港灣鋼筋混凝土結構物耐久性研究

第一年報告

目　　錄

摘　　要　林維明……i

壹、前　　言 …… 林維明・吳信昇…1－1

貳、工作內容 …… 林維明・吳信昇…2－1

叁、研究方法 …… 林維明・吳信昇…3－1

肆、海氣象調查 …… 林維明・吳信昇…4－1

伍、碼頭構造物概述及現有港灣RC結構物調查 林維明・吳信昇…5－1

陸、海水化性分析 …… 林維明・吳信昇…6－1

柒、工作進度 …… 饒　正・林維明…7－1

捌、誌　　謝 …… 林維明……8－1

玖、本年度蒐集之參考文獻 …… 林維明……9－1

拾、附　　錄 …… 林維明…… 10－1

摘　要

林維明

本計劃全程自民國75年7月至80年6月共五年本報告爲概述75.年7月至76年6月一年來之執行情形

本計劃研究動機爲港灣RC 結構物由於受到含有腐蝕因子之海洋環境侵襲，因此易發生銹蝕影響其耐久性爲分析惡化致因，提供維修良策，因此激發本研究計劃。

本研究目的爲對港灣RC 結構物之耐久性提供良好之設計與施工規範以爲日後建港之參考，並對目前各港之RC 結構物之腐蝕特性作一通盤性之了解，並提供防蝕良策以爲進行維修工作之參考。

本年度主要執行之研究工作內容爲：

(1)蒐集資料：本年度內本計劃主持人曾獲國科會補助赴英國倫敦參加「1986年海洋混凝土」國際會議（內容詳見附件二出國報告）助理研究員饒正亦獲省府預算赴香港參加「海洋環境下之混凝土行爲」國際會議，並赴曼徹斯特大學腐蝕防治中心及丹麥腐蝕中心等單位與專家學者研討及蒐集不少這方面相關之研究資料，同時並向各港務局及中央氣象局蒐集碼頭斷面及海氣象環境資料以供研究參考。

(2)現場觀測：本年度內曾兩次赴基隆、台中、高雄、花蓮及蘇澳等五大港口調查觀測各種不同港灣RC 結構物損壞情形，所拍部份照片在第五章中敍明。

(3)海水化性分析：

赴全省五大港口在基隆選定六處、中港五處、高港7處、花港6處、蘇澳5處用自動海水化性測定儀測量海水之 PH 值、導電度、溶氧量及水溫等資料，分別在水面上，水深下1m 及2m 及高低潮時間各量測壹次，同時採集海水樣送國立中興大學環境工程學等，進行分析水質中所含氯離子（Cl^-），硫離子（S^{2-}）及硫酸根離子(SO_4^{2-})各港務局均派員參與本計劃研究並派交通船協助，本計劃得以順利進行，本年度內已進行三次調查工作本報告中列有冬季及春季兩次海水化性分析資料。

(4)現場曝露試驗，試驗模已設計製作完成，現將趕製試體試驗。

(5)成果效益：本計劃在國內爲先驅工作，即將展開一系列完整之試驗。成果效益必須等待所有試驗均完成後才能肯定。

壹、前言

林維明・吳信昇

根據以往之資料統計顯示國際貿易貨物交流數量幾乎95％以上靠海運，由於海運成本低廉載重量大為國貿之主要運輸方式，港埠為世貿市場之直接連繫通路，相關之都市和工業發展之都會，台灣地區人口密集資源有限，對外貿易依存性高為了維持經濟之持續成長，必須重視港埠之發展，而在港埠發展中主要之港灣結構物中仍以鋼筋混凝土為主。

鋼筋混凝土一直被認為是耐久性高，便廉取材方便之實用材料，因此使用最為廣泛，在理論與應用技術上亦力求改進，為求經濟與美觀並將原粗、大、厚、重應用工程技術改進為細小薄輕之結構物然而由於施工不良，材料品質無法確實控制，因此不如長期想像的那麼堅固耐久。混凝土中埋有鋼筋必須注意混凝土品質使其儘可能達到規範之要求而不透水，考慮影響混凝土耐久性之因素，例如

(1)混凝土配比

(2)水泥含量

(3)水灰比

(4)夯實方法及使用工具

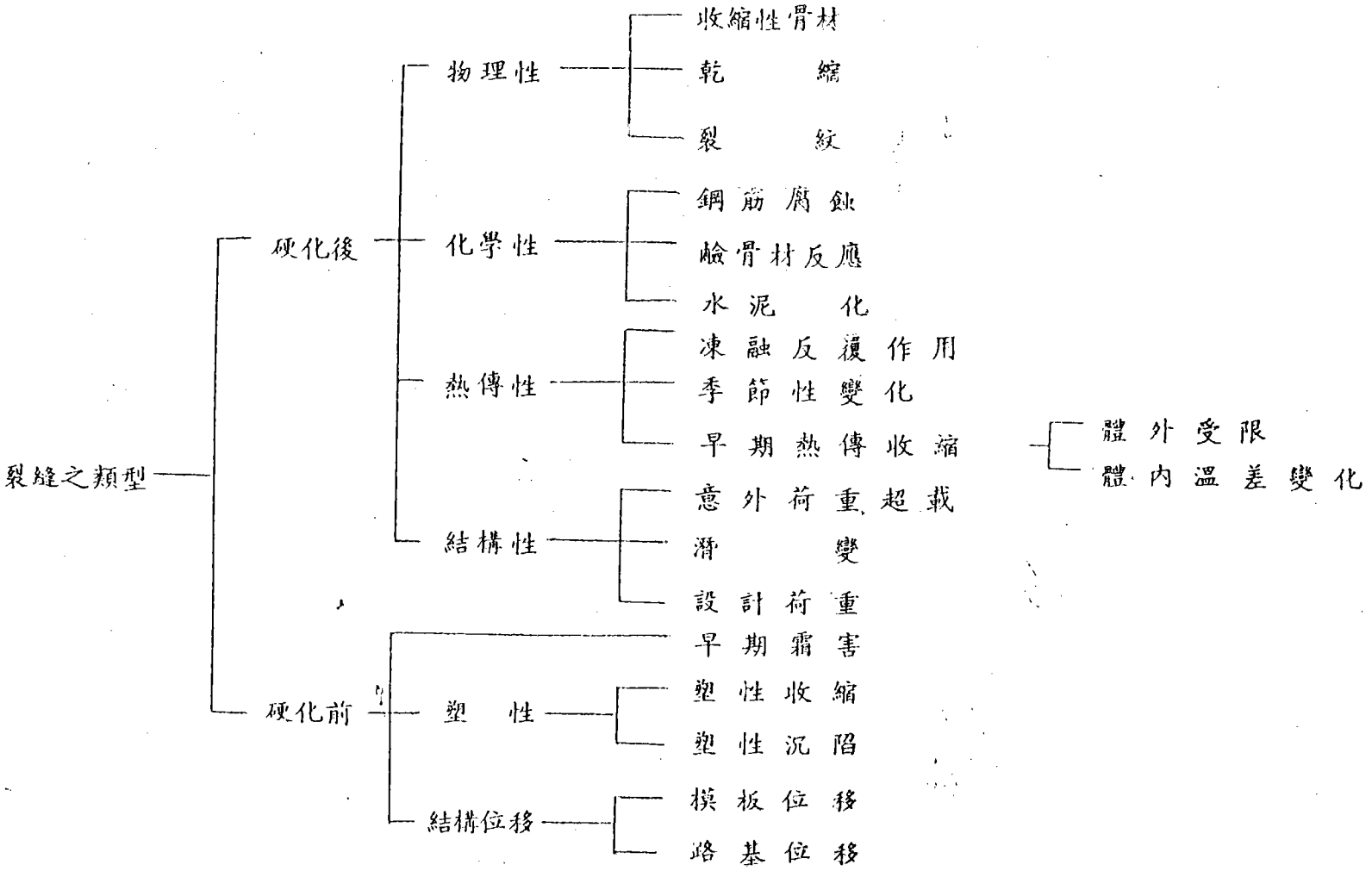
(5)骨材品質

(6)摻 加 之化學葯劑

(7)養生

所有鋼筋混凝土都會發生龜裂，設計時必須考慮致因並加以防範使其寬度及深度在容許範圍內，裂縫歸類如表一所示可分為「結構性」和「非結構性」兩類，所謂結構性乃因設計負荷意外荷重超載或潛變等所造成而非結構性裂縫之歸類如表2及圖1所示。

龜裂超過容許範圍係因設計與施工上之疏忽所致，在進行修護前必先瞭解混凝土結構物劣化之原因，才能決定修護之方法及規範，劣化原因為(1)鋼筋發生銹蝕(2)碳酸化作用(3)冰凍損害(4)化學葯劑之侵蝕(5)氯化鈣問題(6)內部應力變化及(7)脹縮變位受限等概述如下：

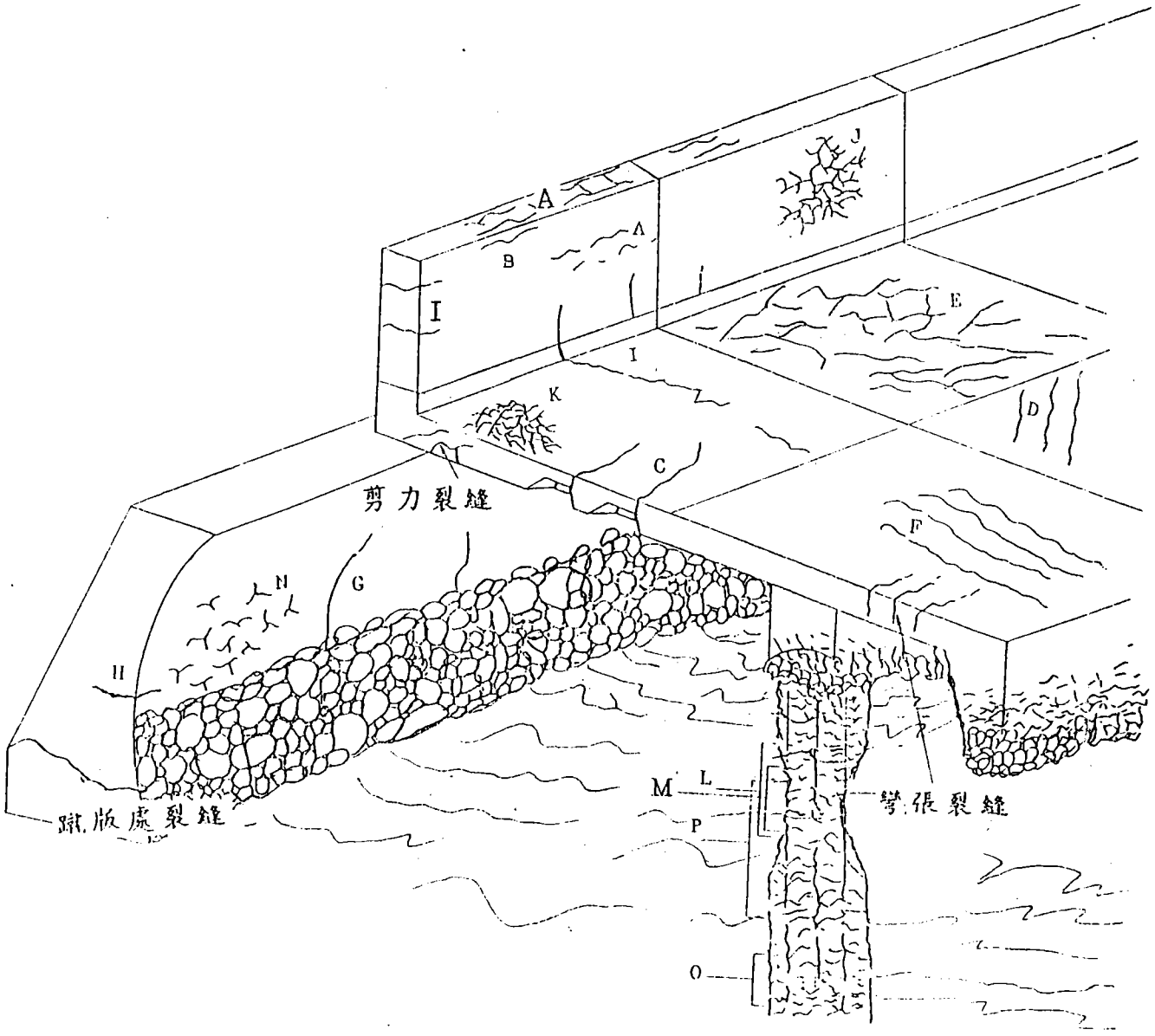


表一　混凝土結構物裂縫的類型

表二　實際發生裂縫之歸類（非結構性）

裂縫類型	代號 參考圖示	細分	普遍發生之位置	主要致因	次要致因	解決對策	察覺的時間 （施工後起算）
塑性沉陷	A	排筋過密	深長斷面	過度泌水	早期快乾情況	減少泌水 （輸氣或再振動）	十分～3小時
	B	彎曲	柱頂				
	C	版厚變化	槽型或格子型版				
塑性收縮	D	對角	路面及版	早期快乾	泌水率低	改善早期養護	卅分～6小時
	E	隨機	R・C・版				
	F	排筋過密	R・C・版	同上加上鋼筋太近表面			
早期熱收縮	G	外部抑制	厚牆	發生過熱	快速冷却	減熱 或/及 隔熱	1天～二、三週
	H	內部抑制	厚版	溫度變化太大			
長期乾縮	I		薄版 （或牆）	接縫不足	過度收縮及養護不足	減少及改善養護	數週～數月
裂紋	J	附隨模板	露面混凝土	不滲水模板	富配比及養護不良	改善養護及粉光	1－7天 （有時較晚）
	K	泥鏝混凝土	版	過度表面粉光			

鋼筋腐蝕	L	自然	柱及樑	保護層不夠	混凝土品質不良	減少表列致因	超過2年
	M	氯化鈣	預鑄混凝土	氯化鈣過量			
鹼骨材反應	N		潤濕區	反應骨材加上高鹼性水泥		減少表列致因	超過5年
化學侵蝕	O	水下基礎	橋墩及柱	CO_2、Mg^{+2} 離子、SO_4^{-2}	混凝土品質不良	改善混凝土品質	超過5年
物理性磨損	P	水面上下	橋墩及柱	波浪、砂、礫石浮冰之作用	骨材及混凝土品質不良	改善骨材及混凝土品質	超過5年



圖一　港灣結構物發生裂縫示意圖

(1)鋼筋發生銹蝕(Corrosion)

銹蝕是一種電磁機械現象，換言之，祇有導電的物體才會發生銹蝕，塑膠或混凝土等只會老化剝蝕而不會銹蝕。在良好的混凝土內，鋼筋是被一層高碱性薄層所緊密地保護著，這一層幾乎看不見的薄膜，本來是銹蝕的產品，但是它却成爲鋼筋外表的保護層，阻止它繼續銹蝕。

在水泥凝固前發生水化作用時，產生氫氧化鈣溶液，其酸碱度高達 12.5，鋼筋表面的氧化鐵層在這種高碱溶液裡非常穩定，所以包在裡面的鋼筋不會受到銹蝕。

鋼筋之銹蝕有三個主要原因：(1)外面的混凝土受到物理性或化學性的損害，使鋼筋暴露在外界的環境中，(2)混凝土本身發生化學變化，喪失其高碱度的性質，(3)保護鋼筋的氧化鐵薄層受到氯化物的侵害。

鋼筋一旦遭受銹蝕，不論是氧或金屬塩的影響，很快就導致斷面積的減少而降低其強度，造成對結構強度的重大影響。而且這種銹蝕會繼續向內蔓延，體積膨脹，撐破外面的混凝土，產生剝落現象。又促使鋼筋暴露的面積增加，加速其銹蝕作用。所以鋼筋混凝土的設計施工，必須注意：(1)混凝土要緊密不透水，(2)鋼筋外的混凝土保護層必須有適當的厚度，(3)混凝土內不應有氯化鈣等化學物品，(4)鋼筋外表有一層彈性良好的保護層以抗拒二氧化碳及水氣的侵襲。

(2)碳酸化作用(Carbonation)

含鈣的水泥與水結合時，產生許多水化產品，具有高碱性，在濕混凝土中造成酸碱度達12至13的高碱環境。混凝土暴露在大氣中，經常受到大氣中二氧化碳的侵襲，雖然正常大氣中二氧化碳的含量只有體積的千分之三，但是經年累月下來，混凝土表面的水化物會逐漸被二氧化碳所分解，使混凝土的碱性大爲降低。這種慢慢向內侵入的分解，稱爲「碳酸化作用」，被侵蝕喪失碱性的面層，則稱爲「碳酸化層」。

碳酸化作用最初使氫氧化鈣（鈉、鉀）分解成爲碳酸鈣（鈉、鉀）及水，然後繼續進行，使殘餘的含水矽化鈣（鋁、鐵）及其他塩類分解，最終成爲碳酸鈣、含水的氧化矽（鋁、鐵）以及含水硫酸鈣。

如果混凝土的品質良好，不透水性很高，上述的碳酸化分解作用進行得很慢，若干年下來，也不過侵蝕到幾公厘的深度而已，混凝土主體不會受到嚴重的影響，不過一旦混凝土有了裂縫，使空氣得以進入內部，則碳酸化的作用就進入更深的內層，如果混凝土本身品質控制得不好，內部有孔隙，則碳酸化的範圍就更爲嚴重了。

(3)冰凍損害(Frost Damage)

混凝土暴露在室外，最普遍的剝落原因之一就是冰凍和融化循環所造成的損害，透水或有裂縫的混凝土吸進了水份在結冰後，體積膨脹達百分之九，如果滲入的水流通受阻造成壓力，則結冰的溫度將因之降低，不斷的凍融循環最後將造成混凝土的崩壞。

(4)化學劑的侵蝕(Chemical Attack)

強烈的化學藥劑接觸到混凝土的表面使得混凝土的表面損壞或喪失其強度，硫化物的溶液也會對混凝土內已經硬化的水泥造成損害。硫化物的種類以及水泥的型別與損害程度有密切的關連，所以如果建築物的基礎是在含硫的土壤上，必須十分注意，確實瞭解土壤內硫化物的性質及含量，地下水的流動情形，使用抗硫水泥，提高混凝土品質並應切實控制施工。

(5)氯化鈣問題(Calcium Chloride)

氯化鈣一直被用作混凝土的早強劑，尤其在寒冷地區之使用甚爲普遍。習慣上認爲使用百分之二重量的氯化鈣片狀固體對混凝土不致造成損害，但是在實際使用時由於無法攪拌均勻，每每發生超用甚多的現象。（目前CP110規範規定通常鋼筋混凝土內氯化物離子的含量，在95％的試體中，平均不得超過0.35 ％，並不得有任何試體超過重量的0.5 ％。）如果混凝土透水或有裂縫，鋼筋就會很快發生銹蝕現象。

(6)內部應力變化(Internal Reaction)

在混凝土的內部，水泥與骨材之間，有時也會發生應力，碱質與骨材反應(Alkali Aggregate Reaction—AAR) 是在混凝土內的骨材與水泥作用所產生之反應，最普遍的是矽質的骨材與碱性的水泥間發生碱矽反應，產生鈣碱矽膠，這種矽膠能吸水，造成膨脹，侵蝕並撐裂混凝土。惟一可用的修護辦法只有設法阻止有水進入混凝土中，矽膠雖然存在，但是沒有水進入就不會膨脹。

(7)變位受限(Restrained Movement)

混凝土與其他材料一樣，在溫度發生變化時有熱脹冷縮的現象。同時，混凝在施工後，開始凝固也會收縮，水份蒸發太快也有局部收縮現象，如果受到限制，不能自由發展，就會產生崩壞或裂縫。

由於海水含有腐蝕因子，對港灣RC 結構物之耐久性影響很大，近年來陸續發現港灣RC 結構物上有析晶現象，然後表面有鋼筋銹斑最後有明顯龜裂、剝落發生。這些都是過去設計者未太重視有關耐久性的問題之故，因此耐久性之RC 結構物應能長久保持其原狀，品質及服務性(Serviceability) 等。

在港灣RC 結構物由於受到海洋環境潮汐(反覆乾濕) 及上部結構物之超荷……等多重作用影響，其受腐蝕之情形極爲複雜，爲瞭解現有港灣鋼筋混凝土結構物內鋼筋之腐蝕狀況等需作現場之詳細調查，而其耐久性與使用之水泥種類、水灰比、保護層厚度、裂縫之產生，施工良否及現場環境有密切關係，而現場環境又與海水中之溫度、PH 值、含塩量、硫酸塩含量……等，有密切之關係，目前這些資料在國內急需建立，以作爲日後建港及維護之參考。

本研究之主要目的爲：

㈠對港灣RC 結構物之耐久性提出充份之資料，作爲日後建港之參考。

㈡對目前各大港口RC 結構物之腐蝕狀況，作一通盤瞭解，作爲日後建港及維護之參考。

貳、工作內容

林維明・吳信昇

本計劃分爲四部份進行，包括資料蒐集海洋環境調查，現場觀測、試樣及採樣、試驗室試驗、資料分析。其目的在使繁複耐久性問題之研究以期整理成在國內較完整參考資料，預定五年內完，目前僅執行第一年之工作，茲就主要之工作內容概述如下：

2－1資料蒐集

本研究中資料蒐集，包括蒐集國內及國外文獻多種，內容則涵蓋試驗方法及步驟、及相關研究報告，然而因有很多試驗方法，儀器量測不盡相同，此則必須加以研判選擇之。另有些試驗方法如配此設計，NDT（非破壞試驗）、摻料……等，則參考我國CNS標準及美國ASTM之標準，綜合以上資料足供本研究參考。

本計劃主持人林維明在本年度內蒙國科會補助經費參加在英國倫敦舉行的1986年海洋混凝土國際會議，並於會後考察英國劍橋大學冶金與材料系，曼徹斯特大學腐蝕防治中心及丹麥腐蝕中心與專家學者研討對國外在海洋混凝土結構物耐久性之研究工作有更深入之認識，同時亦蒐集不少相關之研究資料，另外饒助理研究員正亦奉派參加在香港舉行的「海洋環境下之混凝土行爲」國際會議，同時並於會後並考察曼徹斯特大學及丹麥腐蝕中心，對於腐蝕試驗方法及步驟有更徹底之瞭解，本年內所蒐集之參考資料並在本報告中詳列。

在文獻回顧方面，本報告中附錄中僅列出已在國內工程技術雜誌中刊登之文章，介紹國外在此方面之研究成果，由於海洋RC結構物耐久性研究在國內之研究，本所爲先驅工作因此我們除加緊蒐集國外資料外並將於未來四年內繼續引進國外在這方面之技術新知。

2－2現場觀測、試驗及採集

2－2－1現場觀測

至基隆、台中、高雄、花蓮、蘇澳……五大港口在各種不同碼頭結構物照相，選擇較具代表性碼頭作爲本研究之研究重心，其選擇原則包括（新舊碼頭，各種不同構築材料、碼頭結構物是否有排水溝流入點，

不同使用狀況碼頭……等），本研究計劃在基隆港選擇6處、台中港5處、高雄港7處、花蓮港6處、蘇澳港5處等進行研究。

2－2－2現場試驗

首先使用現場水質測定儀，在所選定碼頭水域內量測海水之pH值、導電度、溶氧量、水溫……等，每年依四季不同，計劃觀測四次，每次在高低潮各觀測一次，然後作整個碼頭面非破壞性強度試驗（NDT），使用試驗鎚（Test Hammer），超音波探測器（Ultrasonic Test Equipment），將所有測點強度標示，並用現場腐蝕電位測儀測量整個碼頭面腐蝕電位，配合NDT結果繪成圖：可由圖中看出碼頭面，之混凝土強度與腐蝕電位之相對關係。

2－2－3現場採樣

在所選碼頭水域內依不同水深（0m.、 1m.、 2m.……）採集海水樣並委託國立中興大學環境工程系作水質分析，檢驗項目包括（氯塩、硫酸塩、總硫化物、鈣、鎂、鉀、鈉），並在碼頭壁面高低潮間之潮汐帶使用混凝土鑽心機來鑽取試體回試驗室內作含塩量測定，中性化深度，NDT試驗，抗壓強度，X光繞射及利用SEM觀察混凝土內微觀結構充分了解混凝土結構物劣化之原因。

2－3實驗室試驗

以不同之水泥、水灰比，保護層之厚度並配合現場碼頭原設計資料等製作試體，完成其基本性質測定，並作乾濕試驗，凍融試驗，中性化試驗……等，測其耐久性因子，另作腐蝕電位之量測，偵測其防蝕能力。另計劃摻加飛灰（Fly Ash）爐石（Slag）……等材料，並研究摻加此類材料對混凝土之耐久性成效如何？

2－4現場曝露試驗

本計劃擬製作不同之配比設計，保護層厚度，水泥種類，鋼筋塗裝等因素之混凝土試體置於各港作曝露試驗，定期作測試並與試驗室資料比較。

2－5資料分析

就以上試驗資料提出最佳之水泥種類，水灰比，保護層厚度、摻料

……等因素，作爲建港設計之參考，就觀測試驗之資料提出目前各港口可能之腐蝕情形作爲維護之參考。

參、研究方法

林維明・吳信昇

本研究之方法乃參考國外文獻及多篇相關研究報告而訂定之並繪成以下之流程圖，如圖 3 － 1 所示。

有關港灣混凝土結構物之規範在表3－1列出日本土木學會港灣協會及海事學會，美國混凝土工程學會,歐洲國際預力聯盟 (International Tederation of Prestressing 簡稱 FIP) 英國驗証學會 (British Veritas) 及挪威 DnV驗証學會 (Det norske Veritas) 等有關鋼筋混凝土及預力混凝土保護層厚度。裂縫控制，抗壓強度，混凝土施工材料包括水泥、骨材、水、混合劑、氯化物含量・有關配合比事項如混凝土之單位水泥量，水灰比，空氣含量及PC灌水泥漿等有關施工事項及檢查相關事項，在各種曝露條件卽海面上，潑濺區及海水中等各國均有定出規範可由表3－1 中加以比較。

表3－1 爲第一種加強耐久性之防蝕方法，另外第二種防蝕法相關之規範如表3－2，這些規範都正在研究發展中。

混凝土之試驗工作之研究方法根据 ACI規定。

有關耐久性偵測使用之技術如表 3－3 所示。

有關水質分析之研究方法係按標準方法滴定 Cl^-, S^{2-}及 SO_4^{2-}之含量，研究方法概述如下：

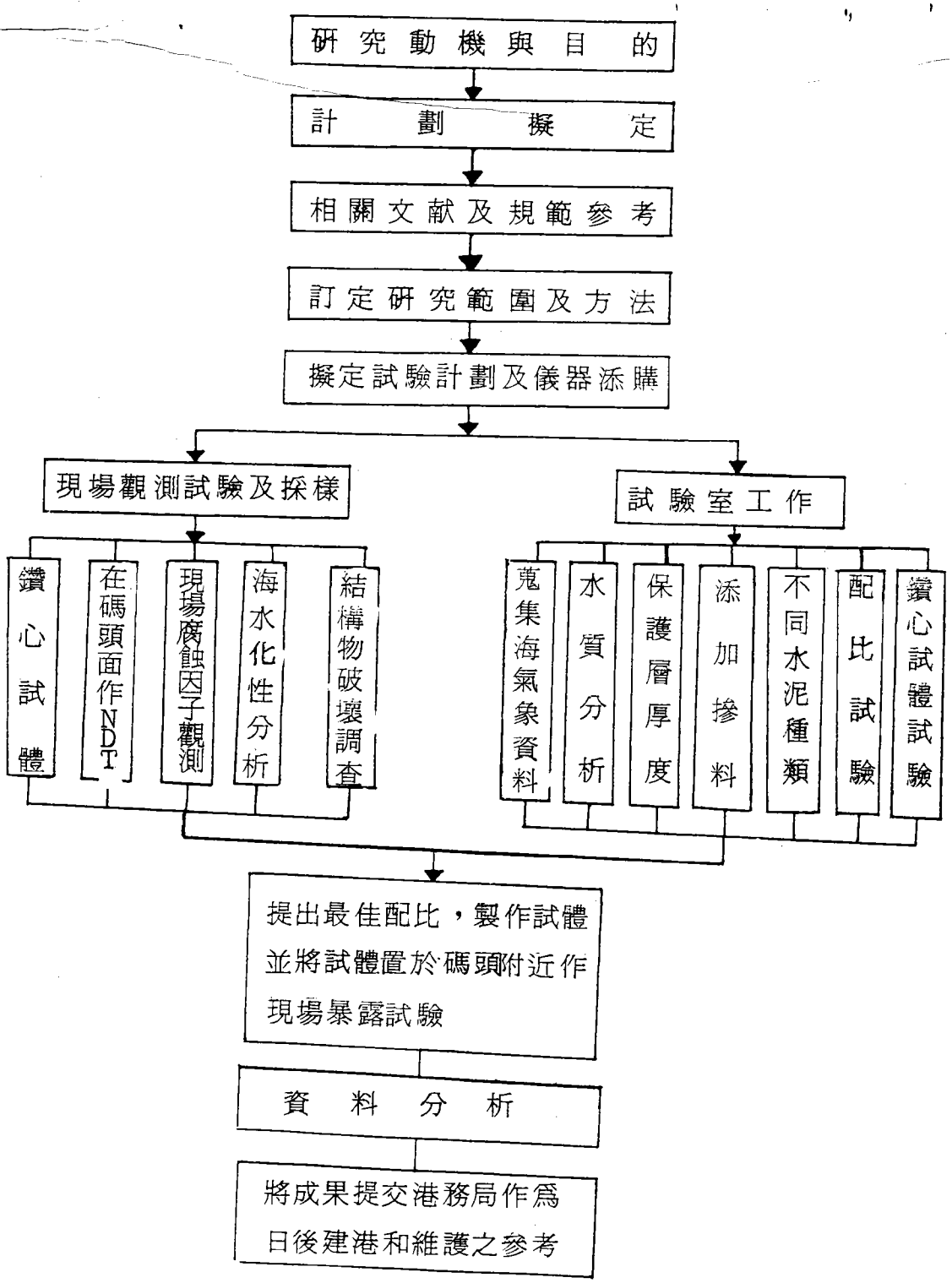

研究動機與目的
計劃擬定
相關文獻及規範參考
訂定研究範圍及方法
擬定試驗計劃及儀器添購
現場觀測試驗及採樣
試驗室工作
鑽心試體
在碼頭面作NDT
現場腐蝕因子觀測
海水化性分析
結構物破壞調查
蒐集海氣象資料
水質分析
保護層厚度
添加摻料
不同水泥種類
配比試驗
鑽心試體試驗
提出最佳配比，製作試體
並將試體置於碼頭附近作
現場暴露試驗
資料分析
將成果提交港務局作爲
日後建港和維護之參考

圖 3－1 研究方法流程圖

名稱			海洋混凝土構造物設計施工指針(1977)	港灣設施之技術基準及解說(1979)	預力混凝土平底船基準(1975)
制定機關			日本土木學會	日本港灣協會	日本海事協會
適用範圍			海洋混凝土構造物設計及施工情況適用	港灣設施之建設、改良，維護情況下適用。	預力混凝土平底船的船體材料設計及施工適用
有關設計事項	鋼材保護層厚度	鋼筋 大氣中	5cm 以上	50mm以上	船側及船底外周部70mm以上 上述以外部份40mm以上
		潑濺帶	7cm 以上	70mm以上	
		海水中	5cm 以上 (水中混凝土10cm以上)	50mm以上	
		PC鋼材 大氣中 潑濺帶 海水中	由主任技師判斷	預力混凝土設計施工指針（土木學會）	船側及船底外周部100mm以上 上述以外部份45mm以上
	裂縫的控制		有害裂縫不發生 大氣中 潑濺帶0.15mm以下 海水中0.2mm以下 且裂縫寬度的推定，依海洋構造物設計基準（日本港灣協會編）指示，計算之	容許裂縫寬度 (1)海水直接接觸部份，潮汐帶、飛沫帶 0.15mm (2)上述以上部份 0.2 mm $W=16C\sigma_s\phi D/Es$ 可用。 W：裂縫寬度 C：混凝土遮蔽活度與張力強度之比對撓曲材上側之鋼筋 丸鋼=1.2，異形棒鋼=0.6 對撓曲材下側之鋼筋 丸鋼=0.8，異形棒鋼=0.4 σ_s：裂縫斷面處鋼筋之應力(kg/cm^2) ϕ：鋼筋混凝土裂縫之斷面係數。 D：鋼筋之標稱直徑（mm） Es：鋼筋之彈性模數(kg/cm^2) $Es=2.1\times10^6 kg/cm^2$	鋼筋混凝土構造、裂縫寬度規制，使有害裂縫不發生
	強度	大氣中 潑濺帶 海水中	對於RC無規定 對於PC之規定 先拉式：350kg/cm^2以上 後拉式：300kg/cm^2以上	無筋混凝土135～180kg/cm^2 鋼筋混凝土240kg/cm^2以上 預力混凝土 先拉式 350kg/cm^2以上 後拉式 300kg/cm^2以上	先拉式400kg/cm^2以上 後拉式350kg/cm^2以上
混凝土材料	水泥		波特蘭水泥（4種類）高炉水泥，矽酸水泥，飛灰水泥，合乎JISR 5210，R5211，R5212及R 5213	需符合JIS規定	波特蘭水泥（3種類）高炉水泥，飛灰水泥，矽酸水泥

表 3 － 1 海洋混凝土結構物規範

uide for the Design and onstruction of Fixed ffshore Concrete tructure (1978)	Recommendation for the Design and Construction of Concrete Sea Structures (1977)		Rules and Regulations for the Construction and Classification of off-shore platforms (1975)	Rules for the Design. Construction and Inspection of offshore structures (1977)	Guidelines for the Design Construction and Classification of Floating Concrete Structures (1978)
A C I	F I P		B V	D N V	D N V
鋼筋混凝土及預力混凝土所製固定式（重力式）海洋構造物設計及施工適用	海洋混凝土構造物設計及施工適用		鋼製混凝土製海域平台之施工及船級鑑定適用	鋼製及混凝土製之海洋結構物適用	浮遊式混凝土製構造和之設計及施工及船級鑑定適用
）厚 （注1）* ）cm以上部 0mm以上 5mm以上 0mm以上	2）厚 50cm以下部材使用左記數值，不得已時，使用注2）中之最大值。	1）壁厚 75mm以上 60mm以上	2）壁厚 0.5mm以下骨材最大尺寸之1.5倍且最大鋼筋直徑之1.5倍以上。	40mm以上 50mm以上 50mm以上 骨材最大粒徑之1.5倍以上	25mm以上 40mm以上 25mm以上
75mm以上 90mm以上 75mm以上	（注2）**中a），b），c）的最大值加13cm	100mm以上 100mm以上 75mm以上		飛沫帶 80mm以上 飛沫帶 100mm以上 飛沫帶 100mm以上	飛沫帶 50mm以上 飛沫帶 80mm以上 飛沫帶 50mm以上
混凝土面發生張應力之處的最小鋼筋量 A_s 以次式規定 $A_s=\frac{f_t}{f_y}\cdot b\cdot de$ ：混凝土平均張應力 y：鋼筋降伏應力 ：斷面寬度 e：1.5c+10db c：混凝土被覆（保護層） b：鋼筋直徑 .2h≤de<0.5(h−x) h：斷面厚度 x：受壓深度	RC 常時荷重時 表面裂縫及寬度0.3mm以下及主筋之被覆之4／1000以下。 終局荷重時 鋼筋應力0.8fy以下。 pc 常時荷重時 表面裂縫寬度0.2mm以下，但是因裂縫而pc鋼材增加應力為相當於0.2mm裂縫寬度的鋼材應力50％以下 終局荷重時 表面裂縫寬度0.3mm以下 鋼筋應力0.8fy以下		國際預力協會發行之Recommendation for the Design sea structures 準據 r_m 混凝土 r_m 鋼材 ULS 1.50 1.15	$A_s\geq\frac{ftm+W}{fsp}\cdot b\cdot de$ ftm：混凝土平均張應力。 fsp：鋼筋之比例限界 W：裂縫處水壓 b：部材寬度 de：有效張力區 $=1.5c+10\phi$ c：混凝土被覆 ϕ：鋼筋直徑 $0.2h<de<0.5(h-x)$ x係以含有效斷面計算之	$A_s\geq\frac{ftm+W}{fsp}\cdot b\cdot de$ ftm：混凝土平均張應力。 W：裂縫處水壓 fsp：鋼筋之比例限界。（<fsy） b：部材寬度 de：有效張力區 $=1.5c+10\phi$ c：混凝土被覆 ϕ：鋼筋直徑
352kg/cm²以上 若有潮汐時，422kg/cm²以上	408kg/cm² 408kg/cm² 306kg/cm² 但是未直接接觸海洋環境時，306kg/cm²以上嚴重潮汐時，459kg/cm²以上。		306kg/cm²以上	由RILM施行的ϕ15cm×30cm−28日材齡強度為基準。材齡28日以降時隨材齡的強度伸長要考慮。 28日材齡前受荷重時，依其實際測定強度。	數值未明示時應使用ϕ15cm×30cm的28日材齡強度 〃 〃 關於張力強度依"offs-hore Rules之附錄D₄"為準。
波特蘭水泥（ASTMC150，C595） C_3A 含量：4～10％ 使用於油槽時，C_3A作減少之規定。	波特蘭水泥，耐硫酸鹽水泥，混合水泥，合乎各因規範。C_3A含量12％以下。		符合法國規格 C_3A 含量8％以下。	普通、改良、早強、低熱耐硝酸鹽、高爐、波特蘭水泥（ASTMI，II，III，IV，IS及IP）	"offshore Rules" 7.2,7.13（註3）***

名稱			海洋混凝土構造物設計施工指針（1977）	港灣設施之技術基準及解說（1979）	預力混凝土平底船基準（1975）	Guide for t and Constuc Fixed Offsh -te Structu
混凝土材料	骨材		骨材須具條件提示：不可含有不純物，有害物，海砂中的塩化物須爲乾重量之0.1%以下。	不可使用易碎的，辟開性的，強度小的，吸水性高的，有膨漲性的。對鋼筋混凝土，避免使用海砂。	不可含有不純物	與被洗掘物質有以上硬度的 ASTMC33·C 海砂以淡水洗
	水		有害物質不可含海水禁止使用	海水禁止使用（無筋混凝土，海水允許使用）	不可含有害物質海水禁止使用	RC { Cl —水 0. SO₄— 0. Cl—水 0. SO₄— 0.
	混和劑		宜使用良質減水劑，AE劑，火山灰之使用須由主任技師判斷。	減水劑，AE劑須符合土木學會規格。	受本協會承認的良質物	火山灰視試驗 。
	氯化物含量		依材料規制	由材料別規制	由材料別規制	RC:Cl—水 0. PC:Cl—水 0.
有關配合比例事項	混凝土	單位水泥量 大氣中	無記載 330kg／m³ 以上（但是水中混凝土，370kg／m³ 以上）	混凝土標準說明書基準	400kg／m³ 以上 400kg／m³ 以上 無記載	356kg／m³以 於薄部材或 475kg／m³以 要注意防止
		單位水泥量 飛濺帶	無記載			
		單位水泥量 海水中				
		水灰比 大氣中	〔附表—1〕	〔附表—2〕	45%以下	45%以下
		水灰比 飛濺帶			45%以下	40%以下
		水灰比 海水中			45%以下	40%以下
		空氣含量（包含凍結融解對策）	推荐使用AE劑，減水劑。	使用AE混凝土，空氣量40%爲標準。	AE劑、減水劑推荐使用。	需要凍結融 ACI 201,2
	PC灌水泥漿		W／C＝45%以下 預力混凝土標準說明書	預力混凝土標準說明書（土木學會）	W／C＝35～45%	ACI 318— 適合
有關施工事項			材齡4日時，保護被海水冲洗。避免於海中及受潮乾濕作用的部份施行澆置。儘量避免使用間隔物，以使用吊勾器具爲宜。	考慮接目	施工時應遵守有關建造工事之施工要領。詳細推荐參考預力混凝土標準說明書（土木學會）	需要水密性 1）粗骨材 徑的25%呈 2）塗上環 3）接著處 泥。
檢查有關事項	定期檢查		混凝土標準說明書	無記載	製造中檢查項目 1）材料試驗 2）水壓，水密試驗 3）海上試轉 4）搭載裝置有效試驗	必實施 1）一般的 2）材料劣 3）初期裂 4）附著生 5）防蝕系 6）洗掘防

1（續）

he Design tion of ore Concre re (1978)	Recommendation for the Design and Cons -truction of Concre -te Sea structures (1977)	Rules and Regulations for the Construction and classification of Offshore platforms (1975)	Rules for the Design Construction and In -spection of Offsho -re structure (1977)	Guideline for the Des -ign construction and classification of Floating concrete structures (1978)
同等或者持 的物質，合乎 330。 洗淨。	有水泥存在而變質的。 水泥反應之物質不可。 海砂塩分量，貝殼量在 容許值以下。	不可含有有害物。 SO_3化合物在0.1%以 下。 不純物（粘土）在2% 以下。	充份強度，耐久性， 適當之粒度。 不可含有產生化學反 應之物及有害物。	"offshore Rules"依据
水泥重量× 07%以下 水泥重量× 09%以下 泥重量× 04%以下 水泥重量× 09%以下	不可使用海水	塩分2g/l以下。 飲料水級之水質。	不可含有污濁物	"offshore Rules"依据
驗結果而使用	不可使用含有0.1%以 上的塩素離子之塩化鈣 混合劑及顏料。	不得含有塩分	須經本協會承認	"offshore Rules"依据
泥重量× 10%以下 泥重量× 06%以下	由材料別規制	由材料別規制	$CaCl_2$禁止使用	"offshore Rules"依据
以上。 巨積混凝土， 上使用時須 裂縫。	無記載 400kg/m^3以上 Gmax=400mm時， 320kg/m^3以上。 Gmax=200mm時， 360kg/m^3以上。	350kg/m^3以上 （希望能有400kg/m^3）	300kg/m^3以上 400kg/m^3以上 無記載	依据"offshore Rules" 依据"offshore Rules" 無記載
	40%～45%	45%以下 45%以下 45%以下	40%以下，希望最大 最大45%	依据"offshore Rules" 依据"offshore Rules" 依据"offshore Rules"
解對策時，依 R-78之規定	10－40mm之最大尺寸 骨材4～7% 但是對於氣泡徑分佈， 氣泡間隔須注意。	無記載	最大骨材粒徑40mm， 3%以下 最大骨材粒徑20mm， 5%以下 氣泡大小0.25mm以下	依据"offshore Rules"
77，16－18項	全膨脹率10%以下 禁止使用海水	壓縮強度：306kg/cm^2 以上 粘度2800μ/m	壓縮強度300kg/cm^2以 上。 Cl：C×0.05%以下 全膨脹率10%以下	依据"offshore Rules"
部材的接頭， 須處理其平均 現。 氣樹脂接著劑、 混凝土多用水	接頭施工，水和的溫度 上昇，寒中施工，養生 等之概念規定。	金屬及塑膠間隔物禁止使 用。接縫施工之考慮。	水泥的始發前打設 （省略）	有關鋼筋配置位置及PC 鋼棒配置位置，依据" offshore Rules"
施：檢查範圍 目視 化 縫 物 統 上工及基礎	定期的實施：檢查區 域：飛沫部，修理部 檢查範圍 1）一般的目視 2）材料劣化 3）裂縫 4）鋼筋電位測定。	每年實施：檢查區域 1）飛沫領域 2）檢查員指定區域 檢查範圍 1）一般的目視	5年以內實施：檢查範 1）一般的目視　圍 2）材料劣化 3）初期裂縫 4）防蝕系統 5）附著生物 6）堆砂	2年後實施檢查範圍 1）裂縫 2）混凝土劣化 3）鋼筋腐蝕

表

名稱		海洋混凝土構造物設計施工(1977)	港灣設施技術基準同解說(1979)	預力混凝土平底船基準(1975)	Guide for the Design and Construction of Fixed Offshore Concrete Structure (1978)
檢查有關事項	特別檢查	混凝土標準施工說明書準据	無記載	登錄爲繼續的檢查。	事故、損傷、劣化發現時，構造物安定有影響部份材料變更之時，諸條件變更時
備考	第2種防蝕方法關連	受磨損衝擊等的激烈作用部份要以適當材料保護其表面或須要增加鋼筋保護或斷面。	無記載	無記載	用冰磨損之時須要施行聚合物等之護膜 電防鋼材與鋼筋要離5cm以上。鋼材與其定著部須要實施電防施工。

(註1)*星搭接(star lap)厚度50cm以上部材時的值減13mm以上。

(註2)**a)骨材最大尺寸之1.5倍。
b)鋼筋最大尺寸之1.5倍。
c)20mm以上。

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

〔附表2〕
最大

(附表-1)

(1)凍結融解時常反覆之地域

構造物露出狀態＼斷面	薄 場合1)	普通 場合2)	厚 場合3)
a)濺沫區	50	55	55
b)潮汐區	45	50	55
c)海水中	55	60	65

(2)稀有變成冰點下氣溫之地域

構造物露出狀態＼斷面	薄 場合1)	普通 場合2)	厚 場合3)
a)飛沫帶	55	60	65
b)潮汐帶	45	50	55
c)海水中	55	60	65

構造部份＼材料
繫船直柱 基礎、胸
繫船岸上 構
無底沈箱 分格式,I
錨錠板

1)斷面厚度20cm程度以下構造部份。
2)不屬於1)及3)之部份
3)巨積構造物的表面部份。
注)本表是由耐久性而定的AE混凝土之最大水灰比(%)

表 3 － 1（續）

Recommendation for the Design and Construction of Concrete Sea structures (1977)	Rules and Regulations for the Construction and Classification of Offshore Platforms (1975)	Rules for the Design Construction and Inspection of Offshore Structures (1977)	Guidelines for the Design Classifica and Ciassifica of Floating Concrete Structure (1978)
無記載	每四年後船級更新實施檢查 1）飛沫領域 2）裝置、設備	發現事故損傷時，通知檢查	每 4 年實施。 檢查苑圍。 1）0.2 mm 以上的裂縫 2）混凝土裂劃 3）鋼筋的腐蝕 4）防蝕系統 檢查位置 1）飛沫區　2）接頭部 3）補修區　4）應力集中處
對被覆之聚合物及永久等護膜之特別防蝕施工時可以緩和被覆施工	無記載	護膜，亞鉛鍍金，陰極防蝕可。 異質的 pc 鋼材之使用引起電蝕之可能性，不可。	依据 “offshore Rules”

表 3 － 2 第 2 種防蝕法相關規範

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

大水灰比（%）

	受凍結融解的地區	不受凍結融解的地區
、 牆	60	65
結	60	65
，# 形	55	55
	60	60

表3－3　鋼筋混凝土結構物耐久性偵測使用之技術

		特性檢驗	試驗技術	其他考慮
力學特性	現場	混凝土表面品質	試驗錘讀數	由於表面軟化，裂紋，或層剝引起之誤差
	試驗室	抗壓、抗張強度	鑽心試驗	
化學特學	現場	碳化 氯、硫、水份 含量	利用酚酞噴霧量測碳化深度。利用衝擊鑽孔機蒐集10－25mm條狀之受污染試體。	依据BS 4550方法分析結果之曲線可得到穿透常數。
	試驗室	混凝土配合比例、 水泥種類 原始水灰比 組成材料礦質	依据BS 1881 P.76 硬化混凝土分析法 鋁鐵比例 利用x－ray繞射法	普通波特蘭水泥（opc）：鋁：鐵＞71.5 抗硫波特蘭水泥（SRPC）：鋁：鐵＜0.9
物理特性	現場	鋼筋埋置情況 鋼筋埋置情況 鋼筋埋置情況 鋼筋埋置情況 保護層之情況	電化學電位法 電阻抗量測法 超音波法（非直接法） 利用內視鏡觀測鋼筋埋置情形。 利用R－Meter探測保護層，鋼筋號數間距等。	依据ASTM C876與其他非破壞性試驗所得結果之關係，小心解釋： 基於土壤阻抗量測， 利用變化探頭間距與最適線間距對時間之關係以計算傳遞速度： 保護層超過100mm及鋼筋搭接處較有問題：
	試驗室	保護層滲透性。 熱擴張係數 混凝土密度／孔隙 一般性（鋼筋與混凝土）	水滲透性、氧擴散常數 常觀及微觀測試	通常利用透水試驗量測，以確定骨材來源，炉石，火山灰及飛灰之存在否。

3. 1. 氯塩 (Chloride)之檢驗法

3. 1. 1. 概述：

氯塩爲水及廢水中之主要無機陰離子。當水中氯塩含量達 250mg/L 且陽離子爲鈉時，可感覺鹹味。但當陽離子爲鈣或鎂時，氯塩含量高達 1000mg/L 並不感覺鹹味。

在尚未採用生物污染指標之前，一般以水中的氯塩含量或氮（氨氮、硝酸氮、亞硝酸氮）含量，做爲水是否遭受污染的指示。

高量的氯塩會損壞金屬之管線與設備以及影響植物生長。

3. 1. 2. 方法的選擇：

(A) 硝酸銀法 (Argentometric Method) ：適用於被滴定液之氯塩在 0.15 ～ 10*mg* Cl^- 之水樣。

(B) 硝酸汞法 (Mercuric Nitrate Method)：滴定終點較爲明確。

(C) 電位滴定法 (Potentiometric Method)：適用於有色或混濁之水樣。

(D) 氰化鐵法 (Automated Ferricyanide Method)：爲自動操作使用法。

3. 1. 3. 取樣及貯藏：

收集代表性水樣於乾淨的玻璃或塑膠瓶中，水樣體積 100ml 已足夠，貯存時可以不必加入任何葯品。

3. 1. 4. 硝酸銀法：

1. 原理：於中性或微鹼性溶液中，以鉻酸銀滴定氯塩，用鉻酸鉀當指示劑，在紅色鉻酸銀形成之前，氯化銀已沉澱。

2. 試劑：

① 鉻酸鉀指示劑：50g K_2CrO_4 溶於少許蒸餾水中，加入 $AgNO_3$ 溶液直至紅色沈澱產生，靜置 12小時，過濾，用蒸餾水稀釋至 1 升。

②標準硝酸銀滴定液，0.0141 N:2.395g $AgNO_3$ 溶於蒸餾水中，稀釋1000ml，貯存於棕色瓶中。以0.014NNacl 溶液標定，方法依步驟(2)。1.00ml = 500ug Cl^-。

③標準氯化鈉溶液，0.0141N:取少量NaCl於140°C乾燥後，稱取824mg溶於水，稀釋至1,000mL。1.00mL=500ug Cl^-。

④去干擾之特殊試劑：

(1)氫氧化鋁懸濁液。

(2)酚酞指示劑。

(3)硫酸，1 N。

(4)氫氧化鈉，1 N。

(5)過氧化氫，30 %。

3.步驟：

(1)準備水樣：

取100 ml水樣或適量，稀釋至100ml。

若水樣含高色度時，加入3mL $Al(OH)_3$ 懸濁液，混合，靜置並過濾。

若水樣含有硫化物、亞硫酸塩或硫代硫酸塩時，加入1ml H_2O_2攪拌1分鐘。

(2)滴定：

以 H_2SO_4 或NaOH 調水樣pH於7～10之間。

加入1.0mL K_2CrO_4 指示劑。

用 $AgNO_3$ 滴至紅棕色出現。

取100mL蒸餾水做空白試驗，一般消耗量在0.2～0.3mL。

4.計算：

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

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。

$$mg\ NaCl/L = mg\ Cl^-/L \times 1.65$$

3. 1. 5. 硝酸汞法：

1. 原理：氯塩可與硝酸汞反應，生成可溶的氯化汞。於pH 2.3～2.8之內，diphenylcarbazone可與多出的汞離子形成紫色的複合物，表示達滴定終點。而Xylene Cyanol FF可做爲pH之指示劑並增助終點辨色。

2. 儀器設備：

①三角瓶，250 ml。

②微量滴定管，5 ml，每一刻劃0.01 mL。

3. 試劑：

①標準氯化鈉溶液，0.0141 N。

②硝酸，0.1 N。

③氫氧化鈉，0.1 N。

④氯塩含量低於100 mg/L時使用的試劑：本試劑中硝酸濃度係檢測成功與否之重要因素，在(a)或(b)中可改變其用量以適應水樣之鹼度範圍。

(1)指示劑—酸化劑之混合試劑：試劑(a)含足夠的硝酸，於100ml水樣中可中和總鹼度爲150mg $CaCO_3$/L至適當pH值。若鹼度異於150mg/L者，得調整硝酸的用量。

(a)依次溶解250mg S-diphenylcarbazone，4.0ml濃硝酸與30mg Xylene Cyanol FF於100ml 95%乙醇中。此試劑不穩定應貯於棕色瓶中，並放於冰箱內。若變質會使終點不明顯，使結果偏高。

(b)用pH meter(參考電極爲非氯塩型式者)，以0.1 N HNO_3或0.1 N NaOH將水樣pH調至2.5±0.1。此時指示劑中不再加硝酸。

(2)標準硝酸汞滴定液，0.0141 N：溶 2.3g $Hg(NO_3)_2$ 或 2.5g $Hg(NO_3)_2 \cdot H_2O$ 於 100ml含0.25ml 濃硝酸之蒸餾水中，稀釋接近 1 L，依步驟 4 a 中所述標定其濃度。標定時，取 5.0ml 標準氯化鈉溶液與 10mg $NaHCO_3$ 稀釋至 100ml。標定後再將此滴定液濃度調至 0.0141N，最後再標定一次。1ml = 500ug Cl^-。貯於棕色瓶中。

⑤氯塩含量高於 100mg／L 時使用的試劑：

(1)混合指示劑溶液：

溶 0.50 g diphenylcarbazone粉末與 0.05g bromphenol blue 粉末於75 mL 95％乙醇中，再用95％乙醇稀釋至 100mL。

(2)標準硝酸汞滴定液，0.141 N:

溶25 g $Hg(NO_3)_2 \cdot H_2O$ 於900mL含 5.0mL濃硝酸的蒸餾水中，稀釋接近 1 L，依步驟 4 b 中所述標定之。標定時，取 25.00mL 標準氯化鈉溶液與25 mL 蒸餾水。標定後將滴定液濃度調至 0.141N，最後再標定一次。

1.00mL = 5.00 mg Cl^-。

4.步驟：

(a)氯塩含量低於 100mg／l 之滴定：

(1)取 100ml 水樣或較少量稀釋至 100ml，使其中氯塩含量少於 100mg。

(2)加 1.0ml 指示劑—酸化劑之混合劑。此時溶液應呈藍綠色，若現淡綠色表示 pH<2.0，純藍色表示 pH > 3.8。大部分飲用水於加入混合試劑後，可使 pH 達 2.5 ± 0.1。對強酸性或鹼性廢水，可先將 pH 調至 8，再加混合試劑。

(3)用 0.0141 N $Hg(NO_3)_2$ 滴定至紫色終點。終點前溶液顏色由藍綠色變至藍色，再加少許幾滴即達終點。

(4)取 100mL含 10mg $NaHCO_3$ 的蒸餾水，做一空白試驗。

(b) 氯塩含量高於 100mg／L之滴定：

(1)取適量水樣（5 ～ 50mL）使滴定量少於 5mL。

(2)加約 0.5mL 混合指示劑溶液，充分混合，溶液應呈紫色。

(3)一滴一滴加入 0.1 N HNO_3至溶液剛好變爲黃色。

(4)用 0.141 N $Hg(NO_3)_2$ 溶液滴至暗紫色。

(5)取蒸餾水依同法，做一空白試驗。

5.計算：

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

式中，A ＝水樣之滴定用量，ml。

B ＝空白試驗之滴定用量，ml。

N ＝ $Hg(NO_3)_2$之當量濃度。

3. 2. 硫酸塩之檢驗法

3. 2. 1. 概論：

硫酸塩是自然水中的主要陰離子。給水中，若適量時對人類有清腸胃、通大便的功用。基於此，美國公共衞生局建議在給水中的最高量爲 250mg/L。工業用水中多量的硫酸塩將在鍋爐中產生鍋垢，或在熱交換器管壁上產生結垢。此外，硫酸塩在厭氧菌存在之下還原爲硫化氫，產生臭味與腐蝕問題，其反應如下：

$$SO_4^{2-} + \text{有機物} \xrightarrow{\text{厭氧細菌}} S^{2-} + H_2O + CO_2$$

$$S^{2-} + 2H^+ \rightleftarrows H_2S$$

$$H_2S + 2O_2 \xrightarrow{\text{細　菌}} H_2SO_4$$

3. 2. 2. 方法的選擇：

測定方法有三種：(A)焙燒餘留物之重量法(B)乾燥餘留物之重量法(C)濁度法。其中，方法(A)與(B)適用於硫酸塩濃度大於 10mg/L，(C)適用於 1～40mg SO_4/L。

3. 2. 3. 取樣及貯藏

含有機物的水樣若有細菌存在時，會將硫酸塩還原爲硫化物，故嚴重汚染的水樣應貯存於低溫下。

3. 2. 4. 分析方法—濁度法

1. 原理：硫酸塩離子在乙酸溶液中，可與氯化鋇反應，生成硫酸鋇的沈澱。利用反光光度計或分光光度計測量硫酸鋇懸浮液之吸收度，然後由標準曲綫求得硫酸塩離子的濃度。
2. 干擾：大量之色度或懸濁物質將有干擾作用。有些懸濁物質可用過濾除去。如兩者與硫酸塩離子濃度比起來並不多，可照步驟 4 之方法改正干擾影響。矽超過 500mg/L 時有干擾，且水中含大量有機物質時，可能無法得到令人滿意的硫酸鋇

沈澱。

飲用水中之離子在酸液中，能與鋇離子形成不溶解化合物者只有硫酸塩。檢驗應在室溫下進行，在10°C 差別之範圍內不致造成太大之誤差。

3. 最小檢出濃度：約 1mg／L 硫酸塩。

4. 儀器：

(1)磁攪拌器：於每個水樣與標準液之施測時，維持定常的攪拌速度，並避免濺出。

(2)光度計：下列任選一種。

①反光濁度計。

②分光光度計：用波長 420nm，光徑 2.5 ～ 10 *cm*。

③濾光光度計。

(3)馬錶或電動計時器。

(4)量匙：0.2 ～ 0.3ml 。

5. 試劑：

(1)緩衝溶液 A：溶 30 g 氯化鎂 $MgCl_2 \cdot 6H_2O$、5g 醋酸鈉 $CH_3COONa \cdot 3H_2O$、1.0g 硝酸鉀 KNO_3與 20ml 99％乙酸於 500ml 蒸餾水中，並稀釋至 1000ml 。

(2)緩衝溶液 B：當硫酸塩濃度低於 10mg／L 時需用之。溶 30 g 氯化鈉、5 g 醋酸鈉、1 g 硝酸鉀、0.111g 硫酸鈉與 20ml 99 % 乙酸於 500ml 蒸餾水，並稀釋至 1000ml 。

(3)氯化鋇晶體：20 ～ 30 mesh 的 $BaCl_2$。

(4)標準硫酸塩溶液：如①或②準備一種。

①稀釋 10.4ml 0.02 N 硫酸（鹼度所用之滴定液）至 100ml。

②溶 0.1479g 無水硫酸鈉 Na_2SO_4於蒸餾水，並稀釋至 100ml 。

可得 1ml = 100ug SO_4^{2-}。

6. 步驟：

(1)形成硫酸鋇濁度：

量取100ml水樣，或適當量稀釋至100ml，置於250ml三角燒瓶中加20ml緩衝溶液，在攪拌器中混合。在溶液仍在攪拌時，加一匙氯化鋇結晶，立即開始計時，在一定速率下攪拌60 ±2秒。

(2)硫酸鋇的測定：

攪拌終了後，立即將水樣倒入光度計之管中，並在5 ±0.5分鐘內測定。

(3)繪製標準曲綫：

取標準硫酸塩溶液同上述之方法製成一標準曲綫，將水樣之濁度讀數與其比較，可算得硫酸塩濃度，標準之範圍在0到40mg/L之間，每支相差5 mg/L。在40mg/L以上時此法之準確度將遞減，硫酸鋇懸濁液將失去穩定。

(4)水樣色度與濁度的校正：

水樣中含色度或濁度時應做空白試驗，不加氯化鋇以校正之。

7. 計算：

$$mg\ SO_4^{2-}/L = \frac{mg\ SO_4^{2-} \times 1000}{\text{水樣體積 (ml)}}$$

3. 3. 水中硫化物檢驗法

3. 3. 1. 甲烯藍比色法原理

於氯化鐵存在下，水中硫化物與對氨基二甲苯胺反應生成甲烯藍（methylene blue），加入磷酸銨去除鐵離子之顏色干擾後，以分光光度計測其吸光度定量之。

3.3.2. 適用範圍：本方法適用於水及廢污水中溶解性及可溶於酸之硫化物之檢驗，濃度範圍爲0.1～2.0mg／L。

3.3.3. 干擾

(1) 水樣之濁度或顏色，影響分光光度計讀值，可加入氫氧化鋁膠羽去除之。

(2) 亞硫酸根、硫代硫酸根、碘離子等之干擾，可先生成硫化鋅沈澱，棄去上澄液以排除之。

(3) 曝氣易使硫化物揮發，故應避免水樣曝氣。

(4) 高濃度之硫化物本身阻礙呈色反應，爲避免檢驗錯誤，對於可能含有硫化物但無呈色反應之水樣，應先以酒石酸銻鉀溶液作定性之測定（註）。

3.3.4. 設備

(1) 玻璃瓶，具瓶塞，容量100mL或500mL。

(2) 分光光度計，使用波長625nm。

3.3.5. 試劑

(1) 蒸餾水：一般蒸餾水。

(2) 氫氧化鈉溶液，6N：溶解240g 氫氧化鈉（NaOH）於蒸餾水，稀釋至1L。

(3) 氯化鋁溶液，6N：溶解100g氯化鋁（$AlCl_3 \cdot 6H_2O$）於144mL蒸餾水。

(4) 醋酸鋅溶液，2N：溶解220g醋酸鋅（$Zn(C_2H_3O_2)_2 \cdot 2H_2O$）於870mL蒸餾水，稀釋至1L。

(5) 胺基—硫酸儲備溶液，在100mL量瓶內，溶解27g對氨基二甲苯胺草酸鹽（P-aminodimethylaniline oxalate）於經冷却之50mL濃硫酸（H_2SO_4）與20mL蒸餾水之混合溶液中，冷却後，以蒸餾水稀釋至刻度；貯藏於棕色玻璃瓶，試劑放久會褪色但仍可使用。

(6) 胺基—硫酸試劑：溶解 25mL 胺基—硫酸儲備溶液於 975mL 1＋1 硫酸溶液中，此試劑應澄清，貯藏於棕色玻璃瓶。

(7) 氯化鐵溶液：溶解100g 氯化鐵（$FeCl_3 \cdot 6H_2O$）於40mL 蒸餾水。

(8) 磷酸氫二銨溶液：溶解 400g 磷酸氫二銨（$(NH_4)_2HPO_4$）於800mL 蒸餾水。

(9) 澱粉指示劑：取 2 g 可溶性澱粉於燒杯，加入少量蒸餾水攪拌成乳狀液，將此乳狀液倒入於 100 mL 沸騰之蒸餾水中，煮沸數分鐘後靜置一夜；加入 0.2g水楊酸（Salicylic acid）或數滴甲苯（toluene）保存之，使用時取其上澄液。

(10) 碘酸氫鉀標準溶液，0.025N：在 1,000mL 量瓶內，溶解0.8124g 碘酸氫鉀（$KH(IO_3)_2$）於蒸餾水，稀釋至刻度。

(11) 重鉻酸鉀標準溶液，0.025N：在 1,000mL 量瓶內，溶解 1.226g無水重鉻酸鉀（$K_2Cr_2O_7$）於蒸餾水，稀釋至刻度。

(12) 硫代硫酸鈉滴定溶液，0.025N：在 1,000mL 量瓶內，溶解6.205g 硫代硫酸鈉（$Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$）於經煮沸而已冷却之蒸餾水，加入0.4g 氫氧化鈉（NaOH），稀釋至刻度，貯存於棕色玻璃瓶。使用前標定。

標定方法（碘酸氫鉀法或重鉻酸鉀法）

① 碘酸氫鉀法：在三角瓶內溶解 2 g 不含碘酸鹽之碘化鉀（KI）於100～150mL 蒸餾水，加入1mL 6N硫酸溶液（或數滴濃硫酸）及20.0 mL 碘酸氫鉀標準溶液，以蒸餾水稀釋至約 200 mL，即以硫代硫酸鈉滴定溶液滴定，在接近終點時加入澱粉指示劑。

② 重鉻酸鉀法：在三角瓶內溶解 2 g 不含碘酸鹽之碘化鉀於100～150 mL 蒸餾水，加入1mL 6N硫酸溶液（或數滴濃硫酸）及20.0 mL 重鉻酸鉀標準溶液，靜置於暗處5分鐘後，稀釋至約400mL，即以硫代硫酸鈉滴定溶液滴定，在接近終點時加入澱粉指示劑。

(13) 碘標準溶液，0.0250N：在1,000mL 量瓶內，溶解20～25g碘化鉀於少量蒸餾水，加入3.2g碘（I_2），混合溶解後稀釋至刻度；以 0.0250N 硫代硫酸鈉滴定溶液標定之。

(14) 硫化物儲備溶液：在1,000mL 量瓶內，溶解7.5g 硫化鈉（$Na_2S \cdot 9H_2O$）於新煮沸且冷却之蒸餾水，稀釋至刻度，本溶液每天配製。

(15) 硫化物標準溶液：在1,000mL 量瓶內，稀釋20.0mL 硫化物儲備溶液於新煮沸且冷却之蒸餾水，稀釋至刻度；使用前配製並標定之。

標定方法

在500 mL 三角瓶中，放入100mL 硫化物標準溶液，10.0 mL 0.0250N 碘標準溶液，滴入2滴濃鹽酸（HCl）混合，以0.0250N 硫代硫酸鈉滴定溶液滴定，在接近終點時加入澱粉指示劑，同時用蒸餾水作一空白試驗。

硫化物濃度（mg S／L）＝4×（A－B）

A＝空白所消耗之0.0250N 硫代硫酸鈉滴定溶液體積（mL）

B＝硫化物標準溶液所消耗之0.0250N 硫代硫酸鈉滴定溶液體積（mL）

3.3.6. 步驟

(1) 溶解硫化物之測定

① 在100mL 之玻璃瓶，加入0.2mL（4滴）6 N 氫氧化鈉溶液，以水樣裝滿玻璃瓶，加入0.2mL 6 N 氯化鋁溶液，小心蓋緊瓶塞使無氣泡遺留在內。

② 將玻璃瓶上下劇烈搖動約1分鐘，使膠羽凝聚，靜置約5～15分鐘，取上澄液，依下述步驟(2)①～⑥或④～⑥操作。

(2) 總硫化物之測定

① 在100mL 之玻璃瓶，加入0.15 mL（3滴）2 N 醋酸鋅溶液，以水樣充滿玻璃瓶，逐滴加入6 N 氫氧化鈉溶液，使pH 爲10.0，小心蓋緊瓶塞使無氣泡遺留在內（若預估硫化物含量低時，可使用500 mL 之玻璃瓶，照比例增加醋酸鋅溶液用量，同樣操作之）。

② 將玻璃瓶上下劇烈搖動，靜置約30分鐘使膠羽沈澱。

③ 小心用虹吸法棄去上澄液（勿損失任何沈澱物），加入蒸餾水稀釋至100mL。

④ 取上述水樣7.5mL，置於試管。

⑤ 加入0.5mL 胺基—硫酸試劑及0.15 mL 氯化鐵溶劑，緩慢倒轉試管一次混合之，靜置3～5分鐘，使呈色反應完全。

⑥ 加入1.6mL 磷酸氫二銨溶液，混合均勻，靜置3～15分鐘；使用分光光度計讀取吸光度，由檢量線求得硫化物含量（μg）。

3.3.7. 檢量線製備

分別精取適量硫化物標準溶液，配製含有0，10，20，30，40，60，80，100

μg 硫化物標準溶液 100mL，依步驟6.(2)④～⑥操作，讀取吸光度，繪製硫化物含量（μg）—吸光度之檢量線。

3.3.8. 計算

(1) 硫化物濃度（mg S／L）$=\frac{\text{檢量線求得之硫化物含量（}\mu g\text{）}}{\text{水樣體積（mL）}}$

(2) 硫化氫（H_2S）濃度

溶解硫化物包括硫化氫（H_2S）及HS^-，與氫離子（H^+）成平衡狀態：

$$H_2S \leftrightharpoons H^+ + HS^-$$

$$K' = \frac{[H^+][HS^-]}{[H_2S]}$$，K′ 爲硫化氫之解離常數

$$pK' = pH - \log\frac{[HS^-]}{[H_2S]}$$

$$pK = pH - pK' = \log\frac{[HS^-]}{[H_2S]}$$

硫化氫之解離常數K′，隨溶液之溫度及離子強度而變化表3-5爲不同溫度及電導度時之pK值測定溶液之 pH 值，計算pK（＝pH －pK′），由附圖可查得溶解硫化物中硫化氫之百分比J，則硫化氫之濃度（以S 表示之）＝J ×溶解硫化物濃度。

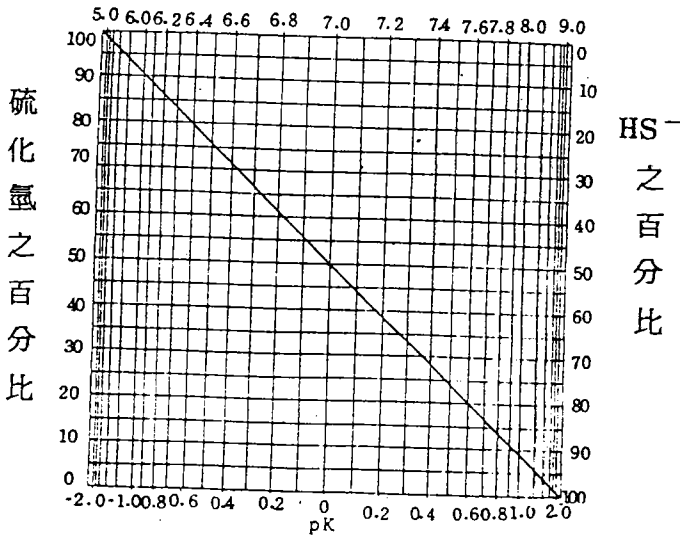
3.3.9. 參考資料

APHA, Standard Method for the Examination of Water and Wastewater, 15th Edition, pp.442～450, (1981).

（註） 在約200mL 之水樣，加入 0.5mL飽和酒石酸銻鉀（potassium antimony tartrate）溶液及 0.5mL 6 N鹽酸溶液，硫化物濃度僅爲 0.5mg／L時，即可生成黃色的硫化銻（Sb_2S_3）沈澱。

表3－5：不同電導度或溫度時之 pK′

電導度 μʊ/cm (25℃)	不同溫度之 pK′		
	20℃	25℃	30℃
0	—	7.03	
100	7.08	7.01	6.94
200	7.07	7.00	6.93
400	7.06	6.99	6.92
700	7.05	6.98	6.91
1,200	7.04	6.97	6.90
2,000	7.03	6.96	6.89
3,000	7.02	6.95	6.88
4,000	7.01	6.94	6.87
5,200	7.00	6.93	6.86
7,200	6.99	6.92	6.85
10,000	6.98	6.91	6.84
14,000	6.97	6.90	6.83
22,000	6.96	6.89	6.82
50,000	6.95	6.88	6.81



附圖 溶解硫化物中之硫化氫及HS^-之百分比

肆、海氣象調查

林維明・吳信昇

港灣鋼筋混凝土因曝露在海洋環境下，而大氣中含有氧、水分、CO_2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、空氣中含有污染物等，而海洋中之潮位變化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風、溫度、濕度、雨量，雨水中PH 值、潮位等資料分述如下：

4－1 風

海風會挾帶含有塩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口之風連風向玫瑰圖按全年風圖及月份風圖分別繪製10年之平均值如圖 4－1～4－15。

4－2 溫度

溫度影響混凝土之熱脹冷縮造成混凝土之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口之溫度如圖 4－16所示。

4－3 溼度

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溼度影響，根據中央氣象局15.年之資料繪製五大港口之相對溼度如圖 4－17～4－18。

4－4 雨量

雨量多爲較潮溼帶，爲易發生腐蝕之條件整理中央氣象局15年之平均雨量資料，繪製五大港口之平均雨量如圖 4－19所示。

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結論如下：

1. 就各地雨水之pH 值言，臺灣地區之酸雨已普遍可見，尤其以民國75.年夏季之雨水，各區之pH 平均值均在4.74 以下，而且夏季在夏季降雨中有76％場雨之pH 值在5.6 以下，即臺灣各地每100場雨

有76場雨爲酸雨，值得注意。

2. 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，東海岸區爲最低（33.5％），而東北區、北部區爲最高（分別爲64.5％，68.5％）。

3. 就空間變異而言，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pH值有偏高之趨勢。

4. 臺灣地區之雨水水質與世界各國比較，發現Na^{+}與Cl^{-}之濃度有偏高之現象，此結果與英國類似，因爲兩地均爲海島所致。就SO_4^{2-}而言，臺灣地區與世界各國相當，NO_3^{-}則略偏低，可能是臺灣地區汽車數量較國外爲少之故；至於Ca^{2+}，Mg^{2+}則有偏高之現象。

4－6 潮位

潮位有下列各種名稱，如第4－20圖所示。

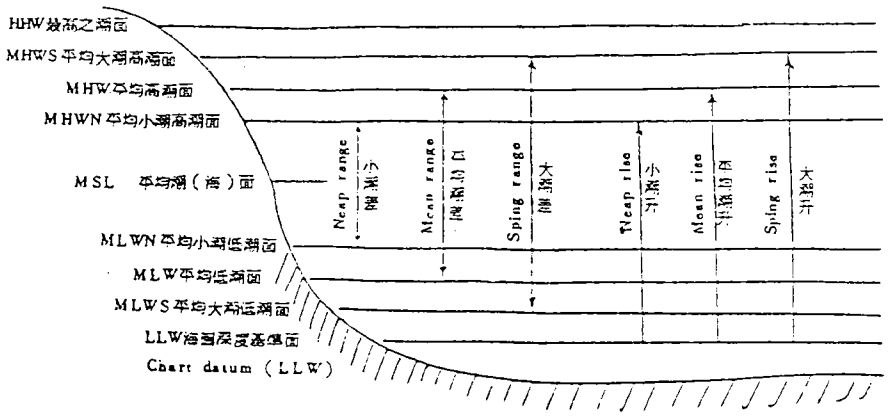


圖4－20圖　海洋潮汐分類

㈠大潮：在朔望附近時之潮汐。

㈡大潮高潮面：大潮時之滿潮面，或稱朔望滿潮面。

㈢大潮低潮面：大潮時之低潮面，或稱朔望低潮面。

㈣小潮：在上下弦附近之潮汐。

㈤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。

㈥小潮升：基準水面量到小潮高潮面。

以上所述爲天文潮位(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

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

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：根據基隆港務局蘇澳工程處民國72年所出版“蘇澳港興建工程”上册第89頁資料

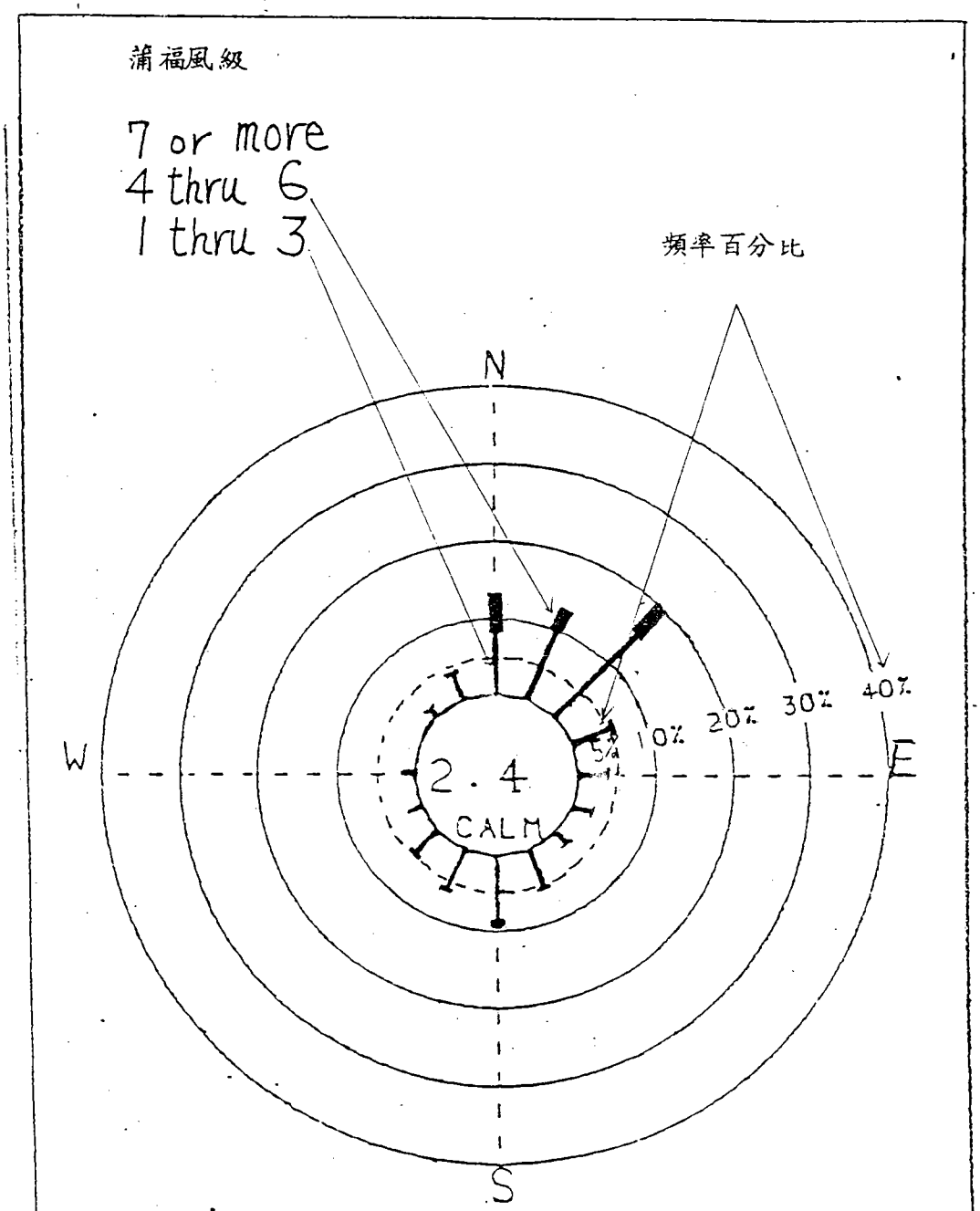


圖 4 － 1　基隆港全年風玫瑰圖（ 1971 ～ 1980 ）

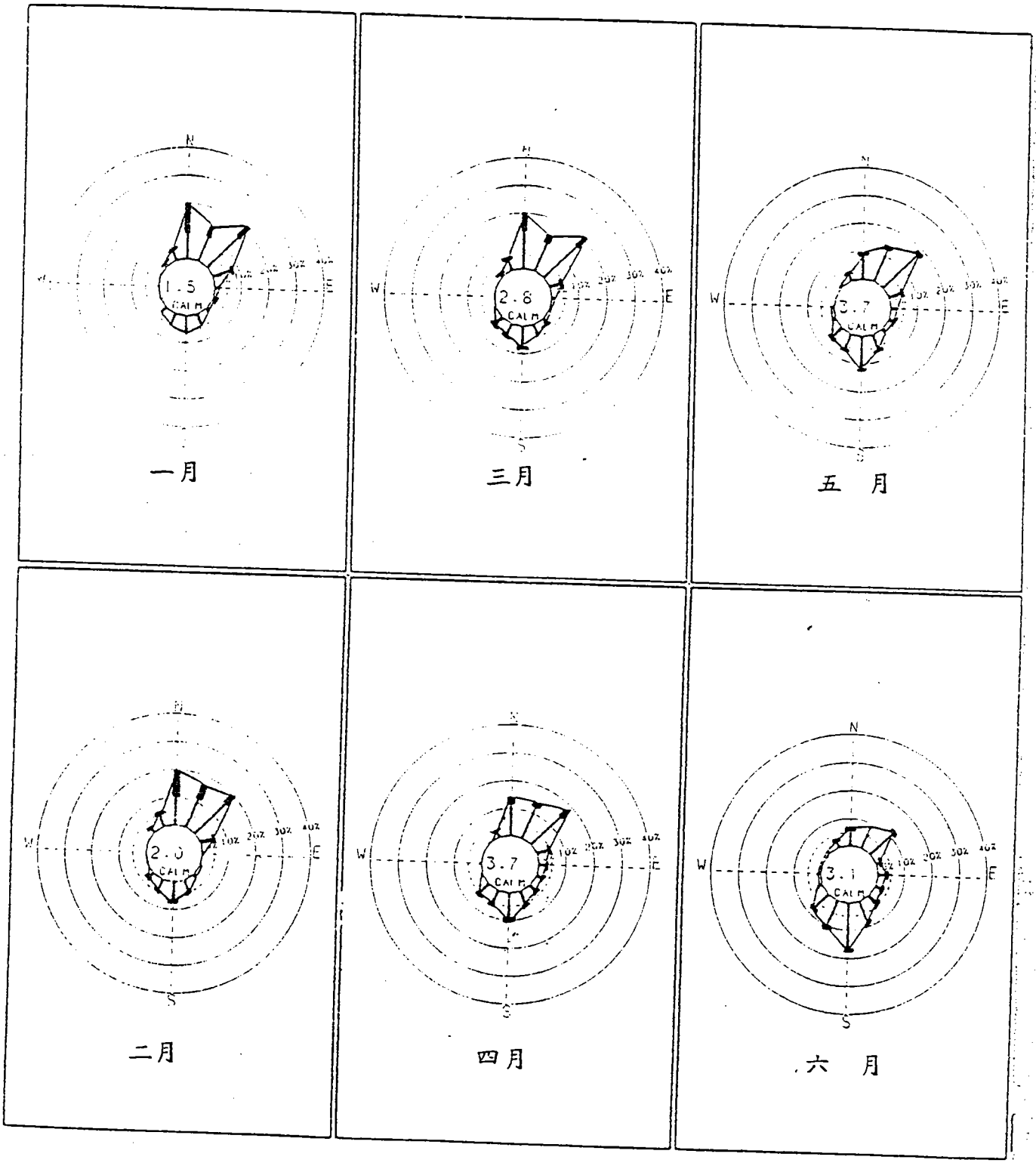


圖 4 — 2 基隆各月風玫瑰圖 (1971 ～ 1980)

