
第6編 腐食および防食

第 6 編 腐食および防食

第 6 編 腐食および防食	1
6.1 腐食の要因	1
6.1.1 腐食現象と腐食機構	1
6.1.2 環境因子の影響	2
6.1.3 鋼表面のさび層の厚さと板厚減少量の関係	2
6.2 鋼管杭の腐食しろおよび防食法に関する規定	4
6.3 土壌環境における腐食	7
6.3.1 土壌の腐食性	7
6.3.2 腐食調査	10
6.4 海洋環境における腐食	16
6.4.1 海洋環境の腐食性	16
6.4.2 鋼材別の腐食速度調査事例	18
6.5 腐食対策	20
6.5.1 重防食鋼管杭および重防食鋼管矢板	20
6.5.2 電気防食	25
6.5.3 腐食しろ	28
6.5.4 被覆防食法	30

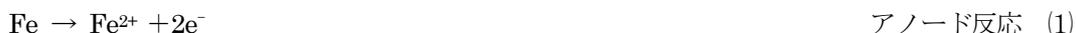
第6編 腐食および防食

6.1 腐食の要因

6.1.1 腐食現象と腐食機構

鋼管杭を取りまく腐食環境は、淡水、海水、大気、土壌などである。これらの環境において pH がほぼ中性な場合、鋼材は水と酸素による電気化学的反応によって腐食が進行する。

鋼材を中性の水溶液に浸すと、その表面には種々の要因によりアノード（陽極）とカソード（陰極）が形成され、局部電池（腐食電池）が生じる。このアノードとカソードの間では電子の授受が行われ、(1)式および(2)式で表される反応が進行する。



(1)式のアノード反応では鉄が溶解し、(2)式のカソード反応では酸素が還元される。これらの反応を統合すると、鋼の腐食反応は(3)式で表される。



(3)式の $\text{Fe}(\text{OH})_2$ は鋼表面に沈澱し、さらに酸化や脱水などの過程を経て、複雑な水和酸化鉄、すなわち「さび」となる。なお、[図 6.1.1](#) にさびの生成過程の模式図を示す。

また、鋼表面に形成されるアノードとカソードの分布には、微細に混在する場合と、ある程度明瞭に区別されたマクロ的集落を形成する場合がある。前者では鋼材は比較的均一に腐食するが、後者では不足が不均一に進行する。腐食電池のアノードとカソードがマクロ的に形成する例としては、異種金属との接触、酸素濃度の差、通気の違いなどが挙げられる。

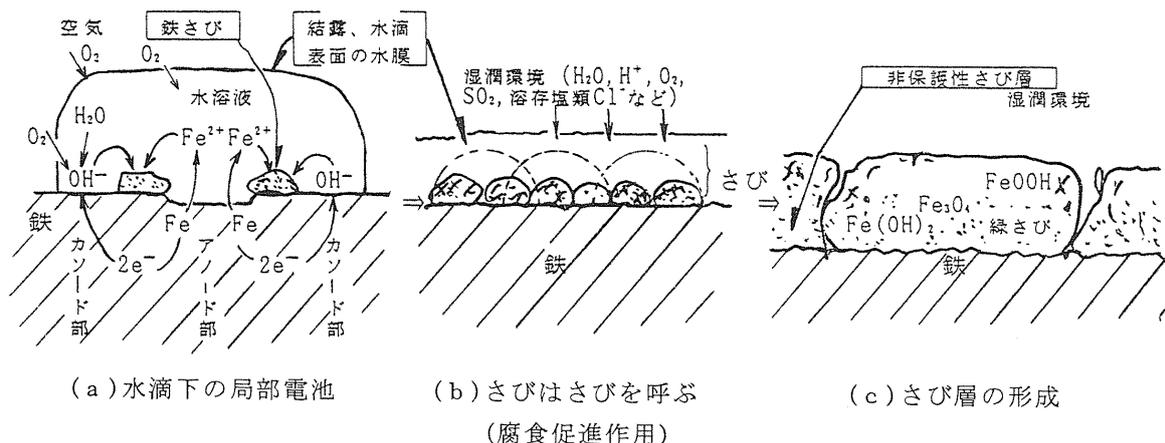


図 6.1.1 さびの生成模式図 (出典 [6-①](#))

6.1.2 環境因子の影響

淡水、海水、大気、土壌などの pH がほぼ中性の環境での腐食速度は、単位時間当たりに鋼表面の到達する酸素の量、すなわち酸素の拡散量によって決まる。腐食速度に影響を及ぼす主な因子としては、水中の溶存酸素濃度、流速または攪拌の程度、温度などが挙げられる。

水中の溶存酸素濃度が高い場合、酸素の拡散量は増加する。また、溶存酸素濃度が同一であっても、流速が増すことで拡散速度が向上し、その結果、鋼表面への酸素到達量が増加する。さらに、温度の上昇も拡散速度を増大させる要因となる。

腐食によって鋼表面に生成されるさびは、ある程度酸素拡散を妨げる障壁として機能し、腐食を抑制する効果を持つ。このさびの保護性は、同一の鋼においても環境によって大きく異なり、水中や土壌中で生成されたさびは保護性が比較的小さいが、大気中で生成されたさびは保護性が高い傾向にある。水の流速がある程度以上に高くなると、鋼表面に生成されたさびが機械的に除去されるようになり、腐食が促進される。特に、海底の流砂など固定物質が含まれる環境では、その影響が顕著である。

水中に食塩など中性塩類が溶けている場合でも、腐食の基本的な機構は原則として変わらない。ただし、塩類の存在は、溶存酸素濃度に影響を与えるほか、鋼表面に生成されるさびの酸素拡散障壁としての機能を低下させる可能性があると考えられる。

6.1.3 鋼表面のさび層の厚さと板厚減少量の関係

腐食によって失われた鉄分のうち、かなりの部分（一般に 1/2 以上）は鋼表面のさび層の形成に用いられ、残りの一部は、いったんさびとして鋼表面に生成された後、浮さびとなって剥離する。別の一部はさびとして残らず、鉄イオンの状態で流出する。これらの鉄分の分配割合は、淡水、海水、大気、土壌などの腐食環境によって異なる。鋼表面のさび層として残存する鉄分の割合は、土壌中では高く、大気中では比較的低くなる傾向があり、水の流動性などによっても変化する。

ここで、腐食によって失われた鉄分がすべて鋼表面のさび層の形成に用いられたと仮定すると、さび層の厚さと板厚減少量の関係は、式(6.1.1)のようになる。

$$y = \frac{D \cdot S \cdot x}{100A} \dots\dots\dots \text{式(6.1.1)}$$

ここに、

y : 鋼材の板厚減少量 (mm)

D : さびの見かけ比重

A : 鉄の比重 (7.85)

x : さび層の厚さ (mm)

S : さび層中の鉄の含有量 (%)

一例として、海洋環境（海上大気～海中部）の鋼管杭のさび層について、某所での測定結果において、 $D = 2.01$ 、 $S = 52.4\%$ を式(6.1.1)に代入して計算すると、

$$y = \frac{2.01 \times 52.4}{100 \times 7.85} x = 0.134x \quad x / y = 7.46$$

となる。すなわち、さび層の厚さは、板厚減少量の約7.5倍となる。

この計算例からも明らかなように、仮に腐食によって失われた鉄分の約半分がさび層の形成に用いられた場合でも、さび層の厚さは板厚減少量よりかなり大きくなる（約3～4倍）。

したがって、さび層の厚さ＝板厚減少量と誤って速断しないよう、留意する必要がある。

さび層の厚さと板厚減少量の関係を、模式的に[図6.1.2](#)に示す。

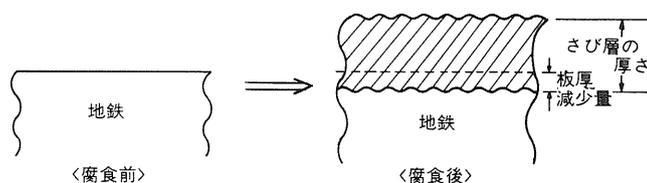


図 6.1.2 さび層の厚さと板厚減少量の関係

6.2 鋼管杭の腐食しろおよび防食法に関する規定

腐食しろによる設計方法は、構造物の耐用年数期間中に鋼材の腐食量に見合った肉厚を、あらかじめ腐食しろとして見込む方法であり、土木、建築の分野では一般的に採用されている。

この方法は、土中のように腐食が比較的均一で、腐食速度が小さい環境においては適しているが、海上、海中のように腐食速度が大きく、予測が困難な環境や、飛沫帯・干満帯などの集中腐食が発生しやすい環境では適していない。

土木、建築、港湾、漁港および河川の各分野における鋼管杭の腐食しろおよび防食法に関する規定を、[表 6.2.1](#)に示す。

(公社)日本港湾協会「港湾の施設の技術上の基準・同解説」(平成30年5月)では、腐食しろによる方法は、原則として認めていない。一方、水産庁が公開している「漁港・漁場の施設の設計参考図書(2023年版)」では、腐食しろによる設計が認められている。しかし、漁港鋼構造物も港湾施設同様に腐食速度は大きく、集中腐食の発生も懸念される。(一財)沿岸技術研究センター「港湾鋼構造物 防食・補修マニュアル(2022年版)」では、鋼部材に著しい腐食が生じている事例の多くが、腐食しろ設計によるものであるとされており、腐食しろを採用する場合には十分な検討が必要である。

これに対して建築・土木分野では、腐食調査の蓄積から、防食措置をとらない場合の腐食しろは、特殊環境を除いて外面1mm(耐用年数100年)へと移行している。

例えば土木分野では、平成8年12月の(公社)日本道路協会「道路橋示方書・同解説 IV下部構造編」の改訂時において、海水や鋼の腐食を促進させるような有害な工場排水などの影響を受けない場合で、腐食調査を行わず、また防食処理を施さない場合には、常時水中および土中にある部分(地下水にある部分を含む)について、従来の2mmから1mmに変更された。同様に(公財)鉄道総合研究所「鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物・抗土圧構造物」においても、平成9年3月の改定時に従来の2mmから1mmに変更されている。

また、建築分野では、昭和63年1月の(一社)日本建築学会「建築基礎構造設計指針」の改定時において、温泉地や薬品工場跡地などの酸性の強い特殊な地盤条件を除き、腐食しろは2mmから1mmへと変更された。公的な技術基準については、平成13年7月2日に公布された国土交通省告示第1113号「地盤の許容応力度及び基礎ぐいの許容支持力を求めるための地盤調査の方法並びにその結果に基づき地盤の許容応力度及び基礎ぐいの許容支持力を定める方法を定める件」において、腐食しろは外面1mm、内面0.5mmから外面1mmへと変更されている。

表 6. 2. 1 (1) 鋼管杭の腐食しるおよび防食法に関する規定

区別	基準名称	腐食しる	備考(防食法)
土 木 関 係	道路橋示方書・同解説IV 下部構造編 (令和7年10月) (公社)日本道路協会	杭が土又は水に接する外面について考慮することを標準とする。 海水や鋼の腐食を促進させる工場排水等の影響を受けない場合で、腐食性調査も行わず、また、防食処理も施さないときは、常時水中及び土中にある部分(地下水中にある部分を含む)について、一般に1mmの腐食しるを考慮するのがよい。鋼管ソイルセメント杭の場合は、鋼管がソイルセメント柱に埋め込まれるため防食は良好と考えてよいが、前述同様に1mmの腐食しるを考慮するのがよい。	海水、鋼の腐食を促進させる工場排水の影響を受ける部分、及び、常時乾湿を繰り返す部分は、十分な防食処理を行う必要がある。
	鉄道構造物等設計標準 ・同解説 基礎構造物 (平成24年1月) (公財)鉄道総合技術研究所	鋼管杭の腐食代は、海水や有害な工場排水および電食などの影響を受けない場合(一般的な環境)で、腐食調査を行わず、また防食処理を施さない場合には、常時水中および土中にある部分(地下水中にある部分を含む)について一般には外周面に1mm考慮するのがよい。	海水や有害な工場排水および電食等の影響を受ける部分、常時乾湿を繰り返す部分で腐食が著しいと考えられる場合(腐食環境下)には、腐食代を大きくとるだけでなく適切な防食処理を施すことが望ましい。
	下水道施設耐震計算例 —処理場・ポンプ場編— 2015年版 (2015年6月) (地共)日本下水道事業団	鋼管杭の腐食減厚は1mmとし、杭が土又は水に接する面について考慮する。ただし、鋼管の内面については考慮しなくてもよい。	
	土地改良事業計画設計 基準及び運用・解説 設計「頭首工」 (令和6年3月) (農林水産省 農村振興局)	土地改良事業計画設計基準及び運用・解説 設計「ポンプ場」など関連する技術基準を参考する。	【設計基準 設計「ポンプ場」】 鋼管杭の腐食減厚は杭が土又は水に接する面について考慮するものとする。ただし、鋼管の内面については考慮しなくてもよい。 [参考] 鋼管杭の腐食減厚は、海水や鋼の腐食を促進させる工場排水等の影響を受けない場合で、腐食調査も行わず、また、腐食処理も施さないときは、常時水中及び地中にある部分(地下水中にある部分も含む)について、一般に1mmの腐食代を考慮するのがよい。
建 築 関 係	国土交通省告示 第1113号 第八八 (平成13年7月)	腐食しる(有効な防食措置を行う場合を除き、1mm以上とする。)	電気防食
	建築基礎構造設計指針 (2019年) (一社)日本建築学会	鋼管杭の腐食しるについては、通常土壌での施工において、外面に防食処理を施さない場合には鋼管杭の外面から1mmを見込む。	鋼管杭の外面に防食処理を施す場合には、腐食しるは見込まなくともよい。 亜硫酸ガスや硫化水素等を多く含有する酸性土壌等の特殊地盤での施工においては、その影響を十分に検討し、必要な腐食しるを見込むものとする。
	建築構造設計指針 (2019年) (東京都)	「鋼管ぐいのくい材から定まる許容耐力」として、腐食しる外側1mm、内側0mmの例を載せている。	

