
港湾鋼構造物の腐食とメンテナンス

Corrosion and Corrosion Protection of Steel Structures for Wharves and Revetments

和田 啓(Kei Wada) 塩田 啓介(Keisuke Shioda) 四宮 秀夫(Hideo Shinomiya) 堀之内 義夫(Yoshio Horinouchi)

要旨：

千葉製鉄所内の港湾鋼構造物における腐食状況の調査および防食・補修工事の例を紹介する。腐食調査では、肉厚測定により防食部と無防食部の腐食傾向の違いを明らかにした。腐食対策では、アルミニウム陽極による電気防食の管理方法として電位測定および陽極調査が有用であること、干満帯に塗装を並用すると陽極の寿命が延びる可能性があることを確認した。また、孔食が生じた鋼管杭や鋼矢板の補修例を示した。最近開発された重防食被覆鋼管杭の使用例についても紹介した。

Synopsis：

This paper reports the inspection results of corrosion of port and harbour structures at Chiba Works and maintenance techniques for them. Differences in the corrosion rate of steel material between with and without corrosion protection was investigated. Electrode potential monitoring and visual inspection of aluminum alloy anode were proved to be effective in quality control of cathodic protection. The life of anode is expected to be extended by coating the structure at the tidal zone. For localized holes at steel pipe piles and steel sheet piles, some repairing methods have been developed and carried out. Finally the newly developed KPP (Kawasaki polyethylene or urethane resin coated pipe) pile is introduced as heavy-duty protective treatment.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

Corrosion and Corrosion Protection of Steel Structures for Wharves and Revetments



和田 啓

Kei Wada

本社 土建技術部千葉
土建技術室 主査(掛
長)

塩田 啓介

Keisuke Shiota

本社 土建技術部千葉
土建技術室 主査(掛
長)

四宮 秀夫

Hideo Shinomiya

本社 土建技術部千葉
土建技術室 主査(掛
長)

堀之内 義夫

Yoshio Horinouchi

本社 土建技術部千葉
土建技術室

1 まえがき

鋼矢板、鋼管杭、鋼管矢板などの鋼材は材料強度が大きいため、施工が容易である、軟弱地盤に適している等の利点があるため、港湾構造物の部材として今日まで大量に使用されている¹⁾。港湾構造物に鋼材を用いる場合は、海水による腐食に対して十分な防食を行う必要があるが²⁾、港湾構造物に鋼材が使用されはじめた当初から近年までは、主に腐食しるによる防食設計で対応されてきた。しかし、M. L. W. L. 直下付近に集中腐食とよばれる激しい局部腐食が発生しやすく、かつ、この集中腐食の発生要因および腐食速度の予測が難しいこと、全面腐食速度も海域によりかなり変動することなどのため、1980年代に入ると腐食の問題が顕在化してきた³⁾。

延長12.3 kmの港湾鋼構造物を有する千葉製鉄所においても、電気防食や腐食しるなどによって腐食対策を行ってきたが、近年、無防食構造物の腐食がかなり著しいことが判明した。そこで、1985年に鋼製護岸・岸壁の詳細な腐食調査を実施したのを契機に、防食管

要旨

千葉製鉄所内の港湾鋼構造物における腐食状況の調査および防食・補修工事の例を紹介する。腐食調査では、肉厚測定により防食部と無防食部の腐食傾向の違いを明らかにした。腐食対策では、アルミニウム陽極による電気防食の管理方法として電位測定および陽極調査が有効であること、干満帯に塗装を並用すると陽極の寿命が延びる可能性があることを確認した。また、孔食が生じた鋼管杭や鋼矢板の補修例を示した。最近開発された重防食被覆鋼管杭の使用例についても紹介した。

Synopsis:

This paper reports the inspection results of corrosion of port and harbour structures at Chiba Works and maintenance techniques for them. Differences in the corrosion rate of steel material between with and without corrosion protection was investigated. Electrode potential monitoring and visual inspection of aluminum alloy anode were proved to be effective in quality control of cathodic protection. The life of anode is expected to be extended by coating the structure at the tidal zone. For localized holes at steel pipe piles and steel sheet piles, some repairing methods have been developed and carried out. Finally the newly developed KPP (Kawasaki polyethylene or urethane resin coated pipe) pile is introduced as heavy-duty protective treatment.

理を強化するとともに、無防食構造物への電気防食の新規適用、腐食が著しい構造物の補修、重防食被覆鋼材の使用などの腐食対策を推進している。

この報告は、筆者らが千葉製鉄所においてこれまで行ってきた港湾鋼構造物に関する腐食調査および防食・補修技術についてまとめたものである。

2 千葉製鉄所における港湾鋼構造物の概要

千葉製鉄所は、千葉市南部の沿岸を埋め立てて造成した臨海製鉄所であり、1951年に埋立が開始され、現在では本工場、生浜地区および西工場を合わせて敷地面積は863 haに及んでいる⁴⁾。当初は、護岸・岸壁には主としてコンクリート矢板が使用されていた。港湾構造物への鋼材の利用に関しては、1956年に本工場Qバースの仮設構造物に使用したのが最初であり、永久構造物としては、1961年に本工場Lバースで直線形鋼矢板を、本工場Oバースで鋼管矢板を利用したのが最初である。その後、千葉製鉄所の発展とともに鋼材を利用した護岸・岸壁が増加し、現在の港湾構造物総延長20.7 kmのうち約60%にあたる12.3 kmが鋼製となっている。

