

基隆港鋼板樁結構物腐蝕調查研究

林維明*

Corrosion Studies of Steel Sheet Pile Structures in Keelung Harbor

Wei-Ming Lin*

摘要

港灣碼頭鋼板樁結構物容易發生腐蝕，而國內尚未有腐蝕調查之經驗，本文係以基隆港七座鋼板樁碼頭所進行的初步腐蝕調查個案作為探討之對象，調查結果發現曾進行過防蝕措施者較未作防蝕者之腐蝕量為輕；而鋼板樁凸面之腐蝕速率較凹面為高，而側面側則為最低。以所處海洋環境位置考慮，則以潮汐帶（低潮位上方0.35m）為最高，水線上（低潮下-0.05m）次之，海中區（低潮低下3公尺）為最低。而在同一水域腐蝕型態之變化性很大，且發現有些裂縫，孔洞及穿孔出現，腐蝕速率超過設計規範 $0.2\text{mm}/\text{yr}$ 值者也很多，建議各港務局應對全港區之鋼板樁作一詳細調查，如此可充份地瞭解該港區海域下鋼板樁腐蝕特性，可建立適用腐蝕速率預報公式及採取適當的補修與設計之策略。

ABSTRACT

The steel sheet piles used in harbor wharf structures are easily corroded. The purpose of this study is to understand the corrosion situation of steel sheet pile structures in the harbor wharf and to examine the effectiveness of corrosion protection. There are seven wharves with steel sheet piles in Keelung harbor were examined. From the data obtained, it is found that the corrosion for the cathodically protected structures is less than that for unprotected structures. At each water level, the corrosion rates of the convex sheet piles are higher than those of the concave sheet piles. One per 30 sheet piles was chosen for each wharf and the thicknesses of steel sheet piles were measured at 3 water levels of LWL+0.35m (in the tidal zone); LWL-0.05M (just below low water level) and LWL-3.00m (in the submerged zone) etc. The maximum corrosion rate is in the tidal zone where is just below mean low water level, and the minimum one is in the submerged zone. There appeared many different corrosion patterns in the same level. Furthermore, also some of cracking, pitting and penetration are found in the structures. The corrosion rates of all steel sheet piles are higher than that of design guide ($0.2\text{mm}/\text{yr}$). It is recommended that the detailed corrosion survey of harbor steel structures should be taken in each harbor, in order to have a full understanding of the performance and corrosion characteristics of the steel sheet pile structure under different marine environments; and to get the suitable estimated formula for corrosion rate. Thus, the proper corrosion protection methods and maintenance treatments ect. for engineering usage can be established.

Key words: steel sheet pile, harbor wharf structures, corrosion rate, cracking, pitting, penetration.

* 省交通處港灣技術研究所研究員兼港工材料組組長

一、前 言

鋼板樁具有高強度；材質均一；容易切割、焊接、搬運、吊裝及打樁等之施工便捷，造型輕巧，美觀及結構體具耐震性佳等諸多優點，因此在港灣碼頭工程中廣受應用，然而其最大的缺點為容易發生腐蝕。

腐蝕為鐵回歸其自然氧化狀態之過程。金屬元素大多數以礦石等自然狀態存在，經冶練而成為金屬僅為一暫存態，發生腐蝕回歸至自然態為自然之趨勢。例如赤鐵礦 (Fe_2O_3) 為最常見之鐵礦石為鐵之氧化物，而鐵之氧化生成物亦為 Fe_2O_3 。由鐵礦石冶練成鐵所需之能量與鐵發生腐蝕而形成與原鐵礦石相同成份的鐵锈所放出能量相等，僅是能量變化之速率不同而已。例如圖 1 為自然鐵礦經冶練成鋼材再經腐蝕回歸氧化物的示意圖⁽¹⁾。

港灣鋼板樁發生腐蝕與海洋環境有關。在海水中其溶氧量、含鹽量、流速、溫度、pH 值、海中生物和細菌的附著等腐蝕因子都是其主要致因。因此要探究腐蝕的原因十分地困難。結構體所處之位置含海洋大氣區、飛沫區、潮汐區、海中區和海床區等五大區域。由於彼此環境不同，

其腐蝕形態亦相對地有差異⁽²⁾。在海洋大氣區，由於在大氣中海風所挾帶之海鹽水汽的作用致生銹腐蝕，在陽光照不到的地方及風雨可及之處較易發生。飛沫區則由海浪之飛沫、乾濕循環和溫度之相乘作用而使腐蝕速率為最大。而潮汐帶，因與海中區形成氧化濃淡電池，此區域由於氧氣供應充分為陰極故腐蝕速率較低，而剛在低潮位下，氧濃度較低區為陽極，又加上生物附著，及海流海浪之攪拌作用，故腐蝕速率較增高，而在深海由於溶氧量低，故腐蝕量亦相對降低，另外由於在海床土壤中有硫酸還原菌存在可能造成腐蝕。由上述可見腐蝕傾向因結構所處之部位而有所差異。

而對港灣鋼板樁結構物之防蝕對策有陰極防蝕，被覆塗裝和預留厚度工法等，圖 2 為常見之

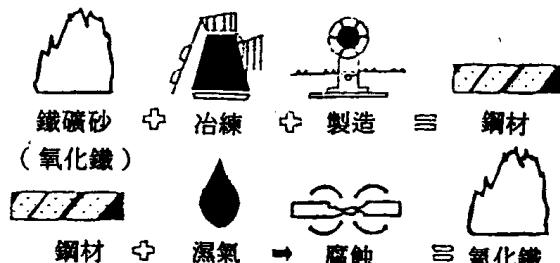
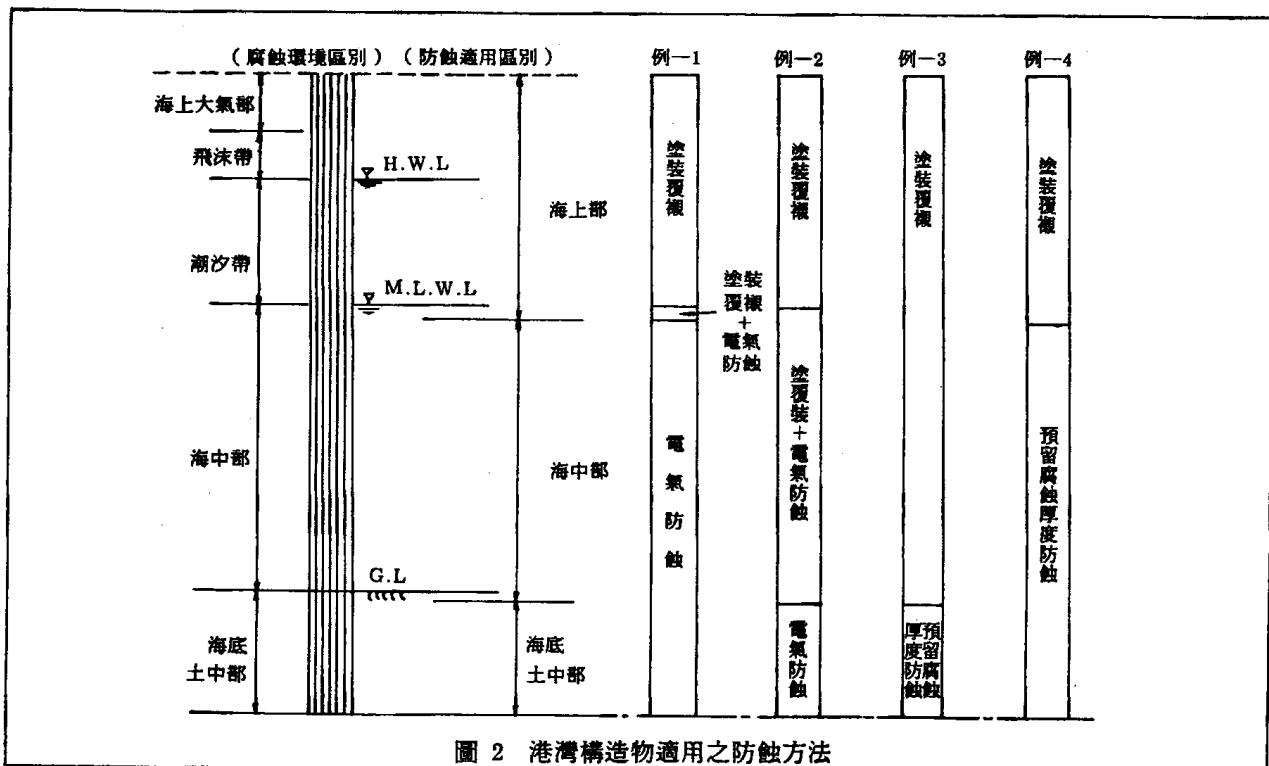


圖 1 鐵礦砂冶煉為鋼材再回歸為氧化鐵之示意圖



基隆港鋼板樁結構物腐蝕調查研究

防蝕工法適用範圍之範例⁽²⁾。預留厚度工法在均勻腐蝕量很小或不發生集中腐蝕之情況較為有效。因此經常對於實際結構物腐蝕情形進行調查，將可以更清楚地瞭解腐蝕傾向及採取必要之防制措施。

本文擬先概述往昔學者對腐蝕調查所得之現象，然後分析檢討本次初步量測之結果，並提出一些結論與建議以供研究、規劃與設計之參考。

二、往昔之研究

1. 鐵銹之形態

鐵銹生成反應相當複雜，有關鋼材發生腐蝕可能生成物的一些特性⁽³⁾，鐵銹生成路徑^(4,5)及在不同環境下生成的鐵銹成份^(6,7)都曾被研究報導過，表 1 為海洋環境下鋼材銹蝕之一些特性⁽⁷⁾，而圖 3⁽⁸⁾為在人工海水中鋼材發生腐蝕之反應生成物形成模式。增田一廣等人⁽⁸⁾對碳鋼進行12年2個月之試驗後，分析銹層之組成和厚度結果如表 2 所示，除潮汐區外，其成份均以 Fe_3O_4 之數量為最多。

