港灣技術研究所專刊第23號

港灣鋼筋混凝土結構物防蝕技術研討會

資料彙刊

中華民國七十四年八月廿,廿一日

台灣省交通處港灣技術研究所編印
台中縣梧棲鎮臨海路83號

序　言

本所成立宗旨在研究發展港灣技術，培育及訓練港灣技術人才，其中港工材料組負責港灣工程材料試驗，港灣結構物破壞診斷與防制對策及發展新港工材料。鋼筋混凝土爲最常用的港工材料，其耐久性及防蝕對策爲各港務局最關心問題之一，也是本所港工材料組未來研究的重點。

承中華民國防蝕學會理事長陳文源先生的鼓勵與協助，及各港務局、顧問公司及工程公司的支持，本所於民國74年 8 月20日、21日兩天，首次舉辦「港灣鋼筋混凝土防蝕技術研討會」，邀請國內外從事腐蝕研究的專家學者主講，與會人員十分踴躍，爲一次成功的研討會，可見工程界已重視海洋腐蝕問題。研討會已圓滿結束，爲使寶貴資料保存下來，並供港灣界同仁隨時參考，乃央請主講人義務撰寫，本所港工材料組同仁整理編輯，完成專刊。因付梓倉卒，校對難免有誤，尙請先進不吝指正。

梁　乃　匡　　謹識

民國74年10月

編者的話

世界各國每年因腐蝕所造成之金錢損失，達國民生產毛額之２％，這的確是一筆龐大之損失，而其中絕大部份的腐蝕可藉現有技術有效地防止與控制。

在港灣結構物中，就同時考慮經濟性與耐久性之觀點而言，鋼筋混凝土爲最佳之港工材料，然而在鋼筋混凝土中均有微細裂紋存在，雖然使用高品質混凝土，其孔隙及裂縫較少，透水性較低，然而在海洋環境中，因受氯離子、硫酸根離子及乾濕…等作用及混凝土中性化，使裂縫增大，加速氧氣、氯離子…等之滲入使鋼筋腐蝕，而腐蝕後之鋼筋，體積增大，造成混凝土之龜裂，更加速整個鋼筋混凝土結構物之腐蝕。

爲確保港灣R.C結構物耐久性，必須事先研究防蝕對策，否則將於完工後花費鉅額之維護費用，由於混凝土龜裂與鋼筋腐蝕機理複雜，最近在國內外已掀起研究風氣，本專題亦爲本港工材料組之研究重點，特召開此研討會，希望藉此拋磚引玉，引起大家對防蝕技術研究興趣，共同致力於開發有效防止及控制腐蝕之技術，本組同仁將朝此一目標，與工程界共同努力，尙祈各界先進隨時指正。

本次研討會由於本組饒助理研究員正之精心籌劃，國內外在此方面研究之專家學者不計報酬到本所主講，各港務局總工程司均能親臨主持，各港務局、顧問工程公司、工程單位及公路局等單位派員參加研討，尤其應感謝各界在財力上給予我們的支援，使本研討會深受好評。本組同仁蘇助理研究員瑞榮、吳助理信昇、徐如娟小姐、馬維倫小姐、曾文傑先生等協助整理記錄、繪圖及校稿，才能使本彙刊順利完成，特此致謝！

港灣技術研究所
港工材料組　組長　林維明　謹識

目　　錄

2.贊助單位一覽表

3.研討會課程表

4.參加人員名册

㈡贊助單位業務範圍及服務事項

㈢港灣技術研究所港工材料組簡介

港灣鋼筋混凝土結構物防蝕技術研討會

Seminar on Corrosion Protection Technology of Marine Reinforced Concrete Structures

腐蝕原理介紹

主講人：張一熙

台灣省交通處港灣技術研究所主辦

中華民國七十四年八月

腐蝕原理介紹

張一熙博士主講

一、前言：

我雖然專門研究腐蝕，但對混凝土在海水中之腐蝕研究做的並不多，主辦單位安排我講解腐蝕原理，所以今日主講之重點在現代電化學理論，腐蝕原理及陰極防蝕之應用。

腐蝕是非常專業的學問，研究的人數也很多，在英國召開之腐蝕年會參加人數約七、八佰人，歐洲地區年會也有一千多人參加，而腐蝕研究也很系統化，有關R.C之腐蝕，在國外之研究方向非常廣泛，有土木材料、化工方面之專業人員參與研究，現在我介紹一本英國 Society of Chemical Industry出版之「Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction」之目錄介紹各位參考（附錄一）大致上說腐蝕是一門很特殊之學問，如果R.C用在海水中更是一門專門的學問，從這本書之目錄中可看出其複雜性，該書分成四大部份：

(一) Extent and Nature of the problem

包括如何作Exposure test（暴露試驗），Failure analysis ……等。

(二) Mechanisms

包括影響R.C中鋼筋壽年縮短，而影響整體結構之因子（Factor），如氯離子……等。

(三) Diagnosis，Monitoring and Repair

包括如何診斷、監測、修護……等，是很重要之重點之一。

(四) Avoidance and Design Recommendations

包括設計及施工應注意事項，以增加R.C之壽年。

這種專業書籍通常介紹R.C之腐蝕及R.C在海水中之腐蝕……等研究方向，今天我雖然介紹腐蝕原理，但亦包括許多混凝土學之專業知識在內，譬如導致R.C中

鋼筋腐蝕之肇因，如裂縫（ Crack ）……等，另附一份R.C之腐蝕檢驗項目，包括Chemical,Physics,Mechanical, 電位、電阻量測……等，由表（附錄二）中可看出其複雜性，不是腐蝕工程師能獨立作業的，還須加入土木方面之專業知識，才能達到研究之效果。

二腐蝕原理介紹：

從圖1.中可看出R.C腐蝕造成破壞之原理：

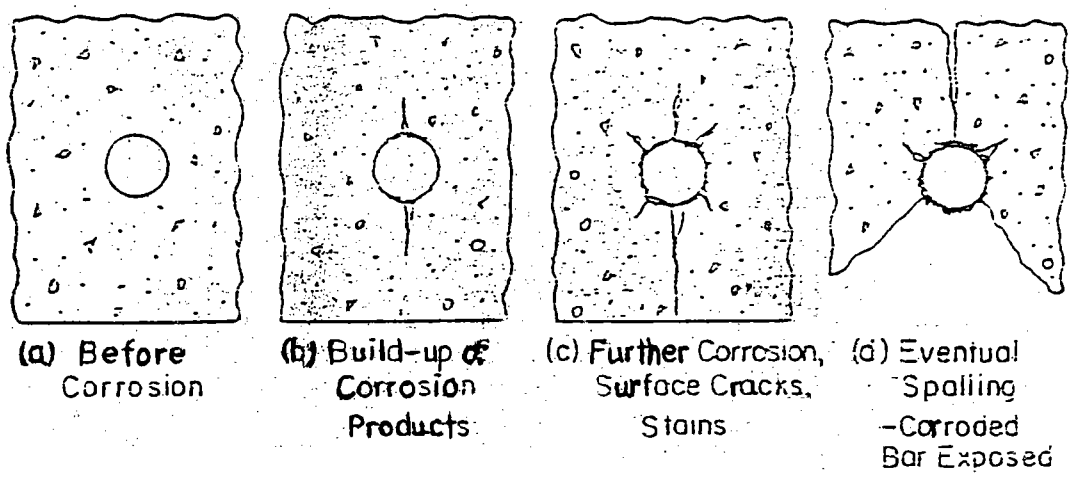


圖1. R.C中因腐蝕產生之破壞變化

(a)未腐蝕前

(b)鋼筋開始腐蝕產生腐蝕生成物（鐵銹）

$Fe \rightarrow Fe^{++} \rightarrow Fe(OH)_2$……等

鐵銹之體積會膨脹兩倍，而原來鋼筋與混凝土有良好的握裹力，但如果鐵銹生成，在混凝土外表並未改變，但原有彈性（ Elastic ）有限，無法承受鐵銹體積膨脹產生之內應力，而產生裂縫（ Crack ）。

(c)裂縫繼續延伸至混凝土表面，更加速R.C之腐蝕。

(d)混凝土保護層崩解，鋼筋露出來。

如果R.C有裂縫，則腐蝕因子如O_2……等滲入，鋼筋會銹的很快，而鋼筋強度，以截面積計算，腐蝕後其截面積縮小，不能承受原設計強度，使R.C產生破壞。

所以R.C之破壞可分兩部份討論，一是鋼筋；另一是混凝土，在R.C中混凝土是供給鋼筋一個環境，但在不同之環境下，其實驗會產生很大之差異，如使用之水泥種類，導電度之高低，是否泡在海水中，有無裂縫……等。

例如在裂縫之延伸試驗中，在10個月以內，有的裂縫不會延伸，有的延伸很快，又如鋼筋以犧牲陽極方式處理（鍍鋅，或Zinc Base Alloy），5年內R.C.根本不改變，如果未經過處理之鋼筋，則不到2年R.C之裂縫就會開始產生，以上所談是一些不同實驗的例子。

現在將R.C中混凝土與鋼筋腐蝕的基本型態產生電位差之例子介紹；如圖2圖3。

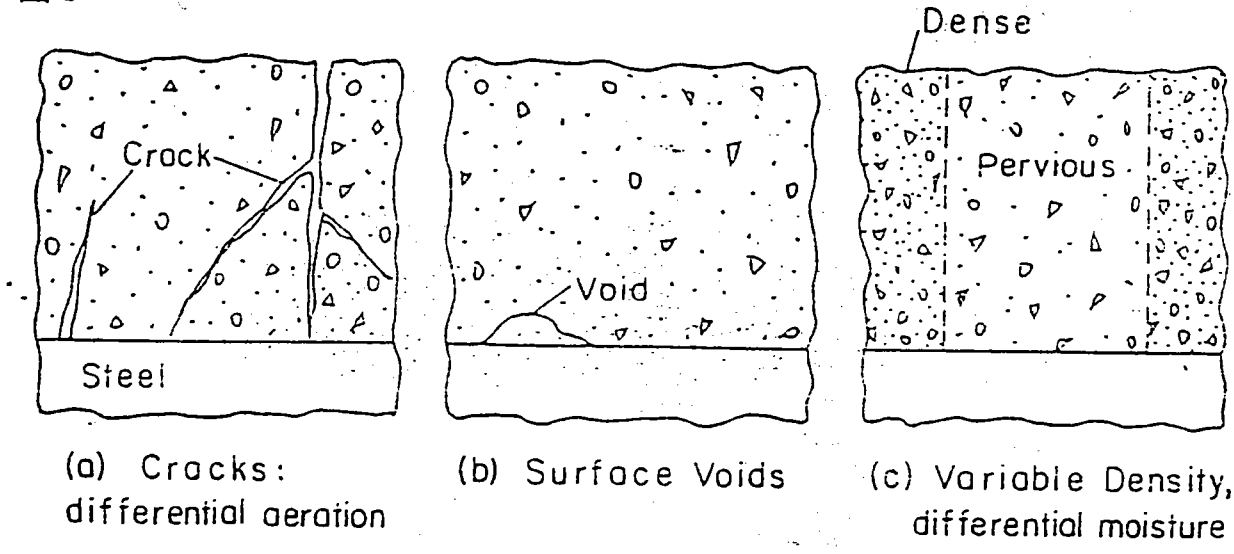


圖2. R.C中由混凝土產生之電位差

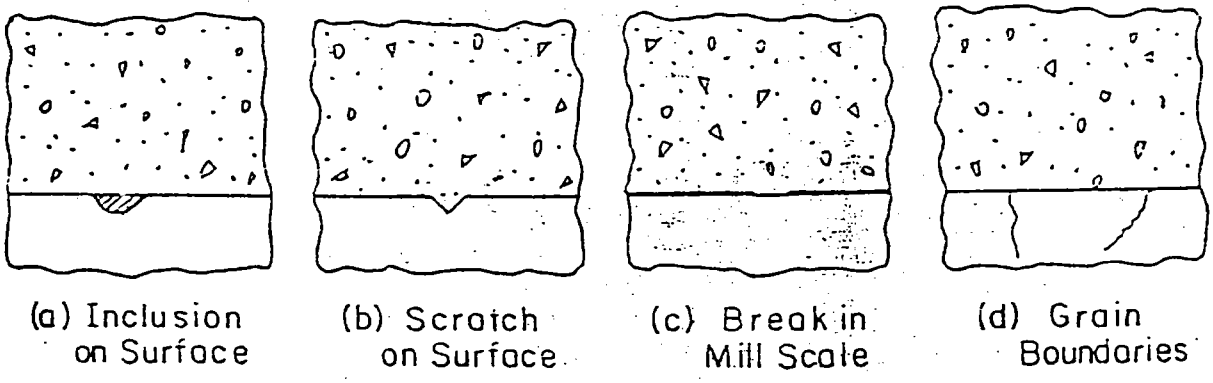


圖3. R.C中由鋼筋產生之電位差

圖 2.(a)　R.C中產生裂縫，使空氣含量不同產生電位差。

(b)　R.C中混凝土與鋼筋接觸面產生空隙，而產生間隙腐蝕。

(c)　R.C中因混凝土之密度不同，則孔隙不同，而產生不同之含水量，發生之電位差。

圖 3.(a)　R.C中鋼筋之材質不均勻產生電位差。

(b)　R.C中鋼筋上部有凹痕，產生間隙腐蝕。

(c)　R.C中鋼筋表面保護層損害產生電位差。

(d)　R.C中鋼筋在冶金時，產生結晶破壞，一般金屬之個體結晶（Partical Crystal)不很規則而Grain Boundaries（晶界）提供間隙，而產生降低強度之通道，如Stress cracking,Fatigue試驗的晶界是主要之考慮因素。

由圖 2. 及圖 3.中可知其由於局部區域不均衡，如密度不均勻，氧氣含量之多寡，則電位不同產生電位差，提供力量造成腐蝕電位而腐蝕。

三、腐蝕型態：

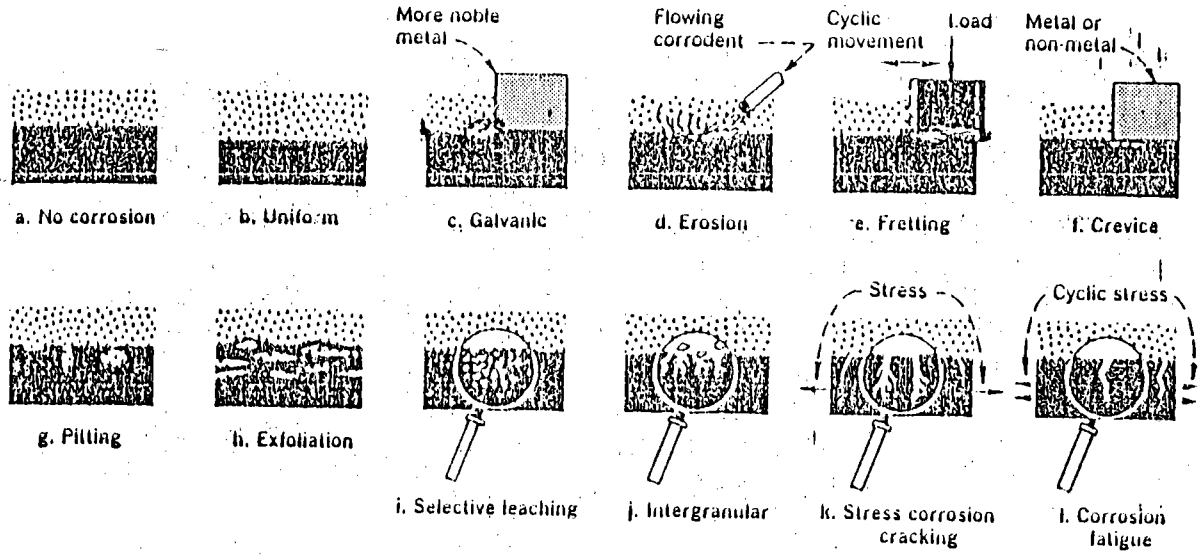


圖 4.　腐蝕分類

一般腐蝕可分許多類型，如圖 4.，但在R.C中以(b)均勻腐蝕（Uniform）(c)流電腐蝕（Galvanic)，(f)罅隙腐蝕（Crevice），(l)腐蝕疲勞（Corrosion Fatigue）較重要。

(1)腐蝕疲勞：在海岸結構物中如海浪之沖擊因Loading之狀況，產生振動（Vibration）不論是低或高頻率（low or high Cycle）均產生疲勞（Fatigue），腐蝕會將疲勞加速，原來能耐 10^8Cycle 之振動，但經腐蝕疲勞後其疲勞極限（fatigue limit）會降低好幾分之一。

(2)罅隙腐蝕：我現在舉個例子向各位說明，譬如在汽車的合金製保險槓上沾了泥土，你可能想泥土蓋在保險槓上，雨水須經過一陣子，才能滲透到保險槓，泥土還可當作保護層用，其實這是不對的，你過了一陣子將泥土刮掉，會發現合金製的保險槓上有小洞產生，時間越久小洞愈深，這就是罅隙腐蝕，另外如可口可樂的瓶子放在不銹鋼的水漕上，瓶底之凹槽愈小，造成之濃度電池差愈大，時間愈久，銹的愈厲害，即使是304不銹鋼也會生銹，這也是罅隙腐蝕。

四電化學理論：

(一)氧氣濃淡電池（Oxygen Concentration Cell）

任何腐蝕之產生必須有陽極反應和陰極反應，而自然腐蝕之陽極反應速率等於陰極反應速率。

(1)陽極（Anode）是氧化反應的地方，即鋼鐵放出電子或離子，離子會水解或生成其它化合物。

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

(2)陰極（Cathode）是產生還原反應的地方，在中性溶液中如海水……等，水與空氣中的氧（O_2）吸收電子而形成氫氧離子（OH^-）。

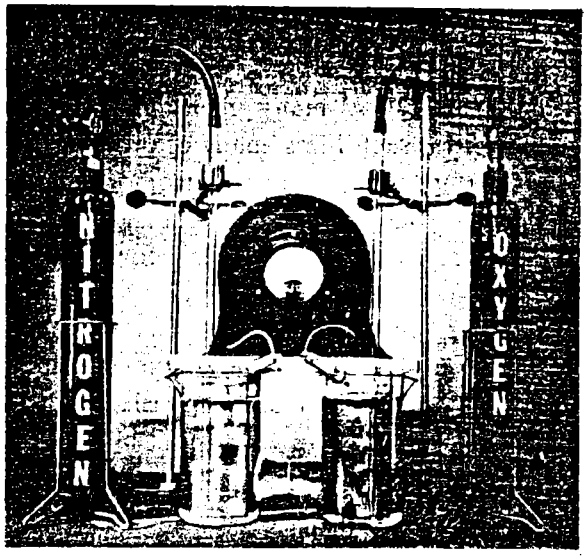
$2H_2O + O_2 + 4e^- \rightarrow 4OH^-$

根據質能不滅定律，在一般電化學反應中，陽極反應放出的電子由陰極得到而在中性溶液中O_2 是主角，（一般海水中的含有 10ppm的溶氧，在開放系統（Open System）中，因體積太大，無法將 10ppm的溶氧除掉）水中之溶氧提供給陰極反應，得到電子後產生氫氧離子（OH^-），反應繼續進行，若沒有沈澱，則 PH 值會逐漸上升，總而言之我們可肯定的在自然腐蝕，即氧化與還原，也就是陽極反應的總量等於陰極反應的總量，氧氣濃度之多少，在電位圖上可改變電位的高低，氧氣多則電位高，氧氣少則電位低，在同一鐵的表面，但是是連通的就是

說氧氣多與氧氣少的地方是連通的，因氧氣濃度不同，就會有電位高低而產生電壓差，有電壓差就會趨動電流，就可使鋼鐵腐蝕，換句話說，是要有電壓差，差到某一程度如 100mv就可以產生腐蝕電流，造成這種環境就會腐蝕，如果在同一鐵表面造成電壓差，能導通（如濕氣、海水…等）就會產生局部濃淡電池（ Local Concentration Cell)造成腐蝕。

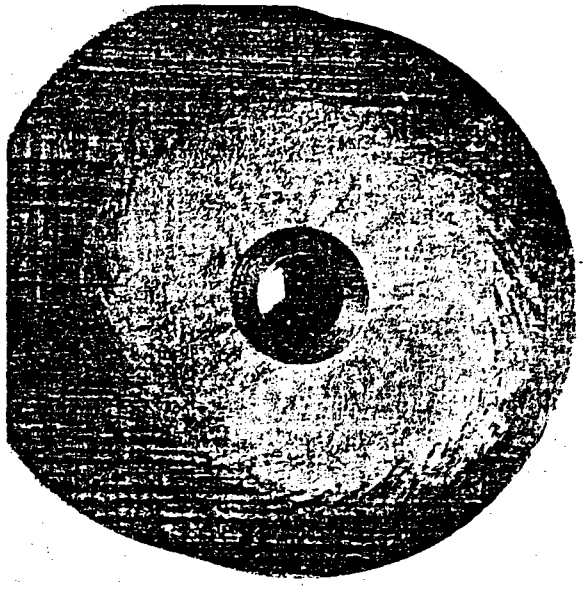
圖 5.就是介紹一個實驗，兩塊鐵板放入燒杯內，一邊充氮氣（ N_2 ），意義就是除氧，另一邊充氧氣（ O_2 ），就是提供充份的氧氣，在尚未通氣前沒有電位產生就是沒有電流流動，充氣後，通N_2這邊電位就下降，充O_2電位不變，這樣就產生電壓差，這就證明因O_2 之溶度不同而產生電壓差。

圖 6.是一張轉盤腐蝕的照片，在同一鐵製的轉盤上，邊上氧氣充足成陰極，中間氧氣較少成陽極，而產生濃淡電池，使中間部位被腐蝕。



Experiment to demonstrate generation of a corrosion current by an oxygen concentration cell.

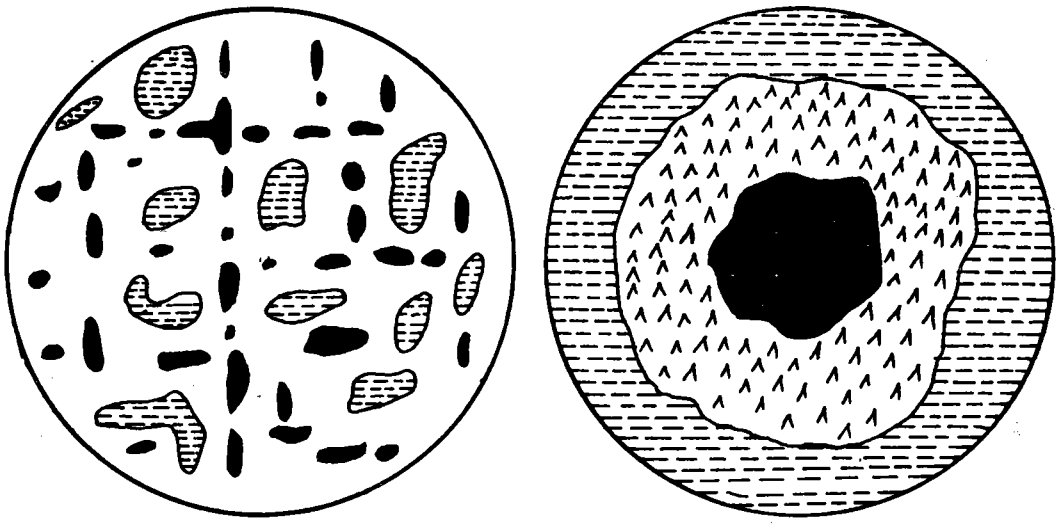
圖 5.



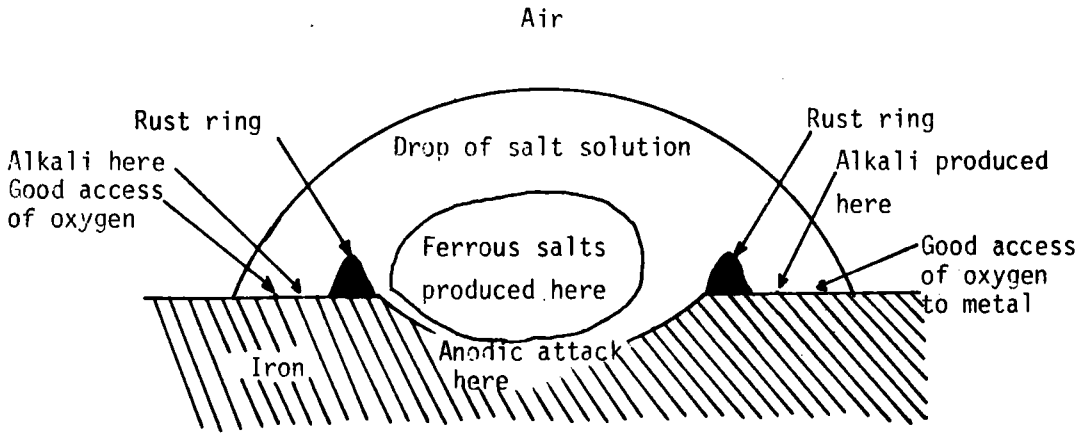
Corrosion by an oxygen concentration cell near the center of an iron disc rotating in sea water.

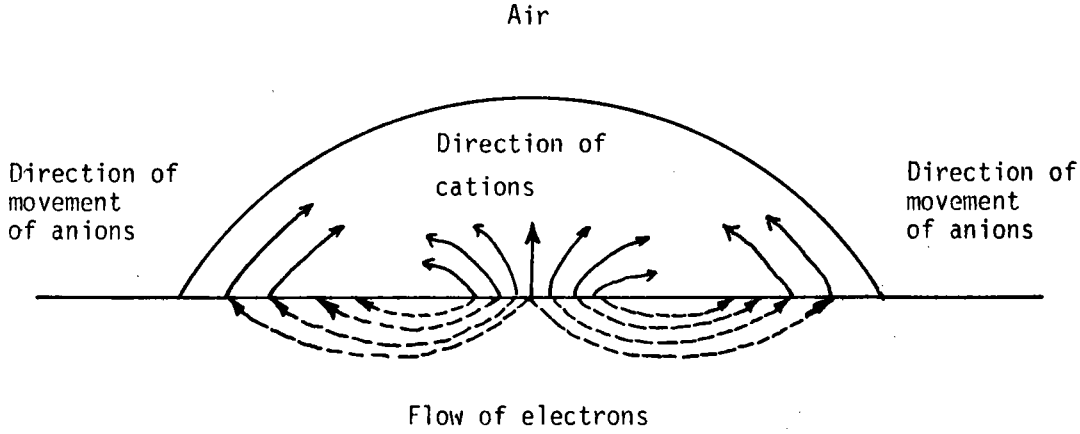
圖 6.

接下來我們作一個非常有名的實驗，即由一滴塩水可看出腐蝕機理（ Corrosion Mechanism)，圖 7.中由一滴塩水滴在塗有指示劑的鐵片上，由水溶液顏色之變化，可指示其酸鹹性及腐蝕之產生。



Pink(cathodic) Blue(anodic corrosion) Brown(rust)





Action of drops of potassium chloride on iron with ferroxyl indicator to show up anodic and cathodic areas

圖 7

$Fe \rightarrow Fe^{++} + 2e^-$ 陽極（藍色）

$1/2O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2(OH)^-$ 陰極（粉紅色）

$> Fe(OH)_2$

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

開始時如圖 7. a 可看出顏色分佈很均勻，表示尚未產生陰陽極，即無腐蝕發生，隔幾小時後，可看出如圖 7. b 之顏色分佈，邊上成粉紅色（陰極），中間成藍色（陽極），其它是鐵銹（棕色），表示已有腐蝕發生。

以上之現象可由圖 7. c 來解釋，在小水滴外圍，因和空氣接觸得到較多的氧，（空氣中有20％的氧氣）水滴中央部份距離最遠，氧氣擴散距離最長， 含氧量較少，則表示距離決定氧氣多少之重要因素，在腐蝕時 $Fe \rightarrow Fe^{++}$ 需消耗氧氣，爲了維持反應繼續產生，則需維持一定濃度之氧氣，則外圍氧氣較多，中央較少，形成局部濃度電池（ Local Concentration Cell）氧氣多的成陰極區，氧氣少的的成陽極區，最後中央成陽極區（藍色），四週成陰極區（粉紅色）（產生腐蝕）。亦表示產生腐蝕之主要因子爲氧氣，並不是水，如果除氧則可防止腐蝕。

另外在電化學中，陽極失去電子，陰極需取得電子，形成交換電子之反應，因金屬之電傳導很快會形成電子流，在該實驗上加一磁場，電子在磁場內會轉向，則水滴在鐵板上旋轉，這表示有電子在流動，則表示有腐蝕產生，可由圖 7. d 來表示。

由以上之實驗可知電化學反應中的陽極反應，得到電子的陰極反應，而總量相等。

圖 8. 是我在實驗室作的氧氣濃度及電位與時間之變化圖，氧氣濃度以N_2來除氧，一通N_2不到 5 分鐘電位馬上下降，也就是說氧氣濃度少時則電位較低。

由以上一系列之實驗可證明氧氣之多少可決定電位之高低，因電位之高低產生電位差，可趨動電流而產生腐蝕。

㈡電流與腐蝕速率的關係：

在熱力學中指出有電位差時，表示有腐蝕的趨勢，但因無時間之控制因素，無法預測腐蝕速率的快慢，腐蝕速率由電流（ Current ）來決定，電流是庫倫／時間，電流大表示同樣的庫倫數在短時間流過，根據法拉弟定律，可將電流大小換算成腐蝕速率。

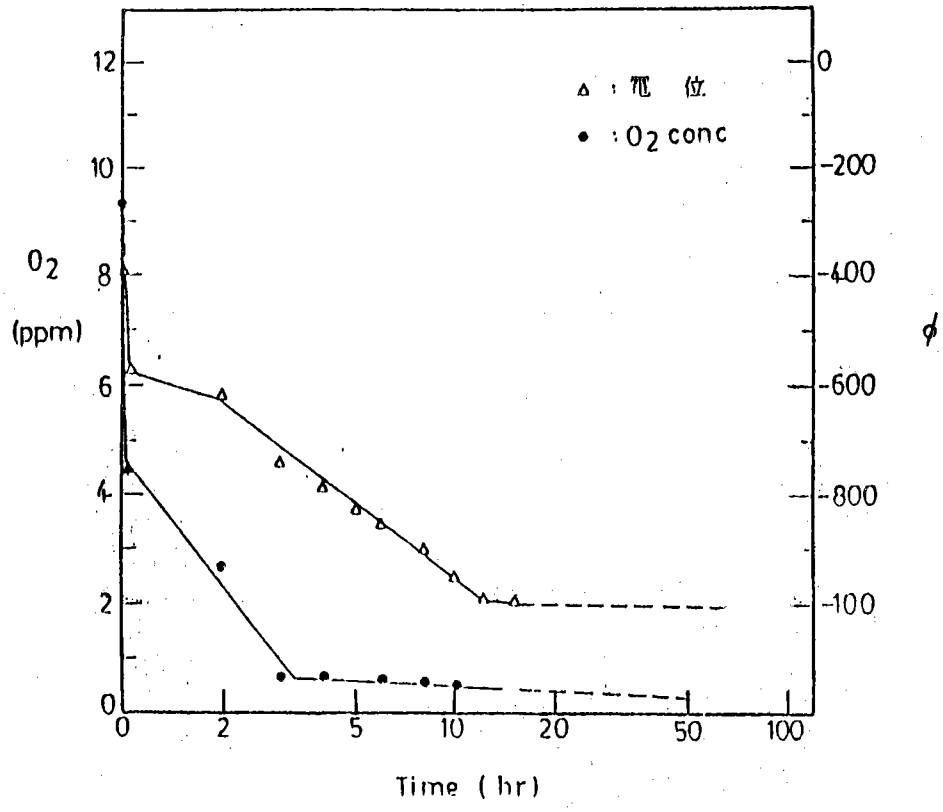


圖 8 以 N_2 於液面除 O_2 溶氧量及碳鋼電位隨時間變化圖。

㈢活性鈍態金屬的特性：

不同之金屬，在不同之電位，其電流之趨勢不同，而活性－鈍態金屬，在低電位時，電流很大，電位愈大時，電流愈大，但當鈍化膜形成時，離子跑不出去，電流變小，即腐蝕速率小（離子之進出速度，可差到一百萬倍）若超過此電位，則鈍化膜會破洞，電位太低，鈍化膜又不形成，此爲活性－鈍態金屬之特性如圖 9.

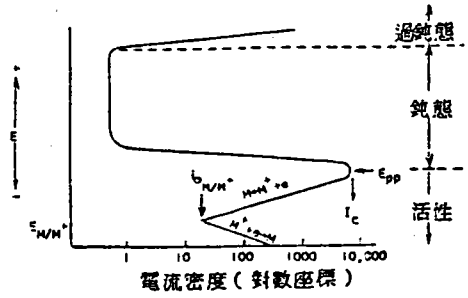


圖 9.活性－鈍態金屬之陽極極化曲線

*鈍化膜－如不銹鋼的錶帶，有 30Å厚之鈍化膜（ 1 個原子約 2Å ），換句話說有十多層原子層厚之鈍化膜，該膜佈的很密，又可自動修補，鈍化膜一旦刮掉，約5ms 就可修補完成，又變成不銹，不銹鋼是較特殊的合金，而鐵也有此種鈍化膜的產生。

五、防蝕技術理論：

㈠陽極防蝕：

利用恒電位儀（ Potentiostate ）將陽極電位升高，電流降低產生鈍化膜，可達到保護的目的。

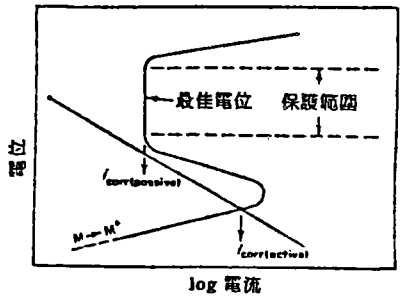


圖10. 陽極防蝕之極化曲線

㈡陰極防蝕：

鐵的鈍化膜不如不銹鋼之鈍化膜好，而且陽極保護的區域很窄，在R.C中用陽極防蝕很少，一般多用陰極防護。

陰極防蝕方法有二：

1.外加電源：使外加直流電源之陰極接於一導電之廢鐵塊，外加陰極電流的大小應該正好能夠使腐蝕電流下降至零。

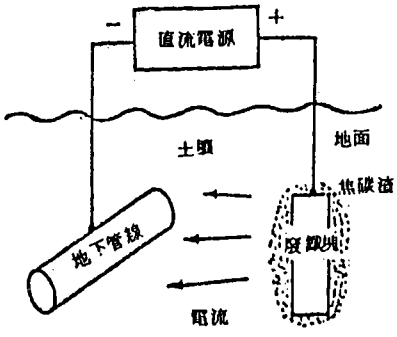


圖11. 外加電流之陰極防蝕

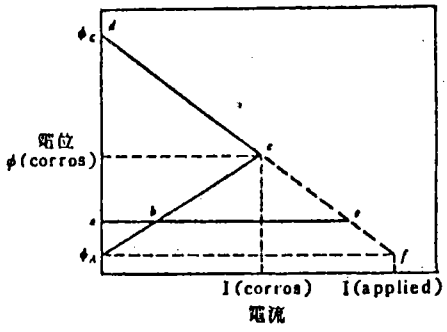


圖12. 外加電流之陰極防蝕原理

2.犧牲陽極：選用較活性（ active）電位低之金屬，如鋅、鎂、鋁……等與電位較高之金屬偶合（ Couple ）在一起，產生伽凡尼電池作用（ galvanic cell）使原有之腐蝕速度降爲零，而保護了陰極金屬，此原理係利用合成電位理論（ Mixed － Potential theory ）中總氧化速率和等於總還原速率和之原理。

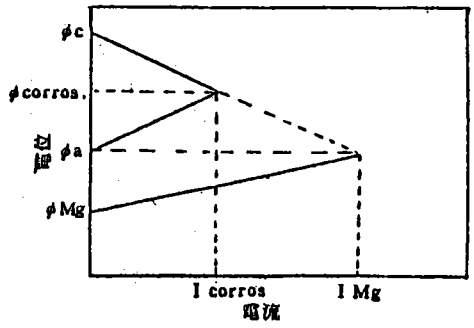


圖13. 犧牲陽極之防蝕原理

Table of Contents

PART 4 – AVOIDANCE AND DESIGN RECOMMENDATIONS

1/13

附錄二

Table 2 – Techniques employed in durability surveys

	PROPERTIES EXAMINED	TESTING TECHNIQUES	OTHER CONSIDERATIONS
ON SITE	*MECHANICAL*		
ON SITE	Concrete surface quality	Schmidt hammer rebound number – type N equipment	Errors due to surface softening, cracks or laminations etc.
LAB	Compressive/tensile strength	Test on cores	To BS 6075
ON SITE	*CHEMICAL*		
ON SITE	Carbonation	Depth measurement using phenolpthalein spray	
ON SITE	Chloride, sulphate and moisture contents	Drillings to collect dust samples in 10 to 25 mm bands through the concrete using percussive drill	Analysis in accordance with BS 4550. Results are curve fitted to produce penetration rate coefficients.
LABORATORY	*CHEMICAL*		
LABORATORY	Concrete mix proportions	To BS 1881, Pt. 6, Analysis of hardened concrete	
LABORATORY	Cement type	Aluminium : iron ratio	OPC = Al:Fe > 1.5 SRPC = Al:Fe < 0.9
LABORATORY	Original water/cement ratio		
LABORATORY	Minerological composition	X-ray diffraction using diffractometer (copper $k\alpha$ radiation)	
ON SITE	*PHYSICAL*		
ON SITE	Condition of embedded steel	Electrochemical potentials	Careful interpretation using ASTM C876-80 interrelated with experience and results from other NDT techniques.
ON SITE	"	Electrical resistivity measurement	Based on soil resistance measurement.
ON SITE	"	Ultrasonic pulse velocity using Pundit with exponential heads (indirect method)	Variable head spacing with best fit line spacing versus time used to calculate velocity.
ON SITE	"	Endoscope – visual inspection of embedded steel	
ON SITE	Condition of cover	Fe depth metre – cover, reinforcement size/spacing	Problems where cover over 100 mm, where mesh is used etc.
LABORATORY	Permeability of cover	Water permeability – oxygen diffusion coefficient	Very susceptible to concrete preconditioning, i.e. laboratory conditions of storage
LABORATORY	Coefficient of thermal expansion		
LABORATORY	Concrete density/porosity		Usually determined during permaeability testing
LABORATORY	General (steel and concrete)	Visual and microscopic examination using optical and polarised light microscopes	Identification of aggregate source, presence of slag, pfa etc.

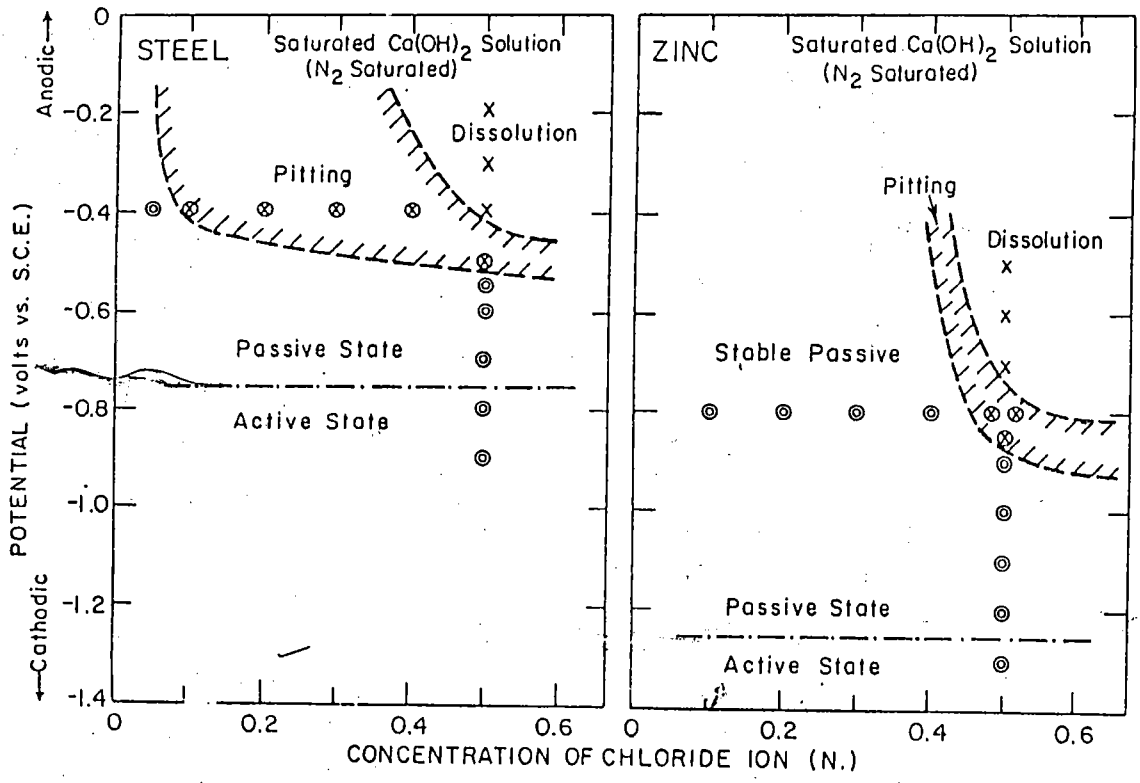


Fig. 7. Corrosion characteristics of steel and of zinc in presence of chloride ion. Differentiation of these characteristics was made from time-variation of anodic current during potentiostatic electrolysis for six hours after addition of chloride ion.

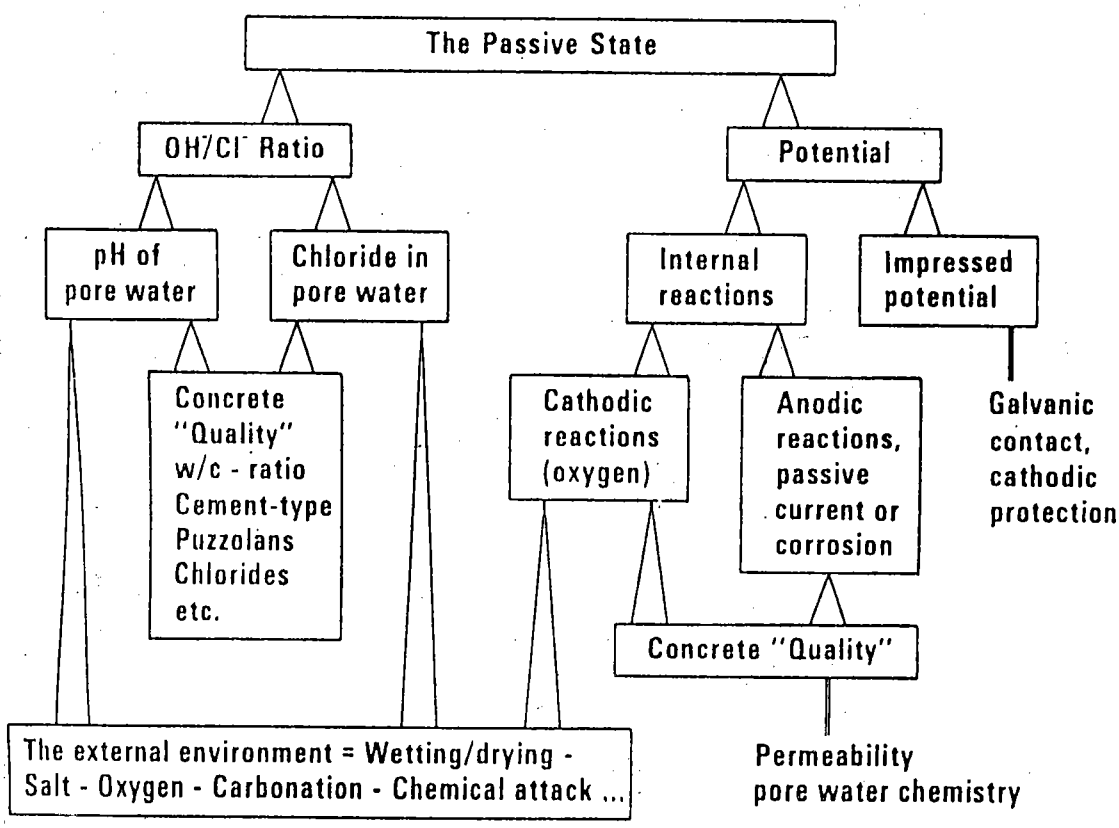


Fig. 1 – An overview of the factors involved in the maintenance of the passive state of steel in concrete.

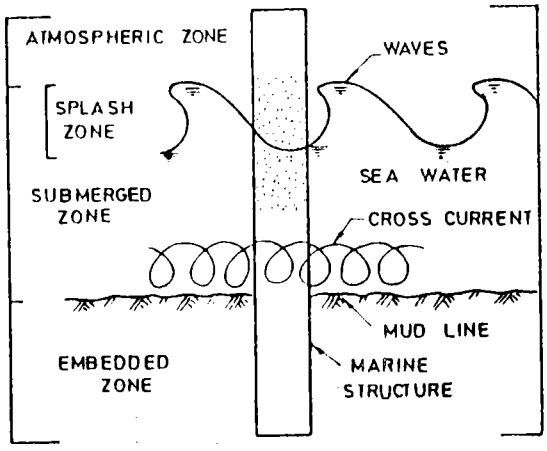


Fig. 1 – Various zones of a marine concrete structure.

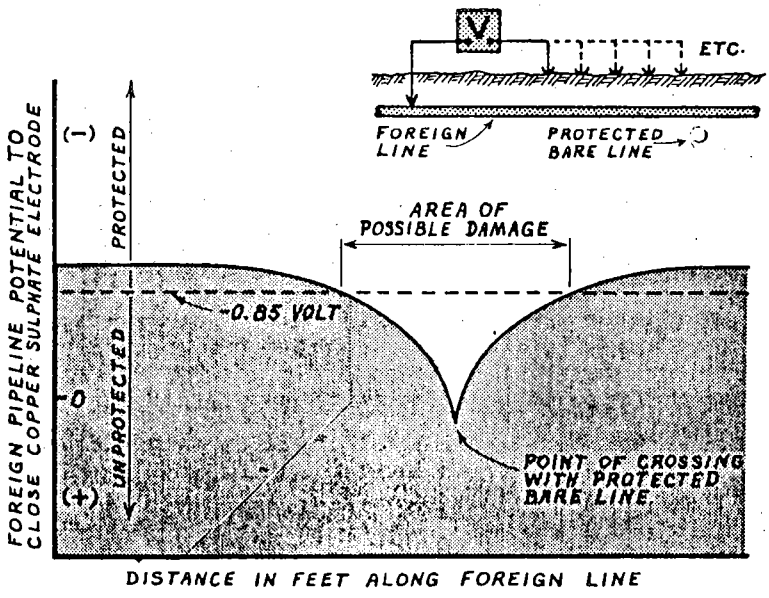


Figure 4-16 -- Pipe-to-earth potentials on foreign pipeline passing through area of influence around cathodically protected bare line

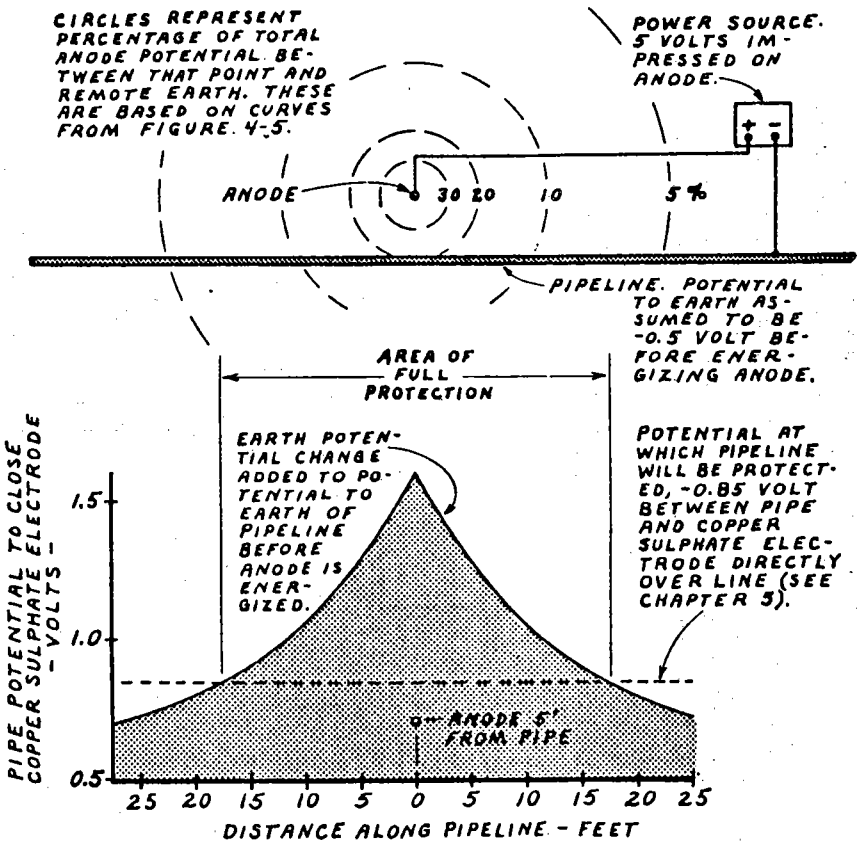


Figure 4-6 -- Protective potentials impressed on a pipeline by a "close" ground bed anode

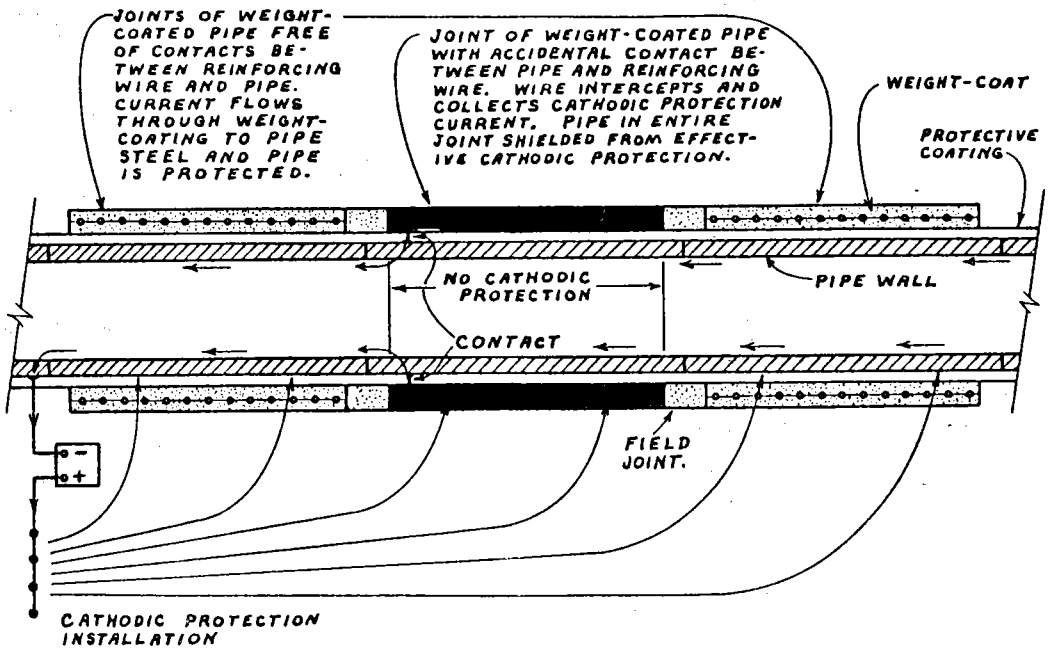


Figure 4-9 -- Electrical shielding by shorted reinforcing wire in weight coating

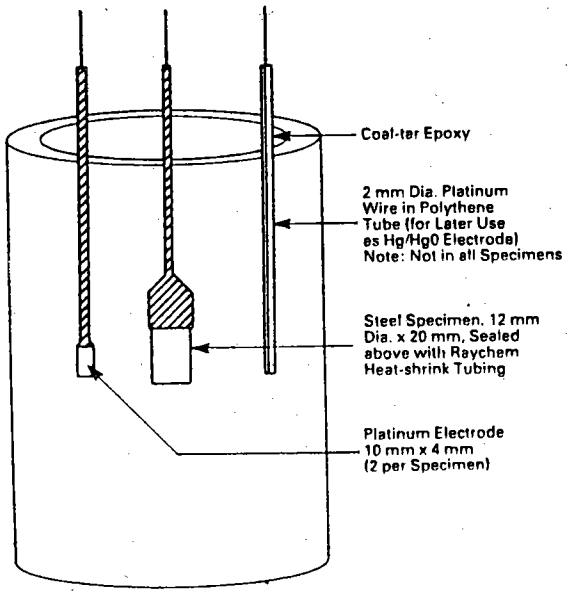


Fig. 3 – 100 mm diameter cyclindrical specimen (Phase II).

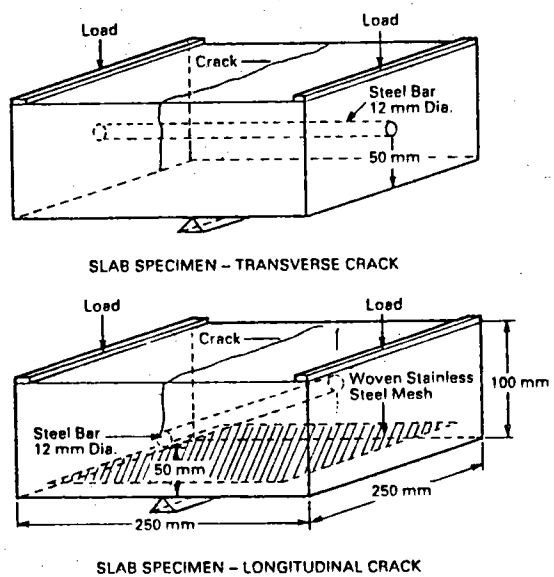


Fig. 4 – Exposure slabs.

The Test Specimens

Identical slabs are also being used as part of an experiment to investigate the effect of the ratio of relative sizes of the anode to the cathode in the exposure project. Here the reinforcement in the small cracked slabs are electrically connected to the reinforcement in larger beams that are uncracked. The coupled specimens are located in Portland Harbour with approximately half the specimens maintained on staging in the tidal range and the remainder immersed in the sea below the platform. The connections are made via a junction box on the jetty above so that pairs of specimens are placed in tidal/tidal, immersed/immersed, tidal/immersed and immersed/tidal exposures. Corrosion currents over a tidal cycle are also being monitored to study the effects of alternate wetting and drying.

The 'Efficiency of Cover' project being carried out by Taylor Woodrow Research Laboratories also uses slab specimens but of a different design as illustrated in Fig. 5. The larger size has been used so that cores can be taken at various times to investigate such parameters as permeability and oxygen diffusion.

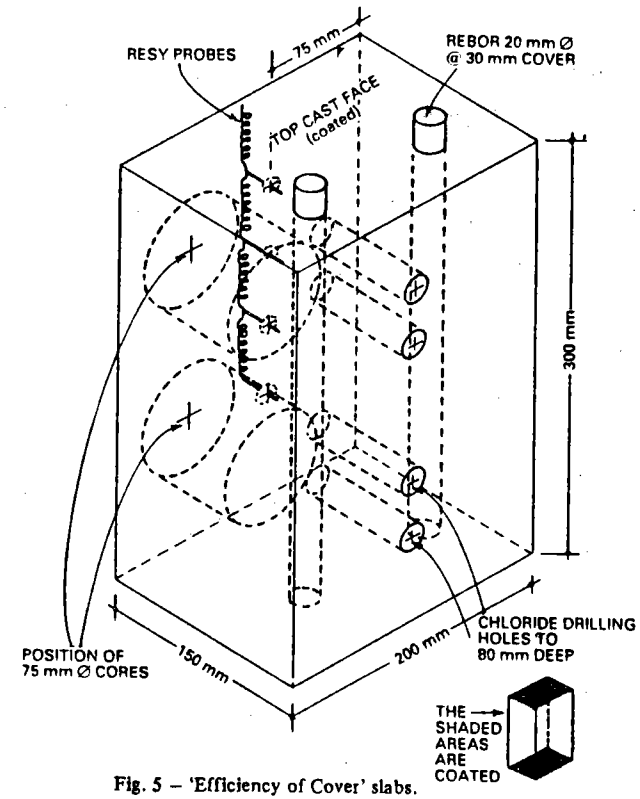


Fig. 5 – 'Efficiency of Cover' slabs.

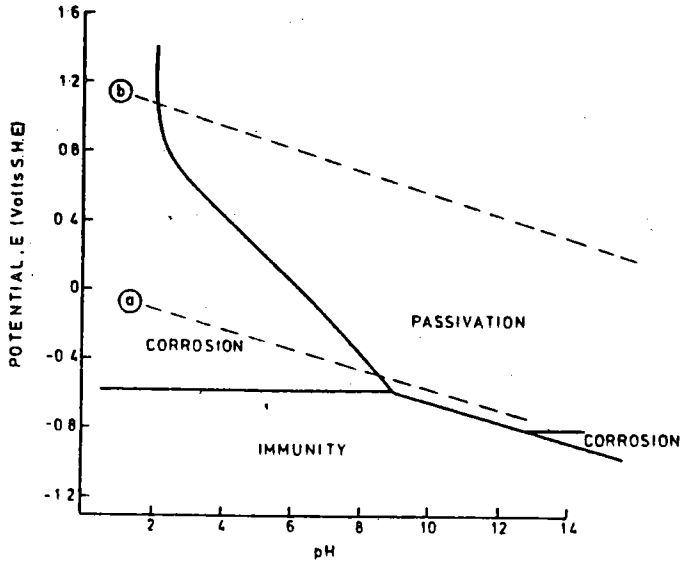


Fig. 2 – Theoretical conditions for corrosion and passivation of iron.

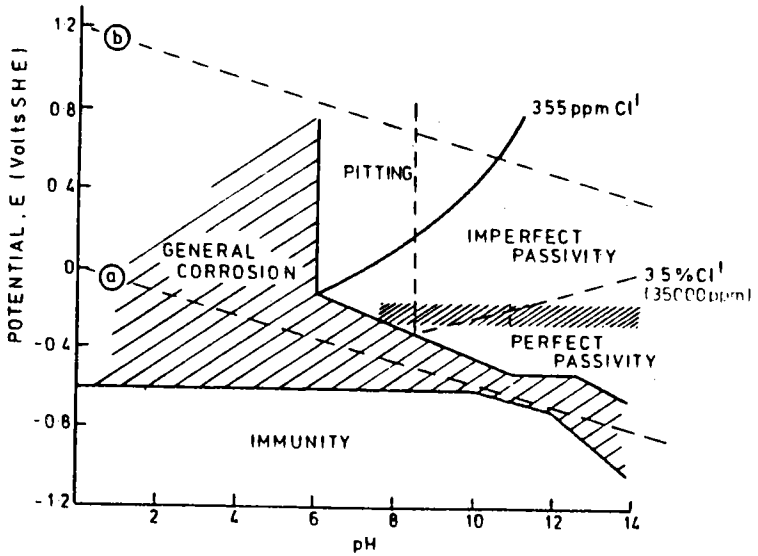


Fig. 3 – Influence of chloride on corrosion and passivation of iron (after Pourbaix [6]).

The Cathodic Reaction

The two principal cathodic reactions available for the corrosion of steel in concrete are indicated on the potential–pH diagrams:

$$\text{Line (a)}\ 2H^+ + 2e' \rightarrow H_2 \tag{5}$$

$$\text{Line (b)}\ \tfrac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e' \rightarrow 2OH' \tag{6}$$

However, oxygen reduction is recognised as the cathodic reaction in most cases of significant corrosion of steel reinforcement.

The Composite Reaction

Whatever the environment, unless the cement paste can dry out completely, corrosion activity can be related to differences in potential within the structure. If passivity breaks down locally in part of the reinforcement, this will become anodic to the passive steel, and if oxygen is available at the passive steel surface, a current will flow from these passive regions to the anode. Most cases of severe corrosion of reinforcement occur in the atmosphere where oxygen to depolarise this macro-cell is plentiful.

In air, as a result of current flow in the macro-cell, a potential difference (iR) can be measured from one point to another on the surface of the concrete (Fig. 4(a)). However, the cathode area is limited, since the resistance path through the concrete from the anode to remote cathodic sites is high. In fully immersed conditions, the seawater has a very much higher conductivity than the concrete, and no significant potential differences will be measurable at the concrete surface. Since the resistance path is short-circuited by the seawater, it is possible for an anode to draw upon a much larger cathode area (Fig. 4(b)), and the steel in a large submerged structure could carry a significant current to a small anode; even though in this case the cathode is inefficient compared with concrete in air, due to limited access of oxygen.

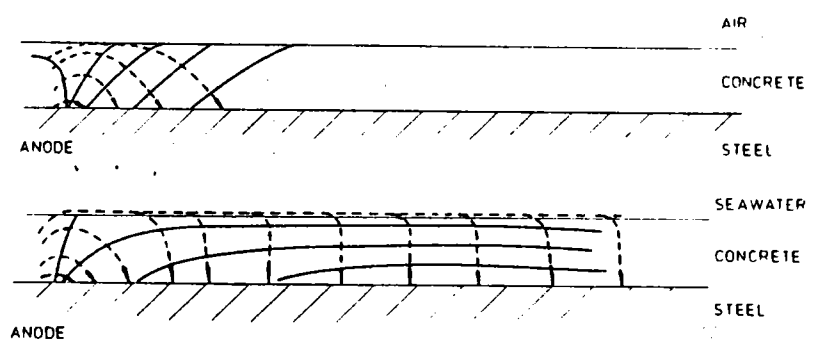


Fig. 4 – Current flow and potential distribution, (a) concrete in air, (b) concrete in sea water. Solid line, equipotential lines; dashed line, current flow.

Electrochemical Measurements

Three basic measurements can be made.

(i) *Change of potential with time.* This is not in itself an indicator of corrosion, since change to a more negative (active) potential could be due to increased corrosion or a limited cathodic reaction (Fig. 5).

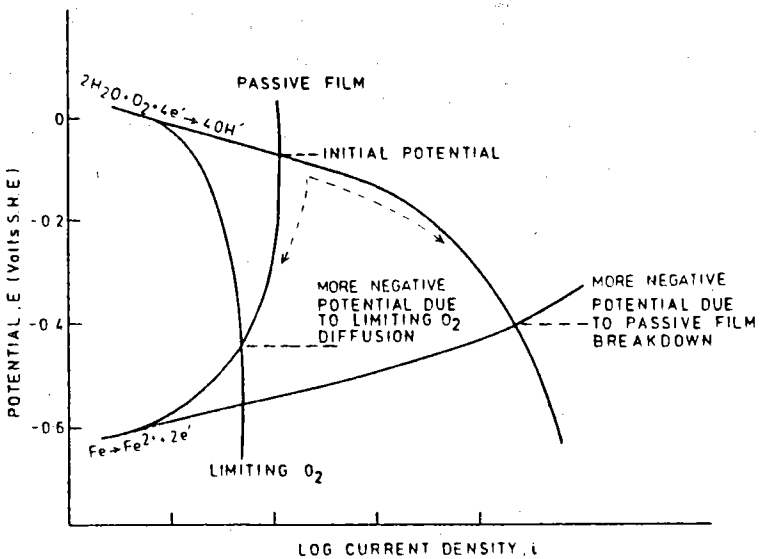


Fig. 5 – Movement of potential due to changes of anodic and cathodic polarisation.

(ii) *Anodic and cathodic polarisation curves.* It should be possible to investigate the active/passive behaviour of steel in concrete by measuring 'potentiostatic' anodic polarisation curves. Fig. 2 would suggest a curve of the form shown in Fig. 6(a), whilst curves (b) or (c) should distinguish between the presence of a passive zone and complete breakdown of passivity in chloride-contaminated concrete. In practice the results for concrete-covered steel immersed in sea water are unlikely to be so clear-cut since other effects such as slow diffusion of oxygen within the concrete and the large '*iR* drop' may obscure the picture.

A schematic cathodic polarisation curve is shown in Fig. 7. When oxygen is plentiful the curve should approximate to a Tafel behaviour (I) but if oxygen supply is limited (II), the hydrogen reaction will take over (III). As with anodic polarisation the practical curves for composite specimens are likely to be much modified by other factors.

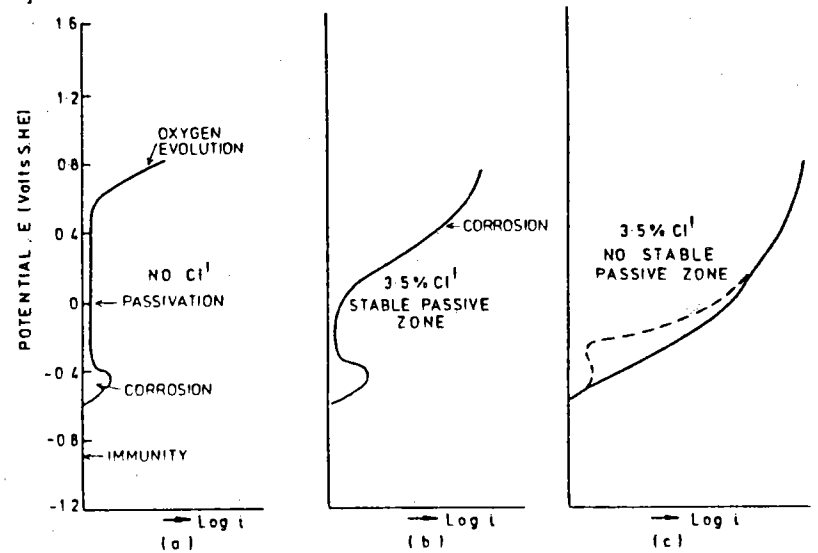


Fig. 6 – Anodic polarisation curves for steel in concrete (schematic).

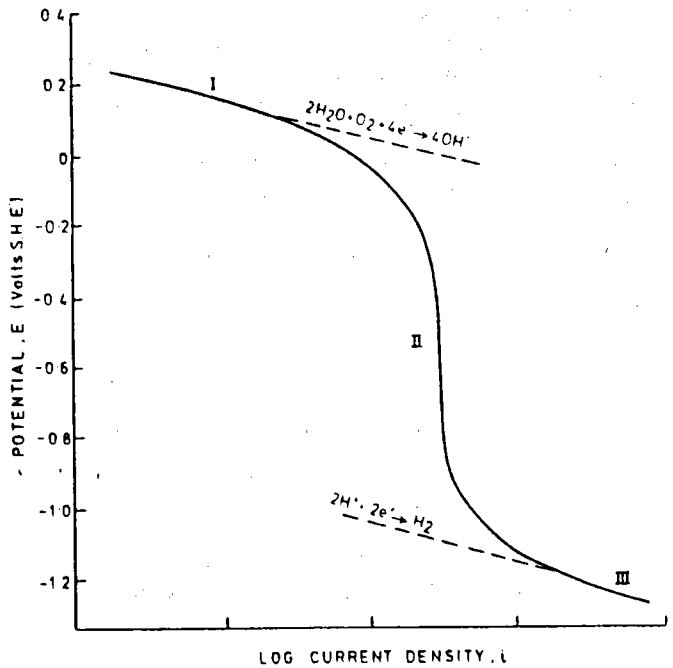


Fig. 7 – Cathodic polarisation curve for steel in concrete (schematic).

