

沿岸環境での鋼材暴露及び室内試験に基づく防食工の劣化モデル

大 即 信 明*

Nobuaki OTSUKI

小 林 孝 一**

Koichi KOBAYASHI

西 田 孝 弘***

Takahiro NISHIDA

本稿は、土木学会鋼構造委員会「沿岸環境における鋼・複合構造物の防食及び耐久性評価に関する研究小委員会（委員長：渡邊英一京都大学名誉教授）」で得られた成果の中で、WG1の検討で得られた成果を基に、海洋環境における鋼構造物の防食技術に関して、無防食鋼材及び防食工を施した鋼材の駿河湾暴露試験の結果及び防食工の損傷部における腐食の検討結果をまとめたものである。

キーワード：防食技術，海洋環境，鋼構造物，損傷部，劣化モデル，経時変化

1. はじめに

海洋環境で鋼構造物を建設・維持管理するためには、鋼材の腐食・防食の状況を知る必要がある。しかしながら、無防食鋼材の腐食機構についての知見は相当あるものの、防食工の腐食機構や耐久性についての知見は乏しい現状である。

本稿は、土木学会鋼構造委員会「沿岸環境における鋼・複合構造物の防食及び耐久性評価に関する研究小委員会（委員長：渡邊英一京都大学名誉教授）」で得られた成果の中で、WG1の成果の一部をまとめるものである。WG1の担当は、①長期暴露試験結果の再整理、②防食工劣化の定量的評価モデルの提案、及び③防食仕様／環境別促進試験法の提案、である。本稿は、特に、この①及び②を中心に構成した。

すなわち、駿河湾での無防食鋼材及び防食工の長期暴露試験結果を整理し、特に従来型防食工の劣化では損傷が問題となることを示し、次に、損傷を考慮した定量的評価モデルの提案とその評価結果をまとめたものである。

2. 無防食鋼材の腐食

無防食鋼材の腐食については、一定の知見¹⁾があるので、本章ではその概要を紹介する。しかしながら、実際の鋼材暴露による試験結果は貴重であるので駿河湾での試験結果を紹介する。

2.1 沿岸環境での無防食鋼材腐食の一般的傾向

海洋環境では鋼材が激しく腐食することが知られている。海水は中性領域であるため鋼の腐食のカソード反応は酸素の還元反応、すなわち海水中の溶存酸素に支配される。また海水は塩分を約3.5%含み、電気伝導性も良いため腐食環境として厳しい環境である。沿岸環境で使用される鋼構造物を考えると（例えば、鋼管杭）、海上大気部、飛沫帯、干満帯、海中部、海底土中部、背面土中部など、各部位で環境が異なるため、各部位で異なる腐食となることが知られている^{1),2)}。

港湾鋼構造物に適用された鋼が最大の腐食速度を示す海洋環境は一般的に飛沫帯であるが、これは、海水に濡れる状態において大気中から十分な酸素の供給を受け、しかも波浪の衝撃によるさびの剥離も加わるためと考えられる。ただし、実際の飛沫帯にあたる部分は主として構造上の理由から、その大部分がコンクリートなどで被

* 東京工業大学大学院理工学研究科国際開発工学専攻（〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1 S6-11）
Tokyo Institute of Technology (2-12-1, Ookayama, Meguro-ku, Tokyo, 152-8552, Japan)

** 岐阜大学社会基盤工学科（〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1）
Gifu University (1-1, Yanagido, Gifu-shi, Gifu, 501-1193, Japan)

*** 電力中央研究所地球工学研究所（〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646）
Central Research Institute of Electric Power Industry (1646, Abiko, Abiko-shi, Chiba, 270-1194, Japan)

覆されているため、港湾鋼構造物の腐食が問題となる環境は、干満帯直下の海中部であることが多い。港湾鋼構造物の平均干潮面（M.L.W.L）直下付近では、鋼に激しい局部腐食が発生することが知られているが、これは干満帯直下の海中部と干満帯にある鋼材との酸素の供給速度の違い等によって生じるマクロセル（酸素濃淡電池）が形成されるものと考えられる。