千葉製鉄所では防食方法として従来より電気防食を採用してき

* 平成2年10月12日原稿受付

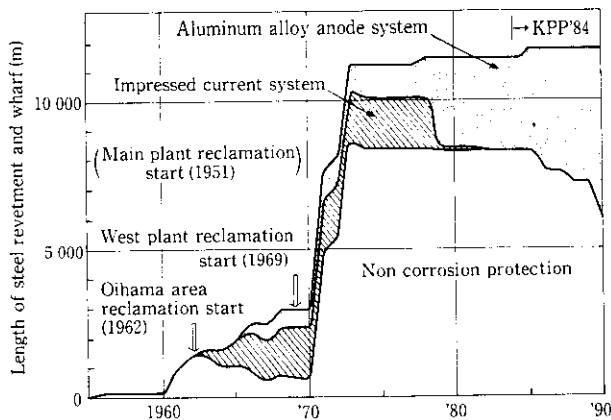


Fig. 1 History of corrosion protection method at Chiba Works

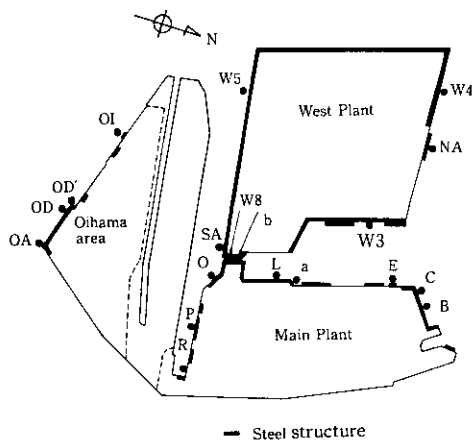


Fig. 2 General layout of Chiba Works and location of wharves and revetments

た。当初は外部電源方式を用いていたが、メンテナンスの容易さおよびアルミニウム合金陽極の性能が向上したことから⁵⁾、徐々に流電陽極方式に切り替え、現在では全面的に流電陽極方式を採用している。また、最近ではメンテナンスフリーのポリエチレン等による重防食鋼管杭、鋼管矢板および鋼矢板を港湾構造物の新設時やリブレース時における防食方式の主流として用いている。

千葉製鉄所における護岸・岸壁の防食状況の経時変化を Fig. 1 に示す。外部電源方式による電気防食を採用したのは1963年(Aベース)が最初であり、鋼材を利用しはじめてから7年目のことであった。その後、本工場、生浜地区の埋立が進むにともない護岸・岸壁の延長は増加し、1966年には流電陽極方式の採用が始まり(Oベース)、1970年には総延長2.9 kmのうち約80%に電気防食を適用した。1970年代に入ると西工場の埋立が始まり、多量の鋼材を港湾構造物に用いた。当時は荷役作業を行う岸壁にのみ電気防食を行い、その他の護岸等については腐食しろをみる設計によって対応していた。1979年には外部電源方式の大半を流電陽極方式に変更した。無防食構造物への電気防食の適用を1986年から積極的に行っているが、現在も港湾鋼構造物の約50%は無防食の状態にある。これらの護岸・岸壁のほとんどは建設されてから17年以上経過している。

この報告でとりあげる護岸・岸壁についてその位置を Fig. 2 に、それぞれの構造形式および防食・補修の履歴を Table 1 に示す。構造部材としては鋼矢板、鋼管杭、鋼管矢板などが用いられ、その組み合わせや寸法はさまざまである。B, C, OA ベースおよび W3

Table 1 Method of corrosion protection for wharves and revetments at Chiba Works

Symbol	Structural type (dia. (mm) × thick. (mm))	Finish of construction	Corrosion protection*1
B (Berth)	Steel walled pipe piles (863.6 × 10.3)	1965	①('65) ②('79)
C (Berth)	Steel walled pipe piles (1016.0 × 10.3)	1968	①('68) ②('79, '89)
E (Berth)	Steel pipe piles (762.0 × 7.1) (609.6 × 9.0)	1964	②③⑤ ('84)
a (Water entrance)	Steel pipe piles (318.5 × 6.9)	1972	③⑤('89)
L (Berth)	Steel sheet pile cell (KSP-F)	1961	①('64) ②('79, '89)
O (Revet- ment)	Steel pipe pile (300 × 6.4) Steel plate (t6)	1961	⑤('84) ②('90)
P (Berth)	Steel pipe pile (508, 660 × 7.9) Steel sheet pile (KSP-II)	1971	⑤('90)
R (Berth)	Steel walled pipe piles (508.8 × 9.0)	1962	②⑤('79)
OA (Berth)	Steel walled pipe piles (660 × 7.1)	1966	①('66) ②('79)
OD (Berth)	Steel walled pipe piles (1016.0 × 10.3)	1968	①('69) ②('82)
OD' (Revet- ment)	Steel walled pipe piles (1016.0 × 10.3)	1968	
OI (Berth)	Steel pipe pile (508.0 × 9.5) Steel sheet pile (KSP-IV)	1973	②④('86)
b (Bridge)	Steel pipe pile (914.4 × 12)	1971	②⑤('87)
W8 (Revet- ment)	Steel sheet pile (KSP-IV)	1971	②('88)
SA (Berth)	Steel pipe pile (609.6 × 12)	1973	②④('87)
W5 (Revet- ment)	Steel sheet pile (KSP-IV)	1971	
W4 (Revet- ment)	Steel sheet pile (KSP-IV)	1971	
NA (Berth)	Steel pipe pile (800~914.4 × 12~15.88)	1985	②, ③('85)
W3 (Revet- ment)	Steel sheet pile (KSP-IV)	1971	②('71) ②④('86)

*1: Corrosion protection method:

- ① Cathodic protection by impressed current
- ② Cathodic protection by aluminum alloy anode
- ③ Heavy duty polyethylene coated pipe (KPP)
- ④ Coating
- ⑤ Repair

護岸では建設と同時に電気防食を適用したが、他の護岸・岸壁においては建設してから3~20年後に電気防食を適用したところもあれば、OD' 護岸のように22年間経過した現在も無防食のままのところもある。E ベース、東海水取水口クラゲ防止網支柱(a地点)、O 護岸、P ベース、R ベース、東西連絡橋(b地点)については4章で述べるように改造・補修工事を行っている。

3 鋼材の腐食状況

3.1 西工場・生浜地区での腐食調査

1985年に西工場・生浜地区全体の港湾鋼構造物について、超音波厚さ計を用いた肉厚測定を実施した。調査地点は、護岸・岸壁法線方向約50 mおきに1点とした。Fig. 3 に測定箇所および肉厚測定