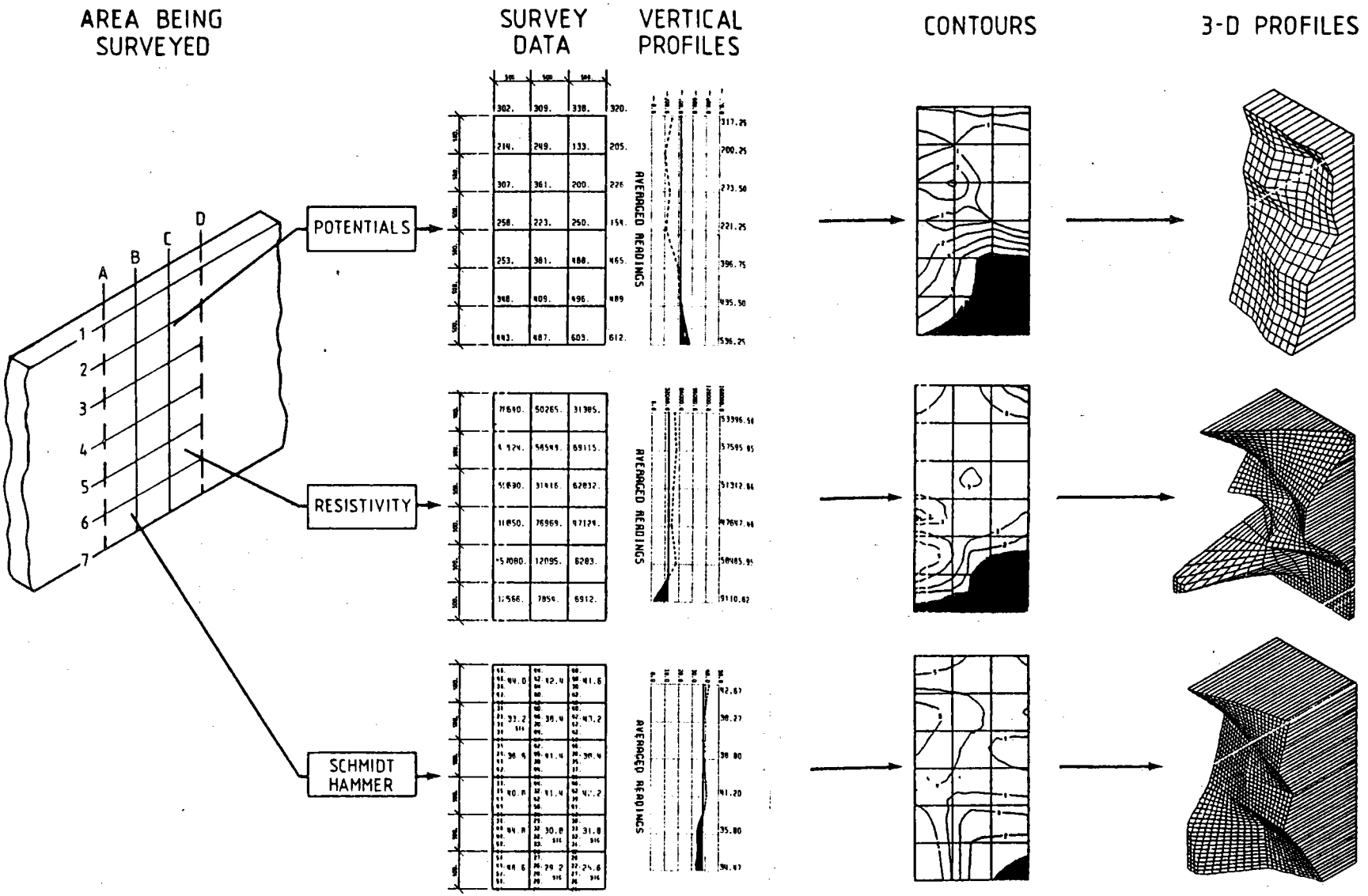


Fig. 3 – Visual plotting of non-destructive test results on a concrete wall. This enables the rapid identification of critical areas.

Table 3 – General Interpretation of Inspection Survey Results

1. Corrosion of the reinforcement

Technique	Interpretation		References
	mV	Chance of Corrosion	
Electrochemical potentials (CSE)	less –ve than –200	5%	Van Daveer [7]
	–200 to 350	50%	
	more –ve than –350	95%	
	Ω cm	Corrosion rate	
Concrete resistivity	< 5,000	Very high	T.W. [2]
	5,000 – 10,000	High	
	10,000 – 20,000	Low	
	> 20,000	Negligible	
Cover to reinforcement	(1) Observance of specification		CP110 [15]
	(2) Likely forms of deterioration due to rebar corrosion		T.W. [3]
	(3) Assessment of time to activation (see also chloride below)		
Chloride drillings	(1) Activation of the reinforcement possible with levels > 0.35–0.4 wt% of the cement.		[2]
	(2) Assessment of time to activation		[3]
Core samples through rebar	Assessment of type and amount of corrosion		[2]

2. Quality of the concrete cover

Schmidt N-type hammer	Comparative hardness of the cover zone.		[2] T.W.
	Average rebound no.	Quality	
	> 40	Good, hard layer	
	30–40	Fair	
	20–30	Poor	
	< 20	Concrete delaminated near surface	
Pundit (indirect method)	>4 km/sec – good quality cover		
	3–4 km/sec – fair quality cover		[2] T.W.
	<3 km/sec – poor quality cover		
Concrete cores	Assessment for:		[2] T.W.
	(1) Visual assessment of integrity		
	(2) Concrete strength		
	(3) Concrete permeability to liquid and gas		
	(4) Diffusivity to oxygen		
	(5) Depth of carbonation		
	(6) General chemical/physical tests		[16] BS 1881

One possible reason for this occurring is the generation of a liquid junction potential at the carbonated/uncarbonated concrete layer interface, due to the difference in hydroxy ion concentration (via the dissolved $Ca(OH)_2$ in the pore water), between the almost neutral carbonated layer and highly alkaline concrete.

The equation controlling the magnitude of the junction potential [7] is:

$$E = (t_- - t_+)\frac{RT}{F}\ln\frac{a_2}{a_1}$$

Where t_- and t_+ are the transport numbers of anion and cation, respectively, and a is the activity of the ions of the two solutions.

The maximum magnitude of this effect is around 100 mV but this is enough to lead to misinterpretation of surface potential measurements.

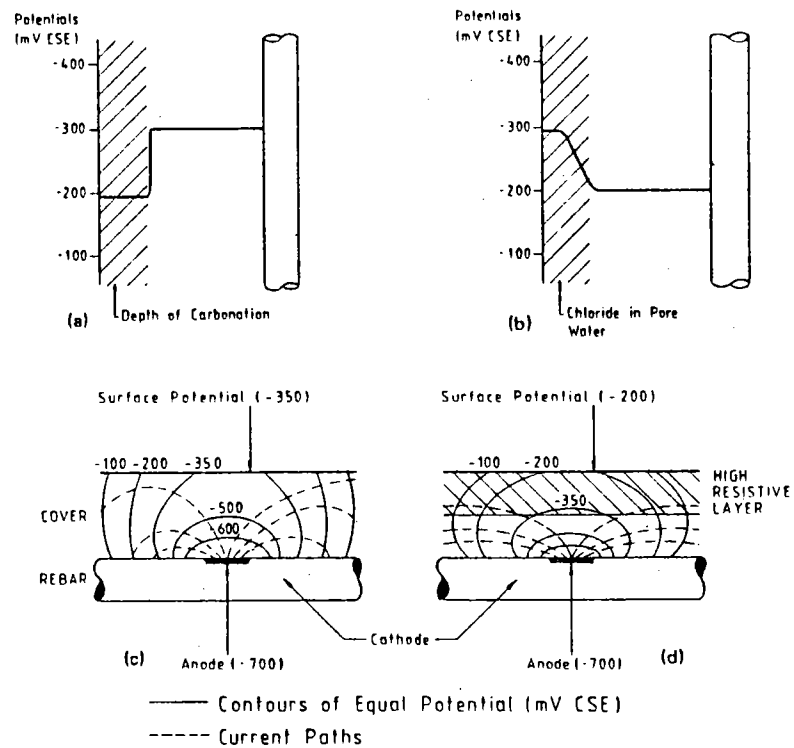
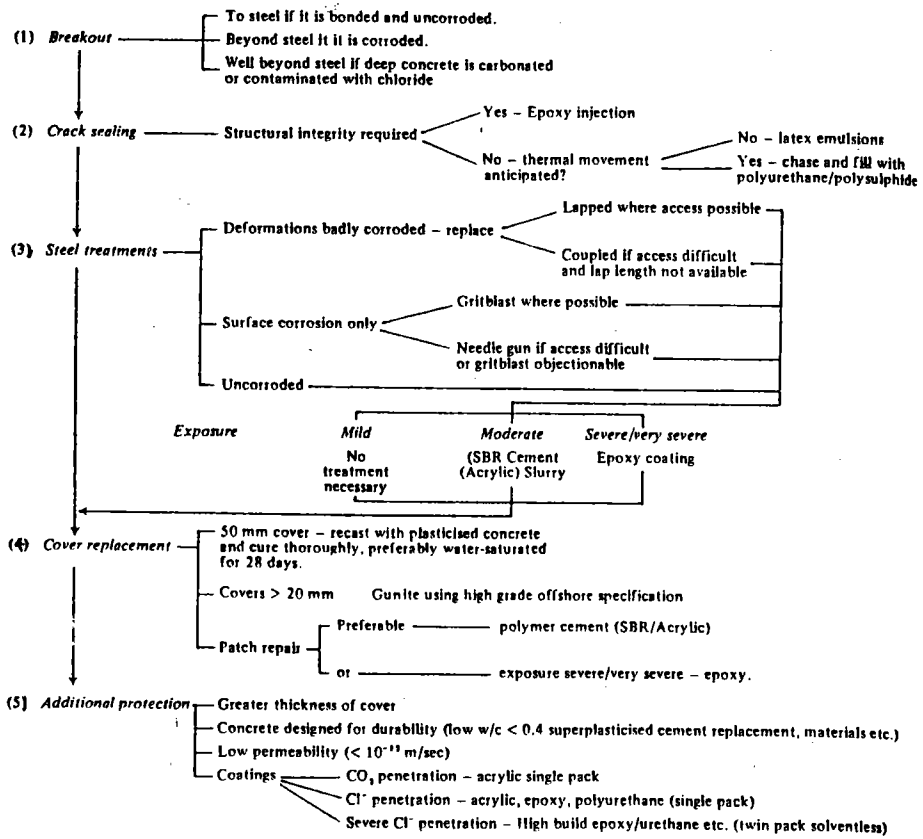


Fig. 4 – Factors affecting potential measurements. (a) Carbonated concrete, (b) chloride-contaminated concrete, (c) normal concrete, and (d) resistive concrete.

Table 4 – Outline Repair Procedure.



(1) **Type of Repair/Mechanical Properties**

Where repairs are required on load-bearing members, or where considerable stress or strain is expected, strength, bond strength and rate of bond strength development of the repair material are likely to be critical. Table 5 gives shear bond strengths for control, polymer modified and epoxy mortars. In terms of bond strength, for example, epoxy mortars perform the best. For protective and/or cosmetic repairs, mechanical performance may not be as critical as the ability of the repair material to withstand environmental penetration.

(2) *Exposure of Repair/Physical Properties*

In conditions where the environment is aggressive, the primary consideration is the ability of the repair to prevent or reduce the penetration rate. Table 5 shows that permeability coefficient of repair materials can vary by four orders of magnitude, depending on material type and supplier. Equally, large variations can occur in other physical properties such as chloride and oxygen diffusion rates and ultraviolet degradation.

The above two considerations for repair material selection are not mutually exclusive and are only intended to illustrate the range of factors which have to be taken into account to achieve a long-term effective repair. Material selection on the basis of one factor, such as strength, is inadequate.

As understanding of the many factors affecting repair selection can only be achieved by a systematic analysis of *in situ* repair performance backed up by detailed laboratory property testing.

Table 5 – Patch Repair materials, shear bond strength and permeability

Repair mix	Surface preparation + state	Shear bond strength N/mm²	Permeability coefficient m/sec × 10^{-9}
Control mortar a/c 3:1 w/c 0.5	Sawn, wet	20.46	9.6
Sytrene Butadiene 1 Polymer content 0.6% by wt cement a/c 3.1:1 w/c 0.47	Sawn, wet Bonding aid used	16.9	0.01
Styrene Butadiene 2 Polymer content 0.12% a/c 2.5:1 w/c 0.35	Sawn, wet Bonding aid used	23.3	0.0002
Acrylic 1 Polymer content 0.18% a/c 3:1 w/c 0.36	Sawn, wet Bonding aid used	21.5	0.04
Epoxy mortar As supplied	Sawn, wet Primed	Failure in concrete, bond intact	Totally impermeable to liquid water

港灣鋼筋混凝土結構物防蝕技術研討會

Seminar on Corrosion Protection Technology of Marine Reinforced Concrete Structures

R.C.腐蝕與水泥之關係

主講人：蔡明谷

台灣省交通處港灣技術研究所主辦
中華民國七十四年八月

鋼筋混凝土腐蝕與水泥之關係

蔡明谷先生主講

第一節　水泥及水化

水泥製造過程中將 CaO，SiO_2，Al_2O_3，Fe_2O_3 混合物加熱時，各反應之程序可概述如下：

800°C 以下；$CaO \cdot Al_2O_3$ 生成，同時可能生成 $CaO \cdot Fe_2O_3$

800－900°C；$2CaO \cdot SiO_2$ 開始形成

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

1000－1100°C；$2CaO \cdot Al_2O_3SiO_2$ 分解

1100－1200°C；$3CaO \cdot Al_2O_3$ 及 $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$ 生成

1260°C；開始熔融

1200－1450°C；$3CaO \cdot SiO_2$ 生成，游離石灰逐漸消失。

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

卜特蘭水泥係由 $CaCO_3$ 爲主成份之石灰石與 SiO_2、$Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$ 爲主成分之粘土適量調配以 1450°C 燒成，生成 $3CaO \cdot SiO_2$（簡稱 C_3S），$2CaO \cdot SiO_2$（簡稱 C_2S），$3CaO \cdot A\ell_2O_3$（簡稱 C_3A）及 $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$（簡稱 C_4AF）等四種主要化合物。

水泥化合物 C_3S，C_2S，C_3A，C_4AF 各具其特性，Portland Cement 乃利用其特性，視其用途編列爲 Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ 型水泥，因此各型水泥各具其特性。

依美國材料試驗協會（ASTM）之規範，將卜德蘭水泥分爲五種，如表 1：

表 1

卜德蘭水泥之美國規範（ASTM）

	第一種及第一種A	第二種及第二種A	第三種及第三種A	第四種*	第五種*
SiO_2，%（最少）	—	21.0	—	—	—
Al_2O_3，%（最多）	—	6.0	—	—	—
Fe_2O_3，%（最多）	—	6.0	—	6.5	—
MgO，%（最多）	5.0	5.0	5.0	5.0	4.0
SO_3，%（最多）{ $3CaO \cdot Al_2O_3$ 不大於8%	2.5	2.5	3.0	2.3	2.3
SO_3，%（最多）{ $3CaO \cdot Al_2O_3$ 大於8%	3.0	—	3.0	—	—
灼失量，%（最多）	3.0	3.0	3.0	2.3	3.0
不溶解殘渣，%（最多）	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
$3CaO \cdot SiO_2$，%(最多）	—	50	—	3.5	50
$2CaO \cdot SiO_2$，%(最少）	—	—	—	40	—
$3CaO \cdot Al_2O_3$，%（最多）	—	8	15	7	5
細度 cm^2/g {用濁度計（最少）	1500	1600	—	1700	1700
細度 cm^2/g {用透度計（最少）	2600	2800	—	3000	3000
健性度壓蒸鍋膨脹，%（最大）	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
凝結時間 吉爾毛法 {初凝，分（最少）	60	60	60	60	60
凝結時間 吉爾毛法 {終凝，小時（最多）	10	10	10	10	10
維加法，分（最少）	45	45	45	45	45
砂漿內空氣體積，%（最多）	12(19±3)	12(19±3)	12(19±3)	12	12
抗壓強度（1:2.75，立方）psi（最低） {1天濕空氣	—	—	1700(1100)	—	—
抗壓強度（1:2.75，立方）psi（最低） {1天濕空氣，2天水	1200(900)	1000(750)	3000(2200)	—	—
抗壓強度（1:2.75，立方）psi（最低） {1天濕空氣，3天水	2100(1500)	1800(1400)	—	800	1500
抗壓強度（1:2.75，立方）psi（最低） {1天濕空氣，27天水	3500(2800)	3500(2800)	—	2000	3000

* 通常無現貨，需要時定製之。
＋ $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3 + 2 \times 3CaO \cdot Al_2O_3$ 不超過 20%。
△附加A字者爲輸氣水泥。

Ⅰ、普通水泥（一般用）ORDINARY (GENERAL PURPOSE)

Ⅱ、中度抗硫酸塩及中度水化熱水泥（改良水泥）MODERATE SULFATE RESISTANCE AND MODERATE HEAT OF HYDRATION

Ⅲ、早強水泥HIGH EARLY STRENGTH

Ⅵ、低熱水泥LOW HEAT OF HYDRATION

Ⅴ、抗硫酸塩水泥SULFATE RESISTANT

四種主要化合物，加水後發生下列水化作用：

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

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

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

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

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

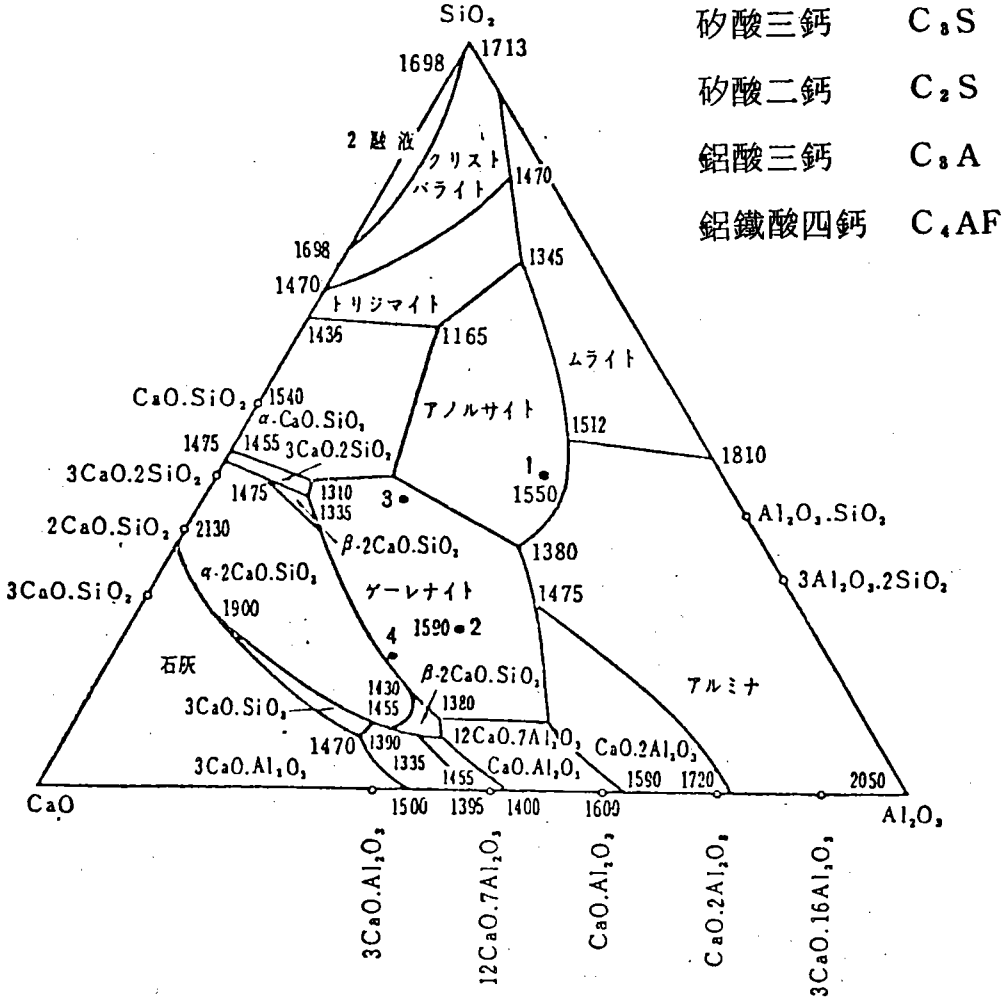
生成之 $CaSO_4\cdot 2H_2O$ 又與水泥中之 C_3A 水合物發生化學反應產生 Ettringite 體積脹大約 2 倍，使水泥硬化體崩裂，即

$$C_3A+6H_2O\rightarrow C_3AH_6$$

$$3CaO\cdot A\ell_2O_3\cdot 6H_2O+3(CaSO_4\cdot 2H_2O)+2OH_2O\rightarrow$$

$$3CaO\cdot A\ell_2O_3\cdot 3CaSO_4\cdot 32H_2O$$

圖(一)爲四種化合物之 $CaO-Al_2O_3-SiO_2$ 三相平衡圖



圖(一) $CaO-Al_2O_3-SiO_2$ 三相平衡圖

利用掃描式電子顯微鏡，可看出水泥中四種主要化合物之分子形狀，如圖(二)

(1)菱形者：Alite(C_3S)

(2)圓形者：Belite(C_2S)

(3)Alite與Belite 與空隙間細長者：Celite(C_3A)

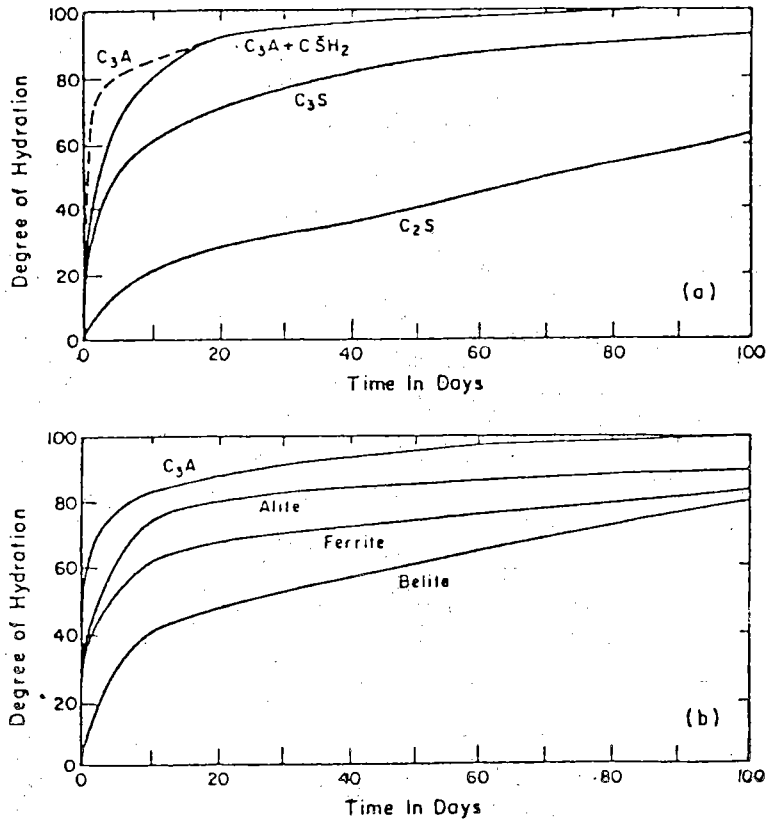
(4)在其它空隙白色者：Felite(C_4AF)

圖(二)

一般好水泥 C_3S，C_2S 含量在 75％左右，台灣目前使用水泥之 C_3S，C_2S 含量在 70％左右。

卜特蘭水泥的水化

水泥熟料礦物水化速率如下圖示：



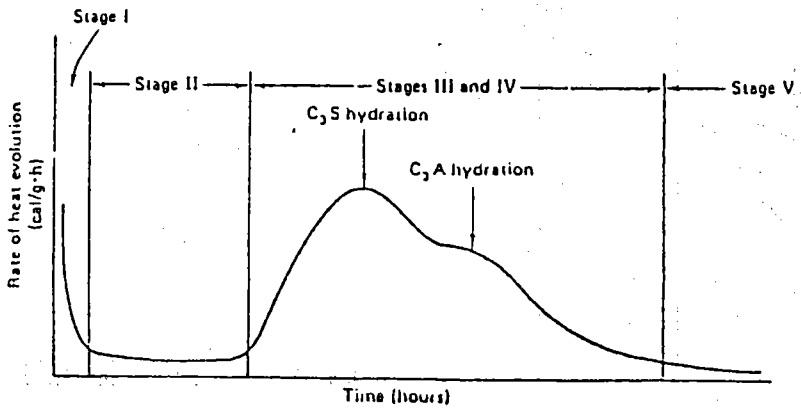
圖(三) 水泥熟料礦物的水化速率

表(二) 水泥熟料礦物的水化特徵

（摘要）

組成 CMPD	反應速度比 Reaction Rate	水化熱 Heat of hydration	在水泥中的貢獻	
			強度	熱量
C_3S	中度	中度	高	高
C_2S	慢	低	先低後高	低
C_3A	快速	非常高	低	高
C_4AF	中度	中度	低	低

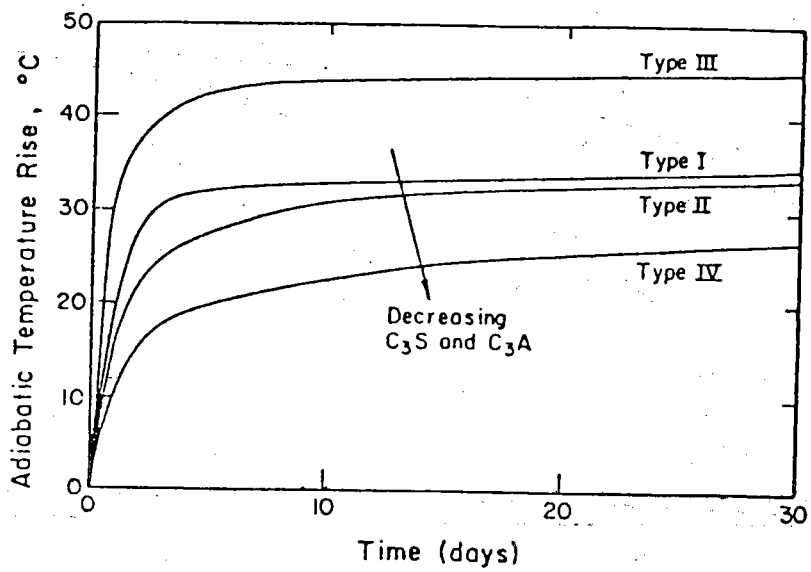
(1)放熱速率曲線（Rate of heat evolution during the hydration of Portland cement）



圖(四) 放熱速率曲線

絕熱狀況下各類水泥溫度上升的情形。

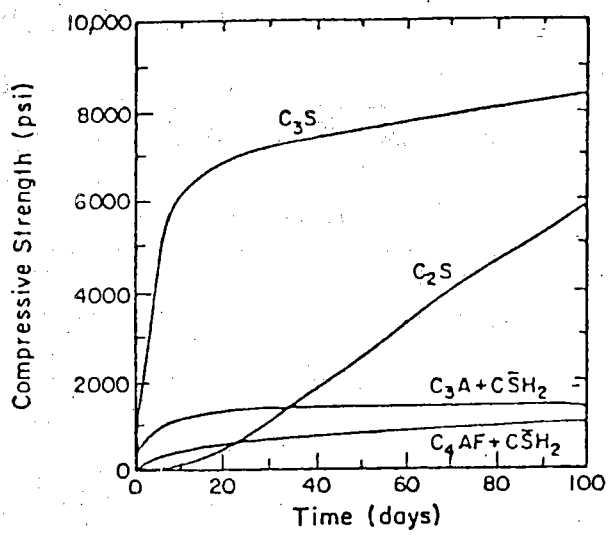
由下圖可以看出C_3A含量高之Type Ⅲ溫度最高，其次爲Type Ⅰ，最小爲Type Ⅳ。



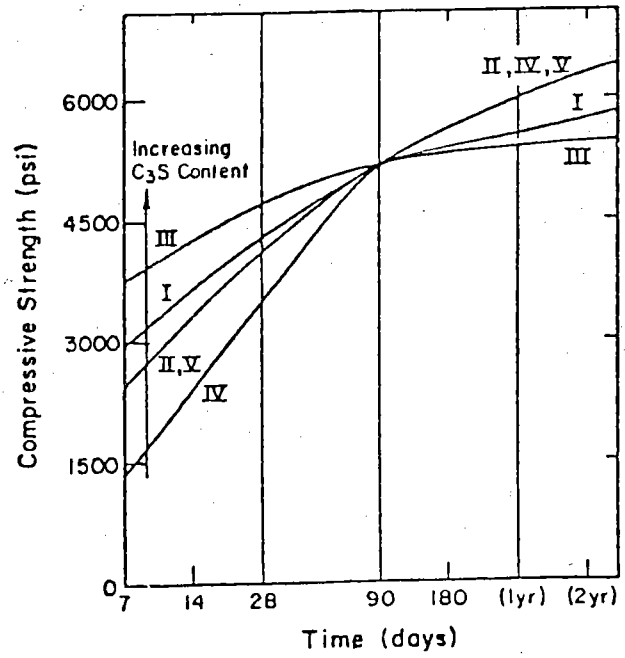
圖(五) 絕熱狀況（Adiabatic）下各類水泥溫度上昇的情形

水泥水化的結果

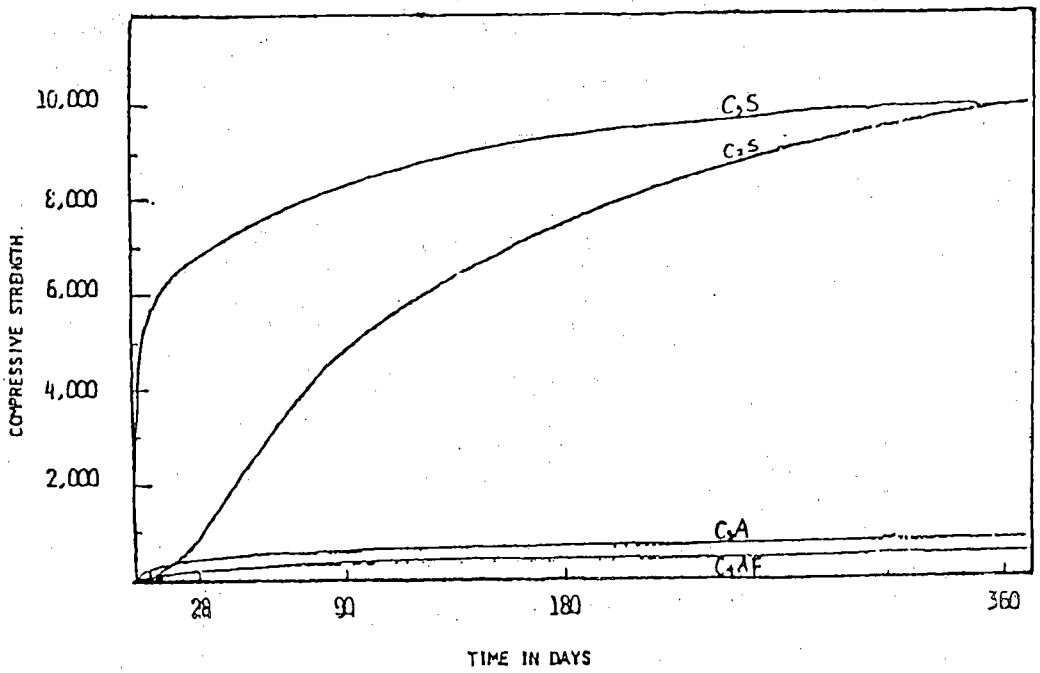
①強度的發展



圖(六) 水泥熟料礦物漿抗壓強度的發展

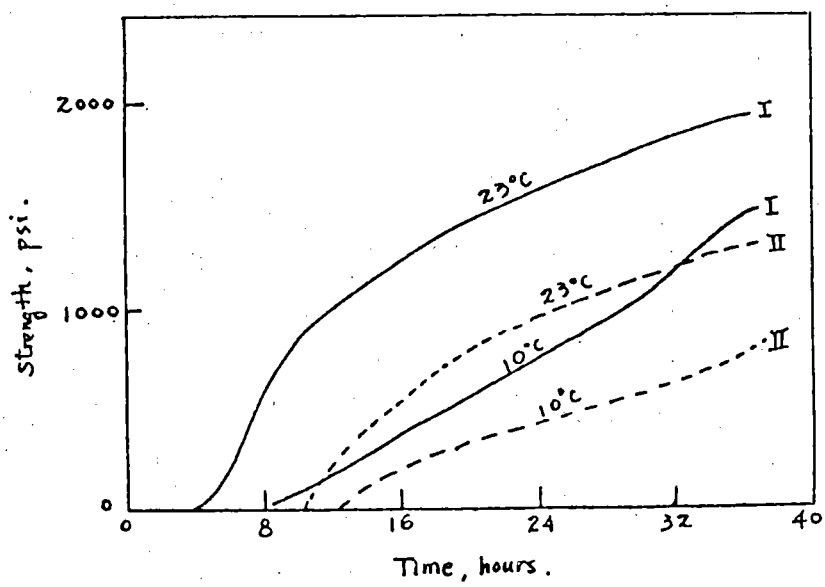


圖(七) 不同水泥種類對混凝土強度發展的影響

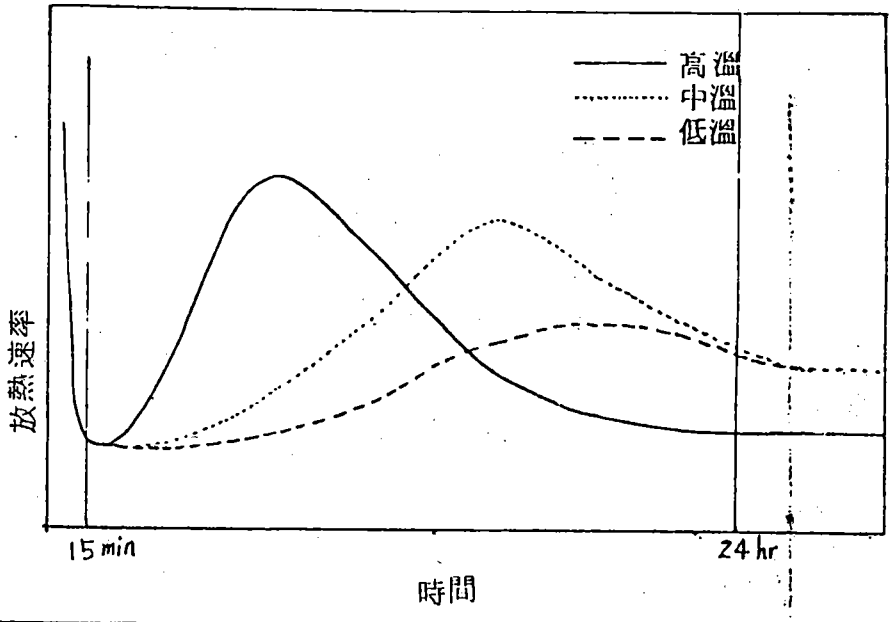


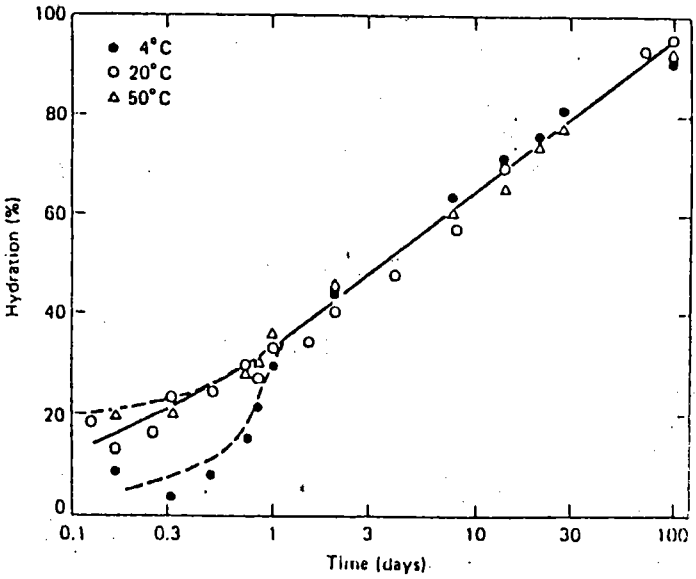
圖(八) 純水泥熟料漿長期性的影響

②溫度的影響：



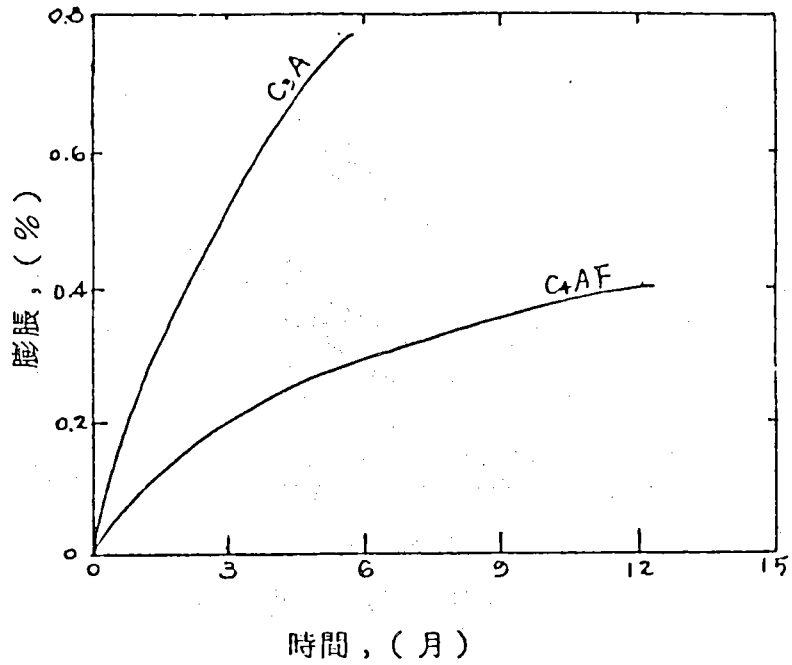
圖(九) 水泥糊體溫度與強度之關係





圖(十) 溫度對 C_3S 水化的影響

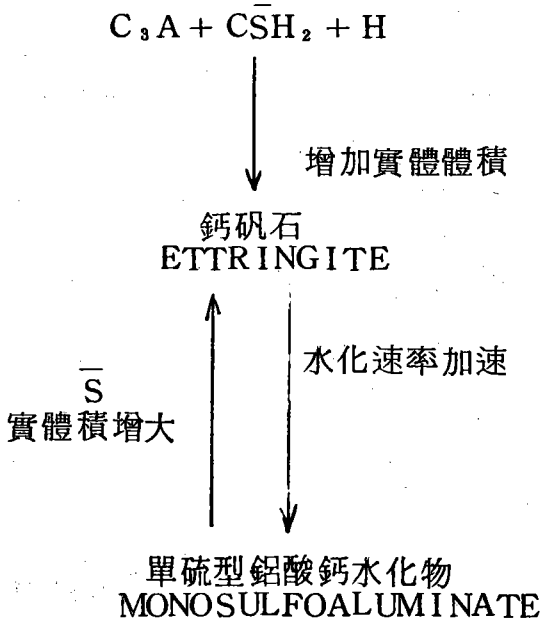
③體積的變化



圖(十一) 體積變化與時間之關係

因硫酸塩侵蝕造成之體積變化

硫酸鹽侵蝕造成體積變化



圖(十二) 硫酸鹽侵蝕造成體積變化

表㈢ 四種化合物收縮率之比較

	收縮率×10^{-4}
C_3S	7.9±0.36
C_2S	7.7±0.36
C_3A	23.4±1.00
C_4AF	4.9±1.14

水和熱（Caℓ／g）

	3天	7天	28天
C_3S	58± 8	53±11	90± 7
C_2S	12± 5	10± 7	25± 4
C_3A	212±28	372±39	329±23
C_4AF	69±27	118±37	118±22

美國水泥化學權威Bogue博士在The Chemistry of Portland Cement書上及Bensted博士在World Cement 雜誌發表的報告也極力主張臨海工程應避免使用C_3A含量多之普通水泥，而改用C_3A含量少之第Ⅱ型水泥或第Ⅴ型水泥。本省之普通水泥C_3A含量通常在10～15％CNS，ASTM均規定第Ⅱ型水泥之C_3A含量爲8％以下，第Ⅴ型爲5％以下。台泥之第Ⅱ型水泥C_3A含量約5～6％，第Ⅴ型水泥約3％左右。根據台泥研究室實驗結果也證實第Ⅱ、Ⅴ型水泥的確具有優異之抗硫酸鹽性能。

第二節　水泥與腐蝕

澎湖跨海大橋腐蝕狀況實景

完工及通車時間：民國59.年完工，民國60.年通車

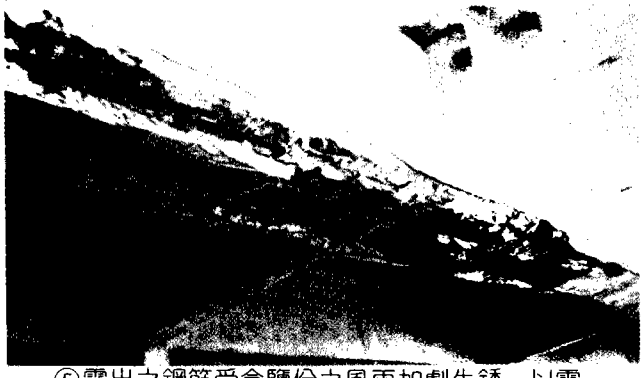
使　用　水　泥：卜特蘭第一型水泥（即普通水泥）

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

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

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

④混凝土被腐蝕，剝落前與剝落後之對照。



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

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

C_3S 是水泥成份中最重要之主成份，與水起水和作用後很快產生 $3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$ 及 $Ca(OH)_2$ 稱爲 Tobermorite 之一種膠體。表面積爲 200～300 萬 cm^2 ／g 非常微細之帶狀膠體， 密密麻麻的帶狀膠體互相交絡成爲網狀向水泥與骨材空隙間塡充。如果水密性好，加之有良好之養生，水份充足，水和作用能一直繼續進行。其所產生之 Tobermorite 就一直繼續把空隙塡滿 ， 空隙率愈來愈少，密度愈提高，強度就愈來愈增高，混凝土結構物內水份充足，其水和作用能長期的繼續進行。如結構物內水份能不乾燥，即可保持碱性，而如能保持 PH12 以上時，鋼筋混凝土中之鋼筋就不會被腐蝕。

須要作水密性好之混凝土原因即在此。第Ⅱ型水泥較高爐水泥，飛灰水泥之PH值高，因此對保護鋼筋腐蝕之功能更高。

C_3S 爲對早期，後期強度最主要成份。第Ⅰ型水泥之 C_3S 含量約50.%左右，沒有特別要求之一般工程可以用此型水泥。

C_2S 經水和作用也產生 $3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$ 及 $Ca(OH)_2$ ，但它的作用在後期，因此 C_2S 較高之水泥後期強度較高。C_2S 有一優點是它的水和熱在四 種水泥化合物中最低。因爲卜特蘭水泥除著重耐壓強度外，水和熱也很重要之因素。C_3A 之水和熱如附件所示最高，C_4AF，C_3S 次之， C_2S 最低。在 Mass Concrete 工程須要避免因水和熱太高，致引起內熱膨脹，外冷收縮，發生龜裂，這樣的工程應該避免使用 C_3A 高之第Ⅰ型水泥，而應使用 C_3A 低，C_2S 高而水和熱低之第Ⅱ型水泥。如果對水和熱要求特別低（七天 60Caℓ 二八天 70Caℓ）而耐壓強度可以犧牲一點（七天 1000 psi ，二八天 2500 psi）就可以使用第四型水泥。

鋼筋混凝土建造物一旦有龜裂即從裂縫開始中性化，氧化以及腐蝕。尤其在臨海工程，含有硫酸鹽及氯離子經風吹雨打之結構物尤甚，因此如何使之不龜裂是工程人員多年來之最大問題，除水灰比，骨材級配，施工和養生等做各種各樣的努力外，仍可從水泥化合物中之膨脹收縮率下工夫。據專家實驗報告 C_3A 之收縮率最高（$23.4 \pm 1.0 \times 10^{-4}$）比 C_2S（$7.7 \pm 0.36 \times 10^{-4}$）高達 3 倍多。據日本水泥協會實驗報告，固定各種條件，變動水泥種類，測定其收縮率結果，以第Ⅱ型水泥製者收縮率最低。因此如果各種施工條件相同，使用第Ⅱ型水泥灌製之混凝土比較不

會因收縮引起之龜裂。

C_3A 最易受硫酸鹽侵蝕，因此硫酸鹽含量高之地區做工程時，如果硫酸鹽含量1500ppm 以上例如直接浸在海水中之混凝土結構物，因海水中之$MgSO_4$ 2400 ppm 因此必須使用第Ⅴ型水泥，而海邊之陸上建造物，受硫酸鹽含量較少之風吹雨打，可以使用第Ⅱ型水泥。

港灣工程從材料上第一優先考慮的是所使用之水泥是否具有抗硫酸性能，而此水泥之水和熱是否低，能用於Mass concrete？水和熱是第二要考慮的。強度也很重要，強度我們也要考慮，Type Ⅳ，Type Ⅴ 雖然水和熱低或抗硫酸鹽之性能好，但強度差一點。龜裂我們也要考慮，收縮率低較不會引起龜裂，是否眞有如此具備多功能之水泥？

答案是有！第Ⅱ型水泥即是。與高爐水泥、飛灰水泥比起來，Type Ⅱ 鹼性較高，$Ca(OH)_2$ 爲鹼性，鹼性越高越不會被中性化，裡面的鋼筋越不會被腐蝕。

此外另有一個特點，台泥之第Ⅱ型水泥含碱量低於 ASTM規定 0.6％以下，不會與骨材反應引起膨脹龜裂。因此在工程任何骨材，惟符合物理性質規格，即可安心使用。不要躭心Alkali reaction，據上述分析California 州全面改用Type II cement 是非常有道理。

改用Type II 之同時施工上仍要特別注意。Concrete 水份蒸發時會留下Capillary 空隙水路，水灰比愈高Capillary 孔徑愈大，其分佈愈廣。水份乾燥後留下空隙率也愈大，緻密度差。乾後之Capillary 孔隙容易吸進空氣中之CO_2，使碱性之Concrete 中性化。如果有龜裂，從裂縫CO_2 更易進入使中性化更加速。Concrete 碱性 PH12 以上時有保護鋼筋之功能，中性化後失去此功能，水灰比大之Concrete 經過乾燥收縮難免有Cracking，雨水從裂縫進入中性化後之Concrete 內使鋼筋因氧化生銹。鋼筋是導電體，以電氣化學之原理導致全面生銹，鋼筋生銹後體積變成 2 倍以上，將鋼筋外面之Concrete 覆蓋層擠破。用Type Ⅰ 水泥之Concrete 在刮風大之海邊Concrete 構造物Capillary 內之gel 水，很快的被吹乾，Capillary 內水份充足時氣體不容易進入，吹乾後之Capillary中空氣CO_2 或含硫酸鹽份之海風雨水容易進入，很快與水泥中之C_3A起化學反應產生Ettr-

ingite，體積漲大爲 2 倍。使平滑的混凝土表面腐蝕鬆散成爲粉狀，喪失混凝土原有之強度，而一塊接一塊剝落。含海水之風雨因此能更進入一層裡面腐蝕，使裂縫愈來愈大並一再延伸。延伸處之混凝土被腐蝕亦喪失強度，使整個保護層剝落，鋼筋乃露出。露出之鋼筋受鹽份之風雨加劇生銹，生銹之鋼筋體積變成二倍以上，將其外層之混凝土漲裂剝落。生銹之鋼筋從表面一層一層腐蝕成爲碎片，粗大之鋼筋如此越來越小，喪失原有之直徑與強度，終使整個結構物崩壞。

Type I 水泥 Concrete 泡在海水中，直接與 1500 ppm 以上之高含量硫酸鹽接觸，當然更快被腐蝕。因此不管是海水中或在海邊之陸地上 Type I cement 之 Concrete 是難免因 C_3A 成份與硫酸鹽化合反應而招致結構物腐蝕崩壞。例如澎湖之電線桿、橋欄杆。嘉義布袋鹽場、台南鹽場之混凝土建造物及混凝土路面、水溝。台南海邊安南國中之混凝土樓板。新竹南寮海水浴場附近民房等，均不在海水中而在陸上，僅受含鹽份之風吹雨打即被腐蝕，使混凝土一塊一塊剝落鋼筋露出。此等現象足可證明海邊陸上建造物，如使用第 I 型水泥即被侵蝕，並不久即將崩壞。

另外一點須要強調的是，鋼筋混凝土先被破壞的是鋼筋外層之 Concrete 部份，如上述腐蝕崩壞後，硫酸鹽或水才能進入鋼筋部份，使之生銹。臨海工程不管是否在水中或在陸上，不管是否有鋼筋或無鋼筋之 Concrete 均應避免使用 C_3A 高之水泥。且要注意做水密性好之 Concrete，臨海工程如果能做到〞水灰比低，水密性好，使用 C_3A 低之 Type II cement 〞，我相信這樣的結構物一定能保持堅固。

港灣鋼筋混凝土結構物防蝕技術研討會

Seminar on Corrosion Protection Technology of Marine Reinforced Concrete Structures

鋼筋混凝土構造物之防蝕技術

主講人：莊秋明

台灣省交通處港灣技術研究所主辦
中華民國七十四年八月

鋼筋混凝土構造物防蝕技術

莊秋明先生主講

一、金屬腐蝕之分類：

金屬腐蝕之種類依其腐蝕之形態可分爲如下表：

- 金屬之腐蝕
  - 乾蝕（高溫氧化等）
  - 金屬熔化之腐蝕
  - 濕蝕
    - 電氣化學之腐蝕（一般在水、土中之腐蝕及大氣中之腐蝕）
    - 純化學之腐蝕（可溶性化學或非水溶液液體之腐蝕）
    - 微生物之腐蝕（嫌氣性細菌及鐵蝕細菌等）
    - 機械作用之腐蝕
      - 應力腐蝕
      - 挫擦腐蝕
      - 潰蝕
      - 摩耗腐蝕

（電氣化學之腐蝕、純化學之腐蝕、微生物之腐蝕）
- 全面腐蝕
- 局部腐蝕
  - 孔蝕
  - 凸狀銹蝕
  - 粒界腐蝕
  - 選擇腐蝕
  - 接觸腐蝕
  - 接縫腐蝕

表 1　金屬腐蝕之分類

上表所列腐蝕之種類爲簡易明瞭而分類者，依他人之構想可能尚有其他之分類法。表中微生物之腐蝕仍然屬于電氣化學之腐蝕。

茲再介紹美國L.L.SHreir　之金屬腐蝕分類說明如下：

㈠化學腐蝕：（不起外皮膜之化學反應，不發生電流作用）

⑴金屬與氣體反應：揮發性氧化物或化合物如鐵或鋁與氯氣之反應。

⑵金屬與液體之反應。

①固體金屬與液體金屬之反應。例如：Ni 被 Hg 之溶解。

②溶解金屬之鹵素（Halogen）化合物對同金屬之溶解。例如：鉛對氯化鉛之溶解。

③金屬對非水溶液之溶解。例如：鉛對四氧化碳之溶解。

㈡電氣化學之腐蝕

(A)濕蝕：

(1)陽極與陰極不可分型之腐蝕（非電解腐蝕）有下列幾種：

①水溶液中之全面均一腐蝕。

②非水溶液中之全面腐蝕。

③溶解氯塩中之全面腐蝕。

(2)陽極與陰極可分型之腐蝕（電解腐蝕）

在水溶液中，非水溶液中及溶解氯塩中，陽極與陰極可明確區分之腐蝕稱局部腐蝕，例如：濃淡電池腐蝕、異種金屬接觸腐蝕、接縫之腐蝕及散失電流之腐蝕等等。

(B)乾蝕：

(1)金屬與 CO_2 或金屬與蒸汽間之反應：

通過金屬表面可產生之化合物薄膜而發生電流反應之腐蝕。例如：同一金屬表面上之氧化膜與金屬之接觸面爲陽極，而氧化膜與外面之氧接觸面爲陰極。

(2)金屬與液體間之反應：

氧化膜均勻發生之反應。例如高溫水蒸氣與金屬之反應二硫化碳中之硫磺與銅之反應等。

綜上所述各種腐蝕中絕大部份之腐蝕或我們平時所能看到之腐蝕“濕蝕”而且均屬陽極與陰極可分型之腐蝕，而這種腐蝕即爲適用陰極防蝕之對象。

二、鋼筋混凝土內鋼筋腐蝕原因與往例防蝕方法：

水泥混凝土由于其本身無可避免之龜裂特性，空隙孔之存在，吸水性及毛細管

之作用易使外面之水份或水汽侵入內部，更由于施工中難于100％之品質控制，鋼筋混凝土保護層厚度不易全部維持一定標準造成厚薄不均，有時由于意外漏漿造生「蜂巢」而產生更多又大之孔隙，又因完工後之地震或外力之損害等導致原已存在腐蝕之因素更擴大致更易形成內部鋼筋加速腐蝕。因此位於易腐蝕環境下未防蝕之R.C.或P.C.構造物多未到設計年限，內部鋼筋便早先腐蝕。有鑒於此，世界各先進國家對位於腐蝕環境內之R.C.、P.C.構造物均事先採取防蝕措施以維其構造物之安全及節省不必要之重建費用。茲將各先進國家對R.C.或P.C.構造物防蝕設施分爲下列五部份說明如下：

㈠構造物材料部份：

(1)應採用龜裂少而又能抗蝕之水泥，如TYPE-II 或TYPE-V （海水中採用）

(2)應防止採用含有鹽份或其他腐蝕性之水份及砂石料，如因工地環境或其他因素而必須採用含鹽份之水或砂石料時，其NaCl 含量不得超過0.1％（日本鋼筋混凝土標準規範規定）。

(3)改良混凝土配合比（或提高水泥配合比增加其強度）以改良混凝土本身之密合性減少空隙孔之存在並可減少凝固後之裂痕。

(4)應採用撓度小之橋梁，在活荷重下R.C.橋梁遠較P.C.橋梁之撓度爲小惟倘限於環境或其他因素而須建造P.C.橋時，應採用高拉力鋼棒施預力（高拉力鋼綫預力橋撓度較大）並採用預力混凝土箱梁建造以減小撓度而防活荷重下裂痕擴大使水汽易侵入。

㈡施工中品質控制部份：

(1)混凝土材料品質及施工中混凝土強度，配合比及搗實工作應嚴格控制以降低及減小空隙孔之存在。

(2)施工中應防止漏漿情形發生以防增多及增大其空隙孔之存在並降低其設計強度。

(3)鋼筋之混凝土保護層務必全部控制在限定之設計厚度以上。

㈢改善腐蝕環境減少或消除腐蝕因素部份：

(1)橋梁上部結構之鋼筋保護層較薄應儘可能避免或改善終年陰濕及水淹之環境，尤其更須防止時濕時乾之環境以防乾濕循環作用最易產生腐蝕電流而加速鋼筋腐蝕。

(2)改善構造物附近周圍長期有害之煙氣與防止高熱並避免有害之液體或物體長期附着構造物。

(3)在可能範圍內橋面應盡量提高增大與水面尤其海面之距離以防海水浪花波及與水汽侵入（國外長久性位於海面上之橋梁距海面之高度至少10.M以上）。

(丁)防蝕方法之種類：

(1)加厚鋼筋之混凝土保護層（上部結構可採用 3 吋厚之保護層）。

(2)鋼筋塗漆防蝕劑或防水劑。

(3)鋼筋以防水帶或防蝕帶包紮。

(4)鋼筋鍍鋅處理。

(5)混凝土內採用防水劑或防蝕劑。

(6)混凝土表面塗裝防水膜。

(戊)防蝕補修之方法：

上述各種防蝕方法適用於新建構造物，原舊構造物內因鋼筋腐蝕龜裂補修防蝕方法以圖 1 說明之。

(1)鋼筋銹蝕保護層剝落之處：

必須將損壞鬆動或脆弱部份以混凝土打除以備整理補修。

(2)鋼筋之防蝕處理：

混凝土剝落或打除露出之鋼筋必須先清除鐵銹乾淨，如有鋼筋銹斷或腐蝕嚴重影響結構安全者應先焊接或補強鋼筋後在其表面上塗裝防銹劑或防水膜。

(3)打洞填補之處理：

將防水劑與水泥砂拌合，富有強性之混合土填入孔洞補實，填補厚度每一次採用約10.ｍｍ，厚度或深度較大之孔洞分成數次層面填補。

(4)混凝土之補強與防水之處理：

將富有增加ＰＨ值及防水性能之化學劑塗刷於混凝表面予浸透入內，以增強

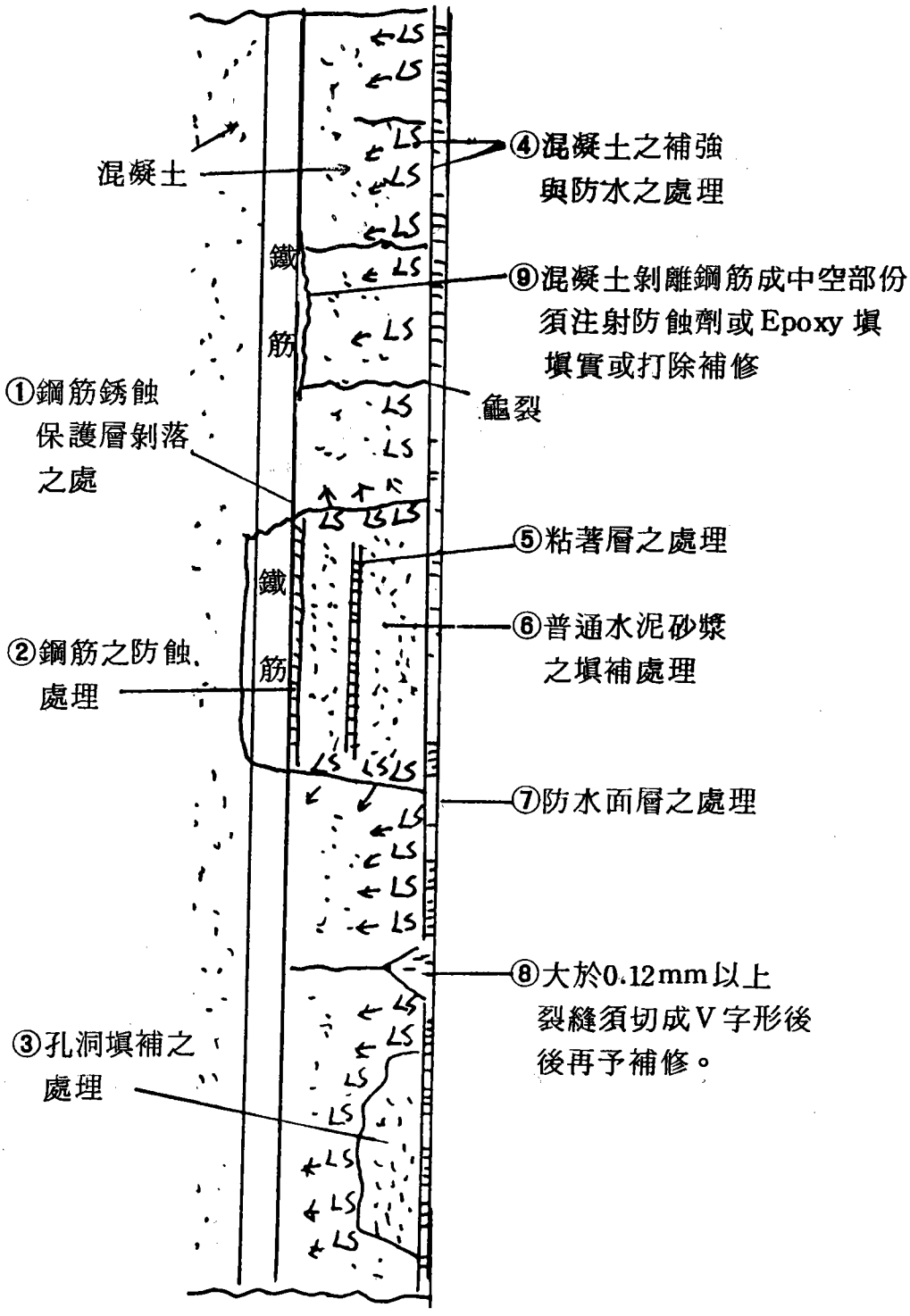


圖 1　鋼筋混凝土構造物防蝕示意圖

舊混凝土之ＰＨ值並加強混凝土內之防水作用，惟事先應將表面凸風化或易摔落之混凝土表面予以清除。

(5)粘着層之處理：

如(3)所述孔洞較大而深必須分數次層面塡補時，其前後兩層間爲加強其黏接之必要，應採用粘接力強之化學劑作爲粘接層厚度至少１ｍｍ。

(6)普通水泥砂漿之塡補處理：

在安全下爲經濟計修補較深厚之混凝土保護層或孔洞上層可用一般水泥漿補平以節省費用。

(7)防水面層之處理：

在(4)混凝土之補強與防水之處理後，再用防水力強之防水劑或防水膜塗於其上以阻斷水汽之浸入。該項防水面層不但有防水作用粘着力強且尙有彈性以防構造物受振動，發生撓度或因氣候伸縮作用而發生新龜裂。

(8)大於０.１２ｍｍ以上裂縫須切成Ｖ字形後再予補修：

一般混凝土裂縫小於０.１２ｍｍ以下者公認爲水汽不易浸入，故大於０.１２ｍｍ之裂縫爲防水汽進入應切成Ｖ字形塗新防水劑後再予補修塡平。

(9)混凝土剝離鋼筋成中空部份須注射防蝕劑或Ｅpoxy 塡實或打除補修。

三、鋼筋混凝土構造物之陰極防蝕方法

甲、腐蝕測量：

Ａ、實地之測蝕作業：

㈠準備工作：

Ⅰ應備器材及數量表

(1)金屬探測器一具　(2)鐵鎚一把

(3)鑿子二把　(4)電鑽一具

(5)塑膠罩一個　(6) 5 加侖塑膠桶兩隻

(7) 5 加侖水桶一隻　(8)½加侖塑膠瓶一個

(9)普通洗衣或洗碗用之肥皂水一品脫

⑽塑膠袋五個　　⑾海棉50.～60.塊

⑿ #18.單線塑膠電線（放在輪軸上者）約三百呎

⒀螺絲刀一把　　⒁混凝土用大釘子一盒

⒂鐵鍊一段（約二公尺）　　⒃半電瓶（Halfcell）二只

⒄半電瓶接棒一支　　⒅電壓表（高性能）

⒆橡皮圈一盒　　⒇硫酸銅（$CuSO_4$）液一瓶

㉑閉塞滿海棉塑膠管一條　　㉒記錄表

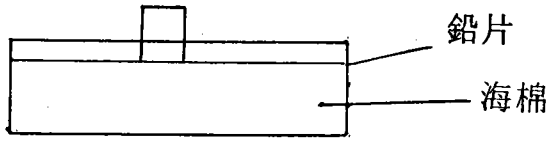
㉓粉筆10.支　　㉔皮尺一圈

㉕油漆一瓶　　㉖書夾

㉗鉛筆　　㉘塑膠皮手套二雙

㉙備用電池一對

㉚鋁版製 4 ″ × 7 ″鋁片下面加入海棉一塊



㉛電阻表兩具　　㉜防蝕檢驗儀

㉝電流干擾器一具（interupter）

Ⅱ 測量用之表格

如附表格（表 1 ，2 ）

Ⅲ半電瓶（Halfcell）之檢查

以往檢查法係採用兩個相同之標準Halfcell以電線相連接觀其電位差（Potential）以校驗Halfcell之好壞或準確性。如果相同之兩個標準Halfcell相連在一起其電位差應爲 0 ，但此種檢查法有發生錯誤之可能，因爲電位差爲 0 之可能性有三：

①相接兩個完全相同之Halfcell其所產生之電位差爲 0 。

②一個高於基準電位差之Halfcell，另一個低於基準電位差之Halfcell，而其高低電位差之絕對值相同，當其相連後而產生之電位差亦爲 0 。

③Halfcell內之零件或接連之電線如有缺短時，其電位差亦爲0。

因此建議用下列新方法來校驗Halfcell：

①在一個混凝土塊上固定一點，任何相同之Halfcell對此固定點應有相同之電位差否則可繼續採用以下面兩個方法檢查Halfcell之好壞。

②用三個相同之標準Halfcell交替互相校驗，便可查出已損壞或不準確之Halfcell。

③用一個不相同而較好之Halfcell將其不同之電位差與理論電位差相比較便可查出其好壞。

㈡工地實測：

作陰極防蝕（Cathodic Protection）前當應先瞭解被防蝕結構物之腐蝕情形及程度，因此必須先進行測蝕而蒐集有關其腐蝕資料並加以分析後再進行防蝕工作，其測蝕工作可分爲下面兩部份說明：

Ⅰ用儀器測蝕部份：

在被防蝕結構物上找出鋼筋以便接電線之用。測蝕之前應先以電阻表校驗鋼筋保護層之電阻，其產生的電阻越大表示保護層越厚，惟其電阻不得超過50,000 Ω否則不適於測蝕。如以橋梁結構物爲例在橋面版或在大梁上先以鑿子打一小洞找出一根鋼筋接於電綫作爲陰極，而接於Halfcell之一端爲陽極，當Halfcell接觸橋面或樑表面上之測量點時，從電表上可測得其電位差（Potential）。因本省水泥及鋼筋之成份與美國之產品不盡相同，故先暫以350 Potential爲界線，凡超過350處之鋼筋即表示已生銹，超過數越多即表示鋼筋之生銹更多。反之低於350處之混凝土內之鋼筋即尙未腐蝕。

Ⅱ用肉眼及音響測蝕部份

被防蝕結構物內部之鋼筋生銹致保護層龜裂，鐵銹溢出保護層外面等均可以肉眼判斷結構物內之鋼筋已生銹。以鐵鎚輕敲結構物表面或以鐵鏈在結

構造物表面上拖拉，依其所發生聲音之不同可判斷混凝土內鋼筋已生銹而與保護層分離產生空洞不實之處。

上述測蝕工作中必須注意及其準備之工作有下列各點：

(1)被防蝕結構物內之鋼筋是否連結，必須先以電表檢查，如發現有未連結之鋼筋則必須設法予以連結，否則將影響腐蝕之測量工作而將來防蝕通電流時其未連結部份之鋼筋將變爲陽極（Anode）反而增加鋼筋腐蝕之速度。

(2)測蝕時Halfcell不能倒轉以防$CuSo_4$溶液流出影響Potential之讀數。

(3)手不能接觸到半電瓶（Halfcell）之銅部分以免發生誤差。

(4)應測各點須使用油漆切實標明位置以利將來反覆檢查比較之用。

(5)接電綫前必須將腐蝕鋼筋之鐵銹清除。

(6)爲了能獲得良好而較正確的電位差，必須在測量點先以海棉濕以適量之水份以助傳電流。

(7)Halfcell鋼筋與電線之接頭須接好。

(8)盡量使用同一種而同一個的儀器測蝕。

(9)注意測量時之環境如被防蝕結構物上之電線油管及其他金屬類並保持一定的濕度。

(10)須先求鋼筋保護層之厚度，分析混凝土之成份及其對電阻之關係並作混凝土PH含量之試驗，以利將來防蝕之用。

(11)先以電阻表測鋼筋保護層之厚度是否超過電阻50,000 Ω。

(12)各種測蝕儀器的校正與檢查。

Ⅲ測定範圍：

依混凝土建築物防蝕之需要將擬加以防蝕之混凝土全部表面作整個之測定。如測量水管、電纜等，則順管線中心測量其Potential外幷於管線兩測約離開距管線中心60公分至1公尺之平行管線作Potential之測定。