2.2 駿河湾における無防食鋼材の暴露試験^{3),4)}

海洋の飛沫帯、干満帯及び海中部における鋼材を対象に、各種の防食材料及び防食技術の開発とその長期耐久性評価を目的として長期の鋼材の防食技術に関する耐久性の試験が実施されている。1981年に科学技術庁の科学技術振興調整費による「海洋構造物による海洋空間等の有効利用に関する研究」の一環として「防食等による海洋構造物の耐久性向上技術の開発」を建設省土木研究所（現、独立行政法人土木研究所）が担当し、その一部である「飛沫帯及び干満帯における鋼構造物の防食技術に関する研究」が土木研究所と鋼材倶楽部（現、社団法人日本鉄鋼連盟）との共同研究で開始された。1984年3月に静岡県大井川町沖の駿河湾に設置された海洋技術総合研究施設において実施されている。実施状況を図1に示す。

試験体の設置から引き上げまでの期間は、それぞれ2.5年間、5.5年間、9.5年間、14.5年間、19.5年間である。試験体は、初期板厚 $t_0=20\text{mm}$ の炭素鋼L型アングル材（SS400）である。経時的に引き上げた試験体は、ケレン及びサンドブラスト後、腐食生成物除去方法に従い、化学的方法により素地を露出させた。

さらに、試験体の腐食量や腐食表面性状を把握するために、ポイントマイクロメータにより直接板厚計測を行い、腐食量を求めた。

図2にポイントマイクロメータにより計測した板厚減少分布を示す。飛沫帯は板厚減少が大きく、干満帯上部は小さい。干満帯下部と海中部の板厚減少はその中間である。図3に板厚減少、すなわち鋼材の腐食量の経時変化を環境ごとに示す。腐食量は、飛沫部上部、飛沫部下部、干満帯下部、海中部の順であり、干満帯上部は最も腐食量が少なかった。飛沫部では、腐食量が直線的に増加し続けている。干満・海中部でも初期には腐食量の直線的な増加が認められるが、時間経過とともに腐食量の増加が小さくなっている。

図4に腐食速度を計算した結果を示す。ただし、ここに示す腐食速度とは瞬間的な腐食速度ではなく、試験期間の異なる腐食量測定値をそれぞれの暴露期間で割って、時間的に平均した計算値である。すなわち、長期（14.5年、19.5年）の腐食速度には、初期の値を含むことに注意が必要である。図より腐食速度は初期から減少し続け、10年経過後はほぼ一定速度で腐食が進行している。

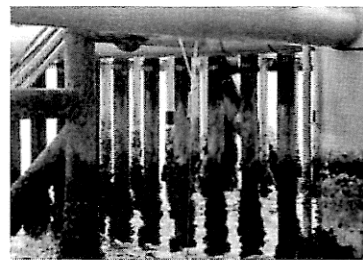


図1 無防食鋼材の暴露状況 [1985年撮影]⁴⁾

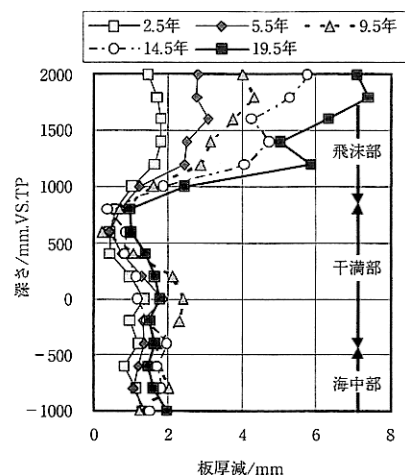


図2 深さ方向の減肉量分布（普通鋼）

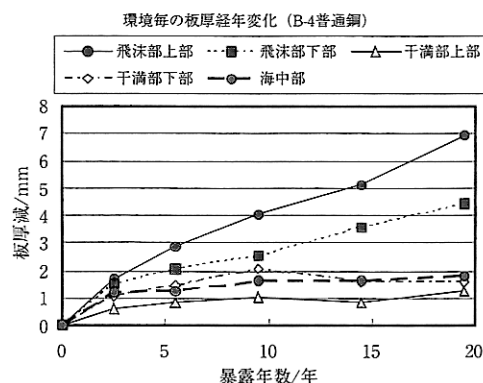


図3 無防食鋼材（普通鋼）の腐食量時間変化

19.5年間という長期にわたって定期的に調査評価し続けた結果、無防食鋼材の腐食速度は飛沫帯が大きく、平均約0.4mm/年であり、干満帯は平均約0.1～0.2mm/年となり海中部の平均約0.2mm/年よりも小さい。この傾向は従来知見とほぼ一致した。しかしながら、19.5年間腐食速度は一定ではなく、初期から10年にかけて徐々に腐食速度が低下してくることが認められた。これは、さび（腐食生成物）の蓄積や付着生物の影響によると思われる。

