

土研資料第1245号

土木研究所資料

東京湾における鋼管杭の腐食防食試験

昭和52年3月

建設省関東地方建設局東京湾岸道路調査事務所

建設省関東地方建設局関東技術事務所

建設省土木研究所地質化学部化学研究室

まえがき

東京湾横断道路橋の基礎構造には、架橋地点の地盤が軟弱であるため、鋼管杭を用いる多柱式基礎が考えられているが、本形式の基礎を採用する場合には、鋼管杭の腐食防止が極めて重要であり、腐食環境がとりわけ厳しいと考えられる東京湾における鋼管杭の腐食及び防食に関する資料を得る必要が認められたので試験を計画した。しかし、従来のような小試験片の暴露試験では、大気中から海中及び海底土中にわたる鋼管杭の腐食傾向や各種防食方法の効果を的確に把握できないため、実大規模に近い試験杭を現地に打込んで試験することにした。

試験は、昭和49年2月に5種類の試験杭(40 cm ϕ 、長さ54 m)の製作及び川崎市浮島沖の人工島近くへの打込みにより開始し、昭和51年11月に引抜いて詳細な調査を終了するまで、約3年間にわたって自然電位の定期観測などを実施した。

この結果、川崎沖における鋼管杭の腐食の実態及び各種防食方法の効果が明らかになるなど、鋼管杭の防食設計をおこなう上で貴重な資料が得られたので報告する。

本試験は、東京湾岸道路調査事務所、関東技術事務所、土木研究所化学研究室の3機関が共同で実施したもので、試験関係者はつぎのとおりである。

東京湾岸道路調査事務所	深井俊英
	近藤静正
	池田実
	北条実
	武江義則
関東技術事務所	高松良行
	梅田亮栄
	小野豊
	飯田主税
	窪田昭夫
	大塚正二
	須田光俊
	泉達也
化学研究室	星野剛
	蒔田実
	森芳徳
	西島高秀
	片脇清
	守屋進

目 次

まえがき	
1. 試験目的	1
2. 試験場所	2
3. 試験概要	5
3.1 試験経過	5
3.2 試験杭	5
3.3 試験方法	10
4. 試験結果及び考察	14
4.1 陰分極試験	14
4.2 仮通電試験	15
4.3 試験杭の腐食傾向	16
4.4 防食被覆の劣化状況	43
4.5 電気防食の効果	64
4.6 アルミニウム陽極の消耗状況	65
5. 試験結果の総括	67
5.1 鋼管杭の腐食について	67
5.2 鋼管杭の防食について	67
5.3 その他	68
あとながき	68

1. 試 験 目 的

東京湾横断道路橋の建設をおこなう場合に必要となる基礎鋼管杭の大気中から海水中及び海底土中にわたる防食対策資料を得る目的で実施した。

2. 試験場所

(1) 試験場所の位置

試験杭を打込んだ場所は、神奈川県川崎市浮島町の地先岸壁より沖合 550 m に設置されている人工島のごく近くである。試験場所の位置を図-1 に示す。

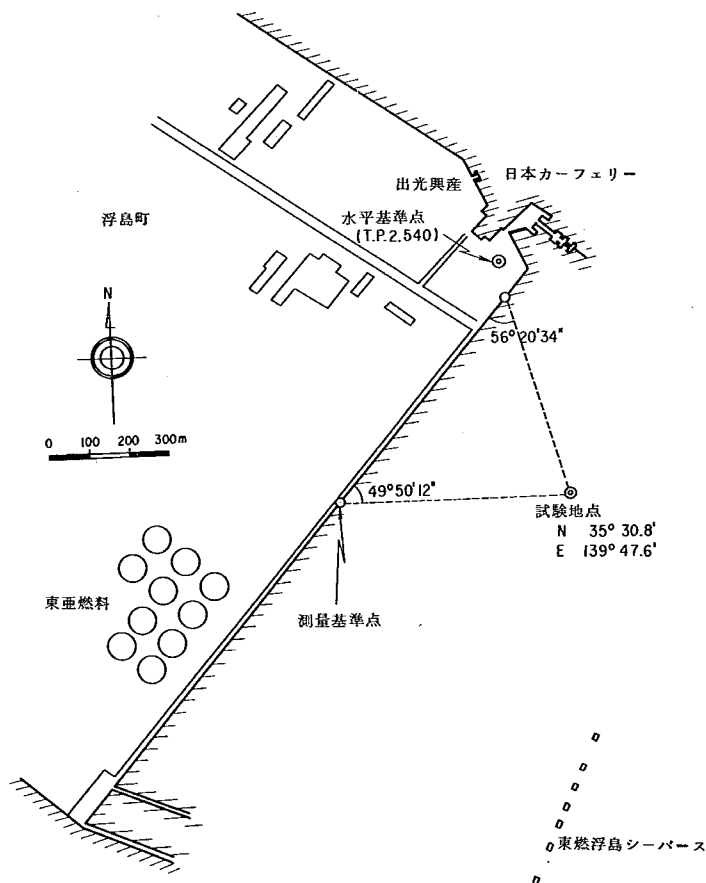


図-1 試験場所

(2) 試験場所の地質

試験場所の海底の地質は、図-2の地質柱状図に示したように、表層は厚さ2.4mのごく軟質の有機質粘土層、その下方に軟質の粘土質シルト層が2.4mもの厚さに堆積している典型的な軟弱地質である。このため、試験杭は軟質の粘土質シルト層に続くややN値の大きいシルト混り細砂層に達する深さまで打込むことにした。

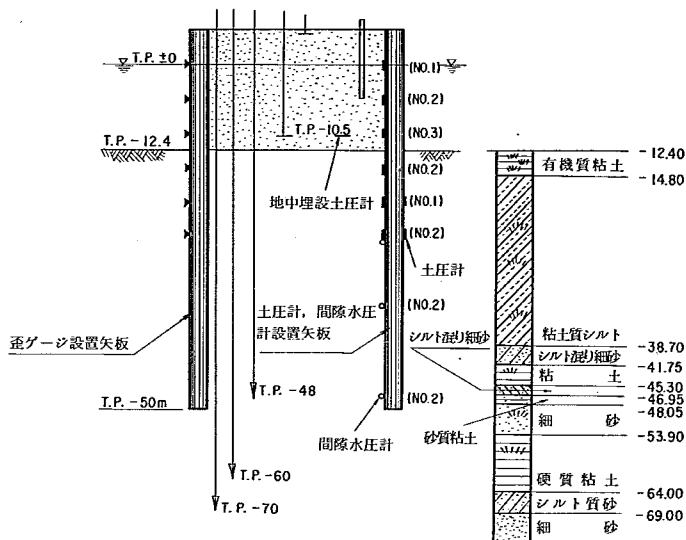


図-2 試験場所の地質

(3) 試験場所の環境条件

試験場所が京浜工業地帯に面した海上にあたるため、大気中には、海塩粒子のほかに硫酸酸化物や窒素酸化物等の腐食性物質がかなり多く含まれていると考えられる。また、海水中には、北方からかなり汚濁した多摩川が流入しており、塩水くさびの存在、有機物を多量に含むヘドロの堆積などが予想される。したがって、試験場所の環境は、大気、海水、海底泥土のいずれに関しても、鋼材に対して強い腐食性を予測させるものである。

これらのことは、その近くに設置した海上暴露台における大気中の亜硫酸ガス濃度の調査結果海水の水質調査結果ならびに鋼試験片の暴露試験結果からも推察できるが、本試験に先立って同じ場所で実施した電気防食試験や海底泥土について実施した種々の調査の結果からも推測できるものである。これらの調査によると、大気中の亜硫酸ガス濃度については一般環境とは比較にな

らない高濃度が測定されており、海水の塩分濃度は層状をなし、しかも、たえず変化すること、泥土中には多量の有機物が含まれており性状が季節的に変化すること、泥土中には嫌気性菌が多く存在し活動していること、泥土中における鋼材の腐食速度は一般海底土に比較して極めて大きいこと等環境の厳しさを裏付けるものであった。

3. 試験概要

3.1 試験経過

試験の経過は表-1に示したとおりである。

表-1 試験経過

項 目	実 施 時 期
試験杭塗装	昭和48年12月
試験杭初期肉厚測定 亜鉛基準電極取付 アルミニウム陽極(土中部)取付	昭和49年1月29～31日
試験杭打込	昭和49年2月11日
陰分極試験 仮通電試験	昭和49年3月中旬
アルミニウム陽極(海水中部)取付	昭和49年3月30日
電位測定	昭和49年2月11日～昭和51年10月26日
試験杭コンクリートライニング (現地施工)	昭和49年5月中旬
試験杭引抜	昭和51年11月13日
試験杭肉厚測定(超音波厚み計) アルミニウム陽極消耗調査 腐食状況目視観察	昭和51年11月18日～22日
試験杭肉厚測定(マイクロメーター)	昭和51年12月～昭和52年1月

3.2 試験杭

(1) 種類

試験には、図-3に示した5種類の試験杭(φ406mm、t9mm、L54m)を用いた。

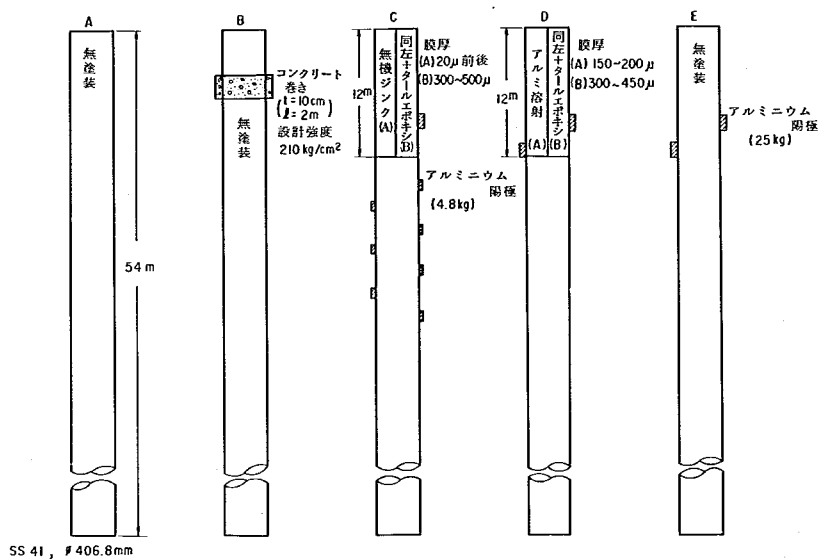


図-3 試験杭

(2) 打込み

試験杭は、図-4に示した如く、人工島セルのまわりに打込んだ。打込みには、 $2.7\text{m} \times 1.3\text{m} \times 2.4\text{m}$ 、やぐら高さ 43.5m の杭打船を用い、ディーゼルハンマー（KB-40）を用いたが、打込む前に 12m 程度自重により沈下し、ハンマー（約 10トン ）を乗せると、さらに 23m ほど沈下したので、残り約 2m を打込んだのみで打込を完了した。杭の打込みに際しては、自然電位計測用リード線を損傷させないように注意し、打込み終了後にリード線をまとめ、杭に沿わせるようにして人工島の観測小屋内に導き端子盤に接続した。打込前及び打込んで暴露中の試験杭を写真-1、2に示す。

(3) 杭頭の処理及び結合

試験杭の頭部は、 $300 \times 300 \times 9\text{mm}$ H形鋼等を用いて結合したが、結合に際しては、各試験杭を電氣的に絶縁する必要があったため、厚いゴム板を杭頭に巻きつける方法を用いた。結合に用いた鋼材は、防錆及び航行船舶に対する安全対策上の必要から、JIS Z 9103（1967）に規定されている安全標識色（黄色）に着色する目的で、塩酸系酸液を用いて除錆した後、厚膜型無機質ジンクリッチペイント＋厚膜型ビニル樹脂系塗料（黄色 $2.5\text{Y}8/12$ ）の塗装を施した。

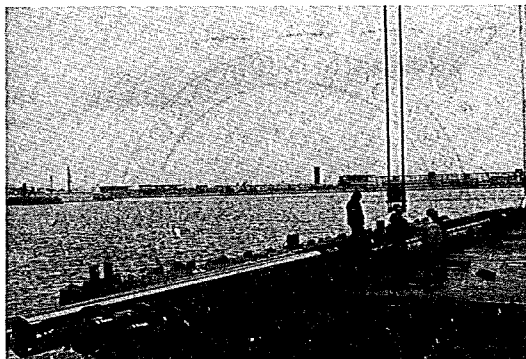


写真-1 打込前の試験杭

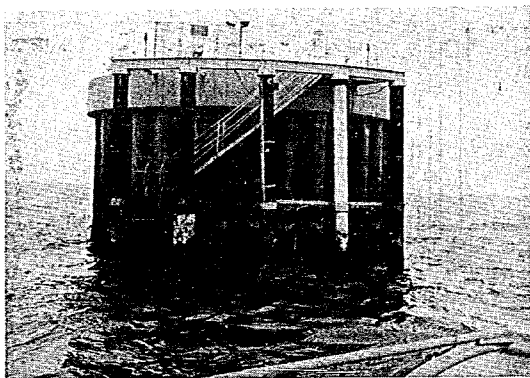


写真-2 暴露中の試験杭

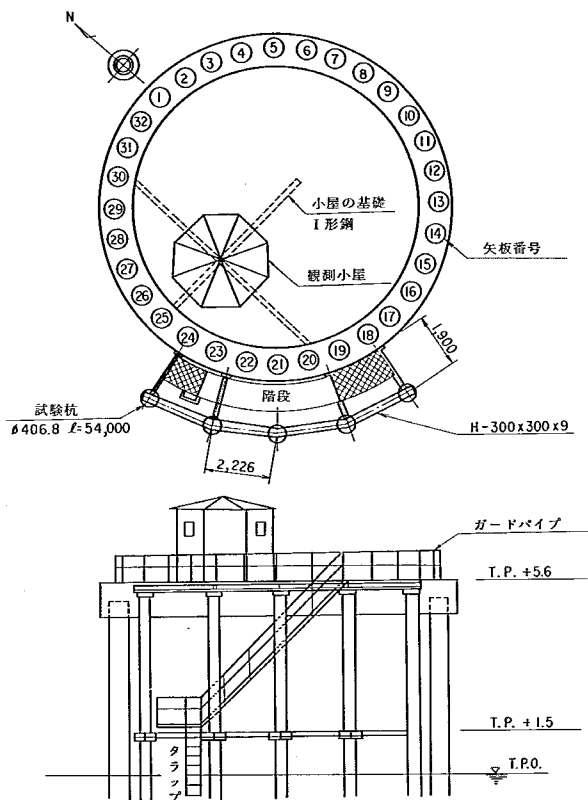


図-4 試験杭配置

(4) 引抜き

打込んでから2.75年経過後に、杭頭部を約2m切断してから写真-3に示したようにつかみ板を杭頭に溶接し、200馬力のバイブロハンマーを装備した50トン起重機船を用いて引抜いた。引抜き状況を写真-4に示す。しかし、無処理のA杭と干渉帯部分にコンクリートライニングを施したB杭の2本は引抜く途中で溶接部から破断したため全部を抜くことができず、結局、B杭の上部15mから下方の長さ39mの部分は回収できなかった。