(三)測定之種類：

(1)裂痕部份繪製平面圖。

(2)結構物內鋼筋生銹後與保護層分離產生空洞不實部份繪製平面圖。

(3)結構物之混凝土採樣每種不同情形下，採樣品至少三個，送實驗室作ＰＨ及含氯量之化驗。

(4)求取鋼筋混凝土保護層之約略厚度。

(5) $CuSo_4$ 半電瓶之電位差Potential 測定。

㈣工地實測之記錄資料

(1)構造物之地點（平面示意圖）

(2)開工年月

(3)構造物之結構略圖

(4)損壞情形

(5)測定時之年、月、日、時、氣溫、風向、濕度

(6)使用之儀表種類

(7)硫酸銅半電瓶 $CuSo_4$ Halfcell 標準點之Potential

①初測時之讀值

②測量完畢時之讀值

(8) $CuSo_4$ Halfcell 對工地測讀之全部Potential 讀值

(9)修護年月

(10)構造物周圍之環境

㈤測橋梁Potential 之選點

一般均以測試目的來決定其選點之多少及位置，下列之建議可作選點之參考應用

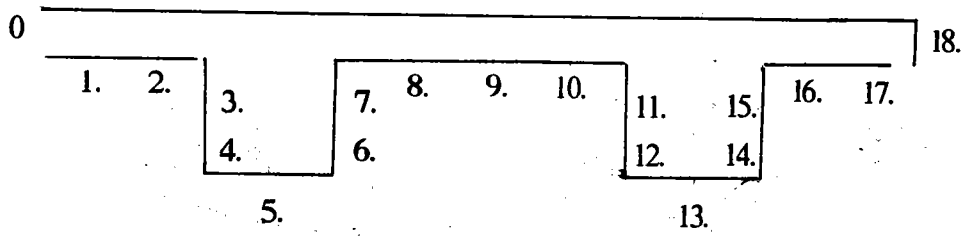
(1)擬獲取概略腐蝕情形時可按構造物之腐蝕情形作不規則之重點選點測蝕。

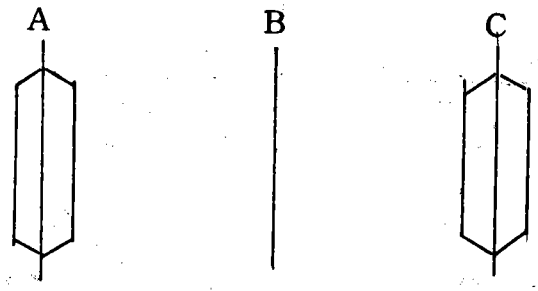
(2)擬獲取整個腐蝕情形作爲今後腐蝕繼續擴大之進度或將復修後防蝕之參考時可採用：

a 一般平面橋梁每１公尺（公尺）之間隔距離需測定一個數（即每公尺見方之左右縱橫間隔作一全面之測讀。

b 對普通Ｔ型梁之測蝕選點建議如下面之示意圖（除梁本身如示意圖、橋

面版可以每隔 1 m選一點）





除梁本身因結構及其型態關係如示意圖所示之選點外，橋面版可以每隔約 1 公尺選一點（見上面斷面圖）至每一跨徑可選三個橫斷面（如上圖所示ＡＢＣ之位置）來測量。

B、防蝕之分析：

(1)將已測繪之裂痕平面圖，其空洞不實部份另繪成一平面圖，按照其面積算出其佔所有裂痕面積的約略百分數。

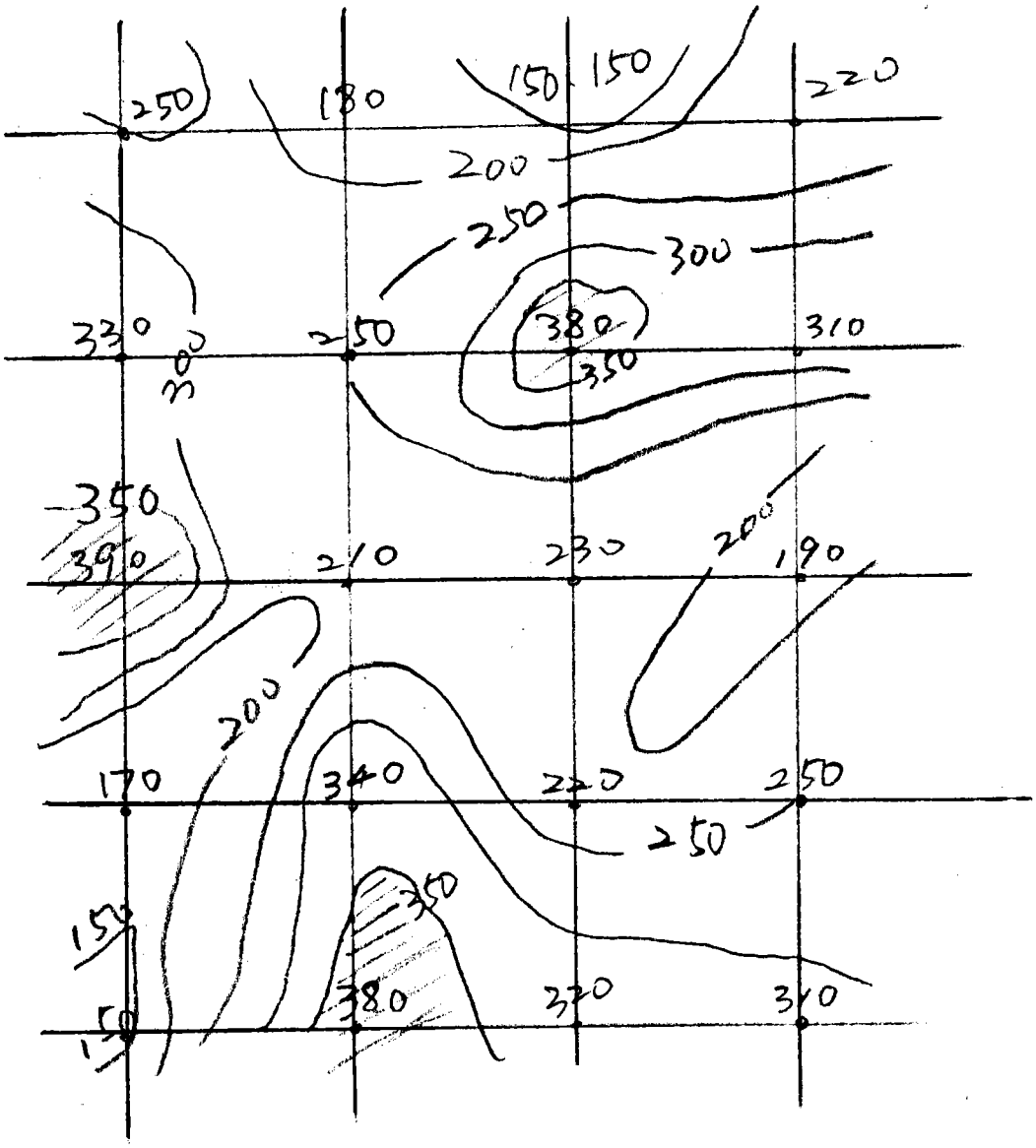
(2)(a)將 Potential 測定之數值以土木工程之等高線工作法繪製等值線（如附圖 2 ）其等值線之差距按腐蝕程度決定。建議暫採用每50.ＭＶ之間距繪成 Potential 之等值線。

(b)大略求出各 350 Potential 線內之面積。

(c)換算成百分數字之腐蝕程度。

(d)爲求取其腐蝕進度之情形可每月測定一次并繪製 Potential 之等值線，以便觀察其腐蝕面積百分數之增加。

(3)空洞不實（ Delaminated ）之鋼筋保護層部份可在其中心處鑽小孔噴射 Epoxy 進入保護層內使鋼筋與保護層粘結一起或打除重建保護層惟應注意新建之保護層或注入 Epoxy 之保護層對 Potential 之變化情形及其變化



附例：①測蝕所得之Potential 等值線圖（ＣＳＥ）

▨表示腐蝕地點②本構造物之鋼筋保護層厚度爲1吋，混凝土強度爲210kg／cm²採用水自然養治。

圖2

值應予記錄作爲將來防蝕分析之用。

(4)臺灣產水泥混凝土內ＰＨ含量及其對鋼筋腐蝕之關係試驗，以便決定防蝕之處理步驟。

(5)混凝土成份之分析及修改其成份或改用其他成份之水泥，對鋼筋防蝕效果之試驗，以利防蝕工作，例如鋼筋保護層之加厚對防蝕之關係，如何改良水泥成份以減低水泥混凝土因厚度或長度關係而發生龜裂。〔美國加州目前已採用改良之水泥即將Portland 水泥（Type工）成份之C_3A減少到６％以下以減少混凝土之伸縮而防龜裂，目前不僅橋梁採用修改之水泥，且正發展舖築連續鋼筋混凝土路面無接縫路面，使行車不跳動而適宜又可防因接縫處所發生之水唧作用（Pumping）造成路面破壞之短處〕。

乙、陰極防蝕方法：

鋼筋混凝土中鋼筋之腐蝕現象可以確定仍屬自然之電化學變化，所使用之陰極防蝕法，係以適當之方向放出充分之電流以阻止鋼筋上之陽極腐蝕電流之發生進入電解質（混凝土）中。如果鋼筋上之陽極得到防蝕電流而不再發生腐蝕電流就變成爲收受電流而被防蝕之陰極。換言之，鋼筋上所有陰陽極負電位必須改變爲比原陽極負電位更低之電位始能達到防蝕。以土中之鋼管而言，從多次之實驗獲知，如要該鋼管達到陰極防蝕之效果，鋼管之電位必須維持在－０.85伏特(CSE)以上或是－０.85伏特（C.S.E）之電位用在鋼筋混凝土管之防蝕作用上也有效惟由其他研究報告指出，在含有氯化物之氫氧化鈣溶液採用－０.71伏特（ＣＳＥ）電位，也可使鋼鐵達到有效之陰極防蝕效果。同時由實驗獲知導致混凝土破裂之鋼筋腐蝕電位爲－０.67伏特（ＣＳＥ）且超過－1.1伏特之防蝕電壓，也將導致混凝土與鋼筋間粘着力之減弱。

如前所述，陰極防蝕有兩種方法，一種爲流電陽極法，另一種爲外加電流法。在流電陽極法方面採用電動勢系列（Electro Motive Force Series）較高金屬作爲犧牲用之陽極。因爲該項陽極之電極電位比被防蝕金屬之電位更高，當該兩種金屬接連時，電流將流向被防蝕之金屬而成爲受收防蝕電流之陰極。以地水上之鋼筋混凝土橋梁陰極防蝕而言，流電陽極法將發生兩項重大之缺點：①陽極

與鋼筋間一直維持最大之電位差。②流電陽極所輸出之電流將因電解質之電阻或其含水量之不同而發生很大之差異變動。至於外加電流法則有下列幾項重要之優點：①由陽極輸出之電壓可以低於 1 伏特或高於 100 伏特等不同之變動。②輸出之電流可依電解質之電阻或含水量之不同而自動調整控制。③鋼筋之防蝕電位可依周圍之電阻環境之需要獨立自動調整維持。地水上鋼筋混凝土構造物之陰極防蝕雖然與地水上之金屬及其構造物之陰極防蝕理論相同，惟因該項混凝土構造物無適當之傳導電流物體，其基本之電路及電流傳佈不太相同，所以該項陰極防蝕須先加以研析與評估，以求改進而達防蝕之目的，茲以圖解說明如下：

圖 3「陽極埋設在混凝土中之圖解」。圖中表示一些電流回路之假定值，由此圖解可知陽極在混凝土中之情況下，接近陽極之鋼筋在理論上應必受陰極防蝕然而圖中下半部圖解顯示遠離陽極之 2 號鋼筋之附近鋼筋，本質上將與電源間成爲無電阻之一連串並聯回路在此情況下，理論上如要使全部之鋼筋均能均勻受到陰極防蝕，混凝土中之陽極就必須在縱橫各向鋼筋隔排總量。爲改進此種缺點，使 2 號及所有埋在混凝土內之鋼筋獲得均勻電阻及電流，陽極必須從混凝土中移置於混凝土面上舖有導電性之封層中，以達到全部鋼筋陰極防蝕之效果。（詳如圖－4 說明）

具有導電性可作爲封層之材料以碳渣爲最佳，且碳渣作爲陽極背填材料已有長久之歷史。根據實驗報告指出，碳渣在乾燥時之電阻爲 52 Ohm·Cm 約爲海水電阻之兩倍，碳渣之導電性能甚佳，當然比水飽和混凝土之電阻 10,000 Ohm·Cm 更佳，至于潮濕之碳渣電阻約只有海水之一半，圖－4「陽極在碳渣內之圖解」可說明採用高導電性能之碳渣作爲鋼筋混凝土之導電封層之可行性，爲進一步明瞭，假定碳渣與鋼筋間之電阻爲 1 Ohm 混凝土和碳渣接觸面與鋼筋間之電阻爲 100 Ohm ，根據電流之定理，顯而易見的橫向流動之電流流經混凝土時，通過碳渣部份而降低之電流與通過混凝土到鋼筋而降低之電流比率爲 1 Ohm 與 100 Ohm之比。此爲鋼筋混凝土構造物之陰極防蝕法最普遍被採用之理論依據。茲以鋼筋混凝土橋梁之陰極防蝕爲例附設施圖說明如下：

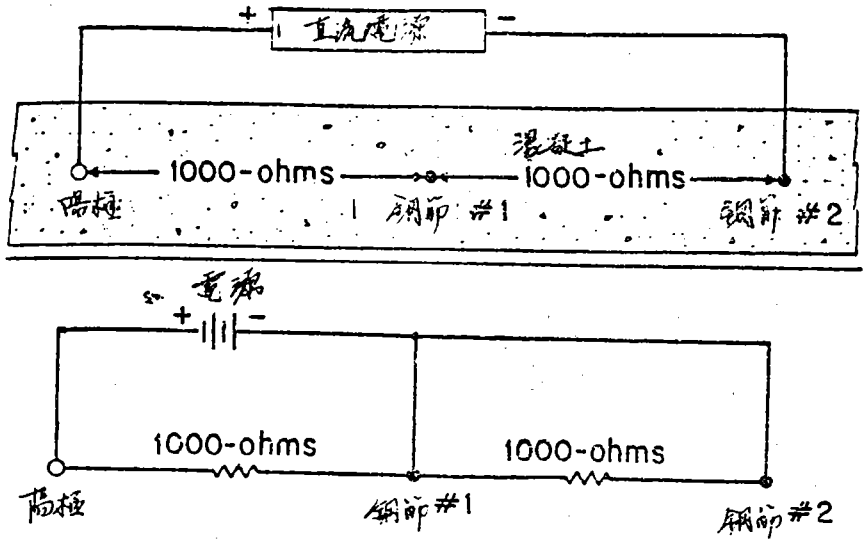


圖 3　陽極埋設於凝混土中之圖解

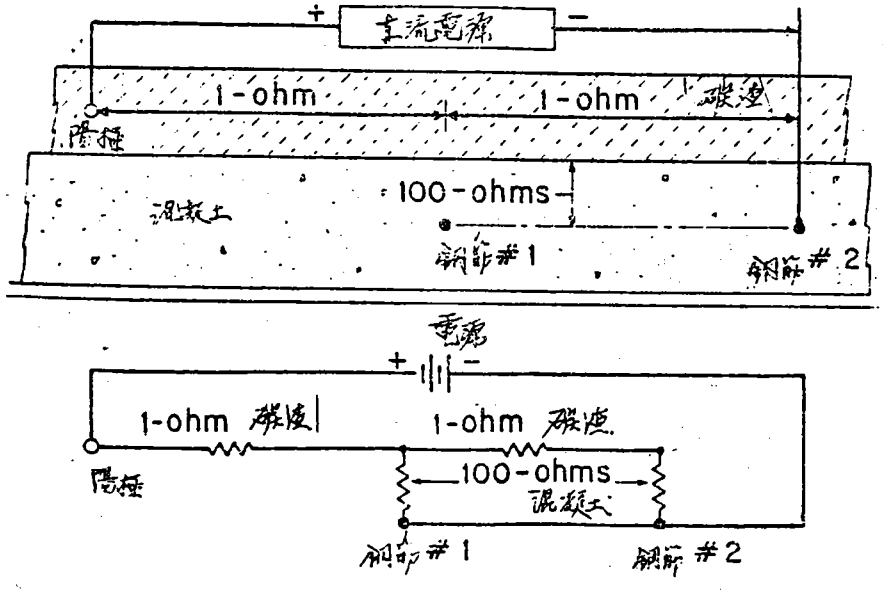
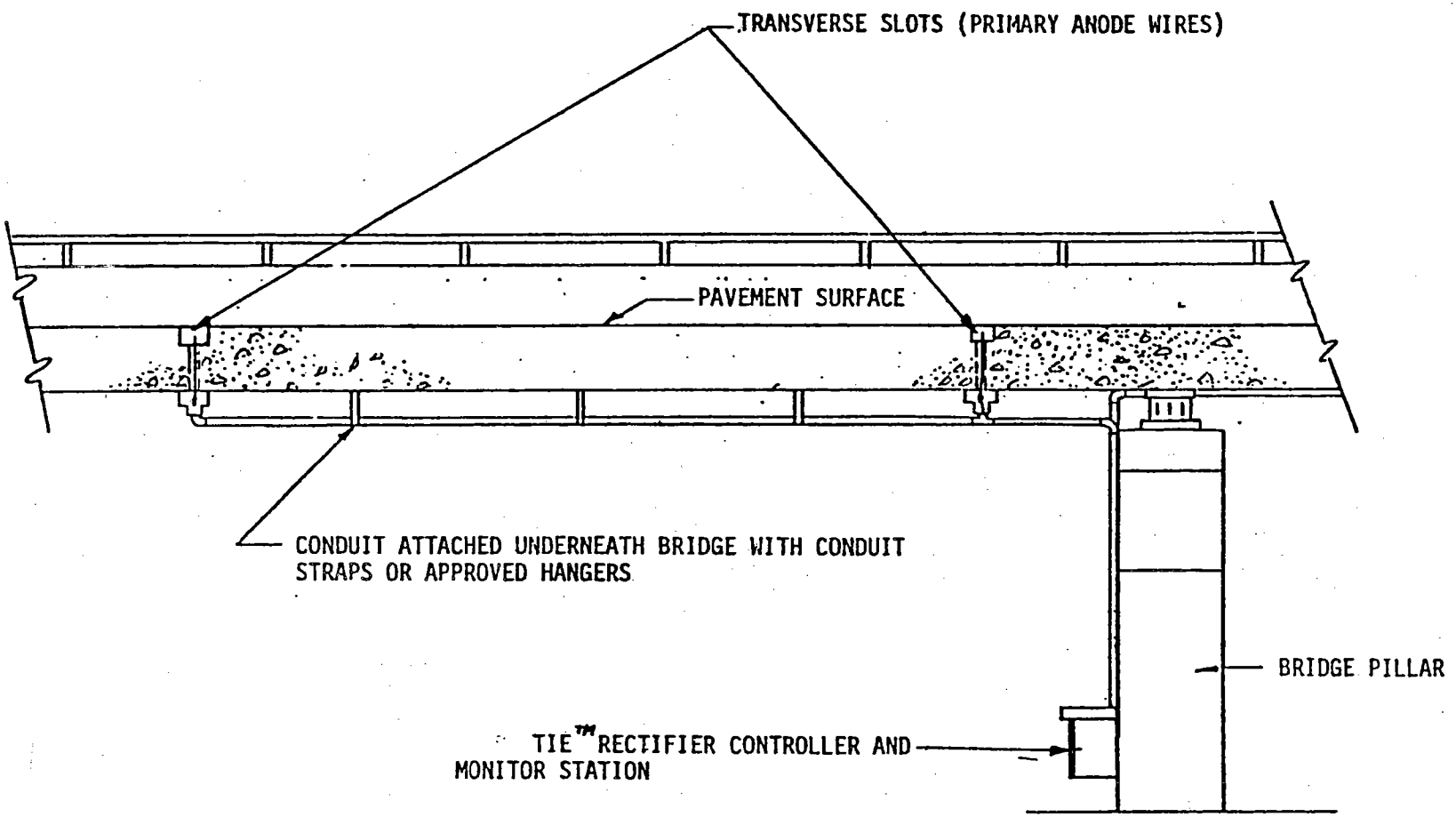
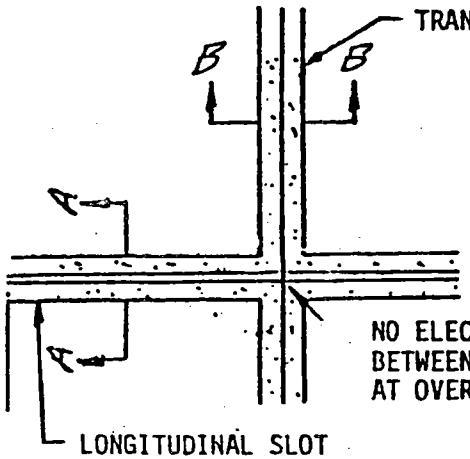


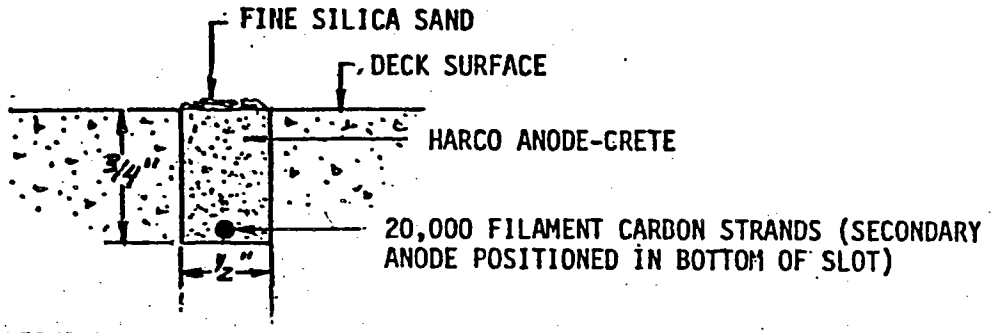
圖 4　陽極埋設在碳渣中之圖解



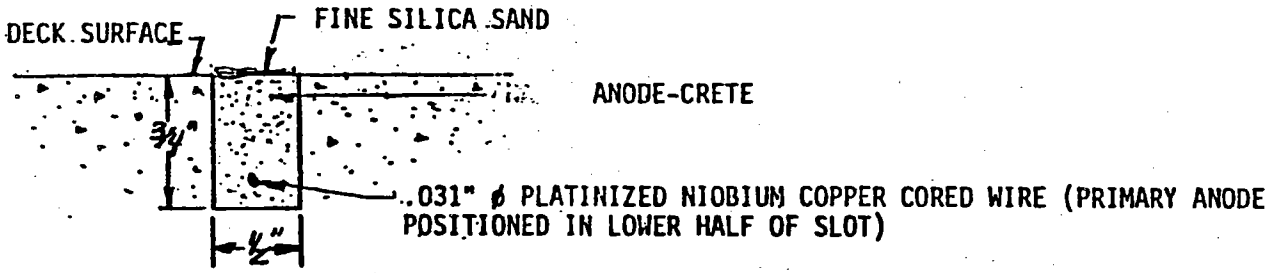
NOT TO SCALE

DRAWN BY: CEW	WIRING UNDER BRIDGE NON-OVERLAY CATHODIC PROTECTION SYSTEM
DATE: 12-28-82	





SECTION A-A



SECTION B-B

NOT TO SCALE

DRAWN BY: CEW	ANODE INSTALLATION NON-OVERLAY CATHODIC PROTECTION SYSTEM
DATE: 12-28-82	
DWG. NO. S-26037-M	

丙、工地之施工

(1)測取Potential 之程序

①原有構造物尚未打除修復前之Potential

②修復後之Potential

③安裝陽極（Anode）及導電材料後之Potential

④陰極防蝕送電後之Potential

⑤最初送電防蝕期間每週測量Potential 一次以資校核防蝕情形，以便調整電量。

(2)原有建造物之打除修護，應配合防蝕施工程序及方法辦理。

(3)倘若使用新水泥漿或混凝土修護時應俟28日凝固期間過後，再加以陰極防蝕裝置否則保固期間因水份及強度之變化易使電流不穩，電位變化不定。

(4)半電瓶（ Halfcell ）之選用

①一般鋼筋混凝土構造物或水管、油管等選用$CuSO_4$ 半電瓶爲原則。

②海水港灣採用Calomel 半電瓶爲宜。

(5)混凝土防蝕用之電源

採用半電瓶（$CuSO_4$）之Potential 1.10v$^+$爲基準，最初電壓及電流以不超過1.3v爲最高限度。

丁.陰極防蝕施工中應注意各點

(1)所有Anode 之接線及配電盤使用之接線一律用絕緣絞線，於穿入電纜管內時應一律檢查其絕緣情況是否良好。凡絕緣不良之接線應一律抽出重換。

(2)所有電線之接頭一律絞緊後再重新焊接之（不能僅作焊接），否則時日一久則發生接觸不良影響電流，並易縮短電線使用之壽命。

(3)如電線線路較多時，應使用不同顏色之電線以資區分各線接頭而免誤接發生危險。

(4)控制箱應加用通風設備或冷風裝置以免過熱而斷路。

(5)半電瓶於每次使用前，應切實檢查其是否良好準確，尤其瓶中之溶液有否變質，裝滿應特別注意。

(6)每次測定電位差時應盡量選取每日同一時間舉行（最好在上午前測試）。

(7)如發現電位差之測值不合理時應作以下檢查：

a 接線是否正確。

b 接線各接點是否良好。

c 採用之直流電壓是否恰當。

d 儀器是否良好，儀器內使用之電源電池是否已減弱。

e 萬能儀表之選用範圍是否恰當。

f 儀表上有不同之讀數，是否將讀格讀錯。

g 使用儀表之前，務須確實檢查其本身之靈敏度及精確度，使用之後務須立刻加以保養，並適當保存。

四、結語

(1)上述無封層陰極防蝕法（Non-Overlay Cathodic Protection System）及瀝青封層陰極防蝕法（Conductive Asphalt overlay cathodic Protection System）分列有其優劣點。無封層陰極防蝕法適用於任何形態及位置之防蝕，惟需費較高。至封層陰極防蝕法限用於平面上之防蝕法，惟費用較少。防蝕之規畫設計應責由經驗工程師擔任，依據腐蝕測量所得之資料予以分析計算研判適用之防蝕方法保護構造物，以發揮防蝕之功效而達經濟之要求。

(2)鋼筋混凝土構造物之陰極防蝕技術雖已研究發展成功，可應用於R.C.或P.C.構造物防蝕長期有效之良法，惟國內對於該項防蝕之規範、標準均尚未訂定，尚須繼續努力研究實驗，以求我國環境下可採用之混凝土及各種保護層厚度應防蝕之鋼筋電位標準以供國內防蝕應用。

(3)金屬之腐蝕在其建造構造物時，雖可採用各種方法預先作防蝕處理，但不是防蝕處理費昂貴就是其效果期間有限，往往在數年後即開始腐蝕，尤其地上水上混凝土內金屬腐蝕，迄今尚未有其他適當方法長期有效予以控制，在防蝕技術上不但很難解決而費時費錢。R.C.構造物陰極防蝕技術之研究成功確實有效解決該項技術難題，相信有助於國內陰極防蝕技術之更進一步之研究發展，對國內十大、十二項及現正進行中之十四項建設有莫大之幫助與用途。

電子顯微鏡在ＲＣ防蝕上之應用

黃　兆　龍　博士

摘　　要

電子顯微鏡爲科技研究上的重要分析工具，直接提供有關微結構變化的資料，使得研究人員能將巨觀材料力學行爲以微觀結構特徵加以解說。電子顯微鏡對ＲＣ中鋼筋腐蝕的功用，主要乃在於腐蝕發生原因的探討，間接提供改良ＲＣ防蝕技術的參考。本文主要簡單介紹電子顯微鏡的基本原理及可能應用於防蝕技術的方向。

電子顯微鏡在R.C防蝕上之應用

黃兆龍博士主講

一、前言

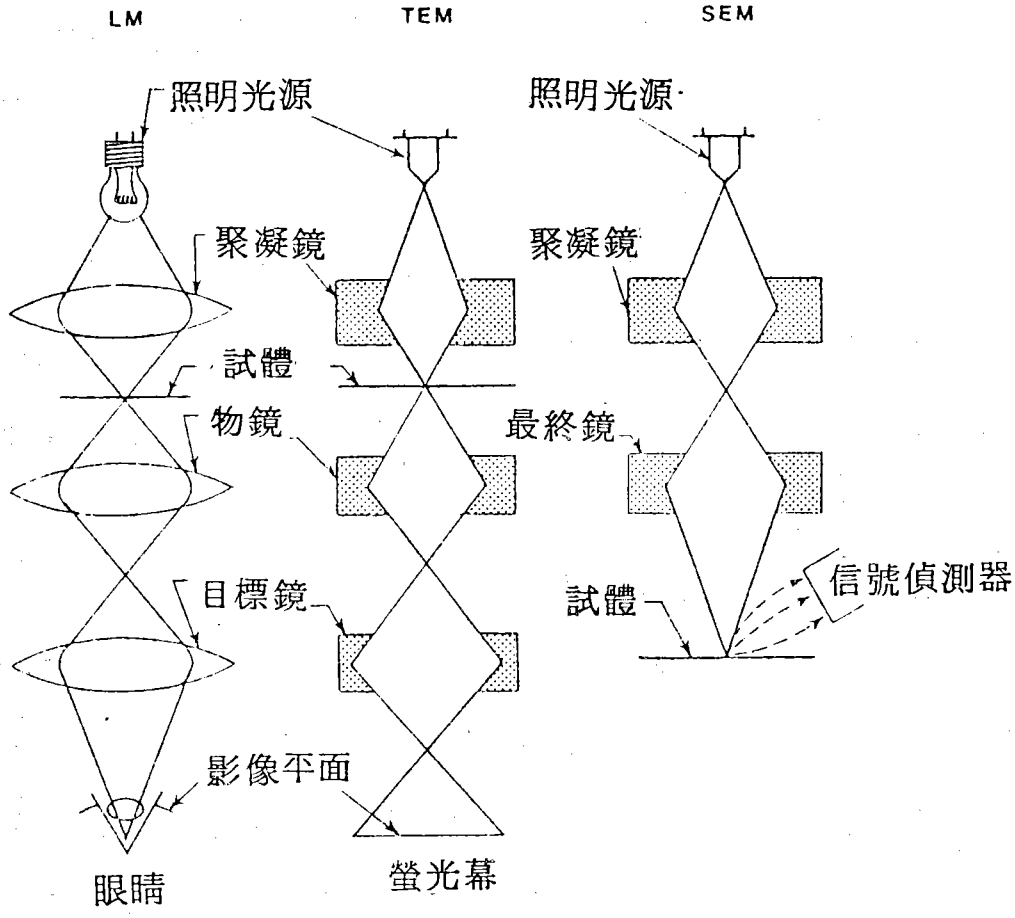
電子顯微鏡（EM,Electron Microscope）在科學研究上扮演相當重要的角色，提供研究和分析人員直接“眼見爲憑”的證據，使得研究者的眼光更深入且更爲細密。雖然電子顯微鏡的推出係在1920年代左右，但其大量應用在混凝土材料研究上係近20年的事〔1〕。EM用於防蝕技術上的文獻甚少，但是因EM俱有直接觀察晶相（Morphology）的功能，使得研究者可以經由混凝土水化及鋼筋腐蝕產生的晶相轉變來推論腐蝕產生的原因或機理（Mechanism ），間接有助於防蝕觀念及技術上的改良。因此應用電子顯微鏡於鋼筋混凝土（RC，Reinforced Concrete ）防蝕上，首先需瞭解混凝土中鋼筋產生腐蝕的機理，而且必須知道腐蝕前後RC內可能有的晶相，如此才可能更有把握地來推論腐蝕的原因及改良防蝕的技術。

二、電子顯微鏡簡單的原理及構造

電子顯微鏡基本上有如一般光學顯微鏡（LM,Light Microscope or Optical Microscope ），是用來放大觀察物之影像，但光學顯微鏡是使用光學透鏡來聚光，而EM則使用線圈的磁力作用來聚凝電子光束，見圖1〔2〕。由於光子（Photon）的波長遠較電子（Electron）的波長長，因此光學顯微觀察目標物的面積較大而造成不清晰的現象，但電子可以被聚凝在甚小的點，所以解析度（Resolution）提高甚多（100倍以上），同時也因此而有較佳的景深（Depth of Field ）及工作距離（Working Distance），此即電子顯微鏡廣被使用之原因。

㈠沿革

光學顯微鏡在科學研究上一直扮演相當重要的角色，然而由於其有限的解析度及太小的工作距離，造成不便，使其功能受到影響。自 1897 年 Thompson 發現電子後，經過30年的努力，利用磁力作用而使電子轉變方向的觀念被建立，遂引發以遠較光子波長更短（電子之波長 $\lambda \simeq 0.0054$ nm ）的電子來照射物體，可得到更清晰的構想。在 1938 年，Ardenne



圖一　比較光子通過光學顯微鏡和電子通過穿透性電子顯微鏡及掃瞄電子顯微鏡的異同〔 2 〕

着手建立第一部掃瞄電子顯微鏡（ＳＥＭ，Scanning Electron Microscope），幾經改良，遲至1960年初期，Cambridge 儀器才推出商用ＳＥＭ。而在1960年末期，混凝土研究即大量採用ＳＥＭ〔3〕，一二十年來ＳＥＭ已發展成爲科技研究上主要的分析工具了。雖然在1971年便有ＴＥＭ推出，惟因試體製作上相當困難，在混凝土研究上並沒被大量應用。

㈡掃瞄電子顯微鏡（ＳＥＭ）的原理及構造

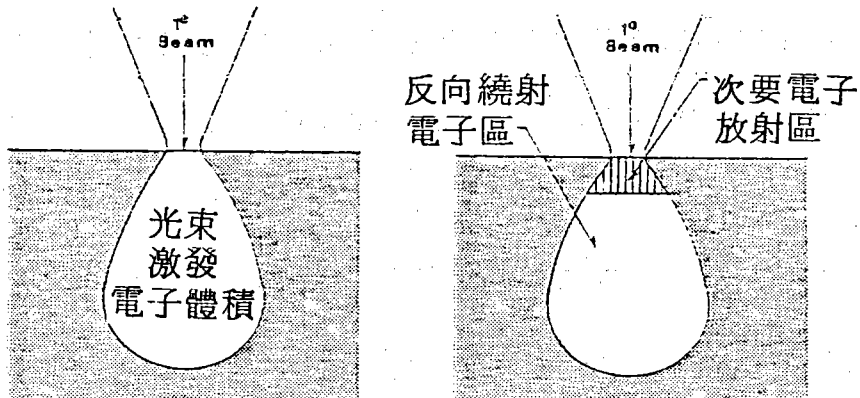
ＳＥＭ係將高能量聚焦電子光束，以磁力綫圈的作用，有系統的將電子光束在試體表面來回掃瞄，當電子光束撞擊試體面上時，會在附近產生很多信號（Signals），這些信號基本上是低能階的次光電子（Secondary Electron ），此刻若以偏壓（Bias）信號收集器來偵測信號，則可將信號傳輸而顯現於陰極射綫管（ＣＲＴ）上，得到試體表面外形（Topography）或晶相之外觀，此即所謂外觀形態（Morphology）。

ＳＥＭ的基本構造簡示如圖二，包括：①掃瞄電子顯微鏡柱（Scanning Electron Microscope Column ）②影像成形器（Image Formation ）③其它改良系統副屬設備。掃瞄電子顯微鏡柱爲電子顯微鏡的重要部份，其中包括產生主要電子光束（Primary Selection Peam）的電子鎗；聚焦主要光束於試體的電磁鏡（Electromagnetic）和孔徑（Aperture ）；免除光束受到空氣分子干擾的眞空系統；試體架（Specimen Stage ）；和容許觀測和放大影像照相的信號偵測器（Signal Detection ）和顯示器（Display Components）

子光束造成擾射作用，並且空氣分子會使電子分散。通常要求眞空度在 1 ×10 $^{-4}$ mm-Hg 以下（一大氣壓爲 760 mm-Hg ），達到此眞空程度需要三種泵浦，即機械泵浦（ 10^{2} ～ 10^{-4} mm-Hg ），擴散泵浦（ 1 × 10^{-3} ～ 10^{-9} mm-Hg ），和離子泵浦（ 10^{-7} ～ 10^{-11} mm-Hg ）。

5. 影像形成器（ Fmage Formation ）

當電子光束撞擊試體時，試體某一部份體積會因而激起電子，見圖三(1)〔 2 〕，上層爲次要放射電子區（ Secondary Emission Electrons ），下層爲反向繞射電子區（ Backscattered Electron Emission ）。此刻電子訊號需以偵測器加以收集，然後經過處理單元即可轉換成影像。一般ＳＥＭ上配備有次要電子偵測器及Ｘ－光偵測器（ＷＤＳ或ＥＤＳ）二種，當然更新型的儀器具更多的功效。影像顯示器（ Image Display ）主要爲陰極射綫管（ＣＲＴ）、掃瞄產生器（Scan Generators ）及放大控制器（ Magnification Control）等。



6. 其他

ＳＥＭ內可以加裝其他各種附屬設備如微硬度計（microhardness tester）、壓力環（Load Cell）等供微觀材料力學測定用，使得ＳＥＭ的功能更完備。

三、鋼筋混凝土銹蝕發生的機理

鋼筋混凝土在正常良好的混凝土品質下，鋼筋是不會發生腐蝕的〔４〕。因爲在混凝土鹼性環境下，鋼筋表面會產生一層鈍化保護層，迫使金屬腐蝕五大要項：陰極、陽極、電流、電壓及電解液無法同時形成。然而若由於混凝土破裂（Cracking），氯化物的侵入或碳化（中性）作用等均足以滿足金屬腐蝕五大要項而造成鋼筋混凝土腐蝕的現象。

1. 混凝土的破裂

混凝土是一種多孔性易脆裂的混合材料，其破裂的途徑相當多，只要力系不平衡，外界作用力超過混凝土拉力即足以造成混凝土的破裂。造成破裂的原因是非常多的，見表一所示〔５〕，基本上可區分爲結構不穩定，混凝土乾縮變形、泌水析離等等原因。一旦混凝土破裂，則有害物質如水、氧氣、氯化物、二氧化碳等會直接侵入，而造成嚴重的腐蝕。

2. 氯化物侵蝕

氯化物的存在將直接破壞鋼筋的鈍化氧化膜，即使在較高的ＰＨ環境下，鋼筋的腐蝕仍會發生。氯化物的侵入除了沿裂縫外，也隨着拌合水內含有消毒用之氯化物，海砂石內含海水遺留之氯塩，甚至使用早强摻料，$CaCl_2$ 等而進入混凝土中，均會造成潛在性威脅。

3. 碳化作用

表一　結構混凝土裂縫的形態、造成原因及控制因素〔 5 〕

裂縫的形態	發生狀況說明	造成問題的原因	控制因素
大而不規則	結構體支撐不良或超載重作用	結構體超負荷	改變設計斷面、加强支承力、限制載重、或載重狀況
大而有規則間距	水泥漿體失水乾縮 水泥漿體熱作用	水份喪失 熱應力或熱體積膨脹	水份蒸發率、配比設計、溫度上昇率及變化、水化作用
粗糙而不規則圖狀	鹼-矽反應，有膠體流出	體積膨脹	水泥中之鹼含量及骨材的成份
細微不規則圖狀 （微裂紋）	過度泌水 塑性收縮	含水量過多而上浮 水分喪失	配比設計 混凝土溫度、表面保護
細微而概略在表面上呈平行（垂直於風向）	塑性收縮	水份喪失	混凝土溫度、表面保護
平行控制縫邊緣 （D－裂縫）	多孔骨材含水量過多	水力壓力	骨材吸水率、混凝土含氣量、最大骨材粒徑
沿鋼筋位置	鋼筋生銹	體積膨脹	適當的保護層，以減少氧、氯、濕氣的滲入
混凝土表面之整片剝落	混凝土受到硫酸塩侵蝕	體積膨脹	配比設計、水泥種類、摻料

空氣中二氧化碳的侵入將降低混凝土之ＰＨ值，尤其是在裂縫附近，使得水泥水化物如 $Ca(OH)_2$ 及Ｃ－Ｓ－Ｈ膠體起反應作用，造成碳化收縮，更促使微裂縫的擴大，間接有害鋼筋，更嚴重的爲鹼性環境的ＰＨ值降低，而致裂縫底部鋼筋鈍化保護膜被破壞，終造成局部鋼筋的腐蝕。

四掃瞄電子顯微鏡觀察ＲＣ腐蝕的技術

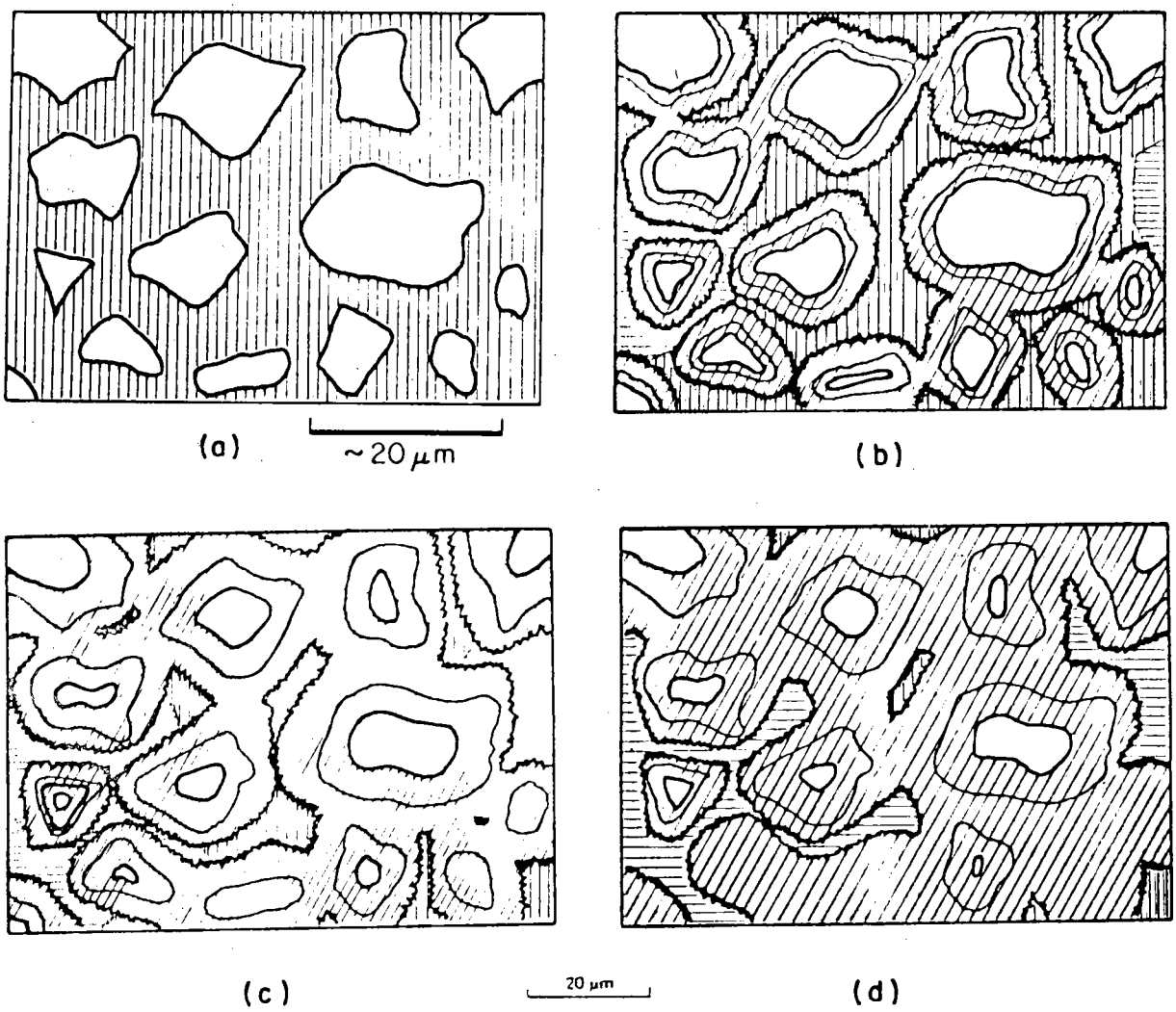
掃瞄電子顯微鏡主要爲觀測試體外觀（ Morphology ），通常10Ｋ（１萬倍）左右即可看出微觀晶相，若配備以ＥＤＸ或ＷＤＸ的Ｘ光分析器則可以在微小點上作定性（ Qualitative ）或定量（ Quant - itative ）分析。運用掃瞄電子顯微鏡於ＲＣ腐蝕研究上，首先必須瞭解各種反應（包括水泥水化、齡骨材反應、硫酸塩侵蝕及腐蝕反應等）的可能生成物（ Products ）及其相應ＳＥＭ晶相外形和Ｘ光光譜，同時也必須取得隨機代表性高之試體並經適當之處理，如此才可正確研判出鋼筋腐蝕的原因，改善防蝕技術。

㈠鋼筋混凝土銹蝕可能ＳＥＭ晶相

１混凝土的水化產物

混凝土中水泥水化產物隨時間、水泥成分、環境而不同，見圖四〔６〕，但基本上可區分爲五大類，即Ｃ－Ｓ－Ｈ＊膠體、毛細管孔、氫氧化鈣

＊水泥化學簡寫符號，$S-SiO_2$ ， $C-CaO$ ， $H-H_2O$ ， $A-Al_2O_3$ ， $\bar{S}-SO_3$ ， $\bar{C}-CO_2$ ， $C\bar{S}H_2$ 石膏， $C_3A \cdot 3CS \cdot 32H$ —鈣矾石 $C_3A \cdot C\bar{S} \cdot 12H$ —單硫型鋁酸鈣水化物。



圖四　水泥漿體ＳＥＭ顯微晶相示意圖〔６〕

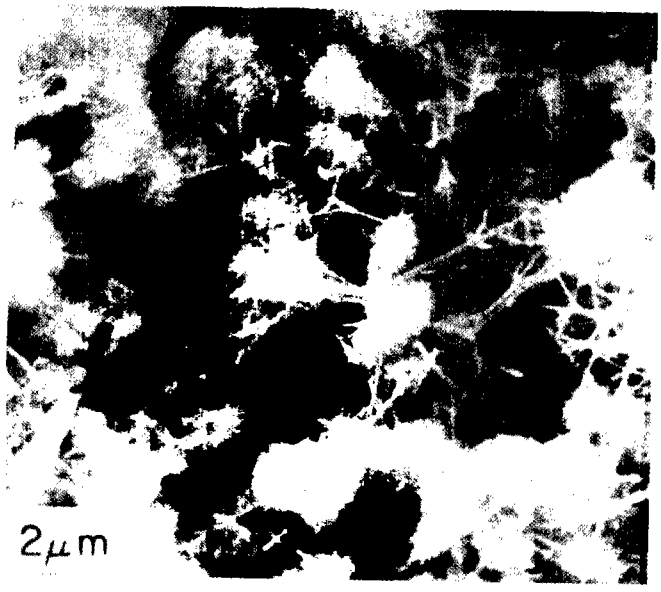
(1)初拌(2) 7 天(3) 28 天(4) 90 天齡期

表二　硬固卜特蘭水泥漿體之組成〔７〕

（依重要性排列）

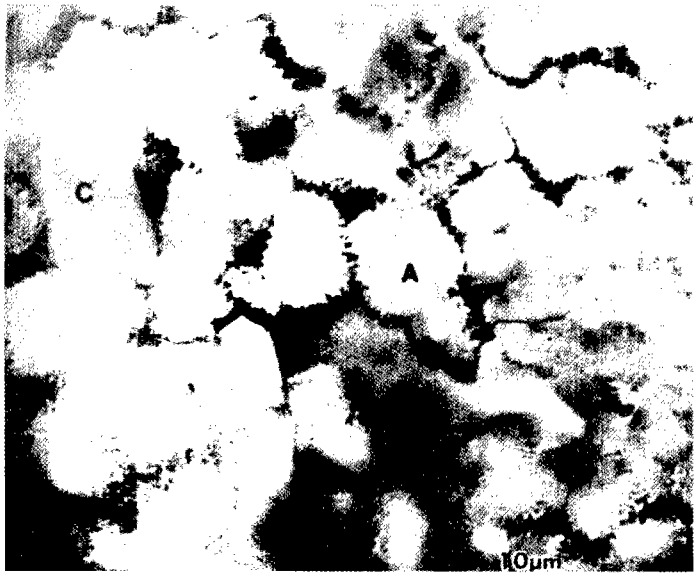
組　成	備　註　（ＳＥＭ外觀）
C－S－H膠體	包括微孔（＜26 Å 直徑），刺球狀至不可解晰物
毛細管孔	中孔及巨孔，黑色孔泡
氫氧化鈣(CH)	結晶物質，無孔層理片狀
鋁酸鈣水化物	細長六角晶狀之鈣矾石（Ettringite），六角薄板至不規則玫瑰狀之單硫型鋁酸鈣水化物
未水化核心	無晶相

鈣、鈣鋁水化物及未水化之核心，見表二〔7〕。圖五顯示爲水化1天之卜特蘭水泥水泥漿SEM顯微圖片，圖上明顯可看出六角棒狀的鈣矾石（Ettringite, $C_3A;3C\bar{S};32H$）—刺球狀之C－S－H膠體（gel）和黑色孔洞之孔隙部份。圖六可看出刺球包裹之未水化核心（Anhydrous Core），C－S－H刺球及孔隙。水化十天，仍可觀查出C－S－H之刺球，氫氧化鈣大量形成，核心隨之減少，見圖七；對於成熟的水泥漿體，基本上已無法區分出C－S－H膠體，除非磨平並加以浸水侵蝕處理，不過CH則隨處可見，見圖八。圖九及圖十分別顯示由CH面裂開之CH晶相和玫瑰花狀之六角形鋁酸鈣水化物。

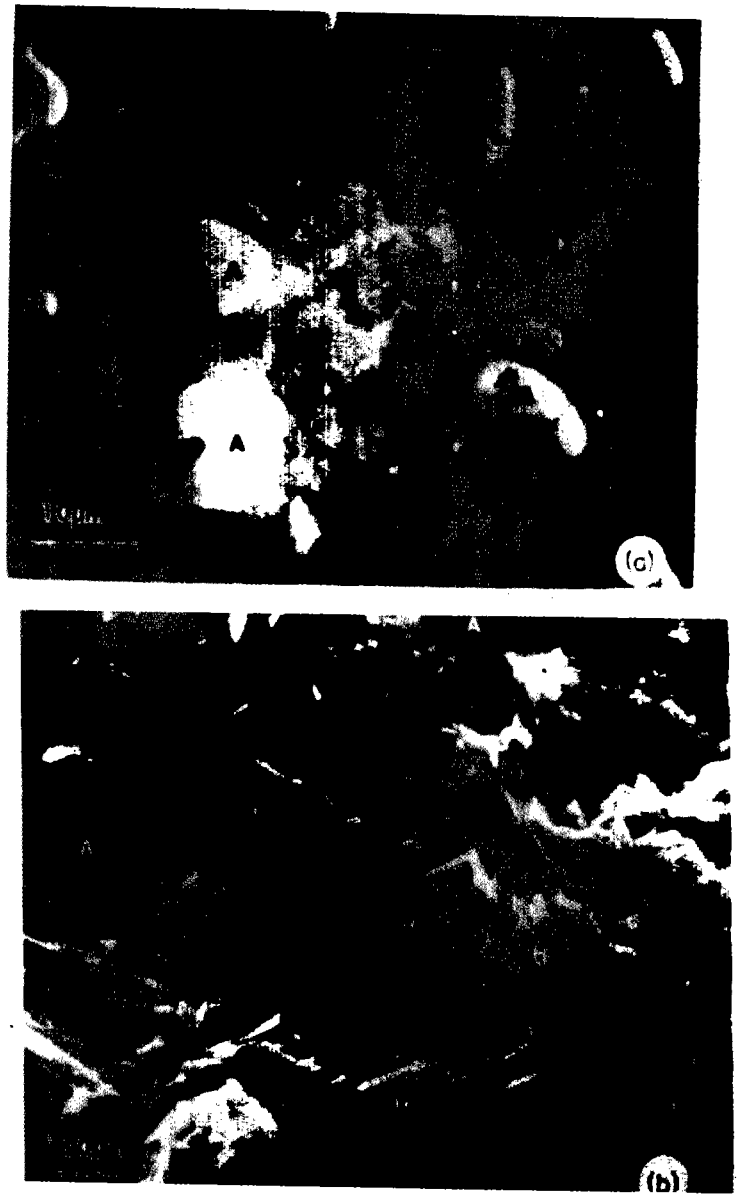


圖五　水化1天之卜特蘭水泥漿體之SEM微觀圖片〔7〕

圖六　部份水化矽酸三鈣之ＳＥＭ微觀圖片，顯示包裹未水化核心之Ｃ－Ｓ－Ｈ膠體〔７〕



圖七　水化10天之矽酸三鈣ＳＥＭ微觀圖片，顯示氫氧化鈣結晶體（Ｃ）填充孔隙空間及未水化核心（Ａ）在水化物（刺球狀）之中心〔７〕。



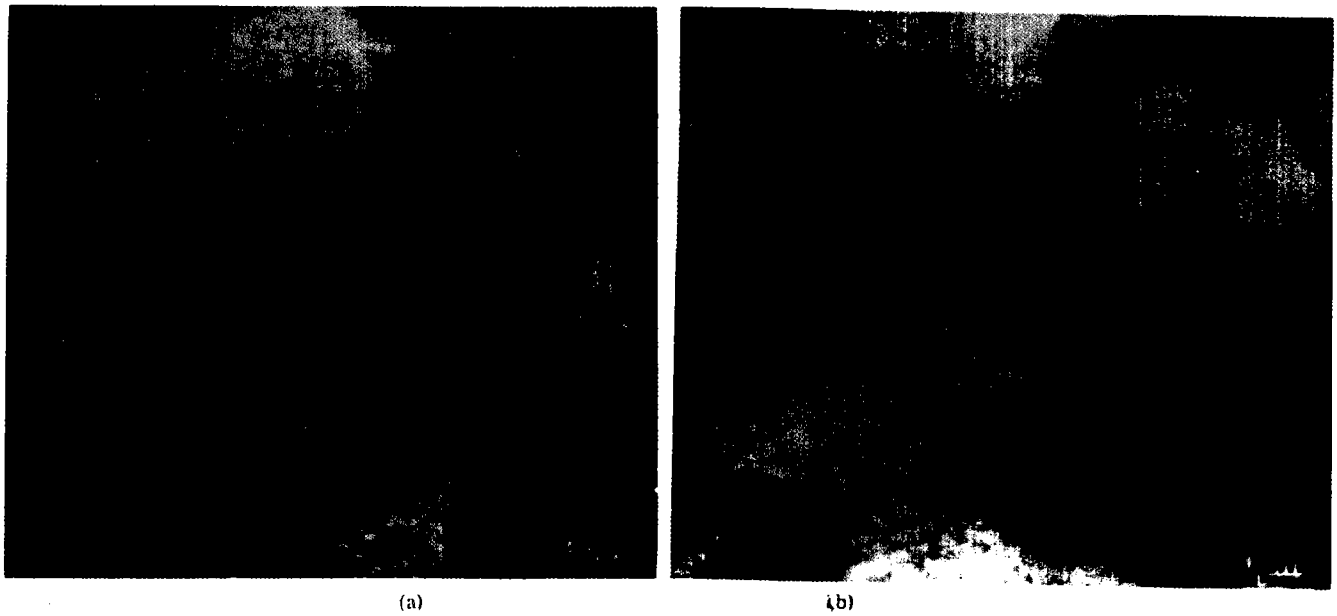
圖八　(1)磨光且浸蝕的矽酸三鈣水化物顯示未水化核心(A)深植在水化物母體中。深灰色者爲 C－S－H(G)淡灰色者爲氫氧化鈣(H)(2)未磨光的折裂矽酸三鈣水化物亦可看出未水化核心(A)和氫氧化鈣(H)〔7〕

圖九　水化的矽酸三鈣水化物沿氫氧化鈣節理拆裂面之ＳＥＭ微觀圖〔７〕

圖十　水泥漿體在 $CaSO_4$ 溶液中產生六角形鋁酸鈣水化物〔７〕

2.有害物質侵入混凝土之產物

混凝土內含有氯化物，將造成C－S－H的多孔洞網狀外觀，見圖十一〔6〕，而外界氯化物可能與鋁酸三鈣（C_3A）形成六角板狀的鈣氯鋁化物（Calcium Chloroaluminate，$C_3A\ CaCl_2\ 10H_2O$），但此並不常見，因爲在混凝土內的量太少了，見圖十二〔8〕。



(a) (b)

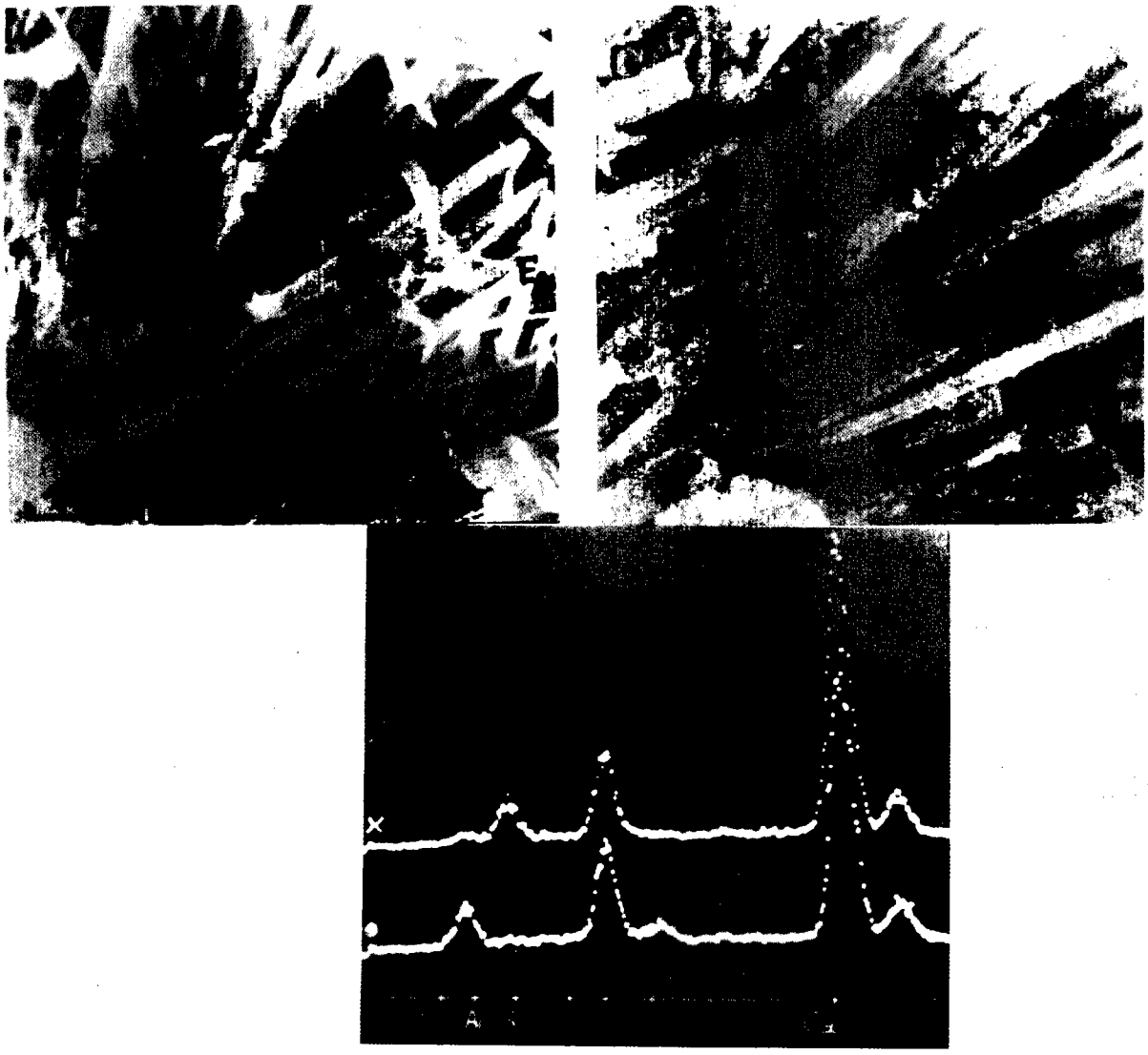
圖十一 (1)水化3天(2)含有$CaCl_2$之矽酸三鈣水化物

C－S－H之外觀〔6〕

圖十二　(X)顯示爲鈣氯鋁化物之六角板狀晶體及網狀

C－S－H（含 Cl^-）外形〔 8 〕

硫酸塩類的侵蝕，將造成膨脹性的鈣矾石，其結晶爲六角柱狀體，倘若遇到活性大的二氧化碳和矽化物，則鈣矾石會轉變成纖維狀的 Thaumasite（$C\overline{C}\cdot C\overline{S}\cdot CS\cdot 15H$），一般目測無法分辨這種海域環境下的產物，必須借助ＥＤＸ來偵測，見圖十三〔 8 〕。硫酸塩的侵蝕通常須透過氫氧化鈣的溶解及二次石膏的形成，如此才可能進一步與 C_3A 組合成局部破壞性之鈣矾石，見圖十四〔 8 〕。



圖十三　由惡化的海堤試體內之鈣矾石(O)和Thaumasite (X)，以能量消散（ＥＤＸ）Ｘ光分析所得之結果如左圖，鈣矾石(O)含Al，S，Ca，而thaumasite含Si，S，Ca〔８〕

圖十四　(1)氫氧化鈣的溶解和(2)二次石膏的形成（小短柱狀體）〔８〕

海水侵蝕作用下，Mg^{++} 離子將組成Aragonite而堆積在方解石（Calcite）之附近，當然富Mg的$Mg(OH)_2$（Brucite）亦會在如海膽　出的Aragonite附近形成，見圖十五〔9〕。詳細Brucite的結晶可由圖十六看出〔9〕。

3. 鋼筋的腐蝕產物

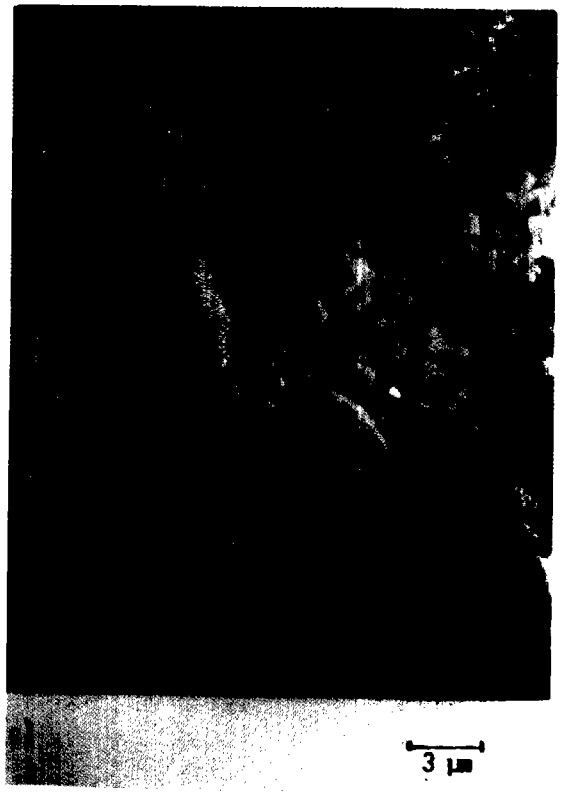
鋼筋在混凝土澆置前可能會有製造時的高溫氧化物Wustite，FeO，但在混凝土中此種氧化鐵層太薄而甚難查覺。一般常見的鐵銹有Hematite，Fe_2O_3，及$Fe(OH)_3$等，這種產物很容易與混凝土中水泥水化產物及其它有害物質分辨出來。圖十七爲腐蝕的一種產物（圓形粒子）〔3〕。腐蝕發生之初期，靠近金屬周遭混凝土水泥漿之外觀晶相會相應改變，此可用來分辨出腐蝕與否的依據。

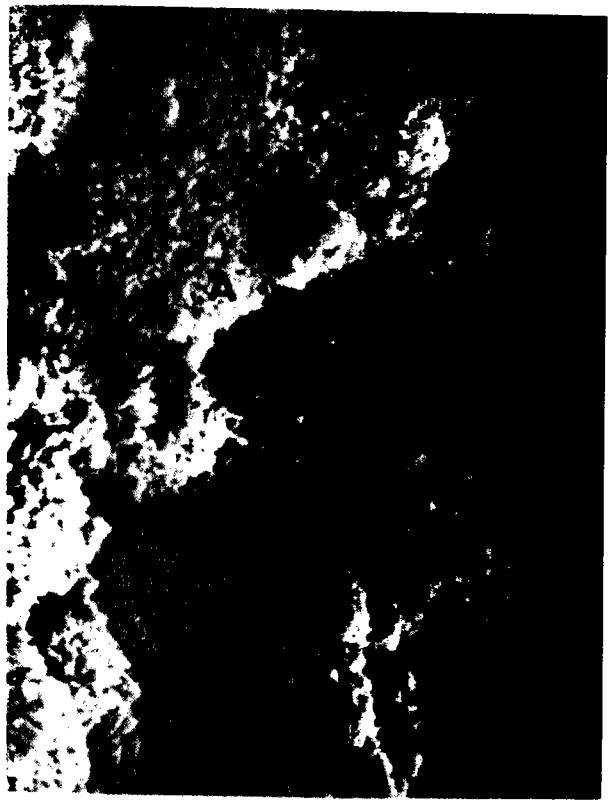
㈡觀測試體的準備作業

鋼筋混凝土腐蝕的認識與晶相的瞭解，有助於防蝕研究工作，且在防蝕技術上可達到防患未然或適時處理的效果，但是取樣工作的正確性與代表性將影響到分析與判斷的可靠性及公正性。因爲ＳＥＭ所觀測的僅是微米（μ）秩的範圍，若取樣代表性不足或試樣受到環境的污染，則在如此細微的觀測點下將造成嚴重的錯誤結果，當然其分析結果亦是不正確的，因此試體的取樣及準備作業是相當重要的。

1. 試體的取樣

依所需瞭解的目的，譬如鋼筋腐蝕原因之研判，則必須先以鑽心取樣，然後沿表皮至鋼筋表面分別採取至少10 g的試體。若只判斷鋼筋腐蝕產物，則只要在鋼筋表皮附近取鐵屑之樣本即可。





圖十五　碳化產物(1)水中養護在水面上形成的方解石及 Aragonite (2)置於海水中二天(3)七天(d) 14 天後海膽放射狀的 Aragonite 分佈於 Brucite 層面上 A－Aragonite，B－Brucite，C－Calcite〔9〕

圖十六　Brucite 層的結晶(1)暴露海水中二天(2)十四天〔 9 〕

2 試樣的處理

由於混凝土爲水化產物，取出的樣本內仍然有部份的水，同時混凝土之水泥漿體爲多孔脆性之材料，在眞空除出水份之時將會因毛細管作用而產生內外不均勻之收縮，此將造成乾裂現象，若不予以克服，則將誤判爲鋼筋混凝土之腐蝕係由於裂縫所造成。通常試體處理的方式有如生物學ＳＥＭ微觀觀測的處理一般，先將試體浸泡入低濃度之甲醇（Methanol）內，然後依序改換高濃度之甲醇，當水份完全被甲醇取代後，即可進行眞空抽氣，將甲醇抽盡。爲了避免試體的碎粒粉末污染試體，通常觀察面爲新劈裂面，因此須借助刀片將試體劈開。接着可以貼至試體釘座上（Stud），四周塗佈避免過度荷電（Charge）造成影像干擾的石墨塗漆或銀漆。然後鍍上一層數Å金膜，此刻即可放入ＳＥＭ內觀測。

㈢ＳＥＭ的觀察

在ＳＥＭ銀幕或ＣＲＴ上，小小的試體可能花上半天的時間才獲得數張觀察影像，有時甚至無法分辨出是何晶相，此刻必須借助前面所談及之晶相，或利用ＥＤＸ／ＷＤＸ來輔助分析觀測物之解釋，必要時需要以純礦物來做判斷之引導，如此才可能對鋼筋腐蝕研究有所助益。

五結論

掃瞄電子顯微鏡（ＳＥＭ）應用在鋼筋混凝土防蝕研究上，在本島尚未廣被使用，但由於ＳＥＭ可提供研究者“眼見爲憑”的直接證據，相信未來在台灣科技研究上將佔有重要之席位。

應用ＳＥＭ於ＲＣ防蝕技術，先須瞭解可能造成腐蝕的機理，產物的晶相，再加上正確的採樣及試樣之處理，如此才可獲得代表性之數據圖片，使判斷合理正確，提高研判分析結果之可信度。

參 考 文 獻

1. White,E.W.,and Roy,R.,"Application of the SEM to Ceramic Studies",Scanning Electron Microscopy ,IIT Research Institute,Chicago,pp.89～94(1968).
2. Postek,M.T.,Howard,K.S.,Johnson,A.H.,and Mc michael ,K.L.,Scanning Electrron Microscopy－A Student's Handbook,Ladd Research Industries,Inc.(1980).
3. Lloyd,J.P.,and Heidersbach,"Use of the Scanning Electron Microscope to Study Cracking and Corrosion in Concrete",Concrete International,pp.45－50, ACI(1985).
4. Verbeck,G.J.,"Mechanisms of Corrosion of Steel in Concrete",in Corrosion of Metals in Concrete,ACI sp－49,pp.21－38(1975).
5. 黃兆龍，" 混凝土破裂原因分析及診治建議 "，混凝土工程技術研討會，頁x1－1～34，台灣營建研究中心，台北(1985).
6. Mindess,S.,and Young,J.F.,Concrete,Prentice－Hall,N.J.(1981).
7. Young,J.F.,"The Microstructure of Hardened Portland Cement Paste",Chapter 1,Creep and Shrinkage in Concrete Structures,Edited by Bazant,Z.P.,and

Wittmann,F.H.,John Wiley and Sons(1982).

8. Regourd,M,"Physico-Chmical Studies of Cement Pastes,Mortars,and Concretes Exposed to Sea Water",in Performance of Concrete in Marine Environment,ACI sp-65,ACI,pp.63-82(1980).

9. Conjeaud,M.L.,"Mechanism of Sea Water Attack on Cement Mortar",in Performance of Concrete in Marine Environment,ACI SD-65,ACI,pp.39-61.(1980).