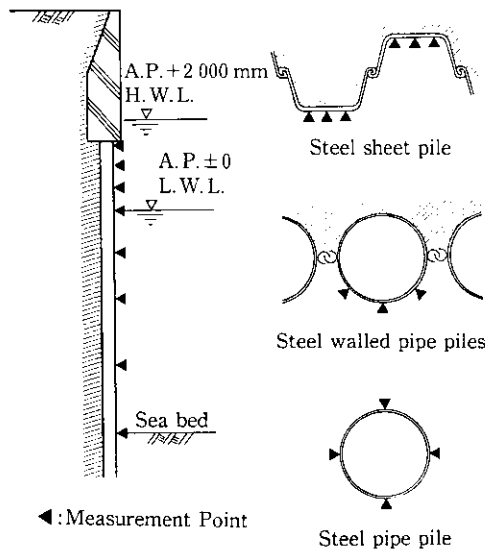


Fig. 3 Measurement point of steel plate thickness

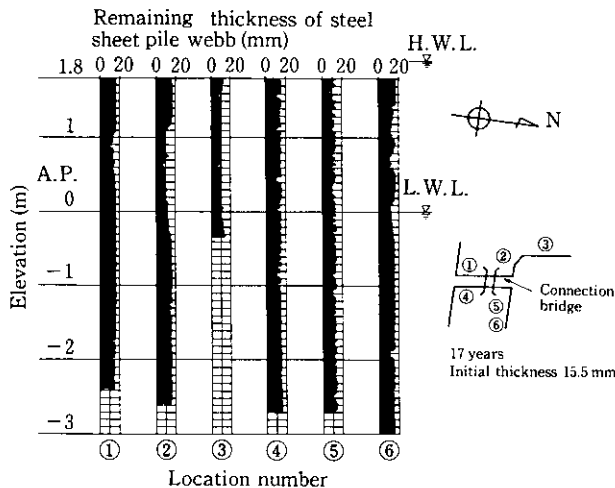


Fig. 4 Results of thickness measurement at W8 revetment

点を示す。測定箇所としては、H.W.L.~L.W.L.間は0.5 m おき、L.W.L.~L.W.L.-2.0 m 間は1.0 m おきに1点とし、全部で5~9点測定した。肉厚測定点としては、鋼矢板は凸面および凹面それぞれ3点、鋼管杭は外周の4点、鋼管矢板は1本の鋼管につき海側の3点を取り、それぞれの肉厚測定点において3回の測定を行い、平均値をとった。

1987年には西工場 W8 護岸において、垂直方向に1 cm おきに肉厚データが得られる、超音波厚さ計を用いた計測システムを使用して、垂直方向の連続的な肉厚分布を調査した。その結果を Fig. 4 に示す。測定地点は東西連絡橋の両側にある鋼矢板護岸の地点①~⑥であり、建設後16年間無防食の状態にあったものである。いずれも鋼矢板の凸面の測定値である。各調査地点ごとに肉厚減少プロフィールのパターンは異なるが、いずれの地点でも AP-400~AP+1800 mm (矢板頭部コンクリート下端)間の腐食が著しく、最も激しい箇所では15.5 mmの公称肉厚に対して約12 mmの肉厚減少がみられ、残存肉厚はきわめて小さくなっていた。従来の報告^{6,7)}によれば、平均干潮面直下に集中腐食と呼ばれる著しい腐食が生じやすく、干満帯 (L.W.L.~H.W.L.間)の腐食は比較的小さいとされ

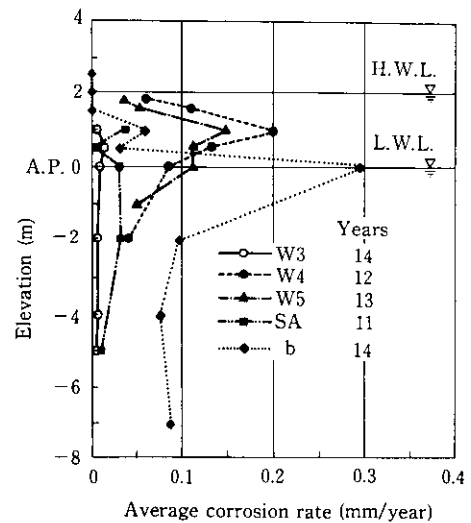


Fig. 5 Results of thickness measurement at West Plant

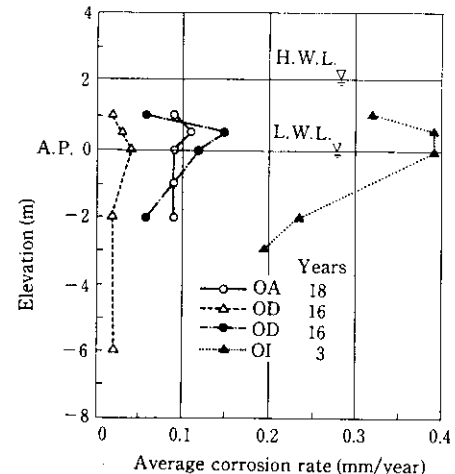


Fig. 6 Results of thickness measurement at Oihama area

ているが、今回の調査では干満帯に集中腐食が生じているのが特徴である。

西工場、生浜地区での腐食調査結果(1985年)を Fig. 5 および 6 に示す。W3 護岸は建設以来アルミニウム合金陽極による電気防食を施していたため、平均腐食速度は0.008 mm/year と非常に小さかった。これに対して、無防食の W4, W5 護岸、東西連絡橋 (b地点) および SA パースでは、場所により腐食速度の違いがみられた。また、腐食速度の最大値は L.W.L.~M.S.L.間の部位にあり、その値は0.04~0.3 mm/year であった。AP-2.0 m 以下の海中では0.1 mm/year 未満の値となっていた。従来の調査^{6,7)}では、鋼矢板凸面の平均腐食速度は、M.S.L. 付近で0.057 mm/year, L.W.L. 付近で0.126 mm/year, 海水中上部で0.068 mm/year であることが報告されている。これに対して、W4 および W5 護岸の場合、L.W.L. 付近および海水中上部では従来の調査結果と同程度の腐食速度であるが、M.S.L. 付近では約1.6倍の腐食速度であり、M.S.L. 付近における集中腐食が著しいことがわかる。一方、b地点の鋼管杭では、L.W.L. にピークがみられ、L.W.L. 以下の腐食速度は鋼矢板のそれよりも大きく、従来の調査結果に近い腐食速度プロフィールとなっていた。SA パースの鋼管杭については、干満帯付近の集中腐食は認められなかった。「港湾の施設の技術上の基準・同解説」⁹⁾にお

