80年6月)已進行四年,為長期持續性之試驗。

混凝土材料長久以來即被公認為一種耐久性極佳之營建材料,因此混凝土材料的劣化腐蝕等現象,在短期間內不易顯現出來,過去此種事實現象不被重視。近年來世界各地已經常發現有關港灣結構物發生腐蝕惡化之實例,諸如1979年美國華盛頓洲 Hood Canal 浮橋因為有嚴重之鋼筋腐蝕現象,因此在經過一個暴風夜晚後即發生下陷現象。日本亦是1984年起對全國的碼頭進行調查,了解港灣結構物腐蝕劣化的情形,影響所至,R.C.結構物腐蝕劣化已是全球各地共同即待改善的問題。因此為瞭解海域現地使用各種混凝土材料之耐久性以及探討其劣化原因,必須進行長期現地曝露試驗。

## 二、曝露試體擺放之範圍

1. 潮汐帶
2. 水中帶
3. 大氣帶

## 三、試驗時間區分

為了有效測量鋼筋發生腐蝕生銹的速率大小,試體曝露期間預計依下列幾個期間進行。

1. 1年 期間

---

\*省交通處港灣技術研究所港工材料組副研究員

2. 2年 期間
3. 3年 期間
4. 5年 期間
5. 10年 期間
6. 15年 期間

#### 四、曝露試體擺放地點

1. 台中港3號碼頭附近(貯木池斜坡上)(潮汐帶)
2. 本所海水循環試驗水槽(潮汐帶,水中帶)  
此試驗水槽(如圖7-1及圖7-2),乃藉由台中港區內之涵管引道,直接抽取台中港區內13、14號碼頭間之海水(水面下5公尺深處),導進試驗水槽中,隨着每天海水潮汐的漲落,水槽相對配合做抽取與排放海水(約每間隔6小時排放一次),使試驗水槽之狀況與實際海水潮汐漲落的情形配合一致。
3. 本所試驗大樓樓頂(大氣帶)

#### 五、試體製作

1. 使用材料:
  - ① 水泥: I, II, V型水泥
  - ② 鋼筋: (1)普通一般省產竹節鋼筋(表面刨光)  
(2)塗覆Epoxy之鋼筋  
(3)鍍鋅鋼筋
  - ③ 摻料: (1)防銹劑  
(2)矽灰(取代水泥用量10%)  
(3)飛灰(取代水泥用量20%)  
(4)爐石(取代水泥用量50%)
  - ④ 骨材: (1)粗骨材(大甲溪河川砂石,最大粒徑3/4")  
(2)細骨材
  - ⑤ 拌合水: 自來水
2. 配比設計:

① 水灰比：0.4, 0.5, 0.7

② 摻料比例：矽灰（10%），飛灰（20%），爐石（50%），防銹劑

③ 坍度：8~10cm

3. 試體製作過程：

① 試體規格：15 $\phi$  × 30cm

② 鋼筋配置：鋼筋埋置於2cm, 4cm, 7cm處共3根

③ 混凝土配比：依據 ACI 211.1-815 規範設計

④ 混凝土之拌合與澆置：依據 ASTM 規範

⑤ 養生狀況：（23 $\pm$ 0.7 $^{\circ}$ C）

(1) 7天齡期

(2) 28天齡期

## 六、試驗室分析項目

1. 鋼筋腐蝕電位值量測
2. 混凝土內氯離子含量
3. 鋼筋保護層厚度對鋼筋生銹之觀測

## 七、工作執行情形

1. 從台中港3號碼頭附近（貯木池碼頭斜坡上）已取回一年期二年期曝露試體，各27個，進行各項分析。
2. 由本所內海水循環水槽內取出各種材料配比之試體，總計120個試體。曝露期間為一年期。進行試體外觀檢視及做各項分析。

## 八、分析結果與討論

1. 擺放於台中港區內之曝露試體（曝露期間一年及兩年：）  
曝露期間為一年及兩年之試體各27個，其試體所採用之材料配比，分別為水灰比0.4、0.5、0.6，使用普通卜特蘭水泥（台泥公司出產之I型水泥）部份試體內並摻有鋼筋防銹劑等摻料，其腐蝕電位值經測量後所得之結果如表7-1及表7-2所示。

從表 7-1 及表 7-2 顯示，普通鋼筋埋置於各種配比材料之試體內，經過一年或二年的曝露後只有少數幾個試體所測得之電位值  $< -350\text{mV}$ ，亦即表示試體內之鋼筋有 95% 之概率有發生腐蝕之情形。經劈裂試體實際觀察後，發現大部份之鋼筋發生銹蝕之位置均集中在試體上下兩端，此處保護層厚度不及 2cm，約 1.5cm，加上試體底部之材質（預鑄固定鋼筋用之水泥模子）與灌製試體之混凝土漿體可能形成二個不同界面（亦即可能在接觸面附近之材質不均勻），因此在接觸面附近產生電位差異造成鋼筋生銹，而其它位置之鋼筋並未有生銹發生。

含 Epoxy 鋼筋之試體劈裂經檢視後，發現鋼筋塗覆之 Epoxy 膜仍然相當完好，並無腐蝕生銹發生。

## 2. 擺放於本所內海水循環水槽內之曝露試體（曝露期間為一年）：

本試驗試體所採用之混凝土材料，包括各型水泥（I、II、V 型）以及數種摻料（諸如：20% 飛灰、10% 矽灰、50% 爐石、防銹劑等），水灰比分別為 0.4、0.5、0.7，經過一年期間的海水反覆浸漬曝露，其鋼筋腐蝕電位值量測之結果如表 7-3 至表 7-6 所示。

### 試驗結果檢討：

- (1) 從表 7-1 至表 7-6 中顯示，試體內埋置之 Epoxy 鋼筋仍然完好，沒有生銹發生。由於 Epoxy（環氧樹脂）隔絕了鋼筋與混凝土的接觸，因此沒有腐蝕電位值。只要 Epoxy 膜完好，海水中  $\text{Cl}^-$  則無法侵入致使鋼筋腐蝕生銹。
- (2) 試體內埋置之鍍鋅鋼筋，因為多了一層保護膜（鍍鋅），猶如做了陰極防蝕，因此短期間內亦不容易發生銹蝕。
- (3) 試體內添加有爐石、飛灰、矽灰等試體內之普通鋼筋，大部份都尚未發現生銹現象，但是仍然有少數試體內之鋼筋已發現有生銹情形，生銹位置仍然集中於試體上下兩端，以及保護層 2cm 處，這些試體腐蝕情形如圖 7-3 所示。

## 九、結 論：

1. 本試驗之試體其曝露期間最長者僅兩年，大部份均為一年期。由於曝露時間尚短，因此大部份之試體尚未受到嚴重的侵蝕。
2. 部份試體內之鋼筋發生銹蝕，且集中於試體上下兩端（保護層不及2cm），可能原因是該處附近之混凝土材質不均勻，造成電位差異，因而造成該處局部生銹。
3. 保護層厚度愈小，鋼筋愈快且愈容易受到侵蝕。
4. 水灰比愈高者，試體之鋼筋有愈容易發生銹蝕之趨勢。

## 十、參考文獻：

1. K.M.Book and J. A Still well, "Exposure Tests on Concrete for Offshore Structure", Wimpey Lab. Ltd, Hayes, Middlesex UB4 OLS,UK.
2. "Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction", 1883 The Society of Chemical Industry Ellis Horwood ,Limited British.
3. "Exposure Tests on Reinforced Concrete in Seawater" Wimpey Lab. Limited, Beaconsfield Road, Hayes, Middlesex UB4 OLS, UK.

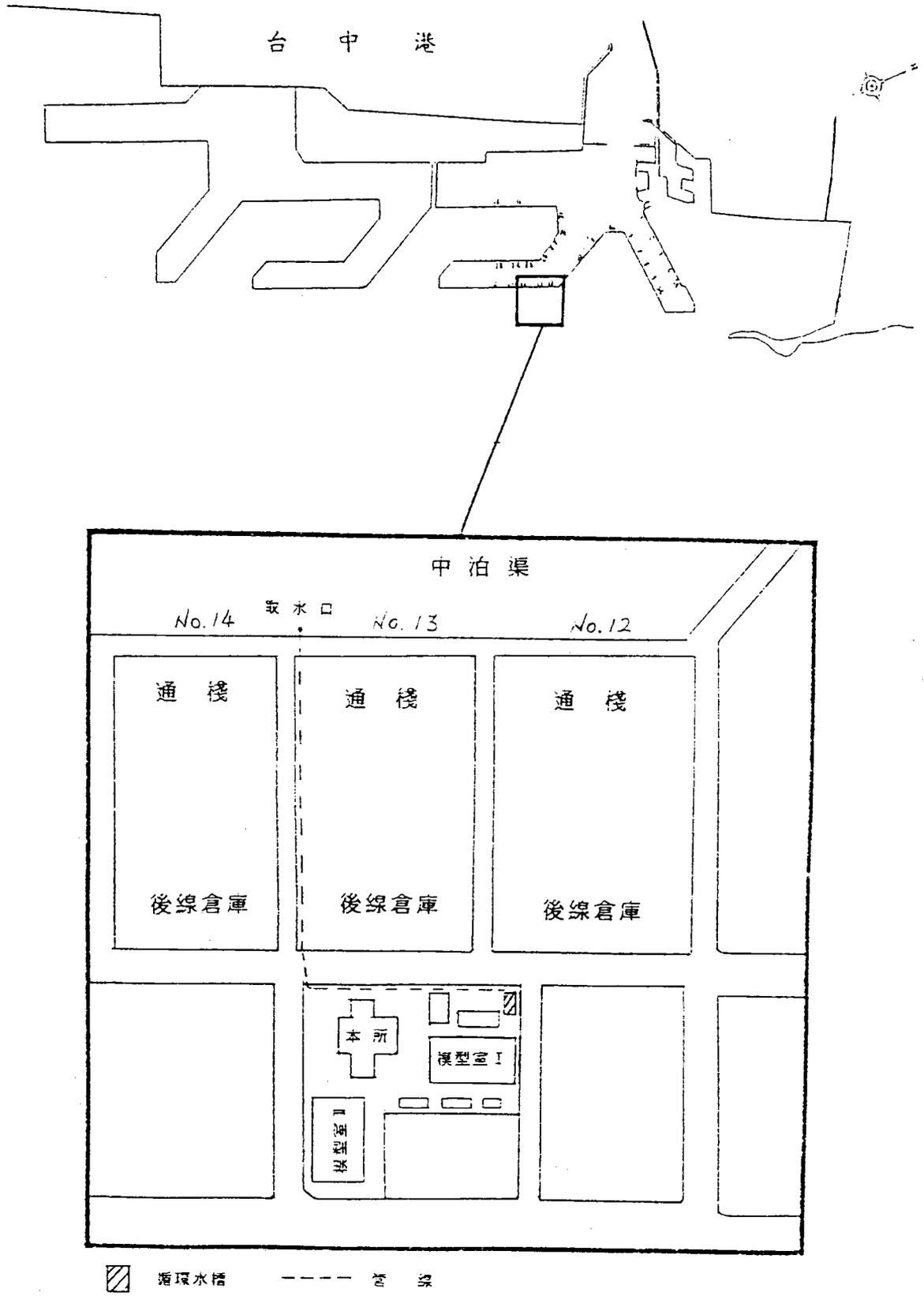
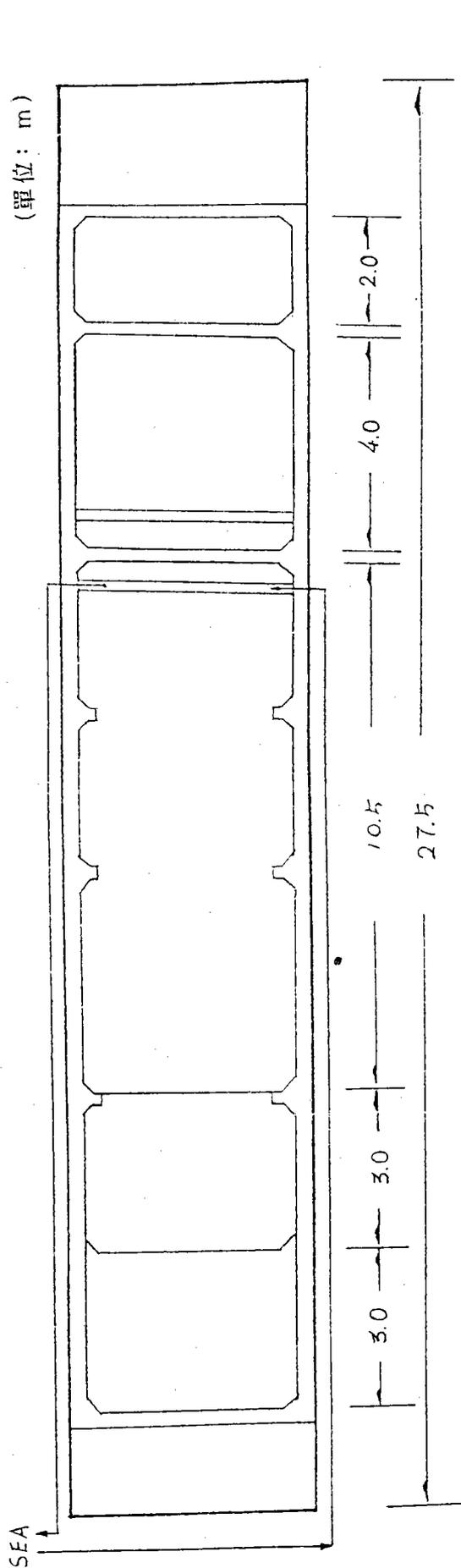


圖 7-1 海水循環水槽之平面配置



7-7

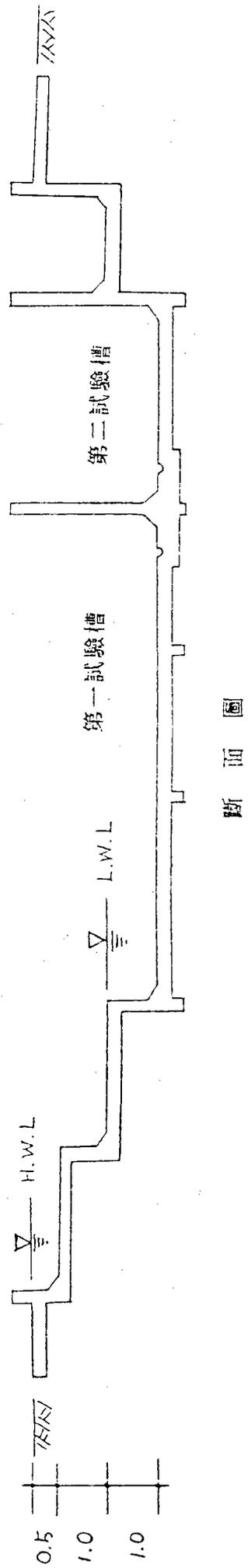
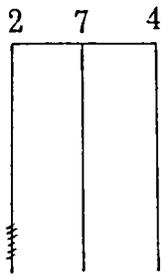


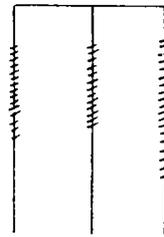
圖 7-2 海水循環水槽之平面配置與斷面圖



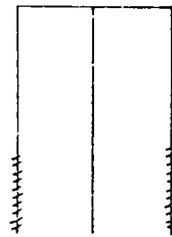
C 4.1水(R)



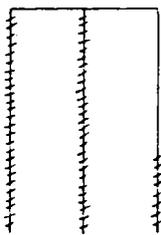
M7.1水(R)



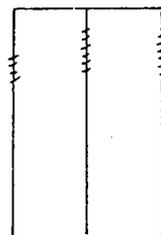
C7.1水(B)



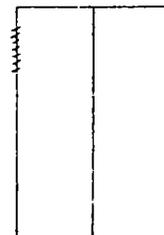
C7.1水(B)



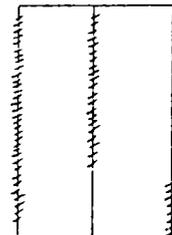
L 7.1 水(B)



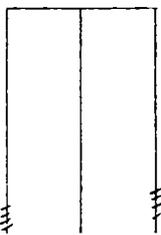
C4.1沙(R)



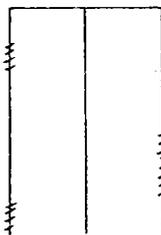
H7.1沙(R)



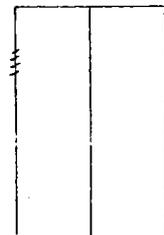
L7.1沙(R)



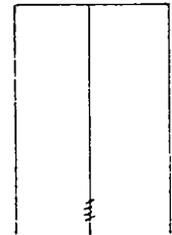
M 7.1 沙(R)



C4.1沙(B)



F5.1沙(B)



H4.1沙(B)

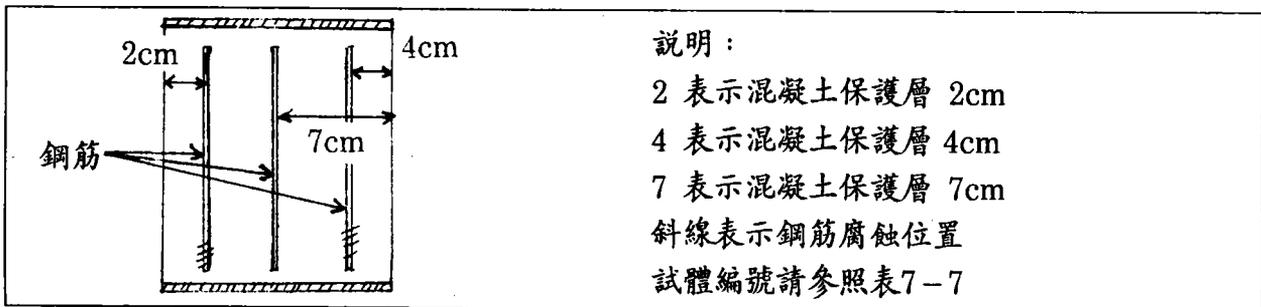


圖7-3 試體內鋼筋銹蝕相關位置簡示圖

表 7-1 一年期曝露試體腐蝕電位分析結果 ( 潮汐帶 )

試體編號	使用材料	水灰比	保護層厚度 (cm)	腐蝕電位值 (mV)	鋼筋生銹狀況	備註
119	I 型 + 普通鋼筋	0.4	2cm 4cm 7cm	-310 -310 -310	無 無 無	
120	I 型 + 普通鋼筋	0.4	2cm 4cm 7cm	-520 -600 -600	距底部處輕微生銹 距底部處輕微生銹 距底部處輕微生銹	試體外表有部份蜂窩
121	I 型 + 普通鋼筋	0.4	2cm 4cm 7cm	-330 -310 -330	無 無 無	
125	I 型 + Epoxy 鋼筋	0.4	2cm 4cm 7cm	—	無	
126	I 型 + Epoxy 鋼筋	0.4	2cm 4cm 7cm	—	無	
127	I 型 + Epoxy 鋼筋	0.4	2cm 4cm 7cm	—	無	
131	I 型 + 防銹劑 + 普通鋼筋	0.4	2cm 4cm 7cm	-470 -290 -340	距底部處輕微生銹 無 無	試體外表有部份蜂窩
132	I 型 + 防銹劑 + 普通鋼筋	0.4	2cm 4cm 7cm	-360 -490 -400	無 距底部處輕微生銹 無	試體外表有部份蜂窩
133	I 型 + 防銹劑 + 普通鋼筋	0.4	2cm 4cm 7cm	-510 -490 -280	距底部處輕微生銹 無 無	試體表有部份蜂窩
137	I 型 + 普通鋼筋	0.5	2cm 4cm 7cm	-370 -400 -410	無 無 無	
138	I 型 + 普通鋼筋	0.5	2cm 4cm 7cm	-490 -510 -450	距底部處輕微生銹 無 無	
139	I 型 + 普通鋼筋	0.5	2cm 4cm 7cm	-530 -330 -360	無 無 無	
143	I 型 + Epoxy 鋼筋	0.5	2cm 4cm 7cm	—	無 無 無	
144	I 型 + Epoxy 鋼筋	0.5	2cm 4cm 7cm	—	無 無 無	
145	I 型 + Epoxy 鋼筋	0.5	2cm 4cm 7cm	—	無 無 無	

表 7-1 一年期曝露試體腐蝕電位分析結果 ( 潮汐帶 ) ( 續 )

試體編號	使用材料	水灰比	保護層厚度 (CM)	腐蝕電位值 (MV)	鋼筋生銹狀況	備註
149	I 型 + 防銹劑 + 普通鋼筋	0.5	2cm	-450	距底部處輕微生銹	
			4cm	-330	無	
			7cm	-380	無	
150	I 型 + 防銹劑 + 普通鋼筋	0.5	2cm	-400	距底部處輕微生銹	
			4cm	-380	無	
			7cm	-290	無	
151	I 型 + 防銹劑 + 普通鋼筋	0.5	2cm	-600	距底部處生銹嚴重	
			4cm	-400	距底部處生銹嚴重	
			7cm	-390	無	
155	I 型 + 普通鋼筋	0.6	2cm	-530	距底部處輕微生銹	
			4cm	-490	距底部處輕微生銹	
			7cm	-570	距底部處生銹嚴重	
156	I 型 + 普通鋼筋	0.6	2cm	-570	距底部處局部生銹	試體外表有 部份蜂窩
			4cm	-530	距底部處局部生銹	
			7cm	-550	距底部處局部生銹	
157	I 型 + 普通鋼筋	0.6	2cm	-600	局部生銹	試體外表有 部份蜂窩
			4cm	-560	距底部處局部生銹	
			7cm	-610	距底部處局部生銹	
161	I 型 + Epoxy 鋼筋	0.6	2cm	—	無	
			4cm			
			7cm			
162	I 型 + Epoxy 鋼筋	0.6	2cm	—	無	
			4cm			
			7cm			
163	I 型 + Epoxy 鋼筋	0.6	2cm	—	無	
			4cm			
			7cm			
167	I 型 + 防銹劑 + 普通鋼筋	0.6	2cm	-490	距底部處輕微生銹	
			4cm	-510	距底部處輕微生銹	
			7cm	-540	距底部處輕微生銹	
168	I 型 + 防銹劑 + 普通鋼筋	0.6	2cm	-600	生銹嚴重	試體外表有 部份蜂窩
			4cm	-550	距底部處局部生銹	
			7cm	-530	距底部處局部生銹	
169	I 型 + 防銹劑 + 普通鋼筋	0.6	2cm	-580	距底部處局部生銹	
			4cm	-530	距底部處局部生銹	
			7cm	-490	距底部處局部生銹	

表 7-2 二年期曝露試體腐蝕電位分析結果 ( 潮汐帶 )

試體編號	使用材料	水灰比	保護層厚度 ( cm )	腐蝕電位 ( mV )	鋼筋生銹狀況	備註
059	I + 普通鋼筋	0.4	2	-350	無	
			4	-330		
			7	-308		
060	"	0.4	2	-320	無	
			4	-310		
			7	-306		
064	"	0.4	2	-365	無	
			4	-340		
			7	-320		
074	I + Epoxy 鋼筋	0.4	2	—	無	
			4			
			7			
075	I + Epoxy 鋼筋	0.4	2	—	無	
			4			
			7			
076	I + Epoxy 鋼筋	0.4	2	—	無	
			4			
			7			
068	I + 防銹劑 + 普通鋼筋	0.4	2	-340	底部輕微生銹	
			4	-380		
			7	-382		
069	I + 防銹劑 + 普通鋼筋	0.4	2	-293	無	
			4	-323		
			7	-302		
070	I + 防銹劑 + 普通鋼筋	0.4	2	-360	無	
			4	-340		
			7	-338		
080	I + 普通鋼筋	0.5	2	-343	無	
			4	-328		
			7	-336		
081	"	0.5	2	-398	無	
			4	-341		
			7	-290		
082	"	0.5	2	-364	無	
			4	-350		
			7	-370		
086	I + Epoxy 鋼筋	0.5	2	—	無	
			4			
			7			
087	"	0.5	2	—	無	
			4			
			7			
088	"	0.5	2	—	無	
			4			
			7			

註：I：卜特蘭I型水泥

表 7-2 二年期曝露試體腐蝕電位分析結果 ( 潮汐帶 ) ( 續 )

試體編號	使用材料	水灰比	保護層厚度 ( cm )	腐蝕電位 ( mV )	鋼筋生銹狀況	備註
092	I + 防銹劑 + 普通鋼筋	0.5	2	-321	無	
			4	-310		
			7	-291		
094	"	0.5	2	-297	無	
			4	-293		
			7	-283		
097	"	0.5	2	-350	無	
			4	-327		
			7	-304		
098	I + 普通鋼筋	0.6	2	-413	生銹嚴重 " 無	
			4	-403		
			7	-310		
099	"	0.6	2	-357	無	
			4	-316		
			7	-323		
100	"	0.6	2	-340	無	
			4	-321		
			7	-318		
104	I + Epoxy 鋼筋	0.6	2	—	無	
			4			
			7			
105	I + Epoxy 鋼筋	0.6	2	—	無	
			4			
			7			
106	I + Epoxy 鋼筋	0.6	2	—	無	
			4			
			7			
110	I + 防銹劑 + 普通鋼筋	0.6	2	-368	底部輕微生銹 無 無	
			4	-343		
			7	-321		
111	"	0.6	2	-389	生銹相當嚴重 " "	
			4	-376		
			7	-369		
112	"	0.6	2	-365	無	
			4	-321		
			7	-330		

註：I：卜特蘭 I 型水泥

表 7-3 一年期曝露試體腐蝕電位分析結果 (水中帶, 試體養生 7 天)

試體編號	使用材料	水灰比	保護層厚度 (cm)	腐蝕電位值 (mV)	鋼筋生銹狀況	備註
A4.1水(R)	I + Epoxy鋼筋	0.4	2	—	無生銹現象	
			4			
			7			
A5.1水(R)	"	0.5	2	—	"	
			4			
			7			
A7.1水(R)	"	0.7	2	—	"	
			4			
			7			
B4.1水(R)	I + 鍍鋅鋼筋	0.4	2	—	"	
			4			
			7			
B5.1水(R)	"	0.5	2	—	"	
			4			
			7			
B7.1水(R)	"	0.7	2	—	"	
			4			
			7			
C4.1水(R)	I + 普通鋼筋	0.4	2	-400	底部生銹 底部輕微生銹 頂端生銹	* 見圖 7-3
			4	-408		
			7	-405		
C5.1水(R)	"	0.5	2	-323	底部輕微生銹 無 無	
			4	-410		
			7	-306		
C7.1水(R)	"	0.7	2	-375	底部生銹 底部輕微生銹 "	
			4	-355		
			7	-370		
F4.1水(R)	I + 普通鋼筋 + 防銹劑	0.4	2	-340	底部生銹 " "	可能材 質不均
			4	-332		
			7	-370		
F5.1水(R)	I + 普通鋼筋 + 防銹劑	0.5	2	-325	無 " "	
			4	-340		
			7	-340		
F7.1水(R)	"	0.7	2	-416	底部嚴重生銹 " "	可能材 質不均
			4	-387		
			7	-450		
H4.1水(R)	I + 50% 爐石 + 普通鋼筋	0.4	2	-293	無	
			4	-313		
			7	-408		
H5.1水(R)	"	0.5	2	-262	無	
			4	-312		
			7	-361		
H7.1水(R)	"	0.7	2	-298	無	
			4	-310		
			7	-306		

註：試體編號請參照表 7-7

表 7-3 一年期曝露試體腐蝕電位分析結果 (水中帶, 試體養生 7 天) (續)

試體編號	使用材料	水灰比	保護層厚度 (cm)	腐蝕電位值 (mV)	鋼筋生銹狀況	備註
J4.1水(R)	I + 20% 飛灰 普通鋼筋	0.4	2	-314	無	
			4	-280		
			7	-338		
J5.1水(R)	"	0.5	2	-354	無	
			4	-421		
			7	-279		
J7.1水(R)	"	0.7	2	-267	無	
			4	-271		
			7	-280		
L4.1水(R)	I + 10% 砂灰 普通鋼筋	0.4	2	-350	無	
			4	-290		
			7	-290		
L5.1水(R)	"	0.5	2	-354	無	
			4	-291		
			7	-394		
L7.1水(R)	"	0.7	2	-219	無 無 底部輕微生銹	
			4	-303		
			7	-440		
M4.1水(R)	II + 普通鋼筋	0.4	2	-284	無	
			4	-220		
			7	-330		
M5.1水(R)	"	0.5	2	-293	無	
			4	-310		
			7	-331		
M7.1水(R)	"	0.7	2	-380	中間部份生銹嚴重 無 "	
			4	-300		
			7	-340		
O4.1水(R)	V 型 + 普通鋼筋	0.4	2	-283	無	
			4	-300		
			7	-302		
O5.1水(R)	"	0.5	2	-298	無	* 見圖 7-3
			4	-313		
			7	-321		
O7.1水(R)	"	0.7	2	-288	無	
			4	-279		
			7	-301		

註：試體編號請參照表 7-7

表 7-4 一年期曝露試體腐蝕電位分析結果 (水中帶, 試體養生 28 天)

試體編號	使用材料	水灰比	保護層厚度 (cm)	腐蝕電位值 (mV)	鋼筋生銹狀況	備註
A4.1水(B)	I + Epoxy鋼筋	0.4	—	—	—	無製作 此試體
A5.1水(B)	"	0.5	—	—	—	"
A7.1水(B)	"	0.7	—	—	—	"
B4.1水(B)	I + 鍍鋅鋼筋	0.4	—	—	—	"
B5.1水(B)	"	0.5	—	—	—	"
B7.1水(B)	"	0.7	—	—	—	"
C4.1水(B)	I + 普通鋼筋	0.4	2 4 7	-370 -385 -285	生銹面積很大 " "	* 見圖 7-3
C5.1水(B)	"	0.5	2 4 7	-393 -313 -331	底部輕微生銹 無 無	
C7.1水(B)	"	0.7	2 4 7	-386 -459 -360	生銹面積很大 " 無	* 見圖 7-3
F4.1水(B)	I + 普通鋼筋 + 防銹劑	0.4	2 4 7	-290 -246 -330	無	
F5.1水(B)	"	0.5	2 4 7	-322 -355 -293	無	
F7.1水(B)	"	0.7	2 4 7	-365 -395 -320	無 " "	
H4.1水(B)	I + 50% 爐石 + 普通鋼筋	0.4	2 4 7	-373 -300 -366	無	
H5.1水(B)	"	0.5	2 4 7	-319 -346 -311	無	
H7.1水(B)	"	0.7	2 4 7	-493 -310 -460	生銹嚴重(全支) ) 無 "	

註：試體編號請參照表 7-7

表 7-4 一年期曝露試體腐蝕電位分析果結 (水中帶, 試體養生 28 天) (續)

試體編號	使用材料	水灰比	保護層厚度 (cm)	腐蝕電位值 (mV)	鋼筋生銹狀況	備註
J4.1水(B)	I + 20% 飛灰 普通鋼筋	0.4	2	-340	無	
			4	-300		
			7	-275		
J5.1水(B)	"	0.5	2	-354	"	
			4	-321		
			7	-279		
J7.1水(B)	"	0.7	2	-364	底部部份生銹 " 無	
			4	-380		
			7	-315		
L4.1水(B)	I + 10% 砂灰 普通鋼筋	0.4	2	-331	無	
			4	-316		
			7	-309		
L5.1水(B)	"	0.5	2	-287	"	
			4	-365		
			7	-322		
L7.1水(B)	"	0.7	2	-418	嚴重生銹 無 無	* 見圖 7-3
			4	-410		
			7	-397		
M4.1水(B)	II + 普通鋼筋	0.4	2	-300	無	
			4	-330		
			7	-274		
M5.1水(B)	"	0.5	2	-331	"	
			4	-318		
			7	-287		
M7.1水(B)	"	0.7	2	-313	"	
			4	-301		
			7	-306		
O4.1水(B)	V + 普通鋼筋	0.4	2	-299	"	
			4	-281		
			7	-283		
O5.1水(B)	"	0.5	2	-313	"	
			4	-336		
			7	-293		
O7.1水(B)	"	0.7	2	-275	"	
			4	-303		
			7	-291		

註：試體編號請參照表 7-7

表 7-5 一年期曝露試體腐蝕電位分析結果(潮汐帶，試體養生 7 天)

試體編號	使用材料	水灰比	保護層厚度 (cm)	腐蝕電位值 (mV)	鋼筋生銹狀況	備註
A4.1 汐(R)	I + Epoxy 鋼筋	0.4	2	—	無	
			4			
			7			
A5.1 汐(R)	"	0.5	2	—	"	
			4			
			7			
A7.1 汐(R)	"	0.7	2	—	"	
			4			
			7			
B4.1 汐(R)	I + 鍍鋅鋼筋	0.4	2	-636	"	
			4	-640		
			7	-699		
B5.1 汐(R)	"	0.5	2	-713	"	
			4	-743		
			7	-750		
B7.1 汐(R)	"	0.7	2	-650	"	
			4	-710		
			7	-850		
C4.1 汐(R)	I + 普通鋼筋	0.4	2	-413	底部部份生銹	* 見圖 7-3
			4	-421	"	
			7	-443	"	
C5.1 汐(R)	"	0.5	2	-353	底部輕微生銹	
			4	-321	無	
			7	-304	無	
C7.1 汐(R)	"	0.7	2	-344	無	
			4	-331		
			7	-321		
F4.1 汐(R)	I + 防銹劑 + 普通鋼筋	0.4	2	-309	"	
			4	-287		
			7	-294		
F5.1 汐(R)	"	0.5	2	-340	無	
			4	-383	頂部輕微生銹	
			7	-323	無	
F7.1 汐(R)	"	0.7	2	-351	無	
			4	-331		
			7	-318		
H4.1 汐(R)	I + 50% 爐石 + 普通鋼筋	0.4	2	-299	"	
			4	-293		
			7	-278		
H5.1 汐(R)	"	0.5	2	-288	"	
			4	-311		
			7	-283		
H7.1 汐(R)	"	0.7	2	-427	底部部份生銹	* 見圖 7-3
			4	-318	無	
			7	-310	"	

