80－研（十）

台灣海域之腐蝕特性、防蝕設計、材料之選用及開發研究

執行期間：民國七十六年七月至八十年六月

計劃主持人：林 維 明
研究員兼港工材料組組長

研 究 人 員：

副研究員	陳桂清	
助理研究員	饒 正	周祖望
助 理	黃永光	吳信昇
	柯正龍	徐如娟
技 工	陳正義	何木火
	林隆貞	

工業技術研究院
工業材料研究所

研 究 員 洪健龍 楊淵洲 蔡克群
毛維雲 高志勇

中國鋼鐵股份有限公司

研 究 員 魏豐義

臺灣省政府交通處港灣技術研究所

中華民國八十年六月三十日 編印

目　　錄

壹、研究工作概述……林維明
貳、海洋鋼結構物腐蝕影響因素之檢討……林維明
參、海洋金屬結構物腐蝕控制概論……林維明
肆、海水水質調查分析……吳信昇
伍、材料選用、開發與防蝕設計之現況……饒　正
陸、混凝土試體曝露試驗……林維明
柒、結論與建議……林維明
附錄一
台灣海域材料耐蝕研究……工材所毛維雲
附錄二
合金元素對鋼板抗海水腐蝕的效應…中鋼公司魏豐義

摘　要

林維明*

本研究計劃爲本所與工業技術研究院工業材料研究所及中國鋼鐵股份公司共同合作之四年研究計劃，其目的在對台灣五大港之海洋腐蝕環境進行調查評估，建立海洋腐蝕研究能力，提出適用於國內各港灣結構物之防蝕設計及材料選用方案及研究發展防蝕設計材料。

本研究曾在五大港蒐集鋼筋混凝土及鋼結構物現場腐蝕偵測調查，海水取樣及進行海氣象資料分析。並曾在台中港安裝鋼材試驗架，貯木池碼頭斜坡上，海水循環水槽內及試驗大樓屋頂上擺放RC試體並在基隆港建兩座試驗架擺放不同防蝕設計之試片以評估最理想之防蝕設計，同時在本所設置海水試驗室引用台中港之海水進行不同防蝕設計標準之實驗及腐蝕電位電流之追蹤實驗。

本報告提出海洋鋼結構物腐蝕影響因素及腐蝕控制之檢討，同時並對實測之海水水質分析檢討各海域之腐蝕特性，對目前各港所使用之混凝土鋼筋及鋼材現況提出看法。而有關曝露試驗工材所及中鋼公司之研究情形詳見本報告之附錄㈠及附錄㈡，而本所所進行之鋼筋混凝土曝露試驗情形則在80研(九)研究報告中詳述，而國外之研究情形則在本報告中概述，有關鋼筋混凝土結構物及鋼結構物之腐蝕調查結果，則可參見80研(九)及(十一)兩本研究報告。

本報告歸納台灣之五大港之腐蝕特性，列出防蝕設計應遵循之方針，曝露試驗之現階段結果及建議今後應再繼續進行之研究方向等都在結論與建議一章中作詳細說明。

*港灣技術研究所研究員兼港工材料組組長

壹、研究工作概述

林維明*

一、整體研究計劃概述

(一)計劃緣起

我國台灣省境內所屬的環境多爲臨海區域或海洋性氣候環境，由於環境中含有的高腐蝕性因子對於金屬或鋼筋混凝土的侵蝕現象極爲嚴重，並加以境內之污染條件亦不相同，故腐蝕特性亦不相同，急需作一通盤了解。過去國內之工程單位對於腐蝕及防蝕工程多賴日本、美國等腐蝕研究先進國家之資料，但這一類資料或有部份屬於各國之特殊條件，並不適合在台灣省條件，或引入一知半解之施工設計及報告，不切時宜，因此常發生實際使用效果及年限不及原設計之要求，故急需針對本國之腐蝕特性、選用合適之材料並開發防蝕之方法。

根據民國七十五年第三屆全國科技會議之決議，將腐蝕防蝕工程技術之研究列爲國家重點科技，並整體規劃國內相關技術之研究能力，以達到更有效處理國內所遭遇到之問題，因此與工業技術研究院工業材料研究所，中鋼公司及中華民國防蝕工程學會等單位共同合作研究本計劃，各發揮所長共同尋求有效的發展防蝕材料與防蝕方法。

(二)研究工作分配情形

由於各個參加研究之單位本身的任務不同，爲求使各單位在本研究工作中能夠適當的回收效益，將研究工作大略分爲下列分項研究工作：

1. 本所（港灣技術研究所）－各海域腐蝕因子收集及腐蝕特性分析、各海域鋼筋混凝土腐蝕特性研究、各港連繫及大規模試驗架安裝，並安排潛水人員事宜。
2. 工業技術研究院工業材料研究所－各海域腐蝕特性研究海洋結構物與海洋鋼筋混凝土陰極防蝕研究及工程設計、防蝕塗料／被覆／內襯材料研究及工程設計、陰極防蝕及表面被覆構件之腐蝕偵測技術

*港灣技術研究所研究員兼港工材料組組長。

、研究、各種金屬腐蝕速率比較。

3. 中國鋼鐵股份有公司－耐海水／海洋環境之低合金鋼發展，高爐水泥適用於海洋工程之研究，及鋁犧牲陽極之開發。
4. 中華民國防蝕工程學會－連絡並邀請相關國內、外學者專家來講述新進防蝕技術及向漁港、軍港及海洋設施作推廣教育工作，並協調各施工工程單位，擬定長期合作計畫。

(三)計畫目標

1. 對台灣五大港口之腐蝕環境作一評估。
2. 建立海洋腐蝕全面研究之基本能力。
3. 提出本國各港灣結構物之防蝕設計及材料之選用方案。
4. 研究發展上項防蝕設計之材料。

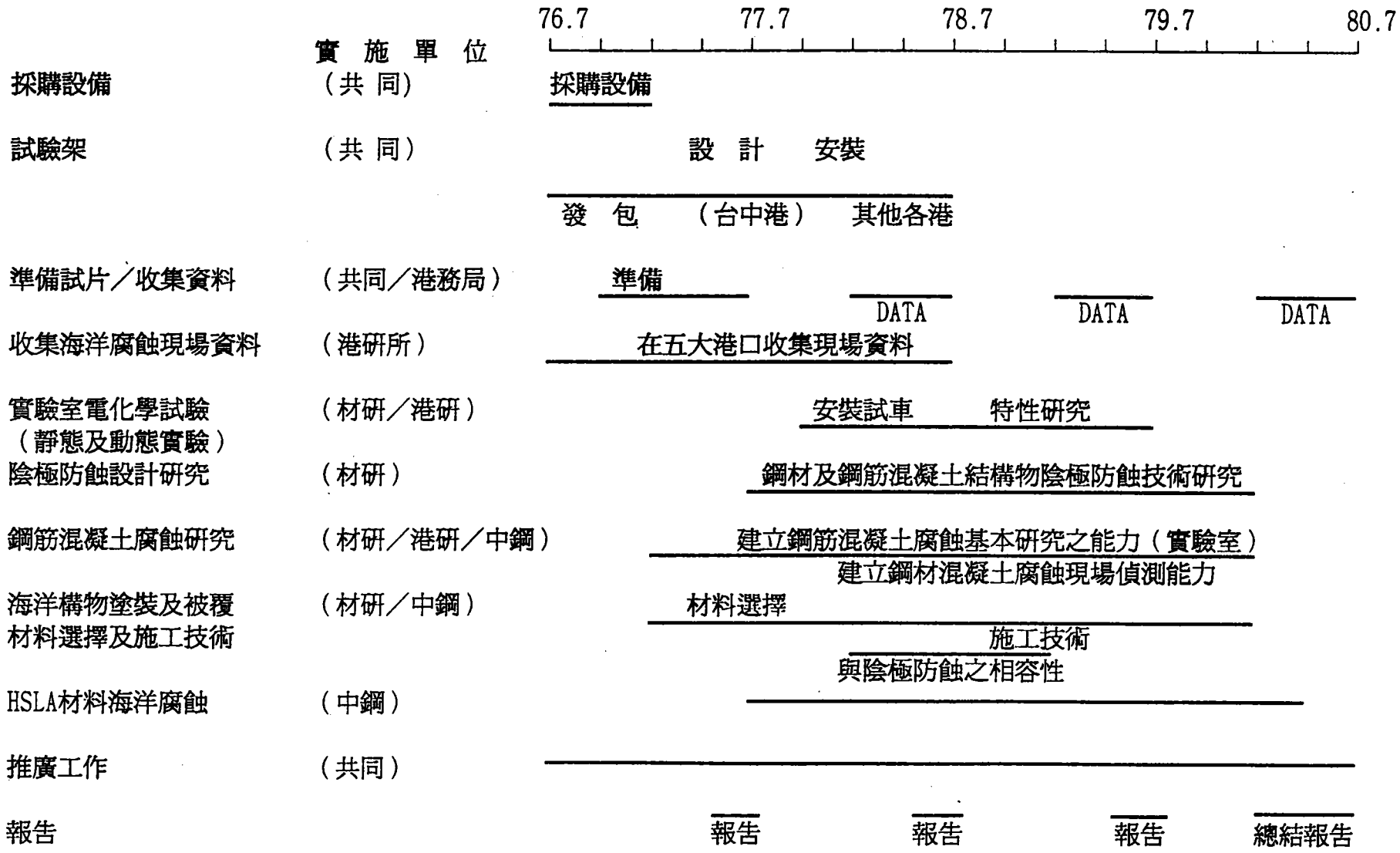
(四)實施方法

1. 在五大港口收集海洋腐蝕現場資料。
2. 在五大港口安裝試驗架，以蒐集現場之試驗腐蝕資料。
3. 在試驗室內作靜態之電化學試驗。
4. 海洋結構物及鋼筋混凝土之陰極防蝕技術之建立。
5. 建立鋼筋混凝土防蝕之基本能力，並建立現場偵測能力。

(五)預定進度

如附表所示

工作時間表（全程計畫）


76.7
77.7
78.7
79.7
80.7
實施單位
採購設備
（共同）
採購設備
試驗架
（共同）
設計
安裝
發包
（台中港）
其他各港
準備試片／收集資料
（共同／港務局）
準備
DATA
DATA
DATA
收集海洋腐蝕現場資料
（港研所）
在五大港口收集現場資料
實驗室電化學試驗
（靜態及動態實驗）
（材研／港研）
安裝試車
特性研究
陰極防蝕設計研究
（材研）
鋼材及鋼筋混凝土結構物陰極防蝕技術研究
鋼筋混凝土腐蝕研究
（材研／港研／中鋼）
建立鋼筋混凝土腐蝕基本研究之能力（實驗室）
建立鋼材混凝土腐蝕現場偵測能力
海洋構物塗裝及被覆
材料選擇及施工技術
（材研／中鋼）
材料選擇
施工技術
與陰極防蝕之相容性
HSLA材料海洋腐蝕
（中鋼）
推廣工作
（共同）
報告
報告
報告
報告
總結報告

(六)預期效果

第一階段將完成台灣五大港口之腐蝕環境的評估工作，及建立海洋腐蝕全面研究之基本能力，將利用此一研究成果向各港務局、軍港、漁港及可能之海洋工程單位顯示海洋腐蝕之嚴重性。第二階段將繼續陰極防蝕、鋼筋混凝土之腐蝕，被覆防蝕技術及耐蝕鋼材開發等專題，以有效推廣至國內可自行供料、設計之自主能力。

二、本研究計劃執行情形概況

本所在本研究計劃中負責蒐集各海域之腐蝕因子及腐蝕特性分析，在第二章對於鋼結構之腐蝕影響因素加以檢討，而第四章對海水水質分析亦作檢討，除外在本所80研（九）港灣RC結構物之耐久性研究報告中，亦有部份的海水水質分析及RC結構物腐蝕機理之檢討，而有關各海域鋼筋混凝土之腐蝕特性研究除在該報告中有詳細之調查報告外，並在本報告中之第五章中檢討有關各港對鋼筋混凝土與鋼材之選用現況，而在第參章對於海洋金屬結構物腐蝕控制方面有深入之探討，在現場曝露試驗方面本所負責混凝土方面，除在第陸章介紹外，並在80研（九）中詳細探討，而中鋼公司與工業材料研究所之研究結果在附錄一及附錄二中詳細介紹。

貳、海洋鋼結構物腐蝕影響因素之檢討

林維明*

一、前　言

在海洋結構物中使用鋼材者如鋼管樁、鋼板樁、型鋼、厚鋼板、拉桿、欄杆、鋼筋及海底線等。由於鋼材具有高强度，材質均一，容易切割、銲接、搬運、吊裝及打樁等，施工便捷，造型輕巧、美觀及結構體具耐震性較佳等多方面的優點，因此使用量多。然最大的缺點爲腐蝕問題，如果在設計時，詳細地考慮安裝防蝕措施則可減少維修工作。而基本的腐蝕知識之瞭解對設計很有幫助，因此本文就鋼材之腐蝕特性機理及影響腐蝕速率的環境因素，鋼材組成因素及其他影響因素如不同金屬之接觸、銹皮、迷失電流及龜裂等，以及土壤中之腐蝕問題等詳加檢討。希望能對腐蝕控制方法及材料之選擇有所幫助。

二、腐蝕之特性

腐蝕爲一自然程序，大多數金屬礦物在其自然狀態下含有許多元素如氧、硫及矽等形成一穩定之化合物。礦物經冶煉合金爲有用的性質，最後製成結構材料。當暴露在天然環境（例如大氣、土壤或海洋），這些金屬漸回歸於原來的氧化狀態，這種金屬對環境的不良破壞性互制現象稱爲腐蝕過程，腐蝕過程（與冶煉過程類似）由於熱能或電能之轉換而使金屬起化學變化，通常稱爲電化學反應。所以腐蝕是一物質（通常是金屬）發生惡化或與環境起反應，性質改變之意義。此處未提及化學或電化學反應，因爲某些腐蝕係因磨損、沖蝕所致。

較易發生腐蝕環境如下：

(1)潮濕空氣較乾燥空氣容易腐蝕。

(2)炎熱空氣較寒冷空氣易腐蝕。

(3)污染空氣較乾淨空氣易腐蝕。

(4)熱水比冷水易腐蝕。

---

*省交通處港灣技術研究所港工材料組組長

(5)海水或含鹽水較淡水易腐蝕。

(6)在酸性溶液比在鹼性溶液易腐蝕。

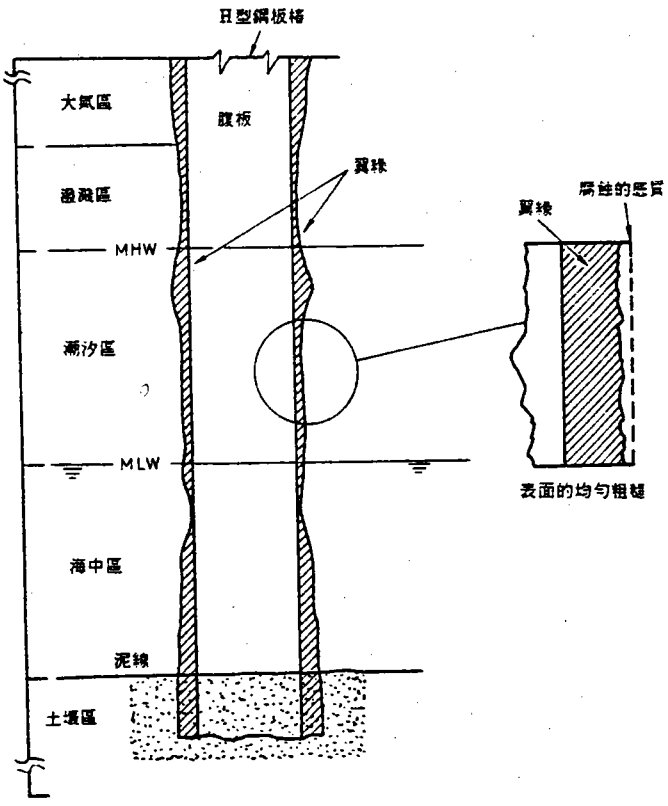
(7)不銹鋼較普通鋼耐久。

(8)在眞空中將不會發生腐蝕現象。

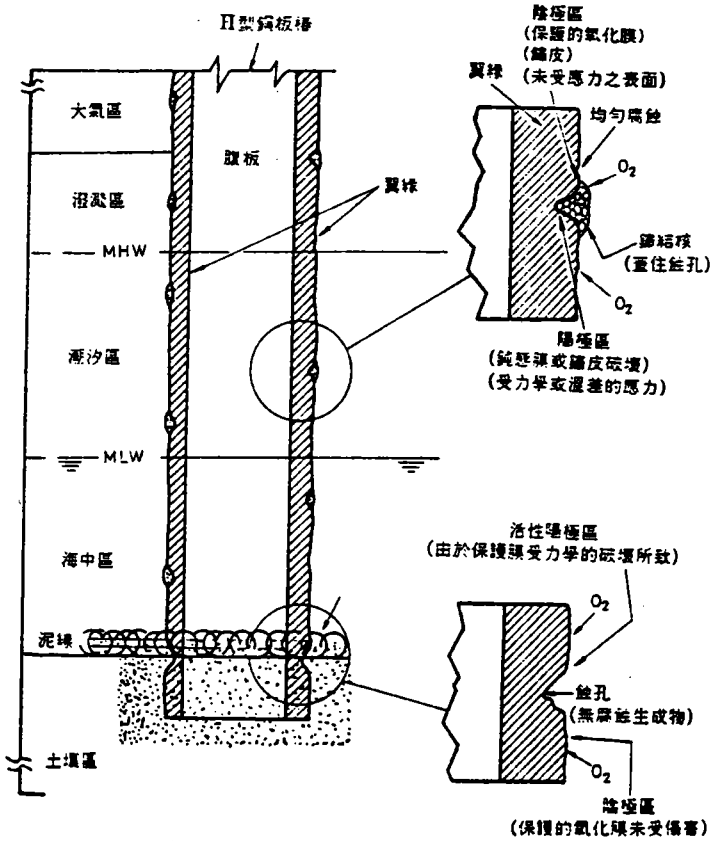
在海洋環境有兩種腐蝕形態是爲設計工程師感到興趣的是，即均勻腐蝕和點蝕，通常均勻腐蝕爲金屬表面整體發生粗糙現象而使其逐漸變薄，這種腐蝕型態經常發生於鋼板樁暴露在電阻係數底的天然水中（圖一），而最常見的點蝕爲一種局部腐蝕型態，經常發生浸泡於海水的基樁上（圖二），在不規則應力作用情況下，應力發生集中之處，則發生之蝕孔可能較均勻腐蝕嚴重。在剛開始浸泡階段，點蝕速率通常爲均勻腐蝕速率的五至六倍。然後漸漸減弱，到十年時約減至爲三倍。均勻腐蝕速率爲使用於濱海結構物的結構桿件防蝕設計的標準依據。

三、腐蝕之原因

腐蝕之發生是因爲金屬或環境上出現物理或化學上之差異。金屬



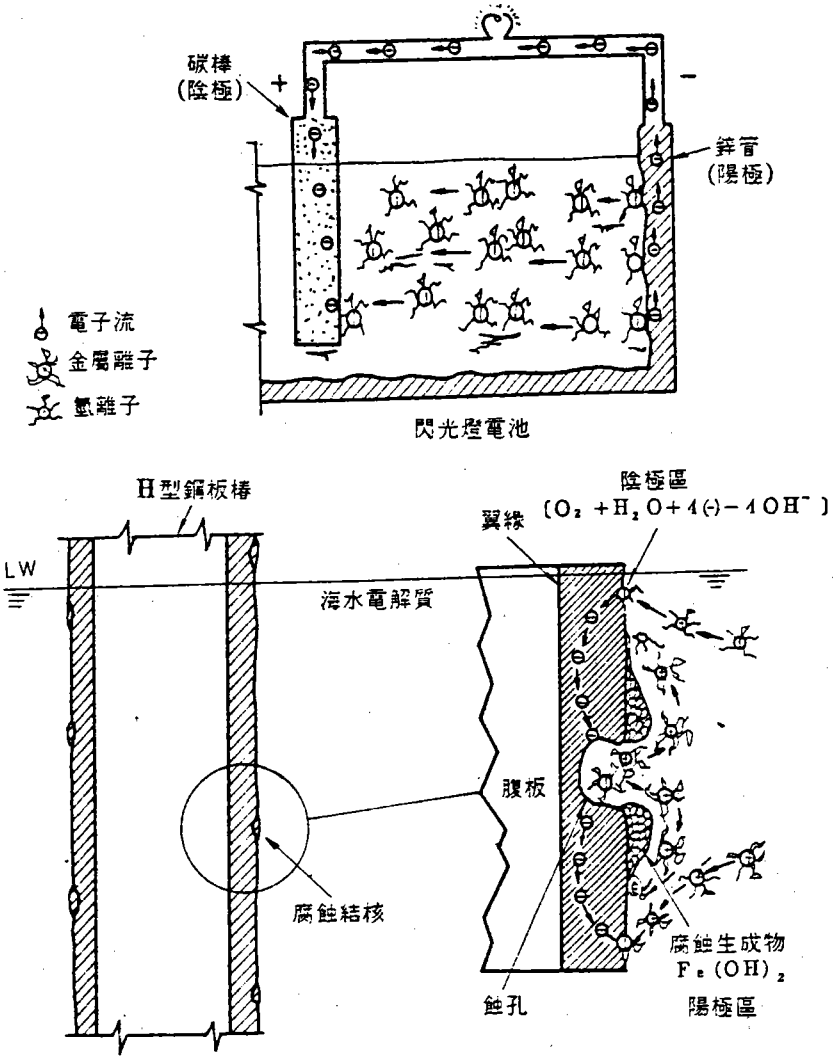
圖一　H型鋼板樁之均勻腐蝕示意圖



圖二　H型鋼板樁發生點蝕示意圖

之差異性情形係由於含少量不純物，局部組成變化，表面抓傷及擦傷、銹皮破壞、機械加工熱處理、溫度應力差、迷失電流、流電偶合和細菌腐蝕等所引起的。而環境上之差異條件，可能由於不同浸泡水深下溶氧量改變、海流速度之局部沖蝕和污染造成鹽份濃度之分佈不均勻、乾濕循環作用或波浪反應作用等現象。此種情形將使金屬表面上不同位置產生電化學之局部電池反應。通常腐蝕反應以伽利尼電池（galvanic cell）研究。即含陽極及陰極兩個電極浸於一導電溶液稱爲電解質，例如乾電池即爲一種伽利尼電池範例，當兩電極外部用一導線連接，則在陽極會發生腐蝕，且有電子流經外部導線至陰極。在任何時間，兩電極間之電壓差決定其瞬間之腐蝕電流，此電壓差將隨所產生之電流量及電池運轉時間而變，而漸趨於穩定值，圖三說明流電腐蝕

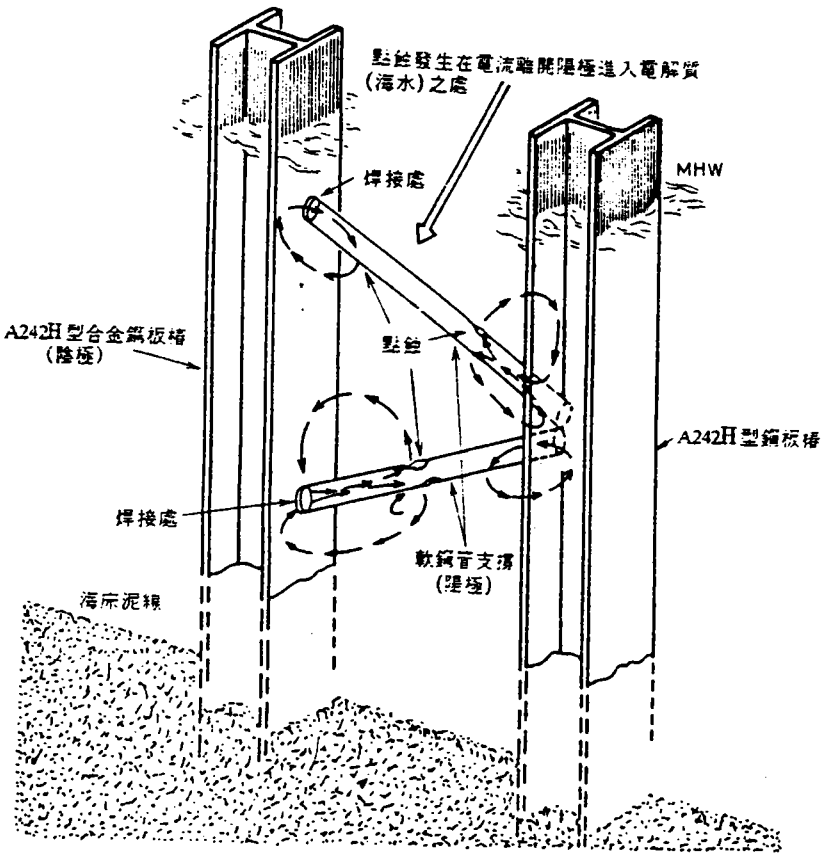
電池原理。



圖三　流電腐蝕電池示意圖

四、海水中鋼材之腐蝕機理

在海水中之鋼板樁結構物上，具有較高化學活性的金屬表面積（陽極）與較欠缺活性之鋼板樁本身（陰極）表面偶合，則將導致有腐蝕電流產生而在陽極區發生腐蝕之現象。一般在腐蝕過程中，當這些局部的陽極與陰極區隨意且持續地更換位置，則表面將會有粗糙度之產生，有時這些局部之活性區並未變換位置，因此金屬遭受局部之侵蝕而發生點蝕現象。通常點蝕之深度與海水的（電解質接觸）陽極區與陰極區之面積比有關，比值較小者，其點蝕量較深。



圖四　流電腐蝕偶合（相異電極電池）

同樣的破壞行爲，可能發生在兩不同金屬偶合且浸於海水中形成一伽利尼電池之情形（圖四），若鋼板樁與一較缺活性之金屬（陰極）偶合浸於海水中，則將發生腐蝕現象。

如圖三所示在一腐蝕坑內亦發生類似之反應。蝕坑底部對金屬表面而言，由於在坑內缺氧之關係所以變爲陽極。坑底之陽極與金屬表面之陰極持續產生電化學反應促使蝕坑愈形加深。在陰極位置，氧氣還原爲氫氧根離子而與鐵離子作用形成膠狀的腐蝕生成物，沈積於金屬表面上，提供一些保護作用。

在海水中，鋼材發生腐蝕之化學反應如下：

(1)在陽極上

由於海水爲强溶劑，對大多數物質均有溶解作用，結晶中之鐵昇華爲鐵原子，被取走二個電子生成二價之鐵離子，即：

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

(2)陰極

陰極爲水的還原反應之處，在有氧氣供應之情況下，海水吸收游離之電子作用形成氫氧根離子，即：

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

氫氧根離子再與鐵離子作用形成氫氧化鐵，即：

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

上式爲鐵變爲氫氧化鐵，將再次反應產生氫氧化三鐵（紅銹）即：

$4Fe(OH)_2 + 2H_2O + O_2 \rightarrow 4Fe(OH)_3$

$3Fe(OH)_2 + 1/2O_2 + H_2O \rightarrow Fe_3O_4 \cdot 4H_2O$

由於氧氣之作用可能形成紅棕色的鐵銹$Fe_2O_3 \cdot H_2O$，而有許多常見的變化形態如$\alpha - Fe_2O_3 \cdot H_2O$（$\alpha$ − FeOOH Goethite）及γ − FeOOH (lepidocrocite)，而在氧氣供應受限制之情況則可能形成Fe_3O_4 (magnetite)生成物。

銹的生成反應相當複雜，表一爲鐵生銹可能的腐蝕生成物（參考文獻20），增田一廣等學者（參考文獻21）曾對碳鋼進行12年 2 個月之試驗，分析銹層組成和厚度之結果如表二所示，由表中可見除潮汐帶外，銹層組成含Fe_3O_4量較多。站在腐蝕將會造成資源的損失，對於鐵銹基本現象之解析和防止及開發耐候鋼之研究仍是相當需要的。

五、在海洋大氣環境下鋼材之腐蝕機理

研究海洋大氣下，鋼材之腐蝕是以電解及直接化學侵蝕兩種機理進行。金屬表面之潤濕程度將對腐蝕速率具有很大之影響性。

在濕透的海洋環境下（wet marine atmosphere），凝結之水氣可以肉眼看見（相當於相對濕度100%）之處，對於鋼材爲一極具侵略性之環境。在此種情況下，腐蝕過程類似於持續浸於海水中情況，除了細薄電解膜，對腐蝕型態特性、腐蝕生成物和氧氣容易傳至金屬表面等具有顯著的影響，最後終於導致加速腐蝕。

在潮濕的海洋環境下（moist marine atmosphere）（相對濕度小於100%），金屬表面的電解膜相當地細薄，因此不易由肉眼察覺。在此情況下，由於灰塵、鹽份及腐蝕生成物之沈積而增加濕氣加速腐蝕之進行，使得電解膜加厚且繼續產生電化學反應。

表一　海洋環境下各部位之腐蝕特性

環境		環境之特徵	腐蝕特性
大氣區		風會攜帶微細海鹽粒子（由距離海面之遠近而有不同的腐蝕性。腐蝕因子爲風速、風向、降雨量、氣溫、日照量、塵埃、季節、污染等）。	在陽光照不到，但是風雨可及的地方，比風雨達不到的地方之腐蝕速率大。
濺灑區		鋼材表面被含有飽和氧氣的薄水膜所濕潤，生物附著量少。	鋼材腐蝕速率大
潮汐帶		因海水之漲退潮乾濕反覆作用	潮汐帶與海中部形成濃淡電池，由於通風性佳，可能當作陰極，因此腐蝕量低。塗膜損傷部位之鋼鐵腐蝕速率大。
海中部	淺海	有飽和的溶解氧，生物會附著及流速等爲腐蝕因子產生作用。	比大氣區的鋼材腐蝕速率大。
	大陸棚	沒有海藻附著，很少有海生物附著，溶解氧濃度較少。	同上
	深海	溶解氧濃度低，水溫及海流流速都低。	鋼材腐蝕速率比淺海爲低，但陽極之消耗量大。
海床土中部		硫酸鹽還原細菌存在之可能。	硫化物會影響鋼鐵腐蝕與電氣防蝕特性。
背面土壤部		殘留水位以上，與土壤環境相同	類似土壤環境
		殘留水位以下者，同海床土中部	類似海床土中部

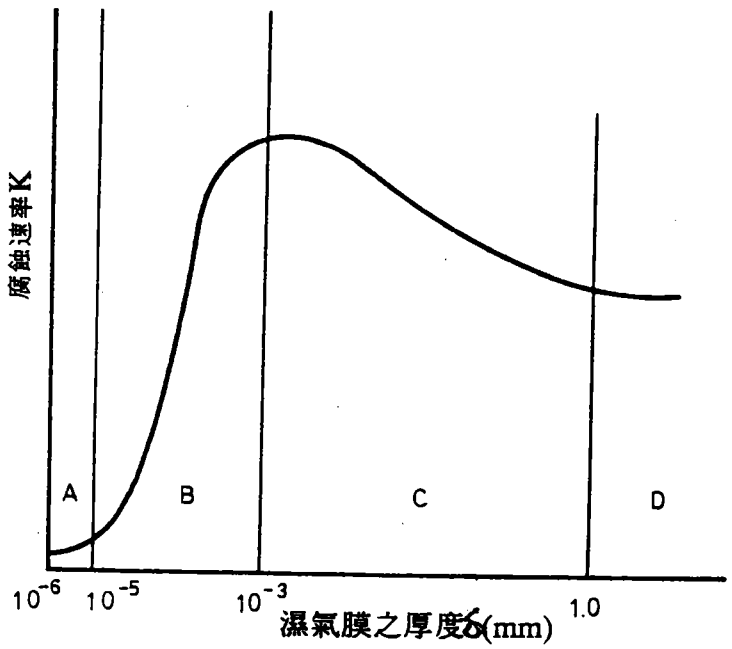
表二　鐵腐蝕可能生成之氧化物、氫氧化物和非晶質複合物之一些特性(20)

化合物 （礦物名）	Fe^{3+} $Fe^{2+}+Fe^{1+}$	色	結晶形	磁　性	電氣傳導	密　度	加熱產生構造轉移
$Fe(OH)_2$	0	白	CdL 六方晶系	常磁性	絕緣體	3.40	約100℃ 分解成Fe_2O_3和H_2 (Schikorr 反應)
Fe O (Wustite)	0	黑	NaCl 立方晶系	常磁性	半導體	5.4 ～5.73	570℃分解成Fe和Fe_3O_4
Fe_3O_4 (magnetite)	0.67	黑	Spinel 立方晶系	強磁性	導體	5.2	
α-FeOOH (gocthite)	1.0	黃	α-FeOOH 斜方晶系	常磁性	絕緣體	4.3	約200℃脫水成 α-Fe_2O_3(或γ-Fe_2O_3)
β-FeOOH (akaganeite)	1.0	淡褐色 ～白	α-Mno2 正方晶系	(常磁性)	(絕緣體)		約300℃脫水成 α-Fe_2O_3(或 γ-Fe_2O_3)
γ-FeOOH (lepidocrocite)	1.0	橙　色	γ-FeOOH 斜方晶系	常磁性	絕緣體	4.1	約200℃脫水成 γ-Fe_2O_3
δ-FeOOH	1.0	褐　色	不規則的CdI_2 六方晶系	強磁性		3.95 (4.32)	約200℃發生α-FeOOH に變態 約300℃脫水成α-Fe_2O_3
α-Fe_2O_3 (hcmatitc)	1.0	赤～黑	ALO_2 三方晶系	常磁性	絕緣體	5.2	
γ-Fe_2O_3 (maghemitc)	1.0	褐　色	Spincl 立方晶系	強磁性	半導體 ～絕緣體	4.88	約400℃的α-Fe_2O_3
綠銹 I 綠銹 II (green rusts)	(0.33) (0.5)	綠 綠	六方晶系 六方晶系	green rust I的生成，Cl^- 是必要的 green rust II的生成，SO_4^{-2} 是必要的			
無定形銹 [非晶質的物質]	(1.0)	褐色	無定形 (amorphous)	存於大氣腐蝕的銹層中，經X-ray 繞射爲擴散繞射圖，推測爲非晶質水氧化鐵。			

在乾燥之大氣條件下，在近海的海洋環境會遇到少數這種情形，鋼材與大氣中之氧氣起化學反應而發生腐蝕，在鋼材上形成氧化膜而迅速發展爲一有限制的厚度（limiting thickness），且若表面無潤濕存在，則可保持穩定及自然地受保護狀態。在工業海洋大氣區，有硫化物之出現，會使氧化膜厚度增加，若保持在乾燥之大氣下，這些膜亦變爲穩定及受保護。然而若在潮濕情況下，金屬表面出現硫化物，則將加速鋼材之腐蝕速率。

大體而論，在高潮位以上之鋼材腐蝕速率之影響因素，有濕氣膜

之厚度，鋼材表面之清潔性、氣溫和蒸發率等，圖五說明金屬表面濕氣膜厚度與腐蝕速率之關係(5)。



圖五　金屬表面濕氣膜厚度與大氣腐蝕速率之間係(5)

六、腐蝕區域分類

研究海洋結構物的腐蝕特性發現，在各部位上有明確的不同腐蝕趨向，通常將之分爲五大區域，各有其特殊的腐蝕速率，表三概示海洋環境下各部位的腐蝕特性。並說明如下：

①大氣區：此區域爲終年曝露在大氣下，易於接近維護。

②濺濕區：自平均高潮位至大氣區底端，在此區域，樁基表面上保持有小濕氣滴和水膜，易接近維護，但在低潮時稍爲不方便。

③潮汐區：介於平均高低潮間。由於潮汐之變化，因此受到週期性之浸泡，在低潮位時，維護較爲困難。

④海中區：自平均低潮位至泥線之管樁，終年浸於海水中，本區域若未借助潛水箱技術或特殊水下油漆技術則不易維護。

⑤海床土中區：此區域爲完全埋於海床下，通常不需維護。

表三　碳鋼鋼管樁上銹層厚度和鏽層組織(21)

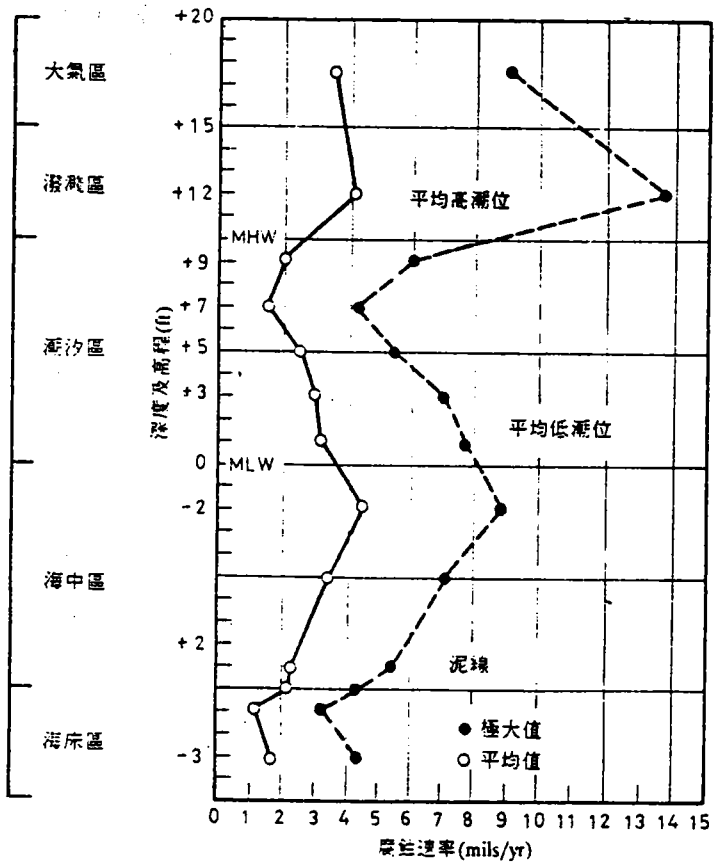
Zone	銹層厚度　Rust layer (mm)	銹層組織　Rust sturcture
Splash	Outer layer:9.4	Fe_3O_4> α -FeOOH> γ -FeOOH
	Inner layer:0.1～0.5	Fe_3O_4> α -FeOOH> γ -FeOOH
Tidal	Outer layer:3.0	γ -FeOOH> α -FeOOH>Fe_3O_4
	Inner layer:0.7～0.9	γ -FeOOH> α -FeOOH>Fe_3O_4
Submerged	Outer layer:8.0	α -FeOOH≒ β -FeOOH≒ γ -FeOOH≒Fe_3O_4
	Inner layer:0.1～0.2	Fe_3O_4> α -FeOOH≒ β -FeOOH≒ γ -FeOOH
Soil	Outer layer:0.8	Fe_3O_4>> γ -FeOOH≒ β -FeOOH≒ α -FeOOH
	Inner layer:0.07～0.1	Fe_3O_4>> γ -FeOOH≒ β -FeOOH≒ α -FeOOH

此外，必須注意通常在大氣、潑濺及土壤區正反兩面所承受腐蝕程度有所差異。

七、海洋鋼板樁腐蝕速率之環境影響因素

1. 曝露區域：通常在上述五種曝露區，鋼板樁表面之腐蝕速率變化很大，圖六說明一些港灣板樁表面上所發生腐蝕速率之剖面圖，這是在八個港灣結構物曝露 19年的腐蝕損失量之平均值。通常在潑濺區腐蝕速率最大，除了有少數情況有沖刷現象外，腐蝕量最低的區域大都在海床區，而在海中區，低於平均低潮位處腐蝕量最大。另外在潮汐帶腐蝕量亦較低，通常在未受擾動的土壤、鋼板樁之腐蝕損失量很低，除非該處爲珊瑚被採取而填土具多孔性，則腐蝕量將增加。

在鋼板樁僅有一側曝露於水中，另一側爲背填土，則平均腐蝕速率約爲1～45mils／yr(mpy)，最大可達3～14mpy。而兩側都曝露於水中，則鋼板樁的腐蝕速率可能加倍。在一長期曝露期間，點蝕所引起局部腐蝕速率約爲平均腐蝕速率之1.5～3倍。



圖六 港灣鋼板樁腐蝕速率剖面圖

2. 沖蝕：沖蝕 (erosion) 源於希臘字之 erodere，字面上之意思爲磨損 (wear away)。在海中區腐蝕加上沖蝕會產生嚴重的局部侵害。在海洋環境下之鋼材，先以相當高之腐蝕速率發生腐蝕，直到在表面上形成一腐蝕反應生成物之保護膜。在不流動的水域，此保護膜很有效，然而在河口有潮汐反覆作用，保護膜將受沖蝕掉。此保護膜之形成會降低腐蝕速率，在潑濺區此保護膜受劇烈的波浪作用破壞，則會使腐蝕速率增加。

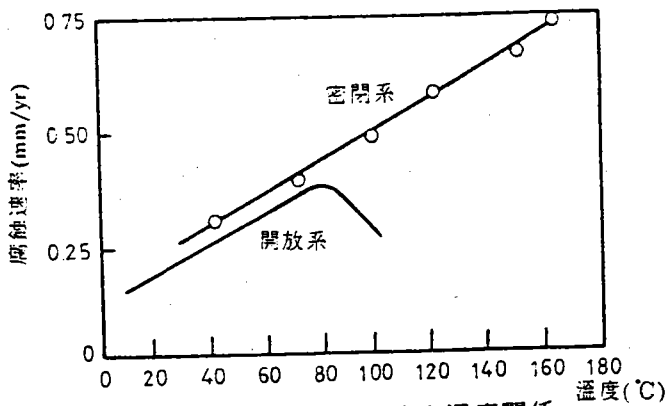
同樣地，海床質對基樁之沖刷作用，將使泥線之鋼材易引起迅速惡化。Ross（參考文獻 10）曾在美國佛羅里達州 Palm海灘安裝鋼板樁突堤觀測，結果發現在漂砂沖蝕區之局部腐蝕速率高達 373mpy，然而像這種曝露情況爲一特例。

3. 水溫：在腐蝕反應下，海水溫度爲一複雜之變數，包括腐蝕反應的化學反應在溫水中會加速。然而此種腐蝕速率之增加，經常很快地

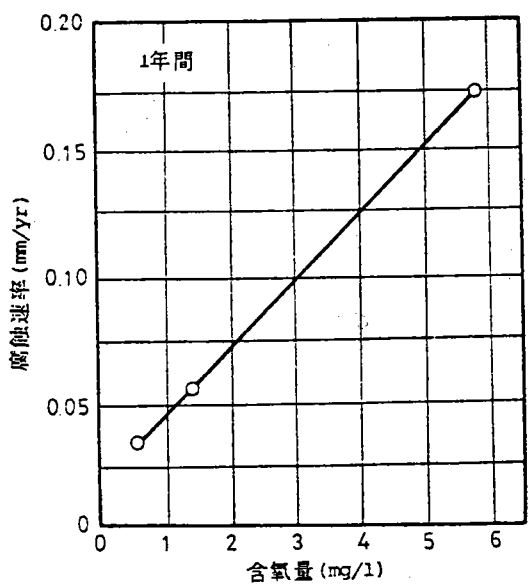
被海洋污著速率之增加所抵銷。海生物附著對金屬表面提供保護，生物活動隨水溫而變，在高溫下溶氧量減少亦對腐蝕速率具有延緩之影響性。活性控制的氧化及擴散控制的還原反應，都會隨溫度之增加而遞增，而鈍態膜之穩定及形成的速率受水溫之影響，而溶氧量會隨水溫及鈣質生成物增加而遞減，顯現衰退的溶解度，因此溫度對於腐蝕的影響性必須個案處理。

港灣結構物等開放系統，隨溫度上升溶氧量減少，溫度上昇到 80 ℃腐蝕速率爲最大，而如海水管線等爲密閉系統，不會有溶氧量減少之現象，故腐蝕速率隨溫度上升而遞增，如圖七所示。

4. 含氧量：在海水中，氧氣爲主要的腐蝕因子，氧氣到達金屬表面之速率及濃度，決定其具有移動氫氣外殼，形成氫氣根離子附著於陰



圖七　鋼鐵腐蝕速度與溫度關係



圖八 鋼鐵腐蝕速度與和含氧量關係

極表面而與鐵離子作用，形成氫氧化鐵之腐蝕速率。

在鐵表面氧氣濃度之變化爲水深之函數，沿管樁上由於有不同的通氣電池 (aeration cell) 之形成，而加速腐蝕之反應與伽利尼電池 (galvanic cell)類似，或稱之爲氧濃淡電池 (oxygen Concentration cell)，氧濃度低之區域對高氧濃度區而言爲陽極。在海中區，剛低於平均低潮位處之腐蝕速率較潮汐帶爲大，係由於此種差異通氣電池作用所致。

如前述，氧氣與氫氣反應生成水或與水作用產生氫氧根離子。此種强有力的陰極反應，促使鐵金屬繼續在陽極發生溶解而形成氧化鐵或氫氧化鐵等腐蝕生成物。

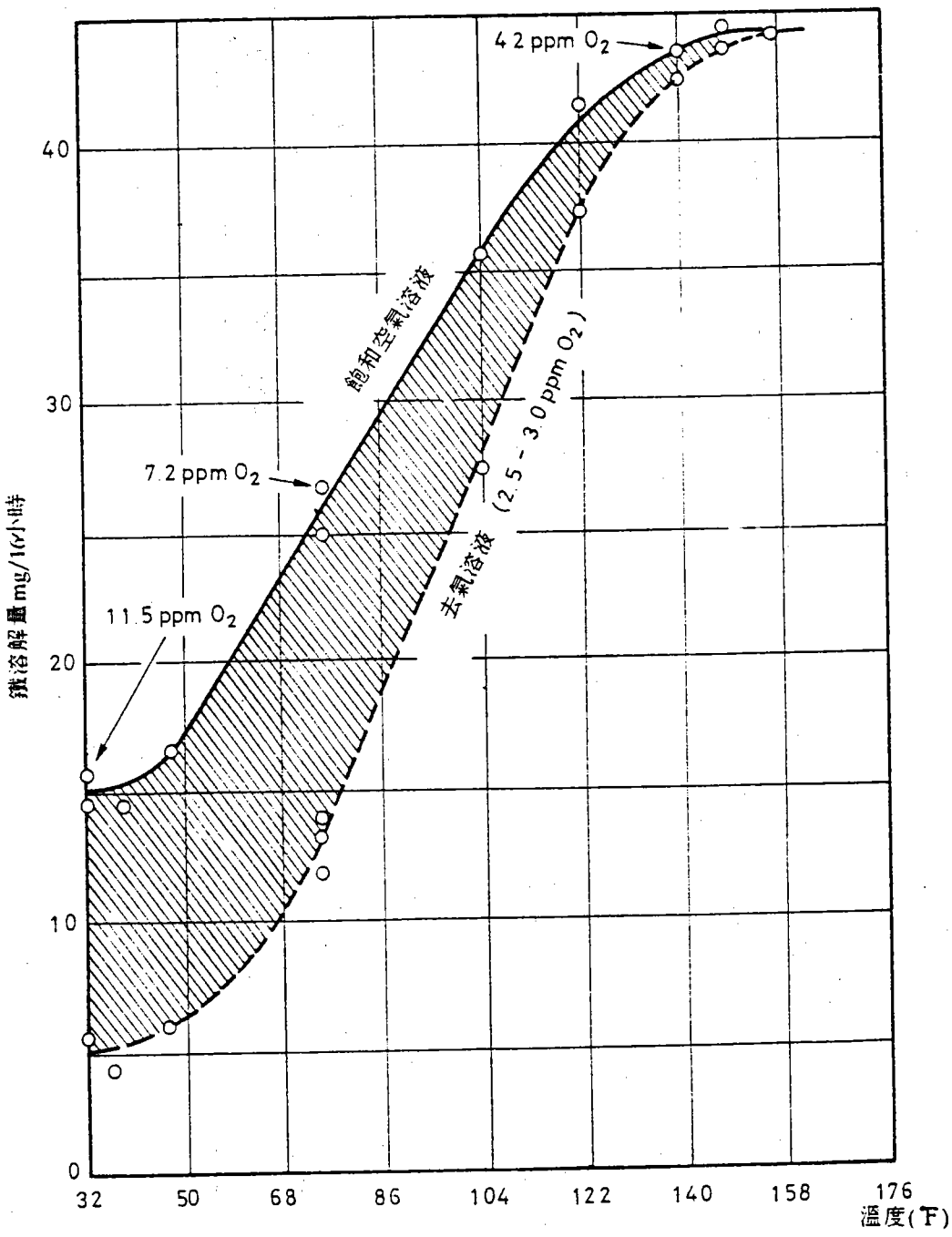
假設鋼材表面無阻礙物，則在海中鋼材上之氧氣量將受波浪作用、流速、漂砂磨損和溫度昇高等因素而遞增，因而增加腐蝕速率。一般而言，腐蝕速率隨溶氧量增加而遞增如圖八所示。而海水污染，有機物量增加會降低溶氧量尤其夏季最爲顯著，因而會降低腐蝕。然而污染的海水，會使海水中之厭氧菌活動增加，反而會使腐蝕速率增大，因此必須詳細檢討。

在海生物污著不顯著之處，溫度及含氧量對海洋腐蝕具有相關性，圖九說明曝露於空氣或部份除氣的氯化鈉 (NaCl)溶液下，溫度及通氣量對腐蝕之影響性。

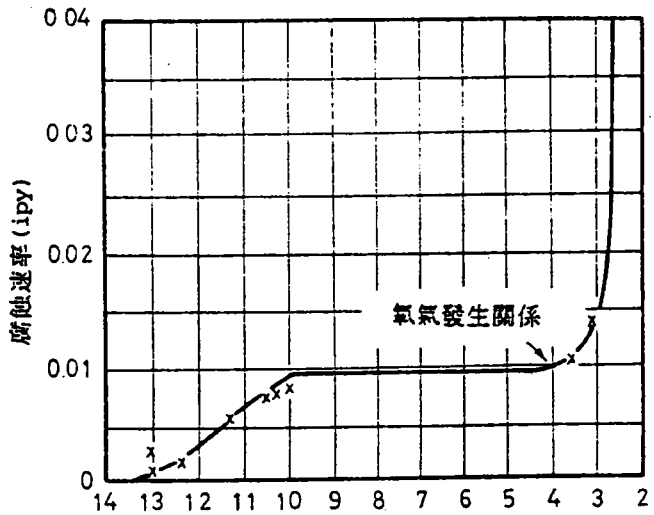
5.pH值：（氫標值，Power of Hydrogen）溶液的酸性或鹼性，係由所含氫離子或氫氧根離子之濃度而定。在中性溶液中兩種離子的濃度相等，而氫離子濃度大者爲酸性，反之爲鹼性。在25℃純水中所含的氫離子與氫氧根離子數量相等爲 1×10^{-7} mole/l，pH值之定義爲 $pH=-\log_{10}[H^{+}]$，因pH值小於 7 爲酸性，反之爲鹼性。

鋼材腐蝕速率與pH值之關係如圖十所示，圖中說明pH值介於 4 與10之間，腐蝕速率不隨pH值而變，一般海水之pH值約在7.2～8.2之間，因此腐蝕速率維持一定值。

在港灣水域含有污染物，pH值可能有點變化，但在pH值略大於7.0時，鋼材之腐蝕速率幾乎爲一定值。當鹼性增加，pH值大於9.5，鋼材會變爲鈍態而形成保護膜且阻止氧氣在鋼材表面之擴散，而當pH值低於 4，鹼性保護膜被溶解，酸直接與金屬作用隨著放出氧氣。由於這些條件在海洋環境下不大可能發生，pH值對鋼板樁腐蝕速率之影響性並不大。



圖九　在3%氯化鈉溶液下，溫度與空氣對鐵之腐蝕的影響性(12)