3. 防食工の劣化—駿河湾暴露試験結果—

駿河湾暴露試験において、海洋の飛沫帯、干満帯及び海中部における防食工の試験も実施されている。本章で

は、約20年間暴露試験を行った従来型塗装（タールエポキシ樹脂塗装）、有機被覆鋼材、超厚膜形被覆、ステンレス・チタン被覆、保護カバーを用いた現地防食試験の耐久性試験結果を要約して述べる。

3.1 従来型塗装（タールエポキシ樹脂塗装）

従来型塗装であるタールエポキシ樹脂塗装（無機ジンクリッチ（75 μm ）+タールエポキシ樹脂（300 $\mu\text{m} \times 2$ ））を施した鋼材では、初期から約15年目までの劣化は穏やかであるが、20年目の劣化が急に進展することが、さび面積率、交流抵抗値（図5）、塗装厚などの測定結果で認められた。この塗装では劣化が直線的でなく、ある時間経過後に急激に進行し始めることは注目すべきである。

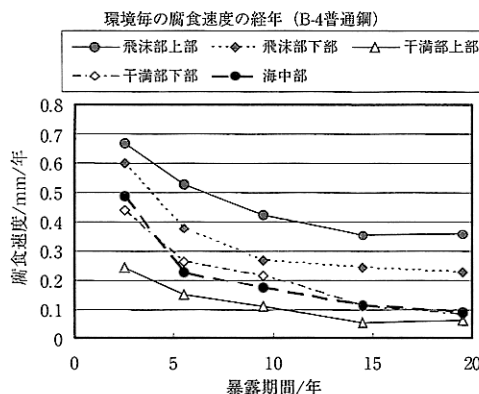


図4 無防食鋼材（普通鋼）の腐食速度の時間変化

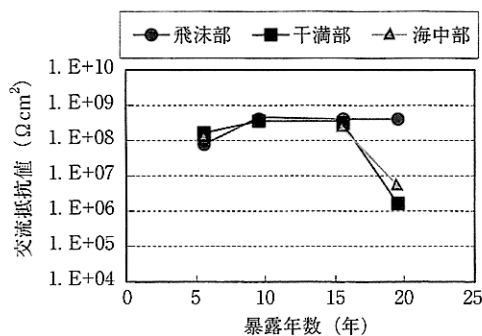


図5 従来型塗装の交流抵抗値（1 kHz）の経年変化

3.2 有機被覆及び超厚膜形被覆

鋼材表面にポリエチレンやポリウレタン等を積層した有機被覆鋼材が開発され、普及しつつある。有機被覆とは工場において膜厚2 mm以上のポリエチレン・ポリウレタンを被覆するものである。また、超厚膜形被覆は有機被覆の一種で、従来型塗装材（例：タールエポキシ樹脂塗装）より腐食性物質遮断性を向上させるため厚膜化した被覆材であり、膜厚1 mm以上可能な塗料で、代表例としてはガラスフレーク塗料、超厚膜形ウレタン樹脂塗料、超厚膜形エポキシ樹脂塗料がある。

有機被覆の20年後の試験体の外観については、一部の

試験体で表面に擦り傷の発生や貝のくい込みがみとめられたが、全ての試験片において、鋼面に達する欠陥、膨れ及び流れさびの発生は認められず、波浪の厳しい概要環境においても長期にわたって良好な耐衝撃性及び耐食性を有した。また、防食層の交流インピーダンスを測定したところ、暴露試験の継続に伴う交流抵抗値の減少や容量成分の増大は認められず、防食層が初期の防食性能を保持していることが確認できた。したがって、有機被覆鋼材は、海中部から飛沫帯にかけて長期に渡って良好な耐久性を有することが確認された。