註：試體編號請參照表 7-7

表 7-5 一年期曝露試體腐蝕電位分析結果 ( 潮汐帶, 試體養生 7 天 ) ( 續 )

試體編號	使用材料	水灰比	保護層厚度 ( cm )	腐蝕電位值 ( mV )	鋼筋生銹狀況	備註
J4.1 汐 ( R )	I + 20% 飛灰 + 普通鋼筋	0.4	2	-313	無	
			4	-303		
			7	-299		
J5.1 汐 ( R )	"	0.5	2	-323	"	
			4	-312		
			7	-310		
J7.1 汐 ( R )	"	0.7	2	-309	"	
			4	-301		
			7	-292		
L4.1 汐 ( R )	I + 10% 砂灰 + 普通鋼筋	0.4	2	-301	"	
			4	-283		
			7	-293		
L5.1 汐 ( R )	"	0.5	2	-321	"	
			4	-311		
			7	-300		
L7.1 汐 ( R )	"	0.7	2	-451	生銹面積很大	* 見圖 7-3
			4	-420	"	
			7	-416	頂端部份生銹	
M4.1 汐 ( R )	II + 普通鋼筋	0.4	2	-323	無	
			4	-317		
			7	-314		
M5.1 汐 ( R )	"	0.5	2	-318	"	
			4	-331		
			7	-301		
M7.1 汐 ( R )	"	0.7	2	-363	頂端部份生銹	* 見圖 7-3
			4	-343	"	
			7	-331	無	
O4.1 汐 ( R )	V + 普通鋼筋	0.4	2	-283	無	
			4	-310		
			7	-280		
O5.1 汐 ( R )	"	0.5	2	-310	"	
			4	-298		
			7	-311		
O7.1 汐 ( R )	"	0.7	2	-331	"	
			4	-314		
			7	-301		

註：試體編號請參照表 7-7

表 7-6 一年期曝露試體腐蝕電位分析結果 ( 潮汐帶, 試體養生 28 天 )

試體編號	使用材料	水灰比	保護層厚度 ( cm )	腐蝕電位值 ( mV )	鋼筋生銹狀況	備註
A4.1 汐 ( B )	I + Epoxy 鋼筋	0.4	—	—	—	無製作 此試體
A5.1 汐 ( B )	"	0.5	—	—	—	"
A7.1 汐 ( B )	"	0.7	—	—	—	"
B4.1 汐 ( B )	I + 鍍鋅鋼筋	0.4	2	-656	無	
			4	-700		
			7	-806		
B5.1 汐 ( B )	"	0.5	2	-661	"	
			4	-683		
			7	-709		
B7.1 汐 ( B )	"	0.7	2	-626	"	
			4	-673		
			7	-731		
C4.1 汐 ( B )	I + 普通鋼筋	0.4	2	-381	輕微生銹	* 見圖 7-3
			4	-383	"	
			7	-274	無	
C5.1 汐 ( B )	"	0.5	2	-339	無	
			4	-301		
			7	-288		
C7.1 汐 ( B )	"	0.7	2	-318	無	
			4	-294	"	
			7	-400	輕微生銹	
F4.1 汐 ( B )	I + 防銹劑 + 普通鋼筋	0.4	2	-320	無	
			4	-306		
			7	-341		
F5.1 汐 ( B )	"	0.5	2	-323	無	
			4	-268	"	
			7	-301	"	
F7.1 汐 ( B )	"	0.7	2	-373	底部部份生銹	* 見圖 7-3
			4	-381	底部輕微生銹	
			7	-324	"	
H4.1 汐 ( B )	I + 50% 爐石 + 普通鋼筋	0.4	2	-221	無	
			4	-213		
			7	-202		
H5.1 汐 ( B )	"	0.5	2	-219	無	
			4	-232		
			7	-218		
H7.1 汐 ( B )	"	0.7	2	-389	頂端輕微生銹	* 見圖 7-3
			4	-299	無	
			7	-311	"	

註：試體編號請參照表 7-7

表 7-6 一年期曝露試體腐蝕電位分析結果 ( 潮汐帶, 試體養生 28 天 ) ( 續 )

試體編號	使用材料	水灰比	保護層厚度 ( cm )	腐蝕電位值 ( mV )	鋼筋生銹狀況	備註
J4.1 汐 ( B )	I + 20% 飛灰 + 普通鋼筋	0.4	2	-267	無	
			4	-241		
			7	-213		
J5.1 汐 ( B )	"	0.5	2	-262	"	
			4	-314		
			7	-313		
J7.1 汐 ( B )	"	0.7	2	-343	"	
			4	-304		
			7	-321		
L4.1 汐 ( B )	I + 10% 砂灰 + 普通鋼筋	0.4	2	-318	無 頂部輕微生銹 "	
			4	-431		
			7	-449		
L5.1 汐 ( B )	"	0.5	2	-348	無	
			4	-361		
			7	-341		
L7.1 汐 ( B )	"	0.7	2	-377	"	
			4	-400		
			7	-412		
M4.1 汐 ( B )	II + 普通鋼筋	0.4	2	-284	"	
			4	-311		
			7	-307		
M5.1 汐 ( B )	"	0.5	2	-340	"	
			4	-326		
			7	-298		
M7.1 汐 ( B )	"	0.7	2	-355	"	
			4	-348		
			7	-331		
O4.1 汐 ( B )	V + 普通鋼筋	0.4	2	-301	"	
			4	-289		
			7	-279		
O5.1 汐 ( B )	"	0.5	2	-321	"	
			4	-311		
			7	-302		
O7.1 汐 ( B )	"	0.7	2	-326	"	
			4	-330		
			7	-341		

註：試體編號請參照表 7-7

表7-7 海水循環水槽內曝露試體編號

試體編號區別

例：A4.1水(R)~A4.15水(R)

A：使用材料

4：水灰比(4→0.4, 5→0.5, 7→0.7)

1：試體號碼順序

水：水中帶(潮：潮汐帶)

(R)：試體養生7天

(B)：試體養生28天

英文字母代表意義：

A：使用卜特蘭I型水泥試體內含有 Epoxy 鋼筋  
(簡略縮寫為：I+Epoxy 鋼筋)

B：(I型+鍍梓鋼筋)

C：(I型+普通鋼筋)

D：(I型, 不含鋼筋及摻料)

E：(I型+防銹劑(摻料))

F：(I型+鋼筋+防銹劑)

G：(I型+爐石摻料)

H：(I型+鋼筋+爐石摻料)

I：(I型+飛灰摻料)

J：(I型+鋼筋+飛灰摻料)

K：(I型+矽灰摻料)

L：(I型+鋼筋+矽灰摻料)

M：(II型+鋼筋)

N：(II型, 不含鋼筋及摻料)

O：(V型+鋼筋)

P：(V型, 不含鋼筋及摻料)

# 捌、利用電化學方法量測混凝土 內鋼筋之腐蝕速率

饒 正\*

## 一、前 言

混凝土內鋼筋之腐蝕是一種電化學之反應，也就是經由混凝土內之孔隙水(電解質)，使得鋼筋表面不同位置因不等電位(陽極與陰極)之電子可自由交換。在陽極區，即鐵(Fe)氧化作鐵離子( $\text{Fe}^{+2}$ )( $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{+2} + 2\text{e}^-$ )，在陰極區，即氧( $\text{O}_2$ )與水( $\text{H}_2\text{O}$ )還原成氫氧離子( $\text{OH}^-$ )( $2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$ )使得鐵離子與氫氧離子形成稍白色的氫氧化亞鐵 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ，再形成紅棕色的氫氧化鐵 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ，即鐵銹。

混凝土內鋼筋之腐蝕速率之快慢是由電化學過程中離子沉澱之容易與否來決定，而混凝土內電子之交換速度又受許多因素所控制，如混凝土之電阻高低，鋼筋之電位高低，在陰極區內氧氣與水份供給之多少，以及陰極與陽極之面積比之大小……等等。

一般以重量減輕法(Weight Loss Methods)來量測腐蝕速率，即試片經一定期間之曝露後量測其重量之減少，通常需時較長，且經常得不到完全滿意之結果，尤其是腐蝕速率隨時間改變時，這種現象特別顯著。以電化學之方法量測腐蝕速率方法是經由金屬放在水溶液中之腐蝕研究發展出來，在金屬材料之腐蝕研究中經常被使用，而在鋼筋混凝土之腐蝕研究中，甚少被使用。近來電化學方法之Tafel外推法(Tafel Plot)與線性極化電阻法(Linear Polarization Resistance)已被國外學者使用於混凝土內鋼筋之腐蝕研究中，而國外許多學者指出利用線性極化電阻法量測腐蝕速率有些誤差，但使用於量測混凝土內鋼筋之腐蝕速率仍不失為一種較為準確之方法。

混凝土材料因電阻較高，會形成壓降(IR Drop)現象，使得量測得到之腐蝕速率數值較小，近年來國外學者亦發展出新的電化學技巧即交流阻抗法(A.C. Impedance)，研究混凝土內鋼筋之腐蝕速率甚為精確。本研究係利用上述之電化學方法探討不同混凝土材料內鋼筋之腐蝕速率。

---

\*港灣技術研究所港工材料組助理研究員

## 二、Tafel外推法(Tafel Plot Technique)

在電化學中，腐蝕速率之計算是經由量測在開路電位時陰極或陽極之腐蝕電流  $i_{\text{corr}}$  或半電池腐蝕電位  $E_{\text{corr}}$  (未提供任何電壓) 而定，但在電化學過程中，因平衡狀態，使得淨電流值為零，而無法決定陰極或陽極之電流。在本方法中，係利用定電位計自腐蝕電位  $E_{\text{corr}}$  起向陰極及陽極方向供給提昇約 250mV 之電壓，這供給之電壓使得試片之電位不同於腐蝕電位  $E_{\text{corr}}$ ，而量測到之電流係陽極與陰極間之電流差值，其值不為零，以電壓值與電流值作圖，即為Tafel圖，如圖8-1所示：

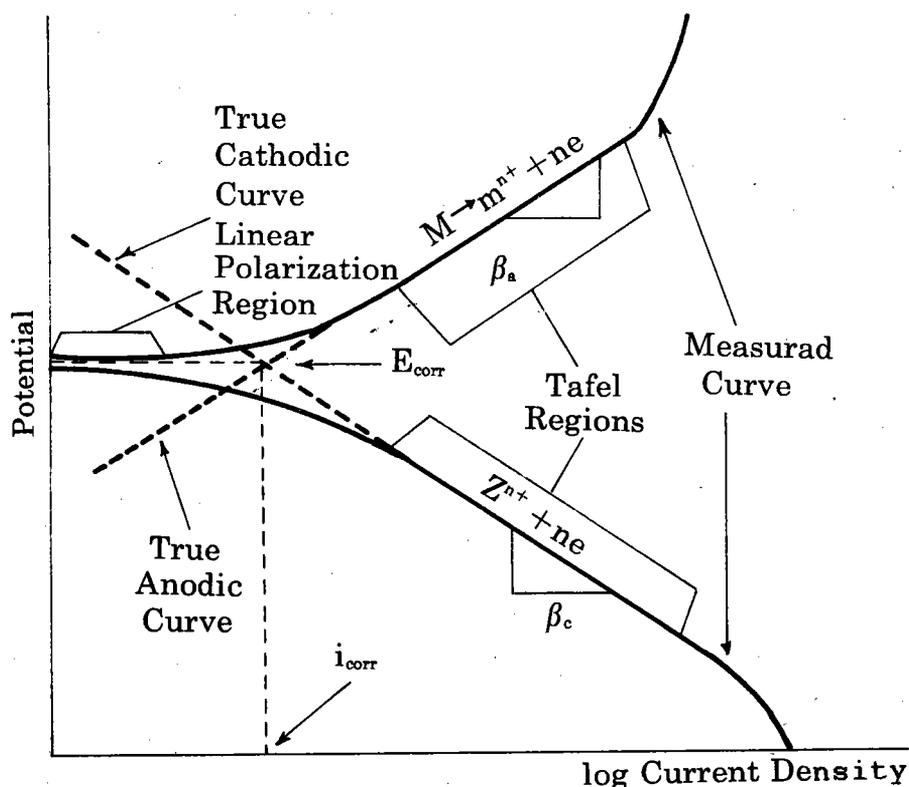


圖8-1 Tafel圖

由圖中可看出一線性地帶，其斜率即為 Tafel 常數，其交叉點即腐蝕電流  $i_{\text{corr}}$ ，將腐電流  $i_{\text{corr}}$  代入由法拉第定律導出之腐蝕速率公式(如公式 1)中即可算出腐蝕速率( $\mu\text{m}/\text{y}$ )

$$\text{腐蝕速率}(\mu\text{m} / \text{y}) = \frac{3.22 \times I_{\text{corr}} \times \text{E.W.}}{d}$$

腐蝕速率( $\mu\text{m}/\text{y}$ ) :  $10^{-6}$ 公尺/年

$I_{\text{corr}}(\mu\text{A}/\text{cm}^2)$  : 電流密度即以  $i_{\text{corr}}$  值除以鋼筋之曝露面積

E.W.(gm) : 鋼筋之當量重(Equivalent Weight)

$d(\text{gm}/\text{cm}^3)$  : 鋼筋之比重

### 三、線性極化電阻法(Linear Polarization Resistance)

在此線性極化電阻法中，對試片中所供給之電壓值較Tafel外推法所供給之電壓值為小，一般約從( $E_{\text{corr}} - 25\text{mV}$ )至( $E_{\text{corr}} + 25\text{mV}$ )。以電壓值與電流值作圖如圖8-2，可得一線性關係，並算出極化電阻  $R_p(\Delta E/\Delta I)$ ，即在腐蝕電位  $E_{\text{corr}}$  時電壓—電流曲線之斜率。

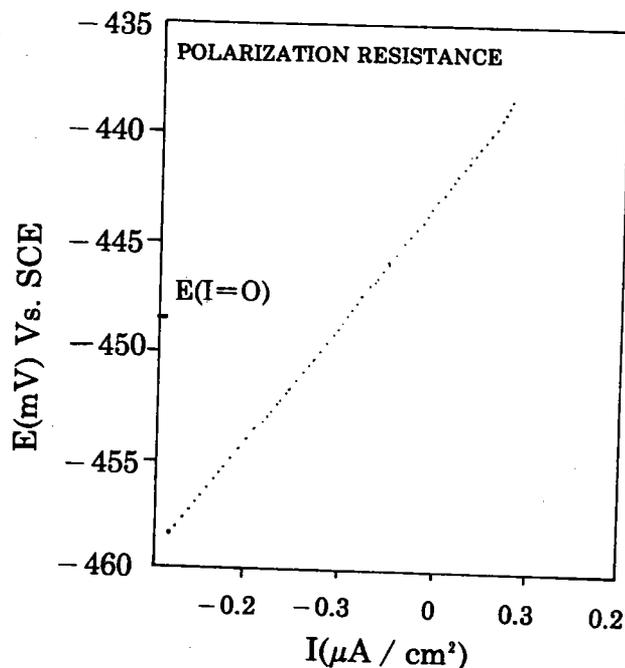


圖8-2 線性極化電阻圖

經由 Stern-Geary 公式(公式2)，由腐蝕電流與極化電阻  $R_p$  之關係可算出腐蝕電流密度  $I_{\text{corr}}$

$$I_{\text{corr}}(\mu\text{A} / \text{cm}^2) = \frac{\beta_a \times \beta_c}{2.3(\beta_a + \beta_c)R_p} \quad (2)$$

公式中

$\beta_a, \beta_c$  : 係陽極與陰極之 Tafel 常數, 以 mV/decade of current 表示

$R_p$  :  $K\Omega\text{cm}^2$

將公式(2)中算出之  $I_{\text{corr}}$  代入公式(1)中即可求出腐蝕速率

#### 四、交流阻抗法(A.C. Impedance)\*

阻抗可視為穩定狀態下, 電流和電位的關係式。因此就大部份金屬/電解液之介面而言(圖 8-4a),  $V$  為由工作電極和參考電極間實際測得的電位, 包含了系統中的 Ohmic Drop。吾人可外加一小幅度之正弦波(Sine Wave)在點  $P(I_0, V_0)$  上, 使得正弦波 ( $\Delta V(t)$ ) 重疊於原來的電位  $V_0$ , 此即所謂的定電位法; 或者正弦電流 ( $\Delta I(t)$ ) 重疊於原來的電流  $I_0$ , 此即所謂的定電流法。

假設外加之  $\Delta V$  和  $\Delta I$  之振幅非常小, 同時滿足極位曲線(穩定狀況)上之線性關係; 則  $\Delta V(t)$  和  $\Delta I(t)$  得以維持時間,  $t$  的正弦曲線關係, 如圖 8-3b 所示。

就任何頻率( $f$ )而言, 阻抗 ( $|z|$ ) 為  $|\Delta V| / |\Delta I|$  之比。 $\Phi$  為相角(可落後或超前), 可以(3)式表示之:

$$Z(f) = \frac{\Delta V}{\Delta I} = |Z| e^{j\Phi} = \frac{|\Delta V| e^{2\pi jft}}{|\Delta I| e^{j(2\pi ft - \Phi)}} \quad (3)$$
$$j = \sqrt{-1}$$

或寫成複數平面上的實部  $\text{Re}$ , 及虛部  $\text{Im}$ 。

$$Z(f) = \text{Re}(f) + j\text{Im}(f) \quad (4)$$

除非是純粹的電阻特性, 否則  $Z$  是頻率  $f$  的函數, 在複數平面上, 可劃成如圖 8-3c 的圖型。在電位學的範疇上, 虛部的負數部份, 常以正的座標標出。以交流(AC)阻抗法測試時, 在低頻的區域, 有時會出現電感( $\text{Im} > 0$ )和負電阻( $\text{Re} < 0$ )的現象。

發生腐蝕的界面, 基本上可視為電阻、電容和/或電感的互相匹配線路。此種電路之組合, 在有外加電位的情況下, 對電容而言, 反應出來的電流會落後(Lag); 對電

---

\*本節摘自“腐蝕防治”第 38 期之楊淵洲著“AC Impedance 腐蝕測試。”

感而言，則有超前(Lead)的現象。對一個沒有電感的電路，如圖8-4所示： $R_s$ 為電解液之電阻， $R_{ct}$ 為電荷移轉電阻或視為極化電阻( $R_p$ )， $C$ 為電容或視為 Double Layer 存在造成的電容，其阻抗( $Z$ )可表示如下：

$$Z = Z' + jZ'' = R_s + \frac{R_{ct}}{1 + \omega j R_{ct} C}$$

$$= R_s + \frac{R_{ct}}{1 + \omega^2 C^2 R_{ct}^2} - \frac{j\omega C R_{ct}^2}{1 + \omega^2 C^2 R_{ct}^2}$$

$$j = \sqrt{-1}$$

$f$ 為頻率，單位為(Hz)

$\omega = 2\pi f$  單位為 radians / s

有時亦可以 Admittance( $Y$ )表示如下：

$$\frac{1}{Z} = Y = Y' + jY''$$

$$Y' = \frac{R_s + R_{ct} + (\omega C R_s R_{ct})^2}{(R_s + R_{ct})^2 + (\omega C R_s R_{ct})^2}$$

$$Y'' = \frac{\omega C R_{ct}^2}{(R_s + R_{ct})^2 + (\omega C R_s R_{ct})^2}$$

其中  $Z' = \frac{Y'}{Y'^2 + Y''^2}$

$$Z'' = \frac{Y''}{Y'^2 + Y''^2}$$

消去 $\omega$ 後可得

$$\left[ Z' - \left( R_s + \frac{1}{2} R_{ct} \right) \right]^2 + (Z'')^2 = \left( \frac{R_{ct}}{2} \right)^2 \quad (6)$$

這是一個以  $\frac{R_{ct}}{2}$  為半徑的圓方程式，圓心座標為  $\left( R_s + \frac{R_{ct}}{2}, 0 \right)$ 。

圖8-5可視為以圖8-4等效電路測得之交流阻抗圖，在應用上，吾人常以 $Z'$ ，為橫座標，以 $-jZ''$ 為縱座標。一般之測試圖型，皆落於第一象限，但是某些特殊現象，會在第二象限或第四象限出現測試數據，圖8-5之圖型稱之為Nyquist Plot或Cole-cole Plot或Argand Plot。

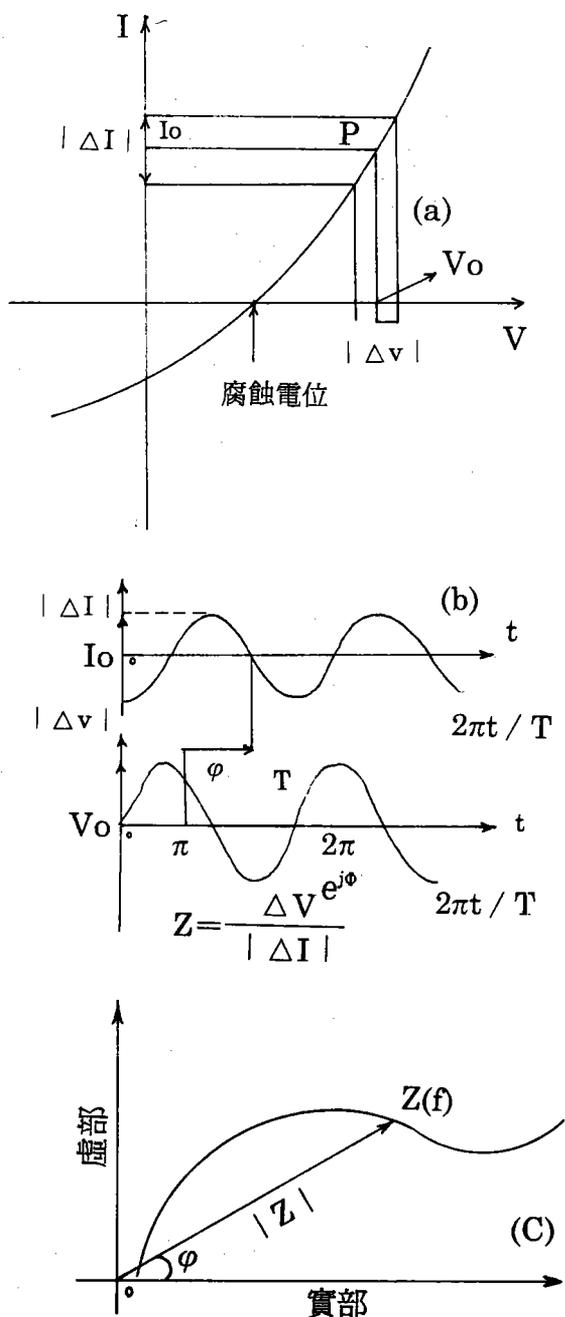


圖8-3 交流阻抗測試原理

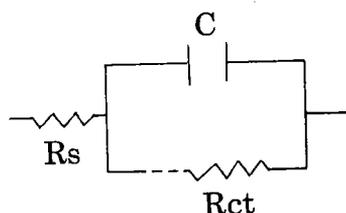


圖8-4 電阻、電容匹配圖

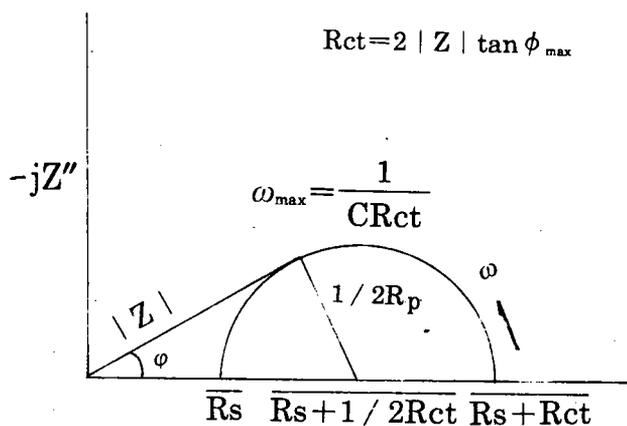


圖8-5 以圖8-4為等效電路測試之AC圖

根據圖 8-5，吾人可推得下列數據，做為腐蝕現象之判斷標準：

電解液之電阻( $R_s$ )：

高頻區內，當 $Z''=0$ 時， $Z'=R_s$

電荷移轉電阻( $R_{ct}$ )：

低頻區內，當 $Z''=0$ 時， $Z'=R_s+R_{ct}$ ，祇要知道 $R_s$ 之值，即可求得 $R_{ct}$ ；或者從最大相角， $\phi_{max}$ 與其相對之阻抗值，亦可由 $R_{ct}=2|Z|\tan\phi_{max}$ 之關係求得；但是當圖形有扭曲時，最大相角法並不精確，不太適合。

電容( $C$ )：

$$\text{電容值可由 } C = \frac{1}{R_{ct}\omega_{max}} = \frac{1}{2\pi R_{ct}f_{max}}$$

之關係式求得；若圖形有扭曲時，以此法測得的 $C$ 值，會有誤差存在。

除了Nyquist Plot以外，交流阻抗測得結果，可以不同的座標組合，劃成多特等定功能的圖形，藉以求得未知的變數。不同的運算方式，可以利用電腦程式的修改，快速的達到欲計算的結果及圖形。

## 五、試驗規劃

### (一) 儀器

本研究採用Solartron之1286型Electrochemical Interface及1250型之頻率反應分析儀，HP7470型繪圖機並應用IBM PC經由GPIB來作全自動化處理，其配置圖如圖8-6。

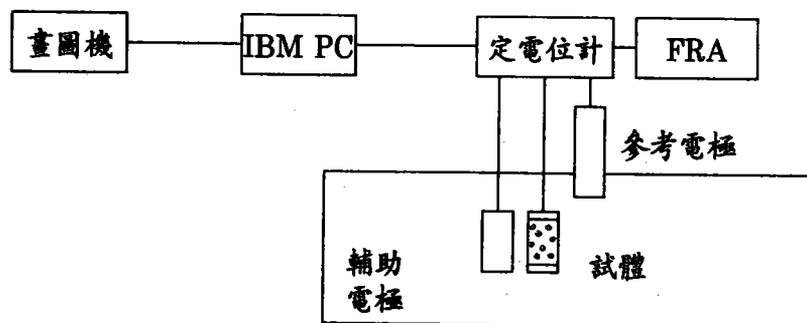


圖8-6 試驗配置圖

## (二) 材 料

本研究試體生產使用之水係蒸餾水，砂使用大甲溪之河砂，水泥使用台泥公司製作之波特蘭 Type I、II、V、型水泥，飛灰使用台電公司之產品，取代量為水泥之 20%，爐石採用中鋼公司之產品。砂灰比均採 1:3，水灰比採 0.4、0.5 及 0.7 三種。

## (三) 試體製作

試體尺寸  $40 \times 40 \times 160\text{mm}$  之立方體(如圖 8-7)，中間放一圓棒鋼筋，其曝露面積約  $30\text{cm}^2$ ，以水泥砂漿攪拌機拌製砂漿，試體製作完成後放入養治室，以恆溫恆濕養治 28 天後取出試驗。

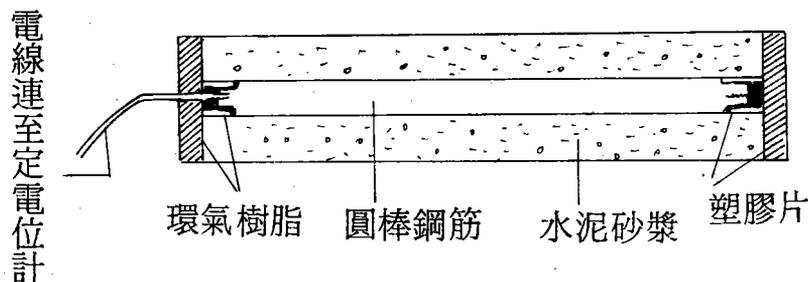


圖 8-7 試片示意圖

## (四) 試驗步驗

### 1. Tafel 外推法

- (1) 首先將試體放入試驗槽中，量測腐蝕電位  $E_{\text{corr}}$  值。
- (2) 利用定電位計以  $0.2\text{mV}/\text{sec}$  之速度，自  $(E_{\text{corr}} - 250\text{mV})$  值掃瞄至  $(E_{\text{corr}} + 250\text{mV})$ 。
- (3) 劃出 Tafel 圖算出 Tafel 參數，腐蝕電值  $I_{\text{corr}}$  值，代入公式(1)，算出腐蝕速率。

### 2. 線性極化電阻法

- (1) 將試體放入試驗槽內，量測腐蝕電位  $E_{\text{corr}}$ 。
- (2) 利用定電位計以  $0.1\text{mV}/\text{sec}$  之速度，自  $(E_{\text{corr}} - 10\text{mV})$  值掃瞄至  $(E_{\text{corr}} + 10\text{mV})$ 。
- (3) 劃出線性極化電阻圖，求出極化電阻  $R_p$ 。代入公式(2)及公式(1)，求出腐蝕速

率。

### 3. 交流阻抗法

(1) 使用定電值計，FRA 及電腦配合工材所設計之軟體可求出極化電阻  $R_p$ ，代入公式(2)及(1)求出腐蝕速率。

## 六、結 果

目前所有之試驗均在進行中，試驗結果日後再提出。

# 玖、混凝土中性化實驗

黃 永 光\*

## 一、前 言

混凝土是一種使用廣泛之建材，它具有經濟性、耐久性、可任意成形、施工方便、可場鑄或預鑄之特性，但混凝土亦有其缺點，如抗拉力不足、延展性低……等等，為彌補其缺點，遂引入抗張力強、延展性良好之鋼筋，形成複合材料即通稱之鋼筋混凝土。在正常的環境下，良好品質的混凝土構造物，其鋼筋受保護層之隔絕不與空氣接觸，且混凝土中含有約 25% 之氫氧化鈣使之維持鹼性，以穩定鋼筋表面的鈍態保護膜，保護鋼筋不致銹蝕。但由於溫度及濕度之變化、載重使用情形、有害化學物質（如酸、氯離子、二氧化碳等等）侵入、維護不佳等因素，均造成混凝土之性能衰減而不能滿足原設計之需求。由於大氣中含有二氧化碳，故混凝土之中性化作用隨時都在進行，在工業區及市區因燃煤、油及汽機車大量排放廢氣，因而使大氣中之二氧化碳上昇，混凝土長期在高濃度之二氧化碳之下，中性化速度更加速進行，不斷的吸收二氧化碳與氫氧化鈣反應生成碳酸鈣，其酸鹼度由高鹼性漸漸變為中性，當中性化深度深達保護層厚度時，便破壞了鈍態膜，而失去保護鋼筋之功能，使鋼筋銹蝕之機率大增，如圖9-1<sup>(1)</sup>所示，鋼筋混凝土構造物之壽命會因而縮短。本文首先探討國內外先進學者對中性化之研究，再就本所之中性化加速試驗結果，作一比較分析。

## 二、中性化作用之反應機理

中性化作用依混凝土所在位置，可分為大氣區和浸泡區的中性化作用，其反應機理分述如下：

### (一) 浸泡區

混凝土位於水面以下，其性質受水中所溶之化學物質之影響。在工業化之社

---

\*港灣技術研究所港工材料組助理

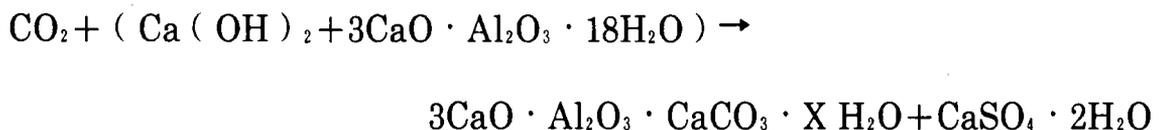
會，河川、近海水域常遭工業廢水之污染，或含有大量有機物時，在有機物分解時產生大量的二氧化碳，致二氧化碳含量增加，在高度碳化之水中會使混凝土產生中性化作用<sup>(2)</sup>，其反應式如下：



水泥所含 25% 之氫氧化鈣漸漸減少，而碳酸鈣漸漸增加，而使混凝土之 pH 值降低，此種反應會增加混凝土內鋼筋之腐蝕機率，如繼續與二氧化碳反應，則碳酸鈣會轉變為溶解性較高之碳酸氫鈣，其反應式如下：



碳酸氫鈣易溶於水中，而析出混凝土體外，使孔隙量增加、強度降低，有害物質更易侵入，更加速中性化作用，而形成一惡性循環。在中性化嚴重時亦可能發生如下的反應：



由於石膏在水中的溶解性高，會析出混凝土而增加混凝土的滲透性，而 C-S-H 膠體是混凝土中主要的膠結材料，若其被分解，則對混凝土的各項工程性質，均有相當不利的影響。

## (二) 大氣區

大氣區之中性化作用其反應機理與浸泡區相同，但受環境濕度之影響，乾濕環境對中性化速度之影響分述如下：

1. 在乾燥之大氣中，二氧化碳迅速穿過混凝土之孔隙，進入混凝土而發生中性化作用，但氣體之滲透達一定深度後，即無法再深入。
2. 當濕度較高時孔隙中部份充水，此時二氧化碳先由孔隙迅速進入後，部份溶入水中，而緩慢的隨孔隙水之擴散更深入混凝土之中。

