港湾構造物の腐食実態と防食対策

横 井 聰 之*

* ピー・エス・コンクリート株式会社

Actual States of Corrosion and Corrosion Control Methods of Steel Structures in Marine Environments

Toshiyuki Yokoi*

* P. S. Concrete Co., Ltd.

The actual states of corrosion of steel structures in marine environments based on field investigations are introduced. Especially the states of intensive corrosion under mean low water level and the conditions in which such corrosion has a tendency to occur are shown. And the design of corrosion control methods is reviewed.

Key words: marine environment, corrosion rate, corrosion control, cathodic protection, lining

1. ま え が き

わが国の港湾構造物においては、栈橋や鋼矢板岸壁などの鋼構造物が多いことが一つの特徴となっている。これらの鋼構造物は、昭和 30 年代後半から大量に建設されてきた。鋼材の高強度、鋼構造物の施工の早さおよびわが国の港湾地域に多い軟弱地盤にも比較的容易に適用できるなどの利点が活用されたからである。

一方、鋼材の欠点は腐食であり、腐食に対しては対策が講じられてきた。しかし、海洋環境における腐食の複雑さ、腐食の進行の予測が困難なことに加えて、構造物はほとんどの部分が海水中に没して腐食の状態に気付にくいなどのため、昭和 50 年代終わりには腐食被害が発生した。

運輸省港湾技術研究所においては、以前から腐食・防食に関する調査・研究を行ってきた。また、港湾建設局等においても、腐食問題に対処するため腐食調査を行ってきた。

本文においては、著者が港湾技術研究所に在職中に担務した調査等をもとに、港湾鋼構造物の腐食の実態と防食対策について記述する。

2. 海洋環境における腐食の特徴

海洋環境において、鋼材に対する海水の作用の仕方は、常に海水中に没している部分、潮位変動により浸水と大気中への暴露を繰り返す部分、海水飛まつや海塩粒子をうける部分など、鋼材が存在する場所により異なる。港湾構造物はこれらの異なる環境をまたがって存在してい

図 1 集中腐食の調査例

* 〒100 東京都千代田区丸の内 3-4-1 (4-1, 3-Chome, Marunouchi, Chiyoda-ku, Tokyo, 100 Japan)

る。

港湾構造物の最も特徴的な腐食の形態は、平均干潮面直下が集中的に著しく腐食することである。港湾関係ではこの形態の腐食を従来から集中腐食と呼びならわしてきた。図 1 に集中腐食をおこしている栈橋鋼管杭の腐食調査結果の例を示す。なお、集中腐食は常に生じるわけではない。

集中腐食は、平均干潮面直下付近をアノード、平均水面付近をカソードとするマクロ腐食である。干満帯部分の鋼材は干潮時には大気中で 3 価の酸化物に酸化されるが、満潮時に海水に浸水すると 2 価の酸化物に還元される。その時の還元電流が大きく、アノード部にあたる平均干潮面直下付近が腐食すると考えられている^{1),2)}。

3. 港湾構造物の腐食の実態

次に、集中腐食が実際にはどの程度生じているか、また、どのような条件の時に生じやすいかを実態調査の結果に基づいて述べる³⁾。

3.1 腐食速度

表 1 に無防食の構造物 73 件の調査結果から求めた鉛直方向各環境ごとの腐食速度を示す。表において H. W. L. (さく望平均満潮面) 付近は平均満潮面付近より上方、M.S.L. (平均水面) 付近は平均満潮面付近から平均干潮面付近まで、L.W.L. (さく望平均干潮面) 付近は平均干潮面付近から L.W.L. 付近まで、海水中上部は L.W.L. 付近から -2 m 付近まで、海水中中下部は -2 m 付近から海底面までを指す。なお、潮位の高さは、上からさく望平均満潮面、平均満潮面、平均水面、平均干潮面、さく望平均干潮面の順であり、さく望平均干潮面はほぼ

表 1 環境および鋼材種類別腐食速度

鋼材種類	腐食速度(平均値) mm/y					
	H.W.L. 付近	M.S.L. 付近	L.W.L. 付近	海水中上部	海水中中下部	海底土中
凸矢板	0.100	0.057	0.126	0.068	0.050	0.037
凹矢板	0.092	0.054	0.061	0.048	0.041	0.031
鋼管杭	0.166	0.066	0.200	0.084	0.067	0.034
鋼材種類	標準偏差 mm/yy					
	H.W.L. 付近	M.S.L. 付近	L.W.L. 付近	海水中上部	海水中中下部	海底土中
凸矢板	0.104	0.031	0.097	0.044	0.031	0.028
凹矢板	0.076	0.041	0.043	0.038	0.026	0.015
鋼管杭	0.101	0.033	0.137	0.053	0.043	0.031