ける無防食鋼材の腐食速度は、H.W.L. 以上の飛沫帯が0.3 mm/year, H.W.L.~L.W.L. の干満帯が0.1~0.3 mm/year, L.W.L.~海底面間の海中帯が0.1 mm/year, 海底土中部が0.03 mm/yearである。これらは Fig. 5 に示した無防食部の平均腐食速度の最大値に近い値である。

つぎに、Fig. 6 についてみると、OD パースは建設以来電気防食を行っているため、腐食速度は深さ方向にはほぼ一定で0.05 mm/year以内と小さかった。OA パースは、OD パースと同様に、建設以来電気防食を適用していたにもかかわらず、腐食速度は0.09 mm/yearと大きかった。これは、建設時に設置した外部電源方式の電気防食装置がある期間故障し、無防食状態にあったためと思われる。一方、無防食であったOD' 鋼管矢板壁およびOI パースは、干満帯での腐食が激しく、西工場と同様の傾向を示していた。OI パースの腐食速度がピーク値で0.39 mm/yearと著しく大きいのは、この矢板が特殊な構造で、両面を海水にさらされており、両面からの腐食が進行していたためである。片面の腐食速度に換算すると、干満帯における腐食速度は約0.2 mm/yearとなる。

3.2 本工場Pパースでの腐食調査

腐食により肉厚が減少しつづけるとやがて鋼材に貫通孔がみられるようになる。前述したように、港湾構造物の平均干満面直下からL.W.L. 付近の干満帯では、鋼に激しい局部腐食が発生することが知られている⁹⁾。港湾関係ではこの種の局部腐食をとくに「集中腐食」と呼んでいるが、千葉製鉄所内においても、無防食状態で十数年以上経過した構造物のいくつかに「集中腐食」による貫通孔が確認された。

本工場Pパースは1971年に建設されたが、無防食であったため腐食が激しく、1985年頃には両面を海水にさらされている鋼矢板に貫通孔がみられるようになった。1990年に補修工事を行った際に腐食状況を調査した。鋼矢板はII型であり、300枚のうちの270枚において公称肉厚10.5 mmのウェブ凸面、凹面両方ともに、L.W.L.~L.W.L.+1200 mm(矢板頭部コンクリート下端)間に約20~150 mmφの円形に近い貫通孔がみられた。また、海上に張り出した建家の柱を支える鋼管杭(外径508.0 mm, 肉厚7.9 mmおよび外径660.0 mm, 肉厚7.9 mm)40本のうちの8本においても、L.W.L.~L.W.L.+1200 mm(杭頭部コンクリート下端)間に約100~700 mmφの円形に近い貫通孔がみられた。建設後19年を経過していることから、貫通孔部の局部腐食速度は鋼矢板では両面で0.55 mm/year以上、鋼管杭では0.42 mm/year以上に達していたと考えられる。

また、肉厚調査からは、干満帯の貫通孔以外においては、鋼矢板ウェブ部は公称肉厚10.5 mmに対して平均残存肉厚4.0~6.6 mmであり、腐食速度は0.21~0.34 mm/year、鋼管杭は公称肉厚7.9 mm

に対して平均残存肉厚4.3~6.0 mmであり、腐食速度は0.1~0.19 mm/yearであることがわかった。

さらに、A. P+1300 mm 付近の鋼矢板頭部のコンクリートをコア抜きし、コンクリートに被覆された部分の鋼矢板の腐食状況を調査したが、ほとんど腐食が進行していないことが明らかになった。

Pパース鋼管杭の貫通孔を Photo 1 に示す。

4 腐食対策

4.1 電気防食

電気防食は、現在すべてアルミニウム合金陽極による流電陽極方式を採用している。陽極の取付作業状況を Photo 2 に示す。設計上の陽極耐用年数は10年とし、電気防食開始時の防食電流密度についてはOパースでの仮通電試験結果より、海水中130 mA/m², 海底土中30 mA/m², 捨石中60 mA/m²として設計している。陽極設計寿命の算出の際には、経年の所要防食電流が初期防食電流の半分程度になることを考慮している。また、防食電位は-800 mV(飽和甘こう電極基準)としている。陽極消耗速度は水質、水深等の環境変化により設計消耗速度とは異なる可能性がある。そこで、防食管理として、陽極取付以後、防食電位より卑電位に保持されているか否かを確認するため、毎年1回電位測定を行い、また、防食電位より貴電位の地点があったり、経過年数が設計上陽極耐用年数に近づいたりしたところについては、潜水士により陽極表面の付着物を除去して陽極の形状、寸法を実測し、残寿命、陽極の消耗速度(消耗重量/経過年数)、陽極消耗比率(消耗速度/設計消耗速度)などを調査し管理している。

1979年に陽極を設置した6地区について、1988年に陽極調査を行ったところ、C, Lパースについては、陽極消耗速度の測定値は設計消耗速度とはほぼ一致していた。しかし、B, D, QおよびOAパースでは、設計上陽極耐用年数(10年)に加うるに1~4年の残存寿命があることが判明した。この原因としては、2300 A·h/kgと見積もったアルミニウム合金陽極の単位有効電流量が実際にはそれ以上であったこと、エレクトロコーティングによる防食電流密度の低下が大きかったこと、当初設計時に比べて水深が浅くなり海中の鋼材面積が減少したこと、水質が改善されたこと、近接構造物から防食電流の流入があったこと等が考えられる。