写真-3 引抜き直前の状態

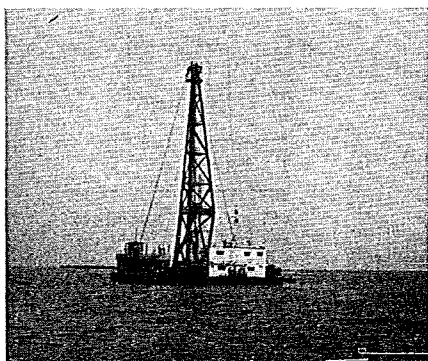


写真-4 引抜き状態

3.3 試験方法

(1) 試験杭肉厚の測定

大気中から海水中及び海底土中にわたる鋼管杭の腐食傾向は、試験杭を打込む前及び試験終了後にそれぞれ肉厚を測定し、その差 (mm) 及び試験期間 (年) から年間腐食速度 (mm/年) を求めて比較した。試験杭の肉厚は、打込み前の試験杭については非破壊測定のできる超音波厚み計を用いて測定し、引抜いた試験杭については超音波厚み計による測定法と測定対象部分から切り取った鋼片についてマイクロメーターで厚みを測定する方法を併用した。測定方法の概要はつぎのとおりである。

1) 超音波厚み計による測定

(a) 厚み測定の原理

圧電材料 (水晶、ジルコン酸鉛振動子等) に電気振動を与えると圧電材料は機械的に振動し超音波を発生する。逆に、圧電材料に機械的振動を与えると振動子の両極に高周波電圧が発生する。したがって、図-5 のように 1 対の振動子を組合わせ、1 方を発振用、他方を受信用として音響的にシールドされた“くさび”の上に接着した深触子をつくり、これを鋼板面に接触させて発信側振動子から超音波パルスを発射すると、パルスは“くさび”の中を伝わり鋼との境界で屈折されて鋼板中に伝わる。鋼板中に入ったパルスは鋼板の底面で反射され受信側振動子にもどり反射電圧を生じる。

今、超音波パルスの通過時間をオシロスコープで観察すると図-6 のように T、S、B のパルスが見られる。T-S は超音波パルスが“くさび”の中を伝わる時間、S-B は超音波パルスが鋼板中を伝わる時間を示す。ここで、S-B は鋼板の厚みに比例して変化するから、S-B を測定することにより鋼板の厚みを測定できる。測定原理は以上述べたとおりであるから、深触子の鋼材面への接触が、さび層の介在や腐食による凹凸が著しいなどにより十分でない場合は、測定精度は悪くなるので、測定に際しては、鋼表面の清掃、研磨その他の処置が必要である。

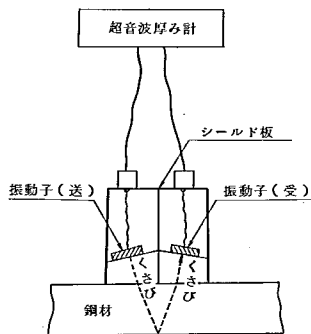


図-5 厚み測定模形図

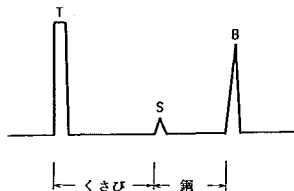


図-6 超音波パルス

(四) 使用した超音波厚み計

測定に用いた厚み計は、パルス反射式のメーター直読式超音波厚み計で、厚みの判明している同一材質の基準板により校正をおこない、迅速簡便な厚み測定ができる。厚み計の主な仕様はつぎのとおりである。

- i) 電 源 直流 8 V
- ii) 測定範囲 2 ~ 15 mm、10 ~ 60 mm の 2 段切換
- iii) 精 度 2 ~ 15 mm ± 0.25 mm
10 ~ 60 mm ± 0.5 mm
- iv) 指示方式 メーター
- v) 測定方法 パルス反射式、2 探触子法
- vi) 音速調整 可能

(イ) 超音波厚み計による測定

厚み測定は、鋼管の長さ方向に図-7のように測点を設定し、鋼管の上端から一定の間隔で1点について3回の測定をおこない3回の平均値をもって各測点における肉厚とした。測点の間隔は試験前鋼管については1 mとし、試験後は図-8に示したように腐食の状態に応じて20 cmから最大5 mまで間隔をかえて測定した。

腐食による肉厚の変化は、試験前鋼管の各測線別平均厚を基準として求めたが、鋼管の厚みは鋼管ごとに異なっていたため、鋼管ごとに測線別平均厚を求めて基準厚とした。超音波厚み計は、器差を考慮し、試験期間中同じものを使用した。

2) マイクロメーターによる測定

マイクロメーターによる厚み測定は、引抜いた試験杭について超音波厚み計による測点を含むように試験片(15×15 cmまたは15×50 cm)を切り取り、加温した10%クエン酸アンモニウム水溶液に浸漬して除錆してからポイントマイクロメーターを用いておこなった。測定は2 cm間隔で15×15 cmの試験片では49点、15×15 cmの場合は168点についておこなった。

なお、マイクロメーターによる厚み測定方法を鋼管のように湾曲した板に用いると、実際の板厚より過大な値が得られるといわれているが、超音波厚み計による測定は測点が限られているので、その不備を補う意味でこの方法を併用した。

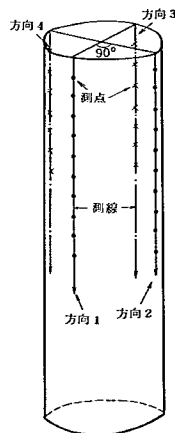


図-7 試験杭の厚み測定位置

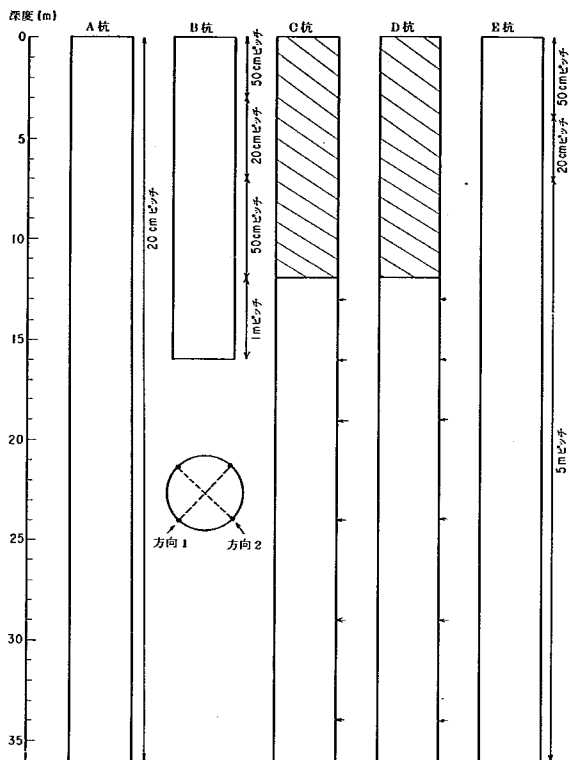


図-8 引抜後の厚み測定位置図

(2) 目視による観察及び孔食深さの測定

引抜いた試験杭について、生物の付着状況、付着生物やさびを除去した面の腐食状況、コンクリートライニングを除去した面の腐食状況及び防食被覆の劣化状況を目視により観察した。また、孔食の著しい部分についてはデプスゲージを用いて孔食深さを測定した。

(3) 陰分極試験

鋼管杭を電気防食する場合の基礎資料を得る目的で実施した。すなわち、無処理試験杭を陰極として図-9のように電流を流入させ、試験杭表面の電位と電流の関係グラフを求め、このグラフと試験杭の接水面積(土中も含む)から防食電流密度を算出した。ただし、この場合には、海中部分ともにそれぞれ違った腐食環境にあるため、試験杭の各部分にあらかじめ設置しておいた

亜鉛基準電極を利用して、試験杭各部分の電位変化を求めることにより平均腐食電流値を推定し防食電流を求める方法をとった。

(4) 仮通電試験

分極試験により求めた防食電流で実際に防食できるかどうかを確認する目的で、無処理試験杭を利用してこれに流電陽極を接続し、流電陽極から試験杭に流入する電流値と試験杭各部の電位変化を連続的に測定した。試験回路図を図-10に示す。

(5) 電位測定

海水中から海底土中にわたり打込まれた鋼管杭に生じる電位の分布を知る目的で実施した。まず、試験杭に絶縁した状態で取付けた亜鉛基準電極の電位を飽和甘汞電極及び電位差計を用いて測定し、次いで試験杭と亜鉛基準電極間の電位を測定することにより試験杭の深度別電位を求めた。

(6) アルミニウム陽極の消耗量の測定

引抜いた試験杭から取外したアルミニウム陽極は、表面の腐食生成物を除去してから秤量し、試験期間中の消耗量を求めた。

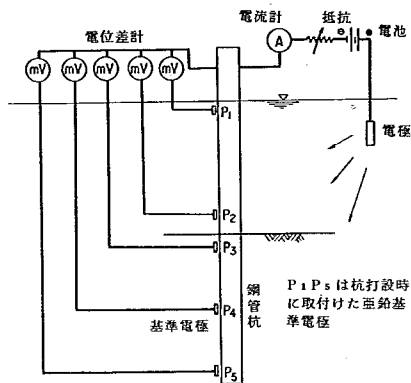


図-9 陰分極試験回路図

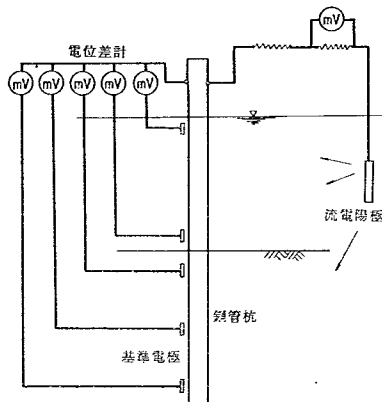


図-10 仮通電試験回路図

4. 試験結果及び考察

4.1 陰分極試験の結果

試験結果を図-11及び図-12に示す。図より試験杭全体の腐食電流は4.0～4.7 A (4.0、4.2、4.5、4.7、4.3 A)、平均4.34 Aであることがわかったので、杭の海水中及び海底土中の表面積は 60.6 m^2 であるから、防食電流密度 $= 4.34 \text{ A} / 60.6 \text{ m}^2 = 0.0716 \text{ A/m}^2$ となる。

この値は、 60.6 m^2 の中で大きい防食電流を必要とする海水中部分の面積が 16.6 m^2 にすぎないことから考えれば、標準条件と比較してかなり大きい値であるといえる。参考までに、標準条件の場合の電流密度として海水中 100 mA/m^2 、海底土中 20 mA/m^2 を用いて計算してみると、 $16.6 \text{ m}^2 \times 0.1 \text{ A/m}^2 + (60.6 - 16.6) \text{ m}^2 \times 0.02 \text{ A/m}^2 = 2.54 \text{ A}$ が必要な防食電流値であり、 4.34 A はその1.7倍に相当しており、試験場所の腐食性が大きいことを示している。

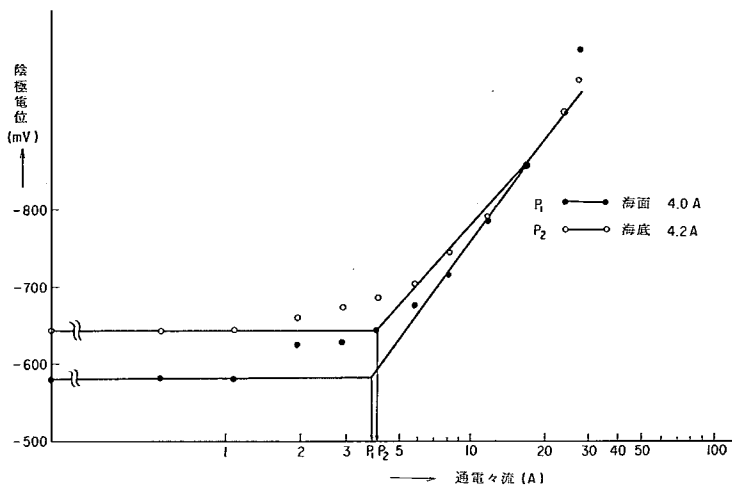


図-11 陰分極曲線(海面, 海底)

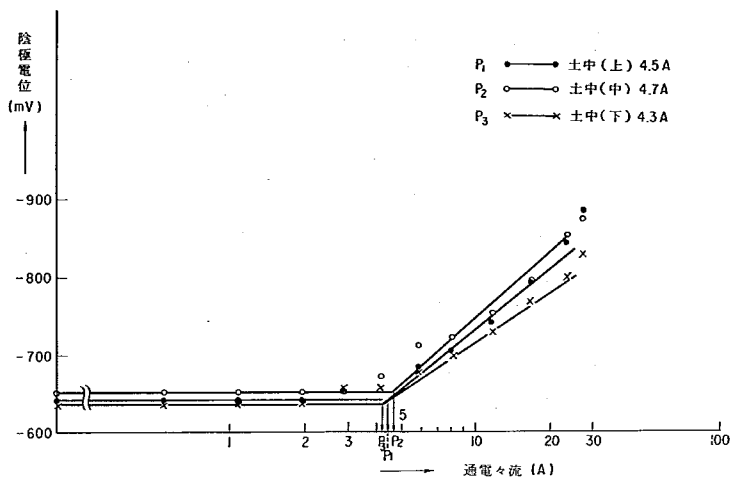


図-12 陰分極曲線（海底土中）

4.2 仮通電試験の結果

試験結果を表-2に示す。表からもわかるように通電電流は9日間の通電によりはば3.5Aに安定している。試験杭の電位は海中部、海底土中部ともに $-835 \sim -880 \text{ mV (SCE)}$ を示し、防食状態にあることが確認された。この結果を陰分極試験の結果と比較すると防食電流密度は 0.072 A/m^2 : 0.058 A/m^2 でやや小さいが、標準条件と比較すれば $3.5 \text{ A} / 2.54 \text{ A} \approx 1.38$ 倍に相当し、仮通電試験の結果からも試験場所の腐食性はかなり大きいことがわかる。

表-2 仮通電試験結果

場所	経過時間		通電前		通電直後		1時間後		1日後		2日後		4日後		7日後		9日後	
	A	-mV	A	-mV	A	-mV	A	-mV	A	-mV	A	-mV	A	-mV	A	-mV	A	-mV
海面	0	560	9.0	600	8.0	730	6.8	770	4.3	800	3.8	810	3.5	840	3.5	835		
海底		640		670		750		800		830		840		860		860		
土中(上)		640		660		750		810		850		860		870		870		
“(中)		650		670		740		820		850		870		880		880		
“(下)		635		650		720		810		840		860		870		870		

4.3 試験杭の腐食傾向

(1) 試験杭の電位測定結果

約900日にわたって実施した試験杭各部の電位測定結果を表-3に、杭全体の平均電位の経時変化を図-13に示す。表及び図よりつぎのことが考察される。

(i) 試験杭の電位は海中から海底土中にわたりほぼ一定で、当初予想したような、環境差による電位差の発生は認められなかったが、これは、海水の比抵抗が小さく、たとえ電位差が生じても腐食電流が流れやすいので、陽極部の電位に引きずられるためと考えられ、電位差のないことがいわゆるマクロ腐食の発生を否定することにはならないと考えられる。この推定の正しいことは、引抜いた試験杭に不均一な腐食が生じていたことから確かめられている。