3. 當大氣之相對濕度達 100% 時，孔隙中充滿水，二氧化碳僅由孔隙水擴散，則中性化速度較為緩慢。

上述三種狀況相對濕度在 50% 左右時，中性化作用最為迅速，並增加中性化深度。其他環境因素如溫度……等亦會影響中性化速度，溫度較高時中性化速度亦較快，但與二氧化碳之濃度及濕度比較，溫度之影響性較小。

### (三) 中性化速度

1. 中性化深度與時間平方根成正比。

$$X = K\sqrt{T} \dots\dots\dots (9-1)$$

式中，X：中性化之深度。

K：依水泥之種類、水灰比之高底等等因素而定之混凝土特性係數。

T：中性化之時間。

本式為最常引用之公式，在混凝土缺乏詳盡之基本資料時，引用本式僅需定出係數 K 值，無論在舊結構物之中性化速度研究或實驗室之中性化分析，均為方便之公式。如圖 9-2 所示混凝土結構物中性化與其壽命之關係，AB 段為理論上之使用年限，T = t<sub>1</sub> 時保護層已失去保護鋼筋之功能，BC 段時鋼筋銹蝕膨脹，當 T = t<sub>2</sub> 時保護層發生裂縫，促使中性化速度加快，當達到 D 點 T = t<sub>3</sub> 時結構物失去原有功能。

2. Schiessl 公式<sup>(3)</sup>

$$T = -\frac{a}{b} \left( X + X_{\infty} \cdot \ln \left( 1 - \frac{X}{X_{\infty}} \right) \right) \dots\dots\dots (9-2)$$

$$X_{\infty} = \frac{D_{eff} \Delta c}{b} \dots\dots\dots (9-3)$$

式中 D<sub>eff</sub>：有效滲透係數

X：中性化之深度

Δc：不同之濃度

a：常數

b：阻滯係數

本式係說明中性化深度 (X) 隨時間 (T) 之增加而加深，但到達一定深度

後，二氧化碳無法滲透得更深，此後中性化深度（ $X_c$ ）不再增加如圖9-3所示，本理論係 Schiessl 先生於 1976 年提出。

### 三、試驗方法

#### (一) 試體之製作

##### 1. 材料之選擇

- ① 粗骨材取自大甲溪榮工處碎石場之標準級配，篩取粒徑不大於  $12.5\text{mm } \phi$  (  $1/2\text{in}$  ) 之粒料。
- ② 細骨材為大甲溪之河砂，其細度模數  $F.M. = 2.71$ 。
- ③ 水泥使用台泥公司之卜特蘭 I、II、V 型水泥及台電公司之飛灰取代 20% 之 I 型水泥、中鋼公司之爐石取代 50% 之 I 型水泥、矽灰取代 10% 之 I 型水泥。
- ④ 拌合水使用適合飲用之自來水，水灰比取 0.4、0.5、0.7 三種。

##### 2. 試體澆灌及編號

以前述六種水泥配合三種水灰比共 18 種配比，依序編號為 A、B、C……P、Q、R，如表 9-1 所示；依 ACI 規範 211.1-81 之規定，拌合後灌製  $7.5\text{cm } \phi \times 15\text{cm}$  之圓柱試體各 18 個，共製作 324 個試體。

##### 3. 養生

試體澆灌後 24 小時拆模，並移至相對濕度 100% 之養生室中養護 28 天，以供試驗用。

- 4. 部份中性化速度較快之試體，以不透氣之環氣樹脂塗滿試體側面，使中性化反應僅能由上下兩底面侵入進行。

#### (二) 試驗設備

加速試驗箱為一密閉之容器（ $185\text{cm} \times 120\text{cm} \times 76\text{cm}$ ），可容納  $7.5\text{cm } \phi \times 15\text{cm}$  之試體約 400 個。內置空氣循環風扇及溫度、相對濕度、二氧化碳濃度控制器，其使用範圍如下：

- ① 溫度自  $10^\circ\text{C}$  至  $50^\circ\text{C}$ 。
- ② 相對濕度自 40% 至 90%。
- ③ 二氧化碳濃度自 0 至 20%。

試驗設定為二氧化碳濃度  $3.0\% \pm 0.2\%$ ，溫度為  $30^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ ，相對濕度為  $60\% \pm 10\%$ 。

### (二) 試驗步驟

1. 將各種配比之混凝土試體 1~9 號放置於  $\text{CO}_2$  加速箱內為甲組、另 10~18 號放置於室外屋簷下不滴水處為乙組、每次實驗取三個試體之平均值為準。
2. 於試體齡期 1、3 及 6 個月時，自甲乙兩組之各種配比各取 3 個試體，經劈裂後以酚酞試劑塗抹剖開面，量測未變色之厚度為已中性化之區域，中央部份呈鮮艷粉紅色為未中性化區域。

## 四、結果與討論

1. 以酚酞試劑測試，中性化深度結果如表 9-2，中性化之深度隨時間之增加而加深。
2. 相同齡期、配比及水灰比下之試體置於加速實驗箱，中性化之深度較大氣中增加很多，如圖 9-4 所示。
3. 不同種類之水泥，在相同水灰比及環境下，其中性化之速度如圖 9-5 所示，以爐石水泥最快、飛灰水泥次之、矽灰水泥再次之、台泥 I 型水泥最慢。
4. 同類水泥、同環境下，不同水灰比相比較如圖 9-6 所示，中性化速度以  $W/C = 0.7$  最快， $W/C = 0.5$  其次， $W/C = 0.4$  最慢。
5. 水灰比 0.7 時中性化之速度較快，顯然水灰比大，則混凝土中之孔隙亦大，二氧化碳較容易進入混凝土中而發生中性化反應。
6. 由式 (9-1) 可得  $X$  與  $\sqrt{T}$  之關係，及由圖 9-4 可得六個月齡期在大氣中之中性化深度，即可推出中性化深度達一般保護層厚度 (4cm)，所需之時間，如表 9-3 所示，台泥 I、II、V 型及矽灰水泥均達 50 年以上，其中 I 型水泥達 200 年，故為防止中性化作用，宜採用 I 型水泥，則在正常環境下，結構物在使用期限內不致受中性化作用之影響。
7.  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  之 pH 值為 12-13 間，但與  $\text{CO}_2$  反應生成  $\text{CaCO}_3$  時，其 pH 值降至 8.5-10 間，故以酚酞試劑測試可迅速獲得  $\text{CO}_2$  侵入之深度。
8. 中性化作用在大氣中隨時都在進行，故試體剖開後，要立即以酚酞測試。
9. 以酚酞測試，試體各部份之中性化深度不一，且呈現之粉紅色色澤深淺不同，

量測時應以鮮艷之粉紅色為準，並由同一人量測，以減少誤差，在無其他精密儀器或於現場調查時，以酚酞測定中性化深度為一適當之方法。

## 五、參考文獻

1. 岸谷孝一與西澤紀昭編，和泉意登志、喜多達夫、前田照信著“中性化”，技報堂出版，1986.8。
2. 李釗，“海洋環境對鋼筋混凝土侵蝕的反應機理及防蝕注意事項”鋼筋混凝土結構物防蝕技術研討會論文集，民國78年10月，台中，第45-46頁。
3. K.Tuutti., “Corrosion of Steel in Concrete” Research Report, The Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982.

表9-1 試體之配比及編號

編號	水 泥	水 灰 比	編號	水 泥	摻 料	水 灰 比
A	台泥 II 型 水泥 100%	0.4	J	台泥 I 型 水泥 90%	矽灰 10%	0.4
B	台泥 II 型 水泥 100%	0.5	K	台泥 I 型 水泥 90%	矽灰 10%	0.5
C	台泥 II 型 水泥 100%	0.7	L	台泥 I 型 水泥 90%	矽灰 10%	0.7
D	台泥 V 型 水泥 100%	0.4	M	台泥 I 型 水泥 80%	飛灰 20%	0.4
E	台泥 V 型 水泥 100%	0.5	N	台泥 I 型 水泥 80%	飛灰 20%	0.5
F	台泥 V 型 水泥 100%	0.7	O	台泥 I 型 水泥 80%	飛灰 20%	0.7
G	台泥 I 型 水泥 100%	0.4	P	台泥 I 型 水泥 50%	爐石 50%	0.4
H	台泥 I 型 水泥 100%	0.5	Q	台泥 I 型 水泥 50%	爐石 50%	0.5
I	台泥 I 型 水泥 100%	0.7	R	台泥 I 型 水泥 50%	爐石 50%	0.7

表9-2 中性化之深度

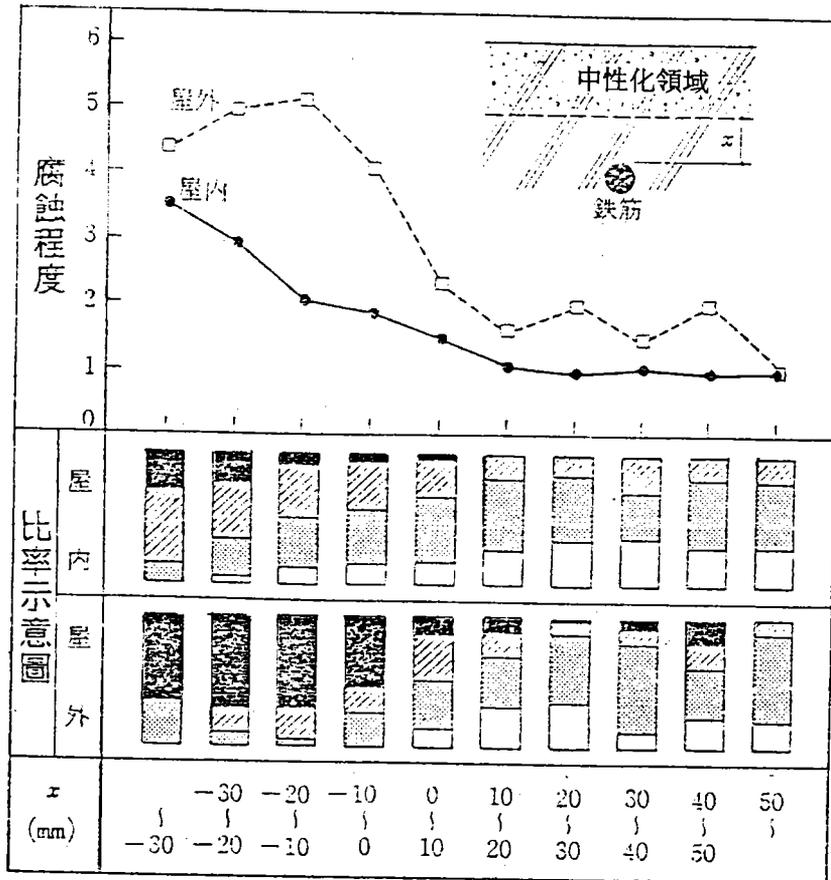
單位：mm

編 號	齡期 組別	一 個 月		三 個 月		六 個 月		備 註
		甲組	乙組	甲組	乙組	甲組	乙組	
A		3	0	7	0	12	0	
B		5	0	15	1	28	1	
C		13	1	25	2	50	4	
D		4	0	9	0	11	0	
E		5	0	11	1	15	1	
F		13	1	25	2	35	4	
G		2	0	6	1	10	1	
H		6	0	12	1	15	1	
I		12	1	21	2	30	2	
J		5	0	10	0	14	0	
K		10	0	16	1	21	2	
L		15	1	30	3	38	4	
M		8	0	14	0	18	1	
N		13	1	20	2	25	3	
O		18	2	35	5	42	6	
P		11	0	15	0	18	1	
Q		12	1	18	2	24	4	
R		25	2	37	4	44	5	

表9-3 各型水泥中性化達4cm所需時間

單位：年

水 泥 種 類	時 間	備 註
台泥 II 型水泥 100%	50	w/c=0.7
台泥 V 型水泥 100%	50	
台泥 I 型水泥 100%	200	
台泥 I 型水泥 90% 砂灰 10%	50	
台泥 I 型水泥 80% 飛灰 20%	22	
台泥 I 型水泥 50% 爐石 50%	32	



圖例	腐蝕程度	鋼筋狀態
	0	鋼筋保護膜完整無銹蝕情況
	1	小面積斑點浮銹
	3	鋼筋全面生銹，有效斷面稍減
	6	鋼筋嚴重銹蝕，有效斷面縮小

圖9-1 中性化深度與鋼筋銹蝕程度關係圖

腐蝕量  
鋼筋  
深度  
中性化

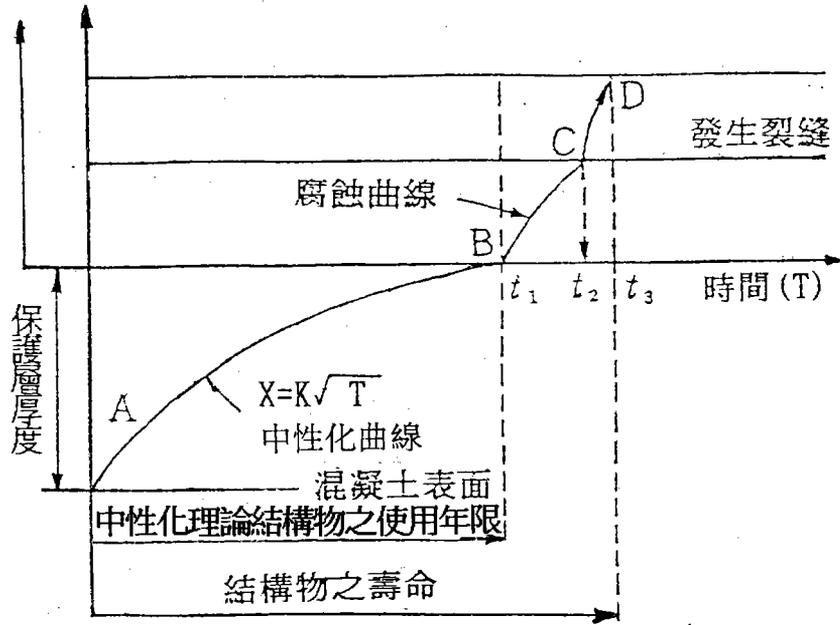


圖9-2 混凝土結構物中性化與其壽命關係圖

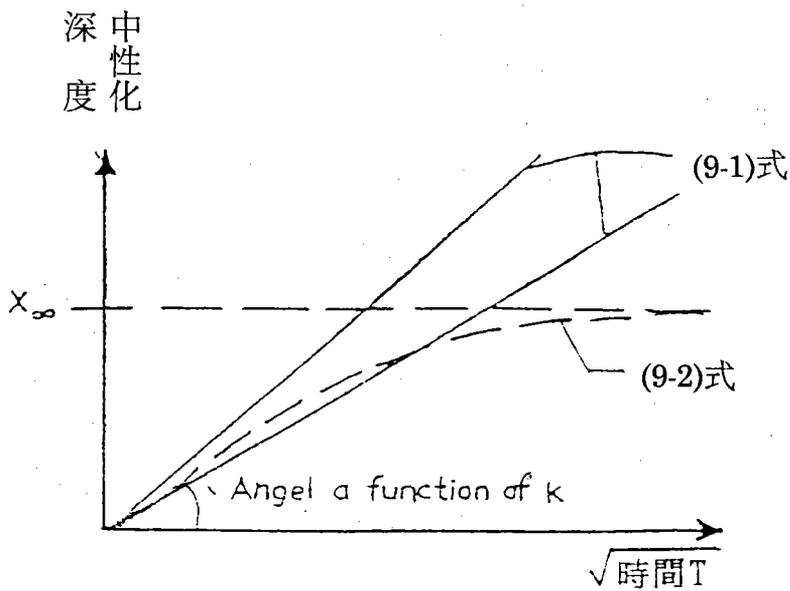
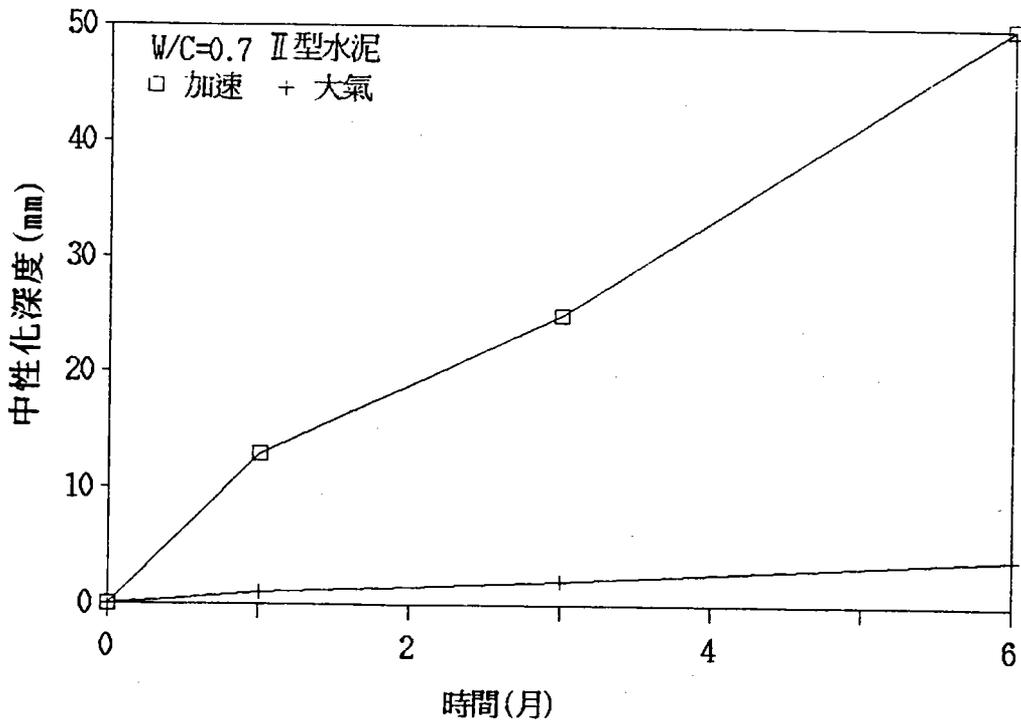
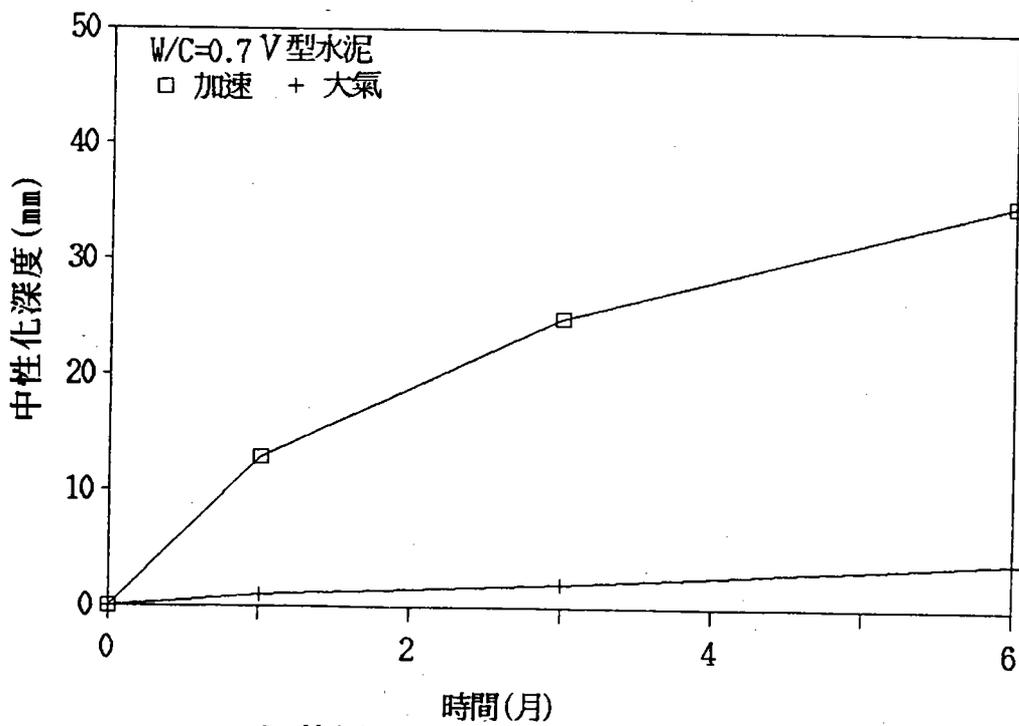


圖9-3 (9-1)式與(9-2)式中性化深度之比較

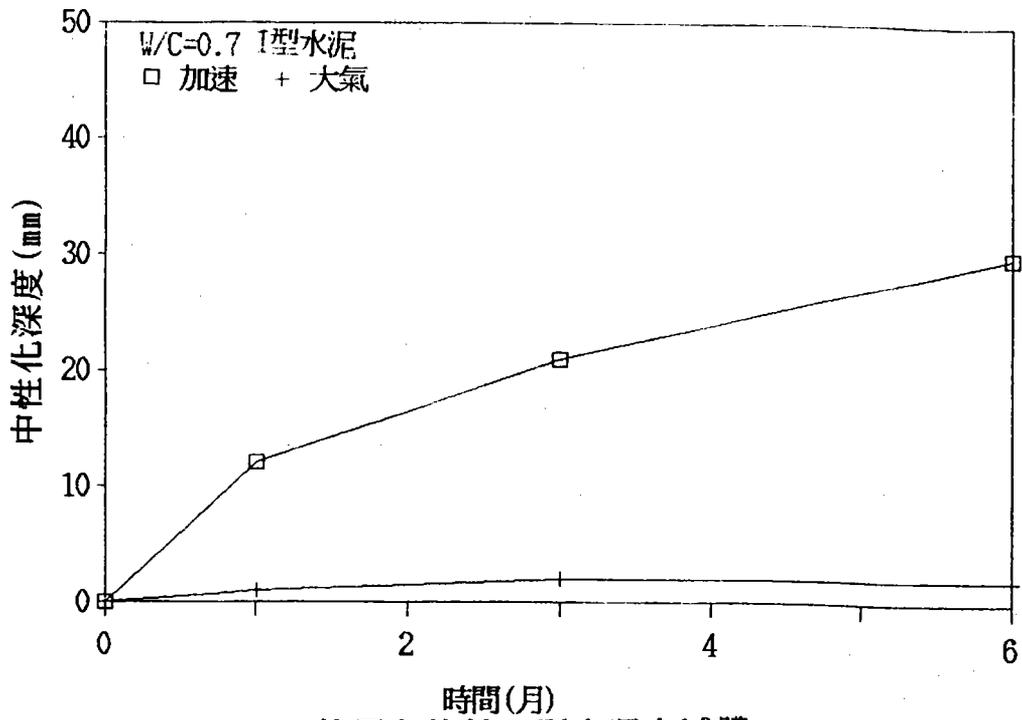


A 使用卜特蘭 II 型水泥之試體

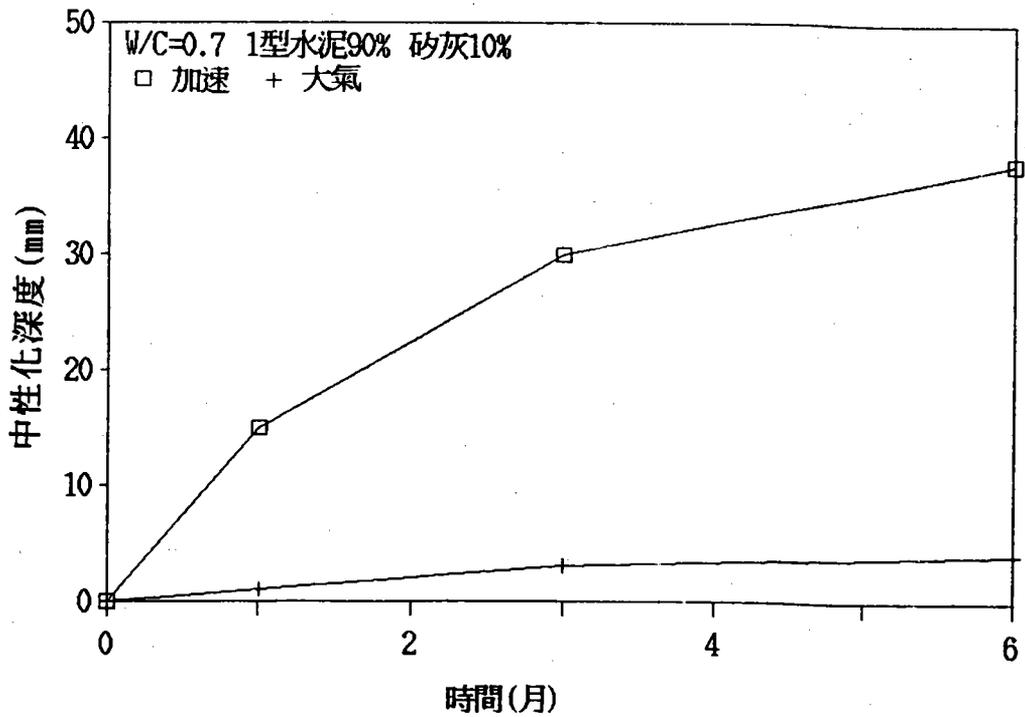


B 使用卜特蘭 V 型水泥之試體

圖 9-4 各種試體在加速箱內與大氣中之中性化速度比較

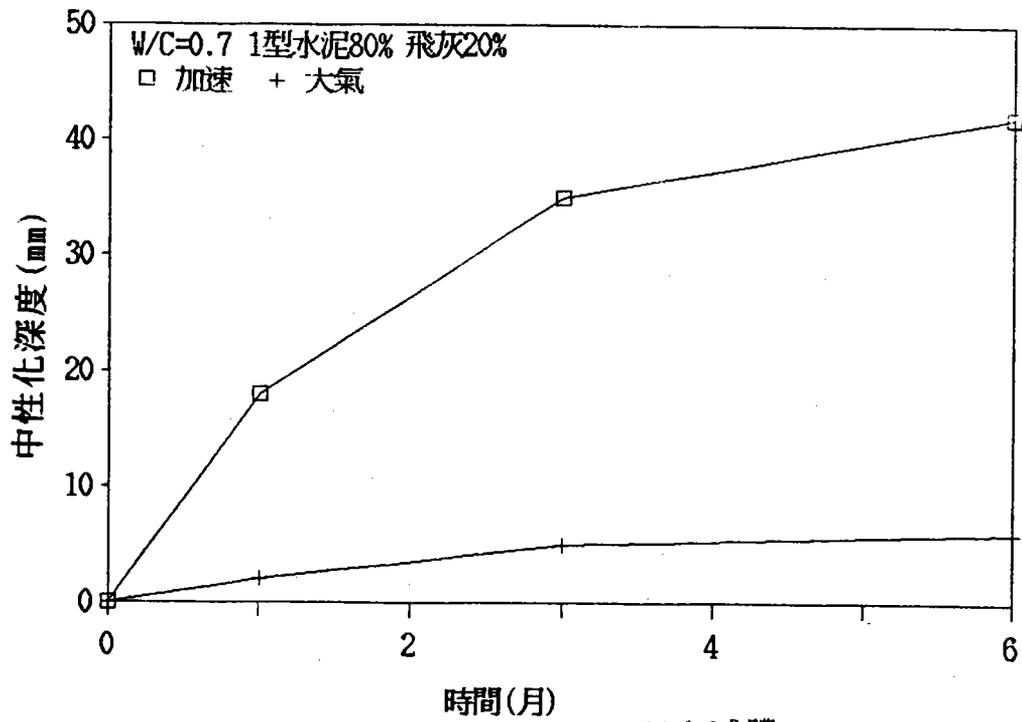


C 使用卜特蘭 I 型水泥之試體

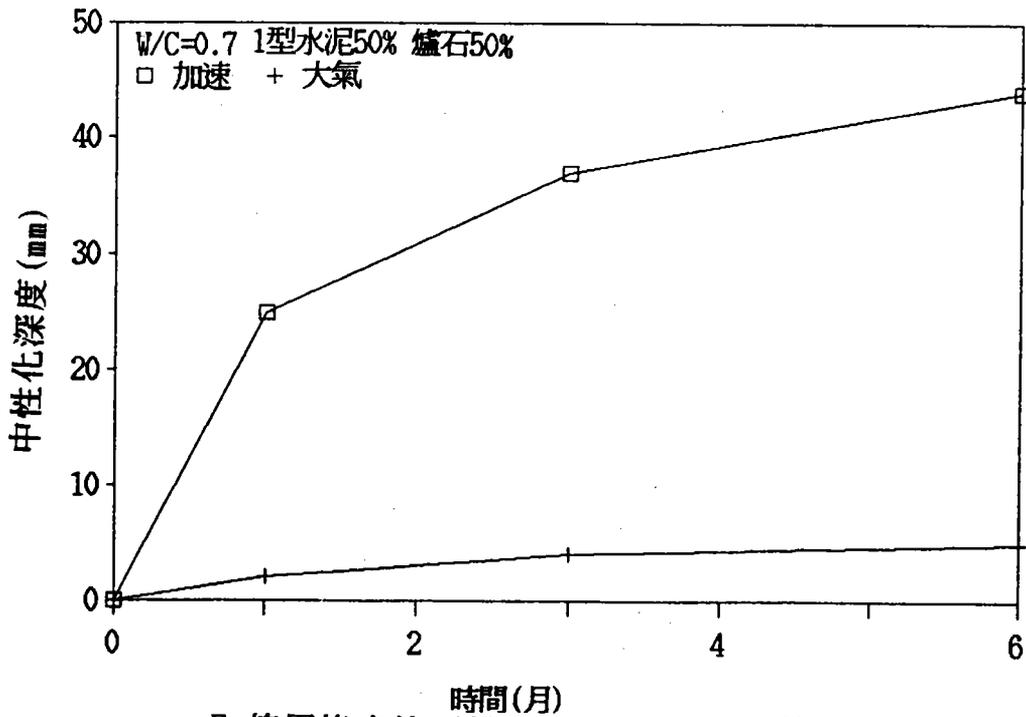


D 使用摻砂灰10% I 型水泥之試體

圖 9-4 各種試體在加速箱內與大氣中之中性化速度比較(續)



E 使用摻飛灰20% I 型水泥之試體



F 使用摻高爐石粉50% I 型水泥之試體

圖 9-4 各種試體在加速箱內與大氣中之中性化速度比較(續)