同様に、厚膜塗装材は20年経過してもほぼ健全であると判断された。ただし、端部等施工不充分と思われる部分や波浪や流木による塗装損傷部にさびや剥離が発生していた。飛沫帯・干満帯を対象とした厚膜塗装を施工する場合、端部等膜厚のつきにくい部位の施工管理を充分に行なう必要があることが示された。

保護カバーを用いた現地防食（ペトロラタムライニング）についても、20年間の暴露試験では、全く劣化は観察されなかった。

3.3 耐食性金属被覆

耐食性金属被覆としてステンレス鋼ならびにチタンの耐久性が評価された。一般にステンレス鋼は炭素鋼等と比べて耐食性が良好と見なされており、海洋構造物用の候補材料の1つにあげられる。しかし、海水は塩分を多く含有し高耐食材料であるステンレス鋼にとっても苛酷な環境であり、SUS304及びSUS316L鋼のような汎用ステンレス鋼では、海水環境下において孔食、すき間腐食等の局部腐食感受性を有することが知られている。特に大型海生生物の付着下でのすき間腐食の発生は大きな問題となっている。これに対する防食対策としては次の2つの方法が考えられる。第1の方法はSUS304等の汎用ステンレス鋼を電気防食（カソード防食）して用いるものである。第2はCr、Mo等の耐食性改善元素を増量した耐海水性の良好なステンレス鋼を用いる方法である。

各種ステンレス鋼の約20年にわたる海洋暴露試験を行い、従来から問題とされている孔食、すき間腐食等の局部腐食感受性を中心に調査された。その結果、(1) 汎用ステンレス鋼（SUS304, 316L）の干満帯及び海中部での孔食、すき間腐食等の局部腐食の発生防止対策として電気防食が有効であり、 -500mVvs.SCE より卑な電位に設定すれば良いこと、(2) 海水環境下におけるステンレス鋼の腐食は大型海生生物付着下でのすき間腐食を中心とした局部腐食、飛沫帯の局部腐食は孔食であり干満帯及び海中部よりもその腐食の程度はかなり軽微であること、(3) 成分的にCr+3Mo+10N量が38 (mass%)を越え、ステンレス鋼（母材自由表面）の局部腐食の発生は認められず、良好な耐海水性を有することが明らかにされた。したがって、海水環境へのステンレス鋼の適

用に際し耐海水性を確保するには、 $\text{Cr}+3\text{Mo}+10\text{N} \geq 38\%$ (mass%) の材料が有効であることが明らかにされた。

耐海水性に優れるチタン（純チタン・チタン合金）で鋼材を完全に覆い鋼材を防食する方法が検討され、特に純チタンとチタン合金間での接触腐食、海洋生物による腐食、人工すき間付与による腐食の有無についても調査した。チタンは生物付着下や人工すき間部にも、腐食の発生が認められず、一般部にも腐食が認められなかったことから、既往の評価と同様に、海洋環境での高い耐食性を確認した。さらに純チタン及びチタン合金片をスポット溶接した場合にも金属接触腐食及び隙間においても腐食が認められず、良好な耐食性を示された。

以上、高耐食性金属材料被覆についての20年暴露結果を纏めて表1に示す。

表1 ステンレス鋼・チタンの耐久性

	ステンレス鋼		チタン
	SUS304 鋼、 SUS316L 鋼又は これらと同等の耐 食性を有するステ ンレス鋼	$\text{Cr}+3\text{Mo}+10\text{N} \geq 38$ (mass%) を 満足する各種 ステンレス鋼	Ti (≥ 99.8 mass%) TP35C (現： TP340C)
飛沫部	局部腐食発生有り	局部腐食発生 無し	腐食発生無し
干満部	電気防食の併用で		
海中部	局部腐食発生無し		

3.4 防食工の損傷劣化

防食工の損傷は以下に大別され、損傷の可能性は厚みと塗装材の強度によって決まる。

- ①初期欠陥
- ②運搬・施工等の取り扱いによるもの
- ③施工後の劣化、浮遊物の衝突、生物の影響

初期欠陥については十分な検査を行い難い現地塗装では発生の可能性があるが、海洋防食に使用される高度な厚膜塗装では可能性は低いものと考えられ、施工傷、あるいは施工後の外的な要因による傷の発生が主と考えられる。