電位測定および陽極調査によって陽極の消耗状態を確認することは陽極の更新時期、周辺環境の変化を推定するのに重要である。

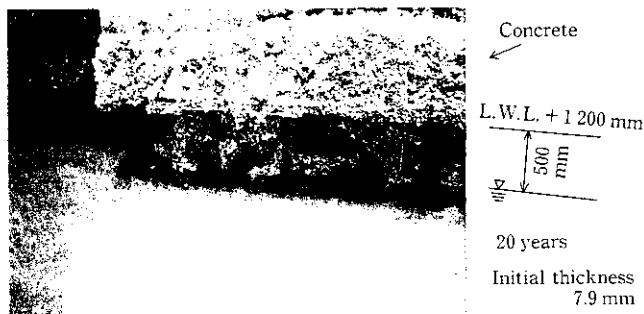


Photo 1 Corrosion of steel pipe piles at P berth

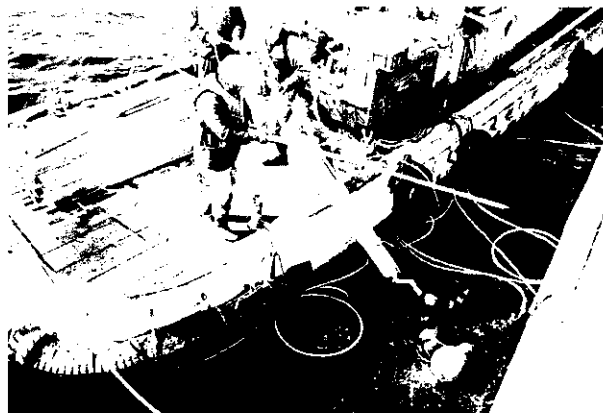


Photo 2 Aluminum alloy anode installation

4.2 電気防食と塗覆装の併用効果

海中部では非常に有効な電気防食も飛沫帯では効果がなく、干満帯では水面下浸漬のときしか効果がないので、飛沫帯および干満帯に対しては塗装や有機ライニング等の塗覆装による防食が必要となる。千葉製鉄所においても、従来より飛沫帯に対してはタールエポキシ樹脂塗料等による塗装を行ってきた。また、1986年よりW3護岸、OIバース、SAバースで干満帯における水中硬化型樹脂ライニングの施工を行った。

電気防食と干満帯における塗覆装を併用すると、干満帯における防食電流をほとんど必要としなくなるため、陽極の消耗が抑制され、寿命が延びることが報告されている¹⁰⁾。そこで、SAバース取付護岸において、電気防食と塗覆装を併用した場合の電位および防食電流の測定を行った。

SAバース取付護岸は、1973年に建設以来無防食であったが、1987年7月に陽極の取付、1987年12月に干満帯の水中硬化型エポ

キシ樹脂ライニングをそれぞれ行った。

電位および防食電流の1日の変化を、塗覆装の前後で比較したものをFig. 7に示す。塗覆装を行う前は潮位の変動に伴って、鋼矢板の電位および防食電流が変化した。塗覆装後は潮位が変動しても電位、電流の変化はみられなくなり、塗覆装前に比べて電位は約110 mV 卑となり、防食電流は約1.2 A (約57%) 減少した。

電位および防食電流の経時変化をFig. 8に示す。1987年12月の塗覆装工事後、干満帯において電位が低下しはじめ、また、電流も減少しており、干満帯の塗覆装の効果が現われていた。

このように、干満帯に塗覆装を行った場合には電気防食の防食電流が減少するため、アルミニウム合金陽極の寿命が延びることが期待できる。また、塗覆装の劣化の程度に応じて防食電流は増加すると考えられるので、逆に、電位や防食電流の測定により塗覆装の健全度を診断することも可能である。