表 6.2.1(2) 鋼管杭の腐食しるおよび防食法に関する規定

区別	基準名称	腐食しる	備考(防食法)																						
港 湾 ・ 漁 港 関 係	港湾の施設の技術上の基準・同解説 (平成30年5月) (公社)日本港湾協会	干満帯および海中部においては、腐食環境条件によっては集中腐食等の著しい腐食が生じるおそれがあるため、腐食しるによる防食は行わないものとする。ただし、仮設構造物の場合は腐食しるによる防食の考え方を適用してもよい。鋼材の腐食速度は、一般に既設鋼構造物の調査結果等を基に取りまとめた「鋼材の腐食速度の標準値」を参照することができる。本数値は片面の腐食速度であるので鋼材の両面の状況を考慮し、両面の数値を合わせて使用する。なお、集中腐食の腐食速度は本数値を大きく上回るので、表の値は適用できない。 鋼材の腐食速度の標準値(mm/年) <table border="1" style="margin-left: 20px;"> <thead> <tr> <th colspan="2">腐食環境</th> <th>腐食速度</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="4">海側</td> <td>H.W.L.以上</td> <td>0.3</td> </tr> <tr> <td>H.W.L.~L.W.L.-1m まで</td> <td>0.1~0.3</td> </tr> <tr> <td>L.W.L.-1m~海底部</td> <td>0.1~0.2</td> </tr> <tr> <td>海底泥層中</td> <td>0.03</td> </tr> <tr> <td rowspan="3">陸側</td> <td>陸上大気中</td> <td>0.1</td> </tr> <tr> <td>土中(残留水位以上)</td> <td>0.03</td> </tr> <tr> <td>土中(残留水位以下)</td> <td>0.02</td> </tr> </tbody> </table>	腐食環境		腐食速度	海側	H.W.L.以上	0.3	H.W.L.~L.W.L.-1m まで	0.1~0.3	L.W.L.-1m~海底部	0.1~0.2	海底泥層中	0.03	陸側	陸上大気中	0.1	土中(残留水位以上)	0.03	土中(残留水位以下)	0.02	1.3.5 鋼材の防食設計 (1) 一般 鋼材の防食対策は、鋼材が存する自然状況に応じて、電気防食工法又は塗覆装工法その他の防食工法によって適切に行なうものとする。この場合において、平均干潮面以下の部分にあつては、電気防食工法、朔望平均干潮面(L.W.L.)以下1m よりも上の部分においては、塗覆装工法によって防食対策を講ずることを標準とする。 (3) 電気防食工法 電気防食工法の適用範囲は、平均干潮面(M.L.W.L.)以下とする。 (4) 塗覆装工法 一般に、朔望平均干潮面以下1m 以上の部位は被覆防食工法を併用する。 (1) 塗装 (2) 有機被覆 (a) 重防食被覆(ウレタンエラストマー被覆、ポリエチレン被覆) (b) 超厚膜形被覆 (c) 水中硬化形被覆 (3) ペトロラタム被覆 (4) 無機被覆 (5) 金属被覆			
	腐食環境		腐食速度																						
海側	H.W.L.以上	0.3																							
	H.W.L.~L.W.L.-1m まで	0.1~0.3																							
	L.W.L.-1m~海底部	0.1~0.2																							
	海底泥層中	0.03																							
陸側	陸上大気中	0.1																							
	土中(残留水位以上)	0.03																							
	土中(残留水位以下)	0.02																							
漁港・漁場の施設の設計参考図書 (2023年版) (水産庁)	水面下にある漁場の施設の防食については、維持補修の難しさを考慮し、原則として腐食代付与による方法とするのがよい。また、構造物の背面土中部は、海側に比較して通常腐食速度が小さいことや、極端な集中腐食を生じないこと等から、腐食代付与による方法を原則とする。 鋼材の平均腐食速度(片面) <table border="1" style="margin-left: 20px;"> <thead> <tr> <th colspan="2">腐食環境</th> <th>腐食速度(mm/年)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="6">海側</td> <td>H.W.L.以上</td> <td>0.3</td> </tr> <tr> <td>H.W.L.~L.W.L.-1m</td> <td>0.1~0.3</td> </tr> <tr> <td>L.W.L.-1m~水深20m</td> <td>0.1~0.2</td> </tr> <tr> <td>水深20~50m</td> <td>0.06</td> </tr> <tr> <td>水深50m 以上深</td> <td>0.045</td> </tr> <tr> <td>海底泥層中</td> <td>0.03</td> </tr> <tr> <td rowspan="3">陸側</td> <td>陸上大気中</td> <td>0.1</td> </tr> <tr> <td>土中(残留水位上)</td> <td>0.03</td> </tr> <tr> <td>土中(残留水位下)</td> <td>0.02</td> </tr> </tbody> </table>	腐食環境		腐食速度(mm/年)	海側	H.W.L.以上	0.3	H.W.L.~L.W.L.-1m	0.1~0.3	L.W.L.-1m~水深20m	0.1~0.2	水深20~50m	0.06	水深50m 以上深	0.045	海底泥層中	0.03	陸側	陸上大気中	0.1	土中(残留水位上)	0.03	土中(残留水位下)	0.02	漁港の施設については、平均干潮面付近で集中腐食が生じるおそれがあることから、平均干潮面(M.L.W.L.)よりも下の部分の海中部及び海底土中部においては電気防食工法、「朔望平均干潮面(L.W.L.)以下1m」よりも上の部分においては被覆防食工法によることが望ましい。
腐食環境		腐食速度(mm/年)																							
海側	H.W.L.以上	0.3																							
	H.W.L.~L.W.L.-1m	0.1~0.3																							
	L.W.L.-1m~水深20m	0.1~0.2																							
	水深20~50m	0.06																							
	水深50m 以上深	0.045																							
	海底泥層中	0.03																							
陸側	陸上大気中	0.1																							
	土中(残留水位上)	0.03																							
	土中(残留水位下)	0.02																							
河 川 関 係	建設省事務連絡 (昭和54年4月10日) 護岸用鋼矢板の選定について	表裏合わせて2mm。ただし、特に腐食が著しいと判断された場合は現地に適合した腐食しるを見込む。																							
	災害復旧工事の設計要領 (平成14年) (社)全国防災協会	片側1mm(両面で2mm)を考慮する。																							

6.3 土壌環境における腐食

6.3.1 土壌の腐食性

土壌環境は、海洋や河川と異なり、種々の条件にさらされている。その要因としては、①土壌の攪乱による均一性の喪失、②地下水の有無、③構造物との接触（例：フーチングの鉄筋との導通）、④土壌の種類の違い等が挙げられる。このような要因がマクロセル（自然界において相対的に電位の高い部分と低い部分が形成する電池）を形成し、局部腐食が生じやすい環境を作り出す。

しかしながら、鋼管杭は土壌の攪乱が少なく、垂直に打設されるため、鋼管杭の表面には比較的均一に土壌が接触する。このため、埋設配管の場合とは異なり、[図 6.3.1](#)に示すようにマクロセル電流の流出が均一となり、局所的な腐食が生じにくい。以下では、一般的な腐食速度と土壌中の各種腐食因子の影響について、腐食調査結果に基づいて述べる。

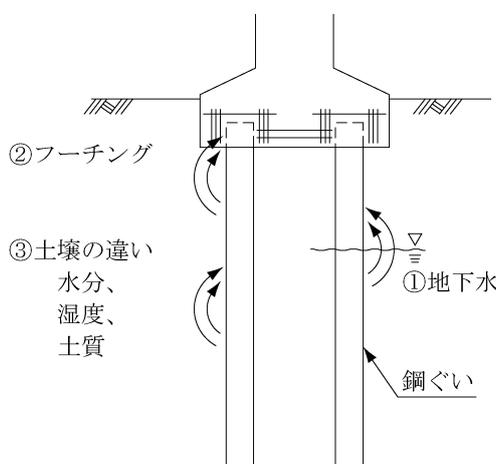


図 6.3.1 土中のマクロセルの考え方

1. 土中での一般の平均腐食減量

全国 20 箇所における鋼管杭、等辺山形鋼および鋼矢板の土中腐食試験の結果から求めた片面の平均腐食量の経年変化を[図 6.3.2](#)に示す。この腐食試験では、外観観察により鋼材表面にさびが土砂とともに固着していることが確認されており、大気中の腐食と同様に、さびによる遮蔽効果が働くことで、経過年数とともに腐食速度が低下すると考えられる。この場合の平均腐食減量の経年変化は、以下の式 (6.3.1)で表される。

$$Y = BX^A \quad \text{式 (6.3.1)}$$

ここに、

Y: 平均腐食減量 (mm)

X: 暴露期間 (年)

A, B: 定数

[図 6.3.2](#)に示す全データの最小二乗法を適用した結果、定数 A 値の値は 0.671 となり、米国の国立標準技術研究所 (National Institute of Standards and Technology, NIST) が提唱する値(0.57)より若干大きい値を示した (防錆防食技術総覧編集委員会：防錆防食技術総覧, P. 135~138, 2000 年)。また、データのばらつきを考慮した場合、平均腐食減量は概ね $\pm 2\sigma$ の範囲に収まり、その場合の定数 B 値の値は 0.0415 であった。これらの値を式 (6.3.1)に代入して、100 年後の土中の鋼材腐食減量 (片面) を予測すると約 1mm 程度となる。

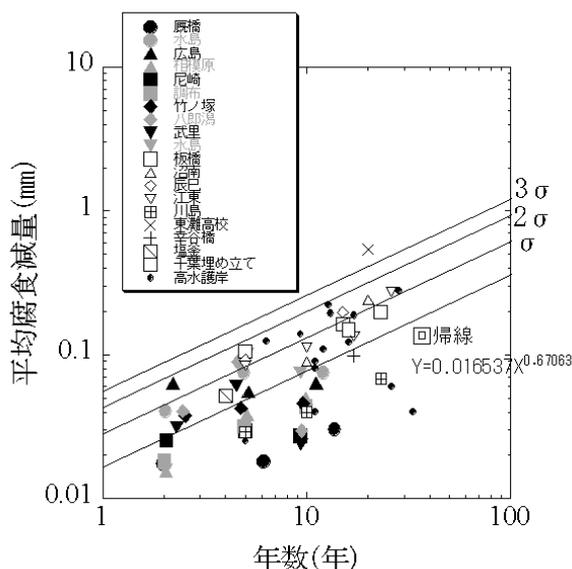


図 6.3.2 土中での腐食減量の経年変化（出典 6-②）

2. 土壌中の酸素

6.1.2 で述べたように、酸性の強い土壌を除けば、通常の土壌における腐食速度は、単位時間当りに鋼表面へ到達する酸素の量によって決まる。

したがって、酸素の乏しい環境では腐食速度は低下する。ただし、後述する硫酸塩還元バクテリアの繁殖する場合には、酸素が存在しなくても、バクテリアの作用により腐食が激しく進行することがある。

土壌中の酸素は、地表から浸透してくる空気由来のもので、雨水や地下水に含まれる溶存酸素によるものがある。一般的には、土壌の空気透過性と酸素吸着性に左右される。酸素の含有量は、深部に行くほど大幅に減少する傾向がある。