海洋構造物の厚膜塗装として、これまで一般的に使用されてきたタールエポキシ樹脂塗装は防食性能に優れるが、塗装材の硬度が低いために様々な傷発生事例が報告されている。

耐久性調査のための鋼管杭協会におけるシンガポールでの長期暴露において、7年後では600～100 μm の膜厚のタールエポキシ樹脂塗装やエポキシ樹脂塗装で多数の傷が発生している⁵⁾。10年後の調査では更に劣化が進行し、飛沫帯直下及び海中部では貫通傷も観測された。一方で、ガラスフレーク入りの厚膜エポキシ（2 mm）やポリエチレン被覆（2 mm）やFRPカバーでは問題は見

られておらず、耐傷性が大きく寿命を左右する。

更に施工後の塗装損傷例としては、3.1で紹介された駿河湾暴露試験において調査された事例で、L型アングルに無機ジンク75 μm とタールエポキシを600 μm 塗装した試験体を約20年間暴露し、調査を行ったものがある。

さび面積率は山側で大きい。また、部位としては干満部が最も大きく、次いで海中部、飛沫部はさびが殆ど発生していなかった。その原因として、暴露を行った海洋技術総合研究施設では図6に見られるような流木がデッキに打ち上げられている様子も観察されており、特に干満部では浮遊物による傷発生起点としたさび発生の増加が考えられた。図7に5年目に干満部に発生した傷を示す。この様に浮遊物の影響があるような環境ではタールエポキシでは傷が発生し易く、長期の防食性の維持が困難となる。

一方、厚膜の重防食被覆では損傷事例の報告が少ない。重防食被覆では施工後には傷が発生する可能性が比較的低いことから、運搬・施工時における傷が問題である。傷の事例を図8に示す。重防食被覆では被覆材が厚いために傷が表面で留まる場合が殆どであるが、鋼面に到達する貫通傷が発生するケースもあり、施工前、あるいは施工後の確認が重要である。但し、傷の影響については定量的な評価方法が確立されていないという課題がある。

3.5 まとめ

駿河湾における20年暴露試験の結果、傷などがない場合には、従来型塗装（無機ジンクリッチ+タールエポキシ）のみが15年経過後、劣化の傾向が認められたが、それ以外の防食工（有機被覆、超厚膜形被覆、耐食性金属被覆、ベトロラタム）では劣化が認められなかった。しかしながら、種々の原因で傷などが発生した場合には、無防食鋼材と異なり、特に干満帯及び干満帯に近い海中部でのさびが著しい。さらに、有機被覆及び超厚膜形被覆においても傷などが発生し、その後の腐食が懸念されることも認められた。

よって、防食工に発生する傷などによって、その後腐食やさびの進行を検討することが重要と考えられる。

4. 防食工での損傷の影響

本章では、これまで不明確であった防食工を施した鋼材の損傷部での腐食メカニズムに関して、暴露試験及びモデル試験による実験的な検討を行った。4.1では、防食工（タールエポキシ樹脂塗装）に損傷部を有する鋼材を海洋環境に暴露し、環境条件や部位が鋼材の腐食に及ぼす影響を検討し、劣化モデルを提案した。また、4.2では、防食工に損傷部が存在する鋼材で生じる腐食に関して、モデル試験体を用いて実験的に評価し、損傷が鋼材腐食に及ぼす影響を評価した。