(ii) アルミニウム陽極を用いて電気防食を施した試験杭の電位は、防食被覆の有無及び被覆の種類により多少異なった経過を示すが、約1か月で -800mV (SCE) より卑となり、完全な防食状態となっている。

(2) 試験杭の腐食による肉厚変化の測定結果

i) 超音波厚み計による測定結果

試験前の肉厚測定結果を表-4に示す。この測定により試験杭の肉厚は、溶接した銅管ごと肉厚が大幅に異なるほか、同じ銅管の場合でも測定方向により多少厚さが異なることがわかったので、銅管別及び測定方向別に試験前後の肉厚を比較した。試験杭を打込んで2.75年経過してから引抜き、腐食による肉厚の変化を求めた結果は表-5及び図-14に示したとおりである。

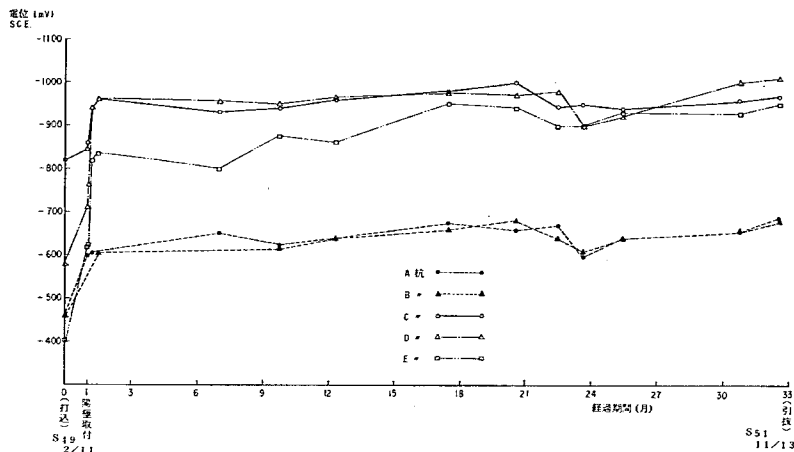


図-13 電位の経時変化

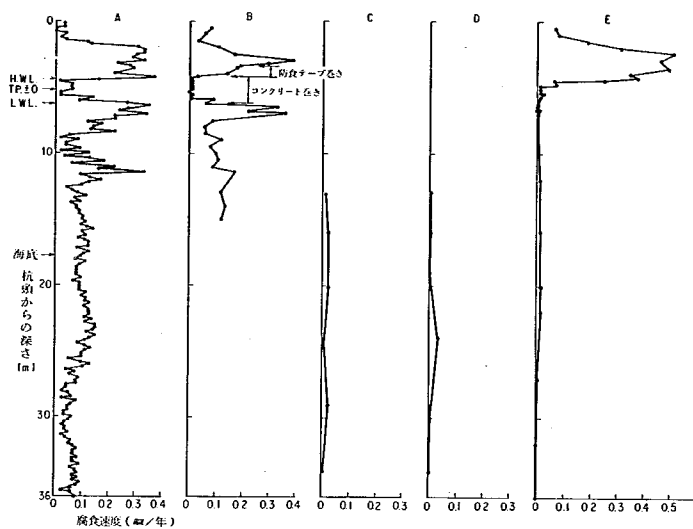


図-1 4 超音波厚さ計による測定結果

表-3 電位測定結果

S 49. 2. 12

打込直後

杭	深さ(M)	Zn電極系	銅管電位 (V_{Zn}^{VS})	Zn電極電位 (V_{SCE}^{VS})	銅管電位 (V_{SCE}^{VS})
A	8		mV	mV	-460 mV
	10	1			
	13				
	15	2			
	18				
	20	3			
	25	4			
	30	5			
	35	6			
B	8				-460
	10	1			
	13				
	15	2			
	18				
	20	3			
	25	4			
	30	5			
	35	6			
C	8				-820
	10	1			
	13				
	15	2			
	18				-680
	20	3			
	25	4			
	30	5			
	35	6			
D	8				-580
	13				
	18				-560
E	8				-405
	10	1			
	13				
	15	2			
	18				
	20	3			
	25	4			
	30	5			
	35	6			

S 49. 3. 12

29日(打込後)

杭	深さ(M)	Zn電極電位	鋼管電位 (V_{Zn}^{VS})	Zn電極電位 (V_{SCE}^{VS})	鋼管電位 (V_{SCE}^{VS})
	8		mV	mV	600 mV
	10	1	405	1038	633
	13				
	15	2	400	1023	623
	18				
	20	3	380	990	610
	25	4	395	980	585
	30	5	355	1020	665
	35	6	373	998	625
	8				621
	10	1	395	1040	645
	13				
	15	2	410	1063	653
	18				
	20	3	360	1005	645
	25	4	380	1038	658
	30	5	382	1018	656
	35	6	363		655
	8				845
	10	1			
	13				
	15	2	165	1040	875
	18				
	20	3			
	25	4	150	1020	870
	30	5			
	35	6	138	1016	878
	8				710
	13				
	18				
	8				621
	10	1	390	1050	660
	13				
	15	2	380	1040	660
	18				
	20	3	358	1013	655
	25	4	395	1058	663
	30	5	400	1060	660
	35	6	365	1020	655

30日(打込後)

S 49. 3. 13

杭	深さ(M)	Zn電極系	銅管電位($V_{S_{Zn}}^{VS}$)	Zn電極電位(V_{SCE}^{VS})	銅管電位(V_{SCE}^{VS})
A	8		mV	mV	mV
	10				
	13				
	15				
	18				
	20				
	25				
	30				
	35				
B	8				
	10				
	13				
	15				
	18				
	20				
	25				
	30				
	35				
C	8				860
	10	1			
	13				
	15	2	180	1070	890
	18				
	20	3			
	25	4	150	1060	910
	30	5			
	35	6	138	1035	897
D	8				765
	13				
	18				
E	8				630
	10	1	398	1045	647
	13				
	15	2	358	1000	642
	18				
	20	3	340	980	640
	25	4	380	1030	650
	30	5	385	1040	655
	35	6	360	1008	648

S 49. 3. 19

36日(打込後)
6日(耐極取付後)

杭	深さ(M)	Zn電極系	銅管電位($V_{S_{Zn}}$) mV	Zn電極電位($V_{S_{SCE}}$) mV	銅管電位($V_{S_{SCE}}$) mV
A	8				605
	10	1	408	1040	632
	13				
	15	2	390	1020	630
	18				
	20	3	358	980	622
	25	4	350	980	630
	30	5	400	1030	630
B	35	6	375	1000	625
	8				
	10	1			
	13				
	15	2			
	18				
	20	3			
	25	4			
C	30	5			
	35	6			
	8				940
	10	1			
	13				
	15	2	98	1058	960
	18				
	20	3			
D	25	4	98	1058	960
	30	5			
	35	6	103	1062	959
	8				940
	13				
	18				
	8				820
	10	1	207	1040	833
E	13				
	15	2	207	1040	833
	18				
	20	3	175	1005	830
	25	4	240	1075	835
	30	5	258	1095	837
	35	6	240	1075	835

S 49.3.29

46日(打込後)
16日(陽極取付後)

杭	深さ(M)	Zn電極 _本	鋼管電位 ($V_{S_{Zn}}$)	Zn電極電位 ($V_{S_{SCE}}$)	鋼管電位 ($V_{S_{SCE}}$)
A	8		mV	mV	605 mV
	10	1	435	1080	645
	13				620
	15	2	420	1060	640
	18				640
	20	3	365	1015	650
	25	4	370	1015	645
	30	5	423	1070	647
	35	6	395	1040	645
B	8				605
	10	1	430	1080	650
	13				630
	15	2	415	1065	650
	18				640
	20	3	360	1015	655
	25	4	415	1050	635
	30	5	400	1060	660
	35	6	390	1040	650
C	8				960
	10	1			970
	13				980
	15	2	110	1080	970
	18				970
	20	3			
	25	4	108	1080	972
	30	5			
	35	6	120	1090	970
D	8				960
	13				983
	18				980
E	8				835
	10	1	183	1055	872
	13				840
	15	2	183	1050	867
	18				860
	20	3	140	1000	860
	25	4	220	1085	865
	30	5	230	1100	870
	35	6	210	1075	865

S 49. 9. 12

213日(打込後)
183日(剛体取付後)

杭	深さ(M)	Zn電極系	鋼管電位 (VS _{Zn})	Zn電極電位 (VS _{SCE})	鋼管電位 (VS _{SCE})
A	8		mV	mV	650 mV
	10	1	380	1040	660
	13				655
	15	2	360	640	280
	18				655
	20	3	325	960	635
	25	4	420	220	640
	30	5	260	650	390
	35	6	440	220	660
B	8				
	10	1			
	13				
	15	2			
	18				
	20	3			
	25	4			
	30	5			
C	8				930
	10	1			
	13				931
	15	2	130	1060	930
	18				930
	20	3			
	25	4	70	1000	930
	30	5			
	35	6	94	1025	931
D	8				955
	13				970
	18				960
E	8				800
	10	1	225	1020	795
	13				800
	15	2	250	1050	810
	18				800
	20	3	595	215	810
	25	4	170	970	800
	30	5	590	220	810
	35	6	213	1010	797

S 49. 10. 31

262日(打込後)
232日(陽極取付後)

杭	深さ(M)	Zn電極 Δ	銅管電位($\frac{VS}{Zn}$)	Zn電極電位($\frac{VS}{SCE}$)	銅管電位($\frac{VS}{SCE}$)
A	8		mV	mV	mV
	10	1			
	13				
	15	2			
	18				
	20	3			
	25	4			
	30	5			
	35	6			
B	8				
	10	1	440		
	13				
	15	2	305		
	18				
	20	3	380		
	25	4	300		
	30	5	300		
	35	6	10		
C	8				
	10	1			
	13				
	15	2			
	18				
	20	3			
	25	4			
	30	5			
	35	6			
D	8				
	13				
	18				
E	8				
	10	1			
	13				
	15	2			
	18				
	20	3			
	25	4			
	30	5			
	35	6			

S 49. 12. 5

297日(打込後)
267日(陽極取付後)

杭	深さ(M)	Zn電極	銅管電位 (VS _{Zn})	Zn電極電位 (VS _{SCE})	銅管電位 (VS _{SCE})
A	8		mV	mV	625 mV
	10	1	350	1000	650
	13				625
	15	2	330	940	610
	18				625
	20	3	325	940	615
	25	4	442	180	622
	30	5	0	620	620
B	35	6	460	160	620
	8				615
	10	1	430	1050	620
	13				620
	15	2	360	980	620
	18				620
	20	3	420	1030	610
	25	4	370	980	610
C	30	5	360	975	615
	35	6	440	1060	620
	8				940
	10	1			
	13				950
	15	2	130	1075	945
	18				940
	20	3			
D	25	4	50	950	900
	30	5			
	35	6	100	1040	940
	8				950
	13				945
	18				940
	8				875
	10	1	470	1000	530
E	13				877
	15	2	625	1030	405
	18				880
	20	3	700	200	900
	25	4	90	970	880
	30	5	700	190	890
	35	6	140	1020	880

S 50. 2. 20

373日(打込後)
343日(陽極取付後)

杭	深さ(M)	Zn電極板	銅管電位($V_{S_{Zn}}$)	Zn電極電位(V_{SCE})	銅管電位(V_{SCE})
A	8		mV	mV	641 mV
	10	1	380	1020	640
	13				640
	15	2	425	1080	655
	18				640
	20	3	445	181	626
	25	4	443	182	625
	30	5	0	640	640
	35	6	441	185	626
B	8				640
	10	1	440	1075	635
	13				640
	15	2	385	1020	635
	18				640
	20	3	430	1060	630
	25	4	390	1012	622
	30	5	385	1005	620
	35	6	390	1018	628
C	8				960
	10	1			
	13				965
	15	2	160	1130	970
	18				965
	20	3			
	25	4	50	1020	970
	30	5			
	35	6	85	1058	973
D	8				965
	13				975
	18				970
E	8				860
	10	1	158	1020	862
	13				865
	15	2	200	1062	862
	18				865
	20	3	670	200	870
	25	4	115	980	865
	30	5	658	220	878
	35	6	185	1055	870

S 50. 7. 25

428日(打込後)
398日(陽極取付後)

杭	深さ(M)	Zn電極電位	鋼管電位 (VS _{Zn})	Zn電極電位 (VS _{SCE})	鋼管電位 (VS _{SCE})
A	8		mV	mV	675 mV
	10	1	350	1020	670
	13				650
	15	2	360	1010	650
	18				650
	20	3			
	25	4			
	30	5			
B	35	6			
	8				660
	10	1	455	1100	645
	13				655
	15	2	360	1040	680
	18				660
	20	3	395	1060	665
	25	4	360	1020	660
C	30	5	320	980	660
	35	6	350	1020	670
	8				980
	10	1			
	13				975
	15	2	130	1115	985
	18				980
	20	3			
D	25	4	40	1030	990
	30	5			
	35	6	80	1060	980
	8				975
	13				970
	18				970
	8				950
	10	1	40	1000	960
E	13				960
	15	2	70	1030	960
	18				965
	20	3			
	25	4	35	1000	965
	30	5			
	35	6	120	1080	960

S 50. 10. 28

523日(打込後)
493日(陽極取付後)

杭	深さ(M)	Zn電極本	銅管電位 (V_{Zn}^{VS})	Zn電極電位 (V_{SCE}^{VS})	銅管電位 (V_{SCE}^{VS})
A	8		mV	mV	660 mV
	10	1	410	1080	675
	13				660
	15	2			
	18				665
	20	3			
	25	4			
	30	5			
B	35	6			
	8				680
	10	1	418	1070	652
	13				670
	15	2			
	18				670
	20	3			
	25	4	420	1080	660
C	30	5	430	1080	650
	35	6	435	1080	645
	8				1000
	10	1			
	13				980
	15	2	180	1145	960
	18				982
	20	3			
D	25	4	100	1045	945
	30	5			
	35	6	108	1060	952
	8				970
	13				965
	18				965
	8				940
	10	1	160	1060	900
E	13				945
	15	2			
	18				945
	20	3			
	25	4	120	1020	900
	30	5			
	35	6	200	1100	900

S 50. 12. 24

618日(打込後)

588日(陽極取付後)

杭	深さ(M)	Zn電極電位	鋼管電位 (VS _{Zn})	Zn電極電位(VS _{SCE})	鋼管電位(VS _{SCE})
A	8		mV	mV	670 mV
	10	1	420	1060	640
	13				640
	15	2			
	18				640
	20	3			
	25	4			
	30	5			
B	35	6			
	8				641
	10	1			
	13				622
	15	2	320	960	640
	18				635
	20	3			
	25	4			
C	30	5	350	1000	650
	35	6	460	1095	635
	8				943
	10	1			
	13				930
	15	2	160	1100	940
	18				940
	20	3			
D	25	4	65	1010	945
	30	5			
	35	6	100	1040	940
	8				980
	13				975
	18				980
	8				900
	10	1			
E	13				903
	15	2			
	18				920
	20	3			
	25	4			
	30	5			
	35	6			