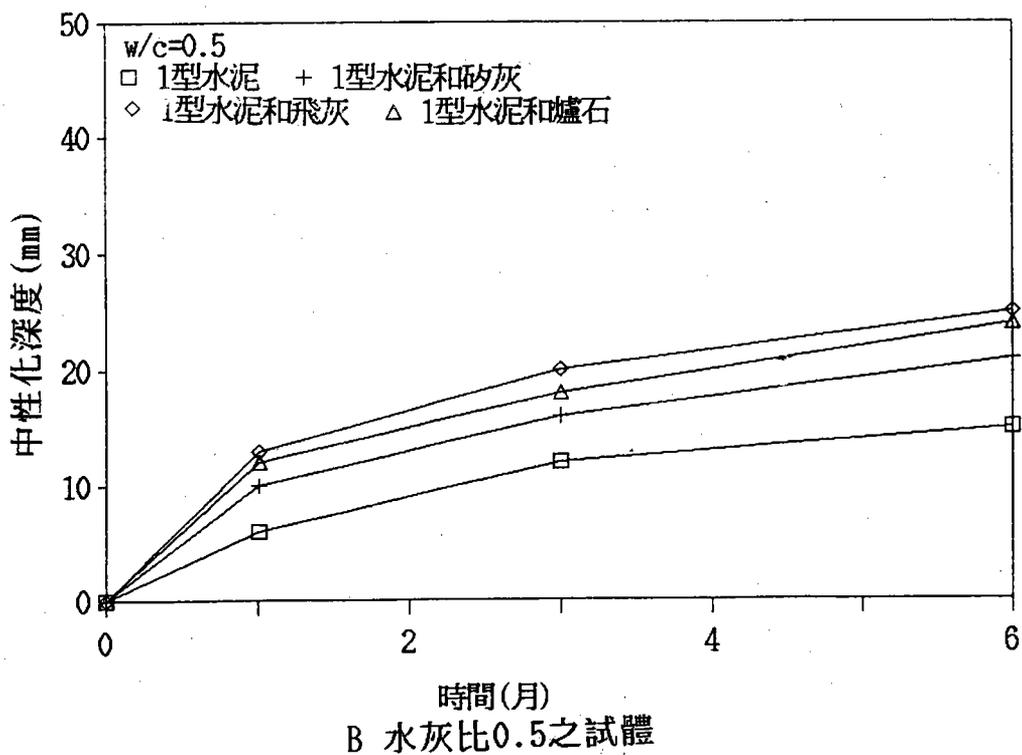
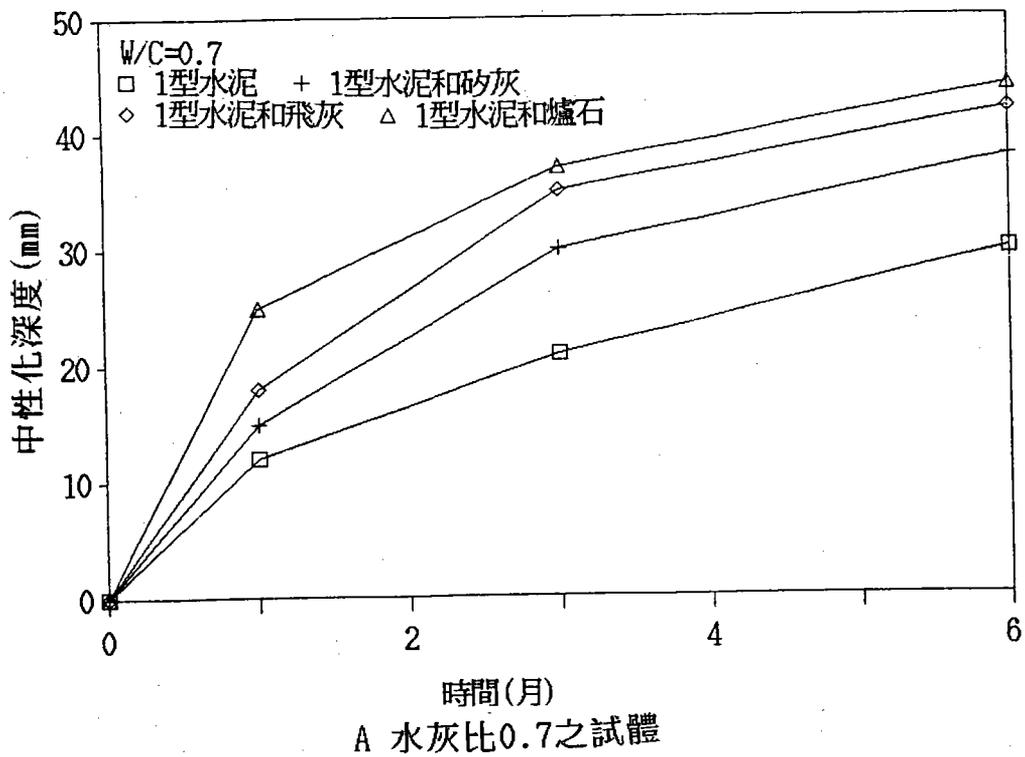
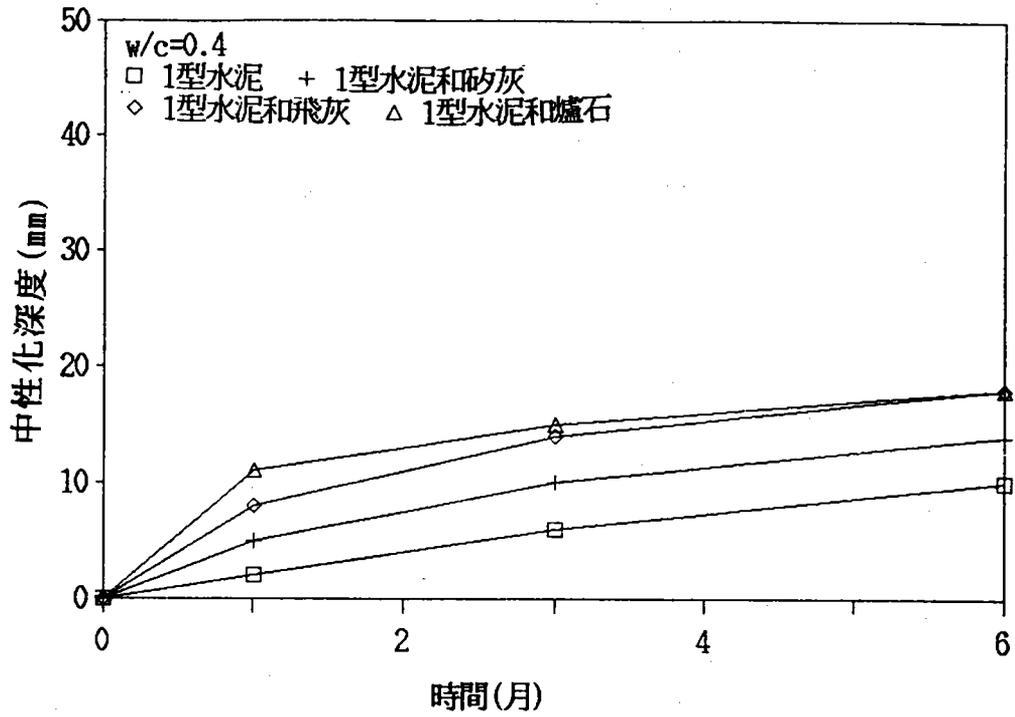
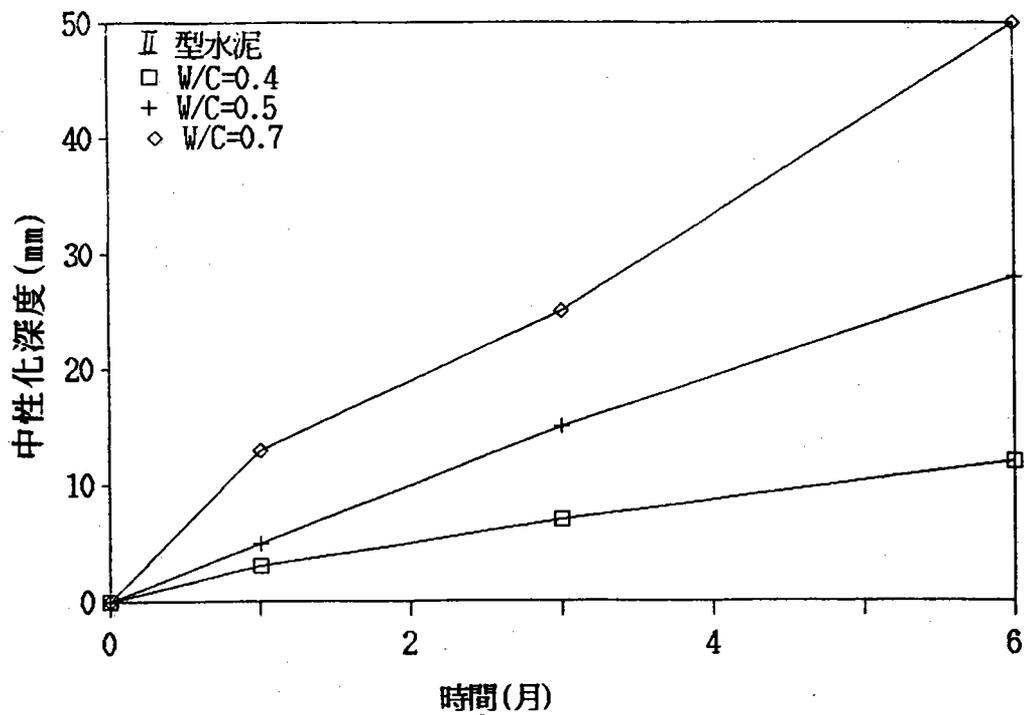


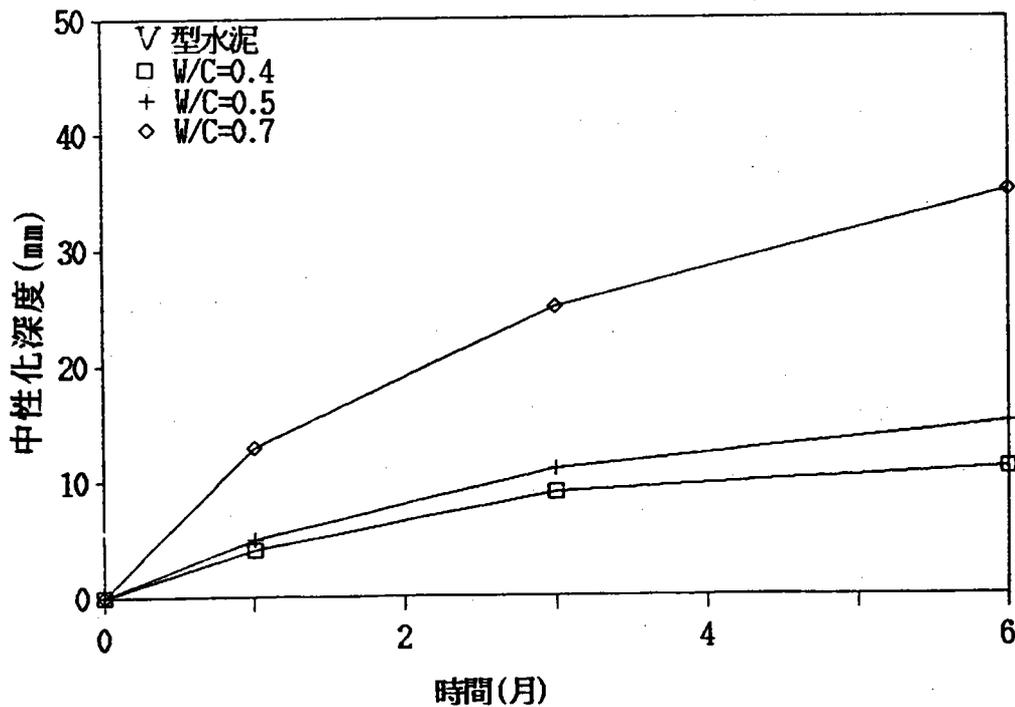
圖 9-5 不同水泥型態試體的中性化速度比較



C 水灰比0.4之試體  
 圖 9-5 不同水泥型態試體的中性化速度比較(續)

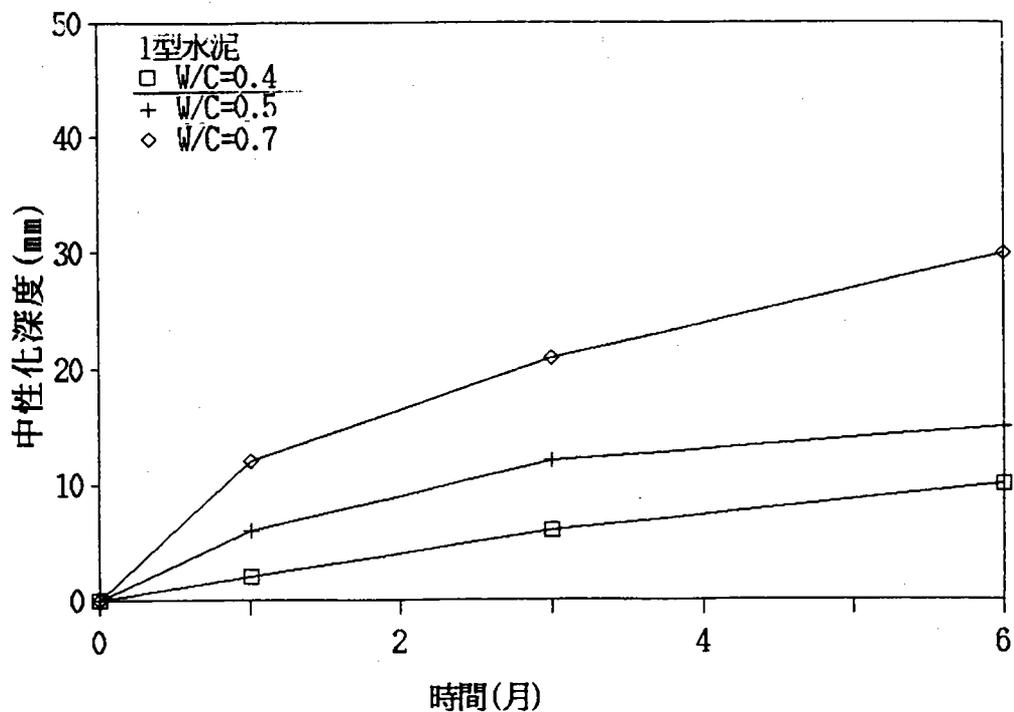


A 使用卜特蘭 II 型水泥之試體

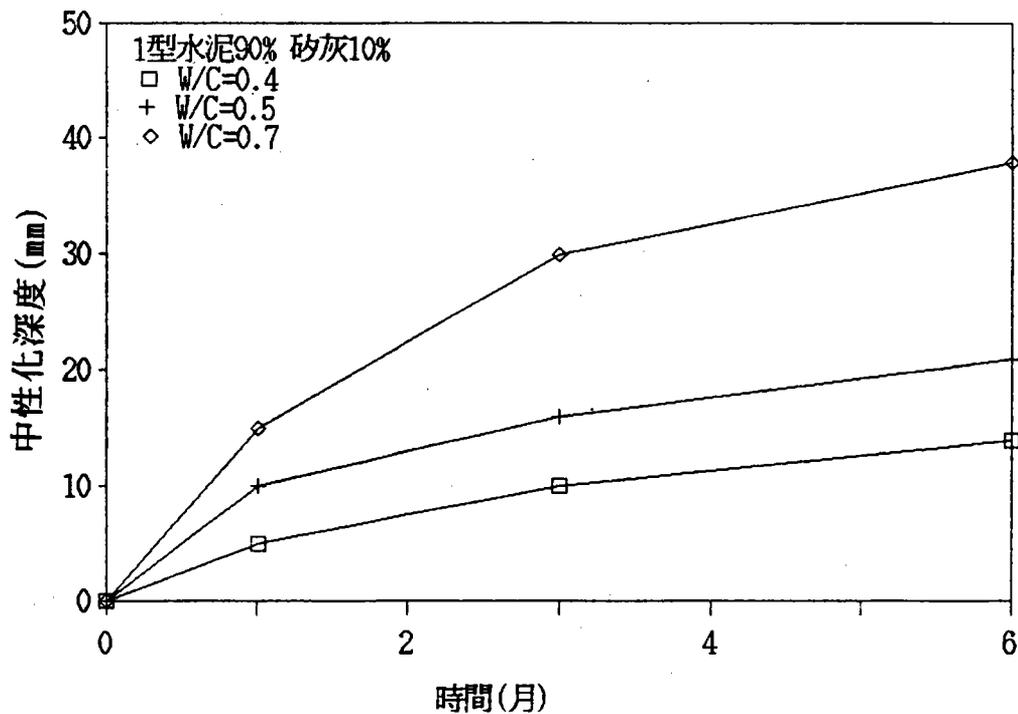


B 使用卜特蘭 V 型水泥之試體

圖 9-6 不同水灰比試體之中性化速度之比較

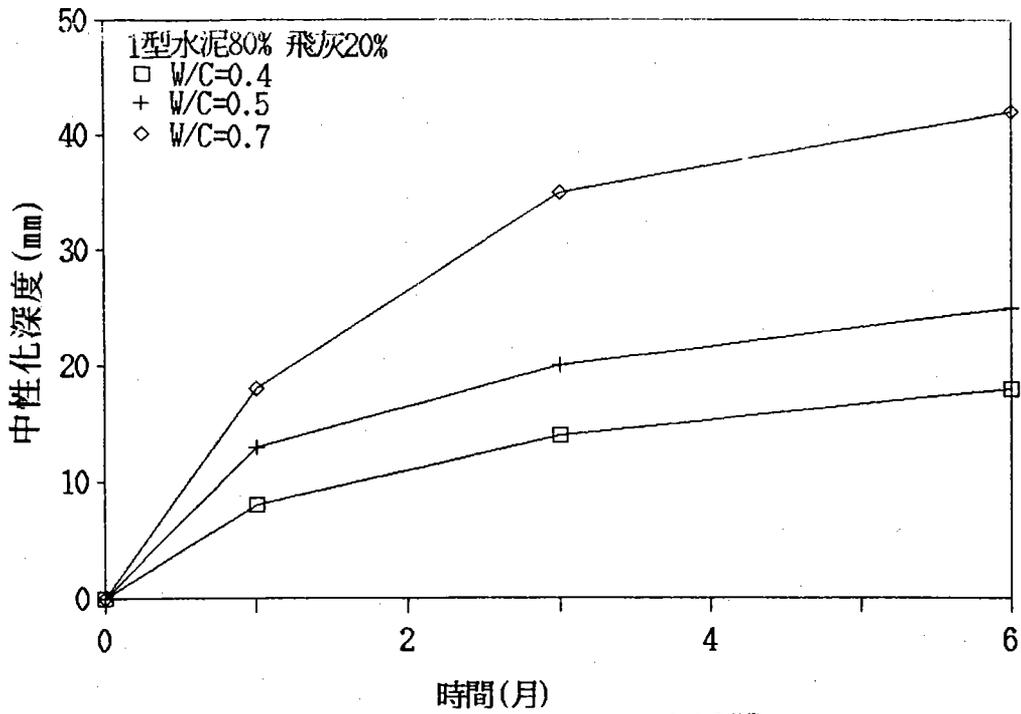


C 使用卜特蘭 I 型水泥之試體

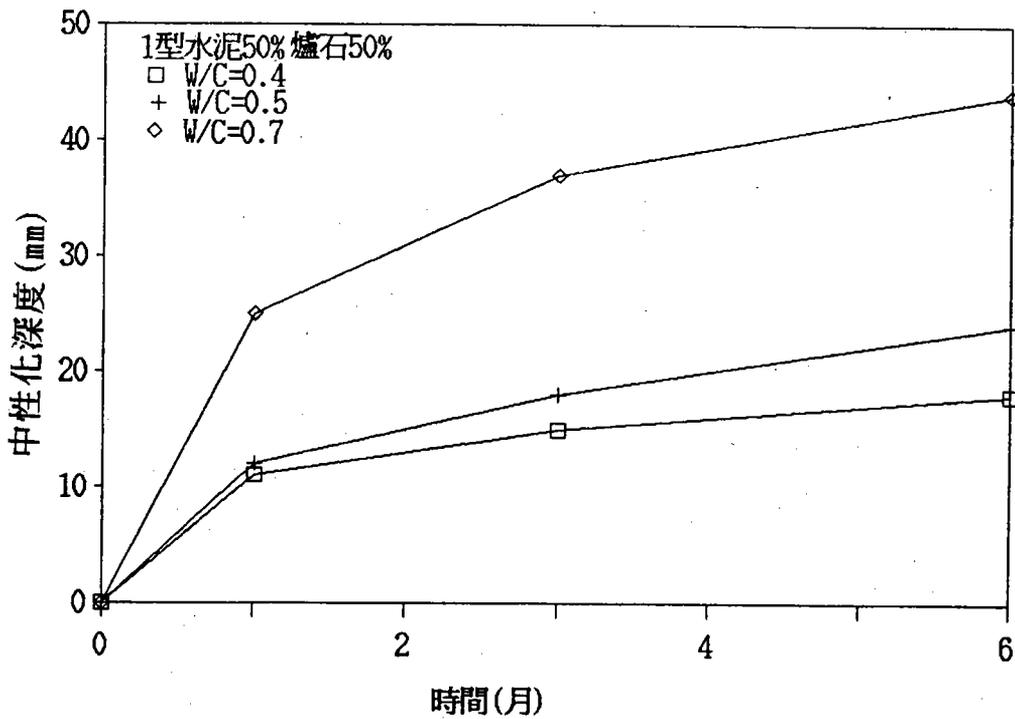


D 使用摻飛灰20% I 型水泥之試體

圖 9-6 不同水灰比試體之中性化速度之比較(續)



E 使用摻飛灰20% I 型水泥之試體



F 使用摻高爐石粉50% I 型水泥之試體

圖 9-6 不同水灰比試體之中性化速度之比較(續)

# 拾、混凝土氯離子擴散試驗

柯 正 龍\*

## 一、前 言

鋼筋混凝土構造物中的鋼筋由於混凝土提供鹼性環境保護，所以在正常品質狀況下，如未受其它物之影響，鋼筋不易產生腐蝕。

鋼筋混凝土中之鋼筋發生腐蝕主要是由於侵蝕性的鹽類破壞混凝土提供之鹼性保護所致，這些鹽類有鹵素族（ $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Br}^-$ 、 $\text{I}^-$ ），硫酸根（ $\text{SO}_4^{-2}$ ）或硫化物（ $\text{S}^{-2}$ ）等，其中又以氯離子作用最強烈，且氯離子侵入混凝土中留存之可能性最高，故對鋼筋腐蝕威脅最大，港灣構造物係以鋼筋混凝土為主要構築材料，且海水中含有大量比例之氯離子，處此海洋環境下，其混凝土中鋼筋受氯離子影響而發生腐蝕之機率較其他環境尤高，故本研究擬以就不同之水泥種類添加不同比例之飛灰試驗其擴散係數，作為選擇施工材料之參考。一般規定混凝土之 pH 值在 12.3~13.2 的鹼性環境下，氯離子含量不得超過  $0.2\sim 2.8\text{kg}/\text{m}^3$ 。

## 二、試驗理論

- ① 氯離子侵入混凝土之程度，依結構物位置不同，一般結構物曝露於飛沫帶地區、氯離子之侵入最為嚴重，主要原因為飛沫帶有乾濕反覆之作用存在，而在潮濕狀況下，因毛細管作用，大量的氯離子和水會侵入混凝土中，而在乾燥時水份被蒸發掉只剩餘氯離子留在混凝土中，造成混凝土表面或內部存留大量的氯離子。

根據最近研究混凝土中氯離子滲透情形，應可適用 Fick 第二擴散定律，為模擬實際氯離子含量入侵混凝土中之分佈狀況，根據 Fick 第二擴散定律。氯離子濃度（C）與滲透深度（X）之控制方程式如下<sup>(1)</sup>：

---

\*台灣省交通處港灣技術研究所助理

$$\frac{\partial C}{\partial T} = D \frac{\partial^2 C}{\partial X^2} \dots\dots\dots (10-1)$$

上述公式，代入下列邊界條件：

B.C.1  $X=0, C=C_0$

B.C.2  $X \rightarrow \infty, C \rightarrow 0$

解此偏微分方程式可得到特別解為：

$$C_{(x,t)} = C_0 \left[ 1 - 2 \operatorname{Erf} \left( \frac{X}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] \dots\dots\dots (10-2)$$

式中：Erf 為誤差函數 (Error function)，其定義為

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

$C_0$ ：混凝土表面起始之氯離子濃度 (ppm)

$C$ ：任何時間，任何深度下之氯離子濃度 (ppm)

$X$ ：深度 (cm)

$t$ ：時間 (sec)

$D$ ：氯離子擴散係數 ( $\text{cm}^2 / \text{sec}$ )

- ⑥ 當混凝土位於飛沫區 (splash zone) 或大氣區 (atmospheric zone)，氯離子滲入混凝土中是由於跳浪所留下之鹽份等細顆粒累積在混凝土表面所造成。

因此，方程式 (10-1) 中，須計算混凝土表面氯之累積量，假設混凝土表面之累積量是連續性的，且可全部滲入混凝土中，則 (10-1) 可解為<sup>(2)</sup>

$$C_{(x,t)} = \int_0^t \frac{W(t_i)}{\sqrt{\pi D (t-t_i)}} \cdot \exp\left(-\frac{X^2}{4D(t-t_i)}\right) dt_i \dots\dots\dots (10-3)$$

式中  $W(t_i)$  為在時間  $t_i$  時，混凝土表面氯離子之每單位時間累積數量。

假設  $W(t_i)$  為一常數  $W$ ，則方程式 (10-3) 可寫為：

$$C_{(x,t)} = 2W \left[ \frac{\sqrt{t}}{\pi D} \cdot \exp\left(-\frac{X}{4Dt}\right) - \frac{X}{2D} \left(1 - \text{Erf}\left(\frac{X}{2\sqrt{Dt}}\right)\right) \right] \dots\dots (10-4)$$

### 三、試驗方法

#### 1. 試驗重點：

本研究對不同水泥（卜特蘭 I 型、II 型水泥）在不同之水灰比時，添加不同比例之飛灰以取代部份水泥之水泥砂漿硬化體進行擴散試驗，以評估受到外界氯離子侵蝕時，抑制擴散速率的效果，作為防止混凝土中鋼筋腐蝕，增加鋼筋混凝土構造物耐久年限之參考。

#### 2. 試驗材料

- ① 水泥：選用台灣水泥公司生產之卜特蘭 I 型水泥及 II 型水泥。
- ② 摻加料：採用飛灰為台電公司火力發電廠所生產的，係燃煤炭粉所形成煤中之雜質，由於高溫溶化，被攜帶上昇，經空氣對流之摩擦冷卻，而形成玻璃球狀之空心圓球，經由靜電吸塵器收集之。
- ③ 水灰比採用 0.4、0.5、0.7、三種。
- ④ 水泥及摻加料之比例

單位：%

成分比例 水灰比	材料種類	水泥（卜特蘭第 I，II 型）	摻加材料（飛灰）
		水灰比採	100
0.4		80	20
0.5		60	40
0.7		40	60

- ⑤ 細砂採用大甲溪之河砂，直徑不大於 2.5mm，細度模數為 2.71。

① 拌合水：使用適合飲用之自來水。

### 3. 試體製作：

① 依照不同之水灰比，水泥種類及不同比例之摻料取代部份水泥分別製作水泥漿體。

② 水泥漿體充分搗實，使內部氣泡儘量驅出，以免試體產生孔隙，而影響擴散試驗。

③ 經攪拌後之水泥漿體分三層灌入高為 15cm，直徑為 7.5cm 之標準圓柱型鋼模內，每層須搗實 25 次。並移至振動桌上振動約一分鐘。

④ 經 24 小時養護後拆模，並將試體置於相對濕度為 100%，溫度  $23 \pm 0.7^\circ\text{C}$  之養生室內，養護 28 天。

### 4. 試驗準備

① 試片準備：將養護齡期達 28 天之試體取出後，以切割機截取直徑 7.5cm，厚約 0.5~1.0cm 之薄片，並用研磨機研磨平整。

② 將試體片置於如圖 10-1 所示之擴散試驗裝置位置上。

③ 容器室內左邊添加 1000ml 之蒸餾水，右邊則加入 1000ml 之 1N 之 NaCl 溶液進行擴散試驗。

④ 擴散時間達 14 天、40 天、50 天、80 天時，自蒸餾水槽取出 10ml 溶液，再填加純蒸餾水 10ml 入蒸餾水槽中。

⑤ 將取出之溶液以硝酸銀法滴定氯離子濃度，試驗原理及方法如下：

① 原理：於中性或微鹼性溶液中，以硝酸銀滴定氯鹽，用鉻酸鉀當指示劑，在紅色硝酸銀形成之前，氯化銀已沈澱。

② 試劑：

(i) 鉻酸鉀指示劑：取 5 公克之  $\text{K}_2\text{CrO}_4$  溶於少許蒸餾水中，加入  $\text{AgNO}_3$  溶液直至產生紅色沈澱，靜置 12 小時，過濾後，再用蒸餾水稀釋至 0.1 公升。

(ii) 標準硝酸銀滴定液，為 0.0141N，以 2.395g  $\text{AgNO}_3$  溶於蒸餾水中，稀釋 100 0ml，貯存於棕色瓶中。

(iii) 去干擾之特殊試劑。

• 酚酞指示劑

• 過氧化氫，(  $\text{H}_2\text{O}_2$  ) 30%。

③ 步驟：

(i) 準備水樣

取 10ml 溶液，加入 30ml 蒸餾水稀釋，若水樣含有硫化物，亞硫酸鹽或硫代硫酸鹽，加入 1ml  $H_2O_2$  攪拌 1 分鐘。

(ii) 滴定以  $H_2SO_4$  或  $NaOH$  調水樣，pH 值介於 7~10 之間加入 1ml  $K_2CrO_4$  指示劑。用  $AgNO_3$  滴至出現紅棕色。取 100ml 蒸餾水做空白試驗，一般消耗量在 0.2~0.3ml。

④ 計算：

$$mg\ Cl^- / l = \frac{(A - B) \times N \times 35450}{\text{水樣體積 (40ml)}}$$

式中 A = 水樣之滴定用量，ml

B = 空白試驗之滴定用量，ml

N =  $AgNO_3$  之當量濃度 (0.0141N)

⑤ 試體代號說明：

I 4 F20  
I 型水泥 ↑      ↑ 添加飛灰比例為 20%  
水灰比 = 0.4 ↑

5. 擴散係數計算

在時間為 t，第 n 次取量，共累積氯離子擴散量  $Q_t$  (mg) 和  $Q_{mt}$  (mole) 計算如下式：

$$Q_t = \frac{V_1}{1000} C_n + \frac{V_2}{1000} \sum_{i=1}^{n-1} C_i$$

$$Q_{mt} = \frac{Q_t}{1000} \div (\text{原子量})$$

其中： $V_1$ ：容器內溶液之數量 (ml)。

$V_2$ ：每次取出測量濃度之數量 (ml)。

$C_i$ ：各階段取出溶液之  $Cl^-$  濃度，單位為 ppm。

$C_n$ ：第 n 次取出溶液之  $Cl^-$  濃度，單位為 ppm。

以  $Q_{mt}$  為縱座標，t (小時) 為橫座標繪圖，由各點一次迴歸可得

Qmt-t關係曲線之斜率，擴散係數D (cm<sup>2</sup>/sec) 即可由下式決定：

$$D = \frac{\Delta Q_{mt} \text{ (mole)}}{\Delta t \text{ (sec)}} \div A \text{ (cm}^2\text{)} \times \frac{d \text{ (cm)}}{\Delta C \text{ (mole/cm}^3\text{)}}$$

其中 d：試片厚度。

A：擴散之斷面積。

ΔC：兩側溶液濃度差。

#### 四、結果與分析：

試驗結果如圖 10-2 至圖 10-7 及表 10-1 至表 10-7 所示。分析檢討如下：

1. 不同水泥種類對氯離子擴散係數之影響。由表 10-7 所示 II 型水泥與 I 型水泥比較，同樣配比材料之水泥漿體具有較大之擴散係數，當水灰比為 0.4 時，其比值為 1.11~2.04，水灰比為 0.5 時為 1.03~1.19，水灰比為 0.7 時，則為 0.97~1.07。故 II 型水泥之抑制氯離子擴散效果較 I 型水泥差。

2. 不同水灰比對氯離子擴散係數之影響

如表 10-7 所示使用同一種配水泥種類及摻料製作之材料水泥漿體之擴散係數將隨水灰比增加而遞增，在 I 型水泥中，未添加飛灰者，水灰比 0.7 之擴散係數約為水灰比 0.4 情況之 1.9 倍，添加量為 20% 者，約為 4.35 倍，添加量為 40% 約為 4.23 倍，而添加 60%，則約為 2.45 倍。在 II 型水泥中，則分別為 1.7、2.2、2.0、1.5 倍。

3. 添加飛灰對氯離子擴散係數之影響

由圖 10-2 至圖 10-7，氯離子擴散量與時間之關係所示，添加飛灰在 40% 以下時，能有效抑制氯離子的擴散，尤其添加量為 20% 者較佳，而添加 40% 時與添加 20% 時之數值相當接近，可見飛灰添加量在 20%~40% 時，能有效抑制氯離子的擴散。

但飛灰添加量為 60% 時，其抑制能力則明顯降低且較未添加者為低之現象，這可能是波索蘭材料 (Pozzlanic Material) 的添加使水泥漿體之孔隙增加<sup>(3)</sup>，在添加比例過大時，使得孔隙之連續空間增大，而促使更多之氯離子通過孔隙之故。

4. 由於離子擴散行為不僅因滲透性及離子結合力而異，亦受整個系統的離子交換能力的影響。滲透溶液種類和漿體孔隙交換扮演一個重要角色。影響擴散係數之因素還有水灰比，養護齡期，養護溫度，擴散環境及含混合材料數量之多寡等。

混凝土中水泥漿體或水泥漿與粗細骨材間之界面必須有效地控制空隙及混凝土本身之微裂縫均為離子擴散滲透之途徑。

從本試驗中，混凝土添加飛灰比例在20%~40%應有較佳之抑制氯離子效果。

### 參 考 文 獻

1. Taylor Woodrow Research Laboratories "Concrete in the Oceans - Marine Durability Survey of Tongul Sands Tower" Tech. Report No.5 CIRIA/UEG Cement and Concrete Association, Department of Energy London, 1980 pp86.
2. K. Takewaka and S. Mastumoto : "Quality and Cover Thickness of Concrete Based on Estimation of Chloride Penetration in Marine Environments", ACI Special Publication, SP-109 1988, pp384.
3. 王櫻茂，黃州屏：“含混合材料水泥硬化體之氯離子擴散”，國科會專題研究報告 NSC 77-0410-E006-31 民國77年7月，pp82.