図6 暴露施設で観察された流木

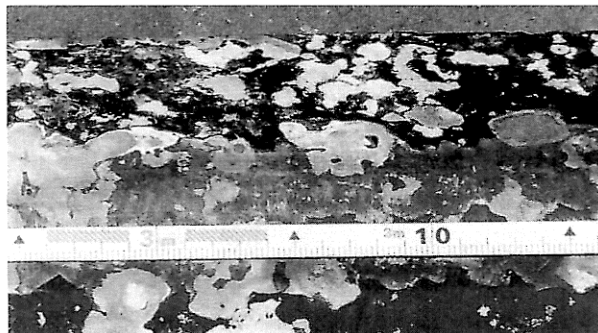


図7 タールエポキシ塗膜の5年目観察の傷

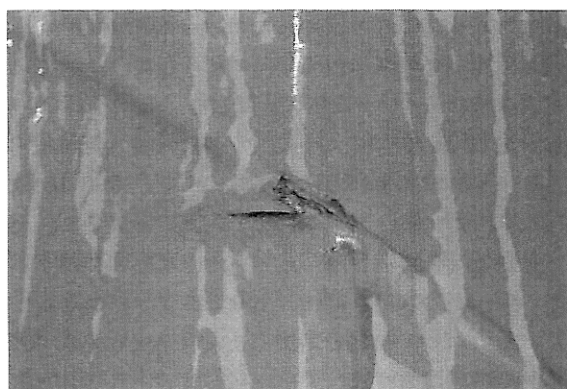


図8 重防食塗装における当て傷の事例（貫通）

4.1 環境条件や部位の相違と損傷の影響

ここでは、防食工に損傷部を有する鋼材を海洋環境に暴露し、環境条件や部位が鋼材の腐食に及ぼす影響を検討した。

(1) 実験概要

1) 供試体概要

供試体は75×150mmで、タールエポキシ樹脂の塗装が試験面に施されている。試験面の中央にはエンドミルを用いてφ1、3、6もしくは12mmの人工傷がタールエポキシ樹脂塗装に設けられ、母材を露出させた。他の面に対しては、エポキシ樹脂の厚膜塗装（膜厚400μm）が適用され、これらの面で腐食が生じるのを防いだ。供試体は鋼管にボルトで固定され、大井川河口部の海洋中の飛沫帯、干満帯、海中部に約1年間暴露された。

2) 測定方法

1年間の暴露終了後、塗装の劣化による剥離部分をたがねで取り除いた上で、図9に示すように腐食面積を4方向で測定した。その後、塗装はすべて軽いブラスト処理にて取り除き、三次元形状測定器にて供試体の人工傷周辺の表面形状を測定することにより、腐食の進展を評価した。

(2) 結果及び考察

1) 劣化の概要

図10に1年間の海洋環境における暴露終了後の供試体外観の例を示す。人工傷において母材の腐食が認められ、さらに飛沫帯に暴露された供試体において、その周囲で塗装の剥離が認められた。したがって、塗装に傷が生じた場合には、飛沫帯にて塗装の劣化が最も進行すると思われる。ただし、実際の海洋構造物においては、飛沫帯で船舶や流木の衝突による傷が発生する可能性、もしくは海洋生物の付着による塗装の損傷が生じる可能性は小さいと考えられるため、実構造物の劣化を予測する上では、これら傷の発生の確率を考慮する必要があるものと考えられる。

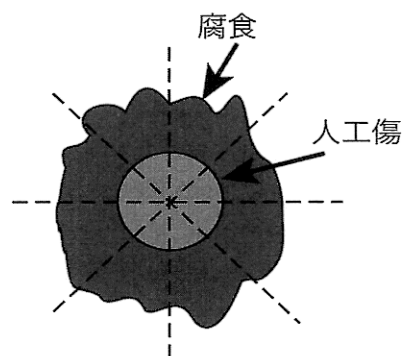


図9 腐食進展距離の測定方法

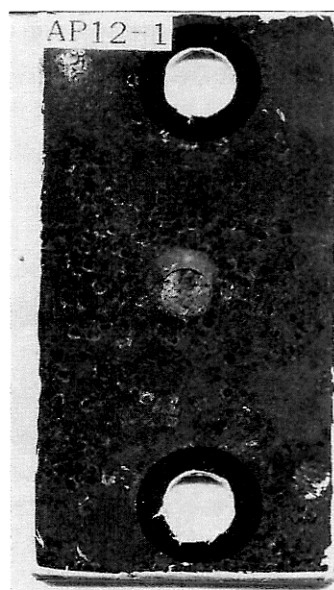


図10 暴露終了後の供試体（飛沫帯）

2) 腐食進展距離

図11は海洋暴露供試体における人工傷の直径と腐食の人工傷からの進展距離との関係を示す。飛沫帯に暴露された供試体において、その周囲で塗装の剥離が認められたが、腐食の進展は塗装の剥離と同様に、飛沫帯に暴露された供試体において最も大きかった。さらに、飛沫帯に暴露された供試体においては、腐食の進展は人工傷の直径と良い関係にあり、人工傷が大きいものほど腐食面積が大きいという結果となった。