3. 土壌の pH

水の酸性が強くと、pH が低い場合には腐食速度が増大する。鋼材の場合、pH4 程度以下の強い無機酸と接触すると、水素が発生し激しい腐食が生じる。炭酸の場合には、この限界 pH は 5 程度とされている。また、土壌中にフミン酸などの有機酸が多量に含まれる場合には、pH 値が中性に近くても腐食が激しくなる傾向がある。したがって、土壌の腐食性を評価する際には、土壌から浸出した水の pH だけでなく、酸の種類や含有量も重要な検討要素となる。

鋼材の腐食速度は、pH6.5 以上の中性またはアルカリ性の土壌の場合では、pH よりも土壌の比抵抗（土壌中で電流が流れにくい性質）に大きく左右される。一方、酸性土壌では、比抵抗よりも pH の影響が支配的となる。

4. 土壌中の微生物による腐食

微生物は、多種多様な物質の合成や分解を繰り返し、周囲の環境に影響を与えている。その中には、金属の腐食に関与するものも存在する。これらの微生物は、金属を直接摂取するのではなく、繁殖活動を通じて周囲の環境を変化させ、金属が腐食しやすい条件を作り出すことで腐食反応を促進させる。表 6.3.1 に土壌

腐食に関係するバクテリアの種類を示す。微生物腐食の中でも特に影響が大きいのが硫酸塩還元バクテリアである。このバクテリアは、有機物中の水素を酸化することでエネルギーを得て、その過程で硫化水素を生成する。この硫化水素が鋼材の腐食を促進する要因となる。海水中の腐食において、海底近傍で腐食量が大い場合は、ヘドロ中に生息する硫酸塩還元バクテリアの影響を受けていることが多い。腐食生成物が黒色であり、腐卵臭が感じられる場合は、硫酸塩還元菌による腐食である可能性が高い。表 6.3.2 に硫酸塩還元バクテリアによる腐食の傾向を示す。

表 6.3.1 土壤腐食に関係するバクテリア種 (出典 6-③)

微生物	硫酸塩還元菌 SRB	メタン生成菌 MPB	鉄酸化細菌 IOB	イオウ酸化細菌 SOB	鉄細菌 IB
分類	嫌気性菌		好気性菌		
生息環境	嫌気性の粘土、埋立地、ヘドロ、さびこぶの中で繁殖しやすい。		好気性の硫酸酸性の環境で繁殖しやすい。	好気性の土壌、油田、イオウ鉱床、汚水などの中で繁殖しやすい。	主として Fe、Mn などを含んだ井水、泉水、湧き水等の地下水に多く繁殖する。
至適 pH	5.0~9.5	中性域	2.0~2.5	2.0~3.5	6~8
栄養物	SO ₄ ²⁻ 乳酸等	酢酸等	Fe ²⁺	S、FeS	Fe ²⁺ 、Mn ²⁺ HCO ₃ ⁻ 、CO ₃ ²⁻
生物活動	SO ₄ ²⁻ をS ²⁻ に還元する。	メタンを生成する。	Fe ²⁺ をFe ³⁺ に酸化する。生成する硫酸鉄は加水分解され硫酸を生成する。	イオウあるいは硫酸鉄を硫酸にする。	水酸化鉄を溶存酸素により酸化し、FeOOH、Fe ₃ O ₄ 等を沈澱させさびこぶを形成する。

表 6.3.2 酸化還元電位と硫酸塩還元バクテリア腐食の傾向 (出典 6-④)

酸化還元電位 (SHE)	腐食の傾向
<100mV	強い
100~200	中程度
200~400	弱い
>400	殆どない

5. 土壤中の成分

腐食を促進する因子として、前述の酸素、酸、バクテリアに次いで炭酸ガスの影響も大きく、腐食を著しく促進する場合がある。また、火山・温泉地帯で噴出する亜硫酸ガスや硫化水素も腐食を促進する要因となる。有機物の腐敗によって生じるアンモニアなども腐食促進因子の一つである。特に硫化水素は、鋼表面に硫化物を生成し、局部電池を形成することで腐食を促進する。

土壤中に多く含まれている塩化物および硫酸塩は、一般に腐食を促進する。特に塩素イオンは、さびの保護性を低下させるため、有害である。硫酸イオンも塩素イオンに次いで有害である。一方、硝酸塩・亜硝酸塩は、硫酸イオンに比べて腐食への影響は比較的軽微である。

りん酸イオン、けい酸イオン、炭酸イオンは、一般に腐食を抑制する傾向があり、また、遊離アルカリ (OH⁻) の存在も腐食を抑制する。鉱山の廃滓 (cinder) や石炭殻、工場廃棄物などで埋立てた土地には、硫化物や無機酸や重金属などの有害物質が多量に含んでいることが多く、一般に強い腐食性を示す傾向がある。

6. 迷走電流による腐食

迷走電流とは、正規の回路より外れて流れる電流のことであり、主に電鉄レール (直流)、接地された直流電源、直流溶接機などから発生する。これらの直流発生源から大地に流出した電流が、近傍に埋設された鋼管などの金属体に流入し、金属体を通して別の場所から大地に流出する際、電流が流出する部位の金属体が腐食される。これが迷走電流による腐食で、一般に電食と呼ばれる。

この腐食は、埋設パイプラインのように水平方向に長く延びている構造物で発生しやすい。一方、鋼管杭の場合は管軸が地盤に対して鉛直方向であるため、迷走電流の流入・流出が起こりにくい。したがって鋼管杭において迷走電流による腐食が発生する可能性は極めて低い。

6.3.2 腐食調査

1. 建設省土木研究所による腐食調査

建設省土木研究所 (現：独立行政法人土木研究所) では、関東地方建設局 (現：関東地方整備局) の協力を得て、設置後 17 年を経過した鋼管杭を引き抜き、腐食状況を調査した。調査結果の概要を示す。

(1) 調査対象

幸谷橋 パイルベント式橋脚 施工：昭和 33 年 10 月～11 月

鋼管杭寸法：φ 486mm、t16mm、t9mm

(2) 土質

鋼管杭が、設置されていた箇所^①の土質性状図を [図 6.3.3](#) に示す。

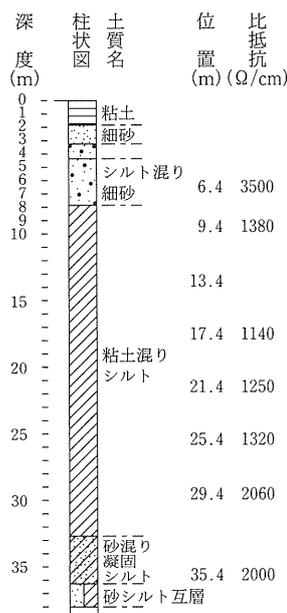


図 6.3.3 土質柱状図 (出典 [6-⑤](#))

(3) 調査結果

調査結果を表 6.3.3 に示す。表から土壌中における腐食速度の総平均値は 0.007mm/yr であること、腐食速度は、地盤の表層部の方が深層部よりも明らかに大きいこと、同じ表層部でも土質の違いによって腐食速度に差があり、細砂よりもシルト混り細砂の方が腐食速度は大きいことなどがわかる。ただし、腐食速度そのものは、最も大きい部分でも平均 0.024mm/yr と小さい。

表 6.3.3 調査結果（出典 6-⑤）

深 さ (m)	土 質 等	表面 状態	初期推定 平均肉厚 (mm)	実測肉厚 (mm)		腐食速度 (mm/yr)		外 観
				最小値	平均値	最大値	平均値	
-0.3~0.0	大 気 中	塗装	15.81	14.04	15.61	0.104	0.024	塗膜劣化部分の腐食著しい。
0.0~0.2	土 中	〃	15.81	15.26	15.76	0.032	0.003	部分的に腐食が認められる程度。
0.2~0.9	細 砂	裸	15.81	15.14	15.65	0.039	0.009	全体的に腐食している他、局部腐食もある。
1.7~2.5	シルト混り 細 砂	〃	15.81	14.76	15.41	0.062	0.024	全体的に腐食している他、局部腐食も多い。
5.2~6.1	粘 土 混り シ ル ト	〃	15.42	15.28	15.39	0.008	0.002	ほとんど腐食が認められない。
10.2~11.1	〃	〃	9.02	8.90	8.99	0.007	0.002	〃
17.2~18.1	〃	〃	9.21	8.86	9.15	0.021	0.004	〃
24.2~25.1	〃	〃	8.74	8.61	8.73	0.008	0.001	〃
28.2~29.1	〃	〃	8.74	8.21	8.70	0.031	0.002	〃
35.2~36.1	細 砂	〃	9.57	9.38	9.52	0.011	0.003	〃

2. 土質工学会・鋼材倶楽部による腐食調査

(1) 腐食試験条件および試験結果

土質工学会（現：地盤工学会）と鋼材倶楽部（現：日本鉄鋼連盟）は共同で、広範囲にわたる様々な土質条件下における鋼杭の腐食挙動を調査するために、1962年から1966年の間に、国内10カ所において腐食試験を実施した。試験では、L型断面、長さ約15mのアンクル材（SS400）を鋼杭と見立て、合計126本を設置した。各地点における地盤の状況、主に調査対象とした腐食要因、および試験材の設置本数は、表 6.3.4 のとおりである。

表 6.3.4 腐食試験条件および試験結果（10年目）（出典 6—⑥）

試験材設置場所	地盤状況	調査対象	試験材本数	平均腐食速度 (mm/yr、両面)
東京電力北電力所厩橋変電所（東京）	沖積シルト	普通鋼の腐食	9	0.0045
川崎製鉄水島製鉄所（岡山）	海面埋立て造成地	普通鋼の腐食 含銅鋼の腐食 外部電源法による電気防食の効果	12	0.0114
広島大学工学部（広島）	砂・シルト層の2層地盤	普通鋼の腐食	10	0.0116
新日本製鉄相模原研究所（神奈川）	関東ローム層	普通鋼の腐食	9	0.0112
関西電力尼崎第三火力発電所（兵庫）	海岸埋立て造成地	普通鋼の腐食 耐候性鋼の腐食 溶接部の腐食 迷走電流の影響	15	0.0083
鹿島建設技術研究所（東京）	砂れき層	普通鋼の腐食	9	0.0093
日本住宅公団竹之塚職員宿舎（東京）	軟弱な砂・粘土の互層	普通鋼の腐食 電車軌道からの迷走電流の影響 塗装による防食効果	12	0.0148
農林省八郎潟干拓地（秋田）	シルト層干拓地	普通鋼の腐食	9	0.0094
日本住宅地公団武里団地（埼玉）	砂層・シルト層	普通鋼の腐食 鋼管杭内面の腐食	11	0.0061
川崎製鉄水島製鉄所（岡山）	海面埋立て造成地	普通鋼の腐食 コンクリートフーチング内の鉄筋の影響 流電陽極法による電気防食の効果	30	0.0127
合計			126	平均 0.0106

これらの試験材は、設置後ほぼ2年目（1回目）、5年目（2回目）および10年目（3回目）に、それぞれ設置本数の1/3ずつを引き抜き、腐食状況の観察と板厚減少量の測定を行った。

得られた結果のうち、主なものは次のとおりである。

- ① ごく地表面に近い部分をのぞき、10年目の試験材でも多くの場合、設置時とほぼ同様の表面状況を保っていた。
- ② 各地点における平均腐食速度（両面、10年目）は表 6.3.4 に示すとおりであり、全地点の腐食速度（両面、10年目）の総平均値は、0.0106mm/yrであった（片面換算では0.0053mm/yr）。また、全試験材の中で最も腐食速度が大きかったものは0.0297mm/yr（両面、10年目）であった。
- ③ 腐食速度は、設置後の経過年数が長くなるにつれて減少する傾向が確認された（図 6.3.4）。
- ④ 以上の結果から、設計用の腐食速度としては0.02mm/yr（両面）程度の値が推奨される。

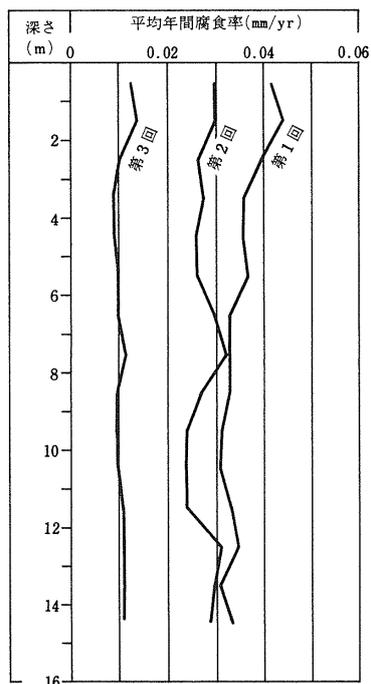


図 6.3.4 各引抜き時 (2、5、10 年目) の平均腐食速度 (両面) (出典 6-⑥)