港灣鋼筋混凝土結構物防蝕技術研討會

Seminar on Corrosion Protection Technology of Marine Reinforced Concrete Structures

電腦輔助海洋用鋼材結構物之陰極防蝕設計

主講人：吳覺宇

台灣省交通處港灣技術研究所主辦
中華民國七十四年八月

電腦輔助海洋用鋼材結構物之陰極防蝕設計

吳覺宇先生主講

摘要：

在海洋用鋼材結構物之陰極防蝕設計中，在過去犧牲陽極式的陰極防蝕需要設計，大抵都僅是利用平均保護電流密度的方法乘上被保護物的表面積，再將得到的陽極重量分配到各個小面積中，但是由電化學反應的基本考慮中電流效率及使用年限並不如此單純，這些性質主要受陽極與陰極之面積比，電化學反應中的極化阻抗以及海水流動中的IR降等因素的影響，因此陽極在逐漸消耗中面積率的改變以及陽極對保護電流密度在陰極表面上的重新分配都隨著使用時間作改變。本文即針對這個設計上的觀念，利用腐蝕反應中的電化學性質作電腦模式來預測出在各種不同的使用條件下，陰極防蝕的效率確定與使用年限之逐步關係。

ABSTRACT:

A study of the computer assistant cathodic protection design method in submarinc application had been done by finite element computer model. In this model the factors of area ratio between sacrificial anode and cathode; the polarization behavior and the IR drop during electrochemical reaction had been considered to calculated the chang of current density distribution during using period to confirm its protective efficiency. It show that there are very good corelation between the computer model and the real application experience. The optimum design of the anode size and location will improve the protective efficiency and saving the costs.

一、前言：

對於鋼鐵結構物在海水中的嚴重腐蝕問題，一般來講可以利用防蝕膠帶或陰極防蝕的方法來達到防蝕的目的，陰極防蝕的實施通常是比較有效的方法並且施工方面也比較簡單。

陰極防蝕一般分爲兩種，一種爲强迫電流法（ impress current ），另一種是犧牲陽極法。而對付碼頭鋼板樁的陰極防蝕中由於電源的取得較爲困難，同時由於其海水之導電度變化很小，因此原則上大都是利用犧牲陽極式的陰極防蝕方法。

利用犧牲陽極式的陰極防蝕法一般考慮的因素有(A)犧牲陽極的電流效率（ current efficiency ），(B)陰極被保護物之電流密度及電位之分佈，(C)現場測試以及試片安排，分析工作。本報告即針對 Al-Zn-In 系列犧牲陽極系統之電流特性，利用有限元素（ finite element ）電腦模式，來模擬並測試（ Monitoring ）實驗室之電位、電流密度分佈作一個整體性的說明。

關於犧牲陽極的特性以及電流效率等參數的研究與討論，筆者在過去的報告中 " The study of the current efficiency of Al-Zn-In sacrificial anode " 在第三屆亞太腐蝕會議中已經報告過了[1]，因此本報告中將主要以利用有限元素（ finite element method ）法的電腦模式來模擬犧牲陽極在海水中對鋼板樁之電位以及電流密度分佈的情形，應同時將犧牲陽極在防蝕反應進行過程中之陽極漸減過程中之各個參數（ parameter ）之變異情形，以確保在設計使用年限以內能夠有效的達到全面安全的防蝕效果。

二陰極防蝕利用有限元素法研究之源由：

在腐蝕之電化學反應過程中，乃至於在陰極防蝕作用的過程中，電化學反應的極化現象（ polarization behaviors ）以及歐姆電阻效應（ IR drop ），混合電位分佈理論（ Mixed Potential Theory ）是主要影響反應速率以及電位，電流密度分佈的重要參數。除此以外在整個反應過程中之陽極體之表面積與陰極體之表面積比，電解質的濃度（在本報告中爲海水）、含氧量、電解質的比導電度（ spec conductivity ）以及各電極在電化學反應過程中之極化電阻之變異（ polarization resistance ）也是重要考慮的因素，因此過去之利用面積乘以保護電流密度之簡單設計方法，無法再適用於不同的海域、溫度、海生物附著以及不同的海水污染程度，因之利用有限元素法來計算一個完整的陰極與陽極關係以及陰極面之電位、電流密度的分佈，藉著電腦之前進發展，成爲更精確，更有效的控制方法。

有限元素的設計方法肇始於 1967 的 Weber et.al[2,3,4]，其利用一維如何坐標來計算電位以及電流分佈情形，Mccafferty 進而利用簡單的二維幾何形狀以及固定的材質性質（ const. material properties ）與界限條件（ boundary condition ）來解電流在系統中傳遞的 Laplace 方程式。但是這些假設在固定材質性質的先決條件下在實際使用中並不能有效的符合實際使用之變異性，尤其是電化學反應中的電位一電流密度之關係爲非線性型的（ non-linear ）。

進一步 Frye[5]及 Kasper 引進利用 electricity 以及 electromagnetic

field 以及熱傳（ heat transfer ）之有限元素法模式（ NASTRA ），將其模式利用到電化學問題的解決。

在利用 finite element Method 來研究電化學反應中電位及電流密度分佈中 Brauer, Decarlo, Forrest 以及 John Fu （傅，美西區公司），Bicicdri 利用在研究線性（ liner 以非線性分佈上之極化現象變異。Doig 及 Flewitt 則利用有限元素之研究用在二種電極藕合後（ galvanic coupling）之二維坐標電位分佈。但在其電極的條件是爲線性的，Strommer 以及 Rad land 再度引用有限差異（ finite difference ）來研究海洋鋼構物之陰極防蝕問題，但這時的界限條件的設計是固定型式的，陽極電位都不變動，這些條件僅適用於强迫電流式的陰極防蝕（因此陽極可以源源不斷的供應電流）。

爲提高有限元素在陰極防蝕在犧牲陽極式中的更大的適用性，本研究以陽極以及陰極之非線性特性極化曲線以及可變異的界限條件來應用在犧牲陽極式之陰極防蝕工程設計上。

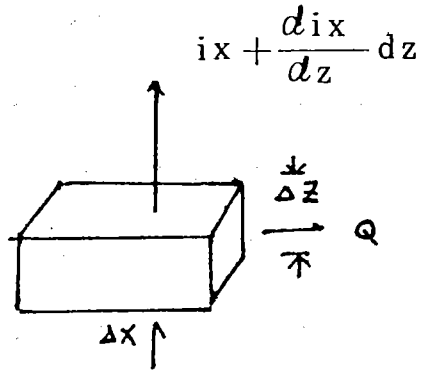
三、電位、電流密度的 fourier eq.分佈特性：

在導電性的介質中，電通量（ electrical conduction ）的特性可以簡單表示爲：

$$Qc = -\sigma A \left(\frac{d\phi}{dx}\right) \Delta t \cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

其中 Qc ：爲電荷在界限上的轉移量

σ ：爲均勻導電介質的比導電率



A ：爲界限的面積

ϕ ：電化學電位

t ：流通時間

x ： dimension

所以在有限的元素（ element ）中點電位的差異爲

$$\triangle \phi x = \frac{d\phi}{dx}(\tfrac{1}{2}\triangle x) \cdots\cdots\cdots\cdots (2)$$

而左右兩邊的電位可以分別爲：

$$\phi_L = \phi - \tfrac{1}{2}\frac{d\phi}{dx}\triangle x \cdots\cdots\cdots\cdots (3)$$

$$\phi_R = \phi + \tfrac{1}{2}\frac{\alpha\phi}{\alpha x}\triangle x \cdots\cdots\cdots\cdots (4)$$

由 ohnic law ：

$$I = \phi / R \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (5)$$

$$I = \frac{\triangle q}{\triangle t} = -\sigma\frac{d\phi}{dx}（在 x 方向上）\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (6)$$

由左側之電通量：

$$\triangle Q_L = -\sigma A\frac{d}{dx}(\phi L)\triangle t \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (7)$$

代入(4)式得到左側電通電：

$$\triangle Q_L = -\sigma\triangle y\triangle z\frac{d}{dx}(\phi - \tfrac{1}{2}\frac{d\phi}{dx}\triangle x)\triangle t \cdots\cdots\cdots (8)$$

同樣可以得到右邊：

$$\triangle Q_R = -\sigma\triangle y\triangle z\frac{d}{dx}(\phi + \tfrac{1}{2}\frac{d\phi}{dx}\triangle x)\triangle t \cdots\cdots\cdots (9)$$

則在每一個 unit cell 進出的淨電通量爲：

$$\triangle Q_{net} = \triangle Q_L - \triangle Q_R$$

$$= -\sigma \triangle y \triangle z \left[\frac{d}{dx} \left(\phi - \frac{1}{2} \frac{d\phi}{dx} \triangle x \right) - \frac{d}{dx} \left(\phi + \frac{1}{2} \frac{d\phi}{dx} \right) \triangle t \right]$$

$$= \sigma \triangle y \triangle z \frac{d^2\phi}{dx^2} \triangle x \triangle t \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (10)$$

由(10)引伸到 x,y,z 三個方向上

電通量在△x△y△z 的 unit element 之淨留量爲

$$\triangle Q_{net} = \sigma \left[\frac{d^2\phi}{dx^2} + \frac{d^2\phi}{dy^2} + \frac{d^2\phi}{dz^2} \right] \triangle x \triangle y \triangle z \triangle t \cdots\cdots (11)$$

代入其電容（ copacity ）的關係式：

$$\triangle Q_{net} = \rho c \triangle x \triangle y \triangle z \triangle \phi \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (12)$$

由(11)、(12)式

$$\triangle Q_{net} = \sigma \left(\frac{d^2\phi}{dx^2} + \frac{d^2\phi}{dy^2} + \frac{d^2\phi}{dz^2} \right) \triangle t = \rho c \triangle \phi \quad \cdots (13)$$

當△t → 0 時由微分得

$$\frac{\sigma}{\rho c} \triangle^2 \phi = \frac{d\phi}{dt} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (14)$$

在有陽極（ source ）以及陰極（ sink ）時，一個穩定狀態下，尤其在設計陰極防蝕的電化學反應中，除了在陽極或陰極表面上之電氣雙重層（ double layer ）以外，其反應電位並不隨時間而變動，因此其一般條件可設訂爲

$$\frac{d\phi}{dt} = 0 \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (15)$$

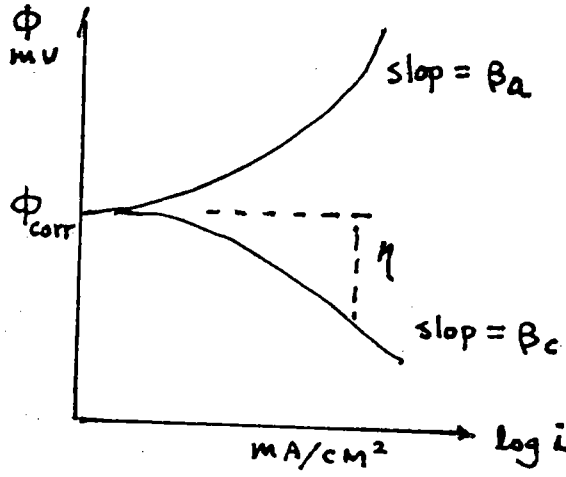
因此得到電位及電流密度之 Laplace eq 特性

$$\nabla^2 \phi = 0 \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (16)$$

由此可知，利用 finite element 方法來作陽極與陰極間之電位，電流密度之分佈實有賴於 Laplace eq.的解釋了。

四電化學之極化特性（ plarization behavior ）

一般來講電極的電化學反應中，其電位（ ϕ ）與電流密度（ i ）間之關係可以由半對數圖（ semi-log ）來表示爲如圖所示：



由 Tafel Slop 的定義

Ancdic： $\beta a = -\dfrac{\Delta\phi}{\Delta \ell og i}$ ……(17)

Cothodic： $\beta c = -\dfrac{\Delta\phi}{\Delta \ell og i}$ ……(18)

其性質主要爲電極之材質以及腐蝕電化學環境的函數。

在電極表面反應時之 Butler － volmer 關係式，對一個過電位（ over － potental ） η ：

可以得到其交換電流密度（ exchange current ）之關係

$$i = io\{\exp(\beta\cdot\eta\cdot F/RT) - \exp[(1-\beta)\cdot\eta\cdot F/RT]\} \cdots (19)$$

，其中 R ： Bcltzman's const ， F ： Faraday const

T ： Absoult temperature(°K)

β ： Tafel slop

η ： over － potential

io ： Corrosion exchange current

因此其電流淨值（ i_{net} ）爲：

$$i_{net} = ia - ic$$

$$= io[\exp_{10}(\ell og\ \eta/\beta a) - \exp_{10}[\ell og - \eta/\beta c)] \cdots (20)$$

用 Taylor 級數展開後

$$i_{net} = io\frac{(\beta a - \beta c)}{\beta a\cdot\beta c}\cdot\ell og\ \eta\cdot 2.3 \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (21)$$

定義極化阻抗（ pdarization resistance ）Rp 爲

$$Rp = \frac{\eta}{i\,net} = \beta a \cdot \beta c / (\beta a - \beta c)\, io \cdot 2.3 \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (22)$$

這個 Rp 在陰極防蝕反應中，取陽極（鋁合金）之極化特性定義爲：R_P^A ，取陰極（鋼板樁）之極化特性曲線中定義爲：R_P^C ，以作爲防蝕設計之表面阻抗之修正式依據。

七、本研究中之有限元素模式上之幾個討論現實：

(A) 影響電位及電流密度的因素：

在海水系統中由於其海水溶液中的比電解　在一定的區域內都相近值，因此在研究陰極防蝕之電位以及電流密度分佈的影響因素（ factor ）僅討論其(A)海水之比電阻或比導電度（ spec conductivity）；犧牲陽極之極化阻抗（R_P^A 項）以及陰極的極化阻抗（R_P^C 項）之相互影響比較值。

R_P^A 以 R_P^C 在第四節已經討論過了，由於海水比電阻項（ IR drop ）隨陽極與陰極點之各個距離不同而改變，因此由陽極投射到陰極各距離點上的電流密度值也不會相同，因此在電位－電流密度之半對數關係圖上所 pick 出來的 R_P^A 以及 R_P^C 也會因 IR drop 隨距離之變化而有所不同。同樣在陽極表面與陰極表面也因混合電位理論的影響，因此在犧牲陽極的陰極防蝕之系統中電位、電流密度以及 IR drop ，R_P^A，R_P^C 等各項值均會受到各材質之性質以及設計保護範圍之面積比之嚴重影響，在有限元素法之計算中，只有透過反覆的修正各個點之 R_P^A ，R_P^C 等值來更進一步提高本模式的適用性。

(B)本研究之有限元素各元素之相關性如圖（如下頁附圖）。

(C)本研究模式之界限條件：

1. 由於 axisymmetry 關係

$$\left.\frac{d\phi}{dr}\right|_{r=0} = 0 \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (23)$$

2. 由於 no current flows out of solution surfuce

$$\left.\frac{dp}{dz}\right|_{z=0} = 0 \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (24)$$

3. 由於在假設之 insulating wall

$$P(x,y)|_{c} = \phi_{Fe} = \text{const} \cdots\cdots\cdots\cdots (25)$$

$$\left.\frac{dp}{dr}\right|_{z=c} = 0 \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (26)$$

4. $R_P^A = P - E_A / I \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (27)$

$$R_P^C = P - E_C / I \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (28)$$

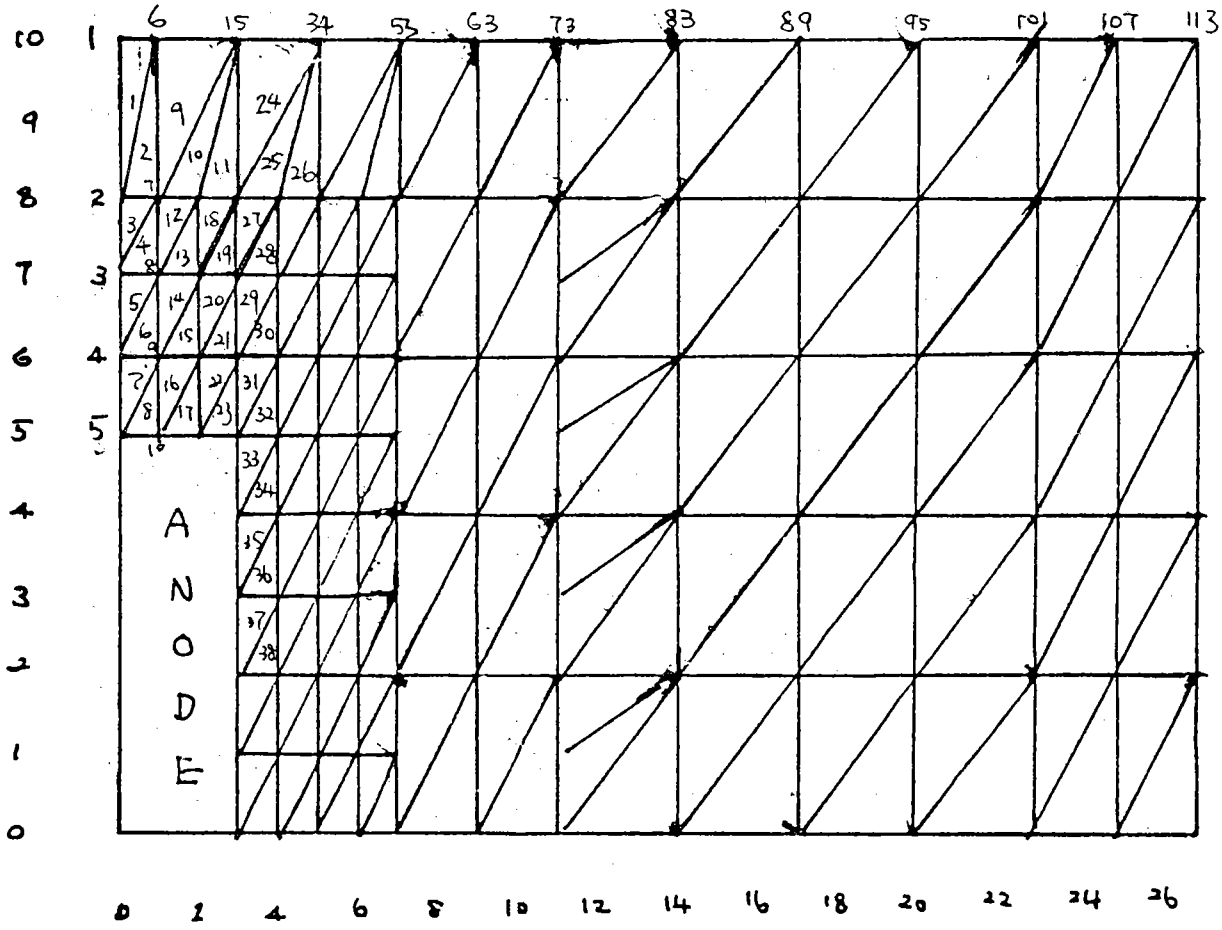
5. $\phi(x,y)|_{d=0} = \phi_{Al}$

$$\phi(x,y)|_{d=c} = \phi_{Fe} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (29)$$

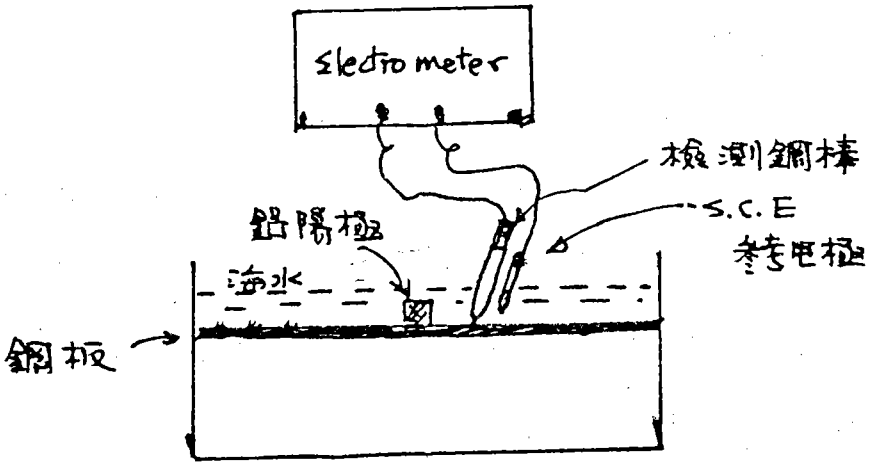
六、實驗室犧牲陽極比較鋼板電位分佈之測量：

本研究中所使用之犧牲陽極對鋼板電位之分佈測量、設備如下圖所示。

利用鋼鐵棒尖端（其餘部分以 Teflon隔絕），及使用飽和甘和電極（S.C.E）作參考電極以及高阻抗（high intenal Impedance）電位計（electrometer）來測量其電位分佈圖作成等電位曲線，然後在方眼紙上依照其坐標劃出，以此結果再與有限元素法之結果作比較。



NODE OF FINITE ELEMENT MODEL.

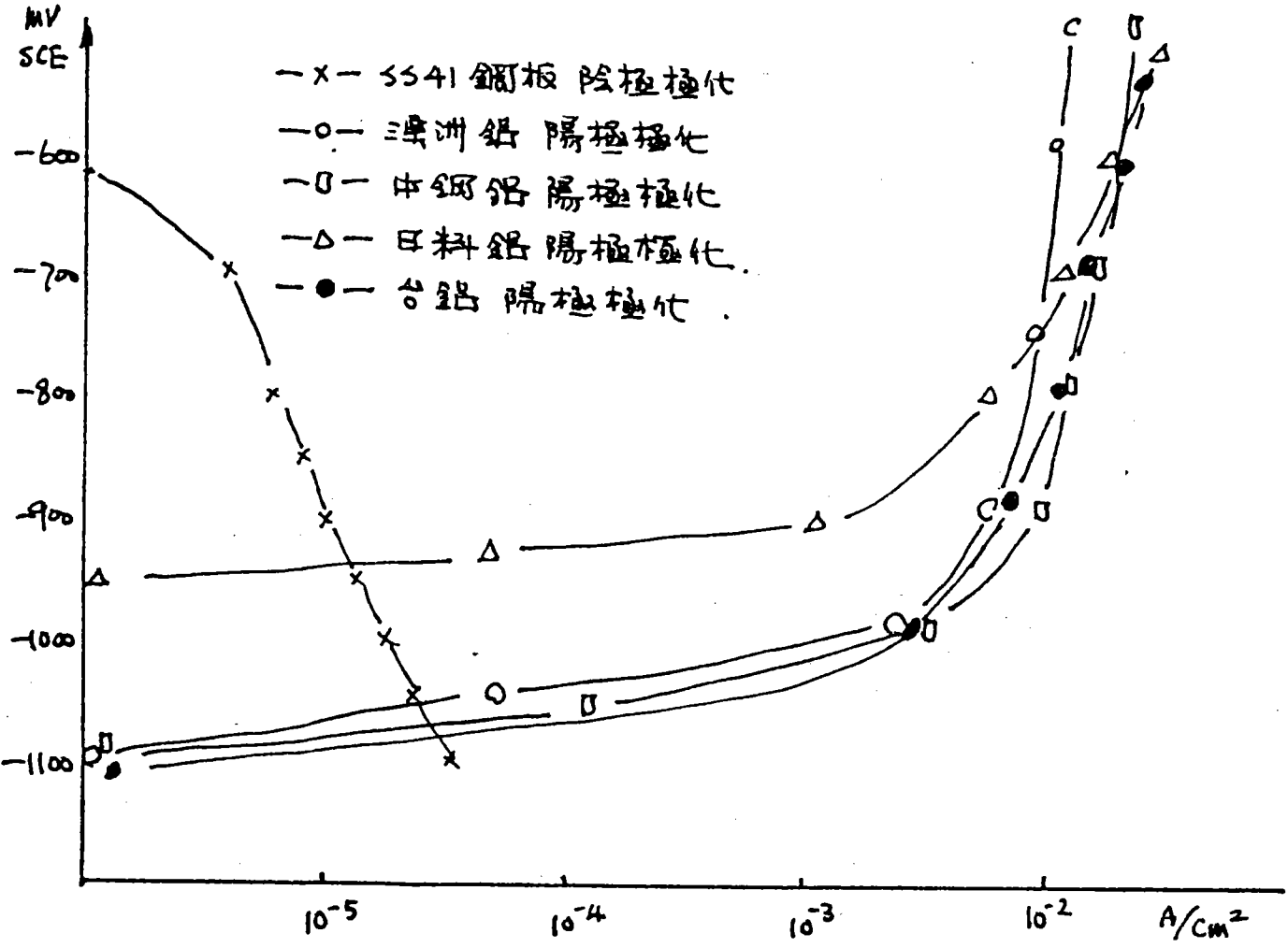


SIDE VIEW

六、本研究各種電極之極化特性：

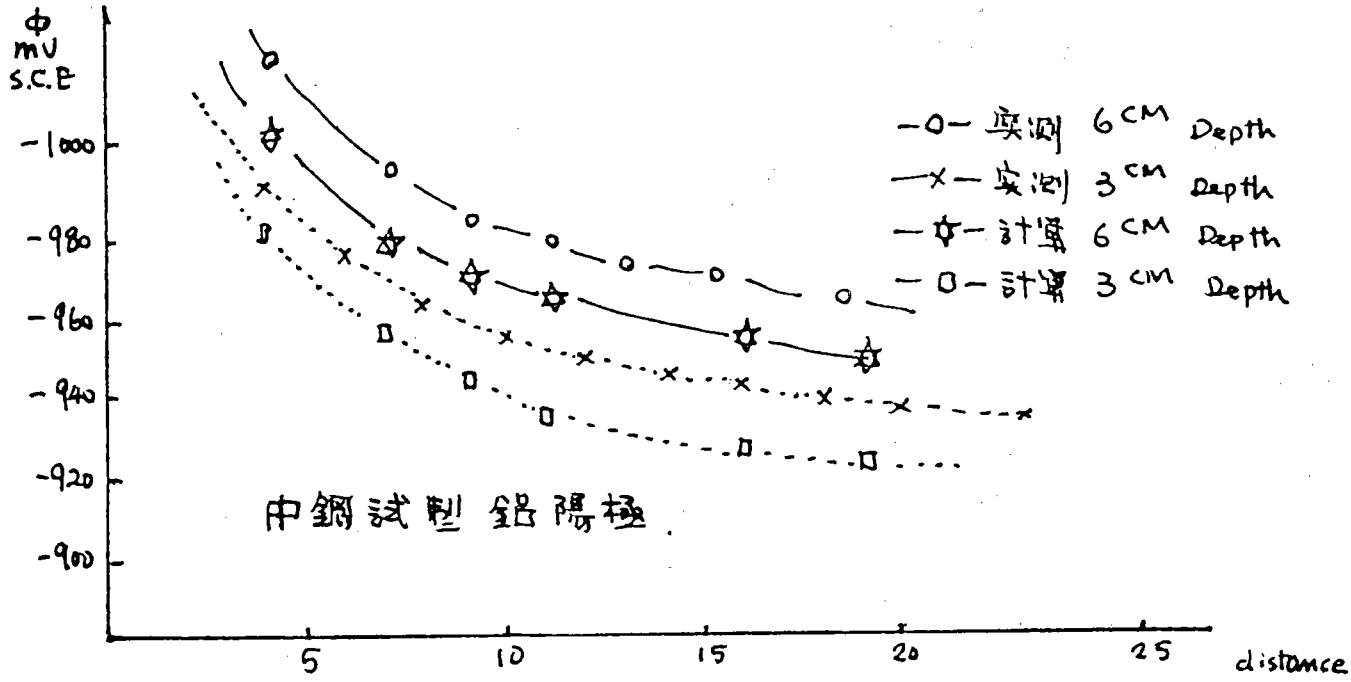
本研究中所使用之各種電極共有SS-41鋼板作陰極板，而犧牲陽極則分別有中鋼自行試製（A型）、台鋁型（B型）、日本製作（C型）以及澳洲料型（D型）。

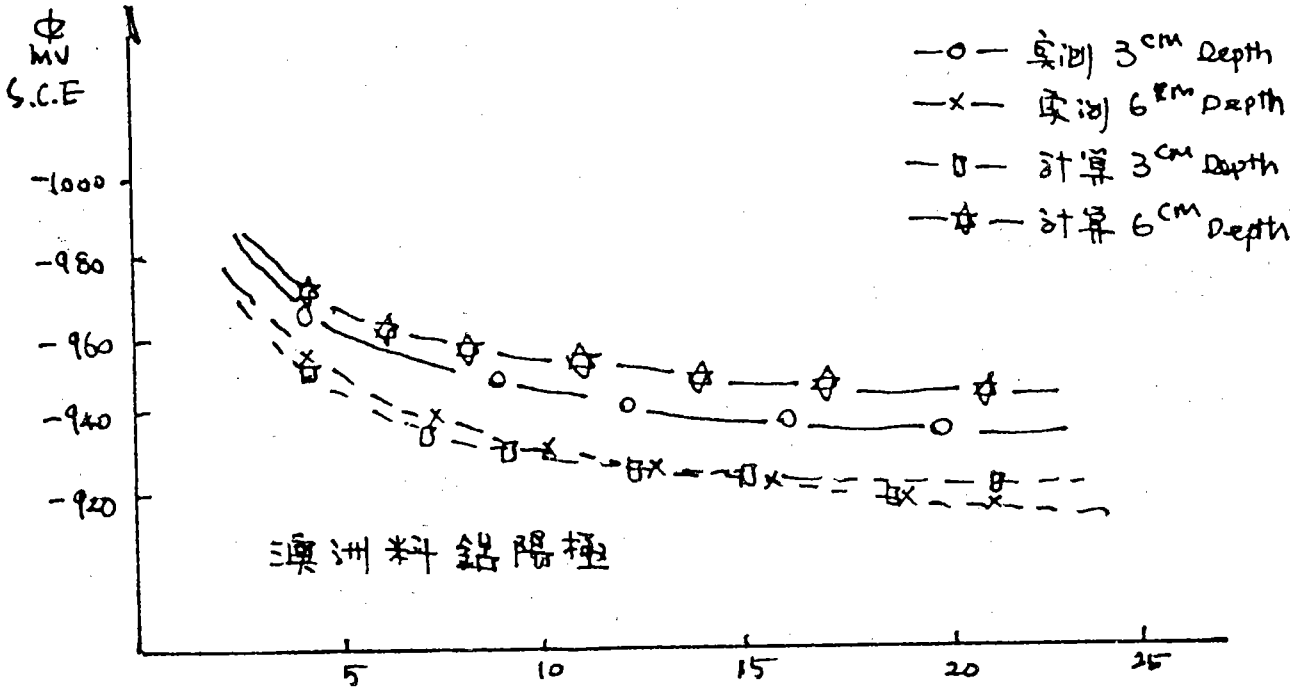
本試驗完全應用恒電位法（potentiostat Technigue），在每一個電位上停留半小時以上以俟其反應近乎完全穩定後（電流不變動等）記錄其電位與電流電度之對數關係圖如下圖：



六、有限元素法之電位分佈與實驗室1/20 scale down 結果之比較

有限元素法所計算出來之電位分佈與實驗室1/20 scale down 下來之結果比較分別如下列二個圖。





十、現場 scale up 之比較

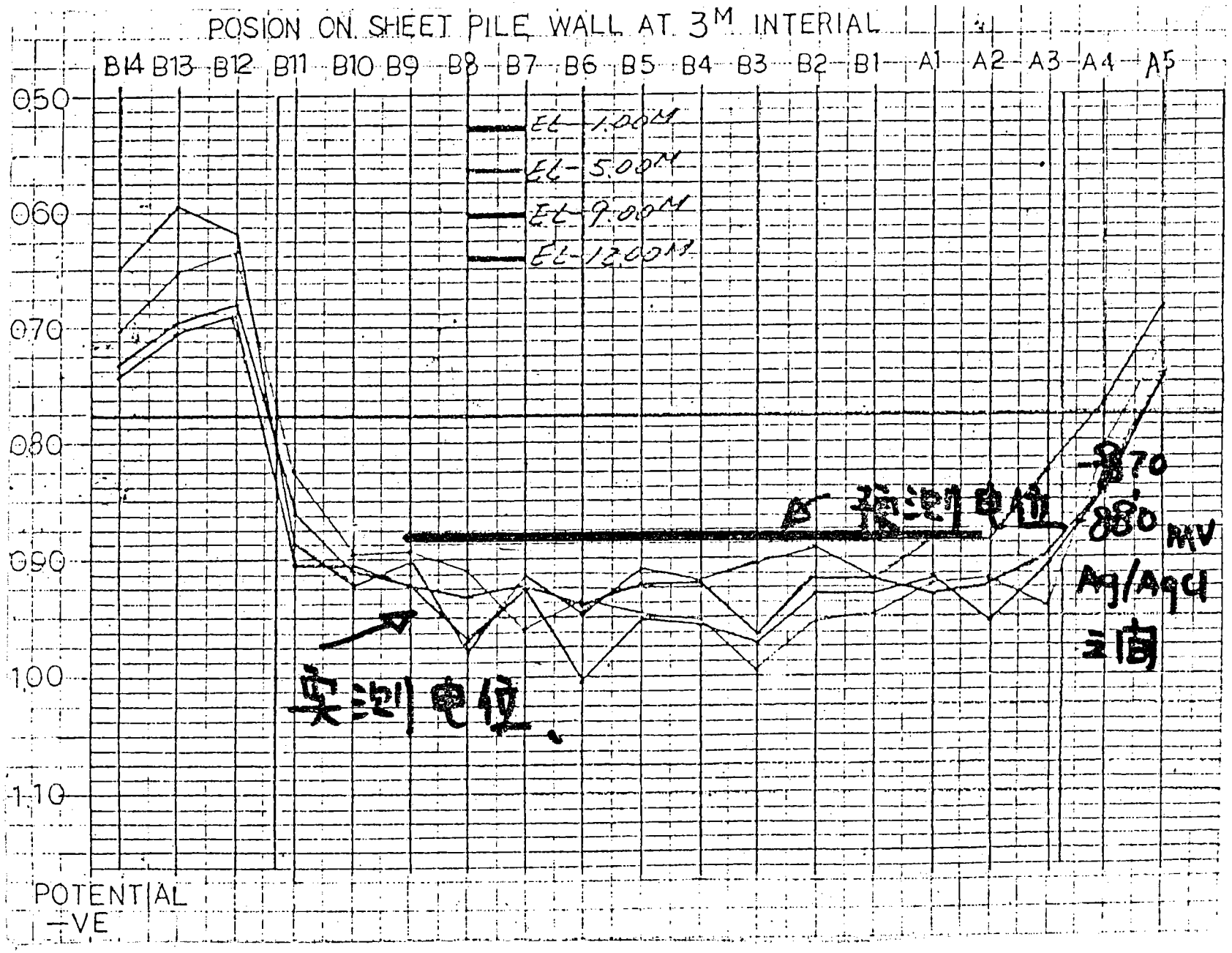
本小組在碼頭彎角處裝置一塊 130 cm 直徑之“八角型”鋼板（由於加工不便，僅能製作用八卦形之八角型鋼板）在中央點裝置不同 size的鋁陽極，在一週以上的時間後使電位到達穩定後，利用 sat、的 Hg_2Cl_2／KCl 之 S.C.E 參考電極測量，測得其各分佈點之電位分別在每 13cm測一點，其電位介在 -743 ～ -749 mv（S.C.E）之間，而利用 computer model 作的結果如下頁，其預測範圍在 -741 ～ -766mv（S.C.E）之間其誤差率約爲 2 至 17mv 。

十一、比較 A.B 碼頭之設計結果

由模擬澳洲料 在中鋼 A.B碼頭轉角處之犧牲陽極陰極防蝕之結果，由有限元素法計算結果與實測結果之比較，有限元素法由 2 支 Anode 來 Super composition 其 average potential 可控制在 -870－880mv（Ag／AgCl in sea water）之間，而實測則在 -920mv（Ag／AgCl in sea water）之間，這項誤差值可由 2 支以上的 Anode 來 super position 時可以修正。

因此本有限元素法可適用於海水下鋼板樁之陰極防蝕預測。

其使用年限計算結果與澳洲料預測之結果差異（原設計爲20年，已有限元素法則僅爲 11.4 年，主要原因可能澳洲料在設計時僅利用均勻電流密度而忽略了其保護電流之各點不均勻性。在過去的經驗中，國內也有曾有過工程在不及保護年限之一半已經 under-protection 了，這個問題將在進一步工作澄清。


POSION ON SHEET PILE WALL AT 3M INTERIAL
B14 B13 B12 B11 B10 B9 B8 B7 B6 B5 B4 B3 B2 B1 A1 A2 A3 A4 A5
0.50
0.60
0.70
0.80
0.90
1.00
1.10
POTENTIAL
-VE
EL-1.00M
EL-5.00M
EL-9.00M
EL-12.00M
预测电位
实测电位
-870
880 mV
Ag/AgCl
三角

玄結言：

1. 造成誤差的可能性爲實驗室所 input 的電化學性質 data 爲靜止水狀態而實際爲動態水，其導電情形可能有所影響，至少在測量 R_P^C 及 R_P^C 之 depolarization效果可能會提高，另外海底鋼板受海中生物附著所分泌出來的分泌物也可能影響其測定的結果。
2. 本 model 在實施時由於 Boundary condition 之設定至爲重要，因此在實際使用時，仍需先收集足夠會影響其反應特性之資料，以作爲設計之參考。
3. 在 1/20 scale down 的模型中，由於日本料的電化學特性很不穩定，因此誤差約爲 40mv ，中鋼 C 料誤差的 20mv ，而澳洲料誤差很少，大致上與陽極的穩定性有關，在作電化學試驗時就可以查覺了，因此 scale up 的比較都以澳洲料作比較。

港灣鋼筋混凝土結構物防蝕技術研討會

Seminar on Corrosion Protection Technology of Marine Reinforced Concrete Structures

海洋區域的土木結構物的腐蝕與其防銹防蝕

主講人：田尻勝紀

台灣省交通處港灣技術研究所主辦
中華民國七十四年八月

海洋區域的土木結構物的腐蝕與其防銹防蝕

蒔田實先生作
田尻勝紀先生主講
陳文源先生譯

一、前言

日本近年來建設許多海上長大橋與海堤等，大型土木結構物，尤其於利用沿海空間觀點上，計劃開闢海上機場、海上都市、海上廢棄物處理設施、海底隧道、浮動防波堤等固定於海底或浮動於海上的各種構造物，且正加緊檢討中。

建設海洋構造物不像陸上，因它處於嚴酷的腐蝕環境下，爲確保這些構造物耐久性，其防銹防蝕對策是十分重要的。但目前爲止，對這些嚴酷腐蝕環境的土木結構物等之防銹防蝕技術尙未確立；原來鋼材非常容易腐蝕，因而建設於海洋區域的鋼結構物的防銹防蝕對策是不可缺的，大致上海洋區域所指的海上大氣部份，飛沫部、潮汐干滿部、海中部及海底土中部與構造物所接觸的環境條件不同，而鋼材腐蝕機構及腐蝕程度有所不同，所以針對各部份環境條件應確立最適當的防銹防蝕對策。再者，建設於海洋區域的構造物，修補上大體有極大困難發生，因此在新建設時應講求適當半永久性的防銹防蝕對策，否則建設後往往要提出龐大經費來維護管理。

總而言之，我們需要一套從新建設開始就包含了能維護管理的一貫防銹防蝕對策，且必要是符合其環境條件，構造形式的免維護防銹防蝕對策，這樣的鋼構造物有關的防銹防蝕技術，現在還存在許多未解明的問題，目前各國正在進行包括新技術的開發在內的研究階段。

混凝土本來是耐久性優秀的材料，對其內部的鋼筋、鋼骨等鋼鐵材料有優秀的防蝕被覆作用，混凝土構造物可說在一般環境條件下是極具耐久性的構造物，但於腐蝕性嚴重的海洋環境下，滲透入混凝土中的鹽份使混凝土中的鋼材腐蝕，雖是鋼筋混凝土構造物却未必能保住耐久性，亦卽在腐蝕性嚴重的海洋環境下，爲確保混凝土構造物的耐久性，其防蝕對策是絕不可欠缺的。通常，混凝土構造物祇考慮到混凝土本身的氣密性與被覆層的盡可能加大，偏重於混凝土的配合設計條件而不講求特別的防蝕對策，近年來海洋區域的混凝土構造物的損傷很多引人注目，單是靠增大 PC 的鋼材之混凝土被覆會失却構造物的優點，所以現在各方面進行混凝土構造物的腐蝕與防蝕研究。

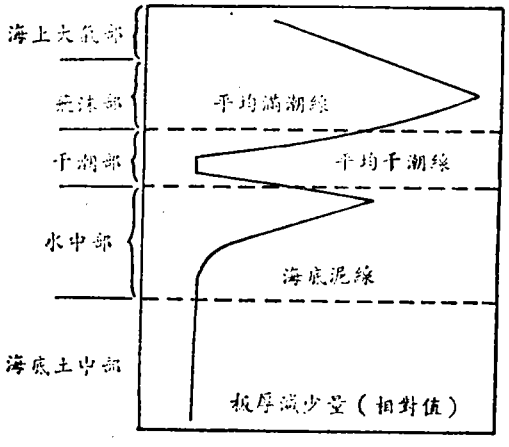
本文是於日本建設省土木研究所正實施進行中的海域鋼結構物及混凝土結構物的腐蝕與防蝕技術之試驗與研究的現狀。

二、鋼結構物的腐蝕與防蝕

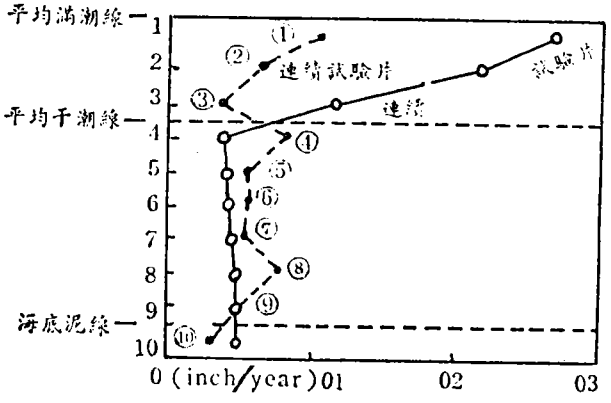
(1)於海域的鋼材之腐蝕傾向及腐蝕速度

1.環境條件與腐蝕傾向

於海域的鋼腐蝕傾向一般上如圖 1 所示，卽飛沫部份腐蝕最嚴重，腐蝕速度亦最大，但潮汐干滿部份，腐蝕漸低，進入海中部的海水面臨直下面其腐蝕速度再次變大，再往下方越水深其腐蝕速度越低，腐蝕速度於潮干汐滿部小而在海水面臨直下產生極大值，原因係夾在海水面間形成濃淡氧的腐蝕電池所引起。



圖—1 環境條件與鋼的腐食傾向
（鋼板樁的腐食在Kure Beach-5年之結果）



圖—2 連續情形下與不連續情形試驗片之腐蝕速度（6個月暴露）〃

如圖1所示腐蝕傾向爲鋼材在海上大氣中到海水中連續情形下處於不同環境結果，若鋼材接觸到各個不同環境時，其腐蝕傾向即如圖2所示，當然因不形成濃淡氧的腐蝕電池，潮汐干滿帶的腐蝕速度比海水面臨直下者來得大

2.鋼材種類與腐蝕速度

土木研究所有關鋼材的鋼蝕速度的曝露試驗結果，如圖3、圖4，及表1，圖3的(a)是於東京灣內的川崎市外海的曝露臺船上（在海面上約1.5m位置，海浪强大下可飛濺到的海上大氣中）之結果；鋼腐蝕速度平均爲0.8 mm/y，有局部嚴重腐蝕，約400天即3.2m鋼板發生穿孔的孔蝕；圖3的(b)是在東京灣內木更津市外海的曝露臺船上（與川崎市外海者同樣的海上大氣中）之結果，鋼腐蝕速度平均爲0.5mm/y，與川崎市外海情形一樣有局部嚴重腐蝕情形，川崎市外海及木更津市外海之結果，比瀨戶內海岩屋外海的0.3mm/y腐蝕大，同樣是海洋區域，但因地理位置場所不同其腐蝕情形亦不同，像與東京灣等大都市，工業地帶鄰接的海域，其腐蝕情形不只是海域地理環境而異，可考慮到尙有其他腐蝕因素存在。

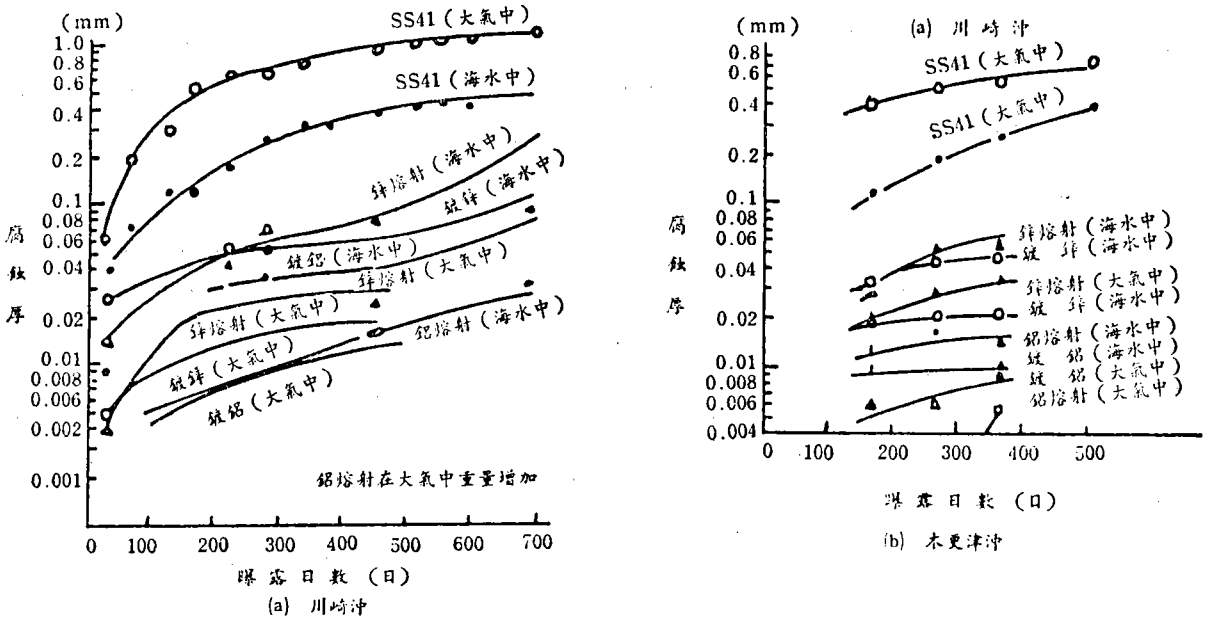


圖-3 鋼、金屬被覆之腐蝕速度[2)]

表-1 耐海水鋼之腐蝕速度[3)]

（片面／單位：mm）

鋼種 / 測定部位(m)	曝露月數	SS 41	SM50A	耐海水鋼 A	耐海水鋼 B	耐海水鋼 C	耐海水鋼 D	耐海水鋼 E	低鉻鋼 3%鉻	低鉻鋼 5%鉻	SS 41 (電防)
上部	16	0.42	0.53	0.48	0.51	0.43	0.56	0.47	0.43	0.20	0.34
(+50～+100)	38	0.92	1.13	0.93	1.01	0.84	0.93	0.96	—	—	0.61
中部	16	0.30	0.30	0.29	0.27	0.31	0.30	0.24	0.21	0.06	0.19
(0～+50)	38	0.58	0.61	0.49	0.55	0.52	0.50	0.46	—	—	0.33
下部	16	0.29	0.28	0.16	0.21	0.28	0.28	0.18	0.11	0.08	0.02
(0～−50)	38	0.73	0.85	0.47	0.68	0.81	0.51	0.50	—	—	0.035

海中腐蝕速度由圖3(a)及(b)之結果約 0.3mm/y 與東京灣之情形，還是比一般海域之腐蝕性嚴重，圖3(a)及(b)可看出鋅、鋁之熔射或電鍍之腐蝕速度，此結果可知鋅、鋁之消耗激大若只有 100μ 膜厚，在海水中其壽命卽只有1～2年。

有關近年開發的耐海水鋼之腐蝕速度的曝露試驗結果如表1，這是把長 1.5mL 型試驗片測立在曝露臺，其下端 30cm 常年曝露在海水中之結果，在海水中多少有耐蝕性良好者，在飛沫帶與一般鋼材比較，其平均腐蝕速度、表面粗度、孔蝕性狀都沒差異，其耐蝕性還不完全，有期待於今後的技術開發。

(2)鋼結構物之海上大氣部份防銹塗裝

1.防銹塗裝歷史

日本的土木結構物歷史，始於明治2年架設的鐵製吉田橋（神奈川縣）、黑金橋（長崎），土木結構橋的防銹塗裝歷史，亦始於此時期，只有明治3年大坂之高麗橋曾留下"曾塗裝過"的記錄，至於這些橋施工何種塗裝系統，卽不清楚，但由塗料歷史來推測，其塗裝系統採用現場調製的紅丹防銹漆爲底塗、上塗用厚漆當面塗，並以熟油稀釋塗裝者，明治7年建設了公鐵道橋（大阪與神戶間的武庫川），然後陸續建設很多路橋、鐵道橋，到昭和10年前都以現場調製型紅丹防銹漆爲底塗、中塗亦都現場調製，上塗使用熟油稀釋的厚漆。土木研究所對防銹塗裝之試驗研究，始於昭和30年的若戶大橋之塗裝，由這時候所作試驗調查與對既有構造物的塗裝調查，可了解昭和20年代情形調查結果如表2，由此結果可知昭和20年代塗裝系統採用油性防銹漆（一般防銹漆或一氧化二鉛防銹漆）與油性調合中塗漆及油性調合面漆，至20年代末才使用油性防銹漆爲底漆，醇酸樹脂系中塗漆及其面漆所組成之塗裝系統，若戶大橋之塗裝經室內促進劣化試驗與現場大氣曝露試驗等結果，才以噴砂法來表面處理，並以長期曝露型伐銹處理底漆爲工場內用曝露型予塗底漆如表3所示；

表2、關於若戶大橋之塗裝調查(既有構造物之塗裝系統)

構造物名稱	塗裝年月	表面處理方法	塗裝系統		
			底塗	中塗	面塗
國鐵若松工機部內吊車	1950年11月	鋼刷除銹	油性防銹漆	油性調合漆	油性調合漆
若松海上保安廳信號所鐵塔	1953年	鋼刷除銹	油性防銹漆	油性調合漆	油性調合漆
國鐵戶大田橋樑	1953年12月	鐵鈀 鋼刷除銹	油性防銹漆	油性調合漆	油性調合漆
若松海上保安廳本部鐵塔	1954年	鋼刷除銹	油性防銹漆	醇酸系中塗漆	醇酸系面漆
八幡裝鐵中原橋樑	1954年2月	鐵鎚 鋼刷除銹	油性防銹漆	油性調合漆	油性調合漆
若松消防署門構	1955年	鋼刷除銹	油性防銹漆	醇酸系中塗漆	醇酸系面漆

表3、若戶大橋之塗裝系統

塗裝系統		
工場	表面處理	噴砂(製品)
	予塗底漆	伐銹處理劑 (120g²/m²)
	底漆(1)	合成樹脂紅丹底漆 (180g/m²)
	底漆(2)	同上
現場	中漆	醇酸樹脂系中塗漆 (140gr/m²)
	面漆(1)	醇酸樹脂系面漆 (130gr/m²)
	面漆(2)	同上

此後昭和30年代末一般橋樑幾乎都採用油性防銹漆、醇酸樹脂系中塗漆與面漆之塗裝系統，甚至於現在仍有很多橋樑採用此塗裝系統，進入昭和40年代（1965年）引進了耐曝露性優秀的鋅粉底漆、中塗及面塗使用氯化橡膠的 Mio 系塗料等各種塗料，昭和40年代(1965年)及昭和50年代（1975年）的代表性塗裝系統，例如表4，及表5。

表4、昭和40年（1965年）代的塗裝系統

年代	橋樑名	塗裝系統		
1966	米山大橋（新潟縣）	工場	表面處理	噴砂(原鋼板)
			予塗底漆	鋅底漆
			底漆	同上
		現場	中塗漆	醇酸樹脂系中塗漆
			面漆	醇酸樹脂系面漆
1967	銀波橋（神奈川縣）	工場	表面處理	噴砂(原鋼板)
			予塗底漆	環氧鋅底漆
		現場	底漆	鉛酸鈣防銹底漆
			面漆	醇酸樹脂系面漆
1968	新小松川橋（東京都）	工場	表面處理	噴砂(原鋼板)
			予塗底漆	鋅粉底漆
			底漆	同上
		現場	底漆	紅丹防銹漆
			中塗漆	醇酸樹脂系中塗漆
			面漆	醇酸樹脂系面漆
1968	神領橋（愛知縣）		表面處理	噴砂(原鋼板)
			予塗底漆	無機鋅底漆
			底漆	氯化鉛防銹漆
			中塗漆	醇酸樹脂系中塗漆
			面漆	醇酸樹脂系面漆
1972	境水道橋	工場	表面處理	噴砂(原鋼板)
			予塗底漆	無機鋅底漆
			底漆 (1)	氯化橡膠底漆
			底漆 (2)	同上
		現場	中塗漆	氯化橡膠中塗漆
			面漆	氯化橡膠面漆

表4、昭和40年（1965年）代的塗裝系統

年代	橋樑名	塗裝系統			
1972	關門橋（山口縣～福岡縣）	工場	表面處理	噴砂(原鋼板)	
			予塗底漆	無機鋅底漆	
			表面處理	尖鋼粒噴砂(製品)	
			熔射	鋅熔射	
			封孔處理	短期曝露型伐銹處理劑	
			底漆	酚系鋅鉻黃防銹漆	
			中塗漆 (1)	酚系 Mio 漆	
			中塗漆 (2)	同上	
		現場	面漆 (1)	氯化橡膠中塗漆	
			面漆 (2)	氯化橡膠面漆	
1974	胞姬橋（新潟縣）	工場	表面處理	噴砂(製品)	
			予塗底漆	環氧鋅底漆	
			底漆 (1)	環氧樹脂底漆	
			底漆 (2)	同上	
		現場	中塗漆	環氧系 Mio 漆	聚氨基甲酸酯中塗漆
			面漆	環氧系銀漆	聚氨基甲酸酯面漆
1974	黑之瀨戶大橋（鹿兒島縣）	工場	表面處理	噴砂(製品)	
			底漆 (1)	厚膜型無機鋅底漆	
			底漆 (2)	氯化橡膠底漆	
			中塗漆 (1)	酚系 Mio 漆	
		現場	中塗漆 (2)	同上	
			面漆	酚系銀漆	
1974	廣島大橋（廣島縣）	工場	表面處理	噴砂(原鋼板)	
			予塗底漆	無機鋅底漆	
			表面處理	噴砂(製品)	
			底漆 (1)	厚膜型無機鋅底漆	
			底漆 (2)	氯化橡膠底漆	
			中塗漆	氯化橡膠中塗漆	
			面漆 (1)	氯化橡膠面漆	
		現場	面漆 (2)	氯化橡膠面漆	

表5、昭和50年（1975年）代的塗裝系統

年代	橋樑名	塗裝系統			
1976	六甲大橋（兵庫縣）	工場	表面處理	噴砂(原鋼板)	
			予塗底漆	長期露曝型伐銹處理劑	
			底漆	一氧化鉛防銹底漆	
			中塗漆 (1)	酚系 Mio 漆	
		現場	中塗漆 (2)	氯化橡膠中塗漆	
			面漆	氯化橡膠面漆	
1976	大島大橋（山口縣）	工場	表面處理	噴砂(原鋼板)	
			予塗底漆	長期曝露型伐銹處理劑	
			底漆 (1)	鉛系防銹漆	
			底漆 (2)	同上	
			中塗漆 (1)	酚系 Mio 漆	
		現場	中塗漆 (2)	氯化橡膠中塗漆	
			面漆	氯化橡膠面漆	
1978	大三島橋（愛媛縣）	工場	表面處理	噴砂(原鋼板)	
			予塗底漆	無機鋅底漆	
			表面處理	噴砂(製品)	
			底漆 (1)	厚膜型無機鋅底漆	
			封孔處理	短期曝露型伐銹底漆	
			底漆 (2)	酚系鋅鉻黃防銹漆	
			中塗漆 (1)	酚系 Mio 漆	
			中塗漆 (2)	同上	
			面漆 (1)	氯化橡膠中塗漆	———
			面漆 (2)	氯化橡膠面漆	———
		現場	面漆 (1)	———	氯化橡膠中塗漆
			面漆 (2)	———	氯化橡膠面漆

2.長期防銹型塗裝系統與塗裝工程

最近於海上或河口地帶等海域建設的大型鋼橋，採用耐久性優秀的長期防銹型塗裝系統，土木研究所的曝露試驗結果，亦證明於嚴重腐蝕海域環境，所採用長期防銹型塗裝系統，比一般塗裝系統耐久性優良。長期防銹型塗裝系統比起一般塗裝系統初期花費較高，但從含補修費的總成本來看，因採用前者的話，其重塗間隔較長而有利，圖4，是有關總成本之例，假定本來的一般塗裝系統①之初期經費爲1.00，長期防銹型塗裝系②之初期經費爲2.23，如圖4所示條件來補修塗裝及上塗時大約10年間來算，以總成本來比較，即以②的塗裝系統較便宜，但採用長期防銹塗裝系統時有幾個問題點要特別了解並予注意，表6，係土木研究所實施的曝露試驗結果，由此可知長期防銹型塗裝系受塗裝工程影響很大，即充分管理的施工條件下，塗裝到最後工程時(a)表示長期防銹型塗裝系比一般塗裝系耐久性優秀，又底塗與中塗在好好管理的施工條件塗裝而中塗及面塗在很難管理之施工條件下的現場塗裝時，即很難充分發揮其性能，於橋樑等土木鋼結構物建設，當建設時塗裝容易損傷，本來通常於工場塗裝後的部材組立，並送到現場按裝後在現場塗面漆的方式較多，由表6，的結果可知採用長期防銹型塗裝系統時，損傷部份的補修多少犧牲了美觀，但從底漆到最後塗裝面漆都在工場塗裝結果較良好，現在建設中的本州四個連絡橋公團的大鳴戶橋及因島大橋，採用長期防銹型塗裝系統，在日本首創從底漆到最終塗裝全部塗裝在工場施工，然後在現場按裝的方法，可考慮今後的土木鋼構造物塗裝就採用此法，由表6之結果在海域若一次生銹雖用心補修，亦無法得完整之耐久性，故苦損傷或劣化發生時，在未從表面生銹以前，趕快儘早補修爲要。

表6　各種塗裝系統之塗裝工程與塗膜性能（5年間海上曝露試驗結果）

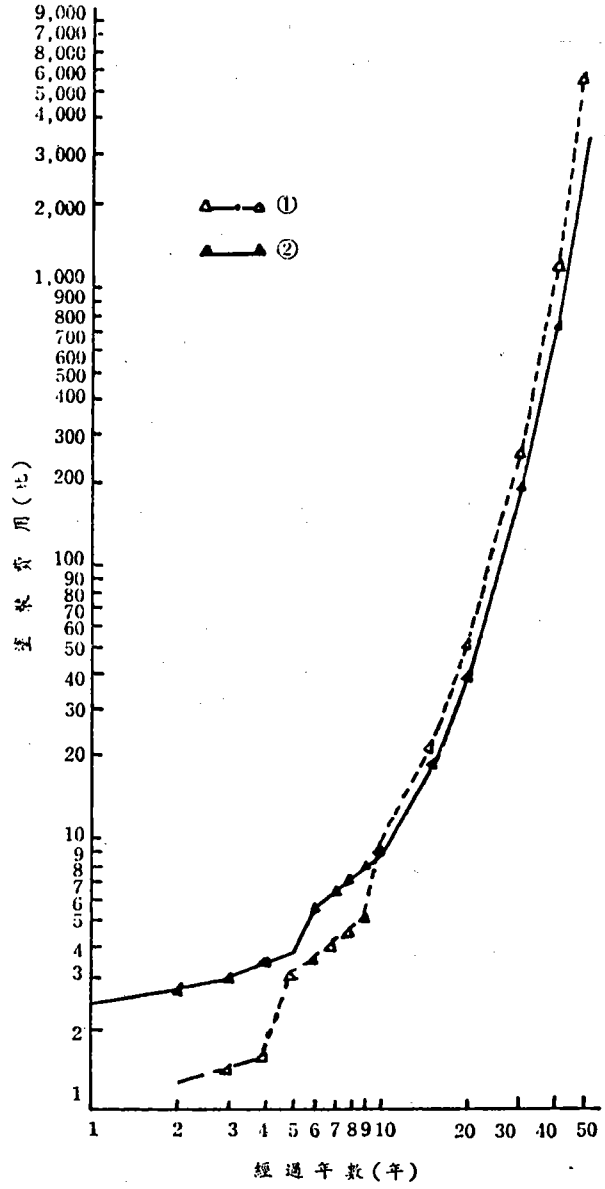
塗裝系		塗裝缺陷之種類	塗裝工程 (a)	(b)	(c)
一般塗裝系	油性～醇酸樹脂	生銹	⊘	⊘	△
		膨脹	⊘	⊘	×
	油性～醇酸樹脂變型矽樹脂	生銹	△	○	△
		膨脹	⊘	⊘	×
長期防銹型塗裝系	有機鋅 HB～氯化橡膠塗料	生銹	○	○	⊘
		膨脹	◎	⊘	△
	有機鋅 HB～環氧樹脂塗料	生銹	○	○	⊘
		膨脹	◎	◎	⊘
	無機鋅HB～酚樹脂Mio～氯化橡膠塗料	生銹	○	○	⊘
		膨脹	◎	○	△
	有機鋅 HB～聚氨基甲酸酯塗料	生銹	○	⊘	⊘
		膨脹	◎	△	△
	無機鋅 HB～聚氯乙烯 HB 塗料	生銹	⊘	⊘	⊘
		膨脹	◎	◎	△

◎無異狀，○稍有異狀，⊘稍有生銹、膨脹，△生銹、膨脹之發生

(a)到最終工程在工場塗裝。

(b)底塗、中塗在工場塗裝，面塗在現場塗裝。

(c)損傷部份之生銹表面，在現場補修塗裝。



No.	塗裝系（初期經費）	補修周期	上塗周期	（補修＋上塗本成）
①	鉛丹＋醇酸樹脂（1.00）	5年	5年	0.737
②	無機鋅底漆＋Epxy＋PU（2.23）	6年（5％）	6年	0.500

圖—4　依塗裝系的總成本之比較[6]

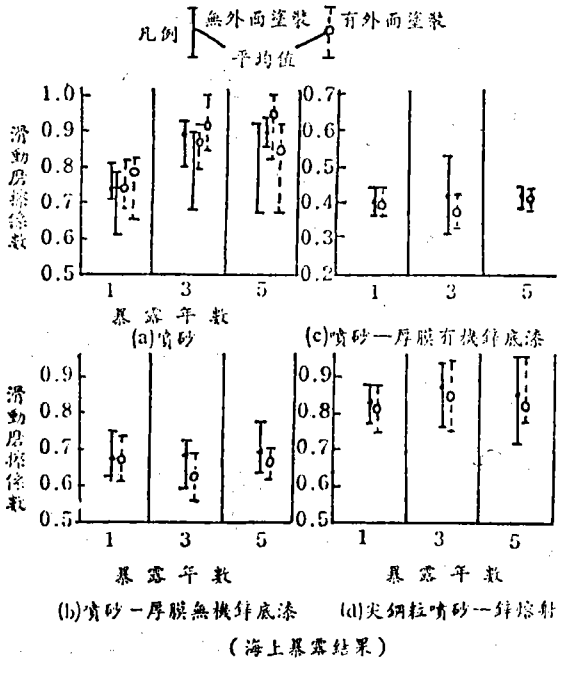
假定利息12％.物價上昇率15％）

3.高强力螺栓接合面的防銹

最近的鋼結構物多採用高强力螺釘，於高强力螺釘確保所定滑動磨擦係數之必要，本來陸上結構物接合面沒進行防銹處理，但嚴酷腐蝕環境之海上大氣部份，因接合面的腐蝕恐怕無法確保長期耐久性，表7、與圖5表示，接合面經防銹處理時之高强力螺釘接頭處之海上曝露試驗結果，接頭處的外側全體塗裝對接合面之防銹毫無效果，不防銹處理時（只噴砂而已）全面的會腐蝕，滑動磨擦係數因生銹而增加，隨腐蝕的進行不久發生致命的缺陷，接合面經防銹處理者，表面不生銹又滑動磨擦係數經年不變化，使用有機鋅底漆對滑動磨擦係數有點問題，但海上大氣部份之高强力螺釘接合面無論如何都要防銹處理。

表7　高强力螺釘接合面之腐蝕（海上曝露試驗5年）

接合面之處理	外面塗裝	外觀
噴砂	無	幾乎全面腐蝕，可確認經年間腐蝕繼續進行。
	有	同上，外面塗裝效果不彰。
砂噴	無	可確認自銹發生，經5年間曝露，多少表面生銹在外周圍部份。
厚膜有機鋅底漆	有	同上，外面塗裝效果不彰。
噴砂	無	確認自銹發生，經5年間曝露，多少在外周圍部份表面生銹。
厚膜無機鋅底漆	有	同上，外面塗裝效果不彰。
尖鋼粒噴砂	無	確認自銹發生，但表面沒生銹。
鋅熔射	有	同上。



圖—5　於高强力螺釘接頭處靡擦係數之經年變化[8]

4.着色塗料與變色褪色性

鋼構造物塗裝是防銹爲第一，其次才是確保美觀爲目的，因着色塗料之種類有些變褪色很顯著，尤其防銹上耐久性優秀的長期防銹型塗裝系統，爲美觀理由上若需要重塗，即失却長期防銹型塗裝系統本來的目的，故需選擇耐變褪色性優秀的色彩塗料才可。土木研究所實施5年海上曝露試驗結果如圖6，由此結果可知塗料色彩，色調不同而發生變褪色情形如下：

1)紅色系統：全般的變褪色度大，變褪色程度因顏料種類及配合比而異，顏色濃淡差異亦大，一般的淡色者較易變褪色，稍混濁色調者比鮮明色彩者不易變褪色。

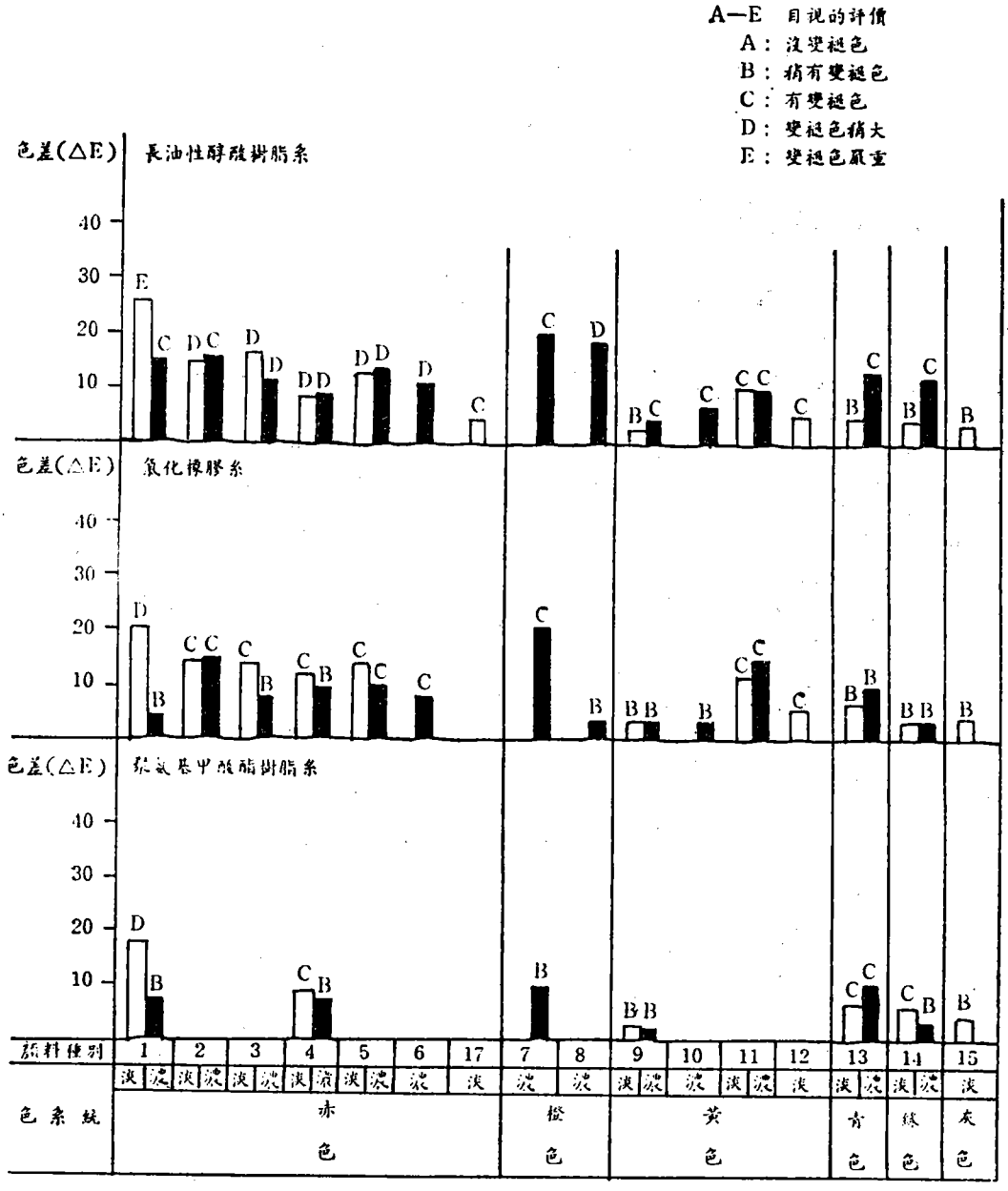
2)橙色系統：比紅色變褪色少。

3)黃色系統：因顏料種類而差別大，使用比較鮮明的黃鉛者變褪色大，使用稍混濁的黃氧化鐵者變褪色較小。

4)藍色系統及綠色系統比紅色系統～橙色系統變褪色小，淡色系統較不變褪色，若水洗即恢復原來色彩狀態。

5)灰色系統變褪色最小。

6) Mio 色彩，完全沒變色。



圖—6 着色塗料之色彩別，展色劑別之變褪色程度（大氣暴露5年……水洗後）[9]