2. 腐蝕速率

表 3 為門智等人⁽⁹⁾所進行普通鋼在海洋環境下之平均腐蝕速率測量結果。日本港灣結構物防蝕設計基準係根據日本運輸省港灣技術研究所之研究成果制定的，過去在高潮位至海床間之腐蝕速率都使用 0.1 mm/yr 為設計基準，然而到1980年時發現，1960年代設計者所考慮的腐蝕速率數據以嫌不足，因此1982年時曾針對港灣鋼結構物之腐蝕進行全面性之調查，表 4 為其調查結果之

範例⁽¹⁰⁾，因此將原規範修正為高潮位至海床間的腐蝕速率分為兩部份，在低潮位 1 公尺以上者採用 $0.1 \sim 0.3 \text{ mm/yr}$ ，以下者採用 $0.1 \sim 0.2 \text{ mm/yr}$ ⁽²⁾。而目前國內港灣鋼結構物設計所採用的數據仍以 0.2 mm/yr 為設計規範⁽¹¹⁾。鋼材之腐蝕速率設計如表 5 所示^(2,11)。

通常港灣碼頭鋼板樁或鋼管結構物，其上部結構（碼頭面及岸壁）均以混凝土包覆，由於裸鋼與混凝土包覆之鋼材間有電位差，因此在裸鋼處為陽極，將會產生集中腐蝕之現象，根據日本港灣技術研究所在1978～1981年期間所進行過之鋼板樁腐蝕調查的結果可歸納如圖 4 所示之腐蝕傾向⁽¹²⁾，其中在低潮位稍下部位處發生集中腐蝕現象，腐蝕速率最大者有高達 0.93 mm/yr ⁽¹²⁾。以鋼板樁而言，向海側凸出面較凹進面的腐蝕量多（圖 5）。而鋼板樁穿孔者必定在凸出面，尤其以隅角端腐蝕量為最高。一般港灣鋼板樁結

表 1 海洋環境下鋼材生銹特性⁽⁷⁾

海洋環境	鐵銹之主要成份	銹層
大氣區	Fe_3O_4 (內層)	飛來的海鹽顆粒及高溫度會妨害保護性銹形態
	$\gamma\text{-FeOOH}$ (外層)	銹易受力學性的破壞。
	$\alpha\text{-FeOOH}$ (外層)	保護性鐵層（主成分為 Fe_3O_4 固著於內層）之形成，即氧氣之擴散受抑制及 2 層鐵銹層 ($\text{FeOOH}/\text{Fe}_3\text{O}_4$) 氧化還原反應之抑制。
	$\beta\text{-FeOOH}$	

表 2 碳鋼鋼管樁上銹層厚度和銹層組織⁽⁸⁾

位置	銹層厚度 (mm)	銹層組織
飛沫區	外層：9.4	$\text{Fe}_3\text{O}_4 > \alpha\text{-FeO} \cdot \text{OH} > \gamma\text{-FeO} \cdot \text{OH}$
	內層：0.1~0.5	$\text{Fe}_3\text{O}_4 > \alpha\text{-FeO} \cdot \text{OH} > \beta\text{-FeO} \cdot \text{OH}$
潮汐帶	外層：3.0	$\gamma\text{-FeO} \cdot \text{OH} > \alpha\text{-FeO} \cdot \text{OH} > \text{Fe}_3\text{O}_4$
	內層：0.7~0.9	$\gamma\text{-FeO} \cdot \text{OH} > \alpha\text{-FeO} \cdot \text{OH} > \text{Fe}_3\text{O}_4$
海中區	外層：0.8	$\alpha\text{-FeO} \cdot \text{OH} = \beta\text{-FeO} \cdot \text{OH} = \gamma\text{-FeO} \cdot \text{OH} = \text{Fe}_3\text{O}_4$
	內層：0.1~0.2	$\text{Fe}_3\text{O}_4 > \alpha\text{-FeO} \cdot \text{OH} = \beta\text{-FeO} \cdot \text{OH} = \gamma\text{-FeO} \cdot \text{OH}$
海床下	外層：0.8	$\text{Fe}_3\text{O}_4 >> \gamma\text{-FeO} \cdot \text{OH} = \beta\text{-FeO} \cdot \text{OH} = \alpha\text{-FeO} \cdot \text{OH}$
	內層：0.07~0.1	$\text{Fe}_3\text{O}_4 >> \gamma\text{-FeO} \cdot \text{OH} = \beta\text{-FeO} \cdot \text{OH} = \alpha\text{-FeO} \cdot \text{OH}$

	腐蝕電位	陽極																		
電氧化學反應	<p>陰極反應 (接受電子的還原反應)</p> $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$ $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$ $2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$ <p>(OH⁻ 過剩、鹼性)</p> $Mg^{++} + 2OH^- \rightarrow Mg(OH)_2$ $Ca^{++} + CO_2 \rightarrow CaCO_3$ $Mg^{++} + CO_3^{2-} \rightarrow MgCO_3$	<p>鐵溶解的陽極反應 (放出電子之氧化反應)</p> $Fe \rightarrow Fe_{(aq)}^{2+} + 2e^-$																		
腐蝕生成物 (沉積皮膜) 之形成反應 模式圖																				
設定電位 (Volt vs. Ag/AgCl) 與主要腐蝕生成物	<table border="1"> <tr> <td>-1.10</td><td>-1.00</td><td>-0.90</td><td>-0.80</td><td>Ecorr (-0.60~-0.46)</td><td>-0.45</td></tr> <tr> <td>Mg(OH)₂, CaCO₃, MgCO₃</td><td>Mg(OH)₂, CaCO₃, MgCO₃</td><td>少量 形成</td><td>未形成</td><td>• 氧氣供應量不充分的地方 (內層、龜裂內) : Fe₃O₄</td><td>Fe₃O₄</td></tr> <tr> <td>腐蝕生成物之電導度 (乾燥狀態)</td><td>$10^{-1}\Omega^{-1} \cdot cm^{-1}$ 以下</td><td></td><td></td><td>• 氧氣供應充分之處 (外層、試驗表面) : γ-FeOOH</td><td></td></tr> </table>	-1.10	-1.00	-0.90	-0.80	Ecorr (-0.60~-0.46)	-0.45	Mg(OH) ₂ , CaCO ₃ , MgCO ₃	Mg(OH) ₂ , CaCO ₃ , MgCO ₃	少量 形成	未形成	• 氧氣供應量不充分的地方 (內層、龜裂內) : Fe ₃ O ₄	Fe ₃ O ₄	腐蝕生成物之電導度 (乾燥狀態)	$10^{-1}\Omega^{-1} \cdot cm^{-1}$ 以下			• 氧氣供應充分之處 (外層、試驗表面) : γ-FeOOH		<p>9 × 10⁻⁶ ~ 5 × 10⁻⁵ Ω⁻¹ · cm⁻¹</p> <p>3 × 10⁻⁴ Ω⁻¹ · cm⁻¹</p>
-1.10	-1.00	-0.90	-0.80	Ecorr (-0.60~-0.46)	-0.45															
Mg(OH) ₂ , CaCO ₃ , MgCO ₃	Mg(OH) ₂ , CaCO ₃ , MgCO ₃	少量 形成	未形成	• 氧氣供應量不充分的地方 (內層、龜裂內) : Fe ₃ O ₄	Fe ₃ O ₄															
腐蝕生成物之電導度 (乾燥狀態)	$10^{-1}\Omega^{-1} \cdot cm^{-1}$ 以下			• 氧氣供應充分之處 (外層、試驗表面) : γ-FeOOH																
具有形效果 的蝕生成物	白色的生成物 Mg(OH) ₂ (Brucite) 、CaCO ₃ (Calcite) 、 MgCO ₃ (Magnesite)	鐵锈：氧化鐵 [Fe ₃ O ₄ (Magnetite)] 氫氧化鐵 [Fe(OH) ₃]																		
	多量	少量																		

圖 3 人工海水 (pH 值 8.2, 25°C, 鮑和空氣) 中之鋼材發生腐蝕，陽極溶解電位下及陰極防蝕電位下之腐蝕反應生成物之形成模式圖 (a)

基隆港鋼板樁結構物腐蝕調查研究

表 3 普通鋼在海洋環境之平均腐蝕速率^(*)

環 境	鋼材試驗 類 別	測定之 數 量	腐蝕速率 (mm/yr)	環 境	鋼材試驗 類 別	測定之 數 量	腐蝕速率 (mm/yr)
海上大氣	腐蝕試驗片	19	0.128	低潮位	鋼板樁	42	0.047
	平 均	19	0.128		平 均	42	0.047
飛沫區	鋼 板 樁	8	0.112	海 水 中	鋼 板 権	59	0.039
	鋼 管 権	1	0.25		鋼 管 権	5	0.062
	H型鋼樁	2	0.198		H型鋼樁	3	0.049
	腐蝕試驗片	16	0.363		腐蝕試驗片	61	0.143
	平 均	27	0.272		平 均	128	0.090
潮汐區	鋼 板 権	35	0.044	海 床 下	H型鋼樁	2	0.033
	鋼 管 権	4	0.070		腐蝕試驗片	3	0.103
	H型鋼樁	2	0.055		平 均	5	0.075
	腐蝕試驗片	27	0.137				
	平 均	68	0.083				

表 4 鋼板樁腐蝕調查結果範例^(*)