(2) 土壌の各種因子と腐食速度との関係

(1)の結果に加え、土壌の各種因子と腐食速度との関係を検討した結果は以下のとおりである。

① 地表面からの深さ

地表面から約 3mまでの深さでは、それ以深の部分に比べて腐食速度はやや大きい。この傾向は、地表面からの空気の浸透による影響と推定される。深さ 3m以深では、腐食速度と深さの間に明確な関係は認められない。

② 土質

粘土からシルト、砂、砂れきに至る広範な範囲の土質・透水性についても、腐食速度との間に明確な関係は認められない。

③ 地層境界

土質が急激に変化する地層境界付近においても、腐食速度が他の部分に比べて特に大きくなる傾向は見られない。

④ 標準貫入試験の N 値

N 値の腐食速度との間には、粘性土、非粘性土を問わず、明確な相関関係は認められない。

⑤ pH

間隙水の pH が低下すると腐食速度がわずかに増加する傾向はあるが、その影響は顕著ではない。

⑥ 復極率

地下水中の溶存酸素量を示す復極率と腐食速度との間に、一定の関係は見当らない。

⑦ 比抵抗

従来より、比抵抗が小さいほど腐食速度は増大し、その影響は大きいとされてきたが、本試験では、比抵抗と腐食速度との間に明確な相関関係は認められなかった。

⑧ 迷走電流

直流電車軌条の至近距離では、軌条からの迷走電流により腐食速度は若干増加すると考えておくのが安全である。

⑨ コロージョンサウンドによる推定腐食速度

コロージョンサウンドにより測定した復極率および比抵抗から推定された腐食速度と、実測された腐食速度との間に明確な相関関係は認められなかった。

⑩ 上述のように、従来から土壌中の腐食に影響を与えられてきた各種環境因子と、実測された腐食速度との間には、いずれも明確な相関関係は見出されなかった。したがって、本試験からは、土壌の腐食性を評価するための有効な調査方法を特定することはできなかった。

3. 鋼管杭協会（現 鋼管杭・鋼矢板技術協会）による腐食調査

(1) 調査対象

宮城県塩釜市貞山埠頭現用構造物鋼管杭基礎

鋼管杭寸法：φ508mm、t9.5mm、杭長7～11m、打設後4年経過

(2) 土質

土質は、地表面から深さ3mまでが埋立土層、約3～8mがシルト層、それ以深が支持層である泥岩の基盤である。

(3) 調査方法および調査結果

鋼管杭3本を露出させ、フーチング底面から約10～20cm下の杭頭付近（深さ2.3m地点）から約60×110mmの試験片を切り取った。

試験片の切取りに先立ち、対象部位の周辺のさびをタガネ、ブラシで除去し、超音波厚さ計を用いて肉厚を測定した。測定した位置および測定結果を、[図6.3.5](#)、[図6.3.6](#)に示す。No.1杭の測定肉厚は9.3mm、9.4mmの部分が多く、当初の公称肉厚9.5mmより若干減少しているが、No.2、No.3杭では、当初の公称肉厚と一致しており、腐食による減少は認められなかった。

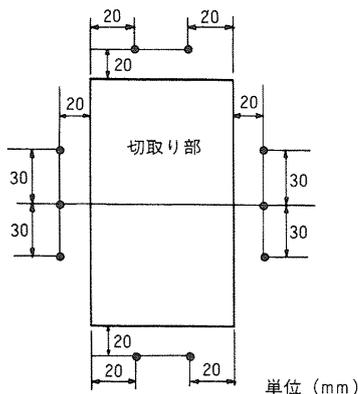


図 6.3.5 肉厚測定位置（出典 [6-⑦](#)）

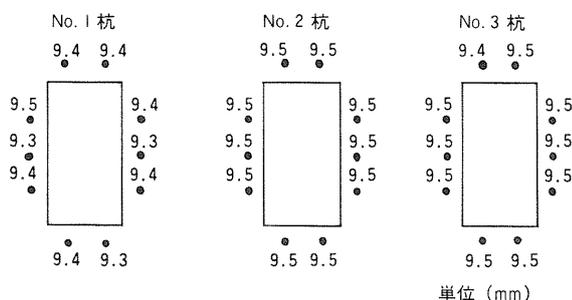


図 6.3.6 肉厚測定結果（出典 [6-⑦](#)）

切り取った試験片は50×100mmに仕上げた後、アルカリ液による除錆処理を施し、目視検査を行なった。

試験片表面（鋼管外面）には凹凸状の腐食の進行が見られた。一方、試験片裏面（鋼管内面）には、ほとんど腐食の進行は見られなかった。方眼形に45点（5×9）の測定点を取り、各点につき3回ずつマイクロメ

一タによる肉厚測定を実施した。その結果から平均肉厚減少量を求めると、 0.052mm であった。初期肉厚には公称肉厚 (9.5mm) を使用した。これから平均腐食速度 (両面) を求めると、 0.013mm/yr となった。

6.4 海洋環境における腐食

6.4.1 海洋環境の腐食性

1. 腐食環境区分

鋼材の腐食傾向に基づき、海洋環境における腐食環境は、海上大気中、飛沫帯、干満帯、海水中、海底土中部と背面土中部の6種類に区分できる。一般に、鋼管杭は海上大気部から海底土中部までの5種類の腐食環境に、また、鋼管矢板はそれらに背面土中部を加えた6種類の腐食環境にまたがって設置される。

これらの6種類の海洋環境の特徴を[表 6.4.1](#)に示す。

表 6.4.1 代表的な腐食環境の特徴（出典 [6-⑧](#)）

環 境	環 境 の 特 徴	腐 食 特 性
海上大気中	風が微細な海塩粒子を運ぶ。海面からの距離により環境の腐食性は変化する。風速、風向き、降雨、気温、日射量、埃、季節、汚染などの腐食因子が影響する。	日陰で降雨洗浄されない部位は、湿潤、高付着塩分となり、腐食速度が大きい。
飛沫帯	鋼材表面は、十分に酸素を含む薄い水膜で濡れている。生物付着はない。	腐食速度は、最も大きい。
干満帯	海水の潮汐により乾湿が繰り返される。	干満帯から海水中に連続している構造物では、M.S.L.付近がマクロセルのカソードとして作用する。塗膜の損傷部での腐食速度は大きい。
海水中	生物付着、流速などが腐食因子として作用する。	干満帯から海水中に連続している構造物では、M.L.W.L.直下付近がマクロセルのアノードとして作用し、腐食速度が大きい。
海底土中部	硫酸塩還元バクテリアなどが存在することもある。	硫化物は、鋼材の腐食や電気防食特性に影響を及ぼす。
背面土中部	残留水位より上では一般陸上の土壌環境とほぼ同じ。	一般陸上の土壌環境に類似している。
	残留水位より下では海底土中部とほぼ同じ。	海底土中部に類似している。

[図 6.4.1](#)に海洋環境における腐食試験結果の一例を示す。試験では、長尺試験片と小形試験片を海洋環境に設置し、腐食量の調査を行っている。

一般に、海洋環境に設置された鋼管杭は、長尺試験片と同様の腐食環境にさらされる。このように、干満帯から海水中まで連続して鋼材が設置されている場合には、干満帯とその直下との間にマクロな酸素濃淡電池が形成されることで、干満帯の腐食速度は抑制される傾向がある。

一方、小形試験片が干満帯に設置され、潮の浸漬と水面上露出を周期的に繰り返し受ける場合には、酸素濃淡によるマクロセルが形成されずに、飛沫帯と同程度の腐食速度を示す。

塗装鋼管杭あるいは有機被覆鋼管杭では、被覆層の高い電気抵抗により酸素濃淡によるマクロセルが形成されない。そのため、干満帯において被覆に損傷が生じた場合、損傷部で露出した鋼材は、小型試験片と同様の腐食傾向を示す可能性がある。

背面土中部における鋼の腐食に関する報告はほとんど存在しない。一般的には、腐食速度は極めて小さいと考えられており、この環境に設置されているタイロッドに関して、腐食損傷の報告はない。

背面土中部の腐食性については、[6.3 土壌環境における腐食](#)の項の内容が適用できる。

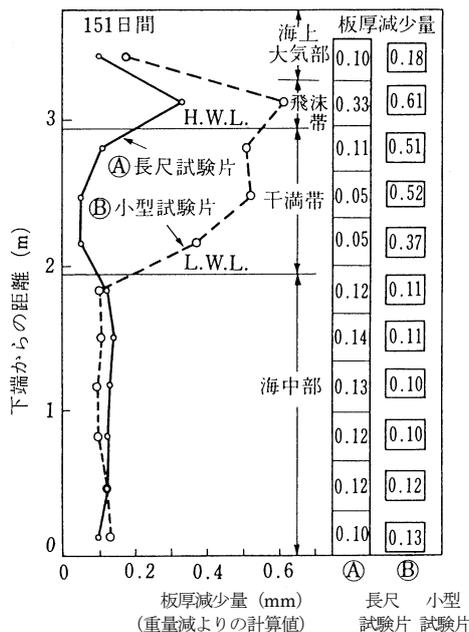


図 6.4.1 海洋環境における鋼材の腐食試験結果の一例 (出典 6-④)

2. 集中腐食

表 6.4.1 に示すように、海洋環境に設置された港湾鋼構造物において、腐食速度が最も大きい環境は、一般に飛沫帯である。しかし、構造物の設置環境や形状などによっては、M.L.W.L. (平均干潮面) 直下部分に著しい局部腐食が発生する場合があります、これをとくに「集中腐食」と呼ぶ。

港湾鋼構造物では、飛沫帯がコンクリートコーピングなどで被覆される場合が多いので、M.L.W.L.直下の集中腐食に注意する必要がある。

例えば、鋼矢板における集中腐食発生パターンは、図 6.4.2 に示す 5 種類の板厚減少プロフィールのうち (a)、(b)、(e) が該当する。

鋼管杭についても、腐食による板厚減少プロフィールを 3 種類に分類でき、そのうちの 하나가「集中腐食」の発生パターンである。ただし、鋼管杭ではその形状や設置水深の影響により、「集中腐食」の発生頻度は鋼矢板よりも低い傾向にある。

「集中腐食」の発生に影響する因子としては、酸素濃淡電池の形成、構造物の形状、水深の大小、コンクリートコーピングレベル、さび層の局部的連続破壊などが指摘されている。

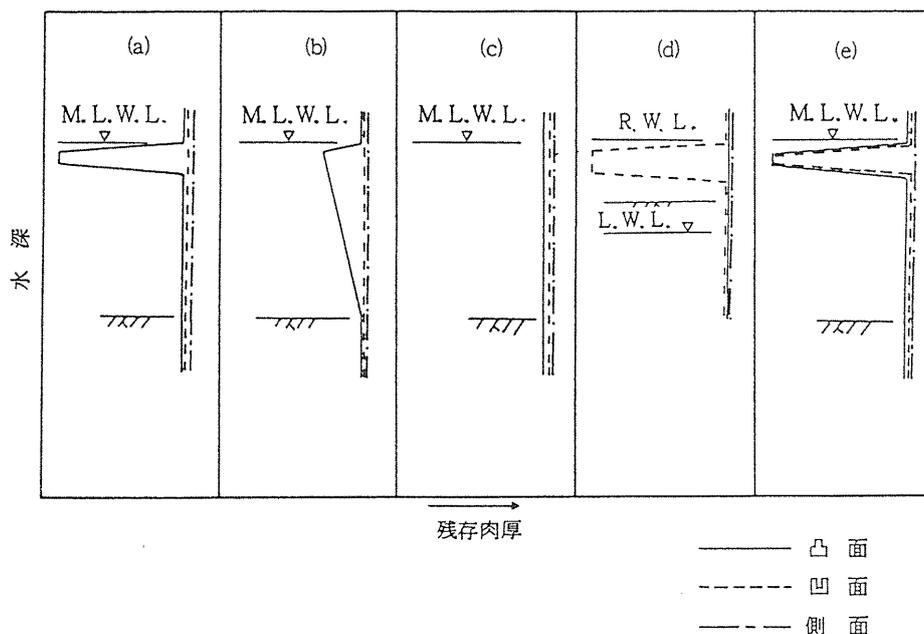


図 6.4.2 鋼矢板における板厚減少プロフィール・パターン (出典 6-9)