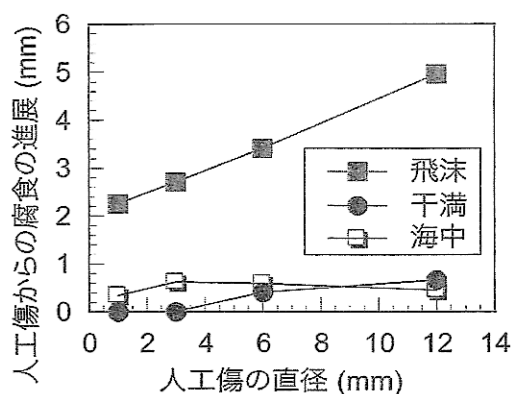


図11 腐食進展距離

3) 腐食の形状

図12に塗装を取り除いた供試体の、人工傷周りの母材表面形状の測定結果の例を示す。

飛沫帯に暴露された供試体において、腐食による断面欠損面積は最も大きく、図12に示したように、最も腐食が水平方向に進展している。また腐食深さは人工傷の中央部にて最も深い。一方、海中部や供試体TPとSPにおいては、腐食は人工傷の外周に沿って深さ方向に進展したため、円環状の断面欠損が生じている。

4) 腐食進展のメカニズム

飛沫帯における表面被覆の損傷からの腐食進展のメカニズムは以下のように説明される。

塗装に損傷が存在し、損傷部分に水分が供給されると、損傷部をアノード、塗装下をカソードとするマクロセル腐食回路が形成される。また大気中においては、マクロセル腐食回路は損傷及び塗装剥離部分の水分が付着、滞留している領域内のみで形成される。損傷近傍のカソードでは還元反応が生じ、発生する水酸化物の影響でこの部分で塗装の剥離が生じ^{6)~8)}、一方、アノードでは腐食物が形成される。一旦このような状況となると、剥離が著しくなった部分は新たにアノードとなり腐食物が堆積し、剥離フロントで形成されるカソードも損傷から外周方向に移動し、剥離がさらに進展して、剥離面積及び腐食面積の拡大が繰り返される。

海中部では部材全体が水で覆われて電氣的に接続されているため、マクロセル腐食回路のカソードとなる範囲は飛沫帯の場合よりも大きくなるものの、水中においては塗装を透過してくる酸素の量は少ないため、単位面積あたりのカソード反応量は大幅に小さくなる。そのため、飛沫帯での場合のような塗装の剥離は生じにくい。この場合には、被覆下で腐食物が生成されることはなく、アノードはカソードにもっとも近い損傷端部にとどまるため、図12に示したように、海中部に暴露された供試体では傷の外周に沿って深い腐食が生じる。

以上を踏まえると、飛沫帯における人工傷のサイズと腐食進展距離との間に相関関係が見られたのは、図13に示すように、アノード面積の影響と考えることができる。なお、図13中の矢印の太さはマクロセル腐食電流量の大きさを表す。飛沫帯における劣化の初期段階では、既に述べたように、アノードは人工傷内部で形成され、カソードは塗装下に形成される。アノードとして作用する人工傷の面積が大きければ、対となるカソード反応量も大きく、したがって塗装の剥離の拡大の速度も大きい。一旦塗装の剥離が生ずれば、この部分はいずれアノードとなり、アノード面積は増大するため、塗装の剥離はさらに加速される。