(3)鋼結構物之飛沫帶、潮汐干滿帶之防蝕技術

1.有關新防蝕技術之開發，官民間之共同研究。

飛沫帶不僅腐蝕最嚴重且與潮汐干滿帶同樣不斷的有飛濺波浪之影響是很難維護補修的地方，所以這些部位的防蝕希望免維護的防蝕系統，不過現在爲止這種技術並未確立。

建設省土木研究所從1973年實施官民共同研究，關於飛沫帶潮汐干滿帶的防蝕技術之開發。以實際之鋼管抗（ϕ508mm 及 609.6mm）與試驗片（ϕ100mm, ℓ2000mm）如表 8 所示36種類的各種防蝕材料於東京灣及茨城縣阿字個浦實施，現場曝露試驗，已得約 5.5年間之試驗結果得知如下事實，又代表的試驗結果如表 9 。

a)犧牲型鐵板捲貼襯

以犧牲型鐵板捲貼襯的防蝕法耐衝擊性優良成本又低，由重量及焊接點關係本來使用板厚 12mm，防蝕壽命10年程度者較多，本研究即採用比碳鋼耐久性優秀的低合金耐海水鋼，飛沫帶上部產生黑褐色較緻密的銹層，飛沫帶下部及干滿帶有紅褐色層狀的銹剝落，對今後腐蝕狀況之

表 8　飛沫帶、潮汐干滿帶之防蝕被覆

分類	被覆種類	樁 C	樁 A	試驗片 C	試驗片 A
金屬被覆	覆上耐海水鋼（Cu-Cr-Al 系）覆厚 6mm	0	0	0	0
	覆上不銹鋼（25 Cr-13 Ni 系）覆厚 3mm	0		0	
	覆上蒙納合金（Monel)2mm			0	
	鈦覆面 0.5mm			0	
	鋁熔射＋環氧柏油漆 100μm　300μm×2	0		0	
金屬熔射＋塗裝	鋁熔射＋聚氯乙烯布補强環氧柏油漆 100μm　300μm×3	0		0	
	鋁熔射＋玻璃纖維補强環氧柏油漆 100μm　300μm×3		0		0
	鋁熔射（封孔處理，200μm）	0		0	
	鋅熔射＋環氧柏油漆 100μm　300μm×2	0		0	
塗裝	無機鋅 HB＋環氧柏油漆 75μm　300μm×3	0	0	0	0
	無機鋅 HB＋玻璃纖維補强環氧樹脂 75μm　300μm×3	0	0	0	0
	無機鋅 HB 100μm			0	
有機內襯（環氧樹脂）	樹脂砂漿（環氧樹脂20% wt) 4mm	0	0	0	0
	樹脂砂漿(環氧樹脂33.3 wt%) 5mm			0	
	玻璃鱗片環氧樹脂 2mm			0	0
	水中硬化型環氧樹脂 5mm			0	0
	環氧樹脂柏油泥 14mm			0	
	不織布含浸環氧樹脂膠布 3mm			0	
有機質內襯（聚酯樹脂）	玻璃鱗片聚酯 1mm			0	
	玻璃鱗片聚酯 2mm			0	
同上（聚乙烯）	聚乙烯（擠壓成形 4mm）	0	0	0	0
	聚乙烯（擠壓成形 4mm）			0	0
	聚乙烯粉體			0	
	聚乙烯熱收縮膠布 3mm			0	
	環氧樹脂粉體塗裝＋聚乙烯擠壓成形 0.3mm　4mm			0	0
同上（聚氨基甲酸酯樹脂）	聚氨基甲酸酯彈性膠 4mm		0		0
	發泡聚氨基甲酸酯彈性膠 10mm			0	
	聚氨基甲酸酯泥 3mm		0		0
同上（其他）	丁二烯橡膠 4mm			0	
	氯丁二烯橡膠板 5mm			0	
	柏油泥 10mm			0	
	石油膏含浸膠布＋FRP 2mm　3mm			0	
無機質內襯	鋼纖維混凝土型模 10mm	0			
	鋼纖維混凝土噴塗 5mm	0			
	混凝土＋FRP 47mm　3mm		0		0
	含玻璃纖維混凝土 20mm			0	0

(1) OEP 指曝露場所（C；東京灣千葉市外海；A；茨城縣阿字個浦外海）

(2)樁大小（C爲 φ508mm＋ℓ45mm；防蝕部份 6m，A爲 φ609.6mm×ℓ16m，防蝕部份 6m）。

(3)試片大小 φ100mm×ℓ2m。

表9　防蝕鋼管樁調查結果（曝露8.5年經過，千葉外海）

防蝕被覆種類	被覆狀況	生物附着狀況
無處理	全體有相當大的腐蝕進行	籐壺、貝類
不銹鋼（25Cr, 13Ni 系）覆面 3mm	溶接部可看到生銹而變色，外部看不出有腐蝕之進行，但被覆境界部無處理樁發生許多凹凸腐蝕。	同　上
耐海水鋼（W, Cr, Al 系）覆面 6mm	全體有腐蝕在進行，干滿帶被覆着較繁密的銹層，被覆境界部無處理樁發生許多凹凸腐蝕。	同　上
鋁熔射（200mm）（封孔處理）	大氣～飛沫帶有白銹存在，干滿帶因有電氣防蝕效果，鋁有些消耗。	籐壺、貝類綠色海苔
鋁熔射（100μm）＋環氧樹脂柏油漆塗裝（300mm×2）	大氣部份有塗膜剝落，有數處發生膨脹，於飛沫帶、干滿帶塗膜剝落多，鋁熔射幾乎消耗盡，且生銹。	籐壺、貝類
鋁熔射（100μm）＋聚氯乙烯布補强環氧樹脂柏油漆塗裝（300μm×2）	大氣～飛沫帶有多處塗膜剝落，紅銹、白銹混生，於干滿帶塗膜剝落較大，生紅銹。	同　上
鋅熔射（100μm）＋環氧柏油漆塗裝（300μm×2）	大氣～飛沫帶比較良好，干滿帶有大塊塗膜剝落，鋅熔射幾乎消耗盡，紅銹、白銹錯雜發生。	同　上
無機鋅底漆塗裝（75μm）＋環氧柏油漆塗裝（300μm×3）	大氣～飛沫帶有小剝傷，有數處膨脹，干滿帶有比較大的塗膜剝落，且紅銹、白銹混雜發生。	同　上
無機鋅底漆塗裝（75μm）＋玻璃纖維補强環氧樹脂塗裝（300μm×3）	大氣～飛沫帶有小剝傷，發生銹，但干滿帶塗膜沒異狀。	籐壺、貝類綠色海苔
聚乙烯擠壓內襯（4mm）	全面的外觀良好。	籐壺、貝類
環氧樹脂系樹脂砂漿內襯（4mm）	大氣部之大剝傷以致剝離及一部份被覆發生龜裂，全面的發生薄銹。	籐壺、貝類綠色海苔
纖維混凝土內襯 No 12, 型模 100mm No 12, 噴塗 50mm	全面發生鋼纖維的點線狀銹，樁上部發生小龜裂。	同　上

進行有必要確認之。

b)塗裝

以厚膜型有機或無機鋅粉底漆爲底塗，超膜厚型環氧樹脂柏油漆或環氧樹脂塗料爲面塗進行試驗，鋼管樁打樁時損傷少，到目前情形良好，雖然防蝕壽命不長，比起其他內襯施工容易，補修也容易等特點，但仍有待今後調查結果。

c)有機質內襯

有機質內襯材料有很多種，本研究針對橡膠、聚乙烯、樹脂砂漿及强化玻璃纖維等試驗，橡膠內襯、耐衝擊性，耐摩損性優秀，雖很難受外力的損傷，但若一旦損傷到表面母材從損傷處之缺陷逐漸擴大之傾向，聚乙烯內襯（擠壓成型者）價格低耐衝擊性優，但還留下與鋼材面之附着問題，若一旦損傷從受傷處會逐漸擴大其缺陷之傾向，樹脂砂漿耐摩損性優秀，但若不注意施工無法得到完全之性能，强化玻璃纖維內襯有不受外力影響之特點，但無法直接附着於鋼材面，與鋼材面之間隙使用砂漿、柏油當接着劑來塡充，因塡充材料性質而其防蝕效果不同。

d)無機質內襯

以水泥硬化體（灰泥或混凝土）當防蝕內襯時，需要求高品質與正確的施工，尤其確保厚度與防止龜裂是最重要，當內襯材料即耐彎曲性與耐衝擊性弱，本研究仍實施纖維混凝土試驗，今後必要確認其耐久性。

e)金屬熔射

有實用性的熔射金屬爲鋅與鋁，於海域環境鋁比較優秀，海中部份若有鋼材露出部份，會促進干滿帶部份的鋁之消耗又熔射上的塗裝，有時也會剝落，故使用鋁熔射在干滿帶仍留下一些待解決之問題。

f)耐蝕性金屬材料

蒙納（Monel）鈦及耐海水性不銹鋼（25 Cr, 13Ni 系）於海域環境有待其優良的耐蝕性之表現本研究即把上述金屬覆上鋼鐵面試驗中，目前爲止得到非常優異的耐蝕

性但比其他防蝕材料價格高，若要採用應該是免維護般完全防蝕才可，其實用性有得確認，尤其海中之鋼鐵接合部要確立防止異種金屬接觸之腐蝕對策才可。

2.各種覆面材（Clad）耐蝕性

以熱間壓延法或爆發壓着法把金屬貼合與鋼材的覆面鋼，若耐蝕性完全即可期待爲免維護防蝕材料，把各種金屬材料之覆面鋼之曝露試驗結果如表 10 與 11，鈦即完全不受海水浸蝕，耐蝕性最優， SUS316L 會發生孔蝕或間隙腐蝕的傾向，故其耐海水性爲目的之覆面材欠適少合性 SUS329J1， 即平均浸蝕性少，局部腐蝕小，故當耐海水性覆面材有望，尼泊爾黃銅或鋁青銅即因平均耐蝕性大無法期待，蒙納合金雖其平均浸蝕稍大於飛沫帶其耐久性稍有問題，但局部腐蝕比較少，若選擇適當厚度之覆面材其實用性可期待之。

表10　各種覆面鋼之腐蝕速度[1]

試驗片	場所	川崎沖				室蘭港			
	曝露時間	14 個月		24 個月		14 個月		24 個月	
	腐蝕量	mg/cm²	mm/y	mg/cm²	mm/y	mg/cm²	mm/y	mg/cm²	mm/y
SUS 316 L	a	2.07	0.0	4.52	0.0	2.99	0.0	1.87	0.0
	b	486.0	0.52	645.8	0.4	219.8	0.24	362.8	0.22
	c	520.2	0.56	531.0	0.34	209.2	0.22	337.8	0.22
SUS 329 J1	a	0.62	0.0	2.66	0.0	0.73	0.0	0.52	0.0
	b	553.2	0.60	642.4	0.4	234.8	0.26	331.0	0.2
	c	544.0	0.58	677.0	0.42	199.6	0.22	297.6	0.18
尼泊爾黃銅	a	56.2	0.06	103.1	0.06	30.2	0.03	40.3	0.02
	b	509.4	0.45	766.1	0.46	193.2	0.2	272.0	0.16
	c	570.2	0.60	763.2	0.46	196.4	0.2	261.6	0.16
鋁青銅	a	30.0	0.03	32.0	0.02	57.0	0.06	72.2	0.05
	b	534.0	0.6	714.8	0.46	197.6	0.22	257.8	0.16
	c	577.4	0.64	675.6	0.44	213.8	0.24	276.0	0.18
蒙納合金	a	4.97	0.0	10.1	0.01	15.0	0.01	24.2	0.01
	b	545.4	0.56	677.0	0. 4	149.2	0.16	211.4	0.12
	c	644.2	0.64	605.2	0.36	148.4	0.16	199.2	0.12
鈦	a	—	—	0.02	0.0	—	—	0.02	0.0

註：a・單體
b・SS 41 之全金溶接
c・SS 41 之稀釋溶接
只有 SS 41 部分腐蝕故數字爲 SS 41 部分之腐蝕數字

表11　各種覆面鋼之孔蝕與間隙腐蝕[2]

(單位：mm/y)

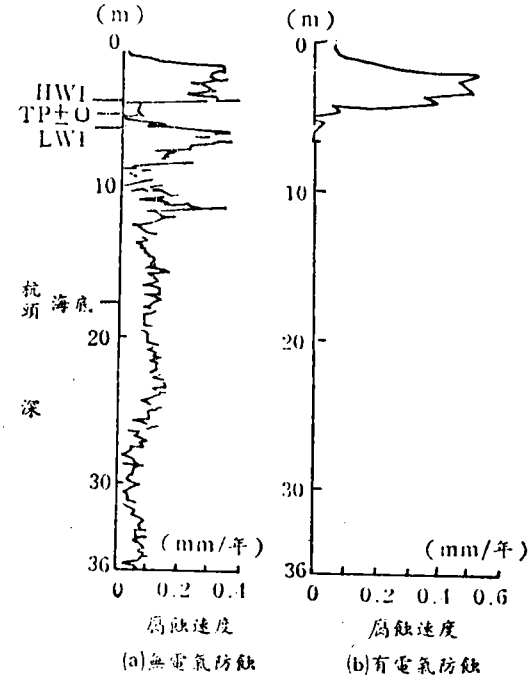
測定項目	最大孔蝕深				最大間隙腐蝕			
場所	川崎沖		室蘭港		川崎沖		室蘭港	
覆面材 ＼ 曝暴期間	14個月	24個月	14個月	24個月	14個月	24個月	14個月	24個月
SUS 316 L	1.18	0.03	4.22	1.5	0.34	0.11	0.14	0.08
SUS 329 J1	0.0	0.05	0.0	0.14	0.19	0.18	0.0	0.0
尼泊爾黃銅	—	—	—	—	0.13	0.12	0.14	0.09
鋁青銅	—	—	—	—	0.51	0.16	0.64	0.31
蒙納合金	0.06	0.3	0.09	0.11	0.03	0.22	0.07	0.07
鈦	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

(4)鋼結構物之海中部份及海底土中部份之電氣防蝕

海底及海底土中部份之防蝕，電氣防蝕確實最有效之防蝕方法，把土木研究所於東京灣有關電氣防蝕之2年試驗結果如圖7，由此結果證明電氣防蝕不僅在海中部份而已，在海底土中部份都有極優秀之防蝕效果，此圖中飛沫部份至潮汐干滿部份，海中部份鋼之腐蝕傾向，正如圖-1所表示於 Kure Beach 者同樣腐蝕速度不一定，在11～12m深度其腐蝕很顯著，其水質因深度而異，可想到有層狀海水存在而起。

這樣的海中部份鋼之腐蝕速度因水溫、溶存氧量、鹽份濃度、潮流等環境條件而異，電氣防蝕需循應環境條件而設計，土木研究所，目前實施有關電氣防蝕設計的基礎研究到目前所得到結果介紹如下表。

圖8即表示於室溫下溶存氧飽和海水中之鋼材設立一定之電流密度之隨時間變化情形，初期電流密度非常大，隨時間而減少，不久漸得一定值把其到達定值之日數與定值情形以表12示之，如此結果所示，因鋼材表面狀態不同，初期電流密度及到達定值日數不同，但其定值大體上及差異，設定電位越卑低（負電位）定值越大，把這時的各種設定電位之鋼腐蝕速度及防蝕率以圖9示之，若設定－800mv 以下電位即防蝕率爲96%，設定－950mv 以下即達99%以上，圖10即表示海水流速與電流密度關係，但這結果對實驗方法仍存有問題尚要檢討，但可知道初期電流密度因流速大而會增大，又電流密度之定值因流速大而增大於2m/S～5m/S大約爲240mA/m²之一定值，5m/S以上即急速增大，圖11爲各種防蝕底塗上塗裝環氧樹脂柏



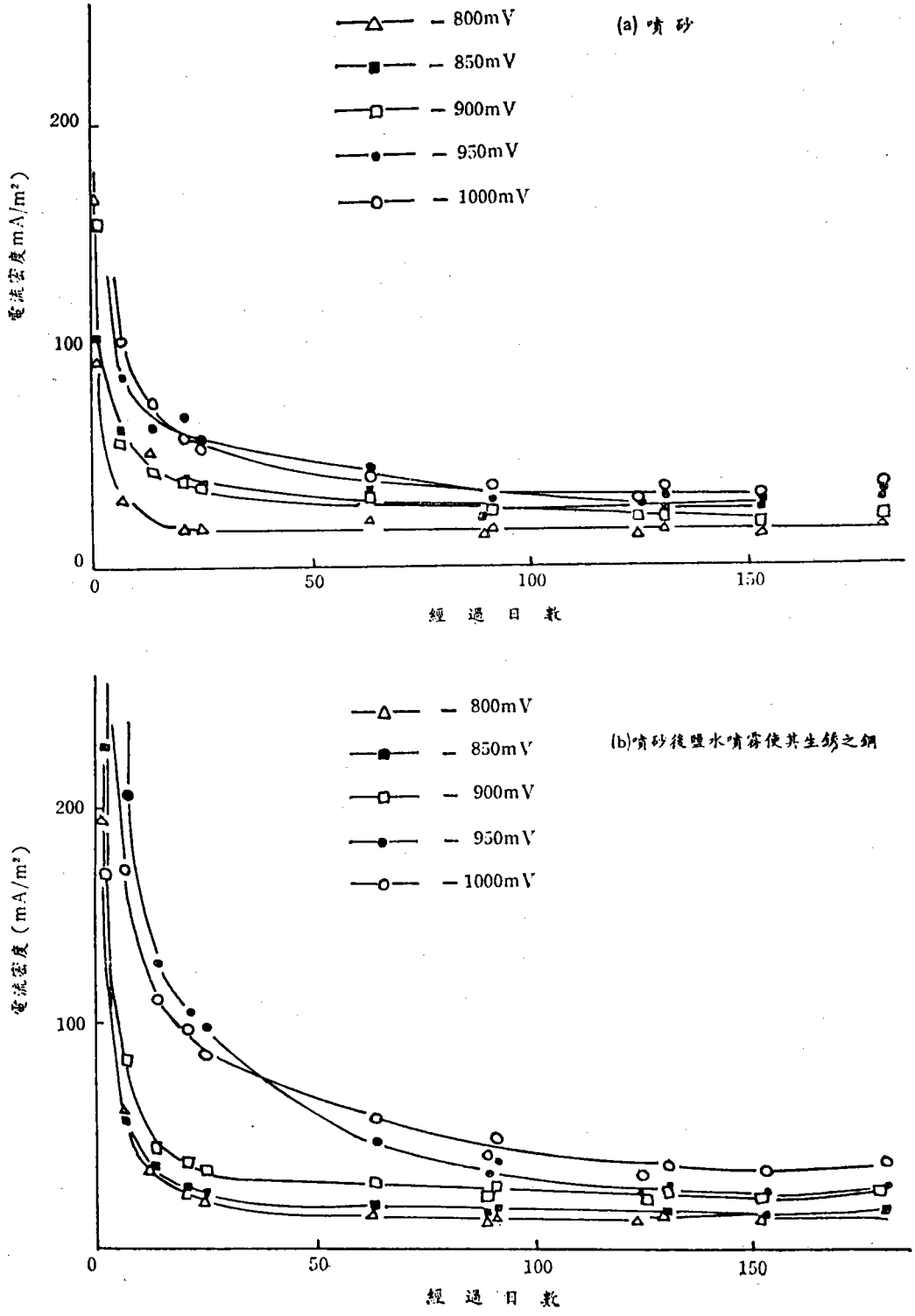
（東京灣、川崎沖外海）

圖—7　鋼管樁之腐蝕與電氣防蝕之効果[12]

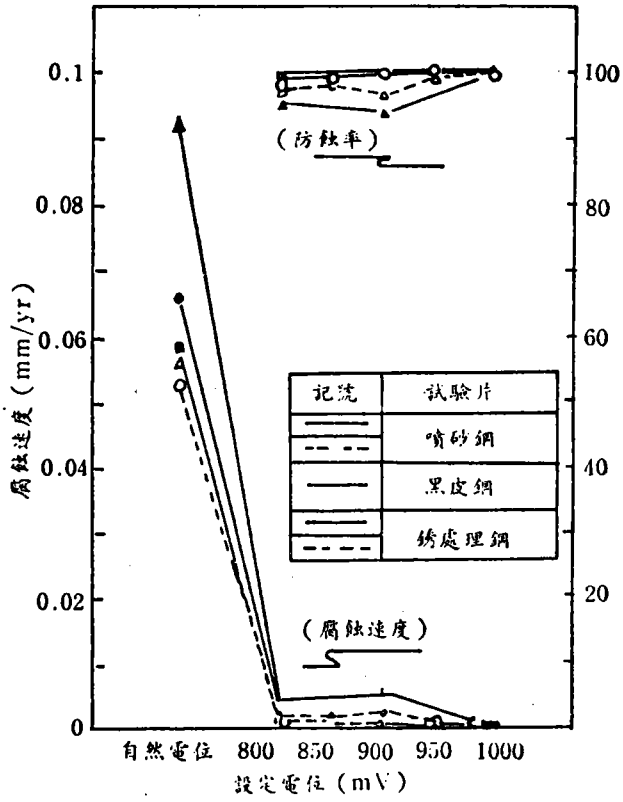
表12　電流密度到定值所需日數與定值（室內試驗）[3]

項目 ＼ 表面狀態	到定值之月數					防蝕電流密度（定值）mA/m²				
數定電位	－800	－850	－900	－950	－1000	－800	－850	－900	－950	－1000
噴砂	20	40	50	90	90	15	28	23	30	35
發銹處理	25	40	50	120	130	15	15	25	28	38

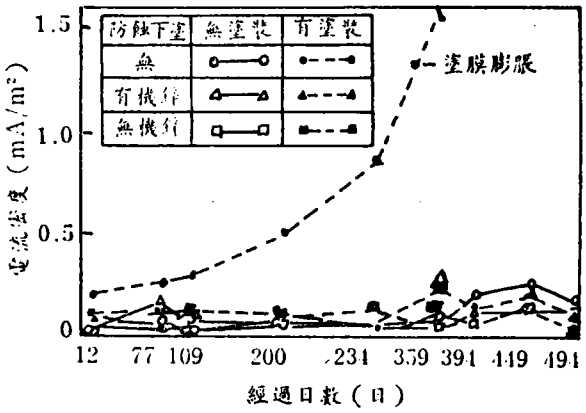
油漆時對鋼材之電流密度隨時間變化情形，與無塗裝鋼材比較電流密度非常小，若沒有防蝕底塗環氧柏油漆塗裝塗膜會膨脹電流密度增大，由此可知電氣防蝕與塗裝併用時要選擇適合與電氣防蝕併用之塗裝系統，並設定不會影響塗裝系統的電位爲要。以上，介紹試驗結果片段，由此可看出來由基礎研究證明了水溫、溶存氧量、鹽水濃度、流速等與電氣防蝕設計條件有關係，於實際海域中環境條件因季節的或有水深方向變化下之電氣防蝕條件，必把設計條件清楚地適合構造物形狀才可，土木研究所目前預定針對這些問題實施研究。



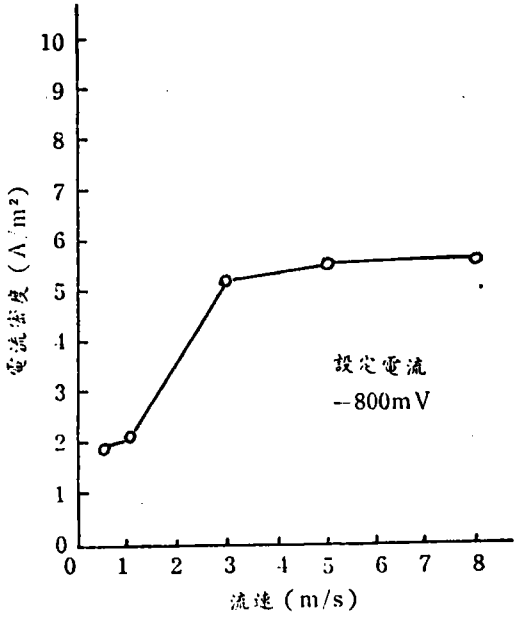
圖—8 各設定電位下之電流密度之隨時間變化[13]



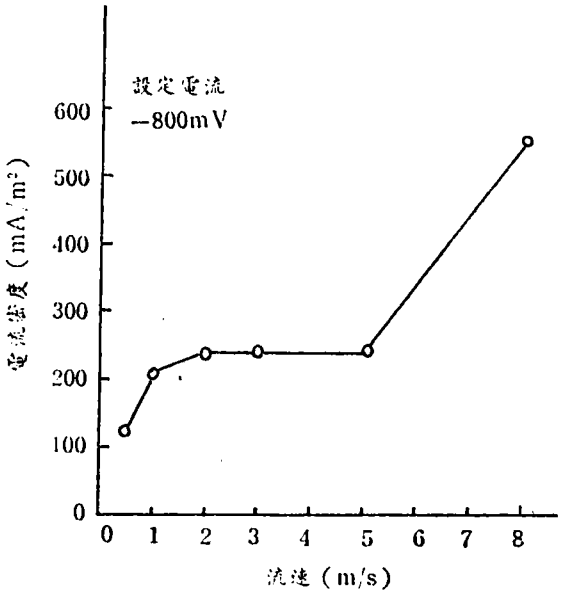
圖—9　各設定電位之下腐蝕速度及其防蝕率[13]



圖—11　各種防蝕底塗上塗裝環氧樹脂柏油漆塗裝（膜厚200 μm）試驗片之電流密度之隨時時變化[13]



(1)試驗開始值後



(2)定常值

圖—10　流速與電流密度[13]

三、因氯化物而腐蝕的鋼鐵材料與混凝土之劣化

(1)混凝土鋼材的腐蝕機構

1.鋼材之腐蝕反應

鋼材腐蝕可說明如下之電氣化學的反應亦即因微小金屬組成之不均一部份或環境條件差異於鋼鐵表面構成局部電池，圖12爲局部電池模型由局部電池的陽極向溶液中流出電流，陰極中即由溶液中流入電流，其反應如下：

陽極部$Fe \rightarrow Fe^{++} + 2e^-$

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

而得 $2Fe + 2H_2O + O_2 \rightarrow 2Fe(OH)_2$ 氫氧化亞鐵 $Fe(OH)_3$ 因溶存氧而再氧化爲氫氧化鐵 $Fe(OH)_3$

2.鋼材的 PH 與電位

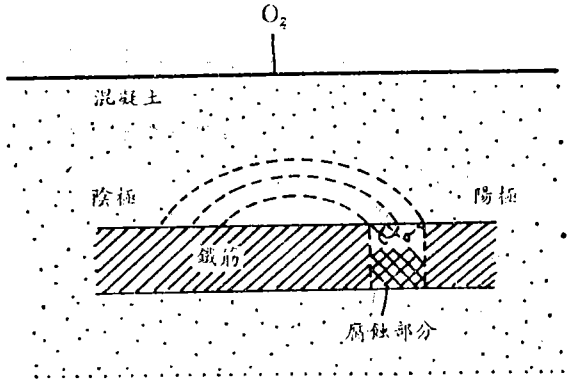
混凝土中鋼材一般不腐蝕，因混凝土是鹼性關係，鋼鐵會腐蝕與否因環境條件之PH變化而異，Pourbaix 作成電位與 PH 圖如圖13，可看出鐵能保持安定之不動態或產生腐蝕的活性態。

混凝土中鋼材是在Ⓐ位置，在不動態區域不腐蝕但混凝土若中性化即 PH 越位由不動態域變成腐蝕域而進行腐蝕，本來有關鋼筋混凝土之耐久性中性化是一大問題，是上面理由而來。但不中性化的混凝土中，若有鹽份存在時，不動態被膜被 Cl^- 破進行孔蝕型腐蝕，海域中鋼筋混凝土中之腐蝕正是鹽份之影響，不一定是混凝土中性化爲主因。

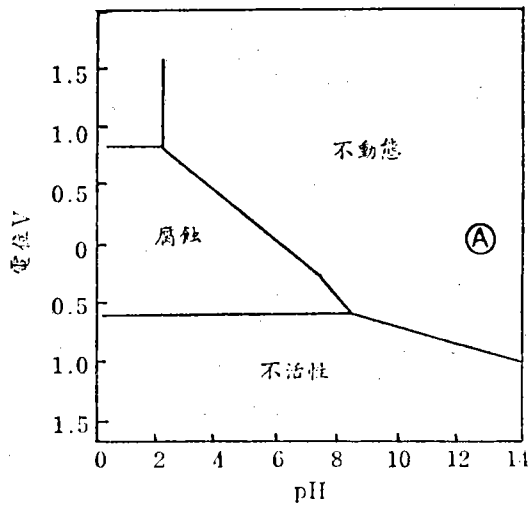
3.巨大腐蝕 (Macro)

鋼材之腐蝕反應是形成局部電池而進行，混凝土中即因陽極與陰極相鄰接形成微小腐蝕 (Micro cell)，若陽極與陰極相離某一程度距離，即進行巨大腐蝕混凝土接觸環境條件，若部份的不同即混凝土中鐵筋周圍之環境條件亦部份的不同而形成巨大腐蝕。

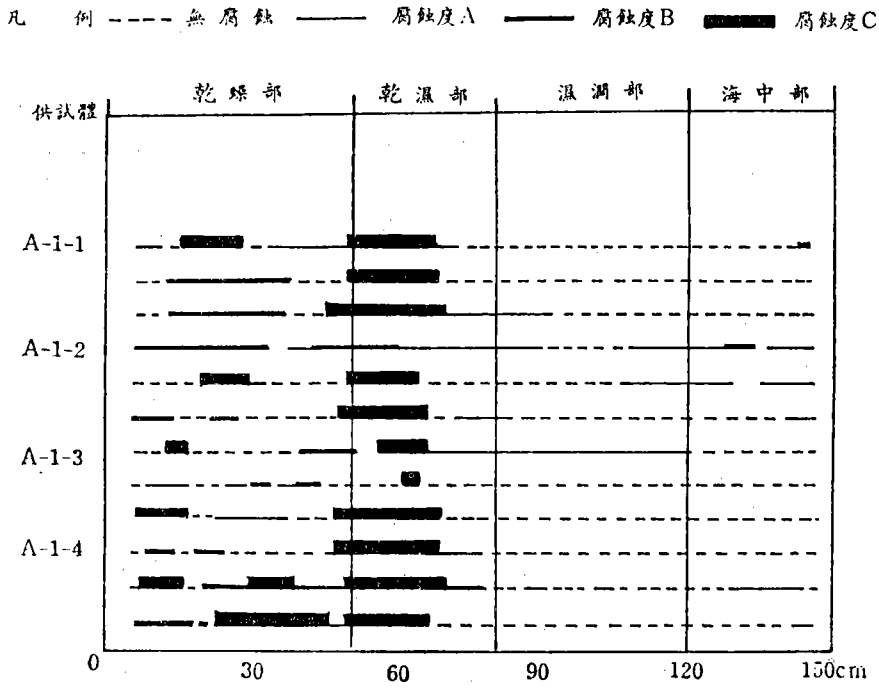
混凝土下部時常在海中，上部曝露於大氣中，其結果即如圖14，由此結果海中部份時常受波浪濕潤腐蝕下進行，但其上部海上大氣中部份發生顯着的集中腐蝕，很明確地知道海上 50～60 cm 處腐蝕最顯着，又把於此曝露條件下的混凝土中鐵筋之電位分布及混凝土之電阻之測定結果，如圖15。由此結果可知鐵筋之電位分布



圖—12 混凝土中鐵筋之巨大腐蝕模型



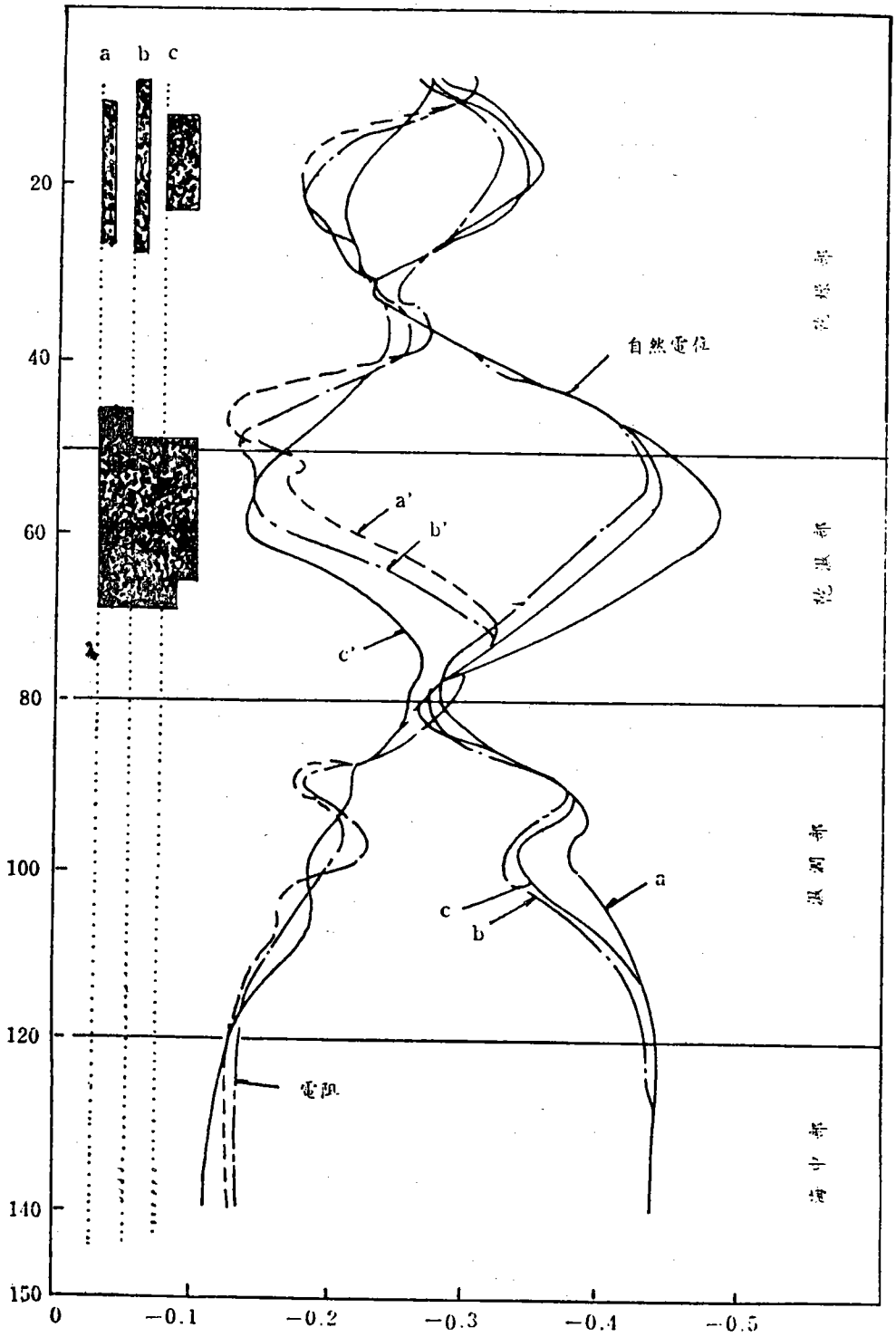
圖—13 鐵的電位—PH 圖[14]



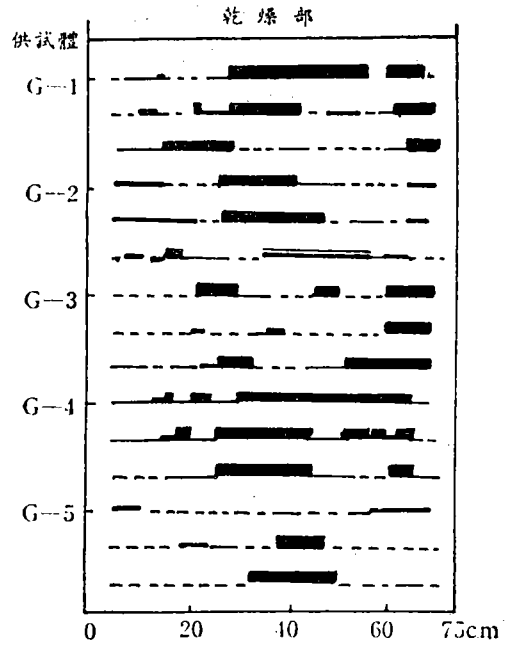
圖—14 大氣中～海中曝露試體之腐蝕狀況
（水、水泥比55%，被覆 2cm．曝露期間2年）

不一致，分成山谷型電位分布如谷底部份與腐蝕嚴重之地方形成對應，很清楚知道混凝土接觸不同環境條件時形成巨大腐蝕，鐵筋之局部腐蝕即進行。

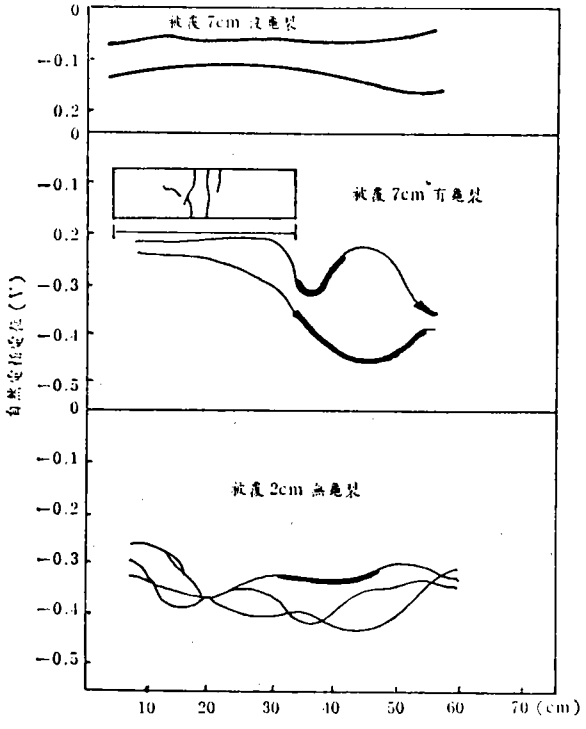
混凝土於單一環境條件下巨大腐蝕難形成，把海上大氣中（於海面上 1.5m 位置）曝露混凝土試體其鐵筋腐蝕狀況如圖15、16所示。此結果可知混凝土在海上大氣中單一環境下鐵筋腐蝕顯着地方是局部的，如圖17所示產生巨大腐蝕，這時混凝土因部份的品質不均勻形成巨大腐蝕，又混凝土產生龜裂時，如圖17所示以龜裂處爲中心產生電位高低形成巨大腐蝕。



圖—15　大氣中～海事曝露試體之自然電位分布與電阻分布[15]
（水、水泥比55%，被覆 2cm 曝露期間2年）



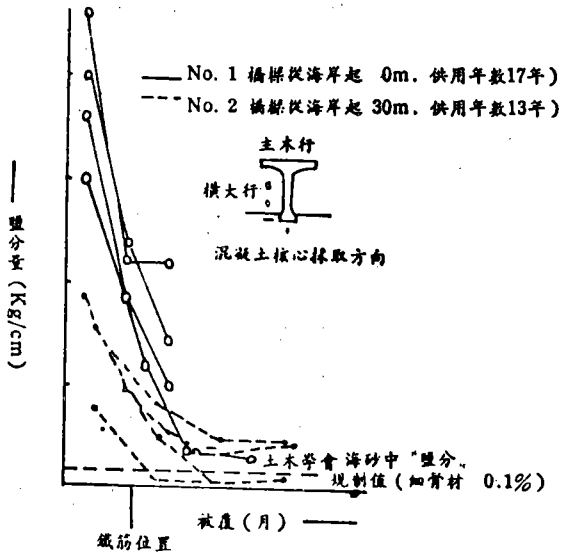
圖—16　大氣中（海上）曝露供試體之腐蝕狀況[15]
（水、水泥比55%，被覆 2cm 曝露期間2年）



圖—17　大氣中（海上）曝露供試體之自然電位分佈[15]
（水・水泥比55%，曝露期間2年）

⑵海岸地域公路橋劣化之實態調查

1980～1981年發現日本沿海之混凝土之損傷，由損傷狀況調查結果其原因是起自氯化物之影響，即圖18所示自混凝土表面 1～2cm 位置含有土木學會規定值海砂中之鹽份之10～20倍多之鹽份，又5～6cm 位置處亦含有3～10倍之鹽份，若有氧氣存在混凝土不進行到中性化鋼材也會極其自然的腐蝕，土木研究所於1982年度起舉行全日本沿岸的混凝土橋於損傷情形。圖20表示自海岸500m 以內的920橋（RC300橋，PC620橋）之實際調查結果，由此結果可明白下列各項事實。



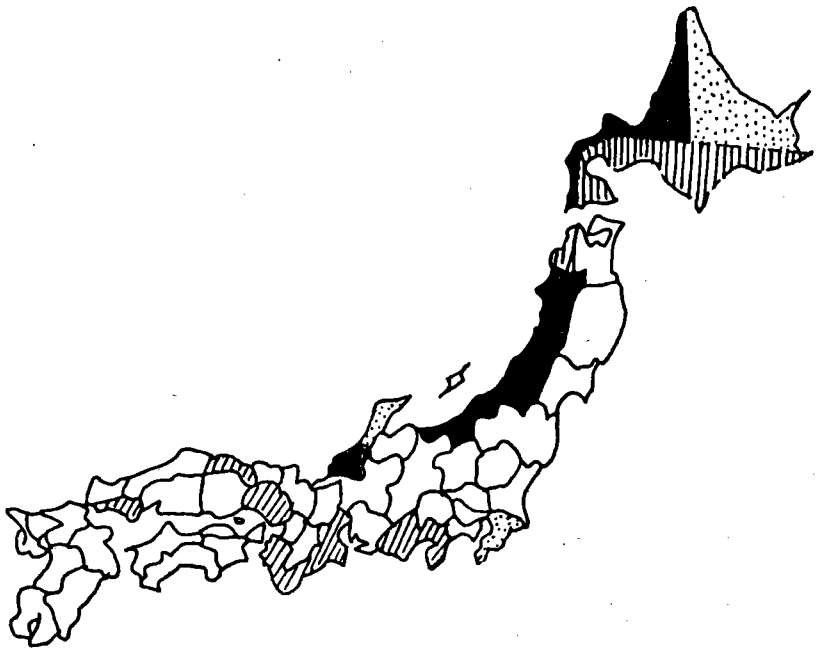
圖—18　混凝土中之鹽份

1.使用年數與損傷程度

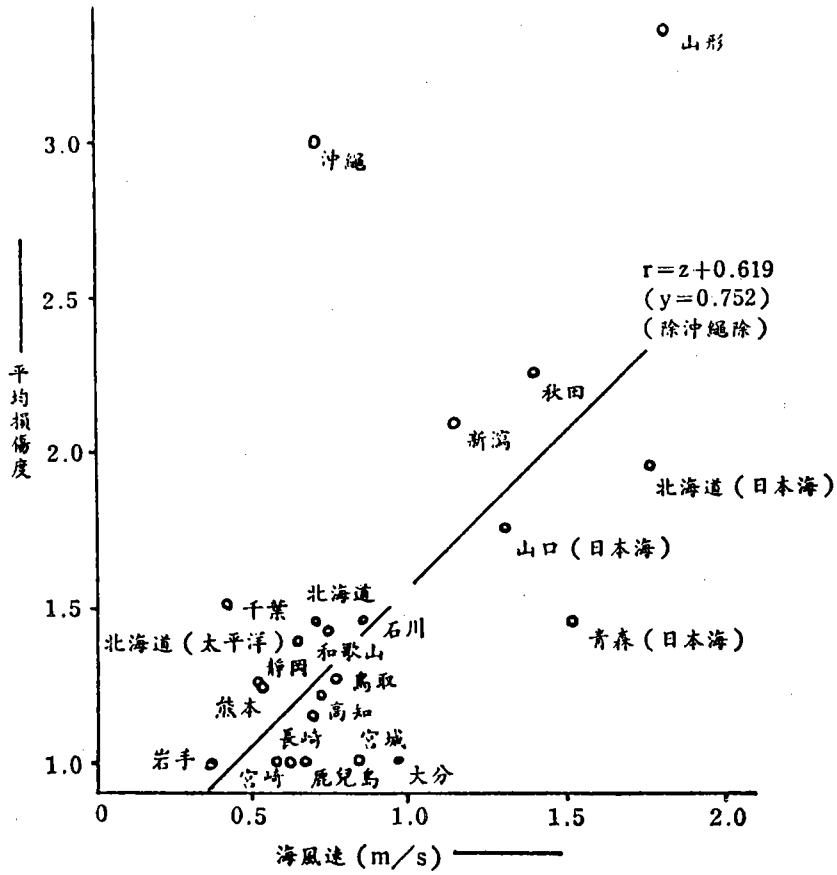
針對損害以外原因所產生之損傷因使用年數增長而增加之傾向，鹽害損傷之發生必與使用年數有關，7～10年與16～20年可看到尖峯點，損傷程度 4 以上之橋樑都有 7 年以上使用記錄。

表—13　損傷度之判定基準

損傷度	判定基準	損傷內容
0	沒受害	
1	受其他原因之傷	很清楚的是其他原因來之損傷
2	有鹽害預兆	空間等發生的銹是原因
3	輕度鹽害	產生很多銹汁部份的龜裂剝落（主桁）
4	中度鹽害	多數龜裂剝落（全部主桁都有）
5	强大鹽害	比 4 項損傷還大粗大又長的龜裂產生



圖—19　地域與損傷度[16)]



圖—20　海風速與損傷度[16)]

2.自海岸起之距離與損傷關係

其他原因發生之損傷與海岸距離沒多大關係，鹽害所引起之損傷程度越近海岸越大，損傷程度4以上之橋樑中約53%是離海岸50m以內，約86%集中在離海岸200m以內。

3.橋種類與其損傷

RCT 桁，後張力T桁，後張力箱桁損傷者很多，先張力平板桁之損傷力最少，因橋種類不同而損傷發生率亦不同。

4.地域與損傷

考慮到因橋種而損傷的發生率，根據發生率高的後張力T桁調查其損傷狀況，即北海道、東北、北陸、沖繩地區之損傷發生率特別高，不只是近海岸與否，可想到對環境條件而腐蝕是因地域而異。

5.海風速度與損傷

可考慮到因地域不同而腐蝕環境條件亦不同，應調查各地域之平均海風速（依海岸線直角方向換算）與平均損傷度關係，得證實海風速度與損傷發生度關係大，除沖繩島外，可知各地域平均濕度與溫度之腐蝕條件影響程度不比海風條件影響腐蝕來得大。

(3)混凝土中鋼筋腐蝕與防蝕方法

混凝土中鋼材若腐蝕，因銹之膨脹壓力使混凝土發生龜裂進而引起混凝土剝落，使混凝土急速劣化，使混凝土中鋼材得防蝕的手段爲充分的被覆與盡可能打設緻密堅實的混凝土最有效，但被覆度的大小才够防蝕，却因環境條件而異，最嚴重腐蝕的環境依筆者個人見解最少要 100 mm 之被覆之必要且不許混凝土有絲毫的裂痕，避免龜裂又得足够的被覆厚度，依構造物種類未必實用，若無法得足够被覆或無法避免裂痕下對混凝土鋼材應採取積極的防蝕對策才是，混凝土結構物防蝕方法。依其機構作用分類如下：

1)於混凝土表面遮斷腐蝕物質的防蝕方法：

例內襯、亞麻仁油處理

2)抑制腐蝕物質，浸透混凝土中之防蝕方法

Palymer Concrete (PCC, PIC)

龜裂補修劑（混凝土發生龜裂時的注入補修材料）

3)鋼材表面遮斷腐蝕性物質的防蝕方法

例電鍍、樹脂塗裝

4)抑制鋼材腐蝕的防蝕方法

例電氣防蝕、耐海水鋼

5)抑制混凝土中鋼材腐蝕環境之防蝕方法

例防銹劑、電氣泳動利用

這些防蝕方法正於研究或開發階段中，不一定已有實績，目前對混凝土結構物有實用性之防蝕法之代表的近年來已提案之指針案中採用者如下：

a)海洋混凝土結構物之防蝕指針（案）日本混凝土工學協會（1983）

b)這路橋鹽害對策指針（案）日本道路協會（1984）

在a)中對嚴重腐蝕環境等。

有防蝕區分，第一種防蝕法規定被覆厚度龜裂寬度許容量等混凝土設計與其施工條件，但若第一種防蝕法全部無法滿足時採用第二種防蝕法，採用環氧樹脂塗裝鋼筋，鍍鋅鋼筋或電氣防蝕。b)即把日本土區分成三種環境條件區，各區域根據

海岸距離規定必要之最低被覆厚度，若被覆厚度無法確保時，採用環氧樹脂塗製鋼筋或混凝土表面塗裝。

港灣鋼筋混凝土結構物防蝕技術研討會

Seminar on Corrosion Protection Technology of
Marine Reinforced Concrete Structures

R.C.結構物之耐久性研究

主講人：川上光男

台灣省交通處港灣技術研究所主辦
中華民國七十四年八月

R.C.結構物之耐久性研究

川上光男博士主講
陳 文 源先生 譯

一、鋼筋腐蝕與構造物之耐久性

就鋼筋混泥土構造物來講，鋼筋或ＰＣ鋼材腐蝕是引起構造物本身之體力降低之原因。

鋼筋混泥土之構造物之拉力之強度弱，而以鋼筋或鋼材來補強，若此補強材料腐蝕，隨而構造體本身體力亦即趨弱，以致不堪用。

本來我們的觀念中，都以爲混凝土中之鋼筋或鋼材不易腐蝕，要研究腐蝕現象把它明朗化需長時間，雖有關心卻無法徹底解決它，在日本NHK播送混凝土危機〃節目，引起大衆的關心、注意，例如冬天散佈凍結融解劑，以致混凝土橋之床版掉落，且在日本國內已取盡了河砂，在南部一帶採用海砂之事亦已是事實。

混凝土中鋼材之腐蝕，因構造物所處環境條件、設計狀況、施工方法、使用材料、等而不同。

技術革新雖進步，對鋼筋或混凝土的檢查方法也進步，但無法判斷鋼筋混凝土在短期間一定狀況下之腐蝕情形，若發現腐蝕時，亦很難判斷其等級，因未確立此判定之方法，例如：如何來判斷其生銹度，生銹到何種程度才算危險，何種程度還不算危險等等之判定方法與決定至今是難題。

由鋼筋之腐蝕來看建築物之耐久性，依材料種類、施工程度、環境條件，對鋼筋之保護條件都不同，譬如：於鋼筋混凝土構造物的龜裂之發生，剝落而發生之缺陷，會大大的支配混凝土構造物全部之耐久性，當構造物一部份剝離時會考慮到是否安全，事實上混凝土構造物是一體之構造物，若一個部份發生缺陷，再有地震等應力加上最衰弱處會集中其作用，以致會發生崩壞的可能。

又混凝土之中性化，海砂中氯化物之影響，直流電流之流入，迷失電流引起之混凝土中內部鋼筋之腐蝕，裂痕發生起因之鋼筋腐蝕導致構造物中內部鋼筋之腐蝕進行，這些問題都與鋼筋混凝土構造物耐久性有密切關係，通常檢討鋼筋混凝土構造物耐久性基本已有二點問題：

①混凝土品質與其劣化。

②混凝土中鋼筋腐蝕起因之問題。

尤其第二問題，一旦發生腐蝕，因腐蝕生成物使鋼筋體積膨脹，使混凝土產生裂痕，混凝土被覆剝離或剝落，若剝落促使混凝土中腐蝕之增加，同時降低其強度更惡劣狀況的使混凝土中鋼筋銹斷以至銹耗殆盡，其體積膨脹大體 1.5倍至 2.5倍，大致上鋼筋可膨脹 2 倍，亦即 9 ㎜鋼筋生銹膨脹爲 13 ㎜，用手一碰即粉散而落。

二、混凝土劣化原因：（如表 1 ）

海洋環境下劣化原因，有來自外界之劣化作用與內部要因，集中分爲物理的原因與化學的原因，物理的原因有氣象作用，凍結、融解、乾燥與濕潤之反覆作用，碳酸化亦即中性化與波浪作用（有漂流物衝擊之可能），磨損或渦凹腐蝕（海洋上爲 Errossion），物理化學的及物理的腐蝕作用都會發生。

化學的原因有由硫酸塩產生的氯化物作用，Ettringite 之形成，膨脹破壞（Ettringite 係水泥膏中氫氧化鈣與鋁化合物反應形成的）此Ettringite 形成約其容積 300 倍之膨脹，以致不得自然而然崩壞。

硫酸與含鋁水泥反應引起約 300 倍以上之混凝土體積膨脹而崩壞狀態，內部的要因有水泥之硬化體溶出與使用反應性骨材，氫氧化鈣的溶解與多孔化是因氫氧化鈣碳酸化爲碳酸鈣，變成碳酸鈣後水份蒸發，因蒸發而產生空隙率增加，變爲多孔性狀態是通氣良好的狀態。

鋼筋混凝土構造物是活生生的東西，因此吸收水份而又吐出水份，氫氧化鈣與二氧化碳反應爲碳酸鈣是水和反應，100年前的無鋼筋混凝土經過 100 年的現在也照樣會有水和反應發生即以各種不同形態繼續發生水和反應（曾經有這些實驗報告）

三、鋼筋之腐蝕要因：（如表 2 ）

鋼筋易腐蝕條件有如下：

①海岸地區或污染地區。

②預鑄部材。

③部材之接合處。

④混凝土混合劑。

⑤利用海砂。

⑥寒冷地帶之構造物，因有凍結解融問題。

⑦基礎構造物，因有不同性狀土壤與電阻問題。

⑧下水設備問題。

⑨裂痕問題。

⑩局部露出問題。

⑪迷失電流。

其因素中高溫多濕問題與海岸地區係有氯離子濃度問題，污染地域問題主要是 $SO_4^{=}$ 的作用，又混凝土的預鑄亦即 P.C.問題多在接合處，混凝土混合材中使用海砂最受 Cl^{-} 與 $SO_4^{=}$ 的作用，其次影響鋼筋的原因還有混凝土之透水性，通氣性，及侵入混凝土中之水成份問題，這是氧，氯，二氧化碳等。

圍繞混凝土環境主要的還是 Cl^{-} 問題，再來是 $SO_4^{=}$ 問題，氯及濕度變化等，混凝土本身之原因係本身性質的問題，如：材料及調合比因水泥種類而異，又依水灰比亦不同，水灰比在建築界大體上爲 65，這水灰比 65是個高數值，以致得到多孔性的混凝土，混凝土沈降值如爲 18 或 21 即太軟，這是 30cm 高的筒於拔下後沈降多少之數字，如其數值爲 18 或 21，那是屬於軟者。

施工性雖好，但骨材與水泥膏形成非常容易分離狀態，故形成混凝土的鬆巢狀，建築物因以鋼筋來配合成各種形體以幫浦壓送下打造鋼筋混凝土才有這樣問題。而土木方面即沒此問題，因多打造如水壩或海岸構造物都是大體積，需不斷的打造故可使用水灰比 50 或 55 ，甚至於比這數值低 10％ 之水灰比亦可打造。

水泥被覆厚度，由中性化式可測得規定之被覆厚度，又因採用的混凝土表面材種類，可大大影響中性化，若沒表面材者中性化非常快，若塗上表面灰泥材可緩延中性化，其上面再塗以塗料的話，使中性化更慢，因可防止外面的二氧化碳之入侵。

混凝土要達到規定強度需長時間，若過程中的養生不良，即無法達到規定強度。

關於裂痕問題之產生係因混凝土在養生期間繼續發生水和反應，這是一種化學反應，放熱而乾燥收縮以致產生裂痕，這裂痕的大型者亦是腐蝕問題之一，又混凝土構造體上經年載荷發生彎曲裂痕與剪斷裂痕。

通常在中心產生彎曲裂痕，角落處產生剪斷裂痕。鋼筋之選擇亦是問題，到底要採用何種鋼筋其材質問題或選擇圓筋或異形筋都是另一種問題。

由腐蝕機構來看，於鋼筋形成腐蝕電池是一種原因，因合金與鋼筋有黑皮處與沒黑皮處產生陽極反應與陰極反應，引起巨大腐蝕電池以致進行腐蝕。

於混凝土中之腐蝕電池是濃淡電池，誠如所知腐蝕電池形態多種，混凝土打造緻密處與不緻密處發生氧濃度差，進而產生通氣差問題，光是有否濕氣亦會產生腐蝕電池，混凝土中PH值之降低亦是原因之一。

這與中性化有關，二氧化碳侵入，引起水和反應，當初氫氧化鈣在下PH 約13（計算上爲12.56），預拌混凝土與二氧化碳反應，PH 逐漸下降在這裏需注意一件事情，亦即混凝土中所說的中性化並不是以PH 7 爲中心，混凝土之中性化係以PH10前後爲中心，混凝土中絕不會產生PH7狀態的，最中性化狀態下之PH爲8.5。

四提高耐久性之對策：

在以上所述環境因素中，若要得耐久性構造物，需注意材料，施工等全部狀態之檢討，其第一條件爲如何來保護鋼筋，因構造上之強度體力會漸漸下降，因此要想出適當之保護，表3是鋼筋混凝土構造物之耐久性對策有關要素。

耐久性對策的考慮:例如打造中性化慢的混凝土，材料中不含有害成份，正確打造水泥被覆厚度，注意施工結果，注意外來作用之原因，於特殊環境下，打造對凍結解融抗力大之混凝土與化學的抵抗力大之混凝土，再加以適當保護對策，以免受化學的腐蝕作用。

五鋼筋腐蝕之環境因子：（如表4）

鋼筋腐蝕因子如下，ＰＨ溶存氧、水份、氯離子，加在鋼筋的應力，鋼筋的變質，抑制劑，迷失電流，溫度等；其中就溶存氧特別說明如下：

混凝土中ＰＨ如前述爲13～8.5範圍，並可分爲PH13～10間爲一個範圍，又PH10～8.5爲另一個範圍，分成這二個範圍理由如下：

PH10以上狀態，若Cl^-不侵入即永不產生中性化，亦即鋼筋在碱性內受保護，一旦PH10以下變酸性，即鋼筋會生銹，故以中性化爲準的生銹界限爲ＰＨ前後，氧氣的作用很有趣，PH13～10範圍，若氯離子不介入，而有氧氣存在鋼筋

得不導體被膜，氧氣存在而得保護作用，但 PH10 以下，若氧氣進入鋼筋的腐蝕量受溶存氧支配腐蝕不斷進行。

故以 PH10 爲基點，氧氣的存在可爲正面作用與負面作用，不過正面作用下若有 Cl^- 進入，縱令在 PH13 其作用即刻轉變爲負面。

所謂混凝土之中性化係指硬化後之混凝土，水泥水和生成物的氫氧化鈣而呈強碱性，這水泥完全水和時，最高有 35 % 之氫氧化鈣游離，對硬化有相當重要的效力，這硬化的混凝土表面受空氣中二氧化碳作用，氫氧化鈣逐漸變成碳酸鈣而失却碱性，若舊混凝土挖開以酚酞指示液呈色即表示混凝土仍健全，若不呈色即已呈中性化，因酚酞溶液對 PH10 以上者呈紅紫色，由此亦可測出中性化情形。

六防蝕對策：

以金屬材料及無機非金屬材料來防蝕是藉表面處理的防蝕，耐蝕性、外觀、耐磨耗性等改善爲目的，在材料表面施以各種加工處理之防蝕方法，依表面處理之防蝕，如金屬被膜，無機非金屬之被膜，有機物被膜，擴散滲透層防蝕法等，其防蝕效果問題有使用環境下被膜本身之耐蝕性，被膜厚度均一性，因被膜缺陷以致露出表面，等各種問題同時并受被膜耐摩耗性，與表面之附著力，都會決定防蝕效果。

若被膜爲非傳導體時，被膜存在促進表面濕蝕又多孔性被膜即不適用防蝕。

到底使用何種方法，何種被膜來防蝕決定在於使用環境，耐蝕性，外觀機械的物理作用，對尺寸精度之要求，表面材質、品質、形狀大小、數量、經濟性等。

以被膜形成來考慮電鍍之防蝕即不適用於海岸構造物，溶融鍍鋅雖速度快，表面亦良好，但溶融鍍鋅時處理溫度高，即怕影響材料之變形，機械性質會變化之缺點又溶融鍍鋅會發生白銹，故需再經鉻處理或燐酸塩處理。

有關鋼筋之鍍鋅，鋼筋使用在混凝土中因 PH12－12.5 故不腐蝕但還要實驗求證，金屬擴散滲透法的鋅滲透、鋁滲透、鉻滲透、矽滲透等或金屬溶射法等，可惜都是多孔質，使用在海岸構造物防蝕仍需繼續改良。

有機被覆內襯使用在飛沫帶，但混凝土構造物防蝕上仍在實驗中，其中可考慮者爲合成橡膠與 P U等， Epoxy 系等防蝕法。

這些材料會防止水與氧氣之透過，又一旦有水與氧氣等透過到表面，亦因顏料之

特殊機能反應爲鈍態化合物而防蝕。

Epoxy粉體塗裝鋼筋會遮斷水，氧氣之透過且耐碱性良好，與混凝土之附着力亦良好，適用於鋼筋混凝土中之鋼筋保護。又以混凝土表面處理來看，能防止氧、二氧化碳、水份、塩份之滲透被膜中聚氯乙烯樹脂塗料，矽樹脂塗料、氟樹脂塗料，都是有效的防蝕材料。

表 1. 混凝土的劣化原因及現象

要因		劣化之原因	劣化現象	與潮位之關係			
				海水帶	潮汐帶	飛沫帶	潮風帶
化學的要因	來自外界之作用	硫酸塩作用	Ettringite 之形成與膨脹破壞	○	○	△	
		氯化物作用	形成溶解性塩類與多孔化	○	○	△	
	內部的要因	水泥硬化體之溶解	$Ca(OH)_2$ 之溶解與多孔化	○	○	△	
		使用反應性骨材	Ettringite之形成與膨脹破壞。	○	○	△	
物理的要因	來自外界之作用	（氣象作用） 凍解、融解	膨脹及表面層破壞		△	○	
		乾燥與濕潤之反覆	由於拘束下之發生龜裂。		△	△	○
			塩類之濃縮及結晶化的膨脹壓		○	○	
		碳酸化	PH之降低與促進鋼筋腐蝕		△	△	△
		（波浪作用） 漂流、固形物之衝突	混凝土表層之破壞	○	○		
		摩損、渦蝕	混凝土表層之破壞	○	○		
	內部的要因	鋼筋之腐蝕	膨脹裂痕及覆蓋層之破損。		△	○	○

表2. 混凝土中鋼筋之腐蝕要因

	要　　因	因　　子
鋼筋易腐蝕之條件	1.海岸地域 2.污染地域 3.預鑄部材 4.混凝土混和劑 5.利用海砂 6.寒冷地帶構造物 7.基礎構造物 8.下水設備 9.發生裂痕 10.露出了局部份 11.迷失電流	多濕（高溫）Cl^- 濃度 污染氣氛（$SO_4^=$濃度等） 接合部，覆蓋厚度 $CaCl_2$之使用 海水成份（Cl^-，$SO_4^=$ 等）之混入 凍結溶解 酸性土壤 污染下水（工場污水，都市排水）
對鋼筋之腐蝕發生影響之要因	1.混凝土透水性，透氣性及溶入之水成份 2.圍繞混凝土之環境 3.混凝土本身之性質 (A)材料及調合比 (B)打壓程度 (C)覆蓋厚 (D)養生方法 (E)龜裂 4.選擇鋼筋	氯、氧、二氧化碳 Cl^- 濃度 $SO_4^=$濃度，氧及濕度變化 混凝土種類，水灰比、骨材種類與粒子混合劑 混凝土中之空隙 濕度之滲入 經過變化；蒸氣養生 大小及位置 材質、表面狀態加工、靜變力大小
由腐蝕機構來看之要因	1.於鋼筋形成腐蝕電池 2.於混凝土形成腐蝕電流 3.混凝土ＰＨ之降低 4.氯離子之存在 5.硫酸離子之存在	合金成份表面含有物抓傷，黑皮之破壞結晶粒界，靜的及反覆的應力。 氧氣濃度，含有濕份差，塩濃度差，附着面之空隙、龜裂、密度差。 塩之侵入，溶解作用，碳酸化作用 形成氯化鐵，ＰＨ之降低 形成硫酸鐵，ＰＨ之降低

表 3. 鋼筋混凝土構造物之耐久對策與關連要素

	要　　因	因　　子
一般環境下	1.製造慢中性化之混凝土	水泥種類、骨材種類、粒度、混合劑W／C、調合，空氣量、施工程度
	2.材料中不含有害成份	骨材不純物、骨材化學成份、混合劑
	3.正確打造相當的覆蓋厚	配對鋼筋、固定鋼筋與配管關連模型等
	4.注意施工中缺陷	巢穴、龜裂、接連處、分離、下沈等
	5.注意外部來的作用原因	大氣、雨水、漏水、滯水、塩份電蝕、化學藥品等
特殊環境下	6.打造耐凍結融解強之混凝土	水泥組成骨材、混合劑、調合施工W／C、養生等。
	7.打造化學的抵抗性強之混凝土	水泥種類，骨材品質、混合劑、調合施工、養生等
	8.受化學的腐蝕作用時，採取適當保護對策	
海洋環境下	9.充分考慮 1 ～ 8 各項 10.製造氣密性高之混凝土 11.採取充分之防銹防蝕對策	骨材種類品質W／C，施工養生等

表4. 腐蝕環境因子之分類

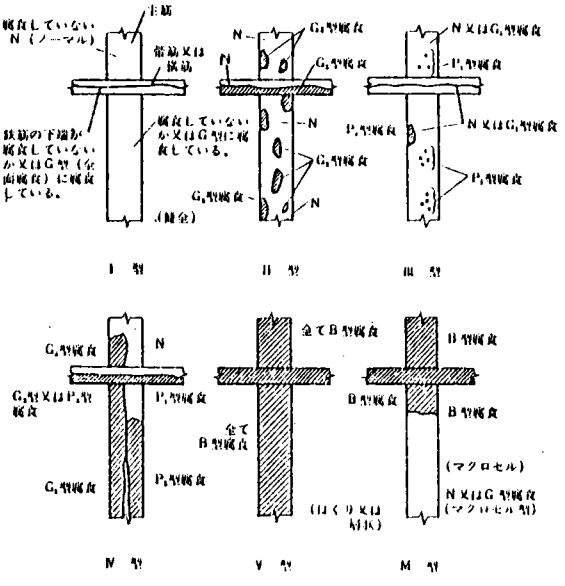
(注)因子影響	一次因子		二次因子		三次因子	
	因子	其內容	因子	其內容	因子	其內容
+	PH (1)	$Ca(OH)_2$ $CaCO_3$及小量NaOH，KOH 水泥品質好壞調合	中性化（碳酸化）	與空氣中CO_2之直接接觸及H_2O中，CO_2溶解入侵之間接接觸	與CO_2接觸之程度	打造之混凝土之粗細、覆蓋厚度、裂痕
−	溶存氧 (2)	混凝土中溶液之組成 溫度	←中性化	同上	同上	同上
			氧之補給	與空氣中之氧之直接或間接接觸	與O_2接觸程度	同上
−	水份 (3)	單位水量（水量）	水之補給 (+補給 (−補給	設置場所、氣候 (水中 (陸上	水之侵入程度	同上
−	氯離子（或其他塩類） (4)	由混凝土材料中NaCl $CaCl_2$塩類混入	$CaCl_2$等之減少	與水泥之反應 (?)	——	——
		硬化後由外部來之入侵	氯離子之補給	設置場所 (海濱地帶 (海水中	氯離子之入侵程度	同上
−	加在鋼筋上應力 (5)	P.C, 混凝土	——	——	——	——
−	鋼筋品質 (6)	異種金屬之混入造成局部電池及不同之金屬組織		——	——	——
+	抑制劑 (7)	人爲的混入	——	——	——	——
−	迷失電流 (8)	——	——	——	——	——
−	溫度	反應速度	——	——	——	——