實測地點	位 置	調查時間(年)	兩側的腐蝕速率 mm/year	鋼板樁型態 兩側之腐蝕速率
Kayamachi 碼頭	L.W.L.	29	0.070	FSP III A
	海中		0.070	
	海床下		0.070	
Shimonoseki 港 2 號突堤 水深 10m 碼頭	H.W.L.	5	0.170	YSP Z-45
	L.W.L.		0.220	
	海中		0.200	
	海床下		0.200	
Shimonoseki 港 1 號突堤 水深 3 公尺 碼頭	H.W.L.	10	0.070	YSP-III
	L.W.L.		0.050	
	海中		0.040	
Tanoura 港 10m 水深 井筒式 碼頭	H.W.L.	5	0.160	YSP-F
	L.W.L.		0.160	
	海中		0.150	
	海床下		0.150	
Akita 港 北碼頭	H.W.L.	27	0.090	YSP-II
	海床		0.020	
	L.W.L.	30	0.134	YSP-V
	海床下		0.100	
	L.W.L.		0.120	
AKita 港 南碼頭	海床下	30	0.084	FSP-II
	H.W.L.		0.114	
	海床下		0.100	
	L.W.L.		0.074	
	海床下		0.050	

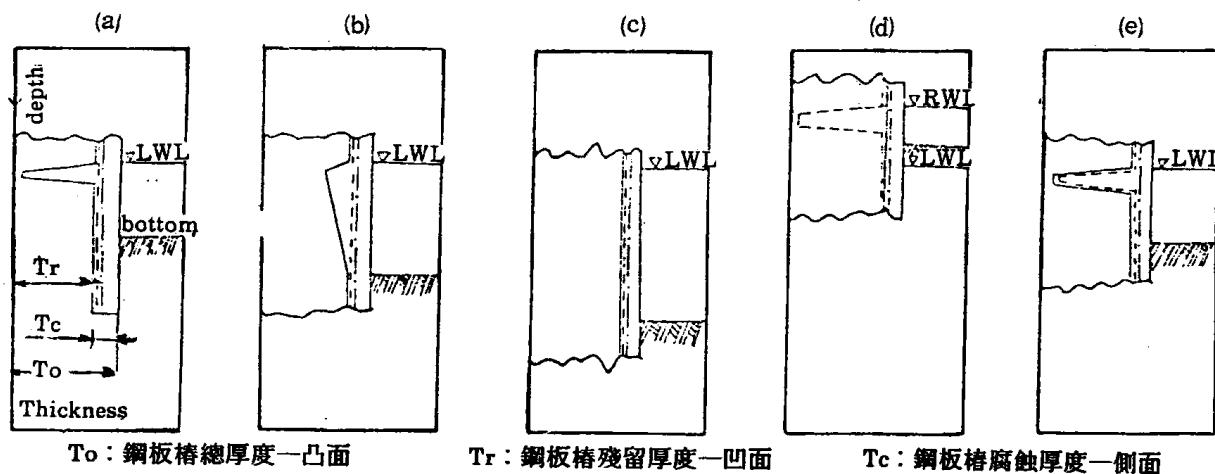


圖 4 鋼板樁發生之腐蝕形態⁽²⁾

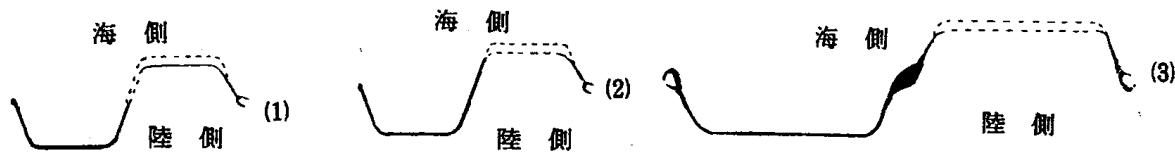


圖 5 鋼板樁發生集中腐蝕之位置⁽²⁾ (點線部份)

表 5 鋼材腐蝕速率^(2,11)

腐蝕環境	腐蝕速率 (mm/yr)	
	日本	我國
海側	高潮位以上	0.3
	高潮位至低潮位下 1.0m	0.1~0.3
	低潮位下 1 公尺至海床	0.1~0.2
	海底淤泥層中	0.3
陸側	陸上大氣區	0.1
	土中 (殘留水位上)	0.03
	土中 (殘留水位下)	0.02

構物腐蝕都發生在繁船岸壁，應力大者較易發生集中腐蝕現象。一般而言，凹進面腐蝕量較少，除非穿孔從陸側流出土壤，否則對結構不會造成危險。而一般鋼管樁之腐蝕趨勢與鋼板樁相似，如圖 6^(13,14)所示。

一般港灣鋼板樁結構物所發生之腐蝕形態有成均勻程度的常態腐蝕 (general corrosion)，可再細分為平坦 (even) 者或凹凸不平坦 (uneven) 者，另有局部電池所引起之腐蝕即局部腐蝕 (local corrosion) 可再分為①腐蝕面平坦 (even) 或②凸凹 (uneven)，③孔蝕面 (pitting)。

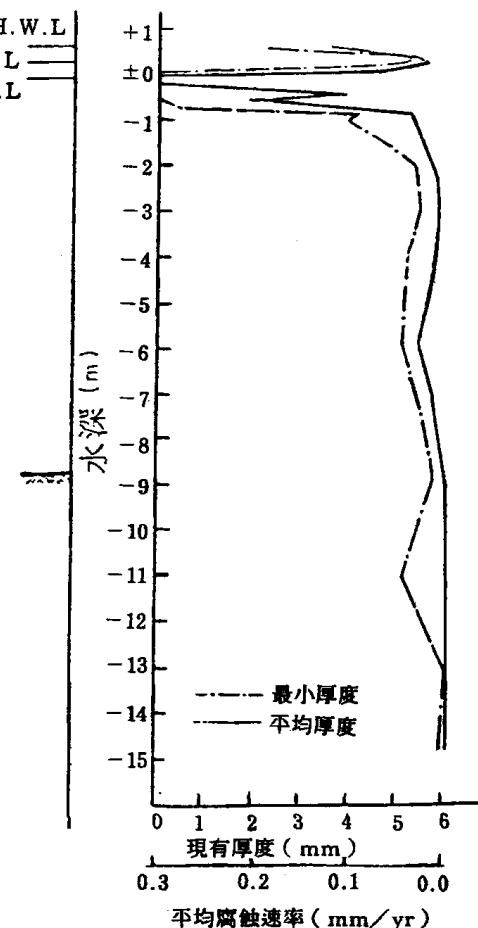


圖 6 鋼管樁的腐蝕調查例

基隆港鋼板樁結構物腐蝕調查研究

(pitting) 其寬／深比值小於 $\frac{1}{4}$ 者為狹窄型 (narrow) , 在寬度與深度相等時為中度 (medium) , 而達到 6 者為寬廣型 (wide) 及④發生龜裂 (cracking) 等四種現象⁽²⁾。

通常鋼板樁腐蝕調查係採用超音波厚度計量測其現有厚度，因此可根據原設計厚度及使用年數而求出腐蝕速率⁽¹⁶⁾如下式：

$$\begin{aligned} \text{腐蝕速率} &= \text{腐蝕量} / \text{使用年限} \\ &= (\text{原設計厚度} - \text{現量測厚度}) \\ &\quad / \text{使用年限} \end{aligned} \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

而有些結構物於工程竣工後數年再安裝陰極防蝕措施，則其腐蝕速率將依安裝前後而有所不同⁽¹⁶⁾，其公式如下：

$$V_c = C / (Y_c + (1-P)Y_p) \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

$$V_p = (C - V_c Y_c) / Y_p \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

式中：
 V_c ：未安裝防蝕措施期間之腐蝕速率
 (mm/yr) 。
 V_p ：安裝防蝕措施後之腐蝕速率 (mm/yr)。

Y_c ：未作防蝕之使用年數 (yr)

Y_p ：已作防蝕之使用年數 (yr)

C ：腐蝕量 (mm)

P ：防蝕效率 (%)

三、調查規劃工作概述

1. 結構物概述

港灣技術研究所為通盤瞭解並建立現有五大港（基隆、高雄、台中、花蓮及蘇澳）的碼頭鋼板樁結構物耐久性的完整資料，提出今後新建鋼

結構物及維修現有鋼結構物之規範，於民國78年7月起開始在各港的現有鋼板樁結構物之腐蝕性進行調查，詳見參考文獻17，本文僅就基隆港數座碼頭之資料剖析，其背景資料如表6所示，而調查之結構物位置圖及碼頭斷面如圖7及圖8所示。本次調查之鋼板樁除西27號使用 Z-25型外，其它都是 Z-38型，其斷面如圖9所示。

本調查工作由潛水人員攜帶海中照像機及英國製之 Cygnus I 型超音波測厚儀進行調查工作。水下工作人員先勘察拍照損壞情形，然後將測厚儀之探頭放置於已清除乾淨的鋼板樁上，本儀器係利用脈沖原理，由彈性波經鋼材至內壁之傳播時間，由於音波在鋼材之傳播速度為一定值，故可由接收器直接讀取現有之厚度（圖10），其原理為：

$$S_i = V \times \frac{1}{2} (t_{i+1} - t_i)$$

式中 V ：超音波在鋼板樁中之傳播速度
 $= 5,920 \text{ m/sec}$

S_i ：現有鋼板樁厚度讀數

t_{i+1}, t_i ：測厚儀接受回聲及剛開始傳播的時間。

為準確起見，取兩個數據，然後求其平均值。為使調查之結果較具可靠性，自每座碼頭啟始點（里程為 0k +0.00 公尺）起，每隔 12 公尺（30 支鋼板樁）取樣一根，在海側凸面、凹面及側面各取兩點，量測之位置為在低潮位下 0.05 公尺（低潮汐帶之處）及 3 公尺（海中區）與低潮位上 0.35 公尺（潮汐帶），量測時先選擇較平坦的