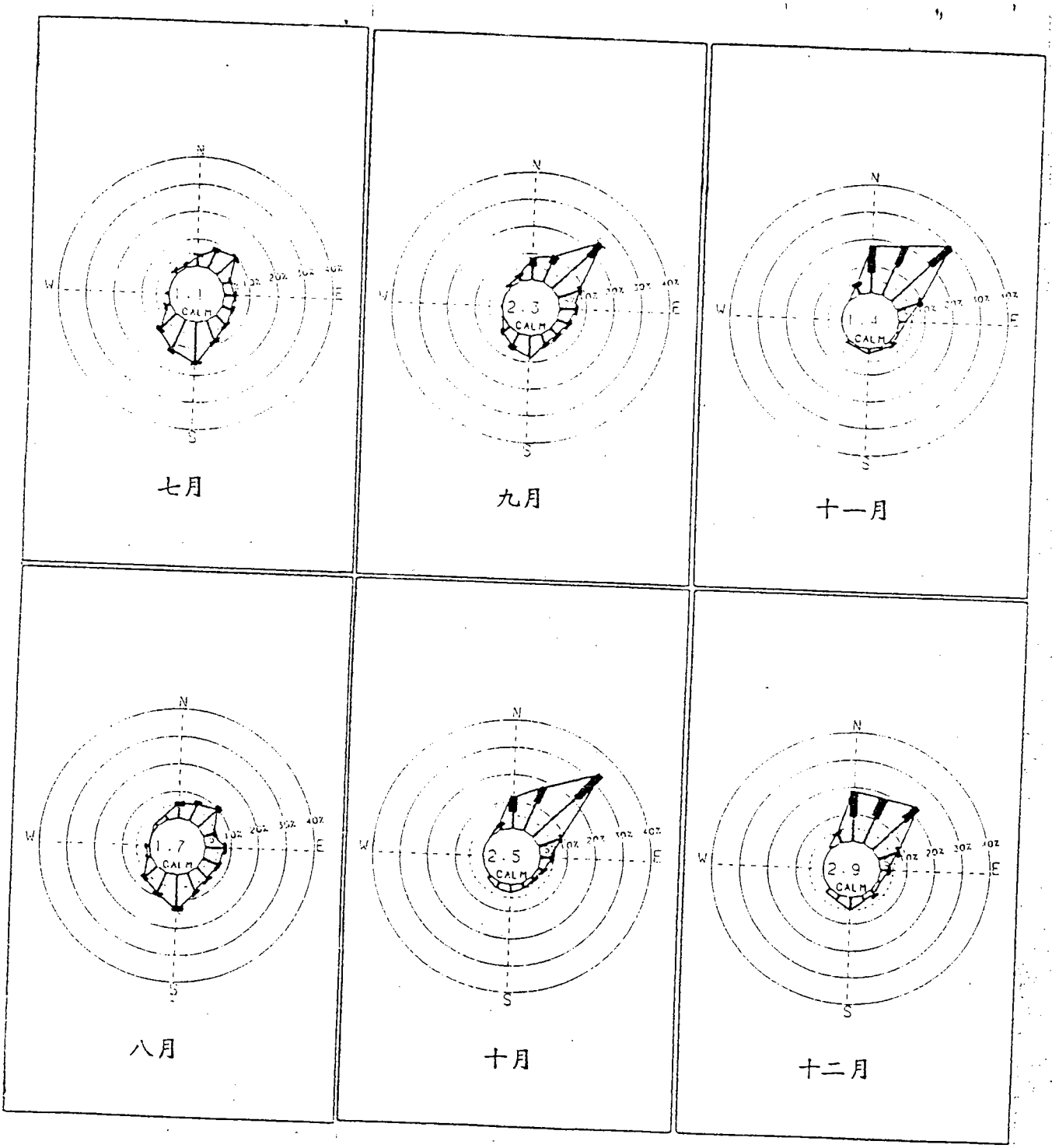


圖 4 — 3 基隆各月風玫瑰圖（1971～1980）

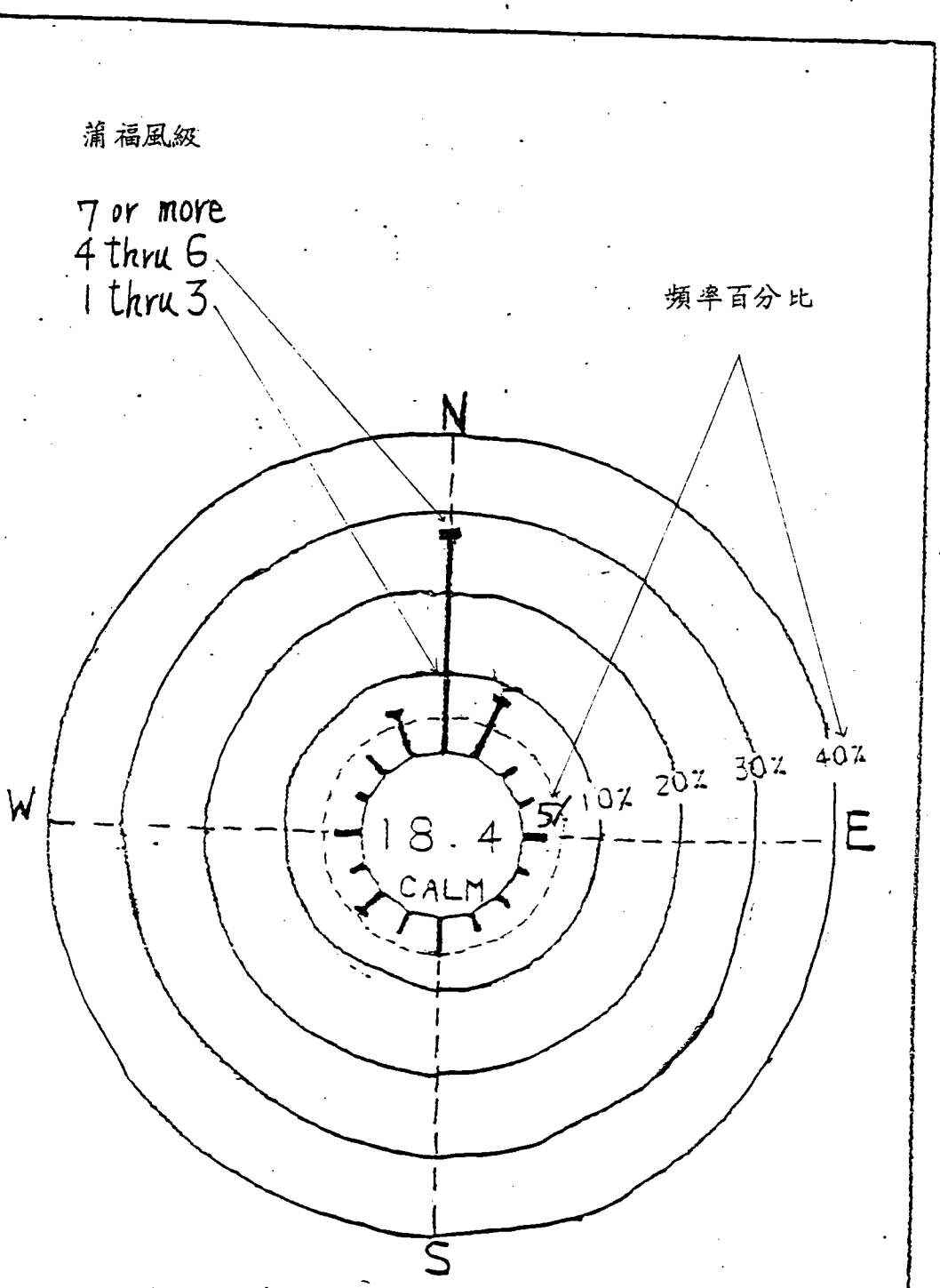


圖 4 — 4台中港全年風玫瑰圖（ 1971 ～1980 ）

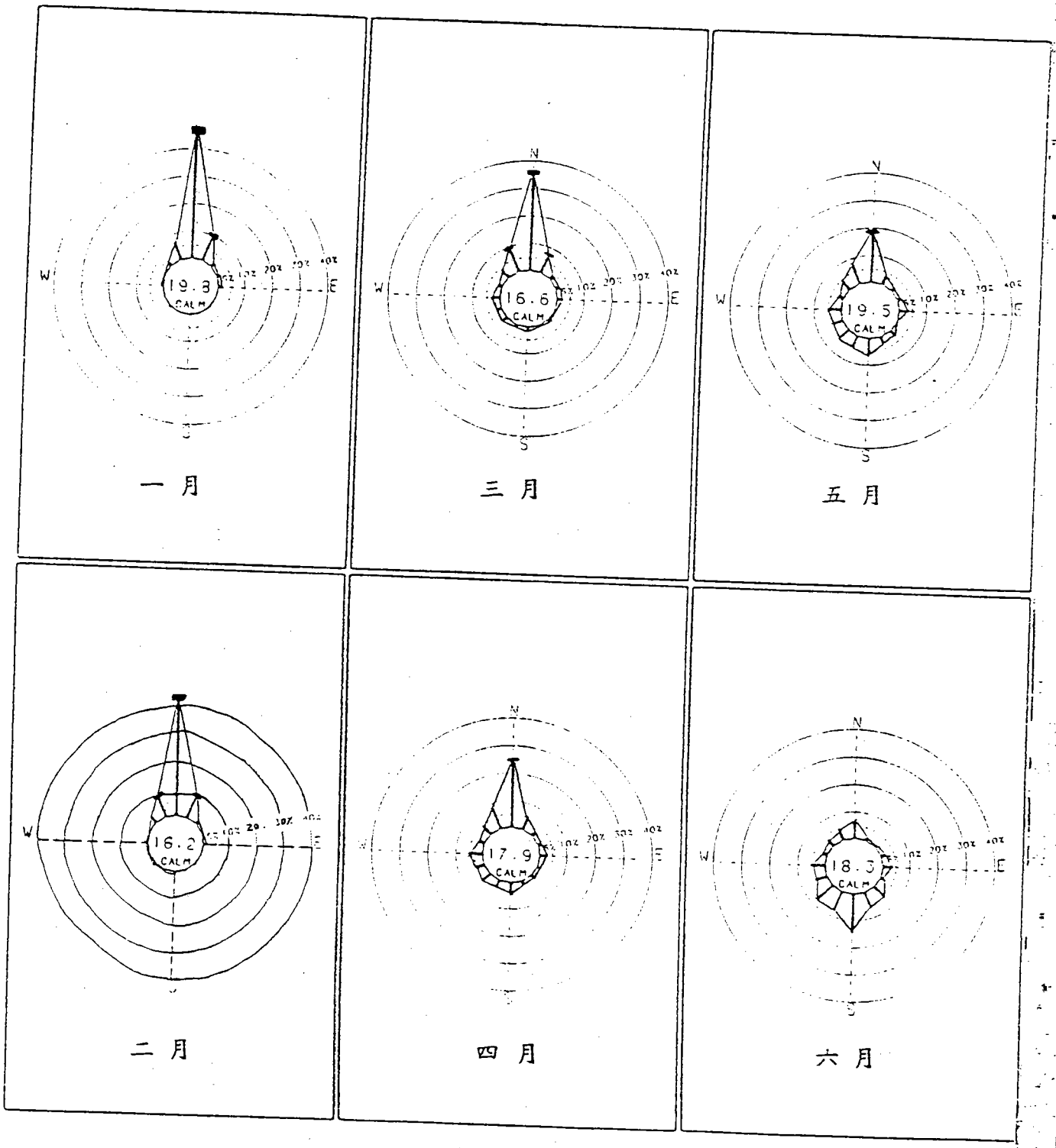
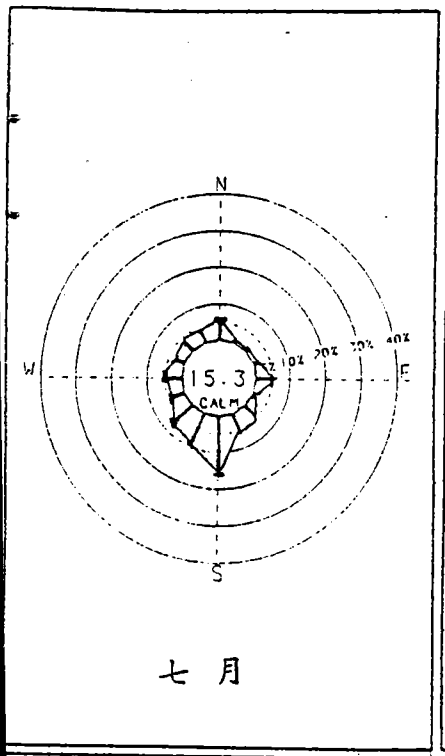
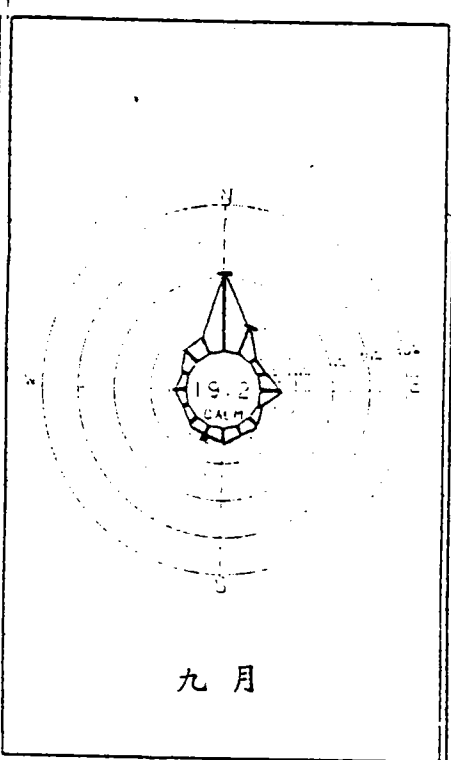


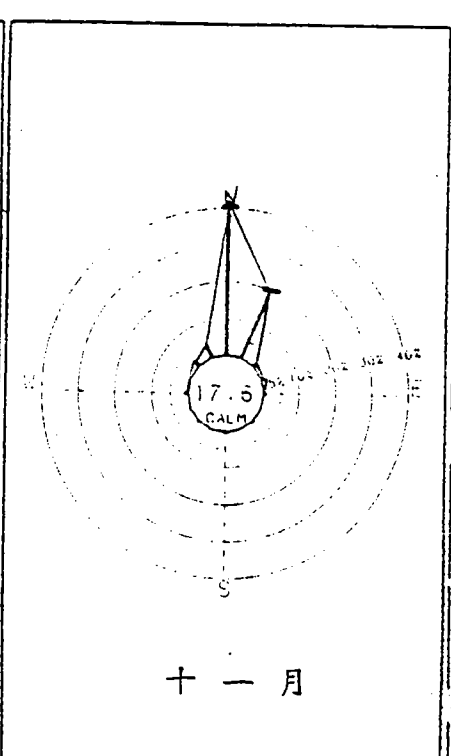
圖 4 — 5 台中港各月風玫瑰圖（1971 ～ 1980）



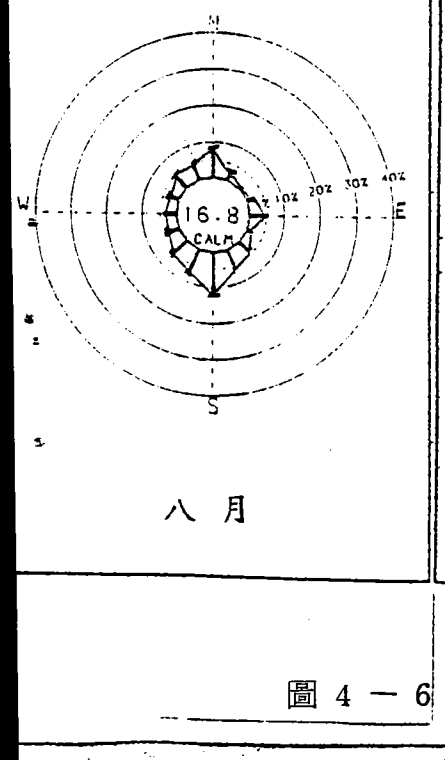
七 月



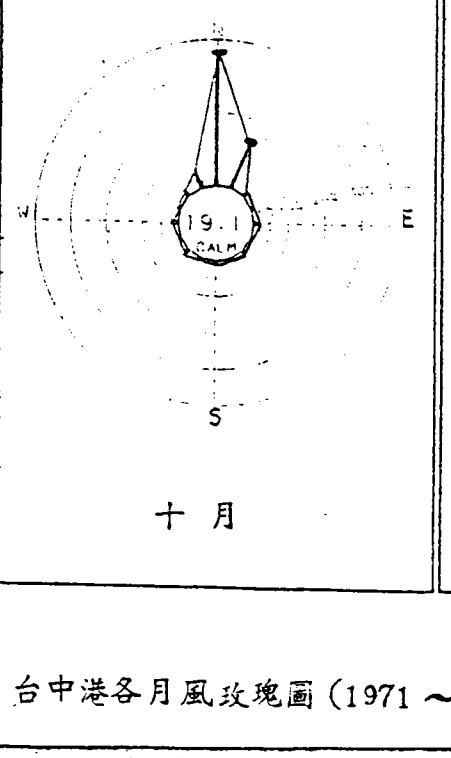
九 月



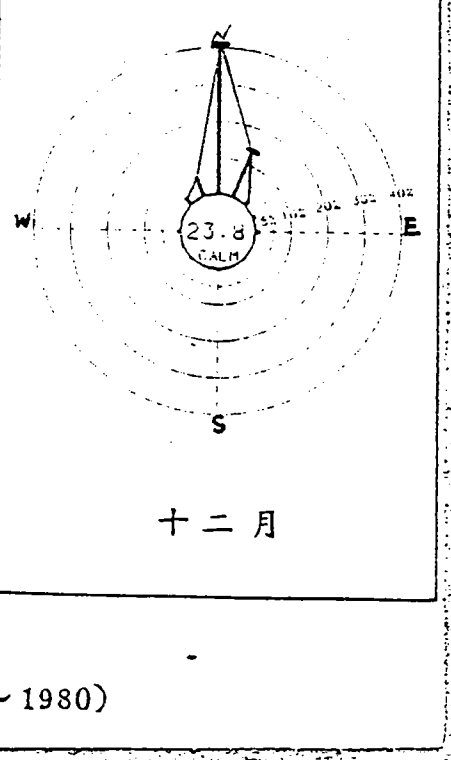
十 一 月



八 月



十 月



十二月

圖 4 － 6 台中港各月風玫瑰圖 (1971 ～ 1980)

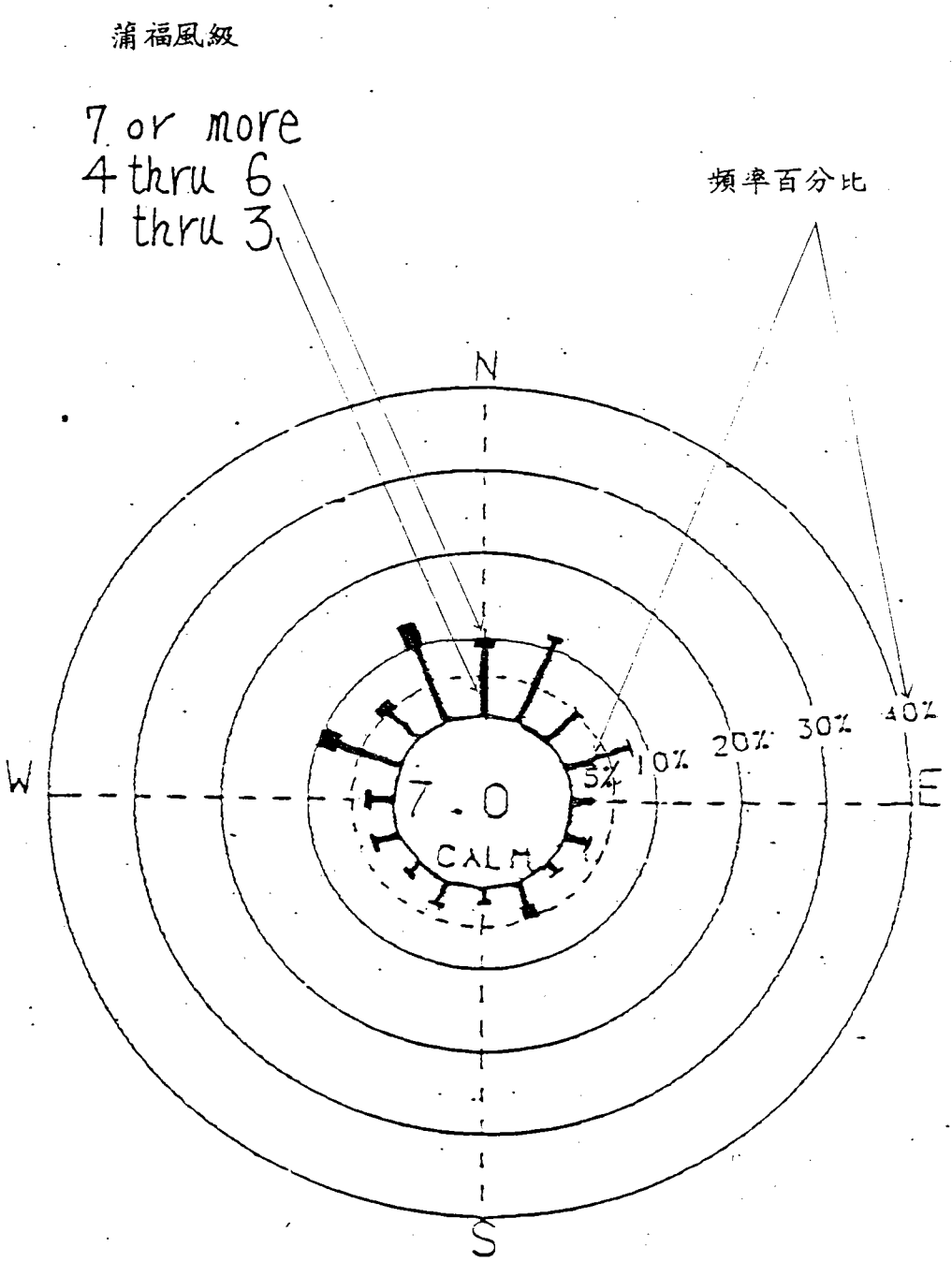


圖 4 — 7　高雄港全年風玫瑰圖（1971 ～1980 ）

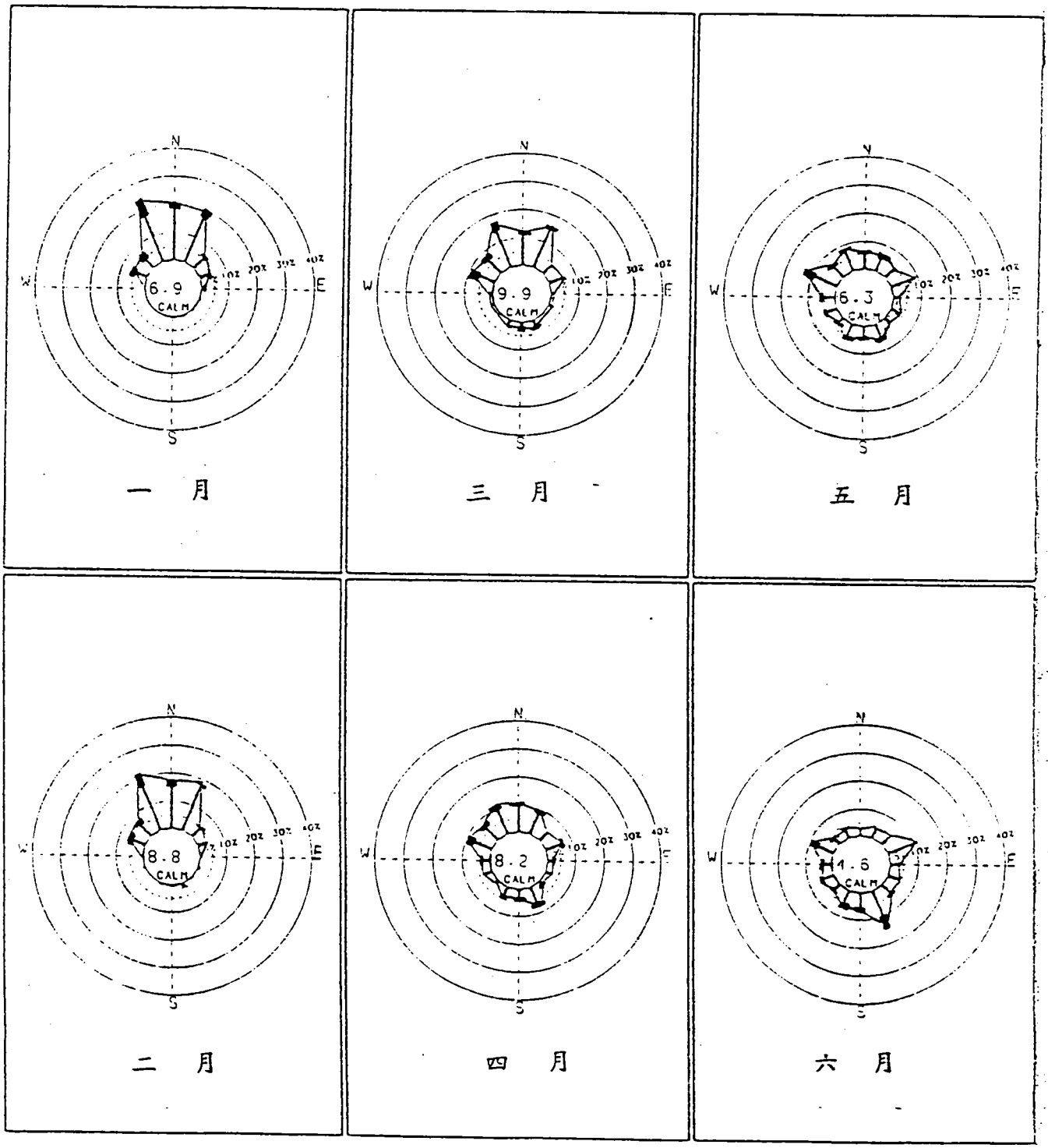


圖 4 — 8 高雄港各月風玫瑰圖 (1971 ～ 1980)

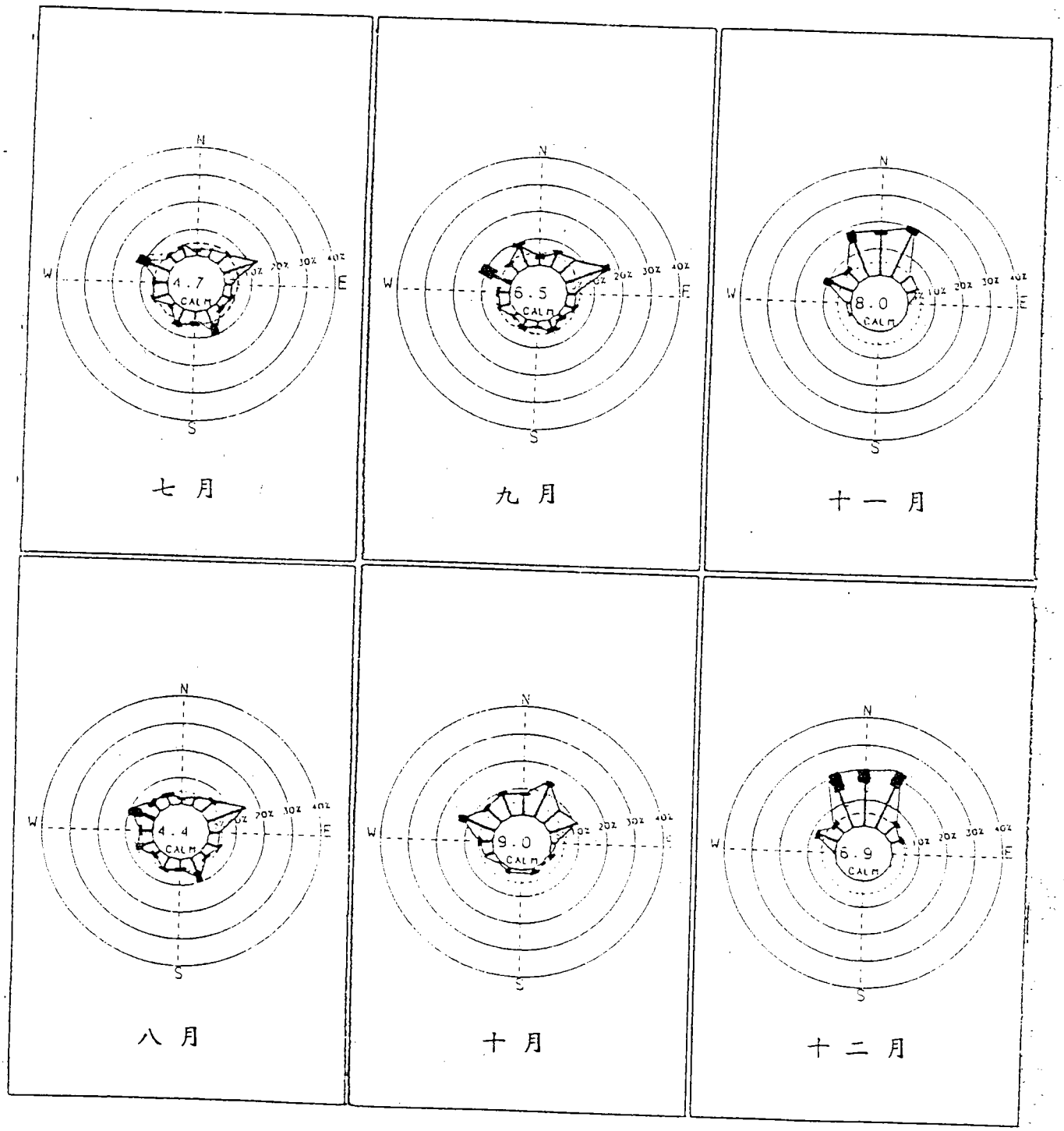


圖 4 — 9　高雄港各月風玫瑰圖（1971 ～ 1980 ）

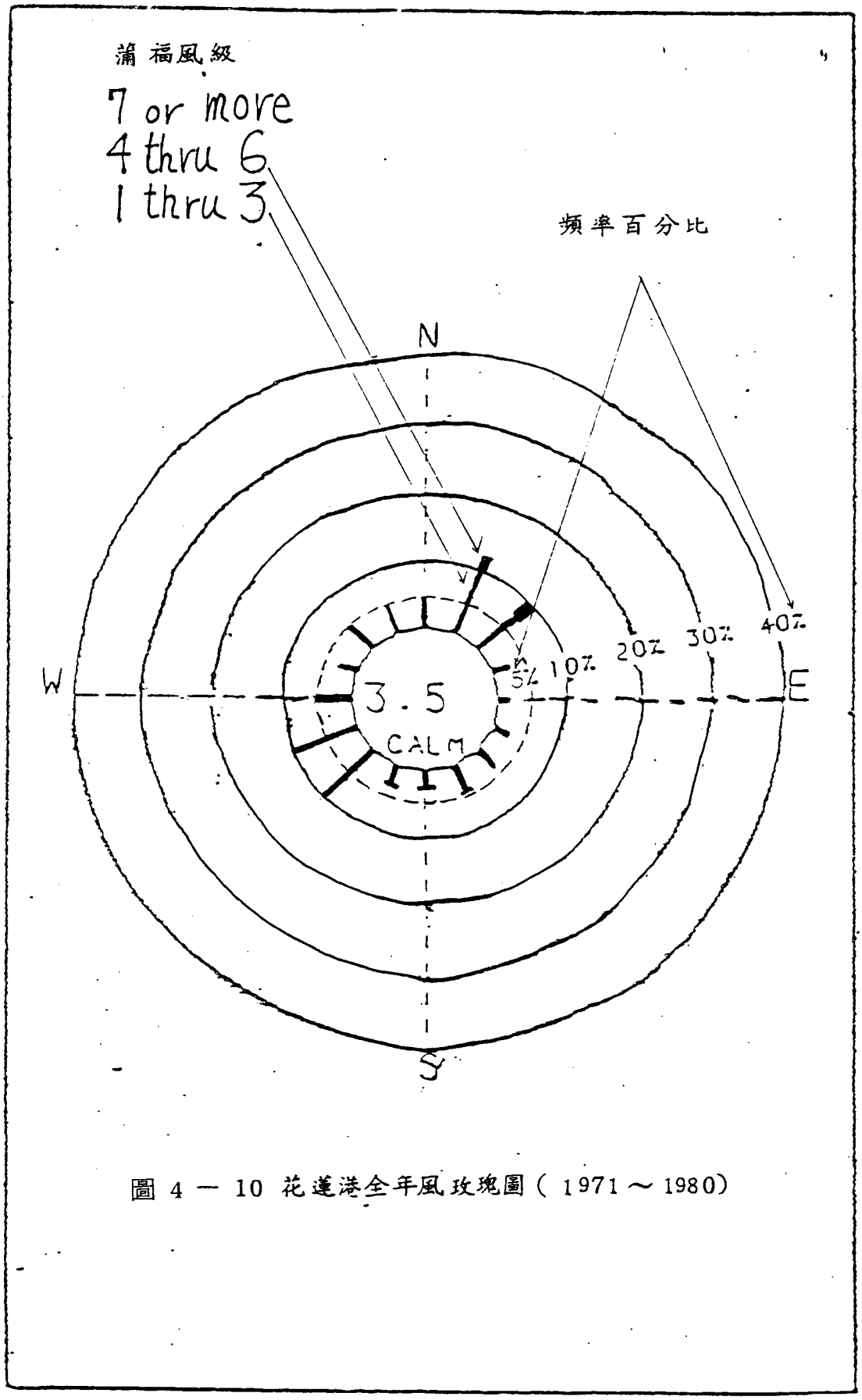


圖 4 — 10 花蓮港全年風玫瑰圖（ 1971 ～ 1980）

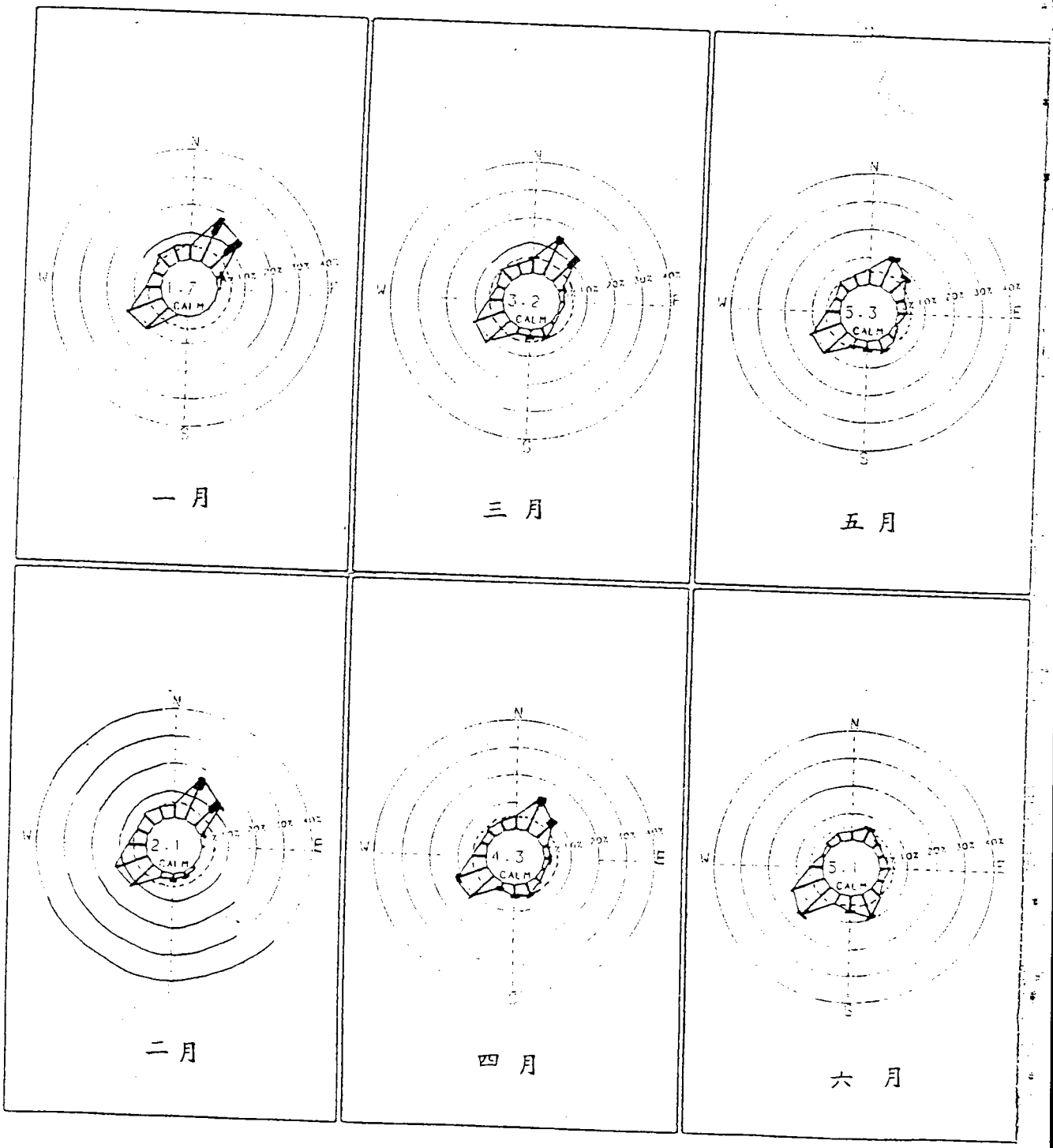


圖 4 － 11 花蓮港各月風玫瑰圖（1971 ～ 1980）

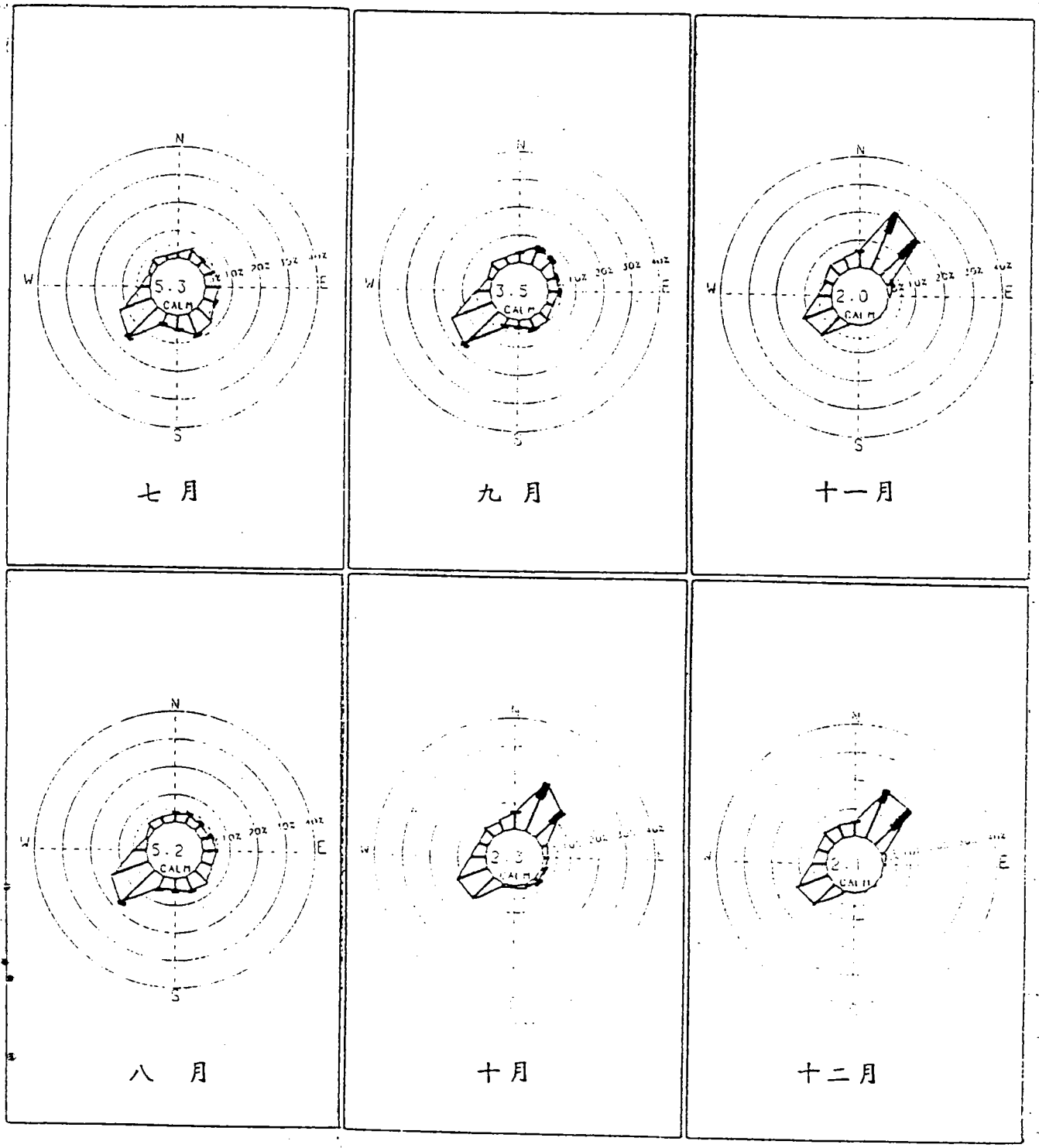


圖 4 — 12 花蓮港各月風玫瑰圖 (1971 ～ 1980)

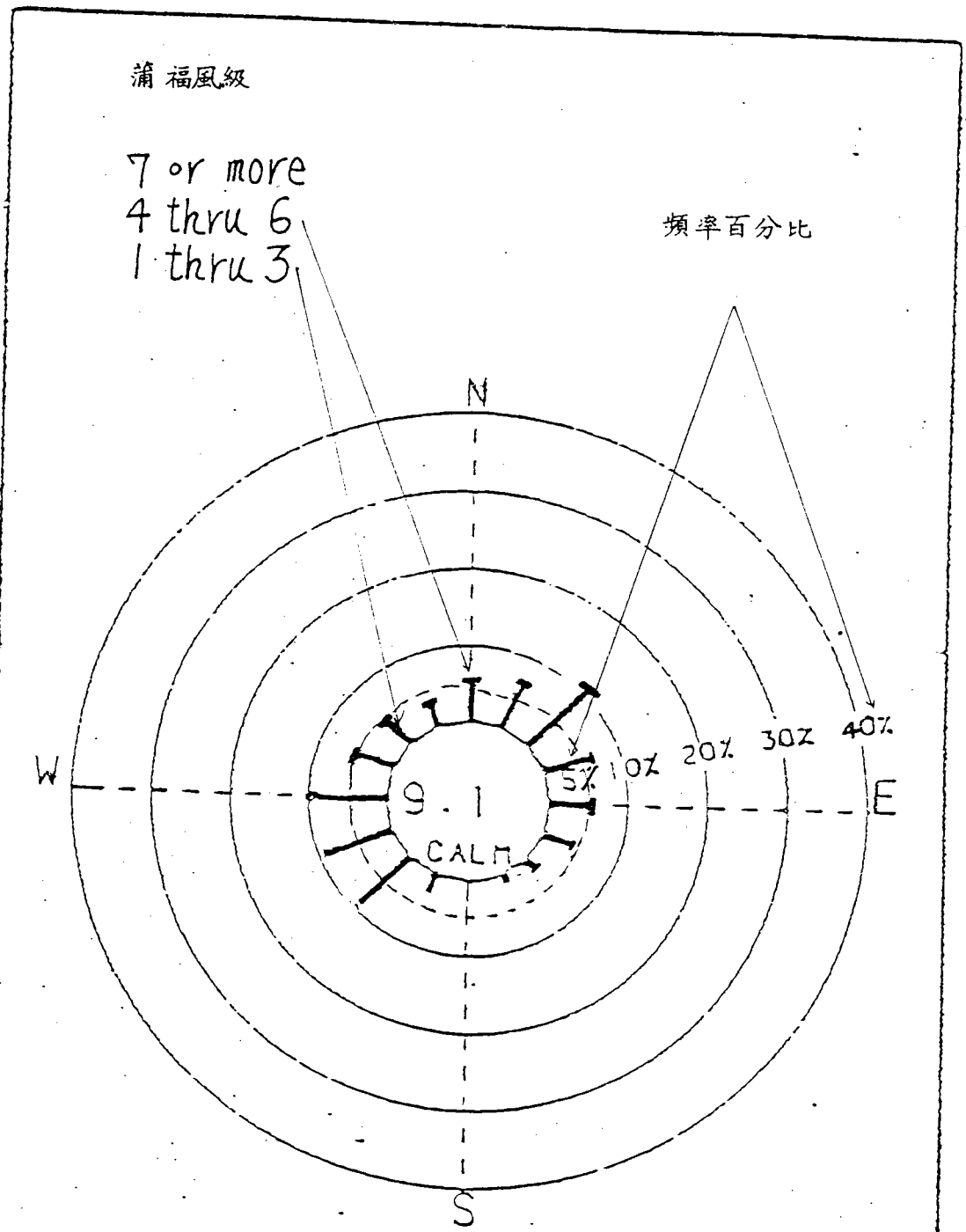


圖 4 － 13　宜蘭全年風玫瑰圖（ 1971～1980 ）

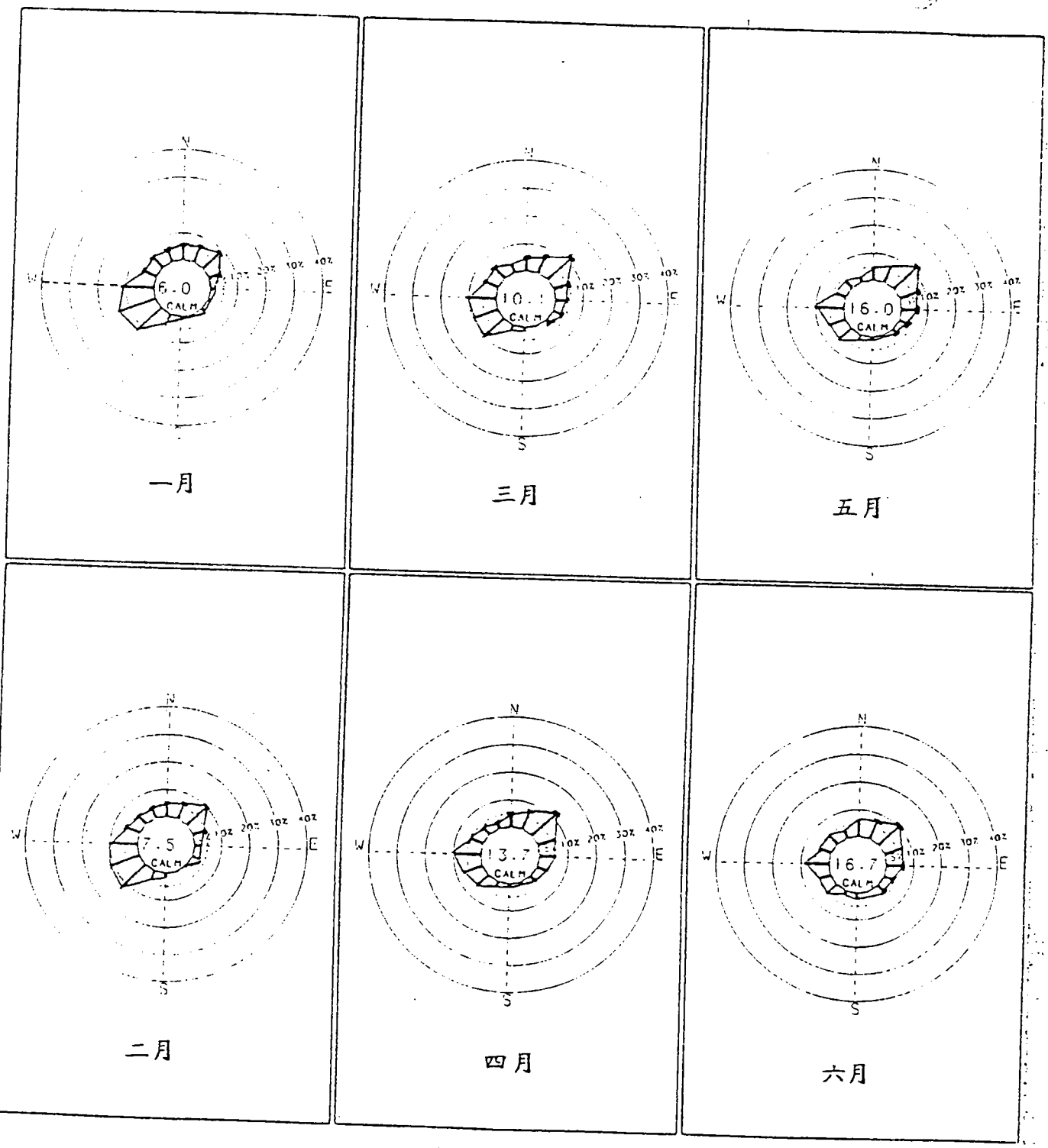


圖 4 — 14 宜蘭各月風玫瑰圖（ 1971 ～ 1980 ）

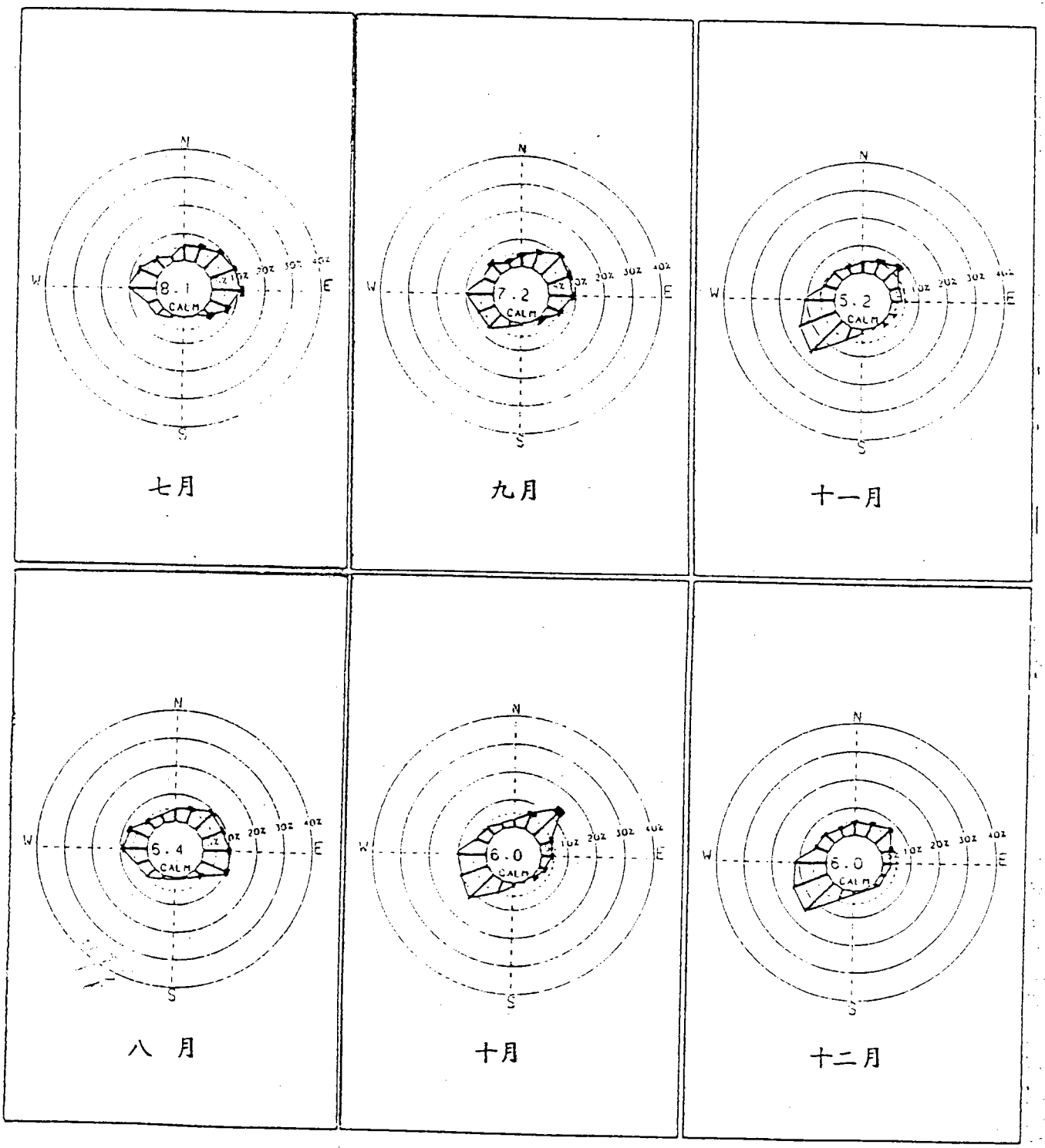


圖 4 － 15　宜蘭各月風玫瑰圖 (1971 ～1980)

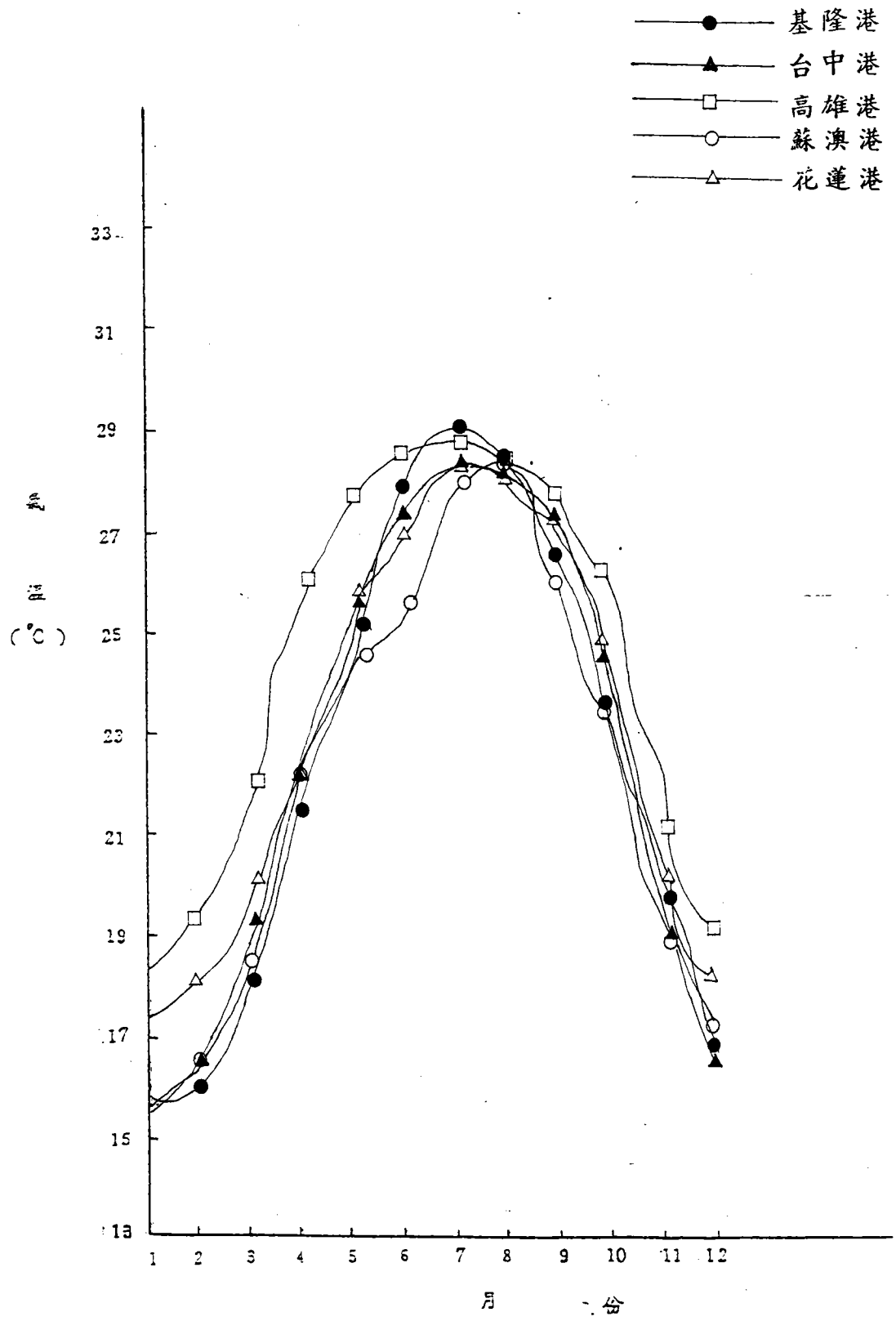


圖 4 — 16 . 平均氣溫月變化圖（1971 ～1985）

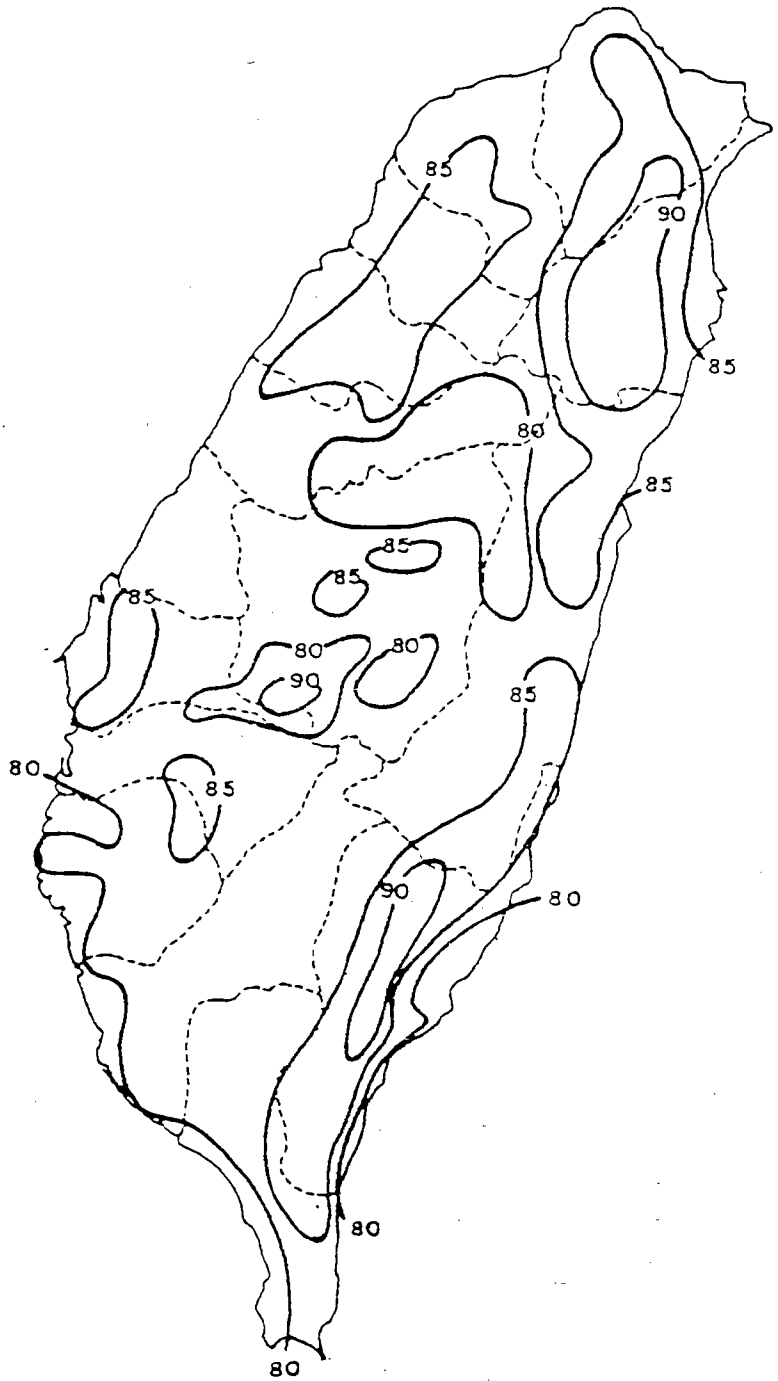


圖 4 — 17　年平均相對濕度（單位：%）

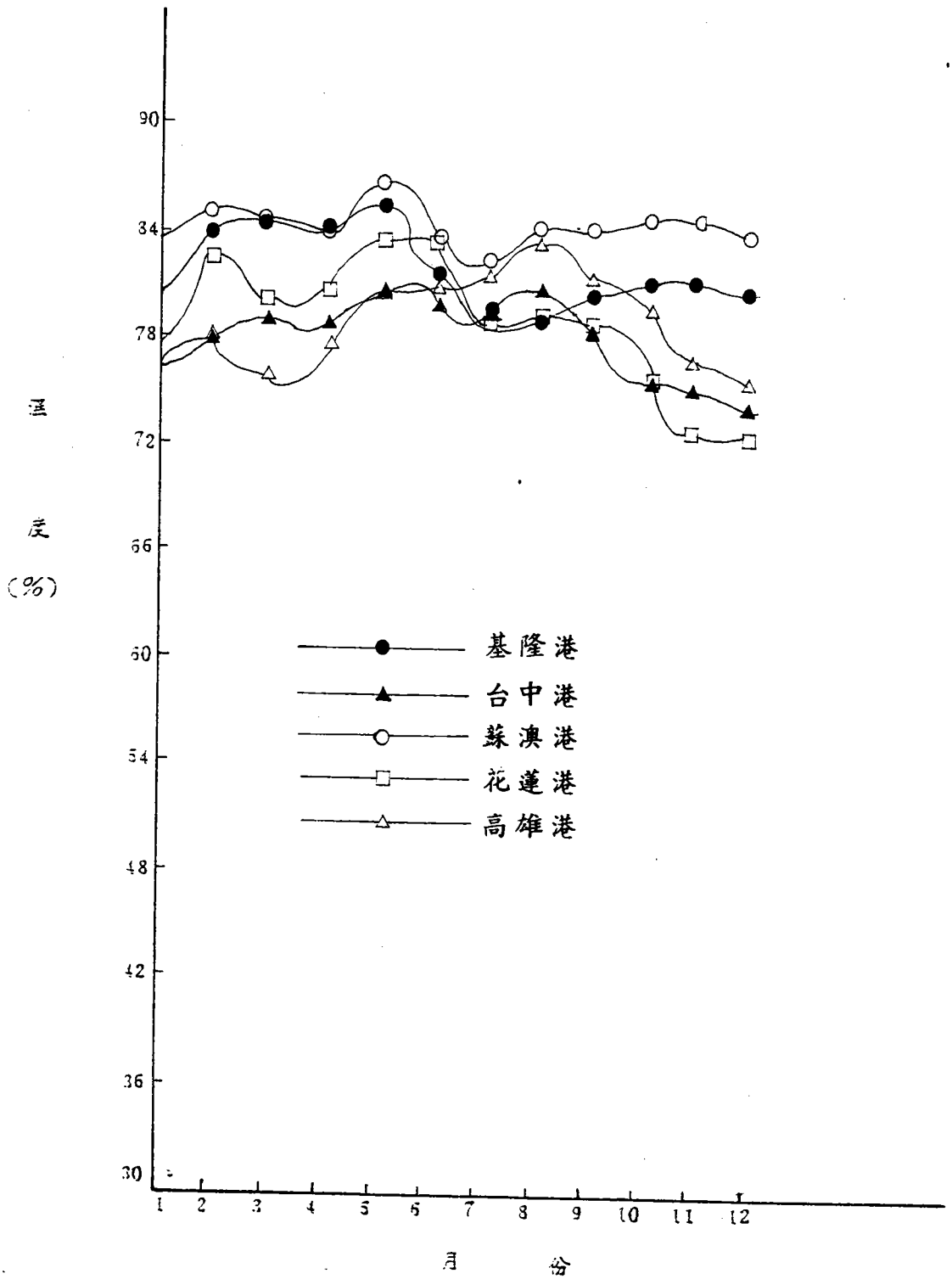


圖 4 — 18 平均相對濕度變化圖 (1971 ～ 1985)

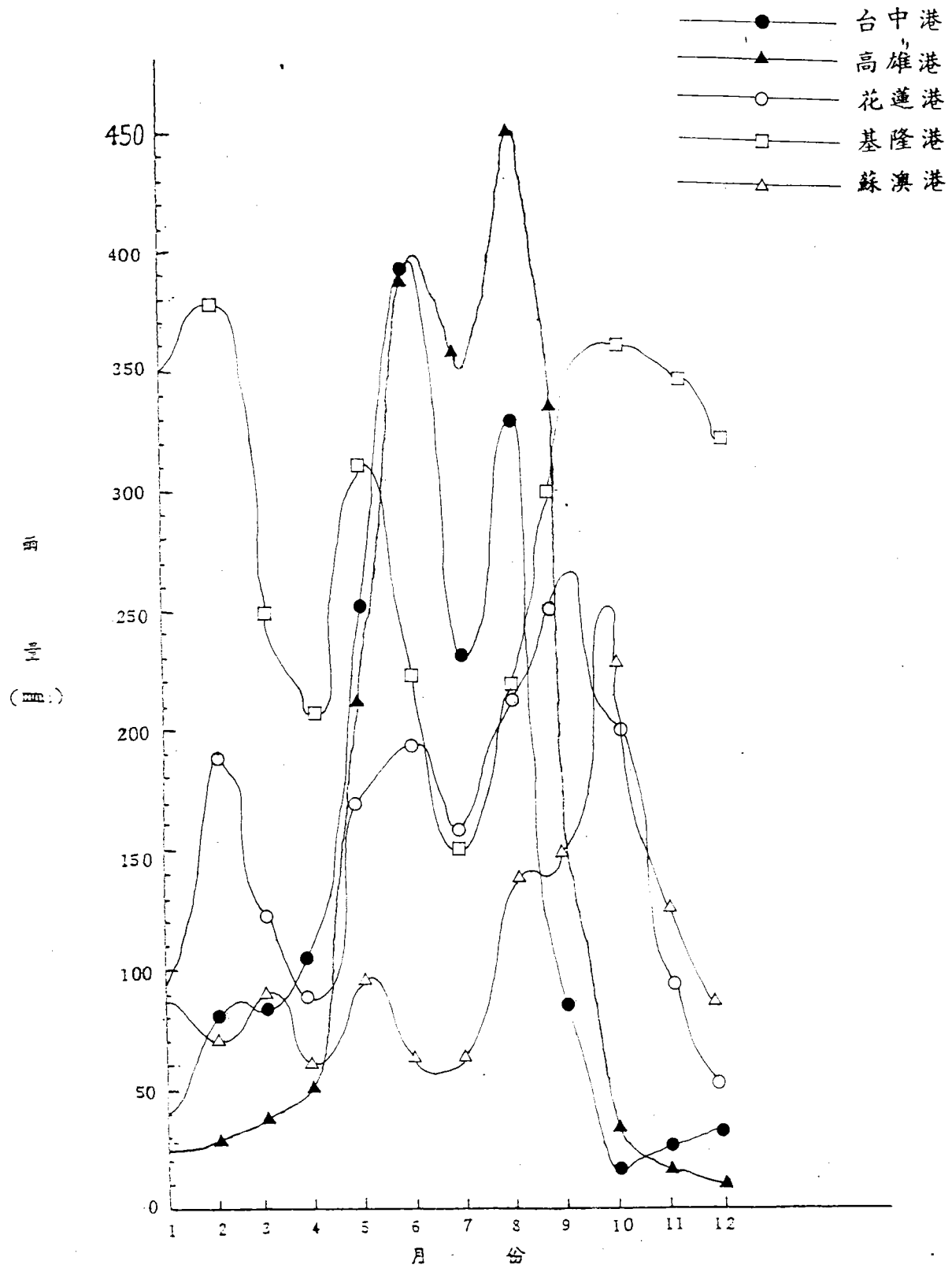


圖 4 — 19　平均雨量變化圖（1971～1985）

伍、碼頭結構物概述及現有港灣RC結構物調查

林維明、吳信昇

5－1 碼頭結構物型式及構築材料

各港根據環境，使用及施工條件及工期及工程費等因素決定碼頭結構物型式及構築材料，圖5－1～圖5－5及表5－1～表5－5分別爲基隆港、台中港、高雄港、花蓮港、蘇澳港等各碼頭佈置及型式概況，而圖5－6～圖5－8分別爲代表性沈箱式碼頭，重力式碼頭及棧橋式碼頭斷面圖。

5－2 現有港灣RC結構物調查

圖5－9爲基隆港碼頭發生銹蝕及舖面損壞情形，雖然使用耐磨之環氧樹脂砂漿舖面，但可能由於與原混凝土破壞面底質之材質特性不同，握裹力不足所致，此方面有待加強研究，另外碼頭及護舷易受船隻碰擊而破壞，如何使用耐久性之材料及防銹之護舷吊環等亦有待研究。

圖5－10爲民國75年11月15日清晨所發生之大地震造成重力式碼頭面變位及填土部份地層下陷，而圖5－11爲蘇澳港南外堤消波塊破塊情形，由於巨型消波塊與防波塊相距甚遠而中間置一些小型消波塊，當波浪沖擊至防波堤，反射波打擊大型消波塊而造成消波塊一直往海側偏移，而未能達到保護效果將危及防波堤之安全，建議蘇澳港分局應儘速設法改善。

圖5－12爲蘇澳港南外堤消波式胸牆發生銹蝕及沖蝕情形，鐵欄杆發生嚴重銹蝕，消波胸牆上已發生鋼筋腐蝕有銹斑出現，而開孔因受巨大波浪作用發生沖蝕現象。

圖5－13爲蘇澳港南外堤面因受到上揚力作用造成龜裂與破損情形，此係因兩沉箱間之間隙太大，波浪湧進再自加強頂緣上沖所造成（參見本圖中第8及10之照片）而胸牆壁上亦受壞作用發生龜裂與破損情形，這些都應加緊修理，以保安全。

圖5－14爲花蓮港外港消波式胸牆沉箱防波堤鋼筋混凝土及鐵欄杆發生銹蝕，開孔受波浪沖擊發生銹蝕情形。

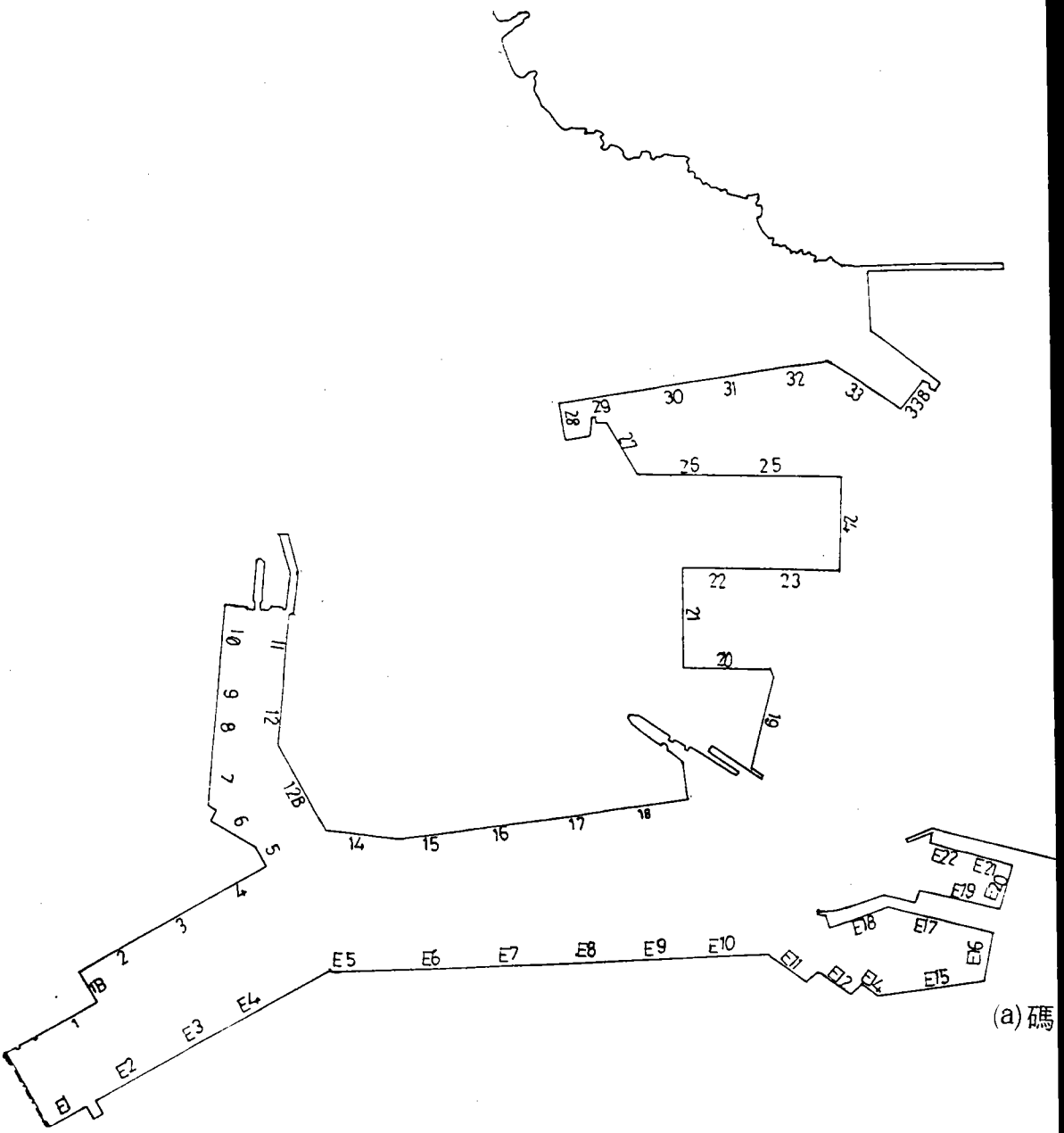
圖5－15爲花蓮港西堤消波塊沖越堤頂，可見自然力之大，同時波力亦使消波塊表面受磨損，龜裂或斷肢，四十噸之巨大體積可能受

乾濕作用而易發生乾縮龜裂，一旦龜裂後再受到波浪作用易發生破損，因此應詳加考慮使用高強度混凝土製作。

圖 5 － 16 爲花蓮港碼頭岸壁上有鋼筋銹蝕及汚著現象，而圖 5 － 17 爲東堤破損及鋼筋銹蝕情形。

圖 5 － 18 爲台中港貯木池棧橋上鐵欄杆及斜樁頂鋼筋混凝土舖面銹蝕，及附近之碼頭岸壁發生鋼筋銹蝕有銹斑出現及汚著之現象。

綜觀各港現有 RC 結構物有腐蝕及沖蝕現象，碼頭面破壞如何修補及防蝕有待未來四年內深入研究。



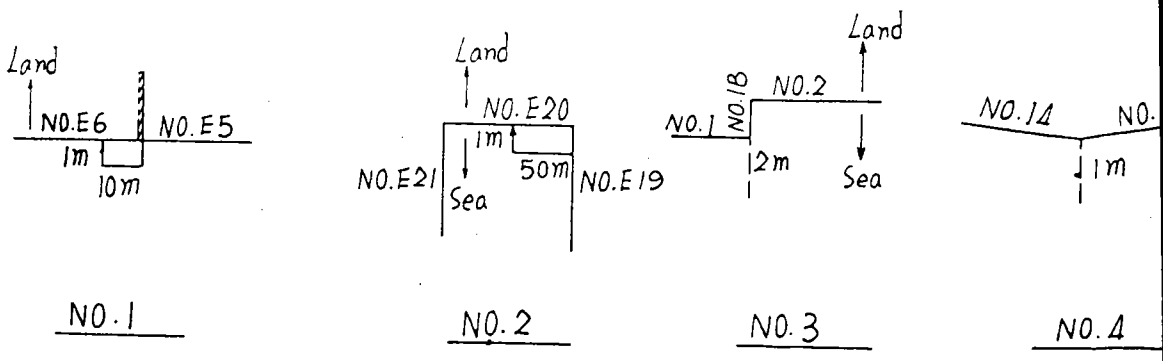
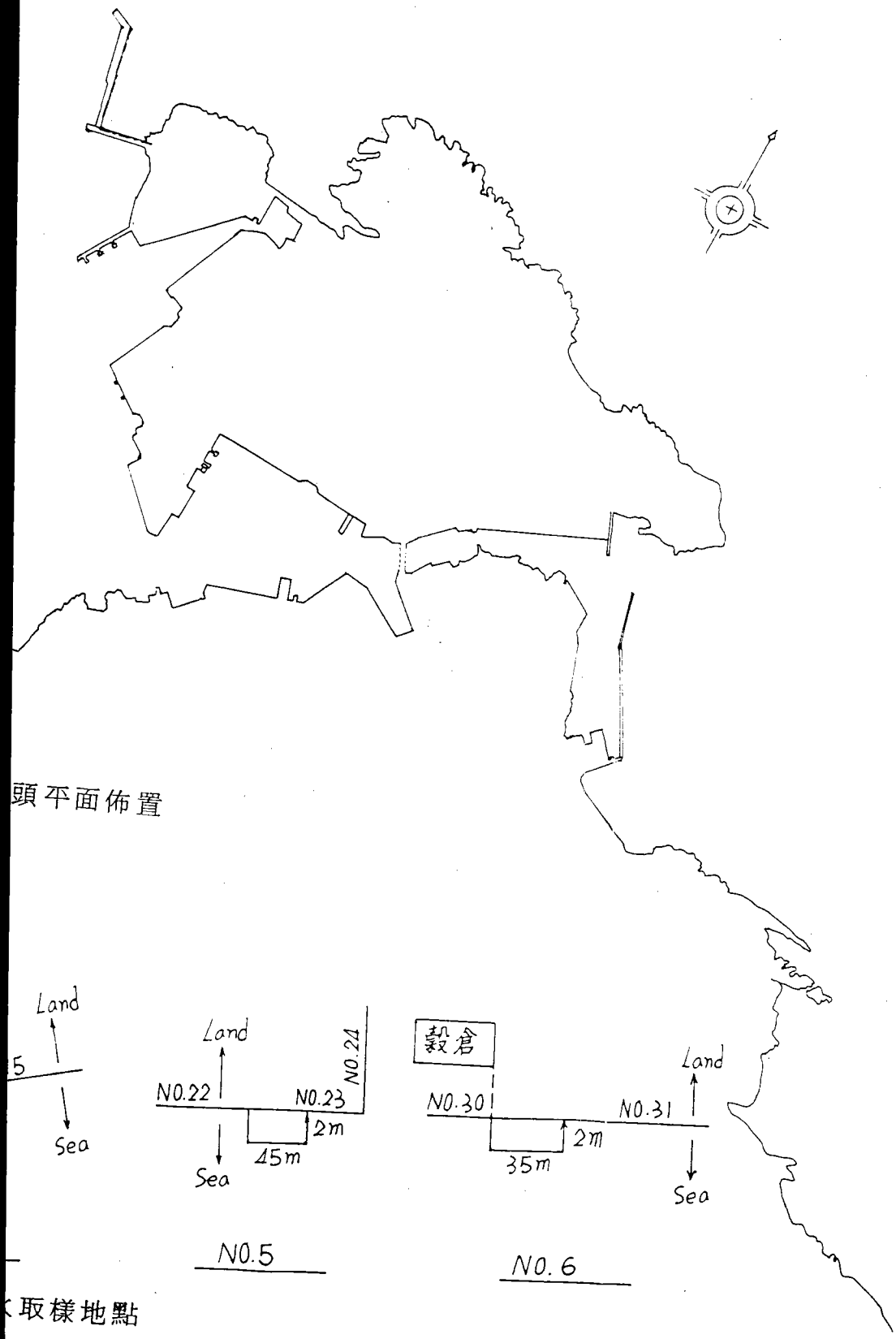


圖5－1　基隆港現有碼頭平面佈置及取樣位置圖



頭平面佈置

NO.5

NO.6

取樣地點

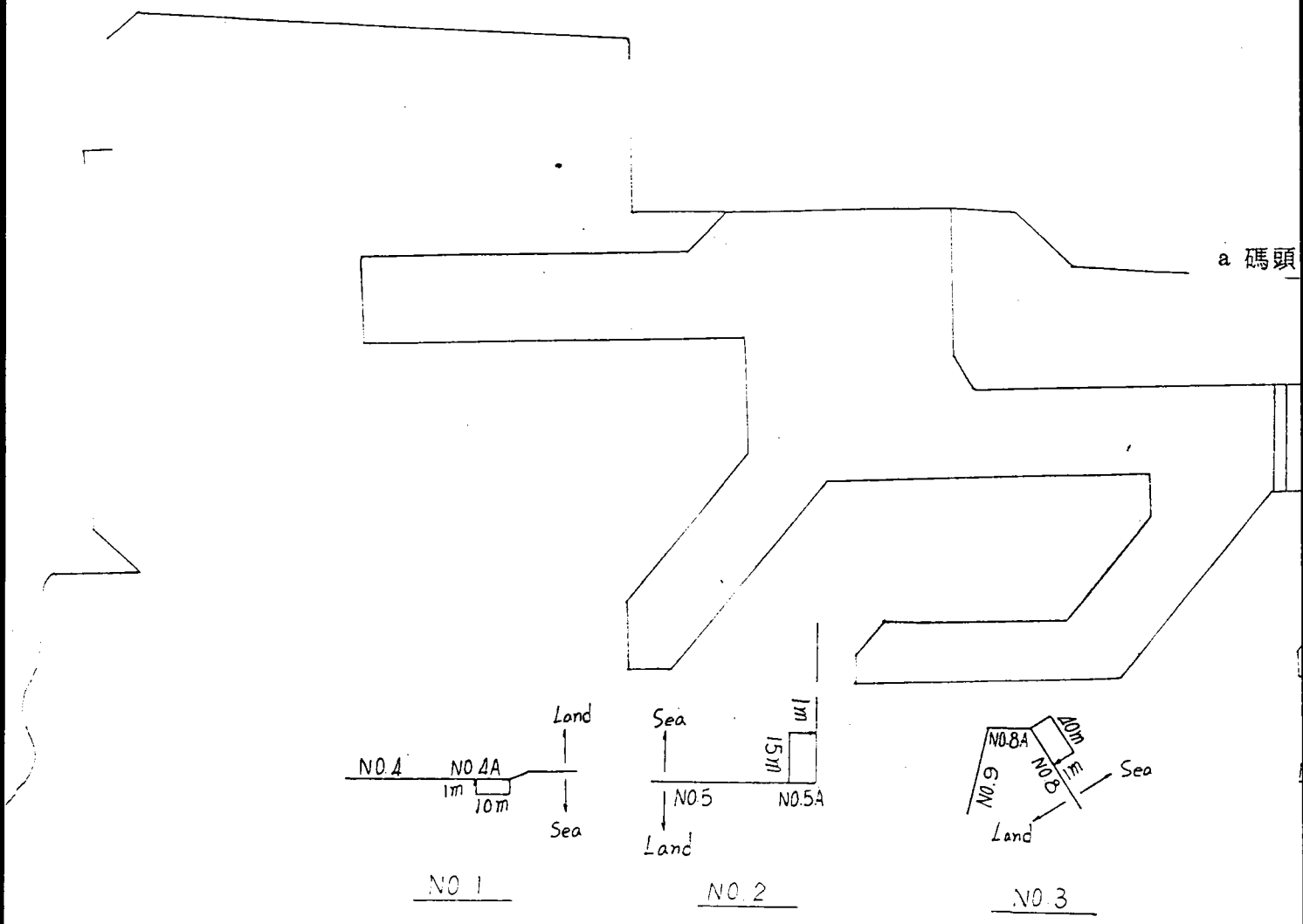
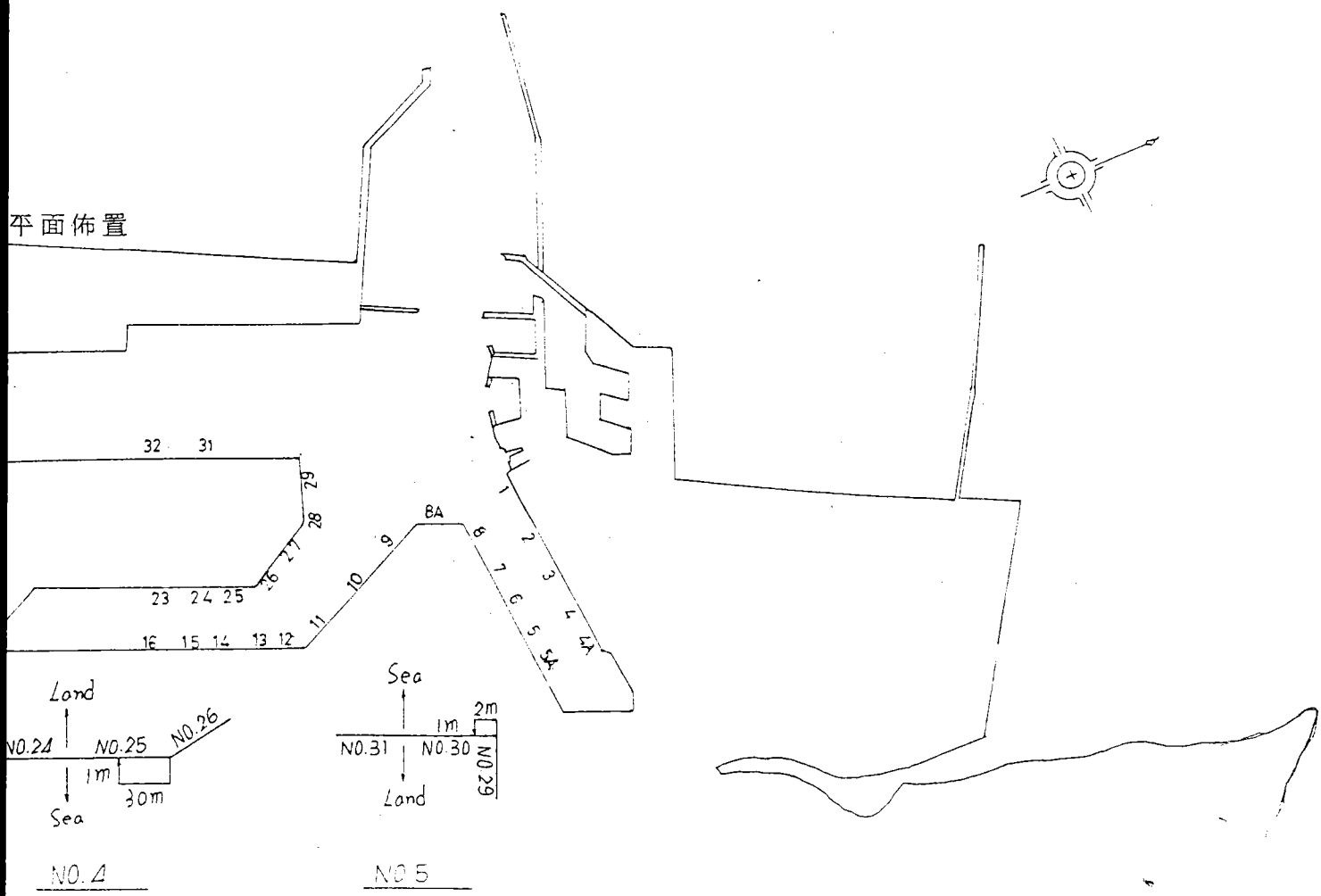


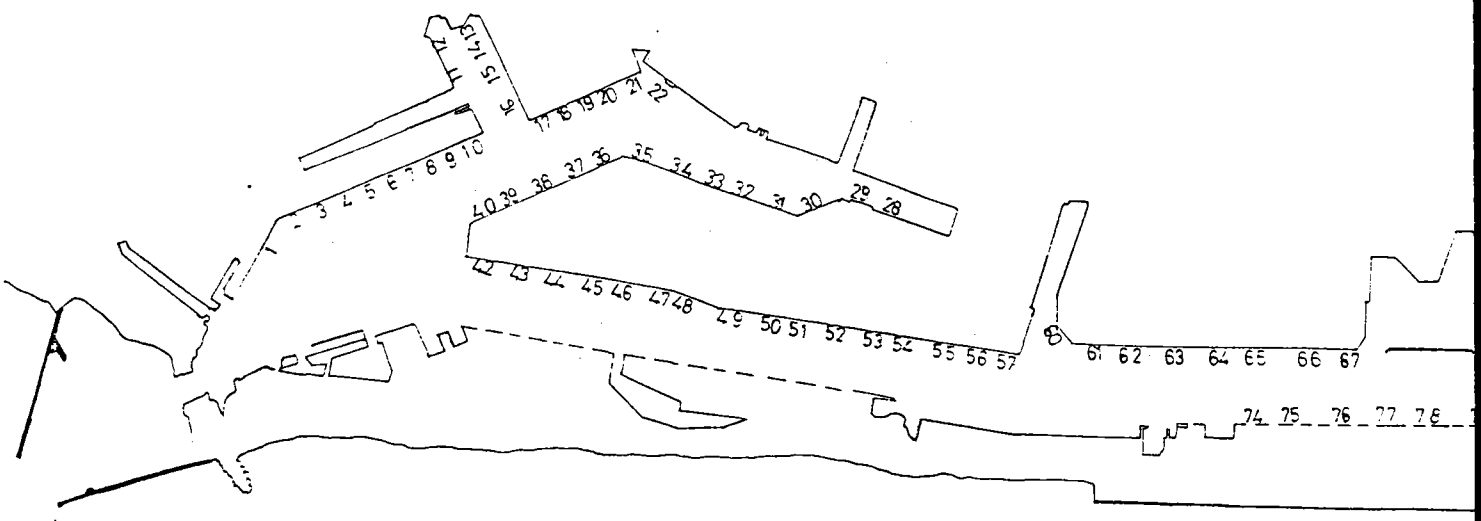
圖 5 － 2　台中港現有碼頭平面佈置及取樣位置

平面佈置

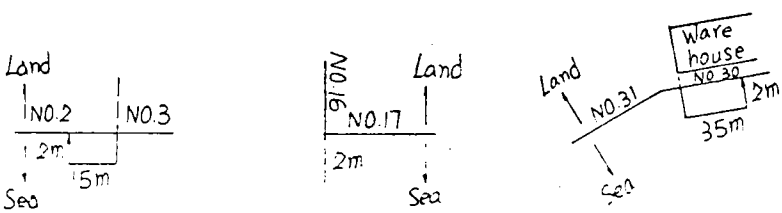


b 海水取様地點

圖



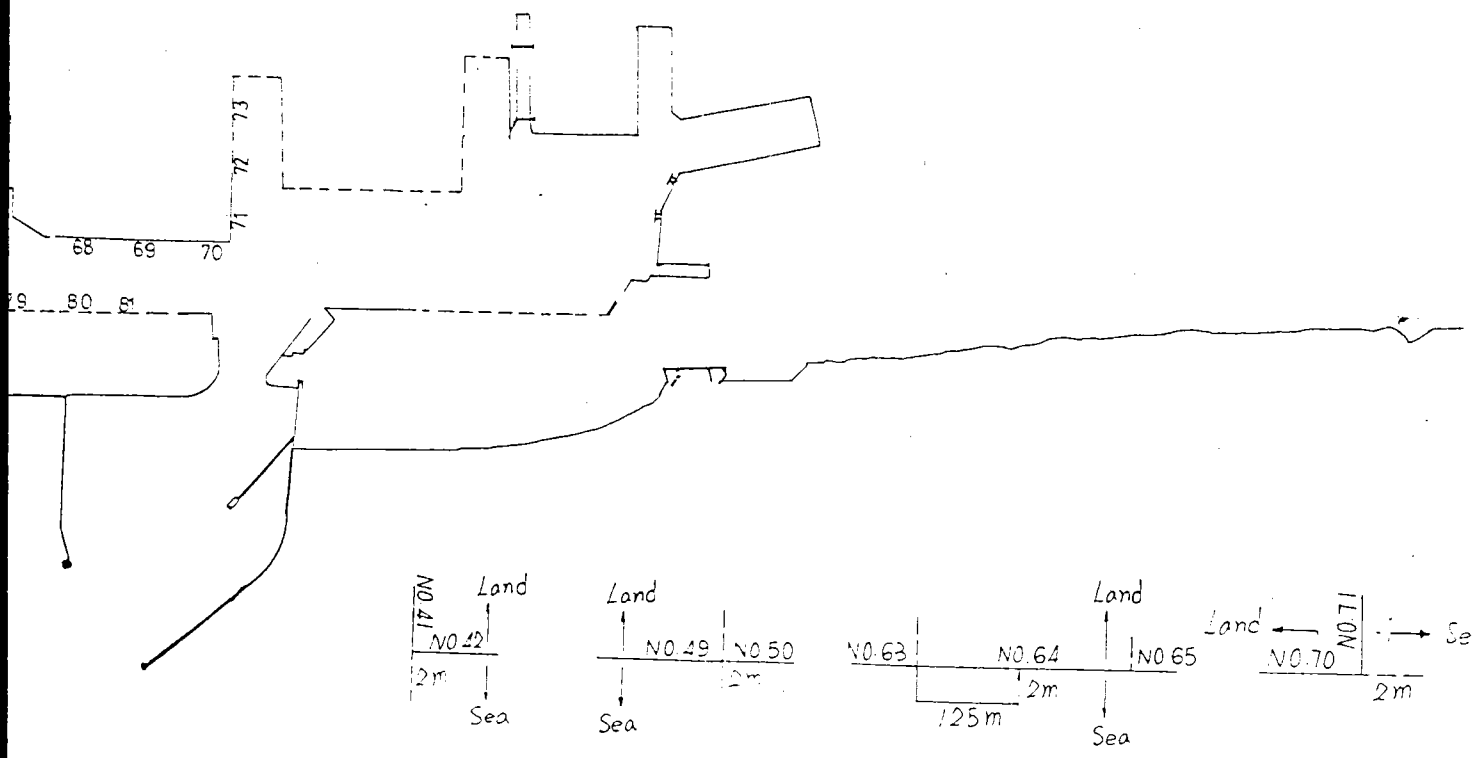
a 碼頭平面佈置



NO.1　　NO.2　　NO.3

b 海水取

圖 5 — 3　高雄港現有碼頭平面佈置及取樣位置圖



樣地點

N0.4　　N0.5　　N0.6　　N0.7

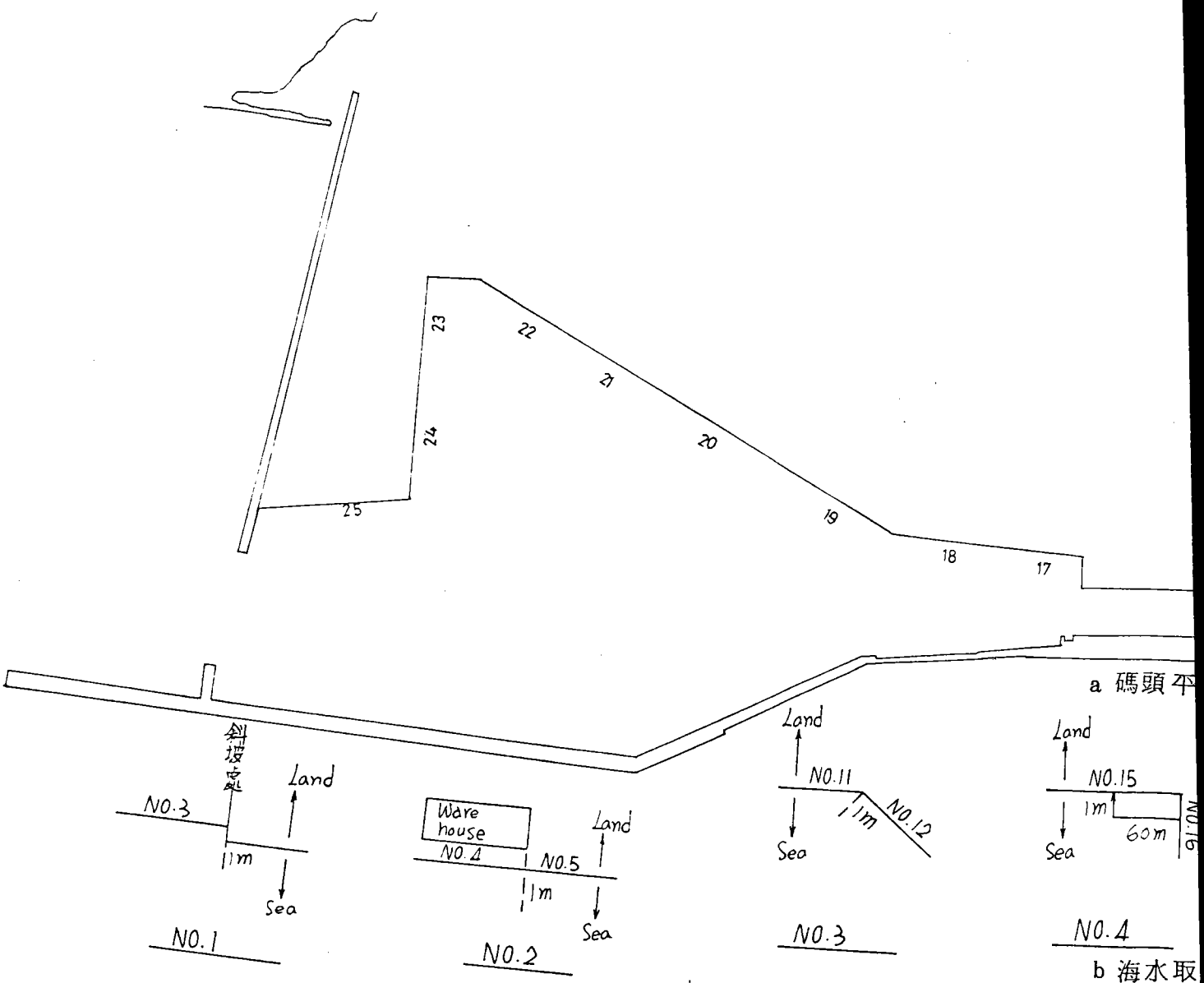
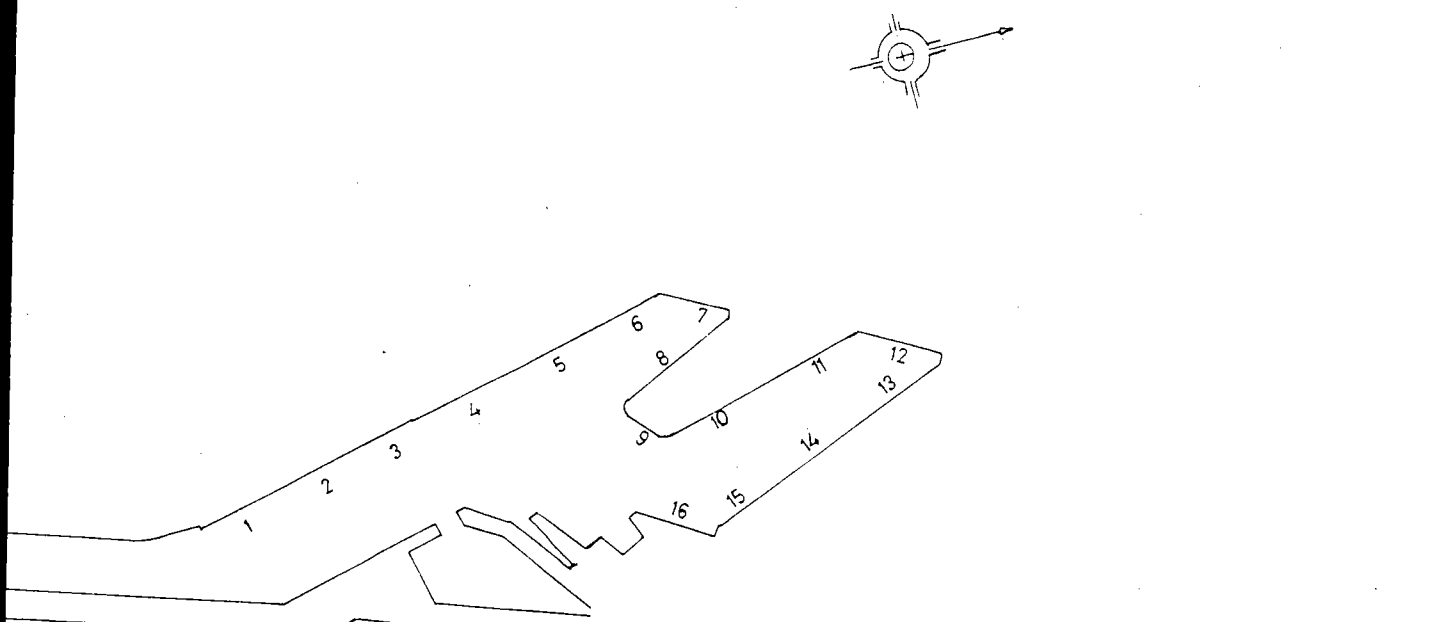
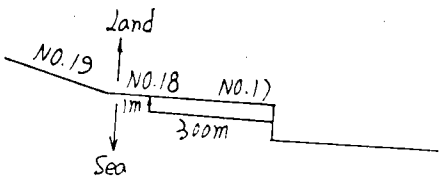
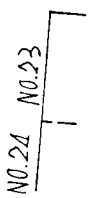