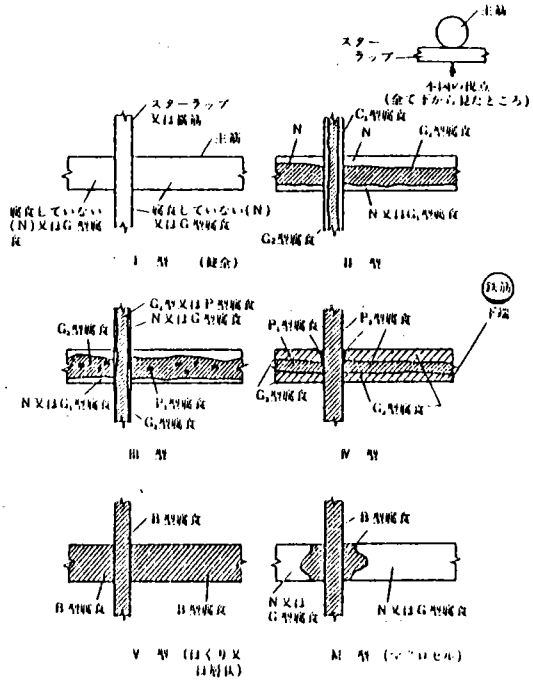
（注） 因子數值大時，腐蝕小時爲＋，相反即爲−

腐蝕分類

形態分類	腐　　蝕	分　　類	腐　蝕　狀　況
N　型	鐵　筋　健　全	(Normal)	鐵筋健全及腐蝕
G 1　型	平坦之全面腐蝕 平坦之部份腐蝕	(Even General) (Even Local)	鐵筋表面有同樣之腐蝕
G 2　型	凹凸的全面腐蝕 凹凸的部份腐蝕	(Uneven General) (Uneven Local)	鐵筋表面成凹凸狀，粗糙狀態之腐蝕
P 1　型	V型的孔蝕（很深）　※1	(Narrow Pits)	鐵筋孔蝕很深之腐蝕
P 2　型	U型的孔蝕　※2	(Gather Pits) (Wide Pits)	鐵筋有成群之孔蝕很深，普遍地有腐蝕
B　型	剝離狀及層狀腐蝕	(Exfoliation) (Banded)	鐵筋生銹如層狀，易剝離之腐蝕

※1　孔蝕單獨存在
※2　孔蝕群密佈着





參考資料「研究結果」

要　　因	文　獻　研　究	實構造物調查研究
混凝土之中性化	• 經20年中性化爲 10mm • 經30年外部灰泥之中性化爲 10mm • 經15～44年中性化爲 1mm～37mm（港灣構造物） • 經20年中性化爲 1.5mm • 施工程度惡劣者（有巢臼處）中性化速度快 • 在屋內中性化經過爲20年灰泥粉飾者 8mm 塗裝裝飾者 10mm混凝土打造者 15mm • 混凝土中性化會增加其壓縮強度	• 經20年平均中性化爲25mm • 經20年中性化最小爲10mm 最大爲70mm • 施工程度惡劣者（有巢臼處）中性化速度快 • 在屋內混凝土之中性化經20年，灰泥粉飾者20mm 塗裝裝飾者 25mm混凝土打造者爲 30mm以上 • 混凝土中性化其壓縮強度會減少
混凝土之水灰比（W／C）	• 水灰比（W／C）越大內部鐵筋越易腐蝕 • 水灰比 60%以下，精密地施工並充分養生鐵筋之腐蝕即小 • 水灰比數越大，混凝土之中性化會越增大 • 水灰比越小，滲透少可提高混凝土之氣密性	• 因混凝土調合爲容積計量無法正確算定其水灰比由壓縮強度來推定其水灰比（W／C)大約爲60～65％
混凝土之塩份含有量	• 塩份含有量越多鐵筋之腐蝕傾向越大 • 學會基準爲 0.04％ • 若不講求特別措施通常混凝土不生銹時其塩份量在 0.03％左右 • 若塩份量超越 0.1％其腐蝕傾向會顯著增大	• 塩份含有量爲 0.09％～1.77％
混凝土的蓋厚	• 蓋厚小者鐵筋之腐蝕斷面之缺陷越顯著 • 若水灰比 55％而使用海水來混合者 蓋厚 7 ㎝看不出鐵筋之生銹 • 若水灰比 70％縱令使用自來水來混合打造混凝土也會看到鐵筋生銹 • 含有氯化物，水灰比在 60％前後，蓋厚 2 ㎝以下鐵筋腐蝕傾向顯然增大 • 海洋構造物之蓋厚要 7.5㎝以上	• 蓋厚爲 5mm～70mm • 不管蓋厚多大內部之鐵筋全部腐蝕

混凝土之裂痕	• 混凝土之裂痕寬度越大鐵筋之腐蝕傾向越大 • 裂痕幅度小會引起鐵筋之局部腐蝕 • 混凝土中不含氯化物時，裂痕 0.2mm 程度鐵筋也會生銹 • 混凝土中含有氯化物，裂痕 0.1mm 程度鐵筋就生銹 • 鐵筋之腐蝕在裂痕寬度爲 0.15mm以下時受塩份含有量左右，裂痕寬度爲 0.15～0.3mm 時增加其影響程度 • 裂痕 0。3mm 以上即不受塩份量影響，而受裂痕寬度而影響腐蝕	• 混凝土裂痕爲 0.1～2.0 mm，內部鐵筋顯著腐蝕
施　工　程　度	• 施工程度不良時，從這部份有空氣、水份、氯化物之入侵使鐵筋腐蝕 • 施工程度不良時，從構造上看對耐久性能有不良之影響	• 施工程度不良，發生巢穴膨鬆部份，內部鐵筋就顯著腐蝕
環　境　條　件	• 混凝土之調合或施工程度都一樣時，混凝土中鐵筋腐蝕順序爲： ①工業地區②海岸地區③寒冷地區④一般地區⑤同一土壤中 • 溫度高時，塩份的影響與鐵筋腐蝕狀況與常溫狀態者呈顯不同是促進鐵筋腐蝕之不利條件	• 冲繩縣屬亞熱帶地域整年間平均爲 22.2℃ 冬季亦很少有 10℃以下之日子 • 降雨量比日本全國之平均高還多，比東京多 1.6 倍。 • 濕度一般的高，平均通年爲 77%之記錄 • 有亞熱帶特別之驟雨與颱風之一次多降雨量 • 調查對象建物之立地範圍在 0.6－3.0KM

港灣鋼筋混凝土結構物防蝕技術研討會

Seminar on Corrosion Protection Technology of Marine Reinforced Concrete Structures

防蝕技術—塗裝

主講人：陳文源

台灣省交通處港灣技術研究所主辦

中華民國七十四年八月

防蝕技術一塗裝

陳文源先生主講

壹　塗裝概論

塗裝是一門很深的學問，塗料是精密化學的一部份，除了一般的塗料之外，在太空、在預鑄廠，也用塗料，應用範圍很廣，今天我們的重點是防蝕。「防銹」與「防蝕」兩者差異在那裡？防銹是指自然界中由水分，氧氣作用所產生之銹的防止，防蝕係指人爲環境下所產生之銹的防止，比如說化學液體，留在海水中；在地下有微生物，或者其他因素，除了這兩個外，有人問什麼叫「Paint－ing」什麼叫「Coating」什麼叫「Lining」這個區別，目前我們中國人常常說「油漆，油漆」爲什麼有「油漆」這兩個字，主要是中國人有五千年文化，是的確有它的價值，因爲我們發現用乾性油，用桐油或亞麻仁油來做油漆，凡是能形成一層被覆膜或一層塗膜用來蓋在被保護的物體，這個能乾燥或形成塗膜的我們叫它爲「油漆」，「油漆」的由來就是如此。「油漆」到目前來講，一般油性系的塗料叫「油漆」所以「Painting」應該是用裝飾用的，比如說畫家或室內裝潢的人，他不管是什麼牆，只要是給它塗一種顏色，能夠有美觀，有顏色的區別或漂亮就好，像這樣不注重前處理，也不把髒的東西去掉，比如說水泥牆上有髒的地方，也不將之弄掉，就把它塗上去，塗上一道有顏色的東西，我們叫它爲「Painting」；這種只是裝飾，漂亮而已，其實眞正的塗裝應該叫「Coating」，「Coating」是有前處理，有經過表面處理，比方說鋼鐵，一定要將黑皮去掉，如果是鋼筋混凝土的話，一定要將混凝土內之鹼性綜合，或上面有附著物或有油性的東西去掉，像這樣的前處理，是一定要有膜厚，就是有底漆，中塗漆，面漆，膜厚在500μ以下的叫「Coating」，至於「Lining」，是有前處理，且膜厚超過500μ以上，叫Lining，在上一節課我聽到的PE鋼管也是Lining。

談到腐蝕的因素，有下列四種：

1.工廠本身的化學腐蝕條件。

2.工廠位於濱海地區或工業地區等環境的腐蝕要因。

3.使用條件的苛刻與變化。

4.本身的老化。

這四個加起來就是腐蝕的原因。不過綜合來講一句話，會生銹會腐蝕，原因有二：一個是外在的，另一個爲內在的，內在的是本身有沒有產生電位差，外在的就是外面有沒有腐蝕的環境。

至於以環境分類的腐蝕有下列幾種：

1.溫蝕：水溶液腐蝕，大氣腐蝕，土壤腐蝕，化學藥品之腐蝕。

2.乾蝕：高溫氣體腐蝕，溶融塩腐蝕，釩侵蝕，氫侵蝕等。

3.微生物腐蝕。

再講防蝕方法有六種：

1.從設計來說；在座專家很多，在鋼架結構物設計之開始，如果設計不講究，給它很大的空隙，則會有截露水，截露水如果一直在那裡的話，就會有腐蝕，所以設計也是非常重要之一。

2.其次是防蝕材料之選擇，防蝕材料不僅是要講一些Coat ing，也要注意在海中要用耐海水鋼，暴露於大氣下則要用耐候鋼等，對防蝕材料的選擇，在耐海水最好的東西是鈦，在化學工廠最好用鉭，在耐高溫材料最好用鋯，我們在選擇材料必須曉得的三個條件。

3.環境遮斷法就是把環境遮斷起來主要是給它一個Painting或Coating，就是連續的被覆膜，把它被覆在要保護的物體上。

4.環境處理就是把氧氣去掉，或是把空中之水去掉，就永遠不會生銹，譬如在水中，如果把氧氣去掉的話，一塊鐵放在水中也永遠不會生銹的，環境處理在大區域下無法做，只有在實驗室或小房間內可做到。

5.電氣防蝕法也就是陰極防蝕法，是在水中或地下可以用。除了以上五個問題以外，防蝕技術的先決條件，不僅在防蝕方面，在土木工程或建築工程也跟這個一樣。首先要設計，然後注意材料問題，再過來就是施工，這三個都非常重要，這三個先決條件都做好以後，我們最後常常忽略掉的就是檢查，一件工程做好後，應該好好的檢查一下，所做完的工程，能不能符合我們的規格，都要做檢查，然後

就要做管理，因爲我們常常忽略掉將一個東西做好後就擺在那裡沒有人管，爲什麼要管理呢？因爲環境在變化，我們過去沒有這種環境，但是因工商業發達，附近有許多工廠建起來，所以爲了應付這些變化，必須管理，比如稍微一發現有銹就要塗漆，不要等銹蝕破壞，因爲銹發生時，銹中間電位較高，沒有生銹的地方電位就較低，那麼就發生了電位差，銹後膨脹的體積約爲7倍大，然後愈變愈大，所以我們一定要講究防蝕對策與防蝕管理，將它綜合起來，才能做好防蝕對策。

假使我們要做一個完全防銹防蝕方法有沒有辦法呢？如果在小房間內，我們可以做的到，第一個先做到環境遮斷法，第二做到電氣防蝕法，第三做到環境處理法，但是眞正能夠做到這三樣的可能性很少，但是小房間內我們可以很容易做到，在這之間非金屬被覆的方法，講得最多的是塗裝，然後金屬被覆的方法，這兩天有人講到金屬溶銹是其中一種，或是擴張滲透也是其中一種，這些問題是我們在防銹防蝕方面，我們必須了解的。我們現在講到防蝕法的當中，先要講到塗裝，塗裝所要求的第一個是防銹，第二個才是美觀，因爲沒有防銹作用，在基礎上塗了再漂亮的油漆在上面，都是沒有用的，因爲一生銹起來，有紅棕的東西吐出來了就很難看，所以我們必須先講求防銹再講求美觀。現在科學進步，塗料不但講這兩種還加了一樣東西，就是機能性的塗料，（比如說你要導電的塗料，還有防霉的塗料，或是防熱的塗料）應該要加這一樣。所以在選擇塗料，應該考慮防銹，美觀及加機能性，在這三樣中，在防蝕塗裝設計中，如何能做好設計，首先第一個要講基礎要素，要知道塗在那一樣被塗物上，常常有人沒有認清被塗物，我們要塗水泥牆，水泥牆是鹼性物，要注意的是任何調合漆都是酸性的，將之塗在鹼性上面，不久就會變色，就會脫落，或黏黏的（就是不乾燥），這就是沒有了解被塗物。在木材方面，同樣是被塗物，我們必須了解它是何種木材，要先知道它的含水率，含水率如果不清楚，若是超過8％，則外銷到加拿大，天氣較乾燥，水份跑出來，則塗膜脫落，同樣的，我們對鋼鐵來說，對鋁，對鋅，矽鐵片，塗裝前必須了解其性質，每一種東西有一種塗料，所以要選擇塗料前，必須了解被塗物。

比方說我們常碰到外面的招牌，很多招牌塗油漆後都會脫落，招牌都是用鋅矽鐵板做的，普通油漆匠是選擇最便宜的調和劑，調和劑裡面有脂肪酸，這脂肪

酸與鋅作用產生脂肪酸鋅，脂肪酸鋅的膨脹係數不同，溫度一高一低，上午、中午及下午的溫度反復不停的成一循環，不久膨脹係數的影響，油漆就脫落了，這就是油漆匠沒有了解被塗物的理由。所以我們選擇塗料一開始就要知道被塗物，被塗物條件我們以S表示。附屬要素，就是指使用塗料塗裝要件，以P表示，至於表面前處理程度之條件以C表示，塗裝作業條件以W表示，塗裝作業條件又分兩種一是塗料之作業以Wp表示，一是前處理之作業以Wc表示：

以S做基礎可分爲六種基本方式：

①S→P→Ⓒ→Ⓦ
②S→P→Ⓦ→Ⓒ　適用於P優先或受限制下用之

③S→Ⓒ→P→Ⓦ
④S→Ⓒ→Ⓦ→P　適用於C優先或受限制下用之

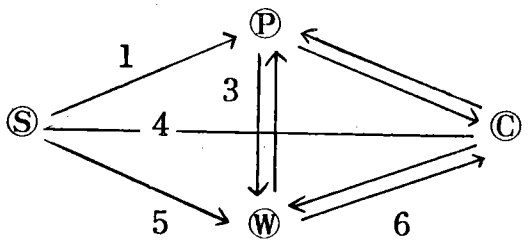
⑤S→Ⓦ→P→Ⓒ
⑥S→Ⓦ→Ⓒ→P　Wp Wc優先或受限制時適用之

附用工事費預算（以M表示之）

耐用年限（以Y表示）

①～⑥中S以（S＋M＋Y）或（S＋M）或（S＋Y）實際應用之。

基本方式之活用



基本方式的選用

(1)一般的或較特殊條件的防蝕塗裝選擇①或②鋼構造物S爲被處理塗裝物以它的必要條件爲基準。

選擇適當的塗料P

然後再選擇適用S→P的Ⓒ最後再選定最適當於S→P→Ⓒ三要素的施工管理方法Ⓦ。

(2)化學工場設備裝置或海岸設施的防蝕塗裝選擇③或④。

(3)因安全問題，公害問題，危險物對象或因特殊環境下的防蝕塗裝選擇⑤或⑥。

防蝕塗料之防蝕機構

(1)表面處理法：

使金屬表面的性質均一化，盡可能均將銹盡量去除， 盡量縮小其電位差及增加表面粗糙度。

(2)由塗裝可得：

金屬面用電氣抵抗性高的物質覆蓋即局部電池二極間插入高抵抗性者，以減少電流量而達防蝕目的。

(3)由塗料可得：

使局部電池二極中因塗料的存在抑制任何一極的反應發生。

㈠替身型（ Sacrificial ）

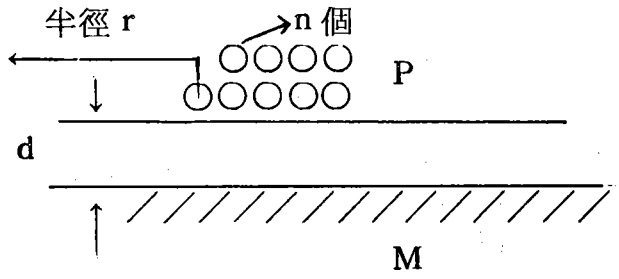
㈡抑制型（ Inhibiting ）

㈢覆蓋型（ Envelops ）

底漆之二大功能

(1)附著力（ Bonding Strength ）

$$\varepsilon = \frac{n\pi r}{6d^3}$$



ε ＝塗膜之附著强度

n ＝爲單位面積中塗料粒子分子數

r ＝塗料粒子半徑

d ＝塗膜中塗料與基材之距離

$d \rightarrow 0$　即 $\varepsilon = \infty$

附著力最大

(2)塗膜防銹功能

$$I = \frac{E - P}{R}$$

P ＝由防銹顏料產生的分極作用（電位即大）

R ＝依塗膜展色劑形成之塗膜電阻

I ＝腐蝕電流

E ＝基材電位

$E \doteqdot P$ 即 $I = 0$

$R = \infty$ 即 $I = 0$

防蝕效果大

影響防蝕效果之要因

要　　因	影響百分率
表面前處理之適當與正確性	49.5
防蝕膜厚與層數	19.1
防蝕材料種類	4.9
其他要因（如環境變化、氣象等）	26.5

表2　表面處理程度與作業方法

表　面	處　理　程　度	作業方法	相關規則
第一種清潔度	黑皮、銹垢、舊塗膜完全除掉，使金屬表面清淨。	噴　砂	SSPC－SP 5 SSPC－SP 6 SSPC－SP10
		酸　洗	SSPC－SP 8
第二種清潔度	銹，舊塗膜除掉，使鋼表面露外，但凹部或狹溢部，仍有少數銹與舊塗膜殘存。	電磨機等動力工具與手工具併用	SSPC－SP 3
第三種清潔度	銹，除掉已劣化之塗膜，露出鋼面但留有未劣化塗膜（活膜）。	同　上	SSPC－SP 2
第四種清潔度	除掉已粉化者，與不良污塵而留下活膜。	同　上	-------

SSPC：美國鋼結構標準

表3　塗裝前鋼材表面處理的各種基準

SSPC（注1）		SIS（注2）	BS 4232（注3）	NACE（注4）	JSRA SPSS（注5）	標準除銹率（注6）
WHITE METAL BLAST CLEANING	SP-5	Sa3	FIRST (NIL)	No 1	Sh3 Sd3	99.9%以上 (-NIL)
NEAR-WHITE METAL BLAST CLEANING	SP-10 (95%以上)	Sa2½	SECOND (95%以上)	No 2	Sh2 Sd2	95%以上 (-99)
COMMERCIAL BLAST CLEANING	SP-6	Sa2	THIRE (80%以上)	No 3	Sh1 Sd1	67%以上 (-80)
BRUSH-OFF BLAST CLEANING	SP-7	Sa1		No 4		
POWER TOOL CLEANING	SP-3	St3			Pt3	
HAND TOOL CLEANING	SP-2	St2				
施工條件及除銹率等用文章表現	SP-10	有相片	( )內表除銹率		有照片及Pt2，Pt1	( )內是最嚴重下之除銹率

（注1）STEEL STRUCTURES PAINTING COUNCIL

（注2）SVENSK STANDRD SIS 05 5900-1967

（注3）BRITISH STANDARD

（注4）NATIONAL ASSOCIATION OF CORROSION ENGINEERS

（注5）日本造船研究協會「塗裝前鋼材表面處理基準」
STANDARD FOR THE PREPARATION OF STEEL SURFACE PRIOR TO PAINTING

（注6）THE-SOCIETY OF NAVAL ARCHITECTS AND MARINE ENGINEERS發行（1969,12）之ABRASIVE BLASTING GUIDE FOR AGED OR COATED STEEL SURFACES之標準值又依表面狀態除銹率

貳　海洋構造物的塗裝防蝕

港灣構造物曝露海上分飛沫帶、潮汐干海帶、海中部及海底土中部。鋼材主要承受海水的腐蝕作用，故需謀求適當的防蝕法，以確保構造物的耐久性。

海水中，海底土中部鋼材可採用電氣防蝕。潮汐干滿帶至海上大氣部主要採用重防蝕塗裝。海中部適用之電氣防蝕，以長壽命的條件設計，故可達到長期間防蝕，但潮汐干滿帶到海上大氣部份採用的塗裝，因塗膜劣化較快不到幾年即生銹。補修困難，無法得到好品質的塗裝，往往補修後不到幾天再生銹。海洋鋼構造物之飛沫帶、潮汐干滿帶的腐蝕最嚴重，會左右構造物耐用壽命。故迫切的需要適合現場施工又能長期耐用半永久性的防蝕材料與工法之開發。

海洋環境下鋼材的腐蝕問題：

(1)海上大氣部

此部份溫度高、海塩粒子多，是嚴酷的腐蝕環境。

(2)飛沫帶

此部份反覆不停受波浪的飛濺濕潤與日曬乾燥，加以塩份或氧之濃縮，溫度變化，受波浪或漂流物的衝擊，海洋生物的付著，產生極嚴重腐蝕。腐蝕速度平均爲 0.3～0.5 mm／y，最大孔蝕部份的腐蝕速度爲 2 ㎜／y 以上。鋼板厚 3 ㎜者 2 年即腐蝕而開孔的例也有。塗膜損傷大很難補修，電氣防蝕沒效果是海洋構造物中防蝕最困難的部份。飛沫帶滿潮位（HWL）直上部腐蝕最大。

(3)潮汐干滿帶

潮汐干滿週期產生侵漬及曝露之反覆情形。鋼樁干滿帶與干滿帶直下的海中部之間形成濃淡氧電池，溶存氧高之干滿帶爲陰極腐蝕量減少，於干滿帶之平均潮位（MWC）附近腐蝕小，干潮位（LWL）下方 1 m 間之腐蝕最大。

(4)海中部

腐蝕形態爲全面腐蝕，應考慮疲勞腐蝕與生物付著塗膜損傷問題，海中部因塗裝或電氣防蝕得到防蝕效果。

(5)海底土中部

埋沒於海底土中部份很少接觸海水，氧氣亦少，是海洋環境中腐蝕最少者。受污染海域含有硫化氫等腐蝕性物質或腐蝕性細菌存在，腐蝕性會增大。又若潮流大的地方，因潮流捲起的砂粒而發生磨損。

2.影響鋼材腐蝕的環境因素

(1)塩份濃度

海水含有各種塩類，爲優良電解質溶液，可促進鋼材的電化學腐蝕。海水中之氯離子所生成的銹，不同於陸上大氣中生成銹之緻密附著力亦較差，因其表面有充分的氧與海水，故腐蝕會連續進行。海水塩份濃度變動受場所或水深影響小，約含有3.2～3.7％ 塩類。河川水流入海洋處，塩份濃度降低溶存氧增加腐蝕會增大。

(2)流速

流動海水氧供給量增大促進腐蝕。水流破壞銹增加腐蝕機會。若使用電氣防蝕電流密度增加，採用流電陽極時，其陽極消耗大。水流攜帶土砂亦會磨耗鋼材。

(3)溫度

水溫上昇腐蝕量增大。水溫上昇10°C，腐蝕量增加2倍。溫度通常因水深增大而降低。

(4)溶存氧

海水中之溶存氧對鋼材的腐蝕反應有支配的影響，溶存氧增加，腐蝕量增大。如潮汐干滿帶直下溶存氧量差距大者，產生濃淡氧電池。海水中之溶存氧寒帶水溫低而溶存氧多，熱帶水溫高 溶存氧量少，於水深方向之分布0～200M水深約有1.3ml／ℓ之差。

(5)PH

PH越低腐蝕速度越增加。除受污染海域，通常PH爲8.1～8.3，深海爲7.5。

(6)海中生物

因付著生物的死滅所發生的有機物或細菌之分解，促進腐蝕。若塗膜有生物付著即造成損傷，於淺海生物付著多，1年付著10cm者亦有。

3.飛沫帶、潮汐干滿帶的防蝕

採用適當的防蝕被覆材料，遮斷鋼材與腐蝕性環境接觸爲最優良的方法。

(1)惡劣的腐蝕環境紫外線臭氧、或海水等，促進防蝕材料劣化的因子；波浪或漂流物之衝擊，生物付著等防蝕材料之損傷因子。

(2)既有構造物防蝕施工的困難：無法充分表面處理；鋼材表面不易乾燥。

4. 複合防蝕法

由於環境不同，所採取的防蝕技術也有所不同，過去單靠塗料塗裝防蝕。現則輔以其他有效防蝕方法，如耐海水鋼、熔融鋅、金屬熔射、超防蝕塗裝、化學內襯、及電氣防蝕等複合化防蝕技術。以達一勞永逸之防蝕效果。如何發展這種防蝕技術，在不同環境下配合不同防蝕技術，除了實驗室之外，在各地進行現場試驗，才能確立有效的防蝕效果。

複合防蝕技術各種防蝕法之適用性（飛沫帶～干滿帶）

防蝕法		新設構造物					既設構造物
		岸壁，護岸，人工島		鋼管基礎	沈箱	浮體構造物	
		鋼矢板	鋼管矢板				
塗裝	一般	○	○	○	○	○	△
	併用玻璃紆維	×	×	○	×	×	△～×
有機內襯	聚乙烯擠壓	×	×	○	×	×	×
	〃 粉體	○	○	○	△	△	×
	樹脂砂漿	○	○	○	○	○	△
	防蝕帶	△	△～×	○	△	△～×	○
無機內襯	———	○	○	○	○	○	○
	使用FRP模型	△	△	○	△	△	○
金屬溶射	———	○	○	○	○	○	×
耐食性金屬被覆	貼板	△～×	△～×	○	○	○	△～×
犧牲鐵板卷貼 耐海水鋼卷貼	———	△～×	△～×	○	○	○	△～×

（注）○適用容易　△適用困難　×不能適用

叁　鋼筋混凝土構造物的塗膜保護

水泥完全水和，即會游離最高35％的Ca（OH）$_2$，其反應式爲$aCaO \cdot SiO_2 + bH_2O \rightarrow cCaO \cdot dSiO_2 \cdot XH_2O + eCa(OH)_2$，硬化後的水泥受大氣中二氧化碳與水份作用，$Ca(OH)_2$緩慢變爲$CaCO_3$，原來混凝土失去碱性而產生中性化現象，鋼筋因而腐蝕，腐蝕達到某一程度即發生膨脹使混凝土產生裂開現象。

混凝土硬化體中之骨材有活潑矽化合物成份存在與水泥中之碱性成份反應而膨脹產生龜裂，或骨材中之酸或塩類化合物之溶解與$Ca(OH)_2$反應產生可溶性物質，引起體積膨脹。

其他如溫度差異，水灰比空氣含量都是內在劣化原因。

海灣或海岸一帶之構造物受到塩害而劣化者最嚴重，塩份浸入情形如下：

1.海塩粒子之入浸

因海浪濺沫，風吹塩份附著於混凝土表面，隨後入浸內部。

2.使用海砂

使用海砂時没洗淨殘留塩份。

3.除冰劑之散布

如氯化鈣等除冰劑會浸入混凝土中。

4.其他混凝土混合材料含有氯離子成份。

5.混凝土中水之浸透引起凍融作用。

使用鋼筋塗裝保護或鍍鋅，混凝土中加入防銹劑使鋼筋在內部不生銹，都是積極性的內部防止方法之一，但應經試驗證明其不影響結構作用。

被塗物的認識：

被塗物的特性重點如下：

①帶碱性

②吸引性大

③易發生裂痕

④有呼吸作用

⑤中性化

⑥水份與其他腐蝕性物質容易透過

針對不同特性選擇適用塗料才能有效地防止劣化。

使用底材與平滑化用材料，底材（ primer ）又稱填平材（ sealer ），目的是防止吸收作用與堅固混凝土表面。增加付著力。

表面的凹凸或劣化部份，斷面缺損部份之修復與填補，可使用高分子聚合物水泥，樹脂水泥，環氧樹脂。其性能爲曲屈，拉張强度接著性，耐藥品性最優秀者，而且硬度大，機械特性好，腐蝕物遮斷性大又無收縮性。

混凝土表面塗裝塗料採用適合被塗物特性，遮斷外在劣化因子或抵抗力強而兼有美觀性能者，一般用壓克力乳化塗料，聚氯乙烯塗料，溶劑型壓克力塗料。但惡劣環境與高度防蝕，使用環氧樹脂塗料與聚氨基甲酸脂樹脂塗料較多。至於飛沫帶與潮汐帶，超重防蝕都採用玻璃磷片系塗料。超厚膜型有環氧樹脂塗料或玻璃纖維襯環氧樹脂塗料。

把塗裝系依混凝土部材種類與使用條件列表如2，塗裝系如A，B，C。

表－2

塗裝系，依混凝土部材之種類或使用條件，由下表所示A類，B類，C類三種中來選定

塗 裝 系 的 分 類

分類	混凝土部材種類與使用條件
A類	PC部材使用一般用塗裝系統
B類	鋼筋混凝土部材所用塗裝系統
C類	難重新塗裝的地方，可予想到嚴重腐蝕之構造物，特定部位所用塗裝系（長期防蝕型）

A類的塗裝系

工程		使用材料	塗裝條件			塗裝間隔
			膜厚（μ）	使用量（mg／m²）	塗裝方法	
前處理	底漆	Epoxy 樹脂底漆	—	0.10	無氣噴塗（刷塗或滾塗）	每一工程之間隔一天以上十天以內爲標準
	補土	Epoxy 樹脂補土	—	0.30	補土刀	
中塗漆		Epoxy 樹脂中塗漆	60	0.32（0.26）	無氣噴塗（刷塗或滾塗）	
面漆		PU 樹脂面漆	30	0.15（0.12）	無氣噴塗（刷塗）	

B類的塗裝系

工程		使用材料	塗裝條件			塗裝間隔
			膜厚（μ）	使用量（mg／m²）	塗裝方法	
前處理	底材漆	Epoxy 樹脂或 PU 樹脂底漆	—	0.10	無氣噴塗（刷塗或滾塗）	每一工程之間隔一天以上十天以內爲標準
	補土	Epoxy 補土	—	0.30	補土刀	
中塗漆		柔軟型Epoxy 或柔軟型PU樹脂中塗漆	60	0.32（0.26）	無氣噴塗（刷塗或滾塗）	
面漆		柔軟型PU 樹脂面漆	30	0.15（0.12）	無氣噴塗（刷塗）	

C類的塗裝系

工程		使用材料	塗裝條件			塗裝間隔
			膜厚（μ）	使用量（mg／m²）	塗裝方法	
前處理	底漆	Epoxy 樹脂底漆或PU樹脂底	—	0.1	無氣噴塗（刷塗或滾塗）	每一工程之間隔一天以上十天以內爲標準
	補土	Epoxy 樹脂或聚乙烯酯樹脂補土	—	0.3	補土刀	
中塗漆		厚膜型 Epoxy 樹脂或聚乙烯酯樹脂中塗漆	350	1.20	無氣噴塗	
面漆		PU樹脂面漆	30	0.15（0.12）	無氣噴塗（刷塗）	

港灣鋼筋混凝土結構物防蝕技術研討會

Seminar on Corrosion Protection Technology of Marine Reinforced Concrete Structures

鋼材組織與結構—破裂分析

主講人：李驊登

台灣省交通處港灣技術研究所主辦
中華民國七十四年八月

鋼材組織與結構—破裂分析

李驊登博士主講

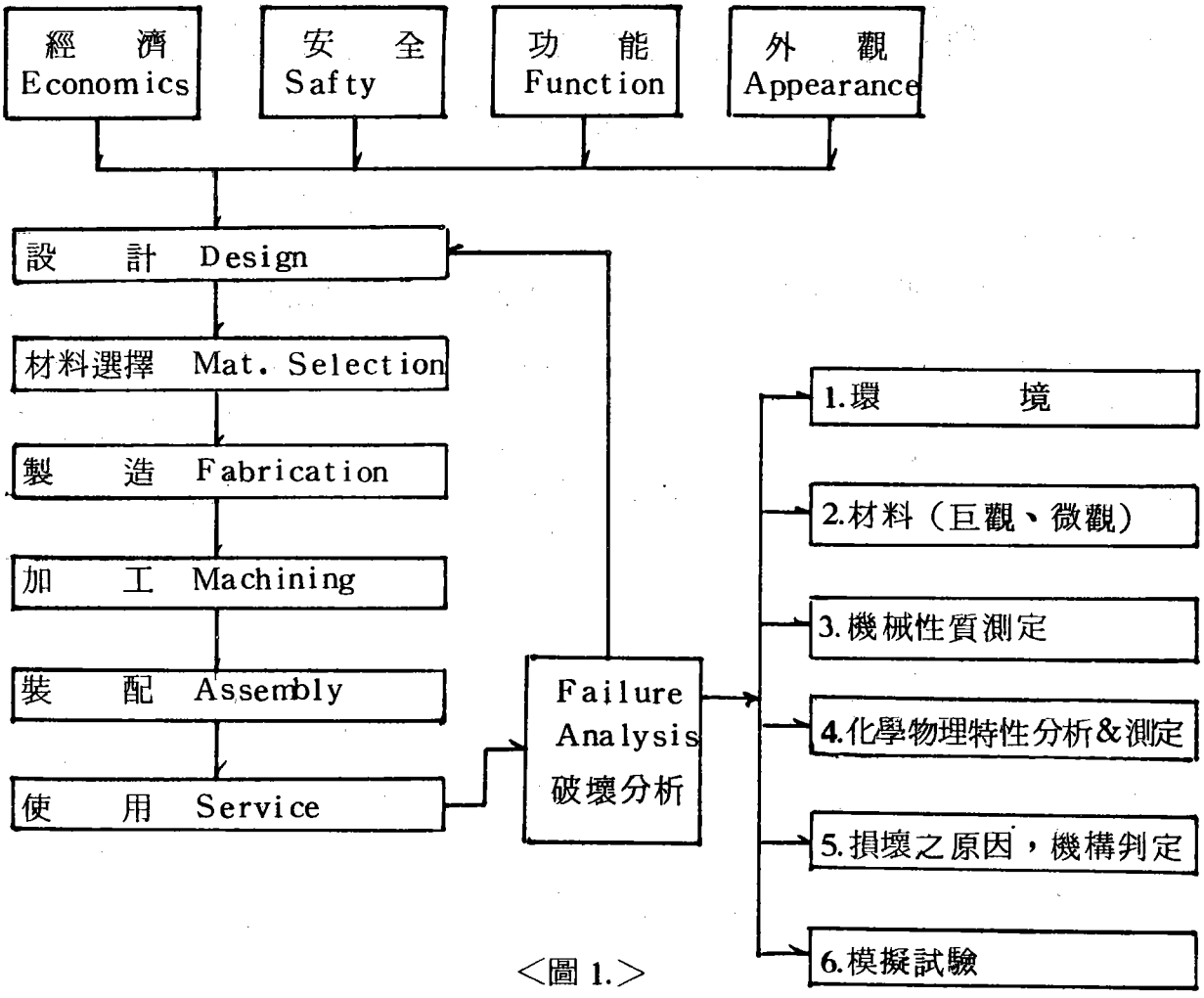
一、摘要：

本文主要是從鋼材金相組織之觀點，對破壞之形成，利用光學顯微鏡（Optical Microscope)，掃描式電子顯微鏡（Scanning Electron Microscope)與穿透式電子顯微鏡（Transmission Electron Microscope)作組織金相與破斷面之觀察。並由機械性質之測定、化學物理特性之分析，及設計、製造與使用狀況之檢討，作鋼材結構破壞分析。

二、前言：

在工程與結構，技術趨向複雜的今天，金屬元件仍佔絕大多數，任一組件一旦發生破裂，工程上之損失實不可計數，故事前的防範與分析設計，乃至使用壽命之預估，遂成工程成敗之關鍵，而其應用及理論即建立在對破壞成因與斷裂問題分析上的了解以及對材質之認識，故爾破壞之分析遂成一門專門之學問。

破壞分析在研究上是一個多角度的問題，其所涉及之層面，包涵甚廣，從設計、材料之選擇、製造、加工、裝配乃至於使用環境狀況，任一發生問題都有可能成爲破壞之成因，故這不只需要專業知識之淵博，同時也要求經驗上之豐富，如此才能由斷裂之現象觀察，作全面之分析了解，找出成因所在，作防止之對策，茲將破裂分析所涉及之各項相關因素，繪成圖表如圖 1.



<圖 1.>

至於破裂分析工作可概分爲二部份：

1.特性分析與測定
- 化學性質：耐蝕性、酸、鹼、組成元素…等。
- 物理性質：導熱性、電、磁…等。
- 機械性質：硬度、拉、壓、彎、疲勞強度、潛變、沖擊、摩耗…等。

2.組織檢驗
- 巨觀結構：型貌、斷口、尺寸變化。
- 微觀結構：顯微組織、金相、破斷面、析出物、碳化物、夾雜物、缺陷、二次相等。

三電子光學儀器：

破裂分析工作主要是利用電子光學儀器如掃描式電子顯微鏡（SEM）穿透式電子顯微鏡（TEM）掃描穿透電子顯微鏡（STEM），電子微探儀（EPMA）

光學顯微鏡 (OM) 作研究分析，它可將圖像放大到幾十倍甚至到百萬倍，從而不但可作巨觀形貌之分析，也可作微觀顯微金相分析，同時亦可進行微區之成份分析，因此被廣泛地用在破裂事故之研究分析。

圖 2.爲各款儀器之功能比較：

	解析度	有效放大倍數	景深
人眼	0.2mm	1 : 1	—
OM	0.2μm	1,000: 1	0.2μm
SEM	10 nm	20,000: 1	35μm
TEM	0.2nm	100,000: 1	20μm

有效放大倍率及解析度以TEM 爲優，但SEM之景深大，可作崎嶇面，即斷口之觀察，EPMA主要作元素的定性與定量分析，而所分析之質點最小可至 1μm ，更小質點之分析則需借助裝配有能譜儀 (EDS : Energy-Dispersive Spectrometer) 之SEM或STEM，唯定量方面精確度不如EPMA上利用波譜儀 (WDS : Wavelength -Dispersive Spectrometer) 所作之分析。STEM能同時作試件之掃描與穿透觀測，在作對照分析上甚爲有利。

四破裂成因探討

鋼材或金屬材料之破壞，往往可透過對破壞面之觀察檢驗，直接由斷面之形貌、組織、特徵、巨觀與微觀之特徵，確定斷源位置，裂紋擴展方向，受力方式與環境介質影響，從而推論斷裂之成因。

造成鋼材斷裂之外在條件如負載、環境因素等是多樣的，而鋼材本身的物理特性、化學成份、熱處理狀況又各不相同，但斷裂的機構，即斷口之基本顯微型態卻是有限的，有規律可循，即任何斷口，大致可經由形貌與顯微組織之分析，加以歸納、分類，從各種可能組合之外貌型態，研究其特徵，追溯斷裂時之工作條件與環境，從而可判定斷裂之機構及成因，斷口分析在斷裂事件分析中之重要性由此可知。

茲將斷裂依其成因加以分類，可大致歸納爲如下幾種類型：

1.由於機械應力

1. 1.強力破裂 (Forced Fracture)

1. 1. 1.滑移破裂 (Slip Fractures)

A. 穿晶窩式 (Transgranular Dimple Fractures)

B. 粒間窩式 (Intergranular Dimple Fractures)

1. 1. 2.脆性破裂 (Brittle Fractures)

A. 劈裂 (Cleavage Fractures)

B. 粒間脆裂 (Intergranular Brittle Fractures)

1. 2.疲勞

1. 2. 1.高周疲勞 (High Cycle Fatigue)

1. 2. 2.低周疲勞 (Low Cycle Fatigue)

2.由於腐蝕

2. 1.孔蝕 (Pitting)

2. 2.粒間腐蝕 (Intergranular Corrosion)

2. 3.應力腐蝕 (SCC: Stress Corrosion Cracking)

2. 4.氫介入腐蝕 (Hydrogen Induced Cracks & Fractures)

2. 5.氫介入應力腐蝕 (Hydrogen Induced Stress Corrosion Cracking)

2. 6.腐蝕疲勞 (Corrosion Cracking)

3.由於熱應力

3. 1.潛變 (Creep)

3. 2.焊接裂紋 (Welding Cracks)

3. 3.淬硬裂紋 (Hardening Cracks)

3. 4.研磨裂紋 (Grinding Cracks)

3. 5.熱震裂紋 (Thermal Shock Cracks)

3. 6.熱裂 (Hot Cracks)

4.由於機械應力、腐蝕與熱應力綜合作用，

現分述如下：

1.由於機械應力：

1. 1.強力破裂：

鋼材受過負載時所造成之破裂，一般依鋼材之材質特性，可分爲延性破裂及脆性破裂二種，延性破裂又稱滑移破裂，是因破裂之前，鋼材本身吸收大量的能量，產生巨大之滑移塊象，故其斷口有大量之變形存在。

脆性破裂則相反，斷裂之前，材質本身並不吸收能量作變形，其外加負荷所作之功全部或大部分消耗在形成斷裂面所需要之功。故其斷面鮮有塑性變形，而沿一定晶面裂斷，故其斷面亦稱之爲"劈裂斷面"。此外，強力破裂之破壞形態又可分爲穿晶 (Transgranular)及粒間 (Intergranular) 破裂二種。當裂紋穿過晶粒擴展時是爲穿晶斷裂，而沿著晶界擴展時，則形成粒間斷裂。

1. 1. 1.滑移破裂：

A) 穿晶窩式

金屬在外力作用下，作巨大變形時，各處的變形程度並不相同，裂紋之生成，首先是在夾雜物 (Inclusion) ，析出物 (Precipitate)，第二相或晶界等處形成微裂 (Microcrack) 之後，隨著應變之增加，逐漸擴展成孔洞，致使其與基地分離，最後，孔洞變大連結在一起，導致破裂（圖 3.），斷口上，其外觀由於局部之塑變，造成凹陷之小坑洞，稱之爲窩坑（Dimple)或韌窩，窩底易見夾雜物或析出物之存在，在拉力破裂之場合，由於鋼材之縮頸現象（Necking)與剪力破壞的影響，造成巨觀上之杯錐狀 (Cup & Cone) 形貌（圖 4. 5.），其與窩坑之存在是爲二大特徵。

B) 粒間窩式

是屬於粒間破裂之一種，巨觀外貌上屬無明顯之變形，但從顯微金相上，在晶界處可發現由於小顆粒之析出物如碳化物、硫化物或夾雜物導致之局部塑變，造成晶界弱化，在外力作用下導致斷裂（圖 6.）。

1. 1. 2.脆性破裂：脆性鋼材在外力作用下所引起的破裂。

A. 劈裂：

外力作用下，晶體沿一定晶面裂斷，是爲劈裂斷口。在金屬學上，依晶

體結構可知，劈裂是破壞原子間之鍵結而生成的，而晶體最密排堆積面間之距離最大，其鍵結力最弱，是故劈裂面往往沿其最密堆積面擴展。例如，屬於體心立方（BCC）之肥粒鐵鋼材之劈裂面爲｛110｝而屬於面心立方(FCC)之鋼材易沿｛111｝劈裂，至於六方最密堆積（HCP）則沿｛0001｝面，所以晶體的滑移系（Slip system)在此扮演著重要角色，當然外力與滑移面的夾角亦有關連。

又鋼材在低溫或應變速率較高的場合下均傾向於脆性劈裂。劈裂面當由一晶粒傳遞至隔鄰晶粒時，由於晶粒之取向不同，扭轉晶界之存在，裂紋之擴展在鄰晶上會造成劈裂台階現象，而後由小台階滙集成大台階。正如河流之滙集，故此種形態之劈裂外貌稱爲"河流圖紋"（River-like pattern）（圖 7.）由裂紋上追溯，可探究出斷裂之起源所在，是爲特徵。

B. 粒間脆裂：

粒間脆裂主要是由於微量元素在晶界偏析（Segregation)或晶界之強化而斷裂，顯微裂口呈冰糖之光滑塊狀，此外在許多情況下，斷口上往往具有穿晶又粒間破裂，此時稱爲混合裂口。

1. 2.疲勞：

鋼材受交變應力之荷載下，發生遞增的局部永久性變形謂之疲勞。所施加之應力雖然低於材料之抗拉強度，但由於應力重覆之作用，仍會產生裂紋或斷裂，此爲疲勞斷裂。

疲勞斷裂與材質、環境、應力強度因子△K，應力波形及頻率等因素有關，其所造成之斷口，往往有所謂疲勞紋（Striviation)之生成，此種形貌，極易分辨，（圖 8.）此外有些情況下更可由疲勞紋間距之測定，推算裂紋擴展速率與交變應力之大小，在分析上具有重大之意義。圖 9.爲一由於鑄造缺陷—縮孔（Sh-

rinkage)所造成之疲勞斷裂。疲勞斷裂雖經多年之研究，但到目前爲止，在航空動力、海洋結構、運輸工具部門之事故中，乃屬最重要之主因，故對改善疲勞強度，提高疲勞壽命，分析接近工作條件下複雜應力作用時，疲勞裂紋之生成，擴展及其影響因素，仍屬重要研究。如圖10.爲交變應力下之擠入（Intrusion）及擠出（Extrusion)現象，在表面所形成之疲勞微裂源。

疲勞斷裂之類別，依成因可分爲機械疲勞、熱應力疲勞及腐蝕疲勞三類，如依加載之類別可分爲拉壓疲勞、彎曲疲勞、扭轉疲勞及接觸疲勞。按疲勞斷裂壽命分則可分爲高周疲勞（High Cycle Fatigue）及低周疲勞（Low Cycle Fatigue)。低周疲勞過程因在大應力作用之下生成較大之塑性疲勞故又稱爲應變疲勞或大變形疲勞，高周疲勞過程，以彈性應變爲主，一般以控制彈性應力恒定下進行試驗，故爲低應變之疲勞亦稱之爲應力疲勞（Stress Fatigue）或小變形疲勞。

一般低周與高周疲勞壽命之分界Nt，規定在 $10^4 \sim 10^5$ 周次低於Nt 之壽命範圍屬於低周，高於Nt 則爲高周疲勞，材料愈硬Nt 愈小，如鑄鐵之 N.t 在10.左右。

2.由於腐蝕導致破裂

腐蝕爲一種電化學反應，是由於鋼材與環境之介質發生化學變化，形成化合物（氧化鐵），導致破壞。如圖11.

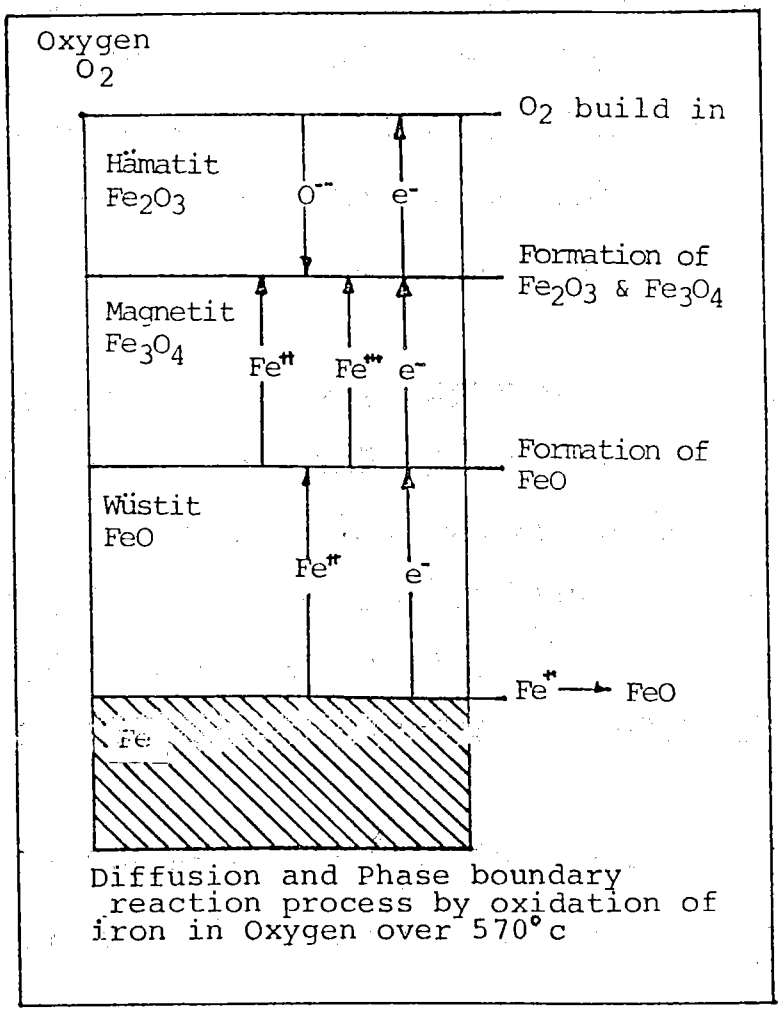


圖11. 鋼材之氧化腐蝕表面氧化物之生成順序

2. 1.孔蝕：

鋼材內之不均一性，或濃度差異所引起之局部腐蝕現象，而常以針狀或細孔出現，孔蝕現象從外觀上不易查覺，用重量損失法，測得重量損失甚微，或幾乎無法測量，但由於其深入組織內部，在破裂事故中屬於最危險之一種。

2. 2.粒間腐蝕：

晶粒間或晶界處之腐蝕爲粒間腐蝕，如不銹鋼在熱處理中由於含高鉻量之碳化物在晶界處生成造成近晶界處晶粒之缺鉻現象，相對於鄰近區成爲陽極，故沿晶界上起粒間腐蝕。

2. 3.應力腐蝕：

鋼材在應力與腐蝕介質雙重作用下所發生之破裂謂爲應力腐蝕破裂（SCC: Stress Corrosion Cracking）其特點在於應力與腐蝕介質二者之相乘作用，即在無應力作用條件下，只有在與強腐蝕介質接觸時在短時間會破壞，而在無腐蝕介質存在時，只有當鋼材上之應力超過抗拉強度時，才會斷裂，所謂相乘作用即當應力與腐蝕介質共同存在作用時，破裂往往在遠低於抗拉強度之應力條件與介質腐蝕性很輕微的情況下，短時間生成破裂，而破裂之前屬無顯著之變形或生成物，而被忽略，以致形成惡性破裂事故。圖12爲鋼材受應力腐蝕生成粒間破裂之斷面。

2. 4. 氫介入腐蝕與氫介入應力腐蝕：

鋼材中含有過量之氫（成H_2），所引致之損傷或破壞謂之。至於氫之介入，鋼材中氫之由來，可以是在鋼材使用之前的處理過程中介入，如熔煉、酸洗或電鍍等處理過程，也可以是在使用中由含氫之環境中吸入。而造成鋼材之脆化現象。在有應力作用之場合中是爲氫介入應力腐蝕，而應力可以是外加之負載應力，也可以是內部殘留應力。

低強度材料如軟鋼或鋁，在氫介入場合會在表面生成汽泡謂之起泡（Blistering）此爲介入之氫原子夾雜物或微裂等不連續處，偏聚成氫分子，體積增大造成內壓力，而中心表面約束力小，故易在表面形成汽泡。

又酸洗或電鍍之過程，若鋼材中，尤其是高強度鋼料若含有數種之夾雜物，則由於吸氫現象，易造成微裂，在低應變速率之拉伸場合，氫會慢慢聚集在夾雜物附近，使該區局部脆化，斷裂後之斷口上會出現白色光點，稱爲雪斑（Snowflake），或魚眼（Fisheye），是爲特徵。

2. 6. 腐蝕疲勞：

腐蝕疲勞是在交變應力與腐蝕介質之共同作用下所生之裂損現象，常見如：海上平台之錨鍊，化工設備構件、石油機械構件及露天各種起重運輸、工程機械，經常受風吹雨淋、濕度、塩份、天氣之影響，均易生腐蝕疲勞破壞。

3. 由於熱應力：

3. 1. 潛變：

鋼材在恒定應力作用下，發生緩慢而持續之變形現象謂之潛變，應力可以是

拉應力、壓應力、扭轉應力或彎曲應力，也可以是複合應力，但對許多實際狀況引起潛變之應力主要是張應力。溫度的要求實際上亦無限制，可以從絕對零度到材料之熔點，都可能在應力作用下發生潛變，而一般依溫度大致可分爲高溫潛變與低溫潛變，高溫潛變是指在金屬原子易於生回復及再結晶之溫度以上之潛變行爲，通常是在熔點、溫度之½以上。

潛變破裂之顯微組織在斷口上往往有空孔（ Pore ）之形成，此爲差排與差排間及差排與結晶缺陷之交互作用產生堆積之效果，顯微分析，空孔之形成，在形態上可分爲二種。

A、楔形孔（ Wedge Type）: 在晶界上形成通常在高應力、低溫下容易生成，呈楔形。

B、圓孔（ Cavern Type）：亦在晶界上堆積，呈圓形孔，而其排列一般與主應力呈垂直或僅作小角度之傾斜。

如在高溫高應力作用下，破裂初期，裂紋擴展主要機構爲擴散，故呈粒間破裂，後期則因截面之減少與塑性變形之增大，而造成穿晶之破裂。

工程上常見之潛變破裂在如鍋爐工程、熱交換器、汽渦輪機組件等高溫使用下之場合。

3.2.焊接破裂：

焊接后或焊接過程中，熱力與機械應力因素作用之影響，導致破裂，其可能之成因，除了焊接條件不當之外，焊料之錯誤選擇，預熱不夠，或突然淬冷，冷却速度過快，不當之接合等，都可能導致焊接破裂。

更進一步探討，焊裂之形成大都是由於焊接熱之影響，在冷却過程中導致內應力之生成，造成裂紋。巨觀之分析，可由焊區上及焊接熱影響區（ HAZ）上裂紋之位置及取向作成因判斷。顯微金相分析，屬粒間破裂，斷口處之晶粒顯示圓滑晶界面，在焊區斷裂之斷口則呈樹枝狀特徵。

3.3.淬硬裂紋：

鋼材淬硬時由於淬冷速度之不均勻造成內應力之生成，導致淬裂。

3.4.研磨裂紋：

對高強度之硬化或回火鋼料，在作表面銑、車、研磨機械加工，由於局部生成之熱在近表面處產生巨大之拉應力，造成微裂，而隨后之再硬化更擴大裂紋，形成所謂研磨破裂。

巨觀上研磨破裂易由其表面之網狀裂紋識別，微觀金相上，裂紋取粒間走向，呈脆性粒間破裂，橫斷面則往往有再硬化金相組織之生成，可資鑑別。

3.5.熱震破裂：

鋼材受到溫度一次或多次反覆突然改變之影響，熱應力在表面上熱脹冷縮之結果生成裂紋，而垂直擴展至鋼材內部是爲熱震破裂，其基本型態仍屬於脆性破裂與研磨破裂類似，在巨觀上亦是在表面上，首先生成網狀裂紋，微觀金相上則在裂紋面上有多量氧化物之生成，覆蓋表面是爲特徵。（圖13.、14.）

結論：

透過各種精密量測儀器如穿透式電子顯微鏡（ＴＥＭ），掃描式電子顯微鏡（ＳＥＭ），穿透掃描電子顯微鏡（ＳＴＥＭ）或一般金相顯微鏡（ＯＭ）觀察鋼材之組織結構，與斷口之形貌特徵，由此可將鋼材之破裂，歸納、分析成數種規則之形態，再由定性與定量之分析，工作條件狀況與歷史之追踪查証，可鑑定機件失效破裂之原因，從而改進設計，製造程序，工作條件或材料，達到防範破裂於未然，延長使用壽命之目的。

本文僅將斷裂之種類，依其成因，或斷口型態作分類，分別探討裂紋形成之影響因素，及斷口所呈現之巨觀與微觀金相特徵，作一檢討歸納，以爲鋼材失效鑑定之參考。

Reference:

1. G. Thomas & M.J. Goringe:"Transmission Electron Microscopy of Materials."John Wiley & Sons. (1979)

2. J.I. Goldstein & H. Yakowitz:"Practical Scanning Electron Microscopy." Plenum Press. N.Y. (1979)

3. S.T. Rolfe & J.M. Barson:"Fracture and Fatigue Control in Structures." Prentice-Hall (1977)

4. H.O. Fuchs & R.I. Stephens:"Metal Fatigue in Engineering." (1980)

5. VDEh:"Riss- und Brucherscheinungen bei metallischen Werkstoffen." Verlag Stahleisen mbH. Duesseldorf (1983)

6. Allianz:"Bruchuntersuchungen und Schadenklaerung." Allianz Versicherungs-AG Muechen und Berlin (1976)

7. H. Schumann:"Metallographie" VEB. Deutscher Verlag fuer Grundstoffindustrie (1980)

8. A.G. Gray:"Source Book in Failure Analysis." ASM.(1976)

9. H.-T. Lee:"The Difference on Transformation and Precipitation Behaviors of Maraging Steels in Relation to Chemical Compositions" (Ger.) 16. Kolloquium EDO, Sep. 11-16,(1983) Antwerp, Belgian.

10. G.G. Chell:"Developments in Fracture Mechanics - I" Applied Science Publischers LTD. London (1979)

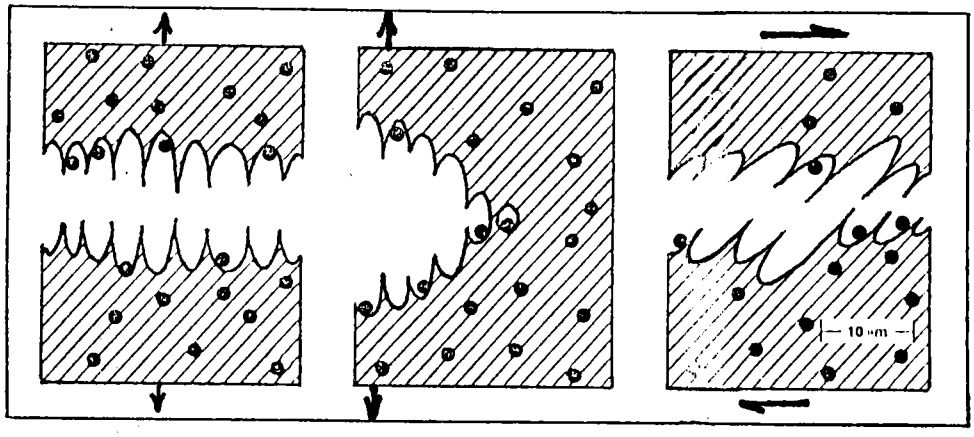


圖 3 ：不同作用力下孔洞連結破裂情形

圖 4 ：韌性鋼材拉伸斷裂后典型杯錐狀斷面及縮頸現象。(18. : 1.)

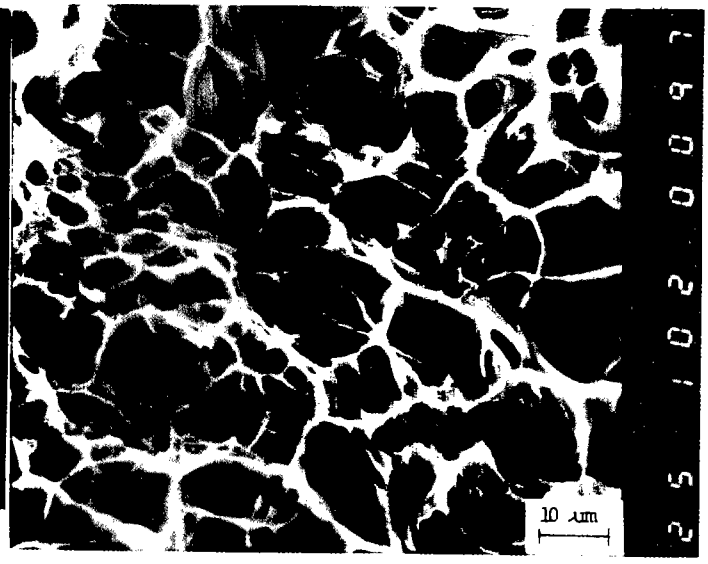
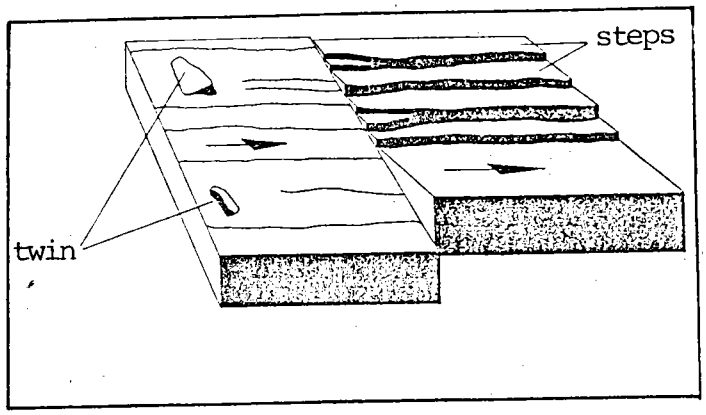


圖 5 ：韌性斷裂中心部份窩坑之生成。(見圖 4) 100 : 1.

圖 6 ：粒間窩式斷裂，在晶界表面有窩坑之形成。(1340 : 1.)