6.4.2 鋼材別の腐食速度調査事例

港湾・河川鋼構造物の既往の腐食調査結果を用いて、鋼管杭・鋼管矢板と鋼矢板の腐食速度を比較した報告について以下に示す。

1. 引用した調査報告書

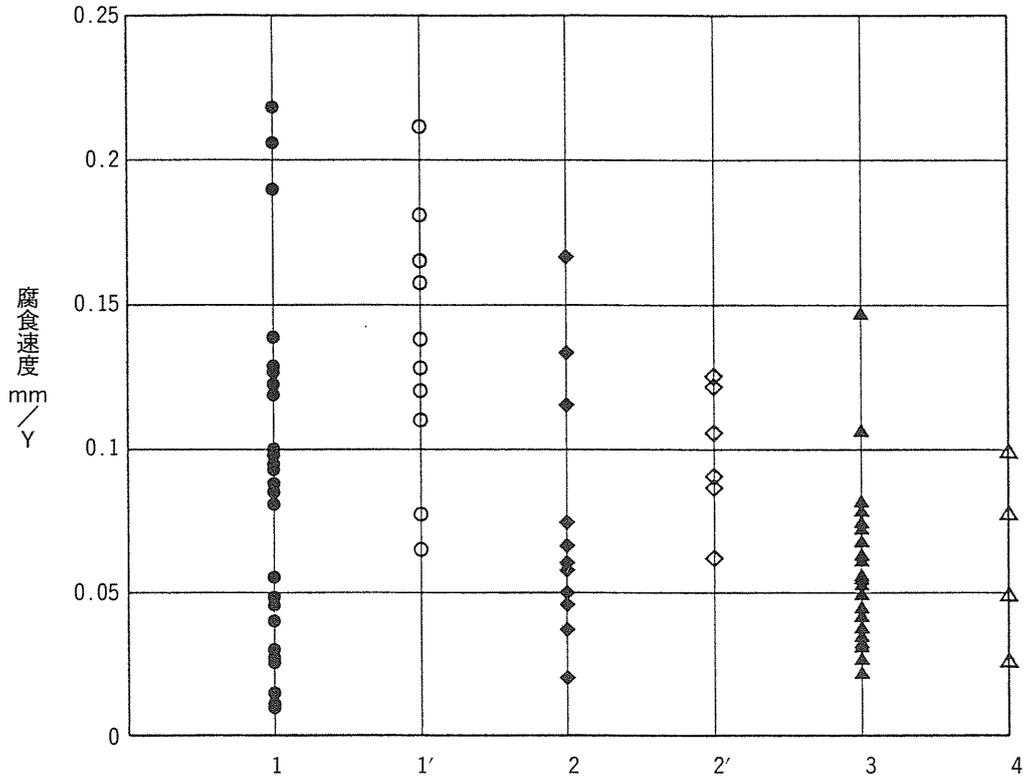
- ① 運輸省港湾技術研究所 : 「港湾鋼構造物の腐食調査資料集 (その 2) —昭和 59 年度全国調査—」
- ② 運輸省港湾技術研究所 : 「港湾鋼構造物の腐食調査資料集No.628」 (昭和 63 年 9 月)
- ③ 運輸省港湾技術研究所 : 「港湾技研資料No.49 港湾鋼構造物の腐食調査 (第 1 報)」 (昭和 43 年 6 月)
- ④ 運輸省港湾技術研究所 : 「港湾技研資料No.84 港湾鋼構造物の腐食調査 (第 2 報)」 (昭和 44 年 9 月)
- ⑤ 運輸省港湾技術研究所 : 「港湾技研資料No.461 小松島港及び名古屋港における鋼管杭の腐食調査」 (昭和 58 年 9 月)
- ⑥ 東京都港湾局 : 「東京港腐食対策手引書 別冊資料」 (平成 3 年 7 月)
- ⑦ 大阪市港湾局 : 「鋼構造物腐食調査報告書」 (平成元年 3 月)
- ⑧ 東京都江東治水事務所 : 「鋼矢板腐食調査 (隅田川外 5 河川) 報告書」 (昭和 59 年 3 月)
- ⑨ 東京都江東治水事務所 : 「鋼矢板腐食調査 (中川外 9 河川) 報告書」 (昭和 59 年 11 月)
- ⑩ (財) 先端建設技術センター : 「河川護岸用鋼矢板耐久性検討業務報告」 (平成 10 年 3 月)

2. 対象データ・評価方法

- 1) 無防食のもののみを対象とした。
- 2) 構造物の部材の調査データのみを対象とし (測定データ約 7,200)、単独試験片の調査データは除外した。
- 3) 鋼材の経過年数は、腐食速度が安定する 10 年以上のものに限定した。
- 4) 鋼矢板は凹部と凸部を合わせて評価した。

3. 調査結果

鋼材別・環境別の腐食速度を図6.4.3に示す。この調査結果によれば、環境により「鋼管杭・鋼管矢板」と「鋼矢板」の腐食速度にバラつきはあったが、総じて両者の鋼材の腐食速度に有意な差異はないと考えられる。



注) 横軸の分類

- 1 = 鋼矢板・海水スプラッシュゾーン
- 1' = 鋼管杭、鋼管矢板・海水スプラッシュゾーン
- 2 = 鋼矢板・海水中
- 2' = 鋼管杭、鋼管矢板・海水中
- 3 = 鋼矢板・淡水スプラッシュゾーン
- 4 = 鋼矢板・淡水中

図 6.4.3 鋼材別・環境別腐食速度

6.5 腐食対策

鋼材を自然環境下で長期間にわたり安定して使用するには、腐食対策を講じる必要がある。

主な腐食対策の方法を図 6.5.1 に示す。腐食対策には、大きく分けて防食法と腐食しろの2つの手法がある。防食法には大きく分けて被覆防食、電気防食、耐食材料の使用、環境制御の4つの方法がある。腐食しろとは、使用環境における供用期間中に予想される腐食量に見合った鋼材の板厚をあらかじめ付加する方法である。

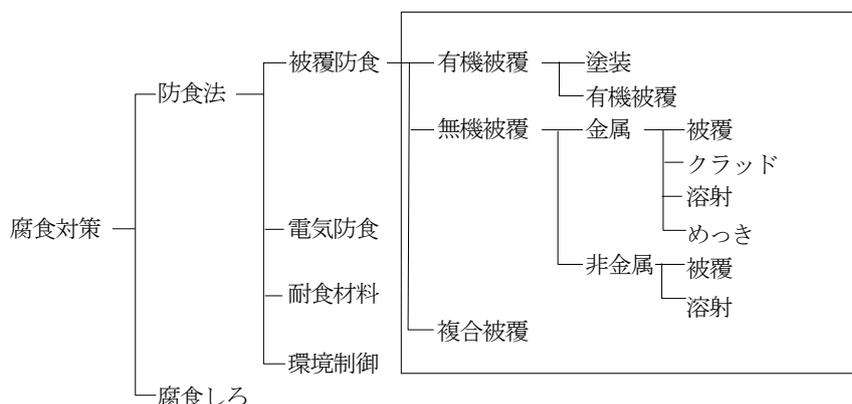


図 6.5.1 各種腐食対策法

この中で鋼管杭・鋼管矢板を海洋、河川、土壌環境で用いる場合に適用される主な腐食対策としては、被覆防食法、電気防食法、および腐食しろがある。

被覆防食には、有機被覆、無機被覆およびこれらを組み合わせた複合被覆がある。有機被覆には塗装とポリエチレンなどによる有機被覆がある。無機被覆には金属被覆と非金属被覆があり、金属被覆には、モネル、チタン、ステンレスなどの被覆やクラッド法、アルミニウムなどの溶射法がある。非金属被覆にはモルタル被覆などがある。

電気防食法は、被防食体である鉄を腐食、すなわちアノード溶解しない電位に電気化学的に設定する方法であり、流電陽極方式と外部電源方式がある。

6.5.1 重防食鋼管杭および重防食鋼管矢板

重防食鋼管杭および重防食鋼管矢板は、鋼管杭あるいは鋼管矢板の外表面をポリエチレンあるいはウレタンエラストマーで被覆した製品であり、鋼管杭メーカーが工場で作成する。その被覆構成例を図 6.5.2～図 6.5.4 に示す。海洋環境で使用する場合、通常は腐食性が厳しい飛沫帯から平均干潮面直下まで、あるいは飛沫帯から海底面直下までを被覆範囲としている (図 6.5.5)。標準的な被覆厚さはポリエチレン、ウレタンエラストマーともに 2.5mm 以上であり、現在は、主にウレタンエラストマーが使用されている。

被覆材料と製品との関係は表 6.5.1 のとおりであり、ポリエチレン、ウレタンエラストマーはいずれも環境遮断性、電気絶縁性に優れた被覆材料である。さらに長期にわたって優れた耐候性を保持するように成分設計がなされている。これらの被覆層は海洋などの苛酷な環境下においても高い接着強度と耐衝撃強度を有しており、長期間にわたり優れた防食性能を発揮する。

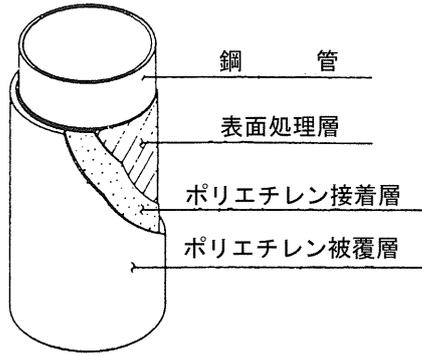


図 6.5.2 重防食鋼管杭の被覆構成例
(ポリエチレン被覆)

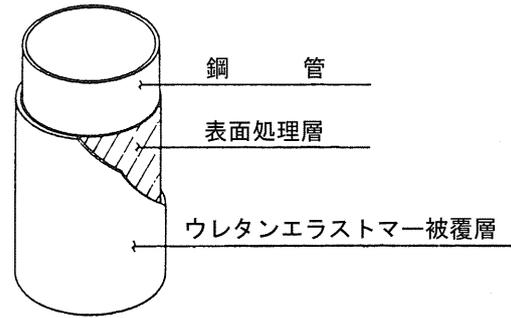


図 6.5.3 重防食鋼管杭の被覆構成例
(ウレタンエラストマー被覆)

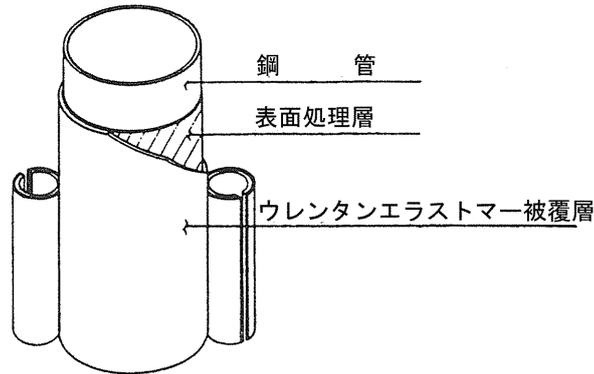


図 6.5.4 重防食鋼管矢板の被覆構成例
(ウレタンエラストマー被覆)

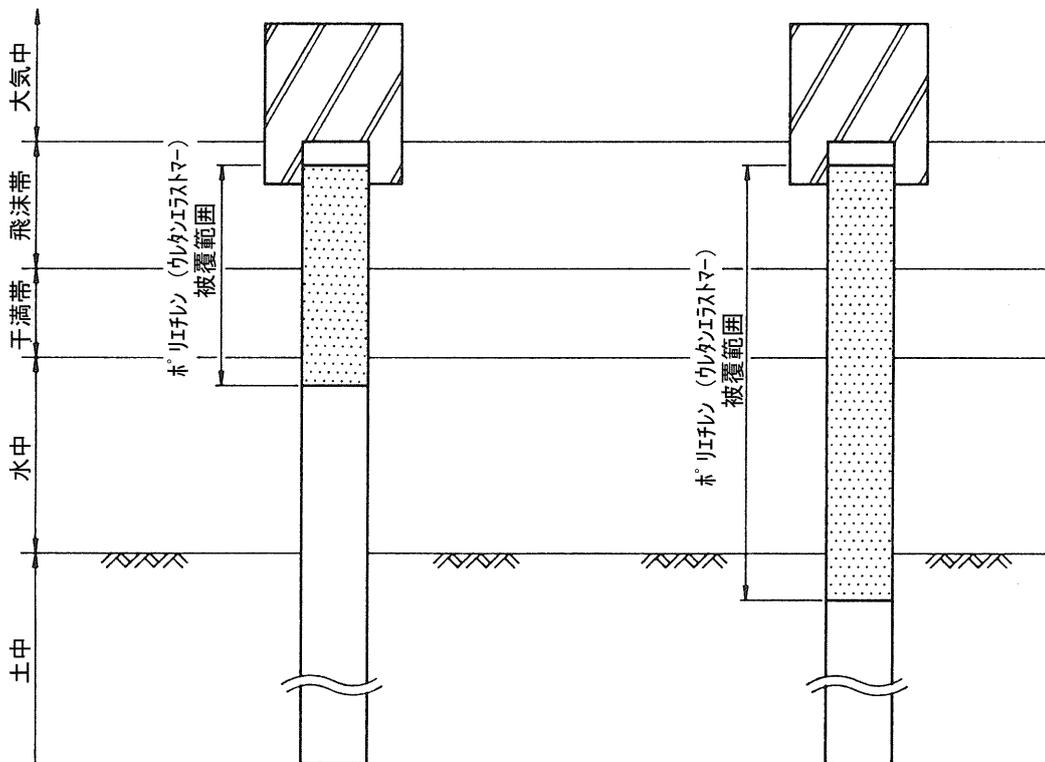


図 6.5.5 重防食鋼管杭被覆範囲例

ポリエチレンあるいはウレタンエラストマー被覆鋼管杭の被覆材料の性状は表 6.5.2 のとおりである。

表 6.5.1 被覆材料と製品との関係

	ポリエチレン被覆	ウレタンエラストマー被覆
鋼管杭	○	○
鋼管矢板	—	○

表 6.5.2 被覆材料の性状 (出典 6-⑩)