圖 5 － 4　花蓮港現有碼頭平面佈置及取樣位置圖



面佈置



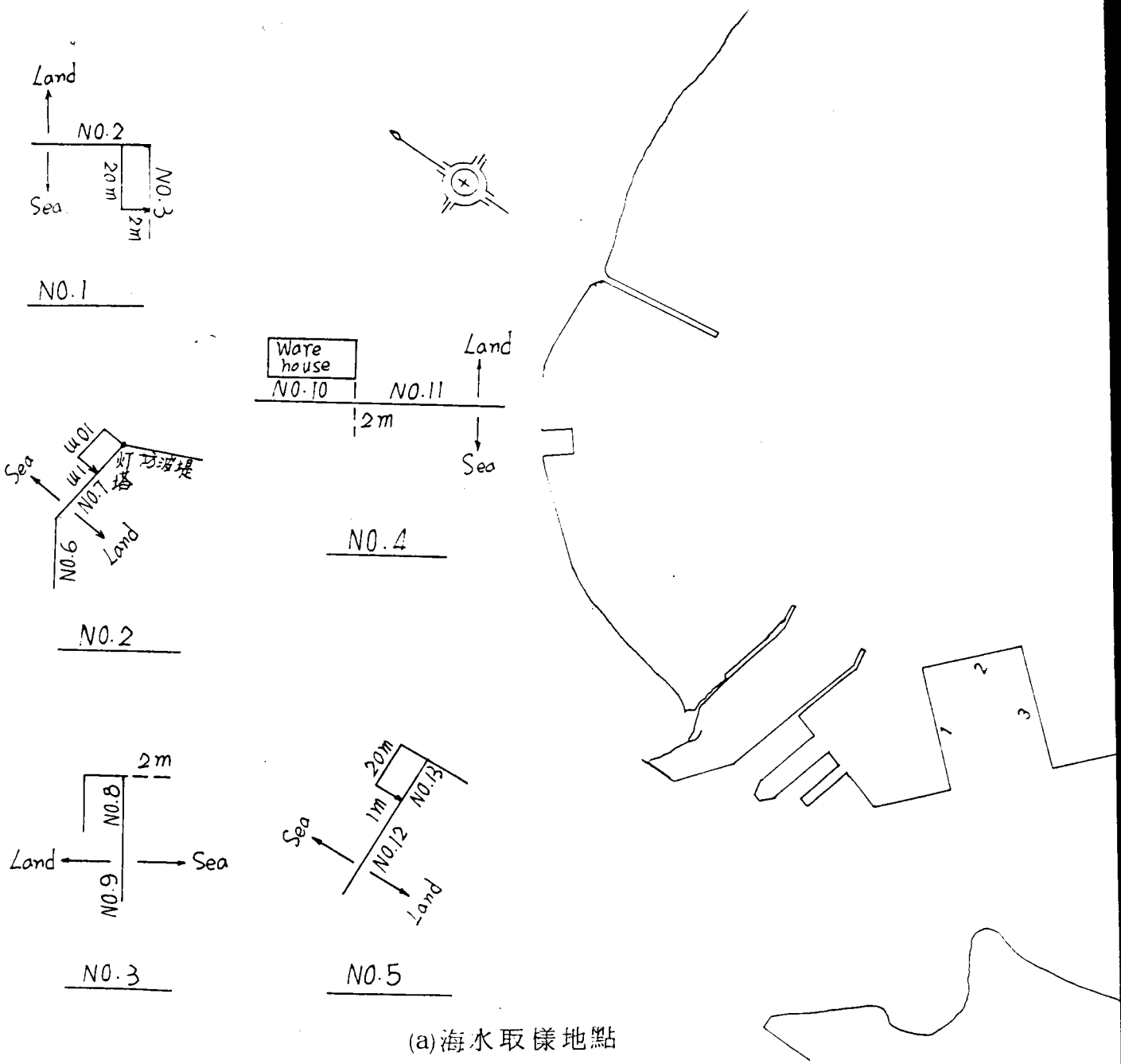


此號碼頭僅在計劃中
故在其計劃地周圍取水

樣地點

NO.5

NO.6



(a)海水取樣地點

圖 5 — 5　蘇澳港現有碼頭平面佈置及取樣位置圖



(b) 碼頭平面佈置

表5－1 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
〃　1B	90.90	－9.00	〃　〃	3,000
〃　2	204.50	－9.00	井筒式 橋墩式	10,000
〃　3	183.00	－9.00	橋墩式	〃　〃
〃　4	167.00	－9.00	〃　〃	〃
〃　5	54.50	－9.00	基樁式	5,000
〃　6	131.00	－9.00	〃　〃	5,000
〃　7	106.00	－9.00	混凝土擁壁式 基樁式	〃
〃　8	136.42	－8.00	基樁式	〃
〃　9	136.42	－8.00	基樁式 擁壁式	〃
〃　10	136.42	－8.00	基樁式	〃
〃　11	167.80	－5.50 －6.50	重力式 構架式	3,000
〃　12	170.00	－6.50	構架式	〃
〃　12B	251.00	－6.50 －9.00	方塊擁壁式	10,000
〃　14	172.40	－9.00	方塊擁壁式 基樁式	〃

表5－1 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
〃 16	154.50	－9.00	〃 〃 〃 〃	〃
〃 17	209.00	－10.00	基樁式	15,000
〃 18	215.50	－10.00	方塊擁壁式 基樁式	〃
〃 18B	85.50	－4.50	方塊擁壁式	3,000
〃 19	264.00	－2.00 －10.00 －11.00	擁壁式 基樁式	20,000
〃 20	221.65	－10.50 －12.50	鋼管樁式	30,000
〃 21	236.60	－10.00	Z－38鋼板樁	20,000
〃 22	190.00	－11.00	〃 〃	30,000
〃 23	210.00	－11.00	井筒式 Z－45鋼板樁	〃
〃 24	240.00	－13.00	井筒式鋼板樁	〃
〃 25	300.00	－13.00	〃 〃	〃
〃 26	210.00	－11.00	〃 〃	〃
〃 27	150.00	－7.00	Z－25鋼板樁	5,000
〃 28A	69.50	－3.50	雙壁L型塊式	500

表5－1　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 28B	103.50	－3.50	雙壁L型塊式	500
〃 29	178.00	－4.50 －6.50	L型塊式	3,000
〃 30	180.00	－10.50	沈箱擁壁式	20,000
〃 31	165.00	－10.50	〃　〃	〃
〃 32	165.00	－11.00	〃　〃	〃
〃 33	210.00	－11.50	沈箱擁壁式 排樁式	30,000
〃 33B	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	混凝方塊擁壁式	
東 1	108.00	－4.50	L型塊式	500
〃 2	200.00	－9.00	Z－38鋼板樁	20,000
〃 3	170.00	－9.00	〃　〃	10,000
〃 4	306.30	－9.00	〃　〃	〃
〃 5	169.20	－9.00	〃　〃	〃
〃 6	180.00	－9.00	〃　〃	20,000
〃 7	178.00	－9.00	〃　〃	10,000

表5－1　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
9	180.00	－9.00	〃　〃	〃
10	300.00	－12.00	排樁棧橋式	30,000
11	200.00	－12.00	〃　〃	〃
12	50.00	－5.00	方塊式	3,000
14	116.00	－5.00	〃　〃	300
15	198.00	－3.00	方塊式 板樁式	〃
16	259.00	－3.00	方塊重力式 板樁式	〃
17	150.00	－5.00	L型塊式	500
19	220.00	－9.00	方塊式 棧橋式	15,000
20	120.00	－6.00	L型消浪式	3,000
21	113.00	－9.00	沈箱式	5,000
22	113.00	－9.00	〃　〃	〃

表5－2　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			沈箱式	
2			〃　〃	
3			〃　〃	
4			〃　〃	
4-A			〃　〃	
5			PC樁 L型塊式	
6			〃　〃	
7			〃　〃	
8			〃　〃	
9			〃　〃	
10			〃　〃	
11			〃　〃	
12			〃　〃	
13			〃　〃	
14				

表5－2　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				
23			沈箱式	
24			〃　〃	
25			〃　〃	
26			P C 樁	
27			〃　〃	
28			〃　〃	
29			〃　〃	
30			鋼板樁	
31			〃　〃	
32			〃　〃	

表5－3　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			棧橋式（鋼管樁）	
2			方塊式	
3			〃　〃	
4			〃　〃	
5			〃　〃	
6			〃　〃	
7			〃　〃	
8			棧橋式（R、C樁）	
9			〃　〃	
10			〃　〃	
11			鋼板樁	
12			〃　〃	
13			棧橋式	
14			〃　〃	
15			〃　〃	

表5－3　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			棧橋式	
17			〃　〃	
18			R，C板樁	
19			〃　〃	
20			〃　〃	
21			〃　〃	
30			〃　〃	
31			棧橋式	
32			〃　〃	
33			〃　〃	
34			鋼板樁	
35			〃　〃	
36			〃　〃	
37			〃　〃	
38			〃　〃	

表5－3　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			鋼板樁	
40			〃　〃	
41			〃　〃	
42			〃　〃	
43			〃　〃	
44			〃　〃	
45			〃　〃	
46			〃　〃	
47			〃　〃	
48			棧橋式	
49			〃　〃	
50			〃　〃	
51			〃　〃	
52			〃　〃	
53			〃　〃	

表5－3　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			鋼板樁	
55			〃　〃	
56			〃　〃	
57			〃　〃	
58			〃　〃	
61			〃　〃	
62			〃　〃	
63			〃　〃	
64			〃　〃	
65			〃　〃	
66			〃　〃	
67			〃　〃	
68			〃　〃	
69			〃　〃	
70			〃　〃	

表5－3　高　雄　港（續）

碼頭編號	長度(公尺)	深度(公尺)	碼頭型式	泊靠船噸(公噸)
71			棧　橋　式	
72			〃　〃	
81			〃　〃	
116			〃　〃	
117			〃　〃	
118			〃　〃	

表5－4　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			重力式	
2			重力式	
3			〃　〃	
4			鋼板樁	
5			〃　〃	
6			〃　〃	
7			重力式	
8			鋼板樁	
9			重力式	
10			〃　〃	
11			〃　〃	
12			〃　〃	
13			〃　〃	
14			〃　〃	
15			〃　〃	

表5－4　花　蓮　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			重力式	
17			〃　〃	
18			〃　〃	
19			〃　〃	

表5－5　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

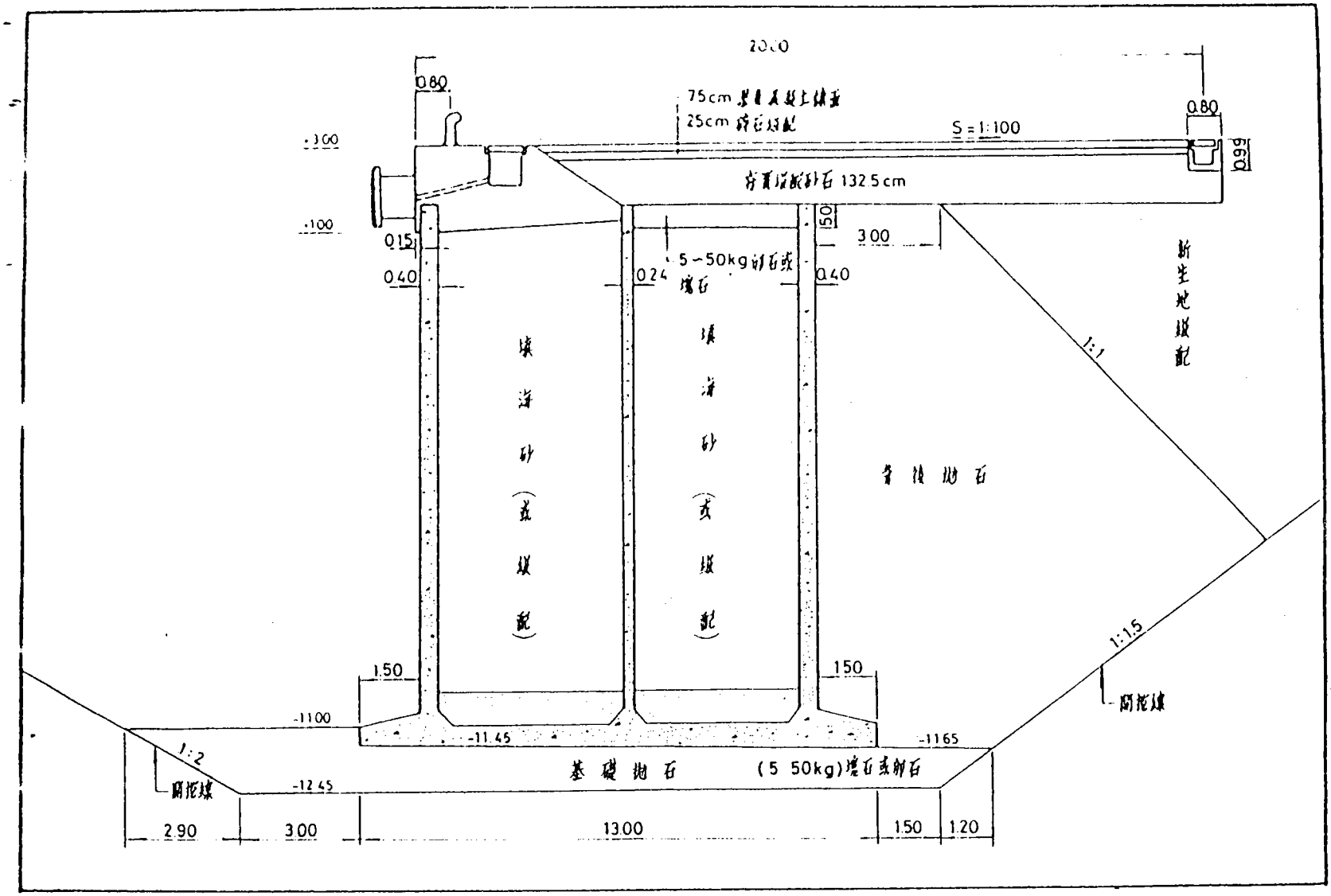


圖 5 － 6　代表性沈箱式碼頭斷面

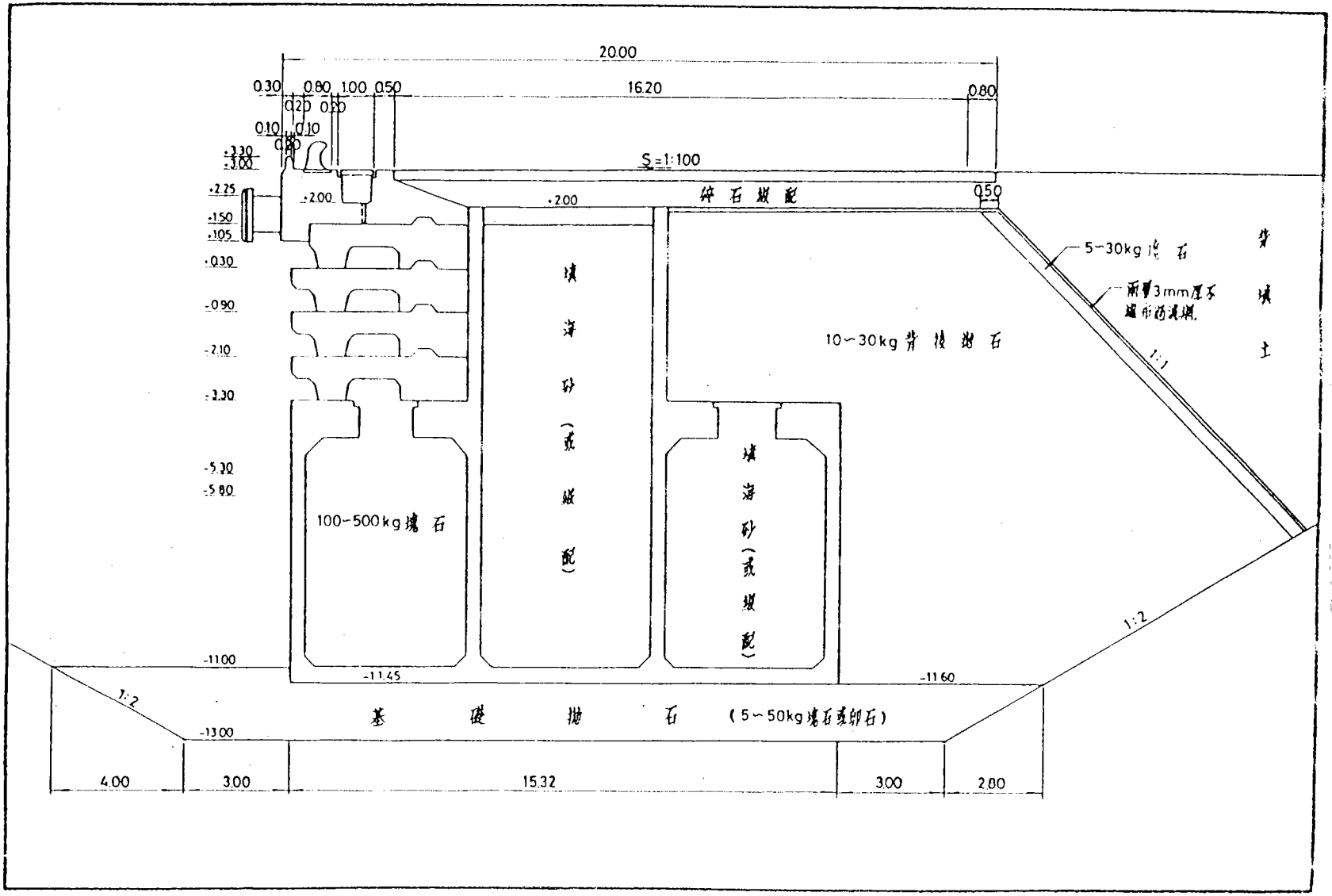


圖 5 － 7　代表性重力式碼頭斷面

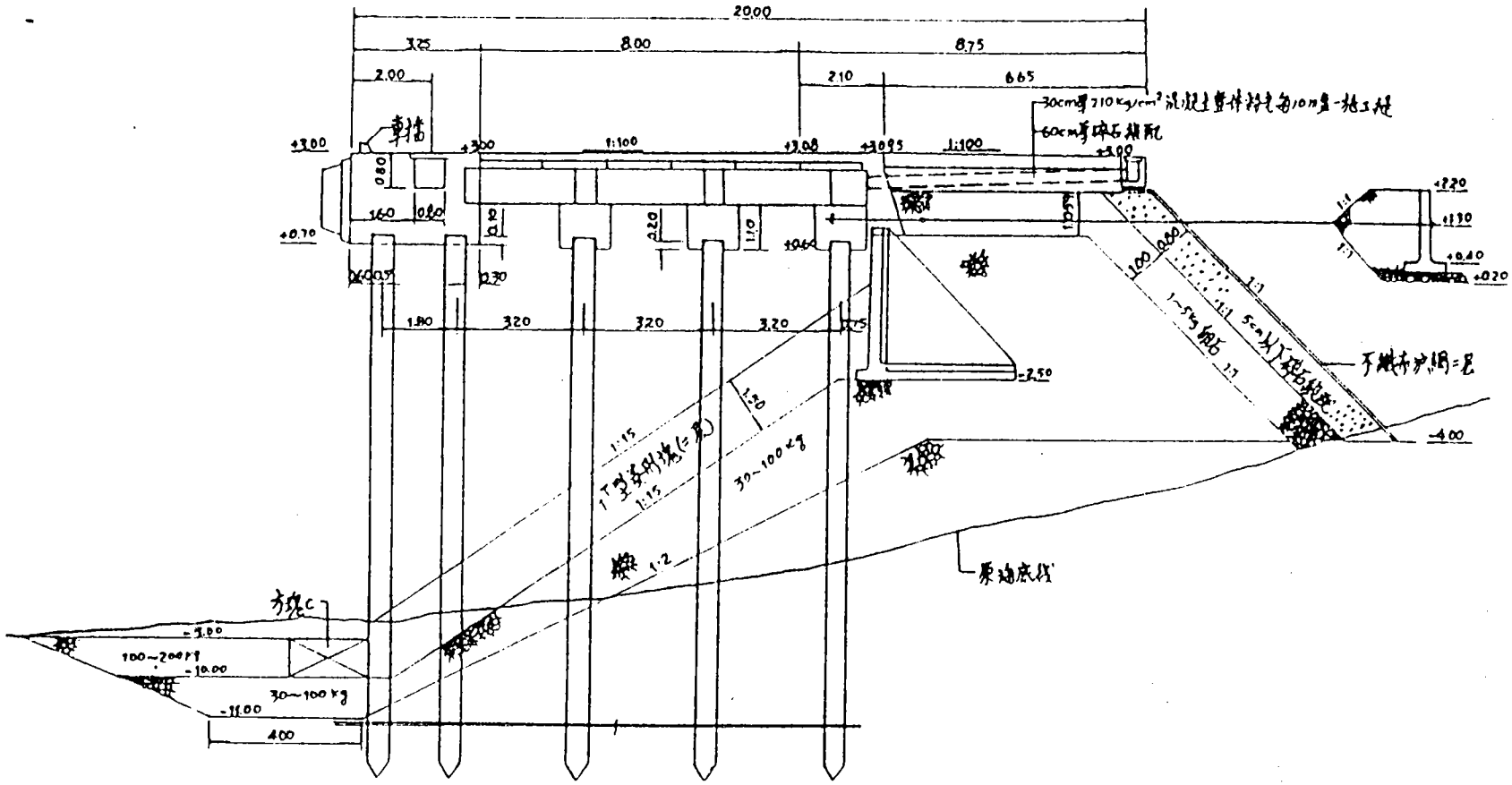
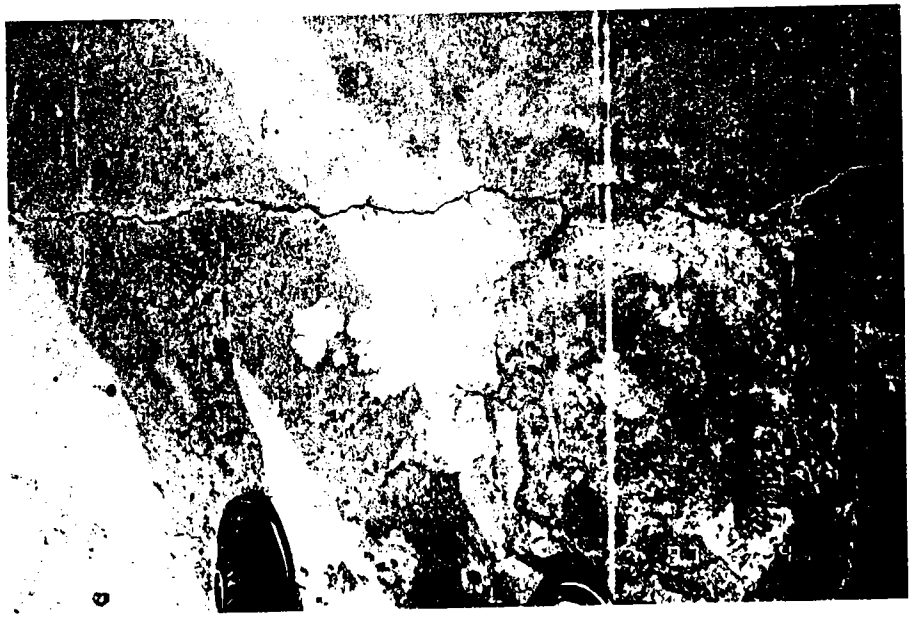
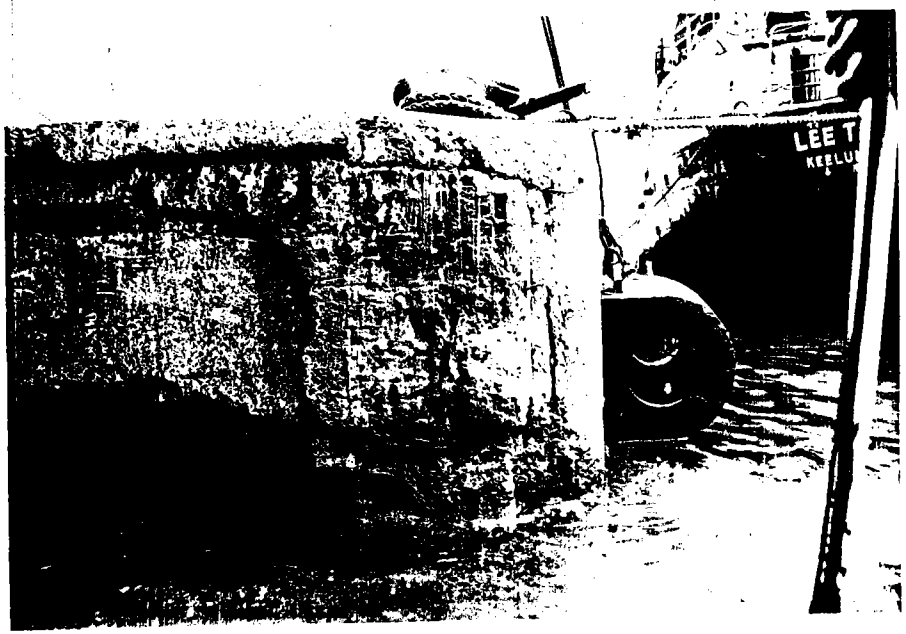


圖 5 － 8　代表性栈橋式碼頭斷面



(1)基隆港樹脂砂漿碼頭面上損壞及龜裂情形



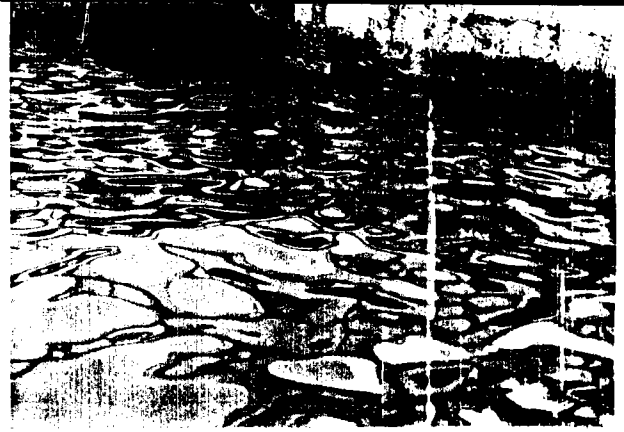
(4)碼頭岸壁發生鋼筋腐蝕現象



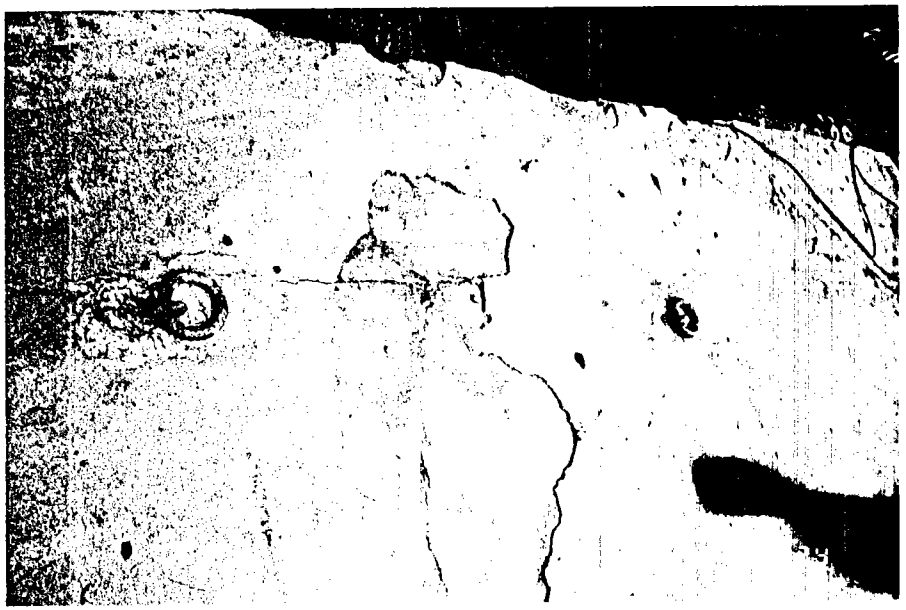




(2)基隆港碼頭面上塗上環氧樹脂砂漿仍受破壞



(5)護舷上鐵件銹蝕、碼頭岸壁損壞



(3)基隆港樹脂砂漿碼頭面上破損



(6)護舷上吊環銹蝕

圖 5 － 9　基隆港碼頭發生腐蝕及舖面損壞情形



(1)蘇澳港受地震引起碼頭面變斜

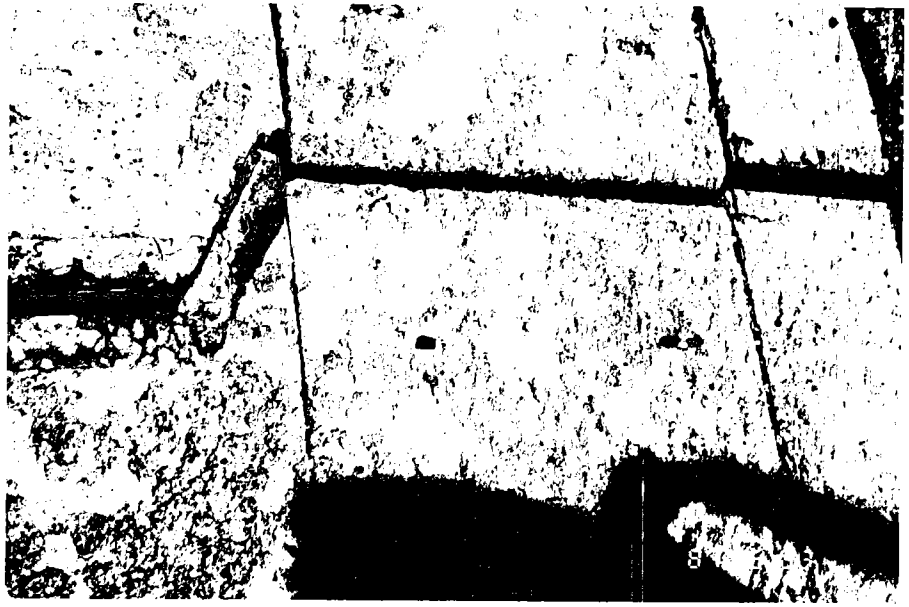


(4)波浪冲走菱形塊造成防波堤，僅塡些小型塊，喪失保護作用，將危及安全





(2)地震作用引起碼頭面變形



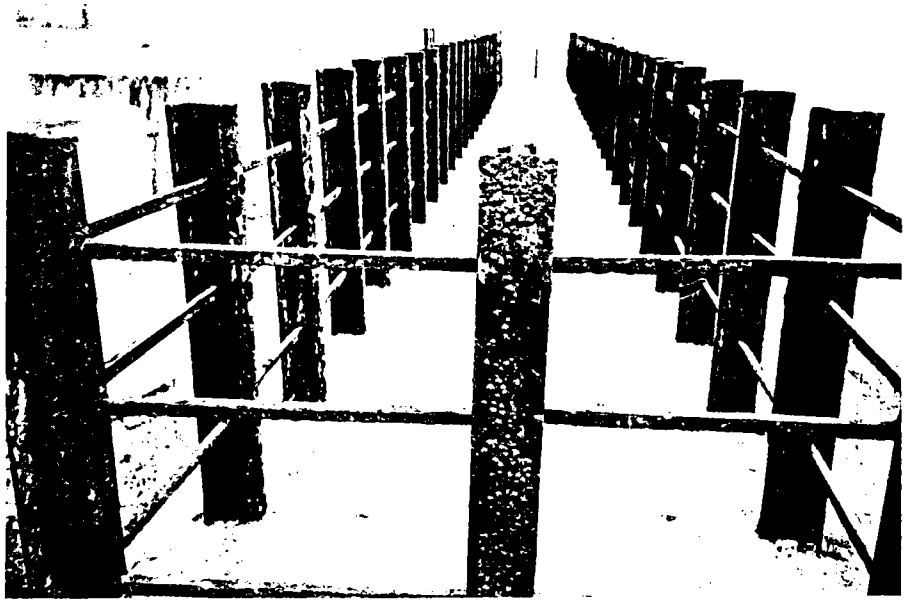
(3)地震作用引起碼頭面方塊偏離

圖 5 — 10　地震引起重力式碼頭面變位



(5)波力冲擊使雙丁塊斷脚及原六角形受磨耗

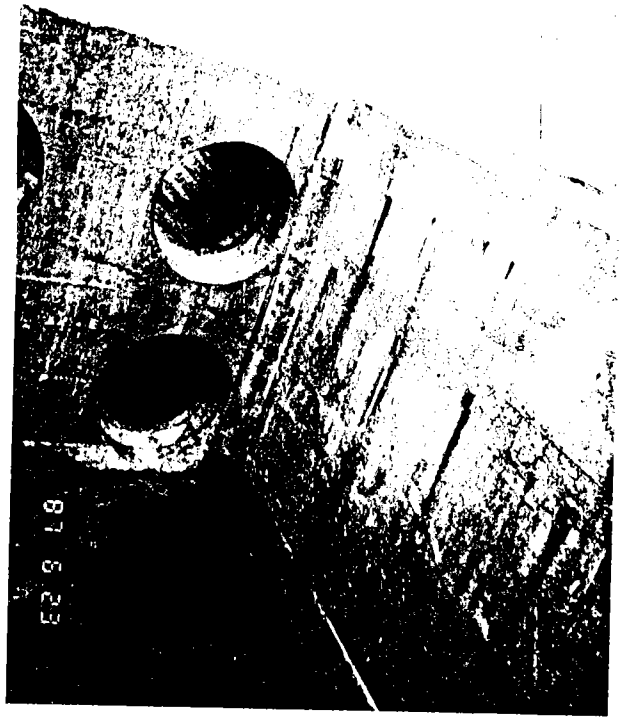
圖 5 — 11　蘇澳港消波塊破壞情形



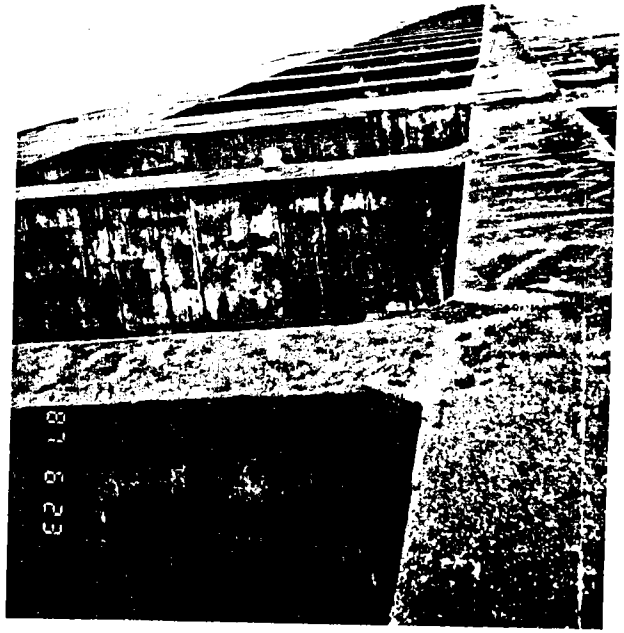
(1)消波胸牆上欄杆嚴重銹蝕



(3)消波胸牆樓梯上欄杆銹蝕嚴重已被拆走樓梯上尚有銹斑



(2)消波胸牆截水胸牆上發生銹斑現象

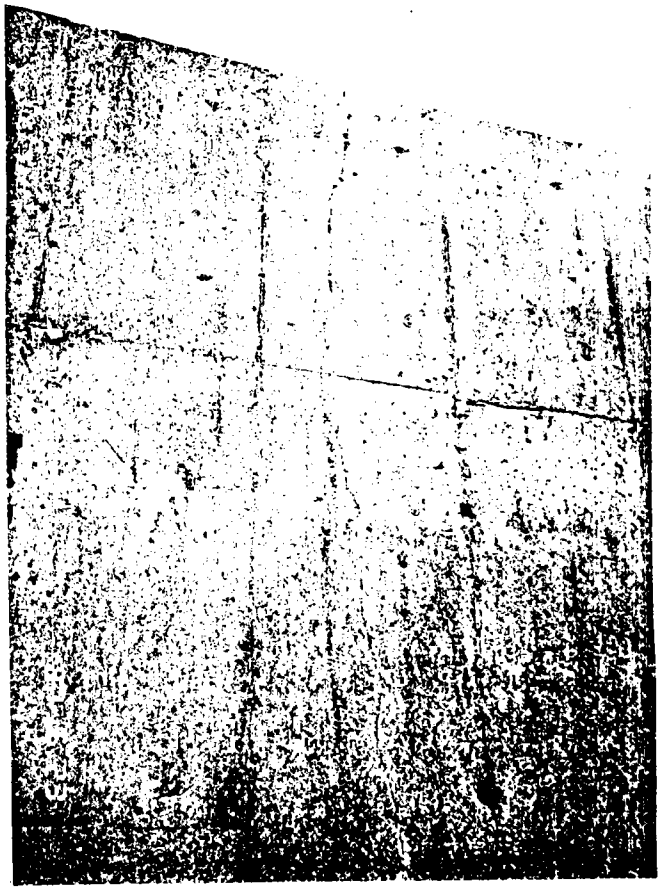


(4)蘇澳港南外堤爲消波式胸牆沉箱型式

圖 5 － 12　蘇澳港南外堤消波式胸牆銹蝕及冲蝕情形



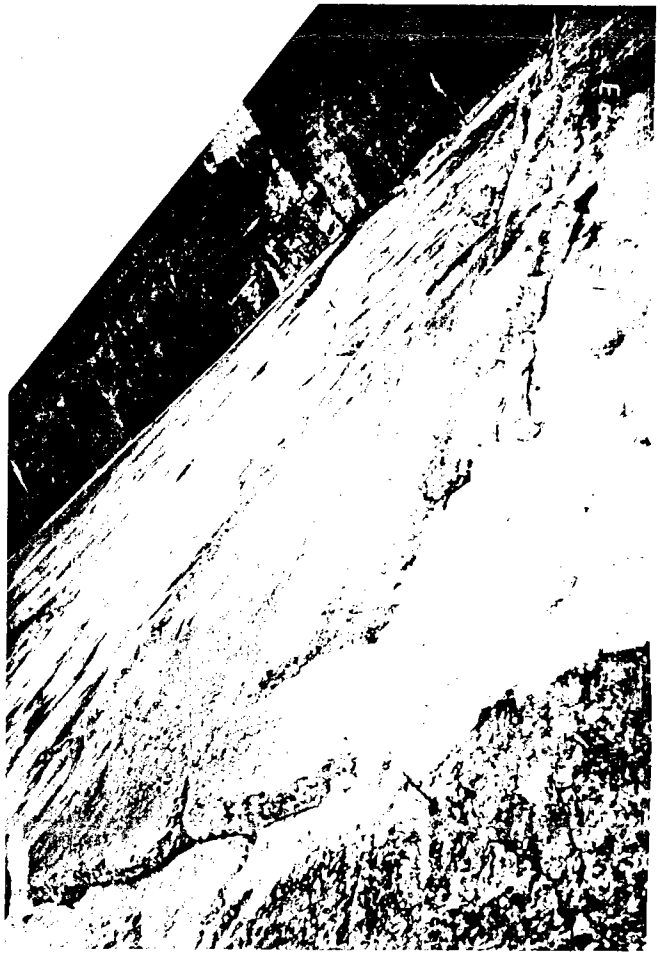
(1)蘇澳港南外堤胸牆混凝土剝落現象



(3)胸牆上混凝土龜裂

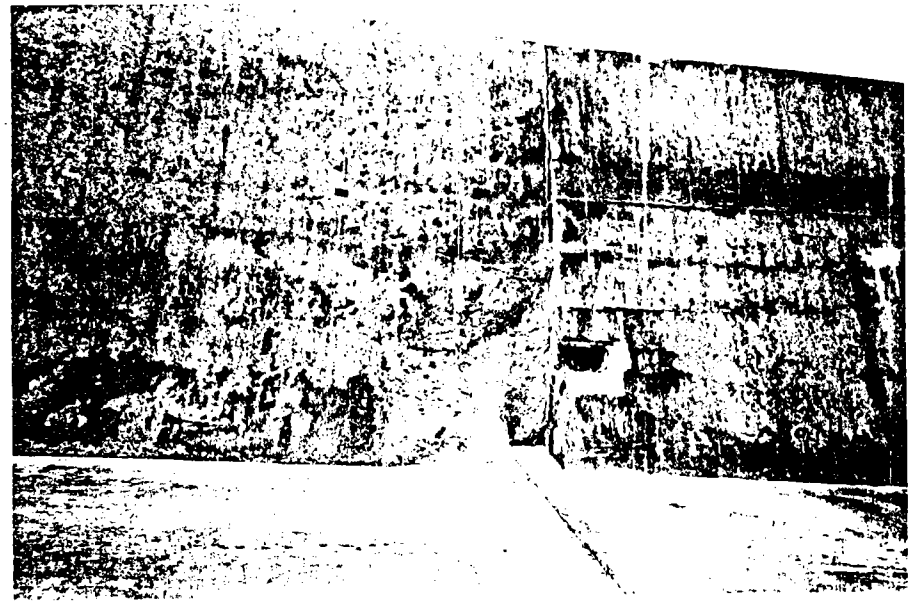


(2)蘇澳港南外堤面受波浪上揚力發生破壞



(4)蘇澳港南外堤胸牆與堤面破壞現象

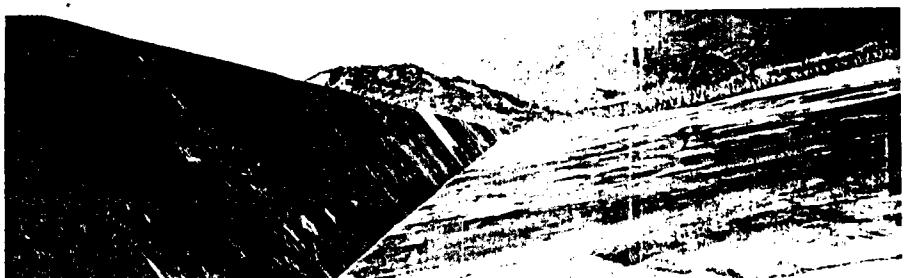
圖 5 － 13　蘇澳港南外堤胸牆及堤面破損情形



(5)胸牆上混凝土剝落



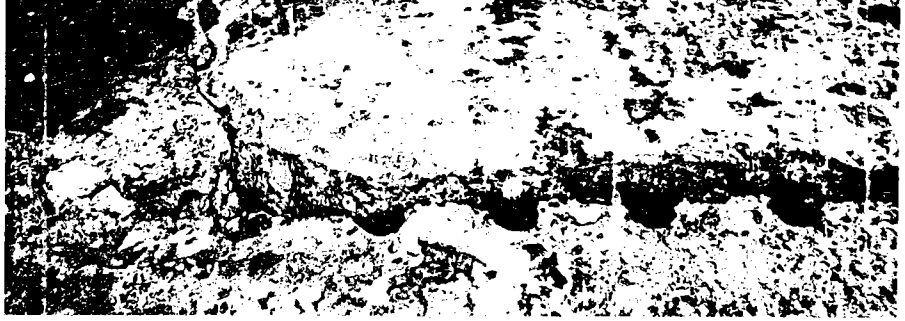
(8)沉箱堤面上加強頂緣



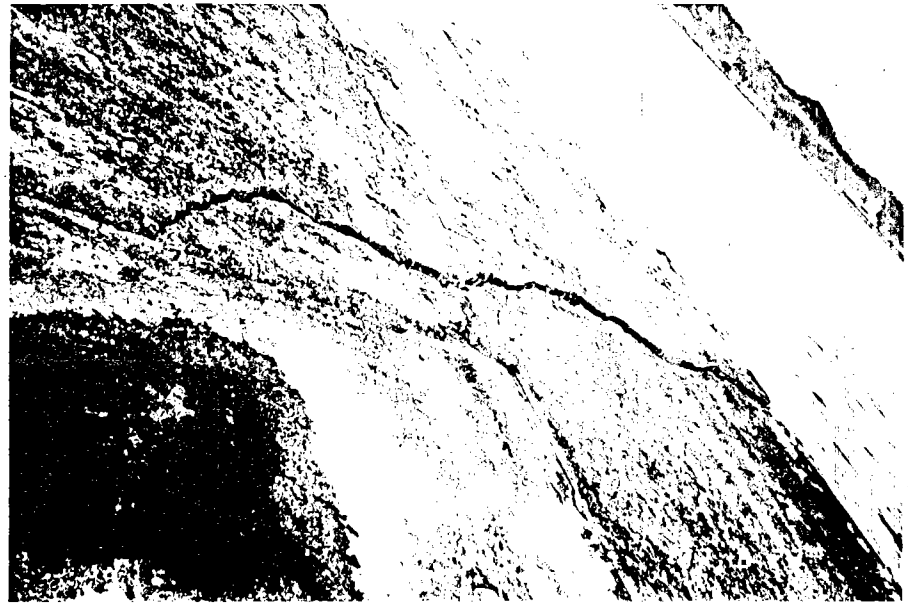




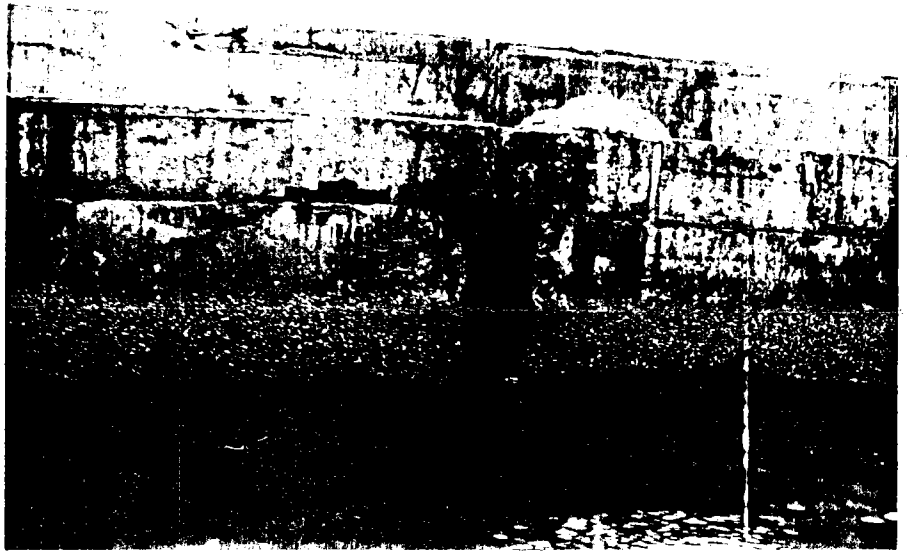
(6)沉箱上混凝土破壞



(9)沉箱上混凝土嚴重龜裂

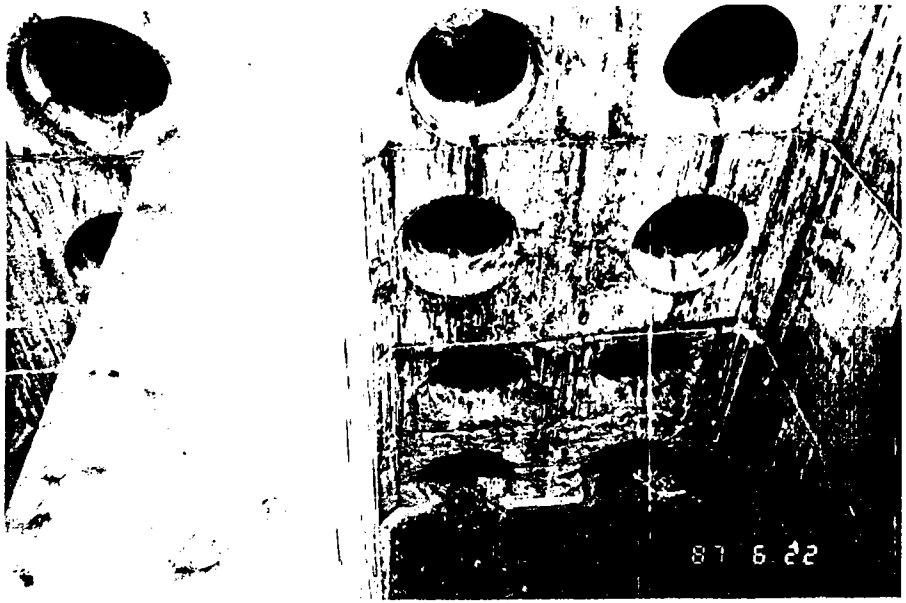


(7)沉箱堤面上混凝土龜裂

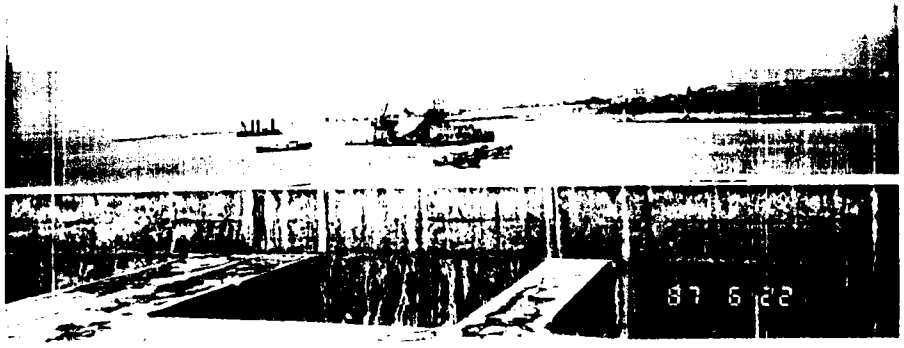


(10)沉箱上發生銹蝕現象

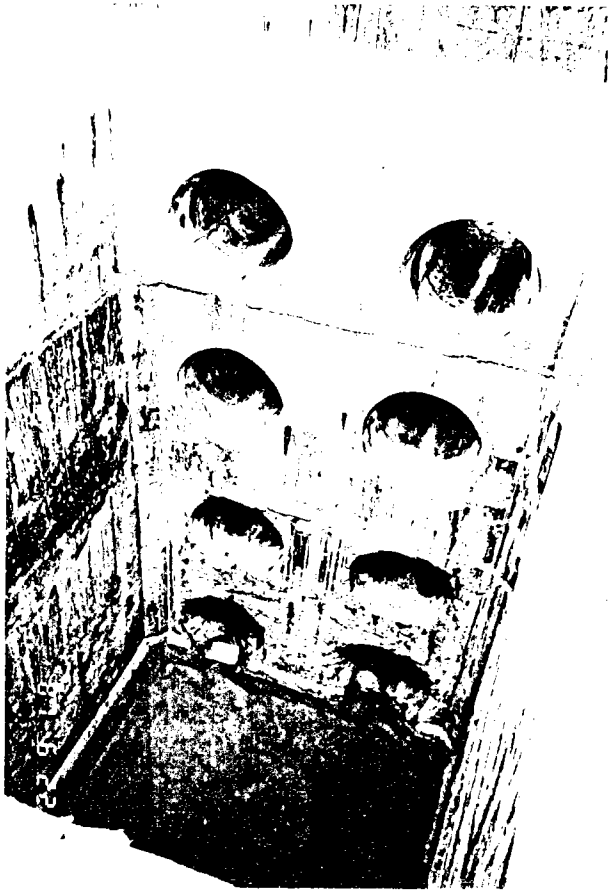
圖 5 － 13 （續）



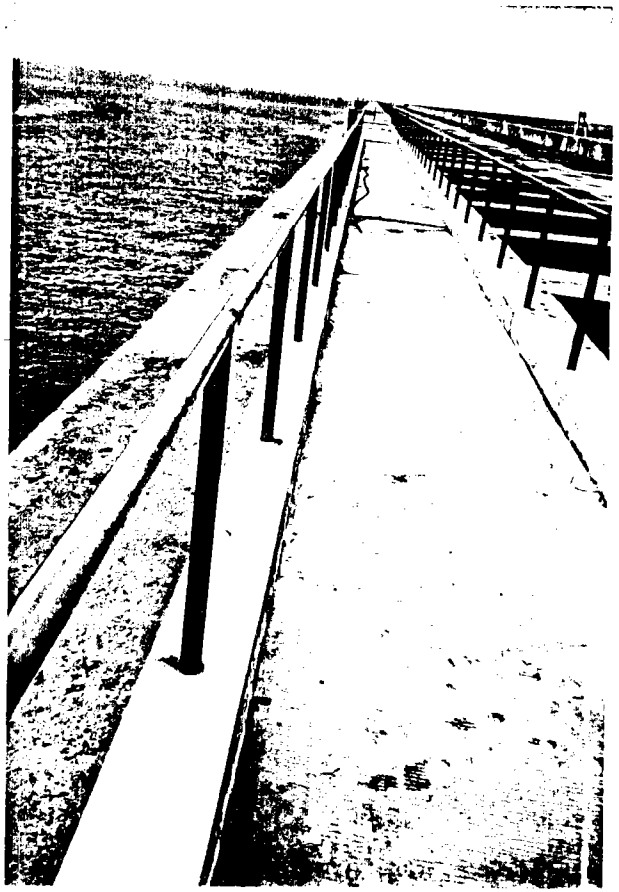
(1)消波胸牆上發生銹斑及截水胸牆發生嚴重孔蝕與銹蝕現象



(3)花蓮港外港消波式胸牆沉箱防波堤



(2)靜波池發生銹斑及截水胸牆發生孔蝕



(4)消波胸牆上欄杆發生銹蝕

圖 5 － 14　花蓮港外港消波胸牆銹蝕與冲蝕情形

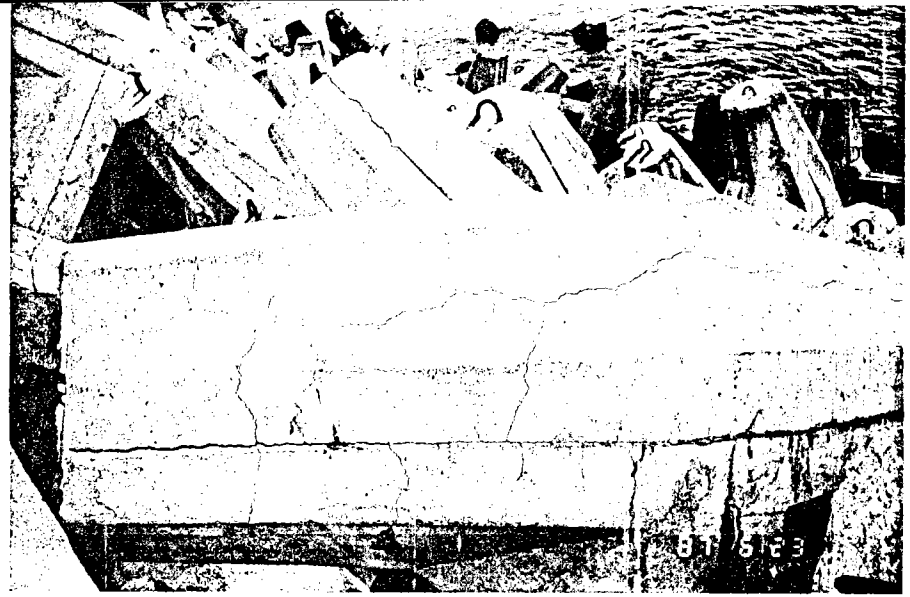


(3)花蓮港西防波堤台階銹蝕剝落

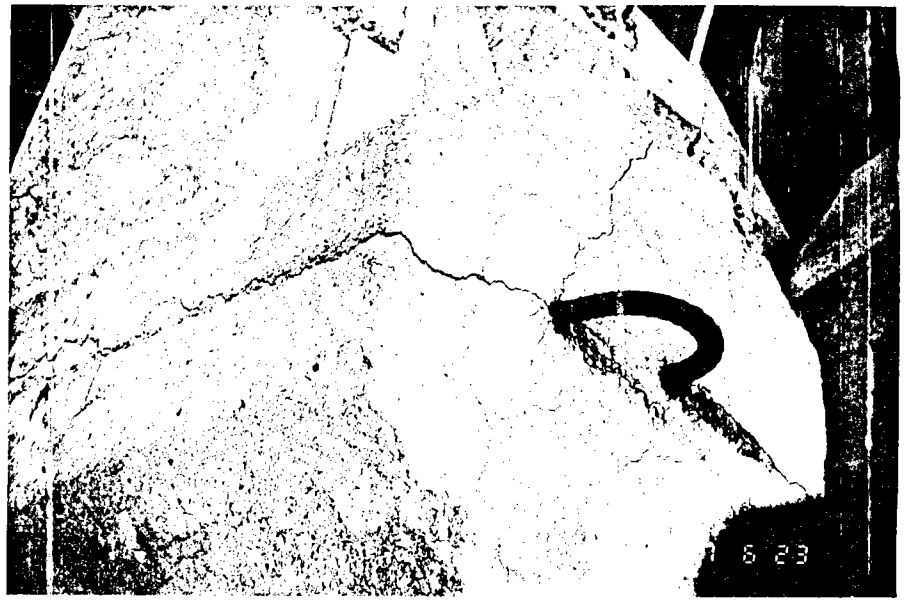


(6)波力作用使得主，肢幹交接處發生龜裂破壞

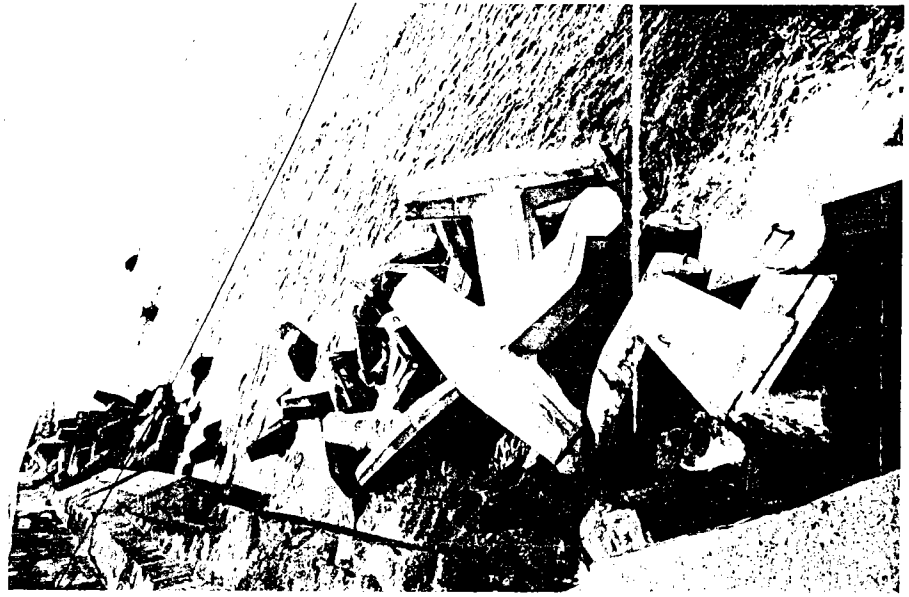
圖 5 － 15　花蓮港西堤消波塊破損情形



(1)雙丁塊發生乾縮龜裂



(4)雙丁塊沿銹蝕之吊環處龜裂



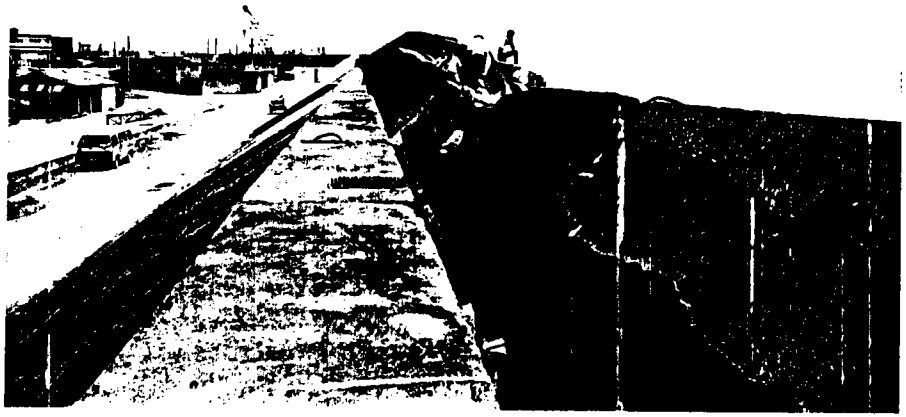
(2)雙丁塊被浪冲走，引起缺口喪失保護，
可能危及防波堤安全



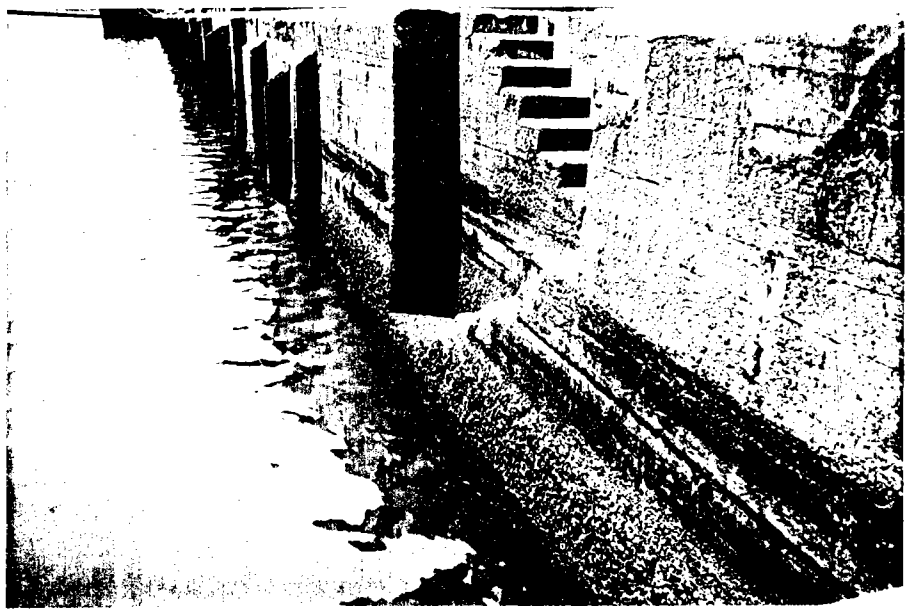
(5)波浪冲擊使其表面及原銳角受磨耗



(1)碼頭岸壁上有鋼筋銹蝕



(1)波浪冲毀



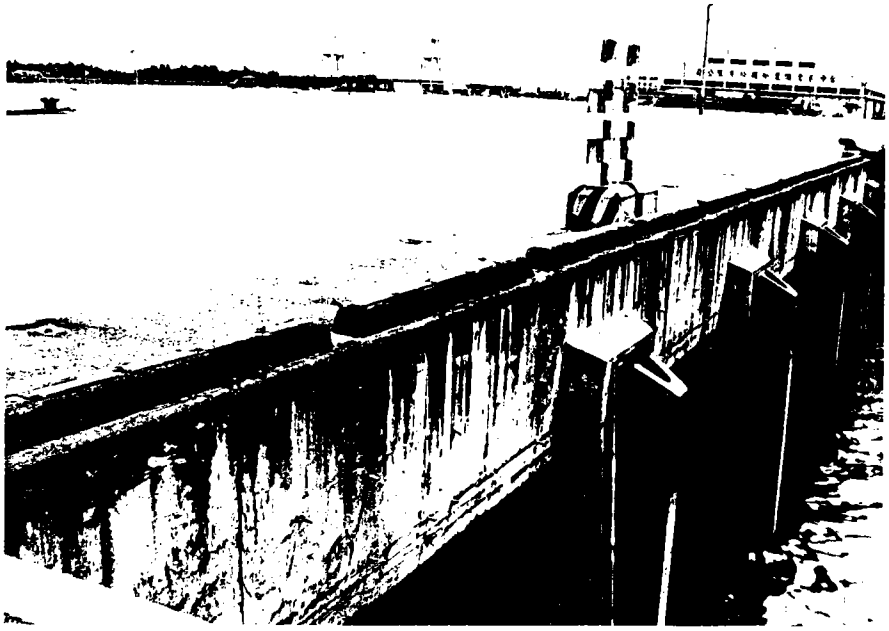
(2)碼頭岸壁在潮汐帶有污著

圖 5 － 16　花蓮港碼頭使用情形

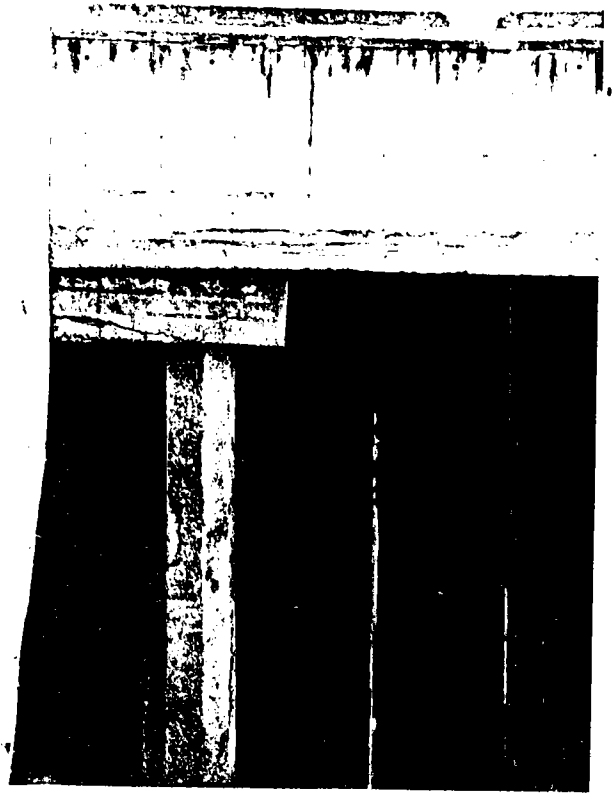


(2)鋼筋銹蝕

圖 5 － 17　花蓮港東堤破損情形



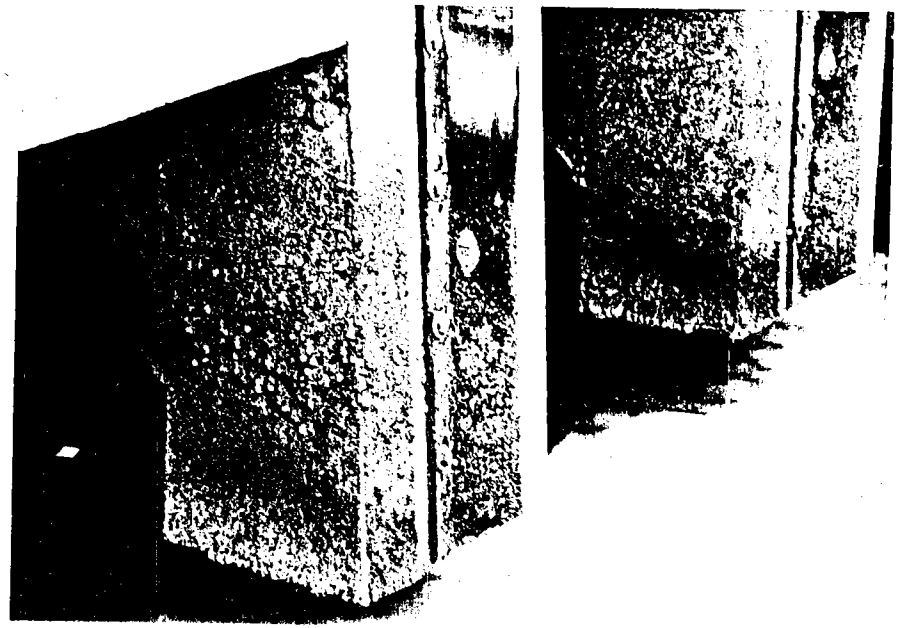
(1)台中港碼頭岸壁發生銹蝕



(3)預力混凝土樁發生龜裂



(2)貯木池棧橋上鐵欄杆及斜樁頂RC舖面銹蝕



(4)潮汐帶混凝土受汚著

圖5－18　台中港碼頭岸壁發生銹蝕與汚著現象

陸、海水化性分析

林維明・吳信昇

6－1 海水的化學組成

海水的化學組成甚爲複雜，爲一種溶解度極大的溶解液，截至目前爲止，在海水中已化驗出來的化學元素有 77 種之多，海水離子組成如表 6－1 所示，各種溶質間幾乎維持著一定比例，但在靠近海岸或港灣的海水，因受到河水冲淡或工廠排放廢水影響，可形成另一種完全不同的溶液。

6－2 取樣地點及調查

本次研究所採海水樣地點如圖 5－1～圖 5－5 海水取樣調查工作如圖 6－1 所示。

6－3 水質分析

本研究攜帶現場水質測儀至所選定之碼頭處，離岸 1～2 公尺採集海水並送至國立中興大學環境工程系作水質檢驗，現場水質測儀所觀測項目計有 pH 值、導電度、溶氧量、水溫。

(1) pH 值

海水中 pH 值一般介於 7.5～8.4 之間，除了特別在隱蔽的海灣和河口則 pH 值會降至 7.5 以下，這是因爲高濃度 CO_2 被溶解，高濃度CO_2造成混凝土中性化而降低其強度。

(2) 導電體(Electrical conductivity)

海水中的電導度直接影響到防蝕電流所須的電位，尤其是在流電陽極爲甚。本研究現場水質測儀原有此項觀測但因所測範圍較小不適於海水中使用，現正加緊趕換之中。

(3)溶解氧氣含量

當海水中含有氧氣時，海水與鋼材接觸時產生氧化腐蝕，氧化耗盡後，未及時補充，反應立即停止，但是海水並不是永遠靜止，海水流動，從別處又帶來新鮮的空氣。

表 6－2至表 6－3 爲本年度內兩次分赴各港口採樣所得數據之平均值而表 6－4至表 6－23 爲各測站所測得之數據。

表 6 － 1　海水中溶解物質之濃度

元素	含量 (ppm)	主要種類	元素	含量 (ppm)	主要種類
Cl	19,353	Cl^-	Sb	5×10^{-4}	$Sb(OH)_6^-$(?)
Na	10,760	Na^+	Cs	5×10^{-4}	Cs^+
Mg	1,294	Mg^{+2} ; $MgSO_4$	Ce	4×10^{-4}	Ce^{+3}
S	812	SO_4^{-2}	Kr	4×10^{-4}	–
Ca	413	Ca^{+2};$CaSO_4$	Y	3×10^{-4}	–
K	387	K^+	Ag	3×10^{-4}	$AgCl_2^-$; $AgCl_3^{-2}$
Br	67.3	Br^-	La	3×10^{-4}	–
C	28	HCO_3^-; H_2CO_3; CO_3^{-2}; 有機化合物	Cd	1×10^{-4}	Cd^{+2} ; $CdSO_4$
			Ne	1×10^{-4}	–
Sr	8.0	Sr^{+2} ; $SrSO_4$	Xe	1×10^{-4}	–
B	4.6	$B(OH)_3$; $B(OH)_2O^-$	W	1×10^{-4}	WO_4^{-2}
Si	3	$Si(OH)_4$; $Si(OH)_3O^-$	Ge	7×10^{-5}	$Ge(OH)_4$; $Ge(OH)_3O^-$
F	1.3	F^-; MgF^+	Cr	5×10^{-5}	–
A	0.6	A(g)	Th	5×10^{-5}	–
N	0.5	NO_3^- ; NO_2^- ; NH_4^+ ; N_2(g) ; 有機化合物	Sc	4×10^{-5}	
			Ga	3×10^{-5}	
Li	0.17	Li^+			
Rb	0.12	Rb^+	Hg	3×10^{-5}	$HgCl_3^-$; $HgCl_4^{-2}$
P	7×10^{-2}	$H_2PO_4^-$; HPO_4^{-2} ; PO_4^{-3} ; H_3PO_4	Pb	3×10^{-5}	Pb^{+2}; $PbSO_4$
			Bi	2×10^{-5}	–
I	6×10^{-2}	IO_3^- ; I^-	Nb	1×10^{-5}	–
Ba	3×10^{-2}	Ba^{+2} ; $BaSO_4$	Tl	$<1\times10^{-5}$	Tl^+
In	$<2\times10^{-2}$		He	5×10^{-6}	–
Al	1×10^{-2}	$Al(OH)_x$	Au	4×10^{-6}	$AuCl_4^-$
Fe	1×10^{-2}	$Fe(OH)_3$	Nd	2×10^{-6}	–
Zn	1×10^{-2}	Zn^{+2} ; $ZnSO_4$	Dy	7×10^{-7}	–
Mo	1×10^{-2}	MoO_4^{-2}	Pr	6×10^{-7}	–
Se	4×10^{-3}	SeO_4^{-2}	Er	6×10^{-7}	–
Cu	3×10^{-3}	Cu^{+2} ; $CuSO_4$	Be	6×10^{-7}	–
As	3×10^{-3}	$H_2AsO_4^-$; $HAsO_4^{-2}$ H_3AsO_4 ; H_3AsO_3	Gd	6×10^{-7}	–
			Yb	5×10^{-7}	–
Sn	3×10^{-3}		Sm	4×10^{-7}	–
U	3×10^{-3}	$UO_2(CO_3)_3^{-4}$	Ho	2×10^{-7}	–
V	2×10^{-3}	$VO_2(OH)_3^{-2}$	Tm	1×10^{-7}	–
Mn	2×10^{-3}	Mn^{+2} ; $MnSO_4$	Eu	1×10^{-7}	–
Ni	2×10^{-3}	Ni^{+2} ; $NiSO_4$	Lu	1×10^{-7}	–
Ti	1×10^{-3}	$Ti(OH)_4$	Pa	2×10^{-9}	–
Co	5×10^{-4}	Co^{+2} ; $CoSO_4$	Ra	1×10^{-10}	Ra^{+2} ; $RaSO_4$
			Rn	6×10^{-16}	–

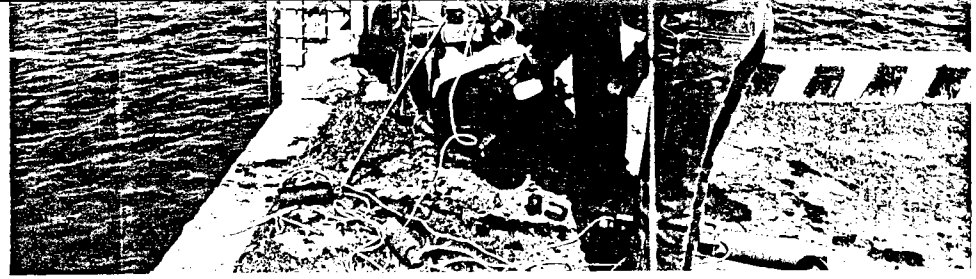


(1)操作海水様自動分析儀



(2)放下採水器





(4)蒐集水様帯回實驗室分析



(3)收起取様器



(5)自動海水様分析儀

圖 6 － 1　海水取様調查

根據表 6 － 2 及表 6 － 3 之資料繪製各港多春季兩季高低潮之平均水溫、pH 值、溶氧量、氯化物含量、硫化物含量、及硫酸根離子含量之變化比較，如圖 6 － 2 至圖 6 － 7 所示，由圖中顯示：

(1)各港平均水溫

多季以高雄港最高 (25.9°C)，台中港最低 (16.1°C)春季則台中港最高 (28.1°C)，而基隆港最低 (18.3°C)。同一地區在高低潮或水深0m，1m 及 2m 之變化性並不大。

(2)各港平均 pH 值

多季以高港最低爲 7.7，台中港最高爲 8.3，春季仍以高港最低爲8.1，台中最高爲 8.3。受高低潮及水深之影響變化性並不大。

(3)各港之平均溶氧量

多季以高港爲最低 (高潮爲 3.3mg ／ l ，低潮爲 3.9mg ／l) 而以台中港最高 (高潮爲 6.7mg ／ l ，低潮爲 7.6mg ／ l)春季仍以中港較高，約爲 8.7 ～ 8.3mg ／ l。而高港及基港最低約爲 3.5 ～ 3.9mg ／ l 。溶氧量之水深變化以台中港最爲顯著，因爲海面上受污染，故溶氧量較低，而在 1m 處及 2m 處之溶氧量較高，但在水深較深處溶氧量應較少，此有待進一步調查分析。

(4)氯離子 (Cl^-)含量

以多季而言，氯離子含量以花蓮港最低 (約爲 1.34×10^4ppm)其他各港海水之氯離子含量相差不大。

春季則以台中爲最高 (約爲 1.9×10^4ppm)其他各港海水之氯離子含量相差並不顯著，隨水深之變化各港不同。俟下年度夏季與秋季兩次實測資料分析結果齊全後再詳加討論。

(5)硫化物 (S^{2-})含量

除高雄港因工業港有硫化物污染外，其他各港硫化物含量太少。

(6)硫酸根離子 (SO_4^{2-})含量

各港之硫酸塩離子隨水深之變化很大，整個趨勢而言，變化介於 (2.4 ～ 3.0) $\times 10^3$ppm。俟下年度夏季與秋季兩次實測資料結果齊全後，再詳細討論。

表 6 － 2 各港區 海域海水化性平均值 （冬季）

深度	項目	港名 / 潮位	基隆 高潮	基隆 低潮	台中 高潮	台中 低潮	高雄 高潮	高雄 低潮	花蓮 高潮	花蓮 低潮	蘇澳 高潮	蘇澳 低潮
0 m	水溫	(℃)	18.6	19.0	16.2	17.7	25.9	26.0	22.6	21.6	21.8	21.7
	酸鹼度	PH值	7.8	7.8	8.3	8.3	7.7	7.7	8.1	8.1	7.8	7.7
	溶氧	(mg／l)	5.9	5.5	6.7	7.6	2.1	2.2	6.5	6.9	5.9	5.6
	Cl^-	(PPM)	15919	15858	15794	16060	15290	15023	14683	13386	15561	15979
	$S^=$	(PPM)	0.006	0	0	0	0.06	0.51	0	0.003	0.004	0
	$SO_4^=$	(PPM)	2985	2984	2766	2482	2708	2868	2613	2497	2691	2735
1 m	水溫	(℃)	18.5	18.8	16.1	16.9	25.9	26.0	23.1	21.7	22.1	21.9
	酸鹼度	PH值	8.0	8.0	8.4	8.3	7.7	7.7	8.1	8.1	7.9	7.9
	溶氧	(mg／l)	5.9	5.6	6.5	7.6	1.8	2.0	6.5	7.2	6.0	5.5
	Cl^-	(PPM)	15905	16144	15971	15794	15570	15570	15135	14154	15903	15878
	$S^=$	(PPM)	0	0.003	0	0	0.05	0.05	0	0	0.004	0.004
	$SO_4^=$	(PPM)	2747	2717	2654	2685	2955	2855	2673	2438	2698	2751
2 m	水溫	(℃)	18.5	18.7	16.0	16.3	25.9	25.7	23.3	22.1	22.2	22.0
	酸鹼度	PH值	8.0	8.0	8.4	8.3	7.7	7.8	8.2	8.2	8.0	8.0
	溶氧	(mg／l)	5.9	5.6	6.3	7.5	1.9	1.8	6.4	6.8	5.8	5.6
	Cl^-	(PPM)	16188	16188	15794	15485	15698	15668	15553	14236	16075	15900
	$S^=$	(PPM)	0	0.007	0	0	0.05	0.05	0	0	0.004	0
	$SO_4^=$	(PPM)	2848	3008	2728	2596	3037	3078	2761	2594	2848	2758

表 6 — 3 各港區　海域海水化性平均值（春季）

深度	項目	港名 / 潮位	基隆 高潮	基隆 低潮	台中 高潮	台中 低潮	高雄 高潮	高雄 低潮	花蓮 高潮	花蓮 低潮	蘇澳 高潮	蘇澳 低潮
0 m	水溫	(℃)	18.3	18.5	28.1	29.5	21.8	22.3	23.2	22.9	21.4	21.3
	酸鹼度	PH值	8.3	8.1	8.9	8.9	7.9	8.0	8.3	8.3	7.8	7.7
	溶氧	(mg/l)	3.5	3.4	8.7	8.3	3.3	3.9	4.6	5.6	5.0	5.0
	Cl^-	(PPM)	17073	17074	18984	18788	16845	16625	16970	17257	16473	16928
	$S^=$	(PPM)	0.025	0.02	0.028	0.026	0.14	1.05	0.025	0.026	0.03	0.02
	$SO_4^=$	(PPM)	2672	2768	2526	2473	2713	2863	2482	27.3	2561	2746
1 m	水溫	(℃)	18.3	18.3	27.8	28.4	21.6	22.2	23.1	22.9	21.5	21.5
	酸鹼度	PH值	8.3	8.2	9.0	8.9	8.1	8.0	8.3	8.4	8.1	8.0
	溶氧	(mg/l)	3.6	3.4	8.6	8.3	3.2	3.7	4.7	5.6	5.0	5.2
	Cl^-	(PPM)	17087	16892	19523	18960	17030	16953	17346	17158	17531	16895
	$S^=$	(PPM)	0.02	0.03	0.022	0.024	0.13	1.72	0.023	0.02	0.03	0.02
	$SO_4^=$	(PPM)	2587	2593	2449	2594	2933	2907	2663	2743	2624	2543
2 m	水溫	(℃)	18.2	18.2	27.4	27.5	21.4	21.9	23.0	22.9	21.6	21.6
	酸鹼度	PH值	8.3	8.3	8.9	8.9	8.1	8.1	8.3	8.4	8.1	8.1
	溶氧	(mg/l)	3.8	3.5	7.7	7.4	3.1	3.7	4.8	5.7	5.0	5.2
	Cl^-	(PPM)	16971	17317	19327	19204	17153	16872	17342	17186	17289	16646
	$S^=$	(PPM)	0.03	0.03	0.026	0.024	0.04	0.83	0.026	0.02	0.02	0.02
	$SO_4^=$	(PPM)	2712	2692	2658	2722	2913	2683	2592	2761	2819	2614

表 6－4　基隆港區海域海水化性分析結果（測站位置參見圖5－1）　☑H　☐L

深度	項目 \ 調查日期 / 測時 / 測站	75年12月12日 09:45 30	09:06 E6	09:22 E20	10:30 1	10:14 14	09:56 23	平均值
0 m	水溫 (℃)	18.6	18.6	18.4	18.8	18.8	18.5	18.6
	酸鹼度 PH值	7.8	7.9	7.9	7.7	7.8	7.9	7.8
	溶氧 (mg/l)	6.6	6.1	5.8	4.3	5.9	6.5	5.9
	Cl^- (PPM)	16622	16006	16537	13857	16193	16300	15919
	$S^=$ (PPM)	0.0	0.03	0.02	0.0	0.0	0.0	0.006
	$SO_4^=$ (PPM)	2951	3262	2664	2878	3348	2806	2985
1 m	水溫 (°C)	18.5	18.6	18.4	18.6	18.7	18.4	18.5
	酸鹼度 PH值	8.0	8.0	8.0	7.8	7.9	8.0	8.0
	溶氧 (mg/l)	6.6	6.0	5.9	4.4	5.9	6.4	5.9
	Cl^- (PPM)	16112	16460	15665	14729	15899	16567	15905
	$S^=$ (PPM)	0	0	0	0	0	0	0
	$SO_4^=$ (PPM)	2749	2824	2696	2642	2557	3013	2747
2 m	水溫 (°C)	18.5	18.6	18.5	18.6	18.6	18.4	18.5
	酸鹼度 PH值	8.0	8.0	8.0	7.9	8.0	8.0	8.0
	溶氧 (mg/l)	6.5	6.2	5.8	4.5	6.0	6.5	5.9
	Cl^- (PPM)	16941	16059	16246	15368	16193	16325	16188
	$S^=$ (PPM)	0	0	0	0	0	0	0
	$SO_4^=$ (PPM)	2723	2847	2857	2609	3134	2920	2848