(A)



(B)

圖 7 ：劈裂斷口形成"河流圖紋"之特徵(A)爲示意圖

(B)爲實際斷口金相。

圖 8 ：疲勞破裂典型疲勞紋。

圖 9 ：由於鑄造缺陷—縮孔（ Shrinkage)所導致之疲勞破裂。

圖10 ：交變應力作用之擠入（ Intrusion)及擠出（ Extrusion ）現象造成表現面上之微裂，即爲疲勞源。

圖 12　碳鋼在 80℃含有 34.7 %之 $Ca(NO_3)_2$ 之水溶液中的粒間應力腐蝕破壞。

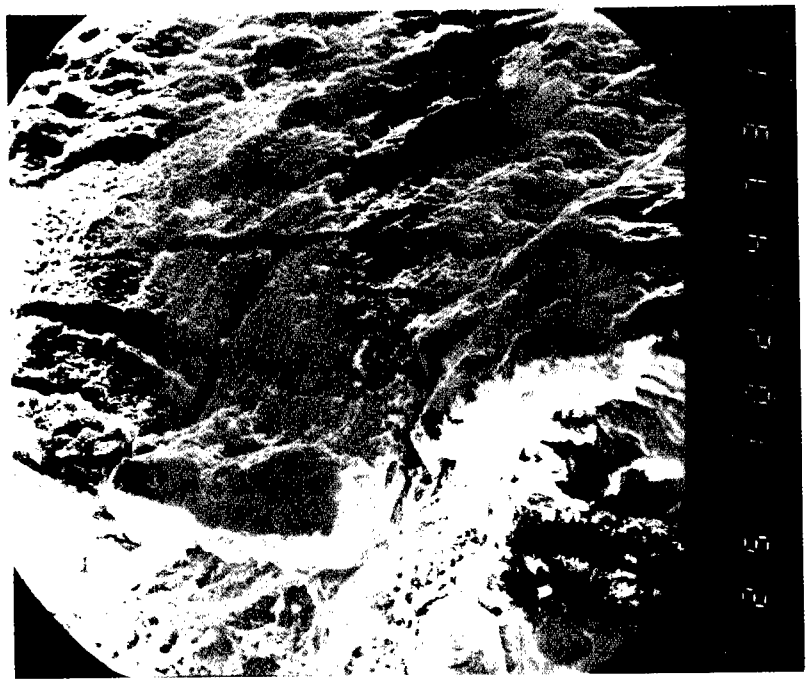


圖 13　高強度麻時效鋼熱震破裂試驗後之表面裂紋及生成物（ 60°⇄700°C ，2000 次）（ 1000:1 ）

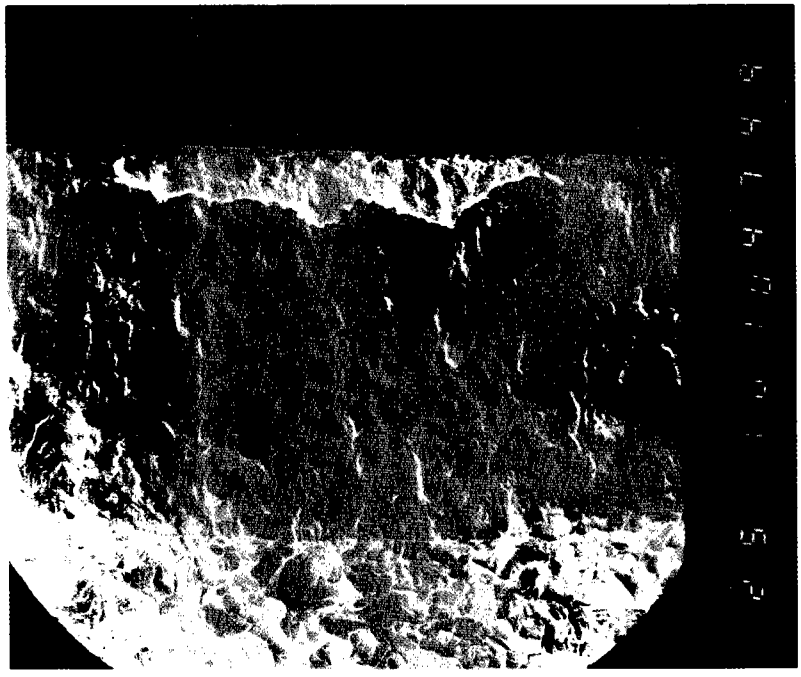


圖 14　同圖 13 爲熱震裂紋之縱斷面，由裂紋前進之波形與最前端裂紋線界可推斷裂紋擴展速度（ 100:1 ）

港灣鋼筋混凝土結構物防蝕技術研討會

Seminar on Corrosion Protection Technology of Marine Reinforced Concrete Structures

混凝土中鋼筋腐蝕的探討

主講人：黃兆龍

台灣省交通處港灣技術研究所主辦
中華民國七十四年八月

混凝土中鋼筋腐蝕的探討

黃兆龍　博士

混凝土中鋼筋腐蝕的探討

黃兆龍　博士

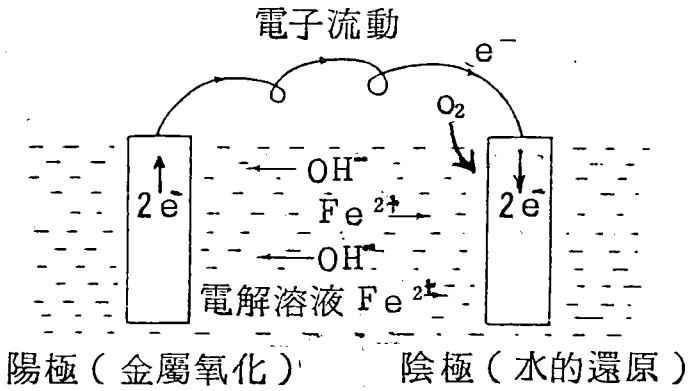
一、前言

鋼筋混凝土構造物中的鋼筋由於混凝土提供鹼性保護〔1，2，3，4〕，所以在正常品質狀況下鋼筋是不易產生腐蝕破壞的，可是由於台灣本島四面環海，空氣潮濕；工廠林立，環境污染；傳統混凝土施工品質的低劣，常造成鋼筋腐蝕的現象，以致鋼筋周遭混凝土脫落，影響結構安全性及美觀性，爲了謀求預防及解決鋼筋腐蝕的問題，造成鋼筋腐蝕的機理及因素須加以探討分析，如此才能獲得最有效的處理。

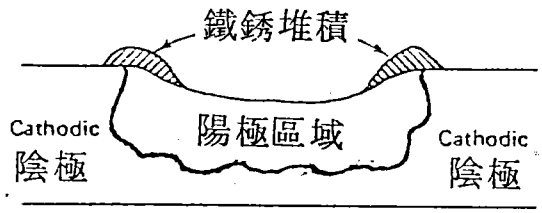
鋼筋腐蝕的最初跡象是鋼筋周遭混凝土的棕色銹斑〔1〕，由於腐蝕的數量較少，而其產生的膨脹張力遠低於混凝土拉應力，因此混凝土不致破壞，但若沒有及時扼阻，則由於惡性循環大量鐵銹繼續形成，而鐵銹體積爲原有鋼筋體積二倍，因而產生甚大的膨脹力，此膨脹作用力將大於混凝土拉應力，以致裂縫產生。嚴重者更可能局部混凝土保護層剝落。所以鋼筋混凝土在鋼筋腐蝕之初即應加以處理，以免腐蝕擴大。

二、電化腐蝕（Electrochemical Corrosion）的一般機理

鋼筋混凝土內鋼筋的腐蝕機理與一般金屬的腐蝕除了環境因素不同外，基本上均同樣須俱有陽極（Anode），陰極（Cathode），電導通路（External Conducting Path），電流（Corrosion Current）及電解溶液（Electrolyte）等五大要項，否則腐蝕即行終止，此五要項如圖一所示〔3〕。



(a)



(b)

圖一　金屬的腐蝕(a)電化腐蝕基本條件(b)單一鋼筋的生銹〔 3 〕

(1)陽極（ Anode ）

陽極是氧化反應（ Oxidation)的地方，此種反應使金屬離子化而放出電子。

$$Fe \rightarrow Fe^{2+}\text{（液態）} + 2e^{-} \qquad \text{公式一}$$

(2)陰極（ Cathode ）

陰極則產生水的還原反應（ Reduction ）。在基性（ basic ）溶液中這種反應將使水與空氣中的氧（O_2）吸收游離電子而形成氫氧離子（OH^{-}）。

$$2H_2O + O_2 + 4e^{-} \rightarrow 4OH^{-} \qquad \text{公式二}$$

一旦氫氧離子產生，金屬離子才會與之結合而形成沉澱物，進而氧化產生鐵銹〔 $Fe(OH)_3$ 〕。

沉澱作用：$Fe^{2+} + 2OH^- \rightarrow Fe(OH)_2$ 公式三

氧化作用：$4Fe(OH)_2 + 2H_2O + O_2 \rightarrow 4Fe(OH)_3$ 公式四

(3)電導通路（ Conducting Path ）

由公式一及二可看出，氧化還原作用均須有電子的移轉，所以有良好的導電路綫，腐蝕作用才可順利進行，因此導電性愈差，腐蝕反應速率愈會受到干擾而遲滯。

(4)電流（ Corrosion Current ）

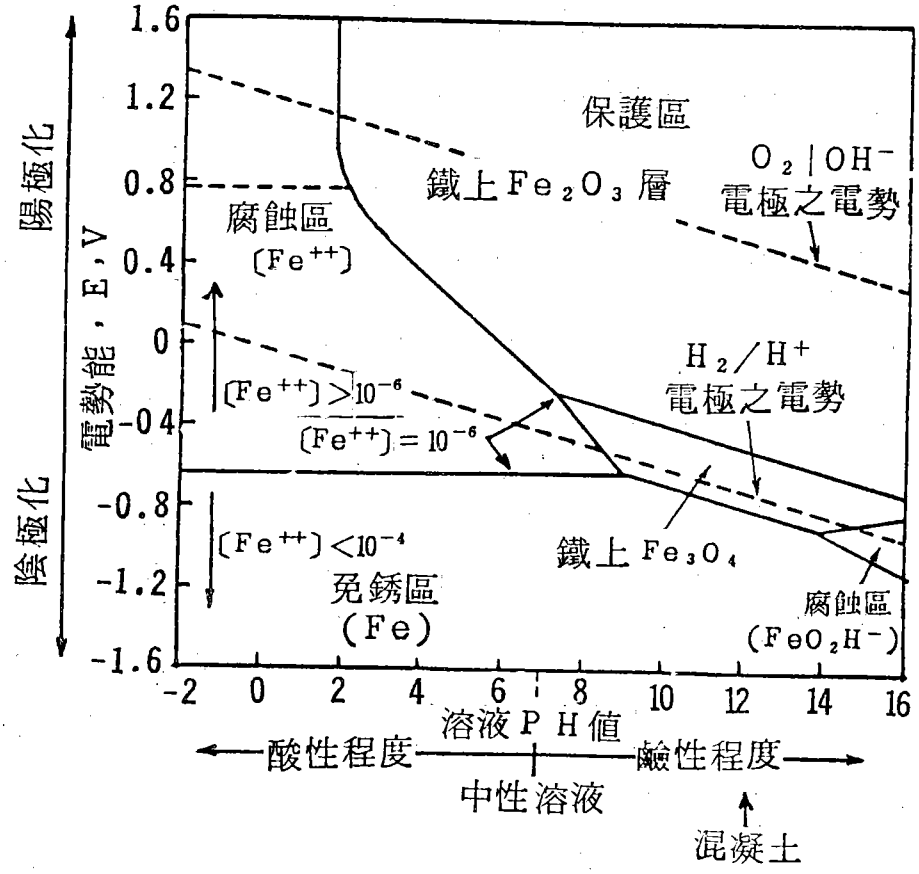
腐蝕的產生必須要有足夠的電子數才可使離子化反應順利進行，換言之要有足夠的電動勢（ Electromotive ）才可使電子流動。

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

電化腐蝕又稱濕腐蝕（ Wet Corrosion ），顧名思義即必須在濕氣或水份狀況下才會有氧化還原反應發生。在潮濕狀況下，離子的移動速率遠比金屬氧化（ Oxidation）擴散作用快，所以金屬腐蝕的速率相當快，倘若無濕氣供應，離子移動將受干擾而中止腐蝕。

對於混凝土內之鋼筋，通常由於水泥水化所提供的鹼性環境，因此鋼筋外表產生的保護性氧化鐵膜（ $\gamma - Fe_2O_3$ ）得以確保，所以腐蝕反應不會發生。這種鹼性環境若純由水化生成物氫氧化鈣〔 $Ca(OH)_2$ 〕提供則其PH值約爲12.4，若加上水泥中少量的鹼性氧化物 Na_2O 及 K_2O 則其PH值將提高至13.2以上〔 5 ，6 〕，由圖二Paurbaix圖之PH－電勢能關係可以看出除非PH值降低至9以下或昇高至14以上，否則腐

蝕將無法產生。通常ＰＨ昇高的可能性極少可以不考慮，然而ＰＨ降低的現象則非常可能，因爲空氣中的二氧化碳在適當的濕度下（ 100 ～ 20 ％ ＲＨ）甚易與Ｃ－Ｓ－Ｈ膠體及氫氧化鈣〔 $Ca(OH)_2$〕起碳化作用（ Carbonation ）而產生碳酸鈣（ $CaCO_3$ ）的酸性物質，見公式五及六，但其反應速率深受混凝土滲透性性質的影響，若水灰比大，滲透性大則碳化作用愈深入且愈完全，而且此作用亦會使Ｃ－Ｓ－Ｈ膠體發生碳化收縮造成表面裂縫，更加速碳化反應的進行，所幸此種碳化反應速率基本上相當緩慢。



圖二　Pourbaix 之ＰＨ－電勢能簡化關係圖

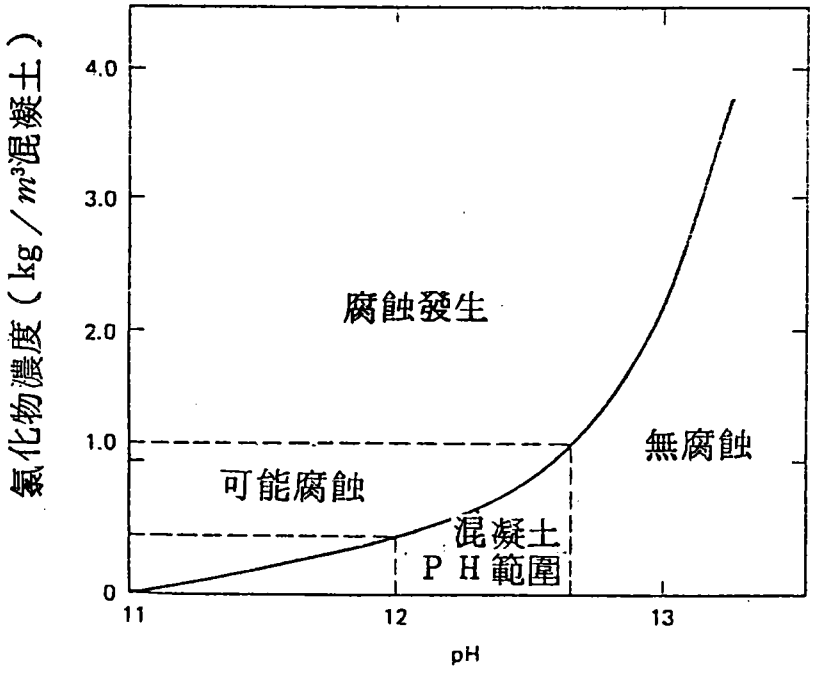
碳化作用：

$$CxSHy+\overline{C}\rightarrow C_{x'}\cdot SH_y+(x-x')C\overline{C}+(y-y')H \qquad 公式五$$

$$CH+\overline{C}\rightarrow C\overline{C}+H \qquad 公式六$$

式中C，S，H，$\overline{C}$分別表CaO，SiO_2，H_2O及CO_2

除了碳化中性作用影響外，混凝土內若含有或外界有氯離子（$C\ell^-$）浸透入的話，則將造成鈍化氧化膜（Passive Oxide Layer）的破壞，以致即使在較高PH值環境下，腐蝕仍然易於發生。這種影響可以由圖三明顯的看出，隨着氯離子的提高，有效保護的PH環境亦隨之應提高〔3〕。但這祇限於游離的氯離子而言，倘若氯離子與其它物質化合成氯



圖三　氯化物對鋼筋腐蝕環境酸鹼值的影響〔3〕

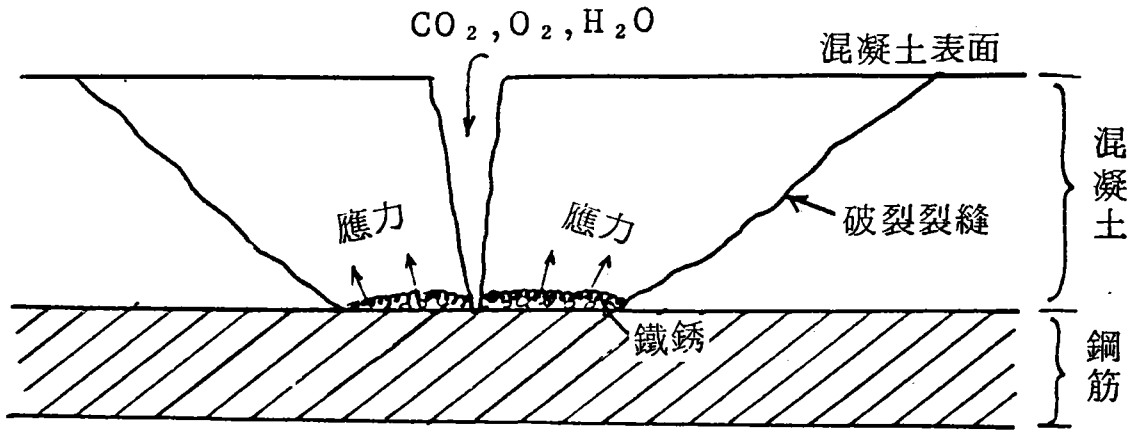
化物則其影響減低。水泥中的C_3A熟料礦物即俱有此種冲淡作用，見公式七，而形成氯鋁化鈣水化物（Chloroaluminate Hydrates），因此水泥中含C_3A礦物有抑制腐蝕的功能，依公式七C_3A至少需3.4％以上才可平衡。

$$C_3A+CaCl_2\cdot 2H_2O+8H_2O \rightarrow C_3A\cdot CaCl_2\cdot 10H_2O \qquad \text{公式七}$$

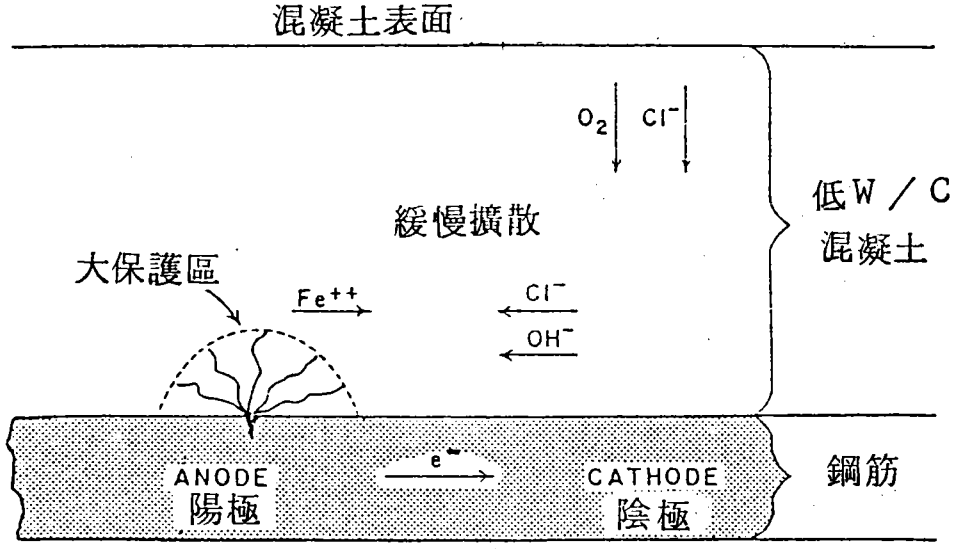
通常這種游離氯化物可由摻料（$CaCl_2$早强劑），水（氯消毒的水）、骨材（如海砂、海石），海水的侵蝕、冲刷等方式帶入。

當然以上是假想無裂縫混凝土狀況下，要是結構混凝土由於力系不平衡造成張力裂縫時，則濕氣、氧氣可直接侵入，滿足電化腐蝕的條件促使腐蝕加速大。

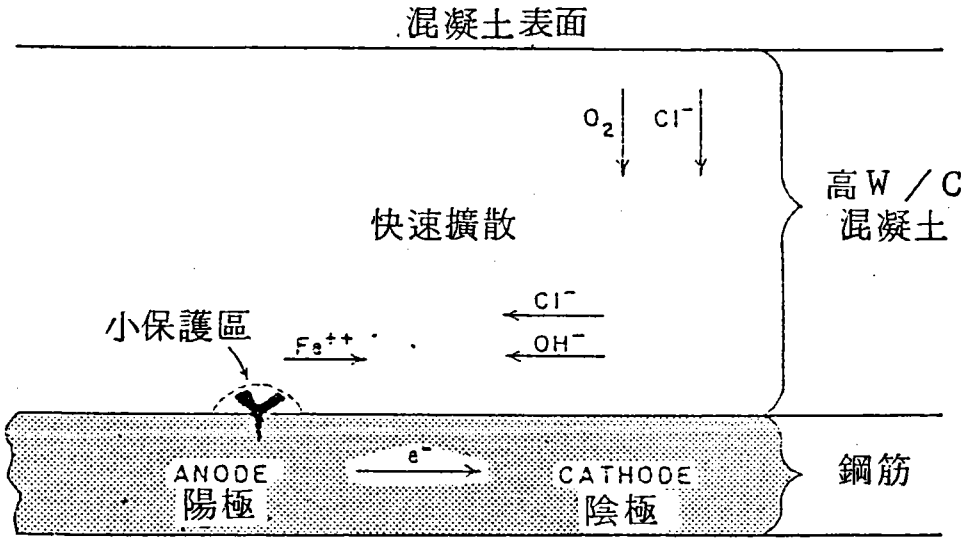
綜合以上數點，可以知道造成混凝土中鋼筋腐蝕的簡單機理爲①混凝土破裂②混凝土中性化或③氯化物的侵入以致鋼筋在潮濕空氣條件下得以進行一般金屬的電化學腐蝕反應。有裂縫混凝土其腐蝕爲直接性的，見圖四，而無裂縫混凝土其腐蝕速率則受混凝土滲透係數所支配，換言之品質好的混凝土其腐蝕性極低。圖五至圖七爲簡示混凝土品質良窳所造成腐蝕的示意例子〔1〕。低水灰比及良好養護的混凝土其滲透性低，所以氧氣（O_2），氯離子（Cl^-）和二氧化碳（CO_2）擴散至鐵／水泥漿介面的速率非常緩慢，相對的氫氧離子（OH^-）被溶出的機率降低，電導性受阻，電流腐蝕反應因而受到遲滯。同時，由於水灰比小毛細孔減少且孔徑較小，反應產物（鐵銹）的擴散步調更慢，而進一步阻止腐蝕的進行，見圖五。圖六則顯示相反的例子，但在無特殊大孔的狀況下，鐵銹的形成仍侷限在一定範圍，而有一小的保護區，倘若有大孔泡或泌水所造成的空隙在鋼筋周遭，則保護區不復存在，腐蝕反應因而更爲快速，見圖七。



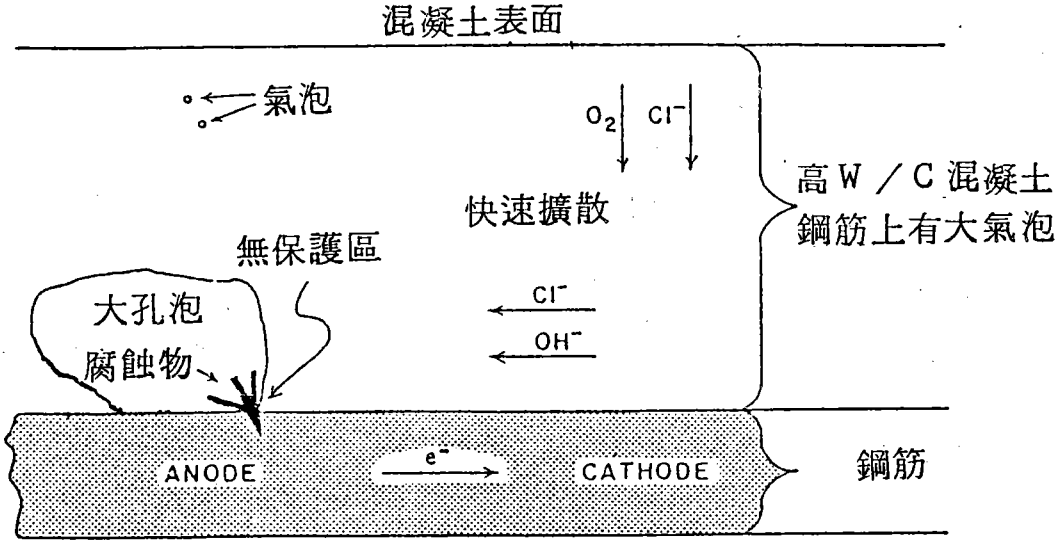
圖四　有裂縫混凝土內鋼筋腐蝕狀況示意圖



圖五　低水灰比且養護良好的混凝土內鋼筋腐蝕的示意圖



圖六　高水灰比且養護不佳混凝土內鋼筋腐蝕的示意圖



圖七　高水灰比且鋼筋上有空氣袋之混凝土內鋼筋腐蝕的示意圖

三、混凝土中鋼筋腐蝕因素分析

鋼筋在鹼性混凝土環境中受到高鹼性保護作用，其鈍化氧化膜不容易受到侵蝕，因此在品質良好的混凝土內，鋼筋腐蝕發生的機率是極少的，然而由於混凝土由材料準備至施工完成、養護等作業過程均容易受到人爲、自然及氣候的影響，以致混凝土預定品質受損產生裂縫等〔 7 ，9 〕，以致增加腐蝕或者潛在腐蝕發生的機率。圖八所示即爲影響混凝土內鋼筋腐蝕的可能因素。

以下謹擇其中較俱影響性的因素加以討論。

㈠氯離子

氯離子對鋼筋腐蝕的影響主要視含水量和陰極極性化所需氧的含量而定〔 9 〕，其影響可由公式八及九看出。

陽極反應：$Fe+2Cl^- \rightarrow FeCl_2 \rightarrow Fe^{++}+2Cl+2e^-$　　公式八

陰極反應：$\frac{1}{2}O_2+H_2O+2e^- \rightarrow 2(OH)^-$　　公式九

氯離子的含量除非水泥中有相當的 C_3A 含量否則均應限制。一般 PH 值爲 12.5 至 13.2 的鹼性環境下，氯含量規定不得超過 0.2 至 2.8 kg／m^3 混凝土〔 10 〕，見圖三。這些氯離子的來源主要爲摻料、水、骨材或暴露於海水所致。

㈡含水量

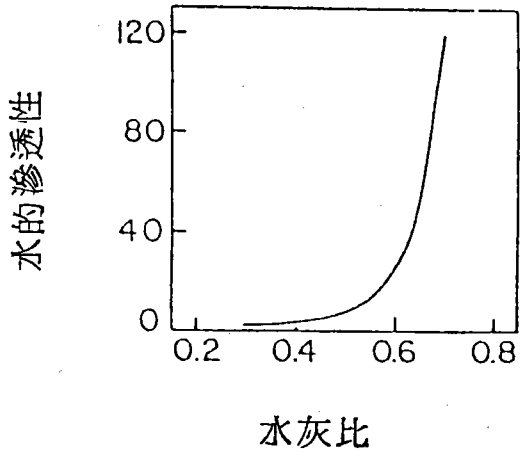
濕氣或含水量的存在是滿足電化腐蝕的必要條件，也是決定腐蝕速率的重要因子〔 2 〕。倘若無濕氣的存在，則腐蝕將中止，參閱圖一及公式二及四，一般腐蝕最嚴重者仍空氣中的濕氣，因爲同時俱有水及氧氣，若鋼筋混凝土長期侵泡水中則腐蝕反而減少〔 9 〕。

㈢混凝土材料

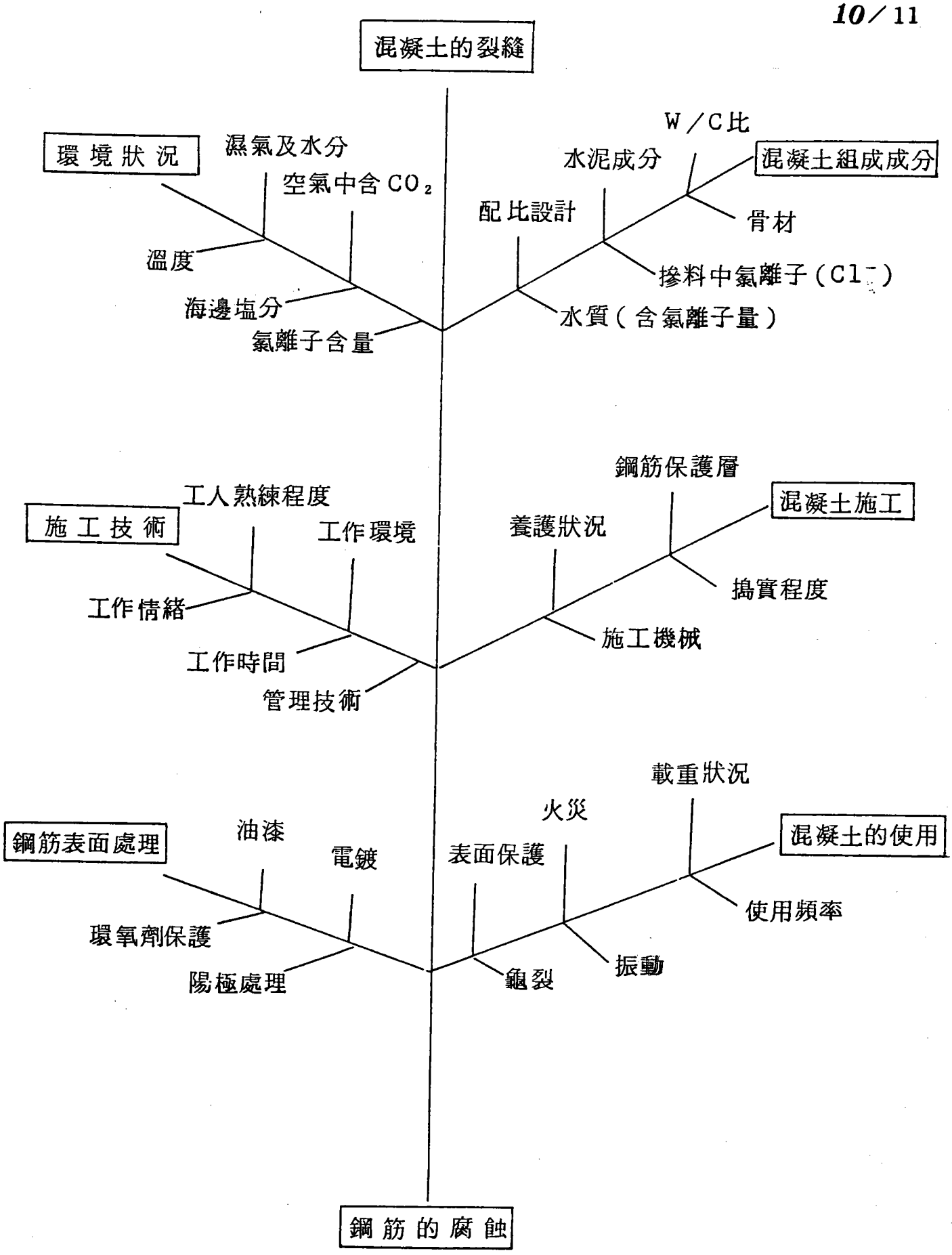
混凝土材料若影響到鹼性物之含量或水、氧氣和氯化物的擴散，均將影響鋼筋腐蝕。這些因素主要因水灰比（W／C），骨材，水泥成分和摻料而異。

1 水灰比（Water-Cement ratio）

水灰比嚴重影響混凝土品質，也決定水及氯化物的滲透性，圖九及圖十顯示出水灰比愈大則水與氯化物的滲透性愈大〔1〕。同時良好品質混凝土對碳化作用的遏阻作用可由表一看出〔11〕，滲透性愈小碳化作用的深度愈少，見圖十一〔12〕。



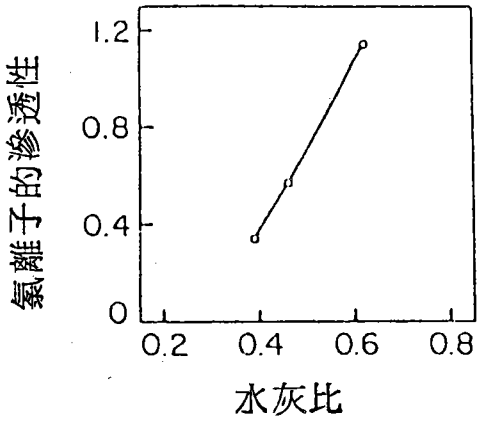
圖九　水灰比對水泥漿體水份滲透性的影響〔1〕



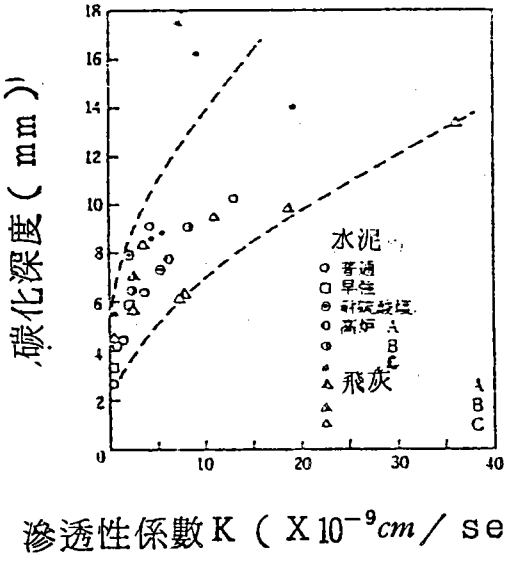
圖八　混凝土內鋼筋腐蝕的可能因素示意圖

表一　混凝土品質對碳化作用之影響

二十八天強度	碳化深度（mm）〔11〕			
	二年後	五年後	十年後	五十年後
20　N／mm²	5	8	12	25
40　N／mm²	0.5	1	2	4



圖十　水灰比與水泥漿體氯離子滲透性的關係〔1〕



圖十一　水泥砂漿滲透係數與碳化作用深度的關係〔12〕

2.骨材

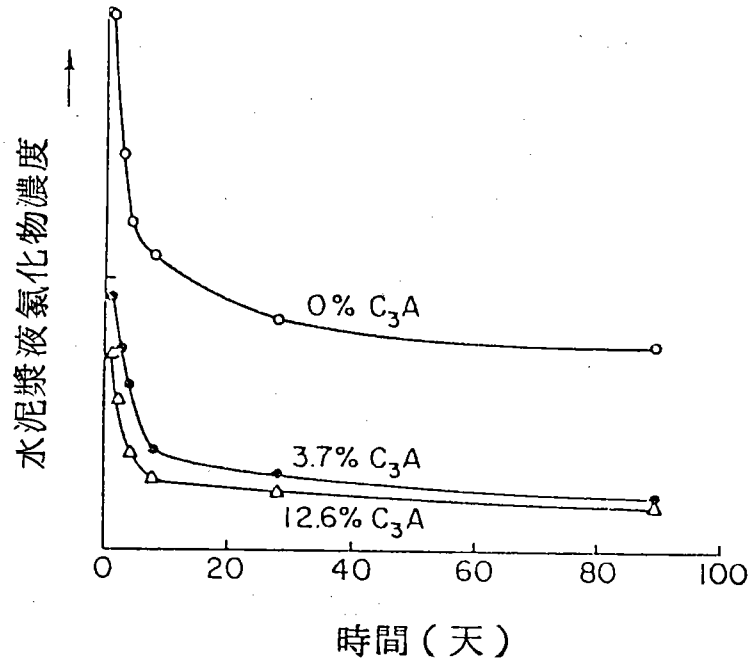
骨材對鋼筋腐蝕的影響主要仍是其對滲透性的影響，骨材粒徑愈大則滲透性愈大，其原因係由於一般骨材常較水泥漿有 10 至 1000 倍大的滲透性係數〔13〕，骨材的級配倘若造成泌水及析離的影響，則將由於形成水、氯化物、氧氣及二氧化碳等有害鋼筋物質之侵入通道，而促進腐蝕的進展。骨材若取自海岸綫或挖泥之堆積場，則可能含有氯化物而有害鋼筋，甚至對混凝土可能會有損害。

3.水泥

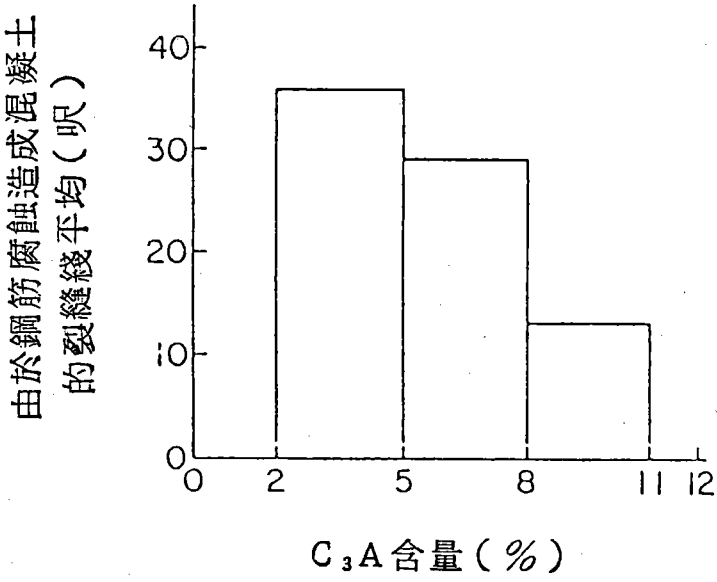
水泥對鋼筋的腐蝕影響是被忽略的。但若由物理性或化學性作用來考慮，它仍然是甚俱影響性的，譬如泌水、鹼質環境、鹼骨材反應，特別是 C_3A 的含量對 Cl^- 的吸附作用，此將使鋼筋的腐蝕性減少，見圖十一〔14〕及十二〔15〕。但若 C_3A 含量過量，則在使用海砂等含 SO_4^{++} 離子的骨材狀況下，可能會造成混凝土由於鈣矾石 (Ettringite) 的膨脹破壞而損及混凝土品質。

4.摻料

使用在混凝土中的摻料種類甚多，基本上大多數有機質材料對鋼筋無腐蝕的影響，然而若考慮如減水劑、强塑劑和輸氣劑等利用減水功能而降低水灰比（W／C）時，摻料即有遲滯鋼筋腐蝕的功用。高爐熟料及飛灰等火山灰（Pozzolans）材料會與氫氧化鈣結合而降低鹼性强度（PH 值），理論上腐蝕會增加，然而事實上由於火山灰反應而增加混凝土緊密程度，使滲透性減低，因而減低腐蝕性。早强摻料如 $CaCl_2$，有助於寒天施工，但由於 Cl^- 的含量，將對混凝土內鋼筋造成嚴重腐蝕的威脅，

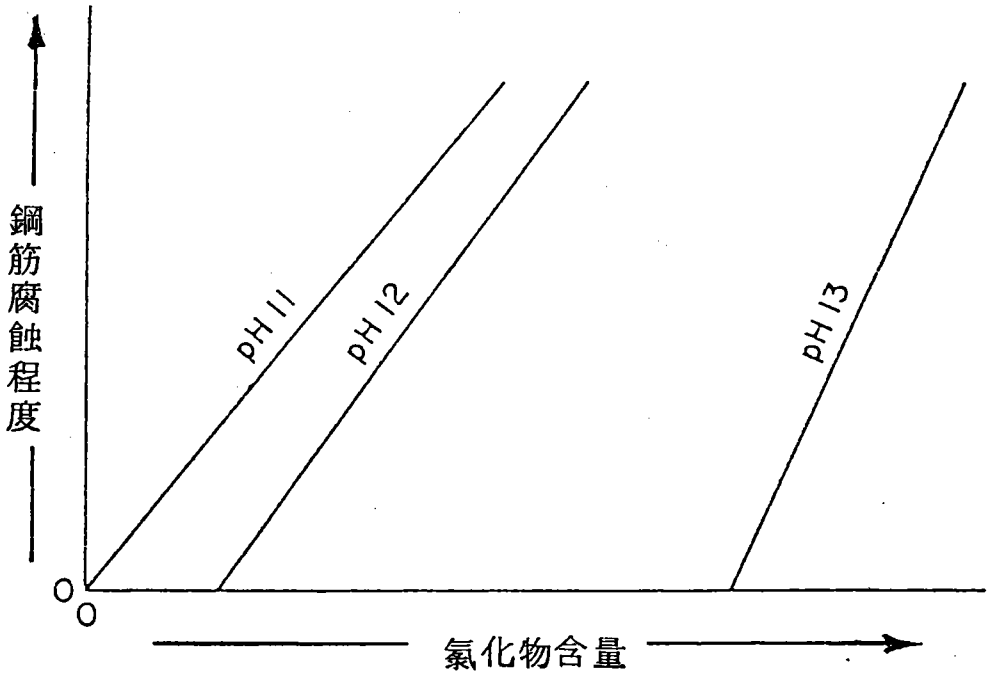


圖十一　在水泥漿溶液中氯化物的濃度隨時間及 C_3A 的含量增加而減低〔14〕



圖十二　C_3A 含量對鋼筋腐蝕造成混凝土裂縫的影響作用〔15〕

見圖三及十三〔 1 〕



圖十三　造成鋼筋腐蝕所需之氯離子濃度隨水泥漿體ＰＨ鹼性之增加而昇高〔 1 〕

5.鋼筋（ Reinforcing Steel ）

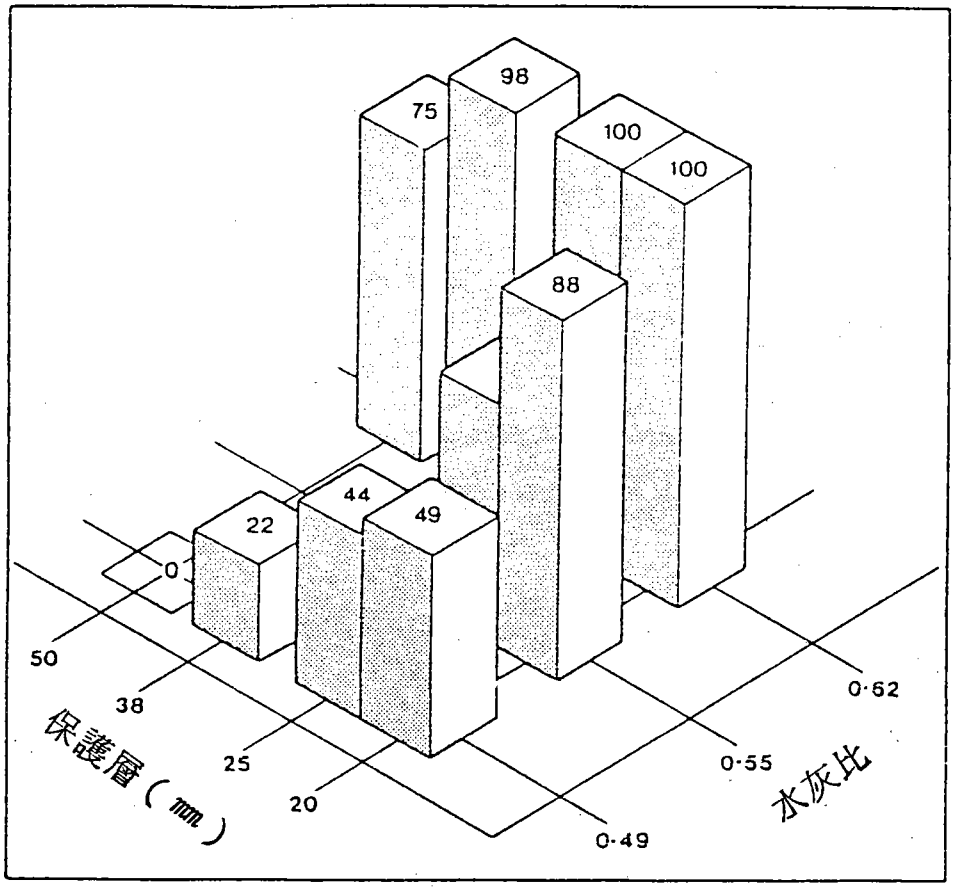
鋼筋品質對腐蝕的影響並無明確的文獻可查。只有可能因混凝土未澆置前鋼筋本身之鐵銹可能影響握裹效果而已〔 1 〕。但是鋼筋所受的應力是支配腐蝕速率的因子，因此對於預力混凝土其含氯量必須加以限制，以免腐蝕過劇。

㈣混凝土施工作業

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

1.鋼筋保護層（Couer of Reinforcing Steel）

鋼筋保護層一般設計上均由規範加以規定，故應視爲無問題，然而事實上施工時常由於施工者未按圖施工，或則保護層間距控制器滑脫或破壞以致保護層厚度不足，此將造成鋼筋腐蝕的擴展，圖十四所示即爲鋼筋保護層對鋼筋腐蝕的影響〔16〕，品質愈佳，則保護層厚度可以愈薄。



圖十四　鋼筋相對腐蝕率與保護層及水灰比之關係〔16〕

2.搗實（Consolidation）

施工作業時搗實的技術常會造成對鋼筋腐蝕的影響。因爲搗實不足，常會有蜂巢（Honey Combing）現象的發生〔7〕，而搗實過度則又可能有過大的泌水及析離，此將造成鋼筋週遭的空氣袋，而有害鋼筋，此例子則有如圖七所示。搗實的程度亦受混凝土工作性的影響，一般施工作業應視混凝土坍度而決定搗實的工具。

3.養護（Curing）

養護對滲透性有相當的影響，養護時間愈長，則水密性愈佳，表二所示卽爲養護時間對滲透性之影響〔3〕。而水中養護較蒸氣養護有較佳之抗腐蝕能力。

表二　水泥漿養護時間對滲透性之影響（W／C＝0.51）〔3〕

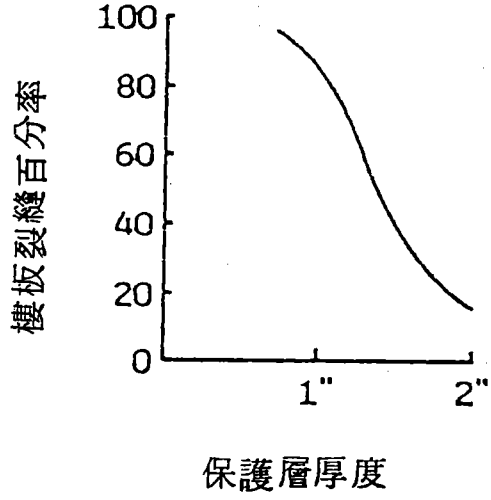
齡期（天）	滲透係數範圍
新拌水泥漿	10－5
1	10－8
3	10－9
4	10－10
7	10－11
14	10－12
28	10－13
100	10－16
240	10－18

㈤工人的技術（Workmanship）

良好的施工技術、工人士氣、情緒等對混凝土品質有相當影響；當然合理的管理、獎懲政策等對品質亦有甚大的影響，進而影響鋼筋的腐蝕抵抗力〔4〕。

㈥鋼筋混凝土的裂縫

鋼筋混凝土由於施工過程、材料耐久的問題、載重狀況、基礎的沉陷等等原因，均將造成混凝土的破裂〔7〕，這些裂縫的形狀、方向及大小對對鋼筋腐蝕有相當的影響〔16〕。因爲混凝土一旦破裂，則外界之濕氣及氧氣或氯化物等將直接與鋼筋接觸，造成鋼筋快速腐蝕。當然裂縫的寬度是決定腐蝕程度的因素，寬度愈大腐蝕也會愈加速，不幸的一般研究文獻僅以混凝土面上裂縫大小而甚少考慮實際鋼筋面上大小問題〔16〕。裂縫與鋼筋的方向關係鋼筋腐蝕程度至鉅，因爲若裂縫與鋼筋垂直，則腐蝕的發生一般可估計爲3倍直徑寬度；然而若與鋼筋平行則鋼筋的鈍化保護膜將全面喪失，造成嚴重的腐蝕現象。前者即爲一般載重不當甚至RC設計時即已假設此部份爲混凝土張力破裂區，而後者爲混凝土施工澆置過程的塑性收縮（Plastic Shrinkage）裂縫或沉陷裂縫（Settlement Cracking）所造成〔16〕。避免塑性收縮裂縫的方式通常爲施工時注意水氣蒸發速率〔7〕，而沉陷裂縫主要仍應增加保護層厚度〔17〕，見圖十五所示。



圖十五　保護層厚度對沉陷裂縫的影響〔 17 〕

四、混凝土中鋼筋腐蝕的控制

鋼筋腐蝕控制主要仍針對產生腐蝕的要項及環境所採取的因應措施，因此腐蝕機理的瞭解有助於抗腐蝕手段的抉擇。由前面所探討的機理及因素，基本上可以看出鋼筋在混凝土中腐蝕的進展是由混凝土滲透性，換言之即品質所支配。若品質俱有潛在性缺陷時，則必須採取延長滲透路綫即增加保護層厚度，或表面塗封來阻滯有害物，或阻斷腐蝕五大要項的方法，表三所示爲部份處理方式及被接受程度〔 2 〕。

㈠氯離子的去除（ Removal ）或抑制（ Inhibition ）

氯離子除去的方法，有使用清水冲淡的方式或利用電化學（ electrochemical ）電滲（ electtro-osmosis ）離子取代法等二種。第一種方法效果不佳，而第二種的成功率甚高。

表三　潛在防蝕處理方式及認同狀況〔 2 〕

防蝕方法			應用時機		潛在需求：被接受程度			
			施工時	施工完成後	肯定	懷疑	現場評估	研究／發展
1　除去氯化物：電化學法＋離子交換				○	○			○
2　腐蝕抑制劑（摻料）（Inhibitors）			○			○		○
3. 混凝土塗封（Seal）	(1)表面（Surface）	①塗膜（membranes）	○	○	○		○	
		②舖面（Overlays）						
		低水灰比	○	○	○			
		乳液改良砂漿	○	○	○			
	(2)低水灰比混凝土	强塑劑（S.P.）	○		○			○
	(3)內部填封混凝土		○		○		○	
	(4)注膠混凝土	①聚合物（Polymers）	○	○	○		○	
		②硫磺（Sulfur）	○	○	○			○
4. 鋼筋表面包封（Coiting）	(1)隔離屏障層		○		○		○	
	(2)陽極處理		○			○	○	
5. 陰極保護（Cathodic Protection）	抑制電流（Impressed Current）		○	○	○		○	

抑制劑的使用效果仍未被全面肯定，需進一步研究發展，使用抑制劑有時會使混凝土强度受到影響。通常被使用的抑制劑爲錫塩類（ Stannous Salt ）、硝酸塩類（ Nitrate ）和安息香酸塩類（ Benzoates ）等氧化物廢料等〔 3 〕。

㈡混凝土塡封料（ Sealants ）

混凝土塡封料基本上分爲二種類型，一種是提供表面屏障（ Barrier ）或遲滯（ Retard ）水、氯化物、氧氣和二氧化碳進入混凝土內；另一類爲滲入混凝土內塡封毛細管孔隙而阻止任何腐蝕物質進入混凝土。

1 防水膜（Waterproof membranes ）

防水膜的材料諸如聚脂樹脂、環氧劑改良煤焦油塗劑、防水膠帶等均爲有效的防水膜形成材料。此類材料爲塗模或粘貼表面上俟乾燥後卽形成防水隔離層。

2 不透水舖面（ Overlay ）

舖設一層低水灰比（ 0.32 ），高水泥因子（ 486kg／m^3 ），低坍度混凝土或良好搗實的混凝土於原有混凝土表面上〔 2 〕，或使用苯乙烯丁基橡膠乳液改良水泥砂漿形成連續性防水膜的方式保護底層混凝土內之鋼筋。舖面處理對氯化物之滲入有相當之阻止效果。

3 全面使用低水灰比混凝土

利用高度減水劑（ High Range Water Reducing Agent ）或强塑劑（ Superplasticizer ）的減水功能使低水灰比高水泥因子的混凝土容易工作，進而達到最佳搗實之高品質混凝土，此對防腐蝕有極佳之效果。

4. 內部填封（Internally Sealed）混凝土

基本上即使用類似乳液改良砂漿舖面等乳液材料，添加入混凝土中，使之形成填封毛細管孔之連續薄膜（Films），因此阻擋氯化物、水、氧氣的侵入〔18〕。

5. 注膠混凝土（Polymer Impregnated Concrete）

將高分子之單體注入硬固混凝土內，部份或全部填封混凝土內之孔隙，然後使之聚合，則可有效防止外界侵蝕物質進入〔18〕，此類單體材料有甲基丙烯酸甲脂（MMA）、苯乙烯（Styrene）或硫磺等易於聚合的低黏性、低毒性材料〔2〕。

㈢鋼筋表面包封（Reinforcing Bar Coatings）

將鋼筋表面以優良的材料直接包封，基本上應用此方法可以不考慮混凝土品質問題，腐蝕問題也無從發生。此類包封材料可分爲二類，即屏障包封（Barrier）及陽極處理（Anodic）包封。有機質材料如靜電粉末處理的環氧劑（Epoxy）、氯化橡膠（Chlorinated Rubber）等常用作屏障包封材料，而鎘、及鋅則常被用作犧牲陽極（Sacrificial Anode）的表面電鍍塗封材料〔2〕。

㈣陰性保護（Cathodic Protection）

陰極保護即是利用反向電流來壓制電化學腐蝕反應，使鋼筋表面極化（Polarization），然而這種方法需採用適當的電壓及電流密度，否則過高的電壓及電流可能使得鋼筋周遭的混凝土產生軟化的現象。

㈤足夠鋼筋保護層（Adequate Steel Cover）

雖然此並未例入表三中，但這是最基本的需求。保護層的厚度視環

境條件而異，在乾燥條件下，無腐蝕可慮，當然保護層的有無並不重要，可是對於近海結構物尤其是水位綫附近等惡劣環境下，鋼筋保護層至少3吋以上〔4〕，但若採用高品質混凝土則保護層可以相對減少。

(六)含水量隔離保護（Moisture Protection）

使用乾燥處理譬如通風、空調等來隔離濕空氣或降低露點（Dew Point），則可以保持混凝土表面及內部的乾燥，避免二氧化碳、水的侵入而達到防蝕的目的。

(七)限制氯化物含量（Limiting Chlorides in Concrete Mix）

限制氯化物含量是消極的處理方式，但非常有效。一般ACI 222或設計規範皆按照混凝土所暴露的環境及鋼筋受力狀況來決定氯離子（Cl^-）的上限值〔4〕。

五、鋼筋腐蝕鑑定技術

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

1.外觀觀測（Appearance）

「有諸於內，形諸於外」內部鋼筋的腐蝕，除非初期的腐蝕，否則一般表面沿鋼筋方向混凝土會有局部鼓起或棕色鐵銹水沿裂縫滲出的外觀，

因此仔細「眼觀」鋼筋混凝土外表，檢查是否有異狀是一般鑑定所必須採行的步驟。

2. 腐蝕電壓測定

利用手提式電壓測定器，如Pathfinder，可以量測出電壓變化的分佈，而預測腐蝕部位及程度。

3. 電磁式厚度檢定器（Pachometer）測定

此爲一種非破壞性電磁儀器（Nondestructive Magnetic Device），用來量測鋼筋保護層之厚度，瞭解施工良窳及提早決定保護層不足時應採之相應措施，如表面塗封等方式。

4. 鑽心取樣

當有鋼筋腐蝕的疑慮，而無法合理解釋時，此時可直接利用鑽機鑽取可能有問題（Trouble）處之混凝土及鋼筋。鑽心樣本可用來觀察初步的鋼筋腐蝕，基本上即爲棕色鐵銹；量計碳化深度；評估混凝土品質；和量測保護層實際厚度等用途。必要時該試體亦可以電子顯微鏡觀察腐蝕的晶相成分及混凝土其它耐久性問題的構成因子，或以X－光繞射分析估定形成物質，以爲分析之依據。

5. 掃瞄電子顯微鏡（Scanning Electron Microscope）檢視

用來分析及檢視鋼筋腐蝕鐵銹的來源，基本上此法可判定工廠所致之銹（Mill Scale）—氧化鐵（FeO,Wustite）或腐蝕之鐵銹—赤鐵礦（Fe_2O_3,Hematite）〔19〕。主要的是可以用來觀察外界有害物SO_4^{--}所造成的鈣矾石或孔隙變化，間接評估造成腐蝕及裂縫的原因。

6. X－光繞射分析儀（X－ray diffractory）分析

可用來鑑別鋼筋在空氣中所生的銹α-Fe_2O_3和混凝土中所生的銹γ-Fe_2O_3，$Fe(OH)_2$及$Fe(OH)_3$等，當然也可以辨出混凝土有害物質及碳化物的成分。

7. 離子濃度檢定器（Ion Meter／PH Meter）量測

使用於檢測碳化深度。另外亦可使用簡便但不準確的酚酞噴灑方式，直直接噴於混凝土表面，然後觀察色澤反應，而決定碳化深度。

8. 其它

利用燒失法、差熱分析等儀器可以測定碳化的嚴重性，以瞭解保護層厚度及混凝土品質。

六、結論

混凝土內鋼筋因爲處於酸鹼值12以上的鹼性環境中，本質上即受到混凝土的保護，因此若鋼筋有足夠保護層、包裹之混凝土俱低水灰比，高施工品質、低氯化物含量，則鋼筋是難於受到腐蝕的。但是由於使用材料的限制、腐蝕觀念的欠缺、施工的疏忽等問題，使得混凝土滲透性增大，或保護層不足甚至結構物使用不當造成龜裂，致令氧氣、水份、二氧化碳、及氯化物易於侵入混凝土中而導致鋼筋之腐蝕。

爲了提高腐蝕抵抗力，採用高品質混凝土、增加保護層厚度、表面隔堵有害物的侵入、注膠處理、陰極保護等方式是可行的，其中以施工混凝土品質及保護層厚度的確保是最重要且最有效的防範措施。

參 考 文 獻

1. Verbeck,G.J.″Mechanisms of Corrosion of Steel in Concrete″,in Corrosin of Metals in Concrete ,ACI SP—49,pp.21—38(1975).

2. Cady,P.D.,″Corrosion of Reinforcing Steel″, ASTM STP—169B,pp.275—299(1978).

3. Mindess,S.,and Young,J.F.,Concrete,Prentice-Hall,N,J(1981)

4. ACI201,Guide to Durable Concrete,ACI,pp.17—24 (1977)

5. Shalon,R,and Raphael,M.,″Influence of Sea Water on Corrosion of Reinforcement″,ACI Journal ,Proceeding,Vol.55,No.12,pp.1251—1268(1959)

6. Kalousek,G.L.,Jumper,C.H, and Tregoning,J.J., ″Composition and Physical Properties of Aqueous Extracts from Portland Cement Clinker Pastes Containing Added Materials″,National Bureau of Standards,Journal of Research,Vol.30,pp.215—255(1943).

7. 黃兆龍，″混凝土破裂原因分析及診治建議″，混凝土工程技術研討會，，頁X1－1～34，台灣營建研究中心，台北（1985）。

8.黃兆龍，混凝土品質控制概論，台灣營建研究中心，台灣（ 1984 ）

9. Mehta, P.K.,"Durability of Concrete in Marine Environment—A Review", in Performance of Concrete in Marine Environment, ACI SP—65, pp.1～19 (1980)

10. Hausmann, D.A.,"Steel Corrosion in Concrete" Materials Protection, Vol.6, No.11, pp.19－23 (1967)

11."Repairs to Reinforced Concrete", Concrete, (1982)

12.笠井芳夫,"鉄筋の腐食と防錆劑"コンクリート工學，Vo.21, No.3, 頁8～18 (1983).

13. Bureau of Reclamation, U.S., Department of the Interior, Concrete Manual, 8th.ed., Superintendent of Documents, Washihgton, (1975)

14. Monforz, G.E. and Verbeck, G.J.,"Corrosion of Prestressed Wire in Concrete", ACI Journal, Proceedings, Vol.57, No.5, pp.491—516 (1960).

15. Verbeck, G.J.,"Field and Labratory Studies of the Sulphate Resistence of Concrete", Performance of Concrete—A Symposium in Honor of Thorbergur Thorvaldson, National Research Council of Canada and the American Concrete Institute (1967).

16. ACI Committees 222 and 224,"Debate: Crack Width ,Cover,and Corrosion",Concrete International, ACI,pp.20～35(1985).

17. Dakhil,F.H.,Cady,P.D.,and Carrier,R.E.,"Cracking of Frech Concrete as Related to Reinforcement",ACI Journal,Proceedings,Vol.72,No.8,pp. 421－428(1975).

18. 黃兆龍，"聚合物在混凝土工程上的應用"，營建世界，33，頁56－57，台灣(1984).

19. Lloyd,J.P.,and Heidersbach,"Use of the Scanning Electron Microscope to Study Cracking and Corrosion in Concrete",Concrete Internation,ACI,pp.45－50.(1985).

TECHNICAL BULLETIN

NK MARINE COAT P
Steel Pipe Pile

Polyethylene Coated Steel Pipe Pile Designed to Protect Against Corrosion

Marubeni CORPORATION
TOKYO HEAD OFFICE
OVERSEAS STEEL TUBULAR PRODUCTS DEPT.
4-2 OHTEMACHI 1-CHOME, CHIYODA-KU, TOKYO, JAPAN

NKK
NIPPON KOKAN

TABLES OF CONTENTS

PAGE

1. INTRODUCTION

Recently, there is an increasing demand for steel pipe piles for construction of offshore structures such as sea-berths, jetties and bulkheads which are subjected to severe corrosion environments. Nippon Kokan K.K. (NKK), a world leader in three major industrial fields-steel-making, engineering and construction, and shipbuilding, have been working on ways and means of protecting the steel pipe piles used under such critical environments from deterioration for many years.

Various kinds of materials and methods for corrosion control systems for offshore structures have been developed, tried and put to practical use in many countries. But few effective and economical corrosion control measures has been available, especially for splash and tidal zones in marine environments.

After many years of research and development, NKK offers a proven answer: NK MARINE COAT P steel pipe piles–Polyethylene Coated steel pipe piles designed to protect against corrosion.

NK Marine Coat P steel pipe piles meet with the following basic requirements;

(1) That it is chemically and physically stable over an extended period of time in marine environments and corrosive soil deposits,

(2) That the overall cost of providing corrosion protection or manufacturing thereof, and maintenance and repairs is economically advantageous over extisting other corrosion control systems,

(3) That it possesses adequate mechanical properties so that it is capable of withstanding the external forces produced from handling, transportation, and storage, and

(4) That repairs can be simply and easily made.

Over 10 years exposure tests on various types of corrosion protection methods have been carried out on offshore structure models in the Bays of Fukuyama and Shimizu, Japan by our engineers of the Corrosion and Protection Laboratory.

The test results have proven Polyethylene Coated steel pipe piles to be one of the most excelling groups in quality and performance among the other corrosion control methods.

This new types of steel pipe pile uses high density polyethylene (HDPE) which was selected by giving due consideration to corrosion resistance, seawater resistance, weathing resistance and impact resistance.

The pile is supplied with a polyethylene coating by a process developved exclusively by NKK under a thoroughgoing quality control.

This Technical Bulletin contains information about what NK MARINE COAT P steel pipe piles are and how to use the piles for offshore structures and for pile foundations on land in corrosive soil deposits.

2. CORROSION PROTECTION FOR STEEL PILES IN MARINE ENVIRONMENTS

2.1 Corrosion of Steel Piles in Mrine Environments

A typical corrosion rate profile of steel piles (steel pipe piles, steel H-piles, steel pipe sheet piles) and steel sheet piling is shown in Fig. 2–1. As can be clearly seen, the marine environment can be classified into five different zones of marine atmospheric, splash, tidal, submerged and mud zones, starting in the vertically downward direction.

The corrosion rate is the fastest in the splash zone and slows down in the sequence of seawater surface, submerged and tidal zones.

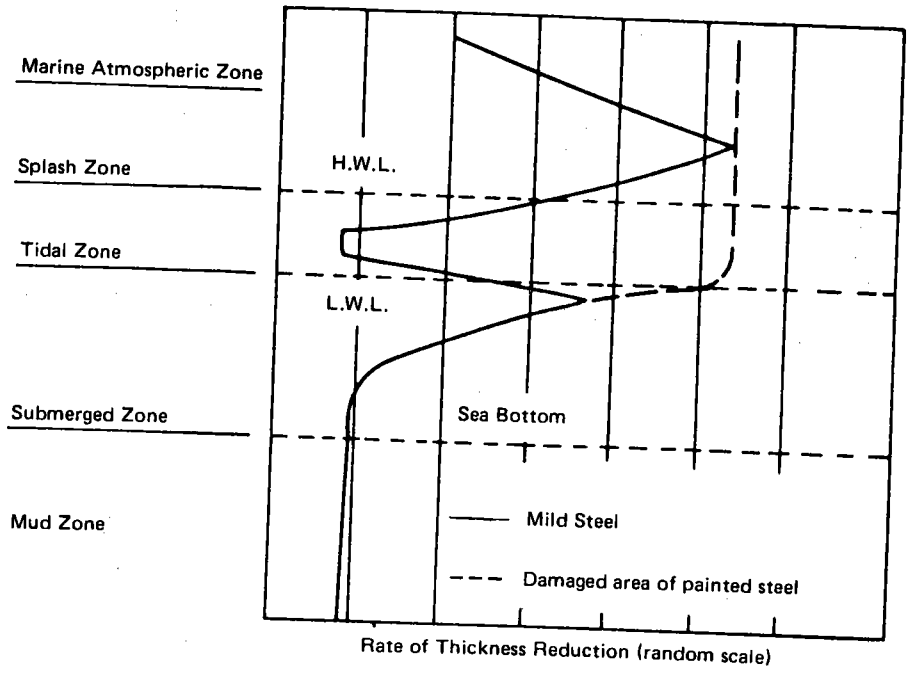


Fig. 2–1 Corrosion rate profile of steel piles in marine environments

The surface of the steel in the splash zone in constantly covered with a thin film of seawater which is applied by the splashes and sprays of seawater. This results in an abundant supply of oxygen to the metal through the film which accelerates the rate of steel corrosion. Even if this section of the steel is provided with a coat of paint, the corrosion at damaged portions of the coating is great, and moreover, since cathodic protection is rendered ineffective, the splash zone among all zones of marine environments is the most difficult to control corrosion.

The steel in the tidal zone is subjected to a cyclic immersion in seawater which becomes similar to that of the splash zone. Therefore, there is a good possibility of the corrosion rate becoming just as fast as that of the splash zone, but actually, it is not that pronounced. This is due to a difference in the O_2 concentration between the seawater surface zone and tidal zone, a phenomena resulting from a formation of a mocro-cell.

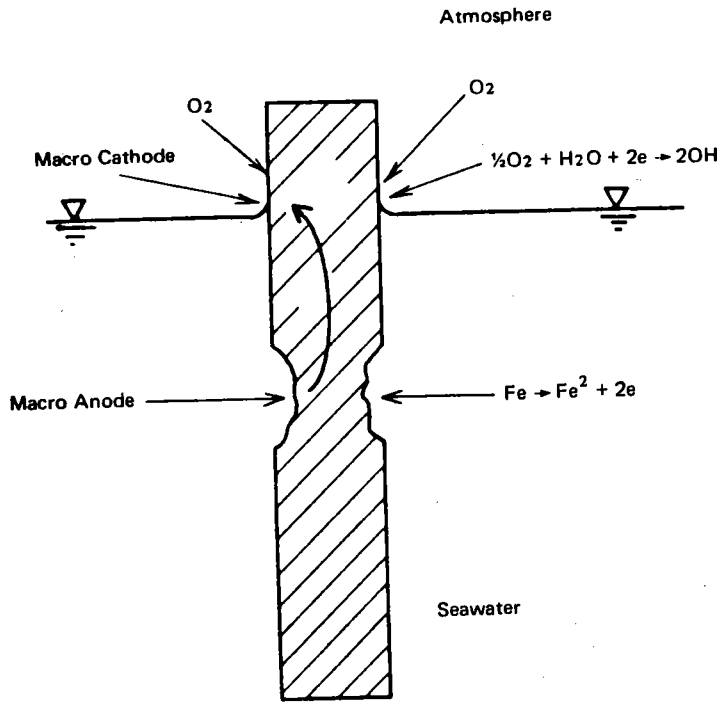


Fig. 2–2 Macro Cell

In other words, the tidal zone, as Fig. 2–2 indicates, cathodically reacts against the seawater surface zone. As a result, the tidal zone is put under a condition as though it is being subjected to cathodic protection with the seawater surface zone acting as a sacrificial anode. This is the reason why corrosion is held in check. On the other hand, corrosion of steel in the seawater surface zone when compared to the deeper submerged zone is more intense by that much of reaction occurring in the tidal zone acting as an anode.

Because of the large amounts of seawater splashes, the steel in the marine atmospheric zone as compared to onland atmospheric zone is subjected to an extremely severe corrosion environment.

Corrosion of steel in the mud zone is most moderate among the marine environments due to a limited supply of O_2.

Table 2–1 indicates corrosion rates of mild and marine steels in each marine environment for Japanese waters.

Table 2–1 Corrosion rate of mild steel and marine steel

Marine Environments	Corrosion Rates (mm/year)	
	Mild Steel	Marine Steel
Marine Atmospheric Zone	0.04 ~ 0.10	0.04 ~ 0.05
Splash Zone	0.3 ~ 0.5	0.1 ~ 0.15
Tidal Zone	~ 0.1	~ 0.1
Submerged Zone	0.2 ~ 0.25	0.15 ~ 0.2
Mud Zone	~ 0.1	~ 0.06

2.2 Corrosion Control Methods of Steel Piles

Among the marine environments, corrosion is mostly stimulated in the area from the splash to seawater surface zones. Therefore, corrosion rates of steels for offshore structures in these zones determines the service life of the structures.

Accordingly, it is of utmost importance that care be given in the selection of proper corrosion protection measures by taking into account the type of structure, the environment in which the structure is constructed, and service life requirements. Great care must be exercised in the selection of corrosion protection measures particularly for steels to be located in the tidal zone which is an environment with many limitations from a standpoint of maintenance and repairs carried out on corrosion protective treatment subtected to damaged by waves, tidal currents, and adherence of barnacles and marine fouling.

It is not a good policy to adopt different protective measures for each environmental zone because it is an extremely difficult task. An appropriate way of drawing up corrosion protection measures is to classify the zones into above sea surface and submerged zones using the seawater surface zone (accurately speaking, one meter below the LWL) as the boundary.

Examples of typical conventional corrosion protection measures taken for offshore structures and their advantages and disadvantages are given in Table 2–2.

Apart from the foregoing, NKK have independently carried out numerous types of long-term marine exposure corrosion tests in the bays of Fukuyama and Shimizu to develop corrosion protection systems which fully satisfy the requirements arizing from designed service lifes and configurations of the structures and environmental conditions.

An example of a corrosion protection system developed from the test results is shown in Table 2–3. The results of the tests have proven that "NK MARINE COAT P" steel pipe piles used as a corrosion protection material for newly installed steel pipe piles is not only the most economical, but also demanstrates the maximum degree of corrosion protection performance. Therefore, NKK highly recommend the use of "NK MARINE COAT P" steel pipe piles as a corrosion protection measures for marine steel pipe piles. Furthermore, a combined use of "NK MARINE COAT P" steel pipe piles above the seawater zone and cathodic protection in the submerged zone is also satisfactory.

Table 2–2 Features of Typical Corrosion Protection Measures

Corrosion Protection Measures	Typical Examples of Specifications			Advantages	Disadvantages
	Corrosion Protection Materials	Film Thickness (mm)			
paints	High build inorganic zinc rich paint + coal tar epoxy	0.70	paints	○ Application is easy ○ Coating is very effective ○ Widely used	○ Unable to expect a long corrosion protection life ○ Poor in impact strength
	High build inorganic zinc rich paint + epoxy	0.45			
	High build organic zinc rich paint + coal tar epoxy	0.70			
	High build organic zinc rich paint + epoxy	0.45			
Low Alloy Marine Steel	Low Alloy Marine Steel	–	Used as structural material	○ Possible to design according to service life ○ Strong in impact strength	○ Limitations in applications
Corrosion Resistant Metallic Materials	Titanium	0.5	Clad	○ Especially excells in corrosion resistance ○ Strong in impact strength	○ High priced ○ Limitations in applications ○ Requires care in galvanic corrosion
	Monel	2	Wrapping		
	Stainless (marine)	4			
Inorganic Linings	Cement mortar	min. 100	Forms	○ Widely used	○ Poor in impact strength
Organic Lining	NK MARINE COAT P (Polyethylene coating)	2.5	Extruded	○ Possible to mass produce	○ Difficult to apply other than pipes
	Epoxy resin mortar	5	Overlay	○ Widely used	○ Requires care in control of application
	Flake lining	2	Paint	○ Impact strength stronger than paint	○ Requires care in control of application
	Epoxymastic	10	Forms	○ Can be used for preventing corrosion of existing structures	○ Limitations in applications
Composite Corrosion Protection	FRP cover + concrete	50		○ Con be used for preventing corrosion of existing structures	○ Limitations in applications
	FRP cover + petroleum			○ Can be used for preventing corrosion of existing structures	○ Limitations in applications

Table 2–3 Adaptability of Corrosion Protection Measures According to Environment

Corrosion Protection Measures \ Environment	Marine Atmosphere		Splash		Tidal		Submerged		Mud	
New Installation / Existing	New	Existing	New	Existing	New	Existing	New	Existing	New	Existing
Paints (Coating)	◎	◎	△	△	△	△	△	–	○	–
Metall Wrapping	◎	○	◎	○	◎	–	◎	–	–	–
Concrete Lining	○	○	△	△	△	△	○	–	○	–
NK MARINE COAT P	◎	–	◎	–	◎	–	◎	–	◎	–
Mastic Lining	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	○	–	–
Cathodic Protection	–	–	–	–	○	○	◎	◎	◎	◎
Marine Steel (Corrosion resistant low alloy steel)	○	–	◎	–	○	–	○	–	○	–

◎ Effective
○ Possible to apply Effect is fairly high
△ Difficult to apply Effect is low
– Out of bounds

4.5 Indent Resistance

Even under high pressure, NK MARINE COAT P is only shightly dented and therefore piles can be stacked up in the same way as other piles can.