	ポリエチレン	ウレタンエラストマー
密度 (g/cm ³)	0.915 以上	—
比重	—	1.0 以上
引張強度 (MPa)	12.0 以上	8.0 以上
伸び (%)	300 以上	30 以上
硬度 (HDD)	40 以上	50 以上
吸水率 (%)	0.10 以下	0.35 以下
体積抵抗率 (Ω・cm)	1.0×10 ¹² 以上	1.0×10 ¹² 以上
接着力	35N/10mm 以上 (ピーリング)	3.0 MPa 以上 (プルオフ)
カーボンコンテスト (%)	1.5～3.0	—
軟化点 (°C)	85 以上	—

ポリエチレンまたはウレタンエラストマーで被覆された重防食製品は、実環境における暴露試験により、被覆の長期耐久性が確認されている。その一例として各種防食方法について表6.5.3に示すような海洋環境における暴露試験がある。写真6.5.1、写真6.5.2、写真6.5.3に主な暴露試験の状況を示す。

表 6.5.3 公的機関等による重防食被覆鋼材の暴露試験（出典 6-⑪～⑭）

実施機関	場所	暴露期間(年) ()内は計画
(独)港湾空港技術研究所 (財)沿岸技術研究センター, 鋼管杭協会他	波崎沖	41 (50) 継続中
建設省土木研究所, 鋼管杭協会, (財)国土開発技術研究センター	千葉沖	完了 11.5
	阿字ヶ浦沖	完了 22
(独)土木研究所, (社)鋼材倶楽部	駿河湾沖	39 (—) 継続中
(独)土木研究所, (社)鋼材倶楽部	沖の鳥島	完了 19.5
鋼管杭協会、他	シンガポール	完了 10
	フィリピン	完了 15

注) 2025年現在の暴露年数



写真 6.5.1 波崎沖



写真 6.5.2 阿字ヶ浦沖

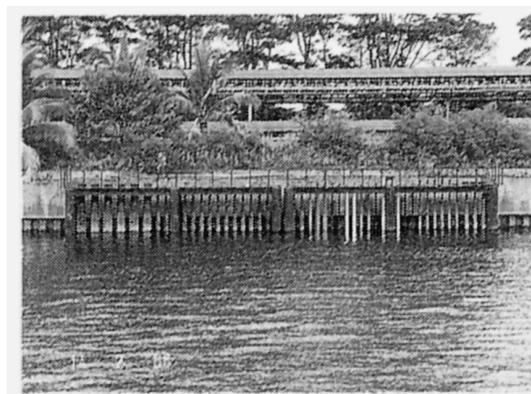


写真 6.5.3 フィリピン

例えば、表 6.5.3 の暴露試験の一例として、建設省土木研究所、(財)国土開発技術センターと鋼管杭協会が共同で実施した千葉沖と茨城県阿字ヶ浦沖における 22 年間の暴露試験の結果を表 6.5.4 に示す。

各種防食法の防食性能については主として外観を中心に、A (優) ~E (劣) の 5 段階で定性的に評価した。評価がC以下のものは、長期の防食性能は期待できない。この結果、ポリエチレン系およびウレタンエラストマー系被覆の防食性能は高耐久性の評価が得られ、他の防食法と比較して優れた防食性能を有することが実証された。

また、表 6.5.5 には茨城県波崎沖におけるポリエチレン被覆の 30 年間の暴露試験結果の要約を示すが、千葉沖、阿字ヶ浦と同様に良好な防食性能を有することが実証されている。

なお、本研究では暴露・観察を継続中であり、現時点でも外観上の大きな変化は見られず、暴露 30 年経過時の詳細な防食性能評価においても良好な結果が得られている。

表 6.5.4 防食鋼管杭暴露試験観察結果 (出典 6-⑪)

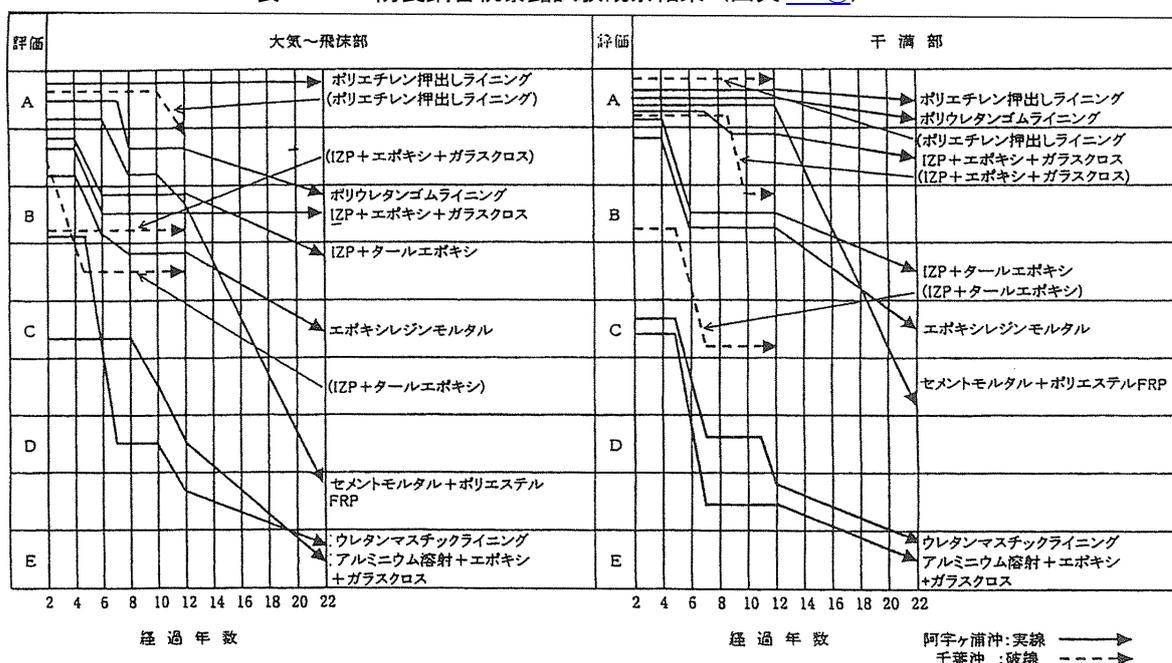


表 6.5.5 波崎沖 30 年間の暴露試験における重防食鋼管杭の総合評価 (出典 6-⑫)

防食工法	被覆構成	耐 久 性				
		外観	絶縁抵抗	塗膜下錆	接着強度	総 合
ポリエチレン被覆法	図 6.5.2 表 6.5.2 参照	防食機能低下に繋がる大きな変状(浮き, 剥離等)はなく、外観良好	被膜下の鋼材表面に腐食が認められないレベルの $10^8 \Omega \text{cm}^2$ 以上の値を示している。	発生無し	30年経過時においても高い値を示し、製品仕様の 35N/cm 以上を満たす	30年間で異常無し

重防食鋼管杭・重防食鋼管矢板の被覆層の諸特性（耐候性、耐海水性、接着性、耐せん断性、耐衝撃性など）は各々の試験によって確認されている。試験結果の例をあげると次のとおりである。総合すると、被覆層は長期の耐久性を有すると評価することができる。

① 耐候性試験

ポリエチレン被覆材料についての促進耐候性試験結果を [図 6.5.6](#) に示す。図から明らかなように、試験時間 10,000 時間に至るまで、ほぼ初期伸び率を維持しており、被覆材料としてのポリエチレンが長期にわたり紫外線による劣化に対して問題のないことがわかる。

② 耐海水性試験

最も厳しいと考えられる 80℃、3%NaCl 水溶液浸漬試験におけるポリエチレン被覆鋼材の結果を [図 6.5.7](#) に示す。図から 2 ヶ月後も接着力の低下はほとんどない。

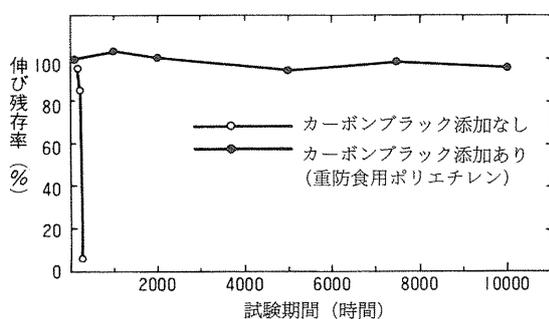


図 6.5.6 サンシャインウェザオメータによるポリエチレン被覆材料の耐候性試験結果 (出典 [6-15](#))

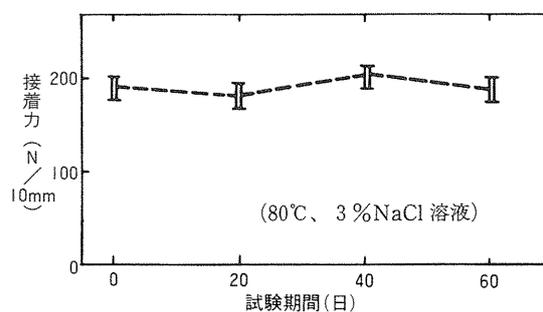


図 6.5.7 ポリエチレン被覆鋼材の耐海水性促進試験結果

なお、この重防食鋼管杭・重防食鋼管矢板の仕様の詳細については（一社）鋼管杭・鋼矢板技術協会「重防食鋼管杭・鋼管矢板製品仕様書」（2019年2月）を参照されたい。

6.5.2 電気防食

1. 概説

電気防食法は、腐食の機構 ([図 6.5.8](#)) に基づき、外部から電流を供給することで、鋼材表面に形成される局部電池のカソードをアノードの平衡電位にまで分極させる方法である。これにより、鋼材表面のアノードとカソードの電位が等しくなり、腐食は生じなくなる。

具体的な方法としては、[図 6.5.9](#) に示すように、水中または土中（地下水位以下）にある鋼材を直流電源装置のマイナス側に接続し、プラス側に接続した電極から、水中または土中を通じて電流を鋼材に流入させる。

この流入電流によって局部電池が消滅し、防食が達成されたときの被防食体（鋼材）の電位を防食電位という。鋼材の自然電位は、海水中では飽和甘こう電極基準で $-600 \sim -650\text{mV}$ 、防食電位は -770mV である。また、土壌中では飽和硫酸銅電極基準で $-700 \sim -800\text{mV}$ 、防食電位は -850mV である。

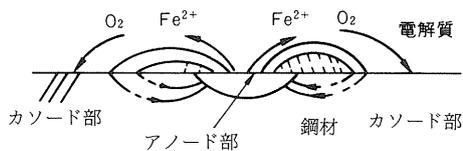


図 6.5.8 局部電池による腐食の機構

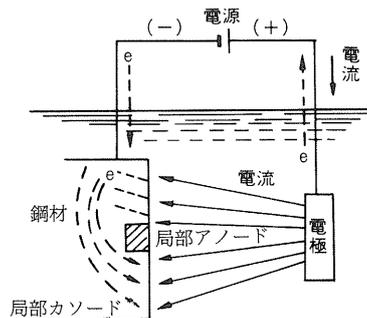


図 6.5.9 電気防食の状況

2. 電気防食の方式

電気防食には、交流電力を整流器で直流に変換して防食電流を供給する外部電源方式と、金属間の電位差（異種金属間電位差）を利用して防食電流を得る流電陽極方式とがある。

(1) 外部電源方式

外部電源方式は、[図 6.5.10](#) に示すように、交流を防食電流の通電に適した直流に変換する整流器と、水中または土中に設置して防食電流を流す電極と、この直流電源装置と電極および被防食体とを接続する配線管によって構成される。