4.3 腐食した鋼構造物の補修

腐食によって劣化した鋼構造物に対して補修工事を実施したものの一覧をTable 2に示す。これらの共通点は、建設当初から補修

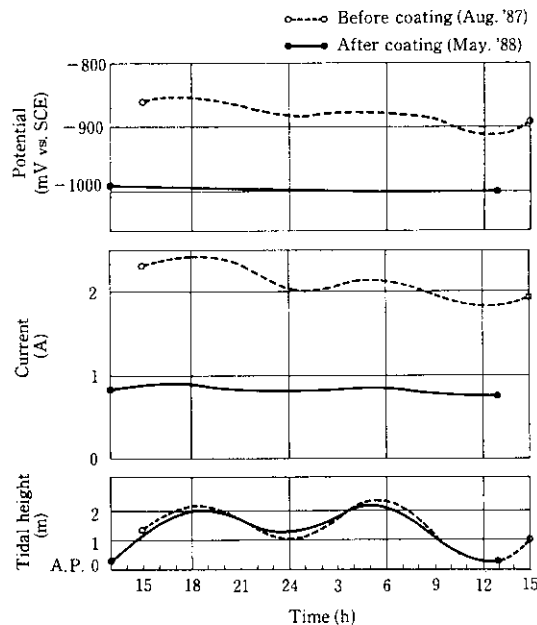


Fig. 7 Change of potential and current in a day

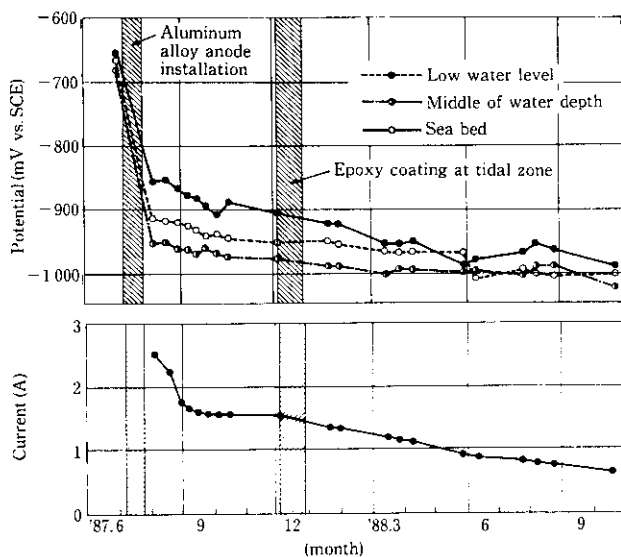


Fig. 8 Change in potential and current with time

Table 2 Repairing method for wharves and revetments at Chiba Works

Name	Year	State of corrosion	Repairing method
R berth	1979	- Steel pipe piles heavily corroded - Some localized holes through steel plate at the piles	- Steel plate weld at the holes - Aluminum alloy anode installed
E berth	1984	- Steel pipe piles heavily corroded - Remaining wall thickness of piles were 7.5 mm to 8.5 mm (initial 9.0 mm) - Some localized holes through steel plate at the piles	- Protection by polyethylene coated pipes (KPP) - Additional KPP piles driven
O revetment	1984	- Steel pipe piles and steel plates heavily corroded - Some holes through steel plate at the plates	Steel plate covering and cement mortal injection
Connection bridge (b)	1987	- Steel pipe piles heavily corroded - Remaining wall thickness of piles were 7.6 mm (initial 12.0 mm)	- Protection by urethane resin coated pipes and concrete injection - Aluminum alloy anode installed
Sea water entrance (a)	1989	- Steel pipes heavily corroded - Some localized holes through steel plate at the piles	Replaced by KPP piles
P berth	1990	- Steel pipe piles and sheet piles heavily corroded - Remaining wall thickness of piles were 4.3 to 6.0 mm (initial 7.9 mm) - Some localized holes through steel plate at the pipe piles and sheet piles	- Protection by urethane resin coated pipes and cement mortal injection - Steel plate weld at the hole of the sheet piles

を行うまで無防食状態のままであったことである。補修方法はRバース、O護岸、東西連絡橋(b地点)、Pバースのように既設構造物の腐食部をあて板や外管により補修するタイプと、Eバースや東海水取水口クラゲ防止網支柱(a地点)のように既設構造物を撤去あるいは既設に隣接して新規の構造物をつくるタイプとの二つに分けられる。

Rバースでは、鋼管矢板に貫通孔が生じ、背面土砂が流出して陥没したため、貫通孔にあて板を溶接により固定したうえで電気防食を施した。

Eバースでは、腐食した鋼管杭に外径がひとまわり大きい重防食鋼管杭(KPP パイル)をかぶせて、間隙にコンクリートを打設して補修した。

O護岸では、鋼板土留壁に貫通孔があき、背面土砂が流出して陥没した。既設土留壁の前面に鋼板をボルト締めによって貼り付け、間隙にセメントモルタルを充填した。

東西連絡橋(b地点)の橋脚の鋼管杭は、Fig. 5 に示すように、L.W.L. 付近の腐食が著しかったため、ウレタンエラストマーで被覆した半割鋼管を干満帯部分に設置し、溶接で外とう管を形成したのちに間隙に水中コンクリートを打設して固定した。

東海水取水口クラゲ防止網支柱(a地点)の補修では、既設腐食杭に隣接して重防食鋼管杭を打設し、その後、既設杭を撤去した。

Pバースでは3.2に述べたように、鋼矢板および鋼管杭に貫通孔が発生していたため、鋼矢板についてはあて板を溶接し、また、鋼管杭については、水中格点工法¹¹⁾を応用したウレタンエラストマー被覆の外とう管方式による補修を行った。

4.4 腐食鋼管杭の二重管式補修方法

Table 2 で述べた補修実績の中で、二重管による補修方法について述べる。

4.4.1 二重管式補修方法の実物大実験¹²⁾

東西連絡橋(b地点)で橋脚用鋼管杭を二重管方式で補修した際に、現地工事に先立ち、補強効果確認のための実物大模型実験を行った。

実験で比較検討した構造タイプを Fig. 9 に示す。腐食部が完全断面欠損で、曲げに対しては外管により補強するタイプ1、タイプ1と同様に完全断面欠損で、曲げに対しては外管で補強し、軸力に対してはリブにより補強するタイプ2、腐食部が肉厚半減で、曲げに対しては外管で補強し、軸力に対しては残存肉厚で対応するタイプ3、健全鋼管のタイプ4の4種類について、曲げ試験と圧縮試験を行った。なお、腐食鋼管杭モデルには、外径 508.0 mm、肉厚 9.0 mm、補強鋼管モデルには外径 720.0 mm、肉厚 7.6 mm の鋼管を用いた。

曲げ試験での荷重と供試体中央変位量との関係を Fig. 10 に示す。健全鋼管のタイプ4に比べて腐食部を補強したタイプ1～タイプ3の場合は、同一荷重に対する変位が小さく、外管による曲げ剛性の補強効果が現われている。

圧縮試験での荷重と頭部変位量との関係を Fig. 11 に示す。各ケースとも荷重 P が 100 tf 付近までは同じような傾向を示しているが、タイプ1は健全鋼管のタイプ4に比べて最大荷重 P_{max} が 20 %程度であり、軸力に対する補強効果は小さいことがわかる。一