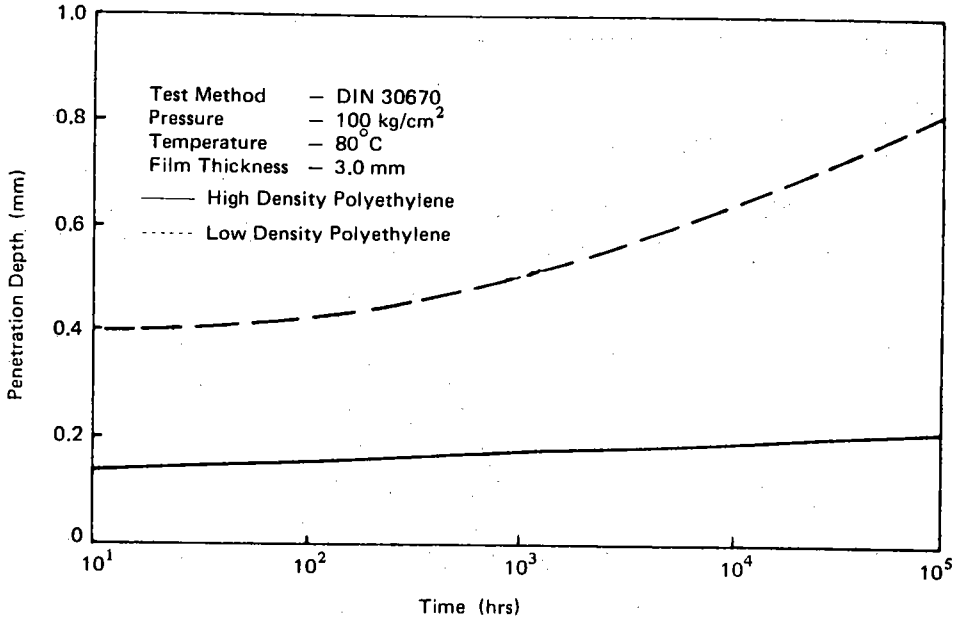


Fig. 4–4 Dependence of Compression on Time

4.6 Thermal aging

Another feature of NK MARINE COAT P is superior heat resistance in the ordinary temperature range.

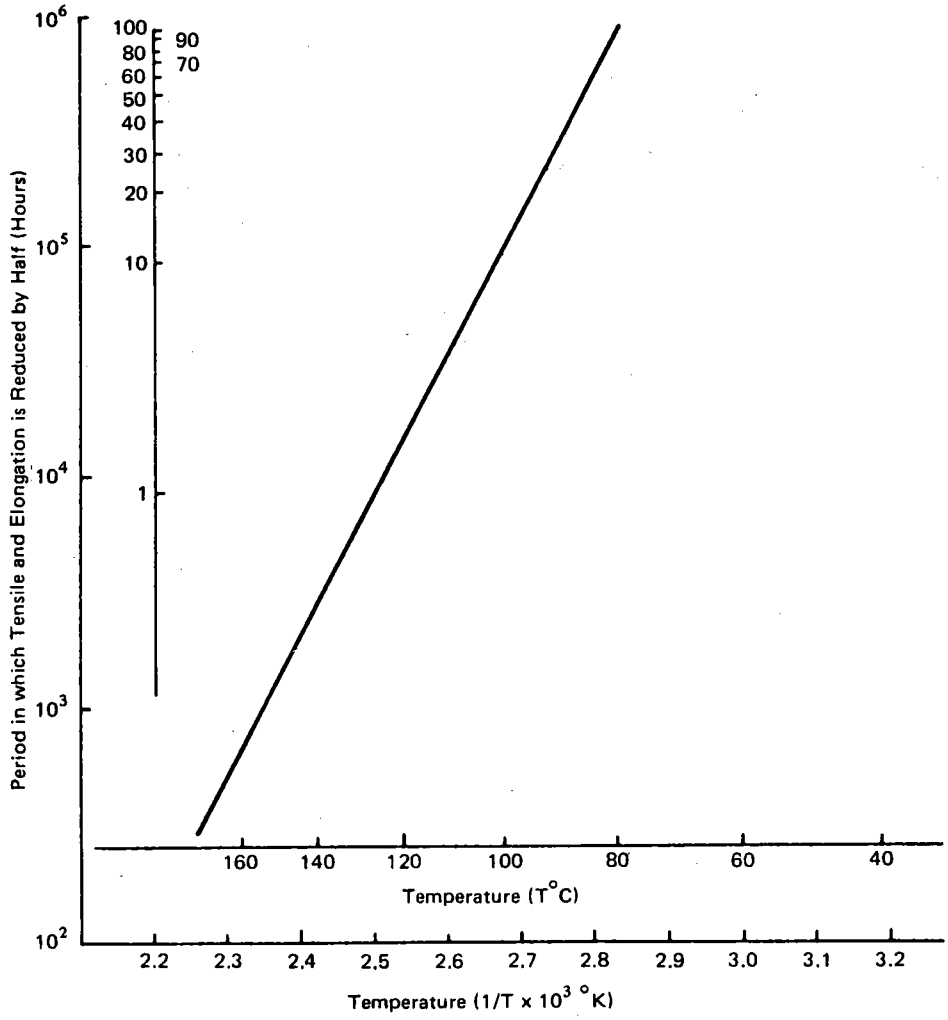


Fig. 4–5 Heat Resistivity of High Density Polyethylene

4.7 Environmental Stress Cracking Resistance

NK MARINE COAT P has a resistance of more than 1,000 hours to cracks due to emvironmental stresses. This means that surfacial cracks that happen to be present will not become any larger.

5. FEATURES OF "NK MARINE COAT P" STEEL PIPE PILE

5.1 Peeling Resistance

Because the adhesion of NK MARINE COAT P to the surface of a steel pipe is exceptionally good, these are no problems with slipping or peeling when a pile is driven in.

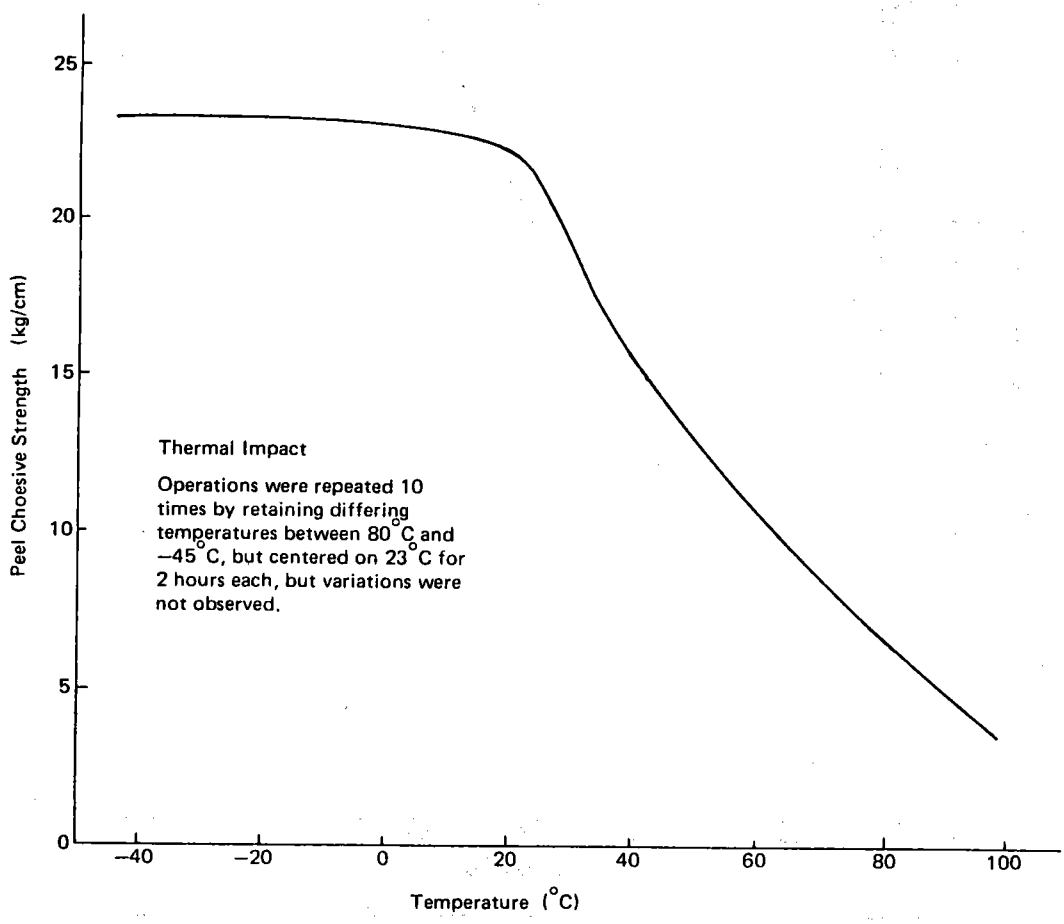


Fig. 5–1 Dependence of Cohesive Strength to Temperature

5.2 Insulation resistance in soil deposits

Because NK MARINE COAT P steel pipe piles have high long-term insulation resistance, they are extremely corrosion-resistant even in highly corrosive siol deposits.

Generally speaking, corrosion does not occur at an insulation resistance of 10^5 $\Omega \cdot m^2$ and above.

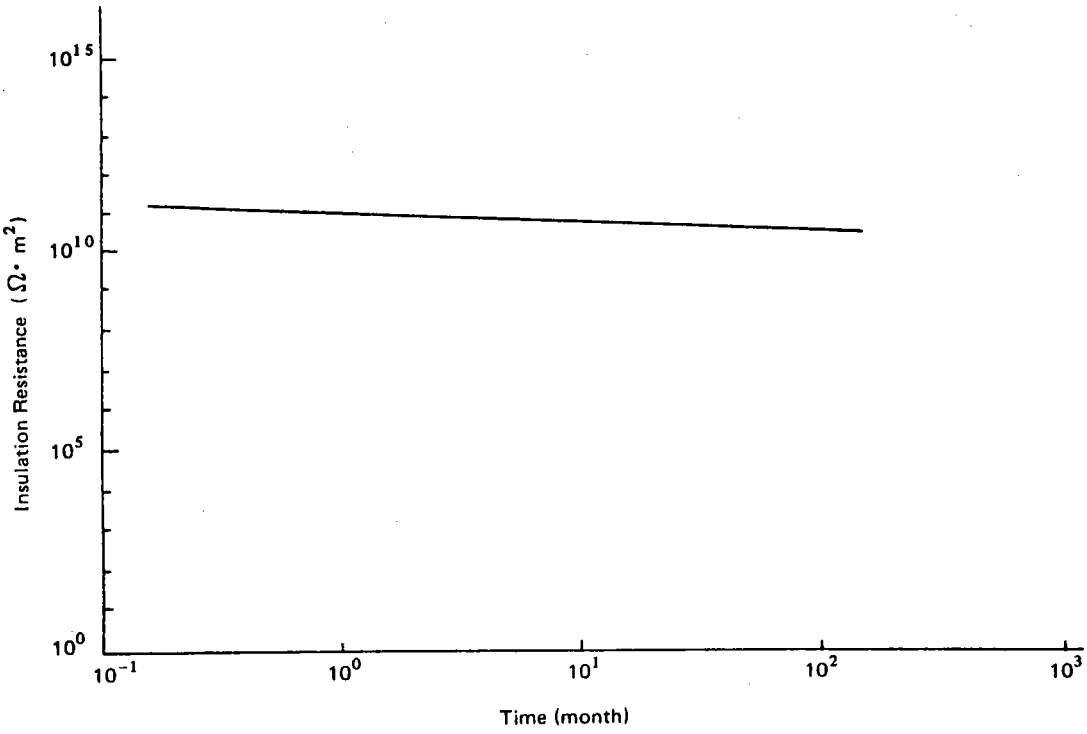


Fig. 5–2 Insulation Resistance in Soil

6.2 Storage

When storing piles on the site, they should never be placed directly on the grouned, but on sheepers, etc. for safety reasons, piles should nøt be stacked higher than 2.0m.

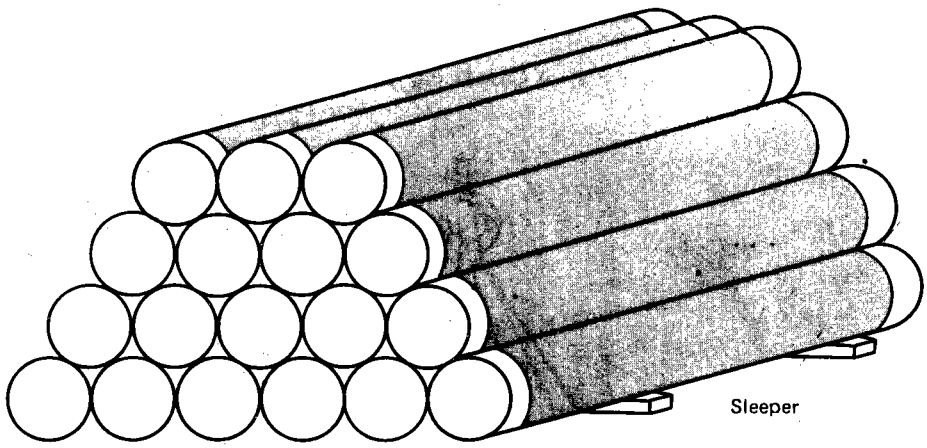


Fig. 6–2 Field Storage

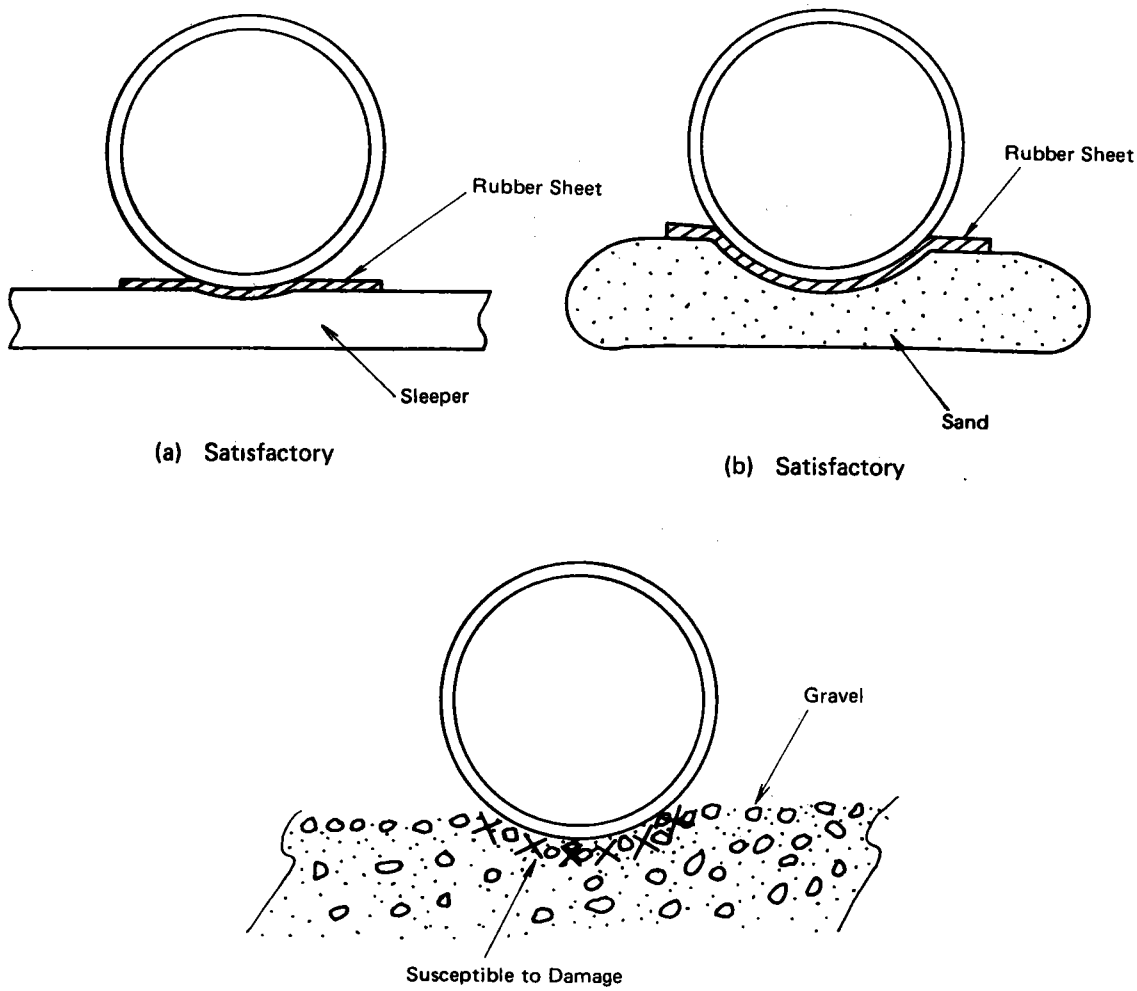


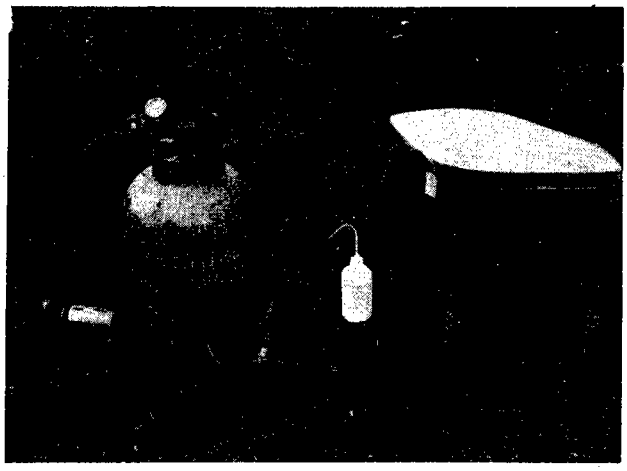
Fig. 6–3 Proper Storing Methods

6.3 Driving

When driving in piles, care should be taken to ensure that sharp objects, such as the pile driver and hammer, do not come into contact with them. If a comparatively thick layer of gravel, or stone or stone paving is present close to the surface of the ground it should be removed before pile driving work. Also, if htere is hard sandy layer in the ground, pre-boring with an auger etc. is neccessary.

7. CORROSION PROTECTION METHOD OF FIELD JOINT

7.1 When Using Shrinkable Tube

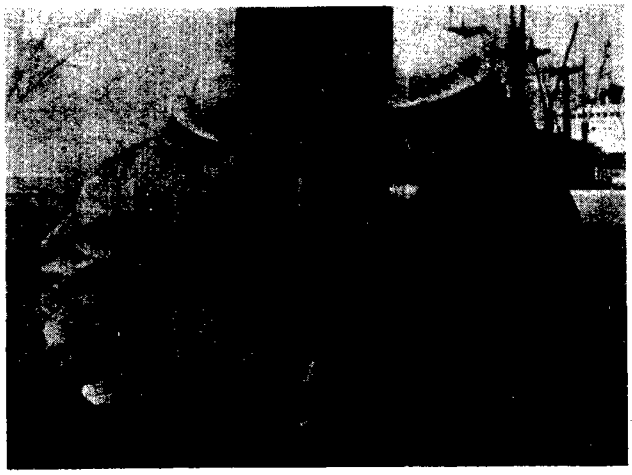


(1) Apparatus (LPG cylinder, burner for LPG only, wire brush, organic solvent, shrinkable tube.)

(2) Rust and welding spatters on the surface of the steel pipe are removed with a grinder or wire brush.

(3) The edges of the coating are removed.

(4) Dirt and grease on the coating are removed with an organic solvent.



(5) The position in which the shrinkable tube is to be set is marked (by lines about 100mm from the ends of the coating)

(6) The surface of the steel pipe is preheated to 40 ~ 70°C.

(7) The tube is temporarily set in the specified position with tape.

(8) The LPG burner is used to heat and shrink the center of the tube in the circumferential direction.

8. CUTTING TO SPECIFIED HEIGHT

(1) The place to be cut is marked

(2) The line 150mm below the place to be cut is also marked. A cutter is used to cut down to the surface of the pipe.

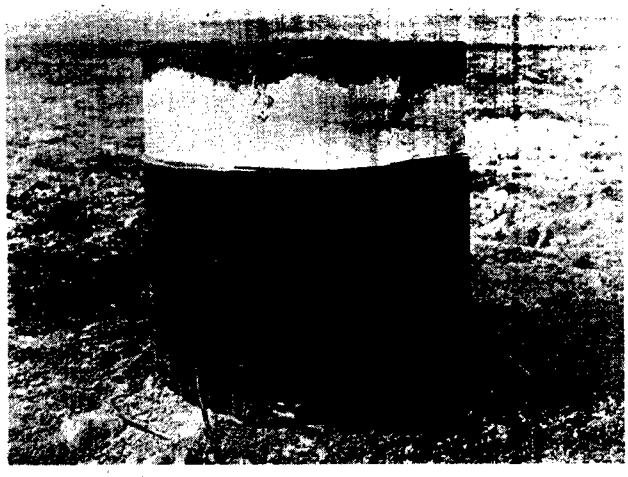
(3) Cutting is done by an acetylene burner.

(4) A cutter is inserted into the pipe in the longitudinal direction.

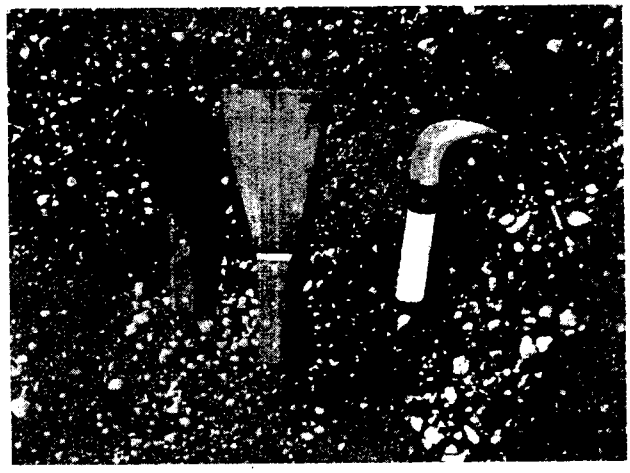
(5) The coating is putted off with a scraper, cutting pliers, screw driver, etc.

(6) If the coating is hard to pull off, the inside of the pipe is heated to 100 ~ 130°C. It can then be putted off easily.

(7) The edge of the coating is removed.

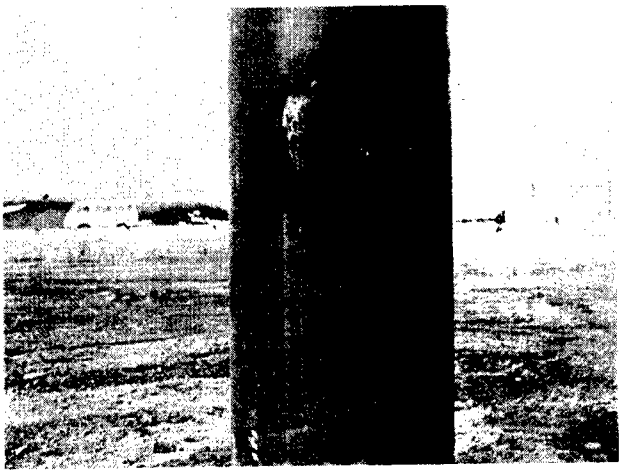


(8) Wark is finished.

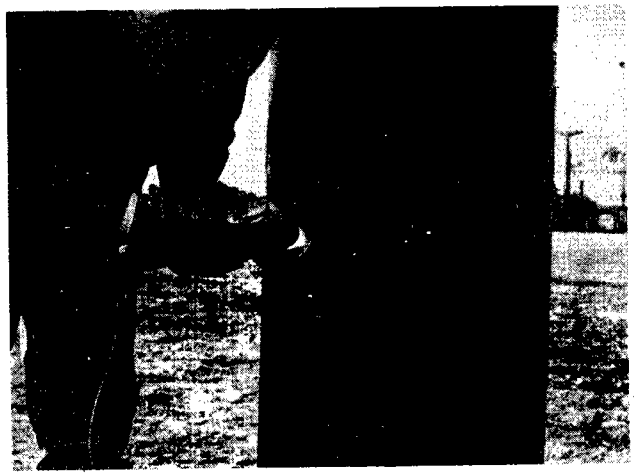


(9) Implements used (scraper and a cutter)
(Time required : 15 ~ 20 mins.)

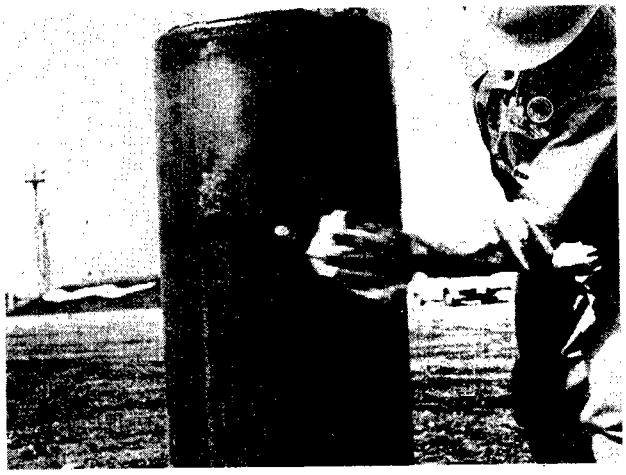
9. REPAIR SYSTEMS



(1) Damaged part.

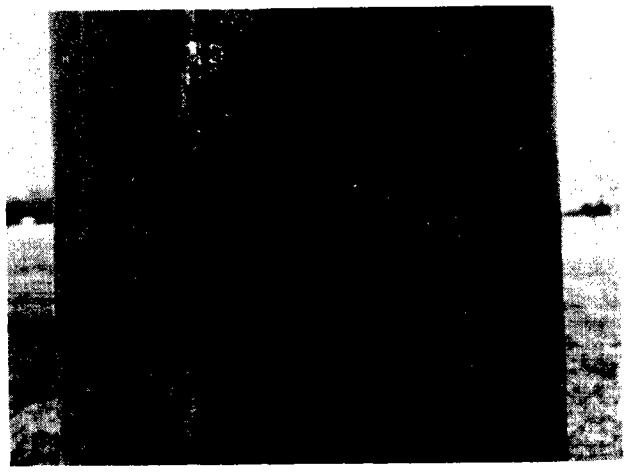


(2) Any rust on the damaged part is removed with a wire brush and the coating is smoothly "finished."



(3) Dirt and grease on the coating are removed with an organic solvent.

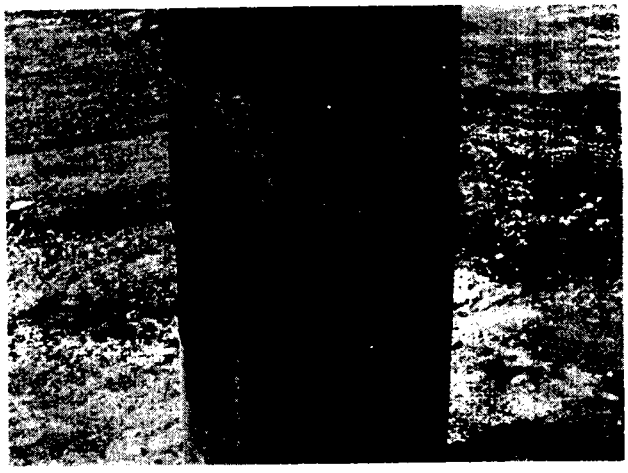
(4) A sealing material is used to full the area.



(5) The sealing matinal is now properly fulled into the area.

(6) The sheet is attached in the position spcified.

(7) Heating and shrinking work.



(8) Heating is stopped when the adhesive begins to leak from the end of the tubing.

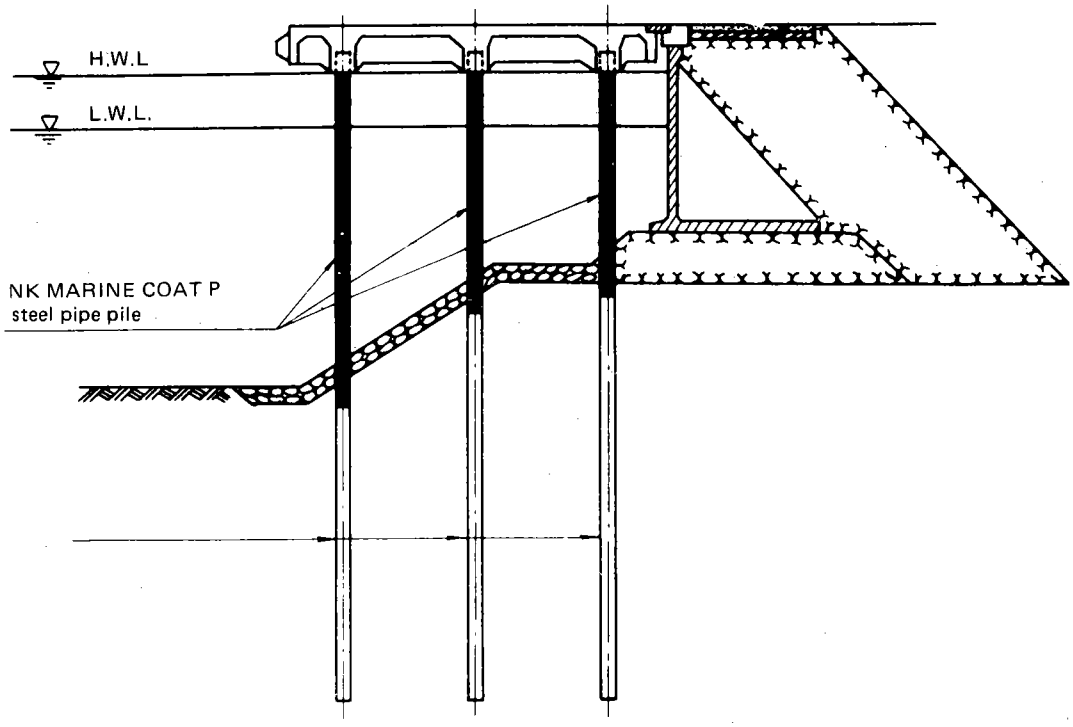
(9) Apparatus used (LPG cylinder, burner for LPG only, mastic tape, wire bursh, application roller, organic solvent, shrinkable sheet)
(Time required : 20 ~ 25 mins.)

10. APPLICATIONS

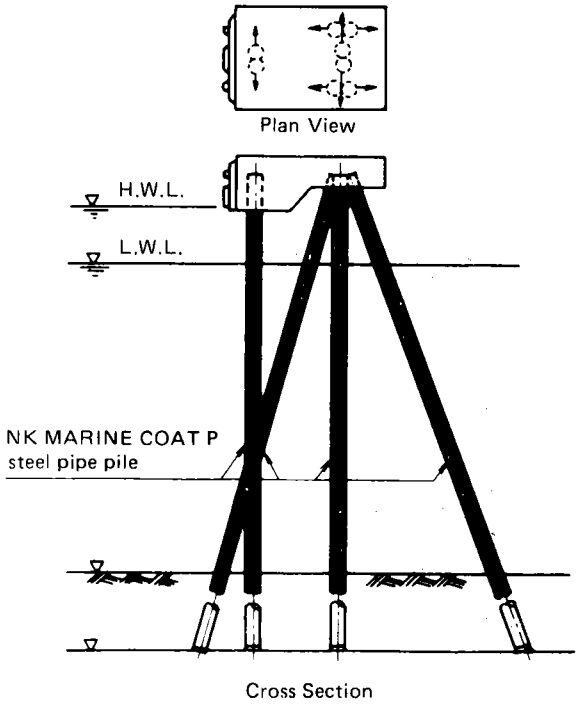
10.1 Waterfront Structures

The following structures are applications of NK MARINE COAT P steel pipe piles to water front structures.

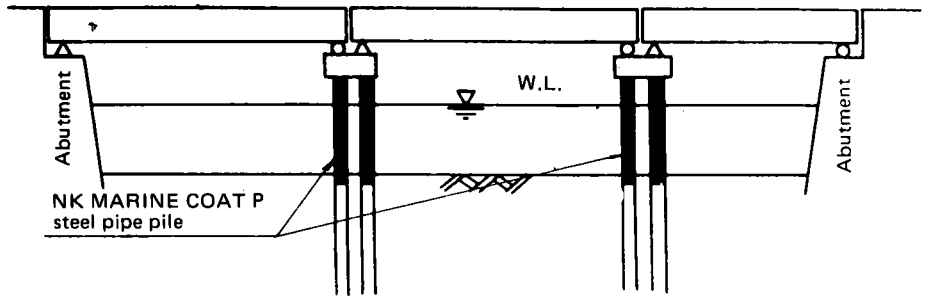
(1) Jetties



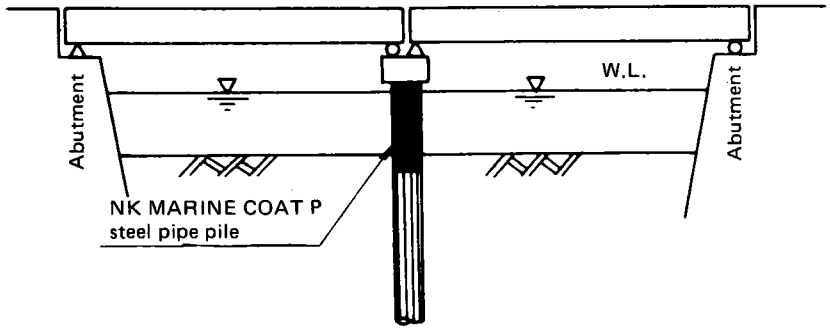
(2) Dolphins



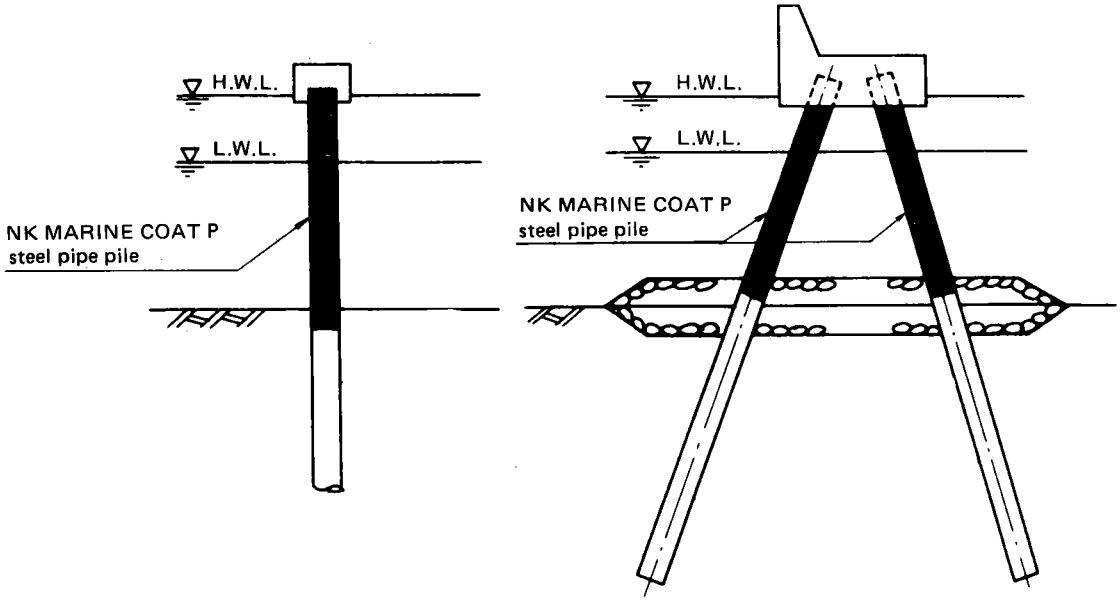
(3) Multiple Pile Foundations



(4) Free-standing Pile Foundations

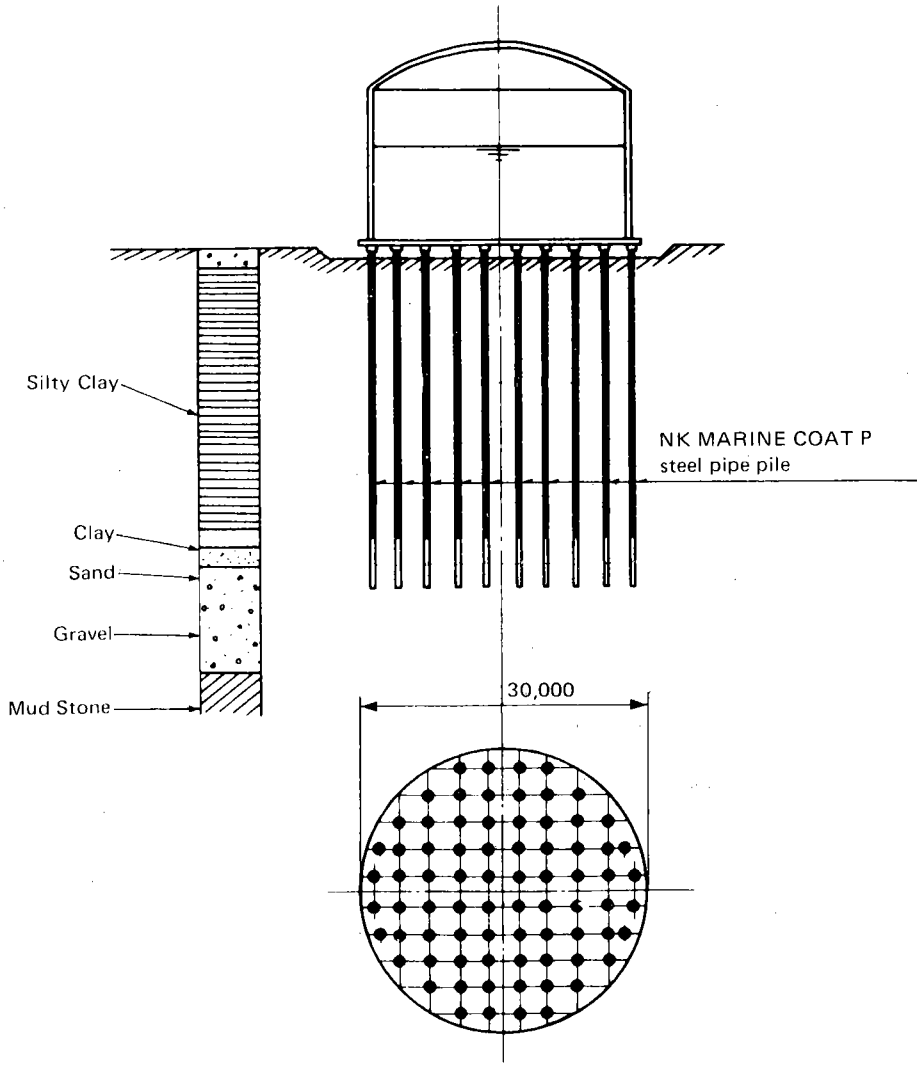


(5) Breakwaters



10.2 Pile Foundation on Land

As practical examples for on-land pile foundations, applications as foundations for various types of structures such as buildings, bridge on corrosive soil deposits containing sulfides which accelerate the stimulation of corrosion can be given for NK MARINE COAT P steel pipe piles. The following example is of foundation for tanks.



Head Office
1-2, 1 Chome, Marunouchi, Chiyoda-ku, Tokyo, Japan
Tel: (03) 212-7111
Cable: KOKANNK TOKYO, KOKAN JUKOO TOKYO, KOKANSHIP TOKYO
Telex: 222-2811 (NKK J) 222-2816 (NKSHIP J)

Overseas Offices & Affiliates

<ASIA>

Bangkok
NIPPON KOKAN K.K.
Bangkok Liaison Office
Thaniya Building 6th Floor, 62 Silom Road, Bangkok, Thailand
Tel: 2342561, 2337896
Telex: 87002 (NKK TH)

Beijing
NIPPON KOKAN K. K.
Beijing Office
Yanjing Hotel Room 1428, Beijing, P.R. China
Tel : 86-8721 Ext. 1428
Cable : KOKANNK BEIJING
Telex : 22630 (NKK CN)

Hong Kong
NIPPON KOKAN K.K.
Hong Kong Office
Room 1101, Fairmont House, 8, Cotton Tree Drive, Central, Hong Kong
Tel: Hong Kong 5-215120, 215129
Telex: 802-83003(KOKAN HX)

Jakarta
Jakarta Representative of Nippon Kokan K.K.
30th Floor, Ratu Plaza, Kav. 9, JL.JEND. Sudirman, Jakarta, Indonesia
Tel: 711874, 711875
Telex: 47346 (NKK JKT)

Kuala Lumpur
NIPPON KOKAN K.K.
Malaysia Office
2nd Floor Mui Plaza, Jalan Parry, Kuala Lumpur 01-04, Malaysia
Tel: (03) 484369, 431208
Telex: MA 32528

Singapore
NIPPON KOKAN K.K.
Singapore Office
UNIT 3008, UIC Bldg., 5 Shenton Way (0106) Singapore
Tel: 2217277
Cable: STEELTUBE SINGAPORE
Telex: 21308 (NKK SP RS)

<MIDDLE EAST>

Al-Khobar
NIPPON KOKAN ARABIA Ltd.
Al-Bustan Compound, Al-Khobar-Damman Highway, Saudi Arabia
Tel: 03-894-8011 Ext. 1257
Telex: 670028 (WATEKA SJ)

<EUROPE>

Düsseldorf
NIPPON KOKAN K.K.
Düsseldorf Office
Immermannstrasse 43, 4000 Düsseldorf 1, West Germany
Tel: (0211) 353481/3
Cable: "KOKANNK" DUSSELDORF
Telex: 8587839 (NKK D)

London
NIPPON KOKAN K.K.
London Office
4th Floor, West Block, 11 Moorfields High Walk, London EC2Y 9 DE, England
Tel: (01) 628-2161/5
Cable: KOKANNK LONDON
Telex: 886310 (NKK LN G) 887602 (NKK LN G)

Paris
NIPPON KOKAN K.K.
Bureau de Représentation de Paris
Centre d'Affaires Le Louvre 2, Place du Palais Royal 75044 Paris CEDEX 01, France
Tel: (297) 06-40 (297) 06-43
Telex: NKKPARI 240587F

Rotterdam
NKK Universal S.A.
Rotterdam Branch
4th Floor Room No. 415, Calandstraat 66, 3016 CD Rotterdam
The Netherlands
Tel: Rotterdam 36-13-44
Telex: 26700 (NKKRT NL)

<NORTH AMERICA>

Houston
NKK America Inc.
Houston Office
Four Allen Center, 1400 Smith Street, Suite 750
Houston, Texas 77002 U.S.A.
Tel: (713) 658-0611/4
Cable: KOKANNK HOUSTON
Telex: 775691 (NKK HOU)

Los Angeles
NKK America Inc.
Los Angeles Office
444 South Flower Street, Suite 2430, Los Angeles, California 90017 U.S.A.
Tel: (213) 624-6651
Cable: "KOKANNK" LOS ANGELES CALIFORNIA
Telex: 910-321-2456 (NKK LSA)

New York
NKK America Inc.
New York Office
450 Park Avenue, New York, N.Y. 10022 U.S.A.
Tel: (212) 826-6250
Cable: "KOKANNK NEW YORK"
Telex: 233495 (NKK UR)

Vancouver
NIPPON KOKAN K.K.
Vancouver Office
P.O. Box 49168, Three Bentall Centre, 595 Burrard Street, Vancouver B.C. V7X-1J1 Canada
Tel: (604) 687-0091
Cable: KOKANNK VCR
Telex: 4507539 (NKK VCR)

<CENTRAL & SOUTH AMERICA>

Mexico City
NIPPON KOKAN K.K.
Oficina Tecnica Informativa en Mexico
Paseo de la Reforma, 300-1905 Col. Juarez, C.P. 06600 Mexico D.F. Mexico
Tel: 5333439, 5333451, 5330238
Telex: 1771781 (NKK ME)

Rio de Janeiro
Nippon Kokan-Indústria Siderúrgica Ltda.
Rua da Assembleia No.-10 S/3501, Edificio Centro Candido Mendes, CEP-20011 Centro Rio de Janeiro, R.J.Brazil
Tel: (021) 224-4570, 8462
Telex: 2122843(NKKR BR)

Tec. No. 242—038

NKK

NIPPON KOKAN

'84. Dec. ②-500 MARUEI
Printed in Japan

附　錄

本次研討會籌辦經過

林　維　明

台灣省交通處林處長及本所梁所長對於港灣R.C. 結構物防蝕技術研究均相當重視，林處長曾指示維明應研究澎湖跨海大橋之腐蝕原因及防蝕對策，並於本年六月十二日與本組饒助理研究員、公路局莊課長、林段長及台泥公司蔡專門委員至現場實地會勘（紀錄詳如附表一）。中華民國防蝕工程學會陳文源理事亦於本年六月六日函本所梁所長擬邀請日本建設省土木研究所地質化學部長蒔田實博士參加本年度中華民國防蝕工程學會年會（ 8 月18日 ）並作專題演講「海洋土木結構物腐蝕及其防制」，並來本所共同研討，請本所出函正式邀請，由於本組現正積極推動國內港灣及海洋結構物防蝕對策，爲求吸收新知，梁所長同意具函邀請，並利用此機會邀請國內專家及各港務局工程人員共同研討港灣R.C結構物防蝕對策，於 7 月19日函請交通處及各港務局派員參加8 月20日及21日兩天之研討會，同時獲得國內各顧問公司、台灣省公路局等單位的回響，均願意派員參加研討並贊助此研討會。承蒙各單位贊助（贊助單位如附件二）及各位主講人、主持人協助（研討會課程表如附件三）參加研討會人員之踴躍（參加人員如附件四）才能使本次研討會辦得成功，更望各位工程界先進能多給與本組鼓勵指教，共同爲推動港灣R.C結構物防蝕技術而努力。

附件一　　澎 湖 跨 海 大 橋 會 勘 研 討 紀 錄

一、時間：中華民國七十四年六月十二日

二、地點：台灣省公路局第三工程處第六工務段辦公室

三、主持人：林　維　明　　紀錄：饒　正

四、出席人員：台灣省公路局　　莊　秋　明

台灣省公路局第三工程處第六工務段　　林　岡　照

台灣水泥公司　　蔡　明　谷

港灣技術研究所　　林　維　明　　饒　正

五、主持人報告：交通處林處長曾指示維明澎湖跨海大橋腐蝕情形相當嚴重，應研究其腐蝕原因及防蝕對策，因此我儘速到此地來勘察，今天我們到現場勘察結果發現腐蝕情況相當嚴重。港灣技術研究所現正積極推動國內港灣及海洋結構物防蝕對策，台泥公司研究室近十年來均在作試樣防蝕觀測，公路局亦對橋樑防蝕對策有多年研究經驗，今天有機會與各位工程界先進共同研討，更難得林處長對腐蝕有相當之認識，希望各位能集思廣益提供寶貴意見，以便呈報林處長參考。

六、討論：

㈠公路局交通工程課莊秋明課長報告：

水泥混凝土由于其本身無可避免之龜裂特性，孔隙之存在，吸水性及毛細管之作用等使外面之水份或水汽侵入內部，更由于施工難達100％之品質控制，鋼筋混凝土保護層厚度不易全部維持一定標準造成厚薄不均，有時由于意外漏漿，造成「蜂巢」而產生更多又大之孔隙，又因完工後之地震或外力之損害等導致原已存在腐蝕之因素更擴大，以致更易形成內部鋼筋加速腐蝕。因此位於易腐蝕環境下未防蝕之R.C.或P.C.橋涵多未達到設計年限，內部鋼筋即已腐蝕，有鑒於此世界各先進國家對位於腐蝕環境內之R.C.、P.C.構造物均事先採取防蝕措施，以維其構造物之安全性及節省不必要之鉅大重建費

用。台灣爲一島嶼四面環海，其腐蝕環境較其他國家更爲嚴重，尤其沿海地帶及海上之橋樑爲甚，以台二綫金山地段、台11綫、台15綫沿海路段橋樑腐蝕重建及海上澎湖大橋之嚴重腐蝕爲例可說明之。

目前世界各先進國家對易腐蝕環境下R.C橋涵之防蝕設施，除在施工中採用抗硫酸鹽水泥，嚴格管制施工品質外尚採用鋼筋保護層加厚、鋼筋塗裝、混凝土中加防腐劑及陰極防蝕等方法予以防蝕，尤其在海上橋樑設計上採用撓度小之橋樑如R.C橋樑遠較P.C橋樑之撓度爲小，同樣P.C橋樑中採用高拉力鋼棒施預力（高拉力鋼綫預力橋撓度較大）並採用預力混凝土箱樑橋建造以減小撓度而防活荷重下裂痕擴大使水汽易侵入，而造成鋼件之腐蝕。更考慮在可能範圍內橋面應儘量提高，並增大橋面與水面（尤其海面）之距離，以防海水浪花波及與水汽侵入混凝土內部。

綜合上述各項防蝕設施之原則，應在國內各種腐蝕環境下製作各種試樣予以試驗，以蒐集各有關防蝕之資料，並加以統計分析，以建立國內之防蝕規範及標準，並可引進R.C構造物之防蝕新技術，予以解決目前國內海洋環境下構造物之嚴重腐蝕問題。

㈡台灣水泥公司研究室蔡明谷專門委員報告：

臨海工程之結構物經常被含硫酸鹽之雨水沖刷之影響，易受侵蝕，尤如使用波特蘭第Ⅰ型水泥，因C_3A含量高易與硫酸鹽起化學作用而使結構物膨脹崩裂，因此需要使用具有抗硫酸鹽性能之水泥，並且注意施工灌製水密性高不龜裂之構造物。因爲硫酸鹽成份易從裂縫侵入將鋼筋腐蝕，鋼筋一旦被腐蝕，以電氣化學之原理傳達到全面鋼筋腐蝕$Fe \rightarrow Fe_2O_3$體積也變成二倍，亦把結構物崩裂。

如使用海砂或海水，因含有Cl^-成份，如上述作用同樣將鋼筋腐蝕。因此環海之台灣，同樣受硫酸鹽腐蝕情形很多。台泥公司願意以水泥化學之學識支援，有關海洋結構物之腐蝕研究。

㈢公路局三區工程處第六工務段林岡照段長報告：

跨海大橋於民國六十年通車而由澎湖縣政府維護，迨至民國六十七年移交公

路局接養後曾因第十六孔腐蝕嚴重，故當年依傳統方式打除重建，針對其餘各孔選擇第一至廿六孔以化學塗料塗裝外，七十年及七十二年分別逐孔檢查結果發現其腐蝕進度已隨外表蝕傷而加速損壞，其中第十二、十三及七十五等三孔嚴重危及交通安全，故於各孔中央加建支柱避免橋樑中斷，致發生意外，其餘各孔爲一勞永逸計，正報奉上級逐段改建中。

依據個人多年檢查及維護經驗，歸納有下列六點看法：

1. 沿海R.C結構之腐蝕，外在之地理環境因素較結構物中材料之因素影響較大，如距海水面高差及風力產生之加壓程度等。
2. 沿海R.C結構完成後即作防蝕較因腐蝕後才修護之保養工作簡單，經費省、效果高，橋齡可增以倍計。
3. 沿海R.C結構體腐蝕均在拉應力部位（如樑板），在應力部位幾無類此情形（如橋墩柱）。
4. R.C結構體之主要材料如水泥係化學材料，而腐蝕亦屬化學作用之一種，單憑土木水利技術人員甚難維護週詳及求得完善效果，借重化工人員參與研究處理至爲重要。
5. 既有結構體之腐蝕情況目前端賴肉眼觀察及經驗評估，無法客觀深入，有待研究高科技之探測方式，如X光及超音波等測探。
6. 沿海R.C結構之施工檢查、維修，國內欠缺可行規範，動輒打除重建殊爲可惜，盲目提高品質要求亦爲浪費，宜早建立可行規範供工程界參考。

㈣港研所港工材料組饒正助理報告：

今天我們來勘察跨海大橋之腐蝕情形，從橋面上看不出有什麼異樣，然而在橋底下所見，眞是令人觸目驚心。混凝土崩裂、鋼筋腐蝕、預力樑之預力鋼綫已斷裂，此時橋樑之承載力已不能達到當時之設計強度，其危險性可想而知。而腐蝕環境較澎湖惡劣的台灣本島沿海港灣結構物，除受海水磨蝕、侵蝕、海風之吹襲、海水之污染外，且受乾濕作用影響，更加速鋼筋混凝土之腐蝕破壞，而其齡期及承載力均較此橋爲多，但是因其腐蝕是在碼頭下，無人注意，而不受重視，眞是見樹不見林之看法，其實其損害之情形應較跨海

大橋有過之而無不及。

本所港工材料組自民國七十年成立後，林組長曾先後與清大材料研究所張一熙博士、台大材料研究所高健章教授、工業技術學院營建系黃兆龍博士、中鋼研究發展處防蝕小組吳覺宇組長，討論目前台灣鋼筋混凝土之腐蝕情形後，均有一致之看法，即在海洋環境下鋼筋混凝土之腐蝕研究在國內是刻不容緩的，也都願意盡一已之力支援此研究課題。

有關防蝕技術之研究，世界各先進國家均有專門研究與推展機構，如英國的Corrosion and Protection Center美國的NACE(National Association of Corrosion Engineers），德國的The Joint Corrosion Association ，日本的腐蝕防蝕協會及防銹技術協會…等，國內方面，從民國六十四年始由交通部舉辦一次鋼筋混凝土之防蝕研討會，邀請留美學人張洪志博士回國主講，嗣後交通研究所亦邀集國內交通事業單位，派員組成防蝕技術小組，推行研究工作，惜因研究費用短缺，實驗儀器缺如，且成員均屬兼職性質，研究範圍侷限於理論方面，難期實質上的成效。

本所在試驗儀器方面已有海洋腐蝕環境測定設備（如酸鹼計、溶氧測定計…等）腐蝕速率測定設備，混凝土及骨材性質測定設備（如萬能試驗機、凍融試驗機…等），以及一些現場腐蝕測試設備在逐年購置中。圖書設備方面，目前國內外有關鋼筋混凝土之腐蝕研究文獻，均在積極蒐集中，如ACI（美國混凝土協會），ASTM（美國材料協會）之有關期刊圖書之購置。本所研究人員具有土木、水利、海洋、電機、化工…等系所畢業之專業人員從事研究，就以上本所之研究人員素質、儀器及圖書設備，研究方向中，可看出本所對海洋環境下之鋼筋混凝土構造物之腐蝕在不遺餘力的研究中。

唯單靠本所之力，尚嫌不足，應結合各學術研究單位、施工單位及其它學術團體，共同出力成立類似國外專責研究機構，寬列預算，延攬專家學者，負責研究推廣與指導國內之防蝕技術。

七、結論與建議：

㈠本大橋腐蝕情形相當嚴重，台灣四周環海類似之海洋環境腐蝕現象已發現很

多，因此需儘速成立防蝕研究小組，專對此問題作有系統之研究與解決對策。

㈡參與本會之各位工程人員曾對本問題均有所研究與心得，每位都願意貢獻其心得以便進一步做更具體且系統之研究，以找出適當而合乎國內環境所需之防蝕方法，以解決國內防蝕問題。

八、散會。

附件二

贊助單位一覽表

編號	贊助單位名稱	金額（新台幣）元	備註
1.	台灣水泥公司	10,000	
2.	榮民工程事業管理處	6,000	
3.	中華工程股份有限公司	10,000	
4.	中華顧問工程司	6,000	
5.	中華民國港埠服務社	6,000	
6.	台灣漁業技術顧問社	6,000	
7.	柏林股份有限公司	20,000	
8.	工量企業股份有限公司	6,000	
9.	凌克港灣股份有限公司	10,000	
10.	中國材料科技股份有限公司	6,000	
11.	文昌儀器行	10,000	
12.	震生機械有限公司	6,000	
13.	科樸股份有限公司	10,000	
14.	台灣治水工業股份有限公司	6,000	
15.	鑫利建設股份有限公司	10,000	
16.	丸紅株式會社台北支店	10,000	
17.	日東電工株式會社台北分公司	10,000	
18.	益鼎工程股份有限公司	6,000	
19.	宏信儀器行	6,000	
20.	三光儀器股份有限公司	10,000	
總計		170,000	

附件三　　港灣鋼筋混凝土結構物防蝕技術研討會課程表

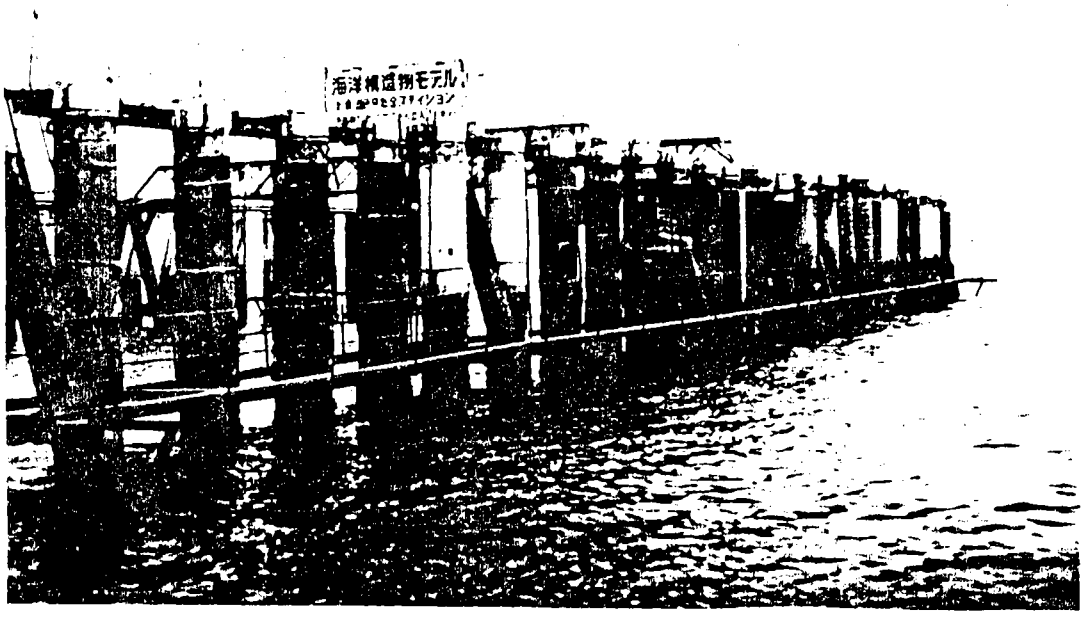
課目	時間	主講人	主持人
報到	8月20日 8:30–9:00		
開幕	9:00–9:10		本所梁所長
腐蝕原理介紹	9:10–10:30	張一熙　博士 清大材研所副教授 工研院工材所顧問	本所梁所長
R.C.腐蝕與水泥之關係	10:40–12:00	蔡明谷　先生 台泥研究室專門委員	台中港務局 沙總工程司
午餐	12:00–13:30		
R.C.結構物防蝕技術	13:30–15:00	莊秋明　先生 台灣省公路局課長 交通研究所陰極防蝕研究員	花蓮港務局 徐總工程司
電子顯微鏡技術在R.C.防蝕之應用	15:10–16:30	黃兆龍　博士 工技院營建系副教授	高雄港務局 康總工程司
電腦輔助用海洋鋼材結構物陰極防蝕設計	16:40–18:00	吳覺宇　先生 工研院工材所防蝕小組研究員	清大材研所 張一熙　博士
海洋土木構造物腐蝕與防治	8月21日 9:10–10:30	田尻勝紀　先生 日本防蝕技術協會技術部長	本所 侯副所長
R.C.結構物之耐久性研究	10:40–12:00	川上光男　博士 日本東京大學教授	中華民國防蝕學會理事會 陳文源　先生
午餐	12:00–13:00		
防蝕膠帶	13:00–13:30	中村正弘　先生 日東電工株式會社	陳文源　先生
防蝕技術—塗裝	13:30–15:00	陳文源　先生 國科會科技委員 柏林公司總經理	工材所 張慶華　博士
鋼材組織與結構介紹	15:10–16:00	李驊登　博士 成大機研所副教授	基隆港務局 祝總工程司
討論	16:10–16:30	各主持人及主講人	林維明　組長 本所港工材料組組長

附件四

參加人員名册

編號	姓名	服務單位	編號	姓名	服務單位
1.	張富南	台灣省交通處	26.	盧習亮	基隆港務局
2.	沙啓鍾	台中港務局	27.	許秀民	基隆港務局
3.	曲綿洸	台中港務局	28.	張朝燦	基隆港務局
4.	林景章	台中港務局	29.	康乃恭	高雄港務局
5.	吳振崑	台中港務局	30.	蔡惟約	高雄港務局
6.	吳啓東	台中港務局	31.	楊義忠	高雄港務局
7.	王世文	台中港務局	32.	候憲中	高雄港務局
8.	張天儀	台中港務局	33.	吳炎村	高雄港務局
9.	戴文誠	台中港務局	34.	徐忠猷	花蓮港務局
10.	謝肇章	台中港務局	35.	卓健	花蓮港務局
11.	張伯伍	台中港務局	36.	蕭曉鐘	花蓮港務局
12.	朱照	台中港務局	37.	楊永德	花蓮港務局
13.	曾萬發	台中港務局	38.	柯登福	花蓮港務局
14.	羅瑞雄	台中港務局	39.	嚴文裕	蘇澳港務分局
15.	楊顯堂	台中港務局	40.	白能達	蘇澳港務分局
16.	謝其章	台中港務局	41.	魏基鐘	台灣省公路局
17.	陳述師	台中港務局	42.	吳清泰	台灣省公路局
18.	呂芳甫	台中港務局	43.	高家仁	榮工處
19.	祝慧圓	基隆港務局	44.	余承聖	中鋼公司
20.	李大中	基隆港務局	45.	陳友忠	中鋼公司
21.	郭建華	基隆港務局	46.	黃滿郎	中鋼公司
22.	吳水地	基隆港務局	47.	何栢滄	中鋼公司
23.	洪金本	基隆港務局	48.	郭纘強	益鼎工程股份有限公司
24.	王焰樹	基隆港務局	49.	張清沛	益鼎工程股份有限公司
25.	李雲萬	基隆港務局	50.	葉可向	益鼎工程股份有限公司

51.	陳盛強	吉興顧問工程公司	78.	曾相茂	港灣技術研究所
52.	張志賢	吉興顧問工程公司	79.	王克尹	港灣技術研究所
53.	楊茂林	中華工程公司	80.	林柏青	港灣技術研究所
54.	劉克修	中華工程公司	81.	李豐博	港灣技術研究所
55.	鄭俊彥	中華顧問工程司	82.	陳圭璋	港灣技術研究所
56.	蔡明昌	中華顧問工程司	83.	簡連貴	港灣技術研究所
57.	熊谷鎰	亞新工程顧問公司	84.	謝明志	港灣技術研究所
58.	張耀文	亞新工程顧問公司	85.	李春榮	港灣技術研究所
59.	林慶福	中興顧問工程社	86.	陳義松	港灣技術研究所
60.	吳文利	台灣治水工業股份有限公司	87.	林維明	港灣技術研究所
61.	陳國鑛	中華民國港埠服務社	88.	林榮三	港灣技術研究所
62.	陳明宗	中華民國港埠服務社	89.	蘇瑞榮	港灣技術研究所
63.	鄧堯山	凌克港灣股份有限公司	90.	吳信昇	港灣技術研究所
64.	洪秋煌	中鼎工程公司	91.	饒　正	港灣技術研究所
65.	郭淵雲	柏林股份有限公司	92.	曾文傑	港灣技術研究所
66.	蘇正實	柏林股份有限公司	93.	馬維倫	港灣技術研究所
67.	柯村忺	柏林股份有限公司	94.	徐如娟	港灣技術研究所
68.	張家聖	日東電工株式會社			
69.	陶緒東	港灣技術研究所			
70.	歐陽餘慶	港灣技術研究所			
71.	王慶福	港灣技術研究所			
72.	翁國和	港灣技術研究所			
73.	單誠基	港灣技術研究所			
74.	江金德	港灣技術研究所			
75.	陳陽益	港灣技術研究所			
76.	張金機	港灣技術研究所			
77.	簡仲璟	港灣技術研究所			



港灣技術研究所

港工材料組

■港灣工程材料試驗
■港灣結構物破壞診斷與防制
■發展新港工材料

• 主要研究專題

(1)利用海砂作爲混凝土骨材之可行性研究（已完成）

(2)護堤雙丁塊在海中受外力作用之力學反應研究（已完成）

(3)纖維混凝土材料強度之研究與應用（進行中）

(4)港灣R.C.結構物之耐久性研究（計劃中）

(5)利用非破壞試驗法研究纖維混凝土強度特性（計劃中）

(6)台灣海域腐蝕特性及防蝕設計（計劃中）（與工材所、中鋼公司合作）

(7)碼頭橡膠護舷碰墊之研究（計劃中）

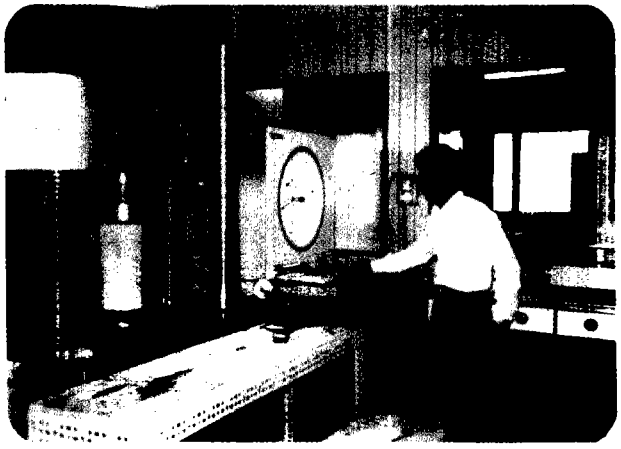
• 主要儀器設備

(1)水泥混凝土試驗設備：恆溫恆濕箱，恆溫恆濕室，萬能試驗機（100噸），混凝土試體振動桌，凍融試驗機，透水試驗儀，頻率共振儀，超音波測儀，柏松比測儀，潛變試驗儀，洛杉機磨損試驗儀，搖篩機……等。

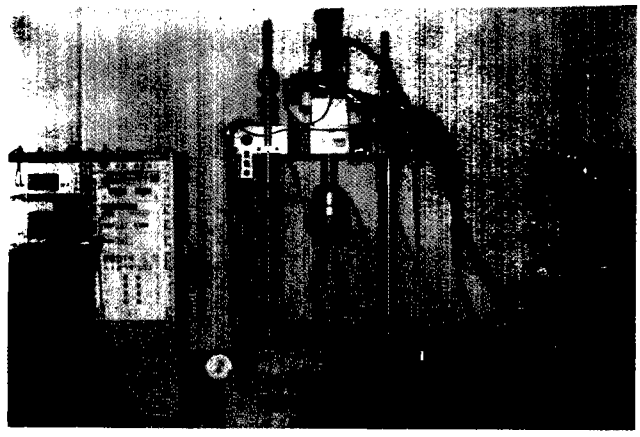
(2)力學試驗設備：動態材料試驗機（25噸），6頻道自動調節平衡增幅器，6頻道光束畫圖機，資料自動掃瞄處理機，鋼筋探測器，校正環（100噸，25噸），多點應變計，各式應變計……等。

(3)腐蝕試驗設備：腐蝕速率測儀，PH計，溶氧計，南森瓶，顛倒溫度計，現場R.C.結構腐蝕測儀……等。

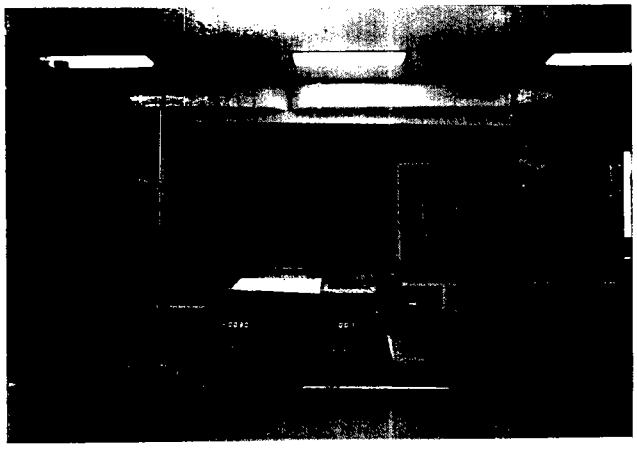
(4)其它材料試驗設備：500公斤材料試驗機，熱傳導係數測儀，光學顯微鏡，精密天平……等。



100 噸萬能試驗機



25 噸動態材料試驗機



腐蝕速率測儀

以超音波測儀作非破壞性試驗

雙丁塊之擺錘試驗

雙丁塊之墜落試驗

本組儀器設備齊全，除供本組基本研究外，更可接受各工程機構委託專題研究。

歡迎洽詢　台中縣梧棲鎮臨海路八三號
TEL：(046)564420.564216