圖十　鋼鐵腐蝕速度與ＰＨ關係

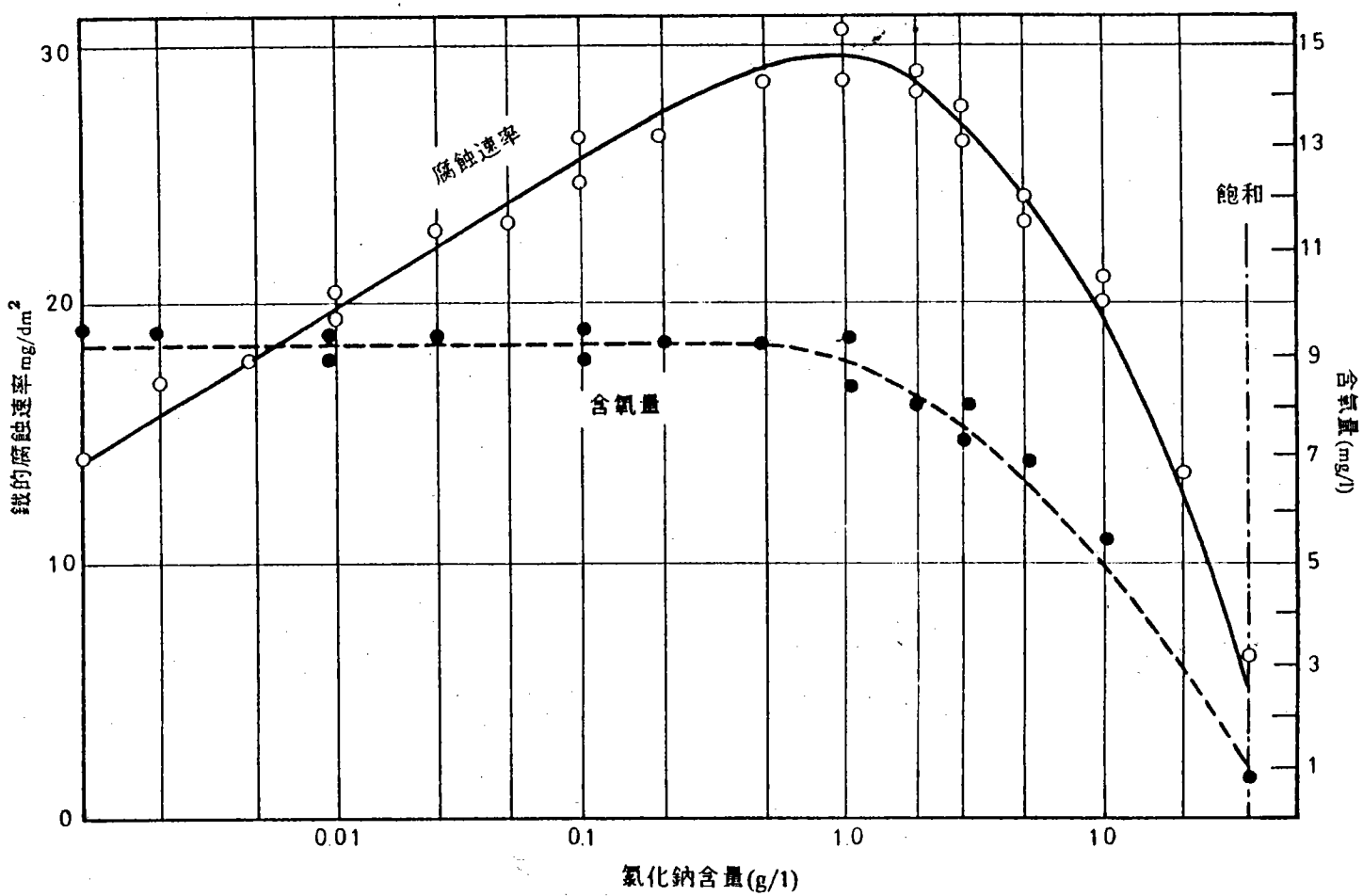
6. 含鹽量：在外海，海水之含鹽量約爲3.5％，在未受污染的港灣或其他海岸地區，受淡水河流稀釋之處海水之成份大多維持一定值。在海水中，氯離子含量最高，由於其能穿入腐蝕生成物所形成的保護膜，致使發生局部腐蝕。由於氯離子之出現亦將影響海水中之溶氧量。圖十一爲鐵之腐蝕速率及溶氧量與含鹽量之關係，由圖中可見腐蝕量隨鹽度增加而遞增，到NaCl＝1％時爲極值然後遞減。值得注意的是在NaCl<1％情況下，溶氧量維持爲一定值，而當NaCl>1％則隨鹽度增加而遞減。

7. 海流速度：海流速度之增加，將使鋼管槽之腐蝕速率增加，其原因是氧氣擴散至金屬表面上之停滯水動力副層（擴散副層）之速率及數量之增加所致。由於氧氣輸送至金屬表面之遞增而使擴散副層之厚度減小。圖十二表示流速對鋼材腐蝕速率之影響性。

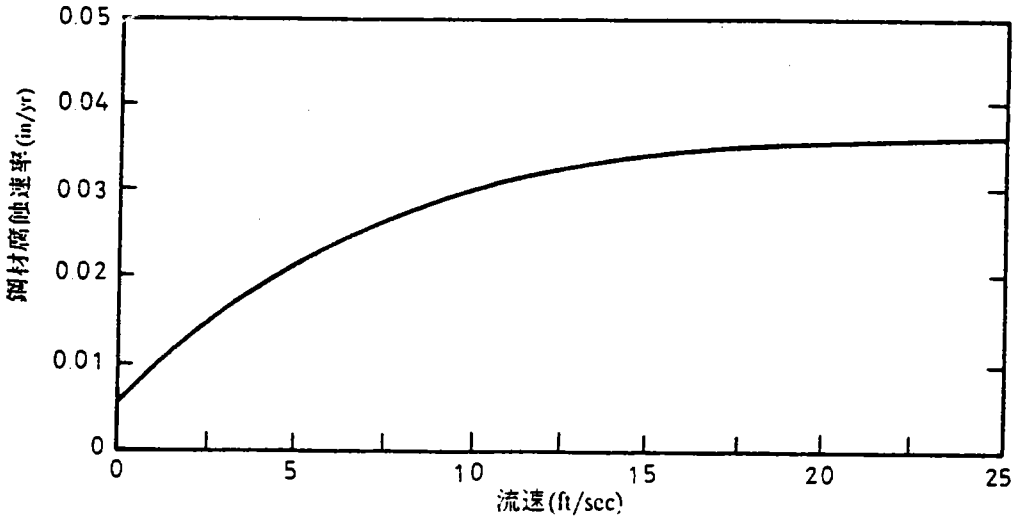
在某些情況例如天然水（pH＝７）而無氯離子存在或在含18％鉻及８％鎳之不銹鋼，其金屬表面有保護膜或已補修過情況，則腐蝕速率隨海流速度增加而遞減。

在非常高之流速下，所造成之沖蝕及穴蝕損失將比普通的腐蝕速率增加好幾倍，在停流情況，鋼材之腐蝕速率將降低，然而由於發生局部腐蝕速率較高，因此點蝕較大。

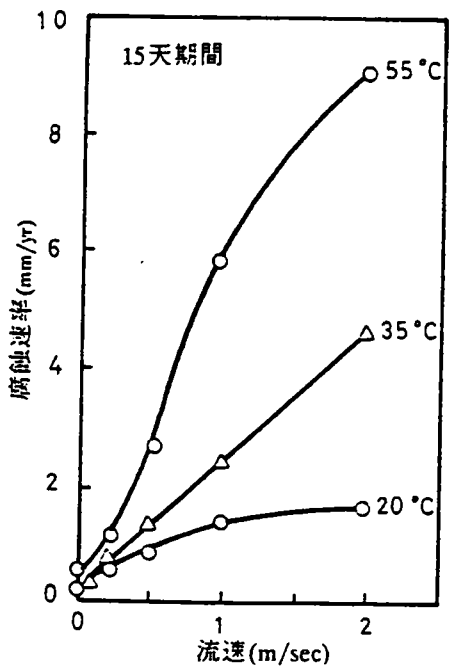
8. 海洋生物之影響：當金屬浸於海水中，在剛開始其表面有生物黏液（slime）附著，接著形成生物黏液膜萌芽的固著微生物（embryonic sessile organism）持久的附著，然後迅速地轉變爲成熟形式其發展程序



圖十一　在溫度75°F，鐵之腐蝕速率與鹽度之關係(12)



圖十二(a)　在大氣溫度下，海水流速對鋼材腐蝕之影響性(6)



圖十二(b)　鋼鐵腐蝕速度與流速溫度關係圖

如圖十三所示，Clapp（參考文獻22）曾列出列最常見之海洋物污著之型態爲：

(1)具有硬殼者：如環蟲（Annelids）、藤壺（Barnacles）、殼狀苔蘚蟲（Bryzoa）、軟體動物（Mollusks）、及珊瑚等。

(2)未具硬殼者：如海藻、絲狀苔蘚蟲、腔腸動物（Coelenterates）、水螅（Hydroids）、被囊類動物（Tunicates）、含鈣質或矽土質的海綿。

這些生物附著之生長而影響鋼材上pH值，溫度及離子濃度之變化，故使之產生電化學反應，其關係如圖十四所示，因此使鋼材發生局部腐蝕反應之機構大致爲：

(1)產生酸：由於生物之新陳代謝或分泌物產生有機酸或無機酸，加速材料之局部腐蝕。

(2)產生硫化物：由於受污染使海水中硫化物含量增加，且因含有硫氧化菌之存在，而使這些硫化物氧化爲硫價釩加速材料腐蝕，而在厭氧環境下，硫酸根被硫酸鹽還原菌還原爲硫化氫，與金屬表面反應形成暫時性之硫化亞鐵保護膜，降低腐蝕速度，但由於鐵離子或亞鐵離子的增加，硫化亞鐵與鐵之偶合作用，形成的伽凡尼效應而加速腐蝕。其電化學反應式如下所列，而硫酸鹽還原菌、硫化鐵及氫氧化鐵之關係如圖十五所示，另在鋼材上，鐵硫化物之變化關係如圖十六所示（參考文獻23）。

陽極：$4Fe \rightarrow 4Fe^{+2} + 8e^{-}$

$8H_2O \rightarrow 8H^{+} + 8OH^{-}$

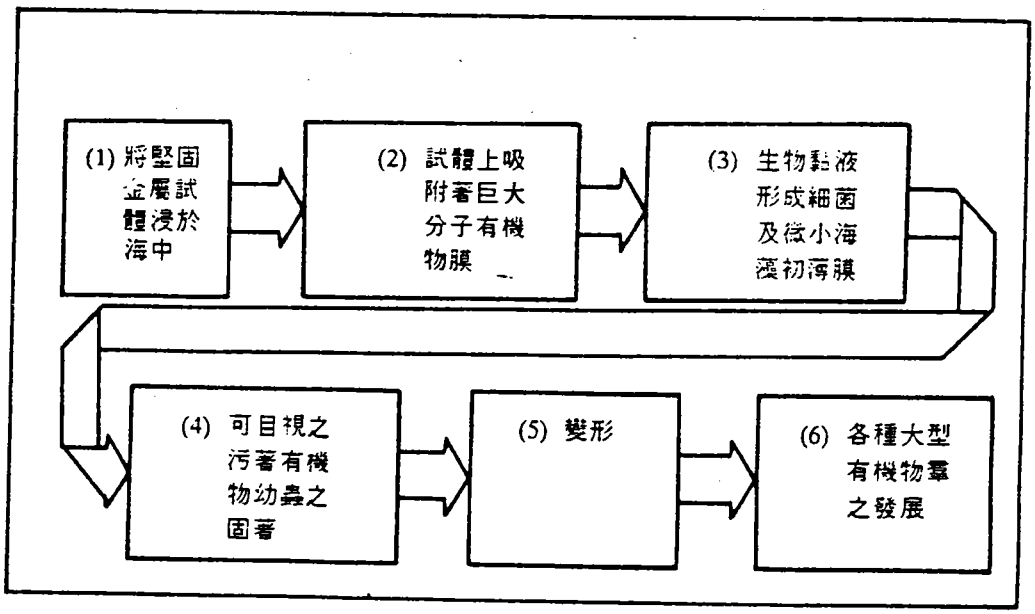
陰極：$8H^{+} + 8e^{-} \rightarrow 8H$

$(SO_4)^{-2} + 8H \xrightarrow{SRB} S^{-2} + 4H_2O$

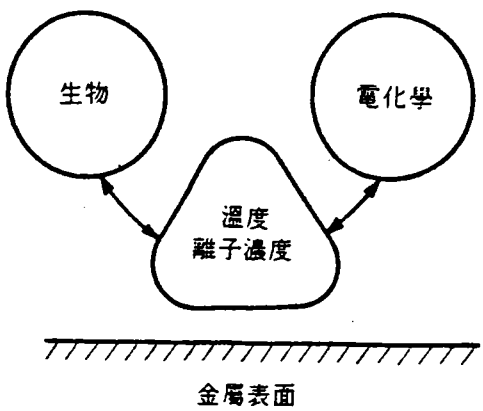
$Fe^{+2} + S^{-2} \rightarrow FeS$（腐蝕生成物）

$3Fe^{+2} + 6OH^{-} \rightarrow 3Fe(OH)_2$（腐蝕生成物）

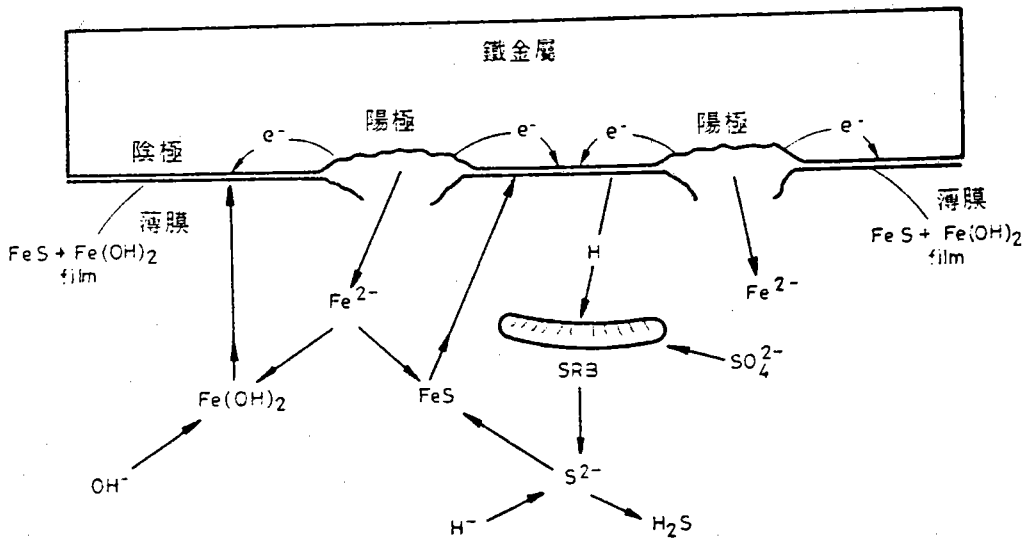
(3)氧濃淡電池效應：海生物分泌的黏膜或微生物產生的腫胞（tubercle）附於金屬表面上，由於氧不易擴散或內層微生物消耗膜內之氧氣，而造成內外氧的濃度不同，因此形成氧濃度差電池（圖十七）發生孔蝕現象。另外由於覆蓋物底端缺氧形成厭氧條件，提供硫酸根還原菌之存在空間，加速孔蝕之發生。而在一成熟生物薄膜上，好氧菌與厭氧菌之生成情形如圖十八所示。



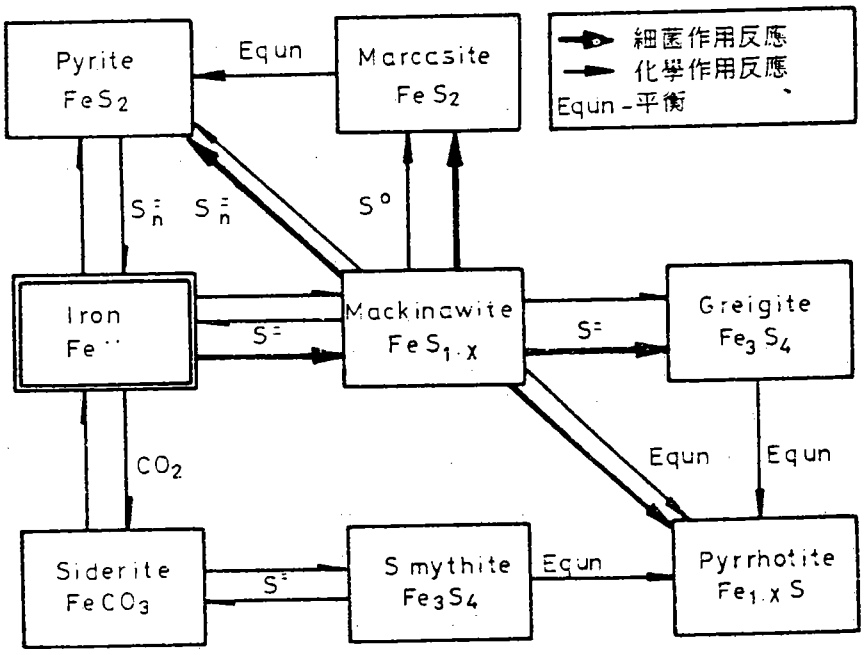
圖十三　海洋生物污著事件之程序圖



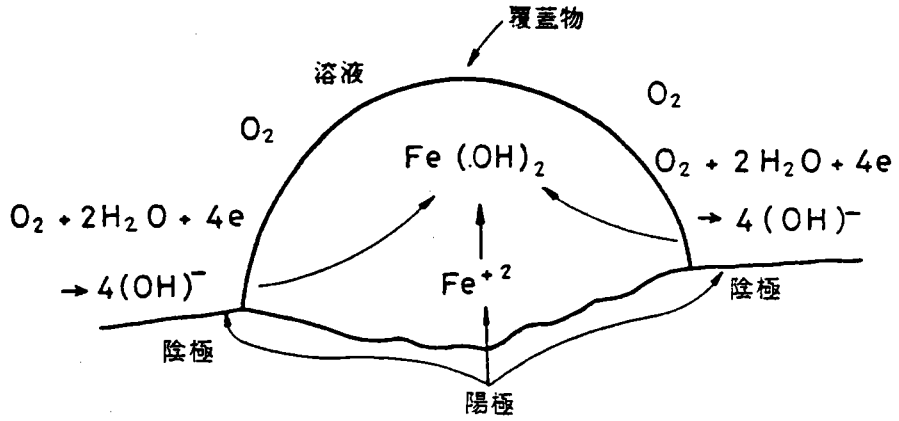
圖十四　金屬浸於海水中，其表面受生物及電化學作用之關係圖



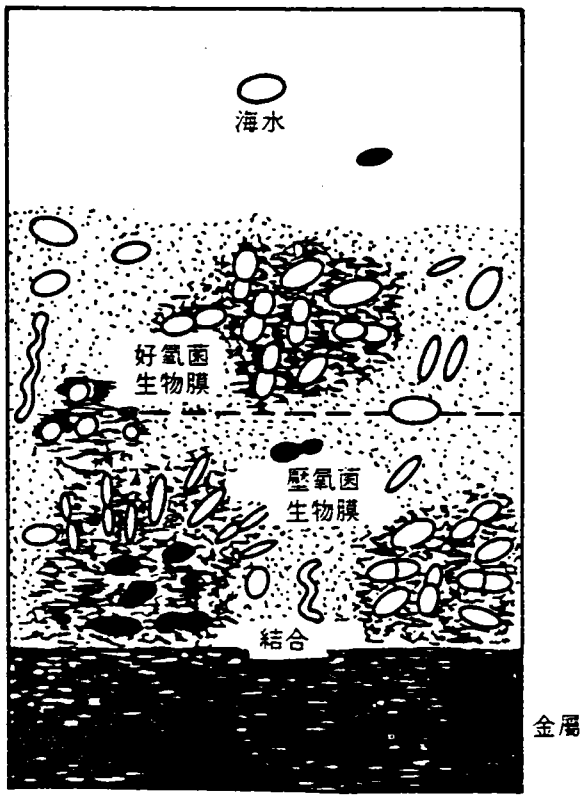
圖十五　在一銹蝕鋼材表面上，硫酸鹽還原菌與硫化鐵及氫氧化亞鐵等之關係



圖十六　鋼材上硫化物間關係圖



圖十七 氧濃度差效應圖



圖十八 在成熟生物膜上,好氧及厭氧微生物之形成及結合現象

(4)保護膜被破壞：由於海生物附著而使鋼材表面保護氧化膜不易形成，或已產生者遭受破壞造成腐蝕。而有些機體，使用各種保護性的有機塗料作爲養分而破壞其保護功能，或有些貝類成長中破壞塗料，因而無法達到保護功效。

(5)陰極去極化效應（Cathodic Depolarization）：金屬離子或電子能迅速被移走，將使金屬腐蝕速率加快，主要移走電子之反應爲移走氫氣。而硫酸還原菌具有氫活化酵素，能移走金屬表面的氫氣，還原硫酸根變爲硫化物，使鐵離子之溶解量更多而加速腐蝕，此種效應稱爲陰極去極化效應。

(6)綜合反應機構：微生物腐蝕反應機構相當複雜，很可能由上述各種反應機構同時或部份作用產生所致，由實驗室所得之反應機構，往往與實際情況有很大的差異，因此應詳加探討反應機構。對於海生物污著之防制方法，可利用流速降低籐壺之形成，根據本研究所與工材所，在台中港進行浸泡試驗結果發現，主要海生物爲籐壺，面向海浪者含量少，而背向海浪者含量多，熱浸鍍鋅材料有抑制籐壺附著之功效，目前所採用防制海生物污著法以加氯殺菌，陰極防蝕可增加金屬表面的鹼性抑制硫酸還氧菌之成長，以及防污塗料中含毒性，不斷溶解防止海生物附著，另一種形成爲利用非黏性的樹脂如鐵弗龍，以其表面張力低的特性，使海生物不易附著而達到防污效果爲主。

9. 污染：港灣之污染包含家庭污水和複雜的工業廢水、漏油等，通常污染由於其具有毒的效力和耗盡溶氧量，因此對海生物有害，將會使得厭氧菌易於生存而加速腐蝕速率，污染物之存在將使管樁位置局部之海水pH值降低或硫化物增加而加速腐蝕速率。海洋污染雖然對海洋動物具有危害，但在潑濺區及潮汐帶，可被覆鋼材表面而提供部份之防蝕保護效果。

10. 風：風是引起海浪之主因，而導致在潑濺區的結構物，發生間歇性潤濕現象，風亦激起水面上升而由碎波攜帶海鹽潑濺於結構物上而受蒸發，使海鹽沈積附著於鋼材表面上，將加速鋼材之腐蝕。因爲鋼材表面具有吸濕性而形成侵略性的局部腐蝕電池。

11. 降雨：降雨會在鋼材表面上留下薄層含有鹽份的水膜，而使氧氣迅速擴散至薄層電質，因此加速腐蝕之進行。而在傾盆大雨情況下，

則會沖洗鋼材表面上殘餘物及鹽份，而降低腐蝕速率。

12. 相對濕度：如前述大氣腐蝕發生在鋼材表面，可以肉眼看見的濕氣膜時，其相對濕度爲100%。而在小於100%情況下，腐蝕在鋼材表面上，不易由肉眼看見的相當細薄電解質膜下進行。此薄膜係由毛細管、吸附和化學凝結作用所形成的。由此機構所引起之腐蝕迅速造成濕氣膜加厚。當膜厚增加，氧氣擴散變爲困難而降低腐蝕速率，因而發展爲穩定膜特性。在乾燥大氣情況下，完全缺乏濕氣，鐵受空氣作用發生氧化，所產生之腐蝕現象相當地輕微。

13. 日照：陽光促使管樁周界之大氣溫度上昇，並影響相對濕度蒸發率和結構物之溫度等。其以複雜的方法影響鋼材之腐蝕速率，金屬表面上有鹽份的濕氣受到太陽日照及海水潤濕之反覆作用，因而破壞鋼材上之保護膜。長期受太陽之紫外線曝露，對於許多塗裝系統之顏色和組成會造成傷害。

14. 海鹽或其他有害物之潑濺：鋼結構物由於受潑濺之海水作用，其中含有鹽份，受日照而蒸發，而鹽份沈積於鋼材上，再受潤濕而加速腐蝕速率。在臨海工業區的大氣中含有工業污染物，例如有硫化物附著在潤濕之鋼材表面上，將加速腐蝕速率。然而在大多數工業海洋大氣下，微量之氯化物存在可視爲對鋼材腐蝕最具侵略之因子，雖然在腐蝕生成物分析上發現硫酸鹽爲主要成份。此可以解釋爲硫酸鹽較氯化物不易發生溶解而且不易被雨水沖走。細砂、表土、煤灰和由其他來源之灰塵即飛灰，可附著於海洋結構物表面上。這些細粒有些爲具有吸濕性而可作爲濕氣凝結中心，而有些如碳煤灰可作陰極而促成局部伽凡尼電池，另有些細粒聚合成大塊或沈澱而形成氧濃淡電池，造成局部點蝕現象。

八、影響腐蝕速率之鋼材組成因素

在碳鋼中加微量之銅（大約0.25%），似乎對海洋環境下防蝕沒有很顯著之改善，而主要之裨益爲對有機塗料具有保持之特性。

鋼板樁及H型樁之新鋼材組成含較高量之銅及少量之鎳及磷，據報導在易受攻擊的潑濺區具有優越抗腐蝕性質，這種鋼材曾在美國北卡羅來納州港灣島（Harbor Island）試驗並與傳統性的A 328碳鋼板樁比較，經過9年曝露試驗發現，新鋼材在小浪作用於潑濺區情況下之耐

蝕能力約爲碳鋼之三倍。而在較嚴酷之暴露條件則約爲兩倍，在其他地點之試驗亦證實此結果，然而在海中區與碳鋼比較，並無顯著的改進。

有一些高强度的低合金鋼，在樁基結構物上使用，其成份中含有鈮（Columbium）或釩（Vanadinm）等合金之鋼材，例如ASTE A572級號爲42、45、50、55及60，然而並未看見有關報導較普通碳鋼有更佳的抗腐蝕能力。

ASTM　A588包含鋼材組成具有抗大氣腐蝕能力約爲碳鋼的兩倍。此類鋼材並未在鋼板樁上使用，僅偶然用於H型鋼或管樁上。在結構附件、支撐或配件上，有時規定用A 588品級以便在海洋環境下能獲得較長之使用壽命，然而未見有改進耐蝕能力，而根據完整的曝露試驗結果發現此類鋼材顯示較優於碳鋼。現在已有許多耐候鋼及耐海水鋼產品出現，有關其腐蝕特性將另文檢討。

九、其他影響腐蝕速率之因素

1.不同金屬接觸：

如前述，海洋結構物不同金屬之偶合，將在陽極之構件上發生流電腐蝕（galvanic corrosion），而在陰極之構件表現鈍性。在海洋樁基施工時，有時扣件、接合處、濺區之套層和零件等裝配之材料不是一般的碳鋼，在此種情況下，若這些金屬對鋼板樁而言爲陰極，對樁基表面而言爲小面積，鄰近之陽極樁表面將會加速發生腐蝕，而陰極之金屬將保持原狀不受影響。若相反的狀況存在，小的陽極配件附接於陰極樁上，配件將迅速發生破壞。表四說明各種金屬和合金在流電系列的相對位置和電位大小。表五則說明兩相異金屬之相對面積與腐蝕之嚴重性關係。

2.銹皮（Mill scale）：

銹皮是鋼材在熱處理或熱滾過程中，在其表面上所形成之氧化鐵黏著物，較鋼材高貴（陰極），由於不利於陽極與陰極面積比之關係，因此銹皮破壞將迅速發生腐蝕，即由於龜裂而使小面積之鋼材曝露與周圍大面積的銹皮相比較下會發生腐蝕現象。

La Que曾敘述，在鋼材上有銹皮，曝露時間三個月，其點蝕深度約爲除去銹皮之情況的三倍。然十年後降低爲1.5或1倍而已。由於初

表四　金屬及合金在海水中之流電系列(a)

金屬或合金名稱	Ag-AgCl 電極 參考電位(volts)
鎂	-1.64 b
Mg-6A1-3Zn	-1.53
鋁陽極（專利）	-1.15 c
A1 5257-H25	-1.13
鋅(MIL-A-18001G)	-1.03
鋁合金 5083-0;X7005-T63;5456-H321	-0.96 to -0.98
鋁陽極(5Zn)	-0.95
鋁合金 5086-H32;5086-H34;5052-H34;7106-T63; Alc.7178-T6;Alc.X7002-T6;6061-T6; 6061-T651:5086-H112;5052-H32;5154-H38	-0.90 to -0.93
3003-H14;5050-H34;1100F;1100-H14	-0.85 to -0.87
X7002-T6;7075-T7351	-0.76 to -0.77
7178-T6;2014-T6;7079-T6	-0.70 to -0.74
2024-T4;2219-T87	-0.65 to -0.68
2% 鎳鑄鐵	-0.68
鑄鐵	-0.61
碳鋼，A1010	-0.61
高強度合金鋼	-0.60
430 不鏽鋼（活性）	-0.57
304 不鏽鋼（活性）	-0.53
410 不鏽鋼（活性）	-0.52
Ni Resist Type I	-0.47
Tobin 青銅	-0.40
黃銅	-0.36
銅	-0.36
海軍黃銅	-0.36 (24.6℃)
紅黃銅	-0.33
G 青銅	-0.31
海軍黃銅	-0.30 (11.9℃)
鋁黃銅	-0.29
90-10 銅鎳合金(1.4Fe)	-0.29 (17℃)
90-10 銅鎳合金(0.82Fe)	-0.28
70-30 銅鎳合金(0.45Fe)	-0.25
70-30 銅鎳合金(0.51Fe)	-0.24 (17℃)
90-10 銅鎳合金(1.4Fe)	-0.24 (6 ℃)
90-10 銅鎳合金(1.5Fe)	-0.22 (24℃)
70-30 銅鎳合金(0.51Fe)	-0.22 (6 ℃)
430 不鏽鋼（鈍態）	-0.22
70-30 銅鎳合金(0.51Fe)	-0.20 (26.7 ℃)
鎳 200	-0.20
316 不鏽鋼（活性）	-0.18
鎳鉻合金 600	-0.17
430 不鏽鋼（鈍態）	-0.15
PDA鈦	-0.15
銀	-0.13
BI 鈦	-0.10
304 不鏽鋼（鈍態）	-0.08
Hastellov C	-0.08
蒙銅 400	-0.08
不鏽鋼（鈍態）	-0.06
石墨	+0.25
鉑	+0.26

註：(a) 本資料除特別提及外，均為美國國際鎳公司之資料，海水流速＝13ft/sec 情況下
(b)H. A. Robinson. "Fundamental Characteristies of Magnesium Galvanic Anodes", Dathodic Protection. A Symposium. pp.104-109. NACE(1949) M. H. Peterson. T. J. Lennox. Jr., and R. E. Groover. "Marine Corrosion Studies (Potential of Aluminum).
(c)Allovs in Quiescent Sea Water. "Report of NRL Progress. pp.26-27 October 1966
(d) 美國國際鎳公司資料，海流流速＝7.8ft/sec 情況下。

表五　海洋中金屬組合之流電之行爲

偶合之金屬 / 所考慮之金屬		(1)鎂合金	(2)鋅	(3)鍍鋅鋼	(4)鋁（五〇五二）	(5)鎘	(6)軟鋼	(7)鍛鋼	(8)低合金鋼	(9)鑄鐵	(10)(甲)—(丙)%鉻鋼	(11)(乙)—(戊)%鉻鋼	(12)沃斯田鉻鎳	(13)不銹鋼	(14)鉛	(15)錳青銅	(16)鋁鎳合金	(17)海軍黃銅	(18)鋁青銅	(19)銅	(20)矽青銅	(21)七〇—三〇銅鎳
(1)鎂合金	S	△	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	E	△	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	L	△	▲	▲	▲	▲	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
(2)鋅	S	□	△	△	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	E	□	△	△	◇	◇	◇	◇	◇	◇	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
	L	○	△	△	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇
(3)鍍鋅鋼	S	□	△	△	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	E	□	△	△	◇	▲	◇	◇	◇	◇	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
	L	○	△	△	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇
(4)鋁(5052)	S	△	□	□	△	◇	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	E	●	□	□	△	△	●	●	●	●	▲	▲	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	L	◇	○	○	△	△	▲	▲	▲	▲	◇	◇	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	◇	◇
(5)鎘	S	□	□	□	○	△	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	E	□	□	□	△	△	◇	◇	◇	◇	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
	L	○	○	○	△	△	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇
(6)軟鋼	S	□	□	□	□	△	△	▲	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	E	□	○	○	□	□	△	△	◇	◇	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
	L	○	○	○	○	○	△	△	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇
(7)鍛鋼	S	□	□	□	□	□	△	△	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	E	□	○	○	□	□	△	△	◇	◇	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
	L	○	○	○	○	○	△	△	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇
(8)低合金鋼	S	□	□	□	□	□	□	□	△	□	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	E	□	○	○	□	□	○	○	△	○	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
	L	○	○	○	○	○	○	○	△	○	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇
(9)鑄鐵	S	□	□	□	□	□	△	△	●	△	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	E	□	○	○	□	□	○	○	◇	△	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
	L	○	○	○	○	○	○	○	◇	△	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇

圖例說明

□　在接觸處腐蝕量頗為減少
○　腐蝕量略減
△　流電效應相當微量
◇　腐蝕略增
▲　腐蝕中等
●　腐蝕嚴重
S　曝露面積較偶合者為小
E　曝露面積較偶合者約相等
L　曝露面積較偶合者約為大

表五　（續）

偶合之金屬 / 所考慮之金屬		(1)鎂合金	(2)鋅	(3)鍍鋅鋼	(4)鋁（五〇五二）	(5)鎘	(6)軟鋼	(7)鍛鋼	(8)低合金鋼	(9)鑄鐵	(10)(甲)—(乙)%鉻鋼	(11)(甲)—(乙)%鉻鋼	(12)沃斯田鉻鎳	(13)不鏽鋼	(14)鉛	(15)錳青銅	(16)鋁鎳合金	(17)海軍黃銅	(18)鋁青銅	(19)銅	(20)矽青銅	(21)七〇—三〇銅鎳
(10)12–14%鉻鋼	SEL	□□○	□□○	□□○	□□○	□□○	□□○	□□○	□□○	□□○	△△△	●◇◇	▲◇◇	●▲◇	●▲◇	●▲◇	●▲◇	●▲◇	●▲◇	●▲◇	●▲◇	●▲◇
(11)16–18%鉻鋼	SEL	□□○	□□○	□□○	□□○	□□○	□□○	□□○	□□○	□□○	□○○	△△△	◇△△	●▲◇	●▲◇	●▲◇	●▲◇	●▲◇	●▲◇	●▲◇	●▲◇	●▲◇
(12)沃斯田鉻鎳不鏽鋼	SEL	□□○	□□○	□□○	□□○	□□○	□□○	□□○	□□○	□□○	□□○	□□○	△△△	□○○	●▲◇	●▲◇	●▲◇	●▲◇	●▲◇	●▲◇	△△△	●▲◇
(13)沃斯田鉻鎳鉬不鏽鋼	SEL	□□○	□□○	□□○	□□○	□□○	□□○	□□○	□□○	□□○	□□○	□□○	△△△	□○○	●▲◇	●▲◇	●▲◇	●▲◇	●▲◇	●▲◇	□○△	△△△
(14)鉛	SEL	□□○	□□○	□□○	□□○	□□○	□□○	□□○	□□○	□□○	◇△△	◇△△	△△△	◇△△	◇△△	◇△△	◇△△	◇△△	◇△△	◇△△	◇△△	◇△△
(15)錳青銅	SEL	□□○	□□○	□□○	□□○	□□○	□□○	□□○	□□○	□□○	▲◇△	●◇△	▲◇△	△△△	●▲◇	●▲◇	●▲◇	●▲◇	●▲◇	●▲◇	●▲◇	●▲◇
(16)鋁鎳合金13% Cr 6.5% Fe Bal. Ni)	SEL	□□○	□□○	□□○	□□○	□□○	□□○	□□○	□□○	□□○	□○△	□○△	△△△	□○△	●◇△	●△△	●◇△	●◇△	●◇△	△△△	●◇△	●◇△
(17)海軍黃銅	SEL	□□○	□□○	□□○	□□○	□□○	□□○	□□○	□□○	□□○	□○△	●◇△	▲◇△	□○○	△△◇	□○○	●◇△	●△△	●◇◇	□△△	●◇◇	●◇◇
(18)鋁青銅	SEL	□□○	□□○	□□○	□□○	□□○	□□○	□□○	□□○	□□○	□○○	●◇△	▲△△	□○○	▲◇△	△△△	●◇△	●◇△	●◇△	△△△	●◇△	●◇△
(19)銅	SEL	□□○	□□○	□□○	□□○	□□○	□□○	□□○	□□○	□□○	□○○	▲△△	▲△△	□○○	□○○	□△○	△△△	△△△	●◇△	□○○	●◇△	●◇△
(20)矽青銅	SEL	□□○	□□○	□□○	□□○	□□○	□□○	□□○	□□○	□□○	□○○	▲△△	▲△△	□○○	△△○	□○○	△△△	△△△	●◇△	□○○	●◇△	●◇△
(21)70–30銅鎳	SEL	□□○	□□○	□□○	□□○	□□○	□□○	□□○	□□○	□□○	□○○	□○○	△△△	□○○	□○○	□○○	□○○	□○○	△△△	□○○	●◇△	●◇△

期之點蝕並不重要，因此不需去除鋼板樁上之銹皮。然而當鋼材上塗裝保護塗料時，則清除銹皮將可使塗料易於附著鋼材表面。

3.迷失電流腐蝕：

由海洋結構物周界外電源所傳來之直流電，若穿過結構體再進入電解質，則會造成樁基加速損壞。由不適當的地下電焊機船舶服務系統、附近的陰極防蝕系統和電車系統等所傳遞之直流電會對港灣地區、地下結構物造成迷失電流腐蝕之損害。一安培的直流電經由結構物至海水，每年將可移走約20磅之鋼材，而交流電之迷失電流不太重要。

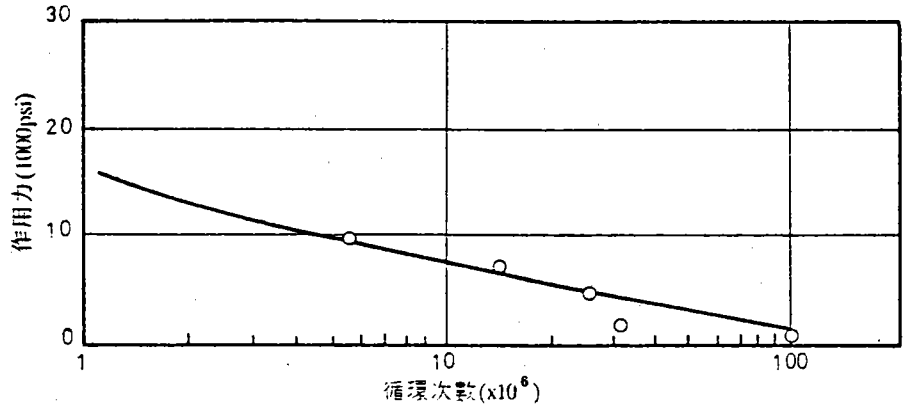
基本上，迷失直流電可在其來源處將之除去，或在結構物安裝適當的接地線至迷失電源，而使迷失電流有一負的迴路。

4.腐蝕疲勞：

應力與腐蝕共同作用下，金屬加速破壞之現象稱爲龜裂，當應力爲反覆或周期性的作用，則所導致之破壞稱爲腐蝕疲勞。

另一種定義腐蝕疲勞的方法，是由一腐蝕環境減少金屬之空氣疲勞阻力。各種因素與應力有關如應力作用方式、大小、延時及頻率，另外環境因素亦影響腐蝕，而使腐蝕疲勞過程趨於複雜性。基本上腐蝕疲勞之結果爲減少空氣疲勞之極限值，一般以作用應力及反覆次數S-N由線表示，圖19爲軟鋼在海水中腐蝕疲勞曲線。在設計海洋結構物時，必須小心地考慮預期的疲勞負荷，採取適當防護措施，避免未來發生問題。

不論作用之靜應力或殘留之內應力，其與腐蝕合成作用所造成之龜裂稱之爲應力腐蝕龜裂，對一般使用在海洋結構物之鋼和低合金鋼發生應力腐蝕龜裂並非一嚴重的問題，大於180,000psi的超高强度鋼在氯



圖十九　軟鋼在海水中以1400rpm轉速旋轉之腐蝕疲勞(18)

化物環境下，顯示易受應力腐蝕龜裂之影響。在有硫化氫情況下（並非一般海水中之成份，爲海床因缺氧情況下，硫酸還原菌所產生的），應力腐蝕龜裂在高强度鋼顯著增加。然而一般代表性的樁基結構物，根據現場經驗及試驗室之資料提供相當徹底的實証，此類鋼材在氯化物環境下不會發生應力腐蝕龜裂現象。

十、土壤中之腐蝕

在海洋結構物，通常樁基及斜樁打入海床中而鋼板樁結構物打入海床下，靠船側可能需挖土而陸側爲背填土，一般認爲在土壤環境下腐蝕不嚴重，因而在泥線下或背填土側之樁基並未作防蝕保護措施，然並非都是如此，一些決定土壤中鋼材發生腐蝕之重要的影響因素討論如下：

1.土壤之結構

土壤之結構爲多孔性或均勻性，是其腐蝕性的重要物理物質。在微細且均勻組織粒狀的土壤下，腐蝕性較粗糙的各種級配混合之土壤情況爲低。後者由於透水性之差異，因此會因不同的環境條件，導致在結構物上形成局部之陰極與陽極區而造成腐蝕。通氣良好的鬆土較通氣不良之黏土不易發生腐蝕。

2.pH值

酸性高之土壤具腐蝕性，輕微之酸性土壤受未受擾動，則未必會發生腐蝕，若背填土含有煤渣，則硫酸會濾出而使周圍的土壤變爲酸性和腐蝕性，且煤渣含有碳，對鋼材而言爲陰極，因此當直接與鋼材接觸時，會造成結構物發生嚴重的流電腐蝕，背填土中含煤渣，經過一段時間可能將具酸性的硫酸及碳濾出因而降低酸性土壤之風險。

高鹼性土壤亦會發生腐蝕，因爲他們經常含大量的溶解鹽而造成土壤具有低電阻，低電阻高鹼性土壤環境或高電阻之土壤混合區，應考慮可能發生腐蝕。

3.有機物

砂土含有機物較少，所以較含有機物多的淤泥和沃土之情況，較不易發生腐蝕。

4.細菌含量

具有厭氧菌之土壤（例如黏土）容易發生腐蝕，此類細菌在含有

硫化物和缺氧的環境下發展，因將硫酸鹽變爲硫化物的變化過程而加速鋼材之腐蝕，接著與腐蝕的鋼材之陰極的氫氣發生作用。這種由鋼結構物陰極表面移走保護性之極化氫膜之自然過程，加速了鋼材局部陽極表面的腐蝕進行。

5.電阻

電阻本身並非土壤腐蝕性的眞正指標，除了非常低電阻土壤（小於 1000 Ω cm）供給容易的電解線路，使電流可自結構物上之局部陽極區流向局部陰極區，在中度電阻（5000～10000 Ω cm）或高電阻（10000～25000 Ω cm）之土壤，由於與結構物之埋設或浸水區不同土壤接觸間電阻之改變，因此發生嚴重的腐蝕現象。土壤電阻之變化範圍較之所量測的絕對值，爲腐蝕性較準確的指標。

通常潤濕土壤之腐蝕性較乾燥土壤爲大，某些非常潮濕的土壤且降雨量相當强之處不具腐蝕性，不含溶解鹽乾燥潔淨的砂亦不具腐蝕性。通常填築由含鹽份的水域所挖的土質，將使其電阻較低且具腐蝕性，直到土壤中的鹽份被沖走。

6.泥線區之腐蝕

在基樁結構物之泥線區，位於海床土壤與海水交界面區域，由於在此區域，結構物周界環境由水變爲土壤之突變結果，因此可能在此區域發生一次重要的加速腐蝕區。若流速會攪動海床質而使結構物發生沖刷，則造成沖蝕現象。通常在泥線下，腐蝕並不嚴重，大致比海中區之平均腐蝕速率一半爲小。然而受海洋放流下水道造成嚴重污染或含厭氧菌之泥線區，則可能發生嚴重之腐蝕。

美國標準局曾對鋼管樁在土壤中之腐蝕進行過研究，其結論爲未擾動之土壤下，受錘擊之鋼管樁之腐蝕情況可加予忽略。

十一、結　　論

1. 影響海洋鋼結構物腐蝕之環境因素有海洋暴露區域、波浪沖蝕、水溫、含氧量、pH值、含鹽量、海流流速、海生物污著、污染、風、降雨、相對濕度、日照、海鹽或有害物之潑濺等。
2. 在材料本身上，改善鋼材之腐蝕速率可在合金之成份上考慮，現已有許多耐候鋼和耐海水鋼材產品出現問市。
3. 影響鋼材腐蝕速率之因素亦有不同金屬之偶合、銹皮破壞、未加塗

裝保護、迷失電流、腐蝕疲勞及土壤中腐蝕等。

4. 在土壤中，鋼材之腐蝕因素爲土壤本身結構與通氣性、pH值、含有機物及細菌量、電阻、泥線區域或海床質受沖蝕等。

5. 影響鋼材之腐蝕因素應隨時徹底地詳加調查，分析其原因，才可提供適切之腐蝕控制對策，並可提供選用材料之依據。

參考文獻

1. Uhlig,H.H.,Corrosion and Corrosion Control,John Wiley and Sons,Inc.,New York,1963.

2. Speller,F.N.,Corrosion,Causes and Prevention,Mc Graw-Hill, Inc.,New York,1951.

3. La Que, F.L. and Copson, H.R., Corrosion Resistance of Metals and Alloys, Rheinhold Publishing Corporation,New York, k1963.

4. Schrier,L.L.,Editor;Corrosion,Volumes I and II,John Wiley and Sons,Inc.,London,1963.

5. Tomashov, N.D., Theory of Corrosion and Protection of Metals, translated by Tytell, B.H., Gold,L,and Preiser,H.S., The MacMiilan Company,New York,1966.

6. Uhlig, H.H., The Corrosion Handbook, pp.387-388(La Que), John Wiley and Sons.Inc., New York,1948.

7. Manual of Cathodic Protection for Inactive Ships and Craft of the U.S.Navy, Nav-Ships No.0919-000-4010,June 1968.

8. Watkins, Laverne L., "Corrosion and Protection of Steel Piling in Seawater", U.S.Army Corps of Engineers,Technical Memorandum No.27,May 1969.

9. Edwards, Wiilard, E., "Marine Corrosion: Its Cause and Cure", Proceedings of the Eighth Annual Appalachian Underground Short Course, Technical Bulletin No.69, West Virginia University Bulletin,October 1963.

10. Ross, C.W., "Experimental Steel Pile Groins, Paim Beach, Florida ", U.S.Army Corps of Engineers,Beach Erosion Board, Memorandum No.1948.

11. U.S.Army Corps of Engineers."Corrosion Control", TM-5-811-4, formerly EM1110-1-84, August 1962.

12. Fink, F.W., "Corrosion of Metals in Seawater", U.S.Department of the Interior, Office of Saline Water, Research and Development Progress Report,No.46,1960.

13. Copson, H.R., : Effects of Velocity on Corrosion by Water", Industrial and Engineering Chemistry, Volume 44,p.1745,1952.

14. Clapp,William F.,po.433,op.cit.(6)

15. Murooka, J.S., "The Effects of fouling by Deep-Ocean Marine Organism", Undersea Technology,pp.22-24,May 1963.
16. Snyder, R.M.and Huil, S., "Parametric Variables Affecting Corrosion", Geo-Marine Technology,pp.17-24,July 1965.
17. "Corrosion Prevention and Control",NAVDOCKS,MO-306, June 1964.
18. Schmitt.R.J.and Pheips, E.H., "Corrosion Performance of Constructional Steels in Marine Applications", talk prepared for presentarion at the First Annual Offshore Technology Conference,Houston.Texas,May 1969.
19. Schwerdtfeger, W.J.and Romanoff, Melvin, "NBS Papers on Underground Corrosion of Steel Piling 1962-1971",National Bureau lof Standards Monograph 127,March 1972.
20. 岡本剛，井上勝也〝腐食と防食〞P31大日本國書（1977）。
21. 增田一廣等，鐵と鋼72（1986）$ 430
22. The Corrosion Handbook Edited by H.H.Uhlig John Witey& Sons New York 1948,9433
23. Pope D.H.etal"Microbiologically influenced Corrosion: a state of the art review" MTI Publication No.13,June 1984.