表 6 基隆港碼頭鋼板樁結構物腐蝕調查之背景

碼頭編號	長度 (m.)	水深 (m.)	鋼板樁 型態	原厚度 (mm)		竣工日期 (年, 月)	防蝕處理	防蝕處理 安裝時間 (年, 月)
				凸、凹面	側面			
東 2 號	200	-9.00	Z-38	17.2	11.4	57, 3.	陰極防蝕	66, 7.
東 3 號	170	-9.00	Z-38	17.2	11.4	57, 3.	陰極防蝕	68, 5.
東 4 號	180	-9.00	Z-38	17.2	11.4	57, 3.	陰極防蝕	69, 7.
東 6 號	180	-9.00	Z-38	17.2	11.4	59, 4.	無	—
東 7 號	178	-9.00	Z-38	17.2	11.4	59, 12.	無	—
東 8 號	180	-9.00	Z-38	17.2	11.4	59, 12.	無	—
西27號	150	-7.00	Z-25	13.0	9.6	59, 11.	無	—

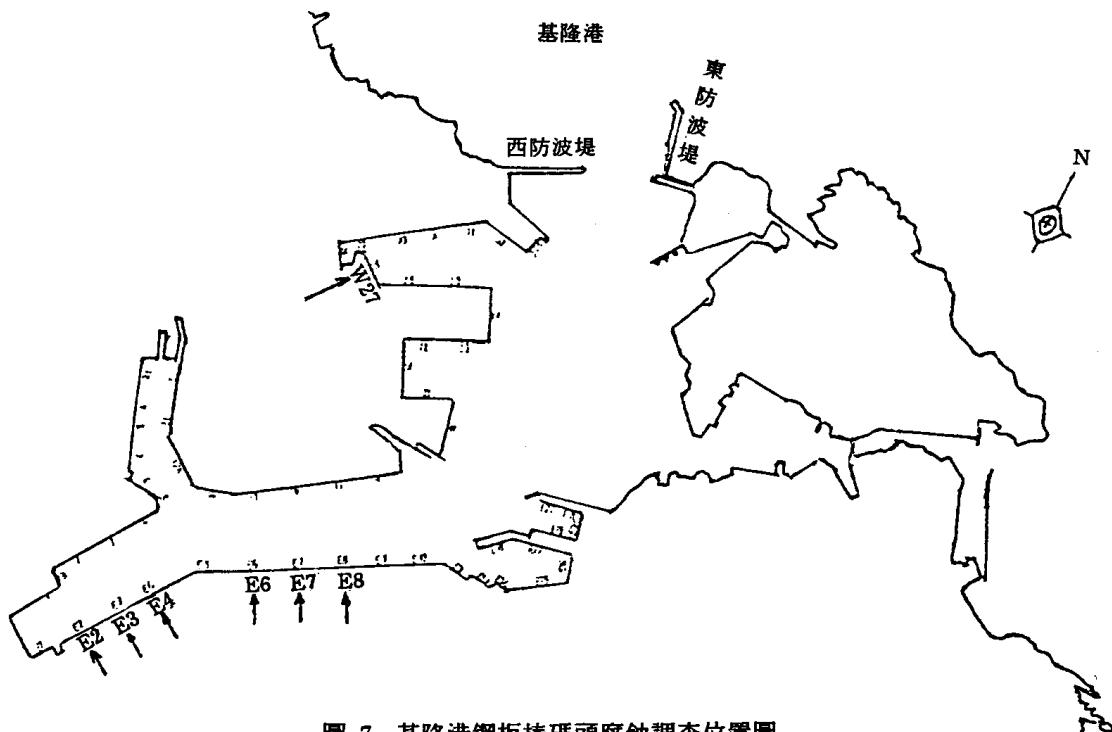


圖 7 基隆港鋼板樁碼頭腐蝕調查位置圖

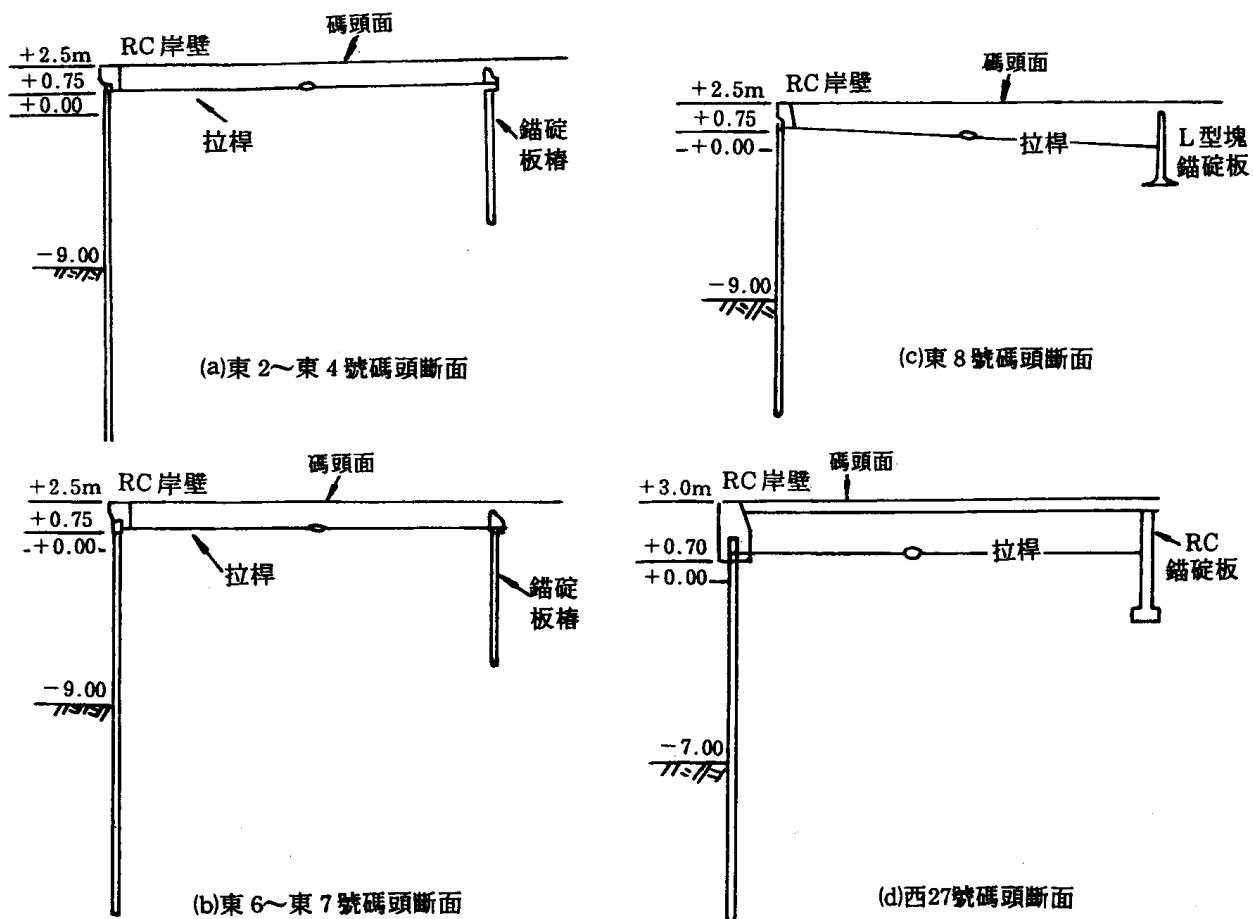


圖 8 碼頭斷面圖

基隆港鋼板樁結構物腐蝕調查研究

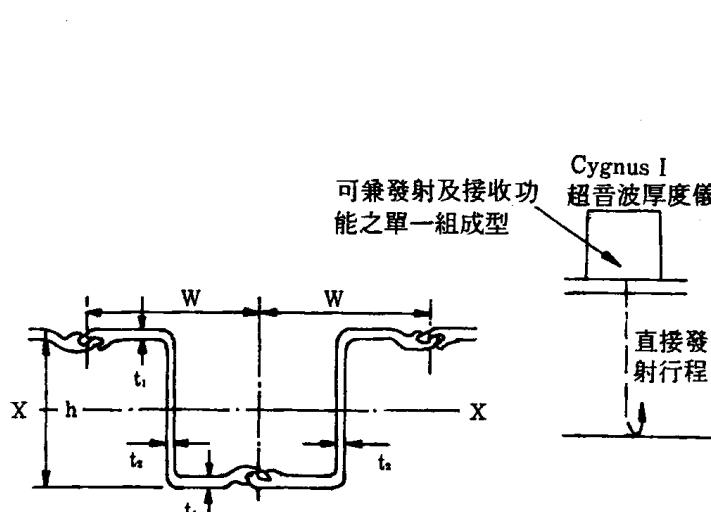


圖 9 鋼板樁斷面

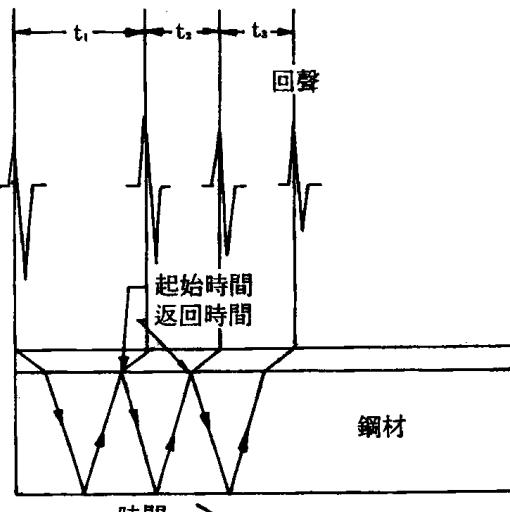


圖10 超音波量測鋼板樁厚度法

地方，敲除海生物及鐵锈約5公分寬，然後進行量測，量測位置如圖11所示，在海中量測鋼板樁厚度之情形如圖12所示。

水下工作人員將讀數記錄在記錄板上，由研究員復記於記錄紙上，攜回研究室進行資料處理與分析工作，表7為檢測記錄之範例。而腐蝕速率之計算按式(1)～式(3)計算完全未作防腐蝕措施者，及已作防腐蝕措施分為安裝前及安裝後之兩種情況下之腐蝕速率。