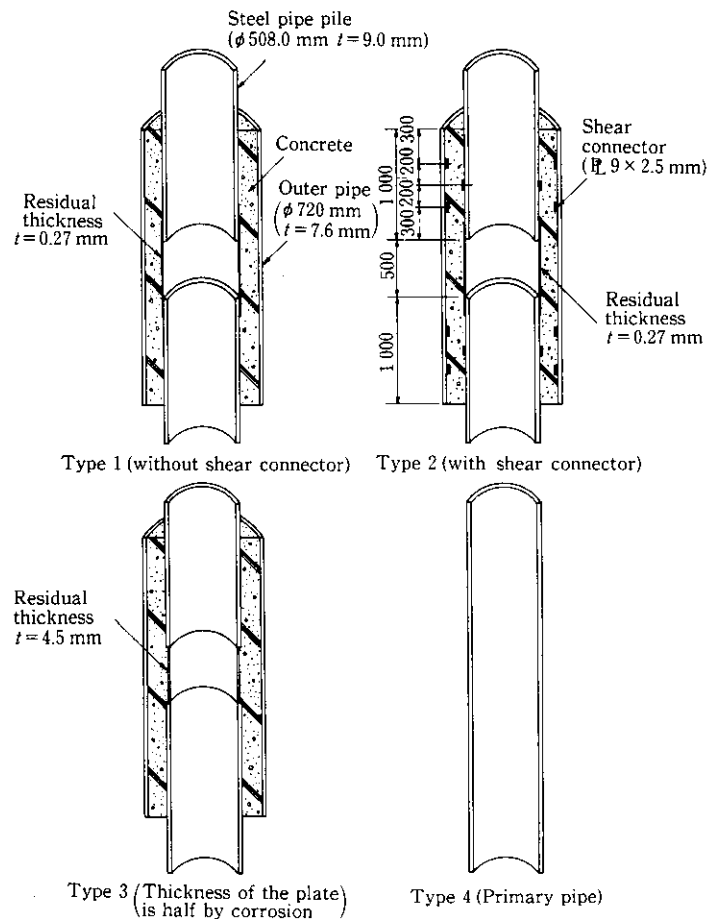
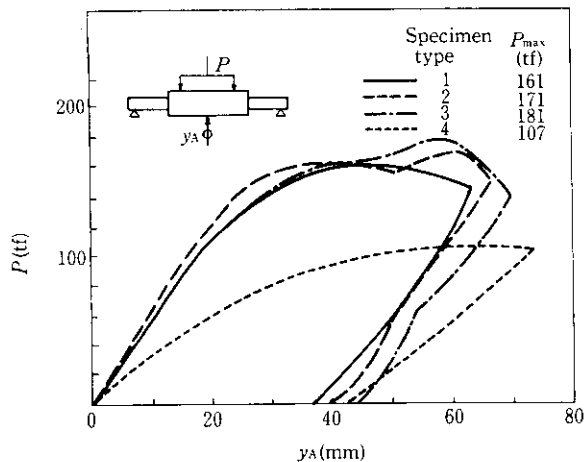
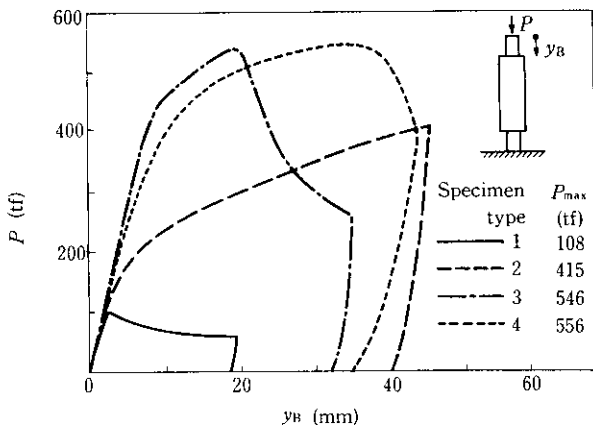


Fig. 9 Specimens for loading tests


 Fig. 10 Load (P)-displacement at the centre (y_A) in the bend test

 Fig. 11 Load (P)-displacement at the top (y_B) in the compression test

方、リブ有りのタイプ2は健全鋼管のタイプ4に比べて同一荷重に対する変位量 y_B は多いが、最大荷重 P_{max} は健全鋼管の約85%の値を示しており、リブにより軸力伝達効果が得られている。これらの実験結果より、外管による補修方法は曲げに対して十分な補強効果があり、さらに、リブを設けることにより軸力に対する補強効果も期待できることが確認された。

4.4.2 P パース鋼管杭の補修

Photo 3 に P パース鋼管杭の補修後の状態を示す。P パース鋼管杭は、3.2 に述べたように L.W.L.~L.W.L.+1200 mm の範囲の残存肉厚が4.3~6.0 mm で、場所によっては断面欠損があり、軸力および曲げに対して補強を行う必要があった。そこで、施工性、経済性および信頼性について補修工法の比較検討を行った結果、水中格点工法¹¹⁾を応用した二重管式補修方法を採用することとした。腐食杭より外径の大きい半割状態の鋼管を鋼管杭の外周にセットし、外管継目をボルトで連絡したのち、一体化を図るため腐食杭と外管とのすき間に膨張コンクリートを充填した。補修対象杭は、外径508.0 mm、肉厚7.9 mm のものが34本、外径660.0 mm、肉厚7.9 mm のものが6本の合計40本である。外管の直径は腐食杭とのすき間が10 cm 以上となるように、また、長さは腐食範囲よりさらに下方1.0 m までカバーできる寸法とした。さらに、外管には、腐食対策としてあらかじめ工場でのウレタンエラストマー被覆を行

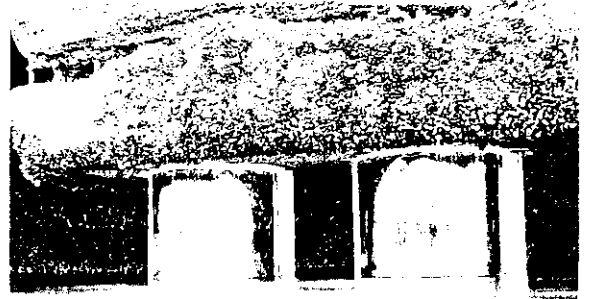


Photo 3 Repairing of steel pipe piles at P berth

ったものを用い、継手部には水中硬化型エポキシ樹脂ライニングを行った。

4.5 重防食鋼管杭 (KPP パイル) の適用

KPP パイルとは、厚さ2.5 mm のポリエチレンシートをブラスト処理した鋼管外面に巻きつけたものである。この製品の最大の特長は、ポリエチレン層が優れた耐食性、耐候性、耐衝撃性を持っているため、長期間にわたってメンテナンスが不要であることである。当社では1984年から本格的に生産・販売を行っており、社内外において多くの実績を有している。