S 51. 1. 29

654日(打込後)
624日(陽極取付後)

杭	深さ(M)	Zn電極系	銅管電位 ($V_{S_{Zn}}$)	Zn電極電位 ($V_{S_{SCE}}$)	銅管電位 ($V_{S_{SCE}}$)
A	8		mV	mV	600 mV
	10	1	420	1040	620
	13				620
	15	2	340	960	620
	18				610
	20	3			
	25	4			
	30	5			
B	35	6			
	8				610
	10	1			
	13				600
	15	2			
	18				
	20	3			
	25	4			
C	30	5			
	35	6			
	8				950
	10	1			
	13				940
	15	2	140	1080	940
	18				940
	20	3			
D	25	4	60	1000	940
	30	5			
	35	6	50	990	940
	8				900
	13				890
	18				890
	8				900
	10	1			
E	13				
	15	2			
	18				
	20	3			
	25	4			
	30	5			
	35	6			

S 51. 3. 23

(打込後)
(陽極取付後)

杭	深さ(M)	Zn電極 _底	銅管電位 ($V_{S_{Zn}}$) mV	Zn電極電位 ($V_{S_{SCE}}$) mV	銅管電位 ($V_{S_{SCE}}$) mV
A	8				640
	10	1	380	1030	650
	13				625
	15	2			
	18				620
	20	3			
	25	4			
	30	5			
B	35	6			
	8				640
	10	1			
	13				640
	15	2			
	18				640
	20	3			
	25	4			
C	30	5			
	35	6			
	8				940
	10	1			
	13				960
	15	2	145	1100	955
	18				940
	20	3			
D	25	4	70	1020	950
	30	5			
	35	6	60	1010	950
	8				920
	13				930
	18				920
E	8				930
	10	1			
	13				935
	15	2			
	18				940
	20	3			
	25	4			
	30	5			
	35	6			

S 51.9.1

869日(打込後)
839日(陽極取付後)

杭	深さ(M)	Zn電極系	銅管電位 ($V_{S_{Zn}}$)	Zn電極電位 ($V_{S_{SCE}}$)	銅管電位 ($V_{S_{SCE}}$)
A	8		mV	mV	660 mV
	10	1			
	13				670
	15	2			
	18				670
	20	3			
	25	4			
	30	5			
B	35	6			
	8				660
	10	1			
	13				660
	15	2			
	18				660
	20	3			
	25	4			
C	30	5			
	35	6			
	8				960
	10	1			
	13				960
	15	2	170	1130	960
	18				960
	20	3			
D	25	4	60	1020	960
	30	5			
	35	6	80	1040	960
	8				1000
	13				1000
	18				1000
	8				930
	10	1			
E	13				960
	15	2			
	18				960
	20	3			
	25	4			
	30	5			
	35	6			

S 51. 10. 26

924日(打込後)
894日(陽極取付後)

杭	深さ(M)	Zn電極系	銅管電位 (VS _{Zn})	Zn電極電位 (VS _{SCE})	銅管電位 (VS _{SCE})
A	8		mV	mV	690 mV
	10	1			
	13				680
	15	2			
	18				670
	20	3			
	25	4			
	30	5			
	35	6			
B	8				680
	10	1			
	13				660
	15	2			
	18				660
	20	3			
	25	4			
	30	5			
	35	6			
C	8				970
	10	1			
	13				950
	15	2	130	1090	
	18				960
	20	3			
	25	4	80	1040	960
	30	5			
	35	6	50	1010	960
D	8				1010
	13				1010
	18				1000
E	8				950
	10	1			
	13				950
	15	2			
	18				950
	20	3			
	25	4			
	30	5			
	35	6			

表-4 腐食試験前肉厚測定結果

机 m	A 机				B 机				C 机				D 机				E 机			
	① 平均	② 平均	③ 平均	④ 平均	① 平均	② 平均	③ 平均	④ 平均	① 平均	② 平均	③ 平均	④ 平均	① 平均	② 平均	③ 平均	④ 平均	① 平均	② 平均	③ 平均	④ 平均
1	873	878	855	862	873	865	872	872									900	860	855	895
2	882	870	870	857	880	888	875	875									898	865	883	890
3	883	870	865	852	880	872	862	873									903	880	880	892
4	882	870	868	853	877	885	868	872									900	870	887	892
5	895	870	861	855	885	880	873	870									902	872	882	890
6	888	877	878	850	880	875	868	883									900	873	883	888
7	887	877	855	858	882	887	867	867									900	872	880	898
8	880	877	873	863	887	875	862	870									902	878	902	895
9	890	873	878	870	888	870	867	875									900	882	900	892
10	887	880	858	862	883	862	863	870									900	883	885	895
11	890	877	880	860	880	877	883	872									900	885	880	892
12	890	885	853	867	882	873	887	870	880	880	887	878	897	885	860	870	895	882	880	892
13	980	985	973	965	955	972	977	963	877	878	887	863	885	907	902	887	880	883	897	890
14	978	977	953	972	960	973	987	962	872	870	882	870	880	910	893	887	895	887	900	890
15	973	945	963	963	967	972	997	962	868	873	885	870	887	910	892	872	913	893	897	895
16	960	982	958	985	958	990	992	967	870	870	873	857	902	910	900	873	898	901	910	888
17	968	947	958	970	965	980	995	968	872	875	887	860	900	903	912	870	902	900	907	885
18	962	982	965	987	975	995	888	962	870	870	885	870	897	910	907	875	887	890	900	893
19	973	977	977	978	990	963	1003	960	870	870	890	858	898	912	907	883	883	883	883	893
20	970	975	978	990	980	970	997	963	870	870	883	858	895	910	910	885	897	890	887	897
21	970	978	972	973	987	963	997	967	868	872	880	863	895	915	910	890	880	897	883	893
22	963	972	965	977	980	977	1000	967	870	873	882	862	903	907	912	900	897	893	880	900
23	972	955	962	970	983	977	1003	963	868	870	880	858	900	910	917	893	900	890	887	897
24	970	953	960	977	980	970	980	940	878	880	880	870	895	907	913	900	913	897	880	897
25	897	893	892	895	943	960	980	953	840	860	860	850	860	877	900	877	890	860	853	880
26	910	892	892	910	953	963	983	943	840	860	867	857	857	880	900	887	900	853	853	880
27	908	897	890	905	940	960	977	940	860	867	860	860	867	863	897	880	887	857	850	870
28	905	893	890	906	940	953	980	943	860	860	873	860	853	880	900	883	890	860	850	877
29	913	893	892	912	943	963	986	933	863	867	890	853	860	880	897	883	890	843	840	870
30	910	897	898	893	943	960	980	920	867	870	880	867	870	880	897	883	880	843	840	860
31	908	890	892	882	940	967	987	923	860	877	880	860	860	877	900	890	880	840	840	867
32	912	892	890	890	936	960	980	923	877	870	900	867	857	880	900	893	893	850	840	877
33	908	892	890	890	946	963	980	923	863	870	900	867	860	880	883	887	863	840	847	860
34	910	892	890	898	940	960	980	930	880	887	903	860	860	880	900	893	877	847	847	860
35	908	893	893	897	946	963	967	937	880	880	900	877	877	880	897	890	870	857	857	867
36	900	898	898	902	940	960	963	920	863	887	893	877	860	880	893	897	883	843	857	863

表-5 超音波厚み計による肉厚測定結果

A 杭

杭頭より (m)	方向1肉厚(mm)		T ₁ -T ₂ (mm)	方向2肉厚(mm)		T ₁ -T ₂ (mm)	平均 腐食速 (mm/Y)
	試験前(T ₁)	試験後(T ₂)		試験前(T ₁)	試験後(T ₂)		
0.2	8.81	8.68	0.13	8.73	8.67	0.06	0.03
0.4	"	8.77	0.04	"	8.60	0.13	0.03
0.6	"	8.80	0.01	"	8.75	0	0.002
0.8	"	8.87	0	"	8.77	0	0
1.0	"	8.60	0.21	"	8.80	0	0.04
1.2	"	8.77	0.04	"	8.68	0.05	0.02
1.4	"	8.62	0.19	"	8.80	0	0.04
1.6	"	8.52	0.29	"	8.35	0.38	0.12
1.8	"	8.65	0.16	"	8.18	0.55	0.13
2.0	"	7.77	1.04	"	8.07	0.66	0.31
2.2	"	7.82	0.99	"	7.93	0.80	0.33
2.4	"	7.85	0.96	"	7.90	0.83	0.33
2.6	"	8.07	0.74	"	7.83	0.90	0.30
2.8	"	7.93	0.88	"	8.00	0.73	0.29
3.0	"	8.05	0.76	"	7.68	1.05	0.33
3.2	"	7.92	0.89	"	8.33	0.40	0.23
3.4	"	7.92	0.89	"	8.10	0.63	0.28
3.6	"	7.83	0.98	"	8.10	0.63	0.29
3.8	"	—	—	"	—	—	—
4.0	"	8.33	0.48	"	8.00	0.73	0.22
4.2	"	7.77	1.04	"	7.75	0.98	0.37
4.4	"	8.30	0.51	"	8.35	0.38	0.16
4.6	"	8.72	0.09	"	8.80	0	0.02
4.8	"	8.68	0.13	"	8.55	0.18	0.06
5.0	"	8.62	0.19	"	8.68	0.15	0.06
5.2	"	8.70	0.11	"	8.52	0.21	0.06
5.4	"	8.87	0	"	8.65	0.08	0.02
5.6	"	8.80	0.01	"	8.63	0.10	0.02
5.8	"	8.65	0.16	"	8.13	0.60	0.14
6.0	"	8.78	0.03	"	8.27	0.46	0.09
6.2	"	8.05	0.76	"	8.02	0.71	0.27
6.4	"	7.78	1.03	"	7.83	0.90	0.35
6.6	"	8.07	0.74	"	7.97	0.76	0.27
6.8	"	8.08	0.73	"	8.13	0.60	0.24
7.0	"	7.58	1.23	"	8.07	0.66	0.34
7.2	"	8.13	0.68	"	8.20	0.53	0.22
7.4	"	8.43	0.38	"	7.93	0.80	0.22
7.6	"	8.38	0.43	"	8.48	0.25	0.12

A 杭

杭頭より (m)	方向1肉厚(mm)		T ₁ -T ₂ (mm)	方向2肉厚(mm)		T ₁ -T ₂ (mm)	平均 腐食速度 (mm/Y)
	試験前(T ₁)	試験後(T ₂)		試験前(T ₁)	試験後(T ₂)		
7.8	8.81	8.40	0.41	8.73	8.22	0.51	0.17
8.0	"	8.28	0.53	"	8.50	0.23	0.14
8.2	"	8.25	0.56	"	8.58	0.15	0.13
8.4	"	7.80	1.01	"	8.53	0.20	0.22
8.6	"	8.52	0.29	"	8.83	0	0.05
8.8	"	8.70	0.11	"	8.80	0	0.02
9.0	"	8.62	0.19	"	8.48	0.25	0.08
9.2	"	8.68	0.23	"	8.73	0	0.04
9.4	"	8.77	0.04	"	8.53	0.20	0.04
9.6	"	8.53	0.28	"	8.53	0.20	0.09
9.8	"	8.68	0.13	"	8.77	0	0.02
10.0	"	8.22	0.59	"	8.67	0.06	0.12
10.2	"	8.63	0.18	"	8.80	0	0.03
10.4	"	8.30	0.51	"	8.52	0.21	0.13
10.6	"	8.32	0.49	"	8.25	0.48	0.18
10.8	"	8.47	0.34	"	8.73	0	0.06
11.0	"	8.10	0.71	"	8.23	0.50	0.22
11.2	"	7.48	0.33	"	8.20	0.53	0.16
11.4	"	7.82	0.99	"	7.90	0.83	0.33
11.6	"	8.47	0.34	"	8.60	0.13	0.09
11.8	"	8.30	0.51	"	8.45	0.28	0.13
12.0	9.72	9.25	0.47	9.69	9.25	0.44	0.17
12.2	"	9.40	0.32	"	9.35	0.34	0.12
12.4	"	9.48	0.24	"	9.40	0.29	0.10
12.6	"	9.65	0.07	"	9.55	0.14	0.04
12.8	"	9.55	0.17	"	9.53	0.16	0.06
13.0	"	9.55	0.17	"	9.40	0.29	0.08
13.2	"	9.33	0.39	"	9.47	0.22	0.11
13.4	"	9.43	0.29	"	9.58	0.11	0.07
13.6	"	9.43	0.29	"	9.50	0.19	0.09
13.8	"	9.55	0.17	"	9.55	0.14	0.06
14.0	"	9.40	0.32	"	9.55	0.14	0.08
14.2	"	9.45	0.27	"	9.50	0.19	0.08
14.4	"	9.43	0.29	"	9.47	0.22	0.09
14.6	"	9.47	0.25	"	9.43	0.26	0.09
14.8	"	9.45	0.27	"	9.42	0.27	0.10
15.0	"	9.38	0.34	"	9.47	0.22	0.10
15.2	"	9.40	0.32	"	9.43	0.26	0.11
15.4	"	9.42	0.30	"	9.43	0.26	0.10

A 杭

杭頭より (m)	方向1肉厚(mm)		T ₁ -T ₂ (mm)	方向2肉厚(mm)		T ₁ -T ₂ (mm)	平均 腐食速 (mm/Y)
	試験前(T ₁)	試験後(T ₂)		試験前(T ₁)	試験後(T ₂)		
15.6	9.72	9.37	0.35	9.69	9.40	0.29	0.12
15.8	"	9.37	0.35	"	9.28	0.41	0.14
16.0	"	9.37	0.35	"	9.50	0.19	0.10
16.2	"	9.37	0.35	"	9.45	0.24	0.11
16.4	"	9.45	0.27	"	9.47	0.22	0.09
16.6	"	9.37	0.35	"	9.43	0.26	0.11
16.8	"	9.43	0.29	"	9.35	0.34	0.12
17.0	"	9.35	0.37	"	9.43	0.26	0.12
17.2	"	9.53	0.19	"	9.43	0.26	0.08
17.4	"	9.35	0.37	"	9.35	0.34	0.13
17.6	"	9.43	0.29	"	9.40	0.29	0.11
17.8	"	9.45	0.27	"	9.42	0.27	0.10
18.0	"	9.48	0.24	"	9.48	0.21	0.08
18.2	"	9.35	0.37	"	9.48	0.21	0.11
18.4	"	9.40	0.32	"	9.50	0.19	0.09
18.6	"	9.47	0.25	"	9.52	0.17	0.08
18.8	"	9.47	0.25	"	9.53	0.16	0.08
19.0	"	9.47	0.25	"	9.48	0.21	0.08
19.2	"	9.45	0.27	"	9.53	0.16	0.08
19.4	"	9.40	0.32	"	9.50	0.19	0.09
19.6	"	9.50	0.22	"	9.52	0.17	0.07
19.8	"	9.47	0.25	"	9.45	0.24	0.09
20.0	"	9.50	0.22	"	9.43	0.26	0.09
20.2	"	9.50	0.22	"	9.40	0.29	0.09
20.4	"	9.47	0.25	"	9.43	0.26	0.09
20.6	"	9.40	0.32	"	9.40	0.29	0.11
20.8	"	9.47	0.25	"	9.40	0.29	0.10
21.0	"	9.40	0.32	"	9.40	0.29	0.11
21.2	"	9.43	0.29	"	9.40	0.29	0.11
21.4	"	9.40	0.32	"	9.37	0.32	0.12
21.6	"	9.40	0.32	"	9.40	0.29	0.11
21.8	"	9.40	0.32	"	9.37	0.32	0.12
22.0	"	9.40	0.32	"	9.33	0.36	0.12
22.2	"	9.40	0.32	"	9.37	0.32	0.12
22.4	"	9.40	0.32	"	9.40	0.29	0.11
22.6	"	9.37	0.35	"	9.33	0.36	0.13
22.8	"	9.47	0.22	"	9.30	0.39	0.11
23.0	"	9.33	0.39	"	9.27	0.42	0.15
23.2	"	9.37	0.35	"	9.23	0.46	0.15