而防蝕效率依浸水率多寡有別，在浸水率為40%以下者，防蝕效率為40%以下，而浸水率在40~80%及80~100%之間，則防蝕效率分別為40~60%及60~90%，完全浸於海中者，防蝕效率為90%⁽¹⁾，本次所選取三個測點在低潮位下3公尺者，由於完全浸於海中，故防蝕效率取90%，而在低潮位下0.05公尺者及其上0.35公尺分別採用60%及50%。

四、調查結果與討論

每一座碼頭在指定的里程下，在不同之水深(+0.35, -0.05, -3.0m)下，於不同之鋼板樁斷面(凸面、凹面及側面)實測兩個位置之厚度，然後求平均值，再換算為腐蝕速率，其成果範例如表7與表8及圖13所示，以下就各碼頭之調查結果進行討論：

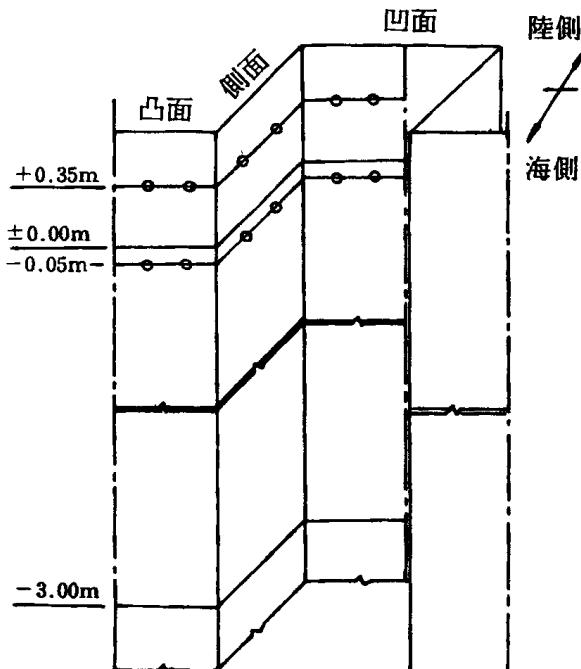


圖11 鋼板樁厚度量測與水深相關位置

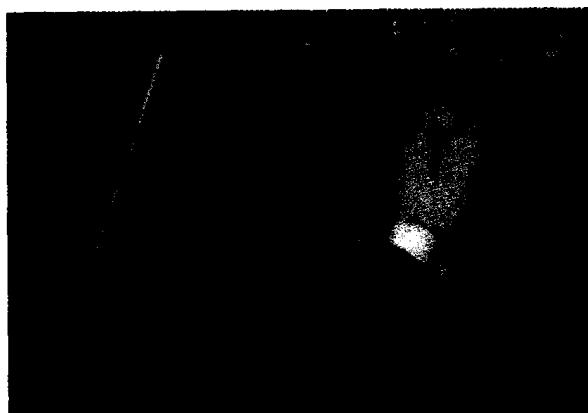


圖12 超音波厚度量測

表 7 基隆港東 2 號碼頭鋼板樁檢測紀錄

調查地點 No.	水深 (m.)	量測 斷面	原鋼板 樁厚度 (mm)	實測鋼板樁 (mm)			腐蝕量 (mm)	平均腐蝕速率 (mm/yr)		
				No.1	No.2	平均		(1)	(2)	(3)
2011	+0.35	凸面	17.20	14.00	14.30	14.15	3.05	0.14	0.21	0.08
		側面	11.40	10.10	9.70	9.90	0.50	0.07	0.10	0.04
		凹面	17.20	15.10	15.10	15.10	2.10	0.10	0.14	0.06
		平均					2.22	0.10	0.15	0.06
2012	-0.05	凸面	17.20	14.60	14.80	14.70	2.50	0.11	0.22	0.20
		側面	11.40	9.90	9.80	9.85	1.55	0.07	0.14	0.01
		凹面	17.20	15.50	14.90	15.20	2.00	0.09	0.18	0.02
		平均					2.02	0.09	0.18	0.02
2013	-3.00	凸面	17.20	15.30	15.10	15.20	2.00	0.09	0.18	0.02
		側面	11.40	10.20	9.90	10.05	1.35	0.06	0.12	0.01
		凹面	17.20	16.00	15.80	15.90	1.30	0.06	0.12	0.01
		平均					1.77	0.08	0.14	0.01
				總平均		2.00	0.09	0.16	0.03	

說明：(1)：腐蝕量除以使用時期

(2)：未作防蝕處理期間的腐蝕速率

(3)：已安裝陰極防蝕後之腐蝕速率

表 8 基隆港東 2 號碼頭鋼板樁檢測結果

水深 (m.)	量測 斷面	原厚度 (mm)	實測厚度 (mm)			腐蝕速率 (mm/yr)	
			平均值	標準偏差	最小值	平均值	最大值
+0.35	凸面	17.2	14.87	1.06	10.40	0.11	0.26
	凹面	17.2	15.46	0.47		0.08	
	側面	11.4	10.17	0.41	9.00	0.06	0.09
-0.05	凸面	17.2	14.81	0.86		0.11	
	凹面	17.2	15.39	0.61		0.80	0.12
	側面	11.4	10.24	0.40		0.05	
-3.00	凸面	17.2	15.39	0.59		0.08	
	凹面	17.2	15.46	0.45	14.10	0.08	
	側面	11.4	10.32	0.54		0.05	

(一) 東 2 號碼頭

(1) 如表 8 所示，平均腐蝕速率以海側凸面為最大，凹面次之，而側面為最小。

(2) 以水深比較，在海中之平均腐蝕速率為最低

，而在低潮位上、下處之平均腐蝕速率較高。在低潮位上方 0.35 公尺有出現平均腐蝕速率高達 0.25 mm/yr。並在該處之實測值有出現銹蝕厚度 6.8 mm 即最大腐蝕速率為

基隆港鋼板樁結構物腐蝕調查研究

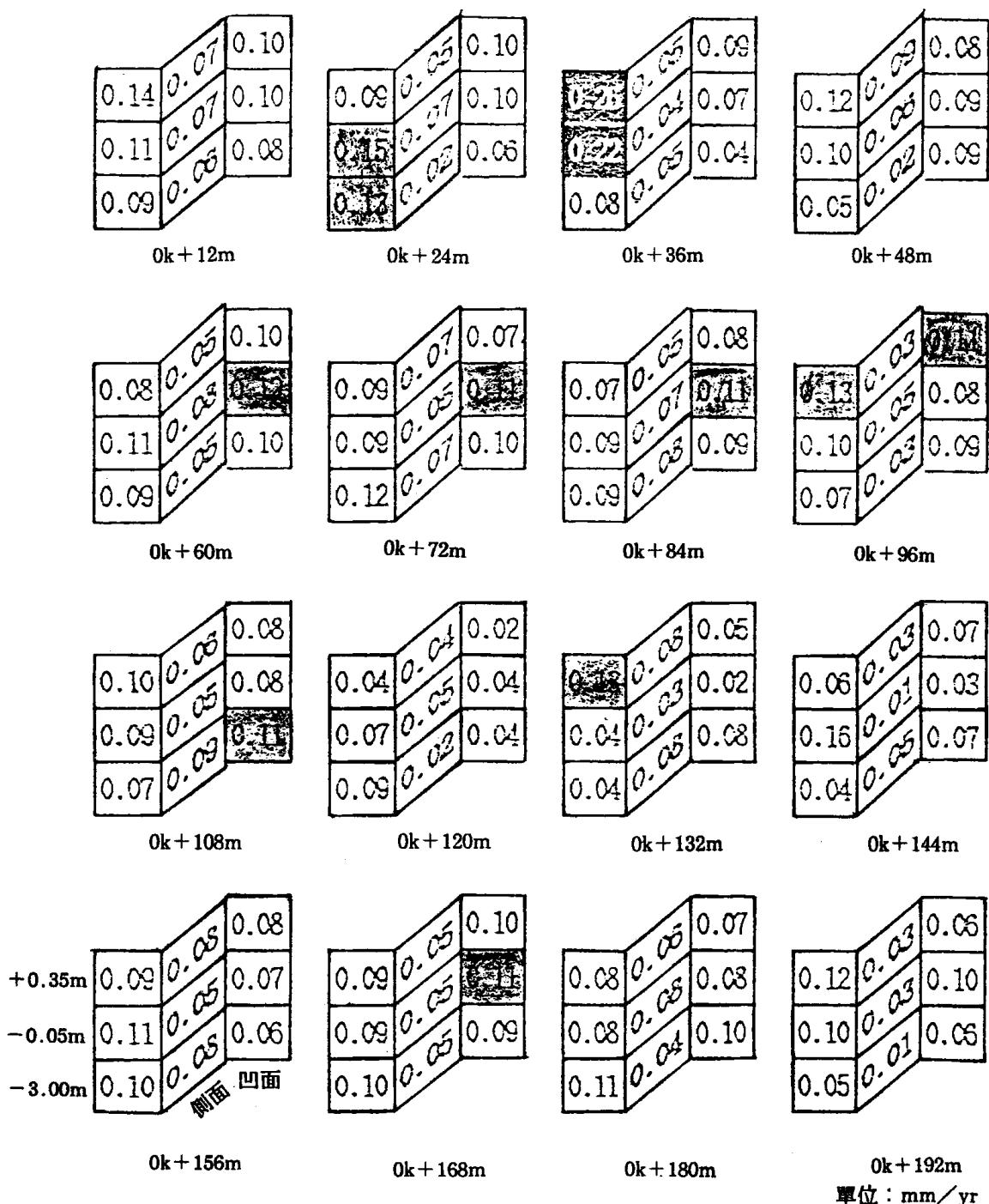


圖13 基隆港東2號碼頭鋼板樁腐蝕狀況示意圖

0.31mm/yr 。

(3)就整座碼頭而言，如圖13所示，在 $0k+36m$ 處，鋼板樁海側凸面在低潮位上 0.35m 及 -0.05m 處之腐蝕速率分別為 0.26 及 0.22mm/yr ，均大於規範值之 0.2mm/yr 。