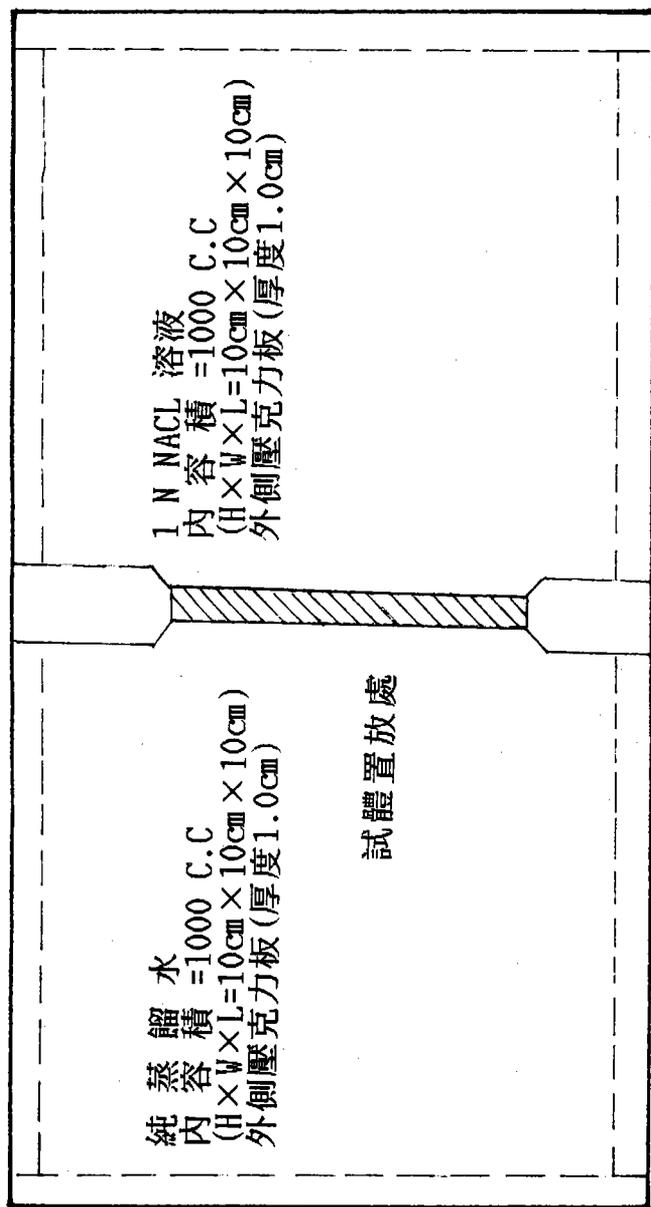


圖 10-1 氯離子擴散試驗裝置示意圖

I型水泥  
水灰比=0.4

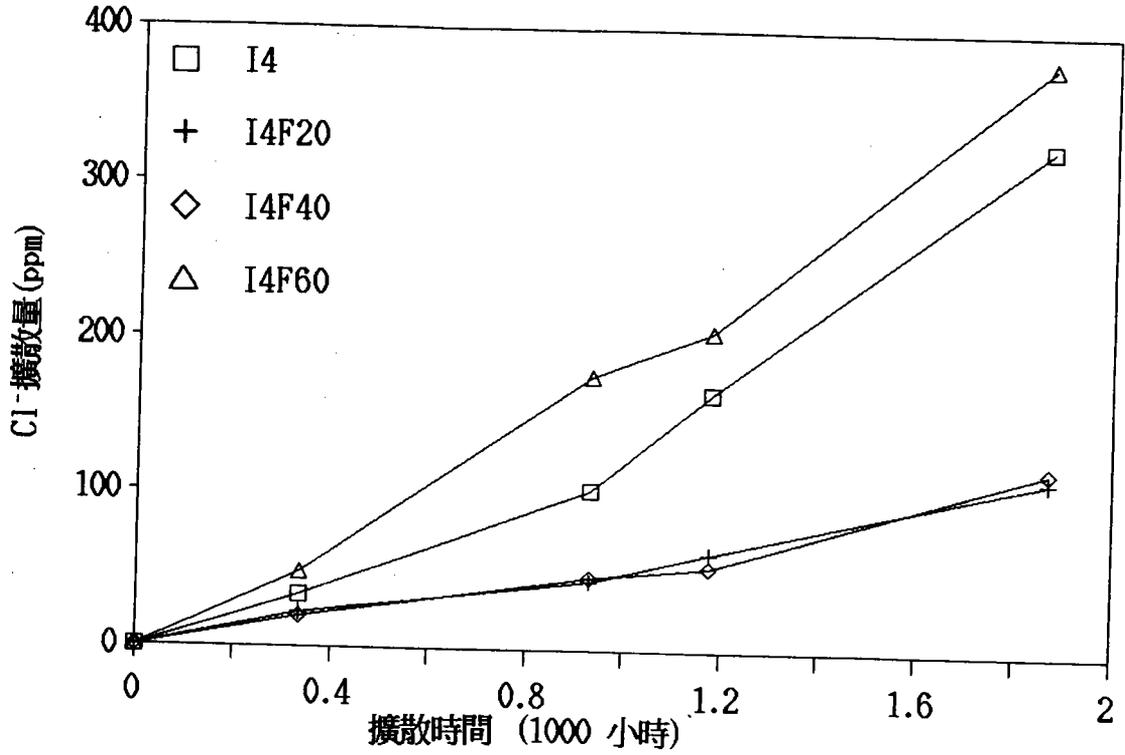


圖10-2 I型水泥,水灰比=0.4 Cl<sup>-</sup>擴散量與時間關係圖

I型水泥  
水灰比=0.5

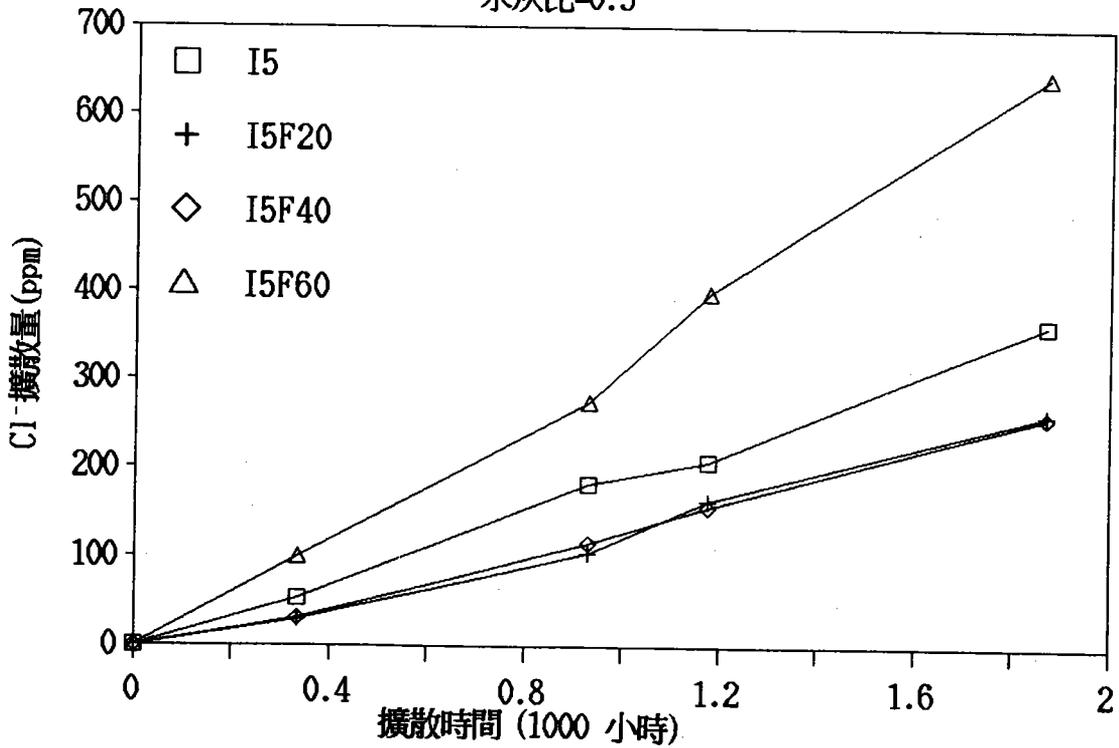


圖10-3 I型水泥,水灰比=0.5 Cl<sup>-</sup>擴散量與時間關係圖

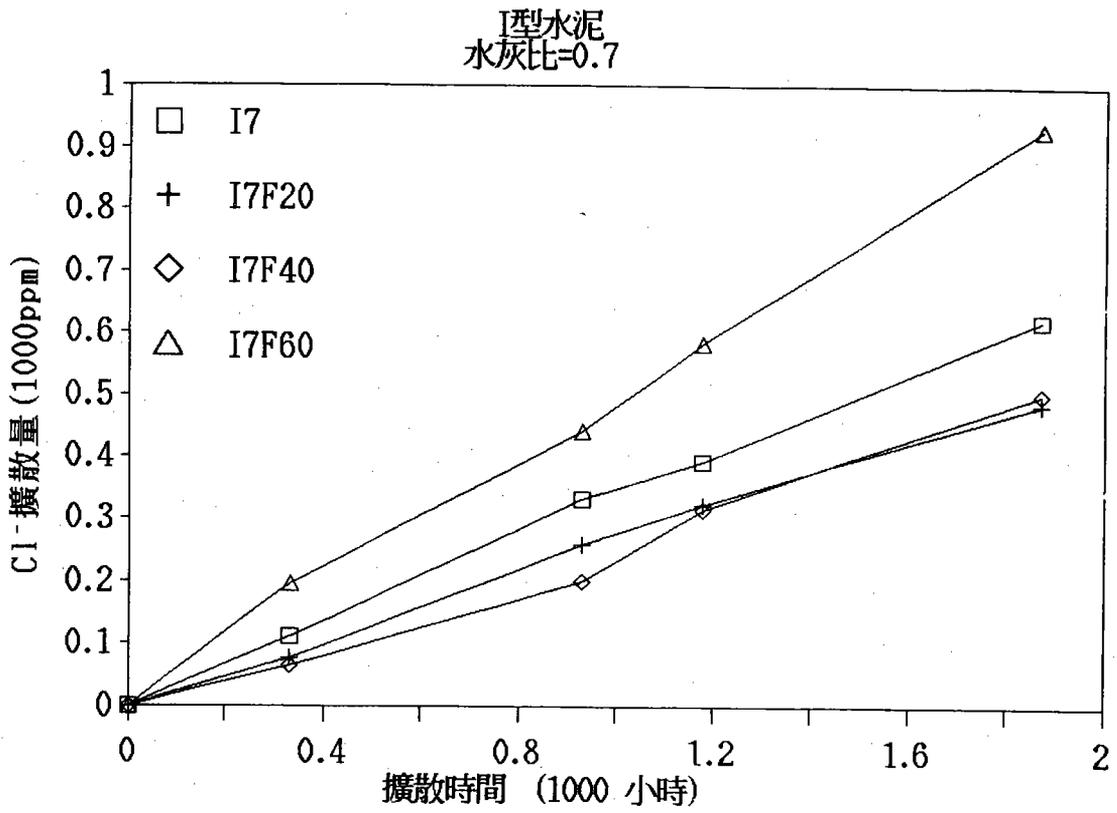


圖10-4 I型水泥,水灰比=0.7 Cl<sup>-</sup>擴散量與時間關係圖

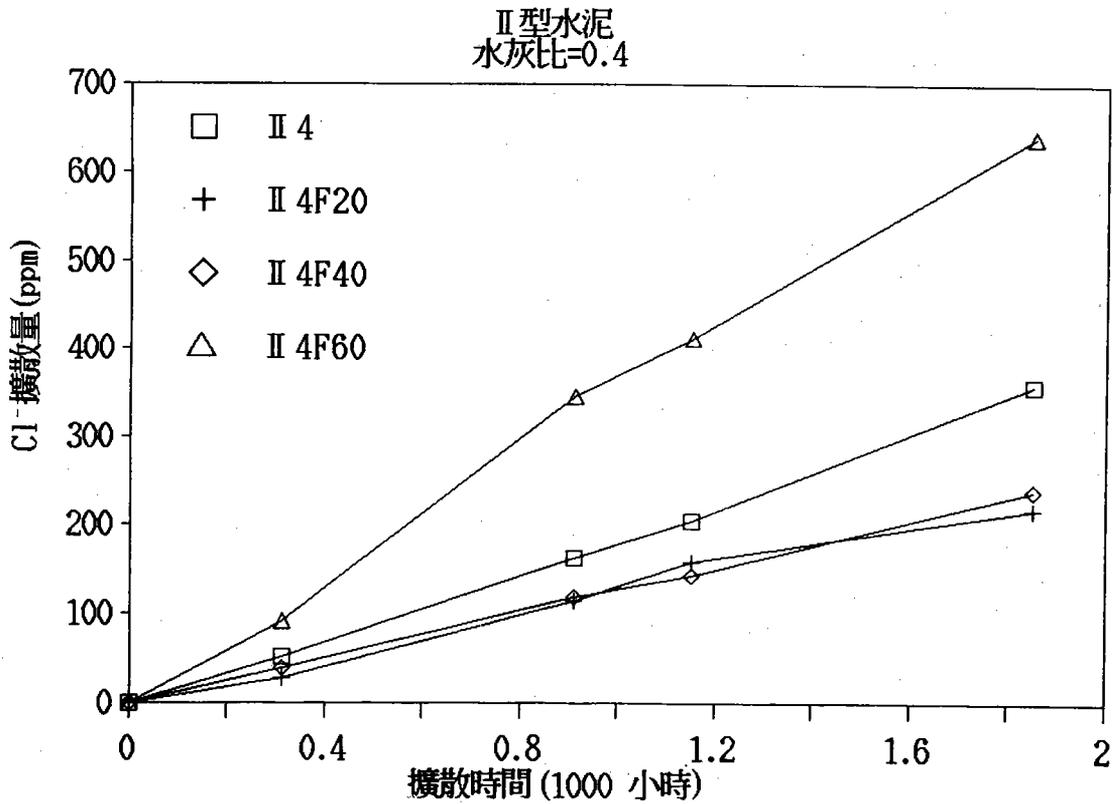


圖10-5 II型水泥,水灰比=0.4 Cl<sup>-</sup>擴散量與時間關係圖

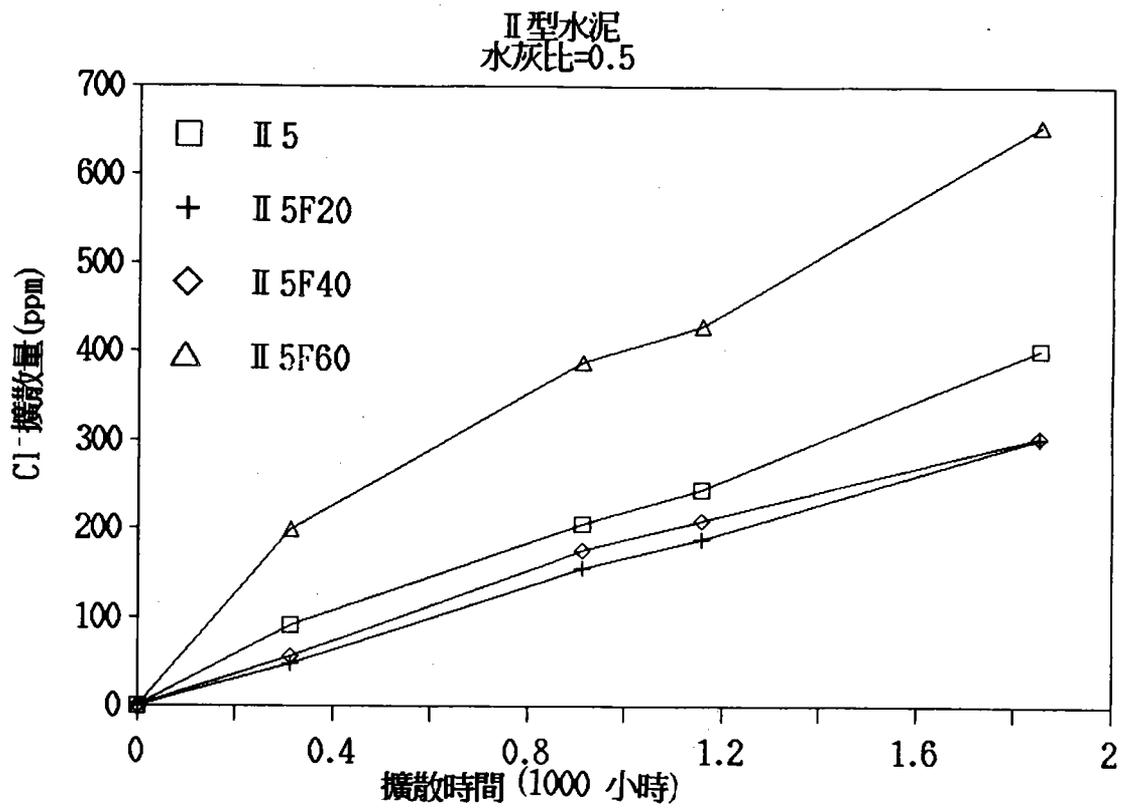


圖10-6 II型水泥,水灰比=0.5 Cl<sup>-</sup>擴散量與時間關係圖

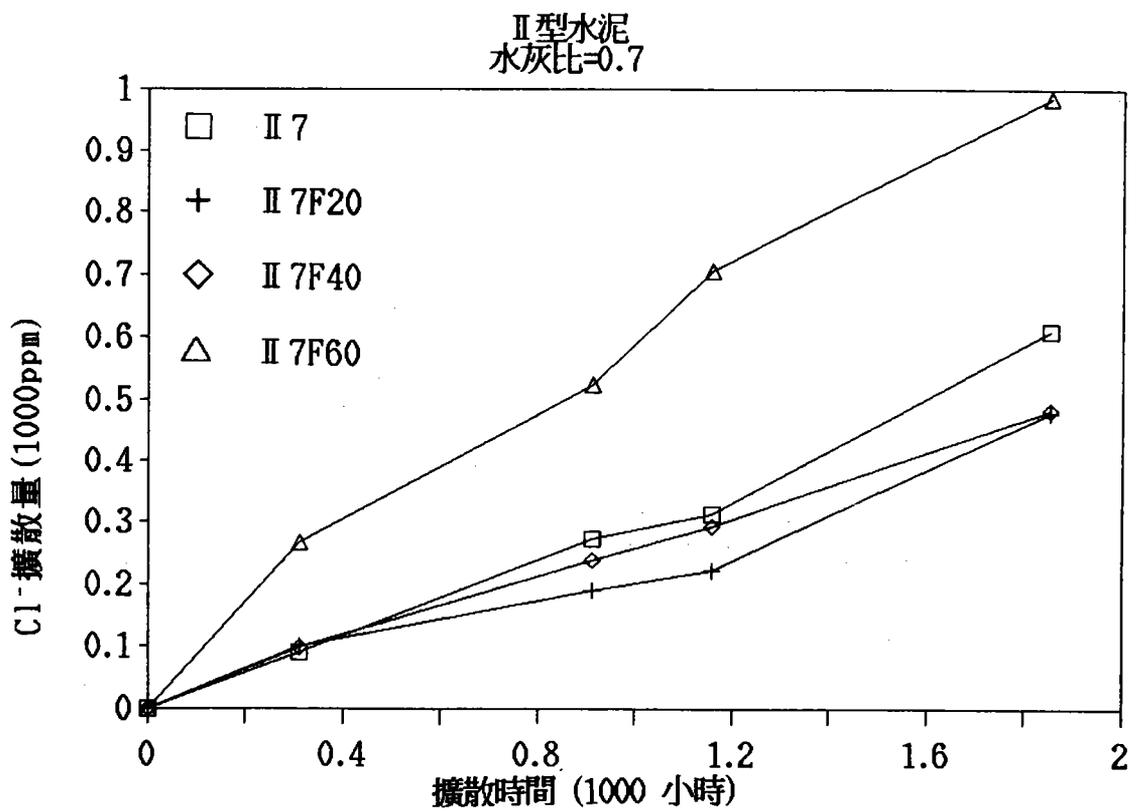


圖10-7 II型水泥,水灰比=0.7 Cl<sup>-</sup>擴散量與時間關係圖

表10-1 I 型水泥,水灰比=0.4 Cl<sup>-</sup>擴散數量(ppm)

時間 代號	334 小時	929 小時	1175 小時	1870 小時
I4	33.4	103.2	165.7	326.7
I4F20	22.3	44.7	63.3	111.7
I4F40	20.1	46.8	54.5	118.4
I4F60	48.2	176.8	205.7	379.6

表10-2 I 型水泥,水灰比=0.5 Cl<sup>-</sup>擴散數量(ppm)

時間 代號	334 小時	929 小時	1175 小時	1870 小時
I5	53.7	182.4	208.1	364.2
I5F20	29.4	104.4	164.4	262.2
I5F40	31.5	115.5	157.5	258.9
I5F60	100.4	274.4	400.0	645.3

表10-3 I 型水泥,水灰比=0.7 Cl<sup>-</sup>擴散數量(ppm)

時間 代號	332 小時	929 小時	1170 小時	1870 小時
I7	110.4	331.9	393.2	621.8
I7F20	76.9	259.1	323.9	485.7
I7F40	65.6	200.8	315.6	502.2
I7F60	196.4	440.7	583.5	930.9

表10-4 II型水泥,水灰比=0.4 Cl<sup>-</sup>擴散數量(ppm)

時間 代號	313 小時	912 小時	1152 小時	1852 小時
II 4	52.8	163.6	205.0	358.9
II 4F20	28.7	115.0	158.1	218.4
II 4F40	39.9	119.7	142.9	239.3
II 4F60	92.1	346.3	412.6	641.0

表10-5 II型水泥,水灰比=0.5 Cl<sup>-</sup>擴散數量(ppm)

時間 代號	312 小時	912 小時	1157 小時	1852 小時
II 5	92.5	204.8	245.0	403.1
II 5F20	47.8	156.3	188.2	303.0
II 5F40	56.1	175.2	210.2	304.8
II 5F60	200.0	388.9	429.6	655.6

表10-6 II型水泥,水灰比=0.7 Cl<sup>-</sup>擴散數量(ppm)

時間 代號	311 小時	912 小時	1157 小時	1852 小時
II 7	91.1	273.3	313.8	611.6
II 7F20	100.7	190.1	222.3	479.4
II 7F40	100.1	239.5	293.1	483.8
II 7F60	266.6	523.8	705.9	986.0

表10-7 Cl<sup>-</sup>擴散係數

試體代號	擴散係數 <sup>1</sup> (10 <sup>-9</sup> cm <sup>2</sup> /sec)	試體代號	擴散係數 <sup>2</sup> (10 <sup>-9</sup> cm <sup>2</sup> /sec)	擴散係數 <sup>2</sup> ————— 擴散係數 <sup>1</sup>
I 4	31.0 (1.0)	II 4	34.4 (1.0)	1.11
I 4F20	10.6 (1.0)	II 4F20	20.9 (1.0)	1.97
I 4F40	11.2 (1.0)	II 4F40	22.9 (1.0)	2.04
I 4F60	36.0 (1.0)	II 4F60	61.4 (1.0)	1.70
I 5	34.5 (1.11)	II 5	38.6 (1.12)	1.12
I 5F20	24.9 (2.34)	II 5F20	29.0 (1.39)	1.16
I 5F40	24.6 (2.20)	II 5F40	29.2 (1.27)	1.19
I 5F60	61.2 (1.70)	II 5F60	62.8 (1.02)	1.03
I 7	59.0 (1.90)	II 7	58.6 (1.70)	0.99
I 7F20	46.1 (4.35)	II 7F20	45.9 (2.20)	0.99
I 7F40	47.7 (4.20)	II 7F40	46.3 (2.00)	0.97
I 7F60	88.3 (2.45)	II 7F60	94.4 (1.50)	1.07

說明：( )內為相同水泥或摻料不同水灰比之擴散係數比

# 拾壹 結論與建議

林 維 明\*

## 11-1 結論

綜合本研究調查與試驗結果，可得到下列結論：

1. 在風速風向分佈情形而言，台中港主風向為北風，基港為東北風，高雄西南季風較盛行，而風向分佈較為平均，東部海岸則分散在東北與西南兩風向，結構物受風面則容易受強勁之海風所挾帶之海鹽侵襲而發生腐蝕現象。
2. 就降雨量而言，冬季兩季以基隆港為最高。花蘇兩港次之，春季則以台中港較高，高港次之，夏季則以高雄港較多。在夏季五大港之氣溫變化小，冬季則南北兩地區溫差變化大，蘇澳與基隆多雨與靠山，因此其相對濕度高。而本省酸雨現象相當普遍，蘇澳地區由於石灰岩礦之開採，灰塵濃度高，因此酸雨偏高，東海岸如花蓮酸雨現象較不嚴重。台中港之潮差較，結構物容易受乾濕反覆作用。
3. 由海水水質分析結果顯示蘇澳港之硫酸根離子與氯離子含量均為最高，為處於較嚴重之腐蝕環境，高雄港 30 號碼頭位於台電公司之火力發電廠溫排水口處附近，因此有 pH 值偏低，溶氧量較低及水溫較高等現象，花蓮港之溶氧量較高，可能由於海洋污染性低之故，各港之平均 pH 值，水溫和導電度等之變化不大。
4. 根據基隆港現場腐蝕調查結果發現碼頭的混凝土強度及水密性均較倉庫為高，倉庫之中性化較碼頭為高，而  $MgO$ ， $SO_3^{2-}$  及  $Cl^-$  侵入結構體則以碼頭較倉庫為高。
5. 根據台中港現場腐蝕調查結果發現其抗壓強度低，透水係數高，骨材呈扁平狀，級配不良，致使孔隙增加，水密性欠佳，而有害離子含量高，23 號碼頭潮汐

---

\*省交通處港灣技術研究員兼港工材料組組長

帶之腐蝕電位已超過 $-600\text{mV}$ ，顯示混凝土內之鋼筋蝕，應即時進行維修工作。

6. 高雄港現場腐蝕調查結果發現 38 號碼頭及中州碼頭潮汐帶之氯離子含量高，腐蝕電位亦高，顯然已達嚴重之腐蝕，而岸邊 3 號倉庫，柱面的混凝土體內有害離子之含量較少，腐蝕電位亦較低，鋼筋腐蝕情形不嚴重。
7. 花蓮港內於使用健性優良的骨材，因此結構物之性能表現良好。
8. 蘇澳港九號碼頭結構物中之氯離子含量高，腐蝕電位亦高，顯示已達嚴重之腐蝕情況。
9. 由於長期曝露試驗第一批試體於民國 77 年 10 月 7 日擺放於台中港 3 號頭附近貯本碼頭斜坡上，曝露時間一年及二年後分別取回實驗室進行腐蝕電位量測及劈裂試體觀測結果發現大部份試體發鋼筋銹蝕位置均集中於圓柱體上下兩底側，該處保護層僅 1.5 公分，混凝土材質分佈不均勻，造成電位差產生局部腐蝕現象，另外保護層厚度較小及水灰比較高，為鋼筋容易發生腐蝕現象之原因。
10. 擺設於本所海水循環水槽之試體於民國 78 年 8 月 15 日擺設完成，曝露一年後，試驗結果發展使用環氧樹脂或鍍鋅之鋼筋不容易銹蝕，而使用高爐石，飛灰及矽灰取代水泥量之試體中之普通鋼筋大部份尚未發現有生銹現象。而有些試體生銹位置是在試體上下兩底端及保護層層厚度 2 公分之情況下發生的。
11. 台中港區油污染日漸嚴重，試體外表均沾有一厚層油污，可能對試驗結果構成影響，灌製不良有蜂窩或孔洞之試體，海水易入侵而鋼筋提早生銹。
12. 擺設於大氣區曝露試體於民國 79 年 5 月擺放於本所試驗大樓三樓屋頂上，距台中港碼頭約 250 公尺，曝露試體按十、十五及二十年之齡期製作。目前尚無實驗之數據。
13. 中性化深度隨時間增加而遞增，各種試體置於加速箱內與在大氣中之中性化速率比較發現增加很多。
14. 水泥種類比較，發現爐石水泥製作之試體之中性化速率為最快，其次是摻加飛灰，再次為矽灰，而最慢者為卜特蘭一型水泥所製作之試體。為防止中性化宜採用卜特蘭一型水泥。
15. 水灰比 0.7 之中性化速率為最快，0.5 次之，0.4 為最慢，顯然水灰比大，則孔隙率大，二氧化碳容易侵入之故。

16. 由混凝土之氯離子擴散試驗結果發現使用卜特蘭 I 型水泥有抑制氯離子侵入結構體之效果，擴散係數隨水灰比增加而遞增，飛灰填加量在 20-40% 可有效地抑制氯離子侵入結構體，而在 60% 時，則產生反效果。

## 11-2 建議

由於本省地處極易腐蝕之海洋環境，港灣鋼筋混凝土結構物極易腐蝕，為保持其耐久性，建議今後應持續進行下列研究工作：

1. 繼續蒐集各港灣之大氣及海洋環境資料，調查 RC 結構物破損原因及分析環境因子對 RC 結構物劣化之影響性。
2. 本省酸雨現象已相當普遍，pH 值均在正常的 5.6 以下，酸雨問題已日趨嚴重，對硫化物之加強管制實已刻不容緩，否則勢必嚴重發生結構物腐蝕問題。
3. 加強調查現有結構物氯離子侵入之滲透速率並以數學模式估算鋼筋開始發銹蝕時間，以供評估結構物使用壽命之依據。
4. 發展控制腐蝕因子之試驗方法如現場簡易量測中性化與氯離子含量方法及非破壞性檢驗腐蝕電位，混凝土電阻，交流阻抗法量測腐蝕速率，鋼筋保護層厚度測定儀，貫入試驗等偵測系統之適用性，優劣點及鑽心取樣分析技術探討研判混凝土及鋼筋惡化範圍與程度之技術。
5. 繼續在不同的海域進行曝露試驗，以探討各種腐蝕參數對腐蝕之影響及發展延緩鋼筋腐蝕之策略。
6. 進行混凝土受乾濕及凍融循環作用下之加速試驗。
7. 繼續進行交流阻抗法量測腐蝕速率之加速試驗之深討。
8. 使用熱示差儀或其他儀器設備再繼續進行中性化加速試驗，建立二氧化碳侵入混凝土速率之預報公式。
9. 儘早建立環境因子對混凝土作用之數學模式，以供初選混凝土製作配比之參數，及符合所需設計年限之要求。
10. 政府有關單位應儘早檢討與制定適用於國內環境之下，港灣鋼筋及預力混凝土結構物設計施工及維修之規範。
11. 設計、施工與使用單位應遵循海洋混凝土規範，配合海域環境條件對材料選用，防蝕措施及施工技術作適當之評估。

12. 業主在施工完成後，應定期檢查作成病歷表隨時追蹤發現惡化應詳細調查惡化之程度與範圍。評估選用適當之補修材料與方法，並追蹤檢查補修後之抑制效果，最適當的方法是在重大工程施工時安裝腐蝕偵測系統，因此當發現銹蝕時，可即時作維修處理，而且政府單位應寬列防蝕之預算，適時與適當地執行維修工作，否則將因腐蝕問題而迫使重建，影響使用之效率或危及安全。
13. 港灣 RC 及 PC 結構物之腐蝕調查與維修工作需由具有防蝕經驗者參與，才能彙整剖析調查結果，供作設計與施工規範依據，提昇防蝕技術。
14. 港灣 RC 結構物常年受海浪之持續作用，應加強研究腐蝕疲勞之問題。
15. 國內應定期舉行學術研討會將 RC 及 PC 腐蝕調查研究，維修技術，經濟效益及工程實務等經驗心得報告以提昇及推動國內港灣鋼筋混凝土之防蝕研究技術水準。
16. 應建立應用掃描式電子顯微鏡、X光繞射分析儀及能量色散儀等微觀儀器檢測與研判混凝土結構物中混凝土劣化及鋼筋銹之生成物特性之鑑定技術能力。
17. 徹底瞭解鋼筋混凝土腐蝕之機理。
18. 發展 RC 結構物防蝕對策，確保工程安全。
19. 發展概率理論，建立定量之 RC 結構物耐久性設計程序模式，可供使用壽命之設計。
20. 研究如何保護鋼筋不受鹽害破壞其鈍態膜之工程實務。

# 附件(一)

環境保護與生態保育研討會 論文專集  
中華民國77年4月, 205~229頁

## THE PRIMARY SEAWATER COMPOSITION ANALYSIS OF FIVE MAJOR HARBORS IN TAIWAN

Wei-Ming Lin \* Kuei-Ching Chen\*\* Cliff C. Rau\*\*\*

Shin-Sheng Wu\*\*\*\*

### ABSTRACT

There are many chemical compositions in seawater. Some ions are the major corrosive factors of harbor engineering structures. The purpose of this research on the seawater chemical analysis quality of five major harbors in Taiwan is to investigate the major ions composition of seawater in each harbor. The seawater samples were taken in four seasons, higher water level & lower water level in seawater surface, 1m & 2m depth.

In this primary study, it is found the chloride ion ( $Cl^-$ ) values are very high. Comparison of  $Cl^-$  values in the five major harbors, the  $Cl^-$  values of seawater in Taichung harbor is maximum ( $\approx 1.9 \times 10^4$  ppm). The higher  $Cl^-$  values will increase the risk of corrosion of harbor engineering structures. There are many industry areas around Kaohsiung harbor, therefore the highest sulfide ( $S^{2-}$ ) value exists in this harbor. The values of sulfate ( $SO_4^{2-}$ ) in each harbor is about 2500-3000 ppm.

It is hoped that the study will be useful for corrosion research in harbor engineering structures.

---

\*Researcher, Head of Harbor Engineering Material Division, Institute of Harbor & Marine Technology, Taiwan, R.O.C.

\*\*Associate Researcher, Institute of Harbor & Marine Technology, Taiwan.

\*\*\*Assistant Researcher, Institute of Harbor & Marine Technology, Taiwan.

\*\*\*\*Research Assistant, Institute of Harbor & Marine Technology, Taiwan.

## 1. INTRODUCTION

Most harbor engineering structures are in intimate contact with the sea, a mobile complex corrosive chemical solution whose nature should be understood before structures are designed to survive in it.

It is conventional to consider the ocean as a solution of major and minor ions, gases and nutrients, with particular matter of varying degrees of activity in suspension in it. Table 1 lists the content of 77 elements in parts per million (ppm) by weight of the dissolved material in the sea are  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{S}^{2-}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Ca}^{+2}$  etc. In which  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{S}^{2-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{O}_2$  etc. are the agents may affect marine biological distribution and the durability of harbor engineering structures. The purpose of this research is to take the seawater composition analysis of the five major harbors in Taiwan, in order to understand the seawater quality for taking techniques to detect and minimize the existing corrosion of structures and design built-in protection against corrosion for new structures.