表6—5 基隆港區海域海水化性分析結果（測站位置參見圖 5—1） □H ☑L

深度	項目 \ 調查日期 / 測站	75年12月12日 14:07 30	13:30 E6	13:46 E20	14:45 1	14:38 14	14:18 23	平均值
0 m	水溫 (℃)	18.8	19.2	18.9	19.2	19.1	18.6	19.0
	酸鹼度 PH值	7.9	7.9	7.9	7.4	7.8	8.0	7.8
	溶氧 (mg/l)	6.4	5.2	5.6	4.0	5.5	6.3	5.5
	Cl^- (PPM)	16325	16567	16514	12986	16378	16378	15858
	$S^=$ (PPM)	0	0	0	0	0	0	0
	$SO_4^=$ (PPM)	2856	2920	3091	2236	3323	3476	2984
1 m	水溫 (°C)	18.6	19.1	18.7	18.7	18.9	18.6	18.8
	酸鹼度 PH值	8.0	8.0	8.0	7.9	7.9	8.0	8.0
	溶氧 (mg/l)	6.4	5.2	5.5	4.6	5.4	6.3	5.6
	Cl^- (PPM)	16407	16299	15846	15473	16165	16674	16144
	$S^=$ (PPM)	0	0	0.02	0	0	0	0.003
	$SO_4^=$ (PPM)	3049	2392	2729	2450	2781	2837	2717
2 m	水溫 (°C)	18.6	18.9	18.6	18.6	18.8	18.6	18.7
	酸鹼度 PH值	8.1	8.0	8.0	7.9	8.0	8.0	8.0
	溶氧 (mg/l)	6.2	5.3	5.5	4.7	5.4	6.4	5.6
	Cl^- (PPM)	16325	16006	15953	16059	16246	16537	16188
	$S^=$ (PPM)	0	0	0.02	0	0.02	0	0.007
	$SO_4^=$ (PPM)	3177	2868	2909	3027	3262	2805	3008

表 6—6 基隆港區海域海水化性分析結果（測站位置參見圖 5—1 ） ☑ H ☐ L

深度	項目 \ 調查日期時間 \ 測站	75年3月12日 08:50 E6	09:02 E20	09:20 30	09:45 23	10:00 14	10:11 1	平均值
0 m	水溫 (℃)	18.8	18.1	18.1	18.1	18.4	18.3	18.3
	酸鹼度 PH值	8.4	8.2	8.4	8.3	8.2	8.2	8.3
	溶氧 (mg/l)	4.1	2.9	4.4	3.8	3.1	2.7	3.5
	Cl^- (PPM)	17349	16109	17557	17762	16936	16729	17073
	$S^=$ (PPM)	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.025
	$SO_4^=$ (PPM)	2653	2377	2805	2411	3017	2768	2672
1 m	水溫 (°C)	18.6	18.3	18.1	18.1	18.3	18.2	18.3
	酸鹼度 PH值	8.4	8.3	8.4	8.4	8.2	8.2	8.3
	溶氧 (mg/l)	4.1	3.3	4.4	3.8	3.3	2.9	3.6
	Cl^- (PPM)	17432	16523	17142	17349	17142	16936	17087
	$S^=$ (PPM)	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02
	$SO_4^=$ (PPM)	2449	2749	2213	2704	2615	2794	2587
2 m	水溫 (°C)	18.4	18.3	18.0	18.0	18.3	18.2	18.2
	酸鹼度 PH值	8.4	8.3	8.4	8.5	8.2	8.2	8.3
	溶氧 (mg/l)	4.3	3.6	4.4	4.0	3.3	3.0	3.8
	Cl^- (PPM)	17968	16626	16626	17143	16730	16730	16971
	$S^=$ (PPM)	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
	$SO_4^=$ (PPM)	2678	2856	2615	2424	2844	2856	2712

表 6 － 7 基隆港區海域海水化性分析結果（測站位置參見圖 5 － 1） □H ☑L

深度	項目 \ 調查日期時間 / 測站	76年3月12日 13:50 E 6	14:05 E 20	14:22 30	14:47 23	15:00 14	15:10 1	平均值
0 m	水溫 (℃)	18.7	19.0	18.0	18.4	18.4	18.3	18.5
	酸鹼度 PH值	8.1	8.1	8.3	8.1	8.1	8.0	8.1
	溶氧 (mg/l)	4.0	3.0	4.0	3.6	3.2	2.7	3.4
	Cl^- (PPM)	17555	16486	16591	17245	17222	17349	17074
	$S^=$ (PPM)	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.02
	$SO_4^=$ (PPM)	2729	2360	2972	3200	2640	2704	2768
1 m	水溫 (°C)	18.6	18.4	17.9	18.0	18.4	18.3	18.3
	酸鹼度 PH值	8.2	8.1	8.3	8.2	8.2	8.1	8.2
	溶氧 (mg/l)	4.1	3.0	4.0	3.8	3.1	2.5	3.4
	Cl^- (PPM)	17555	16316	17012	16802	17349	16316	16892
	$S^=$ (PPM)	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03
	$SO_4^=$ (PPM)	2589	2436	2487	2551	2640	2853	2593
2 m	水溫 (°C)	18.4	18.4	17.9	18.0	18.4	18.2	18.2
	酸鹼度 PH值	8.2	8.5	8.3	8.3	8.2	8.1	8.3
	溶氧 (mg/l)	4.1	3.1	4.0	3.8	3.2	2.5	3.5
	Cl^- (PPM)	17555	17452	17968	17557	17432	16936	17317
	$S^=$ (PPM)	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
	$SO_4^=$ (PPM)	2729	2868	2576	2296	2933	2749	2692

表 6 － 8　台中港區海域海水化性分析結果（測站位置參見圖 5 － 2）　☑ H　☐ L

深度	項目 \ 調查日期 / 測時間 / 測站	76年2月10日 09:00 4 A	09:17 5 A	09:31 8 A	09:48 25	10:02 30	平均值
0 m	水溫 (℃)	16.2	16.2	16.1	15.8	16.5	16.2
	酸鹼度 PH值	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3
	溶氧 (mg/l)	5.6	6.8	6.6	7.0	7.3	6.7
	Cl^- (PPM)	15485	16148	15927	15706	15706	15794
	$S^=$ (PPM)	0	0	0	0	0	0
	$SO_4^=$ (PPM)	2877	2654	3036	2477	2784	2766
1 m	水溫 (°C)	16.1	16.1	16.0	15.8	16.4	16.1
	酸鹼度 PH值	8.4	8.4	8.3	8.3	8.4	8.4
	溶氧 (mg/l)	5.7	6.2	6.8	6.8	7.1	6.5
	Cl^- (PPM)	16148	16148	16148	15485	15927	15971
	$S^=$ (PPM)	0	0	0	0	0	0
	$SO_4^=$ (PPM)	2943	2421	2719	2607	2579	2654
2 m	水溫 (°C)	16.0	16.1	16.0	15.8	16.3	16.0
	酸鹼度 PH值	8.4	8.4	8.4	8.3	8.4	8.4
	溶氧 (mg/l)	5.5	6.0	6.8	6.5	6.7	6.3
	Cl^- (PPM)	15706	15927	15706	15706	15927	15794
	$S^=$ (PPM)	0	0	0	0	0	0
	$SO_4^=$ (PPM)	2587	2933	2971	2309	2840	2728

表 6 -9 台中港區海域海水化性分析結果（測站位置參見圖 5 - 2 ）　☐ H　☑ L

深度	項目 \ 測站 \ 調查日期時間	76年2月10日 14:37	14:53	15:10	15:30	15:45	平均值	
		4 A	5 A	8 A	25	30		
0 m	水溫 (℃)	18.5	18.0	17.0	16.9	18.2	17.7	
	酸鹼度 PH值	8.2	8.2	8.3	8.3	8.3	8.3	
	溶氧 (mg/l)	6.2	7.6	7.8	8.3	8.2	7.6	
	Cl^- (PPM)	15927	14379	15485	15706	18803	16060	
	$S^=$ (PPM)	0	0	0	0	0	0	
	$SO_4^=$ (PPM)	2626	2505	2467	2831	1983	2482	
1 m	水溫 (°C)	16.8	17.3	16.4	16.6	17.3	16.9	
	酸鹼度 PH值	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	
	溶氧 (mg/l)	6.8	7.5	8.0	8.0	7.6	7.6	
	Cl^- (PPM)	15706	15927	15706	15485	16148	15794	
	$S^=$ (PPM)	0	0	0	0	0	0	
	$SO_4^=$ (PPM)	2859	2458	2672	2868	2570	2685	
2 m	水溫 (°C)	16.3	16.3	16.1	16.3	16.5	16.3	
	酸鹼度 PH值	8.4	8.4	8.3	8.3	8.3	8.3	
	溶氧 (mg/l)	6.5	7.5	7.8	8.1	7.8	7.5	
	Cl^- (PPM)	15927	15485	15706	15042	15263	15485	
	$S^=$ (PPM)	0	0	0	0	0	0	
	$SO_4^=$ (PPM)	2160	2691	2756	2495	2877	2596	

表 6 －10 台中港區海域海水化性分析結果（測站位置參見圖 5－2 ） ☑ H ☐ L

深度	項目 \ 調查日期 / 測時間 / 測站	76年5月26日 09:47 4 A	09:40 5 A	09:30 8 A	09:15 25 A	09:21 29 A	平均值	
0 m	水溫 (℃)	28.3	28.5	28.4	28.0	27.3	28.1	
	酸鹼度 PH值	9.0	9.0	9.0	8.9	8.8	8.9	
	溶氧 (mg/l)	9.8	9.6	9.0	7.8	7.3	8.7	
	Cl^- (PPM)	18249	18739	18984	19474	19474	18984	
	$S^=$ (PPM)	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.028	
	$SO_4^=$ (PPM)	2101	2528	2302	2858	2841	2526	
1 m	水溫 (°C)	28.1	28.3	27.9	27.7	27.2	27.8	
	酸鹼度 PH值	9.0	9.0	9.0	8.9	8.9	9.0	
	溶氧 (mg/l)	9.4	10.3	8.2	7.4	7.6	8.6	
	Cl^- (PPM)	19107	18984	19962	19596	19964	19523	
	$S^=$ (PPM)	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.022	
	$SO_4^=$ (PPM)	2347	2945	2459	2302	2190	2449	
2 m	水溫 (°C)	27.3	27.9	27.5	27.4	27.1	27.4	
	酸鹼度 PH值	9.0	9.0	8.8	8.9	8.9	8.9	
	溶氧 (mg/l)	7.5	9.6	7.3	6.8	7.4	7.7	
	Cl^- (PPM)	19474	19352	19229	19229	19351	19327	
	$S^=$ (PPM)	0.03	0.02	0.03	0.03	0.02	0.026	
	$SO_4^=$ (PPM)	2562	2580	2945	2538	2667	2658	

表 6 － 11　台中港區海域海水化性分析結果（測站位置參見圖 5 － 2）　☐ H　☑ L

深度	項目 \ 調查日期時間 \ 測站	75年5月26日 15:20 4 A	15:11 5 A	15:03 8 A	14:47 25 A	14:55 29 A	平均值
0 m	水溫 (℃)	30.3	30.4	28.5	29.5	29.0	29.5
	酸鹼度 PH值	8.9	8.8	8.9	8.8	8.9	8.9
	溶氧 (mg/l)	8.8	7.9	8.5	8.3	8.2	8.3
	Cl^- (PPM)	18249	17269	19229	19352	19842	18788
	$S^=$ (PPM)	0.03	0.03	0.02	0.03	0.02	0.026
	$SO_4^=$ (PPM)	2528	2284	2615	2667	2269	2473
1 m	水溫 (°C)	27.6	29.4	27.9	29.1	28.0	28.4
	酸鹼度 PH值	9.0	8.9	8.9	8.9	8.9	8.9
	溶氧 (mg/l)	7.2	8.8	8.4	9.1	7.8	8.3
	Cl^- (PPM)	18372	18494	19719	18862	19352	18960
	$S^=$ (PPM)	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.024
	$SO_4^=$ (PPM)	2736	2493	2269	2875	2597	2594
2 m	水溫 (°C)	26.9	27.7	27.4	28.3	27.2	27.5
	酸鹼度 PH值	8.8	8.9	8.9	8.9	8.9	8.9
	溶氧 (mg/l)	5.8	7.9	7.3	8.2	7.6	7.4
	Cl^- (PPM)	18984	19351	18617	19474	19596	19204
	$S^=$ (PPM)	0.03	0.02	0.02	0.03	0.02	0.024
	$SO_4^=$ (PPM)	2910	2701	2858	2560	2582	2722

表 6 － 12　高雄港區海域海水化性分析結果（測站位置參見圖 5 － 3 ）　☑ H　☐ L

深度	項目 \ 調查日期 / 測時間 / 測站	75年11月27日 16:05	16:50	16:25	15:55	15:44	15:20	14:58	
		2	16	30	41	50	64	70	平均值
0 m	水溫 (°C)	25.5	25.9	27.8	25.6	25.6	25.4	25.4	25.9
	酸鹼度 PH值	7.7	7.5	7.4	7.7	7.6	7.8	7.9	7.7
	溶氧 (mg/l)	2.1	0.3	0.1	0.8	1.5	3.7	6.1	2.1
	Cl^- (PPM)	15766	12380	15502	15714	15555	15925	16190	15290
	$S^=$ (PPM)	0.03	0.2	0.09	0.03	0	0.03	0.05	0.06
	$SO_4^=$ (PPM)	2629	2371	2594	2465	2875	2922	3098	2708
1 m	水溫 (°C)	25.5	26.1	27.8	25.6	25.6	25.4	25.4	25.9
	酸鹼度 PH值	7.8	7.6	7.5	7.7	7.7	7.9	8.0	7.7
	溶氧 (mg/l)	1.9	0.0	0.0	0.4	1.1	3.4	6.0	1.8
	Cl^- (PPM)	15766	15449	14867	15766	15555	15766	15819	15570
	$S^=$ (PPM)	0.03	0.06	0.20	0	0.02	0.04	0.03	0.05
	$SO_4^=$ (PPM)	3027	2969	2805	2945	2793	3203	2945	2955
2 m	水溫 (°C)	25.5	26.2	27.8	25.5	25.6	25.4	25.4	25.9
	酸鹼度 PH值	7.8	7.6	7.5	7.7	7.7	7.9	8.0	7.7
	溶氧 (mg/l)	1.9	0.0	0.0	0.6	1.1	3.5	6.0	1.9
	Cl^- (PPM)	15766	15714	14973	16031	15343	15872	16190	15698
	$S^=$ (PPM)	0.05	0.06	0.10	0.04	0.03	0.04	0.03	0.05
	$SO_4^=$ (PPM)	3109	2980	3074	2840	3074	2969	3215	3037

表 6－13　高　雄　港區海域海水化性分析結果（測站位置參見圖 5－3　）　□H　☑L

深度	項目	調查日期時間 / 測站	75年11月27日 10:00	10:30	10:42	11:08	11:30	11:50	12:12	
			2	16	30	41	50	64	70	平均值
0 m	水溫	(℃)	25.8	26.1	28.2	25.8	25.6	25.3	25.2	26.0
	酸鹼度	PH值	7.6	7.4	7.4	7.6	7.8	7.8	8.0	7.7
	溶氧	(mg/l)	1.4	1.7	0.3	0.4	2.4	3.3	5.7	2.2
	Cl^-	(PPM)	15481	11058	14761	15343	15925	16243	16348	15023
	$S^=$	(PPM)	0.04	0.40	3.02	0.05	0	0.05	0.03	0.51
	$SO_4^=$	(PPM)	3039	2207	3051	2957	2980	2781	3062	2868
1 m	水溫	(℃)	25.7	26.2	28.1	25.7	25.6	25.4	25.3	26.0
	酸鹼度	PH值	7.6	7.5	7.4	7.6	7.8	7.8	8.0	7.7
	溶氧	(mg/l)	1.0	1.2	0.5	0.4	2.3	3.3	5.0	2.0
	Cl^-	(PPM)	15608	15079	14814	15132	16031	16243	16084	15570
	$S^=$	(PPM)	0.03	0.07	0.12	0.05	0.02	0.03	0	0.05
	$SO_4^=$	(PPM)	2676	3121	3004	3121	2371	2652	3039	2855
2 m	水溫	(℃)	25.6	25.8	26.7	25.7	25.6	25.4	25.3	25.7
	酸鹼度	PH值	7.7	7.7	7.6	7.7	7.8	7.9	8.0	7.8
	溶氧	(mg/l)	0.9	0.7	0.1	0.4	2.3	3.4	5.0	1.8
	Cl^-	(PPM)	15237	15502	15396	15343	15925	16190	16084	15668
	$S^=$	(PPM)	0.02	0.05	0.131	0.06	0.03	0.05	0.02	0.05
	$SO_4^=$	(PPM)	3051	2676	3863	3039	3215	2734	2969	3078

表 6－14 高 雄 港區海域海水化性分析結果（測站位置參見圖 5－3 ） ☑H ☐L

深度	項目 \ 調查日期時間 \ 測站	76年3月3日 09:30	09:46	10:05	08:44	09:00	09:20	10:35	
		41	50	64	16	30	2	70	平均值
0 m	水溫 (℃)	21.6	21.2	21.1	21.7	24.5	21.3	21.2	21.8
	酸鹼度 PH值	8.0	7.9	8.1	7.9	7.6	8.0	8.1	7.9
	溶氧 (mg/l)	2.2	4.3	4.6	2.9	0.6	4.1	4.4	3.3
	Cl^- (PPM)	17030	16447	16447	17251	16020	17914	16809	16845
	$S^=$ (PPM)	0.04	0.05	0.11	0.09	0.69	0.02	0.03	0.14
	$SO_4^=$ (PPM)	2496	2593	3266	2732	2646	2785	2475	2713
1 m	水溫 (°C)	21.6	21.2	21.1	21.6	23.2	21.3	21.2	21.6
	酸鹼度 PH值	8.0	8.1	8.2	8.0	7.8	8.1	8.2	8.1
	溶氧 (mg/l)	1.9	4.6	4.7	2.5	0.3	4.1	4.5	3.2
	Cl^- (PPM)	16809	17472	17251	16809	16809	16587	17472	17030
	$S^=$ (PPM)	0.06	0.07	0.07	0.07	0.55	0.05	0.02	0.13
	$SO_4^=$ (PPM)	3052	2785	3052	2667	2924	2913	3138	2933
2 m	水溫 (°C)	21.3	21.2	21.1	21.7	21.7	21.3	21.2	21.4
	酸鹼度 PH值	8.2	8.1	8.2	8.0	7.9	8.1	8.2	8.1
	溶氧 (mg/l)	2.6	3.9	4.7	2.3	0.1	4.0	4.2	3.1
	Cl^- (PPM)	17472	17030	16875	17472	17472	16875	16875	17153
	$S^=$ (PPM)	0	0.03	0.1	0.06	0.04	0.03	0.04	0.04
	$SO_4^=$ (PPM)	3063	2774	3074	2475	2913	3159	2935	2913

表 6－15 高雄港區海域海水化性分析結果（測站位置參見圖 5－3） 1/1

深度	項目 \ 調查日期時間 \ 測站	76年3月2日 14:52 41	15:06 50	15:25 64	14:02 16	14:20 30	14:40 2	15:55 70	平均值
0 m	水溫 (℃)	21.3	21.5	21.5	22.1	27.3	21.4	21.2	22.3
	酸鹼度 PH值	8.0	7.9	8.0	8.1	7.7	8.0	8.2	8.0
	溶氧 (mg/l)	5.0	4.0	4.7	2.8	1.4	4.2	5.5	3.9
	Cl^- (PPM)	17472	16234	16366	16447	16366	16020	17472	16625
	$S^=$ (PPM)	0.06	0.02	0.06	0.04	7.0	0.07	0.08	1.05
	$SO_4^=$ (PPM)	3288	2806	2806	3159	2560	2806	2614	2863
1 m	水溫 (°C)	21.1	21.4	21.4	22.0	26.6	21.4	21.2	22.2
	酸鹼度 PH值	8.2	8.0	8.1	8.0	7.6	8.1	8.2	8.0
	溶氧 (mg/l)	5.3	3.8	4.6	1.3	1.2	4.2	5.6	3.7
	Cl^- (PPM)	17251	16587	17251	16875	16366	17088	17251	16953
	$S^=$ (PPM)	0.05	0.02	0.06	0.02	11.9	0	0.02	1.72
	$SO_4^=$ (PPM)	3181	2785	3256	2582	2518	3074	2956	2907
2 m	水溫 (°C)	21.1	21.4	21.4	21.7	25.3	21.5	21.2	21.9
	酸鹼度 PH值	8.2	8.1	8.1	8.0	7.7	8.1	8.2	8.1
	溶氧 (mg/l)	5.6	3.7	4.6	1.4	1.0	4.1	5.6	3.7
	Cl^- (PPM)	17251	17088	16234	17030	16447	17251	16809	16872
	$S^=$ (PPM)	0.07	0	0.04	0.03	5.55	0.03	0.09	0.83
	$SO_4^=$ (PPM)	2389	2839	2774	2944	2518	3149	2165	2683

表 6 － 16　花 蓮 港 區 海 域 海 水 化 性 分 析 結 果（ 測 站 位 置 參 見 圖 5 － 4 ）　☑ H　☐ L

深度	項目 \ 調查日期 / 時間 / 測站	75年12月10日 15:15	15:07	14:56	14:48	14:24	14:13	
		3	5	12	15	18	23	平均值
0 m	水溫 (℃)	22.1	22.7	23.0	22.9	23.4	21.6	22.6
	酸鹼度 PH值	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1
	溶氧 (mg/l)	6.6	6.4	6.4	6.4	6.6	6.8	6.5
	Cl^- (PPM)	15075	14857	14376	14676	15846	13272	14683
	$S^=$ (PPM)	0	0	0	0	0	0	0
	$SO_4^=$ (PPM)	2653	2632	2664	2578	2816	2333	2613
1 m	水溫 (°C)	23.2	23.0	23.3	23.1	23.7	22.0	23.1
	酸鹼度 PH值	8.2	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1
	溶氧 (mg/l)	6.5	6.3	6.2	6.5	6.6	6.7	6.5
	Cl^- (PPM)	15261	14942	15338	15474	16165	13627	15135
	$S^=$ (PPM)	0	0	0	0	0	0	0
	$SO_4^=$ (PPM)	2681	2474	2771	2749	2910	2454	2673
2 m	水溫 (°C)	23.4	23.1	23.2	23.2	23.8	22.9	23.3
	酸鹼度 PH值	8.2	8.2	8.2	8.2	8.2	8.2	8.2
	溶氧 (mg/l)	6.4	6.4	6.2	6.2	6.5	6.8	6.4
	Cl^- (PPM)	15551	16193	15925	16218	16032	13400	15553
	$S^=$ (PPM)	0	0	0	0	0	0	0
	$SO_4^=$ (PPM)	2867	3049	2712	2712	2814	2412	2761

表 6－17 花蓮港區海域海水化性分析結果（測站位置參見圖 5－4） □H ☑L

深度	項目 \ 調查日期 / 時間 / 測站	75年12月10日 10:21	10:10	09:57	09:45	09:30	09:05	
		3	5	12	15	18	23	平均值
0 m	水溫 (℃)	21.4	22.2	21.5	21.3	21.3	21.6	21.6
	酸鹼度 PH值	8.1	8.0	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1
	溶氧 (mg/l)	6.8	6.7	6.7	6.8	7.3	7.3	6.9
	Cl^- (PPM)	13521	13857	13347	13253	13040	13298	13386
	$S^=$ (PPM)	0	0	0	0	0	0.02	0.0033
	$SO_4^=$ (PPM)	2474	2472	2599	2360	2412	2664	2497
1 m	水溫 (°C)	21.4	22.4	22.3	21.3	21.3	21.6	21.7
	酸鹼度 PH值	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.2	8.1
	溶氧 (mg/l)	7.0	6.7	6.7	6.8	7.5	8.2	7.2
	Cl^- (PPM)	14477	15208	14643	13512	13405	13681	14154
	$S^=$ (PPM)	0	0	0	0	0	0	0
	$SO_4^=$ (PPM)	2112	2536	2526	2795	2309	2350	2438
2 m	水溫 (°C)	22.5	22.6	22.4	21.8	21.6	21.9	22.1
	酸鹼度 PH值	8.2	8.2	8.2	8.2	8.1	8.2	8.2
	溶氧 (mg/l)	6.4	6.6	6.6	6.9	7.0	7.2	6.8
	Cl^- (PPM)	14370	15335	15067	13673	13146	13826	14236
	$S^=$ (PPM)	0	0	0	0	0	0	0
	$SO_4^=$ (PPM)	2942	2792	2634	2319	2407	2472	2594

表6－18 花蓮港區海域海水化性分析結果（測站位置參見圖5－4） ☑H ☐L

深度	項目 \ 調查日期 / 測時間 / 測站	76年3月10日 13:52	14:07	14:17	14:25	14:33	14:40	
		23	18	15	12	5	3	平均值
0 m	水溫 (℃)	23.3	23.2	23.2	23.2	23.0	23.1	23.2
	酸鹼度 PH值	8.2	8.2	8.3	8.3	8.3	8.2	8.3
	溶氧 (mg/l)	5.2	4.7	4.3	4.6	4.6	4.3	4.6
	Cl^- (PPM)	17603	17143	17142	16936	16299	16697	16970
	$S^=$ (PPM)	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.025
	$SO_4^=$ (PPM)	2540	2564	2391	2511	2424	2462	2482
1 m	水溫 (°C)	23.2	23.2	23.1	23.0	22.9	22.9	23.1
	酸鹼度 PH值	8.3	8.3	8.4	8.3	8.3	8.3	8.3
	溶氧 (mg/l)	5.3	4.7	4.2	4.5	4.8	4.6	4.7
	Cl^- (PPM)	17169	17349	17555	17453	17747	16801	17346
	$S^=$ (PPM)	0.03	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.023
	$SO_4^=$ (PPM)	2691	2716	2424	2411	2615	3123	2663
2 m	水溫 (°C)	23.1	23.1	22.9	23.0	22.9	22.9	23.0
	酸鹼度 PH值	8.3	8.3	8.4	8.3	8.4	8.3	8.3
	溶氧 (mg/l)	5.5	4.7	4.4	4.5	4.7	4.7	4.8
	Cl^- (PPM)	17555	17350	17143	16951	17603	17452	17342
	$S^=$ (PPM)	0.03	0.02	0.03	0.03	0.02	0.03	0.026
	$SO_4^=$ (PPM)	2615	2704	2424	2678	2466	2665	2592

表6－19 花蓮港區海域海水化性分析結果（測站位置參見圖5－4） □H ☑L

深度	項目 \ 調查日期時間 測站	76年3月10日 09:57	10:05	10:15	10:22	10:30	10:37	
		23	18	15	12	5	3	平均值
0 m	水溫 (℃)	22.9	22.9	22.8	22.9	22.9	22.9	22.9
	酸鹼度 PH值	8.3	8.3	8.3	8.2	8.2	8.3	8.3
	溶氧 (mg/l)	5.8	5.9	5.7	5.7	5.4	5.3	5.6
	Cl^- (PPM)	17142	17169	17762	16951	17349	17169	17257
	$S^=$ (PPM)	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.03	0.026
	$SO_4^=$ (PPM)	2653	2496	2793	2972	2602	2762	2713
1 m	水溫 (°C)	22.9	22.9	22.9	22.8	22.8	22.8	22.9
	酸鹼度 PH值	8.4	8.3	8.5	8.3	8.3	8.3	8.4
	溶氧 (mg/l)	6.1	6.0	5.7	5.5	5.2	5.3	5.6
	Cl^- (PPM)	17349	17169	17142	17169	17169	16951	17158
	$S^=$ (PPM)	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02
	$SO_4^=$ (PPM)	2526	2674	3032	2487	2920	2818	2743
2 m	水溫 (°C)	22.9	22.9	22.9	22.8	22.8	22.8	22.9
	酸鹼度 PH值	8.5	8.4	8.4	8.3	8.3	8.3	8.4
	溶氧 (mg/l)	6.2	6.1	5.7	5.4	5.3	5.2	5.7
	Cl^- (PPM)	17349	16109	17762	17386	17386	17143	17186
	$S^=$ (PPM)	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
	$SO_4^=$ (PPM)	2691	2971	2525	3226	2627	2525	2761

表 6 － 20　蘇澳港區海域海水化性分析結果（測站位置參見圖 5－5 ）　☑ H　☐ L

深度	項目 \ 調查日期時間 / 測站	75年12月11日 14:00 3	14:11 7	14:25 8	14:35 11	14:46 13	平均值
0 m	水溫 (℃)	21.8	22.0	21.7	22.0	21.6	21.8
	酸鹼度 PH值	7.8	7.7	7.7	7.8	7.8	7.8
	溶氧 (mg/l)	6.6	6.2	5.8	5.7	5.4	5.9
	Cl^- (PPM)	15846	13458	16300	15984	16218	15561
	$S^=$ (PPM)	0	0.02	0	0	0	0.004
	$SO_4^=$ (PPM)	2940	2429	2514	2739	2835	2691
1 m	水溫 (°C)	22.6	22.3	21.8	22.0	21.7	22.1
	酸鹼度 PH值	8.0	8.0	7.9	7.9	7.8	7.9
	溶氧 (mg/l)	6.3	6.2	6.0	5.7	5.6	6.0
	Cl^- (PPM)	16264	15580	15633	16246	15793	15903
	$S^=$ (PPM)	0	0	0	0.02	0	0.004
	$SO_4^=$ (PPM)	2785	2661	3006	2792	2247	2698
2 m	水溫 (°C)	22.8	22.8	21.8	22.0	21.7	22.2
	酸鹼度 PH值	8.0	8.0	7.9	8.0	7.9	8.0
	溶氧 (mg/l)	6.1	6.1	5.9	5.6	5.4	5.8
	Cl^- (PPM)	16165	16006	16059	16006	16139	16075
	$S^=$ (PPM)	0.02	0	0	0	0	0.004
	$SO_4^=$ (PPM)	3177	2514	2311	2867	3369	2848

表 6 － 21　蘇 澳 港區海域海水化性分析結果（測站位置參見圖 5 － 5 ）　☐ H　☑ L

深度	項目 \ 調查日期時間 / 測站	75 年 12 月 11 日 09:37	09:58	10:03	10:11	10:21		
		3	7	8	1 1	1 3	平均值	
o m	水　溫 (℃)	22.4	21.6	21.2	21.7	21.6	21.7	
	酸 鹼 度 PH值	7.9	7.4	7.6	7.9	7.8	7.7	
	溶　氧 (mg/l)	5.7	6.3	5.7	5.7	4.8	5.6	
	Cl^- (PPM)	16112	15846	16032	15953	15953	15979	
	$S^=$ (PPM)	0	0	0	0	0	0	
	$SO_4^=$ (PPM)	2877	2557	2775	2696	2771	2735	
1 m	水　溫 (°C)	22.5	22.3	21.1	21.8	21.7	21.9	
	酸 鹼 度 PH 值	8.0	7.9	7.9	7.9	7.8	7.9	
	溶　氧 (mg/l)	5.8	6.1	5.6	5.5	4.6	5.5	
	Cl^- (PPM)	16112	15899	15580	16165	15633	15878	
	$S^=$ (PPM)	0	0	0	0	0.02	0.004	
	$SO_4^=$ (PPM)	2754	2760	2712	2525	3006	2751	
2 m	水　溫 (°C)	22.6	22.4	20.9	22.1	22.0	22.0	
	酸 鹼 度 PH值	8.0	8.0	7.9	8.0	8.0	8.0	
	溶　氧 (mg/l)	5.7	5.8	5.7	5.8	5.0	5.6	
	Cl^- (PPM)	16406	15368	15978	15953	15793	15900	
	$S^=$ (PPM)	0	0	0	0	0	0	
	$SO_4^=$ (PPM)	3049	2343	2963	2610	2824	2758	

表6－22 蘇澳港區海域海水化性分析結果（測站位置參見圖5－5） ☑H ☐L

深度	項目 \ 調查日期時間 \ 測站	76年3月11日 13:52	14:00	14:10	14:20	14:31		
		3	7	8	11	13	平均值	
0 m	水溫 (℃)	21.5	21.4	21.4	21.4	21.1	21.4	
	酸鹼度 PH值	7.7	7.8	7.8	7.8	7.7	7.8	
	溶氧 (mg/l)	6.2	5.5	4.8	4.2	4.2	5.0	
	Cl^- (PPM)	16299	15756	16734	17060	16517	16473	
	$S^=$ (PPM)	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	
	$SO_4^=$ (PPM)	2362	2691	2729	2525	2500	2561	
1 m	水溫 (°C)	21.7	21.5	21.4	21.6	21.2	21.5	
	酸鹼度 PH值	8.0	8.5	8.0	8.0	7.9	8.1	
	溶氧 (mg/l)	6.2	5.7	4.8	4.3	4.2	5.0	
	Cl^- (PPM)	17762	17557	17349	16951	18038	17531	
	$S^=$ (PPM)	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.03	
	$SO_4^=$ (PPM)	2691	2322	2600	2640	2868	2624	
2 m	水溫 (°C)	21.6	21.5	21.5	21.6	21.6	21.6	
	酸鹼度 PH值	8.1	8.1	8.0	8.1	8.0	8.1	
	溶氧 (mg/l)	6.0	5.4	5.0	4.4	4.1	5.0	
	Cl^- (PPM)	17142	17821	17142	17169	17169	17289	
	$S^=$ (PPM)	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	
	$SO_4^=$ (PPM)	2754	3166	2818	2794	2564	2819	

表 6 － 23　蘇 澳 港區海域海水化性分析結果（測站位置參見圖 5 － 5 ）　☐ H　☑ L

深度	項目 \ 調查日期 / 時間 / 測站	76 年 3 月 11 日 09:27	09:35	09:45	10:00	10:06	
		3	7	8	11	13	平均值
0 m	水溫 (℃)	21.0	21.3	21.5	21.5	21.2	21.3
	酸鹼度 PH 值	7.8	7.5	7.8	7.7	7.7	7.7
	溶氧 (mg/l)	5.1	5.9	5.0	4.4	4.4	5.0
	Cl^- (PPM)	16381	17349	16936	17349	16626	16928
	$S^=$ (PPM)	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02
	$SO_4^=$ (PPM)	3166	2856	2570	2665	2475	2746
1 m	水溫 (°C)	21.8	21.5	21.6	21.6	21.1	21.5
	酸鹼度 PH值	8.0	8.1	8.0	8.0	7.9	8
	溶氧 (mg/l)	5.8	6.0	5.0	4.5	4.6	5.2
	Cl^- (PPM)	16517	17432	17432	17012	16082	16895
	S^{2-} (PPM)	0.02	0.03	0.03	0.02	0.03	0.02
	SO_4^{2-} (PPM)	2729	2589	2360	2576	2462	2543
2 m	水溫 (°C)	21.7	21.5	21.6	21.6	21.6	21.6
	酸鹼度 PH值	8.1	8.2	8.1	8.1	8.0	8.1
	溶氧 (mg/l)	5.8	6.0	5.2	4.6	4.5	5.2
	Cl^- (PPM)	16730	16951	16951	16082	16517	16646
	$S^=$ (PPM)	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
	$SO_4^=$ (PPM)	2627	2576	2793	2742	2332	2614

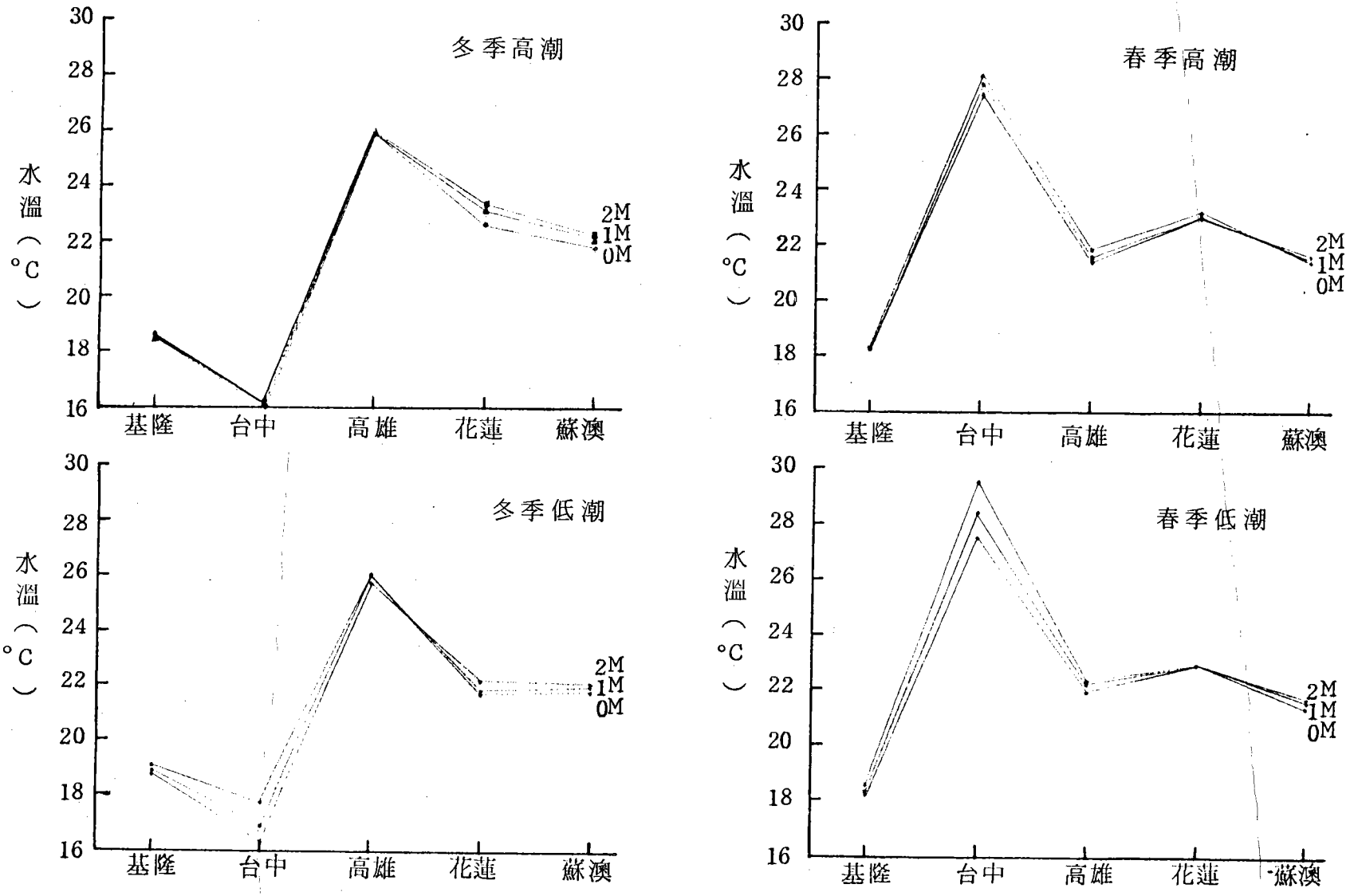


圖 6 — 2 各港區海域平均水溫

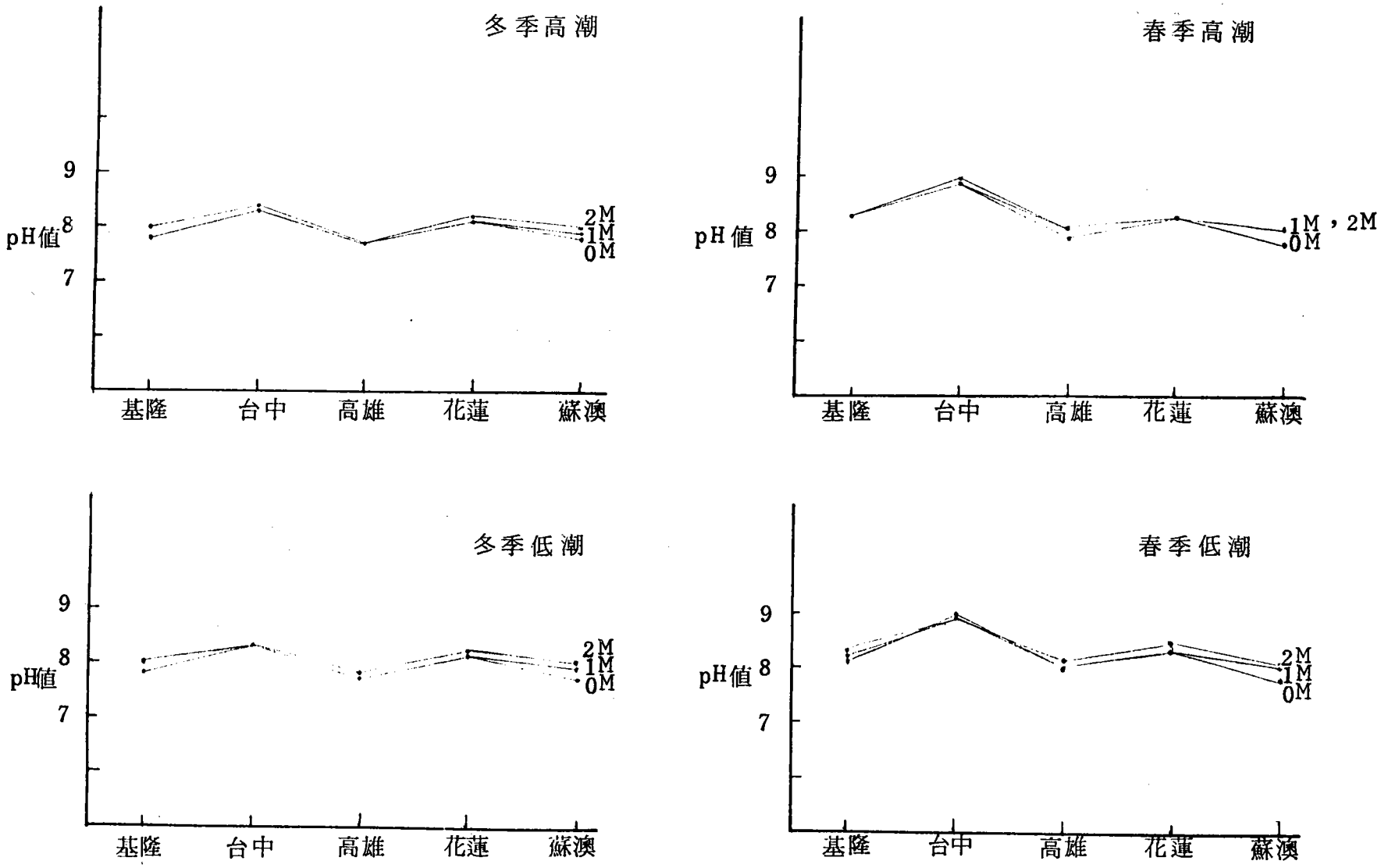


圖 6 － 3　各港區海域平均 pH 值

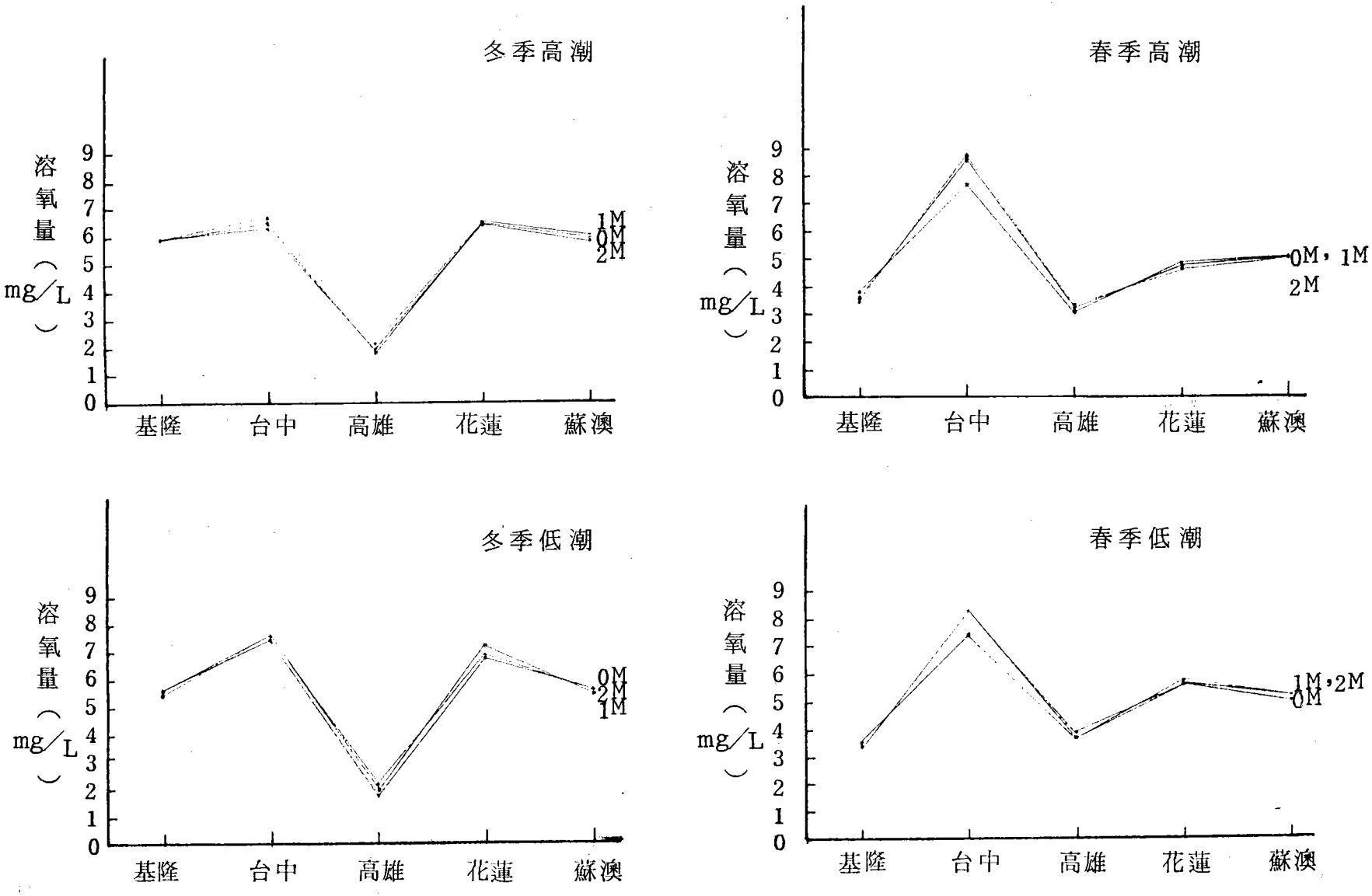


圖 6 － 4　各沛區海域平均溶氧量

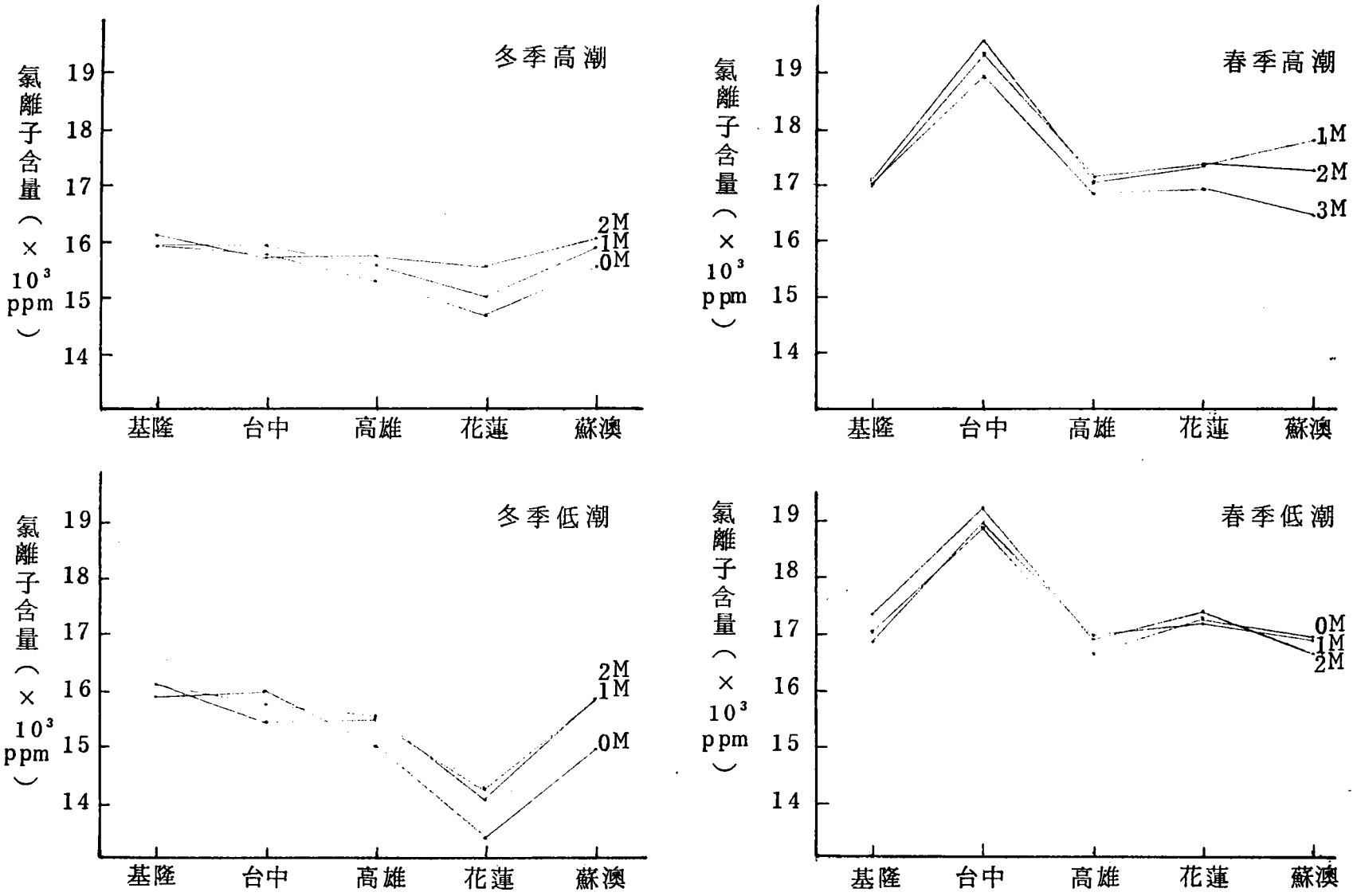


圖 6 － 5　各港區海域平均氯化物含量

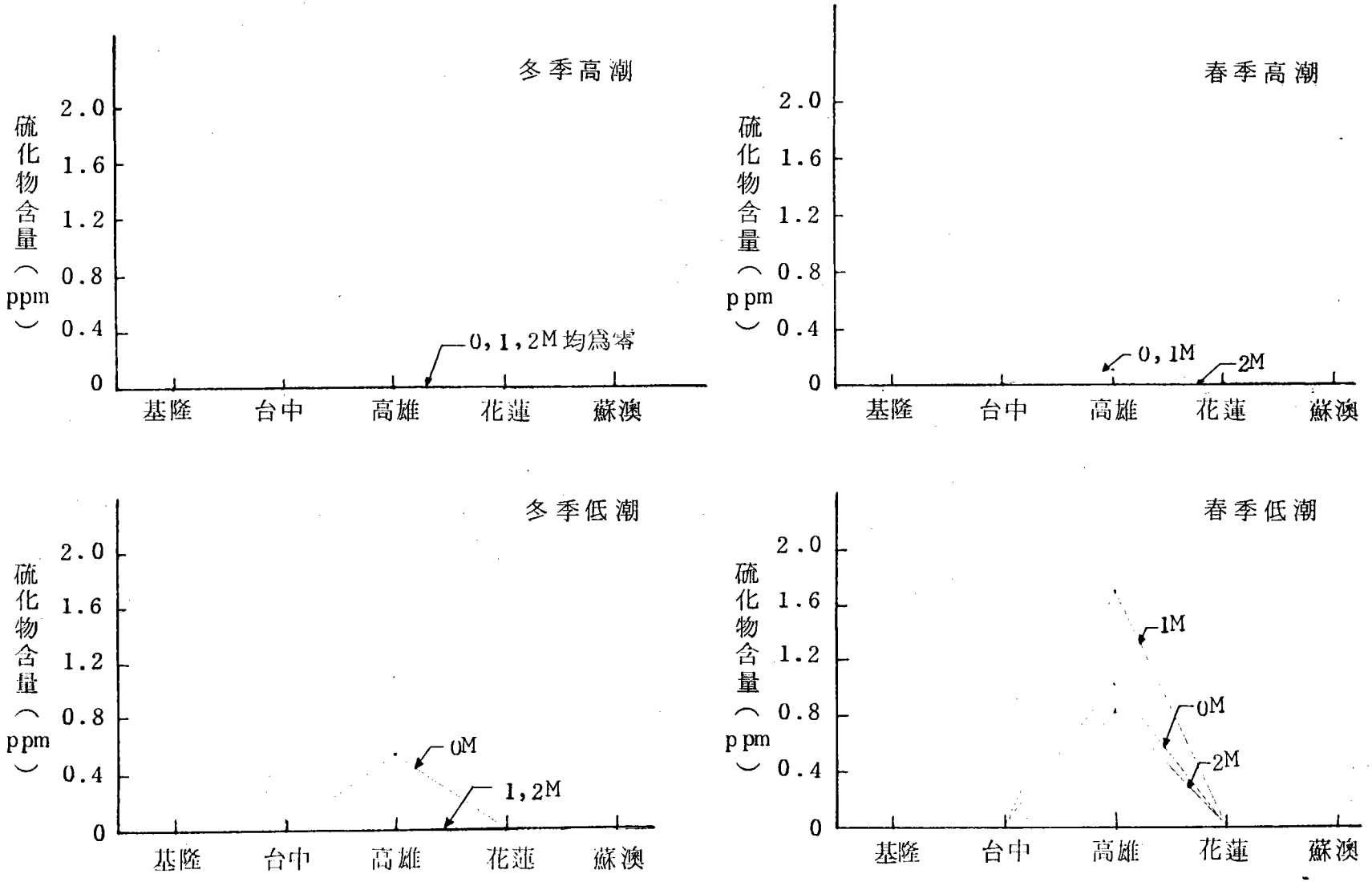


圖 6 — 6　各港區海域平均硫化物含量（S^{2-}）

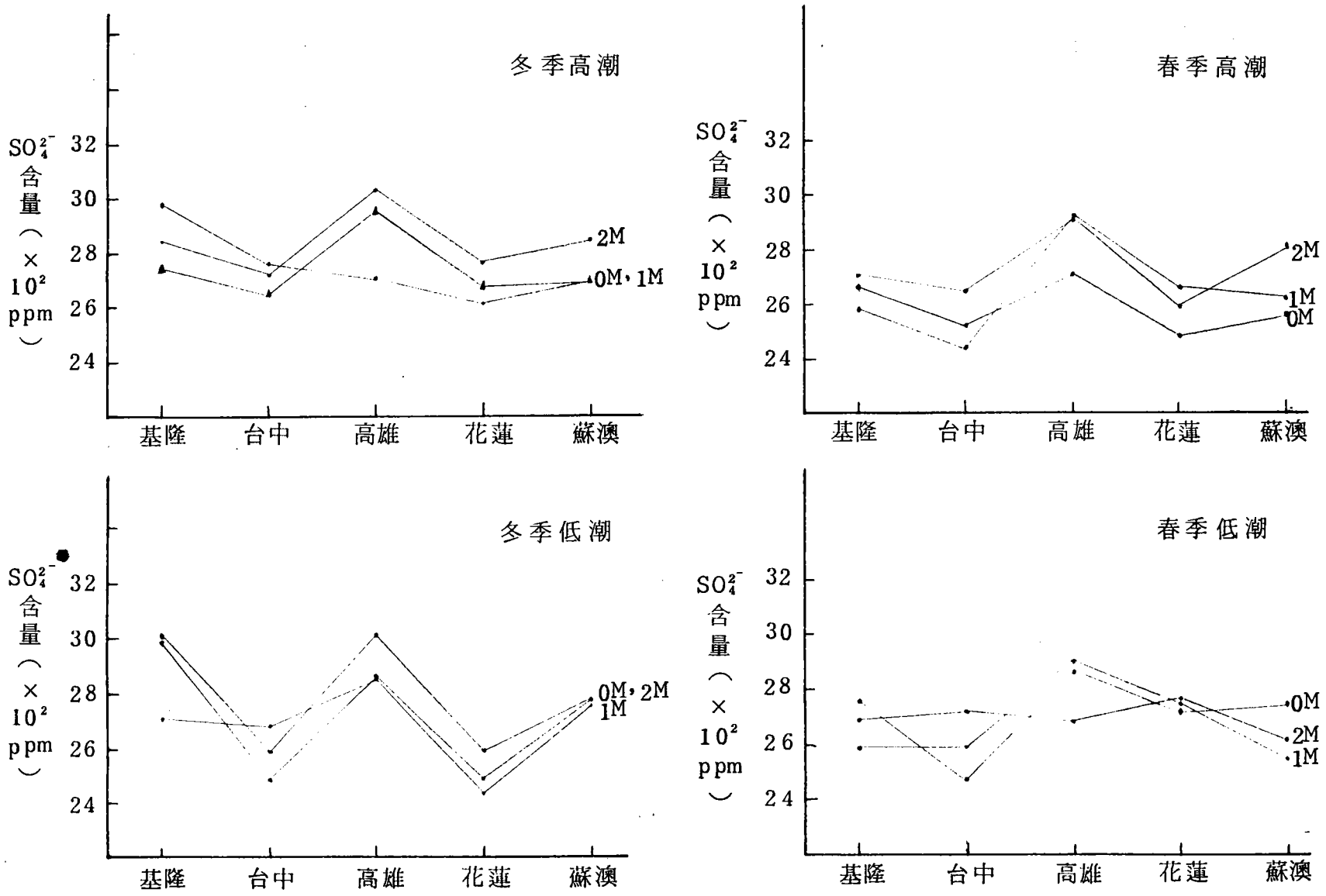


圖 6 — 7 各港區海域平均硫酸根離子含量

柒、工作進度

林維明・饒正

一本研究計劃共計五年，自75年7月至80年6月止，其工作進度如表7－1所示。現就各項工作項目概述如下：

㈠文獻蒐集：儘量出國參加國際會議及至各先進國家考察並蒐集許多國內無法蒐集到之資料，以作爲研究之參考提昇國內研究層次及成果。

㈡現場觀測：了解結構物使用之材料，並以NDT（非破壞性）法量測結構物目前之狀況腐蝕情形……等。

㈢腐蝕環境調查：在台灣五大港口作長期之海氣象、水文資料調查並作海水分析，以了解其現場之腐蝕環境及變化情形。

㈣暴露試驗：以不同之材質（包括不同之水泥、W/C、保護層厚度、鋼筋、摻料…等）作成暴露試驗試體，放至現場作長期之暴露試驗，並與試驗室之試體作比對。

㈤腐蝕速率量測（DC 法）：在試驗室內，就不同材質之試體，以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。

㈥鑽心試驗：在現場之結構物鑽取試體，回試驗室內作抗壓強度試驗，含塩量，中性化測試透水性…等基本性質測定並作SEM（掃瞄式電子顯微鏡），XRD（X光繞射）等定性定量分析。

㈦乾濕試驗：以不同材質之混凝土試體放入乾濕試驗機內量測其對乾濕環境之耐久性。

㈧腐蝕速率量測（AC 法）：在試驗室內，就不同材質之試體，以電化學方法（AC電阻法），量測其鋼筋之腐蝕速率，並與 DC 法之方法與結果作一比較。

㈨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，以了解其材質與中性化之關係。

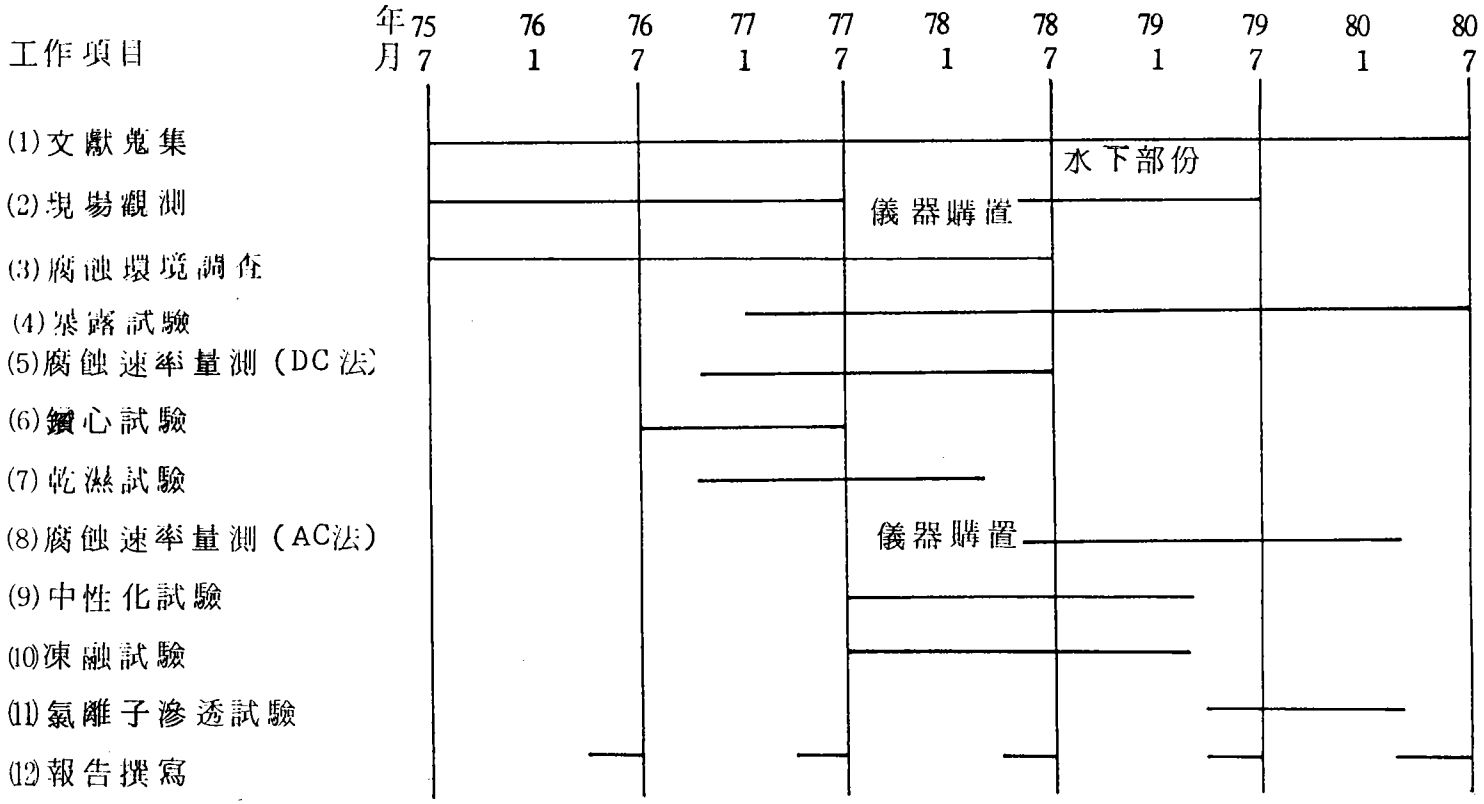
(十)凍融試驗：以不同材質之混凝土試體放入凍融試驗機內，量測其對凍融之耐久性因子，以判斷不同材質混凝土之內部結構之孔隙與耐久性關係。

(十一)氯離子滲透試驗：就不同材質之混凝土試體，作其透水性試驗及氯離子之滲透速率量測，以了解其材質在海洋環境下之耐久性。

(十二)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結報告。

二、本研究計劃本年度均按進度執行，唯暴露試驗在試體模之設計上考慮之因素甚多包括現場之狀況、試驗之內容…等，花費時間許多，並在製作試體模時亦發生許多問題，以致進度落後，現在均已克服而將灌製試體進行試驗。

表 7 － 1　港灣RC結構物耐久性研究預定進度表



捌、致謝

林 維 明

本研究在本年度採海水樣期間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、基隆港務局林課長坤田、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，使本研究計劃更爲順利，同時感謝國立清華大學材料科學工程研究所所長施漢章教授之親臨指導，私立中國工專專校建築科蔡得時教授協助翻譯日文，使得本研究內容更爲充實，亦爲結合學術界與工程界共同研究使技術界昇級之一大研究計劃在此衷心感謝各位參與研究人員之付出與努力之辛勞與投入。

玖、本年度蒐集之參考文獻

林 維 明

1. ACI, Performance of Cancrete in Marine Environment, Publication SP-65, American Concrete Institute, Detroit 1980.

2. ACI, "Durability of Concrete", Publication SP-47, American Concrete Institute , Detroit,1975.

3. ACI, "Corrosion of Metals in Concrete", Publication SP-49, American Concrete Institute, 1975.

4. ASTM, "Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete", STP-713, American Society for Testing and Materials. 1978.

5. ASTM, "Corrosion of Metals in Association with Concrete", STP-818, American Society for Testing and Materials. 1983.

6. ASTM, "Chloride Corrosion of Steel in Concrete", STP-629, American Society for Testing and Materials. 1977.

7. Alan P. Cran, "Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction", Society of Chemical Industry, London, 1983.

8. Clarke J.L. and R.M. Symmons, "Effects of Temperature Gradients on Walls of oil storage structures, Concrete in The Oceans, Technical Report NO.3, 1979.

9. Regan P.E. and Y.D. Hamadi, "Behaviour of Concrete Caisson and Tower Members", Concrete in the Oceans, Technical Report, NO.4, 1981.

10. Taylor Woodrow , "Marine Durability Survey of the Tongue Sands Tower, Concrete in The Oceans , Technical Report NO. 5, 1980.

11. Wilkins N.J.M. and P.F. Lawrence, "Fundamental mechanisms of corrosion of Steel reinforcements in concrete immersed in sea-water", Concrete in The Oceans. Technical Report NO. 6, 1980.

12. Paterson, W.S. M.J. Dill and R. Newby, "Fatigue Strength of Reinforced Concrete in Seawater", Concrete in The Oceans, Technical Report NO. 7, 1982.

13. Stillwell, J.A. "Exposure Teste on Concrete for Offshore Structures", Concrete in the Oceans, Technical Report NO. 8, 1983.

14. ASTM , "Significance of Test and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials" STP-169B, American Society for Testing and Materials 1978.

15. Sereda, Litvan, "Durability of Building Materials and Components", STP-691, American Society for Testing and Materials 1978.

16. Kumar Mehta, P. "Concrete-Structure, Properties, and Materials, Prentice-Hall, Inc., 1986.

17. Scully, J.C. "The Fundamentals of Corrosion", Pergamon press Ltd.1975.

18. Buenfeld N.R. and J.B. Newman, "The Resistivity of Mortars Immersed in Sea-Water", cement and Concrete Research Vol. 16 pp511-524, 1986.

19. Buenfeld N.R. and J.B. Newman, "The Development and Stability of Surface Layers on Concrete Exposed to Sea-Water" cement and concrete Research Vol. 16 pp 721-732.1986.

20. Buenfeld N.R. and J.B. Newman, "The Permeability of Concrete in a Marine Environment", Magazine of concrete Research Vol. 136 NO. 127 pp67-80,1984.

21. Gonzalez, J.A. S. Algaba and C. Andrade, "Corrosion of Reinforcing Bars in Carbonated Concrete", Br. Corros. J., 1980, Vol. 15, NO. 3.

22. Schupack, M. "Design of Permanent Seawater Structures to Prevent Deterioration", Concrete International, March,1982.

23. Gjørv O.E. and Ø. Vennesland, "Diffusion of Chloride Ions from Seawater into Concrete", Cement and Concrete Research, Vol. 9, 1979.

24. Zdenek P. Bazant. "Physical Model for Steel Corrosion in Concrete Sea Structures-Theory", Journal of The Structural Division , June 1979.

25. Gummerson, R.J., C. Hall & W.D. Hoff, "Unsaturated Water Flow within Porous Material Observed by NMR imaging", Nature, Vol. 281, September,1979.

26. Fadh H. DAKHIL, Philip D. Cady, and Roger E. Carrier, "Cracking of Fresh Concrete as Related to Reinforcement", American Concrete Insititute Journal, August 1975.

27. Hughes, B.P. A.K.O. Soleit and R.W. Brierley, "New technique for determining the electrical resistivity of concrete", Magazine of concrete Research Vol. 37 NO. 133 Dec. 1985.

28. Berman, H.A. "Sodium Choride, Corrosion of Reinforcing Steel, and the PH of Calcium Hydroxide Solution", American Concrete Insititute. April 1975.

29. Lundquist, J.T. JR.A.M. Rosenberg, and J.M. Gaidis, "Calcium Nitrite as an Inhibitor of Rebar Corrosion in chloride Containing Concrete", corrosion/77, March 1977.

30. Rosenberg A.M. and J.M. Gaidis, "The Mechanism of Nitrite Inhibition of Chloride Attack on Reinforcing Steal in Alkaline Aqueous Environments", National Association of Corrosion Engineers, November 1979.

31. William D. Grimes, William H. Hartt, and Dean H. Turner, "Cracking of Concrete in Sea Water Due to Embedded Metal Corrosion" , National Association of Corrosion Engineers, Vol. 35, NO. 7, July 1979.

32. Gjorv O.E. and O. Vennesland, "Sea Salts and Alkalinity of Concrete", American concrete Insititute Journal, September 1976.

33. ODD E. Gjorv, "Long-Time Durability of Concrete in Seawater", American Concrete Insititute Journal, January 1971.

34. Akihiro Tamada and Akio Kida, "Corrosion Protection of Offshore Structures, Nippon Kokan Technical Report, Overseas NO. 45, 1985.

35. Bernard Heuze, "Cathodic Protection on Concrete Offshore Platforms" , Materials Protection, Vol. 19, NO. 5, May 1980.

36. David Whiting, "Rapid Measurement of the Chloride Permeability of Concrete", Public Road, Vol. 45, No. 3, August 1981.

37. Per Fidjestol, Bertil Ronning, and Bjorn T. Roland, "Revised Criteria for Prevention of Corrosion in Offshore Concrete Structures", Materials Performance, National Association of Corrosion Engineers, 1985.

38. Per Fidjestol, Bertil Ronning, and Bjorn T. Roland, "Revised Criteria for Prevention of Corrosion in Offshore Concrete Structures", Materials, Performance, National Association of Corrosion Engineers, 1985.

39. Odd E. Gjouv and Norimoto Kashino, "Durability of a 60-year-old reinforced concrete pier in Oslo Harbor", Materials Performance, National Association of Corrosion Engineers, 1986.

40. Grimaldi, G. P. brevet, G. Pannier, A. Raharinaivo, "Factors Influencing Electrode Potential of Steel in Concrete", Br. Corros. J., Vol.21, No.1, 1986.

41. Gouda, V. K. "Corrosion and Corrosion inhibition of Reinforcing Steel-I. Immersed in Alkaline Solutions", Br. Corros. J., Vol.5, September 1970.

42. Gouda V. K. and W. Y. Halaka, "Corrosion and Corrosion Inhabition of Reinforcing Steel-II. Embedded in Concrete", Br. Corros. J., Vol.5, September 1970.

43. Gonzalez, J. A. S. Algaba and C. Andrade, "Corrosion of Reinforcing Bars in Carbonated Concrete, Br. Corros. J., Vol.15, No.3, 1980.

44. NISHIBAYASHI, S. A. HAYASHI and T. ONNISHI "Damage due to Alkali Silica Reaction in Concrete Structure and Reactivity of Aggregate Used", PP.242-243 CAJ REVIEW 1986.

45. ACI, "Innovative Cement Grouting", Publication SP-85, American Concrete Institute, 1984.

46. ASTM, "Laboratory Corrosion Tests and Standards", STP-866, American Society for Testing and Materials. 1984.

47. Tarun R. Naik, "Temperature Effects on Concrete", STP-858, American Society for Testing and Materials. 1985.

48. ACI Committee 515, "A Guide to the Use of Waterproofing, Dampproofing, Protective, and Decorative Barrier Systems for Concrete", American Concrete Institute.

49. ACI, "Concrete Repair and Restoration", American Concrete Institute, V.2, No.9, September 1980.

50. NACE, "Seminar reprints Solving Rebar Corrosion Problems in Concrete", National Association of Corrosion Engineers, September 1982.

51. Dillon, C. P. "Recognition and Prevention", National Association of Corrosion Engineers, 1982.

52. Charles G. Munger, "Corrosion Prevention by Protective Coatings", National Association of Corrosion Engineers, 1984.

53. NACE, "Corrosion Basics an Introduction", National Association of Corrosion Engineers, 1984.

54. NACE, "Corrosion Fatigue: Chemistry, Mechanics and Microstructure", National Association of Corrosion Engineers, 1972.

55. NACE, "Localized Corrosion", National Association of Corrosion Engineers, 1971.

56. ICE, "Corrosion in Civil Engineering", The Institution of Civil Engineers, 1978, 1979.

57. Herbert H. Vhlig and R. Winston Revie, "Corrosion and Corrosion Control: An Introduction to Corrosion Science and Engineering" John Wiley & Sons. Iuc. 1985.

58. Treseder, R. S. "Corrosion Engineers Reference Book", National Association of Corrosion Engineers, October 1983.

59. ASTM, "Corrosion in Natural Environments", STP-558, American Society for Testing and Materials. 1974.

60. Beeby, A. W. "Cracking and Corrosion". Concrete in The Oceans, Technical Report No.1, 1978.

61. NACE, "Handbook of Corrosion Experiments", National Association of Corrosion Engineers.

62. Scalante, E. F. W.P. Iverson, W. F. Gerhold, B. T. Sanderson, and R, L. Alumbaugh, "Corrosion and Protection of Steel Piles in a Natural Seawater Environment", Institute for Materials Research National Bureau of Standards Washington. D. C. 1973.

63. "The Study and Prevention of Corrosion" SP-538, Society of Automotive Engineers, 1983.

64. NACE, "Corrosion-Source Book, a Collection of outstanding articles from the technical literature", National Association of Corrosion Engineers, 1984.

65. Ashworth, V. C.J.L. Booker, "Cathodic Protection Theory and Practice", Institute of Corrosion Science and Technology. 1986.

66. Idorn, G.M. "Durability of Concrete Structures in Denmark", AALBORG UNIVERSITETSCENTER, 1967.

67. Odd E. Gjorv, "Durability of Reinforced Concrete Wharves in Norwegian Harbours", AALBORG UNIVERSITETSCENTER, 1968.

68. NATHAN, C.C. "Corrosion Inhibitors", National Association of Corrosion Engineers, 1973.

69. NACE, "Compilation of Papers on Rebar Corrosion", National Association of Corrosion Engineers, 1983.

70. NACE, "Compilation of Papers on Rebar Corrosion", National Association of Corrosion Engineers, 1976-1982.

71. "Industrial Corrosion", A Journal of the Institution of Corrosion Science and Technology, September 1986.

72. Journal of Construction Repair", Published quarterly by palladian pub. Ltd. London Vol.1, No. 1 1987.

73. Journal of Industrical Corrosin, A Journal of the Institution of Corrosion Science and Technology Birmingham Sept. 1986.

74. NACE, "Paper on Corrosion of Metals in Concrete", National Association of Corrosion Engineers, March 1987.

75. "Proc of 26th International Navigation Congress", Brussels June 1985.

76. GCC, "Seminar on Corrosion in Concrete-Monitoring, Surveying, and Control by Cathodic Protection", Global Corrosion Consultants, May. 1986.

77. Garas F.K., "Strength of Concrete under different States of Stress", American Concrete Institute Seminar "Concrete for Nuclear Reactors", Berlin Oct. 1970.

78. Browne R.D., "Thermal Movement of Concrete", Current Practice Sheet "Concrete" November 1973.

79. Mccurrich L.H., W.M. Kay, "Polyester and Epoxy Resin Concrete", Paper 2, Symposium "Resins and Concrete" University of Newcastle on Tyne, April 1973.

80. Browne R.D., "The Performance of Concrete Structures in the Marine Environment", Syposium on Corrosion in the Marine Envionment November 1973.

81. McCurrich L.H., M.A.J. Adams, "Composite Materials in Civil Eng. Their Current Use, Performance Requirement, and Future Potential", NPL Conference "Composites, - Standards, Testing and Design, April 1974.

82. Bury M.R.C., P.L. Domone, "The Role of Research in the Design of Concrete Offshore Structures", Offshore Tech. Conference Dallas Texas, May 1974.

83. Browne R.D. P.L. Domone, "The Long Term Performance of Concrete in the Marine Environment", Conference on Research and Development for Offshore Structures IEC, October 1974.

84. Brown R.D., M.A.J. Adams, E.L. French, "Experience in the Use of Polymer Concrete in the Building and Construction Industry", Concrete Society Symposium, London, 1975.

85. Browne R.D., "Offshore Materials Research Related to Reinforced and Prestressed Concrete", CIRIA UEG Meeting, February 1976.

86. Browne R.D., "Guidance on the Specification Concrete", C & CA Seminar Fulmer Grange 1976.

87. Browne R.D., P.L. Domone, M.P. Geoghegan, "Inspection and Monitoring of Concrete Structures for Steel Corrosion", Offshore Technology Conference Houston, Texas May 1977.

88. Browne R.D., P.L. Domone, M.P. Geghegan, "Deterioration of Concrete Structures under Marine Condition-their Inspection and Repair", Maintenance of Maritime Structures. Institute of Civil Engineers. October 1977.

89. Browne R.D. "Assessment of the Strength of Concrete in Structures and Identification of Corrosion of Reinforcement", Paper Presented at IABSE. Cambridge July 1978.

90. Browne R.D., M.P. Geoghegan, "The Corrosion of Concrete Marine Structures. The Present Situation", Paper Presented at the Society of Chemical Industry. February 1978.

91. Browne R.D., "Testing and design for durability of Concrete Structures", Paper Present at the Swedish Cement & Concrete Research Inst. Stockholm. June 1979.

92. Browne R.D., A.F. Baker, "The Performance of Structural Concrete in the Marine Environment", Chapter 4 in "Development in Concrete Technology", Ed. F.D. Lydon. 1979.

93. Garas F.K., "Research and Development in Support of the Design of a Prestressed Concrete Pressure Vessel for a Working Pressure of 69 N/mm^2", 5th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Berlin 1979.

94. Blundell R., P.B. Bamforth, "Special Concrete for Special Problems", Nuclear Engineering International January 1980.

95. Browne R.D. "The Mechanisms of Corrosion of Steel in Concrete in relation to Design, Inspection and Repair of Offshore and Coastal Structures", New Brunswick Canada August 1980.

96. Brown R.D., "Detailing for Durability", Concrete Society Doncaster Sympoium, February 1980.

97. Brown R.D., K.J. Doyle, "Inspection and Repair of Offshore Concrete Structures". Europec, October 1980.

98. Bamforth, P.B. "The effect of temperature variation in the Creep of Concrete", Underwater Engineering Group, CIRIA. 1980.

99. Bamforth, P.B. "In-Situ Measurement of the effect of Partial Portland Cement Replacement Using Either Fly Ash or Ground Granulated Blast Furnace Slag on the Performance of Mass Concrete", Proc. Instu. Civ. Engrs. Part 2, 1980, Vol. 69. Sept 1980.

100. Garas F.K, B.R. Waine, C.C. Fleischer "Experimental and analytical Studies of Shear Behaviour of Slabs Subjected to Multiaxial Stress Conditions", Nuclear Engineering and Design, Vol. 61, NO. 3, Dec. 1980,

101. Browne R.D., M.R.C. Bury, "Practicalities of Concrete for OTEC Applications", 8th Qcean Energy Conference June 7-11, 1981.

102. Browne R.D., P.B. Bamforth, "The Use of Concrete for Cryogenic Storage. A Summary of Research, Past and Present", Ist International Conference on Cryogenic Concrete 25-27 March 1981.

103. Browne R.D., "Design Prediction of the Life for Reinforced Concrete in Marine and Other Chloride Environments", Durability of Building Materials, Vol. 3, 1982.

104. Browne R.D., "Design and Construction of Structures Using PFA Concrets", Leeds University 14-16 April 1982.

105. McAnoy R.P.L., "Cyclic Tensile Testing of a Pile in Glacial till", Proceedings of the 2nd International Conference on Numerical Methods in Offshore Piling, April 1982.

106. Bamforth P.B., "Early Thermal Cracking in Concrete", Institute of Concrete Technology.Technical Note TN/2 Slough 1982.

107. Browne R.D., M.P. Geoghegen, A.F. Baker, "Analysis of Structural Condition from Durability Results", Conference on Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction Organised by the Society of Chemical Industry London, June 1983.

108. Browne R.D., "Design for Durability", Paper Presented at the 7th European Ready Mix Concrete Conference. Institute of Concrete Technology, London, 1983.

109. Adams M.A.J., "Selection of Steels for Reinforcement and Prestressing of Concrete at Cryognic Temperature", Second International Cryogenic Concrete Conference. Amsterdam 4-7 October 1983.

110. Browne R.D., C.C. Fleischer, R.P. McAnoy, "Instrumentation of Large Structures", IABSE Colloquium Pembroke College Cambridge. July 1983.

111. Bamforth P.B., "Mass Concrete Foundations benefits from OPC Replacement", Article in Concrete, October 1983.

112. Elliott R.L., "Concrete esting-is Performance Assured?", Concrete December 1983.

113. Browne R.D., "Do Contractors Need Scientists?", Chemistry and Industry, 5 December 1983.

114. Robery P.C., "Structural Repairs", Concrete February 1983.

115. Browne R.D., J.G. Warren, A.R. Abbott, "Measuring the Performance of Concrete Structures in Service", Paper Presented at the American Concrete Institute Symposium on the Evaluation of Existing Concrete Buildings, Phoenix, Arizona, March 8-9, 1984.

116. Bamforth P.B., "Concrete Requirements for Massive Pours", Heathrow Penta Hotel. The Concrete Society "Concrete in the Ground". 1984.

117. Mcleish A., "Reinstatement of Prestress in Locally Damaged Structures", Paper Presented at 5th Offshore Inspection Repair and Maintenance Conference November 1984.

118. Browne R.D., "Ash Concrete-Its Engineering Performance", Ash Tech. '84 The Barbican Centre London, 17th Sept. 1984.

119. Mcleish A., "Repairs to Major Damage of Offshore Concrete Strucres", New Technology for Exploration & Exploitation of Oil and Gas Resources. EEC, Luxemburg Des 1984.

120. Davies I. LI., C.C. Fleischer, A.A. Paton, "Demolition of Prestressed Concrete Pressure Vessels", Present at Vessel Concepts for Gas Cooled Reactors. IAEA. Lausanne, Switzerland 4-7 December 1984.

121. Mcleish A., "Analysis of Defect & Repairs Systems for Concrete Structures", Paper Presented at ICE Seminar "Structural Faults & Repair". 1985.

122. Browne R.D., "Practical Considerations in Producing Durable Concrete", Paper Presented at ICE Seminar "How to make today's Concrete durable for tommorrow". 1985.

123. McAnoy R., Broomfield J.P., S.C. Das, "Cathodic Protection of Rebar a Long Term Solution to Chloride Induced Corrosion?", Paper Presented at ICE Seminar "Structural Faults & Repair", 1985.

124. Browne R. D., B. Gibbs, P. C. Robery, "Repair of Concrete Structures Subjected to Environmental Attack", Paper Presented at ICE Seminar "Structural Faults & Repair". 1985.

125. Papworth F., "Durability of Reinforced Concrete Marine Structures", Paper Presented at Asian Inspection Conference, Singapore. 1985.

126. Bamforth P. B., D. C. Pocock, P. C. Robery, "The Sorptivity of Concrete", Edited & Presented By F. Papworth. "Our World in Concrete & Structures" Conference 27-28/8/85, Singapore, 1985.

127. Mcleish A., "Bursting Stresses due to Prestressing tendons in Curved ducts." Proc Inst. Civ. Engrs. Pt. 2, 1985. Vol. 75. Sept. 1985.

128. Browne R.D., "Investigation of Concrete Structures. Methods Used to Establish the Nature of Problems." North West Region Concrete Society, Symposium on Problems with Concrete October 1985.

129. Papworth F., "An In-Depth look at the Repair of Concrete Marine Structures." Hong king "Contractor" magazine. August 1985.

130. Bamforth P.B., "Alternative Cements for Hot Climates", Concrete magazine February 1986.

131. Browne R.D., "Low Maintenance Concrete-Specification Versus Practice?" Maintenance of Maritime & Offshore Structures ICE February 1986.

132. Browne R.D., "Deteriology & Life Prediction - as Applied to Reinforced Concrete." Building Deteriology Conference, SCI April 1986.

133. Browne R.D., A Mcleish, P.C. Robery, "Repair of Concrete Structures." Published as Chapter II in Underwater Repair. Pub. by Blackie & Son Ltd. February 1986.

134. Broomfield J.P., R. Mcanoy, "Application of Cathodic Protection-Extended Polymer Membranes," Corrosion in Concrete, London Press Centre 13 May 1986.

135. Robinson H.L., "Evaluatuon of Coatings as Carbonation Barriers." Materials Science & Restoration, T.A.E. West Germany. 2-4 Sept. 1986.

136. Pocock D.C., B. Gibbs, "Diagnosis, Prevention and Repair of Deterioration in Concrete Bridges - An Overview." Sino British Highways & Urban Traffic Conference, China 18th November 1986.

137. Mcleish A. and D.J. Miller, "Reinforced Concrete Blocks with Built-in Defects for Diver Training", Operators Advisory Committee on Underwater Inspection, Aberdeen 7th November 1986.

138. Broomfield J.P., P.E. Langford and R. Mcanoy, "Cathodic Protection for Reinforced Concrete: it's Application to Buildings and Marine Structures", Corrosion'87, March 9-13, 1987.

139. Nishibayashi S. and K. Sakata "A study on the Accelerated Test for Durability of Concrete under Action of Sulphate" pp. 240-241 Transactions of Jsce, Vol. 4, 1972.

140. Nishibayashi, S. Yamura, K. Minato, M.,PP.82-83 CAJ Review 1982

141. Nishibayashi, S. Yamura, K. Inoue, S. Hayashi.A., "Seawater Resistance of Concrete" PP.164-166 Tottori University.

142. Nishibayashi S., K. Yamura and S. Inoue "Durability of concrete in sea Water: Method of Accelerated Testing and Evaluation" PP.351-378

143. Nishibayashi. S., K. Yamura and A. Hayashi "Elastic-plastic Properties and Durability of Concrete Made from Recycled Coarse Aggregate Prepared by Crushing Concrete" PP.127-132 Transactions of the Japan Concrete Institute Vol. 6. 1984.

144. Leeming, M.B., C Eng, "CIRIA Review and the Future Surface treatments", CIRIA REVIEW, Qctober 1985.

145. Callow L.M., J.A. Richardson and J.L. Dawson. "Corrosion Monitoring Using Polarisation Resistance Measurements" PP.132-139 Br. Corros. J., 1976, Vol. 11, No.3

146. Page C.L "Mechanism of corrosion protection in reinforced concrete marine structures" PP.514-515 Nature Vol.258, December 11, 1975.

147. Yeomans S.R. and D.J. cook "Corrosion of Steel Reinforcement in Concrete-Causes and Prevention" PP.443-458 Materials OF Construction for Developing Countries August 1978

148. Ramaswamy S.D., M.A. Aziz, S.K. ROY "Some Aspects of Corrosion of Concrete and Preventine Measures" pp. 427-441 Materials of Construction for Developing Countries August 1978.

149. Gjorv E. and N. Kashino "Durability of a 60-year-old reinforced concrete pier in Oslo Harbor" PP.18-26 1986 National Association of Corrosion Engineers.

150. Grimaldi G., Brevet. G. Pannier, A. Raharinaivo "Factors in fluencing electrode potential of steel in concrete" PP.55-62 Br. Corros. J., 1986, Vol.21, No.1 55

151. Page C.L., K.W.J. Treadaway "Aspects of the electrochemistry of steel in concrete" PP.109-115 Nature Vol.297, 13 May, 1982.

152. The concrete society (1986)" Marine Concrete-Papers for the International conference on concrete in Marine Environment" London, 22-24 Sept. 1986

153. Bamforth, P.B. (1984) "Mass Concrete"Concretes Society Digest No. 2, 1984.

154. Birt, J.C. (1984) "Curing Concrete" Concrete Society Digest No. 3, 1984.

155. Harris, C.A.R. (1984) "Statistics for Concrete-Part 1 "Concrete Society Digest No. 5. 1984.

156. The concrete society "Underwater Concreting" Concrete Society Technical Report No. 3. 1971.

157. The concrete society, (1982) "Non- Structural cracks in Concrete" Technical Report No.22 London, 1982.

158. The concrete society "Repair of Concrete Damaged by Reinforcement Corrosion" Technical Report No. 26, London, 1984.

159. The concrete society (1986) "Concrete Industrial Ground Floors" Draft concrete Society Technical Report for Discussion at One-Day conference, London, May 1986.

160. The concrete society (1985). "Concrete Bridges-Investigation, Maintenance and Repair", Proceedings of One-Day Symposium. Kensington, London, September, 1985.

161. The concrete society(1984) " Demolition Special Structures" Proceedings of a One-Day Conference, London, September, 1984.