叁、海洋金屬結構物腐蝕控制概論

林維明*

一、前　　言

濱海的護岸、或港灣的碼頭、船塢、防波堤、外海平台及其他海洋結構物之規劃設計與施工，通常都期望能夠以最少維護量而達到結構物所需的使用年限，且所需的投資經費包括初期施工及爾後之維護費爲最低。因此除必須知道結構物施工位置之環境特性外、亦需清楚結構材料的物性與化性和在該環境下之材料行爲。

在海洋結構物中，管樁材料的選擇與設計特別的重要。因爲不論使用木材、混凝土或鋼料都容易受到海洋環境的物理、化學及生物的侵害，如表1所示。故必須採取保護措施，防止管樁受到過度的損壞及提早破壞。

鋼管樁在海洋結構物之施工具有特別的優點，其可以迅速地搬運及使用標準的起重和吊裝設備搬運安裝，而且施工較爲便捷。然而早期使用此類鋼管樁，很少特別指定作防蝕處理，因而常因銹蝕問題必須提早作修復或更換工作。隨著科技的進步，在海洋結構物規劃與設計期間所需注意的因素頗多，如使用壽命、結構物之形態、現有及未來的環境條件、檢查與維護之程度等。詳細考慮這些因素，則可經濟地建造一個結構物使其有適當的使用年限，而能達到所需的功能。

腐蝕可簡單的定義爲金屬與其環境反應而損壞的現象，其包括金屬單位面積之腐蝕速率、腐蝕程度與金屬厚度之關係及腐蝕形態（均勻、局部、粒界和龜裂）等重要的觀念。其中腐蝕速率爲最重要的參數，可決定金屬結構物之使用壽命。當然腐蝕速率是否能在容許範圍內，係依許多變數例如金屬厚度、金屬結構之功能及預期的使用壽命和環境作用下所產生腐蝕生成物結果等而定。

由於腐蝕引起惡化爲決定鋼材使用壽命之一大因素，因此必須評估鋼材的耐蝕性。其所含蓋的範圍自微量腐蝕不需作任何防蝕到已經

*省交通處港灣技術研究所港工材料組組長

發生嚴重腐蝕。現在有許多已知的方法可以延緩或消除惡化。除了在某些使用條件受限或腐蝕不顯著的情況下，不需作腐蝕控制措施外，其餘腐蝕環境下，爲達到所需之使用壽命之經濟方法，可能在設計時就要配合採取防蝕措施。因而，若在規劃階段決定需作腐蝕控制、則必須提供腐蝕控制方法。本文即介紹如何評估腐蝕控制之需要與否及控制方法。

二、腐蝕控制的需要性

1.不需作腐蝕控制之情況

通常不需作腐蝕控制的海洋鋼結構物如下：

①暫時性使用：在海洋結構物中有許多屬於暫時性安裝或僅作爲臨時性之支撐。在這些情況可能使用時間小於 5 年，或腐蝕速率約爲10密度／年（mpy）或隨機之點蝕約爲20mpy，並不至於危害結構上之安全，此時僅需使用碳鋼，而不需作防蝕措施。

②鋼模：有時在現場澆注鋼管混凝土時，需安裝鋼模、混凝土養生後就可拆除這種輕質之鋼模，故不需作防蝕控制。

③腐蝕輕的環境：在未受污染的淡水地點例如湖泊和內陸河川，通常鋼結構物僅承受輕微的腐蝕。由於腐蝕之控制因素如溶解氧含量在海水及淡水中大約相同，所以兩者之平均腐蝕速率並沒有顯著的差異。但通常淡水之電阻較高，所以發生點蝕的速率較低。淡水腐蝕電池此爲微小電池（microcell）而非巨大電池，因此其腐蝕性能爲均勻細薄型，而非初發的局部點蝕，在此情況下腐蝕速率可能爲5mpy（mil／yr；1mil＝1／1000inch）。因此只要有適當的設計考慮，並不需作防蝕措施亦可確保有長期的使用壽命。

④可移動的結構物：鋼結構物例如可移動式碼頭、浮箱和浮筒都易於拆除作定期檢修，可使用補修或更換鋼鐵構件的方式，等都比提供防蝕控制措施更爲經濟。

2.需要做防蝕控制之情況如下：

①永久性使用：許多海洋結構物都期望能長時間使用，通常最少之使用年限爲20年。也有因移動，更換之困難，而要求需有長達50年以上的壽命。由於通貨膨脹之關係，因腐蝕所造成結構物損壞而追使服務中斷或更新所需之維修費，將比原來的費用高出甚多

。由於長時間服務需求，經常都要在工程開始時採用防蝕處理，以減少維修工作。

②功能與安全性之損害：長時間使用之結構物必須維持結構物之完整性。因此爲了原設計的功能有足夠之安全性，通常在設計上需考慮之安全因素包括因補償材料之缺陷、疲勞龜裂、不可預測的瞬間負荷過高、人工技術欠缺和忽視眞正的操作條件等。腐蝕經常改變這些設計安全因素並增加結構物損壞之風險和對操作人員之危險性。因此在計劃使用的年限內，上述安全係數可能出現危險，故必須加强防止腐蝕工作。

③過多的維護：通常提供防蝕是爲了避免過多昂貴維護程序及由於停修時間之延長而喪失服務和減少收入之情況，如果能夠在開始就安裝陰極防蝕或完整的防蝕設施，則爾後的維護費將可降低。然而是否安裝此種防腐蝕之需要及時間，可由安裝費與爾後的維護及停修費用來比較權衡，且定期檢查將可減少腐蝕造成停修的頻率。

④外觀與可居住性：通常在水面上的海洋結構物之防蝕控制係考慮外觀與居住性的目的，而非經濟觀點。

三、腐蝕控制方法

使用金屬爲施工材料，腐蝕防治可視爲腐蝕電化學反應之控制。因此在結構物或其組件的預期使用壽命內，期望金屬的物理和力學性質都能保持。有關「預期使用壽命」必須注意是無法準確估計的，雖然設計者可根據某些現有資料來預估結構使用壽命。例如說三十年，但可能提早報廢或可延長使用。很顯然地假使在經費上不受限制、要設計一結構物至少能維持30年並不難，但不可能設計剛好維持30年。因此

表1　在海岸鋼結構物腐蝕環境影響因素及機理

性質	影響因素	破壞機理
物理	潮　汐	溫度循環
	風	疲勞和超應力
	流	漂砂沖蝕
	波　浪	疲勞和超應力
	水	超應力（凍融循環）
	船體碰撞	超應力
化學	含鹽份水和海水	腐　蝕
	污染水	腐蝕及直接侵襲
	火　災	高溫應力
生物	有機物污著	化學生成物
	好氧菌	化學生成物
	厭氧菌	化學生成物
	海洋鑽孔蟲	攝取（Ingestion）

雖然設計不足可能造成災難，而設計上過度保守則造成不必要的浪費。因此對防蝕工程師而言，困難的工作爲避免走此兩極端。而最重要的考慮因素是環境污染影響腐蝕生成物之變化，故必須詳加考慮耐腐蝕材料之應用。

因爲腐蝕包含金屬與其環境之反應，故防蝕可選擇特殊之金屬、合金或使用非金屬材料，如玻璃加强聚合物。另外，改變鋼材組成物、清除有害的雜質、降低溫度、流速或增加腐蝕抑制劑等以減少環境的侵略性，也可減輕腐蝕的程度。

在許多結構物及其構件，選擇金屬或合金大都根據其工程性質，但其耐蝕性很少被重視。另一極端情形，可能是太重視防蝕，然而也不能忽略工程性質。通常有現貨是最方便的，但是指定特殊合金然後去找尋是否有工廠可以製造，可能需等待一年或一年以上時間才能交貨，則不見得是適當的，同時亦需考慮裝配之技術與費用。而在某些情況下，一種昂貴的合金可能較便宜者更受愛用，由於其具有更佳的耐蝕能力。例如含 18％鉻、 8 ％鎳之沃斯田不銹鋼通常較廉價的含 17％鉻的肥粒鐵不銹鋼受愛用，因爲後者較前者難焊接，雖然兩者耐腐蝕性可能差異不大。費用必須加以考慮，但並不能肯定價廉的金屬或合金在長期使用爲最便宜的。鉑或鈦合金在某些情況上應用，除高度耐蝕性外，對買主亦爲一明智之投資。然而軟鋼具有優良的力學性質，易於製作成各種形狀，在大結構物上常使用。而其不良之耐蝕性，可用防護塗裝，陰極防蝕或調整環境條件等方式而加以防治改善。

1.實際腐蝕控制方法之歸類

Vernon〔1〕曾提出防蝕法可歸納爲修正設計、環境、金屬及塗裝四大類。在不同之環境下選用適當之方法保護金屬。

表 2 說明亦較完整的腐蝕控制法概要，同時包括腐蝕試驗與偵測和監督及檢查。因執行這些工作，可對材料使用、塗裝及施工程序等提供最有效的保護。且沒有一種特殊方法可適用於各種不同之環境，例如不銹鋼可能使用於高溫氧化環境或流通溫度之水環境下，而陰極防蝕可能使用於各種水環境包括淡水至濕黏土。

表 2 說明腐蝕控制之廣大範圍，且强調在結構物之設計上應避免的一些要點，如同應用特殊防蝕法一樣的重要。同時很明顯的從方法 1 可知，在決定選用材料或特殊防蝕法所應考慮的許多因素，已超出

金屬腐蝕研究範圍外。

腐蝕工程師公認爲在結構物設計時，必須適當的考慮防蝕控制。而 shreir[2]曾一再地建議設計工程師決定選用材料及保護方法時，必須對腐蝕有所認知。Hoar 報告[3]中亦强調在設計階段適當的考慮腐蝕危險，將可使腐蝕破壞之事件大量地減少。然而設計工程師都太專心於結構物的穩定及適當的功能，而不太注意採用防蝕措施。當受環境、應力等作用使結構物上發生腐蝕現象時，腐蝕工程師就必須應用其知識經驗，使用防蝕措施來有效地控制腐蝕。雖然一些防蝕法，如陰極防蝕、控制及改變環境條件、塗裝等，都可在結構物設計及施工完成後再加以補作，但是若能在設計時先加以考慮，則將較爲理想。

現在市面上有各種防蝕材料，且由表 2 可知只選擇某一特定的方法控制腐蝕是相當困難的工作。而很少有一種特殊防蝕法具有許多優點，當考慮所有的因素，其優點最多的即爲唯一的解答。經常最後的決定係根據保護之有效性和執行之費用兩者加以權衡。例如熱交換器若使用海水爲冷卻劑，則有鋁合金、黃銅及鈦合金等材料可供應用，其中後者對高度污染的海水可能是最佳的選擇，但至今價格仍相當嚇人。另外，在某些應用上（海水之脫鹽工作），鈦合金可能與銅鎳合金具有相當的耐蝕能力。

新材料的持續發展，導致在腐蝕控制之材料選擇上更具彈性，而現有可應用之材料，已由材料挑選者之概略資料[4]中加以評定。由於此概括資料隨時在更新，因此變得相當複雜。其中，塑膠爲各種應用上之替代材料，最新之應用爲使用玻璃加强塑膠替代金屬在氣墊船殼上之施工。海洋結構物若承受非常高速潑濺之腐蝕行爲，很少金屬能忍受。而使用玻璃加强塑膠，其具有高强度、耐衝擊、高硬度、質輕及耐腐蝕的最佳組合特性。

現有許多在各種環境下之耐蝕金屬及合金資料，以及有關之腐蝕控制方法均由參閱腐蝕工程手冊[5]。而腐蝕指南[6]有超過 500種耐蝕金屬及合金材料，同時美國防蝕工程師協會的腐蝕資料[7]及 Dechema材料表[8]等都是很有價值的參考文獻。然而在這麼多資料中，若所處之環境條件未能找到相符者，則應進行腐蝕試驗計劃。因此在腐蝕控制方面，爲確保合金能符合規範，特別是在不良處理導致發生晶體介面破壞或應力腐蝕龜裂現象時，腐蝕試驗是相當重要的工作。而控制環境

條件，例如含氧量、酸鹼度及添加腐蝕抑制劑等都是相當的重要。此可由有效地執行監視環境條件或金屬之腐蝕速率及腐蝕電位等之變化而加以確保。

油漆爲腐蝕控制最重要的方法之一，而眾所周知，許多破壞情況是由於金屬之表面處理不當和油漆系統之應用不慎所致。施工常在不適當的環境下由不熟練的工人執行，而引起塗裝失敗。在油漆系統能合乎施工規範前，需進行許多腐蝕試驗來加以驗證。但是在現場應用時，必須有效地監工和檢查，才能得到良好的結果。同樣地在工廠所進行的塗裝作業，如噴漆、熱浸鍍或電鍍塗裝亦應如是。

表2　腐蝕控制方法概要

1. 材料之選擇

選擇金屬或合金（或非金屬材料）以供一特殊環境條件（如優勢的溫度或流速等）之應用，需考慮結構物的力學及物理性質，現可供應性，裝配方法和總費用等，決定是否使用昂貴的耐腐蝕性合金或採用價廉金屬而需防蝕保護及定期維護者。

2. 設計

若金屬必須保護，則應考慮設計應用金屬或非金屬包覆，或應用陽極或陰極保護。設計上應詳加考慮避結構體幾何形狀容易發生腐蝕之情況例如：

(a) 外形容易使飛塵，濕氣或水駐留。
(b) 有罅隙易受沉積物填塞或能使在金屬表面形成堆積之處。
(c) 有設計會導致沖蝕或孔蝕傷害之情形。
(d) 設計而致人不易接近之處，將無法進行維修工作，例如油漆維護時不便觸及之處。
(e) 設計導致金屬內有異類（例如溫度處理上之差異）或環境上之差異。

3. 與其他材料之接觸

避免金屬與金屬或與非金屬的材料之接觸，而易發生腐蝕之情況，例如：

(a) 兩金屬耦合其中較鈍態者（如銅）具大面積與較小面積而活性者（如鐵、鋅或鋁）接觸。
(b) 金屬與具吸水性材料能持續保持潤濕狀況者接觸，或與去氧之鈍態金屬接觸情況。
(c) 與會發出腐蝕氣體（例如一些木材或塑膠類）之物質接觸或封裝在一受限之空間中。

4. 力學因素

避免應力（大小及型態）與環境條件會導致應力腐蝕龜裂、腐蝕疲勞或磨損腐蝕等情況之發生。

(a) 對應力腐蝕龜裂易發生的環境下，避免使用較敏感的合金，若無法確保，則外力或內應力需保持爲極小值。
(b) 對在一腐蝕環境下之金屬遭受疲勞之情況，必須確保金屬由耐蝕塗裝加以適當的保護。
(c) 導致金屬表面有壓力情況者如鎚打（ peening ）、滲碳（ carburing ）或氮化（ nitriding ）等經常對防制腐蝕疲勞及磨損腐蝕有益。

5. 塗裝

若金屬在所考慮之環境下之耐蝕性不良，則應準備設計適當的保護塗裝，例如：

(a) 金屬反應生成物，例如在鋁材上之陽極氧化膜，在鋼材上之磷酸鹽塗裝，然後油漆或注入油脂。在輕金屬和合金（鋅、鋁、鎘、鎂）等上塗裝鉻酸鹽膜。
(b) 金屬塗裝形成一保護屏障（鎳、鉻）和使用犧牲作用保護底材（例如鋼材上有鋅、鋁或鎘等材料）。
(c) 無機塗料例如亮漆、玻璃和陶瓷。
(d) 有機塗料例如油漆、塑膠和油脂。

注意在使用塗料前，底質應作適當的前處理。

6. 環境

為使環境較缺侵略性，可清除容易造成腐蝕之要素，如降低溫度及流速或防制水及濕氣易於侵入之處。

(a) 對大氣腐蝕，降低空氣之濕度、清除固體，添加揮發性的腐蝕抑制劑（對鋼材而言）。

(b) 對水中腐蝕可清除溶解氧，增加 pH 值（對鋼材）及添加抑制劑。對溶液中之鈍態金屬不含其他氧化物。出現溶解氧對所有金屬表面可保持為鈍態。而在某些系統可增加溶液之流速而達到此種效果。

7. 界面的電位

(a) 可利用犧牲陽極或加强電流，使界面之電位保持相當地負值而得以陰極保護金屬。

(b) 使界面之電位保持相當地正值造成鈍態而保護金屬（限制金屬在所考慮的環境下為鈍態）。

8. 腐蝕試驗與偵測

(a) 一金屬或合金在特殊環境下製造（新配方之合金或新環境下），現沒有其行為之資料，則必須進行腐蝕試驗。

(b) 偵測環境組成，金屬腐蝕速率、界面電位等以確保防蝕效果。

9. 監工及檢查

確保在現場或工廠所進行之塗裝之應用，需依規範進行適當的監工和檢查。

最後必須指出的是雖然一特殊防蝕法對所考慮的結構物可能相當有效，但在其他地方，可能會有意料不到的腐蝕風險。最佳的範例是使用陰極防蝕其迷失電流將會導致鄰近未保護之結構物或埋在混凝土中之鋼筋發生腐蝕現象。若陰極防蝕係使用高强度鋼螺栓固定時，則亦可能導致氫氣之吸收和氫脆現象。

2.基本的分類

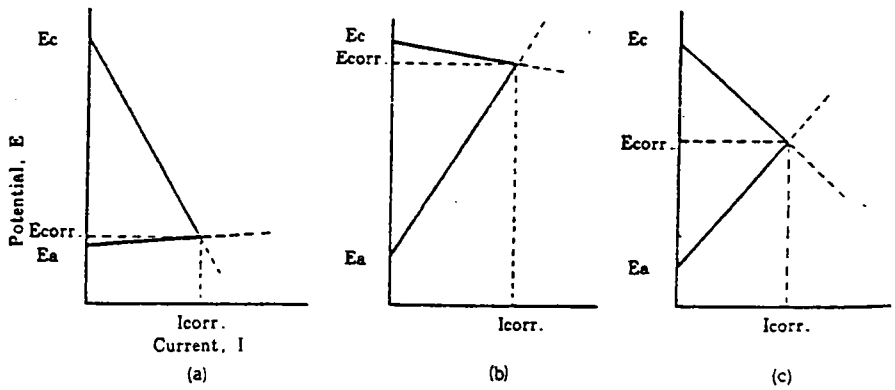
任何腐蝕控制之歸類必須根據腐蝕之電化學原理，此可依據 Evans 圖（圖 1）(5)加以說明

(1)腐蝕反應之熱力學降低。

(2)陰極反應極化之增加（陰極控制）。

(3)陽極反應極化之增加（陽極控制）。

(4)在陽極與陰極間阻抗之增加（電阻控制）。



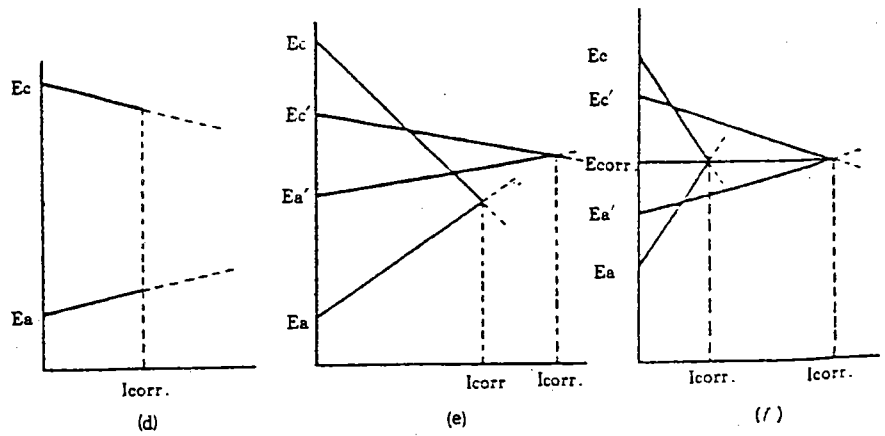


圖 1 Evan圖說明(a)陰極控制(b)陽極控制(c)混合控制(d)電阻控制(e)腐蝕反應具較高之熱力學趨勢者可能得到較低之腐蝕速率(f)腐蝕電位無法表明腐蝕速率(*)

Tomashov(9)曾根據腐蝕之電化學機理製成詳細之控制計劃如表 3 所示，然而雖然較表 2 更爲基本，但仍有一些限制。係因爲並非經常可準確地定義控制因素，且通常包含的控制因素超過一種以上。故由一水溶液中去除溶解氧（部份或全部），降低反應的熱動力，同時也增加陰極反應的極化，兩者都將助成腐蝕速率之降低，且後者影響較爲顯著。

塗裝主要之功能爲當作屏障，將底層的金屬與外界環境隔離，且在一些情況下，例如在鋼材上有一不透水的持續透明的琺瑯，可視爲熱動力控制，而一厚層瀝青塗裝之保護行爲也如同透明之琺瑯。通常油漆塗裝、氧氣和水可滲透，而在抑制的底漆（紅丹、鋅鉻酸鹽）情況下，陽極控制將很顯著。而相反的使用含鋅量多的底漆，將對底質提供陰極保護。

Tomashov(9)認爲使用多種防蝕法，可使腐蝕控制達到最大的效果。例如：鉻與鐵合金產生一鈍態保護膜，此鈍態膜可由增加溶液中之氧化還原（redox）電位、或與鉑（pt）、鈀（pd）金屬合金、或由外電源之電動勢而增加電位等而使之提高。然而沒有理由說明不銹鋼不需要陰極防蝕，雖然此現象有點矛盾，仍有時需要陰極防蝕，特別是當與軟鋼接觸時。

四、結　　論

(1)選擇一特定的腐蝕控制絕非簡單事，必須在最後採取前考慮許多

表 3　腐蝕控制較基本之分類(5)

分類原理	所包含的系統部份	腐蝕控制法	範例
(a)增加系統的熱動力學穩定	金屬	・與熱力較穩定的金屬合金	・在銅中加入金或在鎳中加入銅
	水環境	・降低溶液中之氧化還原（redox）電位，即降低陰極平衡電位$E_{eq.,c}$之數據 ・增加M^{n+}/M平衡之電位，即增加陽極平衡電位$E_{eq.,a}$數據	・由提昇 pH 值，清除溶解氣或其他氣化類而降低a_{H^+}值 ・由溶液中去除合成物（例如CN^-離子）增加$a_{M^{n+}}$
	氣態環境	・清除使金屬不穩定的氧氣或其他氧化氣體	使用惰性大氣（氫、氮、氦）或眞空
	金屬表面	・使用熱力學穩定金屬連續膜塗裝	在銅金屬上塗裝金金屬
(b)增加陰極控制	金屬	減少陰極反應之運動學	・改變兩金屬連結之陰極金屬特性 ・鍍陰極金屬（鐵鍍鋅而與鋁接觸） ・使用油漆塗裝 ・減少陰極金屬之面積
		清除陰極不純物，確保陰極相不沈澱	・從鋅、鋁、鎂中清除重金屬不純物（使用爲犧牲陽極或在乾電池中用鋅情況）。
		增加陰極之過電位	・鋅之混合物；鎂與錳合金
	環境	減少陰極反應之運動學	・減少氫氣之活性a_{H_2}，氧氣或氧化物之濃度，降低溫度、速度和淚動等。
		降低金屬之電位	使用犧牲陽極或加强電流作陰極防蝕保護，用塗裝犧牲保護例如在金屬上塗刷鋅，鋁或鎘等
		陰極抑制	・由於在水中 pH 值增加而形成鈣質沈積物。 ・在酸中填加毒氣（砷、銻、鉍）或有機的抑制劑。
(c)增加陽極控制	金屬	・合金使金屬增加鈍態化 ・合金得較保護的腐蝕生成物。 ・引入電化學活性陰極使易鈍態化。 ・增加外界電動勢之電位。	・將鐵與鉻及鎳合金。 ・在鋼材上填加低濃度的銅、鉻、鎳。 ・加鉑，鈀及其他貴重金屬於鈦，鉻及不銹鋼中。 ・鋼材，不銹鋼與鈦之陽極防蝕
	環境	・增加溶液之氧化還原電位。	填加O_2，HNO_3或其他氧化類於還原酸中而使不銹鋼鈍態化。
		・填加陰極抑制劑。	・填加鉻酸鹽，硝酸鹽及安息酸鹽於中性溶液與鐵接觸。 ・金屬之抑制底漆如紅丹，鉻酸鋅及磷酸鋅。
	表面	・金屬塗裝可即時變爲鈍態。 ・表面處理使易於形成鈍化膜。	・鉻金屬塗裝於鐵金屬上。 ・用HNO_3磨光不銹鋼清除不鈍物。 ・鋁金屬用鉻酸鹽處理。
(d)電阻控制	表面	塗裝	・有機質塗裝增加陽極與陰極面積間之電位降（IR drop）
	環境	清除會增加電導度的水或電解質。	・設計上考慮使其易於排水；土壤中之水分易排出。

因素。特別是當所考慮的合金或環境之腐蝕條件沒有先例時，更要慎重從事。

(2)避免結構物上之設計特性助長腐蝕，此現象和安裝防蝕措施一樣的重要，這方面的腐蝕控制常受忽略。

(3)腐蝕試驗及偵測、監視與檢查都是腐蝕控制之必要的工作。

參考文獻

(1) Vernon, W.H.J., "Metallic Corrosion and Conservation" in the Conservation of Natural Resources,Institution of Civil Engineers,London 105-133(1957).

(2) Shreir,L.L.,British Corrosion 5.11.(1970).

(3) Hoar, T.P., Report of the Committee on Corrosion and Protection, DT.I.Published by H.M.S.O.London(1971).

(4) "Materials Selector"Material Engineering,74(1972).

(5) Shreir L.L.,Corrosion Vol.1 and Vol.2,2nd Edition Newnes- Butterworths,London 1976.

(6) Rabald E.,Corrosion Guide,2nd Edition,Elsevier Amsterdam (1968).

(7) "Corrosion Date Survey"National Association of Carrosion Engineers,Houston(1967).

(8) Rabald E.,Bretschneider,H.and Behrens, D.(editors) "Decherials Materials Tables"(1953-75) (in German).

(9) Tomashov.N.D.,Corrosion Science,1,77(1961).

肆、海水水質分析

吳信昇*

一、前　　言

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

二、調查方法與取樣地點

本研究調查時間從79年2月至80年1月止計一年時間，每月採水樣一次，於高低潮位時同時採水及量測。採水使用採水器從水面至海床每隔一公尺採100cc海水，回到實驗室內利用離子分析儀分析其$C1^-$及SO_4^{-2}含量，在現場也同時使用自動海水測定儀，測量每一公尺海水pH值、溶氧量、導電度及水溫等數據。取樣地點分別在基隆港東6號、西23號，台中港30號，高雄港63號、70號，花蓮港4號，蘇澳港7號等鋼板樁碼頭。

三、試驗結果與比較

各港水質分析均列於表4－1～表4－7。

1.各港平均pH值

各港差異不太大，年平均pH值一般介於8.0～8.2之間，而以花蓮港年平均值8.2較高，台中港30號碼頭及高雄港63號碼頭均爲8.0。

2.各港平均溶氧量

以蘇澳港7號碼頭平均5.4mg／l爲最高，因海洋環境污染少，故其

*港灣技術研究所助理

溶氧量高。以高雄港63號碼頭3.1mg／l爲最低，由表4－4看出其最低值常介於1.0mg／l左右，溶氧量極低，因高雄港爲一工業大港海水污染較爲嚴重，所以有效處理家庭污水排放，減少工廠廢水，及減少船舶給港池帶來之污染均可有效改善此一溶氧量之增加。

3.各港平均導電度

由表中各港平均在9500 μ mho之間，變化不大，若換算一般常用電阻則爲105 Ω cm。

4.各港平均水溫

因係港池內海水水深較淺，常隨季節變化而變化，差異不大。

5.各港氯離子含量

以蘇澳港7號碼頭18470ppm爲最高，而花蓮港4號碼頭17690ppm爲最低。氯離子含量愈高，對港灣鋼板樁之腐蝕威脅很大，所以在使用上應先考慮其海水性質再斟酌設計結構物。

6.各港平均硫酸根離子

以基隆港西23號碼頭其硫酸根離子含2438ppm爲最高，花蓮港4號碼頭其硫酸根離子含量2279ppm爲最低。

綜合上述以蘇澳港、基隆港其SO_4^{-2}、Cl^-等含量較高，海水水質較差，影響港灣鋼結構之腐蝕較爲嚴重，而花蓮港則較輕微。

表 4 － 1　基隆港東 6 號碼頭水質分析表

項　目	數　值	一　月	二　月	三　月	四　月	五　月	六　月	七　月	八　月	九　月	十　月	十一　月	十二　月	年平均值
pH　值	最高值	7.7	8.2	8.1	8.2	8.2	8.3	8.1	8.3	8.2	8.3	8.1	8.1	
	平均值	7.6	8.1	8.1	8.0	8.2	8.3	8.1	8.2	8.2	8.3	8.0	8.1	8.1
	最低值	7.4	7.9	7.9	7.8	8.0	8.2	8.0	8.1	8.1	8.2	8.0	8.0	
溶氧量	最高值	4.3	7.6	9.6	5.9	3.7	3.9	3.4	4.3	4.3	4.7	2.6	3.7	
	平均值	3.8	7.1	8.6	5.1	3.3	3.4	3.3	3.9	3.7	4.4	2.3	2.9	4.3
(mg/l)	最低值	3.5	6.7	8.0	4.6	2.9	3.1	2.8	3.6	3.3	4.2	2.0	2.1	
導電度	最高值	11,040	9,730	9,720	9,700	9,510	9,750	9,650	9,630	9,620	9,580	9,810	9,830	
	平均值	10,700	9,480	9,530	9,570	9,330	9,560	9,560	9,480	9,510	9,530	9,730	9,660	9,640
(μ mho)	最低值	9,900	8,750	8,990	9,420	8,990	9,200	9,450	9,280	9,290	9,390	9,580	9,480	
水　溫	最高值	17.4	18.0	17.5	22.7	26.5	27.5	28.1	26.1	25.9	25.2	21.7	20.2	
	平均值	17.4	17.7	16.7	22.4	26.2	26.6	27.6	25.7	25.7	25.1	21.4	20.1	22.7
(℃)	最低值	17.3	17.4	16.5	22.1	25.9	25.9	27.3	24.7	25.6	25.0	21.3	19.9	
Cl^-	最高值	19,480	18,240	19,990	20,850	18,880	19,440	20,260	19,280	19,100	19,380	20,080	17,800	
	平均值	19,020	17,400	18,740	19,660	18,180	18,310	19,000	18,420	18,720	17,890	18,780	17,280	18,450
(ppm)	最低值	18,750	16,160	17,890	18,190	17,270	17,120	18,430	17,190	18,490	17,440	18,250	16,710	
SO_4^{-2}	最高值	2,847	2,701	2,630	2,414	2,177	2,333	2,517	2,720	2,388	2,517	2,515	2,484	
	平均值	2,702	2,508	2,444	2,328	2,103	2,170	2,210	2,434	2,358	2,396	2,404	2,409	2,372
(ppm)	最低值	2,552	2,331	2,328	2,262	1,961	2,098	2,124	2,244	2,328	2,314	2,318	2,295	

表4-2 基隆港西23號碼頭水質分析表

項目	數值	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月	年平均值
pH 值	最高值	7.9	8.2	8.2	8.2	8.3	8.3	8.2	8.3	8.3	8.3	8.2	8.2	
	平均值	7.7	8.2	8.1	8.1	8.2	8.3	8.2	8.3	8.3	8.3	8.1	8.1	8.1
	最低值	7.4	8.0	8.0	7.6	8.0	8.2	8.1	8.1	8.2	8.2	7.8	8.0	
溶氧量 (mg/l)	最高值	5.1	8.5	9.6	8.7	4.6	4.6	4.1	4.9	4.1	4.6	2.7	4.6	
	平均值	4.4	8.1	9.2	8.3	4.0	4.0	3.4	4.6	3.7	4.3	2.5	4.2	5.1
	最低值	4.0	7.9	8.5	8.0	3.6	3.7	3.0	4.5	3.2	4.0	2.2	3.9	
導電度 (μmho)	最高值	10,970	9,740	9,770	9,780	9,700	9,790	9,740	9,740	9,720	9,710	9,810	9,900	
	平均值	10,630	9,600	9,670	9,710	9,530	9,690	9,550	9,590	9,550	9,600	9,740	9,760	9,720
	最低值	9,900	8,800	9,240	9,500	9,180	9,200	8,870	8,990	9,270	9,270	9,160	9,530	
水溫 (℃)	最高值	17.4	17.8	17.0	23.4	26.7	26.7	28.7	26.2	26.1	25.3	21.6	20.5	
	平均值	17.4	17.5	16.7	23.3	26.4	26.0	27.5	25.0	25.9	25.1	21.5	20.3	22.7
	最低值	17.3	17.3	16.5	23.1	26.0	25.4	27.2	23.8	25.7	25.0	21.4	20.0	
Cl^- (ppm)	最高值	19,900	18,650	21,840	21,020	20,100	19,870	19,910	20,030	20,000	19,850	20,430	17,870	
	平均值	19,100	16,940	20,360	20,010	18,770	18,720	18,790	18,680	19,370	18,380	18,950	17,650	18,100
	最低值	18,350	15,930	18,620	18,620	17,970	17,640	18,280	17,670	18,830	17,700	17,500	17,510	
SO_4^{-2} (ppm)	最高值	2,841	2,631	2,687	2,457	2,238	2,400	2,512	2,861	2,543	2,568	2,577	2,533	
	平均值	2,718	2,451	2,417	2,431	2,177	2,284	2,349	2,593	2,479	2,420	2,466	2,471	2,438
	最低值	2,630	2,355	2,143	2,380	2,149	2,177	2,215	2,145	2,422	2,345	2,178	2,396	

表4-3 台中港30號碼頭水質分析表

項目	數值	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月	年平均值
pH 值	最高值	7.9	8.2	8.2	8.2	8.2	8.3	8.2	8.3	8.2	8.1	8.1	8.3	
	平均值	7.8	7.8	7.8	8.0	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.3	8.0
	最低值	7.7	7.2	7.0	7.8	8.0	7.8	8.0	7.8	8.0	8.0	8.0	8.1	
溶氧量 (mg/l)	最高值	5.8	7.6	7.4	6.0	5.1	4.6	4.3	4.5	4.7	4.5	4.4	4.9	
	平均值	5.1	3.8	4.0	3.6	3.4	4.0	3.8	3.9	4.3	4.0	3.9	3.7	4.0
	最低值	4.6	0.0	0	0.9	1.9	3.3	2.9	3.0	3.5	3.3	3.3	3.2	
導電度 (μmho)	最高值	11,060	9,710	9,740	9,710	9,630	9,630	9,450	9,470	9,710	9,810	9,920	9,990	
	平均值	10,060	9,560	9,550	9,420	9,300	9,370	9,020	9,120	9,550	9,720	9,840	9,940	9,540
	最低值	9,900	9,360	9,290	9,280	9,050	8,930	8,000	8,440	9,230	9,440	9,780	9,890	
水溫 (℃)	最高值	19.0	20.0	21.3	24.7	26.9	29.5	29.5	28.9	30.0	28.1	22.4	20.2	
	平均值	18.7	19.2	21.0	24.2	26.3	28.8	28.6	28.2	29.2	27.4	22.3	19.9	24.5
	最低值	18.6	18.5	20.5	24.0	25.9	28.4	27.9	27.7	28.5	27.2	22.2	19.7	
Cl^- (ppm)	最高值	20,750	17,850	17,210	18,180	19,330	19,830	19,100	19,120	21,140	20,000	21,450	18,240	
	平均值	17,870	16,900	16,810	17,070	18,360	18,070	18,110	17,740	18,610	18,790	18,870	18,060	17,940
	最低值	16,260	16,000	16,350	15,960	17,420	15,970	16,880	16,340	17,530	17,130	17,750	17,750	
SO_4^{-2} (ppm)	最高值	2,791	2,495	2,460	2,438	2,401	2,296	2,512	2,479	2,505	2,703	2,580	2,753	
	平均值	2,610	2,395	2,363	2,391	2,279	2,099	2,356	2,275	2,428	2,449	2,452	2,595	2,391
	最低值	2,085	2,323	2,011	2,277	2,157	2,011	2,267	2,020	2,330	2,369	2,316	2,520	

表4-4 高雄港63號碼頭水質分析表

項目	數值	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月	年平均值
pH 值	最高值	7.7	8.2	8.1	8.1	8.3	8.4	8.2	8.2	8.3	8.0	8.1	8.3	
	平均值	7.7	8.1	8.0	8.0	8.1	8.2	8.0	8.0	8.2	7.9	8.0	8.2	8.0
	最低值	7.5	7.7	7.6	7.7	7.9	8.1	7.5	7.6	8.1	7.6	7.8	8.0	
溶氧量 (mg/l)	最高值	2.8	6.1	5.0	5.2	5.8	3.6	3.3	3.8	4.2	3.6	3.4	3.1	
	平均值	2.5	4.6	4.3	3.5	4.4	2.8	2.5	1.9	3.2	2.5	2.5	1.9	3.1
	最低值	2.2	1.0	1.2	1.8	3.2	2.0	1.1	0.7	2.7	1.2	1.4	1.6	
導電度 (μmho)	最高值	11,070	9,850	9,970	9,970	9,830	9,530	9,570	9,250	9,540	9,690	9,840	9,850	
	平均值	10,915	9,650	9,770	9,740	9,520	8,810	9,380	8,270	9,380	9,390	9,707	9,760	9,520
	最低值	10,640	9,300	9,040	9,020	9,050	8,000	8,450	6,300	9,210	7,630	9,650	9,700	
水溫 (℃)	最高值	24.8	23.9	26.1	24.8	27.1	30.5	30.7	29.8	29.5	29.5	25.7	23.2	
	平均值	23.6	23.6	25.0	24.7	26.7	29.1	29.2	28.9	29.1	28.5	25.6	23.0	26.4
	最低值	22.4	23.4	24.6	24.6	26.1	28.6	28.7	28.3	28.9	28.1	25.4	22.8	
Cl^- (ppm)	最高值	18,850	19,020	22,010	21,950	21,940	18,200	19,160	17,750	18,220	19,280	18,300	19,370	
	平均值	18,220	18,550	18,580	19,600	18,340	16,820	17,550	15,570	17,720	18,100	17,790	18,590	17,980
	最低值	17,750	18,200	17,650	17,150	17,110	15,480	15,760	13,680	16,950	16,520	17,140	17,930	
SO_4^{-2} (ppm)	最高值	2,541	2,709	2,670	2,738	2,461	2,406	2,472	2,372	2,374	2,480	2,552	2,622	
	平均值	2,448	2,641	2,480	2,457	2,290	2,252	2,297	2,167	2,233	2,307	2,441	2,541	2,379
	最低值	2,214	2,610	2,157	2,263	2,201	2,084	2,103	2,005	1,950	1,982	2,343	2,451	

表4-5 高雄港70號碼頭水質分析表

項目	數值	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月	年平均值
pH 值	最高值	7.7	8.3	8.2	8.2	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.0	8.2	8.3	
	平均值	7.7	8.1	8.1	8.0	8.2	8.2	8.1	8.2	8.2	7.8	8.1	8.3	8.1
	最低值	7.4	7.8	8.0	7.8	8.0	8.1	7.9	7.9	8.2	7.2	7.9	8.2	
溶氧量 (mg/l)	最高值	4.1	7.5	7.7	6.1	6.8	3.6	4.3	4.9	4.6	3.8	4.3	3.7	
	平均值	3.0	6.1	6.2	4.7	5.7	3.2	3.4	3.0	3.8	2.1	3.4	3.2	4.0
	最低值	2.5	4.8	4.3	2.6	4.5	2.9	2.0	1.3	3.4	1.4	1.9	2.4	
導電度 (μ mho)	最高值	10,850	9,810	10,050	10,090	9,910	9,590	9,610	9,330	9,680	9,770	9,850	9,920	
	平均值	10,020	9,700	9,910	9,740	9,570	8,940	9,400	8,340	9,360	9,490	9,760	9,780	9,500
	最低值	9,550	9,410	9,480	8,250	9,160	7,760	8,710	7,560	8,500	8,610	9,680	8,950	
水溫 (℃)	最高值	24.9	23.6	25.4	24.9	27.6	30.4	29.5	29.3	29.3	31.6	25.6	23.3	
	平均值	23.6	23.3	24.7	24.7	26.7	29.7	28.9	28.4	28.9	28.9	25.4	23.1	26.4
	最低值	22.3	23.2	24.2	24.3	26.0	28.0	28.2	27.9	28.6	28.1	25.4	22.8	
Cl^- (ppm)	最高值	18,660	19,160	22,080	22,880	19,510	18,330	19,620	17,120	19,040	19,470	18,460	19,660	
	平均值	18,160	18,930	19,220	19,790	18,160	16,700	17,530	15,890	17,580	18,730	18,080	18,690	18,120
	最低值	17,450	18,420	18,310	15,130	17,300	14,650	16,110	15,050	16,150	16,370	17,710	18,010	
SO_4^{-2} (ppm)	最高值	2,716	2,760	2,583	2,760	2,555	2,460	2,600	2,334	2,852	2,601	2,597	2,671	
	平均值	2,526	2,694	2,551	2,521	2,338	2,112	2,402	2,230	2,375	2,455	2,428	2,580	2,434
	最低值	2,214	2,662	2,497	2,140	2,223	2,001	2,139	2,131	2,085	2,093	2,265	2,485	

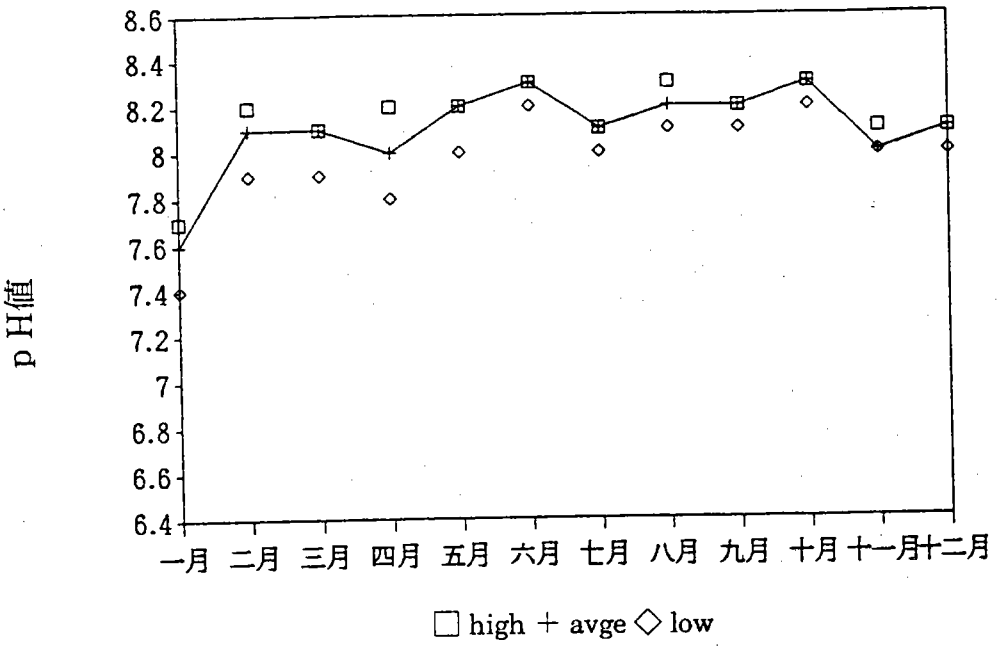
表4-6 花蓮港4號碼頭水質分析表

項目	數值	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月	年平均值
pH 值	最高值	7.9	8.2	8.3	8.3	8.2	8.2	8.2	8.4	8.3	8.3	8.2	8.3	
	平均值	7.8	8.2	8.3	8.2	8.2	8.1	8.2	8.4	8.3	8.3	8.2	8.2	8.2
	最低值	7.8	8.0	8.2	8.1	8.1	8.0	8.1	8.3	8.2	8.2	8.2	8.2	
溶氧量 (mg/l)	最高值	6.0	8.9	8.0	9.2	7.4	6.7	5.6	4.0	3.8	4.6	3.5	4.6	
	平均值	4.4	7.9	7.2	7.6	5.6	5.9	4.5	3.7	3.5	3.5	3.0	3.8	5.1
	最低值	3.9	5.7	6.7	6.6	4.7	5.5	3.8	3.2	3.2	3.0	2.2	3.0	
導電度 (μmho)	最高值	11,040	9,660	9,780	9,990	9,610	9,450	9,680	9,520	9,420	9,660	9,770	9,870	
	平均值	10,710	9,350	9,700	9,740	9,070	8,800	9,320	9,090	9,130	9,260	9,710	9,850	9,480
	最低值	10,080	8,580	9,560	9,230	7,710	7,250	8,510	8,770	8,600	8,580	9,300	9,780	
水溫 (℃)	最高值	23.6	23.7	22.8	25.2	27.2	28.6	28.9	27.5	27.2	26.9	24.6	23.8	
	平均值	23.4	23.5	22.6	24.6	26.1	27.0	27.6	27.2	27.0	26.7	24.5	23.8	25.3
	最低值	22.9	23.0	22.1	24.2	25.8	26.3	26.7	26.8	26.8	26.4	23.8	23.7	
Cl^- (ppm)	最高值	17,480	20,900	19,790	19,070	19,660	17,340	18,950	21,700	17,630	17,370	19,740	18,340	
	平均值	16,700	19,300	18,950	18,510	17,470	16,310	17,720	17,900	17,240	16,290	17,820	18,100	17,690
	最低值	14,160	17,800	18,200	18,010	14,980	15,480	16,290	17,180	16,760	15,090	17,200	17,800	
SO_4^{-2} (ppm)	最高值	2,568	2,608	2,700	2,662	2,387	2,312	2,528	2,355	2,304	2,390	2,433	2,647	
	平均值	2,419	2,270	2,401	2,462	2,248	2,157	2,090	1,966	2,259	2,219	2,322	2,539	2,279
	最低值	2,249	2,091	2,252	2,393	2,024	2,006	1,905	1,749	2,220	1,812	2,286	2,463	

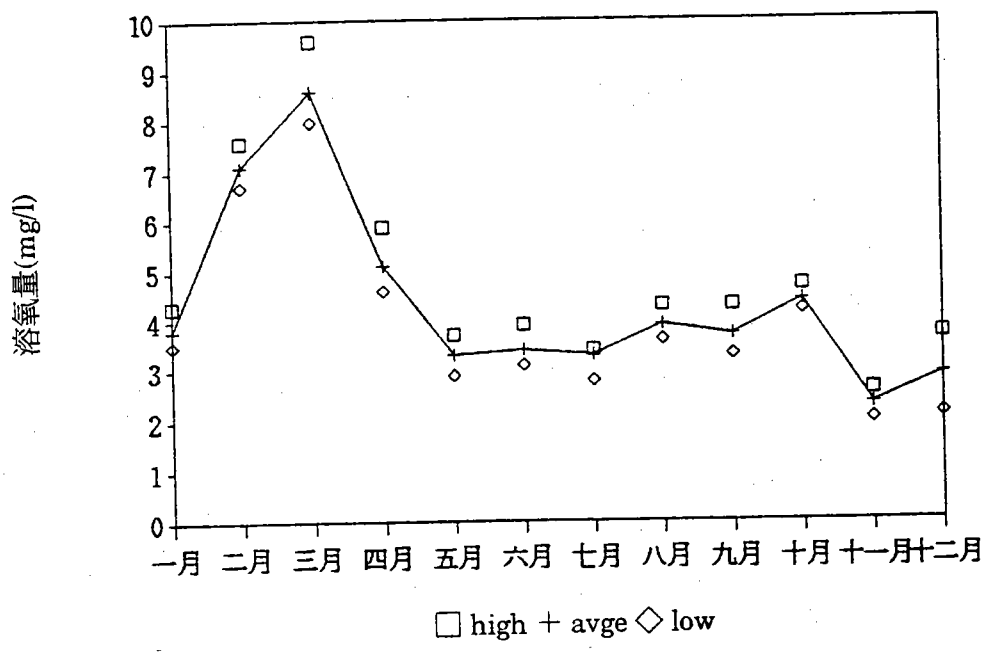
表4-7 蘇澳港 7 號碼頭水質分析表

項　目	數　值	一　月	二　月	三　月	四　月	五　月	六　月	七　月	八　月	九　月	十　月	十一　月	十二　月	年平均值
pH　值	最高值	8.0	8.3	8.2	8.2	8.4	8.3	8.1	8.3	8.3	8.3	8.1	8.1	
	平均值	7.7	8.1	8.1	8.0	8.3	8.3	8.0	8.3	8.2	8.3	8.0	8 1	8.1
	最低值	7.6	7.2	7.2	7.1	7.8	8.0	7.6	7.9	7.9	8.1	7.8	8.0	
溶氧量	最高值	6.5	8.7	8.6	8.2	6.5	6.3	6.5	5.3	5.0	5.0	6.4	3.1	
	平均值	4.8	7.9	7.8	6.1	5.7	5.5	5.7	4.6	4.2	4.2	5.1	2.8	5.4
(mg/l)	最低值	3.9	7.5	7.0	4.9	5.3	5.0	5.3	3.3	3.4	3.9	2.7	2.6	
導電度	最高值	11,040	9,700	9,980	9,980	9,830	9,800	9,760	9,730	9,730	9,730	9,900	9,950	
	平均值	10,900	9,340	9,740	9,510	9,560	9,490	9,250	9,560	9,520	9,620	9,690	9,820	9,670
(μmho)	最低值	10,000	6,240	6,990	6,280	8,220	8,450	8,620	9,000	8,760	9,400	8,300	9,330	
水　溫	最高值	21.7	22.8	22.0	23.8	24.5	27.8	30.1	27.5	27.1	27.1	24.1	22.6	
	平均值	21.4	22.4	21.5	23.3	24.2	25.7	27.7	27.0	26.7	26.8	23.5	22.4	24.4
(℃)	最低值	20.8	21.3	20.3	21.1	24.0	24.3	26.4	26.0	26.2	26.1	22.4	22.0	
Cl^-	最高值	20,690	21,010	19,590	19,540	19,230	17,660	19,760	19,830	19,390	20,250	21,260	20,460	
	平均值	19,350	19,210	18,870	18,640	17,870	17,020	18,490	18,730	18,790	18,670	18,170	17,850	18,470
(ppm)	最低值	18,570	15,870	16,140	16,190	15,040	14,660	16,820	17,000	17,930	17,960	15,790	14,880	
SO_4^{-2}	最高值	2,877	2,801	2,718	2,611	2,436	2,447	2,448	2,685	2,442	2,432	2,860	2,905	
	平均值	2,561	2,555	2,538	2,379	2,319	2,341	2,357	2,404	2,361	2,193	2,273	2,610	2,407
(ppm)	最低值	2,197	2,211	2,200	2,162	2,077	2,129	2,118	2,186	2,177	1,854	1,878	2,391	