表 2⁴⁾ 環境別腐食速度 (イギリス等) (許諾をえて転載)

場 所	腐食速度(平均値) mm/y			
	飛沫帯	干満帯	L.W.L. 付近	海水中
イギリス	0.09	0.04	0.09	0.05
キプロス	0.10	0.04	0.09	0.05
アラブ首長国連邦	0.13	0.07	0.07	0.08
場 所	標準偏差 mm/y			
	飛沫帯	干満帯	L.W.L. 付近	海水中
イギリス	0.05	0.03	0.08	0.04
キプロス	0.07	0.03	0.05	0.04
アラブ首長国連邦	0.06	0.04	0.03	0.08

±0 m にあたる。また、凸矢板は海側に突き出ている面、凹矢板はくぼんでいる面を表す。腐食量は鋼材の表裏両面を合わせて測定されるから、腐食速度は両面に対する値である。ただし、海水に接する表面に比べて裏面の腐食量ははるかに少ないから、安全側にみると、近似的にはこの値を海水に接する面の腐食速度とみることができる。

表にみられるように、L.W.L. 付近の腐食速度の平均値および標準偏差は M.S.L. 付近および海水中よりも大きく、とくに凸矢板と鋼管杭において顕著である。これは、集中腐食のデータが含まれているからである。なお、矢板は凸面に集中腐食が生じるのが特徴である。また、鋼管杭の腐食速度は矢板よりも全体的にやや大きい。

参考のため、イギリス、キプロスおよびアラブ首長国連邦において行われた調査結果⁴⁾を表 2 に示す。鋼材の種類別に分けてないが、ほとんどは矢板である。表 1 と表 2 の環境区分はほぼ対応していると考えられる。

表 1 と表 2 を比較すると、L.W.L. 付近を除いてほぼ一致している。表 2 の L.W.L. 付近の値が表 1 よりも小さいのは集中腐食のデータが少ないからである。一般の海域においては海中部の腐食速度は、地域による差があまりないと言われているが、集中腐食の多少を除けば二つの表はそれを示している。

腐食速度の値については、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」においても、今回の改定にあたって集中腐食を考慮した記述に変更している⁵⁾。

3.2 腐食パターンの分類

集中腐食の傾向の有無を知るには、平均干潮面直下付近の腐食速度のみでなく、腐食速度の鉛直方向の分布形を調べることが有効である。

腐食速度の鉛直方向の分布形を図 2 に示す 3 種類の

図 2 腐食パターンの分類

図 3 鋼材種別別腐食パターンの分布

パターンに分類する。図 2 において、パターン a は、平均干潮面直下付近に腐食速度のピークが明瞭に現れ、その値（平均値）が 0.2 mm/y 程度より大きい場合である。パターン b は、ピークの値が $0.2 \sim 0.1 \text{ mm/y}$ 程度で、パターン a ほどピークが明瞭に出ない場合である。また、パターン c は、干満帯から海中部にわたって腐食速度が 0.1 mm/y 程度以下でピークがない場合である。集中腐食の定量的な定義はないが、パターン a は集中腐食に該当し、パターン b もややその傾向があると言ってよいと思われる。

全国各地の無防食の構造物 212 件の調査結果を矢板、鋼管杭に分けて腐食パターンの度数を示すと、図 3 のようになる。また、両者合わせて各パターンの割合は次のとおりである。

パターン a : 17%

パターン b : 44%

パターン c : 39%

図 3 にみられるように、パターン a の割合は鋼管杭の方が矢板よりも高く、前述の腐食速度とあわせて、鋼管杭の方が腐食しやすい傾向がみられる。

3.3 腐食パターンと要因との関係

次に、この腐食パターンの割合に対して、腐食パターンに関係すると思われる要因について検討する。なお、善⁶⁾ は鋼材露出部上端が高く干満帯部分の露出が広範囲の場合、水深が浅い場合、潮位差が無い場合（潮位差がある場合その大小は関係ない）、淡水が流入している場合に集中腐食が多い傾向があると言っている。

3.3.1 鋼材の種類、構造形式

鋼材の種類については、すでにみたように鋼管杭の方が矢板よりも集中腐食を生じやすい。この点、かつて、戦前に造られた矢板構造物の腐食事例が多く見つかった頃に、矢板の方が集中腐食が多いと思われていたことと異なる。