この方式は、腐食速度に応じて適用電流密度を調整できるうえ、電極を定期的に交換する必要がないため、半永久的な防食が求められる大規模な岸壁などに適している。

(2) 流電陽極方式

流電陽極方式は、[図 6.5.11](#) に示すように、鉄よりも低い電位をもつ亜鉛、アルミニウム、マグネシウム、あるいはこれらの合金（流電陽極）と、それを被防食体に接続する電線などで構成される。

この方式は、外部電源方式と比較して施工が簡単で、設備費も抑えられ、維持管理もほとんど必要としないという利点がある。

電気防食は、鋼材が水中部あるいは土中部に存在する場合に効果を発揮するため、適用範囲は平均干潮面（M.L.W.L.）以下となる。飛沫帯などの腐食の激しい部位では、電気防食は適当な方法とは言えず、コンクリート被覆、あるいは塗装などの他の防食方法を用いる必要がある。

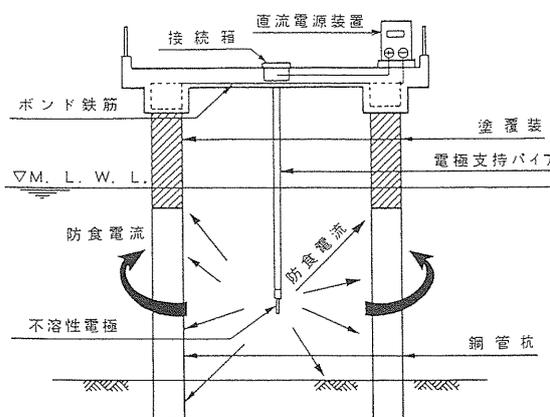


図 6.5.10 外部電源方式

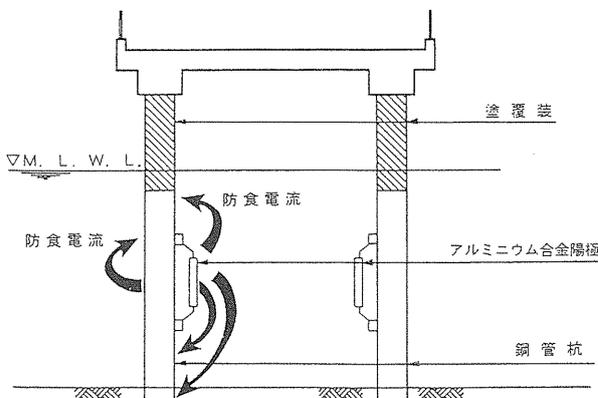


図 6.5.11 流電陽極方式

3. 電気防食の効果

水分が常時存在する海水中や土壌中などの環境では、電気防食は十分その効果を発揮する。この電気防食の効果については、次のような報告がある。

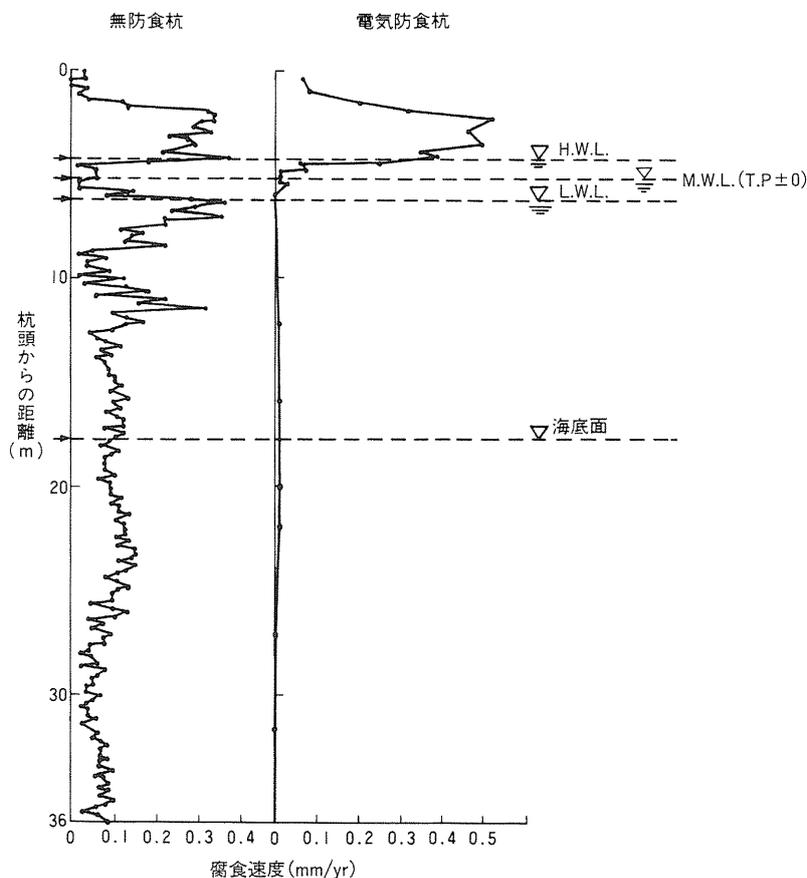


図 6.5.12 無防食杭及び電気防食杭の腐食速度（超音波厚み計による肉厚測定，暴露3年間，川崎沖）（出典 [6-16](#)）

建設省土木研究所は、川崎市浮島沖において約3年間にわたる鋼管杭の暴露試験を実施し、[図 6.5.12](#)に示すように、アルミニウム(AI)による電気防食を施した鋼管杭が、平均潮位以下の海水中および海底土中部において、無防食の鋼管杭に比べて腐食速度が1/10以下であることを確認している。

さらに「港湾基準」施設編第2章 1.3.5 編では、海水中における電気防食の効果について、次のように記述している。「電気防食の効果は、被防食体である鋼材が海水中に浸せきしている時間が長いほど高く、短いほど低くなる。」

なお、防食率は次式で表わされる。

$$\text{防食率} = \frac{\text{不通電試片の質量減} - \text{通電試片の質量減}}{\text{不通電試片の質量減}} \times 100(\%)$$

平均干潮面以下の防食率としては、一般に90%が用いられることが多い。また、干満帯に流入する防食電流は、海水中と比較してかなり大きくなるため、陽極の消耗量が増加する。このような理由から、電気防食

の適用範囲は、原則として平均干潮面以下とされている。

一方、平均干潮面以上の部位については、被覆防食による対策が必要である。この場合、平均干潮面からL.W.L.までの範囲では、L.W.L.以下に比べて、海水に浸せきする時間が短くなるため、防食率がやや低下する。また平均干潮面の直下部の部位は腐食しやすいことから、平均干潮面以下の一定範囲まで被覆防食を適用し、電気防食と併用することが望ましい。

6.5.3 腐食しろ

鋼管杭の防食には、腐食しろによる方法が多く用いられている。腐食しろとは、実際の肉厚から設計上必要な肉厚を差し引いた値である（すなわち、腐食しろ = 実際の肉厚 - 設計上必要な肉厚）。実際の肉厚は打込み時の打撃力から決まることもある。平均腐食速度と構造物の耐用年数とが推定できれば、所要腐食しろは、所要腐食しろ (mm) \geq 平均腐食速度 (mm/yr) \times 耐用年数 (yr) で求められる。このように、平均腐食速度がそれほど大きくない場合には、腐食しろによる防食が採用されることが多い。一般に、孔食速度は平均腐食速度より数倍大きいため、孔食による貫通に対する配慮が必要となる場合がある。また、他の防食法と併用することで、腐食しろを小さく抑えることも可能である。

なお、港湾鋼構造物に関しては、「港湾基準」施設編第3章 1.3.5 において、「干満帯および海中部においては、腐食環境条件によっては集中腐食等の著しい腐食が生じるおそれがあるため、腐食しろによる防食は行わないものとする。ただし、仮設構造物の場合は腐食しろによる防食の考え方を適用してもよい。」と記述されており、腐食しろによる方法には制限が設けられているので注意が必要である。

また、鋼管杭の場合は、内面でほとんど腐食が発生しないため、腐食しろは外面のみを考慮すればよいとされている。これについては、「港湾基準」作用および材料強度条件編 11 章 2.3.3 で、「鋼管杭の内側のように密閉された空間においては、酸素の供給が遮断されることから腐食はないものと考えてもよい。」と記述されている。

さらに、[6.3.2 腐食調査](#)に述べた鋼管杭協会による陸土中の鋼管杭の腐食状況調査（打設後4年目）においても、切取り試験片の表面（鋼管杭外面）には、[写真 6.5.4](#)に示すように腐食の痕跡が明らかに見られたのに対し、切取り試験片裏面（鋼管杭内面）には、[写真 6.5.5](#)に示すように、スパイラル鋼管製造時の成形ロールマークが明瞭に残っており、腐食の痕跡はほとんど見られなかった。



写真 6.5.4 切取り試験片（鋼管杭外面）の除錆後の外観（中央部の傷はハンマによるものである。打設後4年目）



写真 6.5.5 切取り試験片（鋼管杭内面）の除錆後の外観（斜線は製管時のロールマークである。打設後4年目）

また、千葉沖における防食鋼管杭の実地暴露試験の一環として、暴露 5.5 年目の裸鋼管杭について、[図 6.5.13](#) に示す位置から試験片を切取り、鋼管杭の内外面の腐食状況を調査した。その結果を、[表 6.5.7](#)、[写真 6.5.6](#)、[写真 6.5.7](#) に示す。

これらの結果から明らかなように、海上部（D.L.+2.4m）、海中部（D.L.-4.5m）ともに、鋼管杭内面では造管時とほぼ同様の表面状態が保たれており、腐食の進行は認められなかった。

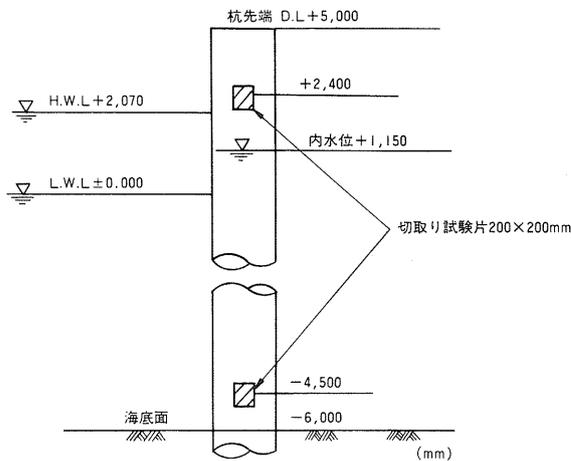


図 6.5.13 切取り試験片の位置

表 6.5.7 切取り試験片の凹凸測定結果

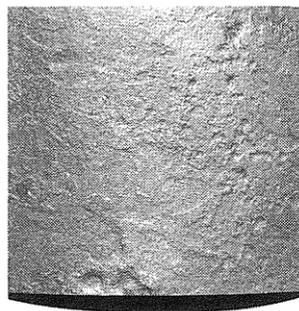
位置		凹凸*1 (mm)	
		平均	最大*2
海上部 D.L.+2.4m	鋼管杭外面	0.21	0.51
	鋼管杭内面	0.08	0.42
海中部 D.L.-4.5m	鋼管杭外面	0.40	1.13
	鋼管杭内面	0.07	0.33
圧延のまま（造管時）		0.07	0.30

*1 ダイアル・デプス・ゲージで測定

*2 上位 10 点の平均値

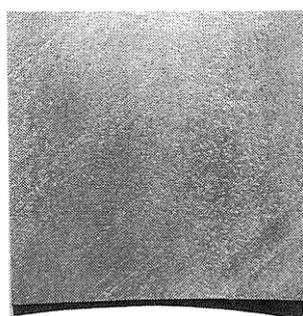


海上部 (D.L.+2.4m)

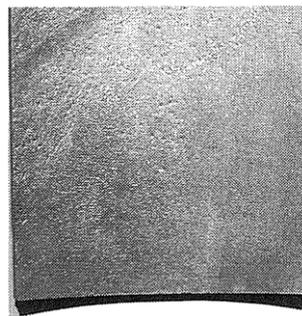


海中部 (D.L.-4.5m)

写真 6.5.6 切取り試験片 (鋼管杭外面) の防錆後の外観 (暴露 5.5 年目)