## 2. FIELD SURVEY

The suitable location for taking seawater sampling is dependent on the different layout of wharfs in each harbor. There are six locations in Keelung harbor, 7 in Kaohsiung harbor, 5 in Taichung harbor, 6 in Hualien harbor and 5 in Suao harbor etc. had been chosen. In each location, the data of PH values, water temperature and the concentration of dissolved oxygen etc. are measured in-situ by using automatic seawater chemical analyzing meter. In order to understand the season and water level and depth variation of seawater chemical quality, the measured period were selected at high water level (HWL) and low water level (LWL) period during the day in each season respectively. And the measured positions are at seawater surface, 1m & 2m below seawater surface etc. respectively. Also seawater samples are taken for chemical composition analysis. The locations for taking seawater

sampling are shown in Fig 1-5 and the survey procedure is shown as Fig 6.

### 3. SAMPLE ANALYSIS METHODS

Seawater has variety of chemical compositions. In which,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{S}^{2-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , are the major corrosive factors of harbor engineering structures. Therefore, analysizing these three major ions contents is the primary work in seawater quality analysis.

1. Methods for determining  $\text{Cl}^-$  content are listed as follows :

- (A) Argentometric method
- (B) Mercuric nitrate method
- (C) Potentiometric method
- (D) Automated ferricyanide method

The content of  $\text{Cl}^-$  obtained in this paper was determined by argentometric method. It could be explained briefly as follows :

(1) Principle

In a neutral or slightly alkaline solution, potassium chromate can indicate the end point of the silver nitrate titration of chloride. Silver chloride is precipitated quantitatively before red silver chromate is formed.

(2) Reagents

- a. Potassium chromate indicator solution : Dissolving 50g  $\text{K}_2\text{CrO}_4$  in a little distilled water. Adding silver nitrate solution until definite red precipitate is formed. Let stand 12 hr, and dilute to 1 liter with distilled water.
- b. Standard silver nitrate titrant, 0.0141 N. ( N : equivalent conc. of  $\text{AgNO}_3$  )
- c. Standard sodium chloride, 0.0141 N.
- d. Special reagents for removal of interference :
  - 1) Aluminum hydroxide suspension.

- 2) Phenolphthalein indicator solution.
- 3) Sodium hydroxide, NaOH, 1N.
- 4) Sulfuric acid, H<sub>2</sub> SO<sub>4</sub>, 1N.
- 5) Hydrogen peroxide, H<sub>2</sub> O<sub>2</sub>, 30%

(3) Experimental procedure

a. Sample preparation :

- . Use a 100ml sample or a suitable portion diluted to 100ml.
- . If the sample is highly colored, adding 3ml Al(OH)<sub>3</sub> suspension, mixing, let it settle, filtering, washing, and combine filtering, and washing.
- . If sulfide, sulfite, or thiosulfate are present, adding 1 ml H<sub>2</sub> O<sub>2</sub> and stirring for 1 min.

b. Titration :

- . Titrate sample in the PH range 7 to 10 directly.
- . Adjust samples besides this range with H<sub>2</sub> SO<sub>4</sub> or NaOH solution.
- . Add 1.0ml K<sub>2</sub> CrO<sub>4</sub> indicator solution.
- . Titrate with standard silver nitrate titrant to a pinkish yellow in the end point.
- . Be consistent in the end-point recognition.
- . Standardize the silver nitrate titrant and establish the reagent blank value by using the titration method outlined above.
- . A distilled water of 0.2 to 0.3 ml is used for the blank method.

(4) Calculation

$$\text{mg/l Cl} = \frac{(A-B) \times N \times 35450}{\text{ml sample}}$$

where A = ml titration for sample,

B = ml titration for blank, and

N = normality of  $\text{AgNO}_3$ ,

$$\text{mg/l} = \text{mg/l Cl} \times 1.65$$

2. Methods for determining  $\text{S}^{2-}$  content are listed as follows:

- (A) Methylene blue method
- (B) Titrimetric ( Iodine ) method

The first method was applied in this research to determine the content of  $\text{S}^{2-}$  in the seawater sample.

3. Methods for determining  $\text{SO}_4^{2-}$  content are listed as follows :

- (A) Gravimetric method with ignition of residue.
- (B) Gravimetric method with drying of residue.
- (C) Turbidimetric method.

Turbidimetric method was used in this research to determine the content of  $\text{SO}_4^{2-}$  in the seawater sample.

## 4.RESULTS AND DISCUSSIONS

The field survey work were executed from Nov. 1986 to Oct. 1987. The retrieved samples during the spring & winter seasons were analyzed by Dept. of Environmental Engineering, National Chung-Hsing University. And the retrieved samples of the summer & autumn were analyzed by ourself in the lab. of our Institute. The extreme values of seawater chemical nature of each harbor are shown in Table 2-5.

For comparison, the average seawater chemical nature of five harbors are figured as shown in Fig 7-11. There are some dominating phenomena could be discussed described and discussed as follows :

1. The average seawater chemical nature of five harbors( shown on Fig 7-11 )

(1) Average seawater temperature

Spring : max. value of 28.1  $^{\circ}\text{C}$  in Taichung harbor; min. value of 18.3

°C in Keelung harbor.

Summer : max. 30.7 °C in Tachung harbor; min. 26 °C in Keelung harbor.

Autumn : max. 29.5 °C in Kaohsiung harbor; min. 15.1 °C in Taichung harbor.

Winter : max. 25.9 °C in Kaohsiung harbor; min. 16.1 °C in Taichung harbor.

The variation of average seawater temperature are small in different water depth and tidal level of each harbor. But in the case of low water level at Taichung harbor. There are an obvious temperature variation at different water depth.

(2) Average PH values

Spring : max. value of 8.9 in Taichung harbor; min. value of 8.0 in Suao harbor.

Summer : max. 8.7 in Hualien harbor; min. 8.0 in Taichung harbor.

Winter : max. 8.3 in Taichung harbor; min. 7.7 in Kaohsiung harbor.

The variation of average PH values are small for different tidal level and water depth.

(3) Average dissolved oxygen

Spring : max. values in Taichung harbor ( 6.7 & 7.6 mg/l in HWL & LWL respectively )

min. values in Keelung harbor ( 3.5 & 3.4 mg/l in HWL & LWL respectively )

The max. values also in Taichung harbor during summer. Autumn & winter etc. with the value of 5.8 & 5.4 mg/l; 6.7 & 6.3 mg/l; and 6.7 & 7.6 mg/l of HWL & LWL respectively. Whilst the min. values are in Kaohsiung harbor during Summer, Autumn & Winter etc. with the values of 3.7 & 2.3 mg/l; 3.6 & 6.1 mg/l and 3.3 & 3.9 mg/l of HWL & LWL respectively. The dissolved O<sub>2</sub> variation by water depth is obvious

in Taichung harbor, also the values at each season in this harbor are highest among these five harbor.

It has an obvious abnormal case of Kaohsiung harbor at water surface of autumn low water level should be check again.

#### (4) Chloride content

The max. value in spring, summer & autumn, winter etc. are in Taichung, Kaohsiung, Suao, & Keelung harbor respectively with values of  $1.93 \times 10^4$ ,  $1.87 \times 10^4$ ,  $1.97 \times 10^4$  &  $1.6 \times 10^4$  ppm etc. There are more obvious variation in different depth at each harbor.

#### (5) Sulfide content

In Kaohsiung, there are highest sulfide content in spring, summer & winter season with values of 0.14 & 1.05; 0.21 & 0.17 and 0.06 & 0.51 ppm in HWL & LWL respectively, Whilst the sulfide content is very small (about 0.01-0.02 ppm) at these five harbor during autumn season.

There are many industry area around Kaohsiung harbor, therefore the air pollution and water pollution is severe in this harbor; Its sulfide content is obviously higher than another four harbor.

#### (6) Sulfate content

The sulfate content of Kaohsiung harbor is highest with 2850, 2650 & 2910 ppm at spring, summer, & winter. And Suao harbor is highest with 3100 ppm at Autumn. The variation of sulfate content for different water depth is obvious in each harbor.

### 2. The extreme seawater chemical nature of five harbors.

Table 2-5 list the extreme seawater chemical nature of five harbor in four season, It could be concluded the following obvious phenomenon :

- (1) There are higher different values of dissolved oxygen, PH,  $Cl^-$ ,  $S^{2-}$ ,  $SO_4^{2-}$  ect. in Kaoshiung harbor, The reason may be explained as it adjoins to the industry area, the severe water pollution condition

cause these phenomena. And there are minor difference in Hualien harbor, Because there are some stream near the harbor, the fresh water of streams will dilute the seawater chemical content of this harbor.

- (2) There are larger variation for different location & water depth, e.g. the  $\text{Cl}^-$  content increased by water depth in winter season, In order to explain these phenomena. It should take more further research. The extreme value of  $\text{Cl}^-$  is 2100 ppm in Taichung. How to explain it?

## 5. CONCLUSION AND SUGGESTION

### 1. Conclusion

- (1) The  $\text{Cl}^-$  content are very high in each harbor. The more high content of  $\text{Cl}^-$ , more easy for the deterioration the harbor reinforced concrete structures.
- (2) Sulfate & sulfide content of Kaohsiung harbor is higher comparing with another harbor. It could be explained as its adjoining to the industry area.
- (3) The values of seawater chemical natures in Kaohsiung are vary greatly at different location. May be the retrieved seawater sample had been polluted already. Whereas the seawater chemical natures are the same for different location in Hualien harbor. This fact could be explained as the seawater had been diluted by the fresh water of nearby stream.

### 2. Suggestion

- (1) The seawater temperature of Taichung harbor are variant, therefore, it should take further research to recognize the phenomenon.
- (2) The variation of seawater quality is not severe for water depth 0-2 m, the sensor should extend to more deep for understanding the variation of chemical natures of seawater with relation to water depth.

- (3) The shield effect, stream, oceanographic & meteorological etc. will influence the seawater quality. These factors should be considered more carefully during further study.
- (4) Water pollution prevention should be considered in each harbor in order to extending the service life of harbor engineering structures.

## ACKNOWLEDGE

The authors should thank to the member of harbor Engineering Material Division of our Institute for their endeavor in the field survey and the researcher of each harbor for their kindly help during our field survey work.

## REFERENCE

1. Myers, J.J., C.H. Holm & R.F. McAllister (1969) "Handbook of Ocean and Underwater Engineering" 1969. pp. 302-309 ; 460, 493-508.
2. APHA-AWWA-WPCF (1975) "Standard Methods for the Examination of Water Wastewater" 14th edition pp. 302-309; 460, 493-508.
3. Chinese Petroleum Institute (1976) "Corrosion Protection of Offshore Oil, Gas Production Equipment" Research Report (in Chinese) pp.21-23.
4. Institute of Harbor and Marine Technology (1987) "Durability of Harbor Reinforced Concrete Structures" Research Report (in Chinese) pp. 3/7-3/19 , 5/3-5/7, 6/1-6/32.

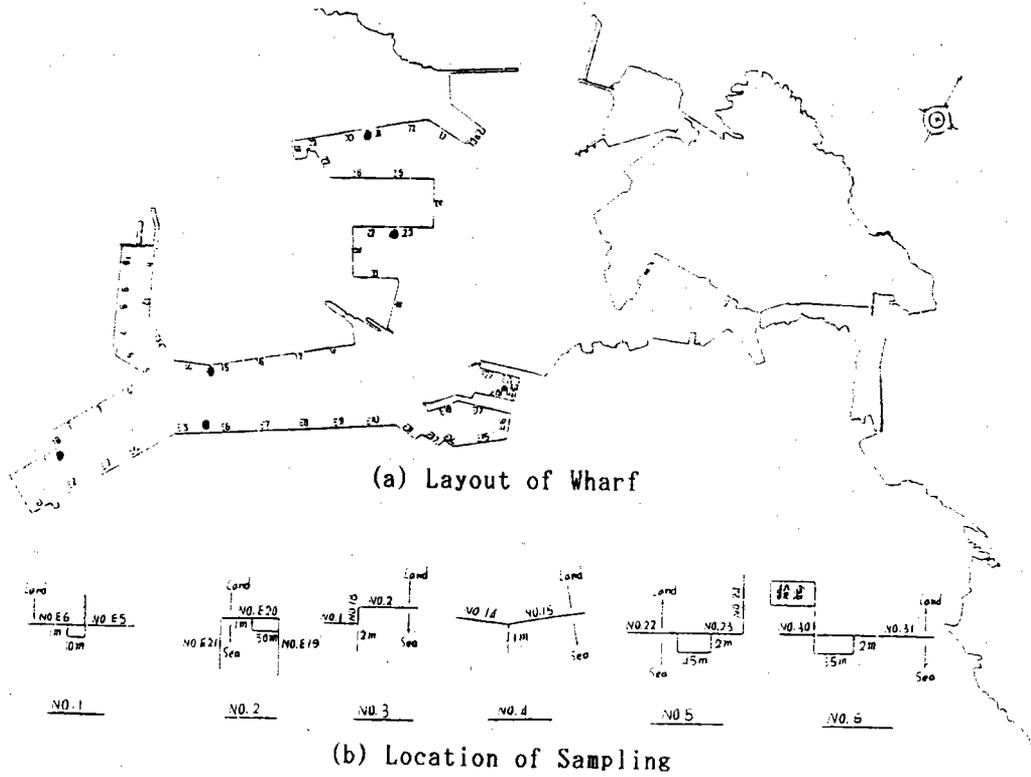


Fig 1. Layout of Keelung Harbor and Location of Sampling

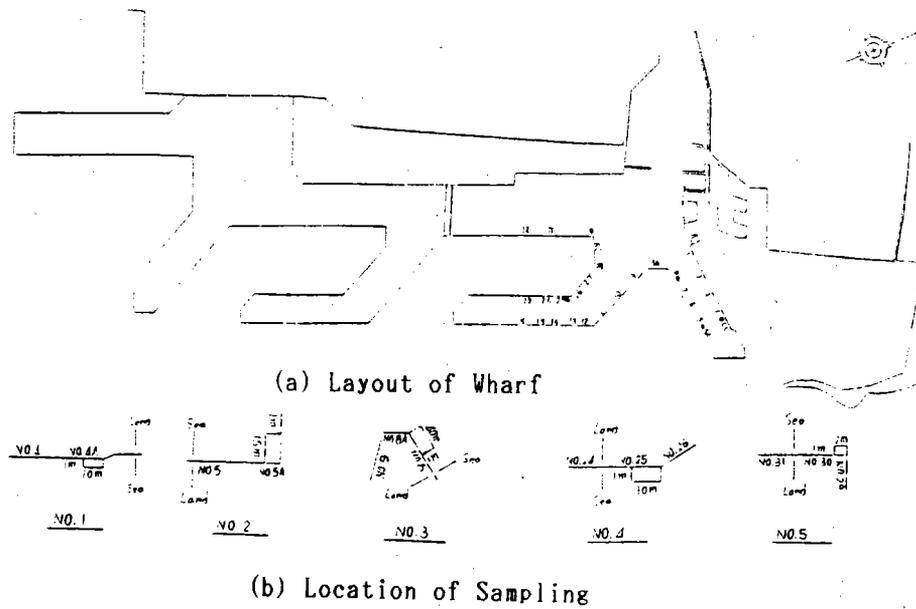


Fig 2. Layout of Taichung Harbor and Location of Sampling

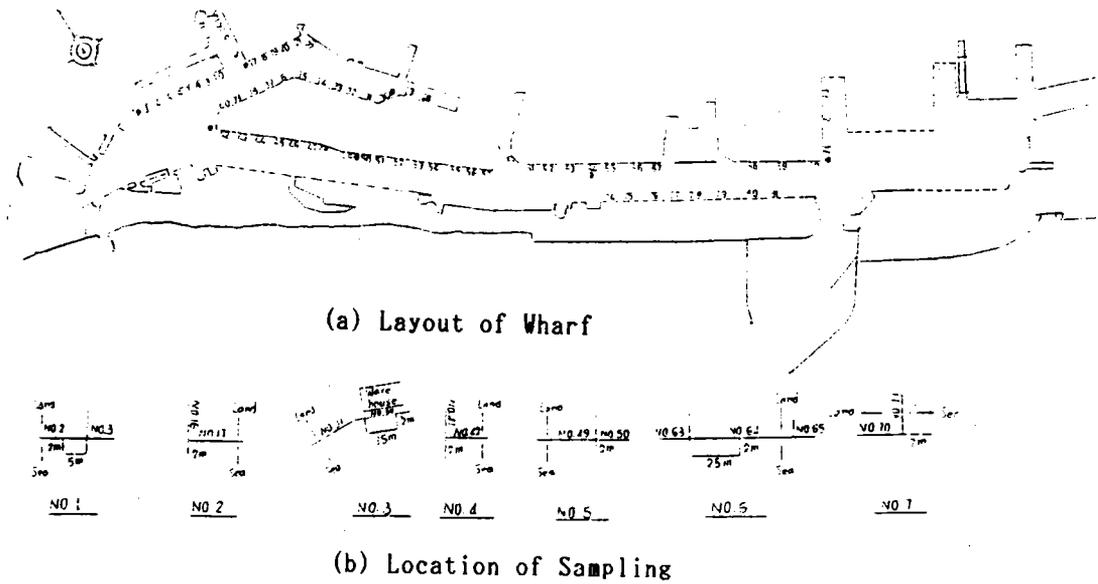


Fig 3. Layout of Kaohsiung Harbor and Location of Sampling

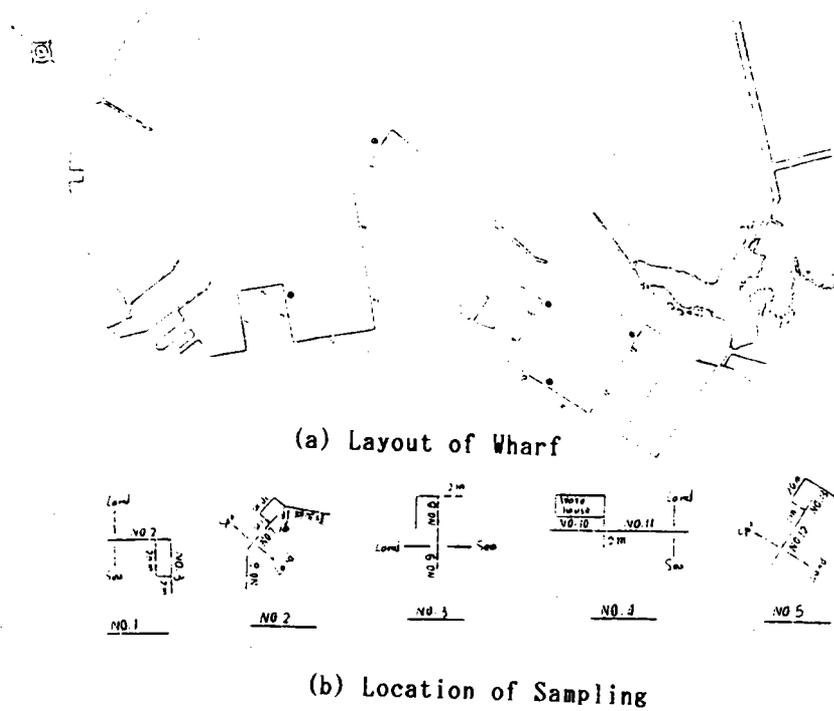


Fig 4. Layout of Suao Harbor and Location of Sampling

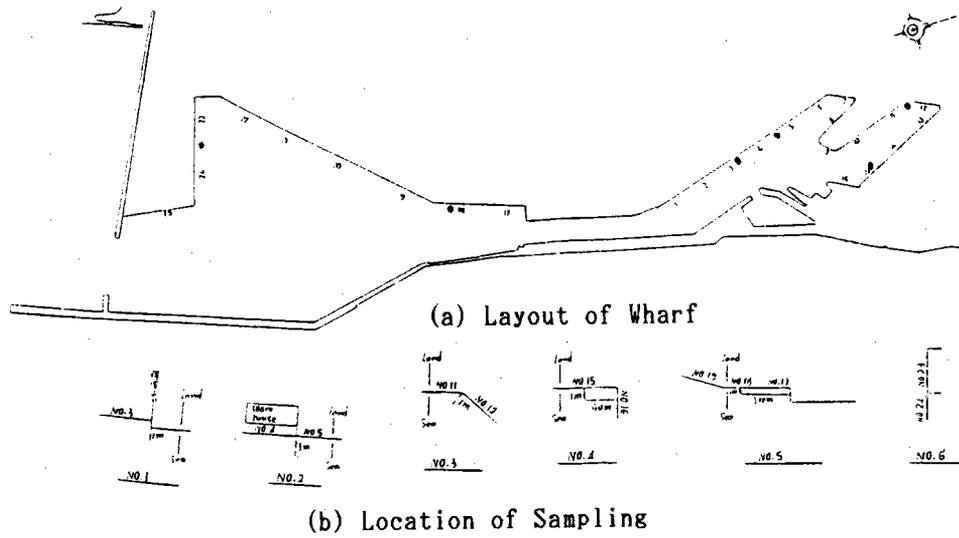


Fig 5A Layout of Hualien Harbor and Location of Sampling

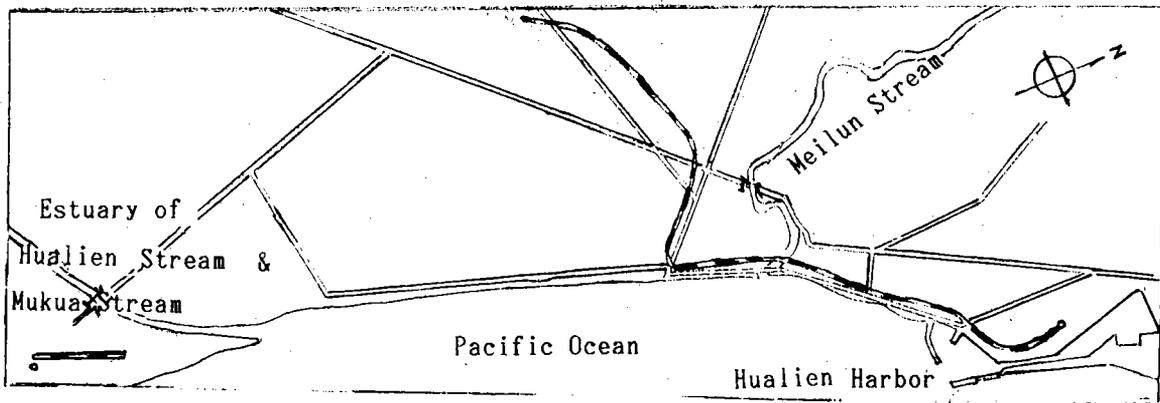


Fig 5B The Stream System in Hualien Harbor Area



(1) Automatic Seawater Chemical Analyzing Meter



(4) Taking Seawater Sample



(2) Putting Sensor into Seawater



(5) Retrieved Seawater Sample to Laboratory



(3) Measuring the Seawater Chemical Nature

Fig 6. The In-Site Survey Procedure

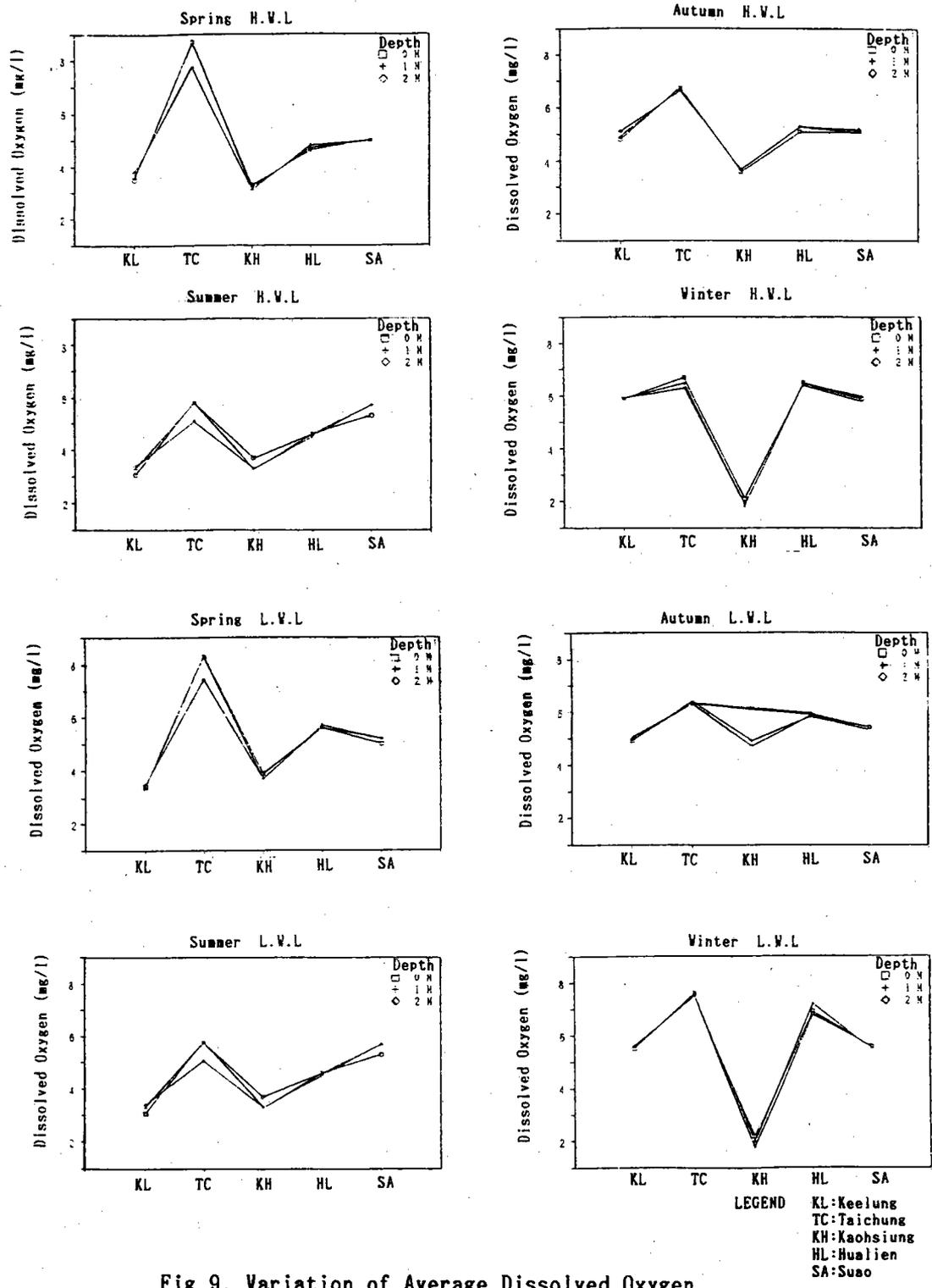


Fig 9. Variation of Average Dissolved Oxygen

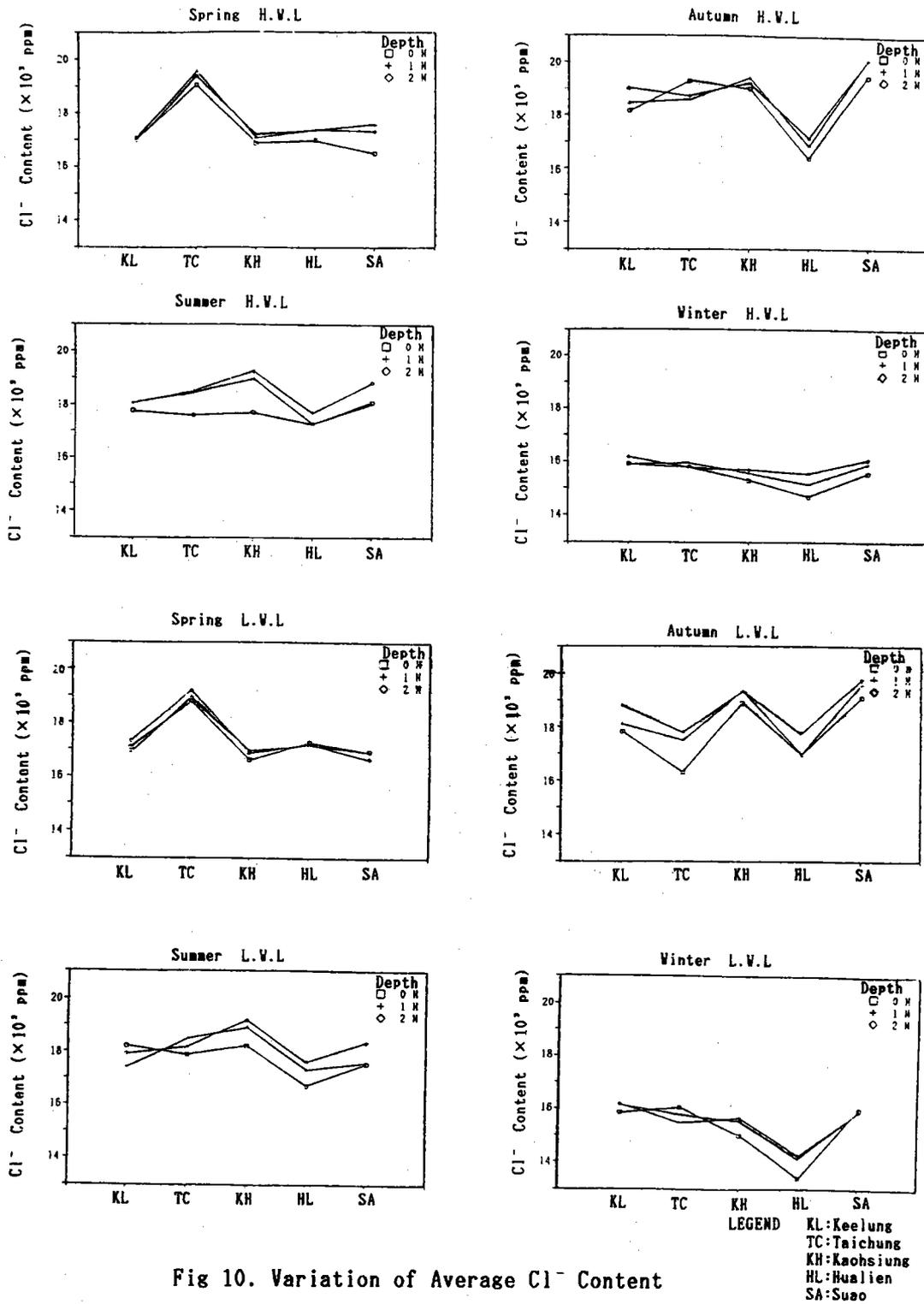


Fig 10. Variation of Average  $\text{Cl}^-$  Content

Table 1. The Composition of Dissolved Material in Seawater

element	amount (ppm)	major ions	element	amount (ppm)	major ions
Cl	19,353	Cl <sup>-</sup>	Sb	5×10 <sup>-4</sup>	Sb(OH) <sub>5</sub> <sup>-</sup> (?)
Na	10,760	Na <sup>+</sup>	Cs	5×10 <sup>-4</sup>	Cs <sup>+</sup>
Mg	1,294	Mg <sup>2+</sup> ; MgSO <sub>4</sub>	Ce	4×10 <sup>-4</sup>	Ce <sup>3+</sup>
S	812	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	Kr	4×10 <sup>-4</sup>	—
Ca	413	Ca <sup>2+</sup> ; CaSO <sub>4</sub>	Y	3×10 <sup>-4</sup>	—
K	387	K <sup>+</sup>	Ag	3×10 <sup>-4</sup>	AgCl <sub>3</sub> <sup>-</sup> ; AgCl <sub>2</sub> <sup>-2</sup>
Br	67.3	Br <sup>-</sup>	La	3×10 <sup>-4</sup>	—
C	28	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ; H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ; CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup> ; Organic Compound	Cd	1×10 <sup>-4</sup>	Cd <sup>2+</sup> ; CdSO <sub>4</sub>
Sr	8.0	Sr <sup>2+</sup> ; SrSO <sub>4</sub>	Ne	1×10 <sup>-4</sup>	—
B	4.6	B(OH) <sub>3</sub> ; B(OH) <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	Xe	1×10 <sup>-4</sup>	—
Si	3	Si(OH) <sub>4</sub> ; Si(OH) <sub>3</sub> O <sup>-</sup>	W	1×10 <sup>-4</sup>	WO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>
F	1.3	F <sup>-</sup> ; MgF <sup>+</sup>	Ge	7×10 <sup>-5</sup>	Ge(OH) <sub>4</sub> ; Ge(OH) <sub>3</sub> O <sup>-</sup>
A	0.6	A(g)	Cr	5×10 <sup>-5</sup>	—
N	0.5	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ; NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ; NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ; N <sub>2</sub> (g); Organic Compound	Th	5×10 <sup>-5</sup>	—
Li	0.17	Li <sup>+</sup>	Sc	4×10 <sup>-5</sup>	—
Rb	0.12	Rb <sup>+</sup>	Ga	3×10 <sup>-5</sup>	—
P	7×10 <sup>-2</sup>	H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ; HPO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> ; PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> ; H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	Hg	3×10 <sup>-5</sup>	HgCl <sub>3</sub> <sup>-</sup> ; HgCl <sub>4</sub> <sup>-2</sup>
I	6×10 <sup>-2</sup>	IO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ; I	Pb	3×10 <sup>-5</sup>	Pb <sup>2+</sup> ; PbSO <sub>4</sub>
Ba	3×10 <sup>-2</sup>	Ba <sup>-2</sup> ; BaSO <sub>4</sub>	Bi	2×10 <sup>-5</sup>	—
In	< 2×10 <sup>-2</sup>	—	Nb	1×10 <sup>-5</sup>	—
Al	1×10 <sup>-2</sup>	Al(OH) <sub>3</sub>	Tl	< 1×10 <sup>-5</sup>	Tl <sup>+</sup>
Fe	1×10 <sup>-2</sup>	Fe(OH) <sub>3</sub>	He	5×10 <sup>-6</sup>	—
Zn	1×10 <sup>-2</sup>	Zn <sup>2+</sup> ; ZnSO <sub>4</sub>	Au	4×10 <sup>-6</sup>	AuCl <sub>4</sub> <sup>-</sup>
Mo	1×10 <sup>-2</sup>	MoO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	Nd	2×10 <sup>-6</sup>	—
Se	4×10 <sup>-3</sup>	SeO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	Dy	7×10 <sup>-7</sup>	—
Cu	3×10 <sup>-3</sup>	Cu <sup>2+</sup> ; CuSO <sub>4</sub>	Pr	6×10 <sup>-7</sup>	—
As	3×10 <sup>-3</sup>	H <sub>2</sub> AsO <sub>4</sub> <sup>-</sup> ; HAsO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> ; H <sub>3</sub> AsO <sub>4</sub> ; H <sub>3</sub> AsO <sub>3</sub>	Er	6×10 <sup>-7</sup>	—
Sn	3×10 <sup>-3</sup>	—	Be	6×10 <sup>-7</sup>	—
U	3×10 <sup>-3</sup>	UO <sub>2</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> <sup>-4</sup>	Gd	6×10 <sup>-7</sup>	—
V	2×10 <sup>-3</sup>	VO <sub>3</sub> (OH) <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	Yb	5×10 <sup>-7</sup>	—
Mn	2×10 <sup>-3</sup>	Mn <sup>2+</sup> ; MnO <sub>4</sub>	Sm	4×10 <sup>-7</sup>	—
Ni	2×10 <sup>-3</sup>	Ni <sup>2+</sup> ; NiSO <sub>4</sub>	Ho	2×10 <sup>-7</sup>	—
Ti	1×10 <sup>-3</sup>	Ti(OH) <sub>4</sub>	Tm	1×10 <sup>-7</sup>	—
Co	5×10 <sup>-4</sup>	Co <sup>2+</sup> ; CoSO <sub>4</sub>	Eu	1×10 <sup>-7</sup>	—
			Lu	1×10 <sup>-7</sup>	—
			Pa	2×10 <sup>-8</sup>	—
			Ra	1×10 <sup>-10</sup>	Ra <sup>2+</sup> ; RaSO <sub>4</sub>
			Rn	6×10 <sup>-15</sup>	—