162. The concrete society, (1985) "Alkali-Silica Reaction. New Sturctures-Specifying the Answer. Existing Sturctures-Diagnosis and Assessment" proc. of a One-Day Conference, London. Nov. 1985.

163. The concrete society, (1985) "Permeablilty of Concrete and Its Control proc. of a One-Day Conference, London, Dec. 1985.

164. Dyton, F.J. (1978) "Case Histories of Repairs of Maritime Sturctures" proc. of Maintenance of Maritime Sturctures. Institution of Civil Engineers, London, 1978. pp89-103.

165. Reeves, C.M. (1985) "The Use of Ground Granulated Blast Furance Slag to produce Durable Concrete" Semianar on How to Make Today's Concrete Durable for Tomorrow, Inst. offcivil Engineers Association of Municipal Engineers, 1985. pp 37 - 54.

166. Dawson, J.L.; P.E. Langford (1985) "The Electrochemistry of steel Corrosion in Concrete Compared to Its Response in Pore Solution" paper will be presented at ASTM" Corrosion testing" meeting Jan 1986. National physical Lab.
Teddington U.K.

167. John, D.G., P.C. Searson, J.L. Dawson (1981) "Use of AC Impedance Technique in Studies on Steel in Concrete in Immersed Conditions" British Corrosion J. Vol. 16, No. 2, 1981. pp102-106.

168. John, D.G. D.A. Eden, J.L. Dawson & P.E. Langford (1986) "On-site Corrosion Monitoring of Reinforcing Steel in Concrete Strctures" Paper to be Presented at Corrosion '87, NACE, San Francisco, March 1987, U.S.A.

169. Callow, L.M., J.D. Scantlebury (1983) "Electrochemical Impedance in Costed Metal Elctrodes. Part 5: Film Thickness", JOCCA 1983(3) pp 93-96.

170. Hepburn, B.J., L.M. Callow, J.D. Scantlebury (1984) "Electrochemical Impedance of Coated Metal Electrodes". Part 6: the Effect of Acid Media, Jocca 1984(7): pp 193-197.

171. Elbasir, A., J.D. Scantlebury, L.M. Callow(1985) "The Adhesion of Chlorinated Rubber to Mild Steel Using a Blister Technique" JOCCA 1985(11) pp282-284.

172. Gill J.S., L.M. Callow, and J.D. Scantlebury (1983) "Corrosion Measurements Derived from Small Perturbation Non-Linearity-Part 1: Harmonic Analysis", Corrosion NACE Vol. 39, NO. 2, Feb. 1983 pp 61-66.

173. Gill J.S., L.M. Callow, J.D. Scantlebury, G.A.M. Sussex (1984) "The Application of Harmonic Analysis to the Measurement of Corrsion Rates in Selected Media" Proc. of 9th ICMC, Toronto 1984. pp 164-167.

174. Hepburn, B.J., K.P. Gowers, J.D. Scantlebury (1986) "Interpretation of Low Frequency AC Imedance Date for Organic Coatings on Mild Steel" British Corrosion Journal Vol. 21, NO. 2, pp 105-108.

175. Scantlebury, J.D., A. Guiseppi Elie, D.A. Eden. L.M. Callow. (1983) "Simulated Underfilm Corrosion of Coated Mild Using an Artificial Blister" Journal of Corrosion-NACE, Vol. 39, NO. 3, March, 1983. pp 108-112.

176. Sussex, G.A.M., J.D. Scantlebury, J.B. Johnson(1984) "Atmospheric Corrosion and Its Accelerted Testing" Proc. of 9th ICMC, Toronto, pp 192-197.

177. Corrosion and Protection Centre Industrial Services UMIST.

178. Programme and Abstracts of papers for "27th Corrosion Science Symposium" Corrosion Science Division , Institution of corrosion science and Technology, 9-21 Sept. 1986 Aston University U.K.

179. Arup, H. (1982) "Recent Progress Concerning Electrochemistry and Corrosion of Steel in Concrete" Proc. of the Arbem Symposium Paris, October 1982.

180. Arup, H. (1982) "Corrosion Related Maintenance Problems, Especially Offshore" Paper Presented at the Sixth Eurpoean Maintenance Congress, Oslo, Norway, June, 1982. PP 103-107.

181. Arup. H. (1985) "Electrochemical Monitoring of the Corrosion State of Steel in Concrete" Presented at First International Conference on Deterioration & Repair of Reinforced Concrete in the Arabian Gulf. October, 1985.

182. Arup, H. (1986) "Surveys of Reinforced Concrete Structures" Proc. of U.K. Corrosion'86, Birmingham, Nov. 1986.

183. The Danish Corrosion Centre "Potential Mapping of Reinforced Concrete Structures" January, 1984.

184. Arup. H. (1978-1981) "Steel in Concrete Electrochemistry & Corrosion Newsletter" NO.1 - NO.7, 1978-1981, The Danish Corrosion Centre, Denmark.

185. Byfors, K. C.M. Hansson, J. Tritthart (1986) "Pore Solution Expression as a Method to Determine the Influence of Mineral Additives on Chloride Binding" to be published in Cement & Concrete Research. 1986.

186. Hansson, C.M. (1984) "Comments on Electrochemical Measurements of the Rate of Corrosion of Steel in Concrete" Cement and Concrete Research, Vol,14. PP 574-584.

187. Hansson, C.M., Th. Frølund, J.B. Markussen (1985) "The Effect of Chloride Cation Type on the Corrosion of Steel in Concrete by Chloride Salts" Cement and Concrete Research, Vol.15 PP 65-73, 1985.

188. Hansson, C.M., H.Strunge, J.B. Markussen, Th. Frolund (1985) "The Effect of Cement Type on the Diffusion of chloride" NORDIC CONCRETE RESEARCH, Edited by the Nordic Concrete Federation Concrete Association of Norway pub. No.4 Oslo, December, 1985. PP. 70-80.

189. Hansson, C.M. (1986) "The Effect of Cement Type on the Chloride Induced Corrosion of Steel in Concrete" presented at the 10th Nordic Corrosion Meeting Stockholm, June, 1986.

190. Hansson, C.M. (1986) "A critical Assessment of Methods of Measuring the Rate of Corrosion of Steel in Reinforced Concrete" Final Report to the Ontaris Ministry of Transportion 1986.

191. Hansson. I.L.H., C.M. Hansson (1983) "Electrical Resistivity Measurements of Portland Cement Based Materials" Cement and Concrete Research, Vol.13, PP 675-683, 1983.

192. Hansson. I.L.H., C.M. Hansson (1984) "Ion-Conduction in Cement - Based Materials" Cement and Concrete Research. Vol.15, PP 201-212, 1985.

193. Maahn. E., B. Sorensen (1986) "The Influence of Microstructure on the Corrosion Properties of Hot-Dip Galvanized Reinforcement in Concrete" Jour. of Corrosion , Vol. 42, No.4, PP187-196, 1986.

194. Otsuki, N., T., Yokoi, O., Shimozawa (1985) "The Influence of Chloride on the Passivation Film on the Surface of Steel Bars in Mortar" Proc. of Japan Society of Civil Engineers. Vol.3, No.360. Aug. 1985. PP 111-118.

195. Otsuki, N. (1985) "Research on the Influence of Chloride on Corrosion of the Embedded Steel Bars in Concrete" Report of the Port and Harbour Research Institute, Vol. 24, No.3 Sept. 1985. (in Japanese)

196. Otsuki, N., Y. Mori, H. Seki, (1983) "Some Consideration for the Chloride Content of the Concrete in Marine Environment" Proc. of Japan Society of civil Engineers. No.332, April, 1983. PP 107-118 (in Japanese).

197. Otsuki, N., O. Shimozawa (1982) "The Study on the Durability of PC Beams after 7Years' Exposure in Marine Environment" Report of the Port and Harbour Research Institute, Vol.21, No.2. June 1982. (in Japanese).

198. Otsuki, N. (1984) "The Influence of Sea Water on the Durability of Concrete Members in Marine Environment" Chemistry Industry, Japan, Aug. 1984. PP 35-40.

199. Otsuki, N. (1986) "Influence of the Existence of Cracks on the Electrochemical Characteristics of Steel Bars in Concrete" Journal of Cement & Concrete. Japan. No. 472, June, 1986. PP 38-44.

200. P. H. R. I. and C. C. A. (1976)"The Five year's Test Report on the Durability of Concrete in Marine Environment" The Port and Harbour Research Institute, Ministry of Transport, Japan & Japan Concrete Institute. 1976.

201. P. H. R. I. and C. C. A. (1981) "The Ten Year's Test Report on the Durability of Concrete in Marine Environment" The Port and Harbour Research Institute, Ministry of Transport & Japan Concrete Institute. 1981.

202. Skei, H., H. Koga (1974) "Durability of Prestressed Concrete under Marine Environment" Technical Note of the Port and Harbour Research Institute Ministry of Transport, Japan. No. 191, June 1974. (in Japanese).

203. Seki, H., S. Onodera, H. Maruyama (1972) "Deterioration of plain Concrete for Coastal Structures under Marintime Environments" Technical Note of the Port and Harbour Research Institute, Ministry of Transport, Japan. No. 142, June. (in Japanese).

204. Seki, H., Y. Horii (1977) "Investigation Results on Deterioration of Reinforced Concrete piled Wharf" Technical Note of the Port and Harbour Research Institute Ministry of Transport, Japan, No. 255, Mar. 1977. (in Japanese).

205. Mori, Y., N. Otsuki, O. Shimozawa (1981) "The Durability of Concrete Mixed with Sea Water under Marine Environment (Ten Years' Test)" Technical Note of the Port and harbour Research Institute Ministry of Transport, Japan. No. 378. June 1981. (in Japanese).

206. Tsuchida, H., T. Yokoi, K. Zen, (1984) "Studies of the Corrosion of Steel Materials in a Marine Environment" Japan Society of civil Engineers. Proc. of 26th International Navigation Congress, Burssels, 1984. PP 55-64.

207. Mori, Y., N. Otsuki, O. Shimozawa, (1981) "The Five Years' Test on the Durability of Concrete in Marine Environment with Some Kinds of Joint" Transactions of the Japan Concrete Institute. Vol.3. 1981. PP 121- 126.

208. Tsuchida, H., T. Yokoi, M. Abe, (1985) "Corrosion Surverys of Steel Structures under Marine Environment" Proc. of the International Ocean Space Utilization '85 Symposium, Nihon University, Tokyo, Japan, June. 1985. PP 507-514.

209. BRE digest 264" The durability of steel in Concrete:part 2 Diagnosis and assessment of Corrosion- cracked concrete Aug. 1982 Building Research Establishment, Dept. of the Environment U.K.

210. Roberts M.H. "Cabonation of Concrete made with dense natural aggregates" BRE information paper IP6/81.

211. Derrick Beckett "Influence of Carbonation and chlorides on Concrete durability" Journal of concrete Feb. 1983.

212. T. Hodgkiess, P.D. Arthur and J.C. Earl "corrosion fatigue of reinforced concrete in seawater" material performance July 1984.

213. ASTM C876-80 "standard Test menthod for half cell Poetenials of reinforcing steel in Concrete".

214. Andrade, C. B. Castelo, M.C. Alonso and J.A. Gonzales, "The Determination of the Corrosion Rate of Steel Embedded in Concrete by the Polarization Resistance and A.C. Impedance Methods", Proc. ASTM Symp, Virginia, (1984)

215. Gonzales, J.A. A. Molina, M.L. Escudero and C. Andrade, "Errors in the Electro-Chemical Evaluation of Very Small Corrosion Rates-I. Polarization Resistance Method Applied to Corrosion of Steel in Concrete", Corr. Sci., 25, 917-930 (1985)

216. Andrade C. and V. Castelo, "Practical Measurement of A.C. Impedance of Steel Bars Embedded in Concrete by Means of a Spectrum Analyser (Fast Fourier Trans-form)", Br. Corr. J., 19, 98-100 (1984)

217. Gonzales, J.A., A. Molina, M.L. Escudero and C.Andrade,"Errors in the Electro-chemical Evaluation of Very Small Corrosion Rates- II. Other Electrochemical Techniques Applied to Corrosion of Steel in Concrete", Corr. Sci, 25, 519-539 (1985)

218. Gonzalez. J.A. Molina, M. Escudero and C. Andrade, "A Comparison of Linear Polar-ization and A.C. Impedance in the Determination of Corrosion Rates of Rein-forcements Embedded in Concrete". NACE "Corrosion 85", Paper No. 257, (1985)

219. Andrade C., C.L. Page "Pore Solution Chemistry and Corrosion in Hydrated Cement Systems Containing Chloride Salts: A Study of Cation Specific Effects" Br. Corros. J. 1986 Vol 21, No.1 P49-54.

220. Gonzalez J.A. and C. Andrade "Effect of Carbonation, Chlorides and Relative Ambieth Humidity on the Corrosion of Galvanized Rebars Embedded in Concret" Br. Corros, J. 1982. Vol 17 No1. PP 21-28.

221 Andrade C. and J.A. Gonzalez "Quantitative Measurements of Corrosion Rate of Reinforcing Steels Embedded in Concrete Using Polarization Resistance Measure-ments" Wekstoffe and Korrosion 29, P 515-519. (1978)

222. Andrade C.A. Macias, Amolina and J.A. Gonzalez "Advances in the Study of the Corrosion of Galvanized Reinforcedments Embeded in Concrete" NACE Corrosion 85 Paper NO. 270 (1985) PP 1-9.

223. Molina A. Blanco M.T. and Andrade C. "Corrosion Rate of Three Different Types of Galvanized Coatings of Steel Reinforcements in Contact with Mortar" 9th Int. Conf. of Metal Corrosion Vol.1 Toronto June. 1984

224. Gonzalez, J.A.; A.J. Vazquez, G. Jauregui and C. Andrade "Effect of Four Coating Structures on Corrosion Kinetic of Galvanized Reinforcement in Concrete" Gauthier - Villars (1984)

225. Blanco M.T. Andrade C. and Macias A. "SEM Study of the Corrosion Products of Galvanized Reinforcements Immersed In Solution in the PH Range 12.6 to 13.6" Br. Corros. J. 1984 Vol 19. No.1 P41-48.

226. Gonzalez J.A. S. Algaba and C. Andrade "Corrosion of Reinforcing Bars in Carbonated Concret" Br. Corros, J. 1980 VOl. 15 No.3 PP 135-139.

227. Macias A. and C. Andrade "Corrosion Rate of Galvanized Steel Immersed in Saturated Solutions of $Ca(OH)_2$ in the PH Range 12-13.8" Br. Corros, J. 1983 Vol 18 NO. 2 PP 82-87.

228. Andrade C. Alonso C. Santos P. and Macias A. "Corrosion Behavior of Steel During Accelerated Cabonation of Solutions Which Simulate the Pore Concrete Solution" 8th International Congress on the Chemistry of Cement Brasil.

229. Gonzalez J.A. Alonso. C. and Andrade C. "Corrosion Rate of Reinforcements During Accelerated Cabonation of Mortar Made with Different Types of Cement" in " Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction"ed. by A.P. Crane Ellis Horwood Publishers Chichester, U.K. PP 159-174 (1983)

230. Andrade C.A. Molina; F. Huete and J.A. Gonzales "The Relation Between the Alkali Content of Cements and the Corrosion Rates of Galvanized Reinforcements" in "Corrosion of Reinforcement in Concrete Constructions" ed by A.P. Crane Eillis Horwood Publishers Chichester, U.K. pp 343-356 (1983)

231. NAGANO H. and NAITO; T. Application of Diffusion Theory to Chloride Penetration into Concrete Located in Splashing Zones. Transactions of the Japan Concrete Institute, Vol. 7, 1985. PP 157-164.

232. NAGANO H. and NAITO; T.A. Study on Chloride Penetration Concrete Based on Diffishion Theory (in Japanese). To Appear in the Proceedings of the 8th Annual Conference of the Japan Concrete Institute, 1986

233. LOBORI and NAGANO; H. A Study on the Reinforcement Corrosion and Chloried Contents of Concrete Structures (in Japanese). To Apper in the Proceedings of the 8th Annual Conference of the Japan Concrete Institute, 1986

234. KANEKO S; NAGANO H. Sakurai H. and yasu S. "Chloride Content and Cement Hydrate Minerals in Concrete in Sea Environment" JCI 1984 PP147-154.

235 西林新藏　阪田憲次　“コンクリ－トの耐硫酸塩性促進試験に關する研究”pp.83～91 土木學會論文報告集第207號1972年11月

236 西林新藏　矢村潔　井上正一　後藤年芳
“耐海水性コンクリ－トの化學的評價に關する研究（海水によつてコンクリ－ト中に生成する物質）”pp.506～511 材料第29巻第320號　昭和55年5月

237 西林新藏　“コンクリ－トの耐海水性—その研究の現狀と將來”pp.2～9 セメント協會　№410 1981年　4月號

238 西林新藏　矢村潔　林昭富　“再生骨材使用コンクリ－トの彈塑性的性質及び耐久性”pp.77～80　第6回コンクリ－ト工學年次講演會論文集 1984

239 西林新藏　矢村潔　吉野公　“コンクリ－ト破碎物の再利用に關する研究—再生コンクリ－トの彈塑性的性質—”pp.101～107 鳥取大學工學部研究報告　第13巻第1號　昭和57年10月

240 西林新藏　矢村潔　井上正一　林昭富　“コンクリ－トの耐海水性に關する研究”pp.299～302 セ技年報　34　昭55

241 西林新藏　矢村潔　吉野公　湊正彥　“コンクリ－ト破碎物の再利用に關する基礎的研究”pp.188～195 鳥取大學部研究報告第12巻第1號　昭和56年10月

242 西林新藏　宮內克之　後藤年芳　“コンクリ－トの耐海水性に關する一考察”pp.6～13　大阪セメント技報№44(1979.1)

243 西林新藏　“輕量コンクリ－トの耐硫酸塩性に關する二，三の考察”pp.66～73　「材料」第18巻第185號　昭和44年2月

244 西林新藏　“コンクリ－トの耐久性とその影響要因”pp.197～204　材料技術研究協會　Vol.4, №5, 1986

245 アルカリ骨材反應調査研究委員會“JCI アルカリ骨材反應調査研究委員會の活動狀況”pp.92～102 エンクリ－ト工學 Vol.24, №11, Nov. 1986

246 西林新藏“アルカリ骨材反應にする構造物の劣化の形態—海外における例—” pp.57～63 コンクリ-ト工學
Vol.24, No.11, NOv. 1986

247 西林新藏 “アメリカ・カナダにおけるアルカリ骨材反應見聞錄” pp.65～69 エンクリ-ト工學 Vol.23 No.10，Oct. 1985

248 岡田清，“コンクリ-トの耐久性”，朝倉書店，1986

249 日本道路協會，“道路橋の塩害對策指針（案）。同解說”，昭和59.年2月

250 日本コンクリ-ト工學協會，“海洋コンクリ-ト構造物の防食指針（案）”，昭和58年2月

251 西林新藏 林昭富 大西利勝 “アルカリ骨材反應による損傷と骨材特性” pp.296～299 セ技年報40昭61

252 西林新藏 矢村潔 吉野公 湊正彥
“再生コンクリ-トに關する基礎的研究” pp.147～150 セ技年報36昭57

253 大友忠典，關博“海洋コンクリ-ト”，1982

254 黃其超 “電化學之原理與應用” 徐氏基金會 64年6月

255 郁仁貽 “實用理論電化學” 徐氏基金會 68年12月8日

256 王仰舒 “鋼鐵材料” 徐氏基金會 68年7月1日

257 謝淵清 “電化學反應程序” 徐氏基金會 1982年4月

258 尤光先 “鋁的陽極處理技術” 徐氏基金會 1982年3月22日

259 張富昌 “電化學分析儀器” 徐氏基金會 74年8月21日

260 鮮祺振 “腐蝕理論與實驗” 徐氏基金會 64年5月

261 鮮祺振 “金屬腐蝕及其控制” 徐氏基金會

262 葉柱熙 “金屬熱處理工程與技術” 徐氏基金會

263 工業技術研究院工業材料研究所，“中華民國75年大氣腐蝕研討會”，民國75年8月

264 台灣營建中心，“混凝土工程技術”，研習會講義，中華民國74年1月

265 港灣技術研究所，“港灣鋼筋混凝土結構物防蝕技術研討會”，資料彙刊，中華民國74年8月

266 港灣技術研究所，“材料與腐蝕研討會”，資料彙刊，中華民國75年6月

267 Young J.Francis，“水泥與混凝土技術”，研習會講議，台灣營建研究中心，中華民國74年6月

268 左克東．許世希，藍亨吉譯，“腐蝕防制學”，百成書店，民國66年

拾、附錄

林 維 明

1. 林維明 (1987,1)"海洋 RC 結構物龜裂與腐蝕互制現象"工程 60 (1)： 24 — 32 …… A 1

2. 林維明 (1987,2)"出席一九八六年海洋混凝土國際會議及會後考察報告"防蝕工程 9：39 — 69 …… A10

3. 林維明 (1987,6)"海洋混凝土結構物腐蝕惡化與修護"營建世界 69：87 — 99 …… A41

4. 林維明 (1987,6)"耐久性鋼筋混凝土製作應考慮之要點"現代營建 90：75 — 87 …… A54

5. 林維明 (1987,6)"混凝土結構物塗裝之實際問題"塗料與塗裝技術 4：61 — 65…… A66

6. 林維明 (1987,6)"鋼筋混凝土腐蝕(一)"中華港埠 68：28 — 42…… A72

7. 林維明 (1987,6)" 鋼筋混凝土防蝕機構 " 防蝕工程 10： 25 — 28… A87

海洋R.C.結構物龜裂與腐蝕互制現象

台灣技術研究所土木材料組組長 林維明

摘 要

本文將海洋R.C.結構物所承受之物理及化學作用而使原細微龜裂之大小與範圍擴大之因素加以歸類，並檢討混凝土中鋼筋腐蝕之電化學現象，同時根據混凝土龜裂增大則其可滲透性遞增，而使有足夠之氧氣侵入鋼筋範圍發生顯著之腐蝕現象，此種龜裂與腐蝕互制模式將在文中概述。

一、前 言

結構物在海洋環境下將承受各種環境負荷，一般而言，若兼顧經濟及耐久性，鋼筋混凝土或預力混凝土結構物仍較被採用，有甚多論著均肯定海洋混凝土結構物之耐久性，然而亦有些嚴重之損壞事例存在(1-4)。混凝龜裂及其中之鋼筋腐蝕被認爲係R.C.結構物損壞之主因。

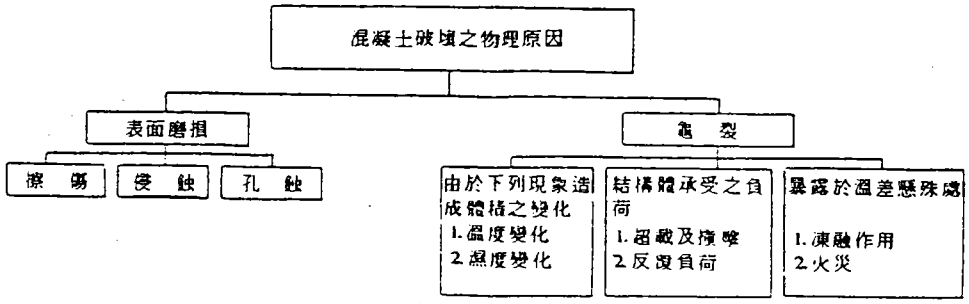
在混凝土中，骨材及鋼筋與水泥漿之界面上均有非肉眼可察覺之微細裂紋存在。由於下列原因將使上述微裂擴展，甚至龜裂至可見之程度：

1. 巨積混凝土構件製作及使用期間內，體內溫差變化大。
2. 打樁時，張應力之回復。
3. 基礎沈陷。
4. 暴露於海洋環境下，混凝土承受凍融，冷熱及乾濕等反覆作用。
5. 其他外力之撞擊。

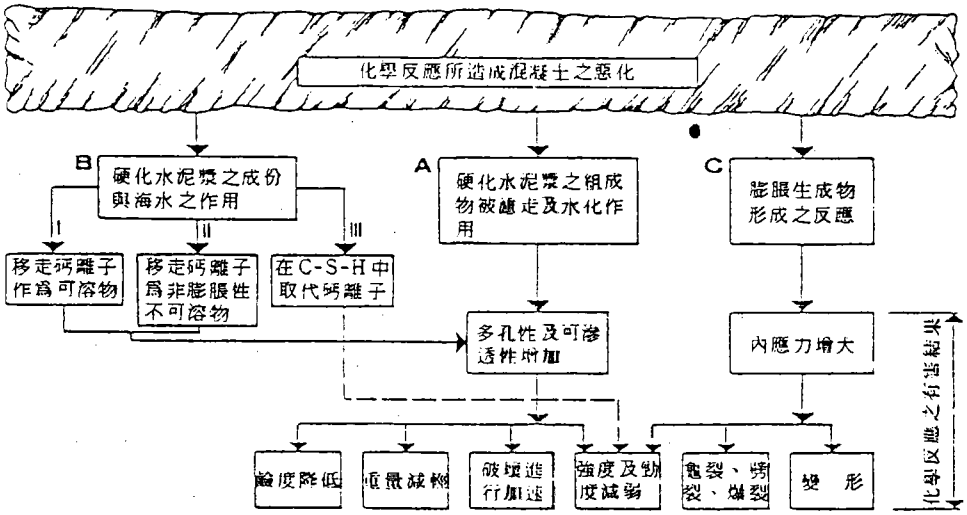
同時各種化學性作用例如硫酸塩侵蝕、鹼骨材反應及鋼筋腐蝕等亦可使混凝土龜裂程度擴大。

R.C. 混凝土發生龜裂及腐蝕互制之關係一直爲研究者所最感興趣之專題，因爲兩者爲一互爲因果關係不易分開之範例，混凝土龜裂將加速鋼筋之腐蝕，尤其是大而可見之裂紋與混凝土中許多微細裂紋連接，形成可爲侵蝕性離子和氣體進入混凝土中鋼筋表面之通路，此現象說明龜裂爲腐蝕之致因，從另一角度而言，因嚴重之腐蝕產生大量之鐵銹，體積增大而導致沿鋼筋表面上之混凝土發生龜裂，所以龜裂亦爲腐蝕的結果。然而專家學者們對於腐蝕爲混凝土龜裂之致因所持之意見不一致，研究者對龜裂導致腐蝕擴展所佔之份量到底有多大產生懷疑，因此現行之各種設計規範及設計手冊上對於海洋混凝土結構物容許之裂紋寬度限制均較爲保守，例如：美國混凝土學會ACI-224R-80建議在海洋中鋼筋混凝土結構物因經年累月處於海水之乾、濕及潑濺情況下，其承受張力之鋼筋，其混凝土表面裂紋不得大於0.15 mm。CEB 1978 Model 規範建議經常承受彎曲應力者，其裂紋限制爲0.1 mm，其他情況爲0.2 mm，法國石油學會(FIP)建議主鋼筋表面混凝土裂紋不得大於保護層厚度之0.004倍，即50 cm 之保護層，則裂紋需在0.2 mm以下；若保護層75cm則爲0.3mm，然而Beeby(5)根據對已龜裂之混凝土作一系列曝露試驗，而發現與橫向裂紋之寬度並無關係存在，因此認爲在設計階段中檢核裂紋寬度對控制腐蝕並無法達到實用目的，除外在海洋環境下作曝露試驗之條件例如結構體全部或部份浸於水中，海水溫度及塩份各有不同，可見海洋腐蝕特性相當複雜。

在許多專家學者之觀點，腐蝕並非鋼筋混凝土損壞之唯一因素，因此研究混凝土龜裂與腐蝕互制之問題，必須分析所有影響混凝土耐久性之複雜因素(包括腐蝕因子在內)，本文將扼要介紹各種影響混凝土破壞之物理及化學現象，並對影響混凝土龜裂及鋼筋腐蝕之因素作簡要檢討。最後提出由現場觀測經驗所得之龜裂與腐蝕互制模式等。



圖一　混凝土破壞之物理原因

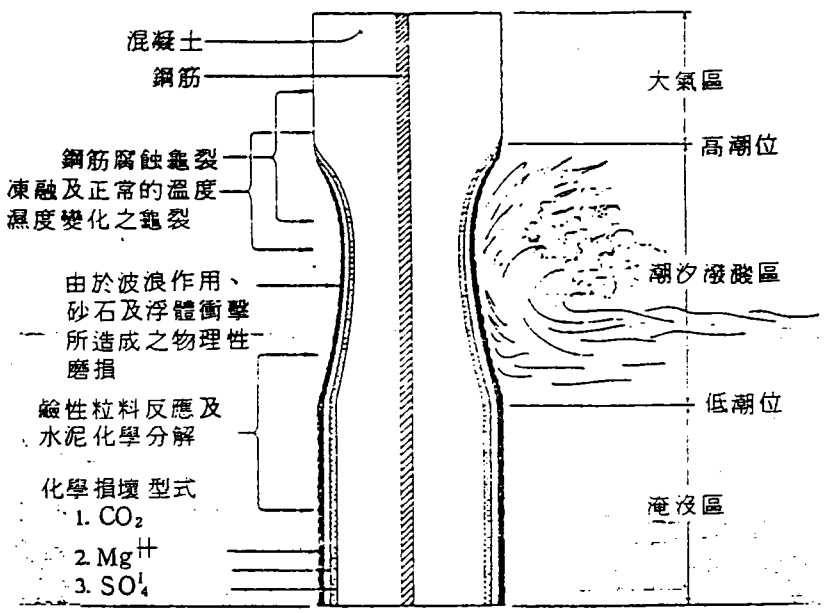


A　：海水攻擊 $Ca(OH)_2$ 及C-S-H膠體（在20°C $Ca(OH)_2$ 可溶度爲 1.7 gm/l）
B_I　：酸溶液，形成 $CaCl_2$ 及硫酸鈣
B_{II}　：草酸及其鹽之溶液，形成草酸鈣
B_{III}　：長期受海水作用可用 Mg^{++} 取代 Ca^{++} 而減弱C-S-H膠體
C　：(i) 硫酸鹽侵蝕形成鈣沸石及石膏
(ii) 鹼性骨材反應
(iii) 混凝土中鋼筋腐蝕
C-S-H式中C, S, H分別表示CaO, SiO_2 及 H_2O

圖二　混凝土破壞之化學原因

二、混凝土損壞之原因

導致混凝土損壞之物理及化學原因分別如圖一及圖二所示，本文不詳加討論，必須注意者爲海水中可能存有許多物理及化學因素同時互制之現象，因而引致混凝土破壞，根據許多海洋混凝土破壞個案中顯示，因受物理或化學因素作用而導致侵蝕現象，其強度依結構物構件所處位置與潮汐活動區之相對位置而定，Mehta④曾提出一代表性概圖如圖三所示，他將結構體所處之位置分爲三個部份，最上部份稱爲大氣區，係經常在海水面上，主要受凍融和氣溫循環及鋼筋腐蝕，鹽害而導致混凝土龜裂，中間部份稱爲潮汐（濺激）區，係爲高低潮位間，乃因受漂流物撞擊及海水與混凝土之化學作用，其他如濕度變化（如潮汐帶之乾濕循環），大氣與潮汐之溫度變化等。下段部份稱爲浸沒區係經常在海水面下；因其僅受化學侵蝕，故相對地受較佳之保護，由於幾乎所有混凝土破壞之物理及化學作用均發生於潮汐區，故很明顯地可解釋爲何大多數海中R.C結構物均在潮汐帶發生損壞。



圖三　海水中混凝土破壞示意圖

三、混凝土龜裂

混凝土之裂紋有許多種型態，在新拌混凝土中由於塑性收縮會產生裂紋，通常此種裂紋相當細緻，且僅限於混凝土表面。在已硬化之混凝土由於直接之超載或溫表，濕度差或化學反應所產生之應力將形成寬且深之裂紋，此等裂紋在短期內對結構物之完整性或耐久性雖不構成影響，然而對長期耐久性將受影響，因爲在混凝土中之微裂，若變爲連續性及寬、深之裂紋便將結構體外部之一些不利之離子或氣體可入侵，則將影響結構體之耐久性。

在骨材與水泥漿界面上，或鋼筋與水泥漿之界面上一般均存有一些微細裂紋，其寬度約爲 1 μm − 100 μm，由於這些微裂數量及大小受限，不連續，因此對耐久性並無直接之影響，然而在應力作用下，或由於水泥漿凝結收縮之影響下，則此微裂有變大及變爲連續性之可能，因此對耐久性將構成威脅。

根據過去試驗結果報告及現行設計規範中所建議之容許裂紋寬度限制，並非意味鋼筋腐蝕與裂紋寬度有直接之關聯，而僅爲減少混凝土微裂及降低其滲透性，此點可由下列一些影響混凝土微裂之設計因素檢討說明：

㈠水灰比：

水灰比影響混凝土之品質亦是決定水與氯化物之滲透性，水灰比愈大則水或氯化物之滲透性愈大，同時良好品質之混凝土對碳化作用有遏阻作用，滲透性愈小，則碳化作用深度將愈小。

海洋R.C結構物中之混凝土配比通常使用高強度之水泥含量 350 − 400 kg/m^3，根據powers (6) 及最近Mehta & Manmohan (7)之調查結果顯示水泥漿之水灰比若高至0.7且經過良好之養生則不易滲透，佔在強度之觀點而言，在許多情況下，高水灰比是可被接受的，但通常海洋R.C結構物設計規範中建議水灰比不得大於0.45，此乃因混凝土澆注後，鋼筋及粗骨材向下聚集而在混凝土表面上形成浮水，造成混凝土內部推裂力較弱，而形成有微裂存在，由於這些微裂使得混凝土之滲透係數較同一水灰比之水泥沙漿之情況下較爲高。

㈡骨材大小

由於降低相對溫度或相對濕度，抑制水泥

漿之收縮，使得骨材與水泥漿界面上有產生微裂之傾向，因粗骨材對混凝土收縮產生局部之抗拒，故其微裂較多，根據美國PS務局(8)研究結果顯示在一定之水灰比下，混凝土之滲透係數隨骨材之粒徑增大而遞增，因此海洋R.C結構物設計規範中建議限制使用最大骨材粒徑或保護層厚度隨骨材粒徑增大而遞增，相反的，若保護層厚度因某些因素而受限時，則需減少骨材之粒徑，根據最新之施工手冊建議，保護層厚度應爲骨材最大粒徑之1.5～2倍。

骨材對鋼筋腐蝕之影響主要仍爲其對滲透性之影響，骨材粒徑愈大則其滲透性愈大，一般骨材之滲透係數約爲水泥漿之10～100倍，骨材級配不良，而造成龜裂！則將形成海水、氯化物、氧氣及二氧化碳等有害鋼筋腐蝕之物質之侵入通道，因而加速腐蝕。

㈢骨材種類

骨材含矽礦（如石英、長石）成份與水泥漿之結合力將較含石灰礦（如石灰石、白雲石）成份者爲弱，這種脆弱之結合力將因正常之溫濕度變化而易受破壞而形成相當可觀之微裂，顯而易見對於一定混凝土品質而言，含石灰石骨材之R.C結構物，其鋼筋腐蝕爲害之程度較之含石英石骨材者爲小，同樣地，良好耐久性之輕質R.C主要係由於其具有良好之骨材與水泥漿之結合力。

另外由於骨材與水泥漿間之熱膨脹性與勁度之差異亦爲界面產生微裂之原因。

㈣保護層厚度

當R.C或P.C使用高品質混凝土時，其保護層厚度究竟應爲多少，一直爲許多工程師們所感困擾之問題，現在北海採用之標準爲R.C 50 mm、PC 70 mm，法國石油學會建議外海潮汐區結構物R.C爲75 mm，PC爲100mm，美國施工規範建議主鋼筋及預力鋼鍵之混凝土保護層厚度至少爲60 mm而對副筋如箍筋或鋼絲網則爲40 mm，適當之保護層厚度於應力超載下所產生之裂紋將較少及較寬，而較薄之保護層則龜裂程度較多及裂紋較細，根據試驗結果顯示對具有同樣品質之混凝土而言，適當之保護層厚度將可對鋼筋之腐蝕提供較佳之防護。

㈤鋼筋之大小

鋼筋亦能抑制混凝土收縮，大號鋼筋有較多之浮水附著於其表面上，由於鋼筋水泥漿受溫度之熱膨脹性反應不同，故將產生微裂，若大號之鋼筋太接近混凝土表面則將產生較嚴重之裂紋。

㈥混凝土疲勞

混凝土結構物在反覆應力作用下將產生微裂，此點可由混凝土之勁度降低加以證明，從鋼筋腐蝕之觀點而言，在海洋環境波浪負荷下，R.C結構物可能表現得較脆弱，因此在施工時預先施加拉力被認爲是承受反覆負荷之海洋R.C結構物之耐久性增強之有效方法(10)。

四、混凝土中鋼筋之腐蝕

混凝土中鋼筋腐蝕爲一電化學反應，主要係因混凝土孔隙中溶液濃度不同而形成局部電池，引起鋼筋上某些部份成爲陽極，而另一部份變爲陰極，典型之陰陽極作用如下：

㈠陽極表面（金屬氧化）

陽極爲氧化反應之地方，此種反應使金屬離子化而放出電子，化學式爲：

$$2\,Fe \rightarrow 2\,Fe^{++} + 4\,e^{-}$$

㈡陰極表面（水之還原）

陰極爲產生水之還原反應，在基性溶液中，此種反應可使水與空氣中之氧吸收游離之電子而形成氫氧離子，化學式爲：

$$O_2 + 2H_2O + 4\,e^{-} \rightarrow 4\,(OH)^{-}$$

一旦產生氫氧離子，金屬離子才會與之結合而形成沉澱物，進而氧化產生鐵銹，化學式如下：

$$2\,Fe^{++} + 4\,(OH)^{-} = 2\,Fe(OH)_2 \quad (\text{沉澱})$$

$$2\,Fe(OH)_2 + H_2O + 1/2\,O_2 \rightarrow 4\,Fe(OH)_3 \quad (\text{紅銹})$$

鋼鐵表面析出$Fe(OH)_2$，此化合物因受氧化逐次變爲$Fe(OH)_3$（紅銹），另一部份

氧化不完全者變爲黑銹，化學式如下：

$$3\,Fe + 8\,(OH)^- = Fe_3O_4\ (黑銹) + 8\,e^- + 4\,H_2O$$

由鐵金屬變爲鐵銹，其體積增加約6～7倍，體積膨脹壓力被認爲是引起混凝土剝裂之原因。

混凝土中鋼筋表面通常有三氧化二鐵（r—Fe_2O_3）不動態薄膜保護著，它在水化後，水泥漿形成之鹼性環境中PH值約爲13相當穩定，若施工良好，完全沒有龜裂，裂痕上之氣密性良好之R.C結構物不致發生腐蝕，但若鹼份溶出或二氧化碳入侵，使得混凝土之鹼性度下降，或有害因子入侵下，則鋼筋之不動態性被破壞，因此陽極表面開始有氧化反應出現，許多學者(11)指出當水泥漿之孔隙中溶液之PH值降至11.5以下之情況，則保護薄膜才開始被破壞，若混凝土爲多孔隙，則空氣中之CO_2將使混凝土碳化，而降低其PH值，然而完全水化後之水泥漿含有重量百分比爲20％之$Ca(OH)_2$，因此對CO_2相當大之中和能力，故對含高水泥量之混凝土，其碳化作用極爲緩慢，故影響不大；在此方面，另有學者Hime and Erlin(12)認爲氯化鈉滲入混凝土，對其PH值並不產生影響，他們試驗數百個含氯化物之混凝土試件，所得結果是除了碳化作用發生後，PH值才有變化，否則PH值均在12.4～13之間。

氯離子對鋼筋鈍化狀態之破壞相當有效，許多學者（例如Gjorv and Vennesland(13)）曾觀測結果發現在海水含有氯離子環境中，氯離子很容易擴散到鋼筋之表面，即使在高品質之混凝土（水灰比爲0.4）亦然，Tuuttc(14)指出腐蝕起因因子爲氯化物入侵，則可能在十年內發生腐蝕。目前對於r—Fe_2O_3保護膜產生破壞之現象尚未十分清楚，是否係氯離子將不可溶解之氧化鐵變爲可溶解之氯化鐵或氯化物包含在氧化Fe_2O_3膜，使其變爲可滲透性。氯化物侵入鋼筋表面，沿鋼筋上集中程度不同，因此形成不同之濃差電池，根據Tremper(13)報告美國加洲公路部發現在每一袋水泥（43公斤）含有0.11 kg之氯化鈣。

一旦鋼筋表面上之鈍性保護膜遭受破壞後，腐蝕之速率將視混凝土之電阻大小及陰極上可供利用之氧分子之多寡而定，在潮濕之環境中，水之飽和度很高，因此電阻就相當小。對海洋結構物而言，含氧量之多寡爲腐蝕進行之過程中陰極反應之主要因素。

根據Okada(15)等人之調查指出混凝土中鋼筋之腐蝕速率依腐蝕單元之中陰極面積(Ac)與陽極面積（Aa）之比值（Ac/Aa）而定，當其值大於100時，將發現高密度之流電電流與嚴重之腐蝕損害，同時亦發現在乾濕反覆作用下之試體，其腐蝕速率較完全浸於水中之試體，其腐蝕速率將因Ac/Aa比值之增加而遞增，此乃陰極上之氧分子供應量較充足之故，因此似乎是由於混凝土龜裂及鋼筋與水泥漿之界面破壞，而使大量之氧分子與鋼筋接觸致引起腐蝕，若鋼筋與水泥漿之粘結性良好，則不易發生腐蝕，Gjorv等人發現在鋼筋面上包覆一薄層之水泥漿對於減少氧分子侵入有相當大之功效，其效果較之減少水灰比或增加保護層厚度爲佳，同樣地Shermer(16)觀測發現在鋼筋混凝土樑在高剪應力下及握裹力喪失後，則腐蝕與混凝土龜裂進行地特別快。

五、混凝土龜裂與鋼筋腐蝕五制模式

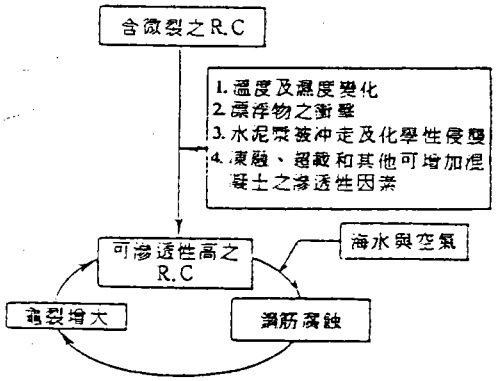
有關R.C結構物中鋼筋之腐蝕，有些裂紋與鋼筋橫向，但不至造成顯著之腐蝕，此種裂紋可讓氯離子侵入鋼筋表面（陽極），但對加速腐蝕作用所需之陰極面積之增加影響性並不大，然而長期觀之，在潮汐帶，此種水密性已受破壞之混凝土，將漸受海水冲走大量之水泥漿而使混凝土之滲透性變大，而加速上述電化學之陰極反應之進行。

由於陰極面積之增大，相關地鋼筋表面之氧分子可連續供應，因而造成水泥漿慢慢地被溶解或鋼筋周界之混凝土逐漸地龜裂，因此鋼筋與水泥漿界面上將發生顯著地損害。

Mehta and Manmchan(7)發現硬化後之水泥糊體，其微裂不大於0.1 *μm* 時，可視爲不可滲透的，同時亦發現水灰比小於0.6之水

泥糊體在養治 90 天後將不含有大於 0.1 μm 之孔隙，因此一般良好搗實及養治情況下之高水泥含量，低水灰比及細粒料情況下之混凝土將不致有顯著之孔隙體積，而其微裂不大於 0.1 μm 。對於高強度之巨積混凝土構件，除非採取適當之預防措施，否則在熱脹冷縮之溫度應變下將產生大量之微裂，同樣地，蒸氣養治下之巨積混凝土，由於溫度應變之差異，將使混凝土更容易產生內部之微裂。

RC結構物，剛開始由於混凝土中之微裂爲非連續性因此鋼筋表面因無足夠之氧分子供應，故被保護著。然而未受保護之混凝土承受凍融反覆作用，氣溫、水溫及濕度之變化，反覆及衝擊負荷，硫酸鹽及鹼性物質反應生成物及受到波浪作用冲走水泥合成物等現象發生而使混凝土微裂及透水性有增加之趨勢，一旦孔隙及微裂連接成爲連續性之網狀，則氧分子易於侵入鋼筋上因而加速腐蝕，在此必須再次強調，對腐蝕有顯著影響者並非龜裂之寬度，而是龜裂所含蓋之面積，特別是與鋼筋表面鄰接之面積，此點相當地重要。

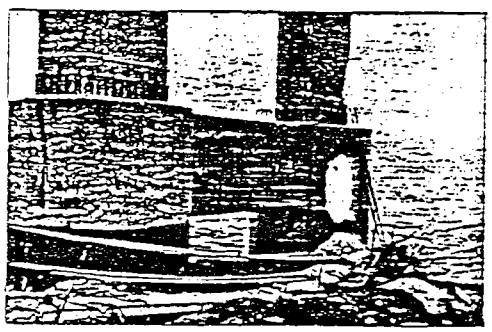


圖四　龜裂一腐蝕互制模式

由上述分析R.C結構物中鋼筋之腐蝕所需之條件可得出混凝土龜裂與鋼筋腐蝕互制之模式如圖四所示，圖中可知由於混凝土微裂之面積增大，或其他原因（例如水泥糊體被冲走…等）而使混凝土滲透性加大，此爲鋼筋發生腐蝕之先決條件，一旦腐蝕加速後，由於腐蝕反應之生成膨脹物將使微裂區擴大，因而產生更多有助於腐蝕進展之有利條件，最後可導致鋼筋與混凝土嚴重地損害。

五、模式之現場驗證

上述有關龜裂一腐蝕之模式係經過現場驗證得之，最近美國加州San Mateo-Hayward橋上有些三角拱梁由於混凝土龜裂及鋼筋嚴重腐蝕（圖五）而必須加以修護，這些梁係於1963年以高品質混凝土澆置的（其水泥含量爲370 kg/m^3，水灰比爲0.45），縱向鋼筋係採用大號之束筋，爲梁底部排列多筋之RC梁，其損壞處僅發生於受海水潑濺之梁底部及迎風面上，尤其發生於預鑄蒸氣養生之梁上，而同樣在17年前現場澆築，自然養生之同品質RC梁並無龜裂與腐蝕之跡象顯現，很顯然地蒸氣養生之大型RC梁，其中鋼筋量多，而不同部位處熱脹冷縮之速率變化大，因此產生相當多之微裂而在受風面端由於嚴重的風化，使得微裂變爲連續之裂紋，進而使鋼筋發生腐蝕及混凝土產生嚴重地龜裂。

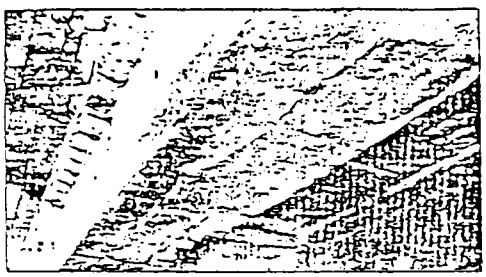


圖五　美國San Mateo-Hayward橋上龜裂之三角拱梁

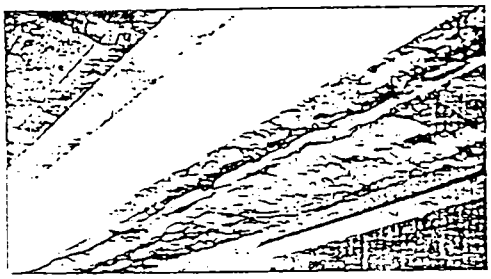
在1979年二月美國華盛頓州Hood運河的一座浮橋，其西半部在一次暴風侵襲下發生斷裂及下沉，隨後檢查橋上仍漂浮之東半部而揭露出在浮橋之甲板上有些地方已發生嚴重的腐蝕。此浮橋甲板經過長期之乾濕反覆作用和由於日曬及冷風吹所造成之溫度變化作用，除外最嚴重之腐蝕區係長期承受張力與壓力之反覆作用下，導致橫向裂紋延伸至甲板上。同時或隨後發生嚴重之腐蝕於與此裂紋平行之鋼筋上

，此乃腐蝕如何跟著微裂及結構物龜裂而發生之最佳實例。

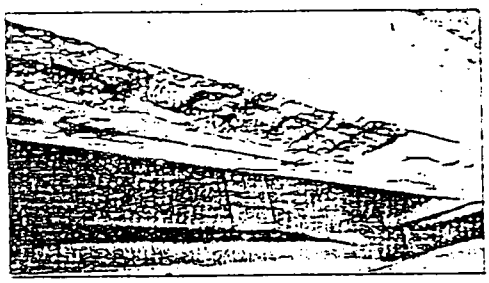
另一實例爲美國東海岸之一外海結構物預力混凝土樁經過溫度變化及凍融反覆作用後混凝土發生嚴重之龜裂，因此混凝土中之鋼筋開始腐蝕，同樣地檢討美國加洲、挪威、丹麥等地許多R.C結構物損壞個案(4)發現鋼筋腐蝕並非混凝土龜裂之唯一致因。



①含有海水之風雨侵入混凝土龜裂處。其硫酸鹽與水泥中C_3A發生化學作用產生Ettringite，體積變成二倍，平滑的混凝土表面，被腐蝕鬆散成爲粉狀，失去混凝土原有強度。



②被腐蝕鬆散之混凝土，一塊接一塊剝落。含海水之風雨更進入一層腐蝕，使龜裂之裂縫越來越大。



③因腐蝕加劇，裂縫越來越大，並一再延伸，被腐蝕之混凝土變成粉狀失去強度，因此整個保護層剝落使鋼筋露出。



④混凝土被腐蝕，剝落前與剝落後之對照。



⑤露出之鋼筋受含鹽份之風雨加劇生銹，以電氣化學之原理使全面生銹。生銹之鋼筋體積增大，加快混凝土之漲裂剝落。



⑥生銹之鋼筋從表面一層一層變成碎片（如從上面第2根與倒數第2根）粗大之鋼筋如此越來越小，喪失原有之直徑及強度。

圖六　澎湖跨海大橋腐蝕實況

六、國內海洋混凝土工程腐蝕實例（摘錄自文獻十七）

在國內澎湖跨海大橋發生嚴重的腐蝕現象如圖六所示，該工程於民國59年完工，民國60年通車，而於民國67年發現其中第16孔發生嚴重腐蝕，當時依傳統方式打除重建針對其餘各孔選擇第一至26孔以化學塗料塗裝，民國70年及72年分別逐孔檢查，結果發現其腐蝕相當嚴重而造成混凝土龜裂損壞，現正逐段改進中，公路局林岡照段長根據其多年檢查及維修澎湖跨海大橋之經驗提出以下六點看法(17)：

1. 沿海R.C結構物之腐蝕，外在之環境因素較結構物本身材料之因素影響爲大，例如必須考慮距離海水面之高差，以免海水潑濺，以及風力所產生之加壓程度。

2. 沿海R.C結構物完工後應即作防蝕設施，比較已經腐蝕後才維護之保養工作簡單，節省經費，效果好。

3. 沿海R.C結構物腐蝕均發生於拉應力部位（如樑板），而在應力部位幾無類似情形（如橋墩柱）。

4. R.C結構物主要材料如水泥係化學材料，而腐蝕亦屬化學作用，因此需土木水利化工材料等技術人員參與研究處理，才能有完善之考慮。

5. 既有之結構體之腐蝕情況若僅以肉眼觀察及經驗評估無法客觀深入，有待高科技之探測如掃描式電子顯微鏡了解腐蝕機理。

6. 沿海R.C結構物之施工、檢查、維修國內欠缺可行規範動輒打除重建，殊爲可惜，盲目提高混凝土品質要求亦爲浪費，宜早建立可行規範供工程界參考。

公路局交通工程課莊秋明課長提出其他的看法如下：

混凝土由於本身有孔隙存在，吸水性及毛細管作用等使得外面之水份或水汽易侵入孔隙中，同時施工品管控制難達100％，R.C保護層厚度不易全部維持一定標準，因此造成厚薄不均，有時由於意外漏漿而造成「蜂巢」產生更多更大之孔隙，另外完工後因地震或外力之作用而使原已腐蝕之因素更爲擴大、加速鋼筋之腐蝕。所以有些R.C或P.C橋涵位於易腐蝕環境下而尚未作防蝕工作，雖未達設計年限，但其內鋼筋已腐蝕，有鑒於此，世界各先進國家對此均事先採取防蝕設計，以維構造物安全及節省不必要之鉅大重建費，台灣爲一海島，四面環海，其腐蝕環境較其他國家更爲嚴重，各先進國家對易腐蝕之環境下R.C橋涵之防蝕設施，除施工採用抗硫酸鹽水泥外，並嚴格施工品管，鋼筋保護層加厚、鋼筋塗裝、混凝土加防腐劑及作陰極防蝕等方法予以防蝕，尤其海上橋樑設計上採用撓度小之橋樑如R.C較P.C爲佳，若P.C橋樑中採用高拉力鋼線施拉預力（高拉力鋼線預力橋撓度較大）並採用預力混凝土箱橋樑建造以減少撓度而防活荷重下裂痕擴大使水汽易於浸入而造成鋼筋之腐蝕，更應考慮將橋面提高以防海水浪花波及與水汽侵入混凝土內部，同時應建立防蝕規範與標準、引進防蝕技術，解決目前國內海洋環境下之嚴重腐蝕問題。

而台灣沿海港灣結構物腐蝕環境比澎湖更惡劣，更應加速港灣R.C結構物腐蝕之研究，提出解決對策。

七、結　論

對於經過良好過實養治之高品質混凝土，因孔隙及微裂所佔之體積甚小，故其滲透係數甚低，處於海洋環境下特別是在潮汐區有無數的物理及化學作用一直在進行，對微裂及孔隙有不斷擴大之趨勢，而導致混凝土之滲透係數增大，成爲鋼筋腐蝕之主因，而只有在混凝土之滲透性大至可讓氧分子侵入相當大之範圍，才可能發生顯著之腐蝕，由於鋼筋之腐蝕將使混凝土之微裂擴大，而使滲透性增大，故龜裂與腐蝕互制，互爲因果難以分開。

龜裂與腐蝕互制模式說明了許多現行海洋R.C結構物之設計與施工規範，此乃根據現地經驗而得，並非龜裂寬度與腐蝕有直接關係存在，其重心在使混凝土滲透性儘可能降低，而減少混凝土微裂之擴大及水泥漿被沖走之趨勢。

參考文獻

1. Atwood, William G., and Johnson, A. A., "The Disintegration of Cement in Sea Water." Transactions, American Society of Civil Engineers, V. 87, 1924, pp. 204-275.

2. Feld, Jacob, Construction Failures, John Wiley and Sons, New York, 1968, pp. 251-255.

3. Gerwick, B. C., "Durability of Structures Under Water." Proceedings, AIPC-FIP-CEB-RILEM-LASS Symposium on Behavior of Concrete Structures in Service (Liege, June 1975), University of Liege, 1975, pp. 255-268.

4. Mehta, P. Kumar, "Durability of Concrete in Marine Environment — A Review." Performance of Concrete in Marine Environment, SP-65, American Concrete Institute, Detroit, 1980, pp. 1-20.

5. Beeby, A. W., "Concrete in the Oceans," CIRIA/UEG Technical Report No. 1, Cement and Concrete Association, Wexham Springs, 1980 77 pp.

6. Powers, T. C., "Structure and Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste." Journal of the American Ceramic Society, V. 41, No. 1, 1958, pp. 1-5.

7. Mehta, P. K., and Manmohan, D., "Pore Size Distribution and Permeability of Hardened Cement Paste." Proceedings, 7th International Congress on the Chemistry of Cement (Paris, 1980), Editions Septima, Paris, 1980, V. III, pp. 1-6.

8. Concrete Manual, 8th Edition, U. S. Bureau of Reclamation, Denver, 1975, p. 37.

9. Gerwick, B. C., "Practical Method of Ensuring Durability of Prestressed Concrete Ocean Structures." Durability of Concrete, SP-47, American Concrete Institute, Detroit, 1975, pp. 317-324.

10. Gjorv, O. E., and Vennesland, O., "Diffusion of Chloride Ions from Seawater into Concrete." Cement and Concrete Research, V. 9, No. 2, Mar. 1979, pp. 229-238.

11. Erlin, Bernard, and Verbeck, George J., "Corrosion of Metals in Concrete—Needed Research." Corrosion of Metals in Concrete, SP-49, American Concrete Institute, Detroit, 1975, pp. 39-46.

12. Hime, William G., and Erlin, Bernard, "Chloride and pH of Concrete," Concrete Construction, V. 26, No. 9, Sept. 1981, pp. 768-769.

13. Tremper, Bailey, "Corrosion of Reinforcing Steel, Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials, STP-169A, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1966, p. 224.

14. Tuutti, Kyosti, "Cracks and Corrosion," CBI Research No. 6:78, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, 1978, 52 pp.

15. Okada, K., Kovanagi, W., and Miyagawa, T., "Chloride Corrosion of Reinforcing Steel in Cracked Concrete." Proceedings, RILEM International Symposium on Offshore Structures (Rio de Janeiro, Oct. 1979), Pentech Press Limited, Plymouth, Devon, 1980, pp. 1.61-1.78.

16. Shermer, Carl L., "Corroded Reinforcement Destroys Concrete Beams." Civil Engineering — ASCE, V. 26, NO. 12, Dec. 1956, pp. 56-57.

17.港灣技術研究所"港灣鋼筋混凝土結構物防蝕技術研討會資料彙刊"港研所專刊第23號，民國74年8月。

本文譯自Mehta P.M. and Gerwick,Jr. B.C " Cracking-Corrosion Interaction in Concrete Exposed to Marine Environment" Jcurnal of CONCRETE INTERNATIONAL DESIGN & CONSTRUCTION OCT. 1982 vol 4 No 10 pp.45 — 51.



出席一九八六年海洋混凝土國際會議及會後考察報告

林維明

一、參加會議經過

一九八六年海洋混凝土國際會議（MARINE CONCRETE '86 INTERNATIONL CONFERENCE ON CONCRETE IN THE MARINE ENVIRONMENT）是由英國混凝土學會（THE CONCRETE SOCIETY）主辦，美國混凝土學會（THE AMERICAN CONCRETE INSTITUTE）及英國土木工程學會（THE INSTITUTION OF CIVIL ENGINEERS）協辦於本(75)年九月廿二～廿四日在倫敦LONDON TARA HOTEL 舉行。

大會鑑於自第二次世界大戰期間興建之海堤，北海海域石油探勘採用混凝土重力式平台，及荷蘭等國家大防洪計劃等採用混凝土結構物之豐碩經驗，證明混凝土可在最惡劣之海洋環境下耐久。因此近海或外海工程中，混凝土為最佳選用材料，然而因其處於海洋腐蝕環境及海浪動力負荷下易受破壞。因此召開本次會議，其目的在集合國際上從事有關港灣及外海結構物設計，施工、使用及維修之專家學者，齊聚一堂，交換研究及工程經驗心得及意見。同時安排展示最新發展之產品，維修及工程技術服務，及檢測儀器以提昇混凝土工程技術。

本次參加會議者約有三百人，其中英國佔大多數，其餘為美國、加拿大、法國、西德、日本、挪威、荷蘭、比利時、丹麥、瑞典、義大利、西班牙、紐西蘭、南斯拉夫、芬蘭、愛爾蘭、伊朗、印度、突尼西亞、沙烏地阿拉伯、巴林島、西印度群島及中華民國等24個國家，亞洲以日本人較多18人組團參加，國內與會者僅筆者壹人，本次論文集中共有43篇文章限於時間僅22篇可在大會中口頭發表，同時有四篇做壁報式展示發表17篇僅能在論文集中發表，論文共分四個主題設計、使用性能，施工與維修等。各主題皆以兩篇受邀論文開場，口頭發表，每篇文章均具有相當高之水準。

筆者文章「雙丁塊破壞動力試驗」被安排在第二天下午五～六點以壁報式發表，與會人員對我從事雙丁塊研究提出許多問題，均對我們以試驗室試驗結果與現場實際破壞情形相印證，相當切合實際，有幾位顧問工程司專家及學校教授表示他們將參加下(11)月九～十四日在台北圓山大飯店舉行之第廿屆海洋工程會議，屆時將至本港灣技術研究所及各港務局參觀，同時任職於美國MOBIL R&D 公司之DR. HOFF（此次他代表ACI出席）亦表示他回美國要寄一些有關美國所作大型雙丁塊現場破壞試驗之研究報告給我參考（已收到見附錄2：參考資料77），英國倫敦希國大學正在修博士的錫蘭MORATUWA 大學，教授HETTARACHCHI 亦希望我回國後能複製數張有關雙丁塊試驗設備，現場破壞及試驗結果之幻燈片贈送予他，因為他想申請作這方面之研究經費，因此本人深信此次參加會議做了一次成功的學術性外交。

本會期間之社交活動，於第一天英國混凝土學會會長DR. JAN BOBROWSKI 夫婦邀請與會人員出席在 INNER TEMPLE HALL 所辦之雞尾酒會，每天中午在會場並備有便餐，自備飲料互相交誼，同時會場上有展示櫃台，參加展示廠商有13家，大家可以互相交換研究及工程經驗心得。

二、與會心得

宣讀之論文分為四個主題（SESSION）設計、使用性能（PERFORMANCE）施工及檢查，維護與修補等，概述如下：

㈠設計：

第一天討論設計問題研討內容包括英國及歐洲海洋混凝土研究回顧，日本現今海洋混凝土結構物之研究，海洋混凝土合作研究計劃英國外海結構物設計規範修正，學式預力混凝土結構物之結構行為，岸壁承受撞擊

省交通處港灣技術研究所研究員兼港工材料組組長

設計，海洋混凝土結構物受嚴重的損害之鑑定與修護。

㈡使用性能（ PERFORMANCE）：

第二天討論主題爲海洋結構物使用之性能，研究之內容包括在海潮地區海洋混凝土結構物長期使用性能之檢討；在不同天氣環境條件下，海洋混凝土結構物之使用性能；北海中外海混凝土結構物使用情形；龜裂混凝土暴露在海洋環境下鋼筋腐蝕情形；在SHOEBURYNESS 地方做海洋暴露試驗研究混凝土耐久性，海洋混凝土之滲透性，水壓下混凝土強度降低現象，鋼筋混凝土在海洋條件下之疲勞特性及外海混凝土結構物在動力負荷下之耐久性等。

㈢施工：

第三天討論施工主題爲水中混凝土檢討及較大海洋Ｒ．Ｃ結構物施工。

㈣檢查與維修：

此爲最後一個研討專題，包括海洋R.C結構物腐蝕診斷與修護方法檢討，海洋R.C 結構物修理系統評估，紐西蘭石油碼頭R.C 樁修護實例及在潮汐區海岸R.C 結構物特殊水中修理技術等。

上述各篇文章摘要詳見附錄一，綜觀三天會期之論文發表可見在國外有關混凝土工程，研究之之重心分別爲腐蝕與耐久性佔40％其他結構，疲勞，檢測與維護各佔同等約20％，而由政府與民間企業合作支持，參加展覽之廠商13家均爲在混凝土工程新產品及維修工作有豐富經驗者，而他們均是有計劃有組織地執行大型研究計劃，所得到之成果可提昇工業技術水準，使工程經濟、安全與實用。

三、考察參觀活動

㈠劍橋大學冶金與材料系：

此次拜訪劍橋大學冶金與材料，與DR.G.T.BURSTEIN詳談有關腐蝕研究，工業材料研究所研究員楊淵洲正在那裡修博士學位另一位工材所研究員趙偉泰亦在該系短期進修，該所有一套特別儀器可在水中直接切割試體，有關腐蝕方面之研究以鋼結構爲主，此次參觀以實驗分析金屬腐蝕速率之極化曲線。

㈡曼徹斯特大學腐蝕防治中心：

此次拜訪接待者爲DR.J.D.SCANTLEBURY及DR.J.L.DAWSON現在該校唸博士者有彭裕民、蔡克群及施建志三人，該中心於1972年創立，13年來對工業界貢獻很大，此兩位教授一位專長爲塗裝，另一位專長爲鋼筋混凝土防蝕，我曾與他們交換研究心得，該中心並設有工業服務中心，可對外服務範圍包括：

1. 顧問及研究建議：有關現場調查評估及試驗室研究，包括混凝土之化學性與機械性分析、腐蝕電位圖測量陰極防蝕、修理評估混凝土包覆、電化學及超音波等非破壞性試驗及修理後結構物之檢查等各方面研究工作之建議。
2. 混凝土結構物檢查：該中心曾作過有關橋樑，土木工程港灣等工程腐蝕之檢查。
3. 訓練：中心可列出各種訓練及短期課程培訓有關之技術。
4. 採購：可協助定出試驗或調查所需儀器之採購工作。

㈢丹麥腐蝕中心（ THE DANISH CORROSION CENTRE）：

此次拜訪該中心副總裁MR.H.ARUP.研究部門主任DR.C.M.HANSSON 及研究員MR.TH.FRφLUND及MISS B.SφRENSEN該中心在混凝土防蝕工程上已經有十幾年之研究經驗，ARUP先生對於現場偵測相當有經驗，而HANSSON博士則對實驗相當內行，由於本研究所現正進行港灣R.C結構物耐久性研究，因此與他們討論許多有關現場調查及實驗之細節問題，得到相當滿意的答覆，她們亦介紹有關這方面之圖書及那些學者具有特殊之專長以及那些儀器之使用性能如何均有概括性之介紹。

㈣丹麥AALBORG大學土木系：

此次拜訪土木系主任HANS FALK.BURCHARTH教授，他是國際著名專家學者在雙丁塊研究方面很有心得，同時他亦爲丹麥政府及顧問公司、瑞典、英國……等國有關港灣方面之顧問，他指導我從事雙丁塊研究應從改變其形狀徑高比著手然後執行水工模型試驗；雙丁塊堡落於塊石基礎上及不同大小之雙丁塊自山坡滾下等在力學及水工方面試驗得出最理想之設計。

四、感想與建議

㈠本次會議所討論之問題均爲工業界所發生之實際問題，研究成果馬上可以應用，國內研究方

向應朝此目標進行，由政府、工業界、學術界共同努力投資研究。

(二)此次會議除地主國英國外，日本人參加最多，建議類似此類會議國內應多鼓勵工業界及學術界派員參加，可提高我國研究及工程實務水準。

(三)行政院科技顧問組正擬委託本所進行國內海洋鋼筋混凝土結構物腐蝕調查、剖析原因及提出研究進行方式，本次攜回資料可供參考，同時亦可與與會人員連繫，對推展將來之研究工作很有幫助。

(四)我曾問過丹麥腐蝕中心有關現場偵測或實驗室儀器以那種儀器最佳，他們說他們的儀器均由他們中心自行設計，自最簡單基本的一直努力到今天的成果，腳踏實地工作將可得到寶貴且有價值之研究成果。

(五)全民讀書風氣濃厚，在地下鐵車上隨時可看見大家手中拿著一本書或報紙吸收知識。

(六)重視生活品質：室內佈置，室外有花園或草坪，使人感覺心曠神怡。

(七)研究精神濃厚，作事認眞負責：例如大英科學館及大英博物館將各種科學之發展及文明演進很清楚地展示出來，而且均是免費供民衆參觀，教授可帶學生到該館教學；我曾到藥房買一種減肥藥，但是藥房有藥不肯賣，他認爲必須要有醫生之處方才能賣，若國內有這種負責現象，則不會發生毒殺兒童事件。

(八)重視水污染，歐洲目來水均可飲用；這方面國內有待加強。

(九)國內近年來生活水準提高，營養太豐富而造成許多文明病，國外在吃喝飲食方面都較簡單，建議國民應多花錢買書而不是買食品。

(十)本次會議發現歐洲及日本在混凝土工程方面非常重視，腐蝕及耐久性研究佔40.%，而結構、疲勞、檢測與維修三項各佔20%，而後三項均與腐蝕有關，然而國內土木工程中未開腐蝕防制學，混凝土工程中亦未談及防蝕，這方面希望國科會能帶動，使政府、工業界及學術界能重視支持它，而減少因腐蝕所造成結構上之損害，喚起全民對防蝕之熱烈關心，若防蝕技術能開發及應用於工業界，將爲我經濟帶來莫大之助益更可使工程保持安全、可靠及經濟實用。

五、攜回資料

本次攜回資料如附件(二)所示，尚有與會關心我們之專家學者將會陸續郵寄資料給我，幫助我從事有關此方面之研究。

六、致謝

感謝國科會對本人出席此次會議及赴劍橋、曼徹斯特及丹麥考察在旅費與生活費及註册費等之補助。

附錄(一)：一九八六年海洋混凝土國際會議宣讀論文摘要

一、英國及歐洲在海洋混凝土工程上之研究回顧

自一九六〇年末葉在北海發現石油氣起，生產平台起先使用鋼套式平台，然而自一九七三年第一座混凝土重力式平台（可兼作原油貯存用）在法國設計，挪威建造，安裝於挪威外海之EKOFISK 油田後至今已有15.座混凝土平台在北海使用中，其中10.座位於英國海域而另5.座在挪威海域，歐洲至少有五個國家參與這些工程之設計與施工工作，同時德國亦在波羅的海建造2.座淺海重力式平台。

北海所建造之平台，其水深爲100 ～ 150公尺，該處五十年復現期之最大波高約爲30.公尺，雖然混凝土工程在港灣及海岸工程使用之經驗已經相當長，且證明相當實用，然而在深海使用有些問題有待研究，例如混凝土平台中貯存相當熱之原油而引致溫度升降而造成混凝土龜裂問題，平台上操作引起重物墜落或船隻碰撞結構物所造成之災害等均未完全了解，衆所皆知海水中含有之氯離子對R.C結構物易發生腐蝕，此需研究靜水壓使海水滲透於混凝土中之問題。

近年來對於R.C及P.C所從事之研究工作，其動機爲工業界之需求及平台之巨額投資（每座平台工程費高達新台幣60億元），因此工業界本身已從事相當多與他們本身特別有關之研究專題，但有很多研究成果均爲業務機密。除此政府亦贊助研發工作，其目的除對外海結構物問題有更深之了解及確保其工程安全外，並增進工業界賺錢之遠景。這些研究計劃乃由工業界與政府合作，研究成果先保密一段時間後，經常公諸於世，本次會議乃介紹一些已可發表之研究成果。

除外海平台有關之研究外，尚有大量之其他海洋混凝土結構之研究工作而其中R.C 結構物因腐蝕所引起之維修研發工作特別引人興趣，研究成果中已建立在海洋條件下改良之修護之方法。爲外海結構物問題目的之研究成果亦與淺海及

海岸結構物有關，特別是腐蝕，耐久性維修等問題。因此雖然本文所敍述之研究計劃主要與外海工業有關，但其成果亦可廣泛應用於海岸結構物上。

外海混凝土結構物現已考慮使用於水深 340 公尺，因爲需考慮深水負荷及結構物總重限制以利施工，因此現致力於使用高強度及輕質混凝土，同時近年來石油價格降低，因此要求價廉之結構平台，故現致力於改進設計及材料之最佳利用研究，歐洲現正進行或剛完成的海洋混凝土之研發工作有下列六大計劃概述如下：

㈠海洋中混凝土（ concrete in the ocean ）研究計劃：

本研究計劃於一九七六開始，本年剛完成，耗資 131 萬英磅，由英國能源部及 34 個工業界單位贊助。研究目的在解決有關海洋混凝土石油生產平台及其他結構物設計，施工及長期使用結構行爲上之問題，共執行 19 個研究計劃分爲兩個階段進行，第一階段於一九七六開始於一九七九完成，第二階段於一九八〇開始，本年剛完成，第一階段有 9 個單位參與研究耗資 42 萬英磅，第二階段有 17 個研究單位參與，耗資 89 萬英磅，研究範圍可分爲四個領域：腐蝕及耐久性（ 40.% ）疲勞（ 23.% ）結構疲勞（ 23.% ）結構行爲（ 20.% ）及測量及檢修（ 17.% ）等。包括在潮汐區及水下R.C 結構物腐蝕 R.C 裂之疲勞行爲，溫差變化之影響性，平台上貯油槽受墜落撞擊所造成之災害，及結構物檢修技術。所有研究計劃由一個很小的管理委員會負責協調。

第一階段已出版 8 本研究報告，第二階段已出版 2 本研究報告，公開售購，而第二階段尚有其他報告將在一九八六～一九八八陸續出版，除外在研究期間亦經常在大型國際會議中發表。

本研究計劃成果現已用於修正美國能源部所定外海結構物設計及施工準則與規範中之混凝土部份。本次會議中另有三篇文章詳細介紹本計劃及疲勞與腐蝕研究成果。

㈡ARBEM 研究計劃（ ARBEM PROGRAMME ）

法國ARBEM 研究計劃於一九七八年開始，其目的在執行有關外海結構物設計，施工及行爲之研究，第一階段於一九八二年完成，部份成果已於一九八〇 & 一九八二在法國BREST 及 PARIS 舉行的BEHAVIOR OF CONCRETE OFFSHORE STRUCTURES 中發表，第二階段正在進行中，經費由法國政府及外海工業界贊助，主要研究六個專題，

①水中混凝土特性－靜水壓之影響性

主要調查孔隙壓對混凝土性質之影響。

②在海洋腐蝕環境下混凝土之耐久性

主要調查鋼筋防蝕方法包括鋼筋上混凝土覆蓋層性質改變之影響因子，表面層處理及其他鋼筋防蝕方法等。

③外海結構物混凝土配合設計與性質

主要目的在發展適合海洋結構物（ 例如貯油槽、浮式結構物及深海平台 ）使用之各種不同之混凝土性質，如開發輕質骨材及高強度水泥等。

④在反覆負荷及衝擊負荷下之結構行爲

調查與詳估在反覆負荷下結構疲勞及衝擊負荷下混凝土結構行爲，特別與建立合適之安全係數有關。

⑤在現有外海結構物安裝儀器，監視結構行爲。

⑥調查在極寒條件下混凝土之承受能力

目前第二階段之研究成果，尚屬業務機密，希望不久可出版。

㈢MATS研究計劃（ MARINE TECHNOLOGICAL RESEARCH （MATS） PROGRAMME）本計劃爲荷蘭政府與工業界合作，有關混凝土方面有四大專題，研究期間超過六年，總經費達數佰萬英磅，即

①混凝土力學：其目的在發展電腦程式解析複雜之結構構件行爲，由於現行設計規範中例如溫差影響性及反覆負荷尚未完全考慮，因此亦用試驗建立有關資料，作爲設計規範。

②混凝土疲勞：調查混凝土在隨機負荷下之疲勞行爲。

③外海混凝土結構物耐久性：調查混凝土之吸水性，特別輕質混凝土，有害物質（ 例如氯化物 ）侵入混凝土中對於混凝土及其中鋼筋之影響性，及檢查鋼筋腐蝕；表面龜裂及水中修護後使用之結構行爲現象。

④在北海作暴露試驗，製作許多混凝土試體置於北海不同水深下，經過二年及十年後取回試驗，可得出在海水長期高壓下之影響性之寶貴資料。研究成果部份已在一九

八五BOSS國際會議中發表，有些在CUR報告中敍明，另有許多成果尚在保密階段，希望不久能公開。

四COIN計劃

COIN(CONCRETE OFFSHORE IN THE NINETIES)計劃於一九八五開始，預定一九八七年完成，一九八八初業發表成告，經費爲65萬英磅，由英國科學與工程研究學會(SERC)能源部及工業界贊助，其目的爲提升材料、設計施工及修護技術，研究專題包含下列問題。

①結構形態：利用有限元素法發展細胞狀結構物(CELLULAR STRUCTURES)之經濟設計利用已發展鋼纖混凝土及鋼柱合成結構物可抗拒靜水壓力負荷之技術，現延伸研究此種結構承受局部負荷及衝力之影響性，若開發成功，則可供水中居住及深海結構物柱腿設計用。

②材料：利用高爐石，飛灰及矽酸塩取代水泥，其中一研究計劃爲調查由於取代水泥後所造成混凝土形態上之改變。當混凝土浸於海水中，表面效應及滲透性等對於耐久性控制相當重要，因此研究如何加強表面層有利之效果及發展新奇的系統以應混凝土滲透性在實驗室及現場測量。硫酸塩在貯油槽或外海結構物支腿上海流停滯區，可能分解細菌，本研究亦調查這些細菌活動之化學析出物對於混凝土耐久性之影響性。

③施工與維護：研究使用鋼纖混凝土於SLIP FORM施工，可減少R.C結構之龜裂控制，及研究PAPAFIL ROPES替代鋼纖於預力鋼索之使用以防腐蝕，另發展ACOUSTIC IMAGING技術檢測鋼筋及預力鋼索，倫敦希國大學正進行R.C試樣經過衝擊損傷後，再作修理之結構強度。大致而言，COLN研究計劃爲擴展目前欠缺資料而相當重要之研究領域。

五SERC對外海結構物灌漿之研究計劃

灌漿技術對混凝土結構物之施工及維護相當重要，此研究大計劃中有8個子計劃在英國幾個大學進行研究，於一九八五開始，預定二二年完成，由英國科會能源部及外海工業界贊助。

六VERITEC 研究

此爲挪威政府與工業界所贊助，包括下列專題：

①地震負荷下，外海結構物之延展性。

②高水壓對深水R.C 特性影響及發展最低鋼筋量需求之設計準則。

③在海洋環境下，輕質混凝土之耐久性及疲勞行爲。

④高強度混凝土(強度＞100MPa)長期置於深海中之 勞強度。

5)深海結構物(水深大於300M)水下修理技術。

七挪威正在進行之其他研究有下列：

①調查R.C在動力負荷下之腐蝕行爲：有些試體加陰極防蝕有些未加，有些置於水深20m之海中，二年後即使龜裂＞1 mm 未見腐蝕，另外檢查一組混凝土柱5 m高外徑60公分，半浸於海水中，兩個空心，其他實心者(含兩個輕質混凝土，每個柱體含不同鋼筋)作動力腐蝕試驗。

②挪威水泥與混凝土研究所亦進行相關之研究計劃如海洋結構物、龜裂寬度標準、纖維混凝土、水中混凝土、高強度混凝土、靜力及動力負荷下，結構物承受水壓之影響性等。

近十年來歐洲在外海混凝土結構物方面已經完成相當多之研究，且對於過去某些欠缺之資料能更爲了解，可作爲修正設計與施工規範依據。這些知識對於許多其他混凝土施工亦有類似問題發生，例如濱海工路橋樑和建築承受塩害(氯離子)亦被證明相當有用。雖然有許多成果目前尚屬業務機密，但將在最近幾年內公諸於世，這些成果可歸納如下，這些對於混凝土應用相關之領域有實質上之了解。

①腐蝕：海水中氯離子出現造成R.C之腐蝕，近年來研究證實浪濺區最易發生腐蝕，在完全浸於水中者不易腐蝕，即使龜裂相當大，因此似乎可以放寬在水下龜裂寬度限制及水泥覆層厚之要求，在另一方面，最近發現某些成果亦在本次會議中發表，即在浪濺區及潮汐區之混凝土可當作水下腐蝕之陰極，此效果之程度如何尚未定。

②疲勞：研究結果證實在海水中可降低鋼筋之疲勞年限，混凝土似乎僅在反覆負荷作用下，海水進出裂縫情況下，不易發生損害，而增加水壓對於疲勞性質上之影響性至今尚未完全確定。

③衝擊：最近研究結果已確定抗拒船體撞擊結構物或平台上重物墜落重擊平台上貯石槽之某些需求。然而許多試驗資料爲得自強度相當低之混凝土。

④溫差變化：現已有相當多之資料決定控制溫差變化（例如貯存熱石油所引起者）所造成之龜裂之要求條件。

(八)材料：大多數研究集中於高強度混凝土（50.～60.MPa）亦研究取代水泥之材料（如飛灰、高爐石等）而顯示這些填加劑效果良好。

在工程上現對於高　度混凝土（28天強度爲100 MPa）引起相當大的興趣，此經常可填加矽酸塩而得到，有關這方面之研究仍在進行中。

輕骨材混凝土在結構上及抗衝擊之使用上增加，其在海水中之耐久性及疲勞特性現仍在調查研究中。

現在所有外海混凝土平台使用上均相當好，僅有一些小問題，而這些問題都是當初在設計與施工時欠缺經驗與資料，然而近年來的研究計劃中有助於認可當初之假設條件。

未來外海混凝土平台，特別建在深海情況下者，激發對於材料與設計方法改進研究興趣，爲此目的所發展之技術有可能改善其他海洋混凝土結構物之設計與施工。

二、日本海洋混凝土結構物研究近況

日本海岸綫總長度約三萬公里，約有1000個港灣，海洋混凝土主要用於港灣之防波堤碼頭及護岸等結構物上，次爲跨海大橋、海底隧道及海上機場等，材料含普混凝土，R.C及P.C，而如今結構物漸往深海建造，爲抗拒暴風浪沖擊，及節省施工費用，曾研發一些新型結構物如下：

(一)弧型留有長縫之沈箱式防波堤：（圖一）

一九八五年在FUNAKAWA 港建造傳統性沈箱節省經費15.%，且可消波浪能量。

(二)浮式防波堤：（圖二）

在FUKUYAMA 港已有實例，成效良好。

(三)防海嘯防波堤：（圖三）

在KAMAISHI 灣NATION 大港計劃堤頭水深63公尺，使用此種有開孔之沈箱式防波堤可降低外力及堤址壓力。

(四)多孔式沈箱防波堤：（圖四）

沈箱面如同凹透鏡型，有開孔，波浪可穿過中空之防波堤往上衝，使波力減弱，穩定度增強。

有關海洋混凝土研究工作在政府機關，大學及工業界均大力加強，研究範圍包括材料特性（耐久性、強度水密性）及施工方法，日本港灣技術研究所於民國35年成立，該研究所在海洋混凝土研究已有25年以上之經驗，扼要介紹如下：

(一)設計：

在防波堤等港灣結構物設計均根據容許應力設計法（ALLOWABLE STRESS DESIGN METHOD）而現在深水防波堤預力混凝土構件或複雜形狀構件現引用極限情況設計法（LIMIT STATE DESIGN METHOD）考慮其安全性，此方法已由日本土木學會研究，現由港研所修正在STANDARD CONCRETE SPECIFICATION 將於本年內出版，在港灣結構物中將此方法納入新修正版的『港灣結構設計與施工基準』內將於最近出版

在港灣結構物設計上，需特別考慮下列各項加以研究：

1. 選定極端外力（波浪力或地震力等）以爲極端極限情況，可使用之極限情況及疲勞極限情況之校核用。
2. 爲結構物之耐久性需考慮R.C中混凝土保護層及允許龜裂之寬度。
3. 維護工作。

日本港研所在海洋混凝土耐久性研究上，執行時間已超過十年，各種不同水泥，保護層及拌合水種類，水灰比、養生條件及龜裂寬度等因素均考慮試驗，由於在破碎區及潮汐活動區最易發生腐蝕，因此在海水循環水槽可控制潮位變化情況下做試驗，發現氯離子含量隨所使用之水泥種類而變，目前繼續在現場取樣做耐久性分析。最新發展之混凝土結構物承受波力後其疲勞特性現均經過試驗，用極限情況設計方法校核疲勞性質，在水中之疲勞強度約爲空氣中之0.7 ～ 0.8 倍，而破壞次數約爲0.1倍，在試驗中均量測龜裂發展及龜裂寬度大小。

港灣混凝土結構物施工後耐用一段時間後，常因鋼筋腐蝕，保護層剝落，日本運輸省，曾調查103個混凝土碼頭，惡化條件，發現超過20年以上之水泥板有不少的裂縫，現研究防蝕方法包括下列各項。

㈠評估結構物惡化程度及其強度之方法研究，主要考慮含塩量測定，混凝土強度決定及殘留結構物強度之計算。

㈡使用環氧基樹脂（ EPOXY RESIN ）或同等品塗於混凝土表面或注入於太大的裂縫中，其效果如何之研究。

㈢在銹蝕鋼筋除銹及用環氧基樹脂或同等品塗於鋼筋上或更換鋼筋等方法，效果如何之研究。

㈣在相當惡化之結構物，加鋼板補強方法之研究。

㈤研究防止混凝土結構物惡化之方法。

日本港研所在這方面已經做了25年，有相當多的資料，了解混凝土變壞之現象及原因，每一情況之修護工作各有不同，很難有系統的選擇最合適之修護工作，因此經濟且有效之維護工作有待未來繼續研究。

海洋混凝土與海水接觸且在惡劣之海浪及暴風浪沖擊下，因此在材料上需求輕質骨材，高強度及抗腐蝕者，新材料如纖維混凝土、礬土纖維（ ARAMID FIBERS ）為最有發展潛力者，另外鋼鐵與混凝土合成之複合構件（ HYBRID MEMBERS ）亦在發展中，在工程上要求經濟及安全，因此為解決技術上之問題，研發工作一直在努力進行中。

三、海洋混凝土合作研究計劃

本文為本次會議第一篇文章詳細介紹有關海洋混凝土合作研究計劃，概述如下：

㈠腐蝕：

※在海水中R.C 結構物鋼筋腐蝕之基本機構。

※鋼筋保護層防蝕能力。

※海洋混凝土結構物最有可能發生腐蝕之部位。

※在英國PORTLANT 及LOCH LINNHE 兩地作混凝土試體在海水中之暴露試驗。

※定出在水面下，無法以肉眼檢查R.C腐蝕之條件。

※海水中混凝土龜裂控制及保護層標準。

㈡結構設計方面：

※理論上設計圓柱及板殼單元（ SHELL ELEMENTS）以抗拒靜水壓力強可能發生破裂之方法研究。

※溫度變化對於不同配筋量之混凝土石油貯槽之影響性。

※貯油槽屋頂承受重物墜落之災害研究。

㈢疲勞：

※外海及近海混凝土結構物疲勞特性。

※R.C 及P.C 在海水中之疲勞強度。

※混凝土修護段之疲勞現象。

※無鋼筋情況下之疲勞特性。

※承受REVERSE BENDING 段之疲勞特性。

㈣檢查與維修：

※調查現有外海及近海混凝土結構物腐蝕情形。

※檢查測定電位及電阻技術。

※電位及電阻測定技術發展。

※在水中混凝土表面所發現之損傷現象歸類。

本研究計劃將於明（ 1987 ）年完成，報告提出結論可對現有及未來混凝土結構物釋疑，應用成果於其他研究，及確認海洋混凝土結構物之設計、施工、檢查及維修尚存在的問題。

本次會議另有兩篇文章介紹腐蝕及疲勞，因此有關結構設計方面之重要結論有14 點在本文中敍明。

四、英國外海結構物設計規範修正

英國能源部於1974年出版一本書「外海結構物安裝設計與施工基準」（ GUIDANCE ON THE DESIGN AND CONSTRUUCTION OF OFFSHORE INSTALLATIOM ）定出施工程序及工程技術設計標準，由於工程技術一直在進步與發展，因此該基準亦隨之繼續修正與更新，所以本文乃就該基準中有關混凝土結構物最近修正之情形加以討論。

在最近幾年內有不少研究工作在進行且有豐碩之成果如第一篇文章介紹，其中最重要的是CONCRETE IN THE OCEAN 這個研究計劃，因此就這些研究成果及北海油田現有18 個重力式平台，其中英國有10 個平台有現場實測之資料，根據這些現有成果就極限情況設計（ LIMIT STATE DESIGN ）衝擊、疲勞、材料耐久性、保護層龜裂寬度、材料品管及混凝土強度等各方面加以修正，本文敍述修正過程，對於某些較重要者特別詳加討論並檢討其研究與考慮背景。圖五為潮濺區各種參久性參數各國規範限定值之比較表一為鋼筋混凝土及預力混凝土保護層厚度之比較。

五、浮式預力混凝土結構物之結構行為

本文報導西德在北海安裝，SEADECK試驗結構物之情形，該結構物為兩個30.m長20.m寬6.m高之平底船型，用預力混凝土建造，中間用鉸鏈連結或固定在一起，而利用單腳錨繫纜

系統（SHIGLE ANGLE LEG MOORING SYSTEM（SALM）固定於海床上（圖六），安裝地點在北海HELIGOLAND島西北方40海哩，在1982起至今經過五年之試驗在文中介紹有關該浮式結構物之設計程序，施工材料與在海中之施工方法，安裝試驗計劃及試驗結果，最後評論此種結構物在海岸環境下之結構與施工材料行爲。

此類浮式預力混凝土結構物可供海水淡化，化工廠，石油氣生產；暫時貯存設備，亦可當作外海工業中支援補給站或工作人員暫時居住場所，而使用混凝土較使用鋼結構爲施工材料有下列優點：

*混凝土比鋼鐵在海洋中較不易發生腐蝕。
*混凝土防火災性較佳，對於化工廠易發生火警相當重要。
*使用混凝土，建造費較經濟。

在海洋中波高大於12.7 m，週期7～12 Sec. 均能忍受，證實設計與技術觀念之可靠性。德國混凝土學會會於本年5月完成，有關此平底船（PONTOONS）得出下列結構物與材料性質。