海上部 (D.L.+2.4m)



海中部 (D.L.-4.5m)

写真 6.5.7 切取り試験片 (鋼管杭内面) の防錆後の外観 (暴露 5.5 年目)

なお、完全に閉塞された状態で外部からの酸素の供給がない場合の鋼管杭 (内径 600mm、杭長 1m) について、杭内部に存在する酸素がすべて杭内面の腐食で消費されると仮定し、杭内面の板厚減少量を計算によって求めた結果を表 6.5.8 に示す。いずれの場合においても板厚の減少量は非常に小さい値であることがわかる。

表 6.5.8 杭内部の腐食

	①杭内部が空気の場合	②杭内部が海水の場合	③杭内部が土壌の場合
i) 腐食生成物 その他の仮定条件	Fe ₃ O ₄ のみと仮定 (3Fe+2O ₂ = Fe ₃ O ₄)	Fe ₃ O ₄ のみ 海水中の溶存酸素濃度を 10ppm と仮定	Fe ₃ O ₄ のみ 土壌中の含水率 30 % 地下水中の溶存酸素濃度 10ppm 空気の含有率 0 %
ii) 杭内部の O ₂ 量	$\frac{0.283 \times 10^3 \times 0.21}{22.4} = 2.651 \text{ mol}$	$\frac{0.283 \times 10^3 \times 10 \times 10^{-6}}{22.4} = 1.26 \times 10^{-4} \text{ mol}$	$1.26 \times 10^{-4} \times 0.3 = 3.79 \times 10^{-5} \text{ mol}$
iii) 杭内部の腐食量	$\frac{3}{2} \times 2.651 \times 55.845 = 222 \text{ g}$	$\frac{3}{2} \times 1.26 \times 10^{-4} \times 55.845 = 0.0106 \text{ g}$	$0.0106 \times 0.3 = 0.0032 \text{ g}$
iv) 杭内部の板厚減少量	$\frac{222}{7.874 \times 10^{-3} \times 1885 \times 10^3} = 0.0150 \text{ mm}$	$\frac{0.0106}{7.874 \times 10^{-3} \times 1885 \times 10^3} = 7.12 \times 10^{-7} \text{ mm}$	$7.12 \times 10^{-7} \times 0.3 = 2.14 \times 10^{-7} \text{ mm}$

ただし、杭内部の空気は標準状態 (0℃, 1.013×10⁵ pa) にあるものとし、空気中の酸素量は 21%, mol 体積は 22.4 l/mol (アボガドロの法則より), 鉄の原子量は 55.845 g/mol, 密度は 7.874×10³ g/mm³ とする。

6.5.4 被覆防食法

1. 塗装

被覆防食法の一つとして、鋼管杭に塗装を施す方法は、橋脚、栈橋の地上突出部などで広く用いられている。鋼管杭の防食塗料には、防食性を有し、土壌環境や海洋環境において劣化しにくく、さらに鋼管杭の打込みの際に周囲の土壌との摩擦によって剥離したり、損傷を受けにくい耐摩耗性および密着性に優れたものを使用する必要がある。

2. 有機被覆

有機被覆とは、ポリエチレン、ウレタンエラストマー、レジンモルタル、強化プラスチックなどの有機質材料を鋼材表面に被覆する方法である。有機被覆は、一般に膜厚が2~10mmと塗装よりも厚く、防食性、耐衝撃性、耐摩耗性に優れているという特長を有している。このうち、ポリエチレン、ウレタンエラストマーによる被覆については [6.5.1 重防食鋼管杭および重防食鋼管矢板](#) に記述しているため、ここではそれ以外の被覆方法について述べる。

① FRP 被覆

FRP 被覆は、ガラス繊維を補強材とし、熱硬化性樹脂を含浸漬層硬化させたものを鋼材表面に被覆する方法である。被覆厚さは2~5mm程度で、機械的強度に非常に優れる。ただし、下地処理、端末処理、環境条件、硬化収縮時の状況などで性能が大きく左右されるため、十分な施工管理と熟練した技術による施工が必要である。主に陸上で被覆され、新設構造物に適用される。

② 厚膜無溶剤型樹脂被覆

厚膜無溶剤型樹脂被覆は、塗装の膜厚を大きくすることで防食性能の向上を図る方法である。一般塗料では、膜厚を確保するために塗装回数が多くなり、工数やコストの増加するほか、塗膜中の溶剤が揮発しにくく膨れの原因になるなどの問題がある。これに対し、厚膜無溶剤型塗料(エポキシ樹脂系、タールウレタン樹脂系など)は、一般塗料では困難な1~5mmの厚さを一回で塗装でき、耐久性の高い被膜を形成できる。施工方法としては特殊塗装機によるスプレーのほか、はけ、ローラーによることもある。

③ 水中硬化型樹脂被覆

水中硬化型樹脂被覆は、水中でも硬化可能な樹脂系防食材を用いて鋼材を被覆する方法である。使用される樹脂は、一般にエポキシ樹脂が多く、海中部、干満帯などの環境に適しており、既設構造物にも用いられる。被覆工法には、パテ状の防食材を手作業で鋼材面に圧着し、3~10mmの膜厚で被覆する方法など、種々のものがあり、厚膜によって腐食性物質の透過を防ぎ、防食効果を発揮する。

3. 無機被覆

無機被覆は、鋼管杭の外表面をセメントモルタルやコンクリートなどのセメント硬化体で被覆する方法であり、地表面付近または海水環境における飛沫帯、干満帯など、特に腐食の激しい部位に多く用いられる。

鉄筋の防食を目的とする場合には、十分なセメント硬化体の厚さが必要であり、通常はひび割れや剥離を防止するために、金網、鉄筋などで補強し、これらと鋼管杭との間にスペーサを設ける。被覆方法としては、地上でコンクリートを吹付けた後に杭を打込む方法、打込み後に鋼管杭の周囲に型枠を設けて充填する方法、あるいは打込み時に外管を用い、これを型枠代わりとしてセメントモルタルを流し込む方法などがある。これらの方法により防食を行なう場合には、高品質の材料選択と入念な施工が求められ、中性化による防食性能の低下、ひび割れ、鉄筋の腐食などに注意する必要がある。

4. 複合防食法

複合防食法とは、構造物を防食する被覆層が複数の層から構成され、それぞれの層が異なる材質や機能を持つ防食システムである。

① ペトロラタム+FRP 保護カバー

ペトロラタムは、インヒビターを含む粘性の高い石油系の防錆材料であり、ガラスクロスや合成繊維不

織布などのテープに含浸させ、構造物の表面に巻付けあるいは貼り付ける。その上から FRP 製の保護カバーを設置し、ペトロラタムテープを構造物に固定する。FRP 保護カバーとペトロラタムテープとの間に、ポリエチレンなどの独立発泡体を緩衝層として挿入することもある。FRP は成型性に優れており、複雑な形状の構造物にも適用可能である。保護カバーの厚さは、波力などの環境条件を考慮して決定しなければならない。FRP は、補強材であるガラス繊維に熱硬化性樹脂を含浸積層硬化させて形成するが、使用される樹脂は、ポリエステル樹脂やエポキシ樹脂などがあり、価格や硬化時間の制御性の観点から、不飽和ポリエステル樹脂が一般的に用いられている。

② セメント硬化体+FRP 保護カバー

この方法は、FRP 製の型枠を海洋構造物に取り付け、その内部にセメントモルタルやコンクリートを注入・硬化させることで形成される。セメント硬化体の厚さは、中性化や塩分浸透に対する耐性を考慮して十分に確保する必要がある。また、保護カバーの厚さも、波力などの環境条件を考慮して適切に決定しなければならない。

③ セメント硬化体+鋼製型枠

この方法は、セメントモルタルやコンクリートを注入するための鋼製型枠を、そのまま防食材として利用する方法である。セメントモルタルやコンクリートのひび割れ防止の観点から有効であり、鋼製型枠の肉厚が十分であれば、腐食しろとして評価することも可能である。使用するセメントモルタルやコンクリートは、(公社)土木学会「2017年制定 コンクリート標準示方書」に準拠して調合する。

5. 高耐食性金属被覆

高耐食性金属被覆とは、耐海水性に優れた金属材料(ステンレス鋼、非鉄系モネル、キュプロニッケル、チタンなど)を鋼構造物に被覆する防食方法である。これらの金属を被覆する方法には、クラッドまたは板巻き溶接がある。

クラッドには、圧延クラッドと爆着クラッドがあり、いずれも母材とクラッド金属を金属結合によって一体化させる方法である。その剪断強度は母材に近い。クラッドされた金属は、通常は設計上、強度部材とみなされないが、実際には強度材料としても十分に機能を発揮すると考えられる。現在、海洋環境で高耐食性を示すほとんどの金属は、クラッドすることが可能である。

板巻き溶接は、高耐食性金属を鋼構造物に溶接してオーバーレイする方法である。なお、高耐食性の金属を素材に巻き付けもしくは張り付ける際には、露出する接合部の気密性と信頼性が確保される必要がある。そのためには、異種金属接触腐食の防止(電気防食との併用や専用の溶接棒の使用など)、被覆端部の処理方法、あるいは施工時の管理や供用中の点検などに注意する必要がある。

高耐食性金属被覆は材料費や加工費を含めた初期費用が他の防食工法より高価である。しかし、他の防食被覆に比べて耐食性、耐衝撃性、耐摩耗性に優れている。また、初期段階のコストが高くても構造物に要求される期待耐用年数が長く見積もれること、メンテナンスコストが低く抑えられることなどの理由でトータルコストを低くできる可能性もあり、最近では海洋鋼構造物などで高耐食性金属被覆の採用事例が増えつつある。ジャケット式岸壁に高耐食性金属被覆が用いられた例を[写真 6.5.8](#)に示す。



写真 6.5.8 高腐食性金属被覆（耐海水性ステンレス鋼被覆）の施工事例

出典

- 6-① 腐食防食協会：耐候性鋼とさび層の現状と課題，JSCE-TC-01. 耐候性鋼技術小委員会報告書，p12，
図 2.1-2，1994 年
- 6-② 守屋進，村瀬正次，中野啓眞：鋼杭、鋼矢板の土中腐食性状の統計的検討，土木技術資料 47-3，p54，
図-3，2005 年
- 6-③ 梶山文夫：土壌に埋設された鉄管の微生物誘起腐食：配管技術，pp94～98，1996 年
- 6-④ 腐食防食協会：防食技術便覧，1986 年
- 6-⑤ 森芳徳，片脇清士他：幸谷橋において 17 年間供用された鋼管ぐい橋脚の土中腐食，土木技術資料，
23-6，1981 年
- 6-⑥ 大崎順彦：鋼ぐいの腐食，p66，鋼材倶楽部，1980 年
- 6-⑦ 福岡正巳，沢口正俊，岸田英明：鋼管杭の実態調査，明日を築く，No. 36，p12，鋼管杭協会，1980 年
- 6-⑧ 沿岸技術研究センター：港湾鋼構造物防食・補修マニュアル（2022 年版）p I-11，2022 年
- 6-⑨ 港湾空港技術研究所（善一章）：海洋環境における鋼構造物の腐食の実態と集中腐食対策に関する研
究，港湾技術研究所報告，Vol. 15，No. 3，p166，1976 年
- 6-⑩ 鋼管杭・鋼矢板技術協会：重防食鋼管杭・鋼管矢板製品仕様書，2019 年
- 6-⑪ 鋼管杭協会：防食鋼管杭の開発とその海洋暴露試験報告書 千葉沖・阿字ヶ浦沖，1992 年
- 6-⑫ 港湾空港技術研究所（山路徹他）：長期海洋暴露試験に基づく鋼管杭の防食工法の耐久性評価に關す
る研究（30 年経過時の報告），港湾空港技術研究所資料，No. 1324，2016 年
- 6-⑬ 土木研究所，日本鉄鋼連盟：海洋構造物の耐久性向上技術に関する共同研究報告書，飛沫部及び干満
部における鋼構造物の防食技術に関する研究第 1 分科会，2016 年
- 6-⑭ 鋼管杭協会：熱帯海域における被覆鋼管の暴露試験—曝露 15 年間の結果報告—（最終報告），1999 年
- 6-⑮ 土木研究所，鋼管杭協会：海洋鋼構造物の防食指針・同解説（案）飛沫帯・干満帯編，p25，1990 年
- 6-⑯ 建設省 関東地方整備局 東京湾岸道路調査事務所，建設省 関東地方整備局 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：東京湾における鋼管杭の腐食防食試験，建設省土木研究所資
料，No. 1245，p17，1977 年