A 杭

杭頭より (m)	方向 1 肉厚 (mm)		T ₁ -T ₂ (mm)	方向 2 肉厚 (mm)		T ₁ -T ₂ (mm)	平均 腐食速度 (mm/Y)
	試験前(T ₁)	試験後(T ₂)		試験前(T ₁)	試験後(T ₂)		
23.4	9.72	9.37	0.35	9.69	9.27	0.42	0.14
23.6	"	9.40	0.32	"	9.33	0.36	0.12
23.8	"	9.40	0.32	"	9.40	0.49	0.15
24.0	"	9.37	0.35	"	9.33	0.36	0.13
24.2	9.01	8.63	0.38	9.03	8.83	0.20	0.11
24.4	"	8.80	0.21	"	8.73	0.30	0.09
24.6	"	8.70	0.31	"	8.73	0.30	0.11
24.8	"	8.60	0.41	"	8.73	0.30	0.13
25.0	"	8.70	0.31	"	8.73	0.30	0.11
25.2	"	8.77	0.24	"	8.73	0.30	0.10
25.4	"	8.80	0.21	"	8.67	0.36	0.10
25.6	"	8.83	0.18	"	8.93	0.10	0.05
25.8	"	8.73	0.28	"	8.77	0.26	0.10
26.0	"	8.60	0.41	"	8.73	0.30	0.13
26.2	"	8.63	0.38	"	8.80	0.23	0.11
26.4	"	8.90	0.11	"	8.90	0.13	0.04
26.6	"	8.80	0.21	"	8.87	0.16	0.07
26.8	"	8.80	0.21	"	8.93	0.10	0.06
27.0	"	8.70	0.31	"	8.87	0.16	0.09
27.2	"	8.70	0.31	"	8.90	0.13	0.08
27.4	"	8.77	0.24	"	8.83	0.20	0.08
27.6	"	8.93	0.08	"	8.87	0.16	0.04
27.8	"	8.90	0.11	"	8.93	0.10	0.04
28.0	"	8.93	0.08	"	8.93	0.10	0.03
28.2	"	8.80	0.21	"	8.97	0.06	0.05
28.4	"	8.90	0.11	"	8.83	0.20	0.06
28.6	"	8.87	0.14	"	9.00	0.03	0.03
28.8	"	8.77	0.24	"	8.83	0.20	0.08
29.0	"	8.97	0.04	"	8.77	0.26	0.06
29.2	"	8.90	0.11	"	8.87	0.16	0.05
29.4	"	8.93	0.08	"	8.83	0.20	0.05
29.6	"	8.93	0.08	"	8.90	0.13	0.04
29.8	"	8.93	0.08	"	8.90	0.13	0.04
30.0	"	8.90	0.11	"	8.83	0.20	0.06
30.2	"	8.90	0.11	"	8.87	0.16	0.05
30.4	"	8.90	0.11	"	8.90	0.13	0.04
30.6	"	8.90	0.11	"	8.97	0.06	0.03
30.8	"	8.93	0.08	"	8.87	0.16	0.04
31.0	"	8.87	0.14	"	8.97	0.06	0.04

A 杭

杭頭より (m)	方向1肉厚(mm)		T ₁ -T ₂ (mm)	方向2肉厚(mm)		T ₁ -T ₂ (mm/Y)	平均 腐食速度 (mm/Y)
	試験前(T ₁)	試験後(T ₂)		試験前(T ₁)	試験後(T ₂)		
31.2	9.01	8.90	0.11	9.03	8.87	0.16	0.05
31.4	■	9.00	0.01	■	8.90	0.13	0.03
31.6	■	8.90	0.11	■	8.90	0.13	0.04
31.8	■	8.83	0.18	■	8.90	0.13	0.06
32.0	■	8.83	0.18	■	8.90	0.13	0.06
32.2	■	8.87	0.14	■	8.80	0.23	0.07
32.4	■	8.77	0.24	■	8.83	0.20	0.08
32.6	■	8.80	0.21	■	8.87	0.16	0.07
32.8	■	8.83	0.18	■	8.83	0.20	0.07
33.0	■	8.77	0.24	■	8.83	0.20	0.08
33.2	■	8.83	0.18	■	8.83	0.20	0.07
33.4	■	8.87	0.14	■	8.77	0.26	0.07
33.6	■	8.80	0.21	■	8.77	0.26	0.09
33.8	■	8.80	0.21	■	8.90	0.13	0.06
34.0	■	8.77	0.24	■	8.87	0.16	0.07
34.2	■	8.77	0.24	■	8.83	0.20	0.08
34.4	■	8.77	0.24	■	8.87	0.16	0.07
34.6	■	8.80	0.21	■	8.83	0.20	0.08
34.8	■	8.83	0.18	■	8.83	0.20	0.07
35.0	■	8.80	0.24	■	8.77	0.26	0.09
35.2	■	8.83	0.18	■	8.77	0.26	0.08
35.4	■	8.83	0.18	■	8.87	0.16	0.06
35.6	■	9.00	0.01	■	8.90	0.13	0.03
35.8	■	8.87	0.14	■	8.87	0.16	0.06
36.0	■	8.83	0.18	■	8.77	0.26	0.08

B 抗

杭頭より (m)	方向1肉厚(mm)		T ₁ -T ₂ (mm)	方向2肉厚(mm)		T ₁ -T ₂ (mm)	平均 腐食速度 (mm/Y)
	試験前(T ₁)	試験後(T ₂)		試験前(T ₁)	試験後(T ₂)		
0.5	8.76	8.62	0.14	8.81	8.50	0.31	0.08
1.0	"	8.75	0.01	"	8.47	0.34	0.06
1.5	"	8.78	0	"	8.63	0.18	0.03
2.0	"	8.80	0	"	8.23	0.58	0.11
2.5	"	8.83	0	"	7.88	0.93	0.17
3.0	"	7.60	1.16	"	7.83	0.98	0.39
3.2	"	8.08	0.68	"	7.90	0.91	0.29
3.4	"	8.30	0.46	"	8.22	0.59	0.19
3.6	"	8.35	0.41	"	8.32	0.49	0.18
3.8	"	—	—	"	—	—	—
4.0	"	8.33	0.43	"	8.45	0.36	0.14
4.2	"	8.70	0.06	"	8.70	0.11	0.03
4.4	"	8.70	0.06	"	8.83	0	0.01
4.6	"	8.72	0.04	"	8.78	0.03	0.01
4.8	"	8.75	0.01	"	8.78	0.03	0.01
5.0	"	8.73	0.03	"	8.80	0.01	0.01
5.2	"	8.73	0.03	"	8.78	0.03	0.01
5.4	"	8.75	0.01	"	8.90	0	0.002
5.6	"	8.77	0	"	8.78	0.03	0.01
5.8	"	8.75	0.01	"	8.78	0.03	0.01
6.0	"	8.52	0.24	"	8.57	0.24	0.09
6.2	"	8.67	0.09	"	8.57	0.24	0.06
6.4	"	8.57	0.19	"	8.02	0.79	0.18
6.6	"	8.50	0.26	"	7.27	1.54	0.33
6.8	"	8.47	0.29	"	7.88	0.93	0.22
7.0	"	8.27	0.49	"	7.32	1.49	0.36
7.5	"	8.52	0.24	"	8.58	0.23	0.09
8.0	"	8.55	0.21	"	8.68	0.13	0.06
8.5	"	8.87	0	"	8.47	0.34	0.06
9.0	"	8.82	0	"	8.18	0.63	0.12
9.5	"	8.67	0.09	"	8.47	0.34	0.08
10.0	"	8.75	0.01	"	8.30	0.51	0.10
10.5	"	8.60	0.16	"	8.38	0.43	0.11
11.0	"	8.58	0.18	"	8.48	0.33	0.09
11.5	"	8.47	0.29	"	8.18	0.63	0.17
12.0	"	—	—	"	—	—	—
13.0	9.72	9.40	0.32	9.57	9.25	0.32	0.12
14.0	"	9.43	0.29	"	9.17	0.40	0.13
15.0	"	9.43	0.29	"	9.20	0.37	0.12

C 杭

杭頭より (m)	方向 1 肉厚 (mm)		$T_1 - T_2$ (mm)	方向 2 肉厚 (mm)		$T_1 - T_2$ (mm)	平均 腐食速 度 (mm/Y)
	試験前(T_1)	試験後(T_2)		試験前(T_1)	試験後(T_2)		
13	8.71	8.67	0.04	8.73	8.70	0.03	0.01
16	"	8.63	0.08	"	8.70	0.03	0.02
19	"	8.62	0.09	"	8.72	0.01	0.02
24	"	8.78	0	"	8.70	0.02	0
29	8.63	8.55	0.08	8.71	8.70	0.01	0.02
34	"	8.70	0	"	8.90	0	0

D 杭

杭頭より (m)	方向 1 肉厚 (mm)		$T_1 - T_2$ (mm)	方向 2 肉厚 (mm)		$T_1 - T_2$ (mm)	平均 腐食速 度 (mm/Y)
	試験前(T_1)	試験後(T_2)		試験前(T_1)	試験後(T_2)		
13	8.83	8.83	0	8.89	8.90	0	0
16	"	8.87	0	"	9.00	0	0
19	"	8.90	0	"	9.07	0	0
24	"	8.73	0.10	"	8.90	0.02	0.03
29	8.74	8.77	0	8.92	8.97	0	0
34	"	8.78	0	"	8.92	0	0

B 杭

杭頭より (m)	方向1肉厚(mm)		T ₁ -T ₂ (mm)	方向2肉厚(mm)		T ₁ -T ₂ (mm)	平均 腐食速度 (mm/Y)
	試験前(T ₁)	試験後(T ₂)		試験前(T ₁)	試験後(T ₂)		
0.5	8.93	8.70	0.23	8.96	8.83	0.13	0.07
1.0	"	8.77	0.16	"	8.67	0.29	0.08
1.5	"	8.70	0.23	"	8.13	0.83	0.19
2.0	"	8.53	0.40	"	7.63	1.33	0.31
2.5	"	7.47	1.46	"	7.60	1.36	0.51
3.0	"	7.67	1.26	"	7.70	1.26	0.46
3.5	"	7.47	1.46	"	7.73	1.23	0.49
4.0	"	7.97	0.96	"	7.97	0.99	0.35
4.2	"	7.60	1.33	"	8.27	0.69	0.37
4.4	"	8.23	0.70	"	8.30	0.66	0.25
4.6	"	8.80	0.13	"	8.77	0.19	0.06
4.8	"	8.77	0.16	"	8.73	0.23	0.07
5.0	"	8.88	0.05	"	8.95	0.01	0.01
5.2	"	8.90	0.03	"	8.97	0	0.01
5.4	"	8.90	0.03	"	8.97	0	0.01
5.6	"	8.92	0.01	"	8.88	0.08	0.02
5.8	"	8.90	0.03	"	9.00	0	0.01
6.0	"	8.92	0.01	"	9.03	0	0.002
6.2	"	8.95	0	"	9.12	0	0
6.4	"	8.93	0	"	9.13	0	0
6.6	"	8.95	0	"	9.07	0	0
6.8	"	9.03	0	"	8.92	0.04	0.01
7.0	"	9.02	0	"	9.00	0	0
12.0	"	8.90	0.03	"	8.92	0.04	0.01
17.0	8.94	8.90	0.04	8.94	9.00	0	0.01
22.0	"	8.92	0.02	"	8.92	0.02	0.01
27.0	8.69	8.68	0.01	8.77	8.83	0	0.002
32.0	"	8.70	0	"	8.77	0	0
36.0	"	8.70	0	"	8.85	0	0

ii) マイクロメーターによる測定結果

マイクロメーターによる測定の場合は試験前の肉厚測定ができないので、超音波厚み計による測定値を基準厚として腐食による肉厚の変化を求めた。肉厚変化の求め方としては、超音波厚み計による各測点における3回の測定値の平均を基準厚とし、これと、同じ位置から採取した試験片(15×15 cm)の横方向中央1列7点のマイクロメーターによる測定値の平均または試験片(15×15 cm)の横方向中央の上、下2列14点のマイクロメーターによる測定値の平均を比較する方法(方法1)と、試験片の49点(15×15 cmの場合)または168点(15×50 cm)のマイクロメーターによる測定値の平均を各鋼管ごとの超音波厚み計による総平均厚と比較する方法(方法2)の2つの方法を用いた。なお、この測定においては、測定値が基準厚より大きい場合は肉厚の変化はないものと判定した。方法1による肉厚の変化を表-6及び図-15に、方法2による肉厚の変化を表-7及び図-16にそれぞれ示す。

iii) 超音波厚み計とマイクロメーターによる測定結果の比較

マイクロメーターによる測定値は、超音波厚み計による測定値と多少異なるほか、B杭の飛沫帯におけるように実際は著しく腐食しているのに腐食していない結果が得られるなどの相違点はあるが、干満帯において腐食が少ない点や海水層の表層付近に腐食の大きい層が存在するなど全体としての腐食パターンには類似性が認められる。

マイクロメーターによる測定結果は、点同志を比較した場合(図-15)と面同志を比較した場合(図-16)とでは、腐食厚がかなり違う部分が生じるのは当然であるが、著しい腐食が認められる部分で腐食していない結果が得られるなど納得しかねる点があったので、ここでは、超音波厚み計による測定結果をもとに、これに表-8に示した目視観察結果を加味して無処理杭の腐食傾向について考察すればつぎのようである。

- ㊦ 無処理の場合にはT.P+2 m付近が腐食は最大で、0.3~0.5 mm/年を示した。
- ㊦ T.P±0 m付近の腐食は少なく0.06 mm/年以下である。
- ㊦ T.P-2 m付近及びT.P-5.5~-6.5 mの海水層の中間付近に腐食の大きい層があるが、水質調査の結果、水深により塩分や溶存酸素濃度の差異が観測されているので、その影響も考えられる。
- ㊦ 海底土中における腐食は、一般に孔食の傾向が著しいため、厚みの測定では実態の把握がむずかしい。海底に近いヘドロ層では特に孔食傾向が大きく、深さ1.5~2 mmの孔食が多数生じていたが無腐食部分もかなり認められた。海底土中深部では黒皮が残っている部分もあり、きわだった腐食は認められなかった。これらのことから、海底土の比較的表層では嫌気性菌の影響がかなり大きいと推定される。なお、腐食速度は一般の海域よりかなり大きい。