*目視檢查所有混凝土內外表面情形僅在船頭平板處有發現少許龜裂，可能爲船碰撞，其餘均未發現有任何損壞或龜裂。
*用試驗錘測定混凝土強度證實所使用之高強度水泥（抗壓強度爲9 000Psi）暴露於海中五年，強度仍相當高，而在水綫上1公尺處所測定之強度值較高於1公尺處者爲低，此顯示在潑濺區混凝土強度受影響降低，根據最近一些研究成果建議使用高爐石水泥或卜特蘭水泥其C,A含量高（3％≦C,A≦ 10％）可減少氯離子侵入混凝土內造成鋼筋之腐蝕。
*碳化深度＜1mm。
*保護層僅極5處30mm，其餘均爲30～40mm，施工品管控制良好。
*混凝土水密性高，氯離子入侵困難，僅有2～3支鋼筋因保護層不足發生腐蝕現象。

因此證實此種浮式預力混凝土在海洋環境下有無法淺駕之優點即無腐蝕，在海水中耐久性好，操作可靠性良好，且維護費低，由於這些試驗所得之經驗證實此種結構物若設計適當，可在海洋環境中適用，對於固定使用之錨碇結構物而言，此種結構物與鋼結構比較，有甚多之優點。

六、岸壁承受撞擊設計

海岸R．C結構物常受船隻碰撞而發生破壞，本文介紹新發展的一種橫向鋼筋配置（圖七）可增強岸壁受撞之剪力阻抗有關之研究。

七、海洋R．C結構物承受重物撞擊所造成之災害鑑定與修理

本文乃介紹英國能源部委託英國倫敦帝國大學所作有關在CONCRETE IN THE OCEAN PROGRAMME中有關重物撞擊海洋結構物災害鑑定之報導，歸納海洋R．C板承受撞擊之種類（含重物墜落、船隻碰撞、波力等）及如何保護現有結構物加強混凝土厚度則太貴或增加本身自重，研究特殊材料護舷吸收能量，同時歸類災害形成並討論水中修理之研究計劃其中利用破壞性試驗（含剪力、壓力、劈裂、張力滲透性、及吸收性）決定使用材料之效力，使用材料含似水泥（CEMENTITIOUS）材料及環氧樹脂，在空氣中曾做了許多試驗，而現正進行水下修理試驗，所使用之水必須模擬海水，水溫控制在7～8℃完全在水中執行修理作業，完全符合外海作業之條件執行。

八、在海灣地區海岸混凝土結構物長期使用性能之檢討

本文檢討於一九七六～一九八四年在英國調查一些港灣混凝土結構物，如防波堤碼頭、橋樑距海岸300公尺外之混凝土油槽等有關素混凝土或P.C、R.C 等施工材料之使用情形，發現大多數R.C均於施工後短時間內發生小至表面風化，大至有剝落現象之混凝土惡化現象。大多數鋼筋腐蝕起因爲混凝土龜裂及剝落，有許多案例顯示鋼筋斷面損失，特別在有局部點蝕（PIT）地方最顯著。惡化之情形依其暴露位置及情況而定，例如潑濺區或大氣塩份侵蝕地區較爲嚴重。素混凝土亦受大氣腐蝕發生風化及龜裂現象，但其程序不如R.C，必須經過詳細調查惡化致因，才能提出特殊修護對策定期檢查及提早預防可減少腐蝕率及可能導致之損害，CIRIA 曾出版一本有關耐久性不佳致因及因應對策之書「THE CRITIA GUIDE TO CONCRETE CONSTRUCTION IN THE GULF REGION」該書乃根據施工經驗，對混凝土材料、配比、施工方法養生等均有規範，最近一九八〇～一九八四英國新建海岸R.C結構物均根據此準則執行。設計施工時依據合適之規範，配合良好之監工嚴格控

制水灰比、溫度、水泥含量……等，可保持結構物之耐久性。圖8 爲調查 400 個底板（ slab ）統計龜裂情況與保護層之關係，圖 9 及圖 10 爲在各種不同地點下，氯化物侵入保護層之情形，而圖 11 爲使用銅／硫酸銅半電池測定一橋墩上腐蝕電位曲綫，可定出腐蝕嚴重區域之範例。

九、在不同天氣環境條件下，海洋混凝土結構物之使用情形

大多數海洋結構物都使用卜特蘭水泥製作之混凝土，有些可使用長達百年，而有些則可能在數年內即發生惡化，若在設計與施工時能詳加考慮天候及海洋環境之影響，則可減少損壞發生，本文重心在討論海洋環境下各種不同天候下之影響性，先將全世界天候變化分爲四區乾熱、濕熱、溫帶及冰凍等，然後檢討目前對惡化機構及個案研究並提出經驗與建議可供未來海洋混凝土結構物設計與施工之準則。

天候對混凝土之影響性如拌合時使用骨材、用水等環境因素；溫濕度循環影響混凝土之機械及化學性，霜害及鹽害等物理性影響。因天氣對混凝土使用性有關故爲求其耐久性必須注意下列各點：

*使用高強度混凝土（要求水灰比低R.C爲 0.42 素混凝土 0.47 ） 可減少霜害及凍害保持耐久性。

*避免斷面太薄，需用粗短結實之牆或無向下負荷之板，此點尤其對乾熱及冷凍區特別重要。

*使用富級配例如R.C 強度高於 370 Kg／m^3 素者爲 350 Kg／m^3。

*考慮使用輸氣劑可減少海水之滲透性、霜害及鹽害。

*用抗硫酸水泥（ TYPE Ⅴ)於素混凝土，而且在結構物設計上儘可能考慮用素混凝土建造。

*R.C 結構物使用TYPE Ⅱ 抗硫酸水泥。

*鋼筋儘可能埋於混凝土中較深處，可與乾縮控制標準相比較，任何天候下，保護層厚度可使用 75.mm ，乾熱區 100 mm ，經常浸於含鹽量低之海水中可減少 25.mm。

*抗硫酸及高炉石水泥較卜特蘭水泥爲佳。

*工人之技術及監工標準必須要求很高，此對搗實及養生特別重要。

*製作混凝土及養生時間周界溫度對其影響性必須特別注意。

圖12爲混凝土結構物裂縫的歸類，實際發生分析如表二示如圖13.，表三爲材料與施工技術對於海洋環境下 R.C 結構物耐久性之分析結果。

十、北海中外海混凝土結構物使用情形

本文檢討北海 16.座外海重力式混凝土平台，使用時承受非期望之負荷及環境因素所造成之災害問題。

北海在此方面之工程技術一直在進步，每一座新的平台均根據現有結構物之設計與建造經驗修正，克服困難，務使使用期間沒有惡化及減少維護工作。

有關非期望負荷包括水壓力差、重物墜落、錨碇、船碰撞、火災、地震、海床沖刷及基礎沉陷等，而有關環境所造成結構物行爲變化如凍融、海洋化學侵蝕性，R.C腐蝕，海洋污物成長等。

北海混凝土結構物使用高品質，強度爲 450 ～ 600 Kg／m^3，浪濺區之水灰比限制爲 0.4 ，在該區之結構物外面加包覆，所以無凍融傷害，海水中硫化物對混凝土可能造成化學性侵蝕災害，然而由於所使用之混凝土品質佳，故無劣化現象報導，雖部份混凝土有被溶解之現象，但其強度沒有太大之影響，DNV 諸納在德國、英國挪威等地所作有關外海R.C 結構物發生腐蝕之研究結果得出下列現象。

*R.C 腐蝕需Cl^-侵至鋼筋處才發生，此依保護層及混凝土品質性質而需 3.～15.個月，在開始時若龜裂寬度大之情況，則在短時間內就會開始發生腐蝕現象。

*鋼筋剛開始發生腐蝕過後，其腐蝕率主要由混凝土品質控制，而與裂縫之寬度無關。

*腐蝕生成物如鎂化物或鈣化物等，留置在裂縫上將阻止腐蝕繼續進行，因此腐蝕率將隨時間遞減，且經過 1～2 年後幾乎完全停止。

*最後腐蝕率很明顯地與裂縫寬度無關，此現象至少若負荷爲靜力，龜裂寬小於 0.5 ～ 1.0 mm 爲如是。

DNV曾安裝陰極防蝕於外海結構物上觀測陽極之消耗量來證實上述之結論，由於北海使用高品質混凝土，保護層厚度夠，及考慮使用壽命短，故無鋼筋腐蝕之事例報導。

十一、龜裂混凝土暴露在海洋環境下鋼筋之腐蝕情形

本文爲報導英國CONCRETE IN THE OCEAN 研究計劃中，其中三個小計劃委託HA-

RWELL 腐蝕服務公司在 PORTLAND 港中之海水試驗室做了兩個，而另一個是由WINPEY試驗室在 PORTLAND 港作海岸暴露試驗執行之情形。

通常R.C 受混凝土之鹼性（ PH = 12.5 ）保護此鈍態可能受碳化（ PH 值降低 ）或 Cl^- 影響而破壞，在相當乾之混凝土或完全浸於水中之情況下很少發生腐蝕，後者乃因溶氧量受限，使陰極反應無法進行，因此僅在半浸於水中情況，最易發生腐蝕，因此本文考慮混凝土未龜裂，人工龜裂或眞正龜裂（ 圓柱及石板 ）（ 圖14. ）等情況，浸於水中試驗其中鋼筋發生腐蝕之現象，所得到之結論如下：

㈠在水中混凝土上有龜裂發生嚴重腐蝕似乎僅在所有的電位均在鈍態區內才可能發生，本計劃長期測量電位得出 Ag / AgCl 參考電位在－500 ～－ 700 mv 區間可能係由於裂縫寬大，而易引起腐蝕，但腐蝕率相當低。若 Ag / AgCl 參考電位低於－ 800 mv 則腐蝕較爲嚴重，必須做好防蝕工作。

㈡試驗發現裂縫與鋼筋排列爲垂向，裂紋＞ 1mm，保護層40.mm ，並無顯著之腐蝕發生，即使 Cl^- 進入鋼筋處亦如是，在此種情況下即使陽極極化亦如此，然而若裂縫與鋼筋排列爲同向，則將易造成腐蝕，而裂縫若小於 0.6mm 則腐蝕現象不嚴重。

㈢在堅實之混凝土中之鈍態鋼筋已被證明可對於長期浸於水中之混凝土龜裂下鋼筋腐蝕提供有效之陰極。在潮汐帶易發生腐蝕，而永久浸於水中者不易發生腐蝕，此結論明顯地推論爲在水中混凝土受損傷之裂縫下發生腐蝕與鋼筋混凝土交界區之表面積比值若高時，則腐蝕較嚴重，因此在後海潮差大之地區，有很嚴重之腐蝕現象，然而在外海浸水面積相當大，因此腐蝕情形並不嚴重。

圖 15.及16.爲在海中試驗所得之電位與電流隨時間變化之情形

十二、在SHOEBURYNESS 地方所作海岸暴露試驗研究混凝土耐久性

本文爲報導英國BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT 公司爲了評估卜特蘭水泥替代材料如飛灰、高炉石熟料及輕質與重質骨材等耐久性在塞晤士河口 SHOEBURYNESS 作海岸曝露試驗，所得結果作爲英國混凝土結構使用標準之依據。

十三、海洋混凝土之滲透性

海水對混凝土之滲透性爲控制其耐久性之因素，本文介紹有關這方面之研究成果，發現滲透率隨時間而遞減，期望在這方面之發展有助於開發選用透水率低耐久性高之材料。圖17.爲測量水泥漿試樣受海水中氯離子擴散之設備及圖18.爲擴散率（ 滲透率 ）與時間之關係。

十四、水壓下，混凝土強度降低之現象

混凝土之外在條件和它的組成成份對於其強度佔有同樣之重要性，例如我們必須注意水灰比及養生條件一樣，本文爲報導在深海水壓強度大之情況下，混凝土強度降低之現象，試驗發現在 600 BAR（ 相當於 6000 公尺水深 ）下，混凝土抗壓強度減少率至少爲10.%亦有超過80.%之現象，主要依所使用之強度試驗條件而定，而即使在300公尺水深下亦有強度降低之現象，同時亦發現在強壓下有相當可觀之微裂發生。

十五、在海洋環境下，R.C 結構物之疲勞特性

海洋R.C結構物承受風浪等嚴重之反覆負荷而產生往覆應力，有關R.C 結構物之疲勞特性研究文獻不多，本文爲第一篇文章所述英國„CONCRETE IN THE OCEAN " 研究計劃中之一部份，爲發展有關海洋R.C結構物疲勞設計規範所作之系列之試驗，包括兩個子計劃共執行之年其中一由 JOHN LAING DESIGN & DEV.負責，共製作51根 R.C梁研究在各種環境條件，反覆頻率及應力下之試驗，得出應力與反覆次數關係之 S －N 曲綫。同時亦研究 R.C經修護後及加陰極防蝕後之耐久性，亦包括五支預力梁之研究，第二個子計劃由GLASGOW大學負責研究反覆彎矩（ REVERSE — BENDING ）下，R.C梁在海水中之耐久性。

主要爲了解腐蝕之影響，本文提出一些疲勞設計曲綫，顯示在海水環境下，R.C中鋼筋疲勞行爲有很嚴重地影響，龜裂下疲勞強度將顯著地減少，試驗資料仍不夠，有待進一步多研究。圖19.爲 Liang所得之 S - N 曲綫，而圖20.爲 Glasgow 與 Laing 曲綫之比較。

十六、外海混凝土結構物在動力負荷下之耐久性

本研究爲挪威能源部與民間企業界贊助由

DNV 所執行之計劃，於一九八三開始研究各種海洋R.C 結構物在不同之暴露區之陰極極化行爲及R.C 中鋼筋之陰極防蝕所需之電流之需要量。研究結果發現：

*每天高低潮關係電流變化值約爲2倍，季節性變化由於氣溫之關係亦爲2倍，由於在潑濺區（潮汐區）氧氣及氯化物易穿入裂縫及孔隙進入鋼筋外而影響之電化學反應，因此陰極防蝕所需之電流量比完全浸於海水情況下爲高，故若未考慮潮汐／潑濺區之電流及鋼筋之確實面積，現有重力式結構物陰極防蝕系統電流低估2～3倍。

*使用輕質混凝土及用SCOTOCHKOT 213（3M產品）包覆鋼筋很顯然地可減少陰極極化之電流，輕質約減少60%，包覆鋼筋約減少90%。

*在潮汐／潑濺區混凝土表面塗裝SCTCHLAD 5857（3M產品）對於陰極極化電流僅減少約20%。圖21.爲各種試體在不同之環境下電流之比較。

十七、水中混凝土

英國混凝土學會自一九七一年出版有關水中混凝土之技術報告後，不論在材料及澆置技術方面均有進步，本文乃英國混凝土學會最新研究之成果及技術介紹。

十八、最新巨大海洋混凝土結構物施工技術

自一九七一年北海EKOFISK混凝土貯油槽建造後，北海現有16.座已建造，3座正施工，將於民國76～78年內完成，例如現GULLFAKS 平台水深達216公尺，排水重1.4百萬噸，海床下基礎要打22公尺之混凝土樁，因此本文介紹打樁，控制圓形模板及巨大模板系統施工及操作技術。

十九、海洋R.C 結構物腐蝕診斷與修護方法檢討

爲解決此問題，必須對損壞原因及程度和針對問題採取有效之補救之道有充分之了解，因此需進行下列工作：

*財務上考慮：很明顯地，要執行一個詳細之非破壞性測量計劃花費相當多，但是有了這些資料才能了解惡化原因與程度，未來結構行爲若不作診斷，雖經修補，馬上又要變壞，比較上這方面花費少，但對補修工作收獲却很大。

*測量調查：本工作分爲三個階段，現場目視初步測量，非破壞性詳細測量及實驗分析，初步測量目的在確定做完整診斷測量所需之程度，而詳細之測量規劃可以很經濟地獲取所需之資料。測量技術之發展使得不增加診斷費用而能完全地了解結構條件，例如現在發展可同時在現場測量腐蝕電位儀器比以前定點測量時間上節省很多。

*資料分析：診斷及資料分析第一步是需對所使用之技術及所得之結果有充分之了解，定出結構物好壞程度（損壞無法修理、可修理、尚未損壞，但有腐蝕活動及尚未腐蝕但需偵測），根據過去測量經驗及現有R.C 腐蝕科技發展知識定出非破壞性試驗，結果是因混凝土品質或由鋼筋腐蝕所致，例如測量自混凝土保護層內氯化物含量，最大值發生於保護層中間而非在表面，最初這種現象解釋爲表面之氯化物被海水沖去或濾取之故，現在認爲是碳化所造成的，因此碳化試驗對於耐久性分析相當的重要，即使不讓氯化物進入R.C 中，若鋼筋外有碳化繼續進行腐蝕現象仍無法停止。另一例子，根據ASTM C876－80 所定腐蝕風險標準，在英國所作之測量結果並沒有惡化之現象，因此必須多收集資料，詳細分析。

*偵測：在結構物施工前後或修護後可安裝偵察儀器調查結構物行爲及惡化情況，測微電子儀器（MICRO ELECTRONICS ）可測得環境（天氣因素、進入結構物程度）及結構反應，例如降露與大氣對R.C 腐蝕有影響，然而每天又受溫度而變，若安裝偵測儀器監視可減少人力之浪費，英國亦設計一種測定表面濕度與混凝土阻抗及腐蝕率之現場偵測儀器及在修護處檢測發展不同氯化物情況下犧牲陽極之防蝕方法等。

*使用年限預測根據實測資料判斷惡化程度，何時損壞才會顯著，惡化發展機構及控制因素，例如在乾濕情況試體重之0.4%之氯離子將於數週內進入20～60 mm 之保護層，完全浸於水中之R.C 結構物可能逾十年仍無惡化現象，綫性極化偵察器可偵測腐蝕率，使我們更充分了解腐蝕運動機構及所造成之損壞率。而自開始腐蝕至達到相當程度之災害大都是由於鋼筋處供氧量充足所致。

*修理：局部惡化僅需替換該修理之部位即可，故必須研究自開始腐蝕至破壞之進展精確地估

計惡化程度及速率，以作爲修護策略依據，惡化程度包括不需修理留作監視，可用防護處理，有斑紋需局部粉飾，局部地區結構需加強需替換損壞構件，需作陰極防蝕，或需破壞及提出改建計劃等情況，若考慮修理必須考慮下列問題：結構設計是否鋼筋用的太多，重新研究負荷分佈及那些構件是多餘的，結構物需修理嗎？負荷如何傳至修理部位上，許多黏合修理材料在呆重下常無法受力，彈性模數低及變形率高，因此難以承受負荷必須詳加考慮。

如今有許多之修護解決方法出現，儘可能地考慮選擇，若因維修時間長而影響使用所延誤之損失應在修理方法之決策上權衡得失決定。因此修理策略必須在有限之預算架構上針對某特定結構物特殊地點環境下採取最經濟可行之技術，環境因素包含相對溫度，溫度季節性變化溶氧及氯化物侵入鋼筋處程度，科技如混凝土配合設計，使用水泥種類腐蝕機構，非破壞性現場偵測技術發展，兩方面配合才能預測損壞程度結構分析及採取最佳之修護方式。圖22爲現場腐蝕測定儀作業情形，圖23爲用現場腐蝕儀測量（ Ag/AgCl ）與半電瓶（ $Cu/CuSO_4$ ）比較，圖24爲碳化剖面圖，圖25灯塔內部在海水面附近所測量之等電位綫。

二十、海洋R.C 結構物修理系統評估

在海洋環境下選擇適當之修理系統標準，須考慮下列因素：

*易於應用：例如易於填於混凝土與鋼筋之小縫隙或凹形缺口剝落處，黏著而不跌落（ SLUMP ）。

*與修理部位底部原結構有握裹力。

*空間穩定及耐久性：養生時不會收縮膨脹，故空間變化與原結構相似。

*可抗拒海洋環境所造成之災害：例如不受海水沖刷影響。

*使用可保護鋼筋防蝕之材料。

爲了評估各種修理系統之優劣，英國環境部 BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT 曾執行本研究計劃在一九七七～一九七九共製作 110 支長方形柱體（ 400 mm 高 125 mm 見方 ）（圖26.）R.C 之保護層厚 12mm 及 25 mm挖出兩個V形凹痕剝落處安裝各種修理系統，（ 圖27. ）然後安裝於英國南方一碼頭潮汐帶上作曝露試驗，結果發現OPC 水泥漿加上一種樹脂類SBR配方最爲耐久，所謂OPC 係泰晤士河谷砂（ 粒徑小於 5 mm ）骨材 5～10 mm 、水灰比 0.5 ，共經過 6.5 年之試驗，本試驗工作目前仍繼續在進行。

廿一、紐西蘭石油碼頭R.C 樁修護實例

本文報導紐西蘭煉油廠碼頭於一九六三年建造之 282 支 R.C樁係用海砂建造，強度爲 3000 PSI 其中有60%在轉角及潑濺區有損壞現象而於 1980 / 1981 對其中 174 支加用環管（ COLLAR ）修理（ 圖28. ）其中 97 支並用 VANDEX×74 MARINE （ 係一種水泥與灰泥合成之稀泥 ）包覆另有20.支用樹脂EPOXY 包覆試驗到目前爲止，使用情況相當良好。

在附近 1 km 外一港灣碼頭亦用海砂，強度爲 5500 PSI預力樁，蒸氣養生於同時建造，但僅一九八〇年在現場製作之冠牆需修理其他結構行爲良好，可見混凝土品質良好及使用預力之優點。

同時紐西蘭混凝土研究學會最近對於混凝土透水性所作之研究發現早期濕養生（ EARLY WET CURING ）可減少透水性，養生後第三天及第四天可減少透水率的 3 倍（ 圖29. ），此發現加強混凝土先驅者曾說過早期養生爲達到海洋混凝土耐久性一最重要之因素。圖30.示在牆上有熱管之情況下，氯化物含量較高，故易使混凝土發生剝落。

廿二、在潮汐區海岸R.C 結構物特殊水中修理技術

本文介紹荷蘭在 EASTERN SCHELDT三角州建造之暴潮堤（ STORN SURGE BARRIER ）一些碼頭損壞修理情況，該堤現仍在施工中，將近完工由於其使用年限爲 200 年，需特別控制有關修理之品質及耐久性。故文中詳細報導損壞原因及水下修理技術之研究及施工方法等。圖31.示水門凹進處之保護設施，而圖32.爲受損壞情形，圖33.爲設計一水流導管，以便潛水人員可進入進行修理工作，而圖34.爲修理之程序。詳請參見原文。

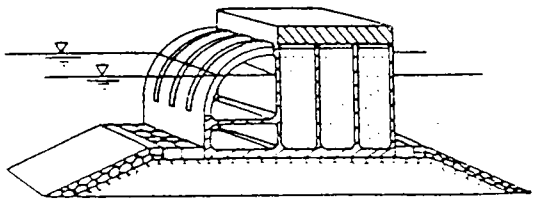


Fig. 1 Arc-shaped slit caisson

圖 1

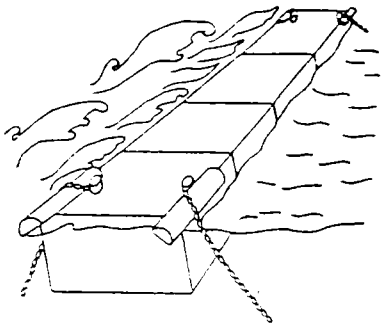


Fig. 2 Floating type breakwater

圖 2

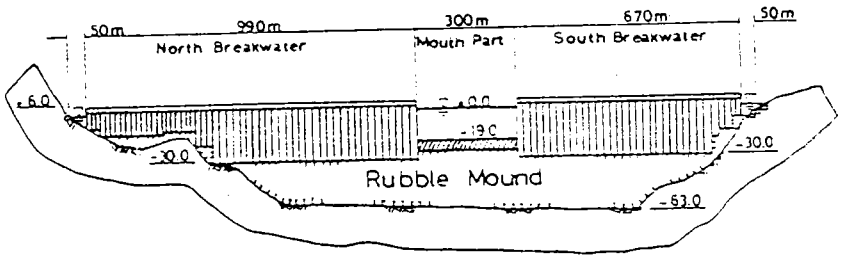


Fig. 3a Transection view (provisional)

圖 3a

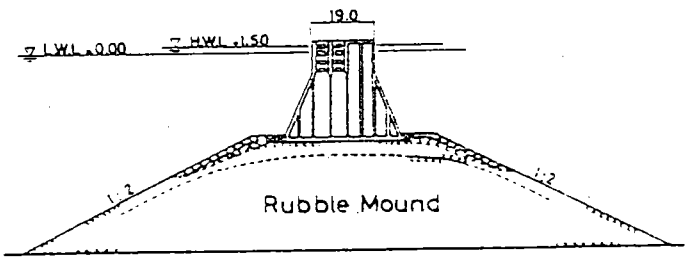


圖 3b

Fig. 3b Cross-section view (provisional

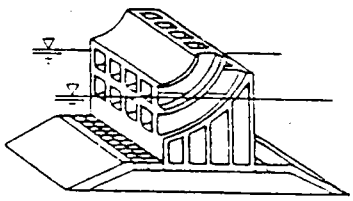


圖 4

Fig. 4 Multicellular caisson

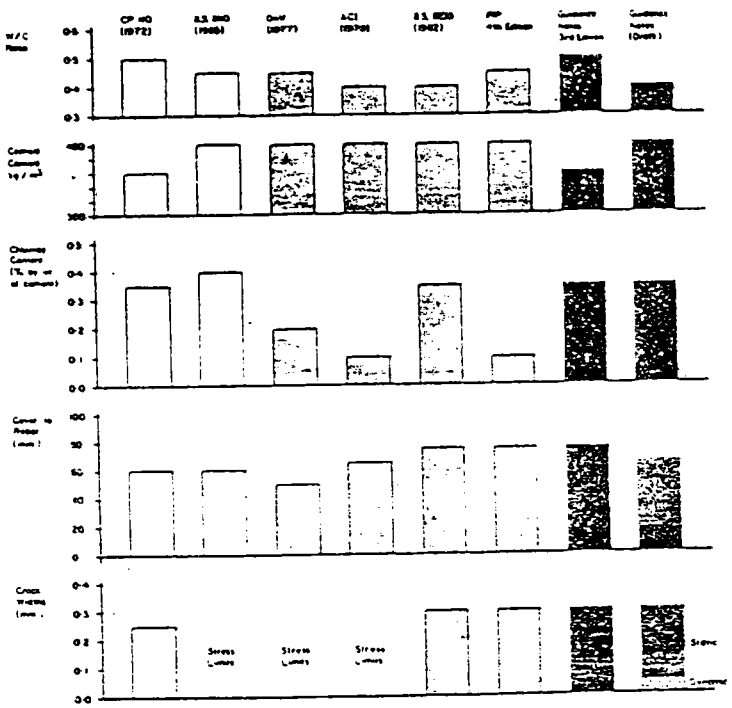


FIGURE 5. DURABILITY PARAMETERS FOR SPLASH ZONE

TABLE 1: COMPARISON OF COVER REQUIREMENTS

	NOMINAL COVER TO REINFORCEMENT (mm)								
	DEn 3rd Ed	DnV	Lloyds	FIP 3rd Ed	FIP 4th Ed	BS 8110	BS 6235	ACI	Draft Guidance
REINFORCING BARS									
(a) Submerged	60	50	60	60	50	60	60	50	45
(b) Splash	75	50	75	75	75	60	75	65	70
(c) Atmospheric	75	40	75	75	75	60	75	50	55
PRESTRESSING TENDONS									
(a) Submerged	75	100	75	75	65	60	75	75	45
(b) Splash	100	100	100	100	90	60	100	90	70
(c) Atmospheric	100	80	100	100	90	60	100	75	55

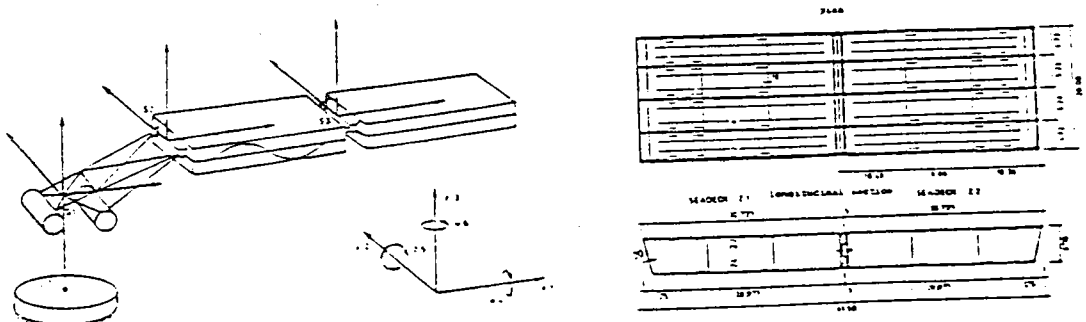


圖 6　SEADECK 試驗結構物

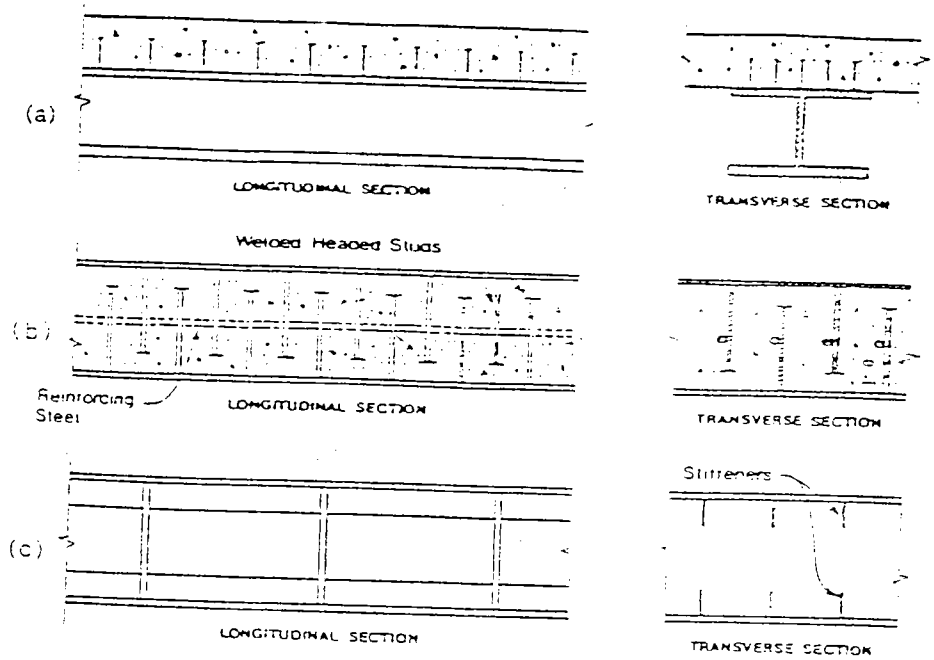


Figure 7 Forms of composite construction

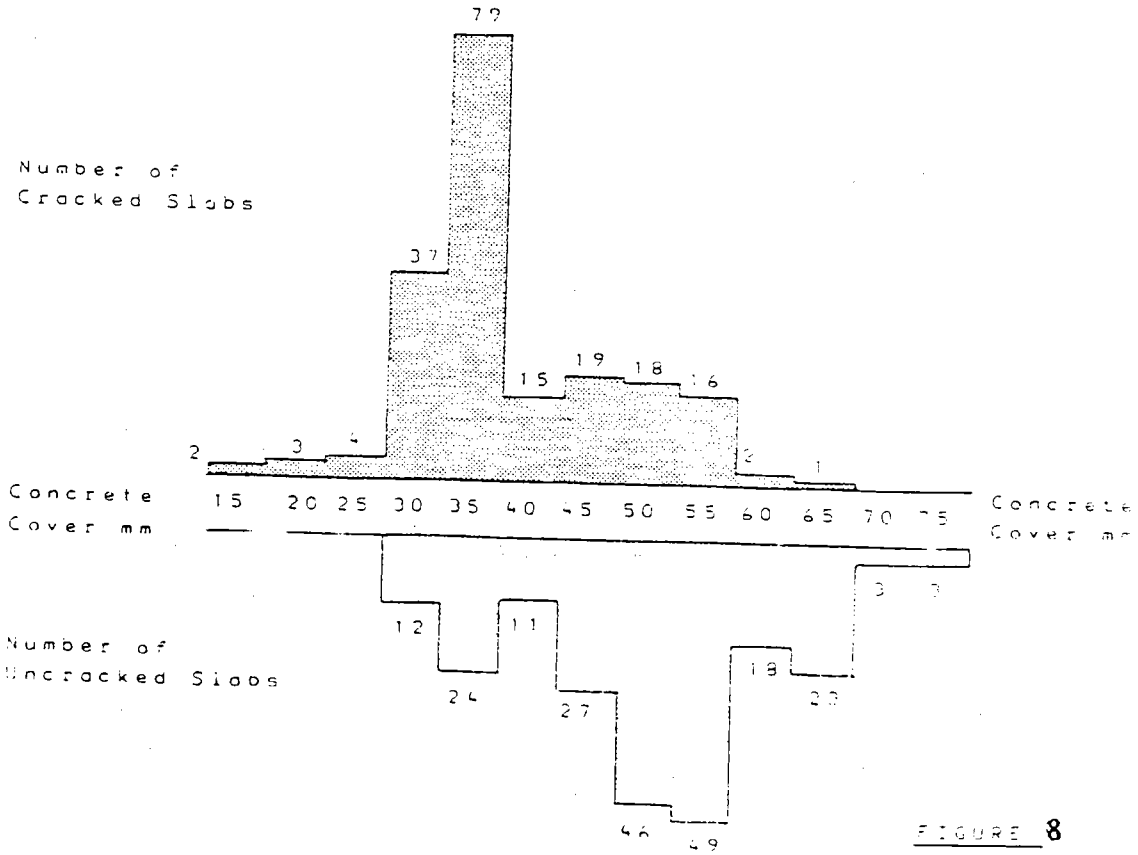


FIGURE 8

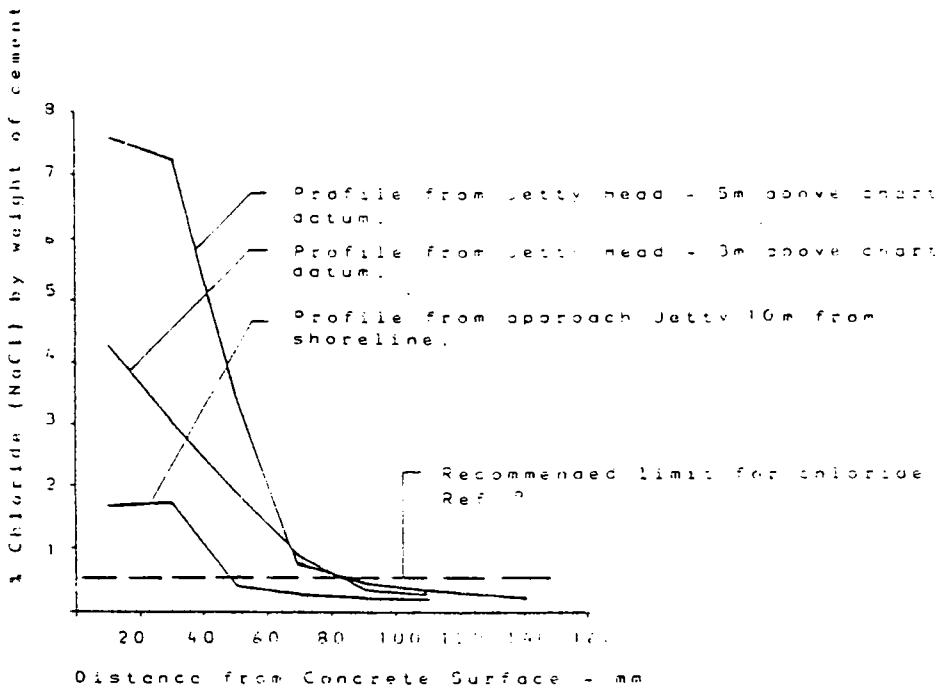


FIGURE 9

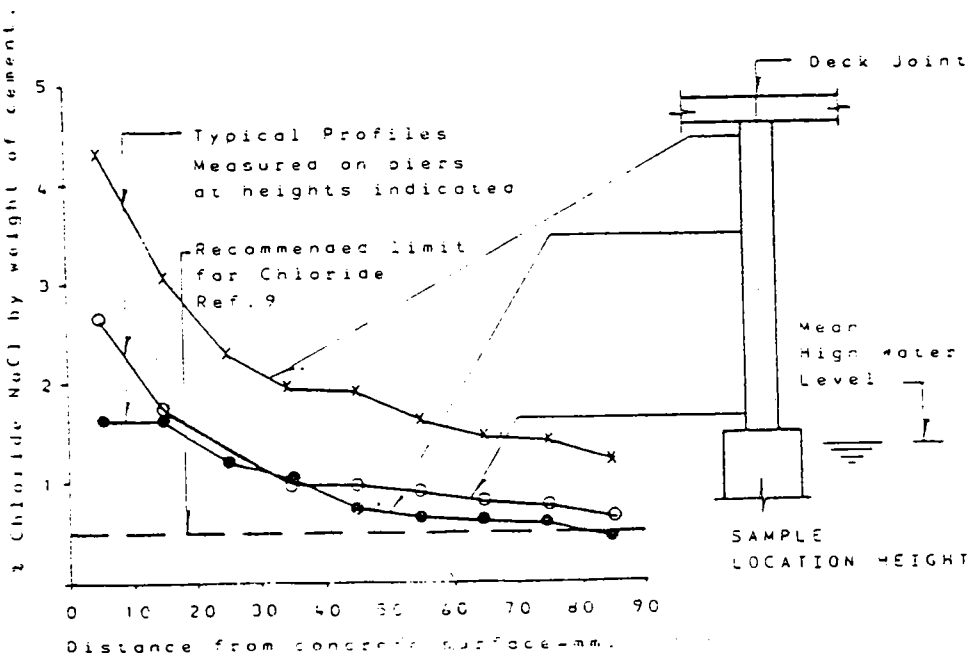


FIGURE 10

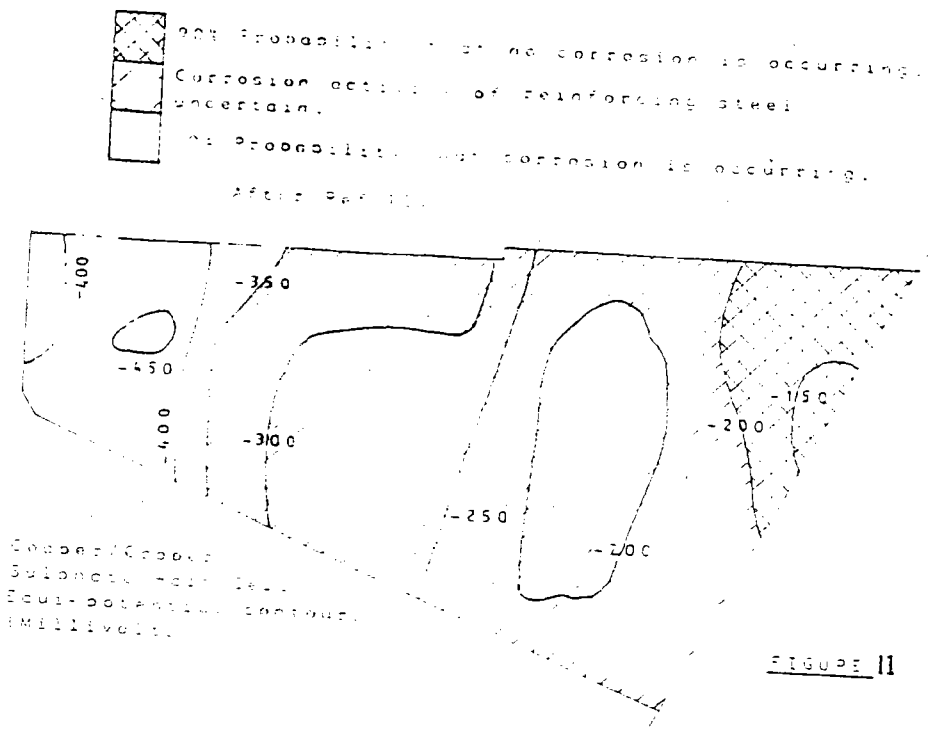


FIGURE 11

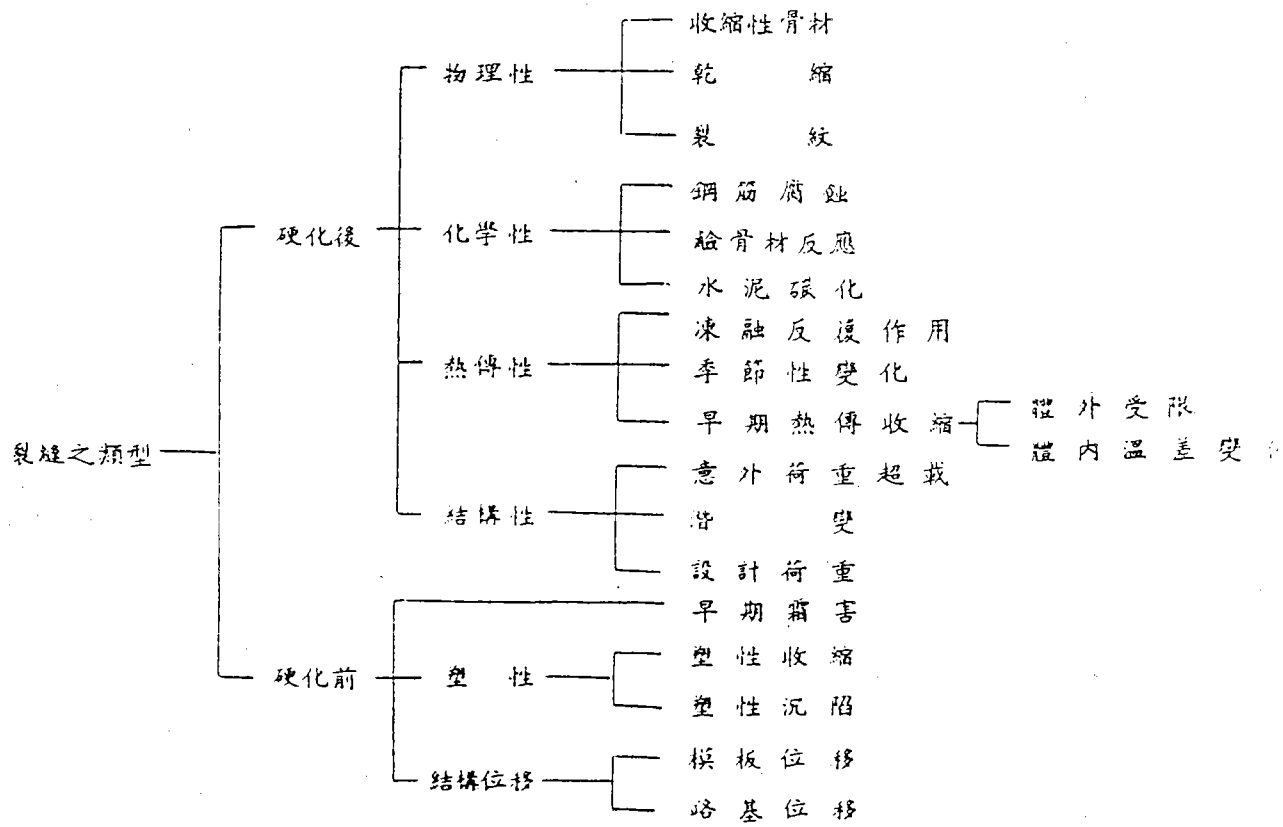


圖 12　混凝土結構物裂縫的類型

表二 實際發生裂縫之歸類（非結構性）

裂縫類型	代號參考圖示	細分	普通發生之位置	主要成因	次要成因	解決辦法	暴露的時間（施工後起算）
塑性沉陷	A	排筋通常	深梁斷面	過度泌水	早期快乾情況	減少泌水（搗氣或再振動）	十分～3小時
	B	彎曲	柱頂				
	C	版厚變化	格型或格子型版				
塑性收縮	D	斜角	路面及版	早期快乾	泌水早退	改善早期養護	卅分～6小時
	E	遮擋	R.C.版				
	F	排筋通常	R.C.版	同上加上鋼筋太近表面			
早期熱收縮	G	外部抑制	厚牆	發生過熱	快速冷卻	減熱或/及隔熱	1天～二、三週
	H	內部抑制	厚版	溫度變化太大			
長期乾縮	I		薄版（或牆）	填縫不足	過度收縮及養護不足	減少及改善養護	數週～數月
裂紋	J	附隨模板	露面混凝土	不洩水模板	言配比及養護不良	改善養護及拋光	1－7天（有時較晚）
	K	泥漿混凝土	版	過度表面拋光			
鋼筋層蝕	L	自然	柱及樑	保護層不夠	混凝土品質不良	減少表列致因	超過2年
		氯化鈣	預鑄混凝土	氯化鈣過量			
驗骨材反應	N		潮濕區	反應骨材加上高鹼性水泥		減少表列致因	超過5年
化學侵蝕	O	水下基礎	牆墩及柱	CO_2 Mg^{+2} 離子 SO_4^{-2}	混凝土品質不良	改善混凝土品質	超過5年
物理性磨損	P	水面上下	牆墩及柱	波浪、砂、礫石浮冰之作用	骨材及混凝土品質不良	改善骨材及混凝土品質	超過5年

表三　材料與施工技術對於海洋環境之R.C結構物耐久性分析結果

現　象	立即顯示結果	中期顯示結果	與不良施工技術導致之結果	暴露於海洋環境（潮汐帶及飛沫帶）
骨　材吸水性高	工作度損失 用水量需求增加	收縮量增加	由於養護及拌合用水量控制不良導致龜裂及透水性增加	鹽、水、空氣經裂縫、結構孔隙侵入助長生銹及冲蝕
健 度 差	由於鹽侵蝕及凍融作用導致表面迅速風化	鋼筋有效保護層減少 ·	養護不良，弱質母體促使迅速剝落	鹽、水、空氣易於侵入，助長生銹及冲蝕
級配不良 含泥量高 形狀不佳	拌合粗糙度增加 用水量需求，塑性沈陷	乾縮增加 收縮裂縫	由於養護及用水量控制不良使裂縫增加	鹽、水、空氣侵入裂縫助長生銹及冲蝕
氯含量高	鋼筋鈍態膜破壞 收縮量增加	鋼筋開始生銹		鹽、水、空氣易於侵蝕鋼筋及加速裂縫之生成
硫含量高	石膏膨脹 鈣　石形成 有時遭致鹼性反應	脫落及保護層減少 混凝土劣化及有效保護層減少 脫落、有效保護層減少	高水灰叱及弱質母體擴大早期影響	同上，混凝土易受外部硫化物侵蝕
鹼性反應	骨材膨脹	脫落、碎裂減少有效保護層	由於養護及用水量導致裂縫增加	鹽、水、空氣助長鋼筋腐蝕及加速裂縫生成
施工技術 養護不良	塑性收縮 水化不全	裂縫 混凝土易透水		鹽、水、空氣能易於達到鋼筋及引起腐蝕與冲蝕現象
搗實不全	水泥浮沫 冷　縫 蜂　巢	混凝土孔層及減少有效保護層 減少有效保護層 減少有效保護層		同　上

在澆注期間，若高溫及吹風則將使惡化加劇。
相對濕度高，則可降低此種不良效果。

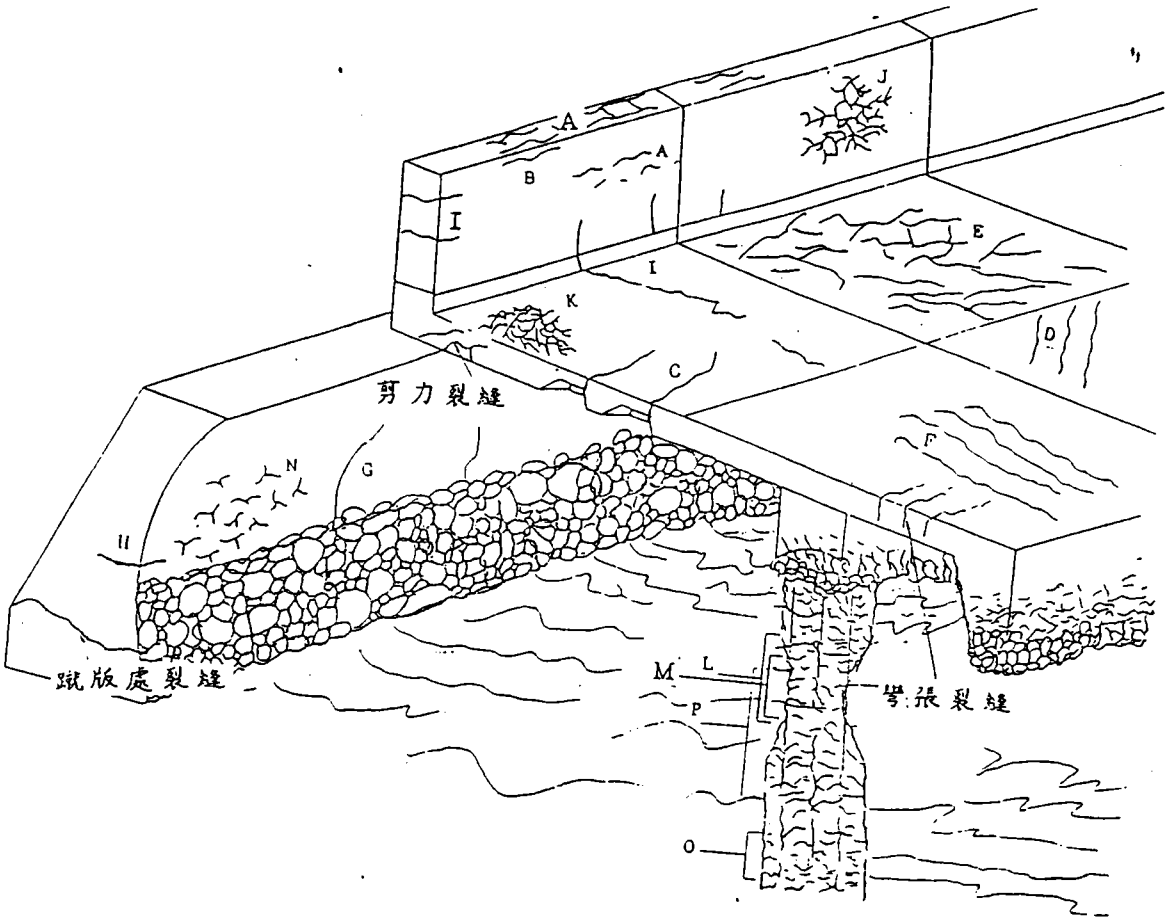


圖 13　海洋混凝土惡化機構

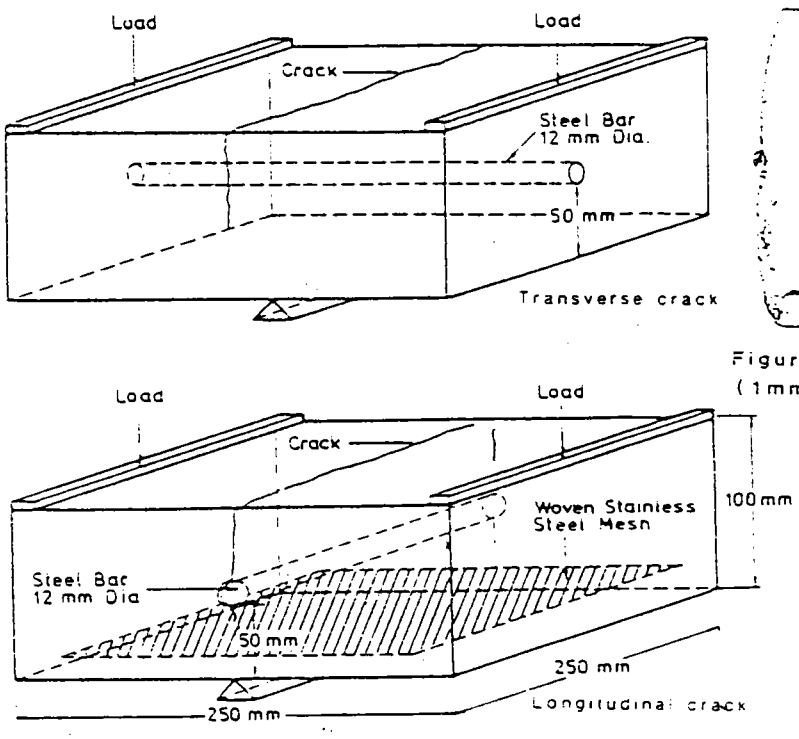


Figure 13a Cracked slab specimens

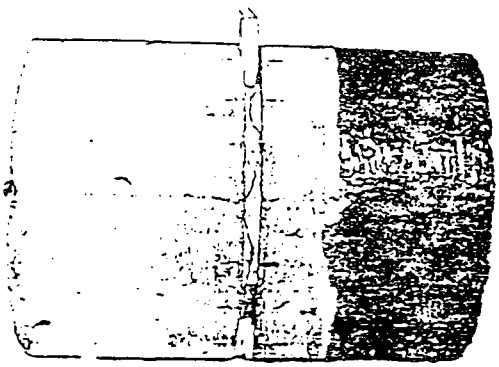


Figure 13b. Cylindrical specimen
(1mm.crack-partially prepared)

圖 14　龜裂混凝土腐蝕試驗試樣

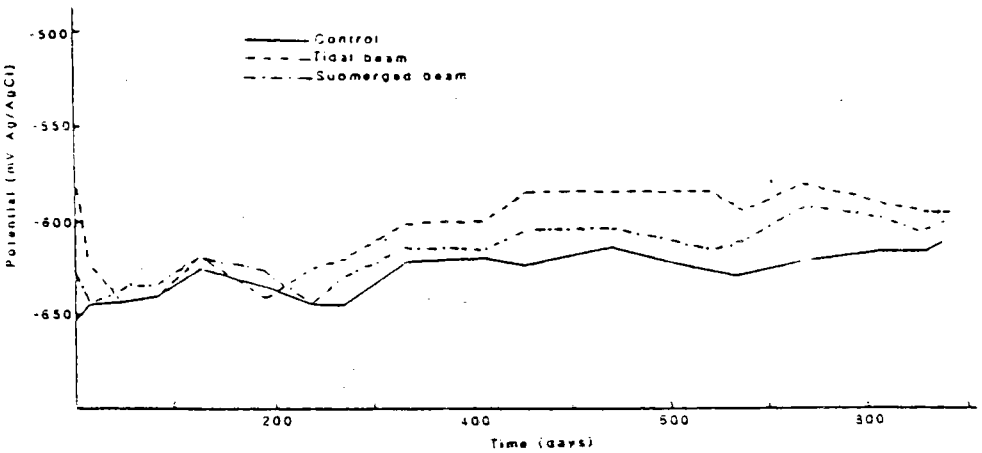


Figure 15 Potentials of concrete beam/bare steel couples in seawater.

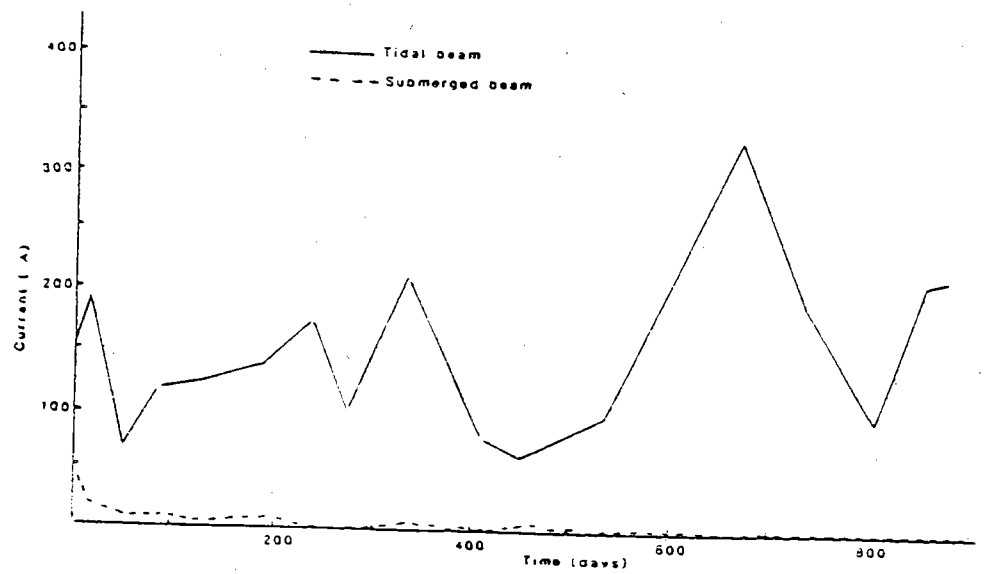


Figure 16 currents flowing in concrete beam/bare steel couples in seawater

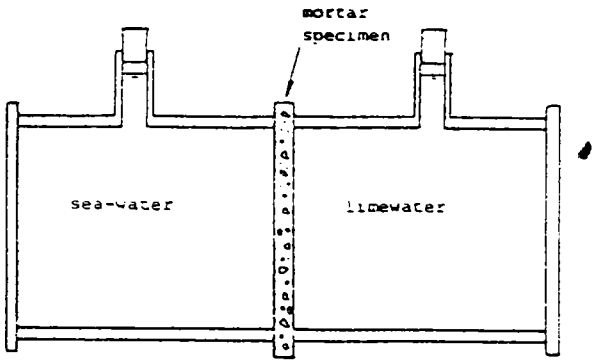


Figure 17 : Section through diffusion cell

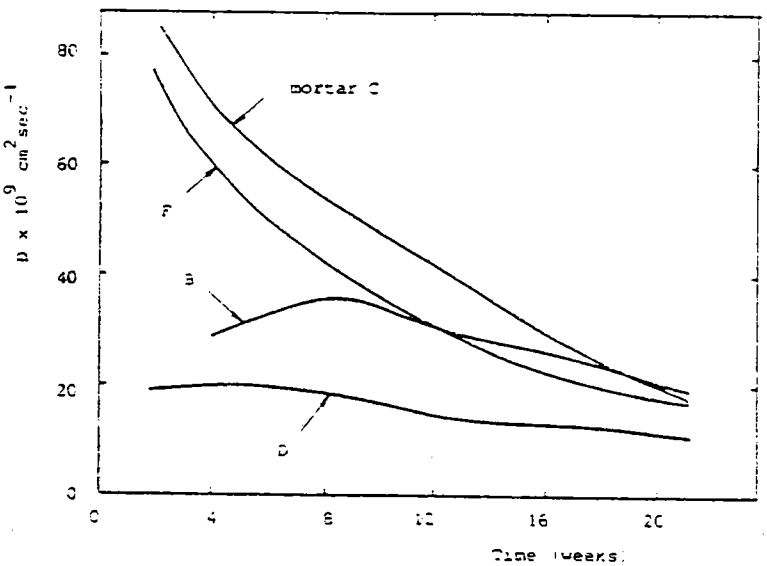
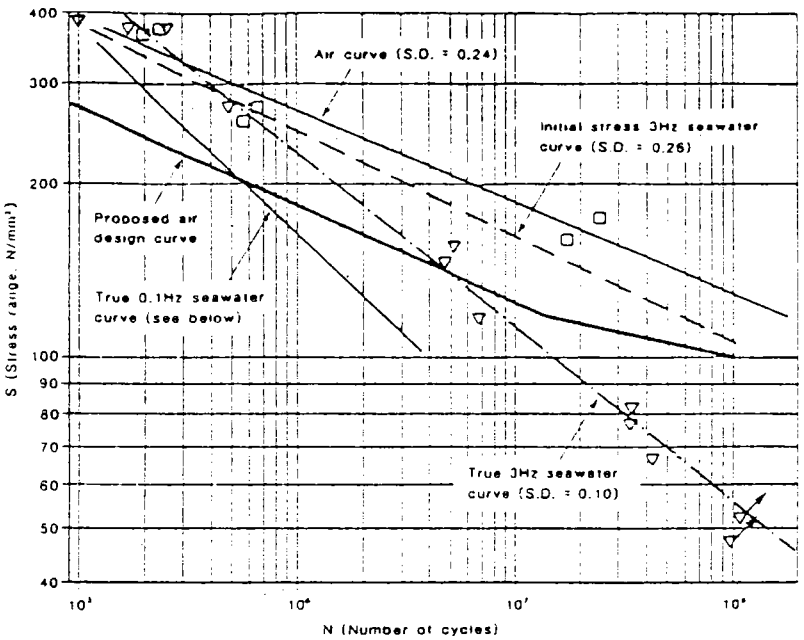
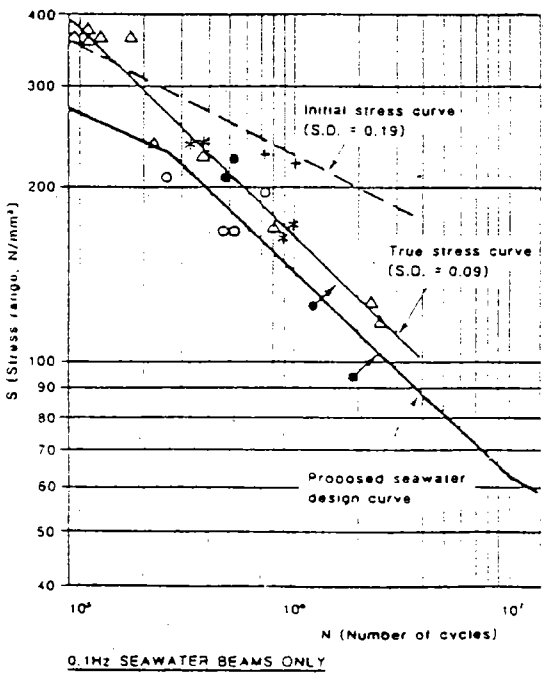


Figure 18 : Progressive effect of sea-water exposure on the chloride ion diffusion coefficient (D) of a range of mortars.





KEY

0.1Hz seawater beams
- Standard beams
- Concrete repair
- Resin repair
- PFA beams
- CP beams

3Hz seawater beams
- Standard beams

3Hz air beams
- Standard beams

Indicates runout

S.D. = Standard deviation

NOTE

Proposed seawater and air design curves are lower bound lines. All other curves are best estimate average lines

FIGURE 19: RESULTS OF S-N ANALYSIS OF LAING DATA

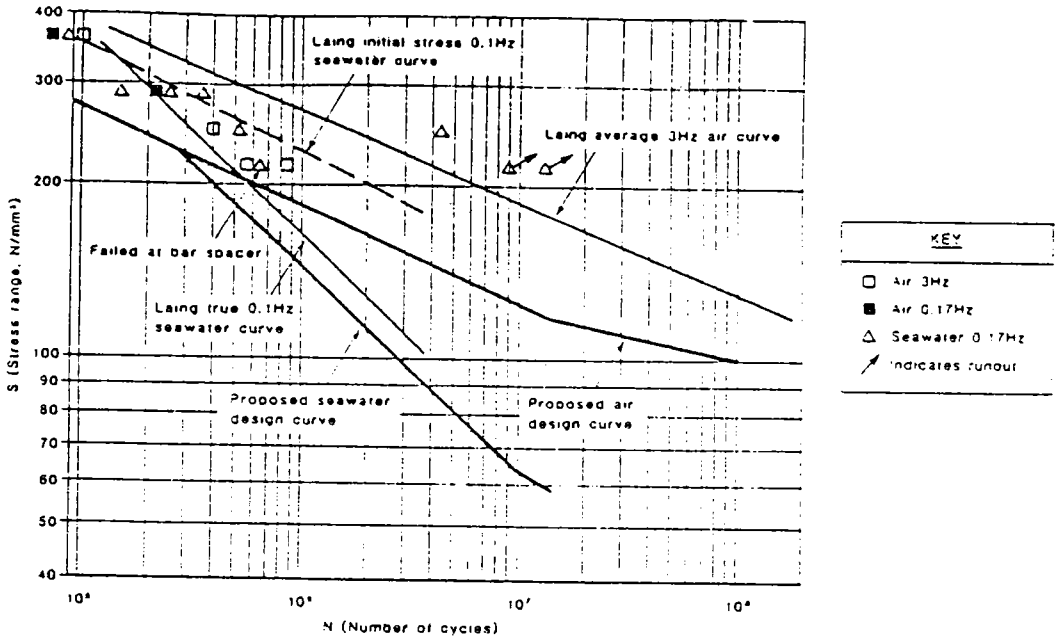


FIGURE 20: GLASGOW RESULTS COMPARED WITH LAING CURVES

圖 20

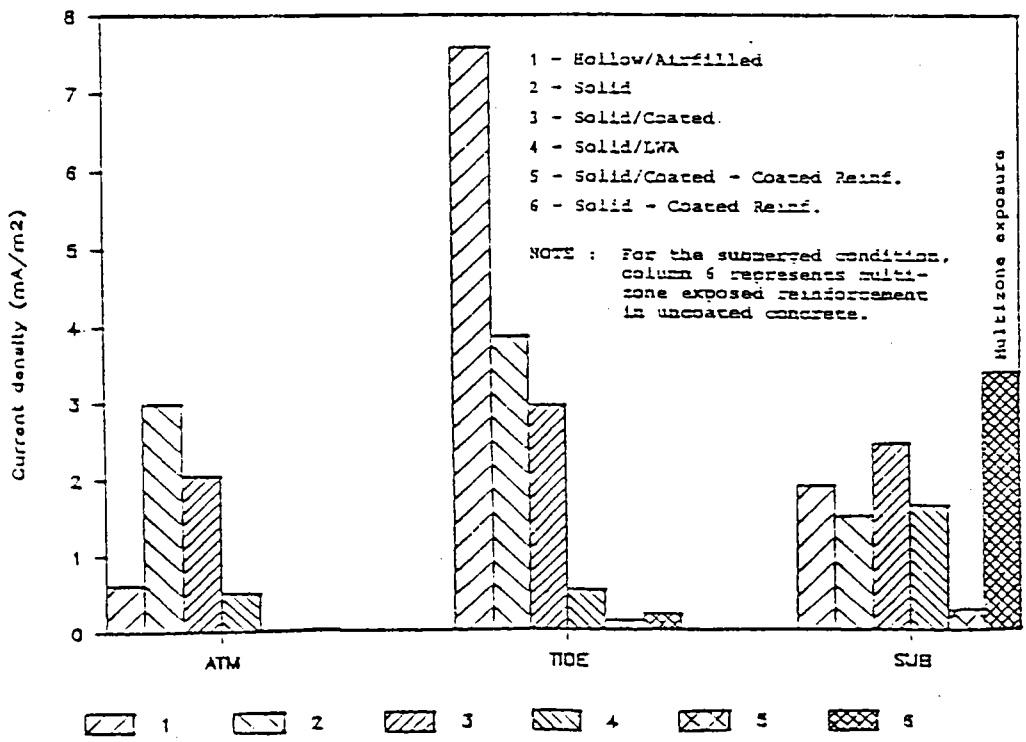


FIGURE 21. Mean current density demands recorded for different exposure conditions in different environmental zones.

圖 21

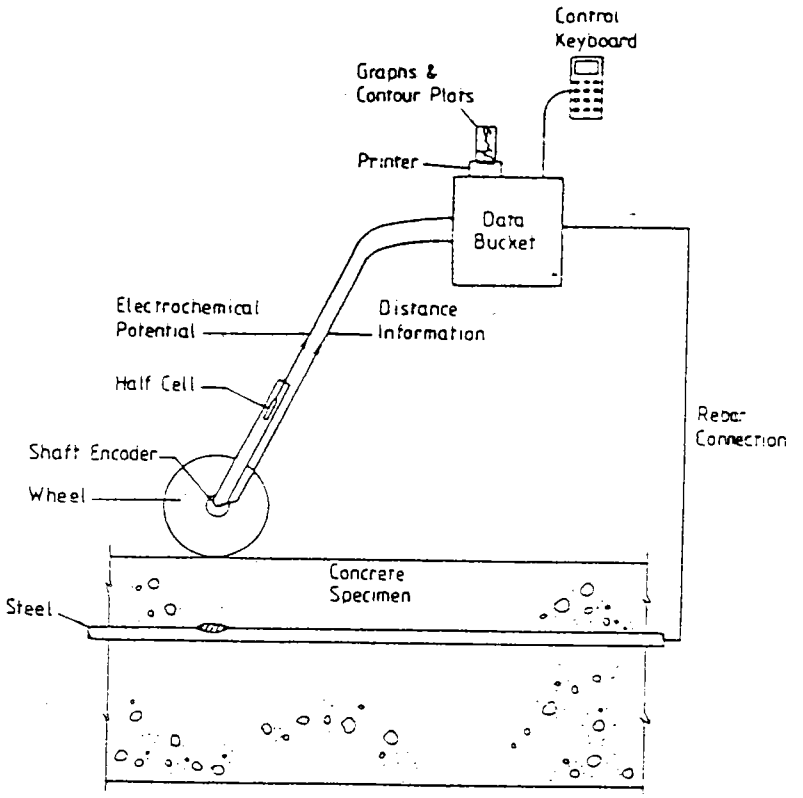
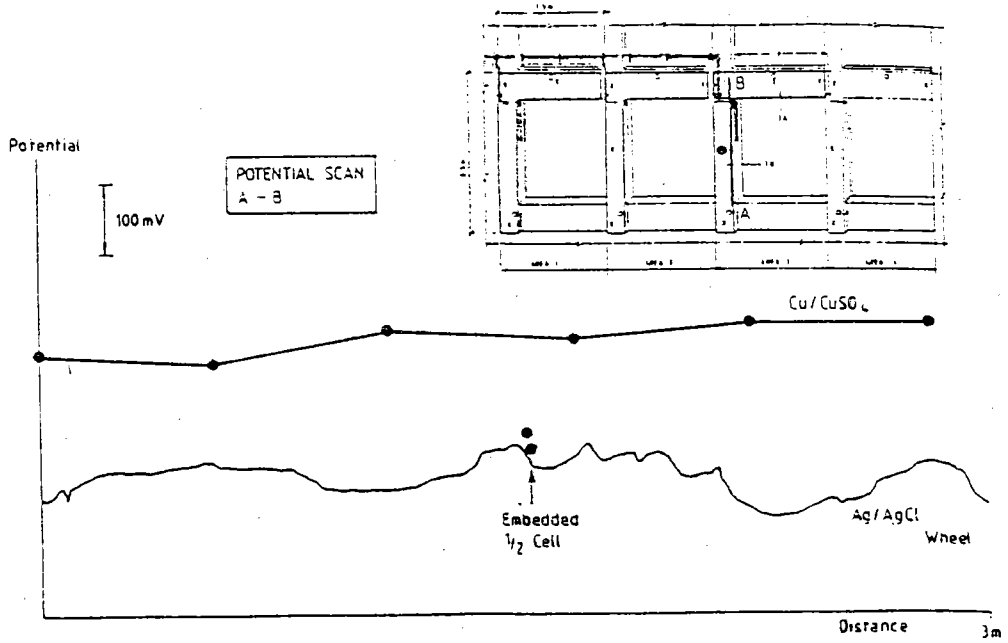


Fig. 22 The Potential Wheel for rapid potential scanning.



POTENTIAL WHEEL SCAN AND STATIC POTENTIALS DOWN COLUMN 3
RIGHT HAND REBAR

Fig. 23 Potential Wheel scan of anodic areas on a reinforced concrete beam suffering from chloride attack.

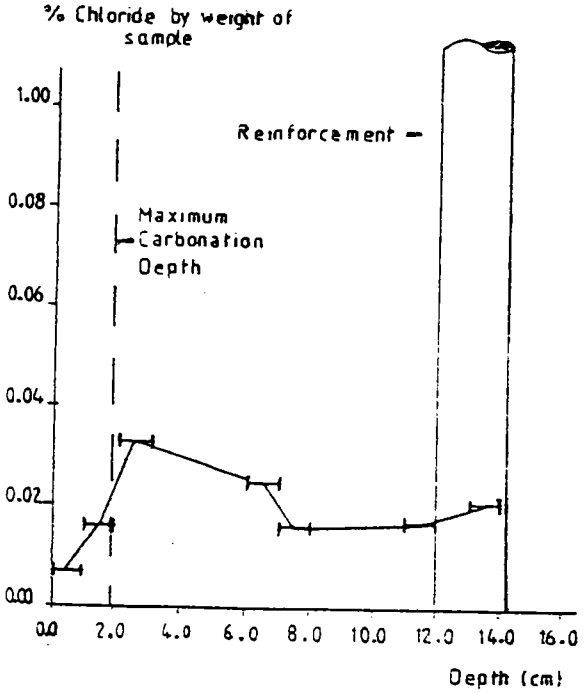


Fig 24 Chloride profile showing peaking caused by carbonation.

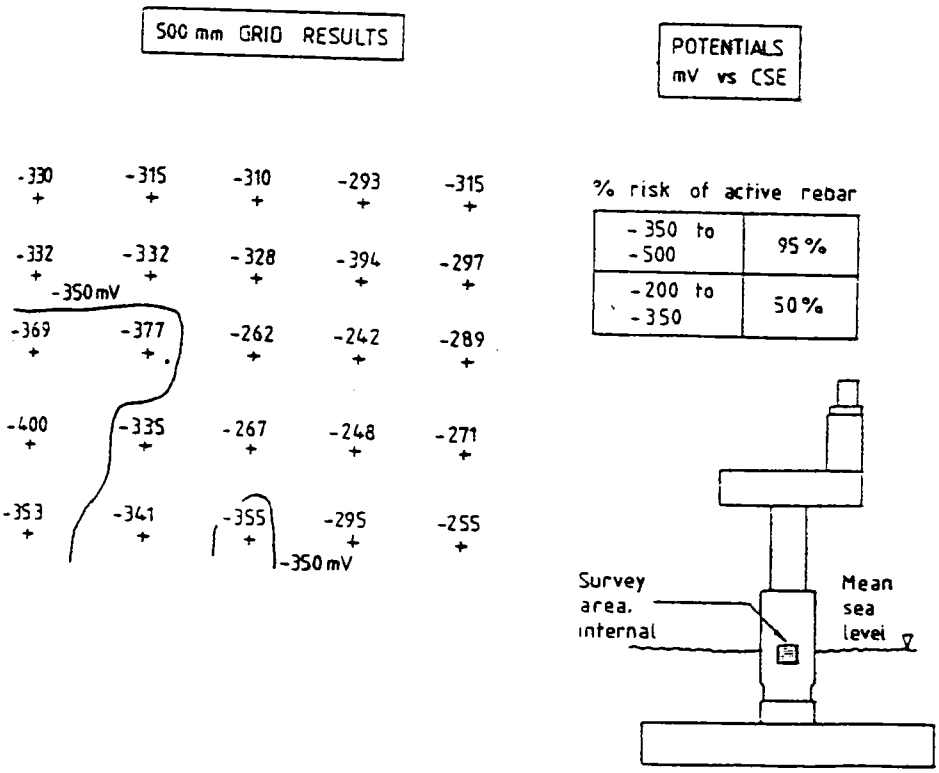


fig. 25 Equipotential contours from the interior of a lighthouse below sea level. Reproduced with the agreement of CIRIA/UEG.

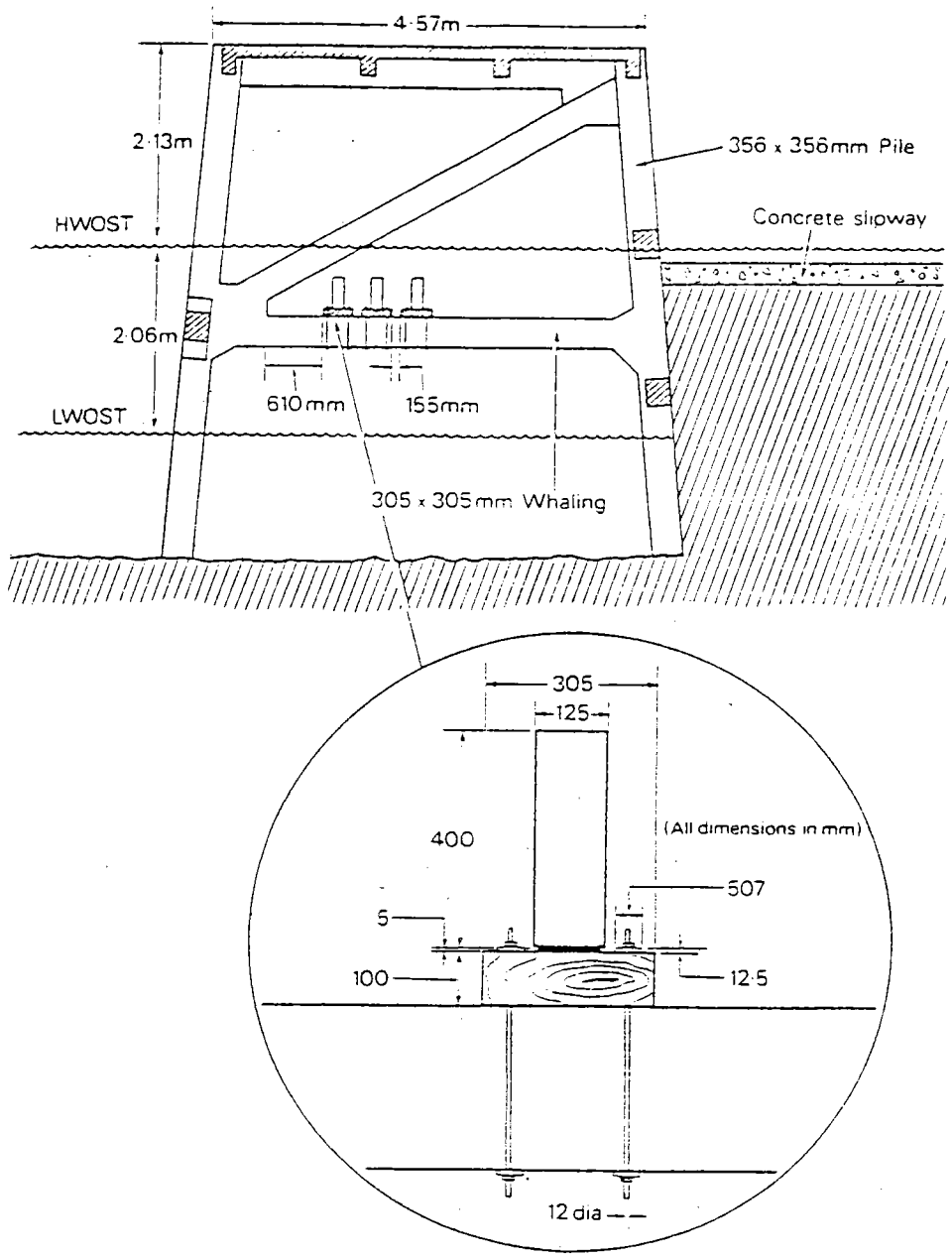


Figure 26 End elevation of Camber Jetty showing location of elm timbers and concrete prisms

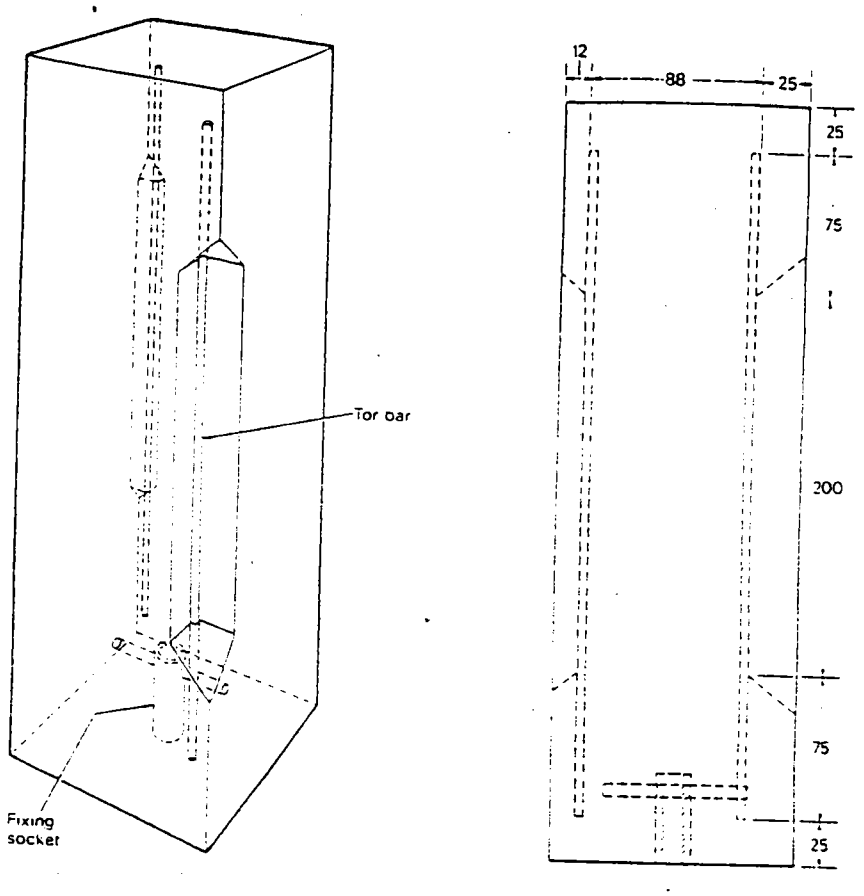
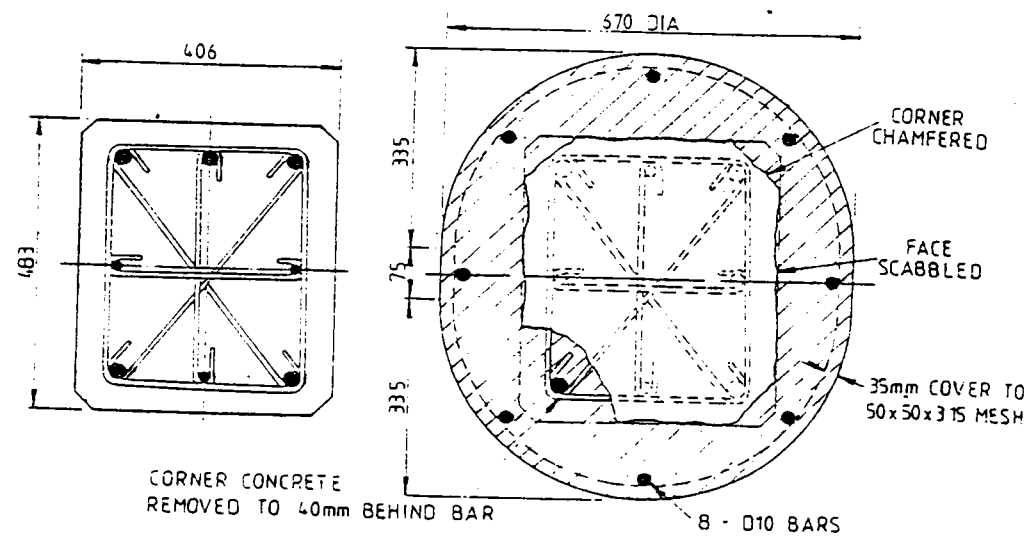


Figure 27 Concrete prisms showing relative positions of 6 mm tor bars, artificial spalls and fixing socket