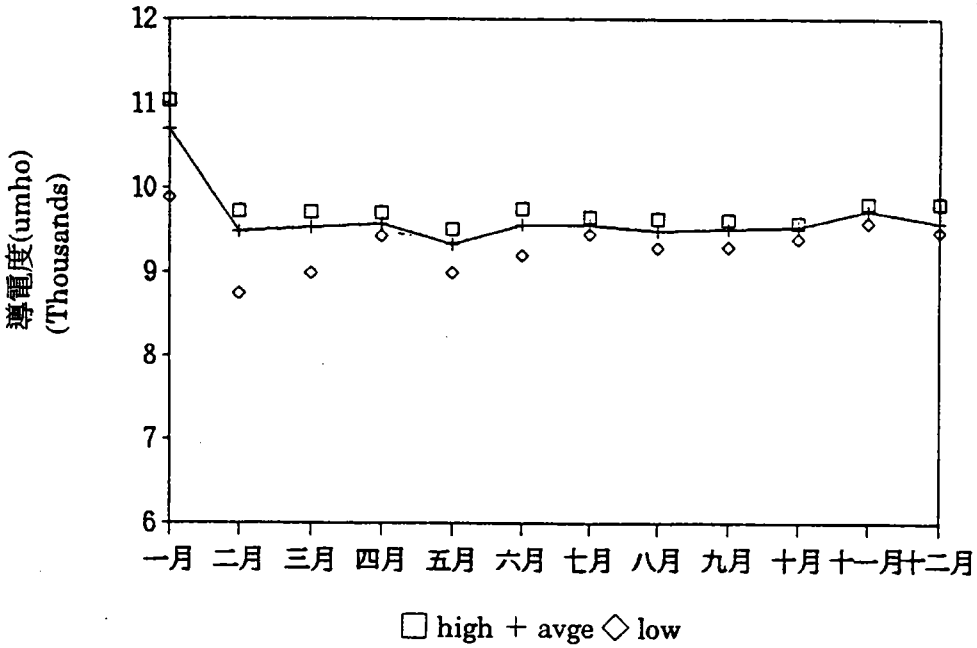
基隆港東6號碼頭pH值



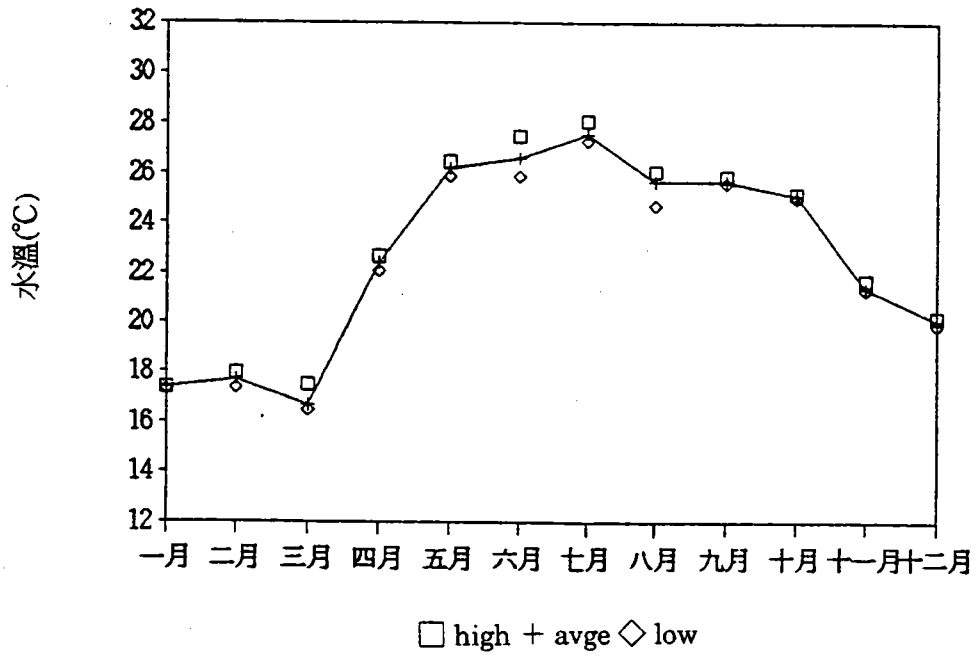
基隆港東6號碼頭溶氧量



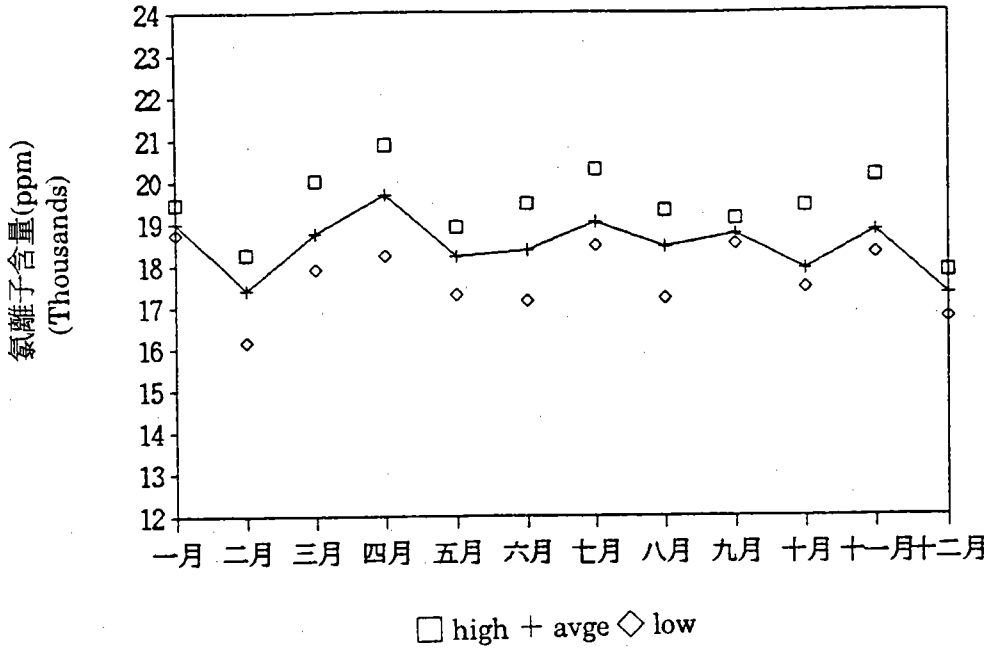
基隆港東6號碼頭導電度



基隆港東6號碼頭水溫



基隆港東6號碼頭氯離子



基隆港東6號碼頭硫酸根離子

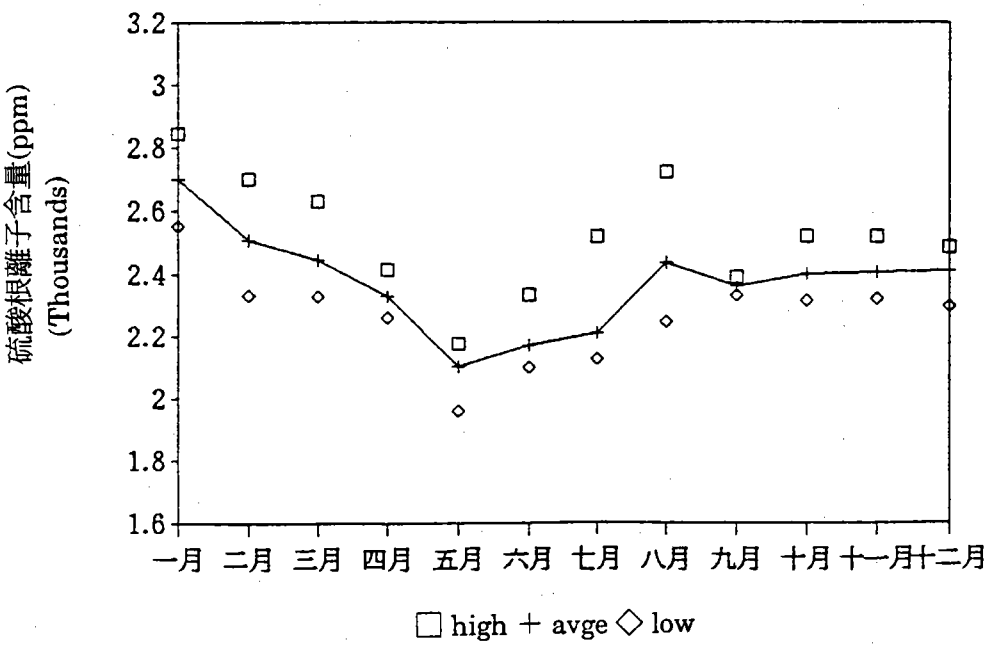
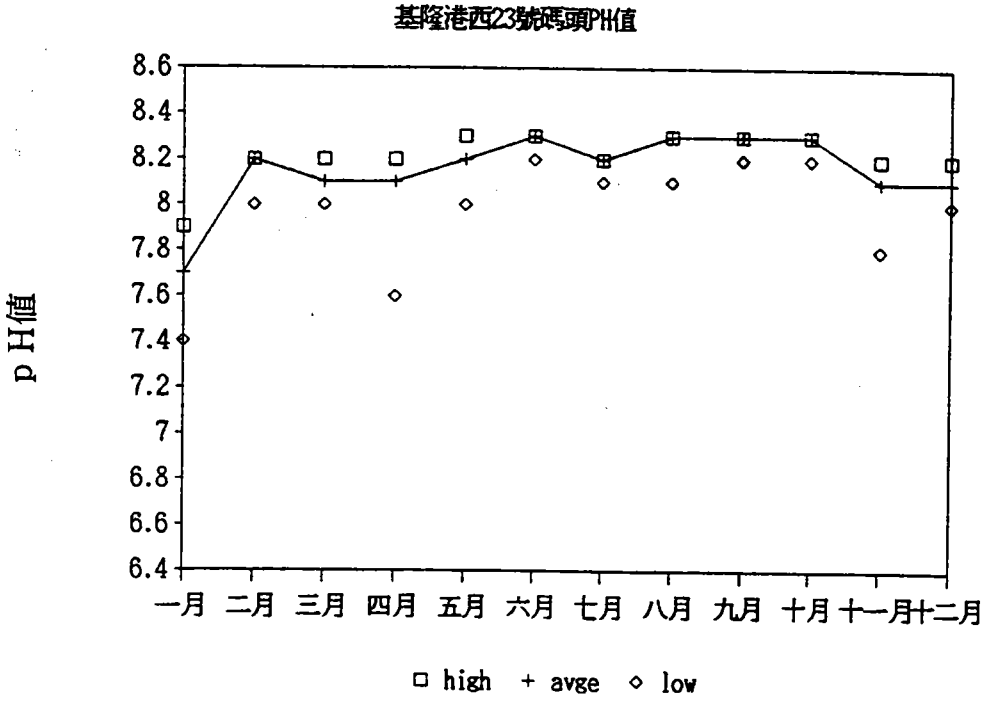
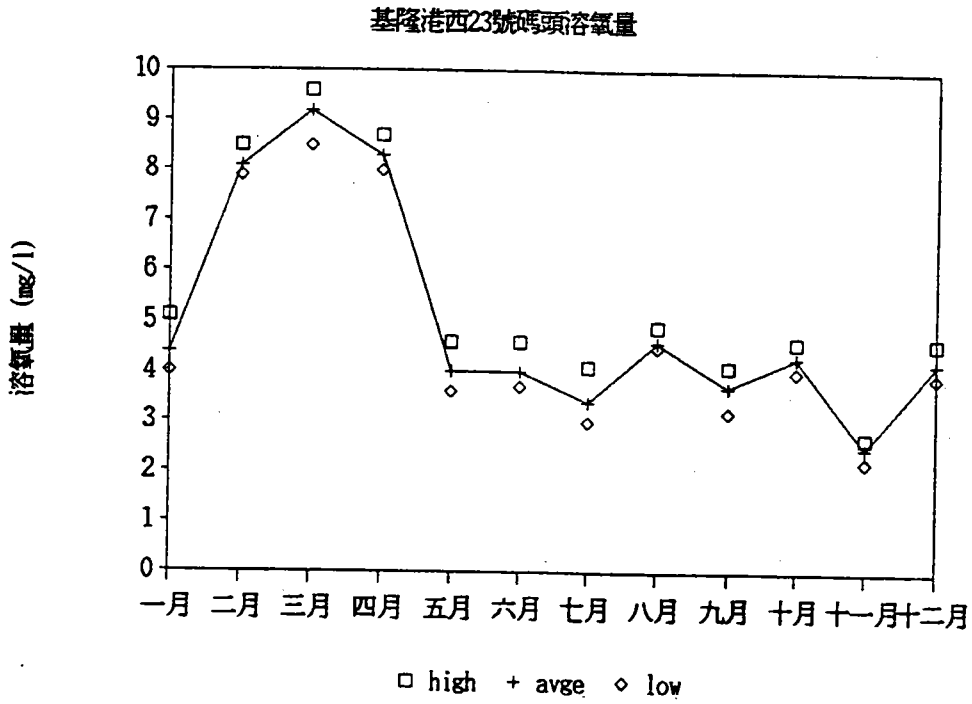
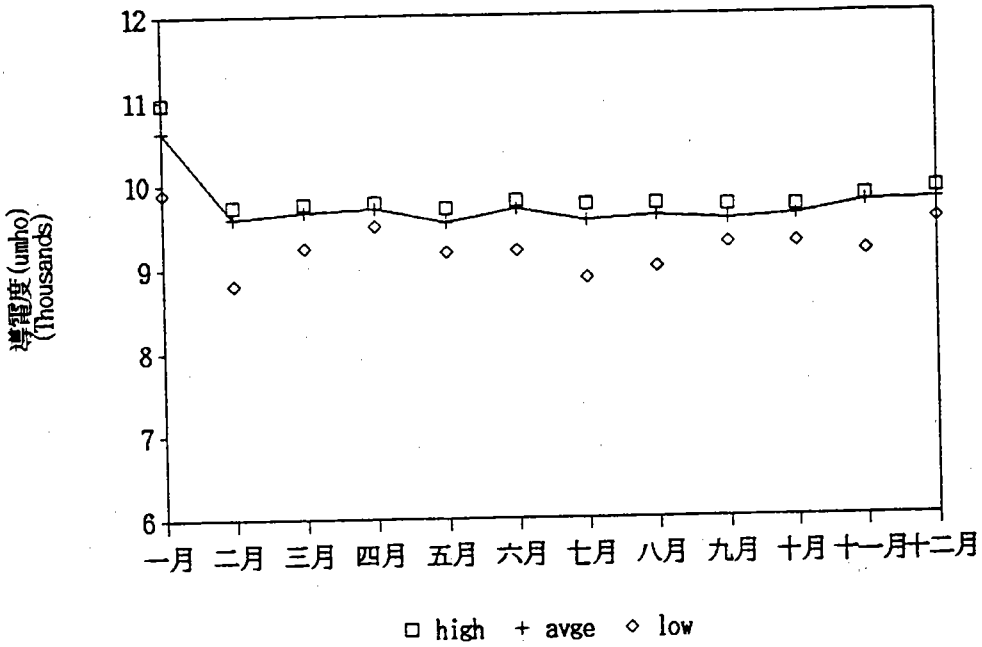


圖 3-1 基隆港東6號碼頭海水水質分析

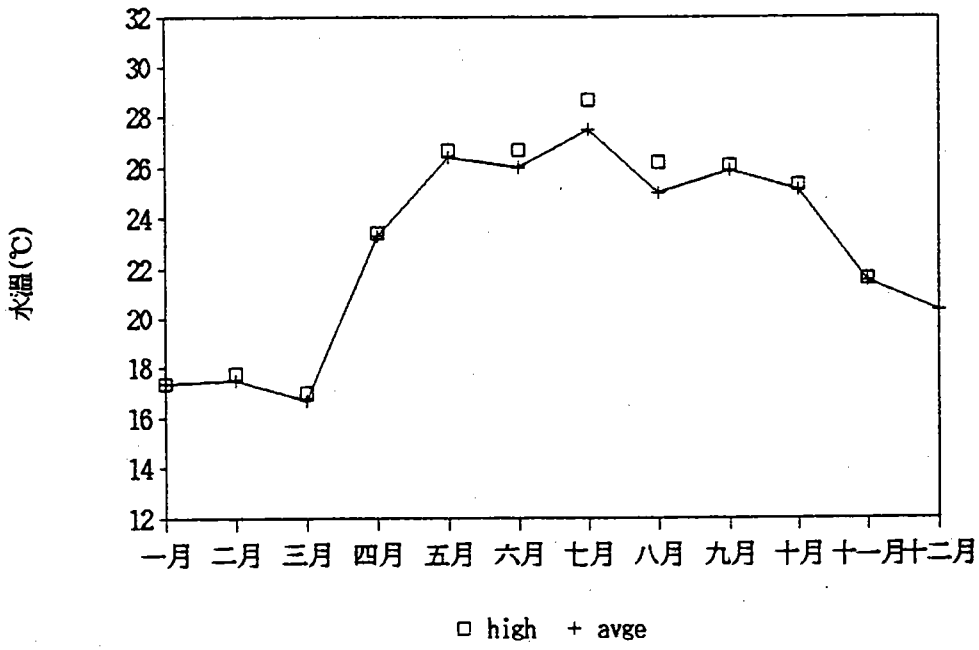

基隆港西23號碼頭PH值
pH值
8.6
8.4
8.2
8
7.8
7.6
7.4
7.2
7
6.8
6.6
6.4
一月 二月 三月 四月 五月 六月 七月 八月 九月 十月 十一月 十二月
high + avge low

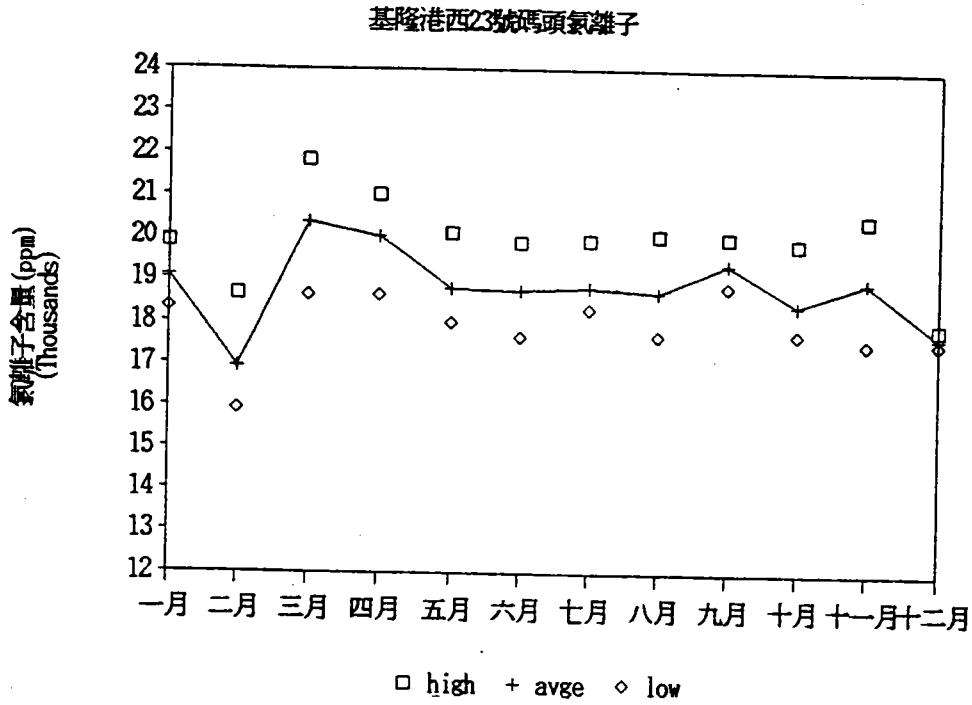

基隆港西23號碼頭溶氧量
溶氧量 (mg/l)
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1
0
一月 二月 三月 四月 五月 六月 七月 八月 九月 十月 十一月 十二月
high + avge low

基隆港西23號碼頭導電度



基隆港西23號碼頭水溫





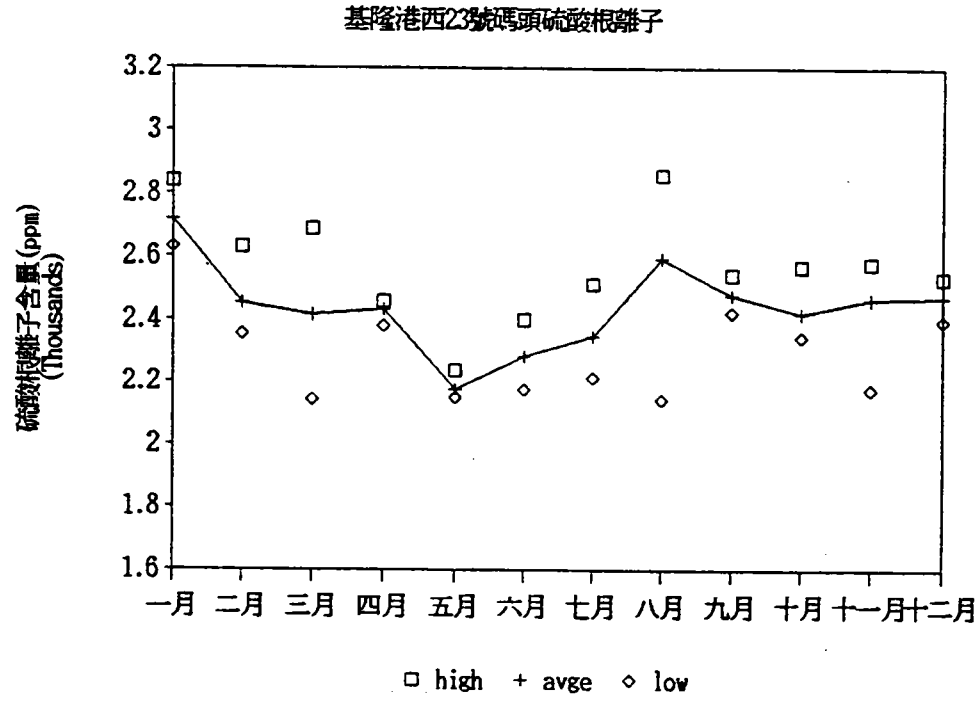
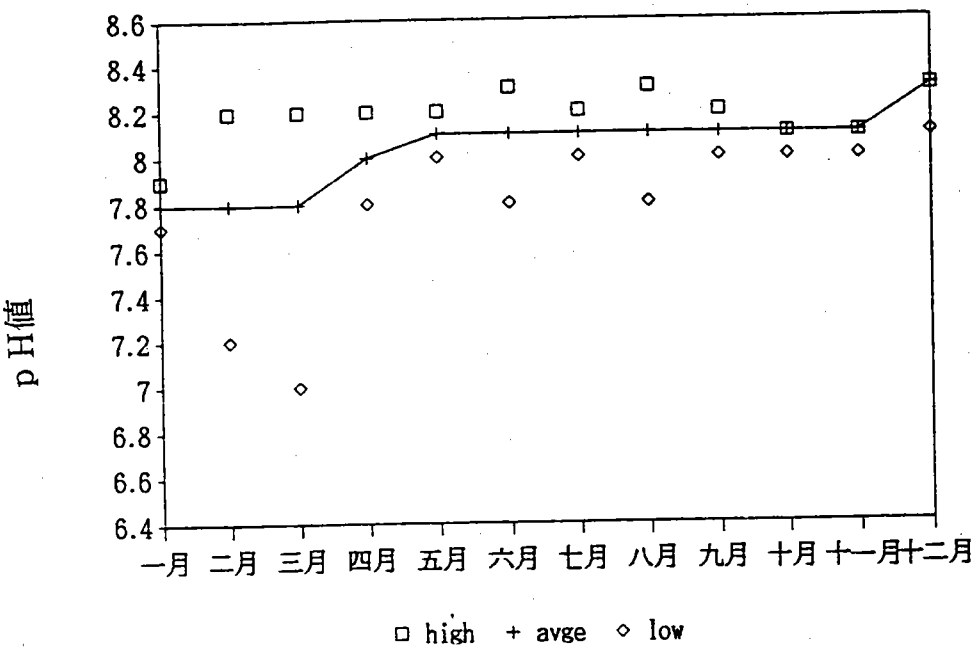
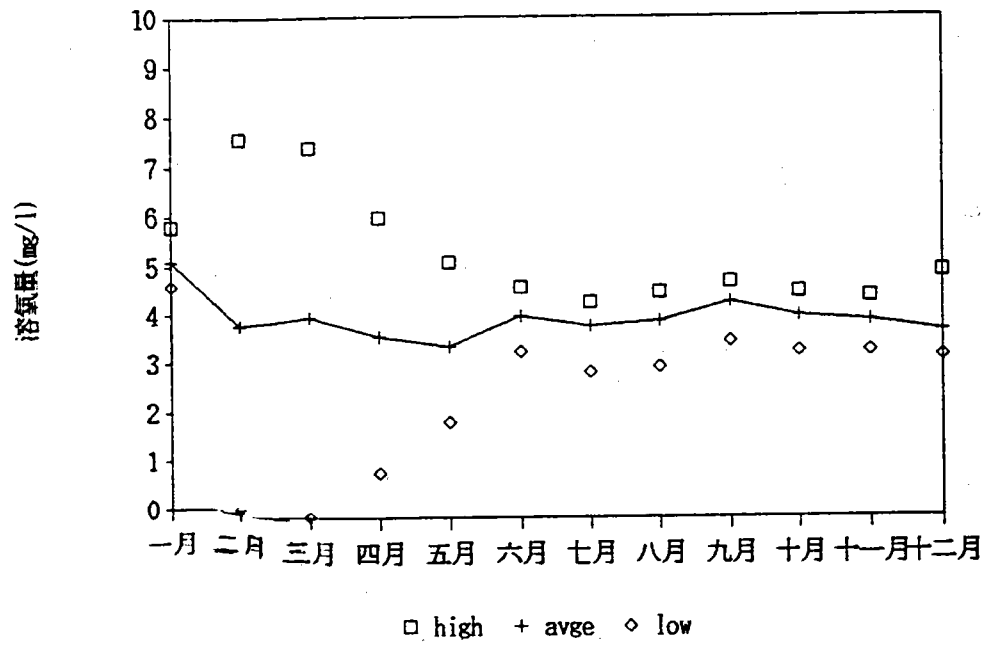


圖 3-2 基隆港西23號碼頭海水水質分析

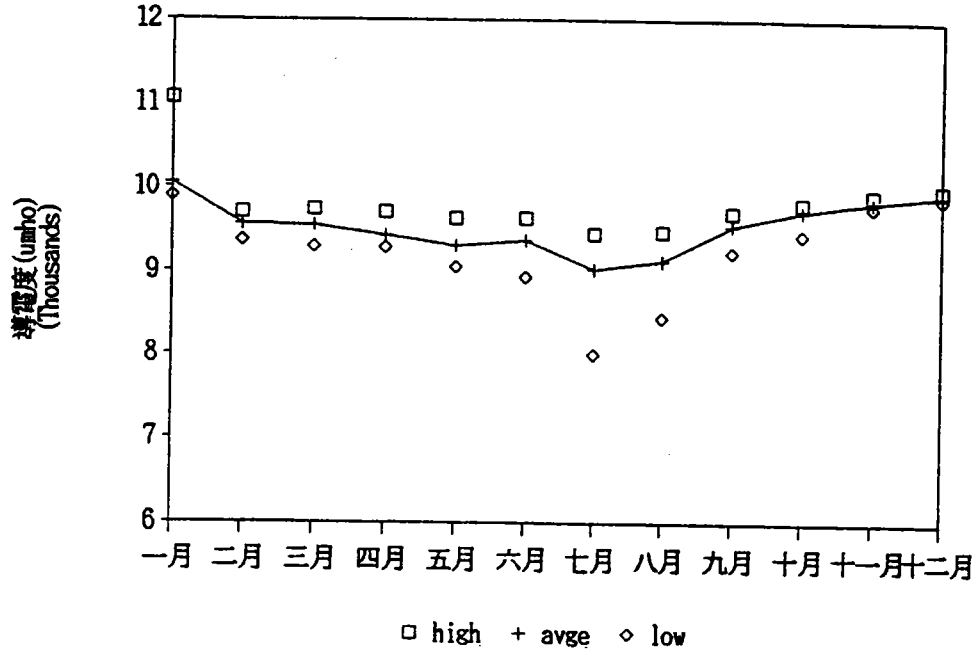
台中港30號碼頭PH值



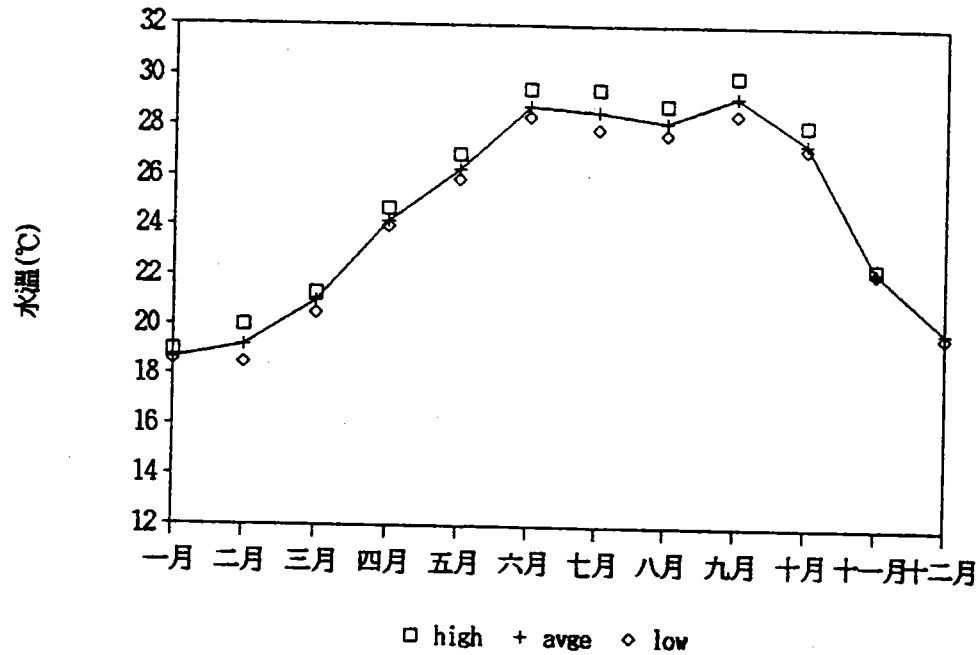
台中港30號碼頭溶氧量

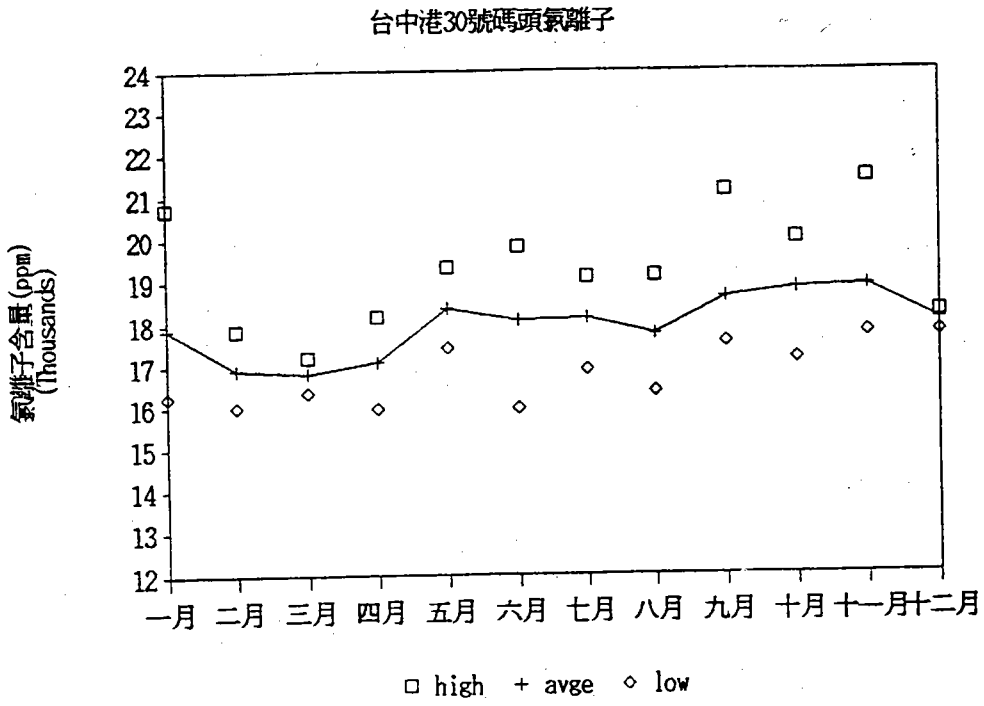


台中港30號碼頭導電度



台中港30號碼頭水溫





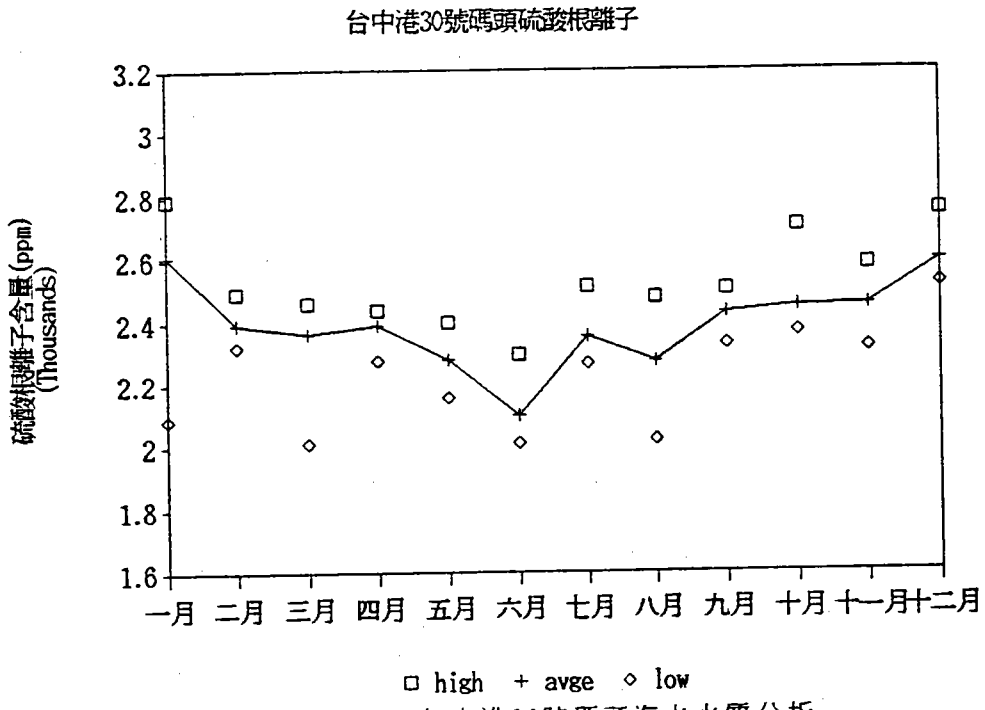
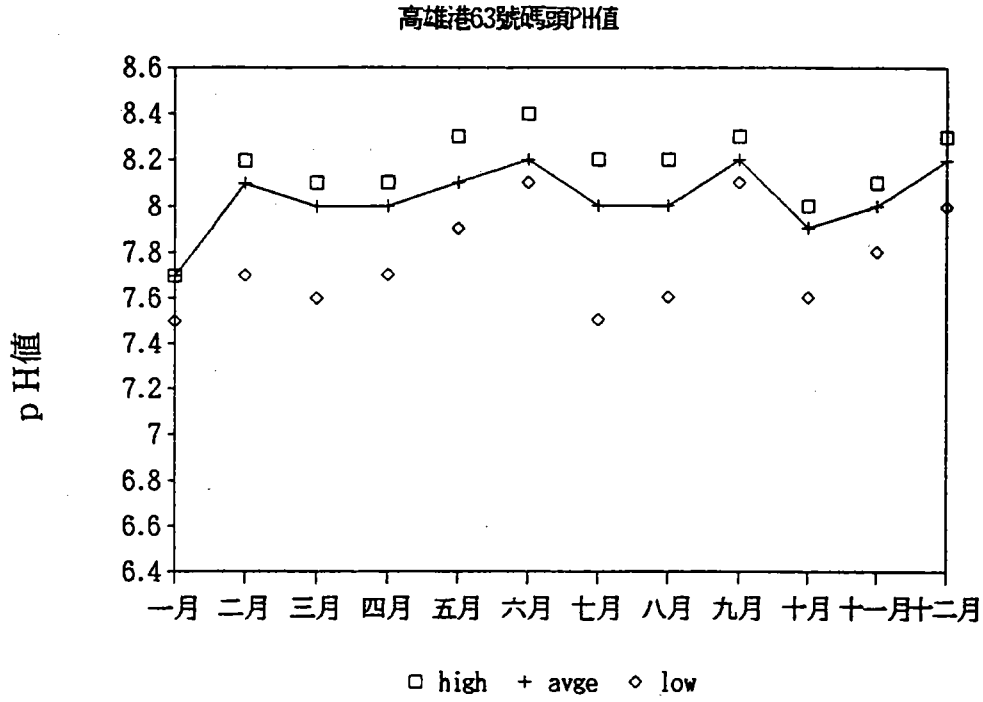
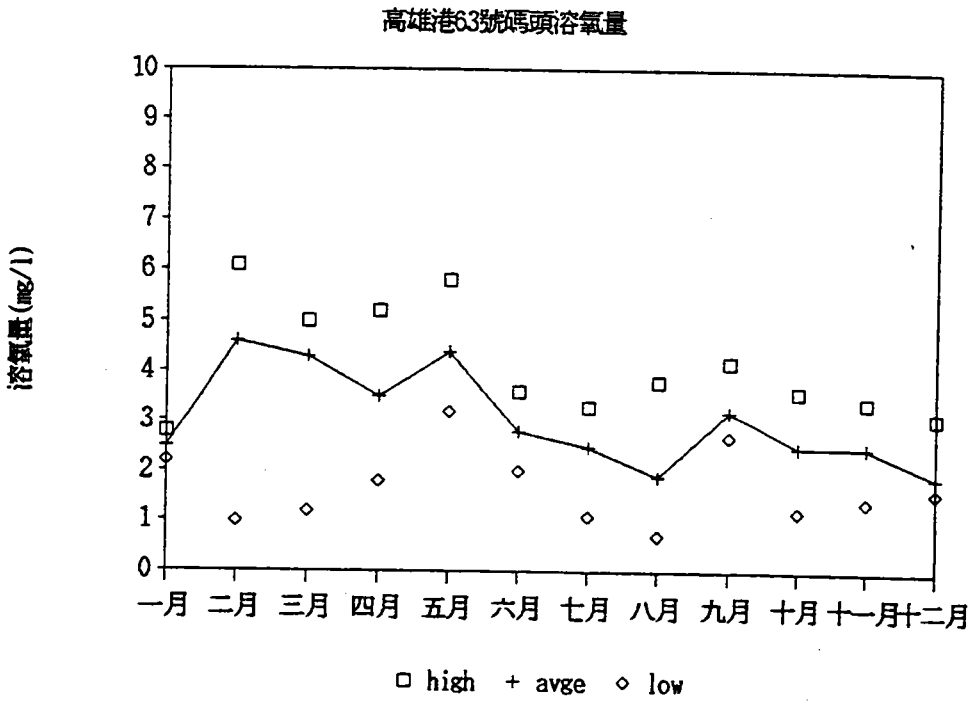
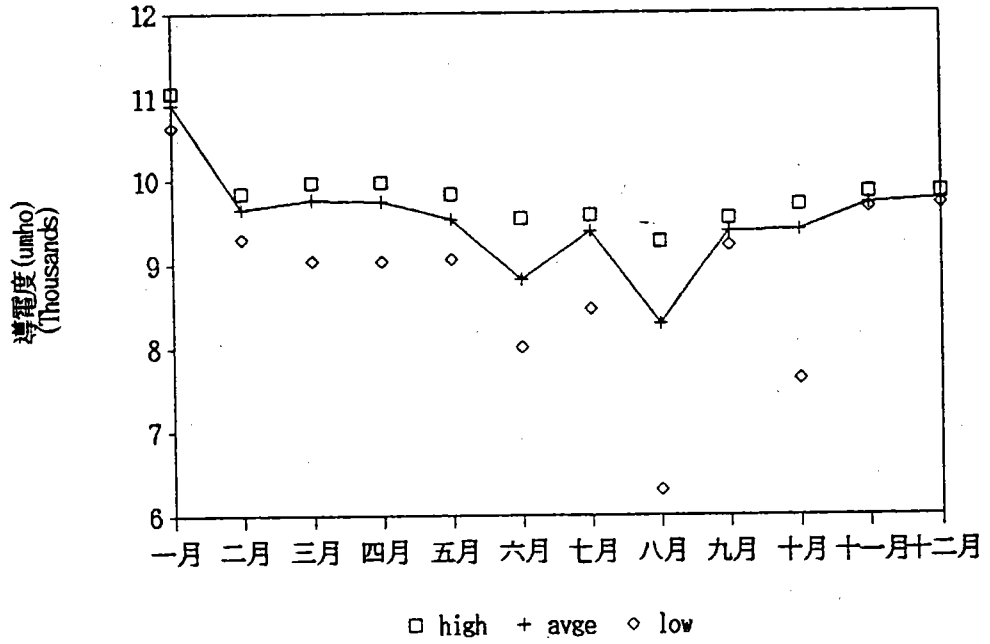


圖 3-3 台中港30號碼頭海水水質分析

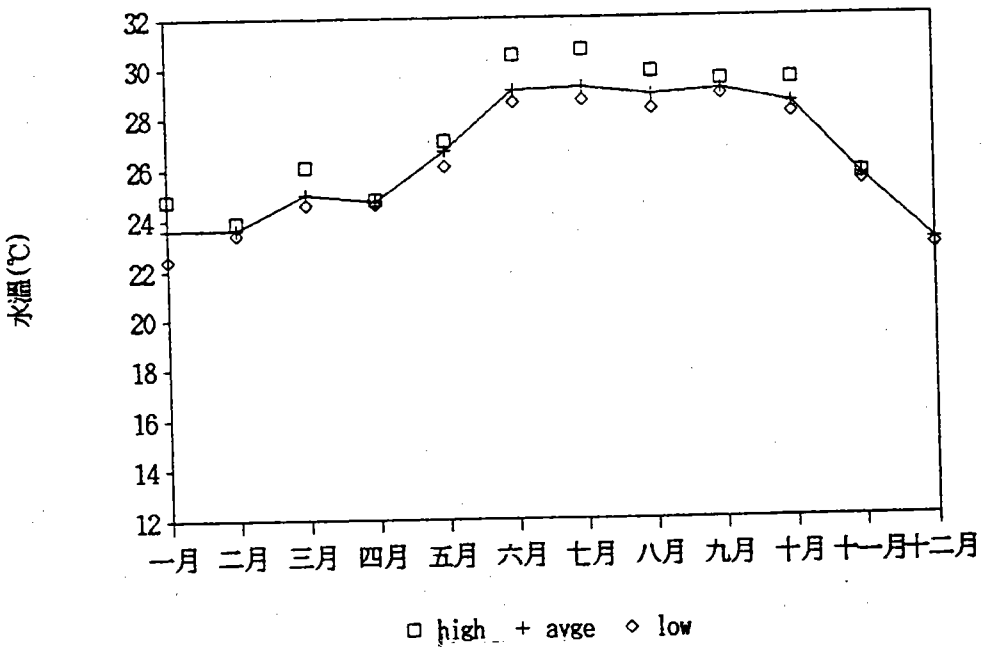

高雄港63號碼頭PH值
pH值
8.6
8.4
8.2
8
7.8
7.6
7.4
7.2
7
6.8
6.6
6.4
一月 二月 三月 四月 五月 六月 七月 八月 九月 十月 十一月 十二月
high + avge low

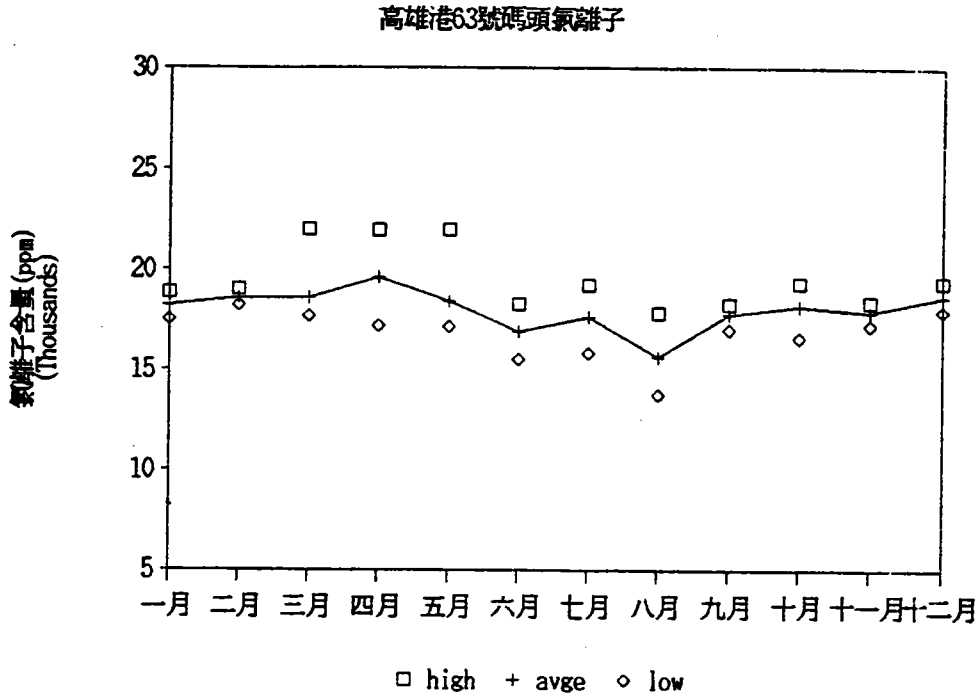

高雄港63號碼頭溶氧量
溶氧量(mg/l)
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1
0
一月 二月 三月 四月 五月 六月 七月 八月 九月 十月 十一月 十二月
high + avge low

高雄港63號碼頭導電度



高雄港63號碼頭水溫





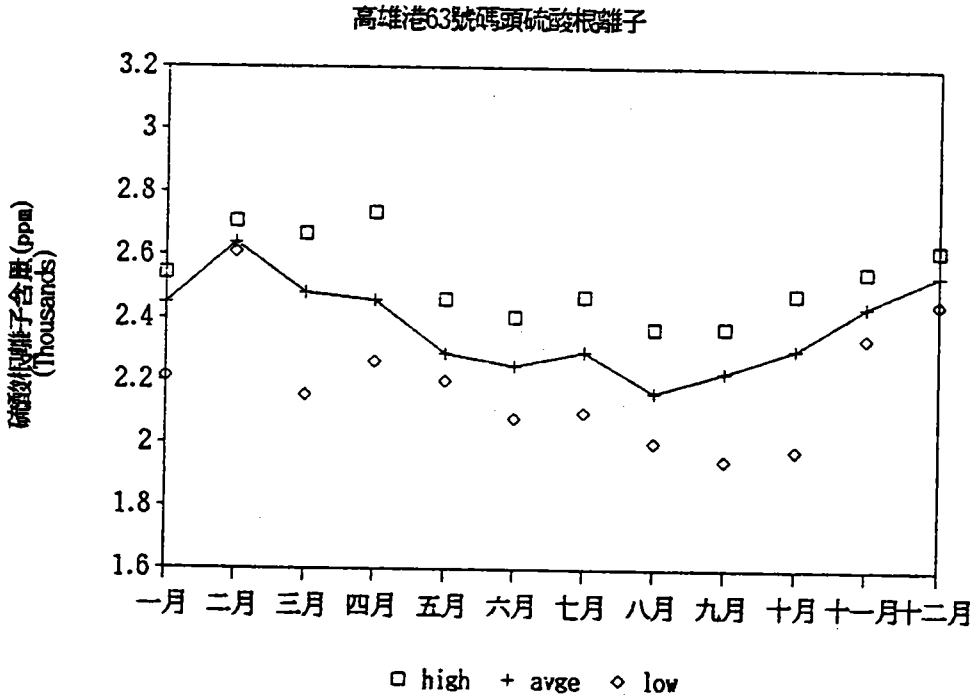
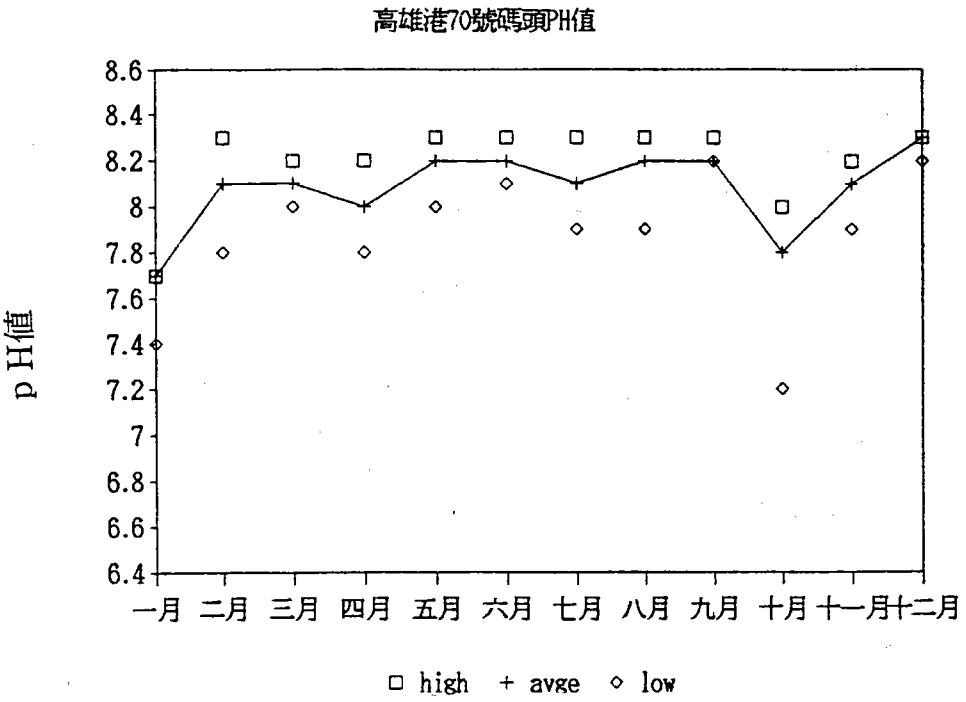
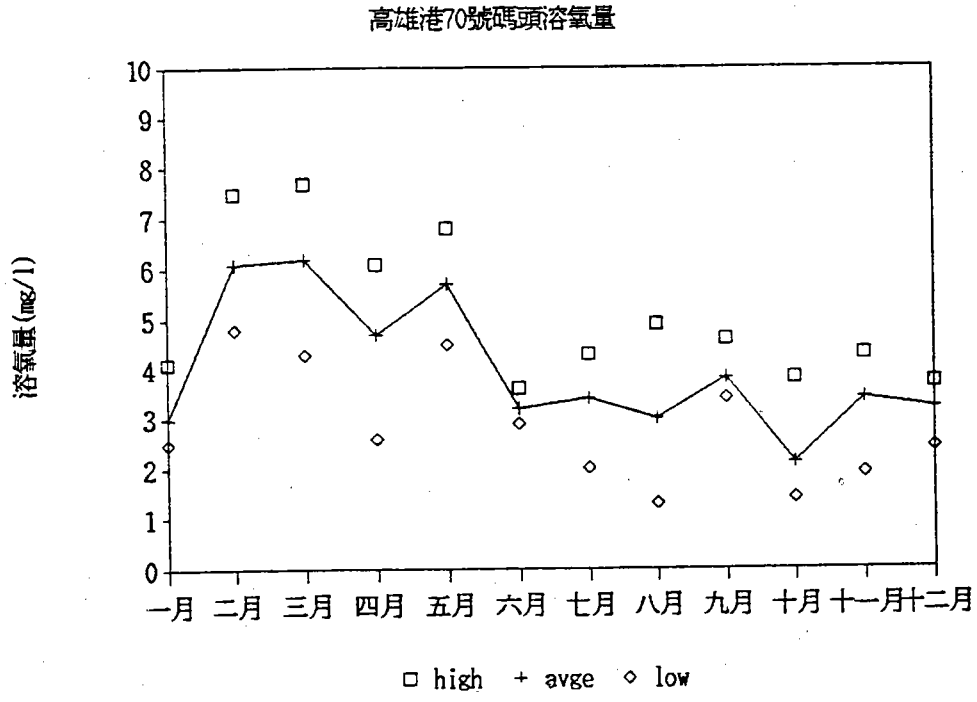
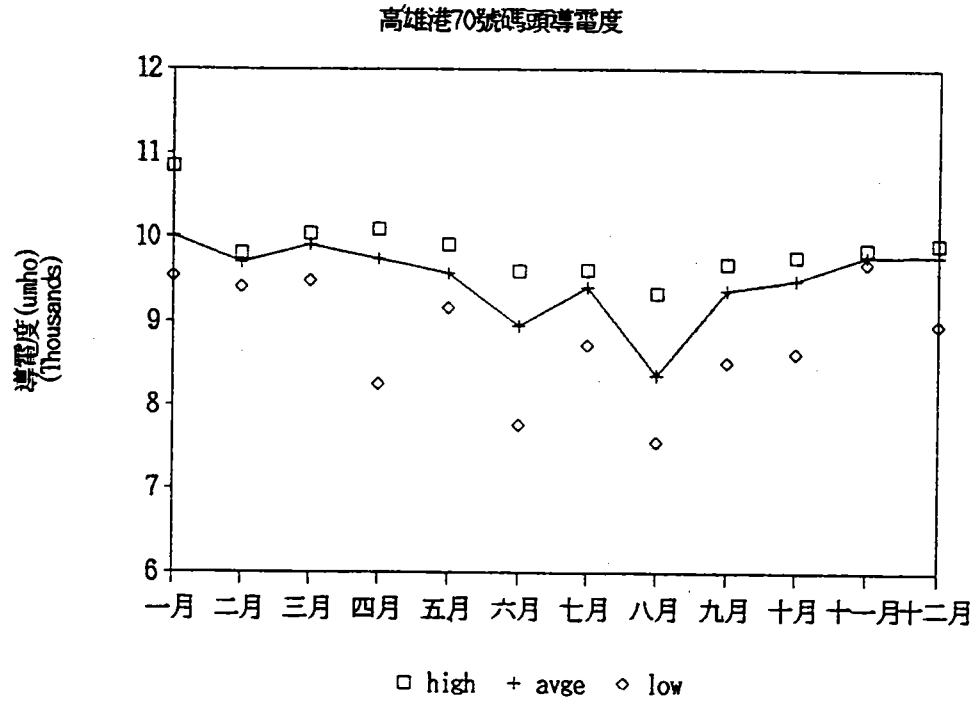
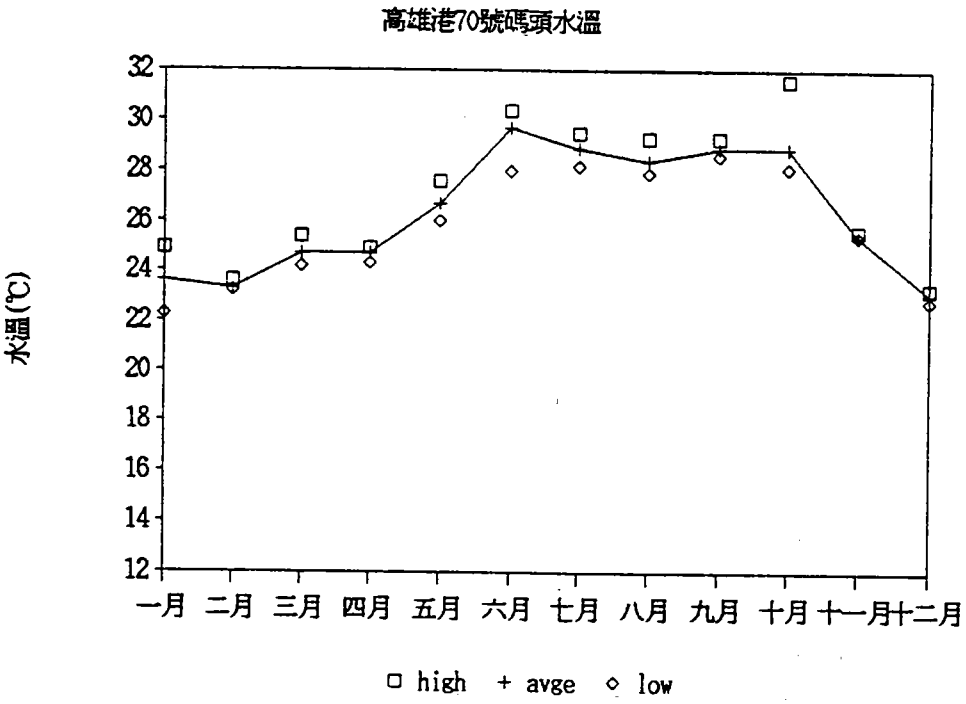


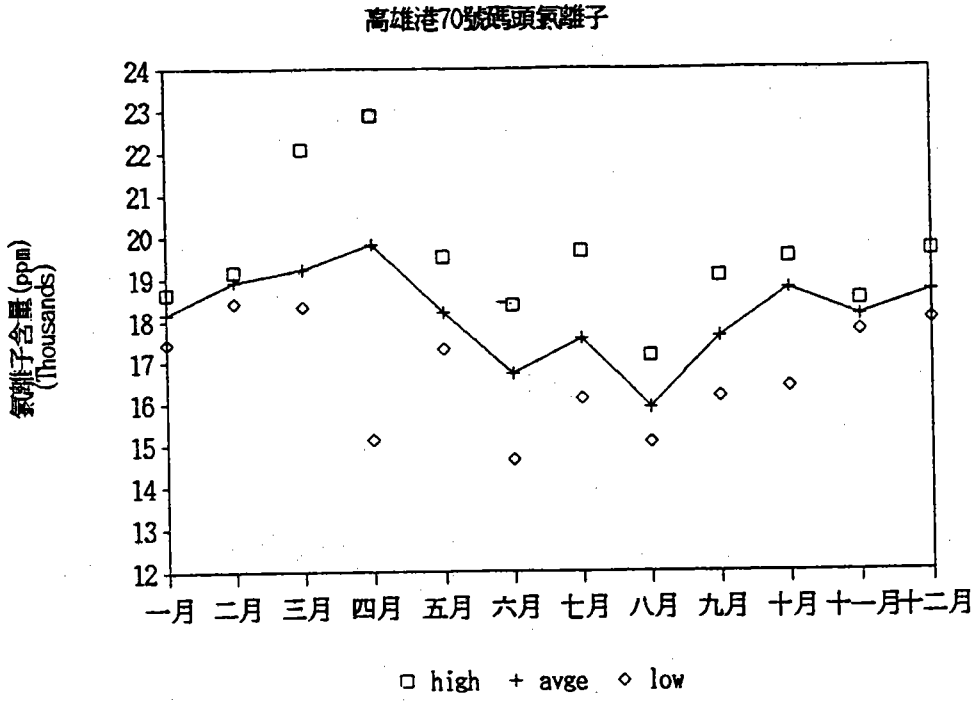
圖 3-4 高雄港63號碼頭海水水質分析


高雄港70號碼頭PH值
pH值
8.6
8.4
8.2
8
7.8
7.6
7.4
7.2
7
6.8
6.6
6.4
一月 二月 三月 四月 五月 六月 七月 八月 九月 十月 十一月 十二月
□ high + avge ◇ low