千葉製鉄所における利用実績を Table 3 に示す。1984年にEパースの補修で51 t 利用したのをはじめとして、その後、1990年までの7年間に計5914 t の KPP パイルを利用している。特に、NAパースの建設(1985年)¹⁸⁾においては外径800~914 mm の KPP パイルを450本打設し、杭打時の被覆損傷防止対策の確立や岸壁上部工の軽量化等 KPP の利用技術の蓄積に大いに役立った。KPP パイルは、新しく岸壁を建設する際の鋼管杭の防食対策として極めて有効であるが、4.3 に述べたように、腐食劣化した鋼構造物のリフレッシュにも活用できる。

Table 3 Application list of KPP piles at Chiba Works

Name	Year	Diameter (ϕ mm)	No. of piles (set)	Weight (tf)
E berth	1984	609.6~762.0	20	51
NA berth	1985	800~914	450	5210
a	1989	318.5	31	29
OD berth	1990	609.6~1016	43	624
Total				5914

Photo 4 はEパースにおける KPP の利用例である。中央部付近の腐食鋼管杭に KPP パイルをかぶせ、さらに、その周辺部には新しく KPP パイルを打設することにより、腐食劣化した栈橋を再生した。

防食に関してメンテナンスフリーが達成される KPP パイルは、今後ますます需要が増えるものと思われる。

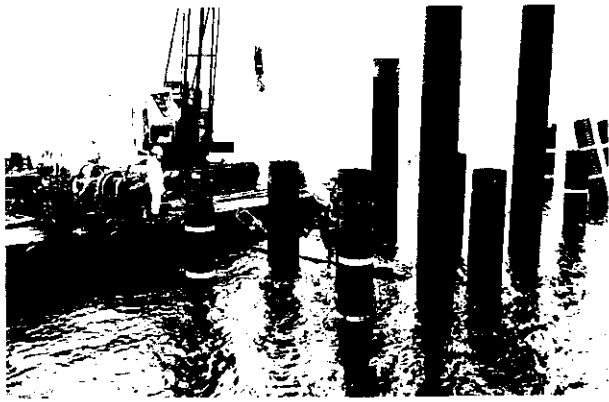


Photo 4 KPP pile installation for the renewal of E berth

5 まとめ

千葉製鉄所内における港湾鋼構造物の腐食状況、防食技術および補修方法について報告した。結果をまとめると次のとおりである。

- (1) 西工場・生浜地区での鋼管杭、鋼管矢板および鋼矢板無防食部の干満帯における平均腐食速度は、約 0.1~0.3 mm/year であり、比較的高い値となっていた。また、本工場における鋼管杭、鋼管矢板および鋼矢板の干満帯に集中腐食による貫通孔が認められ、その箇所での腐食速度は片面で約 0.3 mm/year 以上

の値となっていた。

- (2) アルミニウム合金陽極による電気防食を施した鋼材の平均腐食速度は 0.008 mm/year 以下であり、電気防食の防食効果が確認された。
- (3) 電気防食を電位測定および陽極調査によって管理することは、陽極寿命、防食効果を把握するうえで有効である。電気防食と干満帯における塗覆装を併用した場合には防食電流が減少し陽極寿命が延びる。
- (4) 腐食鋼管杭の二重管式補修方法は、実物大実験によって十分な補強効果が確認され、施工性も良く、有用な工法の一つである。
- (5) 重防食鋼管杭 (KPP パイル) は長期間にわたりメンテナンスフリーで用いることができ、被覆コストも比較的安く、長期的にみて経済的である。港湾構造物の新設・リフレッシュにおける極めて有効な構造材料である。

今後の課題としては、次のことがあげられる。

- (1) 現在もまだ無防食の鋼製護岸・岸壁が残されており、それらの構造物に対する電気防食の適用を推進する必要がある。
- (2) 干満帯においては、電気防食の効果が十分でないため、別途塗装やコンクリート被覆等の対策を進めなければならない。
- (3) 電気防食の陽極取替方法や塗覆装の施工方法に関して、経済的な工法を開発する必要がある。
- (4) 定期的な腐食調査・防食効果調査により、各構造物の腐食に対する安全性を常に把握し、確実な維持・管理を継続することが重要である。

参考文献

- 1) 福田 功、高橋富男：「港湾構造物における補修の考え方と実例、係留施設」, 月刊建設, 32 (1988) 5, 34-40
- 2) 橋本正治、岡本勝昭、森川孝義：「水島製鉄所港湾構造物における電気防食設備と維持管理」, 川崎製鉄技報, 17 (1985) 2, 185-192
- 3) 善 一章：「港湾施設の腐食と防食」, 防食技術, 34 (1985) 3, 184-189
- 4) 長野昌雄、柳 豊和、木村 保、岡本勝昭、和田 啓、塩田啓介：「製鉄所建設とウォーターフロントエンジニアリング」, 川崎製鉄技報, 20 (1988) 4, 261-268
- 5) 沿岸開発技術研究センター：「港湾鋼構造物防食マニュアル」, (1986)
- 6) 横井聰之：「港湾構造物の腐食実態と防食対策」, 防食技術, 38 (1989) 7, 390-395
- 7) 横井聰之、阿部正美：「港湾鋼構造物の腐食の実態について」, 土木学会論文集, 403 (1989) VI-10, 85-92
- 8) 社団法人日本港湾協会：「港湾の施設の技術上の基準・同解説」, (1989)
- 9) 中野敏彦：「港湾構造物の劣化防止・補修技術について」, 港湾技術報告会報告概要集, 4 (1987), 184-196
- 10) 阿部正美、横井聰之：「被覆工と電気防食との併用効果に関する実験」, 港湾技研資料, (1985) 537, 1-39
- 11) 堤 一高、根井基雄、城 郁夫：「川崎製鉄千葉製鉄所 15 万トン原料岸壁建設工事について」, 第 25 回全国港湾工事報告会報告概要集, (1979) 217-222
- 12) 堀之内義夫、和田 啓、塩田啓介：「鋼管杭腐蝕部の二重管式補強法に関する実験」, 土木学会第 44 回年次学術講演会, (1989), 852-853
- 13) 富永真生、齋持 敏、木村 保、奥村一郎：「80,000 D.W.T 製品岸壁の建設」, 土木学会論文集, 385 (1987), 116-125