Table 5. The Extreme Value of Seawater Chemical Nature of Each Harbor (Winter)

Depth	Harbor		Keelung		Taichung		Kaohsiung		Hualien		Suao		
	Water Level												
	Item	H.W.L.	L.W.L.										
0 m	Temp. (°C)	18.4 18.8	18.6 19.2	15.8 16.5	16.9 18.5	25.4 27.8	25.2 28.2	21.6 23.4	21.3 23.2	21.6 23.2	21.6 22.0	21.6 22.4	21.2 22.4
	PH Value	7.7 7.9	7.4 8.0	8.3 8.3	8.3 8.3	7.4 7.9	7.4 8.0	8.1 8.1	8.0 8.1	8.1 8.1	8.1 8.1	7.7 7.8	7.4 7.9
	D.O. (mg/l)	4.3 6.6	4.0 6.4	5.6 7.3	6.2 7.3	0.1 6.1	0.3 5.7	6.4 6.8	6.4 6.8	6.4 6.7	6.4 6.7	5.4 6.6	4.8 6.3
	Cl <sup>-</sup> (ppm)	13857 16622	12986 16567	15485 16148	13379 16803	12380 16190	11058 16348	13272 15075	13040 12857	13040 12857	13040 12857	13459 16300	15846 16112
	S <sup>2-</sup> (ppm)	0.0 0.03	0 0	0 0	0 0	0 0.09	3.02 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0.02	0 0
	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (ppm)	2664 3348	2236 3476	2477 3036	1983 2831	2371 3098	2207 3051	2333 2816	2412 2664	2412 2664	2429 2940	2557 2877	
1 m	Temp. (°C)	18.4 18.7	18.6 19.1	15.8 16.4	16.4 17.3	25.4 27.8	25.3 28.1	22.0 23.2	21.3 22.4	21.3 22.4	21.7 22.6	21.1 22.5	
	PH Value	7.8 8.0	7.9 8.0	8.3 8.4	8.3 8.3	7.5 8.0	7.4 8.0	8.1 8.1	8.1 8.2	8.1 8.2	7.8 8.0	7.9 8.0	
	D.O. (mg/l)	4.4 6.6	4.6 6.4	5.7 7.1	6.8 8.0	0 6.0	0.4 5.0	6.2 6.7	6.2 6.7	6.2 6.7	5.6 6.3	4.6 6.1	
	Cl <sup>-</sup> (ppm)	14729 16567	15473 16674	15485 16148	15485 16148	14867 15819	14814 16243	13627 16165	13405 15208	13405 15208	15580 16264	15580 16165	
	S <sup>2-</sup> (ppm)	0 0	0 0.02	0 0	0 0	0 0.06	0.12 0	0 0	0 0	0 0	0 0.02	0 0.02	
	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (ppm)	2557 3013	2392 3046	2421 2943	2458 2868	2793 3293	2371 3121	2454 2910	2112 2795	2112 2795	2247 3006	2525 3006	
2 m	Temp. (°C)	18.4 18.6	18.6 18.6	15.8 16.3	16.1 16.3	25.4 27.8	25.3 26.7	22.9 23.8	21.6 22.6	21.6 22.6	21.8 22.8	20.9 22.6	
	PH Value	7.9 8.0	7.9 8.1	8.3 8.4	8.3 8.4	7.5 8.0	7.6 8.0	8.2 8.2	8.1 8.2	8.1 8.2	7.9 8.0	7.9 8.0	
	D.O. (mg/l)	4.5 6.5	4.7 6.4	5.5 6.8	6.5 8.1	0 6.0	0.1 5.0	6.2 6.8	6.4 7.2	6.4 7.2	5.4 6.1	5.0 5.8	
	Cl <sup>-</sup> (ppm)	15368 16941	15913 16537	15706 15927	15042 15947	14973 16190	15237 16165	13400 16218	13146 15335	13146 15335	16006 16165	15368 16406	
	S <sup>2-</sup> (ppm)	0 0	0 0.02	0 0	0 0	0 0.06	0.02 0.131	0 0	0 0	0 0	0 0.02	0 0	
	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (ppm)	2609 3134	2805 3262	2309 2933	2495 2877	2840 3215	2676 3863	3412 3049	2319 2942	2319 2942	3311 3369	2343 3049	

## 附件(二)

## CORROSION OF HARBOR REINFORCED CONCRETE STRUCTURES IN TAIWAN

Wei-Ming Lin

Institute of Harbor and Marine Technology  
No. 83, Lin Hi rd., Wuchi, Taichung 43501  
Taiwan, Republic of China

Kuei-Ching Chen

Institute of Harbor and Marine Technology  
No. 83, Lin Hi rd., Wuchi, Taichung 43501  
Taiwan, Republic of China

## ABSTRACT

Concrete is one of the most durable materials and has been extensively used in marine environment. Wharves, harbor reinforced concrete structures, immersed and exposed in the aggressive marine environment, are easily deteriorated and corroded.

Therefore, in the paper, wharves of five major commercial harbors around the island were surveyed in order to find the main factors of structures deterioration and to establish the feasible techniques of monitoring the corrosion of the concrete reinforcement.

From the survey results shown, the main evidences of R.C. structures corrosive might be reinforcement cover insufficient, designing and constructing not under marine structures construction criteria. These defects cause the chloride and sulfide penetrate into concrete structures easily and reduce the R.C. structures durable.

Eventually, using the results of chloride penetration on R.C. structures as a guide for predicting the service life of existing structures or designing a new structure for a given life.

## INTRODUCTION

Reinforced concrete is one of the most important and economic structural materials in the construction industry worldwide. It has been extensively used in marine environment for constructing port facilities like jetties and wharves,

## Publication Right

Based on the above assumptions, the distribution of chlorides at any time can be derived from the following expression:

$$C(X,t) = C_0 \left[ 1 - 2 \operatorname{Erf} \left( \frac{X}{\sqrt{2Dt}} \right) \right] + C_0 \quad (2)$$

where

- X = distance from the concrete surface (cm)
- t = exposure time (sec)
- D = diffusion constant (cm<sup>2</sup>/sec)
- C<sub>0</sub> = equilibrium chloride level on concrete surface
- C(X,t) = chloride level at any position (X) and exposure time (t)
- Erf = error function, in which

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

The chloride contents of retrieved cores were listed in Table 4. The results clearly show that the chloride contents were much more than 0.4% by weight of cement. And the chloride distribution were almost in descending tendency from the depth of exposed surface. According to Van Daeveer (6) research results shown, reinforced concrete presents a corrosion hazard and occurred pitting or depassivation of steel only if chloride content in reinforced concrete is reached activation front (Cl<sup>-</sup> content 0.4% by weight of cement). Therefore, Fick's second law of diffusion as equation (2) was applied by means of computer simulation and calculation.

Table 5 was the results of chloride diffusion coefficients and predicted surface chloride levels. Figure 9 to Figure 13, show the depth of penetration at 0.4 wt% Cl<sup>-</sup> activation front (6) with exposure time of 1, 10, 50, 100 years at each different harbor.

The previous data shown that the reinforcement cover is approximate 8cm at wharf No.3 at Taichung harbor. Due to the surface chloride concentration and chloride diffusion rate indentified, the chloride level at the embedded rebar at Taichung harbor could has reached that required to depassivate the steel within two years of placement.

As a matter of fact, the result by half-cell potential monitoring techniques has indicated that the embedded rebars at Taichung harbor has 90% or 95% probability of being corroded (4). In the meanwhile, visual inspection of the embedded rebars by splitting the retrieved cores of Taichung harbor are also proved corrosion occurred.

#### Cement Contents (4)

Table 6 shows the results of cement content. It obviously indicated that cement contents were much lower and significant insufficient than the rich aggregates proportion (1:2:4) 14%.

#### XRD and SEM analysis (7)

Table 7 shows the results of X-ray diffraction analysis. Minerals were listed in descending order of apparent concentration from line intensity at each depth. The same results are also obtained almost consistently by using scanning electron microscopy analysis.

## CONCLUSION

The marine reinforced concrete structures are not easily to monitoring the deterioration or corrosion from the outside appearances of existing structures. But whenever it occurs deterioration or corrosion, the reinforced concrete structures will exacerbated the damage. From the results of field survey and Lab. analyzing, the following conclusions could be drawn;

1. The main factors which cause the marine harbor reinforced concrete structures deteriorated are:
  - a. Reinforcement cover insufficient.
  - b. Designing and constructing not under marine construction criteria.
  - c. No maintenance executed periodically.
  - d. Aggressive agents ( $Cl^-$ ,  $SO_3^{2-}$ ) ingressing very severely.
2. Non destructive test is a method of feasible and effective techniques to monitor the concrete deterioration and reinforced corrosion.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are deeply indebted to the colleagues in the research group for their dedication to the projects.

## REFERENCES

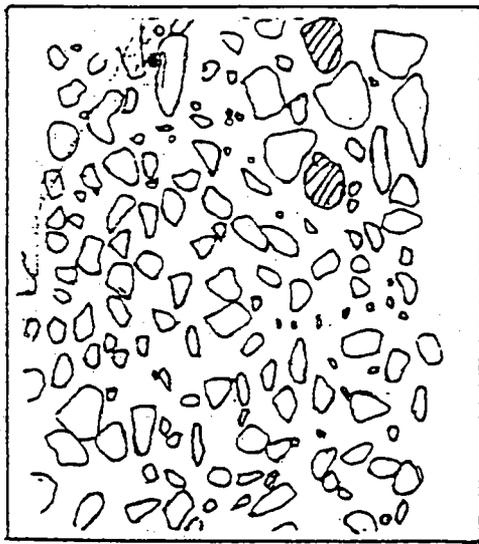
1. "Guide for Making a Condition Survey of Concrete in Service", ACI 201, 1R-68, 1968
2. Malhotra, V.M./Editor, "In Situ/Nondestructive Testing of Concrete," ACI SP-82, 1984.
3. "Annual Book of ASTM Standards," Section 4, Vol. 04.01, 1987.
4. "Annual Book of ASTM Standards," Section 4, Vol. 04.02, 1987.
5. "Concrete in the Oceans, "Technical Report No.5, Taylor Woodrow Research Laboratories, 1980.
6. Van Daveer, J.R., "Techniques for Evaluation Reinforced Concrete Bridge Decks," Journal of the American Concrete Institute, pp. 697-704, 1975.
7. Young, J.F., "The microstructure of Hardened Portland Cement Paste," John Wiley and Sons, 1982.

TABLE 7 THE RESULTS OF X-RAY DIFFRACTION AND SCANNING ELECTRON MICROSCOPY

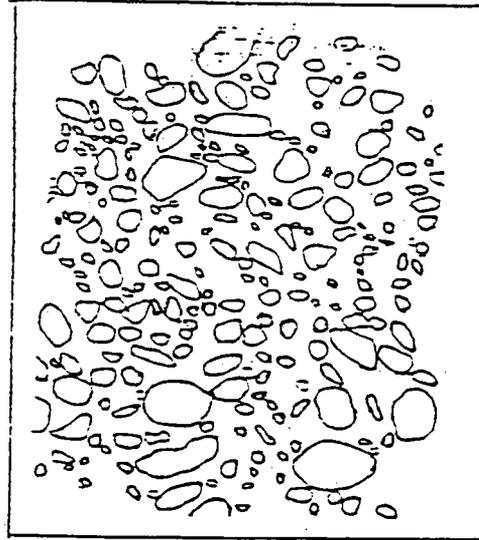
Depths (mm) Samples	0~10	10~20	20~30	30~50	50~100	100~150
KL-W.4	Portlandite Calcite	Portlandite Calcite Ettringite Monochloro- aluminate		Portlandite Calcite Ettringite	Portlandite Calcite Ettringite	Portlandite Calcite Ettringite
TC-3	Calcite Brucite Ettringite	Calcite Brucite Monochloro- aluminate	Portlandite Calcite Monochloro- aluminate	Portlandite Calcite Monochloro- aluminate Ettringite	Portlandite Calcite	Portlandite Calcite Monochloro- aluminate
KH-9	Portlandite Calcite Ettringite Monochloro- aluminate	Portlandite Calcite	Portlandite Calcite	Portlandite Calcite Brucite Ettringite Monochloro- aluminate	Portlandite Ettringite	
HL-3	Portlandite Calcite Brucite Ettringite	Portlandite Calcite Brucite Ettringite Gibbsite	Portlandite Calcite Ettringite Monochloro- aluminate	Portlandite Calcite	Portlandite Calcite Ettringite	Monochloro- aluminate
SA-10	Portlandite Calcite Ettringite	Portlandite	Portlandite Calcite Ettringite Monochloro- aluminate		Portlandite Calcite Gibbsite	

Note: Portlandite [Ca(OH)<sub>2</sub>]  
 Calcite [CaCO<sub>3</sub>]  
 Brucite [Mg(OH)<sub>2</sub>]  
 Ettringite [C<sub>3</sub>A CaSO<sub>4</sub> · 32H<sub>2</sub>O]  
 Monochloroaluminate [C<sub>3</sub>A CaCl<sub>2</sub> · 10H<sub>2</sub>O]  
 Gibbsite [Al(OH)<sub>3</sub>]

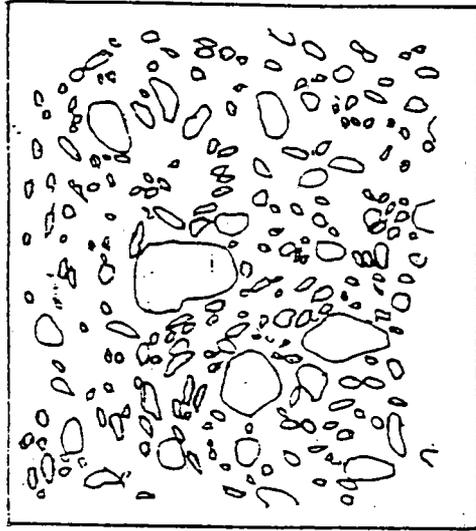




SA-10



HL-3



KII-9

FIGURE 2 Surface sketching of retrieved cores (continued)

415	400	395	405	300	775	420	405	505	505	485	405	480	535	455	445	410	385	435	425	370	430	470	485	045	485	485	550	590	510	405	475	435	405	480
360	385	385	390	380	405	420	435	470	465	450	425	425	440	395	380	370	300	385	405	395	435	450	435	445	435	475	440	420	405	415	380	380	345	
300	400	425	410	405	425	430	425	415	425	410	405	395	375	370	365	380	385	405	455	425	430	425	410	415	385	430	300	305	385	405	370	380	200	
405	420	425	435	420	435	440	410	410	415	430	420	415	390	375	380	380	300	395	415	415	425	415	405	430	395	430	400	305	305	415	385	390	380	
435	455	455	455	450	405	475	475	470	460	460	435	395	400	395	405	410	410	420	425	425	405	405	435	405	435	410	400	405	415	360	380	380	380	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	455	445	440	445	435	440	450	455	460	435	470	435	455	430	470	415	445	410	400	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	545	540	515	500	485	480	490	495	505	485	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

FIGURE 3 Potential distribution at wharf NO.3 at Taichung harbor

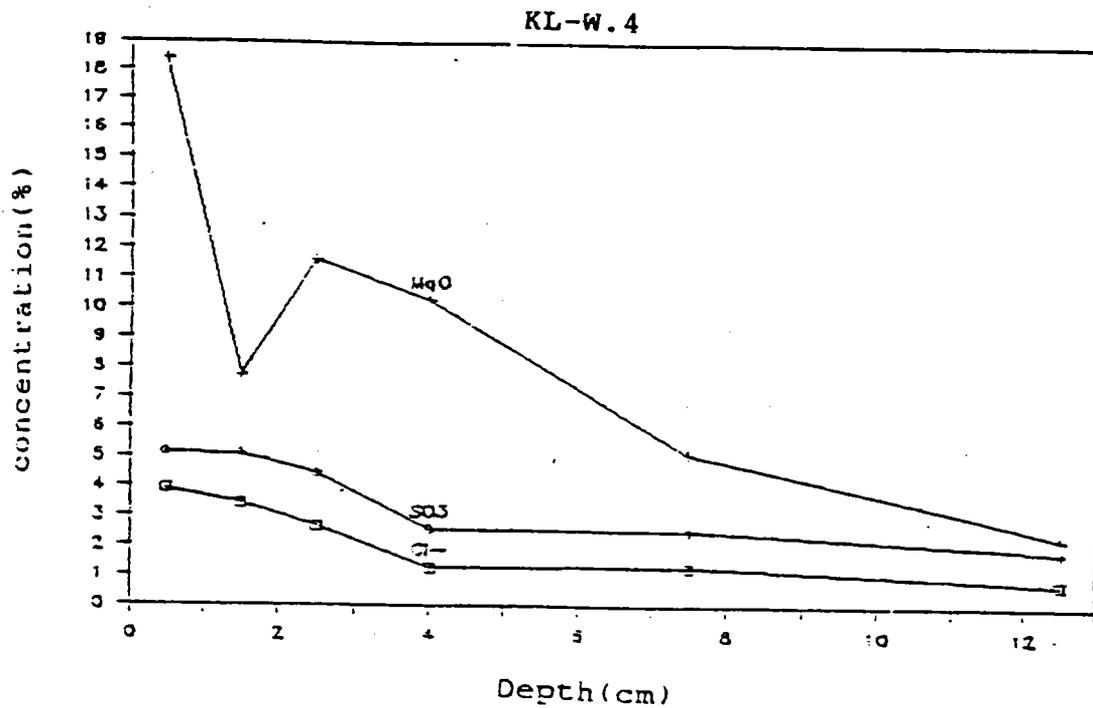


FIGURE 4 Distribution profiles of chemical composition at KL-W.4

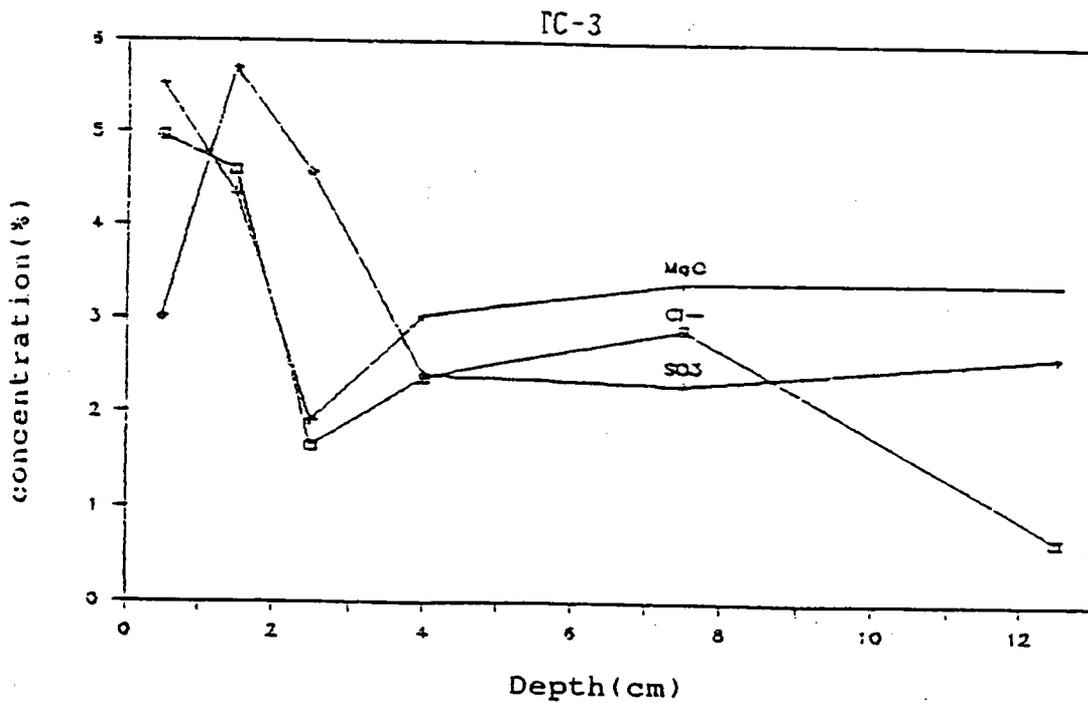


FIGURE 5 Distribution profiles of chemical composition at TC-3

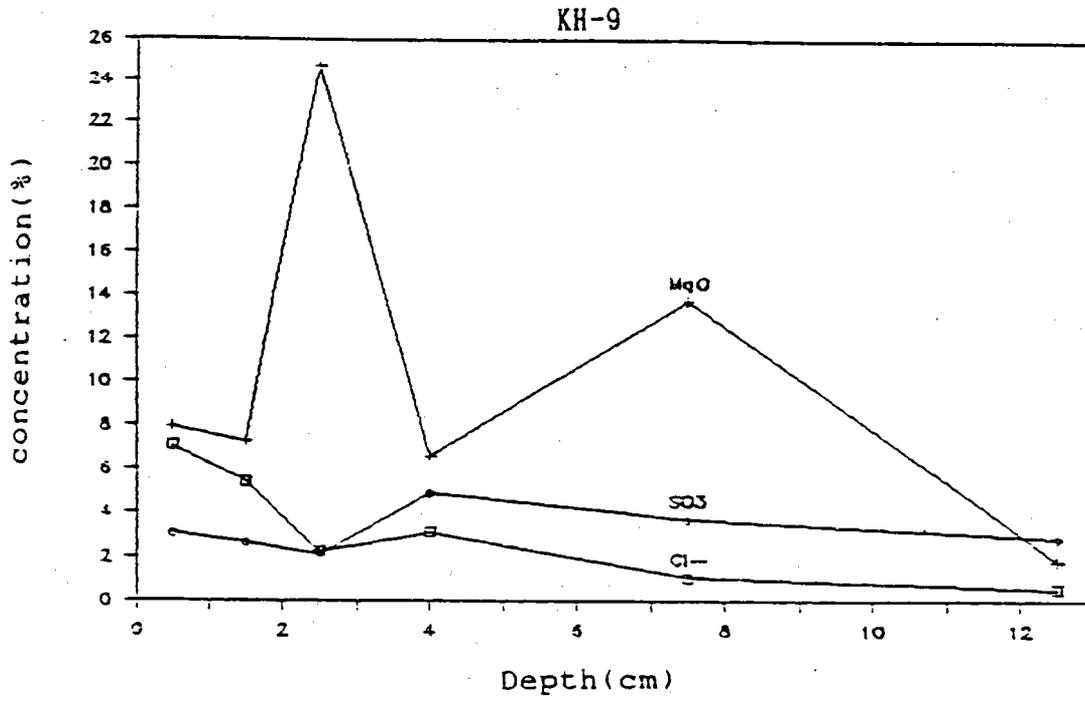


FIGURE 6 Distribution profiles of chemical composition at KH-9

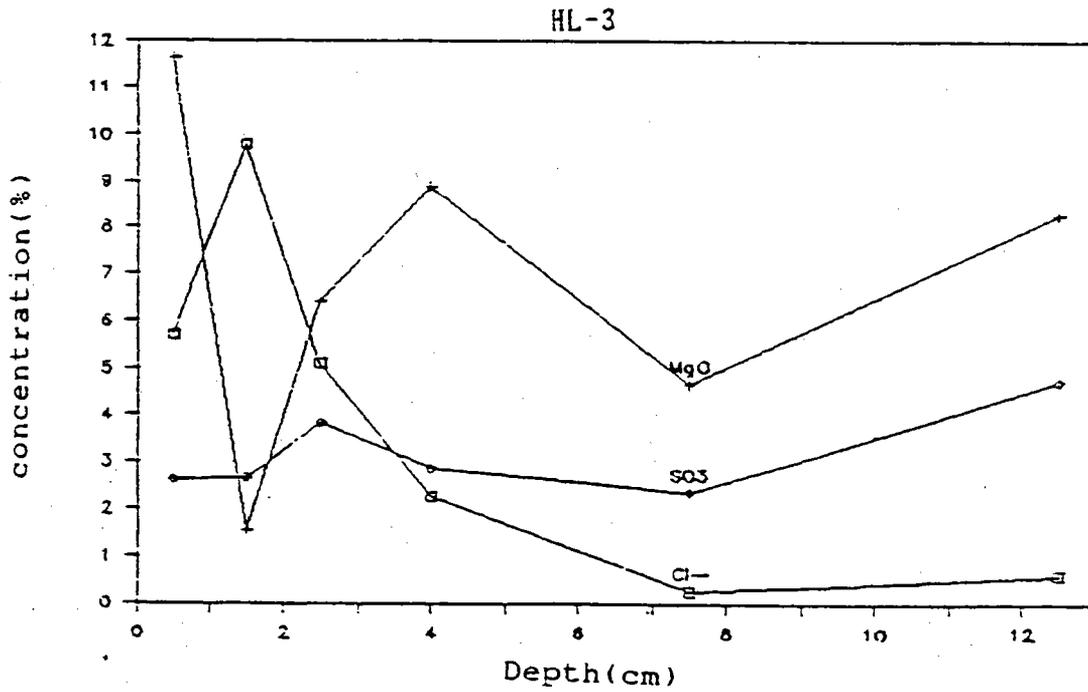


FIGURE 7 Distribution profiles of chemical composition at HL-3

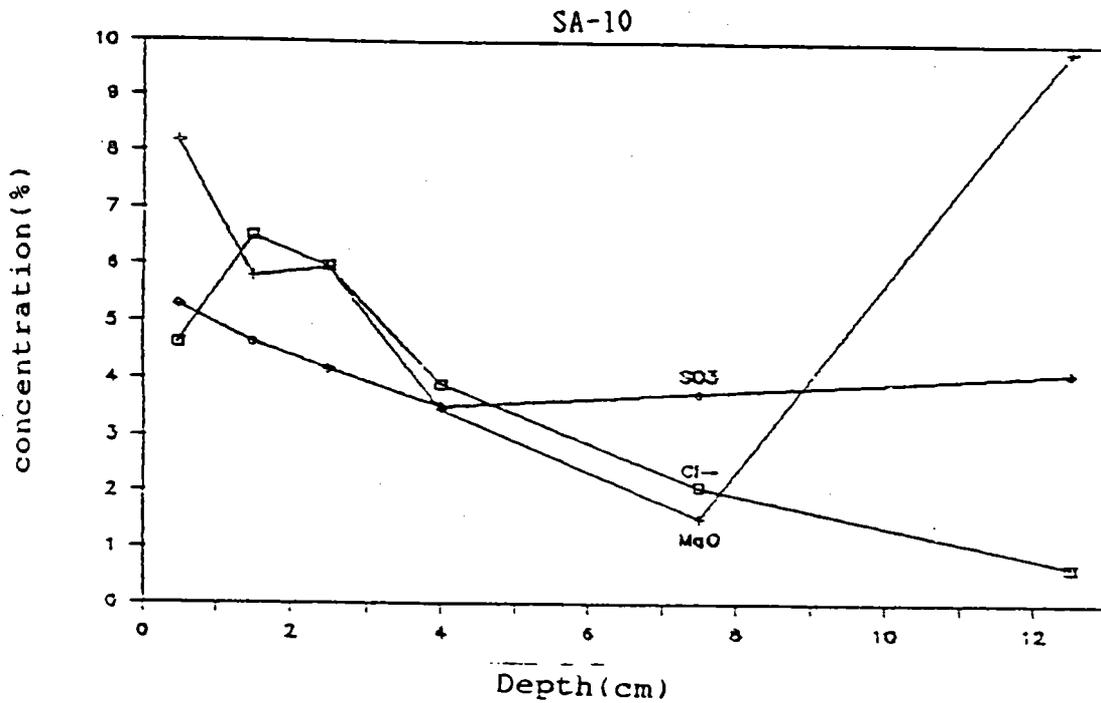


FIGURE 8 Distribution profiles of chemical composition at SA-10

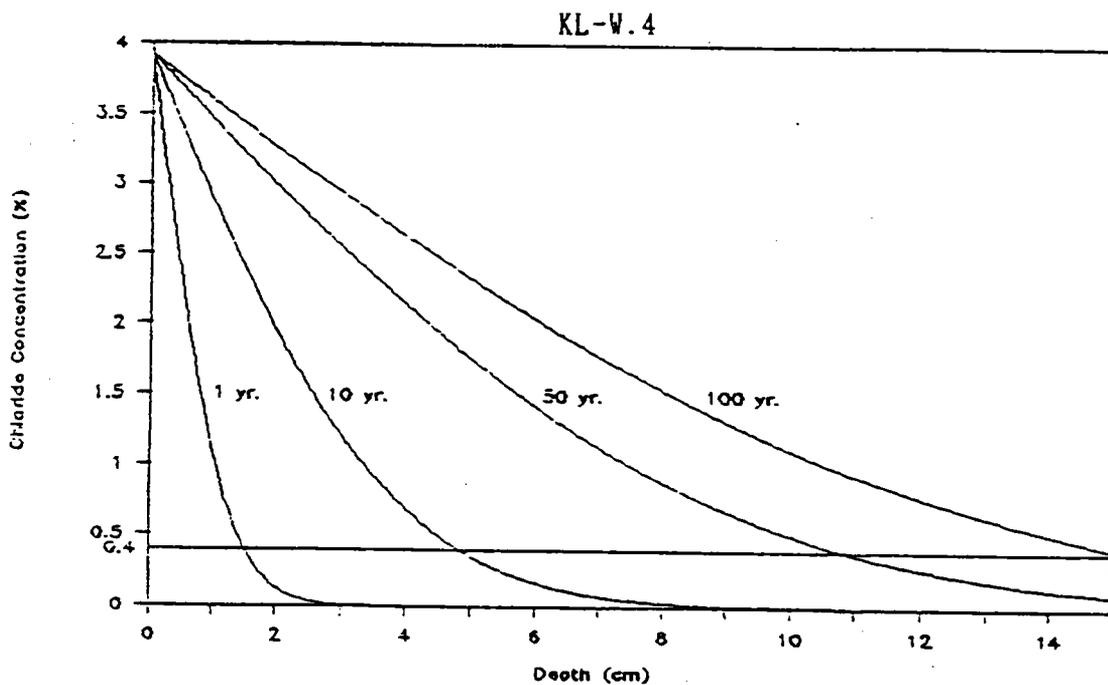


FIGURE 9 Depth of chloride penetration at 0.4% Cl<sup>-</sup> activation front with exposure times at KL-W.4