高雄港70號碼頭溶氧量
溶氧量(mg/l)
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1
0
一月 二月 三月 四月 五月 六月 七月 八月 九月 十月 十一月 十二月
□ high + avge ◇ low


高雄港70號碼頭導電度
導電度(umho)
(thousands)
12
11
10
9
8
7
6
一月 二月 三月 四月 五月 六月 七月 八月 九月 十月 十一月 十二月
□ high + avge ◇ low


高雄港70號碼頭水溫
水溫(℃)
32
30
28
26
24
22
20
18
16
14
12
一月 二月 三月 四月 五月 六月 七月 八月 九月 十月 十一月 十二月
□ high + avge ◇ low



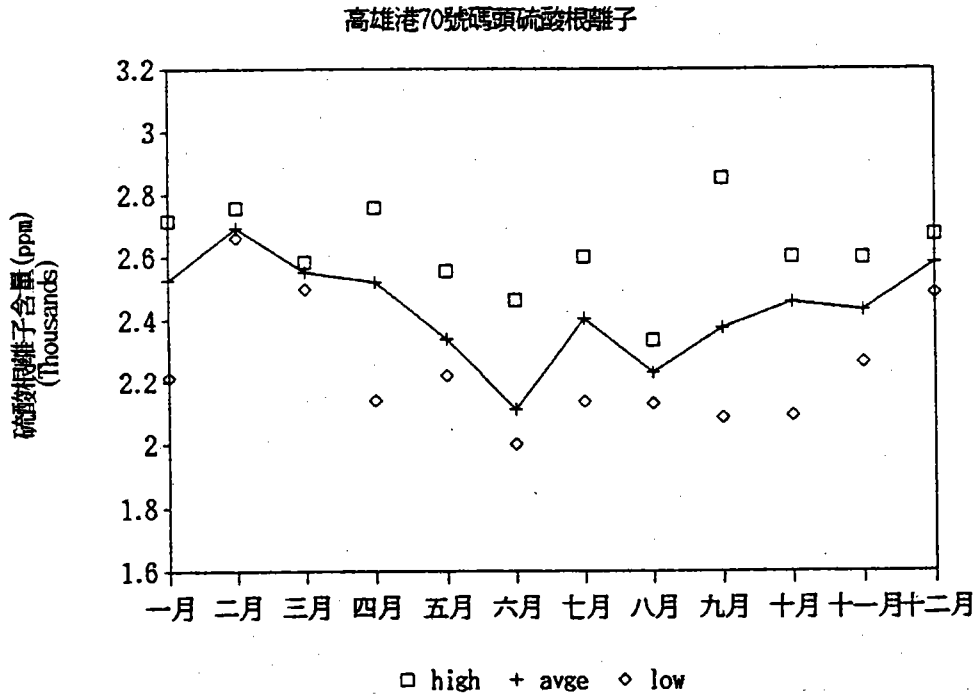
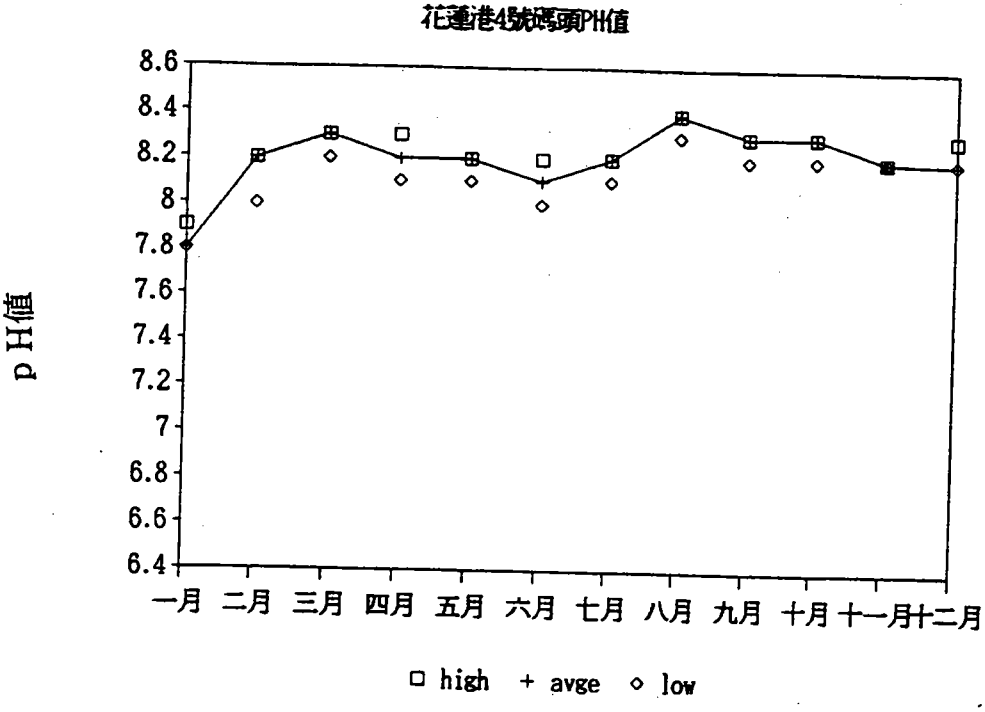
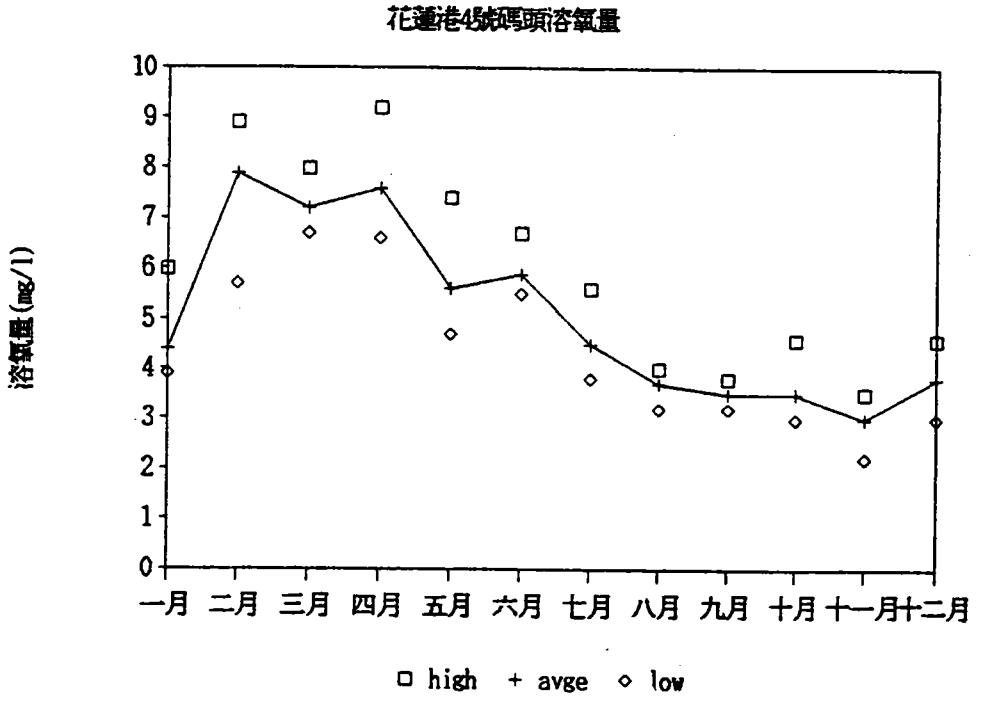
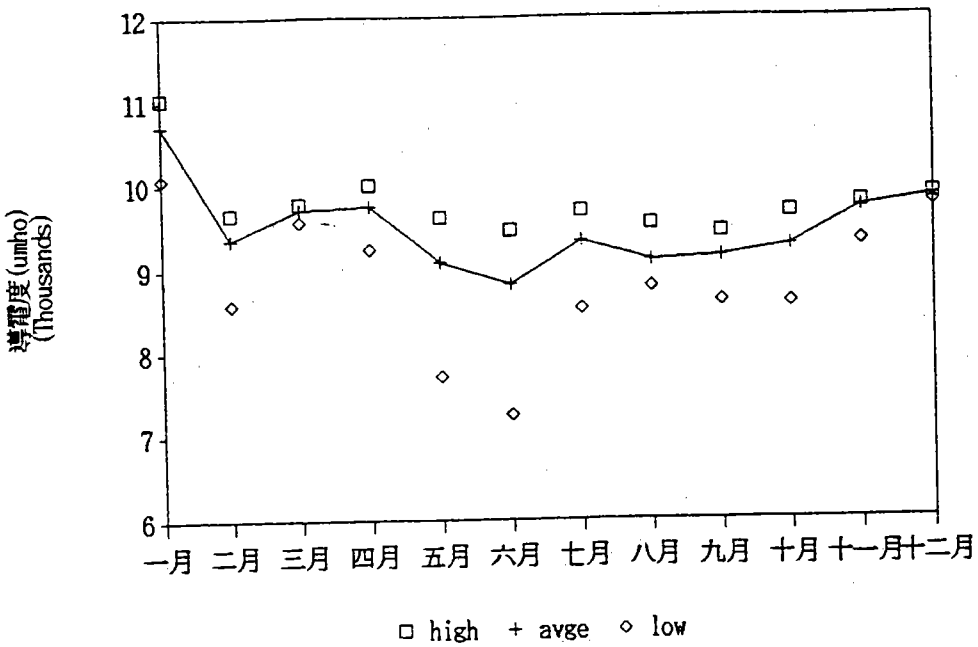


圖 3-5 高雄港70號碼頭海水水質分析

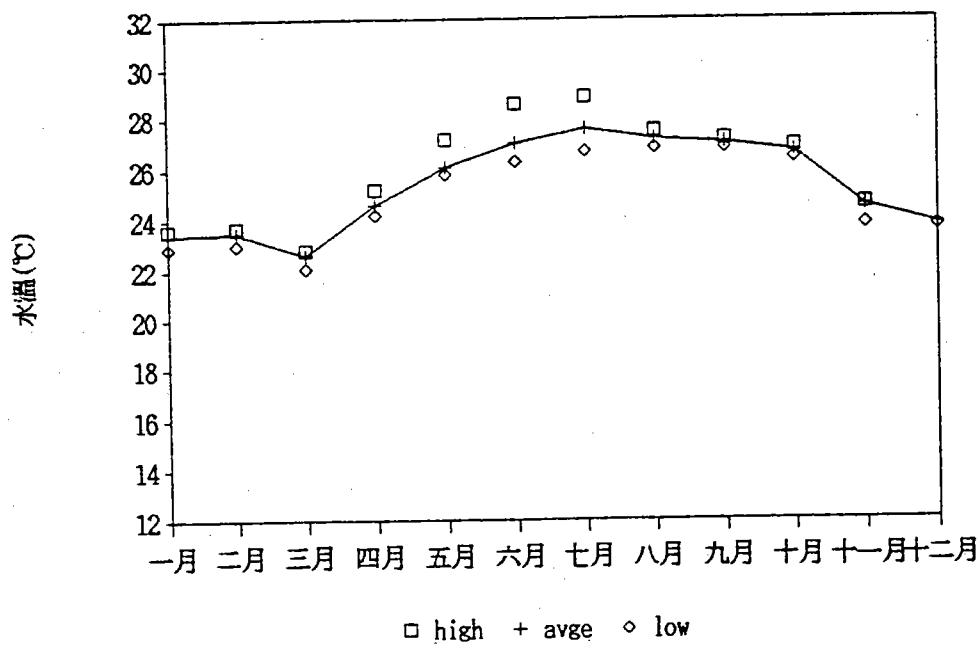

花蓮港4號碼頭PH值
pH值
8.6
8.4
8.2
8
7.8
7.6
7.4
7.2
7
6.8
6.6
6.4
一月 二月 三月 四月 五月 六月 七月 八月 九月 十月 十一月 十二月
high + avge low

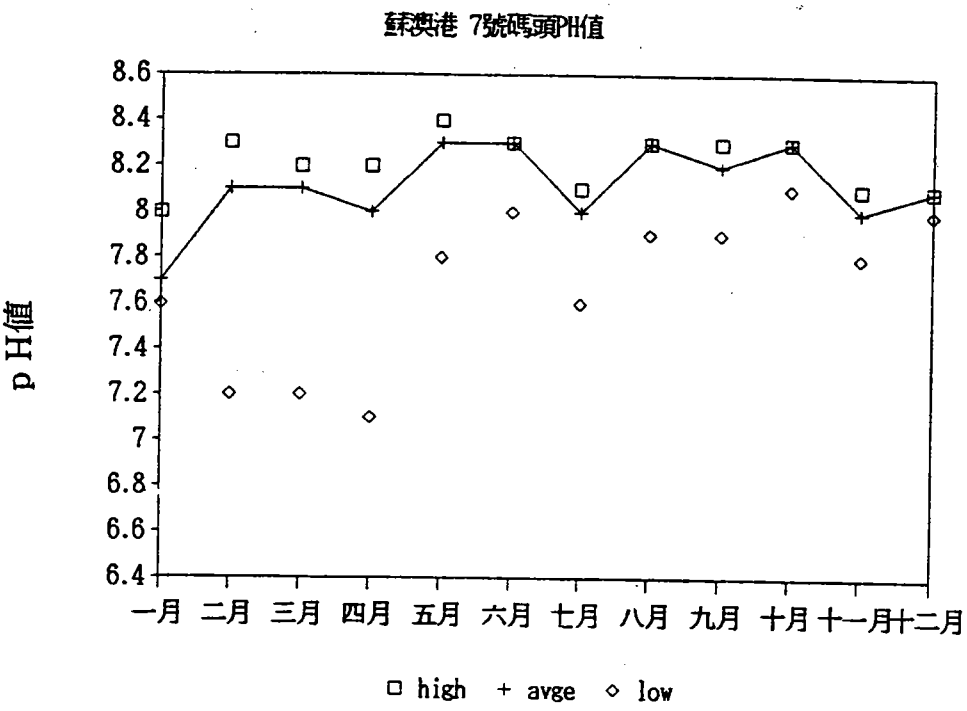

花蓮港4號碼頭溶氧量
溶氧量(mg/l)
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1
0
一月 二月 三月 四月 五月 六月 七月 八月 九月 十月 十一月 十二月
high + avge low

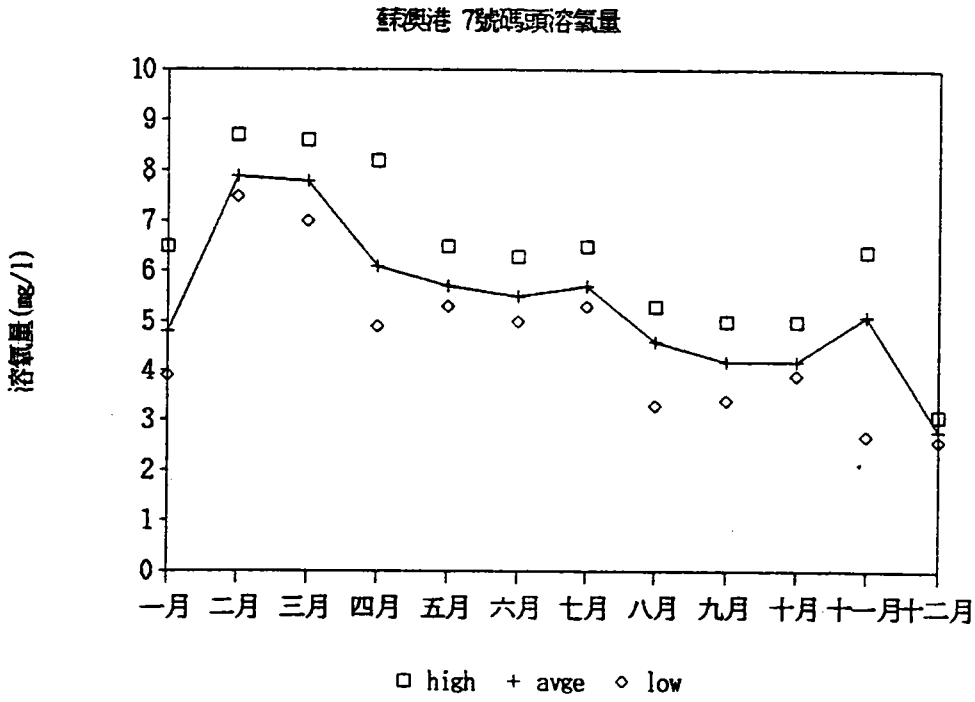
花蓮港4號碼頭導電度



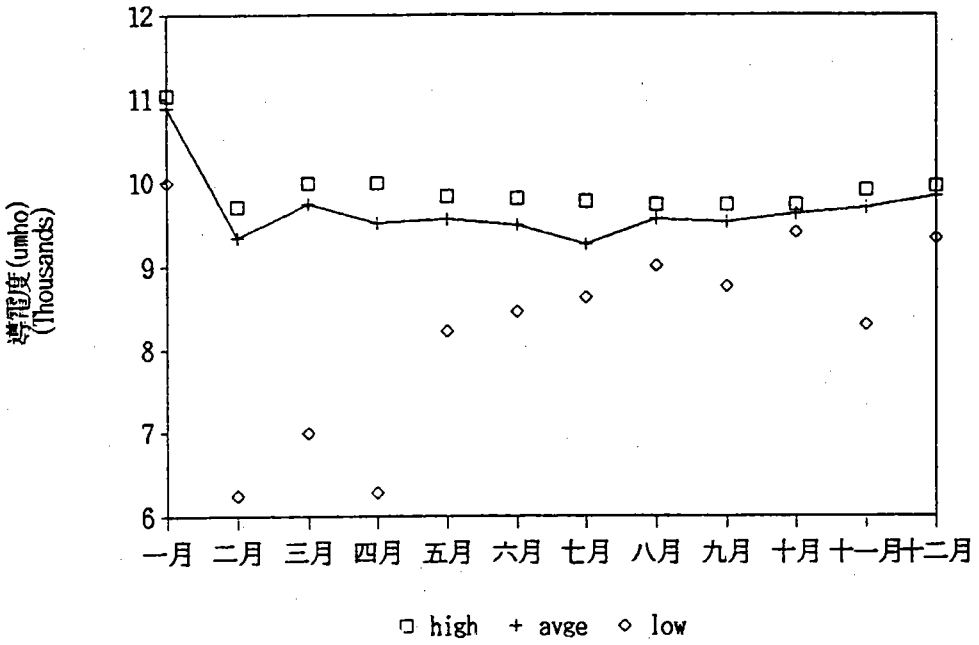
花蓮港4號碼頭水溫



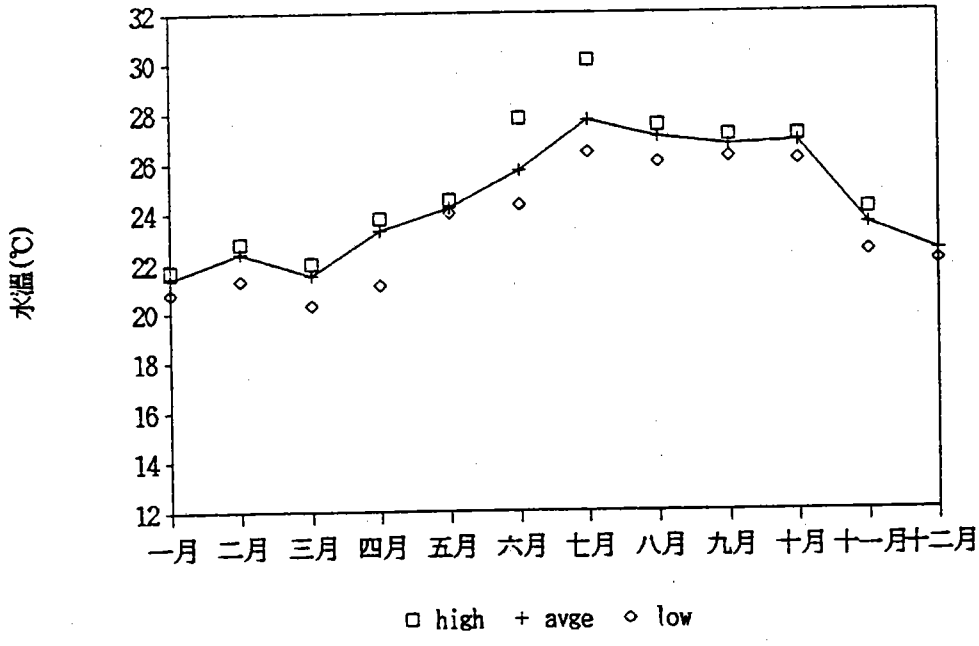

蘇澳港 7號碼頭PH值
pH值
8.6
8.4
8.2
8
7.8
7.6
7.4
7.2
7
6.8
6.6
6.4
一月 二月 三月 四月 五月 六月 七月 八月 九月 十月 十一月 十二月
high + avge low

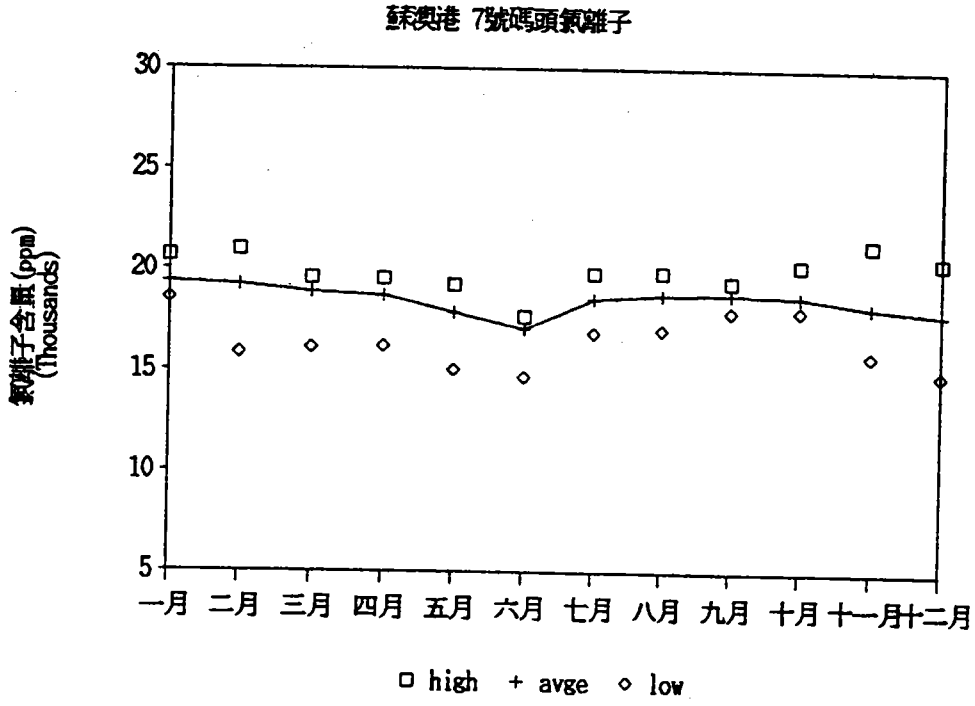

蘇澳港 7號碼頭溶氧量
溶氧量(mg/l)
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1
0
一月 二月 三月 四月 五月 六月 七月 八月 九月 十月 十一月 十二月
high + avge low

蘇澳港 7號碼頭導電度



蘇澳港 7號碼頭水溫





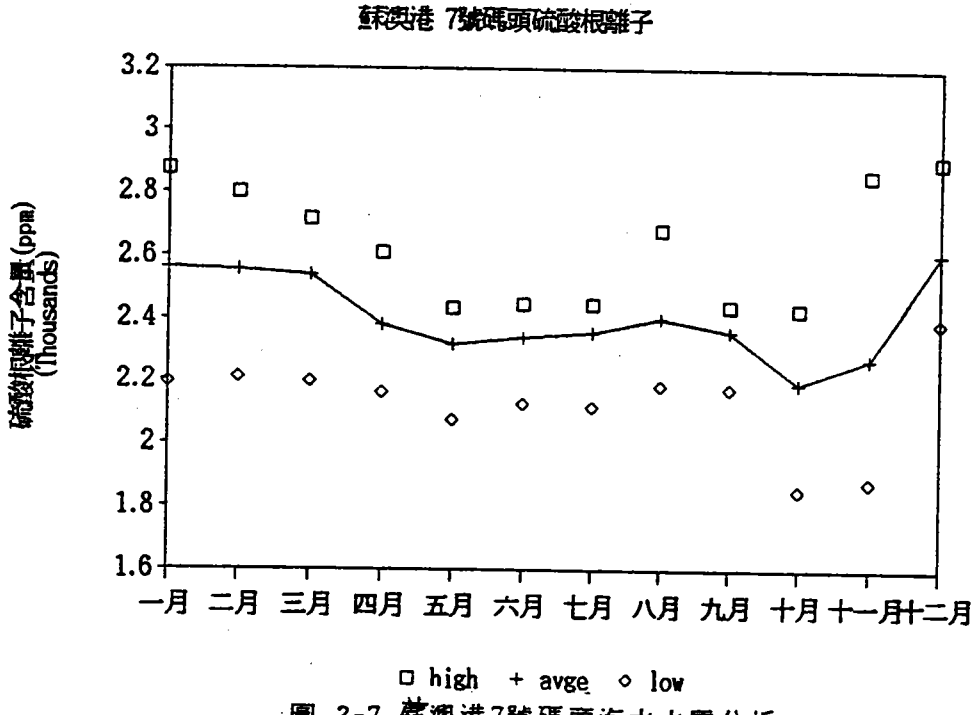


圖 3-7 蘇澳港7號碼頭海水水質分析

伍、材料選用、開發與防蝕設計之現況

饒　正*

一、前　言

本省屬高溫高濕型腐蝕區，且四面臨海，濱海結構物極易腐蝕損壞，甚至危及公共安全。目前國內尚未建立一套適合使用之防蝕規範，且工程界設計及施工時亦未採用國外文獻建議使用之規範，故腐蝕問題層出不窮。

本研究對目前本省經常使用之材料狀況作一了解，現就結構物中最被廣泛使用之材料；鋼筋混凝土與鋼材分開討論如后。

二、鋼筋混凝土材料

(一)材料選用之現況

目前港灣結構物中使用R.C.材料之情形列如表1。大部份均未能符合防蝕要求，以致使用僅12年之新港亦有腐蝕情形發生[1]。

1. 水泥

各結構物均使用波特蘭第I型水泥，其規範如ASTM C-150[2]，由表中知其C_3A含量未受限制，故不適合用於海中結構物，因過量之C_3A會與海水中之SO_4^{-2}離子，形成鈣釩石(Ettringite)而膨脹使混凝土破壞。高雄港第119號碼頭係使用波特蘭TYPE II水泥，其C_3A值限制在8%以下，其耐久性應較TYPE I好。

2. 水灰比

水灰比嚴重影響混凝土品質，也決定水及氯化物之滲透性，由表2[3]台中港港灣結構物所使用之配合表中顯示其水灰比在0.53～0.70之間，與ACI規範建議之0.40以下相差甚多，所以台中港使用僅10年餘，鋼筋混凝土結構物內之鋼筋已有腐蝕現象[1]。

3. 鋼筋

* 港灣技術研究所助理研究員

目前各港大都使用竹節鋼筋，其規範如表3[4]，一般鋼筋在鹼性之混凝土環境保護下，會生成鈍化膜而不腐蝕，但如若混凝土保護層因設計或施工不良，則鋼筋極易銹蝕，使斷面積減少，而影響結構體之安全。

(二)材料選用、開發與防蝕設計

本研究利用不同之水泥種類、摻料、水灰比、保護層厚度.....等參數製成試體，在試驗室內完成一系列之試驗，並將試體浸泡於台中港區內，以量測其在特定海域之腐蝕特性(詳細研究情形請參閱港灣技術研所港灣R.C.結構物之耐久性研究報告)。

三、鋼鐵材料

(一)材料選用之現況

目前港灣結構物使用鋼鐵材料情形如表4，僅高雄港內之鋼板(管)樁有全面作陰極防蝕，而基隆港只有東2-4號碼頭，蘇澳港僅6號碼頭一部份作陰極防蝕，可見仍有許多碼頭鋼結構未作防蝕計，亦未作檢查工作，這是非常危險的，因在海中之碳鋼並非如一般設計標準 0.2mmpy之腐蝕速率作均勻腐蝕，而會因 Cl^-之作用產生孔蝕，使結構體快速破壞，故鋼結構必須作防蝕處理。現在國內使用之鋼鐵材料 SY30、STK41之規範如表5。

(二)材料選用、開發與防蝕設計

本研究由工業技術研究院工業材料研究所負責辦理，選用 1019碳鋼，304、316不銹鋼，5086、6061鋁合金及1019鍍鋅碳鋼放置於試驗架上約(2× 2× 10M)安放於台中港區4A與5A碼頭間及基隆港26碼頭，作浸泡試驗，由長期浸泡後量測試片之重量損失，換算成試片之腐蝕速率。

耐海水低合金鋼之研究由中鋼公司負責辦理。安放試片於台中港區內之試驗架上。

四、參考文獻

1. 林維明，〝港灣鋼筋混凝土結構物之耐久性研究〞，港灣技術研究

2. 〝Concrete and Aggregates〞，Annual Book of ASTM Standard Sec 04. 02 U.S.A. 1987.

3. 〝台中港第一期工程完工報告〞上冊，台中港務局，民國65年．

4."港灣構造物設計標準"上冊",台灣省交通處，民國70年．

表1 鋼筋混凝土結構物之現況

位置	使用材料	防蝕設計	檢查結果
基隆港西1～20號碼頭 西28～33號碼頭 東1號及東10－22號碼頭	波特蘭第I型水泥 配比：1:2:4 或 配比：1:3:6 抗壓强度約3000psi 採用强竹節鋼筋	無	已有腐蝕情形發生[1]
台中港1～13號碼頭 16～28號碼頭	波特蘭第I型水泥 詳見表4-3	無	已有腐蝕情形發生[1]
高雄港 2～10、13～33 48～52、71～115碼頭 119～121號頭	同基隆港 採用波特蘭第II型水泥	無	已有腐蝕情形發生[1]
花蓮港 1～3，7號及10～19號碼頭	同基隆港	無	已有腐蝕情形發生[1]
蘇澳港 1～5號，8～10碼頭	同基隆港	無	已有腐蝕情形發生[1]

表2　台中港混凝土配比表

結構物名稱	設計強度 kg/cm²	最大粒徑 cm	坍度 cm	水灰比 w/c	細粒料率 %	水 kg	水泥 kg	附加劑	細粒料 kg	粗粒料 kg			
										60-40 mm	40-25 mm	25-5 mm	合計
工作船渠、船臺、沈箱渠、鉛錠板等	210	25	10	0.60	46	195	325	—	834			983	983
防波堤、防砂堤、高堤等護基方塊	140	60	7.5±2	0.70	33	163	233	—	738	379	379	504	1252
袋裝混凝土及墊層等	140	40	20	0.80	41	180	225	—	797		541	610	1151
施工道路臨時護岸	140	40	5±2	0.70	41	175	250	—	774		548	618	1166
沈箱封蓋、上部混凝土、胸牆、臨時護岸等	175	60	7.5±2	0.65	35	148	228	NBL C*4c.c 或Zeecon C*0.2%	705	473	394	447	1314
沈箱封蓋、上部混凝土、胸牆、臨時護岸等	175	60	7.5±2	0.65	35	153	235	Tricosai BV C*0.15%	697	468	391	443	1302
沈箱封蓋、上部混凝土、胸牆、臨時護岸等	175	60	7.5±2	0.65	35	147	226	Pozzolith 5L C*0.25%	700	392	392	522	1306
菱型塊帽型塊	210	40	7.5±2	0.60	39	178	297	—	736		462	694	1155
沈箱底層	210	40	10±2	0.53	37	162	306	Pozzolith 5L C*0.25%	683		572	646	1218
沈箱底層	210	40	10±2	0.53	37	165	313	NBL C*4c.c 或Zeecon C*0.2%	696		559	630	1188
沈箱底層	210	40	10±2	0.53	37	170	320	Tricosal BV C*0.15%	689		554	624	1178
沈箱隔牆及外牆	210	25	12±2	0.53	42	179	338	Pozzolith 5L C*0.25%	761			1055	1055
沈箱隔牆及外牆	210	25	12±2	0.52	43	183	345	NBL C*4c.c 或Zeecon C*0.2%	770			1025	1025
沈箱隔牆及外牆	210	25	12±2	0.53	43	184	347	Tricosal BV C*0.15%	788			1008	1008
沈箱接縫等水中混凝土	210	40	15±2	0.53	40	178	335	Pozzolith 5L C*0.25%	726		438	668	1096
沈箱接縫等水中混凝土	210	40	15±2	0.53	39	180	340	NBL C*4c.c 或Zeecon C*0.2%	710		446	668	1114
沈箱接縫等水中混凝土	210	40	15±2	0.53	39	185	349	Tricosal BV C*0.15%	702		441	661	1102
混凝土堤面	175	25	5	0.65	45	187	287	—	837			1027	1027
沈箱渠左拉門壓重	140	40	7.5±2	0.78	43	187	235	—	826		440	560	1100
預力基樁（水養治）	350	25	6	0.43	41	183	425	—	719			1039	1039
預力基樁（蒸氣養治）	350	25	6	0.36	38	187	520	—	633			1036	1036
預力基樁樁尖	350	25	7.5	0.43	40	170	395	Pozzolith 5L c*0.25%	715			1072	1077
預力基樁樁尖	350	25	7.5	0.43	41	172	400	NBL C*4c.c 或Zeecon C*0.2%	729			1053	1053
5－8號碼頭上部結構	210	25	10	0.53	41	174	329	Pozzolith 5L C*0.25%	752			1086	1086
5－8號碼頭上部結構	210	25	10	0.53	42	180	340	NBL C*4c.c 或Zeecon C*0.2%	759			1052	1052
5－8號碼頭鉛錠板	210	60	7.5±2	0.60	35	162	270	—	683	408	408	458	1274
5－8號碼頭L型塊	210	40	12	0.53	37	168	317	NBL C*4c.c	692		556	627	1183
5－8號碼頭護岸區水中混凝土	210	25	15-18	0.45	43	186	413	NBL C*4c.c	744			990	990
防風林邊溝臨港道路雨水下水道	175	40	7.5	0.65	39	180	277	—	740		546	616	1162
碼頭區排水系統	210	40	10±2	0.58	39	180	310	—	729		539	607	1146
膨脹混凝土	210	25	8-10	0.48	40	168	350	Tricoasl MV C*0.75%	711			1071	1071
膨脹混凝土	210	25	8-10	0.41	39	154	375	Tricoasl 181 C*1.5%	690			1085	1085
臨港道路雨水下水道	280	40	7.5±2	0.50	39	178	365	—	720		529	597	1126

表3　鋼筋之規範

種類		記號	化學成份（%）				
			C	Mm	P	S	$C+\frac{Mn}{6}$
熱軋光面鋼筋	1種	SR 24	—	—	0.060以下	0.060以下	—
	2種	SR 30	—	—	0.060以下	0.060以下	—
熱軋竹節鋼筋	1種	SD 23	—	—	0.060以下	0.060以下	—
	2種	SD 30	—	—	0.060以下	0.060以下	—
	3種	SD 35	0.30以下	1.60以下	0.050以下	0.050以下	0.050以下
	4種	SD 40	0.32以下	1.80以下	0.050以下	0.050以下	0.050以下
	5種	SD 45	0.35以下	1.80以下	0.050以下	0.050以下	0.050以下
冷軋竹節鋼筋	1種	SDC 40	—	—	0.060以下	0.060以下	—
	2種	SDC 50	—	—	0.060以下	0.060以下	—

種類		記號	機械性質						
			降伏點或耐力（kg/mm^2）	抗拉強度（kg/mm^2）	試片	伸長率（%）	彎曲角度		彎曲直徑
熱軋光面鋼筋	1種	SR 24	24以上	39至53	2號 3號	20以上 24以上	180°		標稱直徑之3倍
	2種	SR 30	30以上	49至53	2號 3號	16以上 20以上	180°		標稱直徑之4倍
熱軋竹節鋼筋	1種	SD 24	24以上	39至53	2號 3號	18以上 22以上	180°		標稱直徑之3倍
	2種	SD 30	30以上	49至63	2號 3號	14以上 18以上	180°		標稱直徑之4倍
	3種	SD 35	35以上	50以上	2號 3號	18以上 20以上	180°		標稱直徑之4倍
	4種	SD 40	40以上	57以上	2號 3號	15以上 18以上	180°		標稱直徑之5倍
	5種	SD 45	45以上	63以上	2號 3號	12以上 14以上	90°	D25以上	標稱直徑之5倍
								超過D25	標稱直徑之6倍
冷軋竹節鋼筋	1種	SD 40	40以上	50至65	2號 3號	10以上 12以上	180°		標稱直徑之5倍
	2種	SD 50	50以上	63至80	2號 3號	8以上 10以上	90°	D25以上	標稱直徑之5倍
								超過D25	標稱直徑之6倍

表4 鋼結構物現況

位置	使用材料	防蝕設計	檢查結果
基隆港西19～20號碼頭	鋼管樁	無	未檢查
西21～22	Z-38鋼板樁	〃	〃
西23～26	Z-45鋼板樁	〃	〃
西 27	Z-25鋼板樁	〃	〃
東2～9號碼頭	Z-38鋼板樁	東2-東4犧牲陽極法	完工後每年測電位，目前有部份電位已升高至-510mV
東10～11號碼頭	鋼管樁	無	未檢查
東12～14號碼頭	鋼管樁	〃	〃
台中港14～15號碼頭	SY-30鋼板樁	紅丹或鋅鉻黃打底一度，再用核定顏色油漆刷二度	每年以目測方式檢查一次
29號碼頭	鋼管樁	〃	〃
高雄雄 1號碼頭	type Z鋼板樁	犧牲陽極法(Al-Zn-In系鋁陽極)	完工後每年量測電位一次，均合乎設計標準。
11～12號碼頭	type U鋼板樁	〃	〃
34～47號碼頭	type Z鋼板樁	〃	〃
55～58號碼頭	Box type鋼板樁	〃	〃
60～62號碼頭	type Z鋼板樁	〃	〃
63～67號碼頭	Box type鋼板樁	〃	〃
68～70號碼頭	Box type鋼板樁	〃	〃
116號碼頭	鋼管樁	〃	〃
117～118號碼頭	鋼管樁	〃 樁頭至-1.5m以上，以防蝕帶包紮	〃
花蓮港 4～6及8～9號碼頭	鋼板樁	無	未檢查
蘇澳港 6～7號碼頭	STK 41鋼管樁	6號碼頭前2段作陰極防蝕，其餘以環氧樹脂柏油漆施工厚度0.675mm	完工後每年量測電位壹次，均合於設計規範。

表5　銅板（管）樁之鋼料規範

鋼材	化學成份			
	C	P	S	Cu
SY 30		0.04max	0.04max	0.25min
STK 41	0.25max	0.04max	0.04max	

鋼材	物理性質		
	抗彎強度 ($kg\,f/mm^2$)	降伏點 ($kg\,f/mm^2$)	延伸率 (%)
SY30	50 min	30 min	18 min
STK 41	40 min	25 min	18 min

陸、混凝土試體曝露試驗

林維明*

摘要

鋼筋混凝土結構物因材料、設計、施工與使用不當，則容易發生腐蝕而影響其耐久性。最適切的方法爲利用長期曝露試驗，以便能發掘耐久性問題。本章主要是簡單地介紹國內外所進行的混凝土試體曝露試驗的研究計劃及部份試驗結果。同時檢討海洋大氣曝露試驗場設置和試驗應注意之事項；探討曝露試驗之方法及大氣因子蒐集方法。透過曝露試驗結果將更能瞭解新產品及新建結構物之性能，且對現行規範採行或修正可以有更有力之依據供爲遵循。

一、前言

鋼筋混凝土爲主要建材之一，具可塑性、經濟性、耐火性，及耐久性等優點，然而如果材料配比不當，施工不良或超載等現象發生時，則容易造成混凝土表面發生龜裂，大氣中所含之氯離子和氧氣易穿透裂縫侵至鋼筋處而造成鋼筋腐蝕，因而鋼筋會發生體積膨脹而加速混凝土龜裂之擴張，如此惡性循環，將降低其耐久性。

鋼筋混凝土之耐久性可定義爲具有抵抗其性質變化之能力。即可長久保持其原狀，品質與服務性。由於混凝土爲一種複合材料，其組成材料之性質與配比會影響混凝土性質，因此使用之水泥種類、骨材、拌合水、摻料、氯化物含量等都需加以規定。另外對單位水泥用量、水灰比、空氣含量等配比都必須合理。而在工程設計方面如保護層厚度、裂縫寬度限制，混凝土强度等應加注意，同時在施工階段如養生條件、夯實性佳，或使用熱浸渡鋅鋼筋，環氧樹脂鋼筋或安裝陰極防蝕，混凝土表面塗裝防水材料等都是可確保長期使用耐久性之影響參數。參考文獻1列有日本、美國、英國、法國及挪威等先進國家制定之海洋混凝土結構物耐久性規範。

*省交通港灣技術研究所港工材料組組長

由於混凝土之物理及化學性質隨時間與環境之天候、物性、化性及生物性之作用而變。在長期環境作用下，則混凝土本身會與腐蝕因子作用而產生腐蝕生成物，可能阻止或加强其破壞性。因此充分瞭解現地材料之耐久性，最合理的方法爲有計劃地進行曝露試驗，以便能清晰地瞭解混凝土材料之長期性能變化，並可提供工程設計之依據。這是近年來各先進國家投入大量財力、物力及人力進行大氣及海洋曝露試驗之原因，也是本章研討之目的。

二、國內外混凝土試體曝露試驗介紹

以上就台灣省交通處港灣技術研究所、美國陸軍工兵署、美國拉貴腐蝕技術中心、日本運輸省港灣技術研究所、日曹專精營建公司、日產化工公司、日本建設省建築研究所及英國能源部等單位所進行混凝土試體的曝露試驗作扼要之介紹。

(一)、台灣省交通處港灣技術研究所

港研所爲探討混凝土之耐久性，於民國75年7月開始進行「港灣鋼筋混凝土結構物耐久性研究」計劃與本研究計劃，而於民國77年初規劃曝露試驗工作，並邀請各界專家學者研商，同年10月陸續投入龐大的人力製作試體。試體擺放情形如下：

1. 本所海水循環水槽：海中區擺置 1305 個試體，潮汐帶擺放 1017 個試體（圖 1 A）。
2. 台中港 3 號碼頭（貯木池碼頭斜坡上）潮汐帶擺放 81個試體（圖 1B）。
3. 本所試驗大樓三樓平房屋頂上，距台中港碼頭約25公尺處之大氣區共擺放 270 個試體（圖 1C）。

本研究仍在初期執行階段，現階段尚無試驗數據，僅就有關曝露試驗之規劃工作要項說明如后：

1. 試體大小：直徑15公分，高度30公分之圓柱體。
2. 保護層厚度：在圓柱試體配置三支鋼筋，其保護層厚度分別爲 2 公分、4 公分及 7 公分。
3. 鋼筋：有些試體不加鋼筋，而埋設鋼筋者採用直徑 1 公分、長度 27 公分，表面刨光之之圓型鋼筋，其兩端亦加工磨光並以丙酮清洗鋼

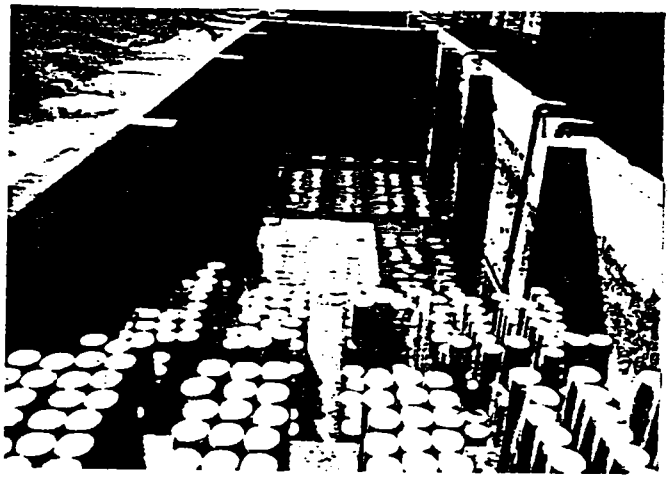


圖1a　港研所海水循環水槽

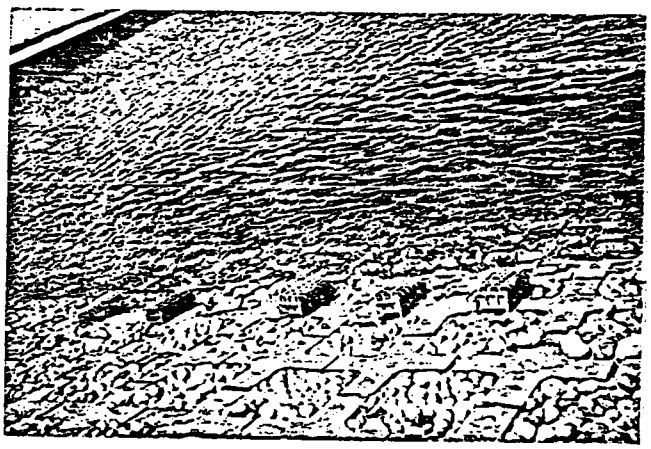


圖1b　台中港斜坡上之曝露試驗

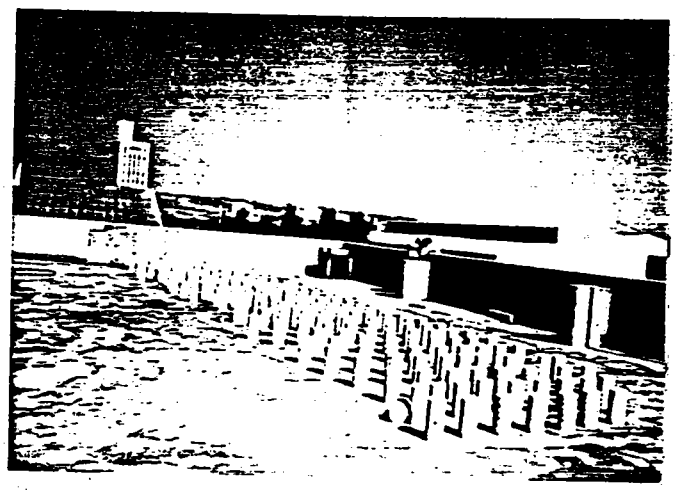


圖1C　港灣技術研究所大氣曝露試體擺置情形

筋表面上之油指及稱重。

4. 水灰比：採用0.4、0.5及0.7三種。
5. 水泥種類：卜特蘭水泥一型，二型及五型三種。
6. 摻料：加飛灰(20%)、矽灰(10%)或不添加任何摻料。
7. 混凝土配比與澆置依美國混凝土學會及美國材料與試驗學會 (ASTM) 之規範執行。澆置完成後之試體置於養生室控制溫度在23 ± 0.7℃以下，經28天後，再置於大氣養生 4 至 5 天後，在試體兩端上下各約 2 公分及底側均塗上環氧樹脂，避免海水由兩底端滲進混凝土試體，密封完成後將試體搬運至試驗大樓屋頂上擺放 (圖 1C) 。
8. 測試：將擺放於曝露現場之試體，按時取回試驗室分析腐蝕速率，劈裂試體以便觀測腐蝕型態並以複製膜求腐蝕面積，而以鋼筋軸向兩側各12公分共24公分之範圍爲量測區域。將鋼筋表面之鐵銹以化學藥品清洗，稱重並與試驗前磨光無銹之鋼筋比較，可得鋼筋銹蝕之重量損失數量。

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

經過長期曝露，按時試驗分析結果，則可研判使用何種保護層厚度、水灰比、水泥種類和摻料等參數對鋼筋混凝土銹蝕之影響性。

本所於民國77年10月1日擺放試體於台中港3號碼頭，78年8月20日擺放試體於本所之海水循環水槽中，而79年5月擺放試體於大氣區，目前擺放在台中港及海水循環水槽的試體已有一年齡期之測試結果，詳見本所80年度研(九)港灣鋼筋混凝土結構物耐久性研究報告，在此不加贅述。

(二)、美國崔特島曝露試驗場(Natural Weathering Exposure Station Treat Island, U. S. A.)