(4)本碼頭於民國57年竣工，66年完成陰極防蝕工程依公式(2)及(3)之計算結果範例如表7所示，由表中可見在未作防蝕前，已有多處地點之鋼板腐蝕速率超過 0.2mm/yr 之規範值（如圖13中陰影部份），安裝陰極防蝕後

12年來之腐蝕速率都在 0.08mm/yr 以下，平均值為 0.03mm/yr ，但仍有腐蝕速率超過 0.2mm/yr 之情形，可能其陰極防蝕效果已失靈之故。

(5)本碼頭位於海水與淡水之交流處，鋼板樁上有生長一些海生物，而造成孔蝕之跡象。

(二) 東 3 號碼頭

(1)如表 9 及圖 14~15 所示，本碼頭鋼板樁的腐蝕趨勢相當顯著，仍以凸面>凹面>側面，而水深則以 $+0.35\text{m} > -0.05\text{m} > -3.00\text{m}$ 。

(2)本碼頭 3 處 $0\text{k} + 48\text{m}$, $0\text{k} + 96\text{m}$ 及 $0\text{k} + 144\text{m}$ 等地方，鋼板樁凸面低潮位上 0.35m 之平均腐蝕速率都超過規範中之 0.2mm/yr 。

(3)本碼頭於民國 57 年竣工，68 年 5 月安裝完成陰極防蝕措施，而根據公式(2)及(3)計算結果發現在未作防蝕處理前已有多處之腐蝕速率超過 0.2mm/yr 之規範值。

(三) 東 4 號碼頭

(1)如表 9 及圖 14~15 所示之平均腐蝕速率，鋼板樁之海側凸面 (0.13mm/yr)>凹面 (0.09mm/yr)>側面 (0.06mm/yr)，且水深以 $+0.35\text{m}$ (0.13mm/yr)> -0.05m (0.10mm/yr)> -3.0m (0.06mm/yr)。其中 () 內數據為腐蝕速率。

(2)在 $0\text{k} + 96\text{m}$ 鋼板樁凸面在低潮位上方 $+0.35\text{m}$ 之處之平均腐蝕速率為 0.24mm/yr 。

(3)本碼頭於民國 57 年竣工，69 年完成安裝陰極防蝕措施，此時已有多處之腐蝕速率超過 0.2mm/yr 之規範設計值。

(四) 東 6 號碼頭

(1)如表 9 及圖 14~15 所示，就平均腐蝕速率而言，鋼板樁的凸面 (0.27mm/yr)>凹面 (0.14mm/yr)>側面 (0.11mm/yr)。

(2)以所處之水深比較，則以 $+0.35\text{m}$ (0.27mm/yr)> -0.05m (0.21mm/yr)> -3.0m (0.15mm/yr)。

(3)本碼頭在 $0\text{k} + 132\text{m}$ 之鋼板樁因腐蝕嚴重無法量測，而在 $0\text{k} + 96\text{m}$ 兩支鋼板樁整支嚴重腐蝕，凸面之平面腐蝕速率高達 0.33mm/yr 及 0.35mm/yr ，而在 $0\text{k} + 108\text{m}$ 處則高達 0.47mm/yr 。

(4)本碼頭海側凸面在水深為 $+0.35\text{m}$ ，其平均腐蝕速率超過 0.2mm/yr 者有 81%，水深為 -0.05m 時，為 37.5%，而在 -3.0m 處則為 12.5%。

(5)本碼頭有許多鐵錆剝落之現象，然而尚未發現有穿孔之跡象。

(五) 東 7 號碼頭

(1)如表 9 及圖 14~15 所示，平均腐蝕趨勢速率仍以凸面>凹面>側面。

(2)所處水深比較而言係 $+0.35\text{m} > -0.05\text{m} > -3.0\text{m}$ 。

(3)本碼頭在 $0\text{k} + 24\text{m}$ 及 $0\text{k} + 36\text{m}$ 處在 $+0.35\text{m}$

表 9 基隆港鋼板樁檢測結果比較表

水深 (m.)	量測 斷面	平均腐蝕速率 (mm/yr)					
		東 3 號	東 4 號	東 6 號	東 7 號	東 8 號	西 27 號
$+0.35$	凸面	0.15	0.13	0.27	0.17	0.30	0.21
	凹面	0.09	0.09	0.14	0.14	0.12	0.11
	側面	0.07	0.06	0.11	0.14	0.12	0.09
-0.05	凸面	0.11	0.10	0.21	0.14	0.19	0.12
	凹面	0.08	0.09	0.13	0.11	0.11	0.08
	側面	0.06	0.06	0.10	0.08	0.10	0.07
-3.00	凸面	0.08	0.08	0.15	0.12	0.13	0.08
	凹面	0.07	0.08	0.10	0.11	0.10	0.08
	側面	0.06	0.04	0.10	0.08	0.09	0.07