構造形式については、鋼材の種類に対応して、栈橋に集中腐食が多い傾向があった。セル式係船岸は矢板と鋼管杭より構成されるが、鋼管杭の方に集中腐食を起こしている事例があった。

3.3.2 鋼材露出部上端高さ

鋼材露出部上端高さが高い場合には集中腐食が生じやすいとされているが、これは、マクロセルのアノード部に対するカソード部の面積の比が大きいほどマクロ腐食が生じやすいことによると考えられている。図 4 は露出部分上端が平均水面 (M.S.L.) より高いか低いかに分けて、それぞれ腐食パターンの件数を示したものである。図にみられるように平均水面より低いとパターン c が多く、高いとパターン b が多くパターン a の比率も高い。これより鋼材露出部上端が高いと集中腐食が生じやすいことが確認された。

3.3.3 水 質

水質と腐食との関係については、pH の低下や硫化物イオンの影響、硫酸塩還元菌の作用など明らかにされている。しかし、それらは水質が著しく汚染している場合であって、実際の港湾の水質はそれらに該当するほど汚染していない。また、水質と集中腐食との関係はわかっていない。善⁷⁾ は、水質の指標として透視の程度を用いて検討した結果からは集中腐食と海水汚染とは特に関係

図 4 鋼材露出部上端高さ別腐食パターンの分布

表 3 海域の水質の基準

項目 類型	利用目的の 適応性	基 準 値				
		水素イオン 濃度 (pH)	化学的酸素 要求量 (COD)	溶存酸素量 (DO)	大腸菌群数	Nヘキサン 抽出物質 (油分等)
A	水産1級 水浴 自然環境保全 およびB以下の 欄に掲げるもの	7.8以上 8.3以下	2 mg/1 以下	7.5 mg/1 以上	1000MPN/ 100ml以下	検出されな いこと
B	水産2級 工業用水 およびCの欄に 掲げるもの	7.8以上 8.3以下	3 mg/1 以下	5 mg/1 以上	—	検出されな いこと
C	環境保全	7.0以上 8.3以下	8 mg/1 以下	2 mg/1 以上	—	—

なさそうであると言っている。しかし、実感としては集中腐食は水質が悪そうなところに多いように思われる。

腐食は長期間かかって進行するものであるから、検討には長期間の水質のデータが必要である。しかし、長期間とくに昭和 40 年代なかばまでのデータはそろっていない。存在するデータも pH、溶存酸素、COD など限られている。さらに、水質の各種指標のうち何が影響するのか、あるいはどの指標をとりあげればよいかかわっていない。

このように、水質と腐食パターンの関係を検討するには十分なデータがない。そこで次のようにごく大づかみに検討した。

環境庁告示「生活環境の保全に関する環境基準」では、海域の環境基準として表 3 を与えている。そして各海域は類型が指定されている。いうまでもなく、指定された類型の基準値は、達成目標であって実際の水質を示すものではない。しかし、相対的にはその海域の水質をある程度表しているとみても見当はずれではないと思われる。ともかく、そのようにみなして例えば類型 C の海域の水質は類型 B の海域よりは悪かったとみることにした。その結果、水質の類型と腐食パターンとの関係は図 5 のようになった。なお、類型 A は港湾内では少ないことと類型 B と基準値の数値に近いことから、類型 A、B は合わせて整理した。図にみられるように、類型 A、B ではパターン c が多い。また、類型 C ではパターン b が多く、パターン a の割合も高くなっている。これより、概略の検討ではあるが、水質が良いと集中腐食が発生しない割合が高いと言ってもよさそうである。

3.3.4 淡水の流入

構造物前面に河川水など淡水が流入しているところでは集中腐食が生じることがあると言われている。淡水が流入する場合、淡水が海水より上層となり、淡水に接しているところがカソード、海水に接しているところがアノードとなるマクロセルが形成されるためと考えられている。

図 5 水質類型別腐食パターンの分布

図 6 淡水流入の有無別腐食パターンの分布

図 7 要因別腐食パターンの比率

図 6 に示すように淡水が流入している事例は少ないが、パターン b の割合が高く、パターン c が低い。これより、淡水が流入しているところでは集中腐食傾向がみられることが多いことは認められる。