TYPICAL PILE SECTION TYPICAL COLLAR SECTION

FIGURE 28

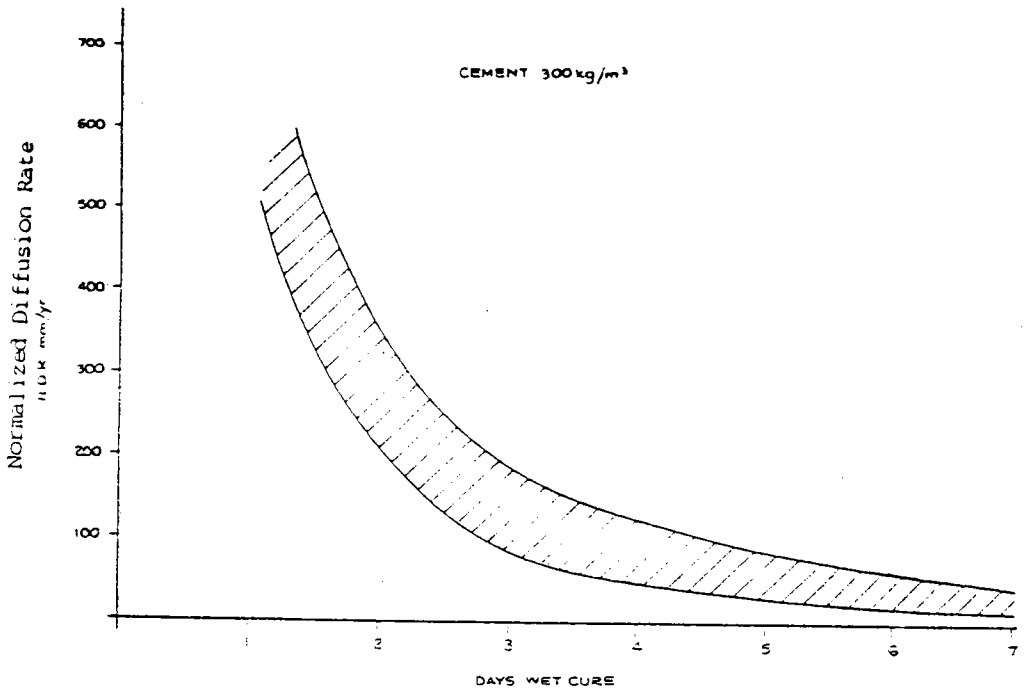


FIGURE 29

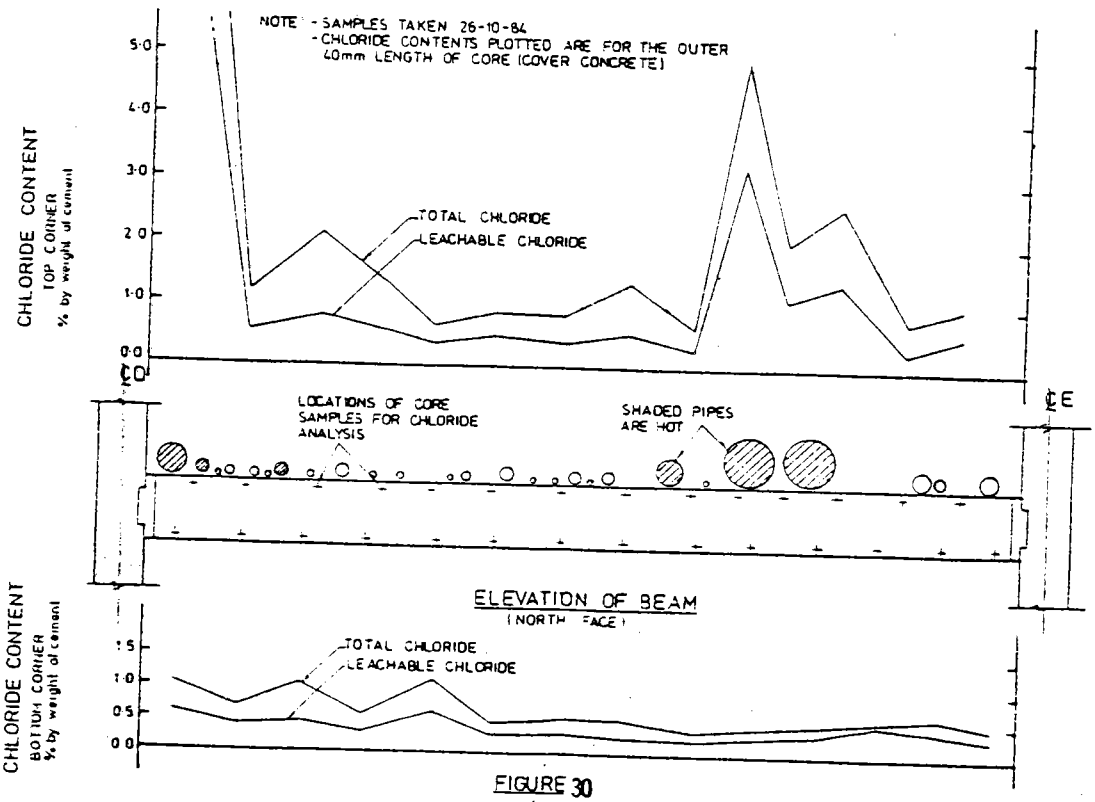


FIGURE 30

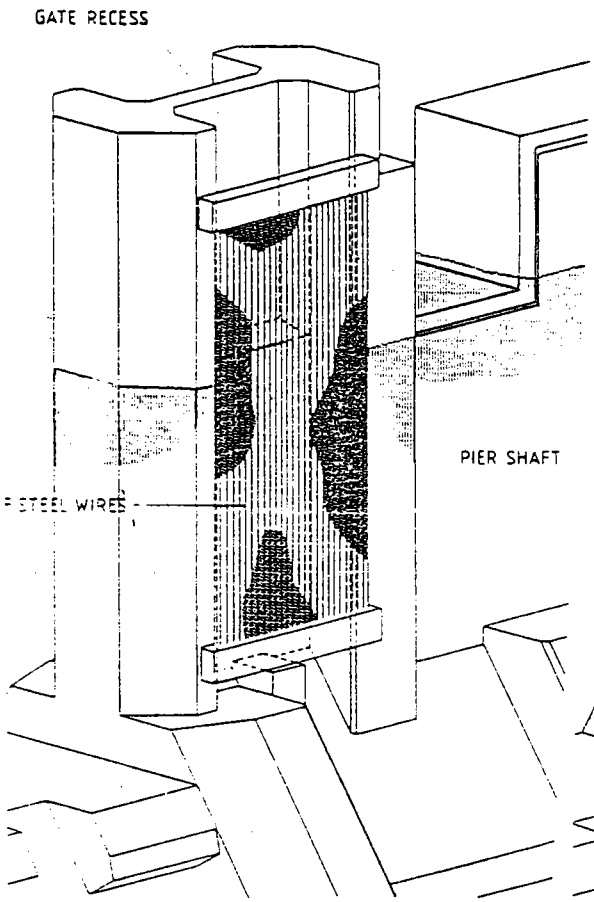


Fig. 31 Gate recess protection construction

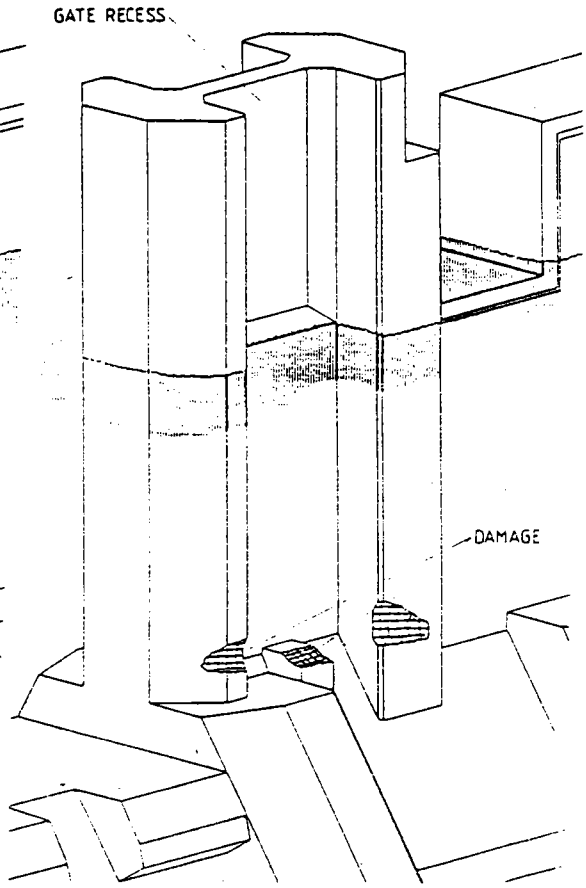


Fig. 32 Damage to pier structure

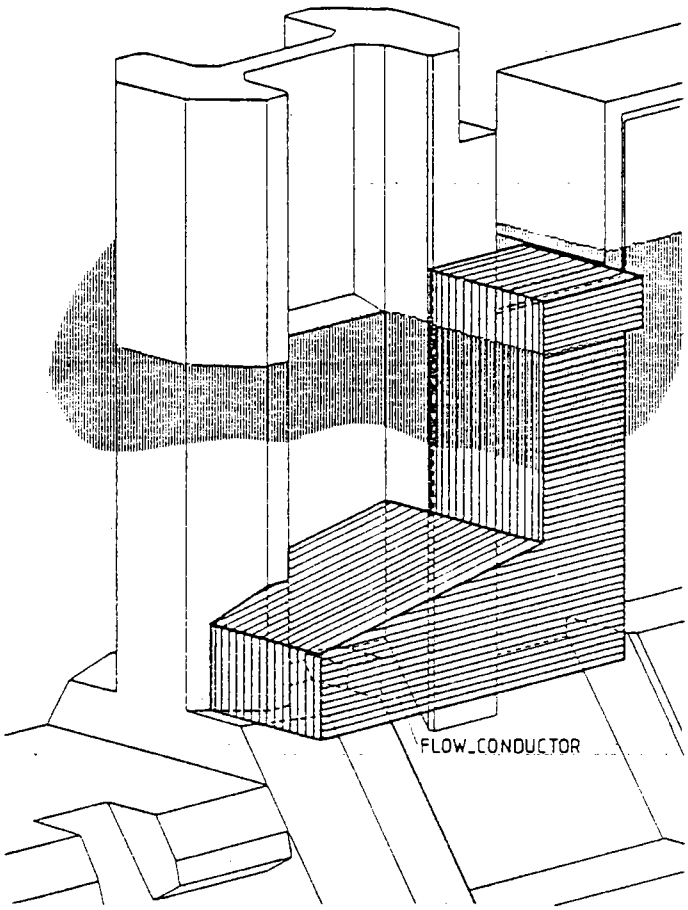


Fig. 33 Half-closed flow conductor construction

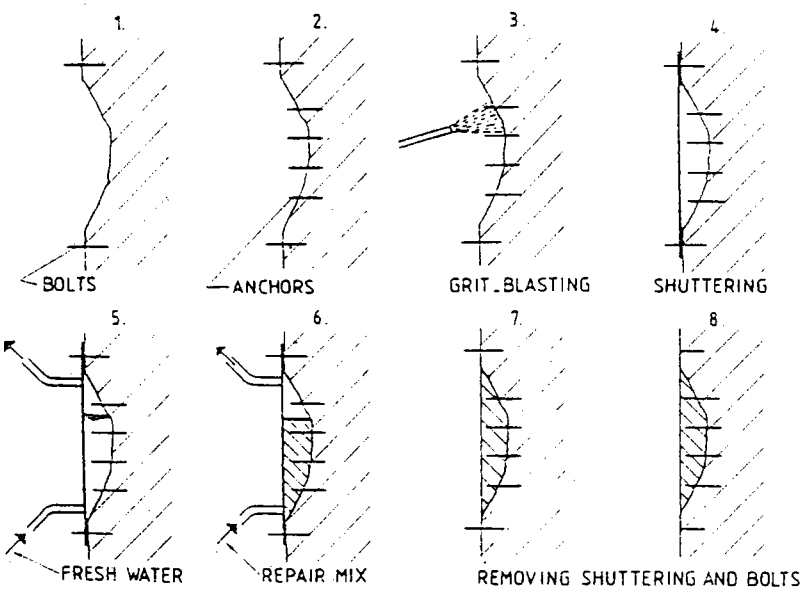


Fig. 34 Repair stages

海洋混凝土結構物惡化腐蝕與修護



林維明

摘要

在海洋環境下，各種結構物型態中，鋼筋混凝土及預力混凝土使用最爲廣泛。海洋混凝土之長期行爲必須在設計及施工階段相當小心地處理有關材料之選擇、配比設計、配筋合適，適當的施工技術和嚴格之施工控制計劃等。

本文討論海洋混凝土結構物耐久性各種影響因素及受各種海水鹽類侵蝕所造成鋼筋腐蝕及混凝土惡化之機構，亦將報導有關混凝土惡化一些實驗及現場調查之成果及在設計及施工階段應採行之防護措施。

一、前言

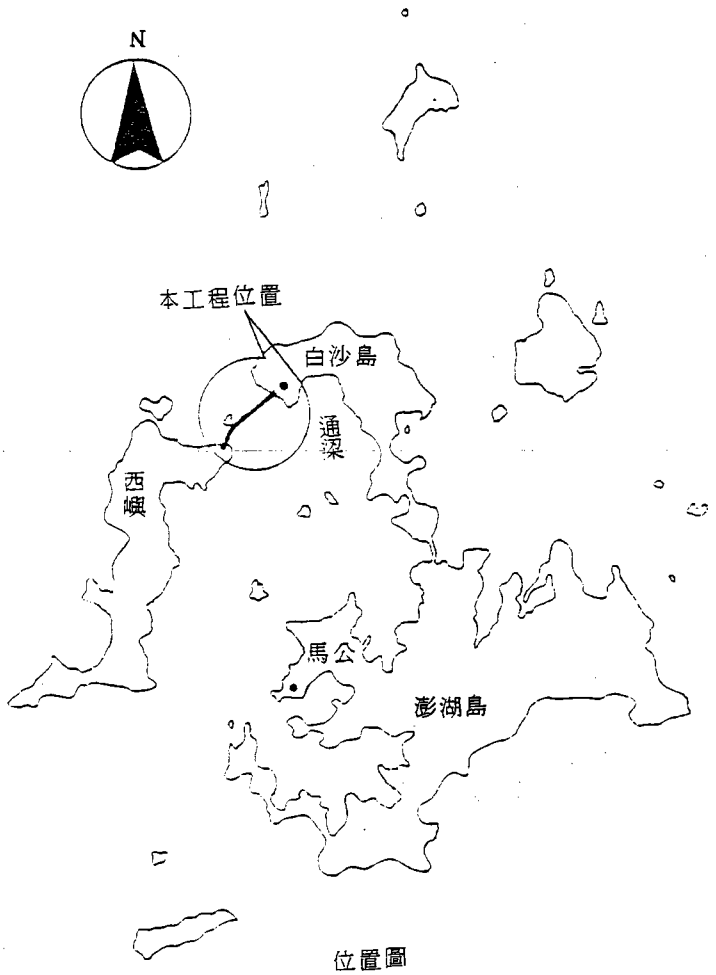
慣用之鋼筋混凝土在海洋環境建造港灣設施如碼頭、防護結構物如防波堤及海堤等廣泛地應用，預力混凝土如水上機場，海域平台，跨海大橋及船塢等之建造。所有這些海洋混凝土結構物包括大額金錢之投資且必須適當考慮這種結構堅固耐久，無惡化及太多之維護，因爲當這些結構物已建造及使用後，再要加以修護均感困難。

以澎湖跨海大橋爲例，該工程全長 2478 公尺（圖一）其中路堤長 319 公尺，橋樑長 2159 公尺，路堤寬 8 公尺，橋面寬 5.1 公尺共有七處避車道寬爲 8 公尺，民國 59 年 12 月完工，60 年通車，67 年發現第 16 孔發生嚴重腐蝕，故當年依傳統方式打除重建，針對其餘各孔選擇第一至廿六孔以化學塗料塗裝外，民國70年及 72 年分別逐孔檢查發現腐蝕損壞加速，其中第 12、13及75等三孔嚴重危及交通安全，故於

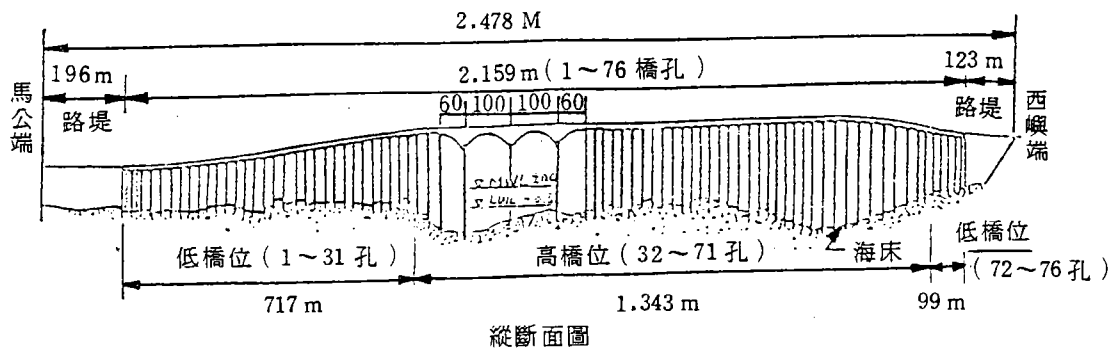
●作者簡介：林維明 省交通處港灣技術研究所研究員兼港工林料組組長

各孔中央加建支柱以免橋樑中斷及發生意外。腐蝕最嚴重之低橋位部份發現有(1)大樑混凝土龜裂(2)保護層脫落(3)鋼筋暴露銹斷(4)部份預力鋼索外露銹斷及(5)腐蝕嚴重影響行車安全，而在高橋位部份（第 32 孔至 71 孔）則有鋼筋銹蝕膨脹以致大樑產生膨脹裂縫及保護層輕微剝落現象（圖 2），低橋位部份已經於民國 73 年 7 月開始施工改建爲路堤，而高橋位部份因腐蝕情況較輕亦於民國 73 年 9 月間分別由國內六家廠商引用中日美等國之不同防蝕材料辦理整修，爲一勞永逸亦將自本(78)年 6 月改爲路堤開始施工。改建爲路堤需花費約新台幣捌億伍仟萬元，假定能在施工前詳加考慮防蝕，則可減少日後之修護工作。

海洋混凝土結構物設計必須先考慮優良混凝土之製作。其品質控制如圖三所示，然而其長期行爲主要



位置圖



縱斷面圖

圖一　澎湖跨海大橋位置及縱斷面圖



①含有海水之風雨侵入混凝土龜裂處。其硫酸鹽與水泥中C_3A發生化學作用產生Ettringite，體積變成二倍，平滑的混凝土表面，被腐蝕鬆散成爲粉狀，失去混凝土原有強度。



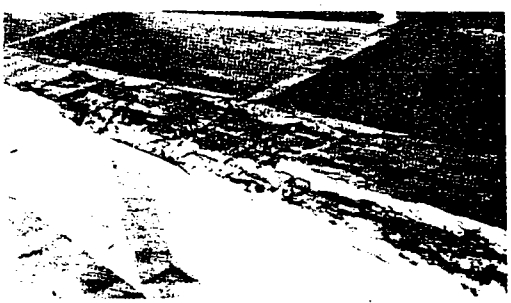
②被腐蝕鬆散之混凝土，一塊接一塊剝落。含海水之風雨更進入一層腐蝕，使龜裂之裂縫越來越大。



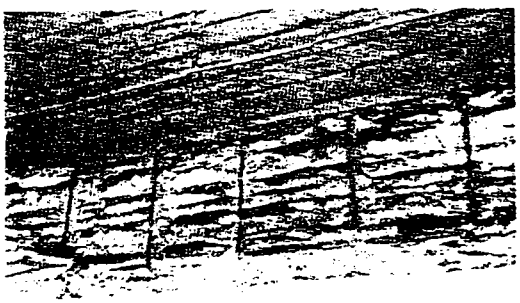
③因腐蝕加劇，裂縫越來越大，並一再延伸，被腐蝕之混凝土變成粉狀失去強度，因此整個保護層剝落使鋼筋露出。



④混凝土被腐蝕，剝落前與剝落後之對照。



⑤露出之鋼筋受含鹽分之風雨加劇生銹，以電氣化學之原理使全面生銹。生銹之鋼筋體積增大，加快混凝土之漲裂剝落。



⑥生銹之鋼筋從表面一層一層變成碎片（如從上面第2根與倒數第2根）粗大之鋼筋如此越來越小，喪失原有之直徑及強度。

圖二　澎湖跨海大橋露蝕情形

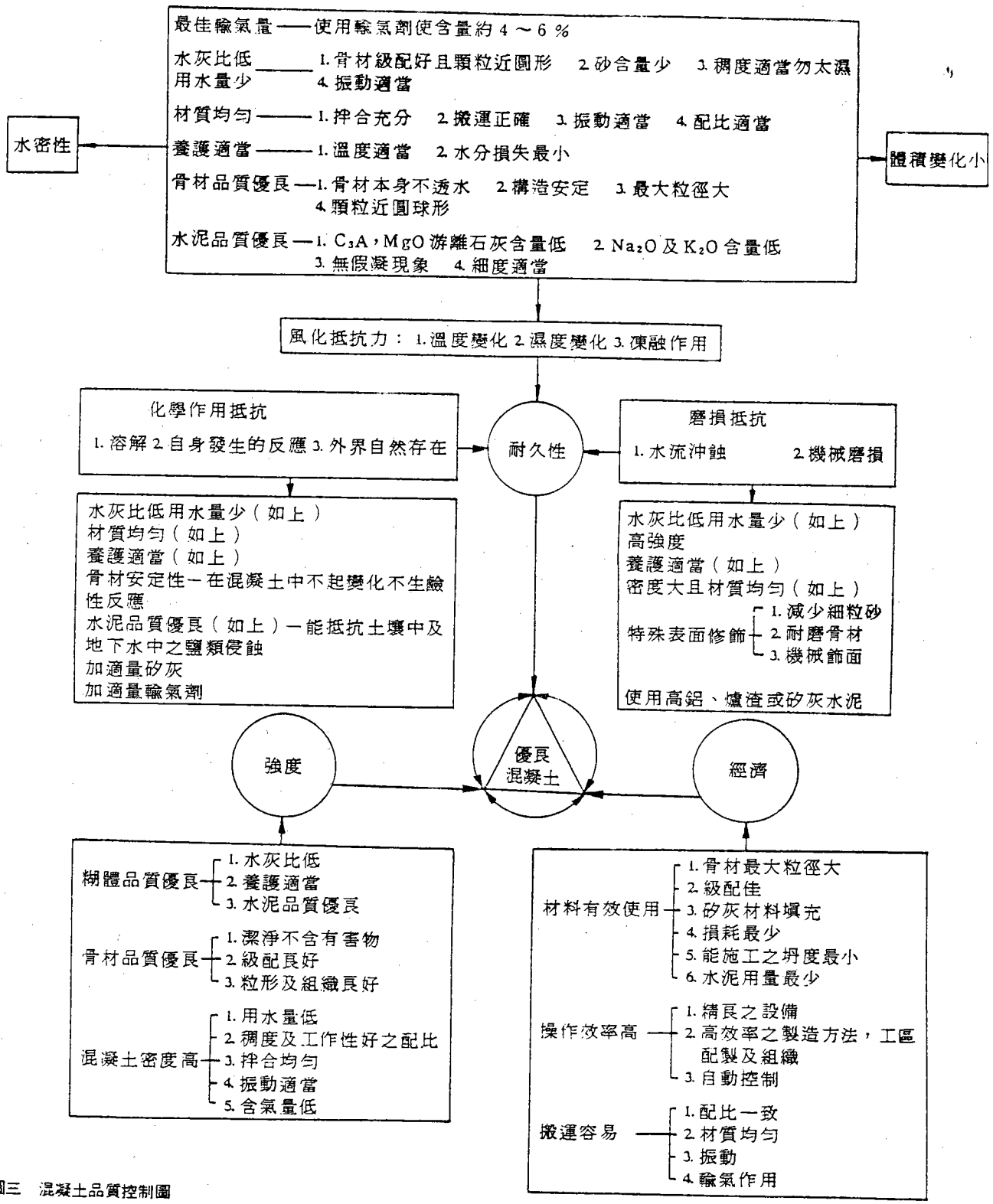
依曝露條件而定。對於侵蝕性海洋環境認識不足，將導致嚴重之經濟損失，甚至於造成災害，因爲修理工作相當困難且昂貴而成功之機率很難確定。

在過去數年內已經有些研究文獻發表有關海洋混凝土結構物耐久性之因素，這些研究已揭露某些很重要之事實然而仍待研究者尚多。

本文由各種不同角度來探討海洋混凝土結構物耐久性盡最大之努力以確定海洋環境下可能侵蝕因素及其對混凝土結構物攻擊之機構，亦提出可採行作爲製造耐久性結構物之最適當方法。

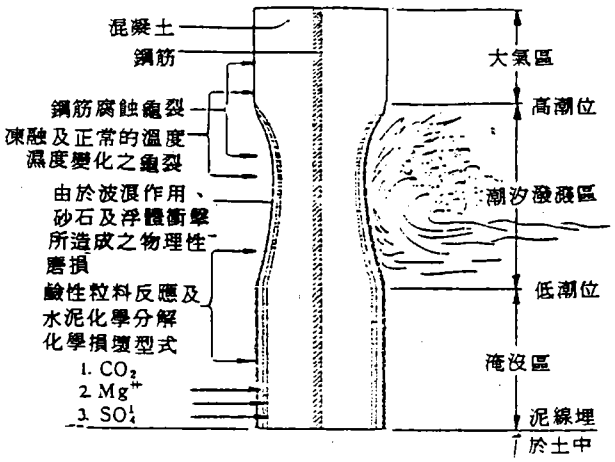
二、結構物及海洋環境

通常一海洋混凝土結構物曝露在海洋中可分爲三區，即埋於土中，沈於水中及大氣區如圖四所示，結構物上部及底部分別承受大氣及地下之曝露條件。而



圖三　混凝土品質控制圖

中間區即泥線至高水位間曝露在海洋環境下，本文僅討論此區域之結構物，海洋環境包括各種物理化學及生物之作用力，海水包括氯化物、硫化物、鹼類與鎂化合物，氧和自大氣吸收或由海中植物或動物所產生之二氧化碳等。亦包含懸移質如海砂、淤泥等，此外亦有波浪運動，海流及潮汐作用於結構物上。



圖四　海水中混凝土破壞示意圖

混凝土結構物承受上述環境條件者主要材料爲混凝土及鋼筋，而混凝土之主要成份爲水泥、粗骨材、砂、水及摻料等，這些混凝土之各種組成物和海洋環境曝露條件對於海洋混凝土結構物長期行爲扮演一重要之角色。

三、影響耐久性因子

海洋混凝土結構物破壞主要因在海洋環境及混凝土、鋼筋上有各種侵蝕性因子互相交互作用使然，首先討論混凝土結構物。

(1)混凝土結構物

混凝土爲將水泥、水、砂、石子、摻料等適當地混合在一起便符合工作性、經濟性、安全性及耐久性，再加上適當之鋼筋排列設計即爲鋼筋混凝土及預力混凝土結構物，而其中水泥製造過程中將 $CaO \cdot SiO_2 \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$ 混合物加熱時，各反應之程序可概述如下：

800℃以下：$CaO \cdot Al_2O_3$ 生成，同時可能生成 $CaO \cdot Fe_2O_3$

800－900℃：$2CaO \cdot SiO_2$ 開始形成

900－1000℃：$5CaO \cdot 3Al_2O_3$ 開始生成，同時可能生成 $2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2$

1000－1100℃：$2CaO \cdot Al_2O_3SiO_2$ 分解

1100－1200℃：$3CaO \cdot Al_2O_3$ 及 $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$ 生成

1260℃：開始熔融

1200－1450℃：$3CaO \cdot SiO_2$ 生成，游離石灰逐漸消失。

以上之程序雖典型之情形，可用以概略說明水泥化合物生成之經過。各化合物之生成亦可能在較高或稍低之溫度情況下進行，因之各階段之反應不免發生重疊。

卜特蘭水泥係由 $CaCO_3$ 爲主成份之石灰石與 $SiO_2 \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$ 爲主成分之粘土適量調配以1450℃燒成，生成矽酸三鈣 $3CaO \cdot SiO_2$（簡稱 C_3S），矽酸二鈣 $2CaO \cdot SiO_2$（簡稱 C_2S），鋁酸三鈣 $3CaO \cdot Al_2O_3$（簡稱 C_3A）及鋁鐵酸四鈣 $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$（簡稱 C_4AF）等四種主要化合物。

水泥化合物 C_3S，C_2S，C_3A，C_4AF 各具其特性，Portland Cement 乃利用其特性，視其用途編列爲 1. 2. 3. 4. 5. 型水泥，因此各型水泥各具其特性。

依美國材料試驗協會（ASTM）之規範，將卜特蘭水泥分爲五種如下：

1. 普通水泥（一般用）（ORDINARY GENERAL PURPOSE CEMENT）
2. 中度抗硫酸鹽及中度水化熱水泥（改良水泥）（MODERATE SULFATE RESISTANCE AND MODERATE HEAT OF HYDRATION）
3. 早強水泥（HIGH EARLY STRENGTH）
4. 低熱水泥（LOW HEAT OF HYDRATION）
5. 抗硫酸鹽水泥（SULFATE RESISTANT）

四種主要化合物，加水後發生下列水化作用：

$$2(3CaO \cdot SiO_2) + 6H_2O \rightarrow 3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O + 3Ca(OH)_2$$

$$2(2CaO \cdot SiO_2) + 4H_2O \rightarrow 3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O + Ca(OH)_2$$

而 $Ca(OH)_2$ 與 $MgSO_4$，Na_2SO_4 等硫酸繼續發生下列反應：

$$Ca(OH)_2 + MgSO_4 + 2H_2O \rightarrow CaSO_4 \cdot 2H_2O + Mg(OH)_2$$

$$Ca(OH)_2 + Na_2SO_4 + 2H_2O \rightarrow CaSO_4 \cdot 2H_2O + 2NaOH$$

生成之 $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 又與水泥中之 C_3A 水合物發生化學反應產生 Ettringite 體積脹大約2倍，使水泥硬化體崩裂，即

$$C_3A + 6H_2O \rightarrow C_3AH_6$$

$$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O + 3(CaSO_4 \cdot 2H_2O) +$$

$20H_2O \rightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$

因此結構物本身影響而耐久性之因子與所使用之結構物及材料型態有關，而與曝露條件獨立包括下列各項：

①使用鹼性不佳且有化學反應之骨材。

②水泥之鹼性及鋁酸三鈣（tricalcium aluminate）含量高。

③水泥、水及骨材之硫酸鹽含量高。

④製作混凝土之水泥含量不足。

⑤鋼筋之保護層不足。

⑥原有混凝土之特性。

⑦使用不同之金屬作爲加強物。

⑧蜂窩及泌水孔等。

⑨在預力混凝土中有導管（ducts）灌漿不足及兩端錨碇或鋼鍵密封不夠。

表一列出常見之混凝土病變及其控制因子等。

海洋混凝土結構物所置之特定條件不盡相同，因此在海洋環境下，影響混凝土耐久性不利之因子如下：

①海水中所含各種鹽類如硫化物、氯化物、鎂、氫、二氧化碳及酸等。

②凍融作用。

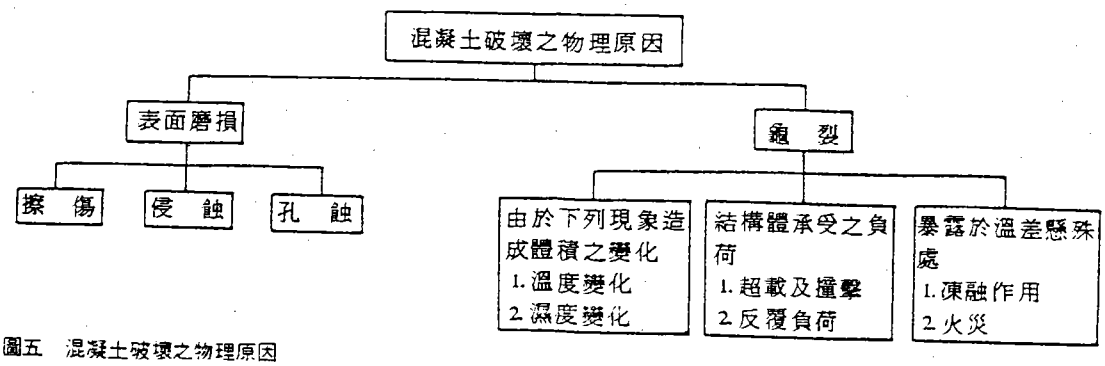
③海水運動如波浪、海流及潮汐等。

④懸移質如海砂、淤泥等可能造成磨損及衝擊。

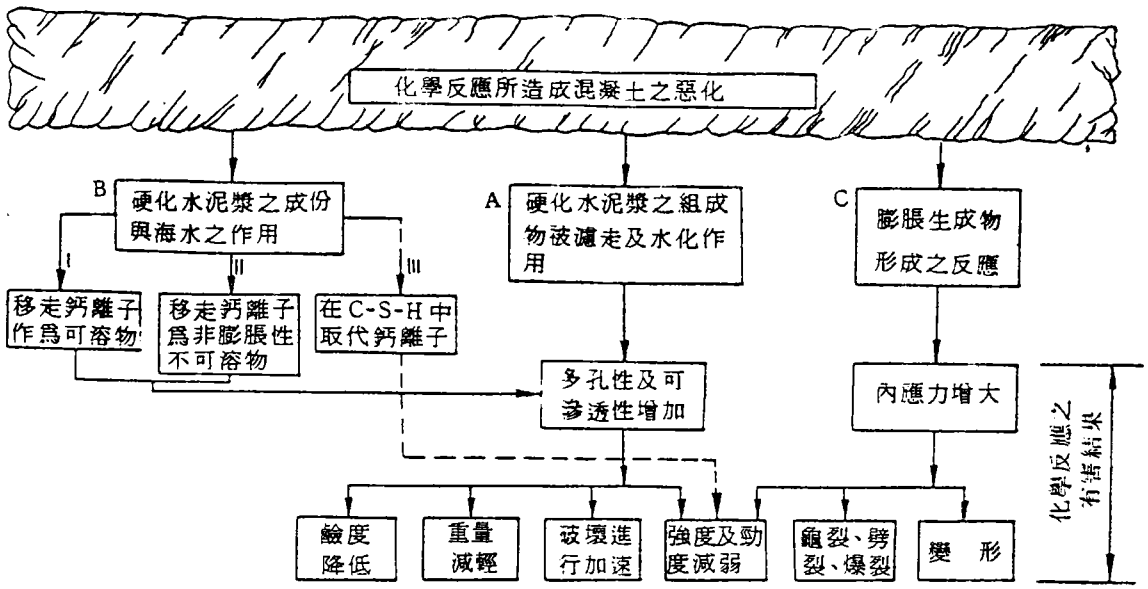
⑤各種海生植物及動物。

表一　混凝土病變的致因一覽表

組成成份	病變型態	病變的原因	環境因子	控制變數
水泥	健度不佳	體積膨脹	水份	游離石灰和方鎂石（Free lime and periclase） 水化熱，冷却速率
	溫度裂縫	熱應力	溫度	
骨材	鹼一矽反應	體積膨脹	水份供應	水泥中之鹼，骨材的成份
	霜害	水力應力	凍融作用	骨材吸水，混凝土含氣量、最大骨材粒徑
水泥漿體	塑性收縮	水份喪失	風速及溫度、濕度	混凝土溫度、表面保護
	乾燥收縮	水份喪失	相對濕度	配比設計、乾燥速率、控制縫
	硫酸鹽侵蝕	體積膨脹	硫酸離子	配比設計、水泥品種、波索蘭摻料、減低W／C
	熱膨脹	體積膨脹	溫度變化	溫度上昇、溫度改變速率
鋼筋	電化學腐蝕	體積膨脹	氧、水份	適當的混凝土保護層



圖五　混凝土破壞之物理原因



A：海水攻擊 $Ca(OH)_2$ 及 C-S-H 膠體（在 20°C $Ca(OH)_2$ 可溶度爲 1.7gm/l）

B：酸溶液，形成 $CaCl_2$ 及鹽酸鈣

B_{II}：草酸及其鹽之溶液，形成草酸鈣

B_{III}：長期受海水作用可用 Mg^{++} 取代 Ca^{++} 而減弱 C-S-H 膠體

C：(1)硫酸鹽侵蝕形成鈣汎石及石膏

(2)鹼性骨材反應

(3)混凝土中鋼筋腐蝕

C-S-H 式中 C，S，H 分別表示 CaO，SiO_2 及 H_2O

圖六　混凝土破壞之化學原因

⑥暴風浪之超載，船隻碰撞等造成在結構物上之龜裂。

⑦在結構物上貯存之石油或危險化學品潑濺（海域平台特殊情況）。

因此導致混凝土損壞之物理及化學原因分別如圖五及圖六所示，表二示主要物理性及化學性作用之機理及相應對策。

四、惡化機構

海洋混凝土惡化主要因素爲①混凝土龜裂②鋼筋或預力鋼鍵及其端點錨碇腐蝕發生所致分述如下：

(1)混凝土龜裂

大多數嚴重之混凝土分裂乃因在滲透性高之混凝土受化學作用所致，化學作用一般形式爲濾去水泥及受酸性海水及硫酸鹽之作用。

硫酸鹽溶液出現在海水與水化水泥漿作用而產生非溶解鹽，這些鹽（鈣矾石）體積相當大，因爲體積膨脹作用而導致混凝土之龜裂及剝離現象。

二氧化碳和各種酸類可能出現在海水中或由微生物所生，可加速氫氧化鈣之溶解而造成表面侵蝕。

水泥含有超過 8 % 之 C_3A （鋁酸三鈣）可導致在海水中之鎂化物替代水化水泥中之鈣化物，而使強度嚴重之損失。

在混凝土拌合中或海水侵入加速腐蝕中，氯化物含量高，特別在低品質混凝土其水灰比高情況更顯然。

除了化學作用外，各種海鹽之結晶體可能發生於混凝土孔隙，此乃因海水侵入毛細管及乾濕作用所致。這些鹽之逐漸累積可導致混凝土之分裂，此係由於鹽結晶體之曝炸壓力使然。這種形態之攻擊在潑濺區特別嚴重。在混凝土中不穩固及有化學反應之骨材由於長期浸於海水中可能由於膨脹而產生龜裂及全面性之分裂。

在海洋環境下之混凝土惡化可由於波浪，海流及潮汐作用而加劇，此外力作用可陸續再補充侵略性因子至影響範圍，不停之海水運動加上懸移質所引起之磨損將沖刷混凝土結構物中較軟部份，因此曝露新的表面而再受攻擊。

五、鋼筋之腐蝕

R.C中鋼筋之腐蝕主要由於侵蝕性之鹽類所致，經常混凝土提供高鹼性防護鋼筋腐蝕，此乃因液態混凝土之 PH值超過12.5（約爲 12.5－13.2）在鹼性環境下在鋼筋表面上形成一層保護膜（ r−Fe_2O_3），此保護膜在高PH值（約13）保持完整。當混凝土傾注及硬化時由高 PH 值供應給鋼筋之保護，直到混凝土環境周界之鋼筋不再有顯著之改變時仍保持完整。一旦硬化之混凝土吹乾至一平衡之濕氣含量，鋼筋之保護完全依混凝土能維持適當之鹼性環境能力而定。然而當由於海鹽侵入 PH 值降低，則在鋼筋表面之保護膜（ r−Fe_2O_3）經常被破壞，仍因毛細管作用，混凝土龜裂及剝落和施工不良等使然。保護層被破壞將導致在鋼筋上發生腐蝕，一旦開始發生腐蝕，則其生成物開始在鋼筋表面上生成，這些生成物逐漸累積導致張力瓦解而將破壞周圍之混凝土而使鋼筋曝露如圖七所示。

鋼筋混凝土內之鋼筋腐蝕與一般金屬腐蝕原理相同，必須有陽極（anode）陰極（Cathode）、電導通路（External Conducting path）、電流（Corrosion current）及電解溶液（Electrolyte)等五項，否則腐蝕即行停止。

(1)陽極（anode）

陽極是氧化反應（oxidation）之地方，也就是鐵銹生成區，金屬離子化放出電子（e^-）

$$Fe \rightarrow Fe^{2+}\text{（液態）} + 2e^-$$

(2)陰極（Cathode）

陰極係產生水之還原反應（Reduction），在基性溶液中，此反應如下：

$$2H_2O + O_2 + 4e^- \rightarrow 4OH^-$$

一旦有氫氧離子生成，金屬離子與之產生氧化反應而析出鐵銹如下：

$$Fe^+ + 2(OH)^- \rightarrow Fe(OH)_2$$

$$4Fe(OH)_2 + 2H_2O + O_2 \rightarrow 4Fe(OH)_3\ \text{（紅銹）}$$

或 $3Fe + 8OH^- \rightarrow Fe_3O_4 + 8e^- + 4H_2O$ （黑銹）

或生成各種氧化物由圖七(c)可見生成$Fe(OH)_3 3H_2O$可達原來鐵之6倍。

(3)電導通路（Conducting path）

由上述知氧化還原需有電子之移轉，因此導電性差者，腐蝕反應將遲緩。

(4)電流（Corrosion current）

必須有足夠之電動勢（Electromotive）才可使電子（e^-）流動，促使腐蝕反應。

(5)電解溶液（Conducting solution，Electrolyte）

電化腐蝕又稱濕腐蝕（Wet Corrosion)即須在潮濕或水份充份情況下才可能發生氧化還原反應，在潮濕情況下，離子之移動速率遠比金屬氧化擴散作用爲快，所以金屬腐蝕速率相當快，若混凝土處於乾燥狀況，水分及氧氣供應不足情況下，銹蝕反應亦將減緩或中止。

鋼筋混凝土腐蝕爲一種局部電池作用受周圍環境影響因素如下表。

局部電池反應	PH	氧氣	水份	鹽分	應力	迷失電流	溫度
陽極反應	◎	○	△	◎	○	◎	◎
陰極反應	△	◎	◎	○	×	×	○

◎關係密切，○有關係，△略有關係，×幾乎無關

水泥水化物中有大量$Ca(OH)_2$而PH值介於12－13之強鹼性環境下鋼筋表面形成$Fe(OH)_2$之鈍態保護膜可抑制銹蝕，但$Ca(OH)_2$遇到空氣中之CO_2氣體，則被中和成$CaCO_3$，PH值將降至8.5－9.5左右，則鋼筋就會銹蝕，若混凝土中氯化物之含量過多時，鈍態保護膜會被Cl^-離子破壞，另外，若混凝土之水密性不夠，則空氣、水份，容易滲至鋼筋表面，更加速鋼筋之銹蝕，混凝土所處溫度愈高，鋼筋氧化反應愈活潑，而$Ca(OH)_2$溶解度降低， PH值亦將降低，抑制鈍態保護膜之生成。迷失電流由鋼筋流出之部位，會引起鋼筋之電解腐蝕，在其流入部位，鋼筋亦將被銹蝕。鋼筋經銹蝕後，其體積將膨脹，據經驗得知，紅銹及黑銹之體積膨脹量分別爲原鋼筋之四倍及二倍，因此銹蝕之膨脹壓力，足以使混凝土，沿鋼筋部位龜裂，使鋼筋銹蝕更加劇烈。

在本島通常鋼筋銹蝕係由於無足夠之保護層所致。在含有氯化鹽的環境下，或使用含氯之早強劑時，鋼筋之銹蝕更容易產生，尤應注意。此類銹蝕之防止

表二　混凝土病變種類、機理及相應策略

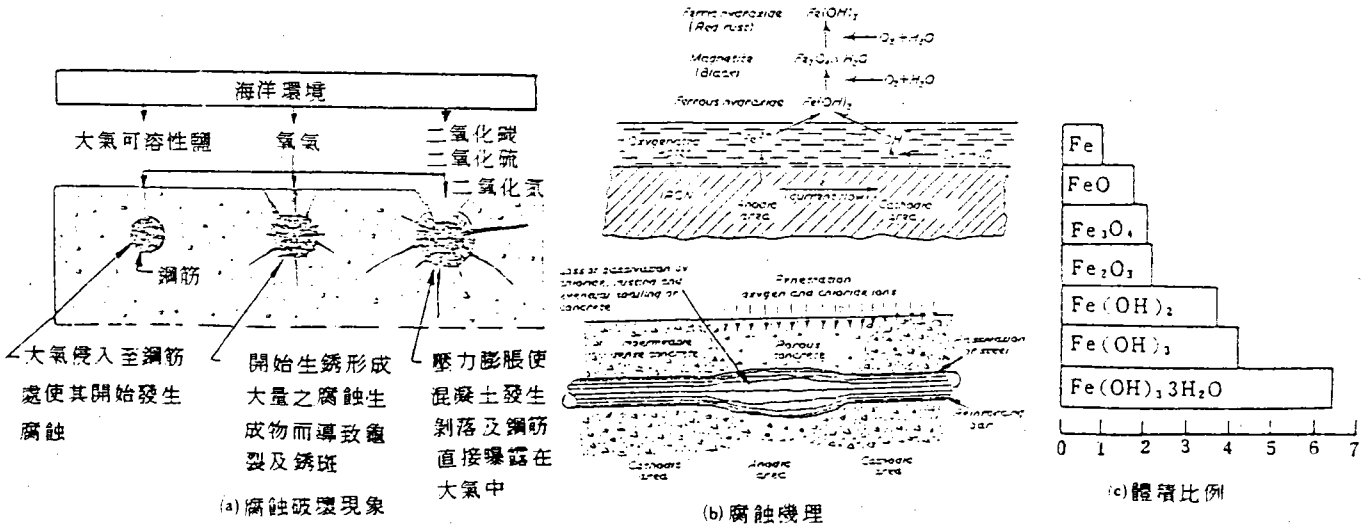
侵蝕的種類		受影響材料[+]	說明	病變機理	控制對策
物理性作用	凍融作用	P，A	水結冰體積膨脹9%，造成冰鏡或水力壓力，使混凝土顆粒分離。	1. 水力定律（Powers） 2. 冰分離（Powers） 3. 中孔却水（Litvan） 4. 滲透性	1. 輸氣 2. 增加強度 3. 減低飽和度 4. 提高滲透係數
	乾濕作用	P	乾燥時表面收縮形成表面裂縫；潮濕時表面膨脹形成內部裂縫。	水份喪失：毛細管張力、表面能量改變	1. 防止水份蒸發 2. 採用伸縮縫
	高溫作用	P，A	冷縮熱膨脹作用或暴露劇烈之火焰產生差異內應力，而使顆粒分離或整片剝落。	骨材與水泥漿體差異膨脹係數及水泥漿遇熱乾縮作用 ·水泥漿體水化物的分解作用	1. 避免直接火焰的接觸或暴露時間過久 2. 提高強度 3. 採用防火或耐火混凝土
	磨損及磨耗	P，A	混凝土抗剪力不足而使表面受剪破壞	剪應力＞剪力強度	1. 採用質硬密實之骨材 2. 提高混凝土強度
化學性作用	溶解與析晶	P	水份滲入混凝土溶解氫氧化鈣而於滲透面露出 乾濕作用而將溶解物析出結構體外造成白華	氫氧化鈣被溶解而造成孔隙 氫氧化鈣被溶解而與其它有害物質結合	1. 減低水灰比、滲透性 2. 摻加火山灰材料 3. 防水塗膜
	硫酸鹽侵蝕	P	單硫型鋁酸鈣水化物與硫酸鈣鹽類作用而生成鈣帆石造成體積膨脹作用，而分離混凝土	四步驟： 1. $SO_4^{2-}(\ell)$ 滲透 SO_4^{2-}（水泥） 2. $Ca(OH)_2$ 溶解 $Ca^{2+} + 2OH$ 3. $SO_4^{2-} + Ca^{2+} + 2H_2O$ 析晶 CSH_2 4. $C_3A \cdot CS \cdot H_{12} + 2CSH_2 + 16H \rightarrow C_3A_13CS \cdot 32H$*	1. 減低水泥之 C_3A 及 C_4AF 量 2. 摻加火山灰材料 3. 減低水灰比、滲透性 4. 蒸汽養護使 C－A－H 相分解 5. 防水塗膜
	鹼－骨材反應	A	骨材之活性矽酸鹽與水泥中之鹼（鉀或鈉）作用產生閉狀裂縫，而滲出膠體，一般呈現爆開或剝落現象	1. 鹼性分解並溶解活性矽 2. 形成含水矽酸鹼玻璃 S+N/K H→N/K－S－H 3. 玻璃吸水形成溶膠滯留侵蝕周圍	1. 減少活性矽酸鹽含量 2. 適當骨材尺寸 3. 水泥中鹼含量使之小於0.6% 4. 減低含水量　5. 防水塗膜
	酸和鹼侵蝕	P	鹼對混凝土的影響甚小，然而酸性則會因 H^+ 離子而加速氫氧化鈣之溶解，甚至使 C－S－H 受侵蝕而產生矽膠	1. $Ca(OH)_2 + 2H^+ \rightarrow Ca^{2+} + 2H_2O$ 2. $C_3S_2H_3 + 6H^+ H_2O \quad 3Ca^{2+} + 2SHn + 6H$*	1. 減低含水量（水密性混凝土）及滲透性 2. 減少游離石灰加入火山灰材料 3. 防水塗膜
	金屬腐蝕	R	電化學反應造成鐵受氧化形成氧化鐵，致使體積膨脹而產生鍵結剝離、破裂或剝落	1. 陽極：$Fe \rightarrow Fe^{2+}(aq) + 2e^-$ 2. 陰極：$2H_2O + O_2 + 4e^- \rightarrow 4OH^-$ 3. 沉澱：$Fe^{2+}(aq) + 2OH^- \rightarrow Fe(OH)_2$ 4. 氧化生銹：$4Fe(OH)_2 + 2H_2O + O_2 \rightarrow$ $4Fe(OH)_2$ 銹	1. 陰極保護 2. 保護塗膜及保護膜或腐蝕阻止物 3. 足夠保護層 4. 減少水中含氯量 5. 減少水灰比及滲透性

[+] P，A，R 分別表水泥漿體，骨材及鋼筋。

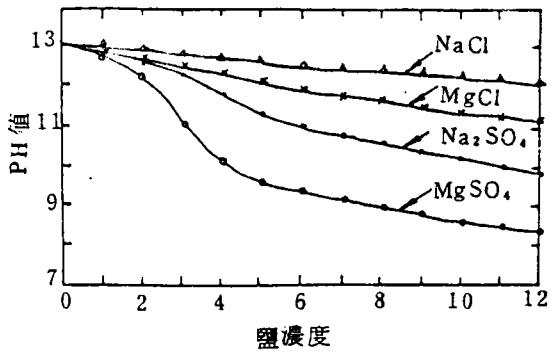
* 混用水泥化學簡寫符號：C－CaO，S－SO_3，H－H_2O，A－$A\ell_2O_3$，S－SiO_2。

表三　實深發生裂縫之歸類(非結構性)

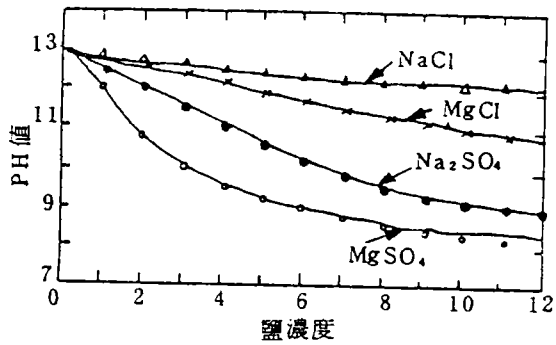
裂縫類型	代號參考圖示	細分	普遍發生之位置	主要致因	次要致因	解決對答	察覺的時間(施工後起算)
塑性沉陷	A	排筋過密	深長斷面	過度泌水	早期快乾情況	減少泌水(輸氣或再振動)	十分鐘～3小時
	B	彎曲	柱頂				
	C	版厚變化	槽型或格子型版				
塑性收縮	D	對角	路面及版	早期快乾	泌水率低	改善早期養護	卅分鐘～6小時
	E	隨機	R.C.版				
	F	排筋過密	R.C.版	同上加上鋼筋太近表面	泌水率低	改善早期養護	卅分鐘～6小時
早期熱收縮	G	外部抑制	厚槽	發生過熱	快速冷却	減熱或/及隔熱	1天～二、三週
	H	內部抑制	厚版	溫度變化太大			
長期乾縮	I		薄版(或牆)	接縫不足	過度收縮及養護不足	減少及改善養護	數週～數月
裂紋	J	附隨模版	露面混凝土	不滲水模板	富配比及養護不良	改善養護及粉光	1－7天(有時較晚)
	K	泥饅混凝土	版	過度表面粉光			
鋼筋腐蝕	L	自然	柱及樑	保護層不夠	混凝土品質不良	減少表列致因	超過2年
	M	氯化劵	預鑄混凝土	氯化劵過量			
鹼骨材反應	N		潤濕區	反應骨材加上高鹼性水泥		減少表列致因	超過5年
化學侵蝕	O	水下基礎	橋墩及柱	CO_2 Mg^{+2} 離子 SO_4^{-2}	混凝土品質不良	改善混凝土品質	超過5年
物理性磨損	P	水面上下	橋墩及柱	波浪、砂、礫石浮水之作用	骨材及混凝土品質不良	改善骨材及混凝土品質	超過5年



圖七　鋼筋混凝土腐蝕機構



圖八　在飽和氫氧化鈣溶液中，各種鹽濃度與PH值之關係



圖九　在水化水泥溶液中，各種鹽濃度與PH值之關係

常採用低水灰比高品質（W／C＝0.4）混凝土，避免使用含氯摻料及骨材，足夠保護層（2吋以上），防蝕劑，鋼筋表面塗膜（環氧樹脂）或混凝土表面防水處理，陰極保護處理，並且一旦其他裂縫超過0.1mm時必須即時修改等措施來防止鋼筋的銹蝕。

六、實驗室試驗及現場調查

曾有學者作過調查各種海鹽對鋼筋周圍混凝土之PH值之影響，此數值之改變爲鋼筋易受腐蝕影響之量度。不同海鹽之濃度變化加於飽和氫氧化鈣溶液（Saturated Calciam hydroxide solutions）及水化水泥溶液中（hydrated cement extracts）同時亦記錄PH值之改變。

試驗結果如圖八及圖九所示，由圖中可見在各種海水鹽類中，硫酸鎂在上述兩種溶液中均呈現鹼性之效果最爲顯著，此行爲可歸之於低溶性之$Mg(OH)_2$生成物所致。

由此兩圖中亦可見僅加2%之$MgSo_4$則在飽和$Ca(OH)_2$溶液下PH值自12.8降至10.7 但同一劑量之$MgSO_4$在水化水泥中則PH值自13.1降至12.3，其他同一劑量之鹽類PH值之降低亦不很顯著若再增加$MgSO_4$量爲4%則在$Ca(OH)_2$溶液及水化水泥中PH值分別爲12.8降至9.5及13.1降至10.1，然後當$MgSO_4$量超過10%則PH值降低率緩慢。Na_2SO_4與$MgSO_4$比較，對PH值降低之影響性較不顯著，但與MgCl及NaCl比較則較顯著，NaCl對PH值降低之影響性可忽略，這些試驗發現與Gion[10]之結果相當吻合。

同時Aziz[11]在新加坡之海洋混凝土結構物亦做了一些現場調查研究海鹽之影響性，這些調查已顯示大量之鹽能深入混凝土中，在海水面上下老舊海洋混凝土結構物混凝土保護層25mm及50mm厚。發現在混凝土表面75－100mm深，鎂含量約爲原來水泥漿中含量之12至15倍，鋼筋腐蝕混凝土保護層剝落而使鋼筋再受海水侵蝕，在腐蝕鋼筋周界之鋼筋發現其PH值約爲9.0。

七、防護措施

爲了達到海洋混凝土結構物耐久性必須採用之各種防護措施摘要如下：

(1)結構設計

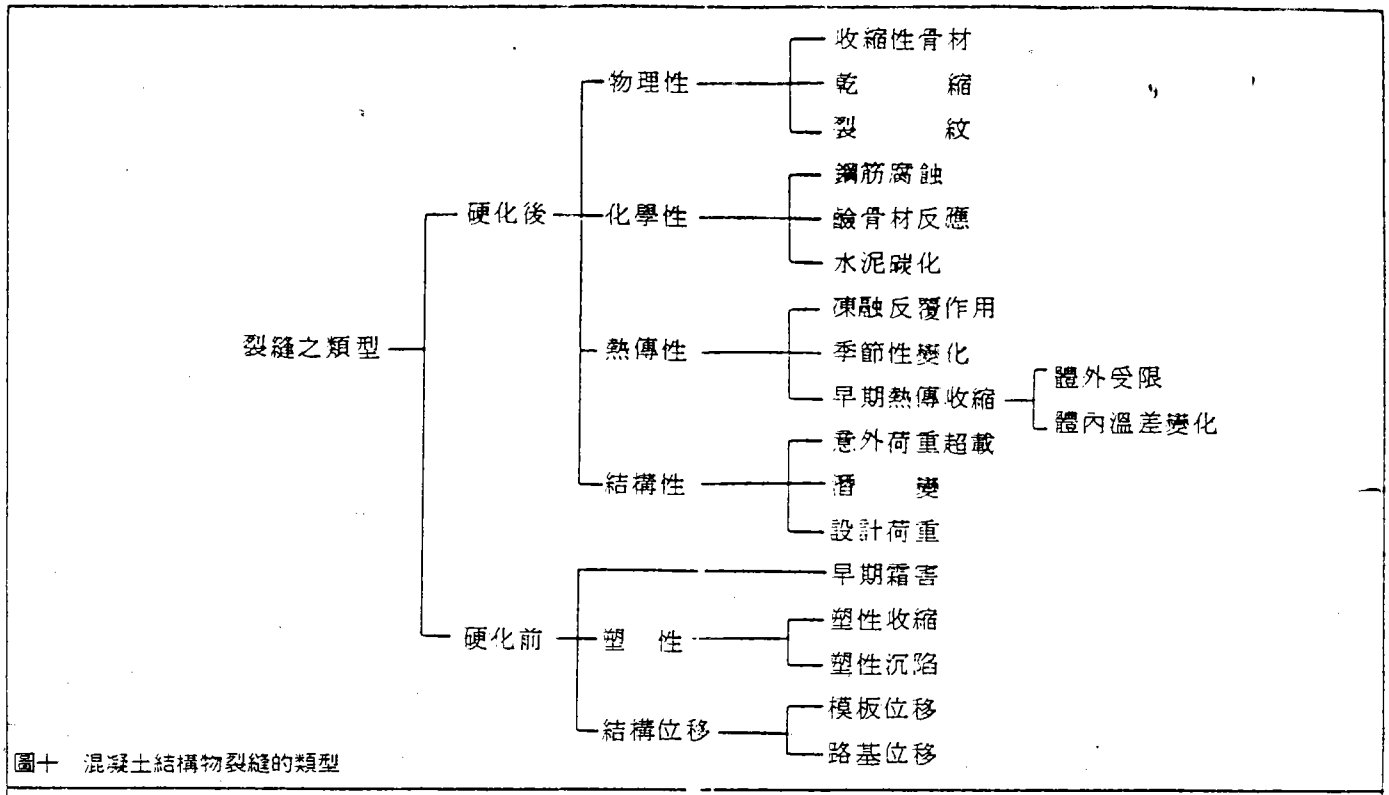
圖十及十一示海洋混凝土結構物裂縫歸類。由表三可見解決對策及察覺時間一般原則表面龜裂寬度限制在0.2mm以下，預力鋼鍵及主要鋼筋之保護層至少必須爲60mm，次要鋼筋爲40mm，必須特別注意接頭避免鋼筋太擠，必須避免銳角(sharp corners)

(2)材料成份之選擇

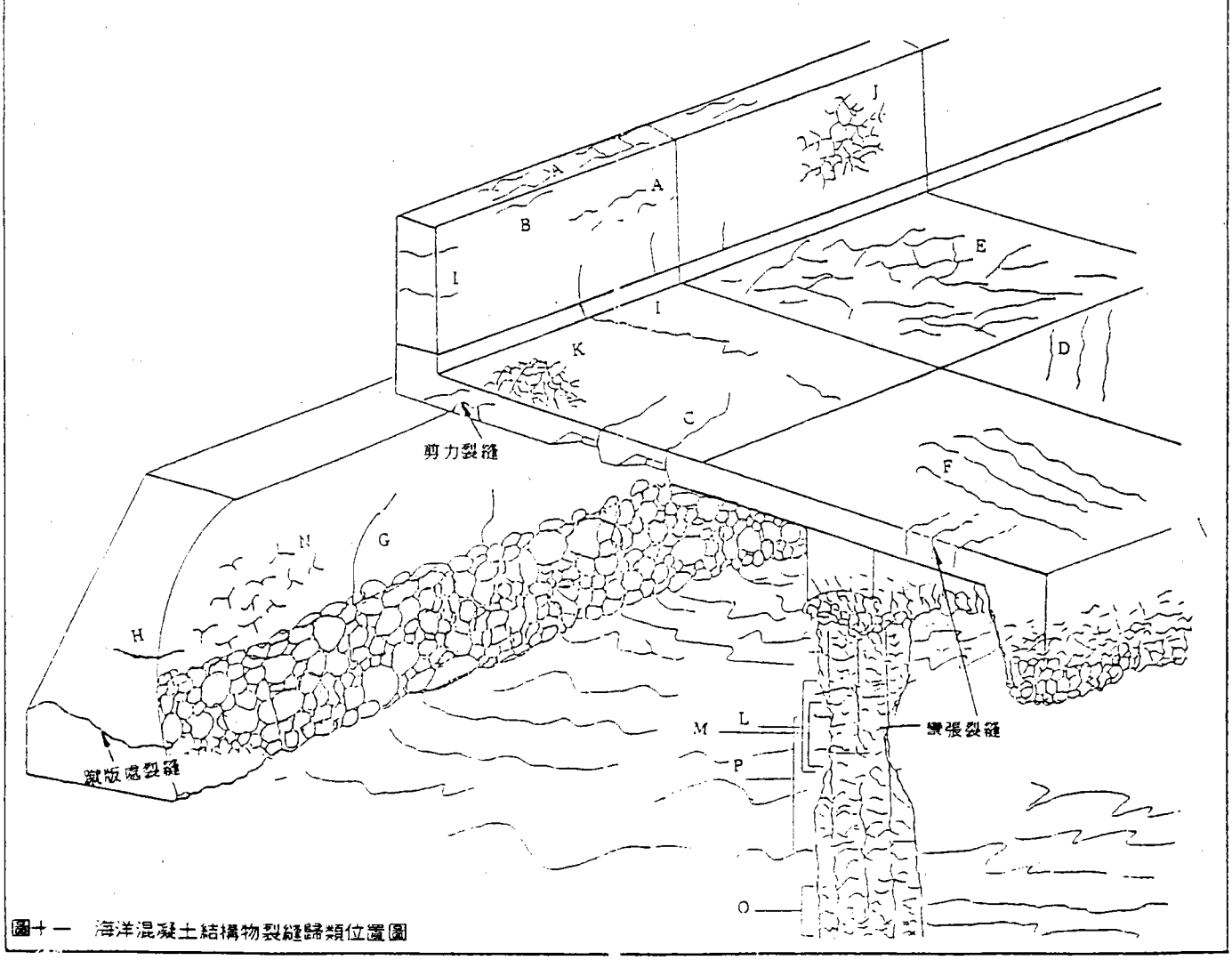
通常卜特蘭水泥專角使用含有5－6%鋁酸三鈣（C_3A）及鹼性含量不得大於0.65%，骨材必須堅強，耐久，不含氯化物和非鹼性反應，拌合及養生水必須爲飲用水之品質，合適之摻料（減水劑，緩凝劑或流動性）必須不含任何氯化物，細砂必須不含污物。

(3)配合設計

骨材必須合適之級配以獲得緊密混凝土（dense Concrete），混凝土水泥含量300 kg/m³及水灰比0.4爲最理想甚至於可用適當之摻料減去含水量，最好用適當之緩凝劑可延緩開始沈澱時間，得到良好之堅實。



圖十　混凝土結構物裂縫的類型



圖十一　海洋混凝土結構物裂縫歸類位置圖

(4)施工技術

施工材料必須保存避免任何污染，模板必須緊密特別在轉角處避免水泥砂漿流出，混凝土必須適當之拌合，澆置及夯實等修飾後之表面必須爲光滑且無蜂窩且若出現有任何浮水孔（bleed-hole）則必須用環氣樹脂填補。在接頭（joint）施工必須特別小心且數量儘可能最小，在施工時間每一階段必須由有經驗之人員控制材料及施工品質。

在海洋環境中根據經驗顯示預力混凝土較鋼筋混凝土較受用，因爲它可以設計在通常負荷下沒有龜裂，同時一般而言預壽施工較現壽較不易受到海洋環境有害因素之傷害。

八、結論

一個海洋混凝土結構物性能成功之主要依其抗拒侵蝕性之海洋環境之耐久性而定。對於環境之侵略性因子及其對混凝土結構上之攻擊機構了解爲發展提供結構物抗拒這些侵蝕作用之要素。假定能在材料選擇配合設計，鋼筋排列，施工技術及品質控制採取適當措施，或許可減少大多數混凝土結構物惡化之問題。

參考資料

1. Cjorv, O. E. (1971). Long-time durability of concrete in seawater. "ACI Journal" 68. (1), pp. 60-67.
2. Biczok, 1. (1972). "Concrete Corrosion-Concrete Protection." Budapest. Akademiai Kiado.
3. Browne, R. D. (1973). The performance of concrete structures in marine environment. "Proc. Symp. Corr. Mar. Envr." Inst. Mar. Engrs.. London. pp. 50-57.
4. Bury, M. R. C. and Domone, P. L. (1974). The role of research in the design of concrete offshore structures. "Proc. Conf. Offshore Technology. Dallas" pp. 155-168.
5. Berman, H. A. (1975). Sodjum chloride, corrosion of reinforcing steel and pH of calcium hydroxide solution. "ACI Journal. 72(4). pp. 150-157.
6. Gerwick. B. C. Jr. (1975). Practical methods of ensuring durability of prestressed concrete ocean structures. "ACI Publication SP-46: Durability of Concrete" pp. 317-324.
7. Aziz. M. A.. Ramaswamy. S. D. and Roy. S. K. (1978). Some aspects of concrete corrosion and preventive measures. "Proc. Int. Conf. Mat. Constr. Der. Count.. Bangkok" Vol. 1. pp. 427-441.
8. Yeomans. S. R. and Cook. D. J. (1978). Corrosion of steel reinforcement in concrete-causes and prevention. "Proc. Int. Conf. Mat. Constr. Dev. Count. Bangkok" Vol. 1. pp. 443-458.
9. Shalon. R. and Raphael. M. (1959). Influence of seawater on corrosion of reinforcement. "ACI Journal" 55. pp. 1251-1268.
10. Gjorv. O. E. and Vennesland. O. (1976). Sea salts and alkalinity of concrete. "ACI Journal" 73. pp. 512-516.
11. Aziz. M. A and Mansur M. A (1983). Deterioration of marine Concrete structures with special emphasis on corrosion of steel and its remedies. Corrosion of reinforcement in concrete Construction edited by Alan P. Crane. Ellis Horwood publishers chichester. U. K. pp. 91-100.
12. The Concrete Society "Non-structural cracks in Concrete" Concrete seciety Technical Report No. 22. 1982. 38p.
13. Metha P.K "Concrete-structure. Properties and Materials" Prentice-Hall Inc. 1986 pp. 105-167.
14. 黃兆龍"混凝土病變及修復"混凝土施工技術財團法人台灣營建研究中心，民國 76 年 2 月，pp.163-191。
15. 林維明"海洋 RC 結構物龜裂與腐蝕互制現象"工程月刊第 60 卷，第一期，民國 76 年 1 月。
16. 港灣技術研究所"港灣鋼筋混凝土結構物防蝕技術研討會資料彙刊"專刊第 23 號，民國 74 年 8 月。

耐久性鋼筋混凝土製作應考慮之要點

林維明

省交通處港灣技術研究所港工材料組組長

摘要

本文主要討論有關混凝土耐久性受環境因子惡化之機構；主要控制因素、氯化物和碳化隨侵入混凝土深度之時間變化特性。預測結構物使用年限與保護層厚度及混凝土強度特性之關係，同時列出ＲＣ結構物保護層欲達耐久性應考慮要點。

一、前言

有些港灣混凝土結構物雖已使用五十年以上，但很少作維修，使用性能仍良好，然而如澎湖跨海大橋僅使用十五年就必須重建，不得不讓人惋惜。土木工程師對於ＲＣ結構物之腐蝕機構所知有限，而腐蝕工程師僅重視鋼結構物，對於ＲＣ結構物之防蝕研究並未注意，因此有關ＲＣ結構物耐久性之研究尚在發展階段。

一般混凝土設計必須考慮下列各點：

(1)結構物各部位之大小及強度與混凝土強度設計。

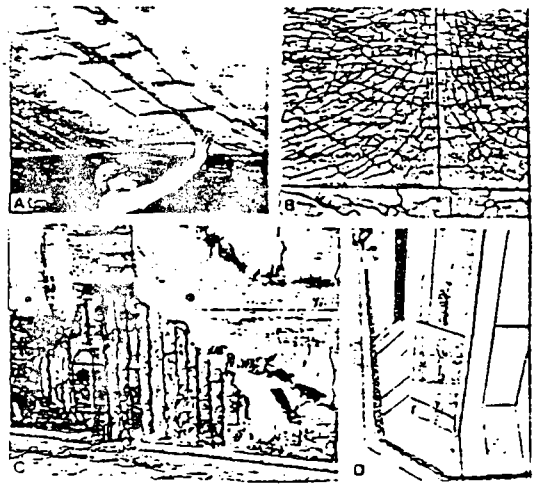
(2)鋼筋強度、大小、數量及分佈等可控制龜裂於容許範圍內。

(3)混凝土配比、水泥種類及保護層等，依據各種天候或暴露條件選定適當之規範應用。

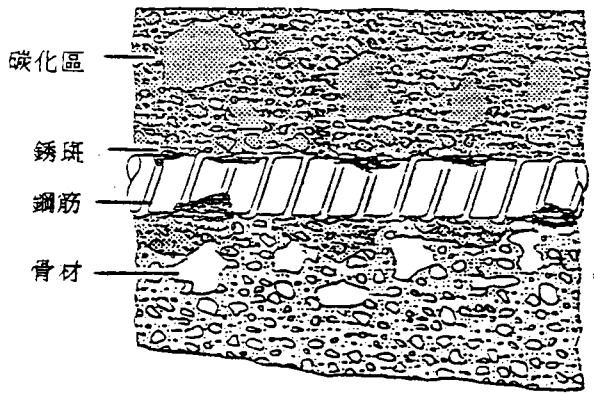
若在施工時，混凝土品質與技術控制良好，則結構物較耐久，有些橋樑可耐 120 年以上，一般建築物可持久60年以上。若定期整修，使用年限可更爲增長。

耐久性災害如同高層建築物有混凝土剝落、破壞美觀問題、ＰＣ或ＲＣ結構物有鋼筋腐蝕問題，橋樑惡化危及安全，依據統計，英國每年花費在修理費用約佔總施工費之40％以上，一般業主需到結構物使用到相當惡化程度，危及安全才開始擔心，而事先並未作防患如同癌症般之鋼筋混凝土腐蝕問題之發生。

表一列出一些混凝土結構物惡化問題、致因及解決之策，這些問題大部與環境條件有關



(a)碼頭底面混凝土剝離
(b)橋面上之鹼性骨材反應
(c)碼頭岸壁上之分層剝離
(d)嵌板受碳化現象



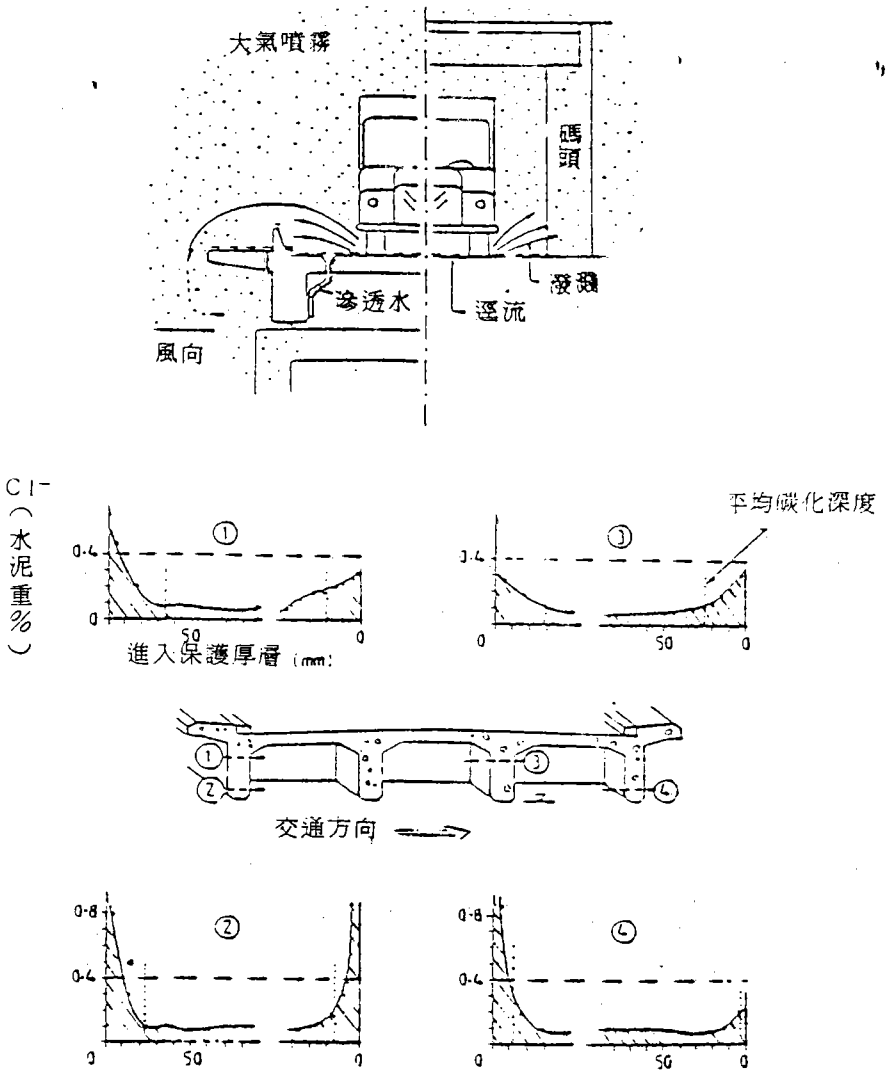
(e)碳化區擴展至鋼筋處

圖一　ＲＣ結構物耐久性問題

，圖一爲一些範例。

通常設計者可能較重視結構物每50年、100年或 500 年發生一次之暴風浪負荷，而對於環境因子如CO_2、Cl^-、H_2O、O_2等因對混凝土之侵略性太慢且不易顯見，故難察覺其影響性。設計者會計算橋樑之溫差變化所產生之應力，但對氯離子侵入保護層、海水侵入接頭和由排水道溢流至鄰近樑柱上及海水發濺至橋面等影響性，並未加注意。圖二爲一跨海橋樑上，海水發濺情況下，氯離子和大氣中之CO_2侵入保護層現象之範例。

現在工程規範一直致力於設計出一套耐久性基準。表二爲英國國家標準對鋼筋混凝土結構物所定之規範。然而此方法並未指出設計年限10 年、20 年…或 100 年混凝土強度和保護層是否足夠，若僅引用此表數據，難以預測使用年限。本文介紹英國 Taywood 工程公司在北海十多年來對於重力式混凝土平台執行有關設計施工與檢查工作所得之經驗，以供營建界參考。



圖二　在橋面下由於受海水發錢氯化物侵入特性[2]

二、ＲＣ結構物惡化現象

㈠惡化過程

圖三(a)示結構物自施工完成後，有害環境因子侵入結構物而開始發生惡化至超過容許值之惡化曲線，此曲線影響因素很多，定期檢查可偵測其惡化發展情形，而在未達到Ｂ線前（超過容許程度）先採取有效防護措施，理想情形希望沒有惡化發生，因此惡化曲線維持在Ａ線（惡化起始線）上。

圖三(b)示現存結構物發生惡化，當惡化至Ｃ點時修整修後，結構物又恢復原新狀態Ｄ點上（原惡化起始線），爾後經常修護可使惡化率降低，而增加其使用年限。修護後 10 ～ 15 年損壞之變化情形，難以預測，故需 3 ～ 5 年維修一次，若使用之維修材料好，則可降低維修頻率。業主與設計者必須認知結構物可能在使用期間內發生惡化現象，而需事先加以評估，施工時先作些防護措施或未作防護，而一旦損壞需作維修，兩者比較權衡經濟與安全性選擇最佳者。現在許多業主因現存結構物需耗費巨額修理費，已開始認知施工時作防護工作之

表一　ＲＣ結構物耐久性問題

發生之問題	致　　因	解決之策
鋼筋焊接不佳而失敗	(a)接合不足而使ＲＣ架構有垂向之潛變與收縮隨時間而變化 (b)溫度變化則鋼筋及屋頂板發生運動乃因無接頭或接頭不足	使用較柔軟的接縫填充物 準備結實和使用較柔軟之接縫填充物
建築物外面瓦片跌落	材料規範及技術不足，所具有之長期性能資料缺乏	不要覆以瓦或使用較佳材料或小心地使用
有蜂巢現象	振動不均勻	用較易流動之混凝土及使用振動器攪拌均勻
凍融傷害及外表面	混凝土拌合太濕或表面工作度太多	水灰比降至0.4及加含輸氣滲料
暑土水泥含量高造成強度損失	水灰比太大及氣溫及相對濕度太高	不要用
預力惡化 (a)暴露之混凝土橋樑	在灌漿之導管，有孔隙，灌漿品質及技術不良	灌漿良好，改進檢查方法
(b)學校預鑄體	預鑄混凝土中含有氯化鈣	不含氯化鈣
鋼筋腐蝕 導至混凝土表面層有剝離龜裂和中空分層現象	1.在拌合時使用氯化鈣 2.骨材中含有害物 3.由大氣碳化或海洋中氯化物濕氣等有害因子侵入	1.不得使用 2.不得使用 3.保護層不足或混凝土拌合不良
鹼骨材反應	1.含矽酸之砂及骨材膨脹和軟化 2.高鹼性含量	1.避免使用敏感性之材料 2.用礦渣或飛灰稀釋水泥

表二　鋼筋混凝土耐久性需求（英國規範參，）

暴露條件	範　　例	保護層最低值（mm）				
輕	表面受保護可防禦天候衝擊或侵蝕性條件例如店舖或辦公室之室內混凝土建築	25	20	20*	20*	20*
不太嚴重	表面隱蔽不受大雨冲刷。混凝土承受凝結且經常在水面下之混凝土結構	—	35	30	25	20
嚴　重	表面暴露受雨水冲刷，乾濕交替，偶有凍霜或嚴重之凝結現象，例如浴室或廚房區域	—	—	40	30	25
非常嚴重	表面暴露在海洋潑濺或嚴重凍霜情形	—	—	50+	40+	30
極　端	表面暴露受海水剝離作用下，例如橋墩或港灣工程	—	—	—	60+	50
混凝土配合	最大水灰比	0.65	0.60	0.55	0.50	0.45
	水泥含量最低值（Kg／m^3）	275	300	325	350	400
	混凝土等級（英國系統）	c30	c35	c40	c45	c50

+混凝土承受凍霜，必須用輸氣劑

＊假定骨材之最大粒徑不超過15mm，則此保護層可降低爲15mm

重要性。

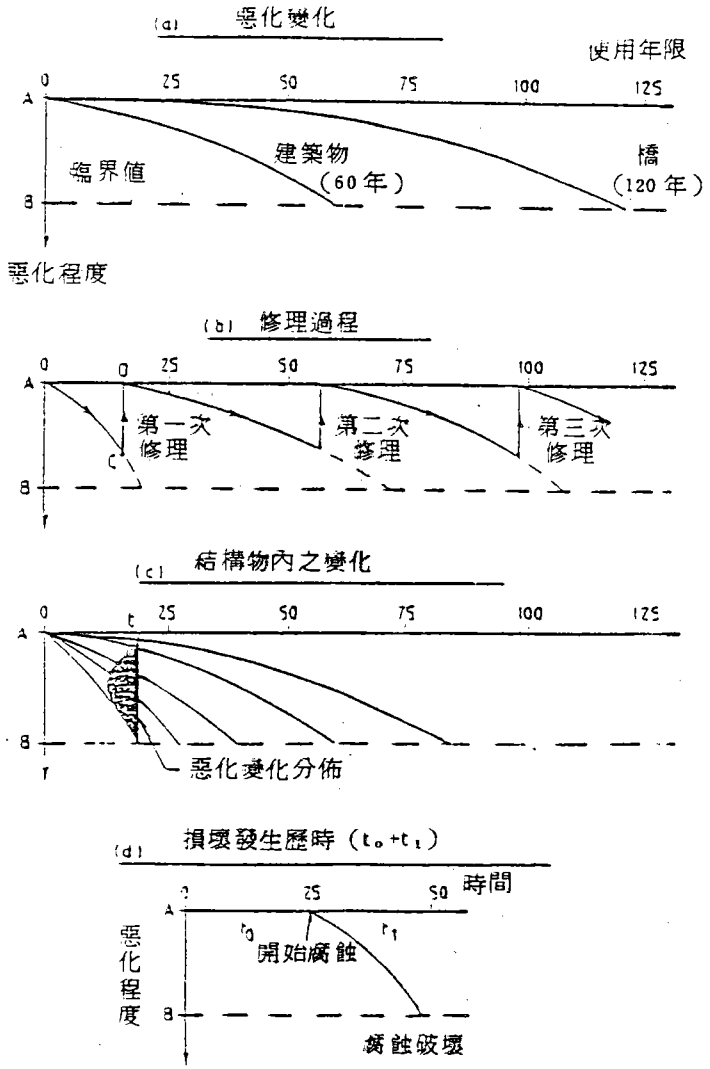
實際上，每一結構體各部位之惡化率變化很大，如圖三(c)所示，某些部位可能一直未發生惡化，而有些則惡化迅速，此乃因混凝土品質、保護層厚度及環境因素等不同使然。

㈡惡化原因

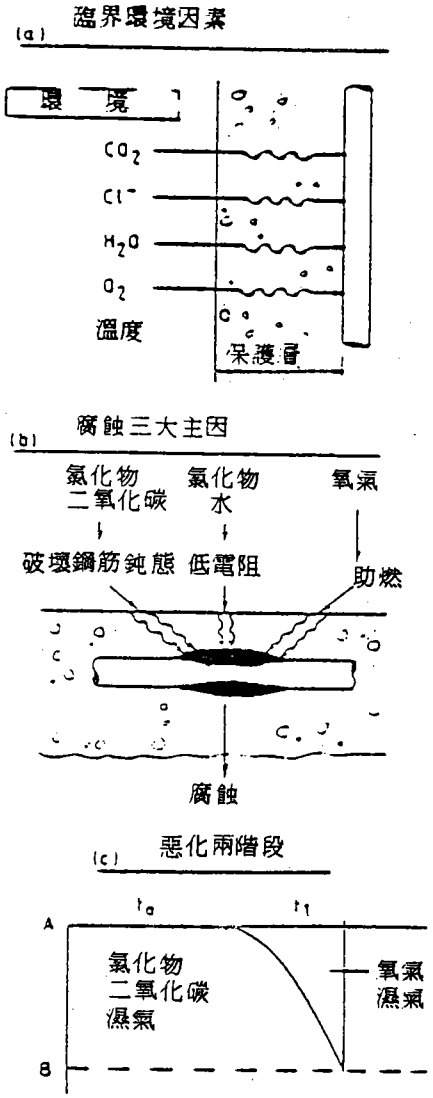
惡化問題大都起因於環境因子侵入混凝土，由於無法清除這些有害因子使然。而有害因子在混凝土存在有一定之容許度，例如路面上，有害因子雖侵入數毫米，可能會使路面發生龜裂現象，而影響原設計之功能，而有些結構物則可能影響不大，規範中均定有容許範圍，有關鋼筋混凝土耐久性之因素中，保護層之特性特別重要。

任何環境因子侵入混凝土保護層，至結構物發生惡化破壞，可分爲兩個階段，如圖三(d)所示，即：

(1) t_0：環境因子開始侵入混凝土至鋼筋處之有害因子侵入量超過容許範圍（開始發生腐蝕）所需之時間。



圖三　惡化程序



圖四　腐蝕機構

(2) t_1：自超過腐蝕臨界值至混凝土發生剝落等惡化所需之時間。

不論濕氣進入混凝土傷害到鋼骨材反應，或空氣中之 CO_2、海水中之 Cl^- 侵入混凝土保護層至鋼筋處而造成鋼筋腐蝕，致使混凝土發生剝離現象等，均包含上述兩個階段過程。

三、鋼筋腐蝕

爲說明上述兩個惡化階段過程及其對結構物之使用年限重要性，以下主要討論鋼筋混凝土腐蝕機構及其防治。

圖四(a)說明鋼筋發生腐蝕之主要環境因子，即 Cl^-、CO_2、H_2O、O_2 及溫度等。圖四(b)說明有三大主因使腐蝕得以進行，即：

(a)氯化物或碳化破壞鋼筋保護層之鹼性保護特性。

(b)爲使發生電化學腐蝕反應有通路，混凝土之電阻至少需低於 5,000 ～ 10,000 Ω *cm*，此低值需由空氣中侵入之濕氣和氯化物所提供。

(c)鋼筋氧化作用之進行乃因氧氣之侵入。

圖四(c)說明惡化過程中，第一階段爲當 Cl^-，CO_2 及 H_2O 等侵入至鋼筋處，超過臨界值所需之時間 to，而 t_1 爲因有 H_2O 及 O_2 而使得鋼筋氧化腐蝕，造成保護層發生龜裂及剝離所需之時間。

結構物發生腐蝕及惡化前，必須同時具有上述三個條件，例如在中東地區相當乾燥，混凝土電阻高達 100,000 Ω cms 之情況下，即使氯化物含量多，混凝土孔隙多，氧氣易侵入，亦不可能發生腐蝕，除非下雨而使電阻降低。另一例子爲海洋結構物潮汐區及經常置於水面下之區域，保護層爲水飽和狀態，大氣中之氧氣無法侵入保護層，故可避免腐蝕現象。

㈠氯化物侵入

氯化物侵入較碳化爲快，雖兩者與水泥之反應程度各有不同，就預測惡化程度而言，鋼筋腐蝕之臨界氯化物含量至今仍在辯論階段，係爲水泥重之 0.2 ～ 0.4 %範圍或爲孔隙水中之 Cl^-/OH^- 的比值？

根據資料顯示，空氣中 CO_2 含量在鄉間環境下爲 0.04 %，而在城市則爲空氣量之 0.4 %。此氣體侵入混凝土後，很明顯地碳化水化水泥在相對濕度穩定保持在 50 ～ 70 %情況下，侵入率最大。乾濕變化不定情況，將使侵入率普遍地降低。

㈡混凝土電阻

對鋼筋腐蝕而言，混凝土電阻爲一相當重要之因素，它與混凝土之濕氣含量關係甚大，如圖五(a)所示，在Cl^-爲水泥重之 0.45 % 情況下，若濕氣含量爲水泥重之 4 %，則電阻降爲低於臨界值 10,000Ω cm ，在同一電阻情況下，若Cl^-爲水泥重之 0.045 %或無氯化物存在之情況下，則濕氣含量分別爲 4.6 %及 4.9 %，即氯化物量增大，則將使濕氣含量降低。愈乾燥，則濕氣含量低，電阻將增大。

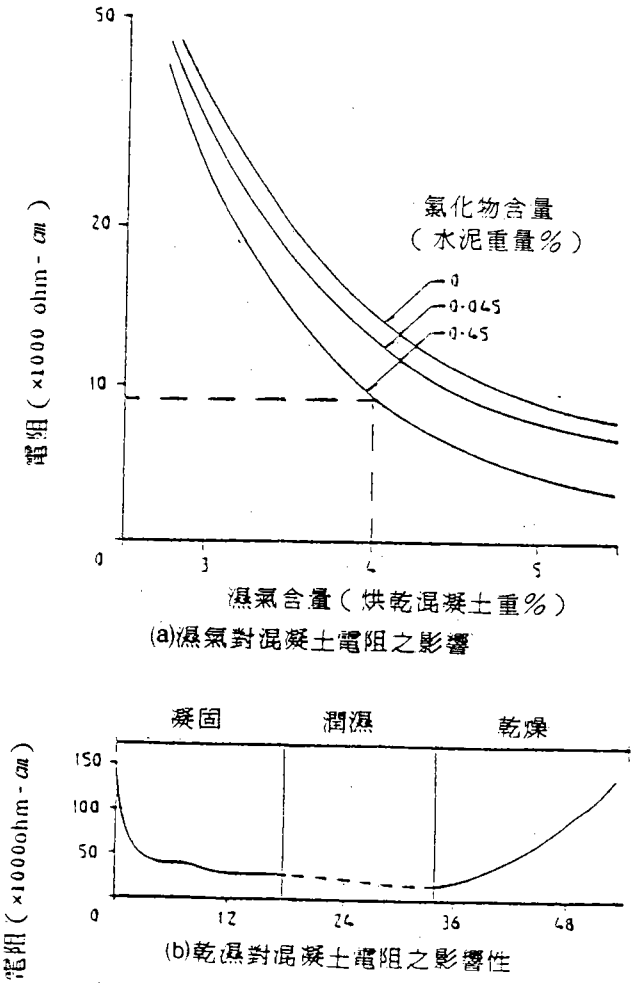
圖五(b)爲乾濕對混凝土電阻之影響性，保護層在凝固期間，養生潤濕，則混凝土電阻將漸降低，受風化則電阻遞增。

修理受氯化物或碳化作用下之混凝土，可在混凝土表面使用一種塗裝，使混凝土保持乾燥狀態，因而可增大混凝土電阻，則腐蝕通路喪失，可避免發生腐蝕現象。

㈢腐蝕條件

除非混凝土在水飽和情況，在數小時內，氧氣可侵入保護層至鋼筋處，腐蝕進行最有利之條件爲比飽和情況略爲乾燥之情形，即相對濕度在 85 ～ 95 %，混凝土電阻低，濕氣含量高且氧氣可侵入之情況。

四、腐蝕所造成之損害



圖五　混凝土保護層電阻

鋼筋銹蝕生成物Fe_2O_3及Fe_3O_4，其體積分別增爲原鋼筋之四倍及二倍。鋼筋體積膨脹對周界之混凝土產生甚大之膨脹力，因而導致各種損害現象，如圖六所示。保護層厚度、鋼筋大小及間隔等爲控制龜裂形態之重要因素。結構形狀亦很重要，例如角隅處首先發生剝離現象，保護層厚度及形狀影響膨脹力之延伸，鋼筋大小及間距影響應力集中位置。災害形態有龜裂（圖六(a)）、爆開（圖六(b)）或中空分層（圖六(c)）及角隅處有懸吊之現象（圖六(d)）等。有些腐蝕生成物雖僅0.01mm厚，亦足以造成混凝土惡化，箍形物（Stirrup）可能由於保護層相當薄，故將先發生龜裂及剝落之現象。

㈠損壞之顯著性

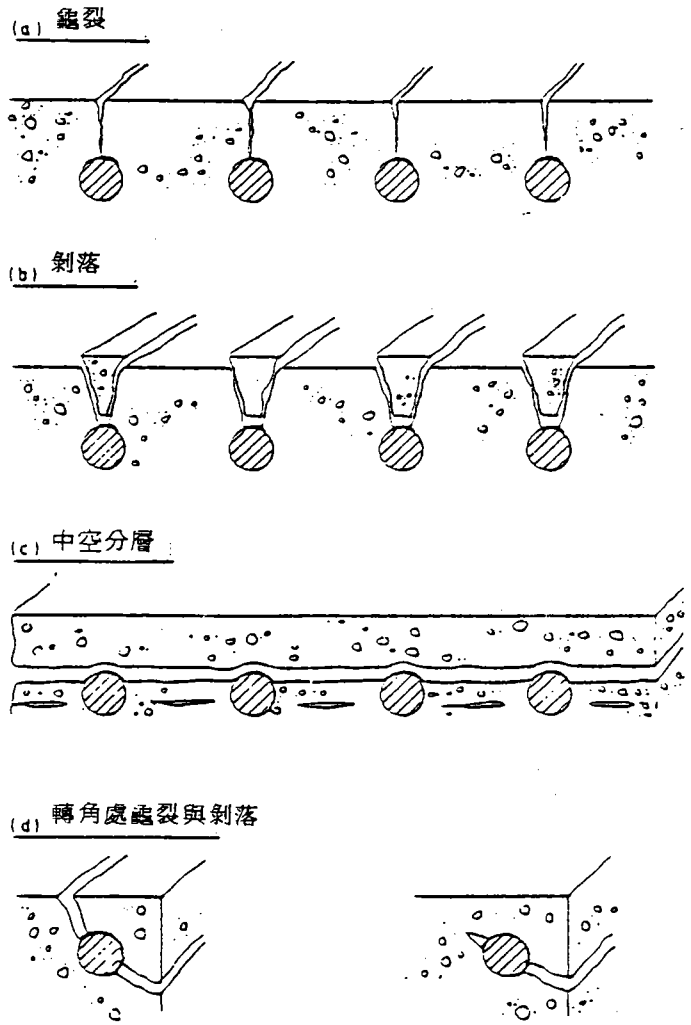
腐蝕對混凝土之損壞的顯著性，依結構物之性能和損害之位置而定。

(a)自建築物小塊剝落掉下來，可能傷及底下之行人。

(b)自橋面下跌落碎片，可能危及橋下交通之安全。

(c)牆或樓板龜裂或中空，可能使得構件強度降低。

(d)任何損壞將導致結構物外觀之損失，有



圖六　各種不同腐蝕災害形態

損美觀。

局部損壞可能對結構物之性能影響很有限，但可能有其他理由使其不被接受而需加以修護。大範圍之中空可能減少樓板之適應性；暴露之鋼筋可能加速腐蝕，海洋碼頭，混凝土樁承受負荷可能由於在角隅處之鋼筋發生銹蝕、混凝土剝落而瀕於險境。

㈡龜裂

根據許多損壞事例發現，大多數混凝土龜裂均與沿鋼筋之腐蝕膨脹力有關，其他原因亦有塑性收縮(Shrinkage)、溫度收縮(Thermal Contraction)及負荷(Load)等。因此在設計上，對保護層及混凝土品質控制較龜裂控制更爲重要。氯化物或CO_2經由裂縫迅速侵入保護層，而使鋼筋發生腐蝕，有效斷面縮小。鐵銹之成長杜塞裂縫，保護鋼筋。因此提高裂縫寬度之容許值，或可降低結構物組成單元之重量及費用，爲值得深入研究之專題。