基隆港鋼板樁結構物腐蝕調查研究

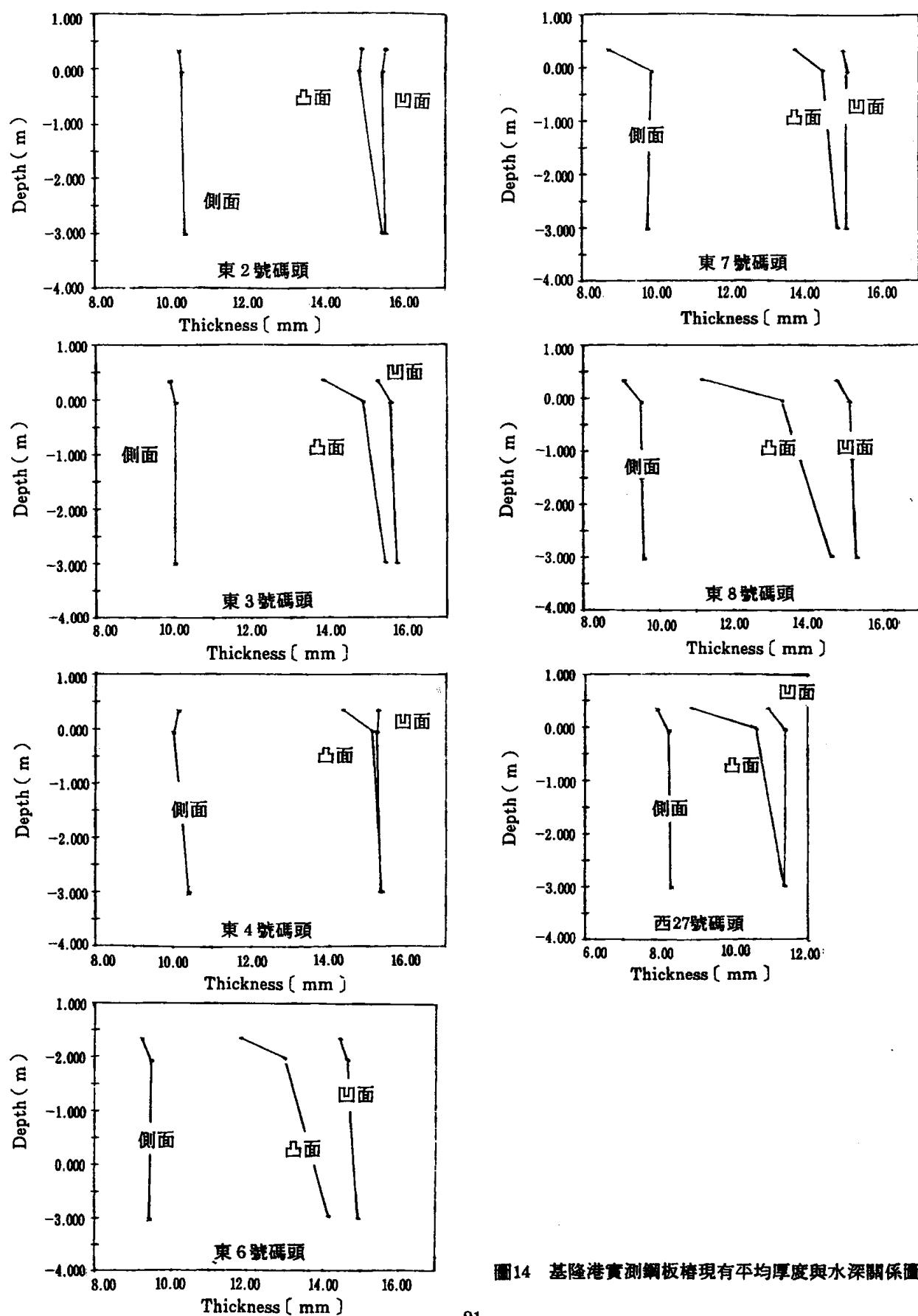


圖14 基隆港實測鋼板樁現有平均厚度與水深關係圖

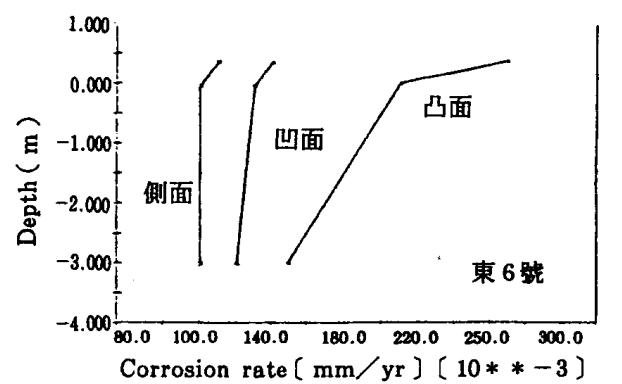
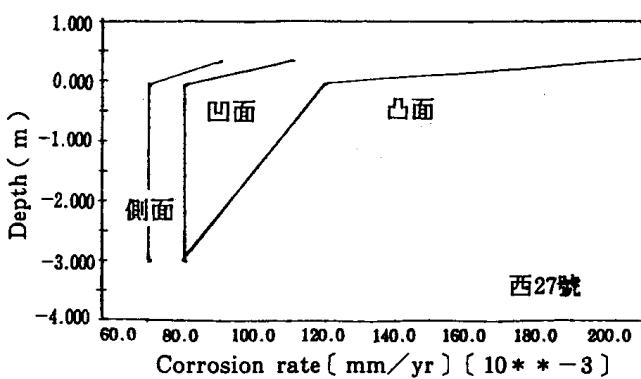
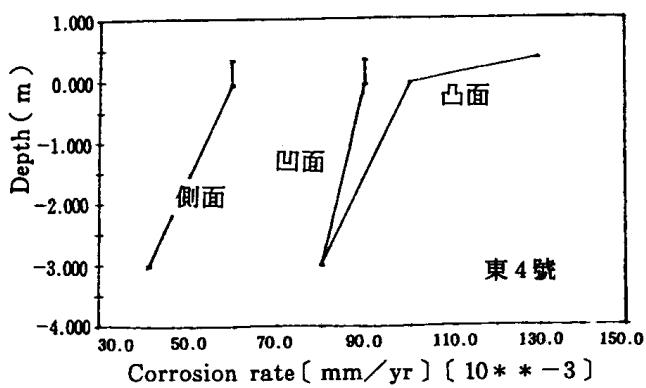
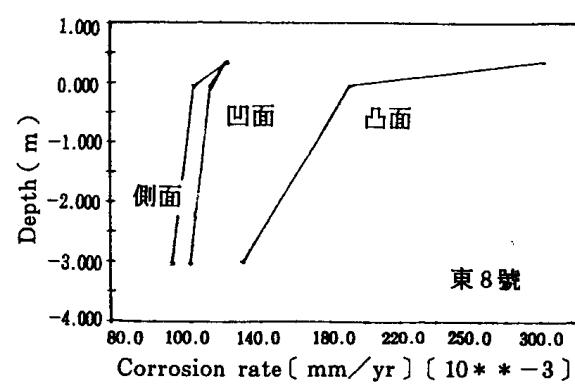
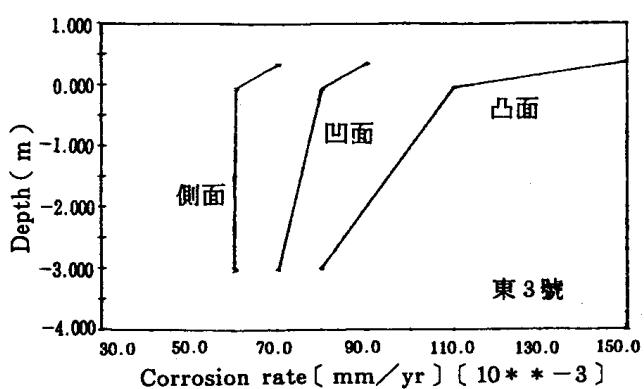
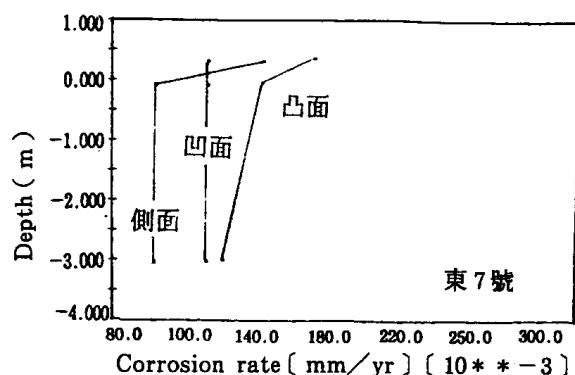
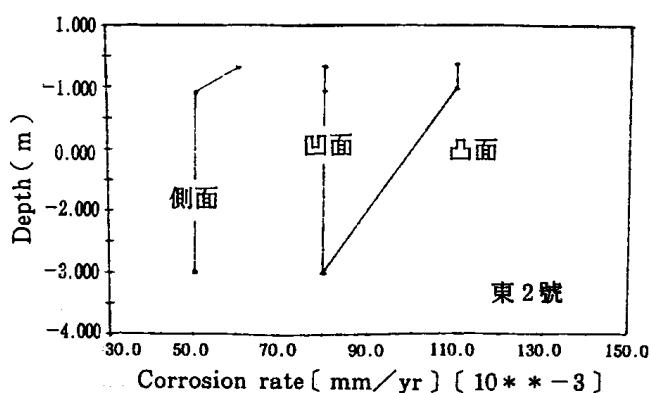


圖15 基隆港實測鋼板樁平均腐蝕速率與水深關係圖

m 及 -0.05m 水深下，鋼板樁凸面之腐蝕速率均大於 0.25mm/yr 。又在 $0k + 156\text{m} \sim 0k + 180\text{m}$ 處之鋼板樁在高程為 $+0.35\text{m}$ 處，其凸面與側面之平均腐蝕速率大於 0.2m m/yr ，甚至高達 0.32mm/yr ，而在 $0k + 192\text{m}$ ，在水深 -3.0m 處，其凸面與側面之平均腐蝕速率達 $0.22 \sim 0.23\text{mm/yr}$ ，在水中有如此高的腐蝕速率，應加詳細檢討。

(4)由現場水下拍攝之照片發現在 $0k + 144\text{m} \sim 0k + 170\text{m}$ 之間有嚴重之龜裂與穿孔之現象發生（如圖16所示）。

(5)本碼頭鋼板樁側面的腐蝕速率較其他碼頭為高。

(六) 東 8 號碼頭

(1)如表 9 及圖14~15所示平均腐蝕速率仍以凸面為最大，凹面及側面次之，最大者高達 0.41mm/yr 。

(2)以所處水深比較，仍以 $+0.35\text{m} > -0.05\text{m} > -3.0\text{m}$ ，而在凹面水深 $+0.35\text{m}$ 及 -0.05m 處均有出現 0.41mm/yr 之情形。

(3)在本碼頭所調查之15根鋼板樁中，除在 $0k + 84\text{m}$ 處之鋼板樁外，其它14根鋼板樁凸面在水深 $+0.35\text{m}$ 及 -0.05m 之腐蝕速率大都超過 0.2mm/yr 規範值。

(4)綜觀本碼頭凸面腐蝕速率普遍相當高，但未發現有大的孔洞現象。

(七) 西 27 號碼頭

(1)如表 9 及圖14~15所示，平均腐蝕仍以凸面

$>$ 凹面 $>$ 側面。在 -0.35m 處有高達 0.32mm/yr 之現象出現。然而在水深 3 公尺處則三面之腐蝕速率相差很少，呈現均勻腐蝕之現象。

(2)以所處水深比較，仍以 $+0.35\text{m} > -0.05\text{m} > -3.0\text{m}$ 。

(3)碼頭在 $0k + 000 \sim 0k + 120\text{m}$ 之間，水深為 $+0.35\text{m}$ 處之鋼板樁海側凸面之平均腐蝕速率幾乎都超過 0.20mm/yr ，亦有高達 0.32mm/yr 者。

(4)由水中照像及觀測發現在 $0k + 10\text{m} \sim 0k + 70\text{m}$ 之間在平均低潮位上下有許多裂縫與孔洞發生，比東七號碼頭更為嚴重，尤其在 $0k + 10\text{m}$ 附近鋼板樁嚴重變形。 $0k + 70\text{m}$ 附近有11支鋼板樁發生龜裂及穿孔現象（如圖17所示）。

(5)在 $0k + 60\text{m}$ 附近發生孔洞及裂縫現象，而實際 $0k + 60\text{m}$ 之腐蝕速率都在 0.10mm/yr 以下，因此有必要進行全面性之腐蝕調查工作。