図 7 に上記 4 項目に対する各腐食パターンの割合を示す。

3.3.5 その他の要因

温暖あるいは寒冷地域など港湾の存在する地域による腐食傾向の相違は特に認められなかった。

潮位差の大小と腐食パターンには関係はみられなかった。なお、前述の善が集中腐食が生じやすい場合として

あげた潮位差の無い場合は特殊な条件である。

波浪、潮流についても、調査対象構造物はほとんどが港内にあって、いずれも小さいこともあり、腐食パターンとの関係はみられなかった。

構造物前面の水深については、前述のように水深が浅いと集中腐食が多い傾向が指摘されていたが、ここで用いたデータからは、水深の浅い構造物の調査数が少ないこともあるが、その傾向は確認できなかった。

イガイやフジツボなどの付着生物と腐食との関係についてはほとんど研究されていない。付着生物については詳しく調べていないが、付着生物と腐食パターンの関係はわからなかった。

4. 港湾鋼構造物の防食対策

4.1 防食設計法の経緯

従来、腐食問題が発生するまでは、港湾鋼構造物の防食対策としては電気防食と腐食しろによる方法がほとんどであった。塗覆装工法については、栈橋鋼管杭の上部にモルタルライニングが用いられる程度であり多くはなかった。

腐食が問題になる干満帯に対しては、電気防食は効率が悪い。また、腐食しろによる方法においては、標準的な腐食速度を用いて設計されていたが、実際には腐食速度のばらつきが大きく、集中腐食を生じることもあり、必ずしも適切に対応できていなかった。

このため、防食法の見直しを行うことになり、運輸省所管の財団法人「沿岸開発技術研究センター」に官民よりなるワーキンググループを設け、さらに専門家よりなる委員会にも諮り、「港湾鋼構造物防食マニュアル」および「港湾鋼構造物補修マニュアル」が作成され（昭和61年）、その後、「港湾の施設の技術上の基準」も改定された。

4.2 防食法の選定

港湾鋼構造物に防食法を適用する場合、鉛直方向に 4

つの区間に分けて考える必要がある。4 区間とは、海上大気部、飛まつ帯および干満帯、海中部、海底土中部である。各防食法の特性を考慮して、各区間の防食法を選定する。図 8 に防食法の組み合わせの例を示す⁸⁾。

4.2.1 海上大気部

通常の係船岸では、海上大気部に鋼材が露出することはほとんどないが、海上大気部には陸上部で適用できる塗覆装工法が適用される。ただし、腐食環境が厳しいことを考慮して、工法および仕様を決める必要がある。

4.2.2 飛まつ帯および干満帯

飛まつ帯および干満帯にも、塗覆装工法が適用される。この部分に適したいくつかの工法のうちから選定する。塗覆装工法の問題点は耐久性である。電気防食は、従来は平均水面以下に適用されていたが、効率的な使い方ではない。なお、海中部に電気防食を適用すれば、干満帯の塗覆装材の劣化、損傷により鋼材が露出しても、没水時に防食電流が流れある程度補ってくれる（図 8(a)）。

4.2.3 海 中 部

海中部には、電気防食、塗覆装工法が適用でき、腐食しろによる方法も常時没水部には場合によっては適用できる。

電気防食の適用性については問題ないが、通常は施設の供用期間中に陽極の再取り付けを行う必要がある。

塗覆装工法を用いる場合は、干満帯から連続して同じ工法を適用できる（図 8 (b), (c)）。塗覆装工法の問題は干満帯と同じく耐久性で、点検、補修が容易でないなど干満帯よりも条件としてはさらに厳しい。塗覆装材の少しの劣化、損傷も見逃さないように点検するのは実際上不可能であるが、定期的に点検を行ってれば、少なくとも被害に直結するような劣化、損傷はとらえることはできると思われる。すなわち、塗覆装工法の採用はメンテナンスの取り組み方とかかわっている。

腐食しろは、採用するとしても、集中腐食を避けて L.W.L. あるいはさらに下からになる（図 8 (d)）。ただ

図 8 防食法の組み合わせ

し、コンクリートに接続する部分の腐食や異種金属接触腐食などがあるので注意する必要がある。また、供用期間中には定期的点検が不可欠である。

耐用期間中のある期間を電気防食で、残りの期間は腐食しろという組み合わせも用いられている(図 8(e))。基本的には腐食しろの場合と同じ問題がある。電気防食期間が終わった段階で、肉厚の確認および耐用年数の見直しを行って、その後の防食設計の見直すことが望ましい。