1. 選址理由：本地區之平潮差爲5.5公尺，最高可達 9.15 公尺，每年平均凍融循環有 135 次，有時可達 242 次，在如此嚴酷的乾濕與凍融反覆作用下，混凝土材料容易因破壞而失去其強度 (圖二) [2]。
2. 研究範圍：在此地有美國陸軍工兵署，美國墾務局，Mobil石油公司及加拿大礦業與能源技術中心等四個單位進行研究[2]、其研究範圍

分別概述如下：

(1)美國陸軍工兵署

本單位所進行之研究包括鋼筋及預力混凝土、纖維混凝土、高分子混凝土、硫磺含浸混凝土、混合材及强塑劑等，歸納代表性結果如下[3～5]：

a.使用 C_3A 含量高與鹼含量高之水泥及使用具鹼性反應之骨材和未加波索蘭材料之條件下在自然曝露情況下，顯示有嚴重之破壞現象。

b.使用骨材種類對混凝土之抗海水性有顯著之影響。

c.RC與PC經過25年之曝露試驗結果，發現持續荷重與破壞荷重無關，保護層厚度大於20公分，則不會發生腐蝕。使用鋁粉之膨脹性水泥漿由於氫脆現象，會降低PC鋼材之韌性，導致相當危險之腐蝕現象。

d.使用輸氣劑對抗凍融具有良好之效果。

e.使用高爐石水泥可節省35%水泥含量，而且可增加抗硫酸鹽侵蝕及鹼性骨材反應之能力　。

(2)美國墾務局

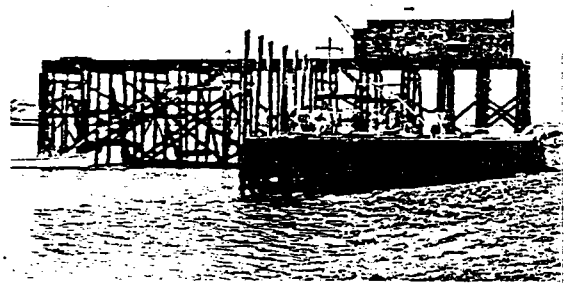
在此進行三項研究包括：①注膠混凝土與高分子混凝土，②船閘門修復材料與工法及③水壩保固結構等之耐久性研究。

(3)Mobil石油公司

該公司在此曝露試驗場進行有關高强度輕質混凝土在海岸環境下之長期行爲，這是北海重力式平台建造時，所最關切之問題。

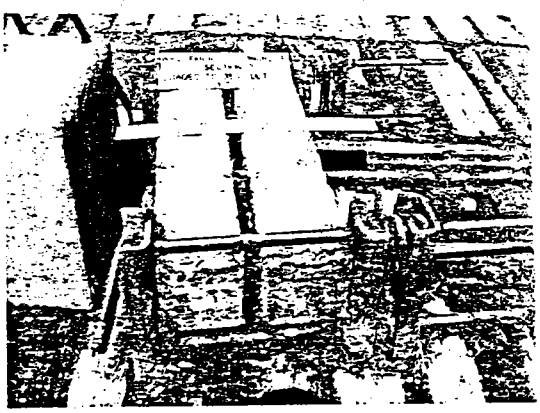
(4)加拿大礦業能源技術中心(CANMET)

CANMET自 1978起曾與加拿大之 New Brunswick大學合作進行九個階段之研究、其目的在決定填加高爐石、飛灰、矽灰與强塑劑後之混凝土耐久性及達到節省水泥與減少公害之效果。研究範圍如表一所示 [2, 6]。



(2a) 崔特島上置放試體與停泊檢視船之木製平台

(2b) 置放於海灘上之混凝土試體



(2c) 施加應力之纖維混凝土樑之耐久性試驗

(2d) 長年試驗後混凝土破損情形之比較

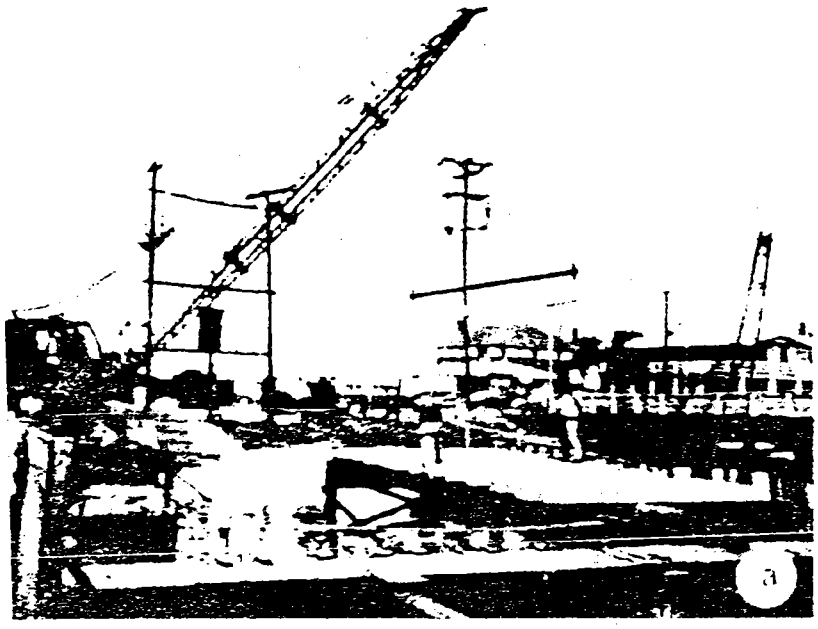
圖二 美國崔特島曝露試體擺放及破損情形[2]

表一　CANMET在崔特島暴露試驗場進行之研究計劃概況〔2,6〕

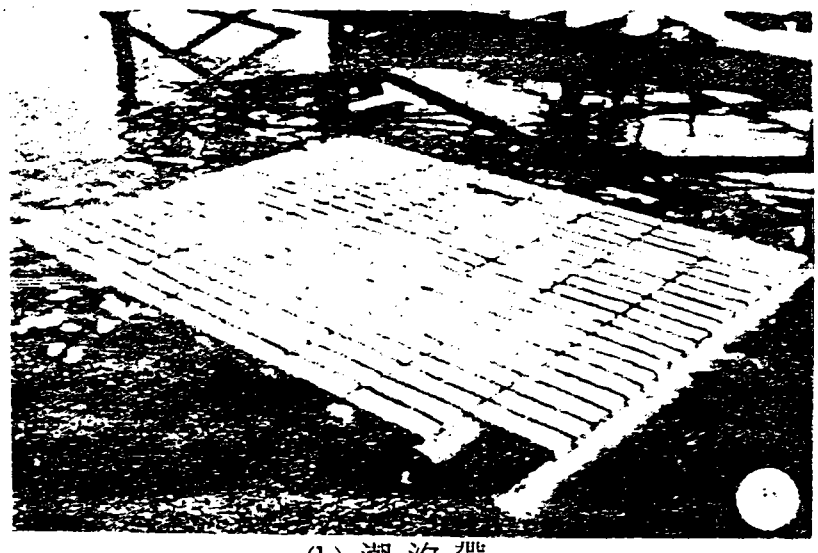
期別	開始時間	水泥種類（ASTM型別）	使用摻料	骨材
1	1978	I	高爐石、輸氣劑	卵石
2	1979	I , II , V	飛灰、輸氣劑、高爐石	卵石
3	1980	I , V	飛灰、輸氣劑	膨脹性頁岩
4	1981	I , V	飛灰、輸氣劑、 矽灰	白雲石之石灰岩石
5	1982	I	矽灰、輸氣劑	白雲石之石灰岩石
6	1983	II	矽灰、輸氣劑、矽灰、強塑劑	膨脹性頁岩
7	1984	II	矽灰、輸氣劑、強塑劑	膨脹性頁岩
8	1985	I	飛灰、輸氣劑、強塑劑	卵石
9	1986	I	飛灰、高爐石、矽灰、輸塑劑、強塑劑	卵石

(三)、美國拉貴腐蝕技術中心(LaQue Center for Corrosion Technology Inc., U.S.A)

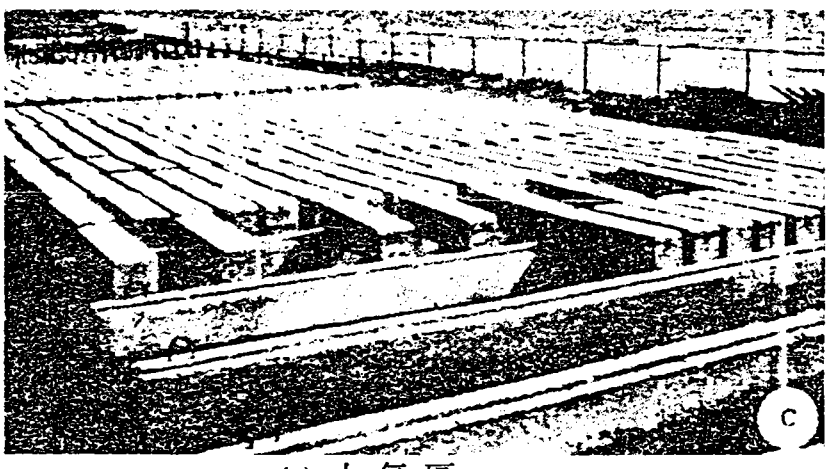
本單位在美國北卡州 Kure 海灘上，設置兩個大型的大氣曝露試驗場，佔地約 15,000m² ,分別距海岸線 25公尺及 250公尺，可承受嚴酷之海洋大氣條件及大量之日曬與溫和之海岸曝露條件。自 1935 年起就有各種試體在此進行曝露試驗，而在 1961年 8月開始有各項鋼筋混凝土之海洋大氣曝露試驗在此進行，圖三爲試體擺放情形，表二～表四及圖四爲經過 11 年曝露試驗後所顯示之結果，圖五爲目測估計鋼筋銹蝕之程度，結果顯示使用 ASTM A615和低合金鋼之鋼筋與鋼筋表面塗裝一層金屬塗料比較，前者會造成嚴重之龜裂與剝落現象，而後者具有塗膜者，防蝕效果較佳[7]。



(a) 潑 濺 區



(b) 潮 汐 帶



(c) 大 氣 區

圖三　美國拉貴腐蝕技術中心曝露試驗情形[7]

表二　鋼筋混凝土試體，大氣曝露試驗結果(7)

鋼筋使用材料	塗3mil厚鎳材		塗1mi厚鎳材		塗8mil厚鎳材		ASTMA615鋼材		Ni-Cu-Cr合金鋼材		4340型鋼材	
混凝土保護層厚度	1/2英吋	11/2英吋	1/2英吋	11/2英吋	1/2英吋	11/2英吋	1/2英吋	11/2英吋	1/2英吋	11/2英吋	1/2英吋	11/2英吋
I型水泥，7.4加侖加摻料	輕微龜裂 (6-40)	未龜裂 (1)	嚴重龜裂 (25-45)	未龜裂 (0-9)	—	—	嚴重剝落 (25-60)	未龜裂 (1-25)	嚴重剝落 (50-75)	未龜裂 (0-2)	嚴重剝落 (10-50)	—
I型水泥，8.0加侖加摻料	輕微龜裂 (40-60)	未龜裂 (0-25)	嚴重龜裂 (15-65)	未龜裂 (3-6)	—	—	嚴重剝落 (75-95)	輕微龜裂 (0)	嚴重剝落 (85-95)	未龜裂 (5-35)	嚴重剝落 (75-95)	未龜裂 (0-5)
I型水泥，7.4加侖未加摻料	非常細微之裂紋 (0)	未龜裂 (0-13)	嚴重龜裂 (10-20)	未龜裂 (0)	嚴重龜裂 (1)	未龜裂 (1)	嚴重龜裂 (5-25)	未龜裂 (5-25)	—	未龜裂 (1-10)	—	—
I型水泥，8.0加侖，未加摻料	些微龜裂 (15-30)	—	嚴重龜裂 (10-25)	未龜裂 (0-3)	嚴重龜裂 (1-5)	未龜裂 (60-75)	嚴重剝落 (60-75)	未龜裂 (0-10)	嚴重龜裂 (56-70)	—	嚴重剝落 (30-80)	—
II型水泥，7.4加侖，加摻料	非常細微裂紋 (5-35)	未龜裂 (0)	—	—	—	—	嚴重剝落 (30-90)	未龜裂 (1-10)	—	—	—	—
II型水泥，8.0加侖·加摻料	中度龜裂 (40)	未龜裂 (1-4)	—	未龜裂 (1-4)	—	—	些微剝落 (95)	未龜裂 (30-50)	—	—	—	—

說明:1.龜裂或剝落爲對混凝土試體整體外觀結果。

2.括號內之數據爲在試體中抽取四支鋼筋發現其生銹之百分率。

3.7.4加侖表示製作混凝土時，每一袋水泥加7.4加侖之水，可歸類爲品質優良。

8.0加侖則表示製作混凝時，每一袋水泥加8.0加侖之水，歸類爲品質不良。

表三　鋼筋混凝土試體潑濺區曝露試驗結果(7)

鋼筋使用材料	塗3mil厚鎳材		塗1mi厚鎳材		塗8mil厚鎳材		ASTMA615鋼材		Ni-Cu-Cr合金鋼材		4340型鋼材	
混凝土保護層厚度	1/2英吋	11/2英吋	1/2英吋	11/2英吋	1/2英吋	11/2英吋	1/2英吋	11/2英吋	1/2英吋	11/2英吋	1/2英吋	11/2英吋
I型水泥，7.4加侖加摻料	輕微龜裂 (10-25)	未龜裂 (0)	—	未龜裂 (0)	—	—	嚴重剝落 (9-26)	未龜裂 (0-8)	嚴重剝落 (45-60)	未龜裂 (0-2)	嚴重剝落 (40-60)	—
I型水泥，8.0加侖加摻料	輕微龜裂 (20-75)	未龜裂 (1-2)	—	相當輕微龜裂 (0)	—	—	嚴重剝落 (9-95)	輕微龜裂 (2-17)	嚴重剝落 (50-100)	未龜裂 (2-40)	嚴重剝落 (60-100)	
I型水泥，7.4加侖未加摻料	中度龜裂 (2-7)	未龜裂 (0-1)	嚴重龜裂 (3-25)	相當輕微龜裂 (0-1)	中度龜裂 (0-1)	未龜裂 (0)	嚴重龜裂 (10-40)	未龜裂 (0-5)	—	相當輕微龜裂 (0)	—	—
I型水泥，8.0加侖，未加摻料	嚴重龜裂 (10-25)	—	中度龜裂 (2-8)	未龜裂 (0-3)	嚴重龜裂 (0-10)	相當輕微龜裂 (0-10)	嚴重龜裂 (12-19)	輕微龜裂 (12-50)	嚴重剝落 (5-75)	嚴重龜裂 (2-12)	嚴重剝落 (50-80)	—
II型水泥，7.4加侖，加摻料	嚴重龜裂 (40-50)	輕微龜裂 (3-12)	—	—	—	—	嚴重剝落 (55-100)	未龜裂 (5-30)	—	—	—	—
II型水泥，8.0加侖·加摻料	中度龜裂 (15-95)	—	—	未龜裂 (1-15)	—	—	嚴重剝落 (100)	嚴重龜裂 (90-100)	—	—	—	—

說明:1.龜裂或剝落爲對混凝土試體整體外觀結果。

2.括號內之數據爲在試體中抽取四支鋼筋發現其生銹之百分率。

3.7.4加侖表示製作混凝土時，每一袋水泥加7.4加侖之水，可歸類爲品質優良。

8.0加侖則表示製作混凝時，每一袋水泥加8.0加侖之水，歸類爲品質不良。

表四　鋼筋混凝土試體，在潮汐帶之曝露結果(7)

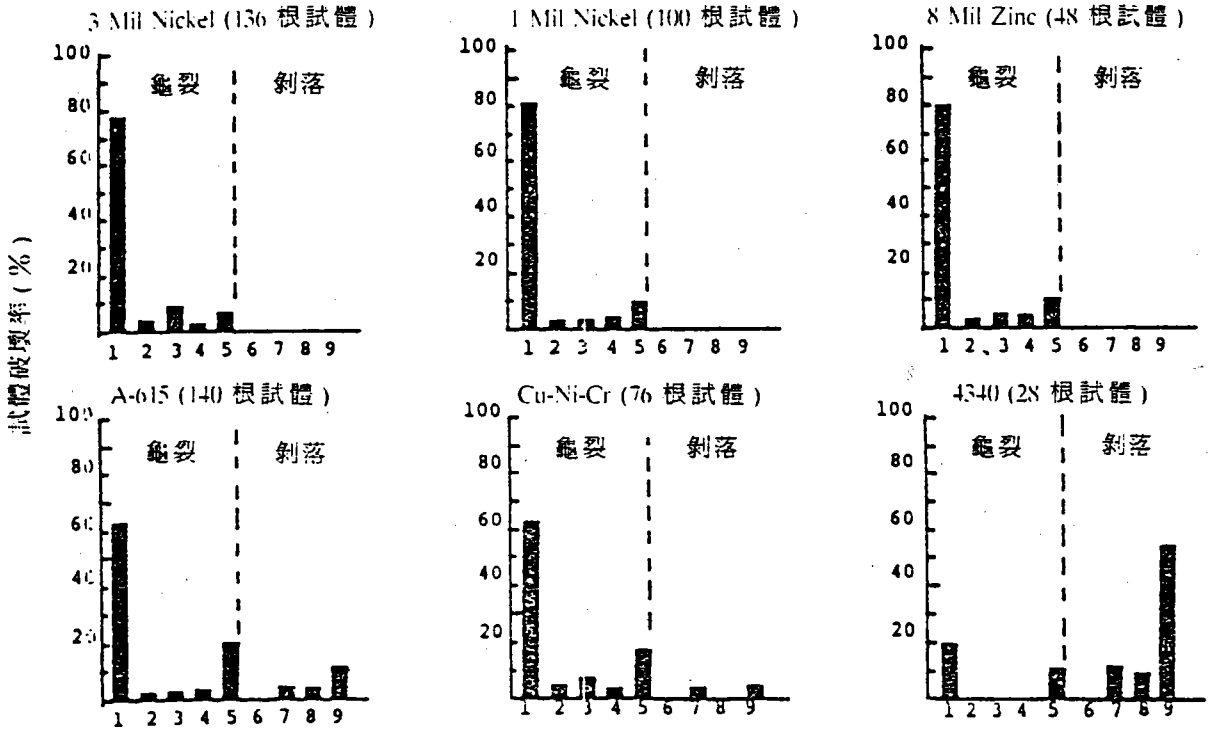
鋼筋使用材料	塗3mil厚鎳材		塗1mil厚鎳材		塗8mil厚鎳材		AASTMA615鋼材		Ni-Cu-Cr合金鋼材		4340型鋼材	
混凝土保護層厚度	1/2英吋	11/2英吋	1/2英吋	11/2英吋	1/2英吋	11/2英吋	1/2英吋	11/2英吋	1/2英吋	11/2英吋	1/2英吋	11/2英吋
I型水泥，7.4加侖加摻料	未龜裂 (1-2)	未龜裂 (1-3)	未龜裂 (2-8)	未龜裂 (1)	—	—	—	未龜裂 (9-14)	未龜裂 (1-2)	未龜裂 (4-10)	—	—
I型水泥，8.0加侖，加摻料	未龜裂 (1-2)	未龜裂 (1-4)	未龜裂 (4-6)	未龜裂 (1-2)	—	—	未龜裂 (1-4)	未龜裂 91-2)	未龜裂 (4-8)	未龜裂 (3-4)	—	—
I型水泥，7.4加侖，未加摻料	未龜裂 (1-3)	未龜裂 (1-4)	未龜裂 (1-13)	未龜裂 (3-6)	未龜裂 (0)	未龜裂 (0)	未龜裂 (1-5)	未龜裂 (6-8)	—	—	—	—
I型水泥，8.0加侖，未加摻料	未龜裂 (1)	未龜裂 (0-1)	未龜裂 (0-10)	未龜裂 (1)	未龜裂 (0)	未龜裂 (0)	未龜裂 (12-16)	未龜裂 (15-20)	未龜裂 (10-15)	未龜裂 (10-14)	—	—
II型水泥，7.4加侖加摻料	未龜裂 (0-1)	未龜裂 (1)	—	—	—	—	未龜裂 (1-2)	未龜裂 (3-5)	—	—	—	—
II型水泥，8.0加侖加摻料	未龜裂 (2-6)	未龜裂 (0-2)	—	未龜裂 (1-2)	—	—	未龜裂 (5-10)	未龜裂 (2-5)	—	—	—	—

說明：1.龜裂或剝落爲對混凝土試體整體外觀結果。

2.括號內之數據爲在試體中抽取四支鋼筋發現其生銹之百分率。

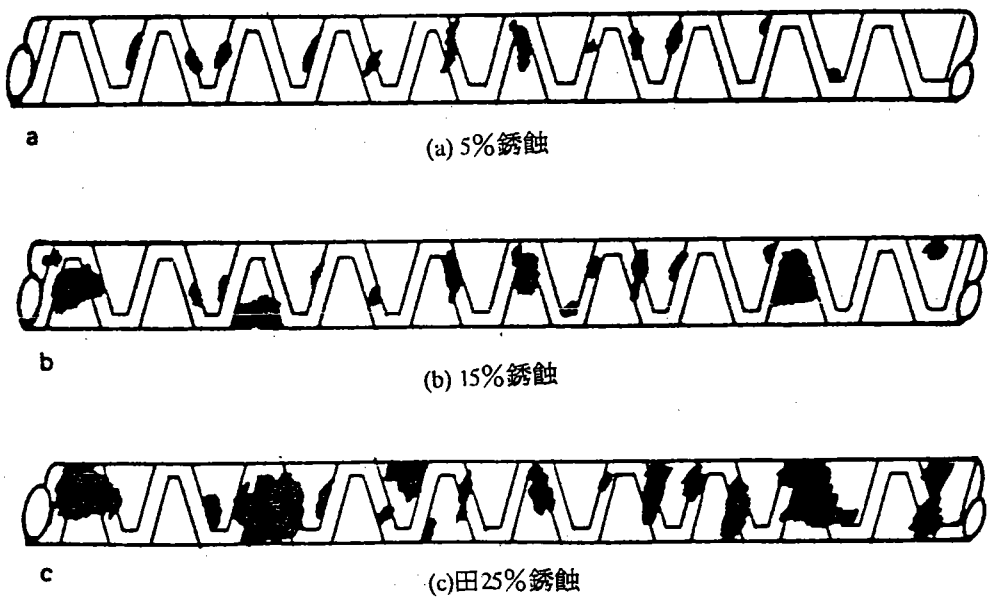
3.7.4加侖表示製作混凝土時，每袋水泥加7.4加侖之水，可歸類爲品質優良

8.0加侖則表示製作混凝土時，每袋水泥加8.0加侖之水，烈歸類爲品質不良



說明　1 未破壞　　4 中度龜裂　7 有點剝落
2 細微裂紋　5 嚴重龜裂　8 中度剝落
3 有點龜裂　6 細微剝落　9 嚴重剝落

圖四　混凝土試體埋設各種不同型態之鋼筋及塗佈後經十一年大氣曝露後之破壞情形[7]



圖五　目測評估鋼筋銹蝕之程度範例

(四)、日本運輸省港灣技術研究所(Port and Harbour Research Institute, Ministry of Transport, Japan)

1. 鹽害實況調查

棧橋式碼頭較容易受鹽害，碼頭上之樑約有27%受鹽害。

2. 水泥種類及內在與侵入性氯離子相關的長期曝露試驗

本實驗的曝露條件是在潮汐區，材齡10年及保護層厚度7公分。分析長期曝露結果及內在氯離子之影響性，同時亦檢討水泥種類之影響及測定自然電極電位。

(1)使用條件

使用的水泥爲普通卜特蘭水泥(記號NO及N2)、早强卜特蘭水泥(記號HO及H2)，中庸熱卜特蘭水泥(記號MO)，B型高爐水泥(記號BO及B2)及高鋁水泥(記號AL)、N2、B2之水泥爲NO、BO(1970)年，當時市售之水泥)再填加化學石膏以$SO_3^=$重量2%。1969年日本JIS R5210～5213曾修正$SO_3^=$量增加2%，因此水泥中$SO_3^=$含量變化對混凝土長期耐海水性之影響必需加以檢討。但在本研究有關此點判斷爲對鹽害無影響，因此未提及，而粗骨材及細骨材使用神奈川縣相模川所出產者。

混凝土的拌合水使用自來水及海水。海水之化學成份如表五所示。減水劑採用波索蘭(Pozzolanna No.5L)，空氣含量之調節使用AE劑No.303。

鋼筋則使用JIS RG3112規定直徑爲9㎜的竹節鋼筋,混凝土中之埋入長度爲18cm，埋入之鋼筋時，使用10%拘綠酸銨酸溶液等使其保持光澤狀態。

(2)試體製作

混凝土配比設計爲粗骨材最大粒徑爲25㎜，水泥用量290kg/m^3，坍度5cm，空氣含量4%，配比設計如表六所示。試體的大小爲直徑15 cm高30cm圓柱型試體，爲埋入鋼筋觀察腐蝕用，同時在試體之上下兩端以切割機切斷。用於混凝土中性化試驗，試體埋入鋼筋數量爲每一個試體3支，保護層厚度分別爲2、4及7公分。利用電化學方法測定試體鋼筋的自然電極電位，判斷是否已發生腐蝕，將各鋼筋上端開一個直徑1㎜之孔洞，將之接於引導線，以利量測。混凝土

之攪拌是使用容量200公升强制攪拌機。混凝土之在20℃恒溫室內進行澆製、混凝土分二層澆注，每層以棒狀振動機搗固，鋼筋腐蝕試驗試體及自然電極電位測定之試體，混凝土澆至上面後，將鋼筋固定器具拆下，自表面4公分部位以振動機再加以搗固，混凝土表面再以鏝刀加以修飾。

(3)試體養生及曝露

混凝土澆注成型後，靜置於恒溫室內，翌日拆模後置於標準養生水槽(21℃)中養生7天(早强卜特蘭水泥養生3天)，然後置於海水循環水槽之最嚴酷腐蝕環境的潮汐帶上。

(4)測定項目

(Ⅰ)混凝土氯離子含量

將試驗齡期10.年的試體，在保護層厚度2、4、7cm的鋼筋旁各採取5公克的混凝土，量測其所含氯離子之數量。

(II)混凝土中鋼筋腐蝕狀況

將試驗齡期十年的試體劈裂，取出鋼筋觀察其表面之腐蝕狀況，並於劈裂後立即進行中性化試驗。取出之鋼筋以肉眼觀察並將腐蝕範圍描繪之，然後利用面積儀測定腐蝕面積。

(III)混凝土中鋼筋之自然電極電位

利用銀－氯化銀參考電極測定，測定試體浸於海水狀況下之鋼筋自然電極電位分佈特性。

(5)試驗結果

(Ⅰ)有關鋼筋腐蝕之測定

齡期十年時，測定使用不同的水泥，拌合水的試體及每一種保護層厚度等，分別觀察數個試樣及量測鋼筋表面腐蝕面積。

使用各種卜特蘭水泥者，以自來水拌合者27個試體，其中有4個發生腐蝕，海水拌合者36者個中有12個腐蝕。B種高爐水泥用自來水拌合者9個中有1個腐蝕，海水拌合則有18個中有2個腐蝕。使

表五　使用海水爲拌合水之化學成份

採水樣日期	比重 (20℃)	pH值 (20℃)	化學成份 (mg/l)						
			Na^+	K^+	Ca^+	Mg^+	Cl^-	$SO_4^=$	CO_2
1970年2月3日	1.024	8.03	10,125	387	376	1,180	17,136	2,412	65

表六　混凝土之配比設計

水泥種類	編號	拌合水	粗骨材之最大粒徑 (mm)	坍度 (cm)	空氣含量 (%)	水灰比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	單位重 (kg/m³) 水 W	水泥 C	細骨材 S	粗骨材 G	減水劑 (I)	AE劑 (c.c)	水泥漿中Cl⁻含量 (%)
普通卜特蘭水泥	NO	淡水	25	6.6	3.4	52.7	37.0	153	290	740	1261	2.9	—	—
		海水	25	5.6	3.2	53.4	36.0	155	290	718	1277	2.9	—	0.277
	N2	淡水	25	6.4	4.0	54.5	37.0	158	290	743	1251	2.9	—	—
		海水	25	5.1	3.4	55.2	36.0	160	290	713	1270	2.9	—	0.235
早強卜特蘭水泥	HO	淡水	25	3.7	3.9	53.1	37.0	154	290	748	1258	2.9	—	—
		海水	25	5.7	3.1	55.2	36.0	160	290	711	1263	2.9	—	0.235
中庸熱卜特蘭水泥	MO	淡水	25	6.5	4.8	52.4	37.0	152	290	742	1263	2.9	—	—
		海水	25	4.6	4.0	53.1	36.0	164	290	720	1280	2.9	—	0.226
B型高鋁水泥	BO	淡水	25	3.5	3.0	52.4	37.6	152	290	738	1258	2.9	—	—
		海水	25	4.0	3.8	53.1	36.0	154	290	716	1274	2.9	—	0.226
	B2	淡水	25	4.2	3.8	54.8	37.6	159	290	720	1242	2.9	—	—
		海水	25	4.7	4.1	55.5	36.0	161	290	708	1258	2.9	—	0.237
高鋁水泥	AL	淡水	25	6.3	3.1	52.1	37.6	151	290	731	1256	2.9	20	—
		海水	25	5.1	5.5	52.8	36.0	153	290	716	1272	2.9	—	0.225

表七　鋼筋腐蝕面積率

單位：%

水泥種類	拌合水	保護層厚度 2 cm 個別	2 cm 平均	4 cm 個別	4 cm 平均	7 cm 個別	7 cm 平均
普通卜特蘭水泥 (No+N2)	自來水	5.3 0.8 1.6 0.0	1.03	1.0 0.0 0.0 0.0	0.25	0.0 0.0 0.0 0.0	0.0
	海水	0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0	0.0	0.0 0.3 0.0 0.1 0.0 0.0	0.07	0.0 0.0 0.1 0.3 0.0 0.1	0.15
早強卜特蘭水泥 (HO)	自來水	0.0 0.0	0.0	0.0 0.0	0.0	0.0 0.0	0.0
	海水	2.0 4.5 4.3	3.6	0.0 0.0 0.0	0.0	0.0 0.0 0.0	0.0
中庸熱卜特蘭水泥 (MO)	自來水	0.0 0.0 0.0	0.0	0.0 0.0 0.0	0.0	0.0 0.0 0.0	0.0
	海水	0.0 1.8 0.8	0.87	0.0 0.0 0.0	0.0	0.5 0.8 0.0	0.43
B型高爐水泥 (BO+B2)	自來水	0.3 0.0 0.0	0.1	0.0 0.0 0.0	0.0	0.0 0.0 0.0	0.0
	海水	0.0 0.0 0.2 0.0 0.0 0.0	0.03	0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0	0.0	0.0 0.0 0.2 0.0 0.0 0.0	0.03
高鋁水泥 (AL)	自來水	0.0 0.2	0.1	0.0 0.1	0.05	0.0 0.0	0.0
	海水	2.3 1.3 2.1	1.9	1.7 0.5 2.0	1.4	1.5 1.3 1.4	1.4

用高鋁水泥者，自來水拌合6個中有2個腐蝕，而使用海水拌合則9個全部發生腐蝕。

鋼筋腐蝕之程度，均爲輕微且都未發生保護層剝落或混凝土表面有銹汁滲出之情形。銹的型態爲Fe_2O_3主成份的紅銹，使用高鋁水泥時，出現紅銹較多，保護層較薄時，亦出現同樣的情況。鋼筋上端部份（澆灌方向附近）的鐵銹較其他部位發生的面積爲大且厚，腐蝕鋼筋的周界混凝土並未發生中性化現象。

使用高鋁水泥，用海水拌合的混凝土鋼筋發生全部腐蝕的理由是高鋁水泥硬化齡期一天，無法拆模，時間太慢之故。鋼筋上端部份腐蝕較可能之理由是泌水影響或鋼筋固定架拆除後，補灌注的混凝土夯實不足變爲多孔質，但取出鋼筋時觀察結果並無異常，除使用高鋁水泥者外，鋼筋腐蝕情形在保護層厚度爲2、4、7公分之試體共有30個其中各有10個，3個及6發生腐蝕。

鋼筋腐蝕面積率之測定結果，如表七所示，腐蝕面積率係以鋼筋表面積50cm²爲基準計算。腐蝕面積依試體中所使用的水泥種類，拌合水及保護層厚度等變化而異。

（II）混凝土中鋼筋之自然電極電位

混凝土中鋼筋自然電極電位，依水泥種類與拌合水組合，每個試體有3根鋼筋(合計42個試體共126根鋼筋)，測定曝露開始時，自然電電位的歷年變化如圖六所示，依水泥種類不同有三個試體，各有三個保護層厚度爲2、4、7cm，每年1月、4月、7月及10月各測定一次共36個測定值加以平均，齡期5年依測定月之變動量相當地大。由圖六可見各種卜特蘭水泥，B型高爐水泥及高鋁水泥三組很明顯地有不同的自然電極電位的逐漸下移之傾向，齡期10年爲－710～－850mV。使用B型高鋁水泥之電位逐漸下移，電位較前二者爲高，齡期10年時爲－240～－270mV。

（III）Cl^-含量

齡期10年，混凝土試體中之保護層Cl^-含量如表八所示，由表中顯示，曝露於潮汐帶10年的混凝土中，其Cl^-含量非常的多。

(6)檢討

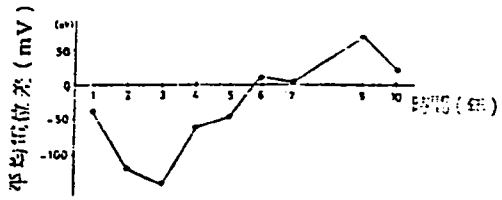
（I）內在Cl^-拌合水中含Cl^-之影響性。

拌合水對有無腐蝕及腐蝕面積率之影響，如表九及表十所示

，腐蝕發生比例，很明顯的使用海水拌合者較多，腐蝕面積率除了普通卜特蘭水泥外，海水拌合者亦顯現有較多之傾向。

海水拌合與自來水拌合的混凝土中鋼筋自然電極電位差之歷時變化如圖六所示。概略的趨勢爲齡期五年以前海水拌合者爲卑，尤其是齡期2年，此傾向特別明顯，齡期6年以後，海水拌合者，則變成稍微爲貴。自然電極電位如果說與鋼筋腐蝕有關，在潮汐帶部份，齡期2年以前用海水拌合者較自來水拌合者易發生腐蝕，但齡期5年以後，其差異逐漸減少。甚至有相反的傾向。雖然如此用海水拌合之情況，混凝土之Cl^-含量仍然較多。

(II)水泥種類之影響



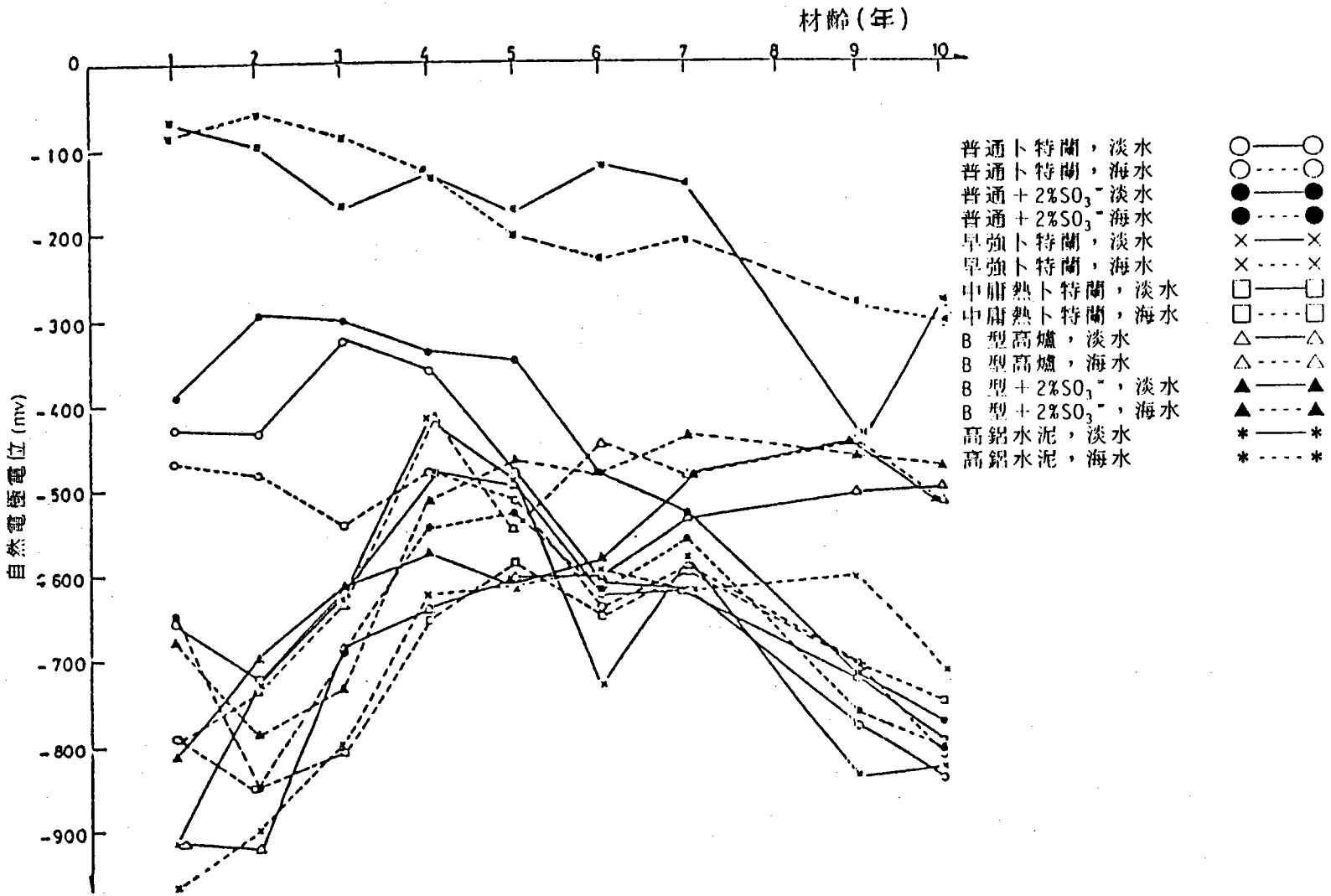
圖六　海水拌合與自來水拌合的混凝土中鋼筋電位差逐年變化

由表九及十判斷，使用自來水拌合的混凝土時，早强卜特蘭水泥、中庸熱卜特蘭水泥及B型高爐水泥防蝕性能優異，普通卜特蘭水泥及高鋁水泥防蝕性能稍差。而使用海水拌合時，B型高爐水泥防蝕性能優異，尤其是本試驗結果顯示使用B型高爐水泥海水拌合混凝土之防蝕性能較用普通卜特蘭水泥自來水拌合混凝土爲佳，值得加以注意。如前述使用各種卜特蘭水泥，B型高爐水泥和高鋁水泥時，自然電極電位之影響傾向不同。

若以自然電極電位判斷，如圖七所示，使用各種卜特蘭水泥及高鋁水泥之混凝土中鋼筋有漸易發生腐蝕，而使用B型高爐水泥之混凝土中之鋼筋有漸難發生腐蝕之傾向。此傾向不受拌合水之影響。

Cl^-含量之影響性，則使用普通與早强卜特蘭混凝土中含量較多，使用B型高爐水泥者次之，而使用高鋁水泥者爲最少。

(III)保護層厚度之影響



圖七　各種混凝土試體中鋼筋之自然電極電位之逐年變化特性[8]

保護層厚度對鋼筋腐蝕程度及腐蝕面積率之影響如表十一及表十二所示。

自來拌合與海水拌合之混凝土中鋼筋生銹之趨勢不同。自來水拌合時，保護層厚度之影響很明顯，保護層愈厚，腐蝕程度及腐蝕面積率減少，特別是保護層厚度7cm時，沒有發生腐蝕現象。而使用海水拌合時，保護層2cm之腐蝕最爲顯著，而以早强卜特蘭水泥的保護層2cm厚者之腐蝕量爲多。

表八　材齡十年之氯化物含量　　(單位：水泥漿重量%)

水泥種類	保護層(cm)	自來水拌合	海水拌合(1)	海水拌合時 Cl^-含量(2)	(1) − (2)
普通卜特蘭水泥(NO)	2 4 7	1.73 1.55 1.33	1.65 1.70 1.30	0.23	1.32 1.37 1.07
早强卜特蘭水泥(HO)	2 4 7	1.63 1.40 1.00	2.70 1.75 1.50	0.24	2.46 1.51 1.26
B型高爐水泥　(BO)	2 4 7	1.08 0.80 0.40	1.50 0.98 0.98	0.23	1.27 0.75 0.75
高鋁水泥　(AL)	2 4 5	0.36 0.16 0.08		0.23	

表九　拌合水對腐蝕率之影響　　(%)

水泥之種類	拌合水		平均
	自來水	海水	
普通卜特蘭水泥	33.3(4/12)	27.8(5/18)	30.1
早强卜特蘭水泥	0(0/6)	33.3(3/9)	16.7
中庸熱卜特蘭水泥	0(0/6)	44.4(4/9)	22.2
B型高爐水泥	11.1(1/9)	11.1(2/18)	11.1
高鋁水泥	33.3(2/6)	100(9/9)	66.7
平均(高鋁水泥除外)	11.1	29.2	

註：腐蝕發生率%　(/)係(腐蝕之個數/全體之個數)

表十　拌合水對腐蝕面積率之影響 (%)

水泥之種類	拌合水	
	自來水	海水
普通卜特蘭水泥	0.73	0.07
早强卜特蘭水泥	0	1.20
中庸熱卜特蘭水泥	0	0.43
B型高爐水泥	0.03	0.03
高鋁水泥	0.05	1.57
平均(高鋁水泥除外)	0.19	0.43

註：腐蝕面積率之平均值（％）

表十一　保護層厚度對腐蝕度之影響　　單位：腐蝕度

水泥之種類	拌合水	保護層厚度（cm）		
		2	4	7
普通卜特蘭水泥	自來水	3/4	1/4	0/4
	海水	0/6	2/6	3/6
早强卜特蘭水泥	自來水	0/2	0/2	0/2
	海水	3/3	0/3	0/3
中庸熱卜特蘭水泥	自來水	0/3	0/3	0/3
	海水	3/4	0/4	2/4
B型高爐水泥	自來水	1/2	0/3	0/3
	海水	1/6	0/6	1/6
合計	自來水	4/12(33.3%)	1/12(8.3%)	0/12 (0%)
	海水	7/19(36.8%)	2/19(10.5%)	6/10(31.6%)

表十二保護層厚度對腐蝕面積率之影響　單位：%

水泥之種類	拌合水	保護層厚度 (%) (cm)		
		2	4	7
普通卜特蘭水泥	自來水	1.93	0.25	0.0
	海　水	0.0	0.07	0.15
早强卜特蘭水泥	自來水	0.0	0.0	0.0
	海　水	3.60	0.0	0.0
中庸熱卜特蘭水泥	自來水	0.0	0.0	0.0
	海　水	0.87	0.0	0.43
B型高爐水泥	自來水	0.1	0.0	0.0
	海　水	0.03	0.0	0.03
合　　計	自來水	0.51	0.06	0.0
	海　水	1.13	0.02	0.15

(7)結論

(Ⅰ)齡期10年，容易發生腐蝕趨勢之影響要因

齡期10年，容易發生腐蝕傾向之影響要因，可由自然電極電位量測結果發現，拌合水與保護層之影響性較之水泥種類之影響性爲少，發現使用B型爐水泥具有良好的防蝕性能，雖使用海水拌合，然而防蝕性能，較之使用普通卜特蘭水泥，自來水拌合者良好。

(Ⅱ)齡期10年，影響腐蝕度及腐蝕面積率之要因

各種拌合水，水泥種類及保護層厚度對腐蝕面積率之影響性如表十三所示。有關腐蝕面積率，以水泥種類及保護層厚度影響性較大，尤其是當使用B型高爐水泥及自來水拌合，保護層厚度達7cm者之情況下，腐蝕量相當地少，整體而言，腐蝕量相當輕微。

(Ⅲ)氯離子含量之影響要因

不論使用何種水泥，試體中 Cl^- 含量隨保護層厚度增加而遞減，就使用水泥種類而言，以高爐水泥中 Cl^- 含量較少。

一般而言，拌合水、水泥種類及保護層厚度都會影響混凝土中

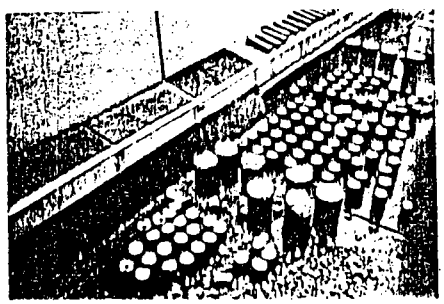
鋼筋腐蝕之事實早已被認定。齡期10年容易發生腐蝕傾向之影響因素中，以水泥種類最爲顯著。

表十三　各種腐蝕因子對腐蝕之影響性[8.9]

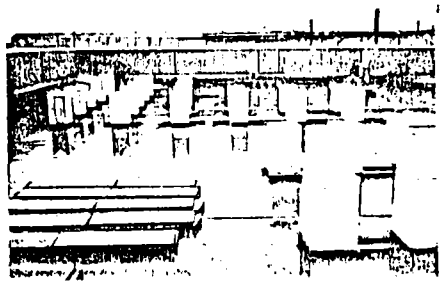
拌合水	腐蝕面積率	水泥種類	腐蝕面積率	保護層厚度	腐蝕面積率
自來水	19%	普通卜特蘭	40%	2公分	82%
海　水	43%	早强卜特蘭	60%	4公分	8%
		中庸熱卜特蘭	22%	7公分	4%
		B型高爐石卜特蘭	3%		

(五)、日曹專精營建公司(Nisso MASTER Builders Co. Ltd.)

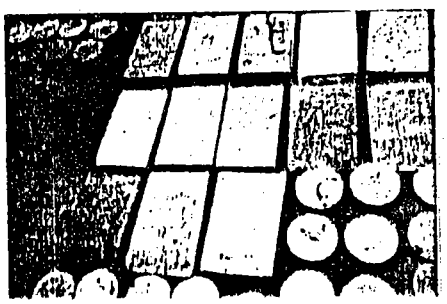
該公司中央研究所設於日本神奈川縣茅ヶ崎市靠近Sagami海灣。在試驗室屋頂上擺放許多鋼筋混凝土試體，測試各種腐蝕抑制劑抑制鋼



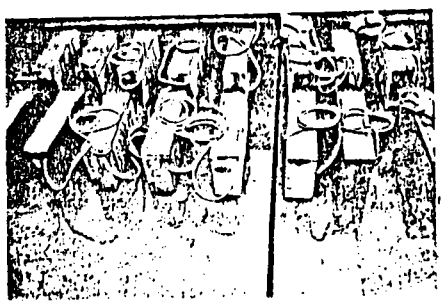
(a) 不同大小之圓柱體



(b) 不同之長方型試體直立或臥置



(c) 不同圓柱體及立方體



(d) 量測腐蝕電位

圖八　日曹專精營建公司大氣曝露試驗情形

筋腐蝕之效果(圖八)，將測試20年，定期進行試驗。

(六)、日產化學工業株式會社

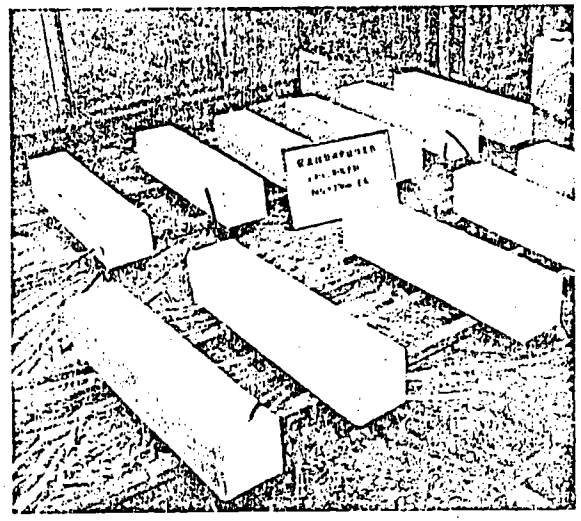
近年來，在混凝土製作及結構物施工，爲確保產品及結構體之使用性能優越，常需添加混凝土摻料(Concrete admixture)，另外爲混凝土體內含鹽量或受海風及海浪侵襲所造成鹽害亦需使用摻料防制。因此日產化工公司發展CANI及SMF在市場上行銷，CANI爲一種不含氯化物及鹼類之硝酸鈉(Calcium Nitrite),其主要功能爲可保持鋼筋防銹及使混凝土速凝。此產品有溶液及粉狀兩種形態，可依需要作適當使用。SMF爲一種高性能之減水劑，主要含磺化三聚氰胺甲醛樹脂(Sulfonated Melamine Formaldehyde Resin)。因爲具有如減水性能，早期强度高，少氣泡，較爲緩凝，因此製作之混凝土所具之性能較佳。

混凝土結構物由於受鹽害、碳化、凍傷和鹼性骨材反應，易於加速惡化，當發現惡化時，應儘速補修，使具恢復使用功能。日產化工公司發展RF-100，LINI-25及LINI摻料等產品在市面上行銷。

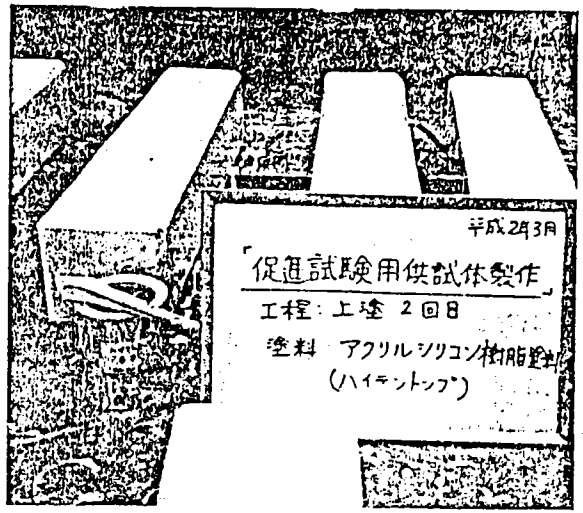
RF-100爲碳化惡化之修理材料，係使用無機性高分子矽酸鋰(Lithlium Silicate)水溶液。施工之方法稱爲REFRETE法，首先灌注FR-100於混凝土中，增强惡化混凝土之表面强度及改進保護材料之黏著性，除外具有使鋼筋周界之混凝土恢復鹼性，因此具有防蝕放果之功能。

同時在曝露之鋼筋周界之混凝土上塗刷RF防銹劑(RF Rust-Proof Paste)及含有腐蝕抑制劑SBR(Styrene Butadiene Rubber，苯乙烯丁烷橡膠)之高分子水泥(Polymer Cement)以利防蝕。然後再使用RF水泥砂漿，SBR基高分子水泥等含有防蝕劑者作爲補修剝落混凝土之材料，最後在混凝土表面塗刷RF防銹劑，保護整個混凝土表面受鹽害或碳化之侵襲。

LINI(Lithum Nitrite)具有防制混凝土中含氯化物造成鋼筋腐蝕及抑制鹼性骨材反應之功能，修理之方法爲先在剝落之混凝土處及曝露鋼筋塗刷LINI劑或SBR基高分子水泥含大量之硝酸鋰，而損壞之部位用LINI水泥砂漿填補或用LINI-SBR高分子水泥砂漿補修防制再度劣化，然後依劣化結構物劣化情況，有時混凝土表面需再塗刷LINI水泥砂漿爲面漆，以確保修理材料能維持長久之功效〔10]。爲了能夠對其產品及補修工法充分的瞭解，應進行曝露試驗及加速試驗，圖九爲填加CANI-30與未添加防銹劑之試體在親不知進行曝露之情形以及在該公司中央研究

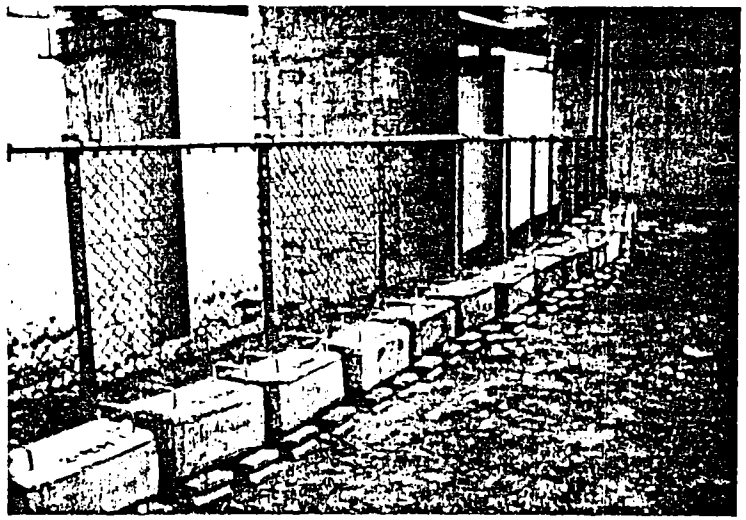


(a) 加速試驗塗裝底漆



(b) 加速試驗上塗漆

(c) 加速試驗塗裝面漆



(d) 在親不知施工現場曝露

圖九　日產化工公司所進行之加速與曝露試驗情形

所試驗室所進行之混凝土試體塗裝LINI加速試驗之試體情形。

(七)日本建設省建築研究所(Building Research Institute Ministry of Construction. Japan)

本研究所之曝露試驗場在其正門之右側，佔地1萬平方公尺，分爲建材，建材構件、結構單元及加速條件等四個區域，並有400m²之試驗場管理大樓概述如下：

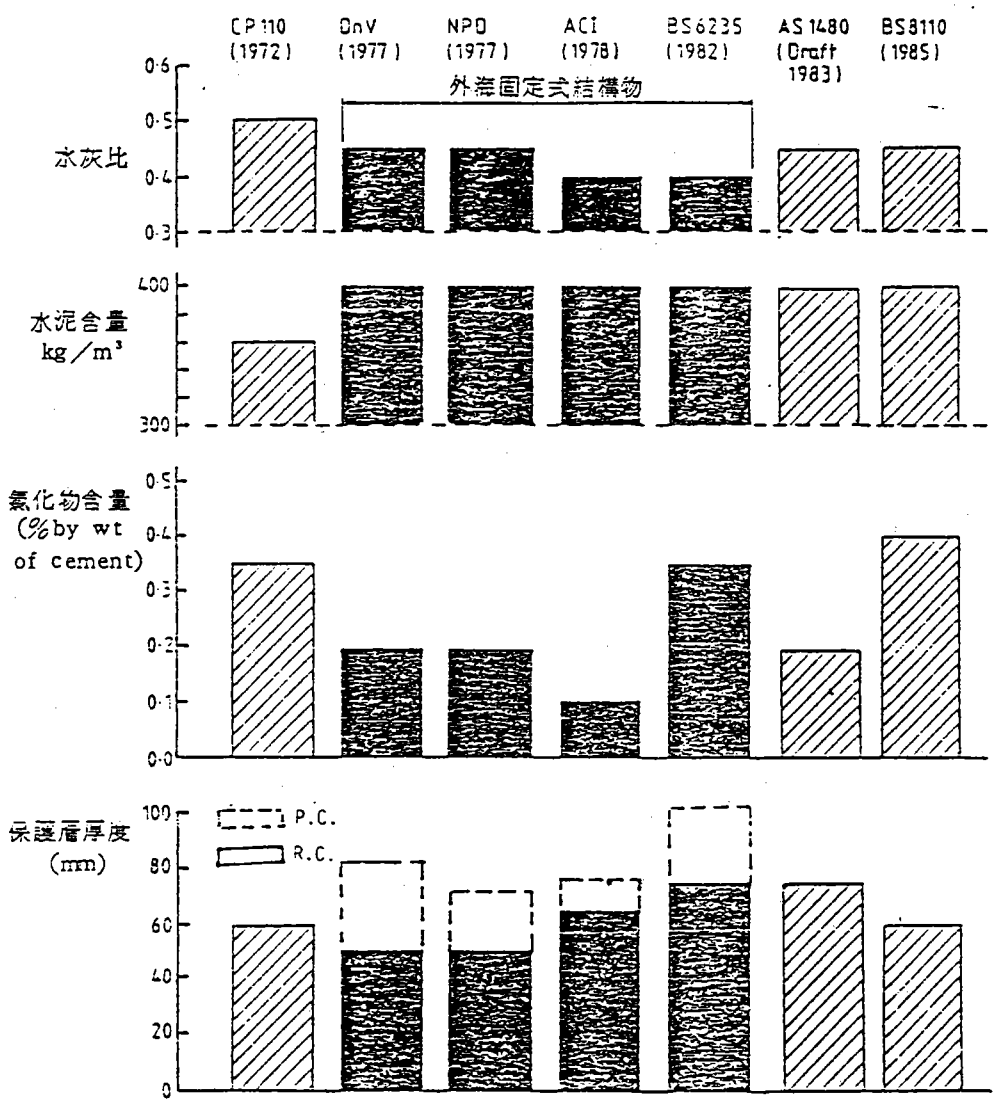
1. 建材區 (Area for Building Materials)
   (1)建築材料直接受到風雨及日光之作用，評估其耐久性。
   (2)試體大小70×70～150×300mm²，厚度爲100mm。
   (3)試體置於鋁製試驗架固定或嵌入，依向陽光之需要而面向南或北，與地面成0°(水平)，30°，45°，60°，90°(垂直)。等方向擺設。
   (4)材料種類有各種外裝磚造塗裝系統、防蝕塗料系統、塗裝鋼板，住宅修飾材、外裝用金屬板、防水材、油漆塗料、塑膠板及有機屋頂材料等。
   (5)各種形狀及大小之混凝土試體擺放於本區之地面上。
2. 建材及結構構件 (Area for builiding and structural elements)
   曝露之試體包括各種日本瓦片、石棉板和金屬板之屋頂材料，住宅所使用各種材料之外壁與門窗按實際大小安裝在試驗場中。
3. 加速條件區 (Area under accelerated condition)
   (1)特別安裝太陽光追蹤器試驗架，可隨太陽光方位和角度而移動。
   (2)人工海水試驗臺爲外徑5m，內徑約5m的圓環狀水槽(深爲80cm)。水槽中充滿人工海水，其中有各種海洋結構物材料，在流速約5knots情況下，測試全部或部份浸於海水中之性能之。
   (3)反覆負荷，施加應力之裝置，利用不同金屬之熱脹冷縮的差異性，施力於試片上，可反映氣候溫度之變化。
   (4)控制大氣溫、濕度條件，如結露現象爲鋼板發生劣化之要因，會發生有機塗料表面惡化和鋼板提早發生腐蝕之現象。

(八)、英國能源部及水泥與混凝土學會(Department of Energy, Cement and Concrete Association,

U.K.)