五、結論與建議

(一) 結論

根據本次初步調查結果可得出下列結論：

1. 沒作過防蝕處理的碼頭之腐蝕速較有作過防蝕者為高。為使結構物使用壽命長及結構安全，必須慎重的選用防蝕措施。

2. 鋼板樁海側凸出面之腐蝕速率最高，凹進面



東 7 號碼頭 $0k + 160\text{m}$ 附近孔洞



東 7 號碼頭 $0k + 170\text{m}$ 附近穿孔

圖16 東 7 號碼頭鋼板樁腐蝕情形

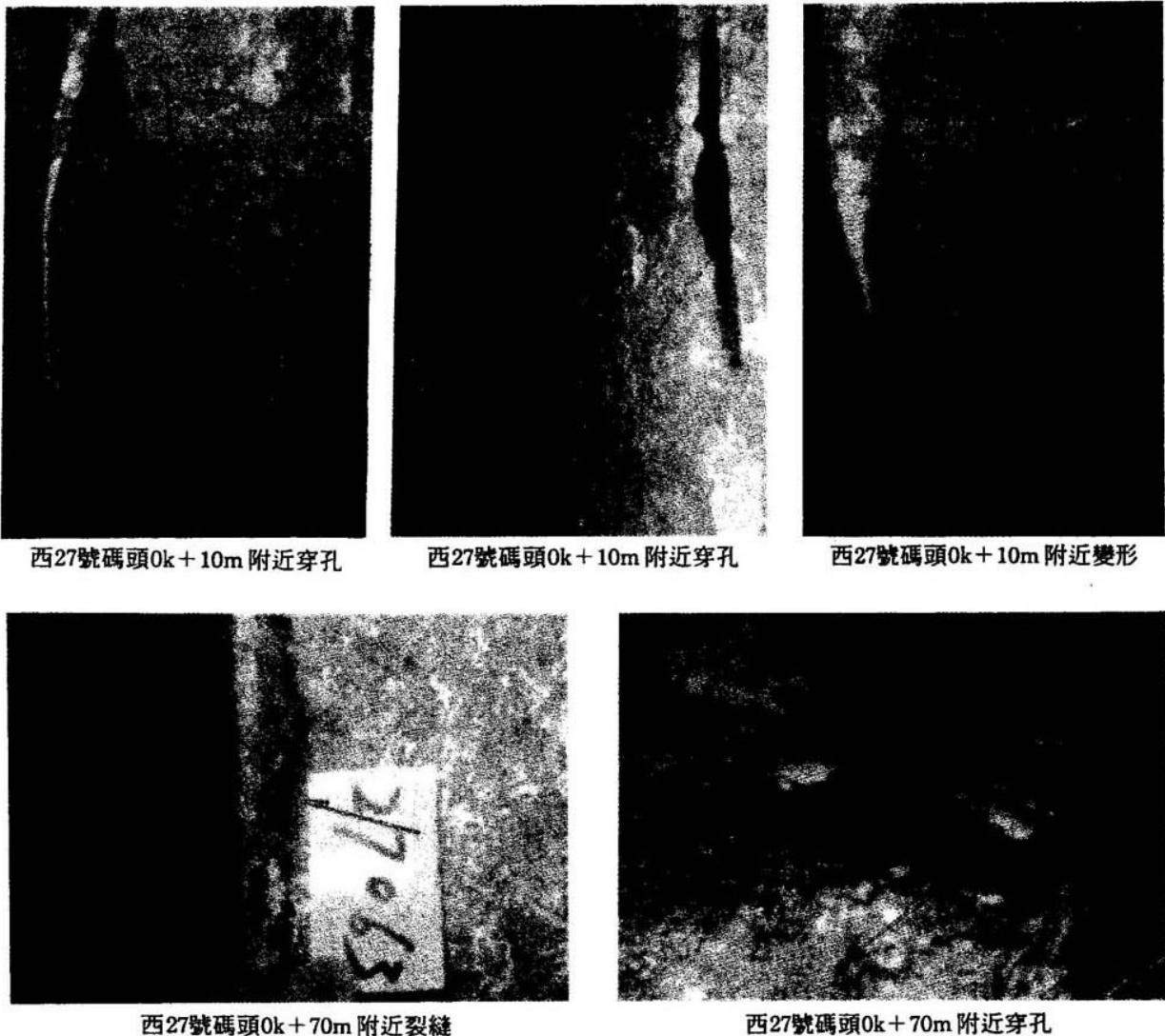


圖17 西27號碼頭鋼板樁腐蝕情形

次之，而側面最低，此係因凸面與凹面直接受到波浪衝擊，而凸面首當其衝。

3. 在平均低潮位上 0.35 公尺處之腐蝕速率最大，而在低潮位下 0.05m 次之，而低潮位下 3 公尺為最小，其原因為前者剛在混凝土包覆之下端，裸鋼與包覆層有電位差產生巨觀腐蝕，而裸鋼為陽極，因此在此處較易發生集中腐蝕；而剛在低潮位下由於此區與海中區形成濃淡氧電池反應，而為陽極，所以腐蝕速率亦較大，而在海中區為陰極，故腐蝕量為最低。

4. 為在西27號碼頭及東 7 號碼頭之平均低水位下發現許多龜裂、孔洞、穿孔之現象（圖

16 及圖 17）。這是海洋環境下發生集中腐蝕之最大特徵，也是必須特別加強防蝕之處。

5. 本次調查並非全面性調查，例如在西27號之 0k + 60m 處所調查之一根鋼板樁之腐蝕速率都在 0.1 mm/yr 以下，然而卻在附近發現有許多孔洞及裂縫出現，因此為確保安全有必要進行全面性之檢測工作。

6. 有些鋼板樁雖已作陰極防蝕，但是腐蝕速率仍超過 0.2 mm/yr 。可能是保護電位不足，而未更換犧牲陽極材料，致無法供應足夠之防蝕電流。

7. 本次調查之鋼板樁僅使用約 20 年，而腐蝕速

基隆港鋼板樁結構物腐蝕調查研究

率有高達 0.47mm/yr ，原設計值有徹底檢討之必要。

(二)建議事項

1. 本次所測三個水深點似嫌不足，未來調查時需考慮多測一些不同水深點，以便更能充分瞭解其在不同海洋環境下之腐蝕趨勢。日本運輸省港灣技術研究所之調查，每1公尺水深下之腐蝕量。
2. 影響腐蝕之因素有海水之含鹽量、硫化物含量，溶氧量，流速、溫度、pH值及海中生物附著於鋼材表面發生有機物或細菌分解而促進腐蝕，這些因素影響性必須深入討論。
3. 安裝陰極防蝕措施應定期檢查，量測保護電位與電流密度之變化。發現有不良現象應立即檢討或更換新的陽極材料，如此才能達到防蝕之效果，並可提供設計之依據。
4. 本次取樣數據不足（每30支僅取一支），尤其在腐蝕嚴重地區應作檢查分析。
5. 應多作調查，除使用超音波厚度計量測外，應使用直流及交流阻抗腐蝕速率現場量測儀調查比較，才能建立適用的腐蝕速率公式。
6. 在本次調查中發現同一水域中有出現常態腐蝕與不均勻腐蝕等兩種型態，其發生原因有待進一步深入研究。
7. 已安裝陰極防蝕後，腐蝕速率仍有偏高現象之情況出現，需詳加研討。
8. 日本經過多年來之調查結果所制定的防蝕設計規範定為高潮位至低潮位下1公尺之腐蝕速率為 $0.1\sim0.3\text{mm/yr}$ ，而低潮下1公尺至海床採用 $0.1\sim0.2\text{mm/yr}$ ，而國內仍採用 0.2mm/yr 為設計規範，根據目前所調查之結果超過 0.2mm/yr 者甚多，因此必須對全港區之鋼板樁多進行詳細調查，徹底瞭解該海域下鋼板樁之腐蝕特性，設計才能有所依據。
9. 由於腐蝕環境不同，腐蝕速率亦隨之而變，因此防蝕方法之適用性必須詳加檢討。如圖

2所示為港灣結構之適用防蝕策略範例，此方面之研究必須加強。

參考文獻

- (1) Burke, N. D. and Bushman J. B. "Corrosion and Protection of Steel Reinforced Concrete Bridge Decks" FHWA-IP-88-007 Report, Washington D.C., U.S.A., pp.1 (1988)
- (2) 沿岸開發技術研究センター“港灣構造物防食マニュアル”昭和61年3月pp.1-5及pp.1-7。
- (3) 岡本 鋼、井上勝也“腐蝕食と防食”大日本圖書P.31(1977)。
- (4) Deiss E. & G. schikorr : Z. Anorg. Allg. Chem., 172, 32 (1928) 191, 322 (1930)。
- (5) 阿部隆治、吉岡英、上田良二：科學，19，472 (1949)。
- (6) 鈴木一郎、増子昇、久松敬弘：防食技術，32，141 (1974)。
- (7) 三沢俊平：高張力鋼の海岸環境強度の総合評價に関する研究，昭和61年3月力pp.63。
- (8) 増田一廣 et al, 鐵と鋼, 72 (1986) S430。
- (9) 門智和渡邊常安, 防食技術, 25 (1976) 173。
- (10) Nippon Steel Corporation "Steel Sheet piling Design Manual" pp.147。
- (11) 台灣省政府交通處“港灣構造物設計標準”第302頁。
- (12) Tsuchida H., T. Yokoi and M. Abe "Corrosion Surveys of Steel Structures Under Marine Environment" Proc. of the international symposium of Ocean Space Utilization' 85 Nihon university, Tokyo, Japan, June, 1985 pp.507—514。
- (13) 中山茂雄“港灣構造物的防蝕”中華民國76年防蝕年會暨海洋防蝕工程研討會，中華民國防蝕學會，民國76年9月，pp4-2。
- (14) 橫井聰之“海洋環境における鋼材の腐食と防食“埋立と浚渫”84.NO.119 pp.34—40。
- (15) 善一章“海中構造物腐食の實態と對策”鹿島出版會，PP1—2，昭和49年。
- (16) 沿岸開發技術研究センター“港灣構造物補修マニュアル”，昭和61年3月，pp.2—14。
- (17) 林維明“港灣鋼結構物之耐久性研究（第一年）”台灣省政府交通處港灣技術研究所，79研02研究報告，民國79年6月。