4.4 防食被覆の劣化状況

防食被覆を施した試験杭の調査によりつぎのことが明らかとなった。

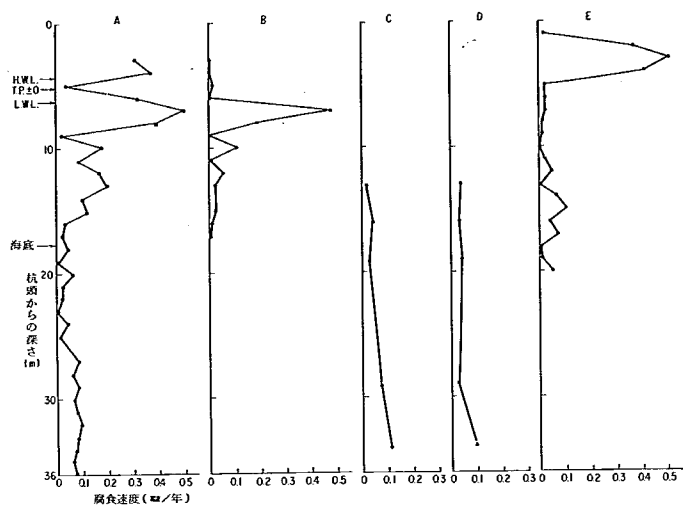


図-15 マイクロメーターによる測定結果(1)

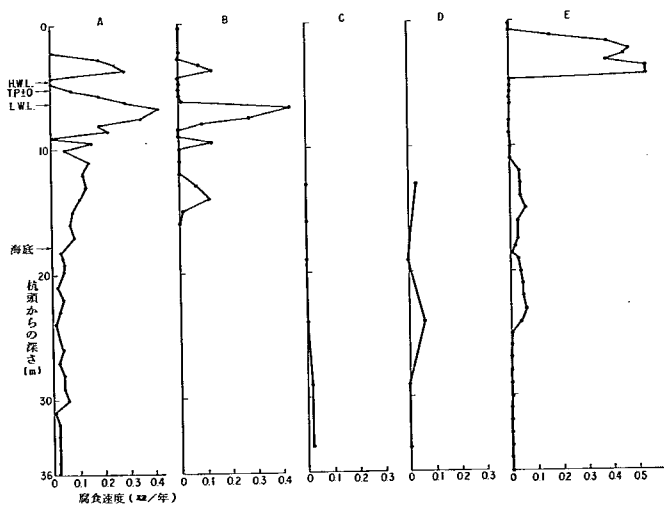


図-16 マイクロメーターによる測定結果(2)

表-6 マイクロメーターによる肉厚測定結果(1)

A 杭

杭頭より (m)	環 境	基準厚(mm)	引抜き後の肉厚測定結果			目 視 観 察
			平均厚(mm)	腐食厚(mm)	腐食速度(mm/年)	
3	大気中	8.82	7.98	0.84	0.31	厚いさびに覆われている。 表面が多孔質状に侵食されて いる。
4	H.W.L 4.35m	8.83	7.81	1.02	0.37	
5	T.P±0(5.23m)	8.82	8.70	0.12	0.04	
6	L.W.L 6.35m	8.95	8.06	0.89	0.32	
7		8.88	7.50	1.33	0.50	
8		8.87	7.81	1.06	0.39	小さい腐食孔が全面に発生。
9		8.80	8.76	0.04	0.02	腐食孔が若干認められる。
10		8.90	8.41	0.49	0.18	
11	海水中	8.87	8.62	0.25	0.09	
12		8.90	8.43	0.47	0.17	
13		8.90	8.34	0.56	0.20	
14		9.80	9.52	0.28	0.10	
15		9.78	9.46	0.32	0.12	
16		9.73	9.64	0.09	0.03	
17		9.60	9.55	0.05	0.02	
18		9.68	9.57	0.11	0.04	
19		9.62	9.66	0	0	
20	海底 18.03m	9.73	9.57	0.16	0.06	境界部にのみさびの発生あり。
21		9.70	9.66	0.04	0.02	全面が細かい針穴状に腐食。
22		9.70	9.65	0.05	0.02	
23	海底土中	9.63	9.64	0	0	
24		9.72	9.61	0.11	0.04	
25		9.70	9.68	0.02	0.01	
26		8.97	—	—	—	
27		9.10	8.89	0.21	0.08	うすいさびが認められる。
28		9.08	8.92	0.16	0.06	部分的に黒皮が認められる。
29		9.05	8.84	0.21	0.03	
30		9.13	8.93	0.20	0.07	
31		9.10	8.89	0.21	0.08	
32		9.08	8.84	0.24	0.09	
33		9.12	8.89	0.23	0.08	
34		9.08	8.89	0.19	0.07	
35		9.10	8.93	0.17	0.06	
36		9.08	8.90	0.18	0.07	

B 杭

杭頭より (m)	環 境	基準厚(mm)	引抜き後の肉厚測定結果			目 視 観 察
			平均厚(mm)	腐食厚(mm)	腐食速度(mm/年)	
3	大気中	8.80	8.80	0	0	
4	H.W.L 4.35m	8.77	8.83	0	0	
5	T.P±0 (5.23m)	8.85	8.83	0.02	0.01	
6	L.W.L 6.35m	8.80	8.82	0	0	
7		8.82	7.49	1.33	0.48	
8		8.87	8.34	0.53	0.19	
9		8.88	8.89	0	0	
10		8.83	8.54	0.29	0.11	
11	海水中	8.80	8.85	0	0	
12		8.82	8.68	0.14	0.05	
13		9.55	9.49	0.06	0.02	
14		9.60	9.55	0.05	—	
15		9.67	9.49	0.18	0.02	
16		9.58	9.55	0.03	0.01	
17		9.65	9.73	0	0	

C 杭

杭頭より (m)	環 境	基準厚(mm)	引抜き後の肉厚測定結果			目 視 観 察
			平均厚(mm)	腐食厚(mm)	腐食速度(mm/年)	
13	海水中	8.87	8.81	0.06	0.02	
16		8.73	8.63	0.10	0.04	
19	海底 18.03m	8.90	8.81	0.09	0.03	
29	海底土中	8.90	8.71	0.19	0.07	
34		9.03	8.73	0.30	0.11	

D 杭

杭頭より (m)	環 境	基準厚(mm)	引抜き後の肉厚測定結果			目 視 観 察
			平均厚(mm)	腐食厚(mm)	腐食速度(mm/年)	
13	海水中	9.02	8.92	0.10	0.04	
16		9.00	8.93	0.09	0.03	
19	海底 18.03m	9.07	8.96	0.11	0.04	
29	海底土中	8.97	8.91	0.06	0.02	
34		9.00	8.76	0.24	0.09	

E 杭

杭頭より (m)	環 境	基準厚(mm)	引抜き後の肉厚測定結果			目 視 観 察
			平均厚(mm)	腐食厚(mm)	腐食速度(mm/年)	
1		9.00	8.95	0.05	0.02	腐食が進んでいる。
2	大気中	8.98	7.98	1.00	0.37	
3		9.03	7.64	1.39	0.51	
4		9.00	7.90	1.10	0.41	
5	H.W.L 4.35m	9.02	8.96	0.06	0.02	
6	T.P±0 (5.23m)	9.00	8.95	0.05	0.02	
7	L.W.L (6.35m)	9.00	8.94	0.06	0.02	
8		9.02	9.00	0.02	0.01	
9	海水中	9.00	8.97	0.03	0.01	
10		9.00	8.99	0.01	0.004	部分的な大きい腐食孔あり。
11		9.00	8.95	0.05	0.02	
12		—	—	—	—	
13		8.80	8.80	0	0	部分的な大きい腐食孔あり。
14		8.95	8.76	0.19	0.07	
15		9.13	8.85	0.28	0.10	
16		8.98	8.88	0.10	0.04	
17		9.02	8.83	0.19	0.07	
18	海底 18.03m	8.87	8.86	0.01	0.004	境界部にかなりのきびが見られる。
19	海底土中	8.83	8.81	0.02	0.01	黒皮が認められる。
20		8.97	8.83	0.14	0.05	

表-7 マイクロメーターによる肉厚測定結果(2)

A 杭

杭頭より (m)	基準厚 (mm)	試験片測定結果				腐食厚 (mm)	腐食速度 (mm/年)
		最大値 (mm)	最小値 (mm)	平均厚 (mm)	標準偏差		
2.0~2.5	8.71	8.98	8.51	8.76	0.069	0	0
2.5~3.0	"	8.83	6.95	8.20	0.439	0.51	0.19
3.0~3.5	"	8.83	6.97	8.03	0.347	0.68	0.25
3.5~4.0	"	8.76	6.93	7.92	0.400	0.79	0.29
4.0~4.5	"	9.13	7.61	8.82	0.230	0	0
4.5~5.0	"	9.06	8.58	8.87	0.109	0	0
5.0~5.5	"	8.79	7.95	8.50	0.190	0.21	0.08
5.5~6.0	"	8.55	7.62	8.20	0.219	0.51	0.19
6.0~6.5	"	8.79	7.02	7.92	0.395	0.79	0.29
6.5~7.0	"	8.75	7.01	7.56	0.202	0.15	0.42
7.5	"	8.21	7.15	7.76	0.185	0.95	0.35
8.0	"	9.05	7.06	8.18	0.403	0.53	0.19
8.5	"	8.84	7.30	8.12	0.329	0.59	0.22
9.0	"	9.08	8.59	8.80	0.086	0	0
9.5	"	8.68	7.51	8.27	0.268	0.44	0.16
10.0	"	8.90	8.06	8.58	0.188	0.13	0.05
11.0	"	8.78	7.38	8.30	0.356	0.41	0.15
12.0	"	8.72	8.03	8.37	0.145	0.34	0.12
13.0	9.73	9.60	9.20	9.38	0.089	0.35	0.13
14.0	"	9.67	9.06	9.42	0.130	0.31	0.11
15.0	"	9.81	9.32	9.52	0.087	0.21	0.08
16.0	"	9.81	9.44	9.55	0.077	0.18	0.07
17.0	"	9.71	9.24	9.52	0.094	0.21	0.08
18.0~18.5	"	9.88	9.23	9.66	0.084	0.07	0.03
18.5~19.0	"	9.84	8.72	9.63	0.117	0.10	0.04
19.0~19.5	"	9.88	8.88	9.63	0.161	0.10	0.04
19.5~20.0	"	9.83	9.12	9.62	0.133	0.11	0.04
21.0	"	9.85	9.32	9.67	0.087	0.06	0.02
22.0	"	9.90	9.53	9.63	0.079	0.10	0.04
23.0	"	9.81	9.55	9.65	0.062	0.08	0.03
24.0	"	9.88	9.55	9.71	0.081	0.02	0.01
25.0	"	—	—	—	—	—	—
26.0	8.97	9.12	8.68	8.87	0.110	0.10	0.04

A 杭

杭頭より (m)	基準厚 (mm)	試験片測定結果				腐食厚 (mm)	腐食速度 (mm/年)
		最大値 (mm)	最小値 (mm)	平均厚 (mm)	標準偏差		
27.0	8.97	9.12	8.64	8.92	0.094	0.05	0.02
28.0	"	9.06	8.66	8.87	0.108	0.10	0.04
29.0	"	9.24	8.84	8.97	0.074	0.10	0.04
30.0	"	9.09	8.72	8.90	0.102	0.17	0.06
31.0	"	9.24	8.70	8.96	0.113	0.01	0.004
32.0	"	9.07	8.75	8.92	0.083	0.05	0.02
33.0	"	9.07	8.75	8.92	0.083	0.05	0.02
34.0	"	9.04	8.82	8.93	0.046	0.04	0.02
35.0	"	9.06	8.82	8.93	0.062	0.04	0.02
36.0	"	9.11	8.85	8.92	0.040	0.05	0.02

B 杭

杭 頭 より (m)	基 準 厚 (mm)	試 験 片 測 定 結 果				腐 食 厚 (mm)	腐食速度 (mm/年)
		最 大 値 (mm)	最 小 値 (mm)	平 均 厚 (mm)	標準偏差		
2.0 ~ 2.5	8.75	9.02	8.70	8.92	0.048	0	0
2.5 ~ 3.0	"	9.32	8.47	8.93	0.104	0	0
3.0 ~ 3.5	"	9.12	7.22	8.54	0.346	0.21	0.08
3.5 ~ 4.0	"	9.00	7.05	8.40	0.337	0.35	0.13
4.0 ~ 4.5	"	9.05	7.50	8.78	0.174	0	0
4.5 ~ 5.0	"	9.01	8.67	8.81	0.053	0	0
5.0 ~ 5.5	"	9.03	8.58	8.87	0.062	0	0
5.5 ~ 6.0	"	9.88	8.76	8.88	0.098	0	0
6.0 ~ 6.5	"	9.00	7.91	8.73	0.184	0.02	0.01
6.5 ~ 7.0	"	8.38	7.01	7.53	0.287	0.22	0.44
7.5	"	8.50	7.18	7.97	0.233	0.78	0.28
8.0	"	9.11	7.03	8.50	0.397	0.25	0.09
8.5	"	9.11	8.32	8.90	0.118	0	0
9.0	"	9.37	8.71	8.97	0.103	0	0
9.5	"	9.01	7.24	8.40	0.365	0.35	0.13
10.0	"	9.13	8.30	8.82	0.174	0	0
11.0	"	9.86	8.21	9.01	0.435	0	0
12.0	"	9.55	8.00	8.85	0.259	0	0
13.0	9.77	9.91	8.48	9.58	0.238	0.19	0.07
14.0	"	9.78	9.02	9.44	0.211	0.33	0.12
15.0	"	10.20	9.48	9.75	0.183	0.02	0.01
16.0	"	10.29	9.67	9.90	0.160	0	0

C 杭

杭 頭 より (m)	基 準 厚 (mm)	試 験 片 測 定 結 果				腐 食 厚 (mm)	腐食速度 (mm/年)
		最 大 値 (mm)	最 小 値 (mm)	平 均 厚 (mm)	標準偏差		
13.0	8.73	9.42	8.53	8.84	0.230	0	0
16.0	"	9.28	8.18	8.80	0.214	0	0
19.0	"	9.51	8.69	8.94	0.196	0	0
24.0	"	9.60	8.69	8.97	0.277	0	0
29.0	8.72	8.92	8.50	8.67	0.118	0.05	0.02
34.0	"	9.01	8.60	8.77	0.108	0.05	0.02

D 杭

杭 頭 より (m)	基 準 厚 (mm)	試 験 片 測 定 結 果				腐 食 厚 (mm)	腐食速度 (mm/年)
		最 大 値 (mm)	最 小 値 (mm)	平 均 厚 (mm)	標 準 偏 差		
13.0	8.99	9.10	8.77	8.92	0.078	0.07	0.03
16.0	"	9.25	8.85	8.96	0.079	0.03	0.01
19.0	"	9.29	8.83	9.00	0.120	0	0
24.0	"	9.14	8.05	8.83	0.155	0.16	0.06
29.0	8.81	9.18	8.72	8.89	0.127	0	0
34.0	"	9.10	8.67	8.82	0.120	0	0