英國能源部與34個工業界贊助單位，於1976年開始執行海中混凝土(Concerte in the Ocean)研究計劃，其目的在解決有關海洋混凝土之石油生產平台，及其他結構物設計、施工及長期使用之結構行爲上之問題，研究計劃成果現已用於修正海洋混凝土設計與施工規範，本研究計劃曾在英國Portlant及Loch linnhe兩地作混凝土試體之海水中曝露試驗。

試驗結果發現龜裂方向與鋼筋同向，若裂縫寬度小於0.6㎜，則腐蝕不嚴重，若與鋼筋排列垂向，則若裂紋寬度大於1㎜，保護層厚度4公分亦無顯著之腐蝕現象發生。試驗結果可供修正現行規範，如圖十



圖十　各種海洋混凝土結構物設計規範建議值比較[11]

所示，在英國標準規範中1982年與1985年比較，大氣區之水灰比自原來之0.4更正爲0.45，RC保護層厚度自7.5公分修正爲6公分，而PC之保護層厚度自10公分修正爲6公分，而氯化物含量自原限制爲水泥重0.35%放寬至水泥重之0.4%，這些都是經過曝露試驗證實之結果才採用的[11]。

(九)其他海洋曝露試驗概說

在全世界曾進行長期性(十年以上)混凝土試體之曝露試驗結果如表14所示(11)，日本北海道土木試驗所在留萌港受潮風的海岸線上曾進行RC及PC試體曝露試驗、東北大學曾在八戶港防波堤試驗、三菱水泥公司在廣島港棧橋下之潮汐帶作混凝土及RC管之劣化試驗，依田博士曾在茅崎海岸作混凝土之浸泡試驗。岸谷博士指導下的建築研究所在東京灣作腐蝕試驗、日本港灣研究所與水泥學會共同在久里濱，酒田，鹿兒島等三處港灣以不同之水泥種類、品質($SO_3^=$含量)，配比、摻料、施工方法(有施工縫、工廠產品)RC及PC部份之耐力變化等項目作長期曝露試驗，目前仍在繼續研究中，茲介紹在海水中長期曝露之試驗結果範例如下。

1. 挪威的Gjφrv先生曾將混凝土長期浸於海水中試驗其強度變化，因該實驗具有組織及系統性，且爲長期性的實驗，故非常著名。該實驗共使用2500個試體置於挪威Trondhrein港內海中達三〇年，測定其強度變化，試體條件爲水泥種類(共16種，包括不同C_3A含量)，單位水泥用量、水灰比、使用摻料、拌合水、養護條件等參數。試驗結果範例如圖十一所示，其試驗結果可歸納如下：
   (1)材齡在三～五年以內，強度隨水化反應而遞增，爾後則海水之影響較水化作用爲大，故強度會降低。
   (2)卜特蘭水泥中之C_3A含量愈少，則抗海水性愈佳，但量過少，則反而抗海水之性能會降低。
   (3)添加波索蘭材料則會改善混凝土之抗海水性質，在C_3A含量愈多之情況下，其效果顯現愈佳。
   (4)養護期間之長短對於抗海水性能之效果並不太顯著。
   (5)作混凝土使用海水拌合，對於抗海水性能幾乎沒有影響。
2. 日本關博教授在日本港灣技術研究所服務期間曾於一九六九年開始進行混凝土試體長期浸泡於海水中之中性化實驗，其結果如下：

表14　混凝土之長期耐海水性試驗(11)

研究者	主　要 實驗要因	暴露條件 [1]暴露場所 [2]與海水關係 [3]暴露期間	試體及養生條件 [1]供試體形狀 [2]浸泡養生	混凝土品質 [1]水泥種類 [2]單位水泥量C [3]水灰比W/C	[1]劣化之判定方法 [2]其他	主要實驗結果
Gjφrv (1971)	水泥種類 ②單位水泥量C ③水灰W/C ④拌合水 ⑤養生方法	[1]挪威 Trondhelm港 [2]海水中(鹽分濃度3%水溫1-12℃) [3]30年間(於1936-43年開始試驗)	[1]10*10*75 cm [2]①材齡2 日拆模→海水中浸泡 ②材齡2 日拆模＋淡水中(6週)→大氣中(6週)→ 海水中	[1]①OPC，BSC，AC等16種 ②OPC之C_3A變化爲0-13% ③BAC爐渣量變爲85% [2]C=267-4-7kg/m^3 [3]W/C-0.55-0.72	[1]①抗壓强度 ②抗彎强度	①養生①之情況BSC，AC良好，OPC 之C_3A量愈少愈好，但若太少，反而降低耐海水性 ②添加火山灰則耐海水增强。耐海水性差之水泥則養生方法，C，W/C 等均爲要因。 ①拌合水對耐海水性沒有影響。
Campus (1965)	①水泥種類	[1]土耳其 Ostende港 [2]潮汐帶(鹽分濃度3.5%，pH=7.5-8) [3]30年間(1934-64年)	[1]①16cm立方 ②φ15*30cm(鋼筋保護層爲1，2，3及5cm)	[1]①OPC，RPC，BSC，AC等10種。 ②爐渣量，火山灰量變化 [2]C=350kg/m^3 [3]W/C=0.5	[1]①抗壓强度 ②化學分析 [2]海水曝露，同時進行淡水及$MgSO_4$浸泡實驗。	①OPC，RPC，PC＋火山灰，1年後，强度開始降低，11年後約減爲5個月之半。 ②BSC，AC，11年後之强度約增加爲5個月時之15-40%，AC則表面無缺損，最爲良好。 ③必須C＞350kg/m^3 ④鋼筋幾乎無腐蝕

續表 14 之 一

研 究 者	主 要 實驗要因	暴露條件 [1]暴露場所 [2]與海水關係 [3]暴露	試體及養生條件 [1]試體形狀 [2]浸泡養生	混凝土品質 [1]水泥種類 [2]單位水泥量C [3]水灰比W/C	[1]劣化之判定方法 [2]其他	主要實驗結果
日本港灣技術究所與水泥協會(1976)	①水泥種類 ②水泥中之SO_3含量 ③W/C ④摻料 ⑤海水條件	[1]久里濱 [2]潮汐帶及海水中 Cl^-：1.5-1.8 $*10_4$ ppm 比重：1.02， pH:7－8.1 水溫:8-24℃ [3]10年間 (1969-79)	[1]①φ15*30cm ②10*10*40cm [2]材齡2日拆模＋標準養生(7日)→海水中	[1]①OPC，RPC，MPC，BSC，SIC，FLC等6種。 ②SO_3量爲1.7-4.2%範圍3種 [2]及[3] W/C=0.65 C=300kg/m³， 及W/C=0.65， C=230 kg/m³ 素混凝土，AE減水劑	[1]①單位容積 ②抗壓强度 ③動彈性係數 ④長度變化 ⑤中性化 ⑥化學分析	①3-5年結果，海水條件影響標準養生。比較重量及長度變化性大，抗壓强度在海水中之潮汐帶影響大，MPC及BSC 强度略爲增大，SO_3並無影響。對標準養生，海水，潮汐帶强度約降低10%。
城ヶ島大橋(1969)	①水泥種類 ②W/C	[1]城ヶ島（神奈川） [2]潮汐帶 [3]12年間 (1959-69)	[1]10*30 cm [2]材齡3日拆模＋灑水養生(1日)＋空氣(10日)→海水中	[1]OPC，PPC，MPC等3種 [2]及[3] W/C=0.4 C=345kg/m³ W/C=1.05 C=170kg/m²	[1]①單位重量 ②抗壓强度 ③動彈性係數 [2]混凝土中鋼筋附著力試驗	①貧配比，3年至12年强度降低。 ②動彈性係數3年以後，幾乎無變化。

續表 14 之二

研究者	主要實驗要因	暴露條件 [1] 暴露場所 [2] 與海水關係 [3] 暴露期間	試體及養生條件 [1] 試體形狀 [2] 浸泡養生	混凝土品質 [1] 水泥種類 [2] 單位水泥量C [3] 水灰比W/C	[1] 劣化之判定方法 [2] 其他	主要實驗結果
三菱水泥 (1971)	①水泥種類 ②W/C	[1] 洞海灣 [2] 鹽分污染水 (pH=5−6) [3] 10年間 (1959-69)	[1] φ10×20cm [2] 材齡2日拆模+標準養生(26日)→海水中	[1] OPC，BSC，SIC，FIC等4種 [2] C=250，300，350 kg/m³ [3] W/C=53-73%	[1] 抗壓強度	①標準養生材齡5年，即強度增加，其後大略一定，在海水中材齡25年強度增加，後有慢慢降低之傾向。 ②FIC 最終抗壓強度爲最低,BSC，OPC比較好。 ③W/C，坍度，耐海水性關係並不明確。
GjOrv (1966)	①水泥種類	[1] 挪威 Trondelm港 [2] 潮汐帶 (氣溫年間之1/4，−5℃以下。1/10，−10℃以下) [3] 27年間 (1936-63)	[1] RC管 (20×20×230cm，鋼筋φ8cm保護層5cm) [2] 水平混凝土製作+濕潤(1週)+水中養生(5週)+空氣中養生(6週)→潮汐帶	[1] ①OPC，BSC，AC等9種 ②OPC，C_3A變化(3-11%) ③BSC，爐石粉量變化 [2] C=260-417kg/m³ [3] W/C=0.56-0.68	[1] ①龜裂發生狀態 ②重量變化	①劣化之主要原因爲凍結融解。 ②劣化現象最低情況：BSC(C=306kg/m³，W/C=0.56，C_3A=3%) ③OPC(C=417kg/m³，W/C=0.47，C_3A=6%)，少劣化。 ④含火山灰60%之水泥情況良好。 ⑤所有配比中C_3A>9%之OPC之劣化現象爲最大。

續表 14 之 三

研究者	主要實驗要因	暴露條件 [1] 暴露場所 [2] 與海水關係 [3] 暴露期間	試體及養生條件 [1] 試體形狀 [2] 浸泡養生	混凝土品質 [1] 水泥種類 [2] 單位水泥量C [3] 水灰比W/C	[1] 劣化之判定方法 [2] 其他	主要實驗結果
Lea & Watkins (1960)	①水泥種類 ②保護層	[1] 英國 Sheerness [2] 潮汐帶 [3] 23年間 (1929-52)	[1] RC管 (鋼筋保護層2.5-5cm)	[1] OPC，RPC，BSC，AC等11種 [2] C=215- 595kg/m³ [3] W/C=0.35-0.98	[1] ①鋼筋腐蝕剝離 ②抗壓强度	①劣化之主要原因，鋼筋腐蝕，以及保護層發生龜裂及剝落。 ②耐海水性之順序爲：AC>BSC>OPC ③同一配比OPC較BSC保護層需增加2.5cm
Deutsher Ausschuss fur Stahlbeton (1958)及(1966)	①水泥種類	[1] 德國 Wilhelmshaven [2] 海岸潮汐帶 [3] 19年間 (1929-1948)	[1] 20cm立方	[1] ①OPC，BSC，AC等13種。 ②BSC，爐渣量30及65%。 [2] C=265-400kg/m³。 [3] W/C=0.66-0.44	[1] ①抗壓强度 ②水泥量及水泥硬化之孔隙 ③重量變化	①OPC，爐渣含量少，BSC之貧配比劣化。 ②BSC（爐渣量50-70%）與AC之C=260 kg/m³具有十分的耐久性。 ③OPC(C_3A=10-13%)爲保持BSC同等耐海水性，則必須C>400kg/m³及W/C<0.45

續表 14 之 四

研究者	主要實驗要因	暴露條件 [1] 暴露場所 [2] 與海水關係 [3] 暴露期間	試體及養生條件 [1] 試體形狀 [2] 浸泡養生	混凝土品質 [1] 水泥種類 [2] 單位水泥量C [3] 水灰比W/C	[1] 劣化之判定方法 [2] 其他	主要實驗結果
PCA (1960)	①水泥種類 ②海水條件或氣象條件	[1] 美國 ①海水凍融作用 Cape Cod Canl，Mass. ②淡水凍融作用 Esopus與Hudson河交流點，N.Y. ③海水溫和 Augustine，Flo. ④海水溫和 New Port Beach，Calif. [2] 潮汐帶 [3] 15年～17年 (1941-42開始)	[1] RC管 斷面 30.5×30.5cm 保護層厚度3.8公分 [2] 澆置RC管，保持濕潤狀態	[1] 22種水泥 Calif.7種 一種AE摻入劑， 一種C_3A量變化。 [2] 及[3] C=279kg/m³ W/C=0.62 C=390kg/m³ W/C=0.44 C=390kg/m³ W/C=0.53	[1] 表面劣化，觀察鋼筋腐蝕現象	①保護層3.8cm，不能充分防止鋼筋腐蝕，溫和地域較寒冷地較具腐蝕傾向。 ②W/C愈小，劣化愈小。嚴酷海水條件下，使用AE混凝土，其W／C最大使用量依ACI規定。 ③AE混凝土，特別凍結地域效果較大。 ④C_3A變化在溫和地區之RC管試驗結果爲C_3A愈大則劣化愈大，海水作用有侵蝕現象，同樣浸泡於溶液中亦有侵蝕現象

續表 14 之 五

研究者	主要實驗要因	暴露條件 [1] 暴露場所 [2] 與海水關係 [3] 暴露期間	試體及養生條件 [1] 試體形狀 [2] 浸泡養生	混凝土品質 [1] 水泥種類 [2] 單位水泥量C [3] 水灰比W/C	[1] 劣化之判定方法 [2] 其他	主要實驗結果
US Army Corps of Engineers (1980)	①RC及PC耐海水性 ②纖維補强混凝土 ③polymer混凝土 ④硫磺含浸混凝土 ⑤混合材及高性能減水劑	[1] 美國緬因州Treat島 [2] 潮汐帶 潮位差平均5.5m 冬季氣溫－23℃ 年間100回之凍結融解 [3] 最長爲26年 (1936年開始)	①美國骨材反應與凍結融解，使用含高鹼及高C_3A 水泥時，鹼矽反應由硫酸鹽作用增加於較早期，即產生損害，高鹼、低C_3A 水泥損害較少。 ②RC有25年曝露試驗 使用AE劑有良好效果，持續荷重與破壞荷重沒有關係，19mm之保護層鋼筋沒發生腐蝕。 ③Polymer的PC 之曝露試驗（2200回以上凍結融解） AE劑17年以上有效，保護層需要20mm以上，灌漿材之鋁粉末防蝕效果良好。 ④混和材之效果（水／水泥＋混和材＝0.4-0.6 ，爐渣摻料比0～65 %，飛灰之摻料比0～80 %） 爐渣65%摻入情況１年後之凍結融解表面發生劣化。			

（註）OPC：普通Portland Cement，RPC：早强Portland Cement；BSC：高爐（slag）Cement，MPC：中庸熱 Portland Cement，
SIC：矽灰（Silica）水泥，FIC：飛灰（flyash）Cement，AC：高鋁（alumina）Cement.

①飛沫帶之混凝土中性比較潮汐帶更爲顯著。

②平均中性化深度爲曝露期間十年3㎜，二〇年達5㎜。

③透水性愈大之混凝土，其中性化深度愈深。

綜合表14，世界各地現場曝露試驗研究結果可以歸納下列四點：

①氣溫不同，惡化機理亦異，寒冷地區受凍融作用，而溫暖地區則受海水之化學作用。

②素混凝土在海中品質降低甚大，但在潮汐帶及飛沫帶由於鋼筋腐蝕而使混凝土劣化甚爲嚴重。

③水泥種類或C_3A含量與耐海水性有密切之關係，其影響程度依配比之貧富而異。

④水灰比(W/C)或單位水泥用量爲提高混凝土品質，耐久性之重要因素。

上述爲在淺海之試驗結果，最近對深海之混凝土亦研究中，混凝土球(外徑1676㎜)及混凝土塊分別置於水深560～1550公尺及800-960公尺深之海床上長達5.3年後，其抗壓强度較陸上標準養生者同一材齡下約降低15%,此現象可解釋爲在深海海水溫度低，强度之成長太慢，並受水壓之關係，部份微細結構遭受破壞所致(11)。

三、曝露試驗之檢討

由於各地之曝露條件不同，因此必須要有現場實測之資料才能建立可靠之規範數據，在進行曝露試驗應注意之事項，曝露方法以及大氣因子蒐集方法分別檢討如下：

(一)曝露場設置與曝露試驗應注意事項

(1)曝露試驗固定架

混凝土試體較爲粗重，固定架應保持穩定與避免銹蝕。

(2)周圍環境之變化

例如附近樹木太高或地上物之建造可能會遮避陽光或影響風力之作用。

(3)儀器維護

儀器設備必須有人手管理，故障時應立即修理，以維持正常之運轉與測試。

(4)曝露試驗影響參數

主要影響參數如受飛砂之磨損，海風挾帶之含鹽量，金屬表面之潤濕時間與溫度等。而這些都與距海岸線之遠近，風浪及海流方向與大小、降雨量、溫、濕度與遮避性潮差之大小等因素有關，設置時應詳加考慮。

(5)測試與評估

評估與解釋鋼筋混凝土海洋腐蝕資料包括量測重量損失，腐蝕速率，侵蝕深度與目視外觀等方法將依詳細實測試資料判斷(12)

(6)測試之影響因素必須考慮週密

例如英國Taywood公司曾試驗200種不同RC防腐蝕塗料之性能　測試，考慮之影響因素如表15所示，若無詳實之調查(如Cl^-或　CO_2之擴散)，則產品之有效性與其使用價值將受置疑(12)。

(7)試驗方法必須可靠

試驗室之加速試驗與現場曝露試驗可以數學模式建立良好相關聯性關係，兩者之惡化形態與範圍必須相似，才可供預報之用。

(8)鋼筋混凝土劣化程度與速率之建立

影響混凝土材料之劣化程度與速率之環境因子如表16所示，而其中最重要者如濕氣、溫度、Cl^-、CO_2等而造成腐蝕、

劣化速率與程度將依曝露環境隨時而異，建立劣化機構可預測有害因子侵入量，在設計與施工時可事先加以考慮。

(9)必須發展概率理論，建立評估RC耐久性設計程序模式，可供使用壽命之設計。

(10)船隻進出頻繁之港區，會造成嚴重的油染，因而曝露於海洋之試體沾有一層厚油污垢，將阻止海水入侵混凝土試體，而影響試驗結果，因此港灣之水污染必須嚴格控制，否則測試結果將受置疑。

(11)灌製不佳之試體，將影響測試效果。

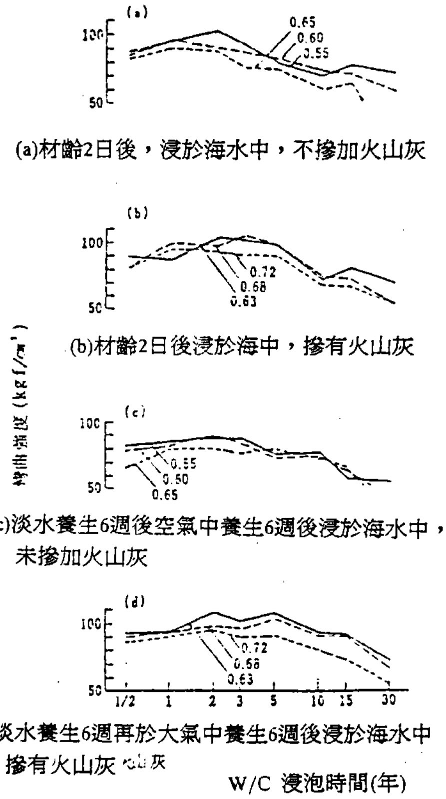
(二)、曝露方法之探討

(1) 按實際大小安裝於曝露試驗場中，試體之形狀、大小以及擺放之角度、方向等都應詳細評估後採用。

(2)加速劣化試驗：例如施加應力或預先龜裂等，可容易了解劣化機

表15　影響塗裝選擇之因素 (12)

性　　質	影　響　因　素　說　明
1)保護性	• CO_2，Cl^-，O_2，SO_2-等之擴散 • 對酸性之阻抗 • 水汽之滲透性 • 水滲透性一吸收性及在壓力下
2)應　用	• 對表面處理不良之容忍度 • 對應用時濕氣之容忍度 • 對在養生期間濕氣之容忍度 • 鹼性表面情況下之阻抗 • 易於應用 • 有毒性 • 易燃性
3)耐久性	• 證實可使用於混凝土結構物上 • 在相似之曝露條件下之個案 • 能柔性跨過鈍態裂縫 • 能填封活動性之龜裂 • 在下列條件下： 很强之紫外線 風／雨／凝結 溫度循環 乾濕循環 凍融 鹽結晶
4)費　用	• 特殊應用需求，在使用之塗裝厚度下之相對費用及利益，維護期間易於再塗裝。



(a)材齡2日後，浸於海水中，不摻加火山灰

(b)材齡2日後浸於海中，摻有火山灰

(c)淡水養生6週後空氣中養生6週後浸於海水中，未摻加火山灰

(d)淡水養生6週再於大氣中養生6週後浸於海水中，摻有火山灰

圖十一　海中長期浸泡齡期與強度關係

表16　材料及構件惡化之影響因素(12)

因素類別	影　響　因　素　說　明
1)風化性	• 輻射：太陽、核能、溫泉。 • 溫度：上升、下降、循環。 • 水：冰、雪、雨、凝結、駐水、相對濕度。 • 正常空氣含：[illegible] • 空氣污染：[illegible] • 凍融
2)生物污著性	• 微生物 • 黴菌 • 細菌
3)應力因素	• 週期性、及支撐應力 • 隨機性應力、雪等物理作用。[illegible]等因素之作用。
4)物理上或化學上不相容	• 不同金屬之偶合 • 不同塗料或材料之接合
5)使用性	• 系統之設計。 • 安全及維修程序。 • 正常磨耗和破裂。 • 使用者濫用。

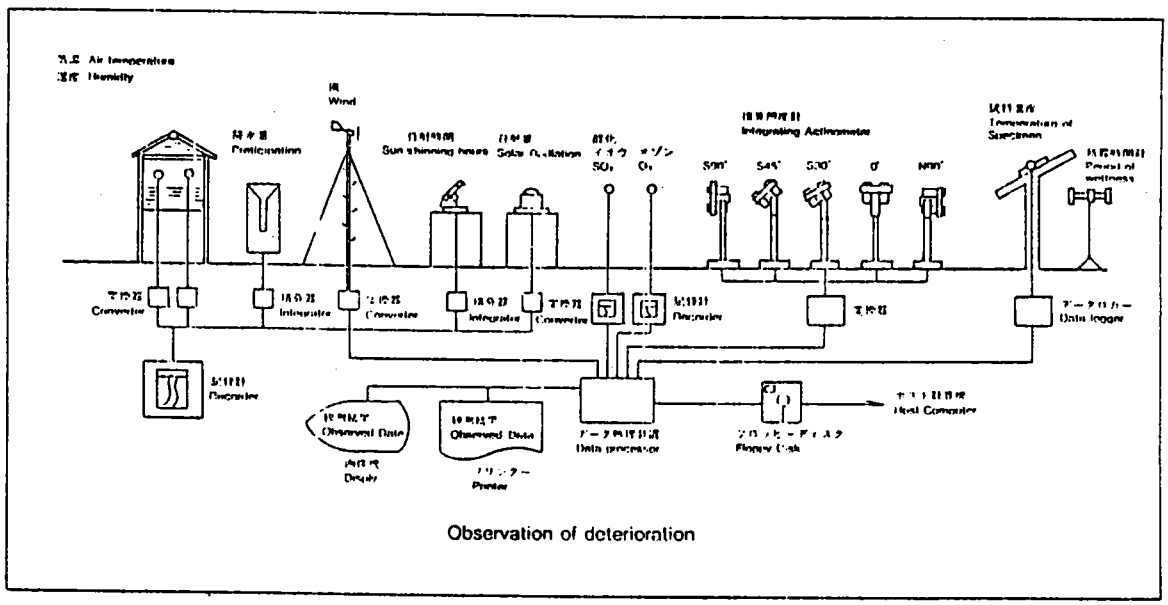
理。

(3) 需在現場條件下，混凝土試拌與養生情況下，量測氯化物侵入之特性以證實在使用期間內，是否充分保護。

(4)評估在不同天候條件下，不同材質及構件之劣化速率。

(三)、大氣因子蒐集方法檢討

觀測劣化因子如氣溫、濕度、降雨、風、日照時間、日射量、SO_2、O_3、照射角度、試體溫度及結露時間等資料輸入於資料處理系統使之定量化，可供評估建物耐久性與氣候因子之關聯性及其所佔之比重(圖12)。天候與環境對混凝土結構物耐久性之影響性必須徹底地檢討



圖十二　日本建築研究所在大氣曝露試驗場設置之氣象因子測試系統

，因此蒐集之資料必須包括日、月、年等之平均、最高、最低值，以供研判其關聯性。

四、結論建議

1. 腐蝕作用之機理與環境之溫濕度相關，台灣地處亞熱帶，四面環海，鋼筋混凝土結構物容易發生腐蝕，加上台灣地窄人稠，未來對空間之需求勢必朝海域空間發展。因此對鋼筋銹蝕導致混凝土結構之破壞及混凝土材料在海域下之行爲等之充分瞭解，必須建立曝露試驗場從長期試驗才能解決耐久性問題。
2. 曝露試驗與加速試驗兩者均爲提供新產品的可靠度及結構材料性能評估的有力證據。
3. 對於曝露試驗場設置以及試驗應注意事項和曝露方法，大氣環境因子之蒐集及建立環境因子與劣化現象之相關性應加以詳細檢討。
4. 曝露試驗爲制定國家材料的設計與施工規範之必要工作，必須產、官、學三方面之專家學者共同配合投入研究。

參考文獻

[1]林維明“海洋混凝土結構物耐久性之檢討”海洋混凝土工程研討會資料彙刊，港灣技術研究所專刊第38號，民國76年10月，PP.1/51～1/56

[2]陳振川“由崔特島曝露場談混凝土材料之長期現地耐久實驗”結構工程第3卷4期，民國77年10月，PP107～ 112 。

[3] Mehta, P.K. “ Durability of Concrete in Marine Environment-A Review ” in Performance of Concrete in Marine Environment, Edited by Malhotra V.M..American Concrete Institute, ACI SP-65, 1980, PP.1 ～ 20 。

[4] U.S Army Corp. of Engineeering “ Natural Weathering. Exposure Station.Treat Island” Structural Laboratory. Waterways Experiment Station U.S.A., Aug 1988.

[5]林維明“混凝土耐化學性作用之檢討（下）”結構工程第四卷2期，民國78年6月，PP.93～ 144

[6] Malhtra V.M. et al., : Curreeut Status of CANMET'S Studies on the Durability of Concrete Containing Supplementary Cememting Mateials in Marine

港灣技術研究所演講集,Dec.1987,PP.155-212

[9]林維明“港灣結構物之鹽害現象與對策(一)”結構工程第五卷第4期，民國79年12月,第97-155頁。

[10]Nakajima. H. and Hori. T. "Prevention of Salt Damage by Corrosion Inhibitors" Proc. of Seminar on the Corrosion Preventive Technique of R.C.Stuctures" .Taichung. Taiwan. R.O.C. Oct.3-4.1989,PP.279-299.

[11]關博、大友忠典“海洋コソワリート、水中コソワリート”山海堂・PP.90-93及PP.34－39，昭和57年12月。

[12]林維明“海洋混凝土結構物防蝕規範及使用壽命預測之檢討”海洋混凝土工程研討會資料彙刊，港灣技術研究所專刊第38號，民國76年10月，第10/1—10/46頁。

柒、結論與建議

林維明*

7－1 結論

綜合本研究，可得到下列結論：

1. 台灣地處亞熱帶，四面環海，海風會挾帶含有鹽份之水汽侵襲結構體，因此一般向風面易發生腐蝕，根據本研究蒐集中央氣象局之風速風向資料，經統計繪製五大港之風玫瑰圖(1)發現台中港之主風向爲北風，基隆港爲東北風，高雄港西南季風較爲盛行，而風向分佈則較爲平均，東部海岸則分散在東北與西南兩風向。主風向之結構體必須加强防蝕工作。
2. 就氣溫而言，平均氣溫約爲 16℃－29℃屬於炎熱，潮濕型之腐蝕地區，夏季時各地之平均溫差變化小，而冬季時則南北兩地溫差約在 3 ℃。
3. 就降雨量而言，冬、秋兩季以基隆港爲最高，花、蘇次之，春季則以台中港較高，高雄港次之，夏季則以高雄港較爲充沛，由於蘇澳與基隆多雨及靠近，因此其相對濕度高，尤其在冬季蘇澳與花蓮兩地之相對濕度相差 13％，各港之平均相對濕度在 72－85％，在如此高之相對濕度下，因此鋼材容易發生腐蝕。
4. 台灣地區之酸雨現象已經相當普遍，平均 pH 值約爲 4.69，經採樣分析去 (79) 年雨水中 pH 值以四月之 4.19 之酸性最强，五月爲 4.40，六月爲 4.45。以降雨型態而言春雨最酸，梅雨次之，以測站而言在全省十個測站台北、下福、大園、觀音、南崁、龜山、中壢、小港、墾丁及大麻里，除後兩站外，其他各站雨水之酸度均高，因此必須對二氧化硫加强管制(2)。台灣地區之 SO_4 濃度約爲 72.9ueq/l與國外相當，污染來源自燃煤及煤油工廠，而 Na^+及 Cl^-之濃度有偏高趨勢係因海島之故。雨水中 Na^+及 Cl^-之濃度與距海岸遠近有關，1 Km 以上受鹽害可能性少，0.4Km 以內應注意鹽害之防制(3)。以地區而言，台北與高雄地區污染嚴重，故雨水中之 pH 值偏低，酸雨含

*省交通處港灣技術研究所研究員兼港工材料組組長

腐蝕因子量多，將促使結構物發生腐蝕現象。

5. 台中港潮差平均值爲5.2公尺，花蓮港爲 3.33 公尺，基隆港 2.53 公尺，高雄港 1.63 公尺，蘇澳港 1.88 公尺，潮差大則結構物容易受乾濕反覆之作用。
6. 根據本所於 79年 2 月至 80年 1 月共一年時間每月至五大港採取水樣，取樣爲自海水面至海床，每隔 1 公尺採水樣 100cc，攜回實驗室進行水質分析，發現各港之年平均 pH 值介於 8.0－ 8.2之間，平均水溫隨季節性而變，然而最高值與最低值差異性不大。年平均 Cl^-含量蘇澳港 7 號碼頭之 18, 470ppm 爲最高，花蓮港 4 號碼頭 17, 690ppm 爲最低， SO_4^{-2}濃度以基隆港西 23號碼頭之 2, 438ppm 爲最高，花蓮港 4 號碼頭 2, 279ppm 爲最低，因此以水質而言蘇澳港及基隆港所含 SO_4^{-2}及 Cl^-含量較高，而花蓮港則較低。由於高雄港水污染嚴重故其 63號碼頭之溶氧量最低值達 0.7mg/l ，年平均值爲 3.1mg/l ，而花蓮與蘇澳海洋環境污染少，故年平均值達 5.1及 5.4mg/l 。
7. 影響海洋結構物之環境因素必須詳加調查如曝露區域，波浪沖蝕，水溫、含氧量、 pH 值、含鹽量、海流流速、海生物污著污染、風、降雨、酸雨、相對濕度、日照等。
8. 在材料本身上，改善鋼材之腐蝕速率可在合金之成份上考慮，現已有許多耐候鋼和耐海水鋼材產品出現門市，中國鋼鐵公司經過研究結果發現鈦 (Ti) 及磷(P)之添加均具明顯之强化效果，磷有助於大氣飛沫區之平均抗蝕性，鉻 (Cr) 對抗蝕性無顯著效應，鉬 (Mo)有助於平均抗蝕性及抗孔蝕性，鈦則有助於海水區的平均抗蝕性與抗孔蝕性，添加合金愈多，將使鋼材之電位愈趨貴重，可降低腐蝕速率。鋼材若未含Cr、 Mo 或Cu、 Ni者對抗海洋環境之侵蝕性較差， A36 ， A588及 Acr Ten A等類鋼材不適用於海洋環境，利用電化學測出之最初腐蝕速率不足以代表其長期抗蝕性。有關耐海水鋼材之研究係中鋼公司負責，詳見附錄（二）。
9. 影響鋼材腐蝕速率之因素有不同金屬之偶合，銹皮破壞未加塗裝保護、迷失電流、腐蝕疲勞及土壤中腐蝕等，而在土壤中，鋼材之腐蝕因素爲土壤本身結構與通氣性 pH 值，含有機物及細菌量、電阻、泥線區域或海床質受沖刷等各種因素。
10. 選擇一防蝕設計並不簡單，必須慎重考慮，尤其所考慮選用之合金

或環境之腐蝕條件未有先例時，更應慎重從事。

11.避免結構上之設計特性可能會助長腐蝕，此現象與安裝防蝕措施一樣地重要，而這方面之腐蝕控制常被忽略掉。

12.現有 RC 結構物使用卜特蘭 I 型水泥，其中所含過量之鋁酸三鈣將與海水中之硫酸鹽及氯離子作用形成膨脹性之鈣釩石而破壞混凝土，如果改用 II 型水泥，耐久性將較好。

13.水灰比爲影響混凝土滲透性的主要參數，台中港之港灣 RC 結構物施工時採用之水灰比爲 0.53 ～ 0.80 超過一般海洋混凝土之建議值。所以使用不足十年就發生腐蝕現象，因此新建工程應嚴格地遵循海洋混凝土設計與施工規範在使用材料及配比方面詳加考慮。

14.目前 RC 及PC結構物大都使用竹節鋼筋，而保護層必須足夠以免銹蝕，而在需特別保護之處可採用熱浸鍍鋅或塗裝環氧樹脂之鋼筋可達防蝕效果，台電公司台中火力發電廠之碼頭工程及目前澎湖跨海大橋改建工程之預力樑就是採用環氧樹脂鋼筋設計施工。

15.目前高雄港之鋼板（管）樁碼頭結構物已全面作陰極防蝕，基隆港東 2 號～東 4 號碼頭及蘇澳港 6 號碼頭部份作陰極防蝕外，其他鋼結構物均未作陰極防蝕，且安裝陰極防蝕後亦未作定期檢測所具保護電位與電流密度之變化。

16.工業材料研究所曾選用 1019 碳鋼與 1019 鍍鋅碳鋼、 304 及 316 不銹鋼， 5086 及 6061 鋁合金鋼等種類之試片，於民國 75年 10月底起在台中港之4A及5A碼頭間貯木池棧橋邊安裝在一 2 × 2 × 10公尺之試驗架上作長期海洋浸泡試驗。

17.1019 碳鋼經過0.5、 1.0及2.5年浸泡試驗比較發現腐蝕速率隨時間有遞減之現象，在潮汐帶與飛沫帶之腐蝕速率較海中區爲高，在海中區0.5、 1.0及2.5年之浸泡期測得之腐蝕速率分別爲 0.58 ， 0.45 ， 0.20mmpy 與一般設計標準 (0.2mmpy) 較高，因此設計標準需加以修正，否則結構物無法達到預期之使用壽命。

18.316及 304 不銹鋼試片經過三年半之浸泡後發現兩者在潮汐帶與大氣區均具有類似之耐蝕能力，而在海中區則 316 不銹鋼之耐蝕力較佳，兩者之腐蝕速率均隨水深增加而遞增。

19.比較半年與2.5年浸泡期之 5086 鋁合金鋼之數據發現腐蝕型態主要爲孔蝕，腐蝕速率隨水深和浸泡時間之增加而遞增，可能是鋁材表面

易形成氧化膜抵抗外界腐蝕因子之侵入而在海中區，因有氯離子存在，氧化膜無法形成之故。

20.根據過去有不少專家學者在美、日、英、德、挪威及土耳其等各個不同之海域進行海洋混凝土長期曝露試驗結果可歸納下列四點：

①惡化機理隨氣溫而變，在熱帶地區，容易受海水之化學作用。

②素混凝土在海中之品質降低甚大， 而在潮汐帶及飛沫帶之鋼筋混凝土，很容易發生鋼筋腐蝕造成混凝土結構物劣化現象。

③鋼筋腐蝕與製作時所使用之水泥種類或鋁酸三鈣（C_3A）含量有關，而其影響性依混凝土配比之貧富而異。

④水灰比與單位水泥用量爲提高混凝土品質與耐久性之重要因素。

21.本所自民國77年10月起在台中港3號碼頭之潮汐帶擺放81個試體，而於78年8月擺放1305個試體於本所海水循環水槽之海中區， 1017個試體於潮汐帶，而另外在79年5月製作 270 個試體擺放於試驗大樓三樓屋頂上進行大氣曝露試驗，這些長期曝露均在持續進行中，部份測試結果顯示混凝土保護層不足、材質分佈不均，水灰比過高均爲鋼筋腐蝕之致因。使用環氧樹脂或鍍鋅鋼筋不易發生銹蝕，而使用高爐石，飛灰及矽灰等波索蘭材料取代部份水泥量製作之 RC試體，尚未有發現鋼筋銹蝕現象。

7－2 建議事項：

根據本研究建議今後應朝下列方向繼續進行研究：

1. 影響海洋結構物腐蝕之因素如海水中之 pH 值、含鹽量、硫化物含量、溶氧量、水溫、生物污著及大氣污染、風速、風向、雨量、相對濕度、酸雨、波浪及海流等。這些因素都必須再加深入調查及探討其影響性之權重。
2. 腐蝕試驗及偵測，監視與檢查等都是控制腐蝕之必要工作，必須加强研究。
3. 在鋼材之材質上應研究利用正常化和熱處理方法，使鋼材能達均質化，以降低發生孔蝕之機率。
4. 加强利用交流阻抗方法測試較長時間浸泡和曝露之試片的腐蝕速率和抗蝕特性之研究。
5. 研究陰極防蝕和抗腐蝕疲勞之問題。

6. 研究添加鉬對鋼材之機械性及顯微組織之效應。
7. 研訂現場可產製鋼材之條件及其合金成份。
8. 安裝陰極防蝕措施後，應定期檢測保護電位及電流密度之變化，發現不良者，應立即檢討或更換新的陽極材料，所得數據可供制定防蝕設計規範之依據，此方面工作應予加强。
9. 由於各海域之腐蝕環境不同，腐蝕速率亦隨之而異，應徹底研究檢討防蝕方法之適用性。
10. 應加强調查實際鋼結構物之腐蝕速率，以供設計基準。
11. 在台中港進行浸泡試驗是考慮其水質較佳，所得之數據可應用於台灣海域，然而近年來台中港業務較以往繁忙，因此海水污染日趨嚴重，故所得之數據無法具有代表性，在作浸泡試驗時一般以未受污染之水域所得之數據作爲參考點，可供比對，因此必須再尋求一參考點，目前台中港之數據僅可供台中港之新建工程參考而已。
12. 海水浸泡試驗之數據將隨環境因素變化而變，因此周邊之環境因子變化之調查與記錄分析相當的重要，具有完整之環境資料則可利用迴歸分析推算至其他地區應用。
13. 曝露試驗與加速試驗兩者均爲提供新產品之可靠度及結構材料性能評估之有力證據，爲充分瞭解材料在海域環境下行爲之指標，必須加强研究才能從長期試驗數據中，解決耐久性之問題。
14. 對於曝露試驗場設置以及試驗應注意事項，和曝露方法，環境因子之蒐集及建立與劣化現象之相關性必須加以詳細之檢討。
15. 曝露試驗爲制定國家材料之設計與施工規範及防蝕設計材料選用與開發之必要工作，必須產、官、學三方面之專家學者共同配合投入研究。

參考文獻

1. 台灣省政府交通處港灣技術研究所〝港灣鋼筋混凝土結構物之耐久性研究〞80－研（九）研究報告，中華民國80年6月。
2. 陳景雄、柯文雄〝酸性沈降之調查研究報告〞環保署委託中央大學大氣物理研究所及台灣大學大氣科學系研究，民國79年6月。
3. 蔣本基、鄭福田等〝台灣地區酸雨調查研究（一）（二）〞民國74，75年度研究報告，台灣電力公司電力研究所，國立台灣大學環境

工程學研究所。

台灣海域材料耐蝕研究

一、前言

台灣地處東北亞，屬於亞熱帶氣候，台灣環境東有太平洋，西有台灣海峽，四面環海，與歐美日等國家相比較，台灣平均溫度，平均濕度均高，且環海的環境使得鹽份含量也高，從材料腐蝕的觀點而言，這種高溫多濕且多鹽的環境，較易造成材料的腐蝕，以往歐美在作腐蝕調查時，其結果是認爲每年腐蝕所造成的損失，約佔其國民生產毛額 4 %以上，若台灣環境與其相同，則每年的損失當在台幣千億以上，況且台灣的環境對材料腐蝕是更不利。

有鑒於此，自民國 75年開始，由工材所，中鋼，港研所合作由台中港環境起步，作台灣海域的材料耐蝕研究，此一計劃先訂五年爲期，工材所部份是進行台灣海域中金屬材料浸泡試驗（ Immersion Test），將送訂定之金屬材料設於海洋環境中，於特定的時間取出，然後計算其腐蝕速率（ Corrosion Rate ）於 75.10在台中港區儲木池邊選定位置安放試驗架及試片，於 78.10於基隆港區 26號碼頭邊亦安放試驗架，此二試驗點均已有數據可供參改。

二、目標

了解台灣海域內，各種海洋環境常用材料的腐蝕速率，由此可定出其防蝕設計標準。

三、實驗

浸泡試驗於75.10開始，75.10於台中港內儲木池邊安放（附圖一），試片種類及安放位置如（附圖二）所示，試片主要是以碳鋼，不銹鋼，鋁合金，銅合金等爲主，試片架結構如（附圖三）所標明，同時爲了防止試片與試片架產生異種金屬腐蝕（ Galvanic Corrosion），所以試片均安放於試片座上，試片座再固定於試片架上，試片座如（附圖四）。

78.10 於基隆港區內亦安放浸泡試驗架，試片架安放於 26 號碼頭邊上（附圖五）其試片係採 SS41碳鋼，此爲了摸擬鋼板樁之材質，其試

驗架設計與結構均與台中港類似，但尺寸較小。

試驗架安放後，人員定期前往檢查試驗架及試片，並在一定的期間內取出試片，台中港區內之試片定期於0.5年，1.0年，2.5年，3.5年均取出碳鋼及其餘合金試片，基隆港區內則於79.12取出第一批SS41試片。試片取出後，先遵照ASTM G-1之標準來清洗試片，碳鋼以Clarke's Solution清洗，不銹鋼以60℃硝酸清洗，鋁合金亦以硝酸清洗。在清洗過後再測其Weight Loss，再換算至其Corrosion Rate，所有不同位置之Corrosion Rate可以用其位置標出，如此即可得到不同環境中，不同浸泡時間，不同材料的Corrosion Profile。

四、結果

爲了解在試片取出，以不同Solution清洗試片時，會對試片造成多大的影響，所有的試片，均用相同的材料浸泡於欲用於清洗試片的Soluion中，測其重量－時間的變化圖（圖六－圖十），各種材料在經過48hrs之浸泡後，其重量損失百分比均極小，均在可以接受範圍之內，由以證明所有之清洗溶液均可採用。

在台中港區中之試驗，在經過半年後，所有的試片均取出一部份，在清洗後，繼而測出其Corrosion Rate後，其Corrosion Profile如（圖十一）所示，碳鋼的腐蝕速率顯著高於其他不銹鋼或是鋁合金，若分開來看，1019碳鋼的腐蝕速率如（圖十二），在浸泡段（Immersion Zone）中，碳鋼的腐蝕速率趨於一定值，由mdd之Scale換算至mmpy，約等於0.6mmpy，不銹鋼與鋁合金之Corrosion Profile分別如（附圖十三），（附圖十四）所列不銹鋼之腐蝕速率均隨著水深增加而增大，但316遠優於304，鋁合金在潮汐段及飛沫段中腐蝕速率沒有太大的變化，但在浸泡段中5086鋁合金的耐蝕力則遠優於6061之耐蝕力。

1019碳鋼分別在0.5，1.0，2.5，3.5年的期間均有取出試片來測其腐蝕速率，結果如（圖十五，十六），碳鋼於浸泡段的腐蝕速率隨著浸泡時間增長而變小，在3.5年時其平均Corrosion Rate低於0.1mmpy。將基港內SS41試片（浸泡1年）與中港內浸泡3.5年的試片腐蝕速率並列，可以發現基港內碳鋼的腐蝕速率與中港內類似，所以一樣是碳鋼，在基港內耐蝕力優於中港。

五、討論與結論

㈠碳鋼的腐蝕速率隨著試驗時間增加而降低，平均腐蝕速率由 0.6mmpy 降至 0.1 mmpy，而一般用之於海洋環境陰極防蝕設計標準是 0.2mmpy，由此可見，若在中港環境使用 0.2mmpy標準不足以應付自然環境所造成的腐蝕，若在基港內，使用 0.2mmpy之標準已足夠。

㈡ 304 ， 316 用在大氣，飛沫，潮汐等區段，均有良好的耐蝕力，若在 Immersion Zone，則最好選擇 316 ，這兩種不銹鋼的腐蝕型態均是孔蝕（ Pitting ）。

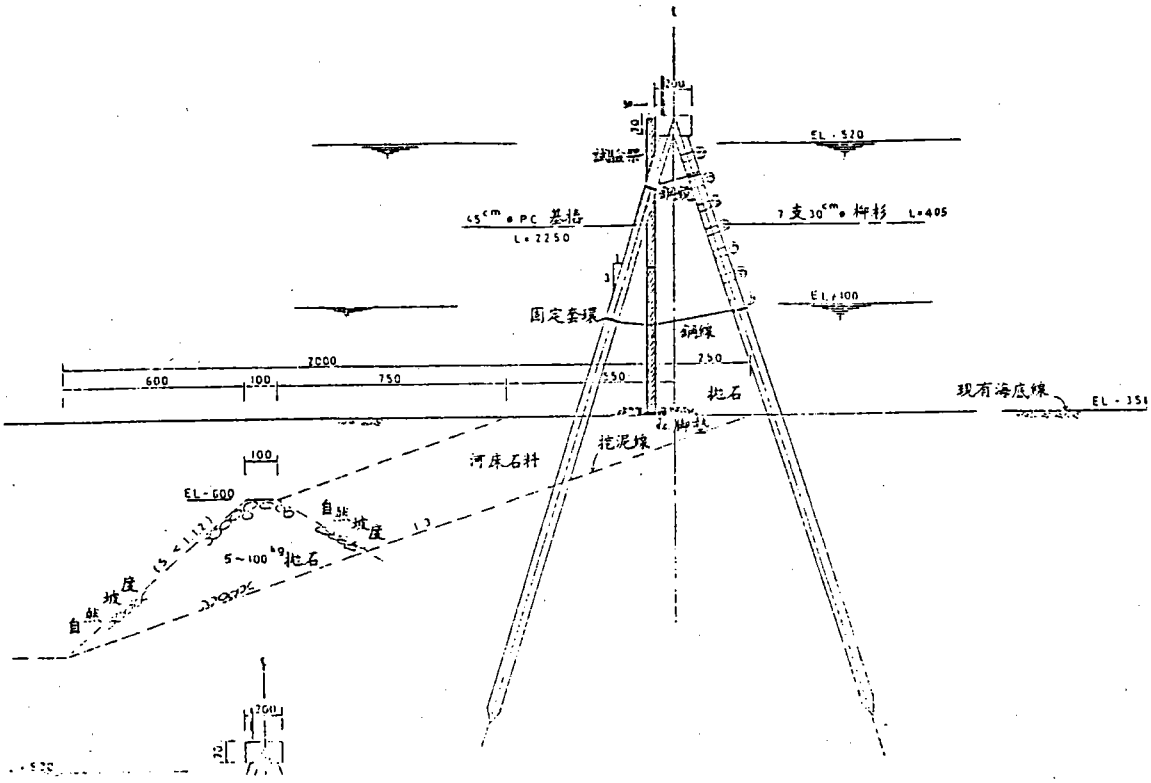
㈢ 5086 鋁合金與 6061 鋁合金與不銹鋼類似，在 Immersion Zone之上均有良好的耐蝕力，在浸泡段中則 5086 較 6061 爲佳。

六、後續工作

繼續維護試片架，並預定在中港試片浸泡 5 年，基港浸泡 2 ， 3 ， 5 年時繼續取出試片，測其腐蝕速率，以了解台灣海域中最適當之防蝕設計標準。

七、誌謝

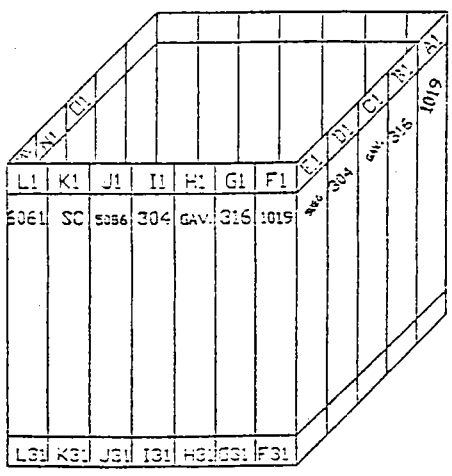
於台中港安放試片架及取放試片多承港研所港工材料組諸同仁協助，在基隆港內則承港埠工程處第一工務所諸同仁幫忙，謹在此一併致謝！