4.2.4 海底土中部

矢板、鋼管杭とも地盤に打ち込まれるから、海底土中部には塗覆装工法は適用できない。したがって、海底土中部では電気防食が腐食しろになる。

海中部に電気防食を用いる場合には、海底土中部も電気防食になる。海中部が塗覆装工法で海底土中部に電気防食を用いると海中部の塗覆装材の劣化、損傷を補ってくれる(図 8(b))。

腐食しろによる方法は、海底土中の腐食速度は小さく、腐食しろの厚さも薄いから、設計上生じる鋼材の余裕厚さを利用できる場合がある。

4.3 腐食速度の設定と腐食形態の予測

腐食しろにより設計する場合には、腐食速度の設定と集中腐食の可能性の予測が問題となる。腐食しろによらず防食法を適用する場合にも、当該構造物の条件では腐食速度がどの程度になり、集中腐食の可能性があるかを想定することが望ましい。すなわち、腐食環境が厳しいものか否かを判定した上で、防食設計にとりかかることが重要である。

集中腐食を起こさない場合は、腐食速度は標準的な値から大きく異なることはないが、個々の構造物により一様ではない。さらに、L.W.L. 付近の腐食速度は、集中腐食傾向があればかなり変動する。したがって、同一港内の既存の腐食調査結果など類似の条件でのデータの収集や、腐食調査を実施して、当該構造物における腐食速度を設定する必要がある。

集中腐食の有無の予測についても、前述のデータにもとづきある程度は予測がつくが、同一港内の構造物の状態なども調査した上で判定する必要がある。

4.4 電気防食の設計

港湾鋼構造物に適用する電気防食の方式は、おもに維持管理が容易なことから現在ではほとんどすべてが流電陽極方式である。従来、電気防食の適用範囲は、平均水面以下であった。しかし、干満帯では防食効率が悪いこと、万一なんらかの原因により電気防食が不十分な場合には集中腐食のおそれがあることから、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」改定版⁹⁾では平均干潮面以下を原則とすることとなった。

防食電流密度(海中部)の初期値は、通常の場合 100

mA/m²、防食期間中(15 年以上)の平均の防食電流密度は 50 mA/m² を標準とする。

防食率については、テストピースによる試験では 90% 以上、なかには 100% 近い場合もあるが、実構造物の調査では必ずしも 90% 以上確保されていない。実構造物の調査においては、電気防食開始以前の腐食、電気防食の対象外の鋼材背面の腐食等電気防食そのものの以外の要素を含めて算出されるので、防食率は見掛け上小さくなる。実際の設計においては上記の要素も考慮して 90% を標準とするのがよいと考える。

4.5 塗覆装工法の設計

港湾鋼構造物に適用される塗覆装工法には多くの種類がある。そのなかで比較的多く用いられている工法は、モルタルライニング、水中硬化型樹脂ライニング、ポリエチレンライニング、ポリウレタンライニング、ペトロラタムライニングおよび塗装である。

塗覆装工法の設計において最も問題になるのは、工法の選定である。従来、塗覆装工法の実績が少ないことから、各工法の評価は必ずしも定まっていなかった。したがって、工法の選定にあたっては、構造物の形式、部材形状、自然条件、耐用年数、防食範囲、施工条件、メンテナンス、実績、工費等を検討する必要がある。

5. あとがき

以上述べたように、港湾鋼構造物の腐食の実態がかなりの程度明らかになった。一方、塗覆装工法については、現在、試験や追跡調査が進められている。これらの結果をもとに防食設計法の進歩が期待される。

なお、防食法が所定の効果を確実に発揮するには定期的な点検が重要である。(1989 年 5 月 6 日受理)

文 献

- 1) 善 一章: 港湾技研資料, 413, 31 (1982).
- 2) W. Schwenk: *Stahl und Eisen*, 101 [1] 1237 (1984).
- 3) 横井聡之, 阿部正美: 土木学会論文集, 403 [VI-10] 85 (1989).
- 4) J. Mortey, D. W. Bruce: "Survey of steel piling performance in marine environments", p. 17, British Steel Corporation, (1983).
- 5) 港湾の施設の技術上の基準・同解説(改定版)(上巻), p. 238, 日本港湾協会 (1989).
- 6) 善 一章: 港湾技術研究所報告, 15 [3] 198 (1976).
- 7) 善 一章: 港湾技術研究所報告, 15 [3] 192 (1976).
- 8) 港湾鋼構造物防食マニュアル, p. 1-24, 沿岸開発技術研究センター (1986).
- 9) 港湾の施設の技術上の基準・同解説(改定版)(上巻), p. 242, 日本港湾協会 (1989).