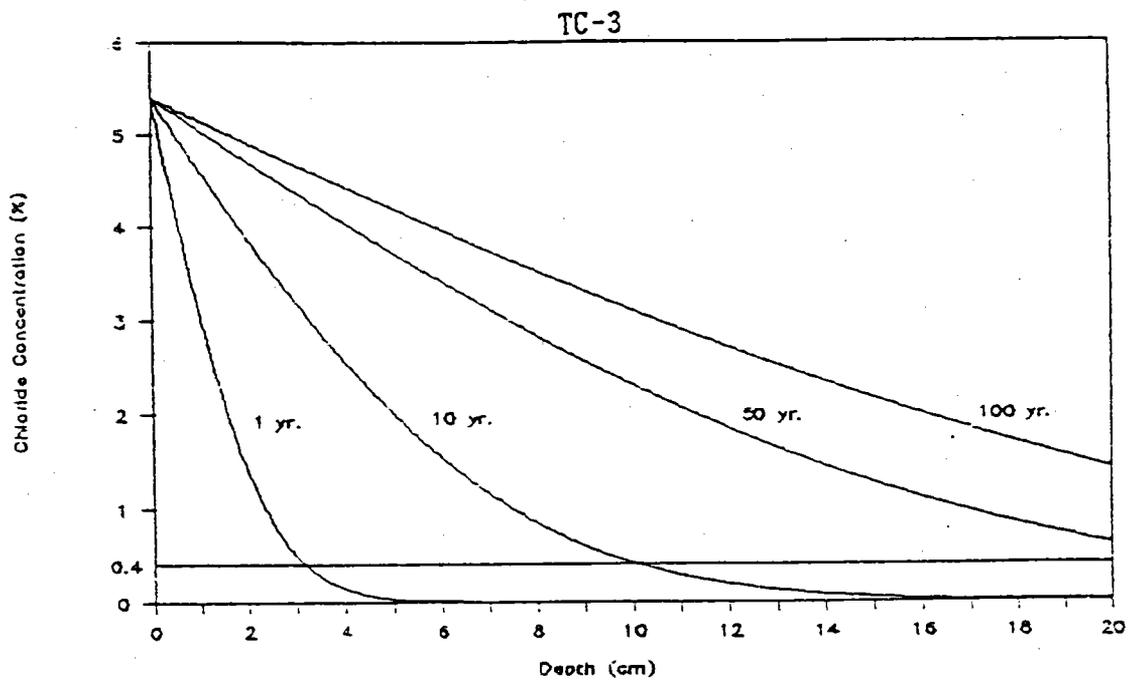


FIGURE 10 Depth of chloride penetration at 0.4% Cl<sup>-</sup> activation front with exposure times at TC-3

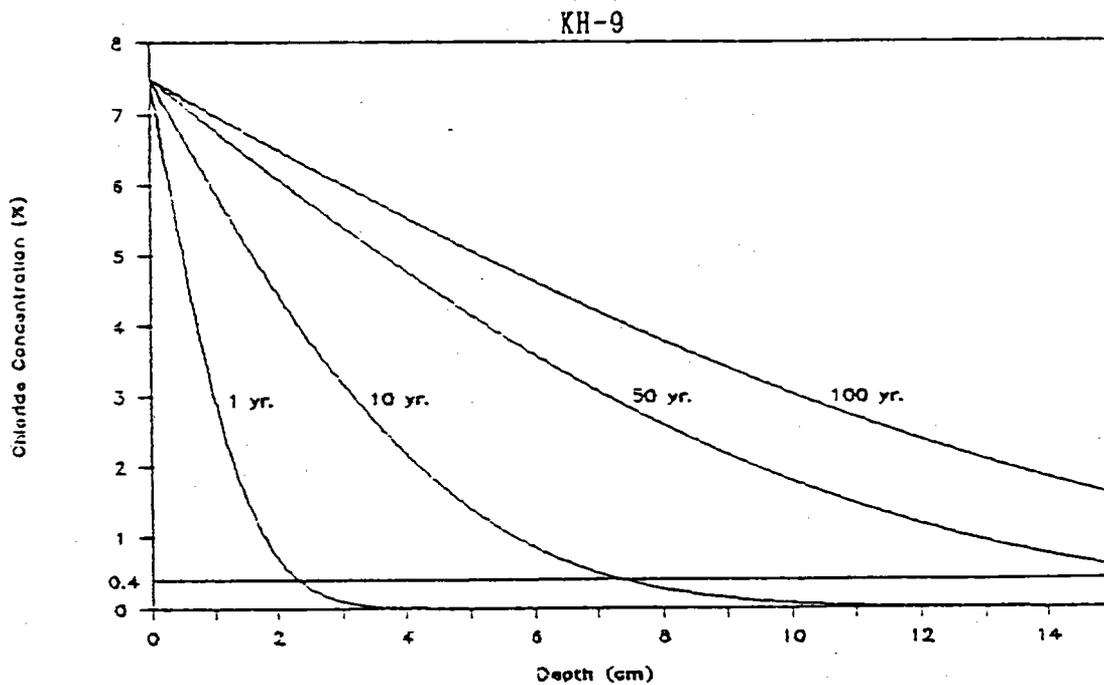


FIGURE 11 Depth of chloride penetration at 0.4% Cl<sup>-</sup> activation front with exposure times at KH-9

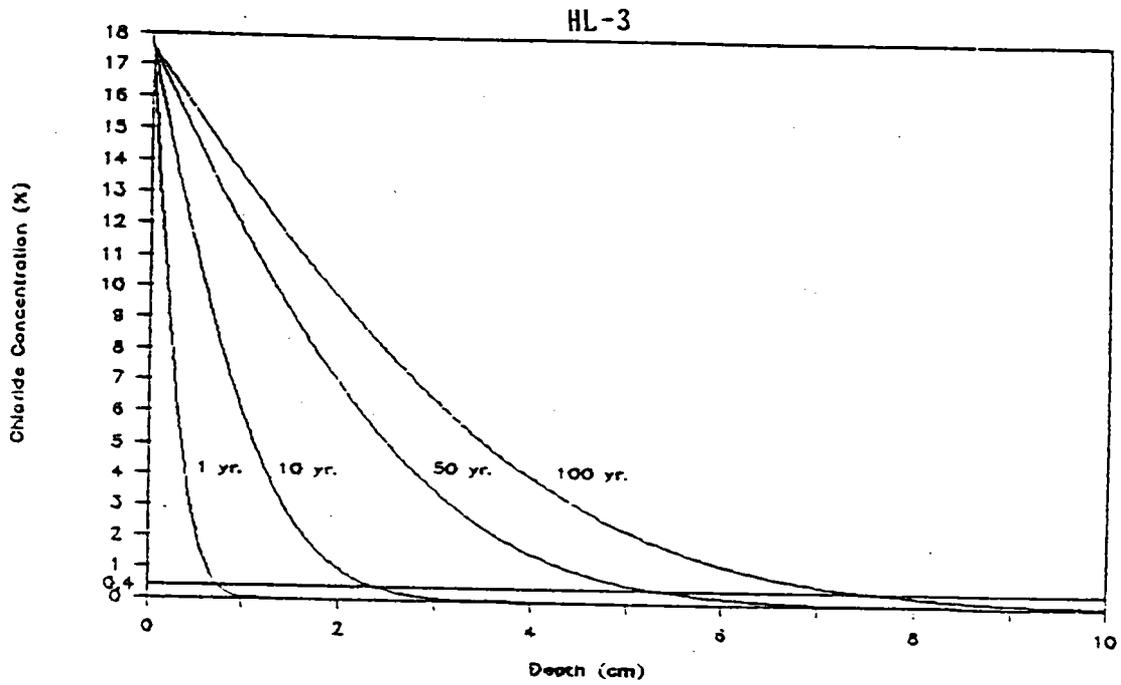


FIGURE 12 Depth of chloride penetration at 0.4% Cl<sup>-</sup> activation front with exposure times at HL-3

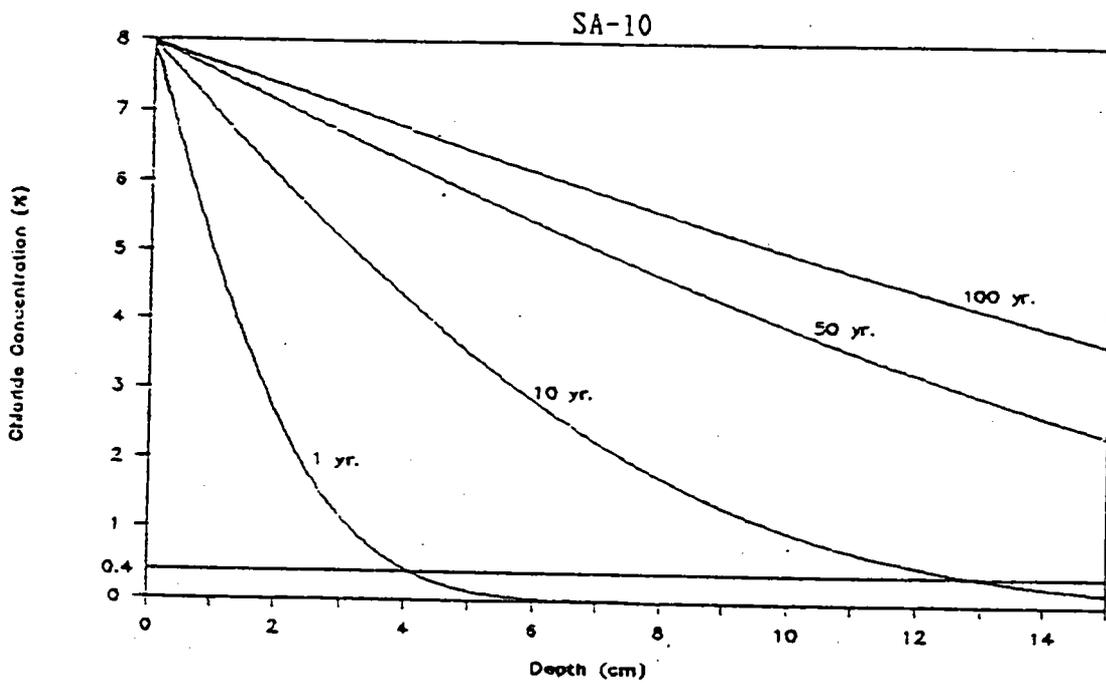


FIGURE 13 Depth of chloride penetration at 0.4% Cl<sup>-</sup> activation front with exposure times at SA-10

## 附件(三)

# Corrosion of Reinforced Concrete Structures in Taiwan

Wei-Ming Lin and Tzu-Wang Jou

Institute of Harbor and Marine Technology, No. 83, Lin Hi Road, Wuchi, Taichung V3501, Taiwan, Republic of China

*Corrosion factors were analyzed in four buildings and one bridge located near the coastal areas in Taiwan. It is shown that the contents of  $Cl^-$  and  $MgO$  are higher for seaside structures. The main factor that controlled the corrosion of steel in the reinforced concrete is  $Cl^-$  penetration, which is much more effective compared with carbonation in marine environment. From the chloride profiles, it can be confirmed that the closer the seashore, the more accurate is the distribution of chloride in the concrete as predicted by diffusion theory and Fick's second law. For 50 years, passive life of steel in seaside reinforced concrete structures, a minimum thickness of 11 cm (4.3 in.) concrete cover is required in Taiwan, Republic of China. Otherwise, a special process on concrete quality control would be needed.*

Taiwan is an island located in a subtropical zone with high temperature and humidity. In this marine-type environment, reinforced concrete structures easily corrode. The objective of this article is to identify the main factors that cause corrosion in seaside buildings and bridges. Normally, for reinforced concrete components that corrode, the service life can be generally divided as (a) the corrosion initiation time, during which the steel remains passive and (b) the corrosion propagation time, when corrosion propagates to maximum tolerable limit. The latter is not easy to predict, because it is decided not only by material quality but also by the method of structural design, such as whether or not the component

is under tension or compression, where the propagation time will be much different. Conservatively, the effective service life of reinforced concrete can be taken as the passive life of steel.

The field survey included four buildings, three of them located at different harbors of Taiwan, Republic of China, and one bridge near the Chiang Kai-Shek International Airport (Figure 1). It consisted of visual examination, photography, mapping of cracks and spalls, nondestructive testing (NDT), core drilling, and analysis. The in-site tests were to determine the depth of concrete cover, strength, and electropotential mapping. The laboratory tests were conducted to find the contents of  $Cl^-$ ,  $SO_3^{2-}$ ,  $MgO$ , and

cement. In addition, carbonation depth, gravity, and water permeability of retrieved cores were determined.

### Mathematical Modeling and Analysis

#### Corrosion Failure Model

In reinforced concrete components, the embedded steel is passivated because of the alkalis present in hardened cement. Thus, the process of corrosion is induced only if three primary factors play a role:

- Steel depassivation—allowing corrosion to start, because of the pH value decreasing around the steel surface by carbonation or penetration of chlorides;
- Low resistivity of the concrete—as the chlorides or  $H_2O$  ingress into the concrete, the resistivity drops from a normal value of greater than 20,000 ohm-cm to 5000 to 10,000 ohm-cm;<sup>2</sup> this permits electrolytic corrosion cells to develop; and
- Enough oxygen content—the oxygen in the environment must diffuse sufficiently to the steel to produce corrosion, whereby corrosion damage is produced.

The service life of reinforced concrete due to corrosion failure can be modeled as a composite of the following:

- initiation time ( $t_1$ )—during which the steel remains passive and
- corrosion propagation time ( $t_2$ )—corrosion propagates to maximum tolerable limit (Figure 2).

The latter is less predictable, because it depends on the rate of oxygen diffusion through the concrete cover and the tolerant level of corrosion of the structure. In practice,  $t_2$  is influenced by the moisture content of the concrete, its quality, its strength, and mechanics requirements. Generally, higher temperature and more rapid drying out of the concrete can give rise to short  $t_2$  values from six months to five years.<sup>1</sup> Thus, the effective service life of the structures due to corrosion failure can be considered as  $t_1$ , or passive life, which can also be considered as the design life of the structures.

#### Initiation of Corrosion in Reinforced Concrete

Because of the presence of NaOH, KOH, and Ca(OH)<sub>2</sub> during hydration of Portland cements, the pH values are in the range 13 to 14,<sup>2</sup> and the embedded steel therefore displays passivity. In this condition, the corrosion rate is negligibly small. Two agents that may cause breakdown of steel passivation are CO<sub>2</sub>, which may carbonate concrete depressing the pH value toward neutral levels (pH=9), and Cl<sup>-</sup>, which can induce depassivation (pitting) even at high pH levels.<sup>3</sup>

#### Carbonation of Concrete

Concrete is a porous material in which CO<sub>2</sub> can diffuse inside and react with Ca(OH)<sub>2</sub> producing CaCO<sub>3</sub>. For the case of unidirectional diffusion into concrete of uniform stable pore structure and moisture content from an environment of constant temperature, relative humidity, and CO<sub>2</sub> concentration, the rate of advance of the

carbonation front can be written as<sup>3</sup>

$$\frac{dx}{dt} = \frac{DC}{AX} \quad (1)$$

where A is the reacting quantity of alkaline substances per unit volume of concrete; C is the concentration of CO<sub>2</sub> in the environment; and D is the diffusion coefficient.

Integrating Equation (1) produces

$$x^2 = 2 \frac{DCt}{A} \quad (2)$$

For simplicity, according to Klopfer,<sup>4</sup> the depth of carbonation can be expressed as

$$x = \sqrt{2Kt} \quad (3)$$

where K is the carbonation coefficient ( $K = DC/A$ ); t is the exposure time; and X is the carbonation depth.

The results from three drilled samples in seaside structures are shown in Table 1.

#### Chloride Penetration

Assuming that concrete is permanently near saturation, the flux of chlorides at any point can be taken as proportional to the chloride concentration gradient. This is described by the diffusion theory and Fick's second law, and the governing equation can be expressed as

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial X^2} \quad (4)$$

considering the boundary conditions (1) at the surface,  $C(x,t) |_{x=0} = C_s$ ; and (2) at deep inside  $C(x,t) |_{x \rightarrow \infty} = C_o$ . The partial differential Equation (4) is solved as

$$C = (C_s - C_o) \left[ 1 - 2 \operatorname{Erf} \left( \frac{X}{\sqrt{2Dt}} \right) \right] + C_o \quad (5)$$

where C is the concentration at depth X after exposure time t; C<sub>o</sub> is the original concentration; C<sub>s</sub> is the surface concentration; D is the diffusion coefficient; and Erf is the error function, which is defined

$$\operatorname{Erf}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x \exp(-y^2/2) dy \quad (6)$$

Van Daveer, who worked on concrete bridge decks exposed to deicing salts, indicated that corrosion activation of the reinforcement occurred (by pitting or depassivation of steel) when the concentration of chloride in the vicinity of the steel bars attained about 0.4 wt% of cement.<sup>5</sup> Accordingly, the results of diffusion analysis for three drilled samples are shown in Table 2.

## Results and Discussion

### Fitting the Distribution of Chloride Ion in Concrete

The diffusion equation of chloride ion has the same form as heat conduction and it can be described as Equation (5). Due to seasonal variations, wind and rain effects, and the farther the area from the seashore, the more variable are the contents of chloride and humidity in the environment. Therefore, errors between the theoretical fitting curve and the actual distribution of chloride ion are larger in that place. In Figures 3 through 7, which show normalized chloride ion distribution, the mean square errors (E [error<sup>2</sup>]) vary from 0.004 to 56.336 as the distances between the sites and seashore vary from 10 m (32 ft) to 6 km (3.7 miles).

### Required Thickness of Concrete Cover for Corrosion Resistance

#### Steel Corrosion Due to Carbonation

Based on Equation (3), the advances of activation front (location in which pH is approximately 10 in the diffusion zone) with exposure time of samples are plotted in Figure 8. Because concrete quality and environmental conditions of samples are not well known, the depths to activation front are assumed following lognormal distribution (Figure 9).<sup>6</sup> Therefore, the depths of activation front for exposure times of 10, 30, and 50 years are predicted as 2.3 cm (0.9 in.), 3.9 cm (1.54 in.), and 5 cm (2 in.), respectively, with probability of 0.95 (Figure 10), and these can be considered as the required concrete covers for effective service life of 10, 30, and 50 years.

**Steel Corrosion Due to Chloride Ion**

As for  $Cl^-$ , the advances of chloride activation front (corresponding to 0.4 wt%  $Cl^-$  in concrete) during exposure time of samples are plotted in Figure 11, and the lognormal distributions are shown in Figure 12. The required thickness of concrete covers to prevent chloride ion corrosion during effective service life of 10, 30, and 50 years are 5.1 cm (2 in.), 8.8 cm (3.5 in.), and 11.4 cm (4.5 in.), respectively, with probability of 0.95 (Figure 13).

**Conclusion**

Based on study and analysis of core samples from four buildings and one bridge in the seaside area of Taiwan, the following conclusions can be drawn:

- The contents of  $Cl^-$ ,  $SO_3^{2-}$ , and MgO are higher in coastal structures,

but the content of  $SO_3^{2-}$  is negligibly small in areas farther from the seashore.

- The chloride ion is the major agent inducing corrosion of steel in the marine environment. It diffuses following Fick's second law more steadily in structures near the seashore.
- For corrosion-resistant design of seaside structures, the thickness of 11 cm of concrete cover is required for 50 years' effective service life in Taiwan. Otherwise, a special process improving on concrete quality would be needed.

**Acknowledgment**

The authors thank K.C. Chen, S.S. Wu, and C. Rau for their efforts in undertaking survey measurements on actual structures, and D.S. Kuo in the preparation of this paper.

**References**

1. R.D. Browne, "Design Prediction of the Life for Reinforced Concrete in Marine and Other Chloride Environments," Durability of Building Materials (Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Scientific Publishing Company, 1982), pp. 113-125.
2. F. Longuet, L. Burglen, A. Zelwer, Revue des Matériaux de Construction et de Travaux Publics 675, 1975: pp. 35-41.
3. L.F. Christopher, "Barriers to the Prediction of Service Life of Metallic Materials," NATO ASI Series E95 (Dordrecht/Boston/Lancaster: Martinus Nijhoff Publishers, 1985).
4. M. Klopfer, "The Carbonation of External Concrete and How to Combat It" 1981 One-Day Conference on the Repair of Concrete Structures (London, England: Imperial College, 1981).
5. J.R. Van Daveer, Journal of the American Concrete Institute 72, 1975: pp. 697-704.
6. A.H-S. Ang, W.H. Tang, Probability Concepts in Engineering Planning and Design, Vol. 1 (New York, NY: John Wiley & Sons, 1975).

More information may be available from CORROSION/89 paper no. 167, presented in New Orleans, Louisiana.

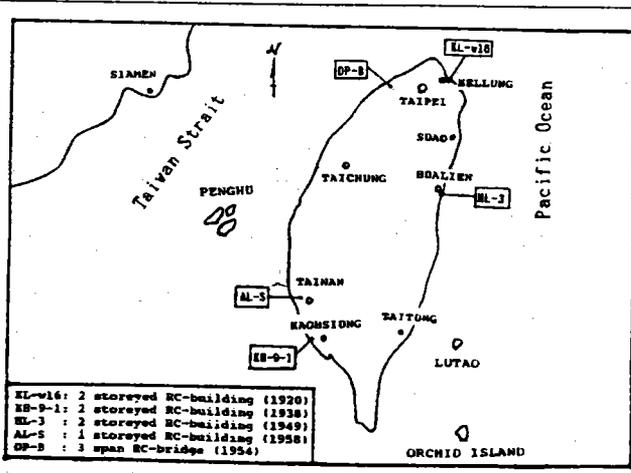
**TABLE 1**  
Carbonation of Drilled Samples

Samples	Age (y)	Carbonation Depth (mm)	Carbonation Coefficient (mm <sup>2</sup> /y)
KL-w16	68	45.0	14.89
HL-3	39	20.0	5.13
DP-B	34	32.0	15.06

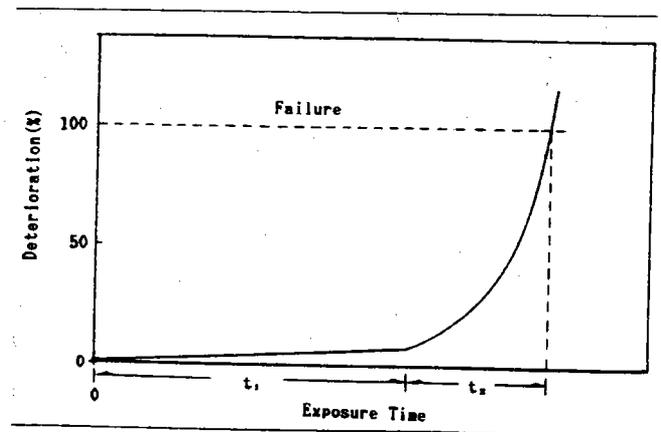
**TABLE 2**  
Chloride Penetration of Drilled Samples

Samples	Age (y)	Surface Concentration (%)	Original Concentration (%)	Diffusion Coefficient (mm <sup>2</sup> /y)	Depth of Activation Front (mm)
KL-w16	68	3.52	0.00	8.03	52.3
KH-9-1	50	5.83	0.07	22.12	89.2
HL-3	39	2.50	0.16	2.97	24.9

Note: (1) % is weight ratio of  $Cl^-$  to cement in concrete; (2) the second, third, and fourth columns are derived from Equation (5) by using least square method; and (3) the last column is solved from Equation (5) as  $Cl^-$  at 0.4 wt% by cement.

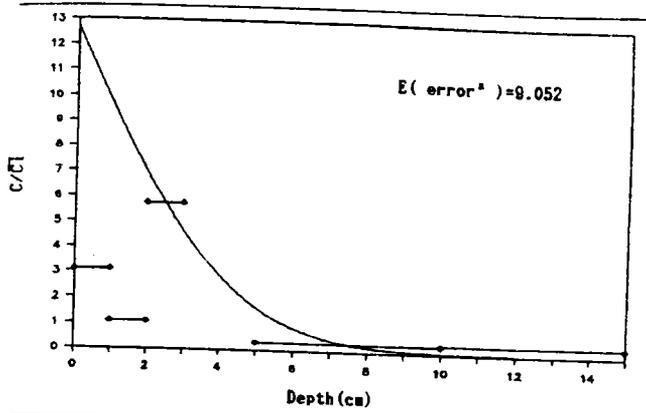


**FIGURE 1**  
Location of structures for investigation in Taiwan.



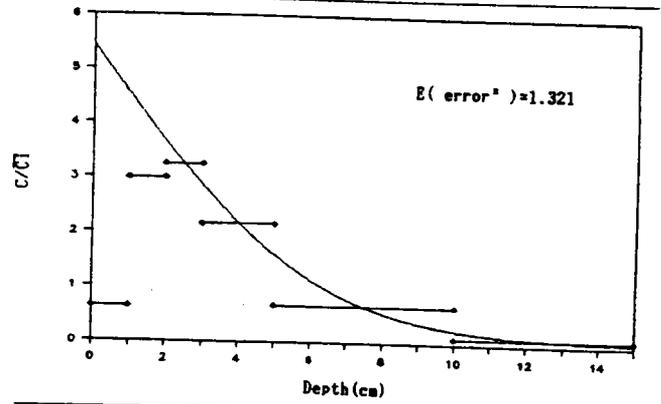
**FIGURE 2**  
Time for reinforced concrete failure due to steel corrosion.

# COATINGS & LININGS



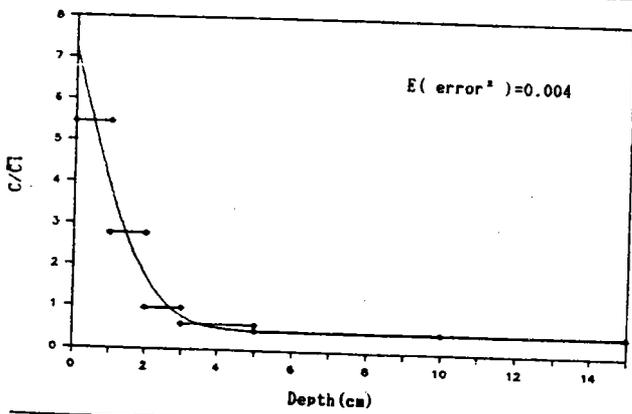
**FIGURE 3**

Simulation of chloride penetration for sample KL-w16 with 68-year exposure time at 25 m from seashore.



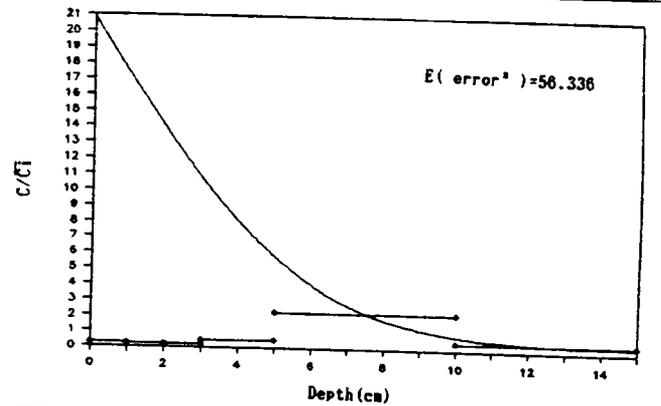
**FIGURE 4**

Simulation of chloride penetration for sample KH-9-1 with 50-year exposure time at 12 m from seashore.



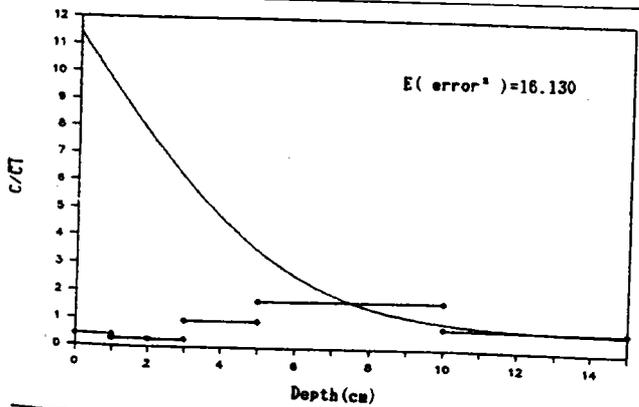
**FIGURE 5**

Simulation of chloride penetration for sample HL-3 with 39-year exposure time at 10 m from seashore.



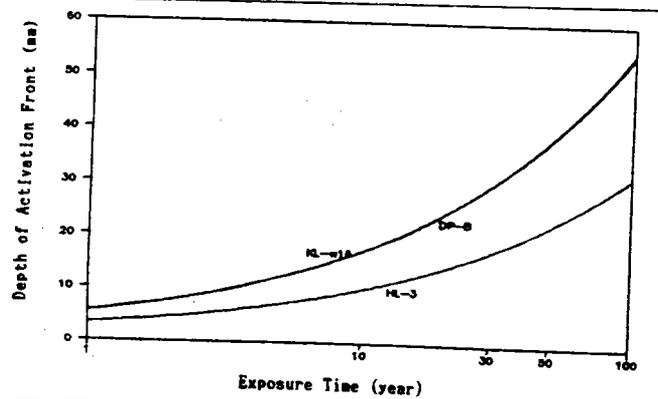
**FIGURE 6**

Simulation of chloride penetration for sample AL-S with 30-year exposure time at 6 km from seashore.



**FIGURE 7**

Simulation of chloride penetration for sample DP-B with 34-year exposure time at 3 km from seashore.



**FIGURE 8**

Corrosion activation front due to carbonation (activation front equals pH approximately 10).

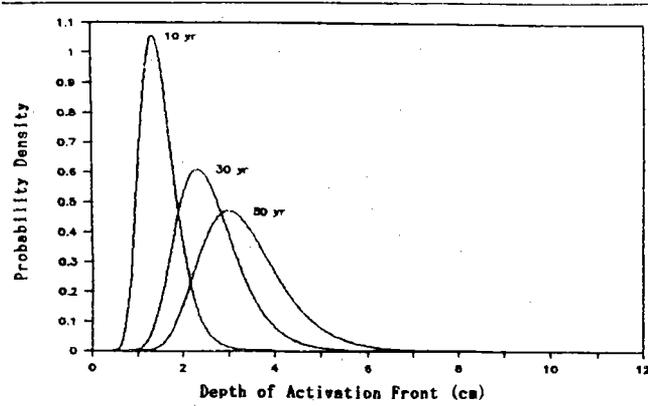


FIGURE 9

Lognormal format distribution of carbonation activation front.

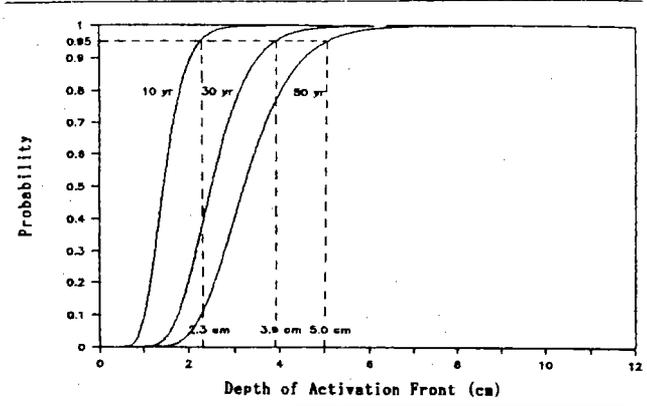


FIGURE 10

Probability distribution of carbonation activation front for 10-, 30-, and 50-year exposure time.

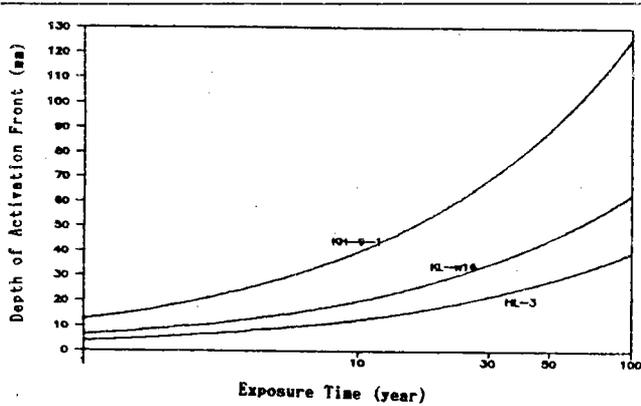


FIGURE 11

Corrosion activation front due to chloride ion (activation front equals 0.4 wt%  $Cl^-$  by cement).

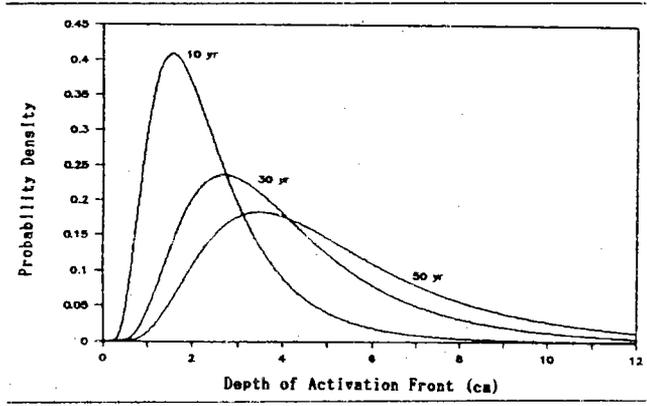


FIGURE 12

Lognormal format distribution of chloride activation front.

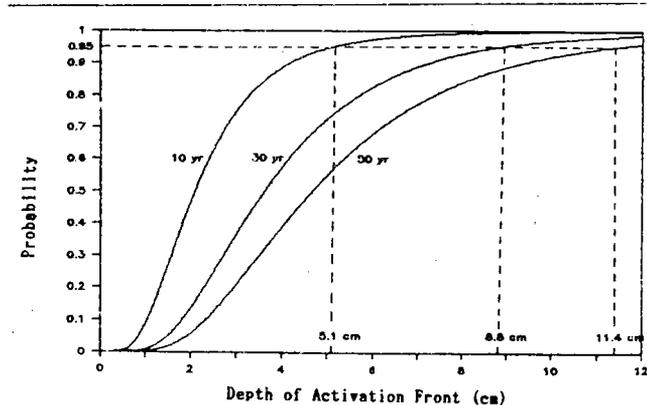


FIGURE 13

Probability distribution of chloride activation front for 10-, 30-, and 50-year exposure time.

**THE EDGE...**

**W**hat gives you the competitive edge?  
The right information...

a FREE catalog of business books from the U.S. Government available for sale from the Superintendent of Documents.

Write to:  
Free Business Catalog  
U.S. Government Printing Office  
Office of Marketing—Stop SM  
Washington, DC 20401