五、設計年限

估算環境因子侵入至鋼筋處所需之時間(t_o)，較預測腐蝕生成物造成混凝土損壞所需之時間(t_i)爲易，後者有時需費數月或數年，依天候條件而定。

因此爲設計目的，環境因子侵入至鋼筋處其量達到臨界值之時間(t_o)較被採用，亦爲安全邊緣。即設計年限 = t_o。

㈠CO_2侵入

假設一建築物或結構物遠離海岸，碳化侵入率可引用簡單之擴散定律得之，即

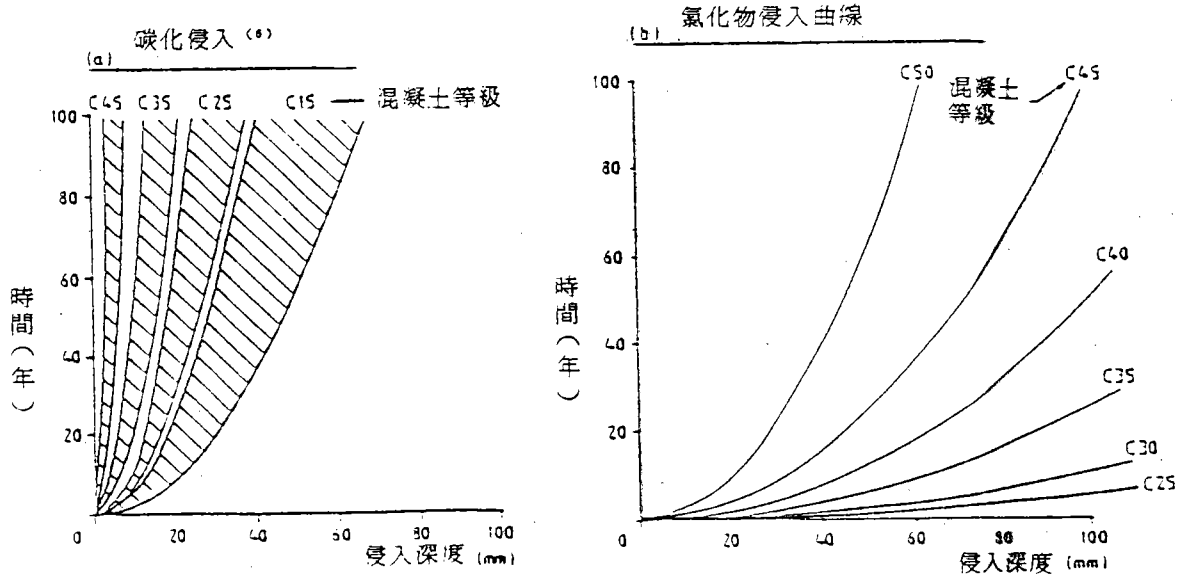
$$x = k\sqrt{t} \qquad \cdots\cdots\cdots (1)$$

式中，x：碳化時間 t 後侵入保護層之距離

k：擴散係數

即保護層加厚一倍，則設計年限可增大四倍，例如原設計年限十六年增爲六十四年；反之若配筋不理想、施工不小心、保護層減半，則設計年限降爲原來之¼，例如原十六年降爲四年，因此使業主蒙受極大之災害損失。

德國學者 Klopfer(1978)[6] 曾發表有關碳化侵入率與混凝土品質之關係，圖七(a)爲碳化侵入深度與混凝土種類及使用年限之間關係，例如使用保護層 20mm，混凝土種類爲 c35（強度爲 35 N／mm²），則使用年限可達 100 年以上。



圖七　耐久性預測

因此設計者可選擇保護層厚度及混凝土品質，而由圖七中找到所需保護層之厚度。

㈡保護層澆置之容許範圍

英國混凝土施工規範規定，實際混凝土保護層不得小於規範所定厚度（Nominal Cover）5mm，而對暴露不嚴重之情況，混凝土強度爲 27.5 N／mm²（c30），保護層要求至少爲 10mm。

㈢氯化物侵入

海洋結構物包括近海建築物、碼頭或橋樑等，氯化物侵入較碳化爲快。氯化物侵入率亦遵循擴散定律，圖七(b)爲 Taywood 工程公司根據四〇座以上現有海洋結構物所測得氯化物侵入曲線。假設使用年限爲五〇年，保護層厚 70mm，在圖七(b)查出需用高強度混凝土C45（45 N／mm²），而據英國規範（表二）即使在極端暴露條件下，C45 之混凝土所用的保護層厚度僅用 60mm，再查圖七(b)，若使用60mm之保護層，使用年限僅達三十七年，故對某些條件而言，可能無法達到設計年限。

在無結構上之龜裂情況下，氯離子擴散進入混凝土，依 Fick 擴散定律示如下式：

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_c \frac{d^2 c}{dx^2} \qquad \cdots\cdots(2)$$

式中，c：氯離子之濃度

x：氯離子侵入之深度

t：氯化物發生擴散所花費之時間

D_c：混凝土之擴散係數

式(2)之標準解法可示如下式：

$$C_{(x,t)} = C_o - C_o \mathrm{erf}(x/2\sqrt{D_c t}) \qquad \cdots\cdots(3)$$

式中 C_o：混凝土保護層表面層之氯化物濃度

erf：誤差函數（error Function）

因此在鋼筋處之氯化物含量達到臨界值所需之時間，決定於氯化物之擴散係數、混凝土表面之氯化物含量、保護層厚度等因素，可根據鑽孔取不同深度下之試樣分析氯化物含量而得。

㈣氧氣侵入

氧氣擴散進入保護層至鋼筋處，擴散控制因素與氯化物相同，乾混凝土易使氧氣侵入，飽和水情況則侵入量較低。

如圖八所示，在同一相對濕度，保護層愈厚侵入率愈少，例如相對濕度60％情況下，保護層 50mm 及 25mm，O_2之侵入率分別爲 75mm之 5 倍及20 倍，而在同一保護層情況下 O_2 之侵入率將與所處之相對濕度成反比，例如 25mm之保護層情況下，在相對濕度80％條件下，氧氣侵入量僅爲 60％ 情況下之 1／5。

六、一般耐久性原則

雖然有關耐久性研究工作，至今仍在繼續進行中，目前對鋼筋混凝土結構物設計施工及檢查，欲期達到耐久性要求可歸納如下：

㈠耐久性主要目標

(1)主要目的爲提供混凝土表面層緊密性，以防止環境因子侵入。

(2)水灰比必須低於 0.4，可降低硬化水泥中之孔隙，若水灰比大於 0.4，則骨材間之孔隙率變爲可互相連接。

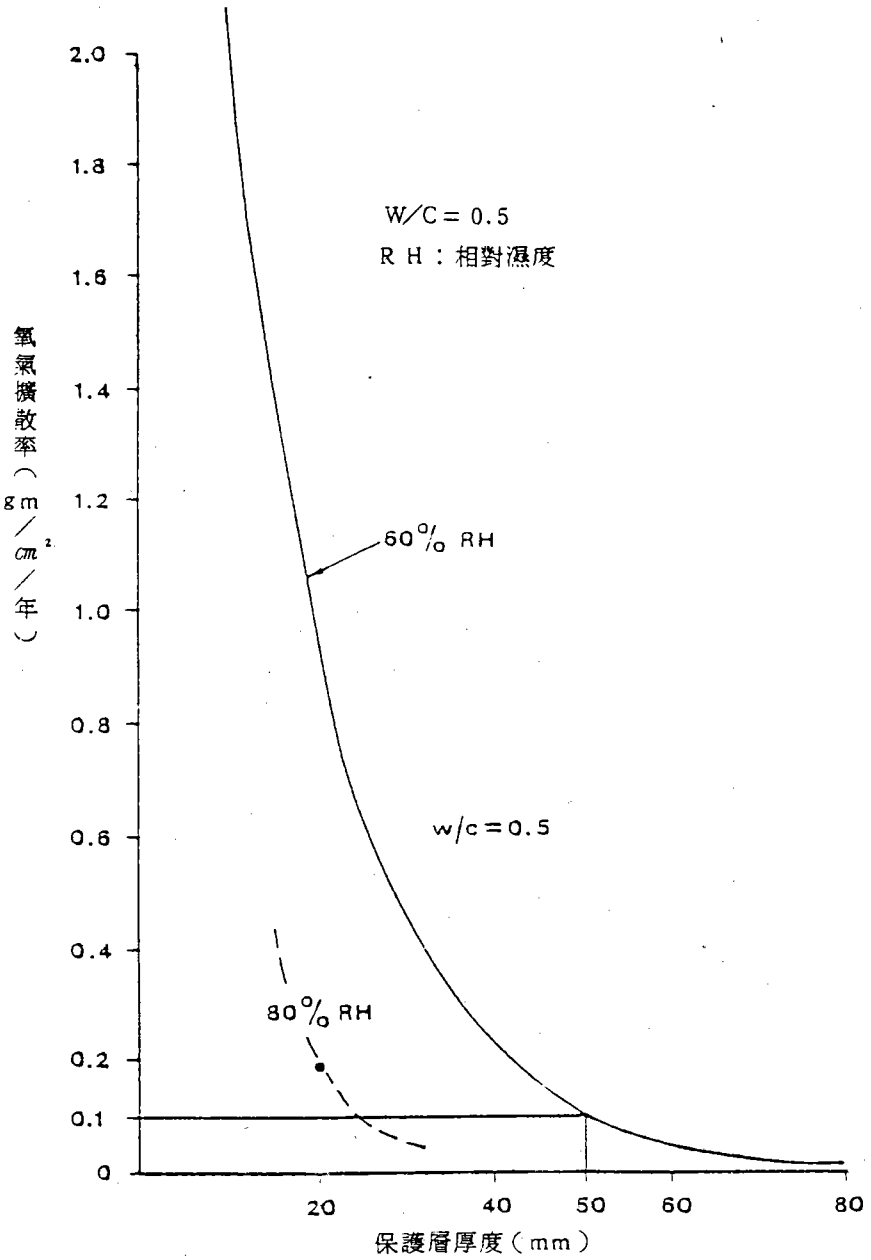
(3)配合設計適當，合理之填料（即體積小）、級配良好、骨材品質控制好、水泥充足、骨材間之孔隙小，可減少擴散。

(4)水泥含量多，可確保因拌合水所致混凝土孔隙量較少。若水泥量高可與侵入之二氧化碳作用，而減少碳化作用，然而水泥量過量，拌合時可能導致過多之水化熱，因而引起在混凝土上有早齡龜裂之現象發生。

(5)使用高強度水泥（大於 35 ～ 40 N／mm²），拌合時可確保得到水灰比低及水泥含量高，使得環境因子不易侵入之混凝土，但若結構上要求爲低強度者，則此項要求將使工程費提高。

(6)水泥中含 C_3A 量高，則可吸收環境侵入之氯化物。

(7)使用高爐石粉及飛灰等水泥替代品，可



圖八　相對濕度對氧氣擴散率之影響性

不用高強度水泥，而得到緊密之混凝土。

(8)摻加工作度佳之摻料和強塑劑，可使拌合時水灰比低，工作度良好，易於灌漿之混凝土。

(9)黏結拌合，使用砂含量，考慮攪灌方法使得在保護層不產生孔洞和蜂窩現象。

㈡灌漿

夯實可控制灌漿材料間之孔隙，灌漿時避免骨材、砂和水泥沉至結構體底部，否則將使結構體頂部水量多，而造成表面層多孔、水灰比高及收縮大之現象，故結構物頂面要保持有最低之工作度。

㈢養生

(1)混凝土表面濕養生，可形成一相當不透

水之緊密外皮，如此可減少環境因子侵入；在空氣中養生用塑膠布保護。

(2)可用養生膜增加外皮阻力。

(3)水泥替代品可能比正常之水泥更需用潤濕養生，以確保其有效性。

㈣鋼筋或鐵形物

(1)在施工中，確保結構物上各部位之保護層厚度，一定要合乎規定，特別在易受傷之處。

(2)在轉角處避免鋼筋排列太近表面層，由於在轉角兩側均有環境因子侵入，因此侵入率爲通常單面（Flat Surface）同一保護層情況之兩倍。

(3)對大多數結構物而言，由於收縮、溫差變化及負荷等所造成之裂縫寬度設計值，對腐蝕而言並非一項相當重要之因素。

㈤室內

(1)在室內較室外溫暖有中央控制系統，特別在廚房、浴室有時較爲潮濕，天花板上隱蔽處相對濕度高，因此將使腐蝕速率提高，應加注意。

(2)塑膠布由於其多孔性，若當作屏障，可能效果不彰。

㈥額外之防護

(1)設計良好之混凝土包覆：抑制有害因子侵入，可提供額外之安全和增長使用壽命，可使用一些已被證明使用性能良好者，塗裝在混凝土表面上，結構物有些部位嚴重地受氯化物侵入，例如橋樑接頭和鄰近之樑，橋面底部和橋墩等，塗裝後則表面之氯化物將較未塗裝之粗糙之混凝土表面者，易受海水冲走。

(2)爾後在結構物使用年限內，可能需再塗裝，但費用實際上將比修理費用爲低。

(3)永久掩蔽物（Permanent Shutter）對於混凝土密封可能相當有效，如此則可使用低品質混凝土，但必須校核此種掩蔽物隨時間之惡化現象。

(4)在美國使用環氧樹脂（Powder Epoxies）塗裝於橋面上之鋼筋上，已被證明相當成功[7,8]，且即使在紮筋過程中稍有局部損壞，對耐久性之影響性不大，且需要可再加修整。通常鍍鋅鋼筋對於氯化物環境並未被認爲有效，一般而言，不銹鋼太過於昂貴，且若與其他金屬連接，則必須避免其間發生局部電流反應。

㈦施工中之檢查

(1)在紮筋時必須注意檢查其位置不得太近表面，利用保護層測定儀量測，確保保護層厚度合乎規定，若保護層太薄則有害物易侵入，爲未來災害之伏因。

(2)鑽心取樣帶回試驗室對保護層品質作檢查。

(3)加速侵入試驗：校核拌合物對於控制有害物侵入之有效性，此試驗對試拌相當重要。可使用凍融試驗。

(4)檢核混凝土拌合比，以確保在施工期間能符合規範。

㈧在施工期間之檢查

(1)碳化侵入：可取回混凝土試樣使用甲酚醛鹼性試驗噴射，若是一般混凝土則呈現粉紅色，若在碳化區則爲無色，因此可查出碳化深度。

(2)氯化物侵入：可鑽取試樣自表面下 0～10mm，10～25mm，25～50mm …等之鑽心（穿過保護層至鋼筋處），然後分析不同深度下氯化物之含量，然後畫出其與深入之關係及災害性質。

(3)環境因子侵入偵測：在易受傷害區，發生災害前需事先用非破壞試驗錘，超音波測定混凝土強度，用腐蝕電位測定儀及電阻儀測定混凝土電阻及鋼筋腐蝕電位及早作防範工作。

七、結論

(1)現今工程師們必須了解結構物在使用期間惡化之機理及其防制方法，以應業主及設計者之需求。

(2)有關有害因子侵入理論、設計年限之求

法等，相當具有實際設計之價值，應再深入研究。

(3)控制耐久性之要求爲：混凝土外層緊密、保護層足夠、良好養生（最好用濕養生）、表面加塗裝防止氯化物、濕氣、二氧化碳及氧氣等有害環境因子侵入。

(4)作額外之塗裝及控制有害因子侵入技術，將可使臨界災害區更爲安全，甚至可使用較低之混凝土品質及降低保護層厚度。

(5)在施工期間內細心檢查，且在使用期間對環境有害因子侵入，作詳細之偵測工作，與花昂貴之修理或換新費用比較，利弊是相當值得的。

(6)在災害區必須敲掉惡化混凝土至銹蝕鋼筋背後，清除鋼筋銹蝕，再用稠密混凝土（水灰比低）修補保護層，而對尚未損害區需加防制。

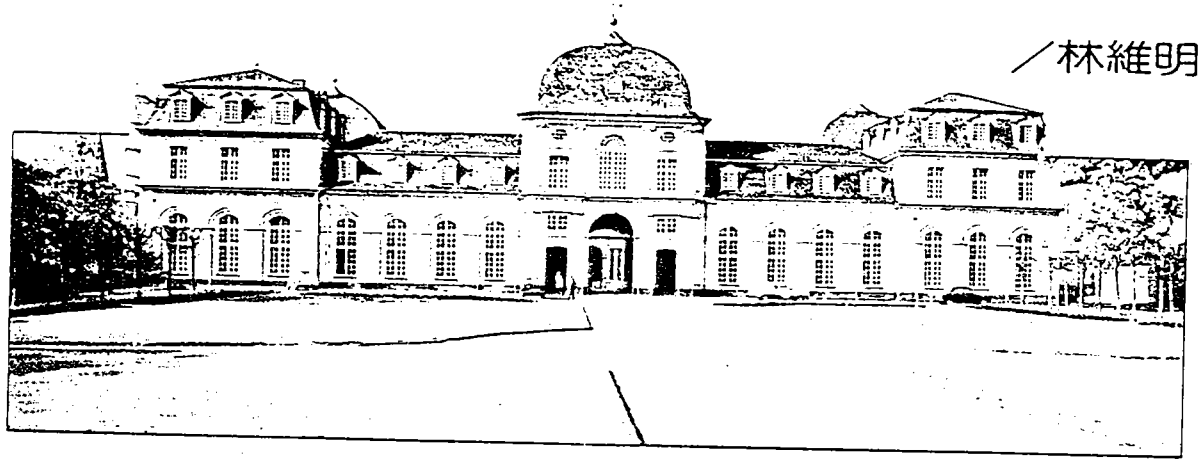
(7)對於新建結構物應配製採用低水灰比，拌合時控制氯化物含量，水泥量足提供稠密之混凝土，避免有角隅形狀結構，或需加額外保護，保護層要完全地夯實，厚度合乎規定，且表面用浸水養生。

參考資料

1. Construction Industry Forecasts, 1983-1984-1985 by the Joint Forecasting Committee of the Building and Civil Engineering EDC,. National Economic Development Office, HMSO, December 1983.
2. VOLKWEIN, A. and SPRINGENSCHMID R. Corrosion of Reinforcement in Concrete Bridges at Different Age Due to Carbonation and Chloride Penetration. Proceedings of the Second International Conference on the Durability of Building Materials and Components. National Bureau of Standards, Gaithersburg, Maryland, USA. September 14-16, 1981.
3. BSOOOO, The Structural Use of Concrete. Part 1. Design, Materials and Workmanship. Document 84/11009, The British Standards Institution. March 1984.
4. BROWNE R.D., DOMONE P.L., and GEOGHEGAN, M.P. "Deterioration of Concrete Structures under Marine Conditions- Their Inspection and Repair", Paper Presented at the Maintenance of Maritime Structures Conference, Institution of Civil Engineers, October 1977.
5. TUUTTI K. Service Life of Structures with Regard to Corrosion of Embedded Steel. In Quality Control of Concrete Structures. Volume 1. Swedish Cement and Concrete Reseach Institute, Stockholm. 1979.
6. KLOPFER H. The Carbonation of External Concrete and How to Combat it. Bantenschutz und Bansanierung. Volume 1 No. 3. 1978. pp 96-97.
7. CLEAR K.C. and VIRMANI Y.P. Corrosion of Non-specification Epoxy-Coated Rebars in Salty Concrete. National Association of Corrosion Engineers. Houston, Texas, USA, 1983.
8. Anti Corrosion Times, Vol 2, No. 2. The Fusion Bonded Coaters Association, Hinsdale, Illinois, USA. July.
9. BROWNE R.D. "Detailing for Durability" Concrete Society Doncaster Symposium Feb. 1980.

混凝土結構物塗裝之實際問題

／林維明



混凝土是時下國內極為常用的結構物使用材料，其保養維護與美化諸問題，牽涉建築及塗裝兩相關施工業，因而時起紛爭，急待解決；本文就混凝土結構物之各種特性及種種理論可變因素，作一概括性之介紹，以供吾業界參考……。

一、前言

過去一般業主及設計者均認為，混凝土結構物不需作維護且可耐久，而實際上並非如此，有些混凝土結構物更需經常維護，才能達到預期之設計年限；以澎湖跨海大橋為例，該橋於民國60年建造完成通車，67年就發現第16孔腐蝕嚴重後，開始對各孔進行各種不同整修，邀請國內外專家研究對策為安全起見於民國73年間，將腐蝕嚴重段改為路堤，而較輕者由維眞、中道、昭林、弘瑋、南寶及柏林等六家廠商引用中、日、美等國不同之防蝕材料進行塗裝整修，然而卻並不盡理想，為一勞永逸，現已逐步將原有橋樑改路堤，一座橋樑壽命僅達13年，實在可惜，若能當時在施工後隨時注意使用塗裝防護，相信其使用壽命一定會更長。

二、塗裝之需要性

在下列三種情形下，需決定使用塗裝來保護：

1. 增加使用性能：例如在化學工廠有酸氣溢出，肥料製造工廠硫酸塩含量高之土壤，海洋結構物等有侵蝕性之環境下，若未加塗裝保護，混凝土很難達到預期之使用性能。
2. 增加耐久性：使用塗裝可防止水、氯化物、二氧化碳等有害因子侵入混凝土中，因而可

增加其耐久性。

3. 增加美觀或承受風雨攻擊之性能：保護結構物之外觀、修飾混凝土表層不平處或減少可見之銹斑。

有兩種方法可對塗裝作合適之選擇，即使用過去之經驗或自微傷開始塗裝，選用前者需結構物或環境條件之特性沒有太大之改變，另外使用之塗料亦無改變，而後者主要是對以前所使用過之塗料產生疑問或不滿意時而選用，塗裝前必須先了解水泥及混凝土之物理及化學性質，而後才能對混凝土本身或其內之鋼筋發生惡化及受侵襲之機構有充分之了解。而其塗裝機構複雜，因此即使最內行之研究者亦在努力達成上述目標。混凝土惡化最常見之形態如受硫酸塩侵蝕或氯化物引起之腐蝕等等。現時已有充分之資料顯示，可對塗料之選擇有部份之幫助。將來再加充實，有更多之研究及實務經驗將可繼續擴展此方面之資料庫。

試著去了解混凝土性質及其惡化過程，注意焦點可放在塗裝後結構物使用性能是否令人滿意，掌握這些資料，必須確定何種塗裝，專利系統或特殊配方具有所需要之性質，然後將所選定之塗料可在合理之方式下應用於結構物上。例如：對天候條件、濕度、溫度等之容忍度或對混凝土表面條件和其本身組織等之影響性都必須詳加考慮。對任一混凝土保護之特殊問題，必須詳細考慮多作比較分析將更有用，例如選定可降低ＲＣ結構物碳化率之塗裝，然亦可使用其他的方法來處理，以得到相同之效果，因此需多作比較。

埋於混凝土中之鋼筋，受混凝土水泥水化之鹼性環境保護，由於大氣中之二氧化碳或其他氣體的侵入而使鹼性環境中之 pH值降低，一旦碳化進行至鋼筋處，抗拒腐蝕之鈍態將喪失，腐蝕速率主要受大氣中侵入之氧氣和濕氣來決定。

通常碳化過程中包括大氣中之 CO_2 及濕氣，因此在相當乾燥之大氣情況下，縱有 CO_2，但碳化進行並不顯著，主要是缺水之故；相反的，在相當潮濕之情況下，或在滲透性相當充分之混凝土孔隙中若充滿水；亦可阻止 CO_2 侵入混凝土中，故碳化率亦低。碳化率最大之情況爲大氣中之相對濕度介於 50～70%。普通混凝土其碳化率變化爲非綫性。許多專家學者曾提出各種碳化深度與時間之關係，最常見者爲碳化深度與時間之平方根成正比之關係。

鋼筋混凝土結構物設計規範例如英國Cp-110[1]等通常對防制鋼筋腐蝕之混凝土品質及保護層均定有建議值，此係根據結構物之期望年限內來設定，然而事實上混凝土結構物之期望年限很難定。

由緊密天然骨材所製成之混凝土，其碳化現象，英國建物研究組織（Building Research Establishment）ＢＲＥ[2]曾建議一般情形，碳化僅深及混凝土之表層數厘米，即10年後深及 5～8ｍｍ，而50年後可能深及10～15ｍｍ。

然而混凝土碳化過程可依混凝土原組成而變，例如水灰比，現澆後養生條件良好及使用時之曝露條件等均爲其左右因素。

現正發展之高強度水泥有較高之水灰比，再加上養生條件不足，因而使得英國及西德現在建造之ＲＣ結構物普遍發生碳化高之現象。

Ｆｉｇｇ[3]最近曾調查兩國混凝土試樣發現一爲材齡12年，結構物外表層曝露條件下，碳化深及60mm，而另一材齡135年者，碳化深僅達2mm。

碳化速率過大，將導致鋼筋腐蝕及混凝土剝落，預期延長使用年限，將可採用塗裝方式來確保混凝土未來之碳化率能在容許範圍內。

降低碳化率及研究防制方法之基本需求爲「需限制 CO_2 及濕氣侵入混凝土」，許多人認

爲防冰之混凝土可防止鋼筋發生腐蝕現象，然而很難防止濕氣可自廣大之塗裝面上或自結構物之接縫，例如：門窗、裝飾物等處滲入而發生碳化及腐蝕，除外可塗上水蒸氣不能通過之塗料於混凝土上，冒其可吸收水氣而在塗裝上起水泡之風險。

自此種「防水」觀念開始，實際上有些產品有防水效果，但碳化率增大，故對混凝土結構物本身而言是有害的，例如矽酸塩或矽甲烷之處理（Silicone or Silane treatments）爲防水產品，可能增加碳化率—至少剛開始阻止水侵入混凝土表面，而不允許混凝土吸收水，因而使得大量之 CO_2 侵入水化水泥中。

因此最好追尋限制 CO_2 侵入之目標，有許多塗裝專利可讓 CO_2 侵入之滲透性降低，但容許來自下雨或自建物室內所產生之濕氣之侵入，大多數塗料有讓水氣穿過而降低吸附水（trapped water）之性質。

若對上述所討論之問題，過去沒有經驗可使用那些設計基準以利於設計者選擇合適之塗裝，似乎可尋求下列兩類資料來獲得：

1.獨立團體：

例如@建物研究組織（Building Research Establishment ），水泥與混凝土協會（Cement and Concrete Association）混凝土學會（Concrete Socity），油漆研究學會（Paint Research Association）及契約理事會（Agreement Board）等。

2.塗料製造廠商：

有關特殊塗料之性質及使用性能仍在研究階段，例如有關ＲＣ惡化及其修理英國ＢＲＥ[4]及混凝土學會[5]均有報告，英國國家標準局亦對塗裝訂有規範[6]由於在英國缺乏有用之資料，故所提出之建議仍相當有限。而有關氯化橡膠（Chlorinated rubber）、環氧樹脂（epoxy）、瀝青（bitumen）及一些其他種類之塗料等，已有良好之使用成果，所定出來之設計指引建議程度就較大些。

另一個問題爲當考慮由獨立團體所提出之建議；通常將塗料按一般標題歸類，即歸類不夠細分，因此若認爲在同一類別下之所有商業產品，其使用性能相同這是不合理的，因爲如不同製造廠商出產，不同之填充物形態及負荷情況下之樹脂將影響塗料之性能甚巨。

塗料廠商亦可提供更多有關其產品之資料，但是否有關聯且無偏差，無誇大其詞呢？值得考慮！

指定者（Specifiers）可面臨來自現有相當多公司或產品廠商之不同之意見。且可能遭受難以弄清楚及決定那種產品，特性及意見是正確的，未必所有製造廠商均會讓人誤解，但不同之經驗，試驗方法及所表示之觀念等經常會使人辨別不清，尤其是廠商所提供之資料益處較少，虛構之情形較多，更讓人感到混淆不清，甚至有些產品無法眞正了解其所能提供之確實用途何在。

實驗室試驗結果經常報導有關可以證實其所宣稱之商業化塗料之性能，而主要問題爲如何評估試驗結果與實際工業應用之使用性能之間的關係。

試驗可單獨在油漆工廠執行或在工廠使用適當之混凝土、水泥砂漿等試驗條件和控制增加試驗環境下之 CO_2 含量或修正空氣中之相對濕度等，而可能較快得到有用之結果，然而從實際結構物或自然曝露條件下試體所得到之比較性資料較欠缺，因此必須考慮所得到試驗資料之價值性，對於新塗料之試驗通常是在實驗室中完成的，因而可能未考慮曝露在風雨中對塗料保護性能的影響。

舉一個最近西德所做的兩種塗料之研究。

試驗情況均考慮相當周密，結果之可靠度亦高，然而得到雙面結果之範例，說明如下：

其中一種塗料考慮有孔隙之設計，因此在正常相對濕度下將充滿水，而限制CO_2之侵入。而第二個製造廠商則使用特別乾燥之大氣情況下而提出比較性實驗室試驗資料，此資料結果說明了上述濕度相關機構之塗裝（humidity related mechanism coating）顯著地比其他塗裝爲差。所引起之問題在英國組織（UK organisation）無法得到正確答案。此證據可能由製造廠商弄得更複雜，由於他們通常做了比較性之結果但並未提給業主，而僅將最好之結果提出來（例如在試驗室CO_2滲透性最低值）通常所提之產品都是根據〝它並非不可滲透的，但已經相當足夠了〞此相當足夠之說法似乎係根據理論上之考慮而已。

另外製造廠商所提供之文獻，當談及其產品之濕氣滲透性，亦陳述了塗料可吸出原底質（Substrate）之濕氣。

對業主而言，塗裝必須兼顧耐久與美觀，故需對塗料作徹底的了解，此需考慮塗裝後混凝土之碳化和若未塗裝會有什麼變化作一比較，當然其品質及結構物之曝露條件之影響性亦爲重要之相關因素。

因此英國施工工業研究資料學會The Construction Industry Research and Information Association（CIRIA）開始進行一研究計劃評估現有塗裝資料，試驗數據及設計降低碳化率塗裝之使用性能，計劃完成期中報告及指引手册等，作更深入之研究。此項研究計劃希望爲CIRIA計劃之後續工作，然其完成之程度將依其希望塗裝工業界所能贊助之經費需求可得到之反應而定。預期此基金能儘快籌成。現在不想預斷期中報告之發現，希望能很明顯地獲益，則必須考慮下列兩點：

1. 收集可達到預期保護效果之塗裝實際性能數值，而非僅賴實驗室之數據。
2. 在試驗方法上達到一致性，因而使現有產品比較更有價值性。

此外多蒐集現有塗裝可達到之性質及使用性能資料，以確保塗裝能達到預期之效果，下列幾點亦須考慮到：

1. 易於應用：應用塗裝於結構物達到所需膜厚之容易度。
2. 在應用時間內，塗料對底質及天候條件之容忍度，例如兩壓密之材料在低溫養生相當快，而其對混凝土濕氣含量之容忍度如何？
3. 在混凝土上之龜裂對塗料行爲之影響性，若有龜裂，應如何處理，非柔性塗裝將隨底質之輕微運動發生龜裂現象，即使柔性塗料具有廣大的使用範圍，亦應愼重處理，記住：龜裂寬度0．1mm增爲0．2mm，則已增大100％。
4. 在塗料物理上之缺陷之容忍度，即若底質粗糙或塗裝薄至何種程度才可使塗裝上無小孔出現？根據某些研究結果指出：爲降低碳化率之塗料，在塗裝上之小孔，其影響性很大。

此外應隨時對塗裝在美觀與保護性能上作偵測，使能更深入了解並可達到預期之使用性能爲依歸。

三、結論

根據上述，在此提出下列三個準則以供選擇正確之塗裝：

1. 先定義問題所在：例如由混凝土外側遭受硫酸塩之侵蝕或混凝土內部塩結晶所引起之腐蝕現象之判定。
2. 獲取任何可得到之相關經驗與資料：努力獲取正確之個案資料。

3.最謹地察看資料：塗料對於某一結構物具有良好之保護性，不見得對其他結構物亦表現良好。

參考文獻：

1. British standard code of practice cp 110 1972 "The structural use of concrete".
2. Building Research Establishment Information Sheet IP 14/78 The Carbonation of Concrete made with deuse natural aggregates.
3. Figg J W "New light on the early history of reinforced Concrete "Chemistry and Industry PP793-795 Nov. 1984.
4. BRE Digests 263 264 265 "The durability of steel in concrete" July, Aug, Sept 1982.
5. Concrete Society Technical Report No.26 "Repair of Concrete damaged by reinforcement Corrosion " Concrete Society 1984.
6. BS 6150 "Paint of building British Standards Institution".
7. Cather R "Practical problems with coating selection for concrete " PP4-6 Industrial corrosion Sept 1986.

作者：林維明

現任：省交通處港灣技術研究所
研究員兼港工材料組組長

中 華 港 埠

鋼筋混凝土腐蝕(一)

林維明

一、前 言

1.研究背景

通常混凝土可對其中之鋼筋提供相當好的腐蝕保護，混凝土爲一高鹼性環境，使其在鋼筋表面上形成一保護性氧化膜，而防止其發生腐蝕，此外，混凝土可配比爲滲透性低，使得腐蝕影響因子不易滲入。滲透性低亦可增加混凝土之電阻而阻止電化學腐蝕電流之流動，因有這些固有的防護特性，故在大多數 R.C. 構件或結構物，不易發生鋼筋腐蝕。然而若混凝土品質不佳，結構物設計時未詳加考慮其環境因素，或在混凝土使用期間內，其周圍之環境條件未如預期情況而有所變化等情形下，則可能發生腐蝕。

由於鋼筋混凝土結構物使用廣泛，而其修護費用高，因此其腐蝕現象已漸受關心， R.C. 結構物之腐蝕，首先在海洋結構物及化工廠發現，最近[illegible]導指出，在橋樑或暴露於氧化物作用下之 R.C. 結構物有發生腐蝕之現象，故使此問題變爲特別引人注意。因此廣泛地研究影響鋼筋腐蝕之因素，可增加我們對腐蝕之瞭解程度，尤其是有關氯離子的影響性。預期此研究所發現結果之應用，將使新混凝土結構物之腐蝕現象減少，且可對現有結構物因腐蝕導致之損害的修護方法提出改進。而混凝土結構物設計、施工及維護者必須有防蝕之知識，本文目的僅對有關此方面之研究作一簡介。

氯離子被認爲鋼筋腐蝕之主因，在某些情況缺少氯離子亦可能發生腐蝕，例如混凝土之碳化作用使其鹼性降低而使鋼筋腐蝕，然而在水灰比低之混凝土中，碳化作用經常爲一緩慢過程，故由於碳化所導致之腐蝕現象並不如氯離子所引起者之普遍。氯離子散佈於自然界中，因此在混凝土拌合中經常無意中將會摻入空氣中少量氯離子。

通常氯離子亦可能當作一早强摻料而有意地拌合於混凝土中，在海洋環境下，未受保護之堅硬混凝土，亦有可能受海水中之溶解氯離子侵入或曬鹽除冰過程中，氯離子將侵入混凝土中。

混凝土中鋼筋腐蝕率深受環境因素影響，必須在有氧氣及濕氣情況下，才有可能發生電化學腐蝕。 R.C. 中氯離子含量大，則易受腐蝕，特別是在承受乾濕反覆作用情況下更爲嚴重。其他影響腐蝕率之因素爲 R.C. 混合劑中含有害物，混凝土

孔隙水之ＰＨ值，卜特蘭水泥糊體之碳化作用，混凝土龜裂，迷失電流，不同金屬材質間接觸發生局部電池反應，利用海砂，基礎置於酸性土壤中， R.C. 結構物露出局部鋼筋和預鑄部材之接合處等。在 R.C. 結構物設計上必須詳加考慮鋼筋之腐蝕，例如摻料之配比，鋼筋保護層厚度，控制龜裂方法和防蝕方法設計等均爲控制腐蝕發生或降低腐蝕速率所應考慮之因素。

由於腐蝕結果造成混凝土損壞，因鋼筋腐蝕有生成物（鐵銹）後，其體積較原來爲大，而對周圍混凝土產生應力，在混凝土外表面上顯現生銹之跡象爲有銹斑，龜裂及保護層剝落，同時亦發生鋼筋有效斷面積減小；上述惡化之現象，使得鋼筋與混凝土間之握裹力損失，因此結構物之危險性可能隨時間而遞增。有關鋼筋斷面積縮小此一現象，對於高强度預力結構物情況之影響性而言，必須特別注意，因爲鋼筋微量損失，可能將造成結構物强度不足而導致破壞。

到目前爲止，有關腐蝕研究尚未發展有任何鋼筋或其他型態之加强物置於混凝土中不會發生腐蝕而且在經濟及技術上爲可行的；然而研究重心爲加强提高混凝土品質；細心設計、良好之施工及在混凝土拌合或份中氯離子含量有合理之限制。其他正在調查之防蝕方法如腐蝕抑制劑使用，鋼筋上之包護及陰極防蝕等。雖然一直仍有鋼筋之腐蝕問題存在，而引起許多學者之關心，因此在此方面之研究，目前雖已有少許之成果，仍待深入研究者仍多。

本報告爲討論 R.C. 腐蝕致因與控制方法，新結構物中鋼筋之防蝕方法，現有結構物檢測腐蝕技術及修護步驟，如此可減少腐蝕之發生。且在大多數 R.C. 及 P.C. 結構物實例中均有滿意的成果，均在本報告中介紹。

二、混凝土中鋼筋之腐蝕機構

首先討論混凝土中鋼筋之腐蝕過程，腐蝕機構通常以電化學處理，研究其中某些主要腐蝕致因且討論相關之現象。其次討論影響腐蝕之混凝土變數，包括混凝土拌合，配比，品質及保護層及腐蝕抑制劑之實效性及碳化等現象。

㈠蝕腐原理

1.電化學作用

雖然鐵可由化學反應腐蝕，而在水環境下，最常見之腐蝕型態爲電化學反應，此反應與閃光燈電池之作用原理相同。一爲陽極發生電化學氧化，而另一爲陰極發生化學還原，除外還需有電導體及電解溶液，任何金屬表面發生腐蝕爲其上有陰極、陽極及金屬本身爲一導電通路，在陰極與陽極之反應通稱爲半電池反應（half-cell reactions）。在陽極，爲一負極，鐵氧化爲鐵離子即：

$$Fe \rightleftarrows Fe^{++} + 2e^{-} \quad \cdots\cdots(1)$$

鐵離子之標準還原－氧化電位$E^{0} = -0.44$

標準還原一氧化電位（The standard Redox potential)爲當金屬與氫電極連接所產生之電位，卽在平衡或非反應狀況下電化學反應之相對電位，亦爲表示電動勢（electromotive force）的方法。式(1)中鐵離子（Fe^{++})隨後將經過一些複雜之反應使鐵氧化，反應後生成物之體積爲原來鐵體積之數倍。

在陰極，則發生還原反應，處於酸性溶液中，在陰極發生之反應爲氫離子還原爲氫，然而混凝土爲一高鹼性化合物，經常氧氣供應充足，故陰極反應爲：

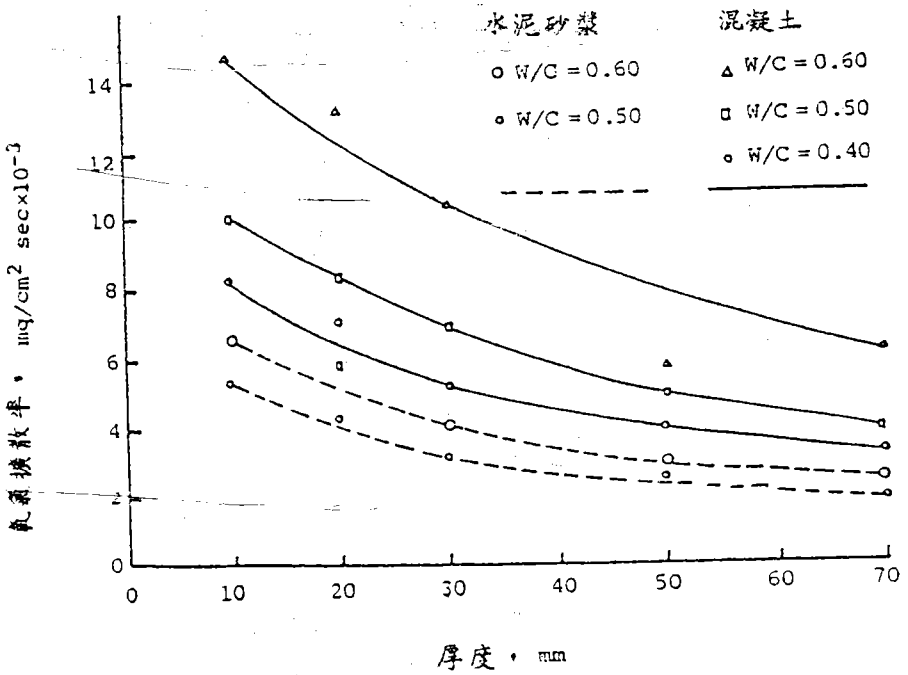
$$\frac{1}{2}H_2O+\frac{1}{4}O_2+e^- \rightleftarrows OH^- \quad \cdots\cdots(2)$$

氫氧離子之標準還原一氧化電位爲$E^\circ=0.401$

腐蝕之鐵片對溶解液合成物，溫度和這些半電池之極化作用而言，有一斷路電位（open circuit potential）亦稱爲靜止電位（rest potential），其與式(1)及式(2)反應之標準還原氧化電位相關，腐蝕率與極化作用(polarization)有關，將在以下討論。

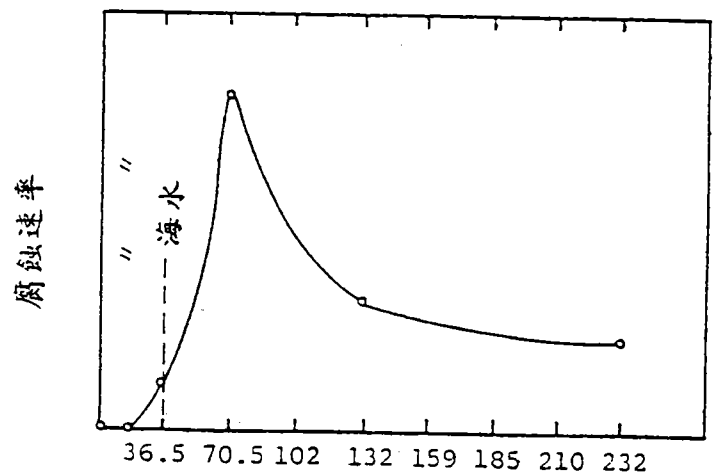
2.混凝土中之溶氧量

雖然含氧量爲鋼筋腐蝕主要控制因素之一，而有關其對混凝土之影響性之研究文獻並不多，圖一說明混凝土及水泥砂漿在不同水灰比及厚度下，氧氣擴



圖一　水泥砂漿與混凝土之水灰比及厚度與氧氣擴散之影響

散率之概況，氧氣在混凝土中之擴散率亦深受混凝土孔隙水之飽和程度所影響，有些調查報告指出若鋼筋鈍態破壞，則在鋼筋混凝土結構物暴露於承受間歇乾濕作用之範圍將易發生鋼筋之腐蝕。若混凝土長期浸於水中，則雖有氯化物出現，然而其腐蝕率仍相當慢。在濕混凝土中，溶氧主要在溶液中擴散，而在半乾混凝土中，氧氣擴散地相當快然而在陰極反應中氧氣被消耗，故氧必須爲一溶解狀態，故溶解氧之濃度很重要，所有影響氧可溶性之因素亦將影響其可得到程度，Griffin and Henry (4)曾得出含鹽量對腐蝕率之影響性如圖二所示，腐蝕率隨氯化鈉（NaCl）之濃度增加而遞增，當達到一極值後將遞減，此變化係因溶氧量及氧之擴散性降低所致，因此氧之可獲得到之程度，可使腐蝕進行持續，此爲在海水之鹽溶液中之腐蝕特性，然而在濕混凝土結構物則溶氧量可能不同，在一直浸於水中之R.C.結構物中很少有鋼筋腐蝕之問題存在，即使在海水中亦如此，因爲溶氧量不足達到鋼筋處，而使腐蝕通路無法持續。



圖二　氯化鈉濃度對腐蝕速率之影響

3.氯離子之重要性

如前所述，混凝土對於鋼筋可提供有效之腐蝕防護環境，然而若溶氧和大氣及氯離子侵入 R.C. 結構物則使電化學反應持續將可能造成鋼筋腐蝕此方面之研究文獻報導很多，而海水污染造成混凝土中鋼筋腐蝕之研究文獻報導並不多，氯離子可能以各種方法進入混凝土中，有些當作加速劑有意地摻入，有些在拌合中隨骨材加入，有些由含鹽份之風吹入，或撒鹽除冰，海水潑濺及霧氣等侵入。概述如下；

(1)在混凝土拌合中加入

卜特蘭水泥水化最有名之加速劑爲氯化鈣，通常依水泥重量摻加大於其2％之固態之二水氯化鈣（Calcium chloride dihydrate）。氯化物亦可能含於其他加速劑中，例如某些減水劑有時摻入少量之氯化物，可達到緩凝之效果；在某些情況下，缺乏淡水，而必須用含有氯化物之海水拌合，或取用暴露於海水之骨材（或骨材曾在某時間吸進海水之情形）等均含有相當量之氯化鹽，由於骨材是多孔性，故可能含有大量之氯化物。

(2)擴散至混凝土中

氯化物可擴散至混凝土中也就是說混凝土雖然沒有龜裂，但是氯化物仍可進入混凝土，有許多學者曾發表有關氯離子在混凝土中之擴散係數近似值解法。但大多數文獻忽略混凝土與氯化物之互制現象。

(3)自由氯離子之電化學角色

有關氯離子對腐蝕之影響性，目前有三套理論說明如下：

ⓐ氧化膜理論（The oxide Film Theory）

某些調查者相信在金屬表面生成一層氧化膜，可使其保持鈍態且可防止發生腐蝕，此理論係假設氯離子通過混凝侵入至鋼筋上之氧化膜或較其他離子（例如硫酸根離子(SO_4)）易在氧化膜中破壞，另外氯離子可能成膠狀地驅散氧化膜，因而使其易於侵入。

ⓑ吸附理論（The Adsorption Theory）

氯離子，溶氧或氫氧離子等相競地在鋼筋表面上吸附，氯離子可加速金屬離子之水化作用，因而使得金屬離子易於分解。

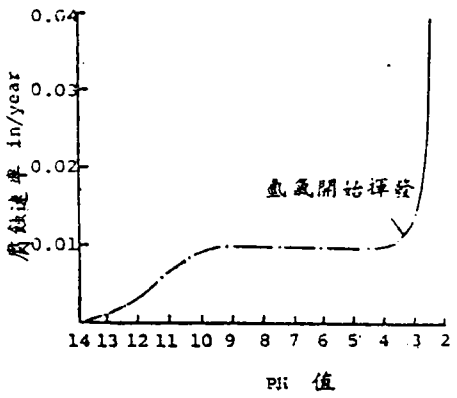
ⓒ短暫合成物理論（The Transitory Compleix Theory）

根據此理論，由於腐蝕所產生之鐵離子之因子中氯離子可與氫氧離子匹敵，形成一可溶性之氯化鐵型之化合物，而此種化合物可自陽極擴散，因而破壞 $Fe(OH)_2$ 之保護層，而使其繼續發生腐蝕現象，在距離電極一段長度，此化合物產生分解，而使氫氧化二鐵沉澱下來，氯離子可自由地自陽極傳遞較多之鐵離子，此種現象可在混凝土遭受腐蝕破壞之事例中顯見，經常可在靠近鋼筋處發現一淡綠色之半固體之反應生成物，當此生成物暴露在空氣中，則先變爲黑銹，接著將再變爲紅銹。

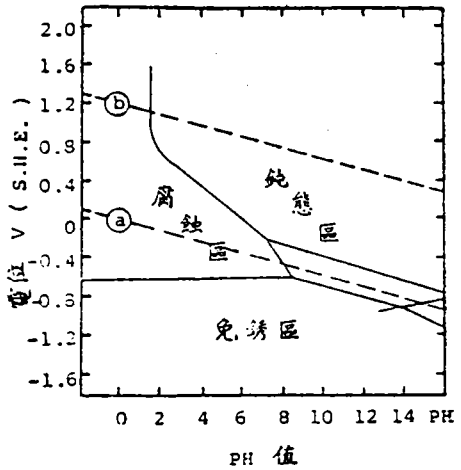
因爲腐蝕並非閉塞，許多鐵離子離開腐蝕位置而繼續移進混凝土中，且與氧反應形成氧化鐵而膨脹因而導致混凝土龜裂，氯化鐵生成物之形成，可能亦爲導致混凝土龜裂之作用力。

4. PH值與腐蝕率之關係

如圖三所示，當PH值增加則腐蝕率減少，因爲一般混凝土之PH值均大於12.5，經常爲保護鋼筋免受腐蝕之最佳環境，僅在有鹽份出現或混凝土保護



圖三　室溫下輸氣輕水之ＰＨ值對鐵腐蝕性之影響



圖四　鐵之 Pourbaix 圖

層被碳化之情況下，鋼筋才易於發生腐蝕。

5.Pourbaix圖 (Pourbaix diagrams)

Pourbai 曾設計一種電位與ＰＨ值之關係圖，由圖中可得出在水介質中，電化學與鐵之腐蝕行爲關係。如圖四所示，ＰＨ值介於 8 與13範圍內，則鐵處於鈍態，此說明混凝土之保護性質。即在混凝土中無氯離子或僅有少量之氯離子侵入，則其中之鋼筋將不至發生腐蝕。圖中顯示若ＰＨ值大於13，則可能發生腐蝕，在此情況下形成一溶解之鐵酸鹽 ($HFeO_2^-$型式)。在混凝土中鋼筋以一顯見之速率溶解之機構可視爲嚴重之腐蝕，故若在混凝土摻加摻料可使其ＰＨ值增加因而可能造成不利之影響，然而這種現象尚未被確定可在混凝土中發生。

6.高强度鋼及其他金屬

有關新發展之高强度鋼 (high strength steel) 與過去之標準鋼或低强度鋼承受腐蝕性之比較，這方面研究文獻並不多，而預料對腐蝕之反應一定有所不同，此爲影響鋼鐵腐蝕之次要因素。

過去曾有學者研究混凝土中預力鋼之腐蝕，確證混凝土中若加上氯化物相當不利。

在混凝土中，若鋁與鋼筋接觸且其中有氯化物或鹼存在。鋁將在混凝土中腐蝕且腐蝕率甚高，同樣地鉛及錫(例如錫焊料)亦可能發生腐蝕現象。在ＰＨ值約爲12.5情況下，鋅立即產生化學反應形成鋅酸鹽，且放出氫氣如下式：

$$Zn+OH^-+H_2O\rightarrow HZnO_2^-+H_2\uparrow \quad \cdots\cdots(3)$$

若鍍鋅鋼置於混凝土中，必須採取適當之方法防止氫氣在新鮮混凝土中放出，通常可使用少量之鉻酸鹽（chromate salt）。

在浸於水中之混凝土結構物，鋼筋自由暴露且與混凝土內部鋼筋連接，則可能發展伽凡尼電池（alvanic cell）其自由暴露端爲陽極，而埋著端爲陰極，此可能使得在自由暴露端之腐蝕率增加。

銅、鉻、鎳和銀等其他金屬一般在混凝土中不至於發生腐蝕，然而若置於海洋環境下，則略有腐蝕之趨向。

7.半電池之極化（Polarization of half cells）

半電池之平衡可由其可逆之電位（reversible potential）描述其特性，此電位決定於標準氧化還原電位，參於半電池反應者（例如 OH^- Fe^{++}等）之濃度（活動力）及電解溶液之溫度等因素。

當一電流流經半電池，則電流計上指示可自可逆電位移動至量測電位，此移動量稱爲極化（Polarization）在一定電流下，半電池反應爲不可逆性，則其極化作用大，例如氧氣之半電池反應（式(2)）幾乎爲不可逆性，且其有相當高之極化程度。

半電池電位之腐蝕過程，由於極化效應關係，故實際上腐蝕較慢，一般有三種極化現象應用於陰極及陽極，即濃度極化（concentration polarization）、歐姆極化（ohmic polarization）和活性極化（activation polarization），此三種極化現象可能同時出現，說明如下：

(1)濃度極化：此現象爲在電極附近電解液濃度之變化下發生，例如在陰極上之含氧量之減少即是。

(2)歐姆極化：此現象發生於電解液之歐姆電阻（例如潮濕之混凝土）和電極表面上任何薄膜，此乃根據歐姆定律將產生一歐姆電位差（IR落差）。

(3)活性極化：由於電極反應之控制板之動力的阻礙所產生的。Tafel 曾以試驗說明在無濃度極化和歐姆極化之强電流，其量測之極化值（η）爲活動極化，直接與電流（i）之對數成正比。

$$\eta=a+b\log i$$

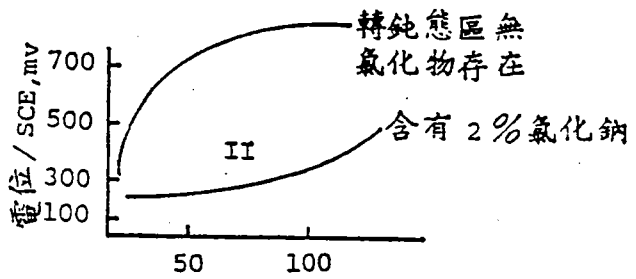
式中 a，b 分別稱爲 Tafel 截距（Tafel intercept）及斜率（Tafel slope）參數，將 η 與 i 相對值畫於半對數方格紙上可求得 a、b 值，參數 a 與交換電流强度（exchange current density）i 相關。此電流爲流經電極電解質分界面之電流流進出量達平衡狀況之電流且爲一量度反應可逆性之方法。Tafel 而斜率參數(b)爲一可根據現代電極反應理論，洞察電極反應之機構之參數。

8.鈍態與反絕緣（Passivity and transpassivity）

在腐蝕過程中，陽極半電池之特殊處爲鈍態與反絕緣觀念。金屬之鈍態通常由一緊貼於金屬上之氧化薄膜加以特性，其可防制金屬腐蝕之擴展，此種通常不易以肉眼見到之薄膜，其確實之組成很難決定，然而似乎很明顯爲氧化物，故通稱爲氧化膜。

當一電位作用於一鐵電極，電流率依鈍態情況而定，在混凝土之鐵通常爲一鈍態，因此當有一電位作用於鐵上，則有一股小電流流動，若電位繼續增强，電流將流動。此乃因在此點氧放出且電極反應含水之電解（如圖五中曲線Ⅰ）即：

$$2H_2O \rightarrow 4H^+ + O_2 + 4e^- \quad \cdots\cdots(4)$$

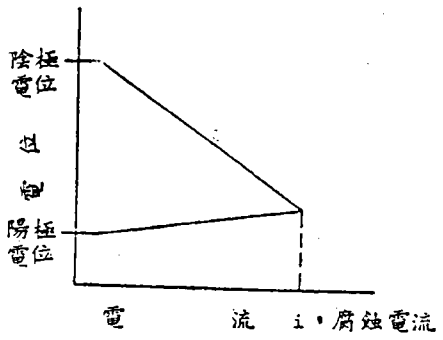


圖五　混凝土中之鐵電極

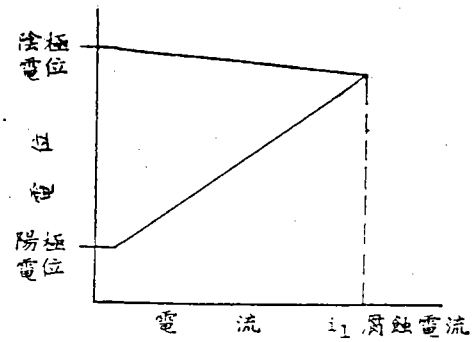
此一現象稱爲反隔緣（transpassivity），曾有文獻報導腐蝕試驗程序中使用加强電位（impressed potential），Grimes 發現當一陽極高電位作用於混凝土之鋼筋上，則鋼筋上之ＰＨ值將改變其值約爲0～4，同時亦在鋼筋周界立即形成一堆液體（liquid pod）。在ＰＨ值低之環境下，鋼筋或混凝土均不可能爲耐久性的。

9.腐蝕控制機構型態

如前所述，欲發生腐蝕，其過程中必須有陽極與陰極反應，然而不同之腐蝕狀況可畫在同一張電位與電流之關係圖上作比較，其爲一半電池與一輔助反電極（auxiliary counter electrode）極化作用得之。對此討論係假設在陽極與陰極區間無電阻差及陰極與陽極電流爲簡單之代數相加。在這些條件下，腐蝕樣品之斷路電位將爲兩個電流與電位曲線之交點，在此交點上，無淨外電流且在此交點之電流絕對值等於腐蝕電流。若陰極反應爲緩慢過程（極化作用大），則腐蝕率受陰極控制（圖六），相反的，若陽極反應較慢，則腐蝕率爲陽極控制（圖七）。



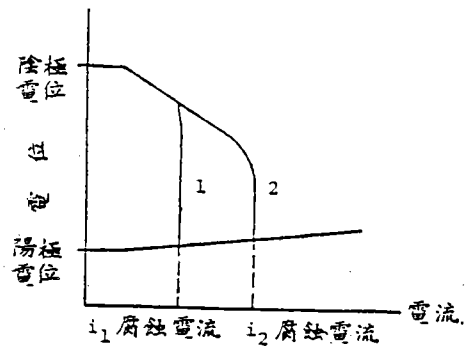
圖六　陰極控制



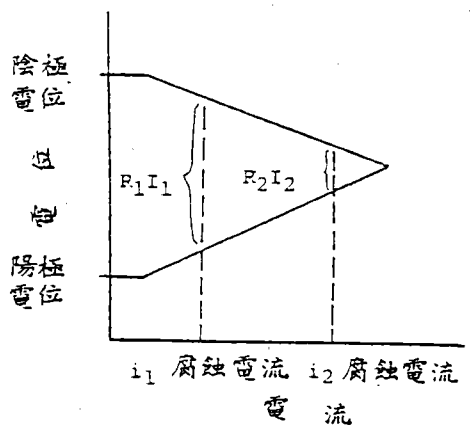
圖七　陽極控制

通常在混凝土中有一種或二種腐蝕率控制機構，一爲陰極控制，在此種情況下，腐蝕率決定於進入混凝土之氧擴散率，圖八爲兩種不同氧氣擴散率之陰極擴散控制示意圖。

另一種爲電阻控制，當鋼筋在混凝土中腐蝕，陰極與陽極區可能距離英呎，沒有足夠之電流可極化陽極及陰極，因此混凝土之電阻可能相當重要，圖九說明兩種電阻控制，其可供腐蝕之電位爲陽極與陰極間之電位差減去混凝土孔隙所產生之 IR 電壓降。



圖八　陰極擴散控制



圖九　電阻控制

10.迷失電流腐蝕（stray current corrosion）

迷失電流爲外來電流所造成者，其可加速鋼筋之腐蝕，最常見者爲電車、電鍍工廠和陰極防蝕系統等。

11.陰極防蝕

陰極防蝕原理爲改變金屬之電位以降低電流，因而降低腐蝕率，此可使用較陽極電位爲高之保護電流，此電流流至陽極表面，在該處產生陰極反應。此方法在使用上之困難爲決定可應用於此系統之正確電位。

12.其他鹽離子之影響性

雖然有某些文獻上曾報導硫酸鹽及碳酸鹽也有可能造成鋼筋腐蝕，然而尚未經過良好之證明，雖然混凝土在某些情況下可能會發生龜裂，且暴露之鋼筋可能出現銹蝕。而硫酸鹽，碳酸鹽等可能並非銹蝕之主要原因，他們在鈣離子多之環境下爲低溶解性將降低這些鹽離子之可得到度。然而某些可溶性鹽，例如高氯酸鹽（perchlorates）醋酸鹽（acetates）和除氯外之鹵素鹽(halogens）等，可能對混凝土中鋼筋會產生腐蝕，硫化氫亦可能爲腐蝕之致因。

13.應力腐蝕龜裂（stress corrosion cracking）

應力腐蝕可定義爲應力與腐蝕一齊作用所造成之傷害，而大於兩者各別作用所致者，即爲在腐蝕環境下承受張應力與腐蝕而發生材料龜裂與斷裂。

在施受應力鋼（stressed steel）中，當在陽極區腐蝕繼續進行，由於腐蝕所造成有些微缺陷，可能將導至張力强度嚴重地受損。

另一與應力腐蝕龜裂有關之腐蝕型式爲晶界腐蝕（Intergrangular Corrosion），在此情況下，一氣體（經常爲氫）在鐵中被吸收而造成延伸性（Ductility）喪失及因而發生龜裂，氫脆問題將於第五章中詳細討論，其他可能引起晶界腐蝕之材料爲硫化氫和高濃度之胺鹽（Ammonia）和硝酸鹽（Nitrate)，對於這種腐蝕型態如何進行之機構，至今尚未完全被了解，相信它包含離子之聚合强度，而在文獻中尚未見到有關混凝土中應力腐蝕之實例研討。

㈡混凝土環境對腐蝕之影響性

1.卜特蘭水泥（portland cement）

當卜特蘭水泥水化時，矽酸鹽與水作用產生水化矽酸鈣和氫氧化鈣，卜特蘭水泥與水發生水化作用之方程式如下：

$$2(3CaOSiO_2)+6H_2O\rightarrow 3CaO\cdot 2SiO_2\cdot 3H_2O+3Ca(OH)_2 \quad \cdots\cdots(5)$$

$$2(2CaOSiO_2)+4H_2O\rightarrow 3CaO\cdot 2SiO\cdot 3H_2O+Ca(OH)_2 \quad \cdots\cdots\cdots(6)$$

前面曾提及過，在混凝土保護下之鋼筋，通常可提供高鹼性之環境，因爲在鋼筋上形成一層氧化膜，此膜之完整性與保護性將依混凝土環境之酸鹼度（ＰＨ值）而定。

各種水泥型態爲不同之水泥合成物與其粗細度等變化所得之混合物，因此各水泥型態所具有保護混凝土中之鋼筋的能力各不相同。根據 Pressler 等人之研究結果，一水化良好之卜特蘭水泥，可能含有水泥重量比之15～30%之氫氧化鈣，在此情況下不管其濕度含量多寡，混凝土之ＰＨ值經常可維持在13左右。

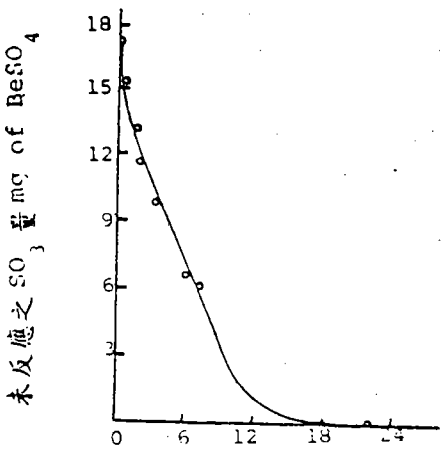
Rosenquist 曾描述一個在熱帶性天候下，混凝土碼頭鋼筋快速腐蝕之實例，該處以火山灰（Pozzlan）加入於卜特蘭水泥中，且在施工完成後相當短時間內就看見有鋼筋腐蝕之跡象，鑽取在鋼筋附近混凝土試樣經分析其ＰＨ值，所得之結果爲5.7—8.5，若不摻加火山灰則雖ＰＨ值增加然而並未見腐蝕現象。其他研究結果則說明火山灰並未對鋼筋混凝土行爲造成不利之影響，此鋼筋混凝土半浸於飽和鹽溶液下。而研究中所使用之火山灰爲一凝灰岩（calcined volcanic tuff），以水泥重量比之16—32%摻入混凝土中，此火山灰之保護性可能與其來源之特性有關。

在某些情況下，使用混和水泥（blended cement），因爲其酸鹼度降低，故可能有害，其透水性可減少，且電阻亦增加，此現象特別在水灰比降低情況下顯著，同時此種水泥對氯化物侵入之阻抗約爲卜特蘭水泥之２—５倍，此現象影響腐蝕甚大，且在某些情況下與此種混合水泥相關之有利條件可抵銷其不利條件。即使水泥原有酸鹼度很高，而可能受各種作用使其鹼性受減。例如可溶性鹼性鹽與水溶化可減少鹼性爲一明顯例子。與在空氣中或溶於水中之二氧化碳反應（碳化）之半中性化現象亦爲另一常見之例子。

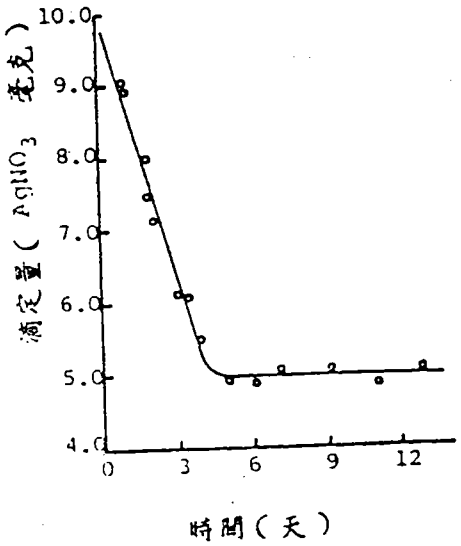
在卜特蘭水泥中主要由矽酸鹽傳遞强度予母體，氯離子與矽酸鹽間察覺不出有反應，但至少有１%氯化鈣加入水泥中可加速矽酸鹽之水化作用，氯化鈣似乎可在矽酸三鈣之水化作用作爲加速劑且可使鋼筋腐蝕加速。

同時在卜特蘭水泥出現者爲鋁酸三鈣（C_3A）和鋁鐵酸四鈣（C_4AF），除非C_3A受緩凝，否則它在水泥中可迅速產生反應，硫酸鈣用作緩凝劑，其在鋁酸鹽顆粒上形成一鈣釩石，因此減緩其反應（圖十）。

氯化鈣亦與鋁酸鹽在水泥中形成不可溶解之反應物（圖十一），最常見之混合物爲 C_3A，$CaCl_2$ XH_2O（法拉第鹽）（表一），比較圖十與圖十一可知，此混合物之形成速率較鈣釩石爲慢，鋁酸鹽與氯化物混合形成鈣釩石，而防止硫化物與剩餘之鋁酸鹽再度反應。C_3A與氯化物之化學合成，通常視爲氯化物進入混凝土速率減少之有利因素，根據 Mehta 之報告，除非C_3A之含量大於８%，否則很難預期有一化學上地阻礙氯化物侵入混凝土中，然而最近 Gjoprv 等學者在試驗室研究證實，既使8.6% C_3A對於混凝土浸於海水中情況下，氯化物侵入量之降低並非有效。而其他研究如 stratfull 等學者亦發現甚多C_3A與高含量有關之腐蝕引起之災害實例。



圖十　波特蘭水泥中之鋁酸三鈣與石膏之反應速率



圖十一　氯化鈣與波特蘭水泥之反應速率

表一　八種不同之卜特蘭水泥與氯化鈣反應生成物分析

$\frac{1}{3}SO_3$ 含 量*	$C_3A+C_4AF-\frac{1}{3}SO_3$	反應過後氯化鈣數量
0.20	1.43	1.19
0.05	1.42	1.37
0.30	1.10	1.18
0.07	1.62	1.45
0.72	0.69	0.63
0.25	1.03	1.08
0.26	1.05	1.07
0.23	1.15	1.05
平 均 值	1.18	1.13

＊這些數值以克分子當量（molar equivalents）表示，而不用常用之%表示，此乃爲比較方便，SO_3 量之大差異爲故意地。

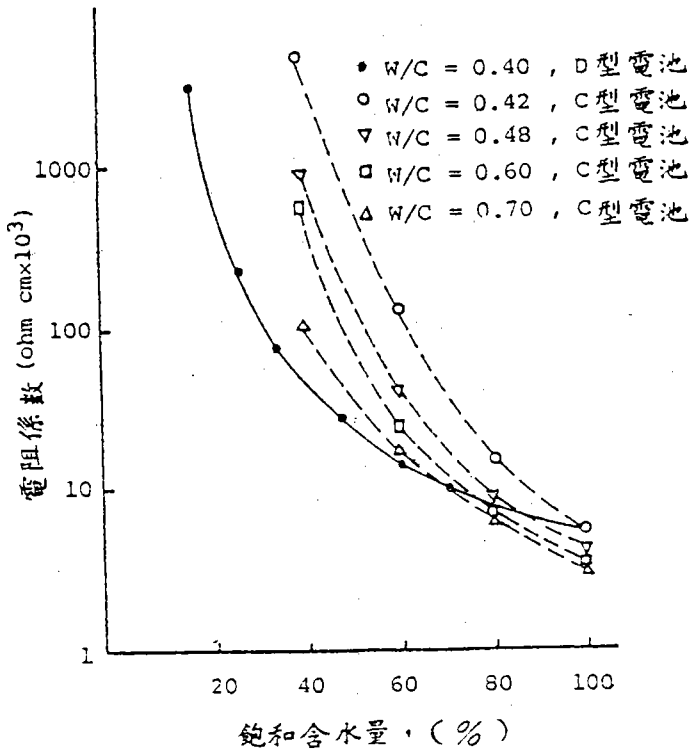
2.骨材

骨材通常對混凝土中鋼筋之腐蝕影響性很小，但亦有例外，當骨材中含有氯化鹽則可能發生很嚴重問題，此種現象因採用海砂或取用含鹽份地點之骨材，多孔之骨材能吸收相當量之鹽。

必須特別注意的是，當使用摻料含有氯化物和輕質材拌合時， Helms 與 Bowman發現，在輕質混凝土，當鋼筋暴露於大氣或溫度改變下，特別易於腐蝕，輕質骨材含硫化物可傷害在應力作用下之高强度鋼。

3.水份

前已討論濕氣含量高可降低CO_2之擴散率及混凝土碳化率，同時對氧氣在混凝土中之擴散亦影響性大。混凝土濕氣含量對於混凝土電阻之影響性，爲一相當重要之因素，原先有飽和水之混凝土漸漸變乾，結果其電阻自原來約爲 $7\times10^3\Omega\cdot cm$增至 $6000\times10^3\Omega\cdot cm$，（圖十二），根據現場觀測資料顯示，當電阻大於 $(50\sim70)\times10^3\Omega\cdot cm$，則可忽略鋼筋之腐蝕，其他作者亦試驗得出電阻數值大於$10\times10^3\Omega cm$(Browne(1982)) 及$12\times10^3\Omega cm$ (Cavalier(1981)) 情況下，即使有氯離子、氧氣和濕氣存在，亦似乎不會腐蝕引起之災害發生。



圖十二　飽和含水量對混凝土電阻係數之影響

4.腐蝕抑制劑

有許多有機及無機的化學摻料曾被考慮爲鋼筋腐蝕之特殊抑制劑，然而某些摻料可能延遲水泥之凝固時間或對後期强度有害，許多可能遭受溶解，因此

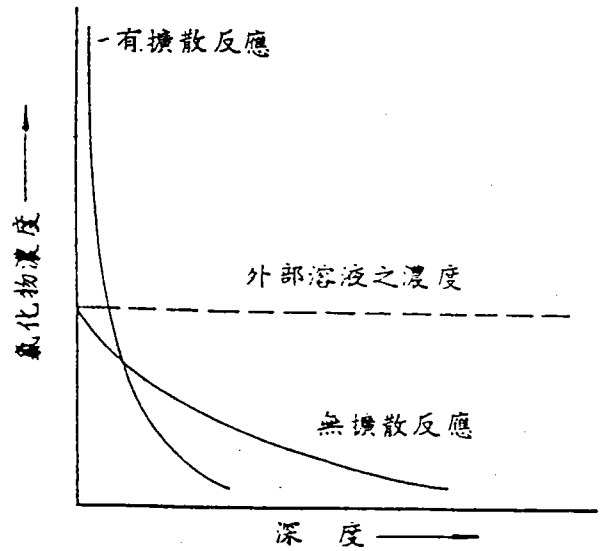
在混凝土中所發揮之效果不彰，無機抑制劑如二鉻酸鈣（calcium nitrite）二氯化錫（stannous chloride）、鉻酸鉛及鉻酸鋅（zinc and lead chromates），次磷酸鈣（calclium hypophosphite）、硝酸鈉（sodium nitrite）和硝酸鈣（calcium nitrite）等，有機抑制劑爲安息香酸鈉（sodium benzoate），乙基苯胺（ethyl aniline）等，某些抑制劑能抑制氯化物反應，在歐洲硝酸鈉曾被使用，而發現效果良好，現美國正研究使用硝酸鈣。因爲必須消去硝酸鹽之某些副作用，例如低强度，沉澱時間不定，風化且易受鹼性骨材反應等。

5.混凝土品質

高品質混凝土，對鋼筋之抗蝕，可提供較佳之保護，水灰比低將可延緩氯化物，二氧化碳和氧氣之擴散，亦可使混凝土强度增加，可能使腐蝕引起之應力導致龜裂之時間拖長。降低水灰比則可使混凝土孔隙體積及滲透性減少。使用不同之水泥種類，强塑劑和摻料等，可能爲控制氯化物滲透和入侵之重要因素。

6.鋼筋上混凝土保護層厚度

鋼筋上混凝土之保護層愈厚愈佳，必須配合良好之結構設計，環境條件及施工費用等。保護層厚度之影響非爲一簡單之線性關係，考慮一電解質進入一多孔混凝土結構體而無化學反應之正常擴散，氯離子濃度與保護層厚度之關係如圖13所示，然而在水泥漿情況下，氯離子進入水泥漿之擴散伴隨物理的吸附及化學之凝固，這些因素使得在某一特定位置之氯化物之濃度降低，因此亦降低向內之擴散，此現象亦示如圖十三。



圖十三　總氯化物濃度之梯度與水泥是否有發生化學反應之關係

7.碳化作用

當混凝土與空氣或水中之二氧化碳作用而發生碳化作用，其PH值降至8.5，在此低PH值情況下，鋼筋不再爲鈍態則可能發生腐蝕。對高品質混凝土而言，碳化速率相當慢之情況，除非混凝土已發生龜裂或混凝土保護層有缺陷或相當薄，否則通常碳化作用並非一問題。

在非常乾之混凝土或在飽和水之混凝土下，碳化並非一問題，最大碳化率約爲50%飽和水情況。

鋼筋混凝土防蝕機構

林　維　明

* 省交通處港灣技術研究所研究員兼港工材料組組長*

一、前　言

常聽有人表示爲防制ＲＣ腐蝕必須阻止水及氧氣之侵入，然而大多數混凝土不論高品質或一般性者均容許有水或氧氣之進入。因此現今較被接受之觀念爲利用孔隙水高鹼性特性所引起之鈍態以防護鋼筋腐蝕。而此鈍態之持續將因水或氧氣之出現結果而變。

本文目的在檢討上述現象並考慮內在及外在參數，若原始鈍態不再持續情況下，這些參數可能顯得相當的重要，爲了討論方便可將ＲＣ腐蝕定爲四種情況說明如下：

二、ＲＣ腐蝕四種情況

*1.*鈍態（ THE PASSIVE STATE ）

鈍態爲ＲＣ中鋼筋最常見之保護情形，乃因 pH 值大及含氧量多所致。在此情況下通常腐蝕率相當低（約爲 0.1 公尺／年），在無氯化物情況下 pH 值等於 13 ，鈍態之電位約在＋200 mv 至－700 mv SCE 範圍，但在滲合空氣之混凝土中，鋼筋之電位範圍爲＋100 mv 至－200 mv SCE，混凝土品質包含之參數爲水灰比，火山石加入量，可滲透性及抗拒鈍態之電阻及影響電位，而基本上鈍態鋼筋仍爲非腐蝕。

2.點蝕（ Pitting Corrosion ）

點蝕爲氯離子侵入所造成，點蝕情況爲可由當作陰極之鈍態鋼之大面積與小面積之陽極範圍間發生之流電作用（ galvanic action ）加以特性在此局部範圍之環境下氯化物濃度高而 pH 值低。

鈍態鋼筋與局部陽極間之平均電位範圍爲－200 至-500mv SCE，在電化學電位圖上將顯示在陽極地區附近之電位梯度大。

3.常態腐蝕（ general corrosion ）

常態腐蝕爲由於碳化或氯化物過量爲均勻程度之腐蝕。其電化學電位範圍爲－450 mv 至－600 mv SCE ，電位梯度並非很大。

4.活性、低電位腐蝕（ active low potential corrosion ）

在氧氣進入受限之環境下，鈍態膜無法維持，在仍爲高鹼性之混凝土中之鋼筋變爲活性，在 pH 值 13 之溶液下鐵之平衡電位約爲－1000 mv，鐵溶解爲複雜之二氧化鐵（ FeO_2 ）然而腐蝕率相當低，等於或低於鈍態。若改變條件，使易獲得氧氣，則鋼筋將易再成鈍態。

在此條件下，不易形成點蝕，因爲電位較點蝕陽蝕之電位爲低，若鋼筋暴露在裂紋底下之環境，此局部小範圍部份之鋼筋將變爲陰極防護。

三、影響腐蝕率之因素

*1.*鈍態

圖㈠爲評估有關維持鈍態之因素，此圖强調氧化物含量與電位之關係，氯化物始點（ chloride threshold ）爲電位之函數，點蝕電位（ pitting potential ）爲氯化物含量之函數，此種關係在不銹鋼及其它鈍態鋼之腐蝕研究普遍地被接受。有時在鋼筋混凝土研究亦被考慮。

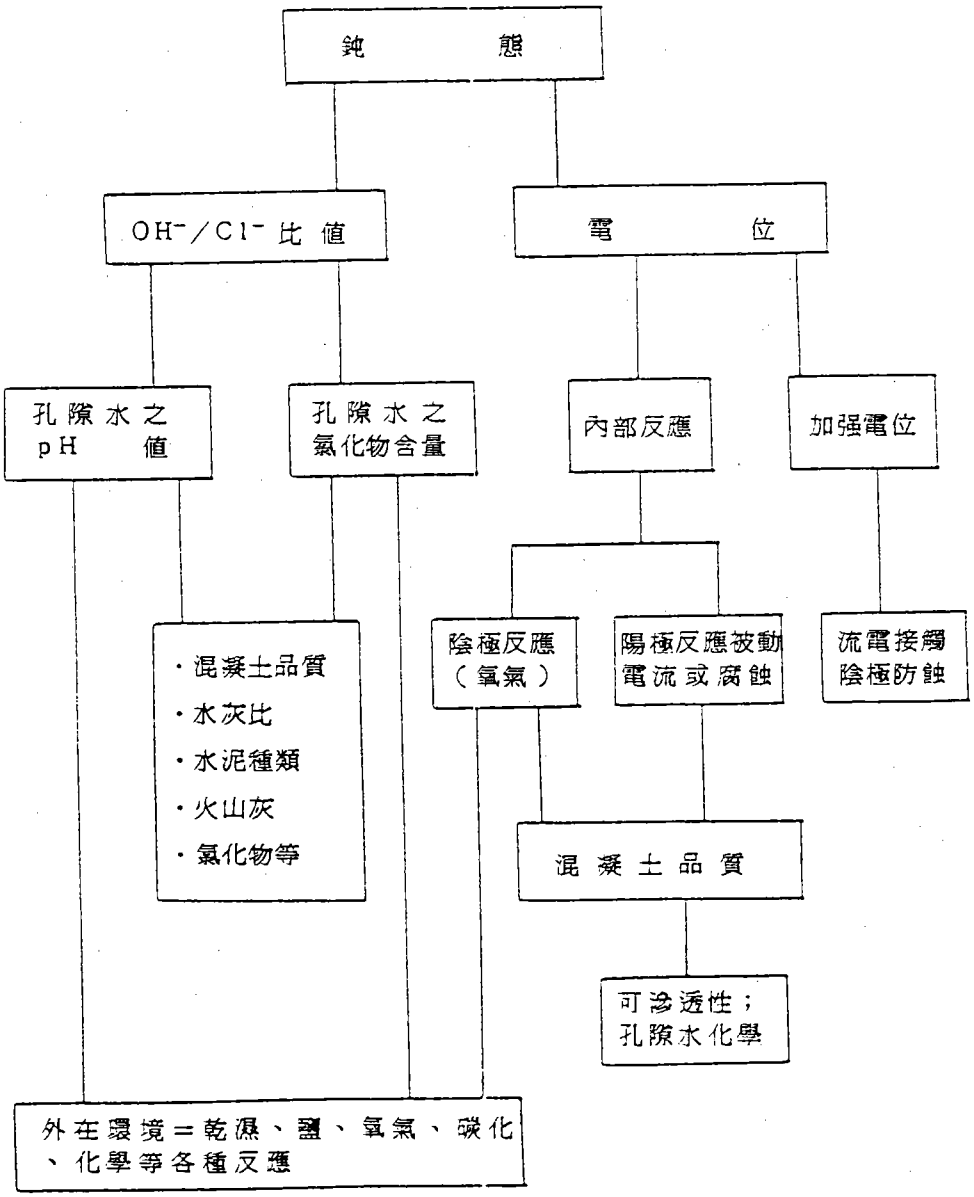
在此情況下之鋼筋受良好之保護，但須有一小量之鈍態電流的維持保護氧化膜。在鋼筋上鈍態表面氧氣之陰極還原機構至今尚未完全被研究清楚。而且反應速率及其因變數如保護層及電位等均不足以釋爲擴散控制或活潑性控制。這些因素似乎可對鈍態電流密度之大小產生影響，玆討論如下：

過去研究在液體中之鈍態電流密度方法爲在去氧溶液（ de-aeration solution ）中量測之電流爲電位之函數以消去氧氣之陰極還原，此方法亦可能在ＲＣ中適用，但去氧過程（ de-aeration process ）相當困難且將在鋼筋與混凝土之界面上產生化學變化。

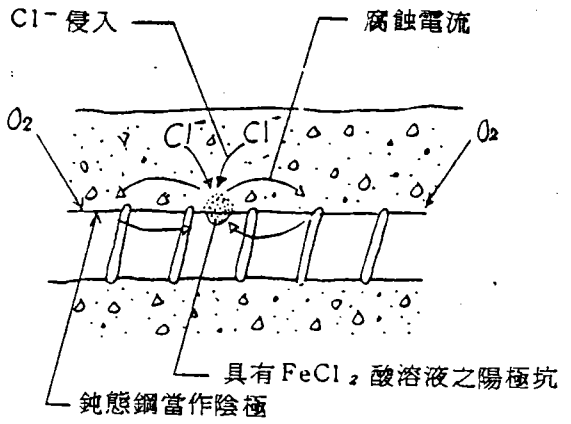
由此技術所得之鈍態電流密度，其大小約低於鋼筋浸在鹼性溶液，其成份與孔隙水溶液類似者之三倍。此可能由於在混凝土中擴散阻力高及在鋼筋外加入之下特蘭水泥層限制溶解鋼鐵類，自氧化膜與混凝土界面上離開。在比較上，不同形態之混凝土中鋼筋之鈍態電流密度相差不大，其有關混凝土品質差異之影響性尚未很確定。

若被動電流密度不太低，其他因素相等，則此可助於在一限制之供氧溶液下維持一低電位，而使鋼筋維持在氯化物開始攻擊之臨界電位。

碳化及氯化物侵入爲混凝土中鋼筋鈍態損失兩個最主要之機構，這些因素不論在外在環境和混凝土品質均爲決定開始發生腐蝕所需之時間。經常可在教科書及科學文獻中發現被討論。



圖(一)　影響鋼筋混凝土維持鈍態因素概觀



圖(二) 在RC結構物中鋼筋腐蝕坑周界之電化學腐蝕過程

2.點蝕情況

點蝕在混凝土具有良好之傳導性，高鹼性（無碳化）和氯化物含量適中（氯化物僅達鋼筋隔離範圍）情況下最易發展。

在這些局部範圍下，濃度高，鈍態膜薄，故氯離子易破壞此局部之鈍態膜，然後一旦開始發生腐蝕將形成一腐蝕電池即鄰近之鈍態鋼作爲陰極該處氧氣被還原，而僅在具有 $FeCl_2$ 酸溶液陽極坑中之鐵被氧化分解（如圖(二)所示）。

然後有許多因素合成以維持或加速現有點蝕之發展，並非擴展腐蝕或發展新點蝕。在陽極（坑）產生酸性，而在陰極產生鹼性，因此使得 pH 值在相反方向移轉，在陽極 pH值非常顯著較低值，不僅因爲高電流密度且因爲加水分解連接於生銹體而使 Fe^{2+} 氧化爲 Fe^{3+}。氯化物移往陽極（及遠離陰極）爲另一助成因素。但由於陰極極化所致之平均電位顯著之下降可能爲避免在鄰近形成新點蝕之最重要因素，至少直到較高之氯化物濃度移往其他地方爲止。

在另一方面，電位移轉可能亦開始發展遏制受腐蝕攻擊之技術。在陽極之電流密度將降低，不僅因爲驅動力低且因爲陽極面積增加，即在陽極邊緣混凝土中性及在陽極區之低 pH 值液體。因此，電位學產生之濃度梯度將受反方向離子擴散所擺平而可導致點蝕之再鈍化。

形成之腐蝕生成物在靠近陽極之低 pH 值條件下均爲可溶解的，因此不需混凝土發生剝落，亦有相當量之腐蝕。

點蝕之發展將受下列混凝土性質所影響：

(1)混凝土之低電阻有助於坑之形成，使得有效之陰極與陽極面積比值變得相當大，且利於離子之移往。

(2)在高鹼性含量（在此情況下不僅溶解之鹼類及沈澱之氫氧化鈣）下，將阻止坑之側向發展及利於坑之加深。

(3)氧氣進入亦爲決定總腐蝕量一重要因素，然而具有大的陰極與陽極面積比值將導致坑之加深甚至在有限之氧氣供應量情況亦如是。若混凝土變爲半乾，氧氣侵入量將增加得相當多，但此種刺激作用對於坑之擴大發展將較在陽極附近液體變乾及高電阻之抵銷量爲大。

3.常態腐蝕狀態

常態腐蝕可能由於碳化或過量之氯離子在混凝土體內及侵入其中所引起，因此形成大量緊靠之坑。在表面上各處不僅陽極及陰極過程都在發生，且 pH 值變化通常與這些過程有關而互相抵銷，此意旨爲陽極分解發生在一近中性或鹼性環境，在該處氧氣已進入，在此情況下腐蝕生成物爲硬銹（solid rust）在相當初期階段將產生剝落。

在實際應用上，由於碳化或氯化物所產生之常態腐蝕有不同之特性。在碳化已深入

情況下，混凝土似乎較易滲透和半乾，一旦開始腐蝕，其速率可能由相當高之電阻及缺水所控制，而非由氧氣之擴散使然。潤濕時間（The time of wetness）爲在大氣腐蝕相當重要之因素，亦爲在這些條件下腐蝕率適當之測量。但當然它可應用於鋼筋及混凝土之界面條件且可能因增加溫度而使腐蝕率漸增。Tutti 曾證實這種關係，利用電化學腐蝕電池偵測碳化混凝土之腐蝕率且他發現若濕度相當高，毛細孔充滿水，限制氧氣擴散則腐蝕率將突然下降。

相反的，在氯化物多之混凝土之腐蝕現象，經常可能會在海中或濱海，跨海大橋見到，該處水份充足，電阻低，而氧氣之擴散進入孔隙似乎爲腐蝕率之決定因素。

4.活性、低電位腐蝕

鋼筋之去鈍態可在供氧氣相當受限之情況下發生，即氧氣之陰極還原之電流密度較鈍態電流密度爲低。此相符於其具有相當低之腐蝕率約爲 0.1 m/year，一旦活性狀態建立再鈍態僅在陰極電流密度高於鈍態尖峯值情況下才可能發生，因此理論上當鋼筋變爲相當活性則腐蝕率可變爲相當地高，然而在實驗上，在鋼筋混凝土中之鈍態尖峯值發現並不太顯著。

活性狀態亦可由在低氧之環境之陰極防蝕期間之結果，因爲陰極防蝕不僅可去除鋼鐵表面之氧氣，增加 pH 值，且可增加鐵離子之溶解能力。

在低電位情況如放出氫氣（Hydrogen evolution）可能係於陰極反應之電位，但仍在非常低之電流密度。由於陰極防蝕而使得電位再下降，將促使電流消耗突增及發生氫氣放出。

在灌漿之鋼管（grounted steel ducts）中之預力鋼鍵（prestressing tendons）並非因發生氫脆而破壞，但氫脆已在承受腐蝕之鋁或鍍鋅鋼（galvanized steel）發生流電接觸下之鋼還上發生。

至今爲止，水泥型態或混凝土之組成物對於活性情況之發展影響性所知並不多，孔隙水之 pH 值可能爲重要因素，不過仍需多作研究，可望得出新的認識。

參考資料

1 N. Wilkins, 'A "State of the Art-Summary from first International Seminar on Electrochemistry and Corrosion of Steel in Concerete'Steel" in' Concrete Newsletter, Jan. 1980 Korrosionscentralen, Denmark.

2 F. O. Grnvold, C. M. Preece and H. Arup, "Corrosion protection of steel by concrete, in particular by low porosity cement mortar's", 8th International Congress in Metallic Corrosion, Mainz, 1981.

3 C. M. Preece et al."The influence of cement type on the electrochemical behaviour of steel inconcrete", Conference on Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction London, June 1983.

4 C. L. Page Nature, 258, 514-515 (1975).

5 K. Tuutti "Corrosion of steel in Concrete", Swedish Cement and Concrete Research Institute ISSN 0-346-6906

6 H. Arup, "Steel in Concrete Newsletter", Jan 1980 Korrosionscentralen Denmark.