E 杭

杭 頭 より (m)	基 準 厚 (mm)	試 験 片 測 定 結 果				腐 食 厚 (mm)	腐食速度 (mm/年)
		最 大 値 (mm)	最 小 値 (mm)	平 均 厚 (mm)	標準偏差		
0 ~ 0.5	8.89	9.13	8.55	8.91	0.095	0	0
0.5 ~ 1.0	"	9.07	8.82	8.94	0.057	0	0
1.0 ~ 1.5	"	8.95	7.40	8.46	0.397	0.43	0.16
1.5 ~ 2.0	"	8.27	7.15	7.85	0.225	1.04	0.38
2.0 ~ 2.5	"	8.29	7.00	7.59	0.281	1.30	0.47
2.5 ~ 3.0	"	8.51	7.21	7.66	0.218	1.23	0.45
3.0 ~ 3.5	"	8.69	7.27	7.84	0.217	1.05	0.38
3.5 ~ 4.0	"	9.06	7.27	8.41	0.456	1.48	0.54
4.0 ~ 4.5	"	8.96	7.24	8.42	0.433	1.47	0.54
4.5 ~ 5.0	"	9.11	8.76	8.91	0.051	0	0
5.0 ~ 5.5	"	9.13	8.84	8.94	0.044	0	0
5.5 ~ 6.0	"	9.17	8.73	8.96	0.065	0	0
6.0 ~ 6.5	"	9.13	8.88	8.97	0.057	0	0
6.5 ~ 7.0	"	9.11	8.85	8.94	0.046	0	0
8.0	"	9.16	8.89	8.99	0.065	0	0
9.0	"	9.15	8.88	8.98	0.066	0	0
10.0	"	9.82	8.86	9.24	0.201	0	0
11.0	"	9.15	8.90	8.97	0.060	0	0
12.0	8.93	9.06	8.70	8.81	0.079	0.12	0.04
13.0	"	8.99	8.74	8.82	0.059	0.11	0.04
14.0	"	9.38	8.71	8.82	0.108	0.11	0.04
15.0	"	8.91	8.59	8.78	0.066	0.15	0.06
16.0	"	9.00	8.71	8.85	0.076	0.08	0.03
17.0 ~ 17.5	"	9.01	8.73	8.85	0.064	0.08	0.03
17.5 ~ 18.0	"	9.15	8.09	8.88	0.100	0.05	0.02
18.0 ~ 18.5	"	9.07	8.08	8.90	0.096	0.03	0.01
18.5 ~ 19.0	"	9.07	8.76	8.86	0.081	0.07	0.03
20.0	"	8.96	8.74	8.83	0.059	0.10	0.04
21.0	"	8.98	8.72	8.80	0.055	0.13	0.05
22.0	"	8.85	8.72	8.80	0.049	0.13	0.05
23.0	"	8.87	8.69	8.76	0.053	0.17	0.06
24.0	"	9.11	8.66	8.81	0.109	0.12	0.04
25.0	8.63	8.97	8.59	8.44	0.090	0	0
26.0	"	9.15	8.62	8.84	0.118	0	0

E 杭

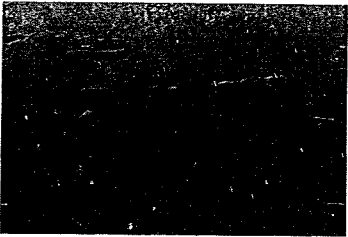
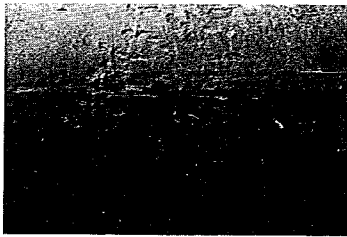
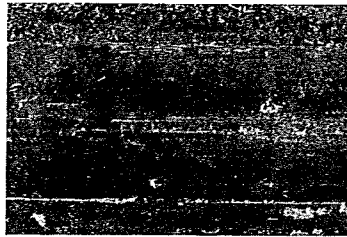
杭頭より (m)	基準厚 (mm)	試験片測定結果				腐食厚 (mm)	腐食速度 (mm/年)
		最大値 (mm)	最小値 (mm)	平均厚 (mm)	標準偏差		
27.0	8.63	9.00	8.63	8.74	0.076	0	0
28.0	"	8.99	8.58	8.69	0.084	0	0
29.0	"	8.77	8.52	8.64	0.051	0	0
30.0	"	9.00	8.51	8.72	0.111	0	0
31.0	"	9.09	8.63	8.76	0.092	0	0
32.0	"	8.84	8.56	8.71	0.055	0	0
33.0	"	9.00	8.62	8.72	0.071	0	0
34.0	"	8.84	8.65	8.71	0.037	0	0
35.0	"	8.90	8.65	8.76	0.066	0	0

表-8 外観調査結果

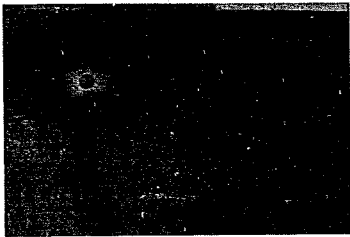
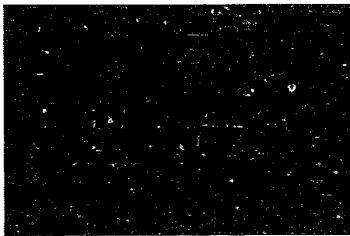
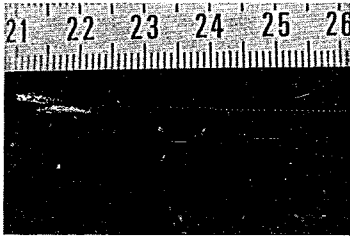
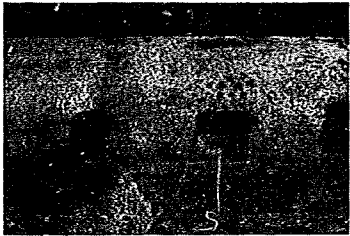
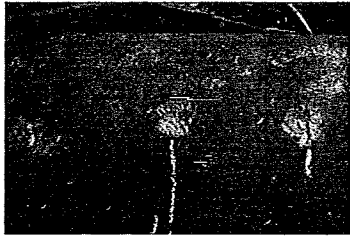
A杭(無防食)

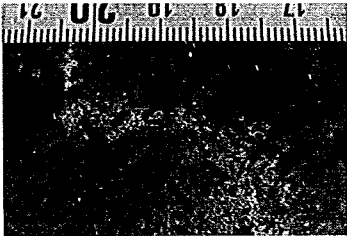
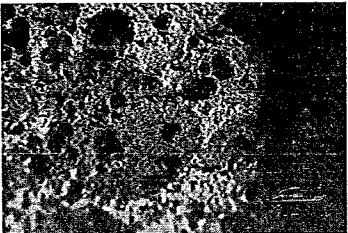
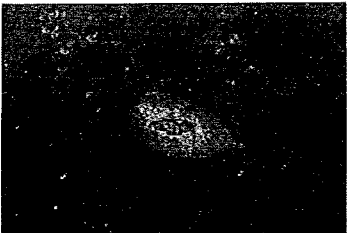
深 度	観 察 結 果
T.P+5225 ↓ H.W.L	天端より0~1 mは、黒褐色のち密な錆であり腐食はない。2 m~4 mは浮錆が全面に広がり腐食はT.P+2.0 m前後が最も激しく、鋼材面は1~2 mm程度の凹凸があった。錆層は5~6 mm Ⓐ1 A杭 1.0 m Ⓐ2 A杭 3.0 m
H.W.L ↓ L.W.L	フジツボが多数付着していた。5 m付近は石灰質付着物で覆われており、鋼材面は比較的平滑で0.2~0.3 mmの凹凸であった。 Ⓐ3 A杭 5.0 m
L.W.L	カラス貝の付着が多く、鋼材面は1 mm前後の孔食が多数認められた。 Ⓐ4 A杭 L.W.L

深 度	観 察 結 果
H.W.L と 海 底	L.W.L から下 3 m 程は凹凸が広がっていたが、それ以下のヘドロ層までの間は 1.5 ~ 2 m 程の深さで部分的に腐食していた。
	 5 A 杭 7.0 m  6 A 杭 10.0 m
	 7 A 杭 11.0 m  8 A 杭 12.8 m

深 度	観 察 結 果
ヘドロ中	海水とヘドロの境界に集中腐食がみられた。 ヘドロ中は鋼面に酸化皮膜が残っており、部分的に腐食が広がっていた。深さは1.5～2 mm程であった。  No. 9 A杭 海-ヘドロ  No. 10 A杭 ヘドロ  No. 11 A杭 G.L.-3.0 m
土 中	黒皮が残っている部分もあり、きわだった腐食は認められなかった。  No. 12 A杭 土中

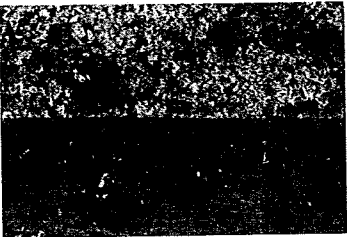
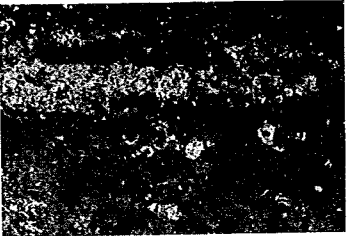
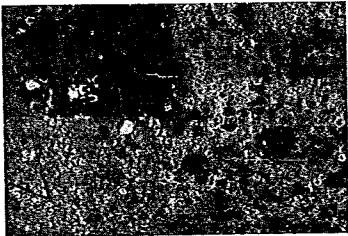
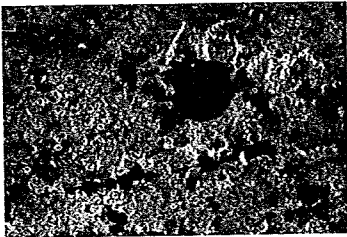
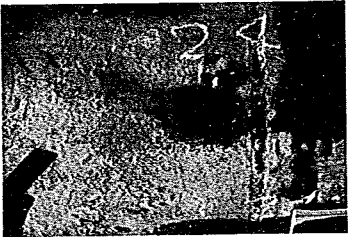
B杭 無防食（コンクリート巻“天端より4～6 m”）

深 度	観 察 結 果
天 端 ↓ H.W.L	A杭と同様、天端より1 mぐらいまでは腐食が少なく、それ以下はT.P + 2.0 m 付近をピークとして全面腐食であった。  No. 13 B杭 1.0 m  No. 14 B杭 3.0 m  No. 15 B杭（接写）1.0 m  No. 16 B杭（接写）3.1 m
H.W.L ↓ L.W.L	コンクリート被覆中であり0.5 mm以下の細かい凹凸であった。  No. 17 B杭（コンクリート巻き部分）5.0 m  No. 18 B杭 7.0 m

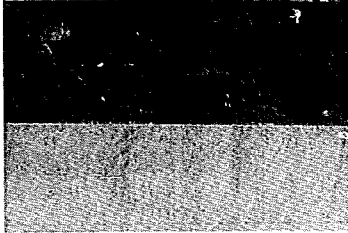
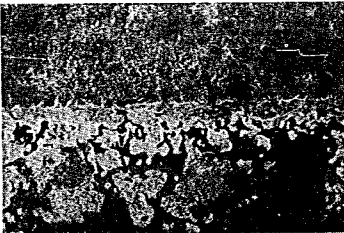
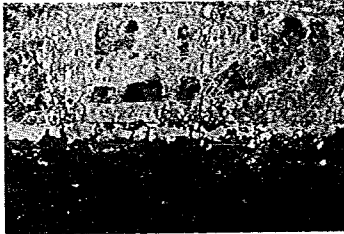
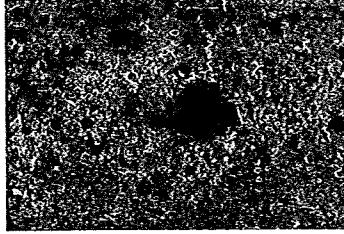
深 度	観 察 結 果
L.W.L	鋼材面は1mm前後の凹凸が多数認められ、A杭とはほぼ同様であった。  No. 19 B杭 (接写) 5.0 m
L.W.L 以 下	A杭と同様に部分的に広がった腐食が点在していた。  No. 20 B杭 (接写) 6.2 m  No. 21 B杭 1.4 m  No. 22 B杭 1.0 m
15 m 土 中	鋼管杭引抜時に溶接部より破断した為、調査対象にならなかったが、A杭とはほぼ同様の腐食傾向であったと思われる。

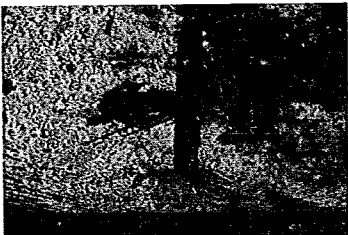
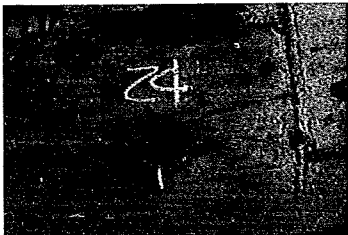
C杭（ジンクリッチペイント+タールエポキシ塗装+電防）

深 度	観 察 結 果
天 端 / H.W.L	天端より3 mまでは塗装は健在であったが、4 m付近では浮錆の発生がみられた。 Ⓐ23 C杭 1.0 m Ⓐ24 C杭 3.0 m Ⓐ25 C杭 4.0 m
H.W.L / L.W.L	±0 m（天端より5 m付近）では塗膜の劣化が激しく、ジンクリッチペイントのみ面には残存塗膜は少なく、タールエポキシ塗膜もほとんど防錆力を消失しているように思われた。 Ⓐ26 C杭 5.0 m

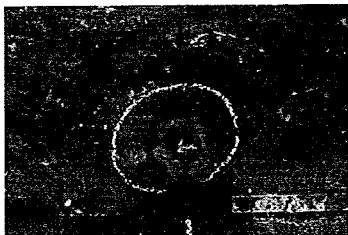
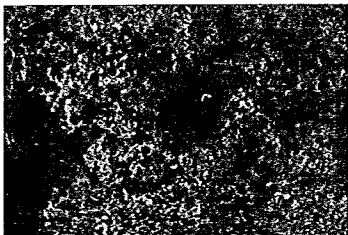
深 度	観 察 結 果
L.W.L ↓ 海 底	ジンクリッチペイントはほとんど消失していたがタールエポキシ塗装を施した部分は健在であった。電気防食との相乗効果により腐食はほとんど無い。  No. 27 C杭 7.0 m  No. 28 C杭 9.0 m (キズ)  No. 29 C杭 境  No. 30 C杭 16.0 m
土 中	局部腐食も認められず平滑な鋼材面が維持されていた。  No. 31 C杭 24.0 m

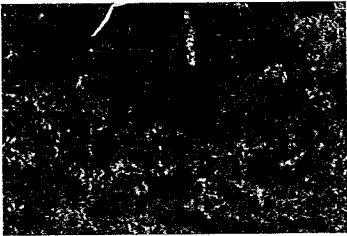
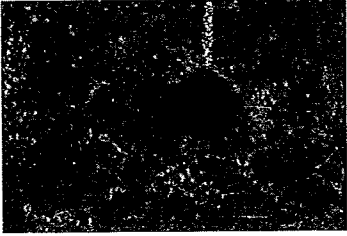
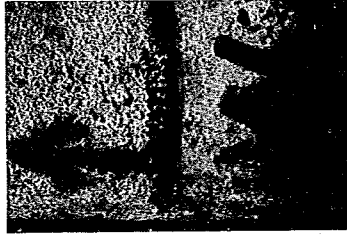
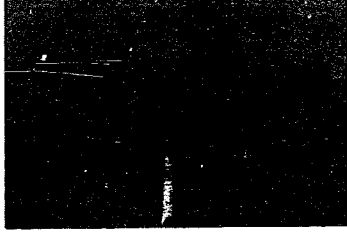
D杭（アルミ溶射+タールエポキシ塗装+電防）