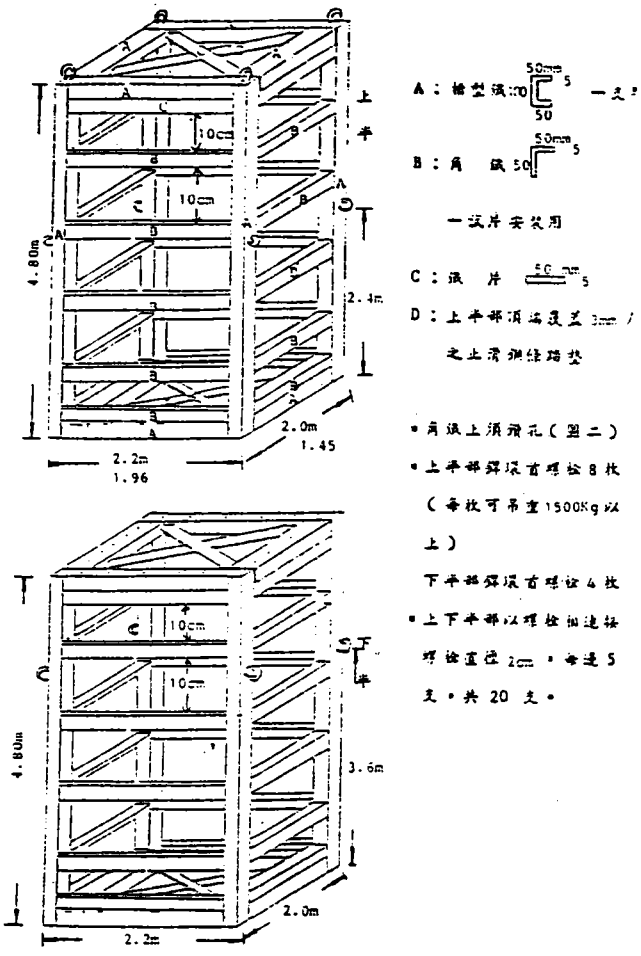
附圖一：台中港內試驗架配置

海水浸漬試驗 (IMMERSION TEST)

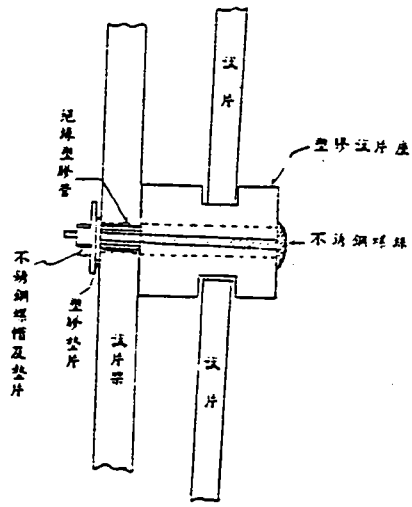
1. 1019 碳鋼	(280×220 × 3mm)	62片
2. 連續式 1019 碳鋼	(3000×110 × 3mm)	6片
3. Galvanized 1019 碳鋼		62片
4. 連續式 Galvanized 1019 碳鋼		6片
5. 304 stainless Steel		62片
6. 316 Stainless Steel		62片
7. 5086 Aluminum		62片
8. 6061 Aluminum		62片
9. 60/40 黃銅		62片



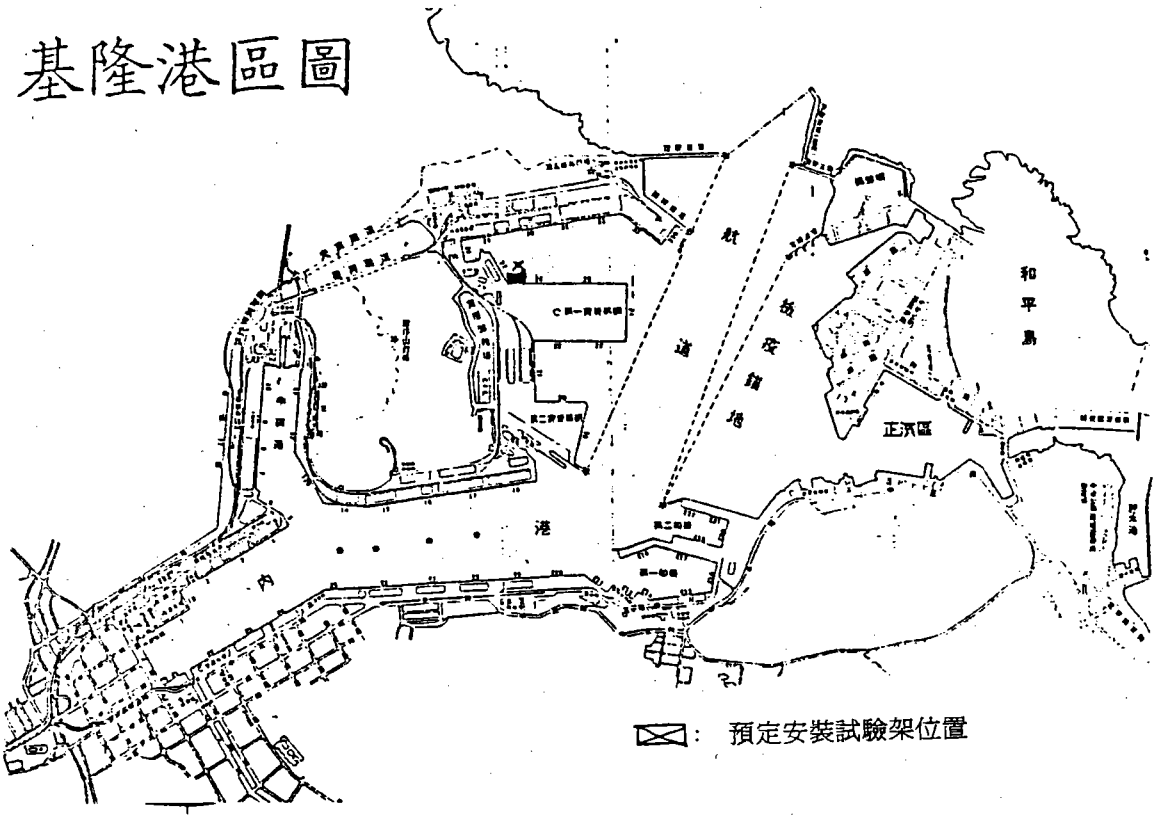
附圖二：試驗一片種類與位置



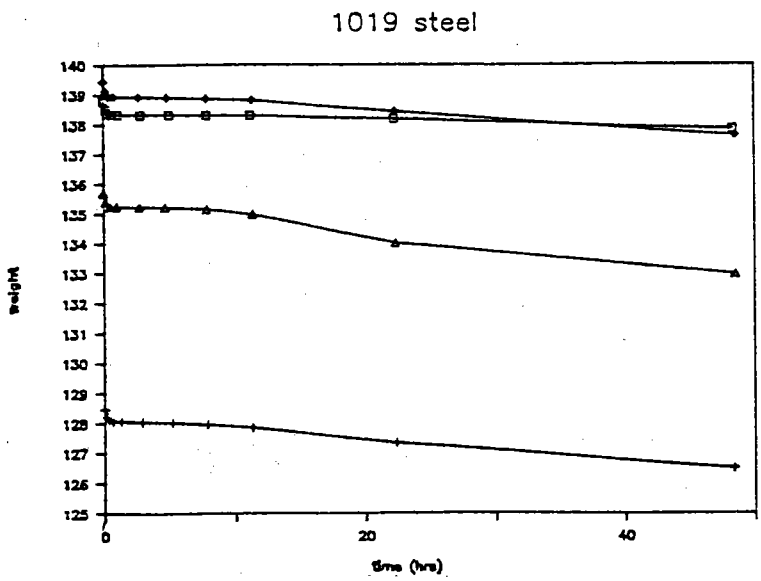
附圖三：試片架構造



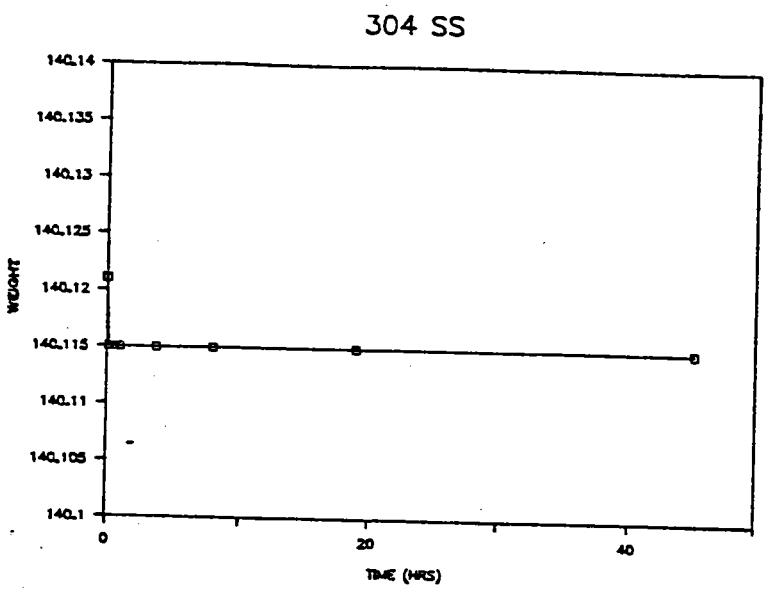
附圖四：試片固定詳圖



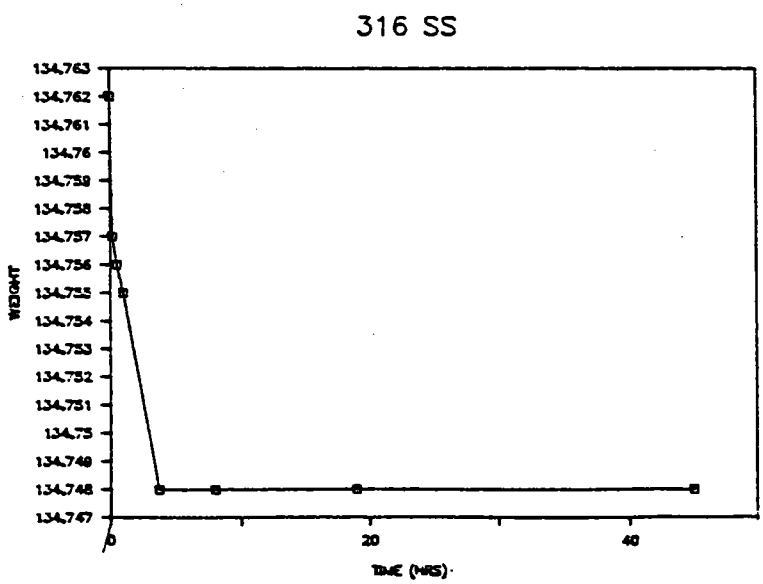
附圖五：基港內試片架位置



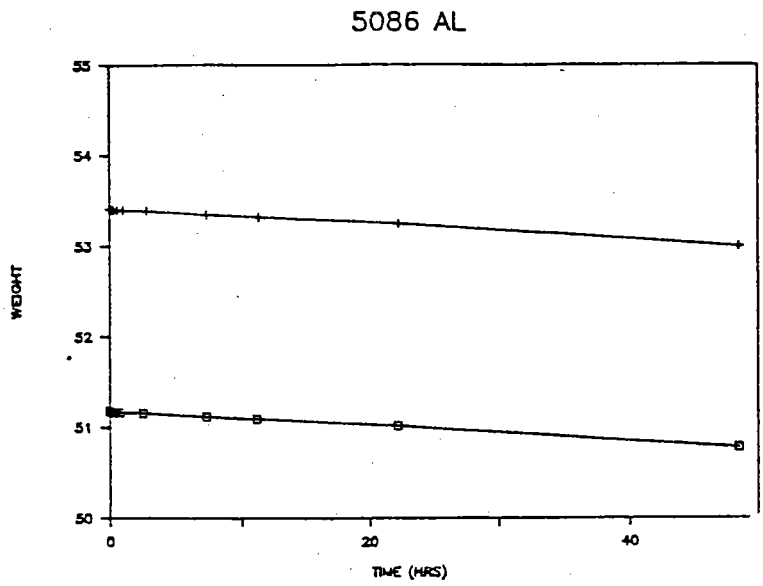
附圖六：碳鋼對Clarke's Solation之變化



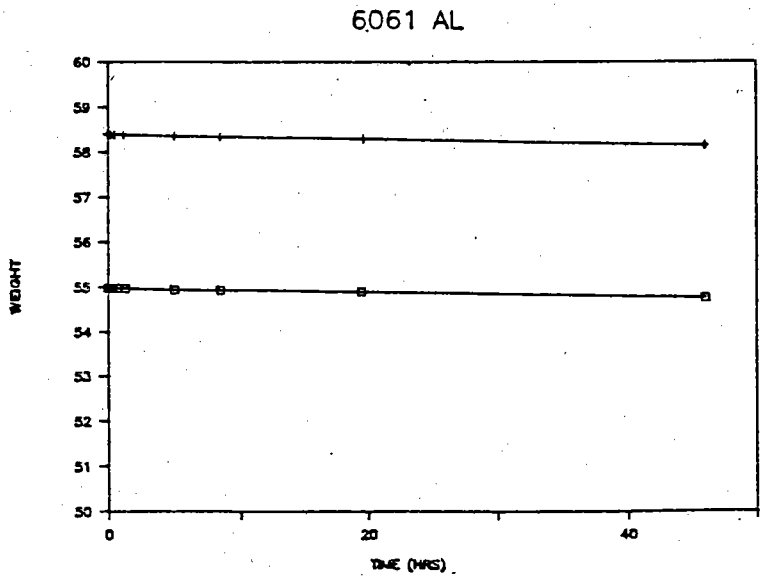
附圖七：304不銹鋼在60℃硝酸溶液中之變化



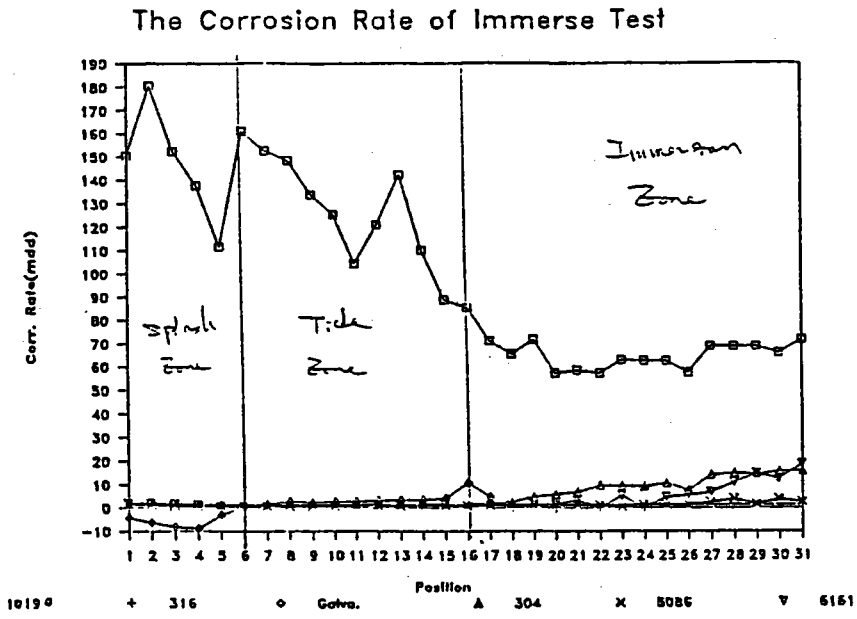
附圖八：316不銹鋼在60℃硝酸中之變化



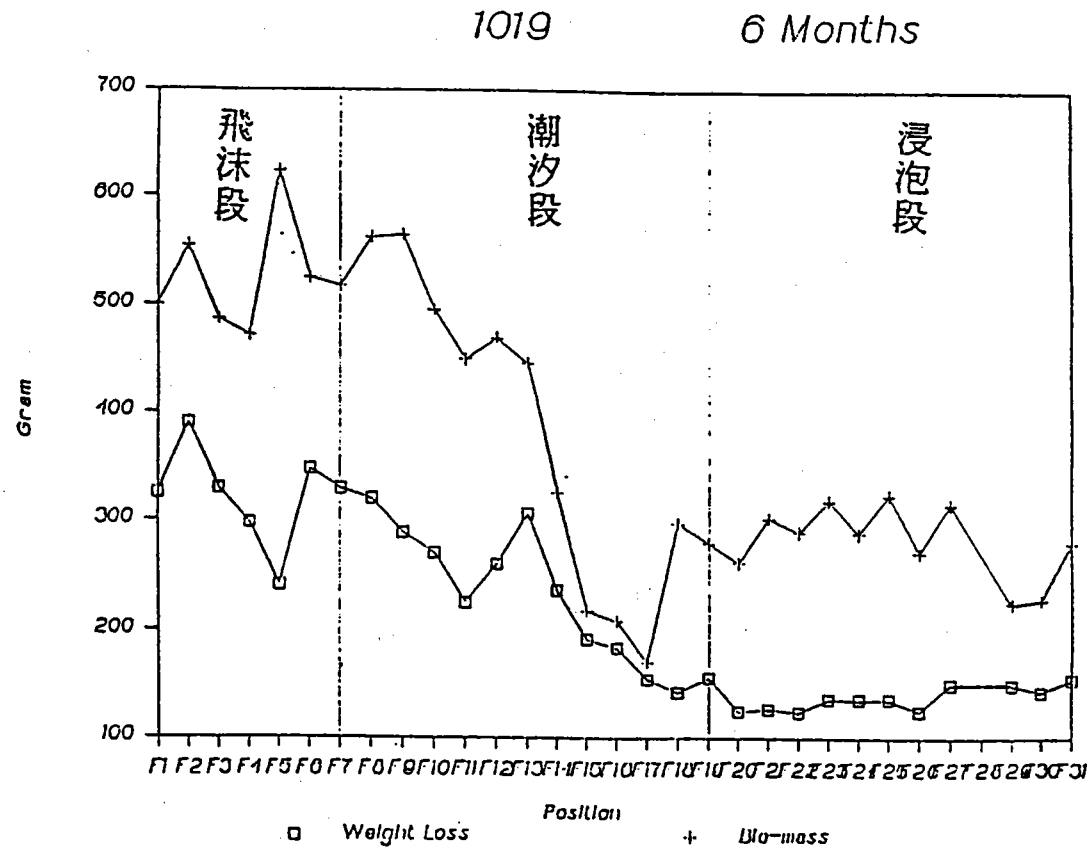
附圖九：5086鋁合金－硝酸溶液之變化



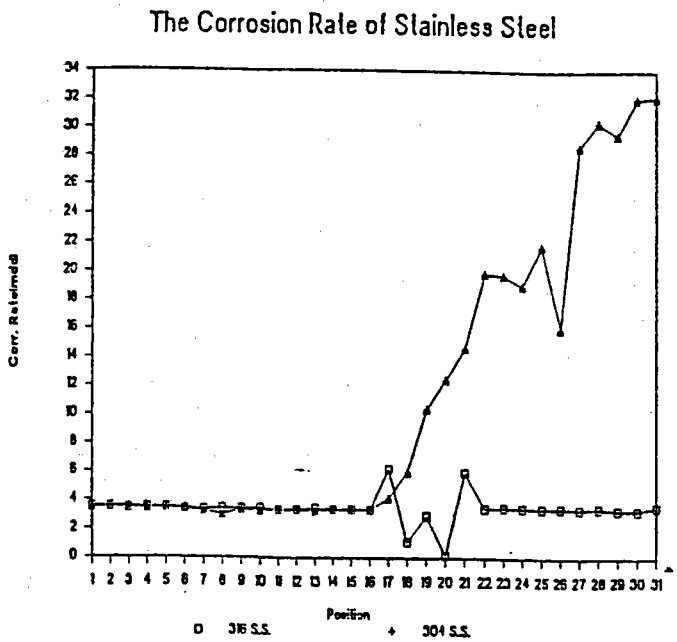
附圖十：6061鋁合金－硝酸溶液之變化



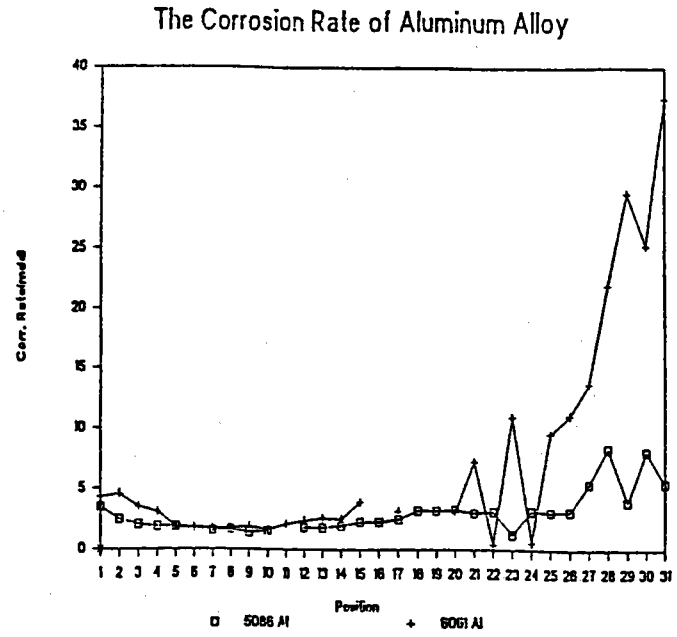
附圖十一：半年浸泡後，所有不同材料的corrosion Profile



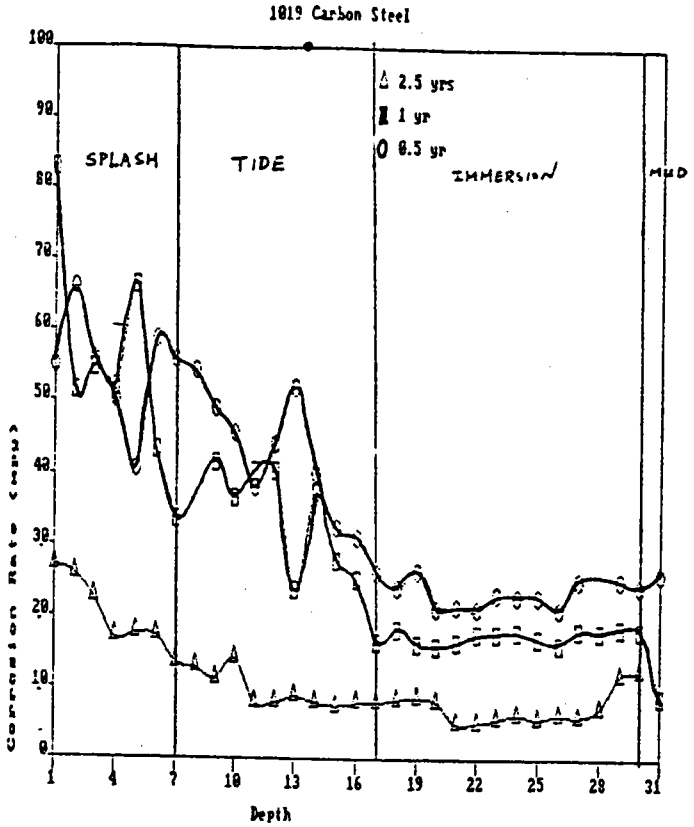
附圖十二：半年浸泡碳鋼試片之變化



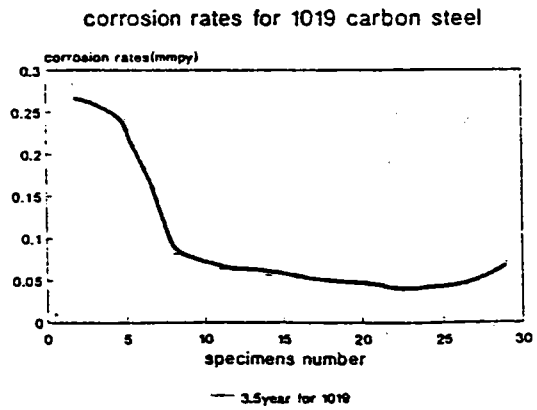
附圖十三：304及316不銹鋼之Corrosion Profile



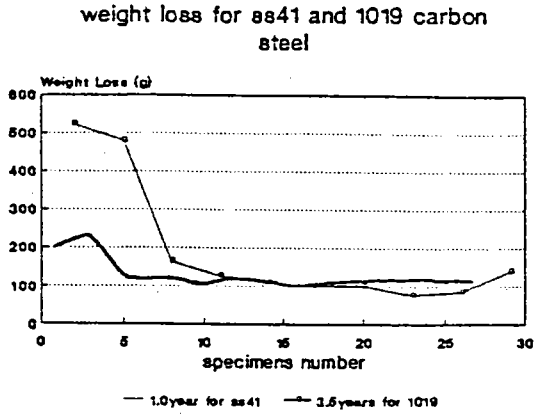
附圖十四：鋁合金於半年後之Corrosion Profile



附圖十五：1019碳鋼腐蝕速率(0.5,1.0,2.5年)



附圖十六：1019碳鋼腐蝕速率(3.5年)



附圖十七：基港浸泡1年之SS41腐蝕速率

合金元素對鋼板抗海水腐蝕的效應

一、前言

由於地球上的陸地有限，而人口不斷膨脹，因此人類已逐漸轉向開發海洋資源，並尋求利用海洋空間，而在海洋開發中所使用的各種材料，仍以鋼鐵材料的價格較低，強度較高和易於加工等特點，成爲主要之使用材料；然而鋼鐵最主要的缺點在於容易腐蝕，因此開發耐海水腐蝕之可焊接鋼也就成爲一個途徑。

1910年左右，國外即有含銅普通鋼的浸漬腐蝕研究，1930年代則有鋼中添加合金元素及抗海水腐蝕的研究，1951年美鋼開發出含P，Cu，Ni的耐海水腐蝕鋼，其在海洋環境中腐蝕最激烈的飛沫帶有較一般碳鋼爲優的抗蝕性，但因含有多量的P，因此韌性和焊接性均較差，因此日本的鋼鐵公司乃開發出不同等級的耐海水腐蝕鋼。

在各種研究中，以探討合金元素和環境因素的效應最爲廣泛。Larrabee(1)對添加Ni，Cu，P之鋼材在飛沫區之抗蝕性進行5年的實地試驗，顯示含0.5% Ni-0.5% Cu-0.12% P鋼材之重量損失僅爲一般碳鋼的5%。Satake等人(2)在循環浸泡的試驗中，發現C含量提高，抗蝕性降低；添加P和Cr會使抗蝕性提高；在浸泡實驗中，C含量增加，抗蝕性也是降低，而添加P亦會使抗蝕性增加。牟田徹等人(3)則發現添加小於1%之Cr和Al對在飛沫區和浸入海水區之腐蝕量會減少；而在污染海水中進行兩年的試驗顯示添加0.68% Cr和0.28% Al之鋼材在飛沫和潮汐區之腐蝕量分別爲0.3mm和0.7mm，約僅爲一般碳鋼的1/5至1/6。佐武二郎等人(4)則發現增加Cr含量於含Mo的鋼材，可增進在海水中的抗蝕性。玉田和谷村(5)之研究顯示在海洋大氣，添加Cr和Al對抗蝕性有利；在潮汐區，以添加P，Cr，Ni，Al爲有利；在海水中，以添加Cu＋Cr＋Al爲有利。Kowaka等人(6)在流動之海水中試驗顯示添加Cr，Mo，Mn，Cu和Al均可增加鋼材之抗蝕性；含2Cr-0.2Mo鋼在流動海水中之抗蝕性爲一般碳銅之兩倍，若爲去氧之流動海水，則增爲10倍。Shimada等人(7)則發現含Si，Cr，Cu或Si，Cr，Cu，Mo之低合金鋼之抗蝕性優於碳鋼，而含2% Cr之Cu-Cr-Mo-Si鋼材於海水中之腐蝕速率約爲碳鋼的1/3。Masumsto等人(8)之試驗結果顯示，添加Si，Cr，Mo和Cu在飛沫區可增抗蝕性，其中以

高Si-中Cr，高Si-中Cr-Mo和低Si-高Cr-Mo鋼爲最佳，在海水中，則以含高Cr爲佳。Kurisu等人[9]則發現添加Cr(1.03～1.08)和Mo(0.10～0.21％)在海水中可增抗蝕性，而添加Cr(1.03～1.08％)，Cu(0.32～0.45％)，Ni(0.17～0.21％)於飛沫區和海水中均可增加抗蝕性，且約爲碳鋼之兩倍。增田一廣等人[10]在飛沫區和潮汐區之海中經12年試驗，發現0.7Si-0.2Cu-0.5Cr鋼的腐蝕量約爲碳鋼的50～80％，但於海水中，則無顯著差異。

在耐蝕機構方面，Masushima和Veno證實在人工海水中，含Cr(0～3％)鋼表面的腐蝕生成物會阻礙氧氣的擴散，因此銹層內起氧化還原不易。渡邊常安和門智發現含Cr鋼在海水中生成較軟之針狀外層銹，和內層硬且密著的銹，此密著的銹在數天內即生成，被認爲是一好的保護層。Shimada等人發現在耐海水腐蝕鋼（Mariloy T）之銹晶間隙較一般碳鋼者小，同時Si，Cr和Cu富集在銹層內，因而認爲此些元素阻止銹晶體的急速成長，而生成緻密銹層，此不同於碳鋼上生成之針狀（Acicular）銹晶體。Takamura等人在海洋大氣區和飛沫區之腐蝕過程，發現γ-FeOOH逐漸轉換成Fe_3O_4此時添加之合金元素(Mn-Cu-Cr-Mo或P-Cu-Ni)會被溶解成離子而存於銹層內，形成許多Fe_3O_4的成核點，因而抑制Fe_3O_4晶粒之生長，而此種銹層會阻止H_2O，Cl^-或O_2之侵入，因而增加抗蝕性。Naito等人之實驗結果指出，合金（W，Mo和P）生成不溶性金屬鹽MXO_4沈積於陽極活化區，因而抑制陽極反應，此促進銹層的黏附性和密度，尤其於存有Cu時，同時認爲Cu在含氯離子溶液會抑制Fe_3O_4的生成，而Fe_3O_4會妨礙銹層的黏附性和密度。

依上所述，雖然已有許多研究合金效應和腐蝕機構之文章問世，但結果並未完全有一定論，因此各廠家之耐海水腐蝕鋼之合金成份未見完全相同者，加上近年來在煉鋼和軋鋼製程上有相當大的進步，因此以往之數據是否能完全採信是值得考慮的。

本研究採眞空熔煉，控制軋延方式，於實驗室進行鋼材之電化學測試和循環浸泡試驗，並於台中港進行實際曝露試驗，以探討合金成份之抗蝕效應。

二、實驗材料與方法

實驗鋼材是以眞空熔煉，經澆鑄成210×210×L(mm^3)之鋼胚，成份如表1所示（其中A-36和Acr TenA爲現場料）。然後加熱至1100℃，保持

約1小時，再軋至20 mm，完軋溫度約830℃。

實驗方法爲

(1)金相觀察：取厚度之1/4處來觀察金相顯微結構，此分別使用光學顯微鏡和掃描電子顯微鏡。

(2)機械性質測試：拉力試棒依ASTM E-8之Gauge length爲250mm，取全厚試片來測試，YS以0.5％垂直來決定其值。衝擊試片取自試片厚度之中央位置，試片大小爲10× 10× 55mm³。

(3)電化學性質測試：試片經鑽成直徑15mm，小圓片，利用EG& G之Model273＋ IBM PS2/50電腦之Potentiostat＋ Galvanostat來量測其電化學性質，溶液爲人工海水，其成份如表 2 所示，PH值爲7.6。

(4)加速腐蝕試驗：試片經切成8.5× 100× 75mm³，再以銑床去除銹皮，磨床磨至600號SiC砂紙的程度，經清洗液、自來水清洗、量厚度，再以丙酮去脂、吹乾、稱重，再進行 7 個星期的腐蝕失重試驗。此乃將試片浸於室溫之人工海水中10分鐘，再於RH：55～60％之氣氛中晾乾50分鐘來返覆進行試驗，裝置如圖 1 所示。

(5)實際腐蝕曝露試驗：將試片切成100× 150× t和100× 600× t mm³，兩種尺寸，經加工鉋除銹皮，研磨至600號SiC砂紙之程度，然後去脂，吹乾，量尺寸和稱重，然後分別放於台中港內之浸入海水區和潮汐，飛沫區，如圖 2 所示。

Chemical Composition of Substitute Ocean Water

Compound	Concentration(g/l)
NaCl	24.53
$MgCl_2 \cdot 6H_2O$	5.20
Na_2SO_4	4.09
$CaCl_2$	1.16
KCl	0.695
$NaHCO_3$	0.201
KBr	0.101
H_3BO_3	0.027
$SrCl_2 \cdot 6H_2O$	0.025
NaF	0.003

Cl^- : 17769ppm , SO_4^{-2} : 2766ppm

Chemical Composition of Sea Water in Taichung Habour

Item	Value
pH value	8.1～8.3
Oxygen(mg/l)	4.1～7.3
Cl^-(ppm)	15480～20220
SO_4^{-2}(ppm)	2050～3040

第一次實驗用鋼料之化學成份

鋼種編號 \ 合金元素 / 厚度 mm	C	Si	Mn	S	P	Cu	Ni	Cr	Mo	Al	Ti	N
					(wt%)							(ppm)
288	0.13	0.26	1.3	0.012	0.074	0.3	0.14	0.4	0.17	0.038	——	62
308 (20)	0.12	0.25	1.32	0.009	0.069	0.31	0.14	0.4	0.17	0.029	——	59
291	0.13	0.28	1.34	0.012	0.017	0.32	0.14	0.45	0.17	0.011	——	70
309 (20)	0.12	0.27	1.31	0.009	0.018	0.32	0.14	0.4	0.17	0.033	——	62
292	0.13	0.28	1.27	0.012	0.017	0.32	0.13	0.81	0.17	0.026	——	59
311 (20)	0.12	0.29	1.31	0.010	0.018	0.32	0.14	0.82	0.17	0.033	——	60
294	0.13	0.26	1.28	0.012	0.019	0.33	0.14	0.4	0.45	0.026	——	60
313 (20)	0.12	0.28	1.32	0.011	0.019	0.31	0.12	0.4	0.45	0.026	——	65
295	0.13	0.28	1.30	0.012	0.017	0.33	0.14	0.42	0.17	0.026	0.013	56
314 (20)	0.13	0.26	1.30	0.011	0.017	0.32	0.12	0.4	0.17	0.029	0.022	66

第一次實驗用鋼料之機械性質

機械性能 / 鋼種編號	Y.S.(kg/mm²)	T.S.(kg/mm²)	El(%)	RA(%)
288	33.8	67.4	21.1	35.5
308	37	72	21.4	34.4
291	35.7	68.5	23	39
309	32.9	64.1	25.7	46.7
292	41.5	78.2	23	41.6
311	36.8	69.7	22.8	42.8
294	42.7	73.7	24.4	48.3
313	37.7	69.6	24.9	42.8
295	33.3	63.3	25.3	44.5
314	40	69.8	26.7	48.9

第一次實驗料間之化學成份差異

288：0.074%P	291：0.017%P
308：0.069%P	309：0.018%P
291：0.45%Cr	292：0.81%Cr
309：0.40%Cr	311：0.82%Cr
291：0.17%Mo	294：0.45%Mo
309：0.17%Mo	313：0.45%Mo
291：0 Ti	295：0.013%Ti
309：0 Ti	314：0.022%Ti

第一次實驗料之合金元素的
強化係數（kg/mm²、wt%）

機械性能 / 合金元素	Y.S.	T.S.	
P	33.3	19.3	65～70
	80.4	154.9	143 120
Cr	16.1	26.9	
	9.3	13.3	
Mo	25	18.6	
	17.1	19.6	
Ti	——	——	
	322.7	259.1	

磷含量對海洋環境之腐蝕速率效應

鋼材編號	磷含量 (wt%)	海水中 (g/cm²) 19.5個月	海水中 (g/cm²) 38個月	潮汐區 (m/m) 19.5個月	潮汐區 (m/m) 38個月	大氣飛沫區(m/m) 19.5個月	大氣飛沫區(m/m) 38個月
291	0.017	0.155	0.260	——	0.28	0.63	1.99
288	0.074	0.154	0.289	——	0.32	——	0.71
309	0.018	0.151	0.290	------		------	
308	0.069	0.158	0.299	------		------	
抗孔蝕程度		291較288佳 308和309均不佳		291較288佳			

鉻含量對海洋環境之腐蝕速率效應

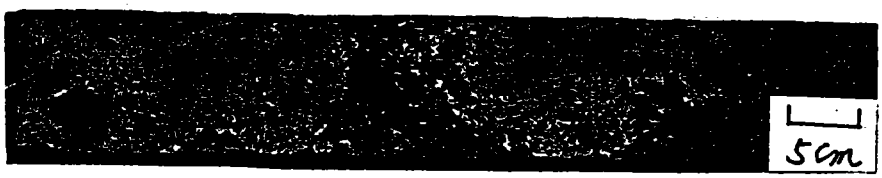
鋼材編號	鉻含量 (wt%)	海水中 (g/cm²) 19.5個月	海水中 (g/cm²) 38個月	潮汐區 (m/m) 19.5個月	潮汐區 (m/m) 38個月	大氣飛沫區(m/m) 19.5個月	大氣飛沫區(m/m) 38個月
291	0.45	0.155	0.260	——	0.28	0.63	1.99
292	0.81	——	——	0.22	0.49	0.94	——
309	0.40	0.151	0.299	------		------	
311	0.82	0.144	0.305	------		------	
抗孔蝕程度		311較309佳		291和292均佳			

鉬含量對海洋環境之腐蝕速率效應

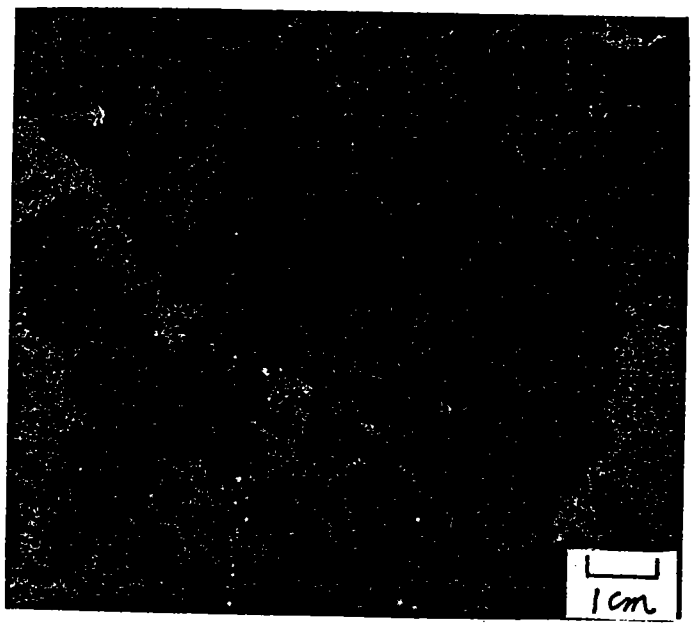
鋼材編號	鉬含量 (wt%)	海水中 (g/cm²) 19.5個月	海水中 (g/cm²) 38個月	潮汐區 (m/m) 19.5個月	潮汐區 (m/m) 38個月	大氣飛沫區(m/m) 19.5個月	大氣飛沫區(m/m) 38個月
291	0.17	0.155	0.260	——	0.28	0.63	1.99
294	0.45	0.156	0.270	0.13	0.16	——	0.87
309	0.17	0.151	0.299	———		———	
313	0.45	0.160	0.326	———		———	
抗孔蝕程度		313較309佳					

鈦含量對海洋環境之腐蝕速率效應

鋼材編號	鈦含量 (wt%)	海水中 (g/cm²) 19.5個月	海水中 (g/cm²) 38個月	潮汐區 (m/m) 19.5個月	潮汐區 (m/m) 38個月	大氣飛沫區(m/m) 19.5個月	大氣飛沫區(m/m) 38個月
291	0	0.155	0.260	——	0.28	0.63	1.99
295	0.013	0.156	0.270	0.25	0.42	1.02	——
309	0	0.151	0.299	———		———	
314	0.022	0.156	0.250	———		———	
抗孔蝕程度		291較295佳 314較309佳		291較295佳			

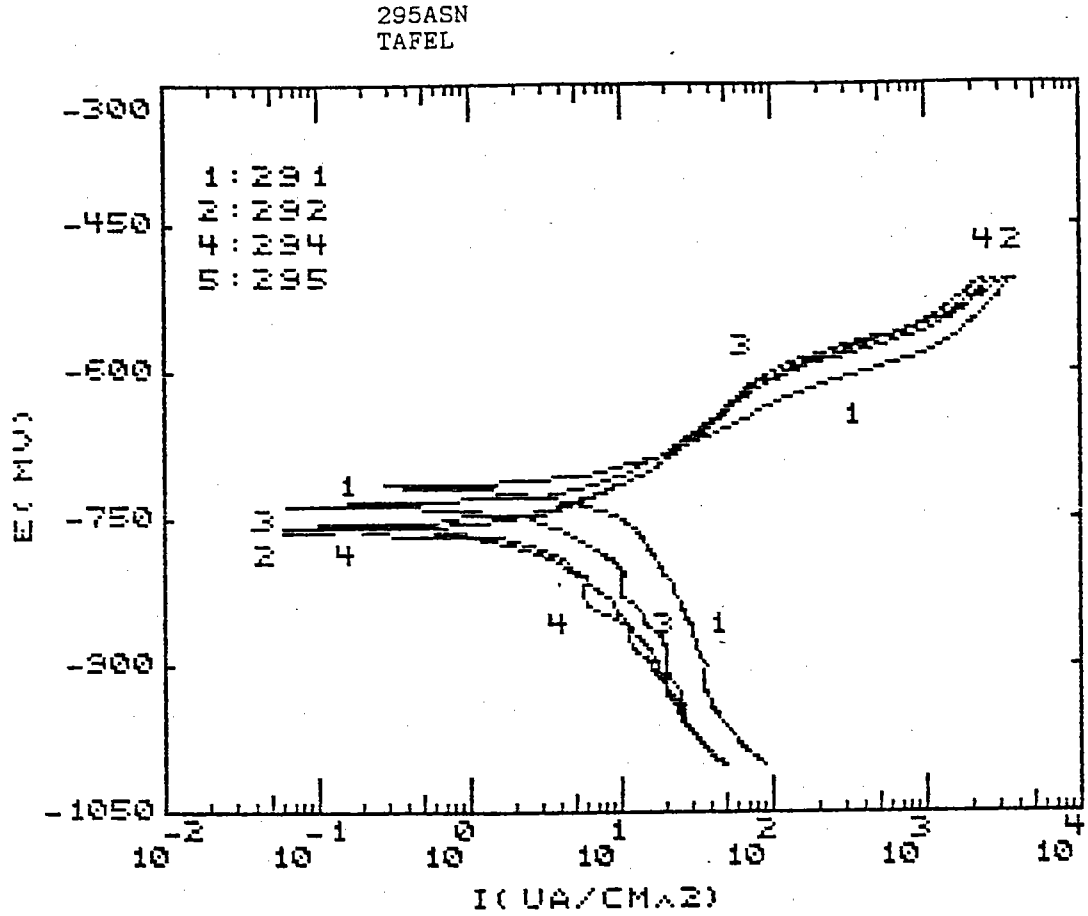


(a) General view



(b) Close up of (a)

Fig. Appearance of 288 steel after exposure in tide zone after 38 months.


295ASN
TAFEL
1:291
2:292
4:294
5:295
-300
-450
-600
-750
-900
-1050
E(MV)
10^-2
10^-1
10^0
10^1
10^2
10^3
10^4
I(UA/CM^2)

腐蝕性質 / 鋼材編號	腐蝕電位 (mV v.s. SCE)	腐蝕速率（MPY） Tafel Plot	腐蝕速率（MPY） Linear Plot
291	-787	1.96	2.3
292	-753	2.15	1.88
294	-732	3.31	3.4
295	-758	2.29	2.15
A-36	-791	1.11	1.31

腐蝕失重10-4g/mm² / 鋼材編號	厚度 (m/m)	14天	28天	42天	49天
288	8.1	1.148	2.294	2.654	3.297
291	8.1	2.123	——	2.398	3.598
292	8.1	1.706	1.979	3.543	3.819
294	8.1	1.227	1.93	3.417	3.657
295	8.1	0.976	1.998	2.796	3.488
A-36	8.3	1.98	2.199	4.31	5.324

初步結果：1.磷的添加有益於大氣飛沫區的平均抗蝕性，對海水和潮汐區無影響。對孔蝕有些微不良效益。

2.鉻對抗蝕性無顯著效應。

3.鉬的添加有益於潮汐和大氣飛沫區的平均抗蝕性，對海水區無影響，但於海水區，有助抗孔蝕。

4.鈦的添加稍有助於在海水區的平均抗蝕性和抗孔蝕性。

5.添加合金使鋼材電位較貴重，腐蝕速率減低。

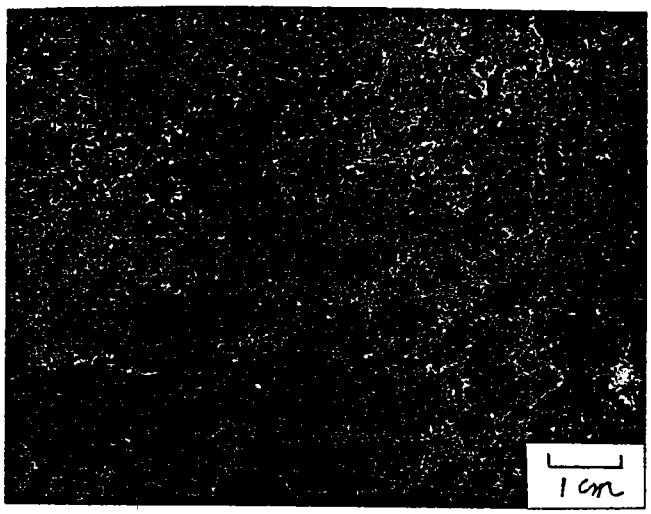
鋼種 \ 合金元素 / 厚度mm		C	Si	Mn	S	P	Cu	Ni	Cr	Mo	Al	Ti	N
		(wt%)										(ppm)	
457	20	0.112	0.046	0.83	0.0098	0.086	0.46	0.57	—	—	0.021	—	56
458	20	0.108	0.25	1.12	0.0101	0.021	—	—	0.81	0.20	0.031	—	60
AcrTen A	4.5	0.1	0.44	0.47	0.005	0.092	0.31	0.24	0.58	—	0.022	—	70
A36	20	0.13	0.25	0.85	0.015	0.018	—	—	—	—	—	—	—

鋼材種類	海水中(g/cm²) 29個月	潮汐區(m/m) 11.5個月	29個月	大氣飛沫區(m/m) 11.5個月
457	0.401	0.42	1.2	0.72
458	0.324	0.36	1.3	0.7
AcrTen A	0.137	0.16	—	0.56
A36	0.226	0.22	—	0.58
抗孔蝕程度	457和458在海水和潮汐區均有嚴重孔蝕Acr TenA在海水中之孔蝕亦嚴重			

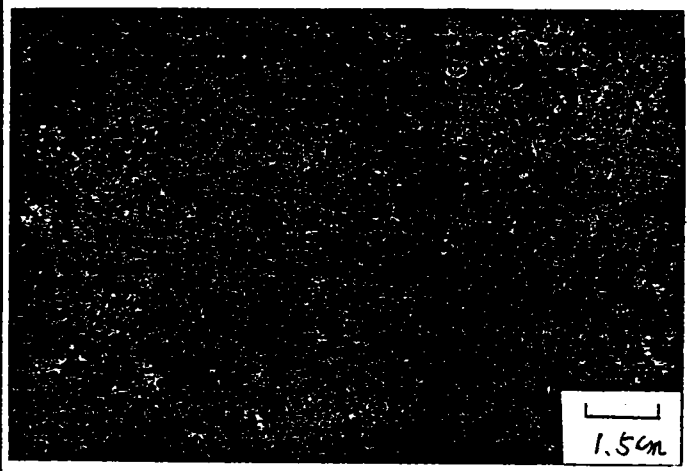
初步結果：1.未含Cr，Mo或未含Cu，Ni對抗海洋環境之侵蝕均差。

2.Acr Ten A之腐蝕速率較低，但抗海洋環境之孔蝕亦欠佳。

(a) 458 General view

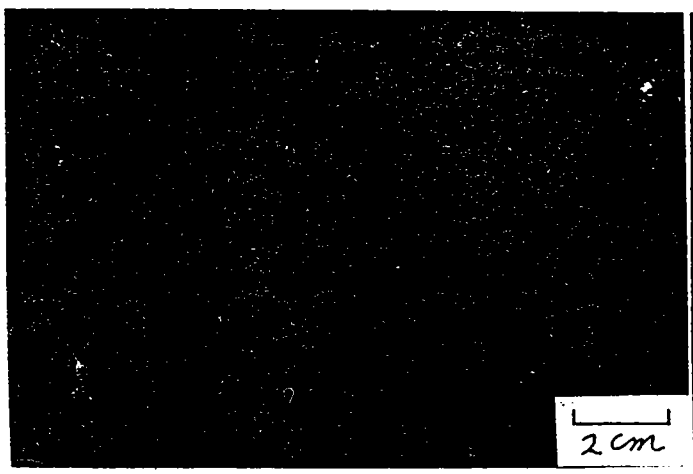


(b) Close up of(a)



(c) General view

Fig. Appearance of 458 steel after exposure in tide zone (a,b) and sea water (c) for 29 months.



(a) A36

(b) Acr Ten A

Fig. Appearance of A36 and Acr Ten A steels after exposure in sea water for 29 months.

Powdar x-rey diffraction data of rust formed on steels after exposure in Taichung Habour for 11months.

A-36 Inner layer	A-36 Outer layer	Acr Ten A Inner layer	Acr Ten A Duter layer	ASTM
2θ Intensity	2θ Intensity	2θ Intensity	2θ Intensity	2θ I/I_1 Compound
14.2 S				
19.6 S				
24.7 S	24.4 S.	24.7 S	24.9 S.	24.71 100 α-FeOOH
28.0 V.V.W.				28.29 25 α-Fe_2O_3
31.1 V.S.	31.2 S.	31.4 S.	31.5 W.	31.52 90 γ-FeOOH
35.2 W	35.3 V.V.W.	35.2 V.W.	35.4 W.	35.09 30 Fe_3O_4
38.7 V.W.	39.0 V.W.	38.7 W.		38.84 30 α-FeOOH
40.2 V.W.			40.7 V.V.W.	(38.83 100 α-Fe_2O_3)
41.2 V.S.	41.4 W.	40.8 V.W.	41.6 V.S.	41.38 100 Fe_3O_4
42.8 W.	42.8 S.	42.7 V.S.	43 S.	42.79 25 α-FeOOH
44.5 V.W.		44.6 V.V.W.		44.54 20 γ-FeOOH
45.8 S.			46.2 V.V.W.	
46.6 V.V.W.	46.5 V.V.W.	46.8 W.	46.9 V.W.	46.74 V.S. δ-FeOOH
48.1 V.W.		48.3 W.	48.4 W.	48.16 20 α-FeOOH
50.4 W.	50.6 V.V.W.	50.7 V.W.	50.7 W.	50.41 20 Fe_3O_4
51.2 V.V.W.				(50.68 20 γ-FeOOH)
54.3 S.			55 V.W.	55.01 70 γ-FeOOH
57.4 V.V.W.		58 V.V.W.		57.89 20 γ-FeOOH
59.1 V.V.W.	59.0 V.V.W.	59.1 V.V.W.	59.4 V.W.	
61.1 V.W.				62.19 40 γ-FeOOH
62.5 W.	62.4 W.	62.4 S.	62.6 S.	62.62 20 α-FeOOH
65.8 V.S.	65.9 V.V.W.	66.1 V.V.W.	66.2 V.W.	
67.4 W.	67.4 V.V.W.	67.6 V.W.	67.6 S.	67.21 30 Fe_3O_4
69.5 W.	69.5 V.W.	69.8 W.	69.7 S.	69.77 16 α-FeOOH
72.1 S.	72.5 V.W.	72.5 W.	72.6 S.	74.07 40 Fe_3O_4
74.2 S.	74 V.V.W.	74.2 W.	74.5 V.S.	74.12 35 α-Fe_2O_3
76.0 S.	75.8 V.V.W.	75.9 V.W.	75.9 V.W.	76.06 35 α-Fe_2O_3

V.S. : Very strony , V.W. : Very weak

三、結論

1.Ti，P均具明顯之强化效果。

2.P有助於大氣飛沫區之平均抗蝕性。

3.Cr對抗蝕性無顯著效應。

4.Mo可些微增進平均抗蝕性，而對抗孔蝕增益很大。

5.Ti的添加稍有助於在海水中之平均抗蝕性和抗孔蝕性。

6.添加合金愈多，會使鋼材之電位愈趨貴重。

7.未含Cr，Mo或未含Cu，Ni對抗海洋環境之侵蝕均差。

8.A-36，A-588，Acr Ten A較此類鋼材不適用於海洋環境。

9.利用電化學測出之最初腐蝕速率不足以代表其長時間之抗蝕性。

四、未來工作

1.利用正常化和熱處理方法使鋼材均質化，降低孔蝕的發生。

2.利用A.C.Impedance測試較長時間浸泡和曝露試片之腐蝕速率和抗蝕特性。

3.考慮OLAC或TMCP製程及焊接性研究。

4.陰極防蝕和抗腐蝕疲勞之問題。

5.研究添加Mo對此類鋼材之機械性質，顯微組織之效應。

6.訂出現場可產製之條件和合金成份。