深 度	観 察 結 果	
天 端 ↓ H.W.L	アルミ溶射部およびタールエポキシ（上塗）共に健全であった。  ㏽32 D杭 1.0 m	 ㏽33 D杭 3.0 m
H.W.L ↓ L.W.L	アルミ溶射部は白サビとなりタールエポキシ塗膜の剥離も目立つ状態であった。特にアルミ溶射部には金属面の露出が見られた。  ㏽34 D杭 5.0 m	 ㏽35 D杭 7.0 m
L.W.L ↓ 海 底	干満部と同様塗膜の劣化が目立ち防錆力は消失していると思われた。鋼材面は電気防食により平滑な面が維持されていた。  ㏽36 D杭 10.0 m	 ㏽37 D杭 13.0 m

深 度	観 察 結 果	
ヘドロ 土 中	ほとんど腐食はなく平滑面で石炭質の付着物で覆われていた。	
	 438 D 杭 境	 439 D 杭 24 m

E 杭 無塗装 電気防食

深 度	観 察 結 果	
天 端 H.W.L	A・B 共杭と同様、上部はち密な錆で T.P+2.0 m 付近での腐食は激しい。	
	 440 E 杭 1.0 m	 441 E 杭 3.0 m
H.W.L L.W.L	上部の腐食も 5 m 付近までで、それ以下は石炭質の付着物で全面が覆われ、鋼材面は平滑な状態であった。	
	 442 E 杭 4.2 m	 443 E 杭 5.0 m

深 度	
L.W.L / 海 底	上記のように電気防食により腐食抑制力が保たれている。  No. 44 E杭 7.0 m  No. 45 E杭 12.0 m
海 底 / 土 中	海水中は石炭質付着物で覆われており、また土中も鋼材面は平滑で腐食はほとんど認められなかった。  No. 46 E杭 境  No. 47 E杭 土中

- i) 無機質ジnkリッチペイント塗装のみの部分は膜厚が 20μ 前後しかなかったため全体的に劣化し素地の腐食が始まっていた。無機質ジnkリッチ塗膜は、亜鉛メッキや亜鉛溶射の場合より海水中での溶出速度は小さいが、膜厚が小さいため耐久性が小さいのも当然と思われる。
- ii) 無機質ジnkリッチの上にタールエポキシを塗装した部分は飛沫帯では良好な状態を維持していたが干満帯でははくりやふくれなどの劣化が著しかった。フジフボやムラサキイガイなどの付着が著しいことと波浪の作用が劣化を促進していると考えられる。これに対して電気防食が有効に作用する海中部分では塗膜状態は良好であり、電気防食が塗膜寿命の延長効果を持つことがわかる。
- iii) アルミニウム溶射は飛沫帯では健全な状態を維持していたが、干満帯ではアルミ溶射層の消耗がかなりあり、一部には鋼材面の露出が認められた。海中部では干満帯と同様にアルミ溶射層の消耗により一部の鋼材面が露出していた。これらのことから、アルミニウム溶射は、アルミニウム陽極による電気防食を併用しても、海水に接する環境での耐久性はそれ程大きくないことがわかる。
- iv) アルミニウム溶射の上にタールエポキシを塗装した場合は、飛沫帯での耐久性は良好であるが、干満帯では無機質ジnkリッチペイント塗装の場合よりも塗膜のはがれやふくれが著しく、タールエポキシのはがれ部分のアルミニウム溶射層がかなり消耗し、一部の鋼材面が露出していた。海中部も干満帯と同様であり、防食下地にアルミニウム溶射を用いた場合には、無機質ジnkリッチペイントの場合に認められたような電気防食による塗膜寿命の延長効果は小さいと判断される。
- v) セメントコンクリートライニングを施した場合は、ライニングの時期が多少遅れたためか、現地でライニング後に鋼管の発錆によると思われるひびわれが生じ、引抜き工事のときにライニングが落下したため、ライニング層の詳細な調査はできなかった。
- ライニングが落下した後の鋼管表面には多少の孔食はあるがその深さはそれ程大きくなく、平均腐食速度は $0.01\text{mm}/\text{年}$ 程度で腐食は小さかった。この結果を無処理の A 杭と比較して見ると、同じ部分で $0.02 \sim 0.37\text{mm}/\text{年}$ (平均 $0.11\text{mm}/\text{年}$) を示し腐食を約 $1/10$ に軽減している。このことから、施工管理が不十分な現地施工でも、コンクリートライニングは効果的であることがわかる。

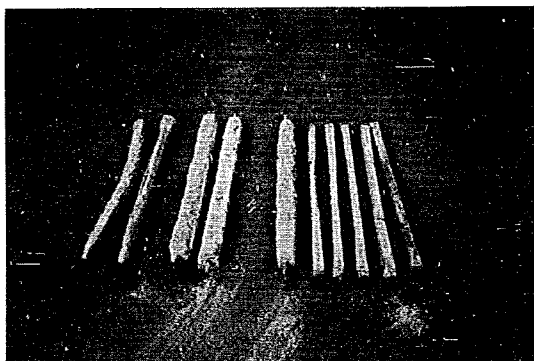
4.5 電気防食の効果

- i) 電気防食は、平均潮位以下の海水中及び海底土中にある鋼管杭に対して優れた防食効果を有し、無防食の場合と比較して腐食を $1/10$ 以下とすることを確認した。
- ii) 上記の効果は、アルミニウム陽極を用いて鋼管電位を -800mV (S.C.E) より卑に維持することにより達成された。
- iii) 電気防食を、海水環境に適性を有する無機質ジnkリッチペイント + タールエポキシの塗装と

併用すれば、塗膜寿命の大幅な延長効果が期待できる。

4.6 アルミニウム陽極の消耗状況

試験杭 C、D、E に取付けたアルミニウム陽極の消耗状況及びアルミニウム陽極から発生した電気の推定値を写真-6 及び表-9 に示す。



E 1, 2 D 1, 2

C 1, 4, 5, 6, 7, 8

写 真 - 6 取外したアルミニウム陽極

表-9 アルミニウム陽極の消耗状況調査結果

試験杭 底	陽極 底	型 式	初 重 量 (kg)	後 重 量 (kg)	芯金重量 (kg)	重 量 減 (kg)	使用電気量 (A-Yr)	平均発生電流 (A)	総発生電流 (A)
C	1	P-05(1B)	25.0	12.90	-0.03	12.07	3.17	1.153	2.135
	2	SC-1	4.8	完全消耗	—	3.3	0.87	0.316	
	3	"	"	"	—	3.3	0.71	0.258	
	4	"	"	2.98	-0.08	1.74	0.37	0.135	
	5	"	"	3.10	-0.05	1.65	0.35	0.127	
	6	"	"	3.82	-0.10	0.88	0.19	0.069	
	7	"	"	4.43	-0.07	0.30	0.06	0.022	
	8	"	"	4.00	-0.11	0.69	0.15	0.055	
D	1	P-05(1B)	25.0	14.95	-0.03	10.02	2.64	0.960	2.190
	2	"	"	12.12	-0.03	12.85	3.38	1.229	
E	1	"	"	7.52	-0.02	17.46	4.59	1.669	3.429
	2	"	"	6.56	-0.02	18.42	4.84	1.760	

注) 海土中に設置されていた陽極は C 杭の底 3～8 である。

表において、発生電気量は、アルミニウム陽極の有効電気量を海水中で $0.263 A - Yr / kg$ (効率 80 %)、海底土中 $0.214 A - Yr / kg$ (同 65 %) として計算した。この調査によりつぎのことがわかった。

- i) アルミニウム陽極の消耗度は、防食被覆の有無すなわち防食面積の大きさや防食被覆の種類により異なり、無塗装の E 杭を 100 とした場合にアルミニウム溶射 + タールエポキシ (アルミニウム溶射の $1/2$ の面積が露出) では約 64、無機ジंक + タールエポキシ (無機ジंकの $1/2$ の面積が露出) では約 62 である。
- ii) 無機ジंकを下地とした C 杭よりもアルミ溶射を下地とした D 杭の方が陽極消耗が小さかったのは、無機ジंक塗膜の塗膜としての効果が多少あったことと、アルミ溶射からのタールエポキシ塗膜のはくり傾向が大きく結果的に表面積を大きくしたことの 2 つの原因が考えられる。
- iii) アルミニウム溶射層の存在が陽極の消耗を減ずる効果が予想したより小さかったが、それは、アルミニウム溶射層のアルミニウムの純度が高いため活性化しにくく、従って、有効に作用しなかったためと考えられる。
- iv) 鋼の防食に要するアルミニウムの重量は、効率 100 % とした場合に鋼の腐食量の約 $1/3$ であることがわかっているから、無防食の A 杭における鋼の腐食重量から、電気防食によって失われるアルミニウム陽極の重量すなわちアルミニウム陽極の消耗量を計算してみるとつぎのようである。

平均潮位以下杭頭から 36 m までの平均腐食厚さは 2.75 年で約 0.27 mm であり、電気防食した E 杭における平均腐食厚さはほぼその $1/10$ であるから、正味 0.24 mm が電気防食により防食されたことになる。

すなわち、 $0.024 \text{ cm} \times \pi \times 40 \text{ cm}$ (杭の直径) $\times 3000 \text{ cm}$ (杭の対象部分の長さ) $\times 7.8 \text{ g} / \text{cm}^3$ (鋼の密度) $\approx 67 \text{ kg}$ が鋼の腐食重量である。

しかし、杭はさらにその下方 19 m までであるから、その部分の腐食厚さを測定値より小さいものとして平均 0.04 mm / 年、2.75 で 0.11 mm と仮定して計算すると、 $0.011 \text{ cm} \times \pi \times 40 \text{ cm} \times 1900 \text{ cm} \times 7.8 \text{ g} / \text{cm}^3 \approx 20 \text{ kg}$ となり、結局 $67 \text{ kg} + 20 \text{ kg} = 87 \text{ kg}$ の鋼が無防食の場合に平均潮位以下の部分から失われたことになる。ところで、同一条件にある電気防食を施した E 杭では 35.9 kg のアルミニウム陽極が消耗しているので、その効率を求めてみると、

$87 \text{ kg} / 3 / 35.9 \text{ kg} \times 100 \% \approx 80 \%$ となり、表-9 の計算時の海水中における効率と一致している。

これらのことから、川崎沖においてアルミ陽極を海水中に設置する場合は効率を 80 % として防食設計できることがわかる。

5. 試験結果の総括

この試験により明らかとなった主な事項はつぎのようである。

5.1 鋼管杭の腐食について

大気中から海水中及び海底土中にわたる鋼管杭の腐食は、飛沫帯で最も著しく、ついで海水の比較的表面付近であるが、海水の中間層や一般には腐食の少ない海底土中においてもかなり大きい腐食が認められた。これに対して腐食が小さい部分は平均潮位付近である。これらの腐食傾向は、海底土中における腐食がかなり大きいことや海水の中間層に腐食の大きい部分がある特異点を除けば一般に認められている腐食のパターンから大きくはずれるものではないが、飛沫帯において $0.3 \sim 0.5 \text{ mm/年}$ の腐食は、一般の海域と比較すればかなり大きい値である。

なお、鋼管内面の腐食は予想以上に少なく、問題にしくてもよいと考えられる。

5.2 鋼管杭の防食について

(1) 飛沫帯の防食

飛沫帯の腐食は、海域環境に適性のある無機質シンクリッチペイント+タールエポキシ塗装により十分に防止できるが、耐久性の観点からはできる限り厚膜とする必要があり、無機質シンクリッチペイント、タールエポキシ共に厚塗り型のものを使用すべきであろう。アルミ溶射+タールエポキシは損傷を受けた場合にタールエポキシ塗膜にふくれやはがれの広がる速度が、無機質シンクリッチペイントと比較して大きいので注意が必要である。

なお、飛沫帯の防食に関しては、総合技術開発プロジェクトの海洋構造物における構造材料の防食技術の開発研究が、建設省土木研究所、(財) 国土開発技術研究センター、鋼管杭協会の共同研究により、実施され、防食指針が作成されているので参考にして頂きたい。

(2) 干満帯の防食

干満帯は腐食そのものはそれ程大きくないが、電気防食の効果は十分に及ばない上に、防食被覆の補修が困難な部分である。

試験の結果では、飛沫帯に適性のあった無機質シンクリッチペイント+タールエポキシ塗装でさえ、貝類の付着と波浪の衝撃の交互作用により塗膜ははくりする傾向が明らかに認められ、付着力の強化及び塗膜物性の向上のため、ガラスクロスなどのクロス材を併用する必要が認められた。アルミ溶射+タールエポキシの場合は、タールエポキシ塗膜のふくれやはがれが無機質シンクリッチペイント使用の場合より著しく全く不適であった。

セメントコンクリートライニングは、試験杭を打込んでから3か月ほど経過してから現場で打設したため、H.W.L.付近にひびわれを生じ、杭の引抜き時に落下したが、腐食の防止効果は明ら

かで無防食の場合の1/10程度であり、極めて有効であった。

電気防食の効果は干満帯に対しては十分でないといわれているが、試験の結果からは平均潮位付近及びそれ以下に対して明らかな防食効果が認められた。

(3) 海水中における防食

海水中の部分に対しては電気防食が最も効果があり、無防食の場合の1/10以下に腐食をおえることがわかった。また、塗装と併用すると塗膜の寿命を延長する効果のあることを確認した。

塗装と電気防食を併用した場合は、防食下地にアルミ溶射を用いた場合より無機質ジंकリッチペイントを用いた場合の方が明らかに有効であった。

(4) 海底土中における防食

海底土中においては海水中におけると同様に電気防食が極めて有効であり、川崎沖のような有機物の多い軟質シルト中においても電位を -800 mV (S.C.E) より卑に保持すれば、腐食を無防食の場合の1/10以下にできることがわかった。

5.3 その他

試験杭の厚さ測定等により求めた試験場所における腐食性の大きさと打込んだ試験杭を用いておこなった陰分極試験や仮通電試験の結果及びアルミニウム陽極の消耗度は、いずれも、試験場所の腐食性の強さを示す点で一致しており、このような環境に鋼管杭基礎を建設する場合は、飛沫帯については勿論、海水中及び海底土中におかれる部分に対しても、適切な防食を施す必要性が強く感じられた。

あ と が き

海域環境に構築される鋼構造物に適用する防食技術は、一般鋼構造物の防錆技術の主流である防錆塗装技術などより著しく立ち遅れており、飛沫帯に適用する防食技術にはとりわけ問題が多い。このため、これらの研究は今後も実施していかなければならないと考えている。

謝 辞

本試験の実施にあたり、御協力を頂いた中川防蝕工業株式会社及び日本防蝕工業株式会社ならびに両社の関係者諸氏に深く感謝する次第である。