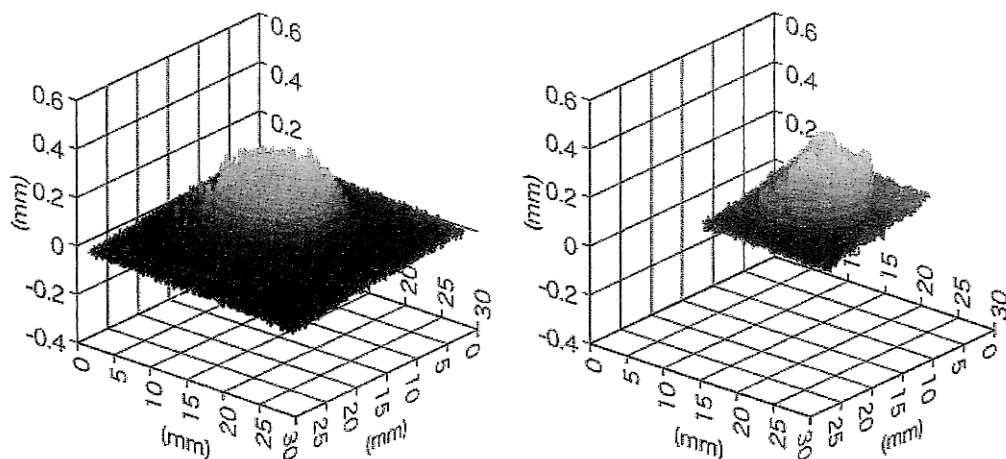


図12 人工傷部分での母材の形状 (腐食の形状) (左：干満帯、傷φ12mm、右：海中部、傷φ12mm)

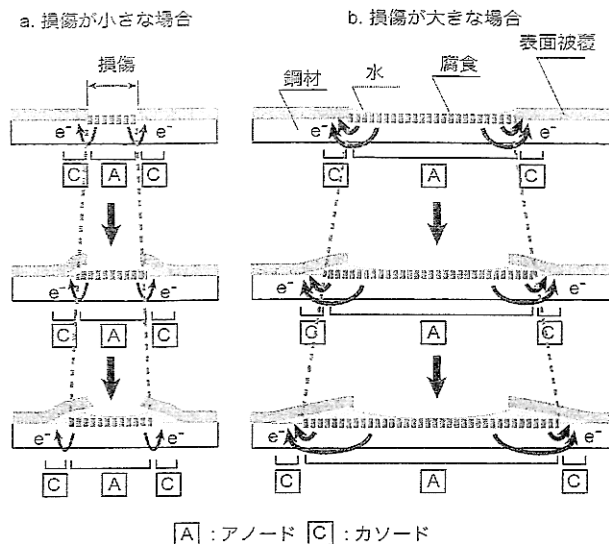


図13 干満帯で被覆の傷が腐食面積に与える影響

4.2 マクロセルに及ぼす損傷の影響

ここでは、防食工に損傷部が存在する鋼材で生じる腐食をモデル試験体により実験的に評価した。

(1) 実験概要

1) 供試体概要

防食工に損傷部が存在する場合、鋼材においてはマクロセル腐食（腐食反応におけるアノード・カソードが局所的に存在する腐食）とミクロセル腐食（腐食反応におけるアノード・カソードが全面的に存在する腐食）が進行する。実際の鋼材においては、これらの腐食を分離して評価することは難しく、特にマクロセル腐食を直接評価することは難しい。そこで、マクロセル腐食及びミクロセル腐食を区別して評価するため、図14に示すような分割された複数の鉄筋要素からなるモデル供試体⁹⁾（以下分割鋼材供試体と称す）を用いた。

また、種々の損傷部を模擬するために、図15に示すようにType-A～Type-F供試体を作製した。さらに、これらの供試体に対して塗装の品質の違いを検討するため、塗装厚さを2水準（厚塗り：138～188 μm、薄塗り：45～65 μm）設けた。なお、劣化の進行を短期間で評価するため、本モデル試験では、塗装材には下塗り材（長油性フタル酸樹脂系）のみを使用した。

2) 測定項目

上記で示した供試体を3.0%wtのNaCl水溶液（室温：20℃）に浸漬し、1週間ごとに4週間までマクロセル電流密度、ミクロセル電流密度に関して以下の測定を行った。

本検討で使用した分割鋼材供試体はマクロセル腐食を直接評価するために各鉄筋要素にリード線を配した。実験では隣り合う鉄筋要素間を流れる電流をリード線を介して無抵抗電流計により測定し、マクロセル電流密度とした。マクロセル電流密度は式1により算出した。

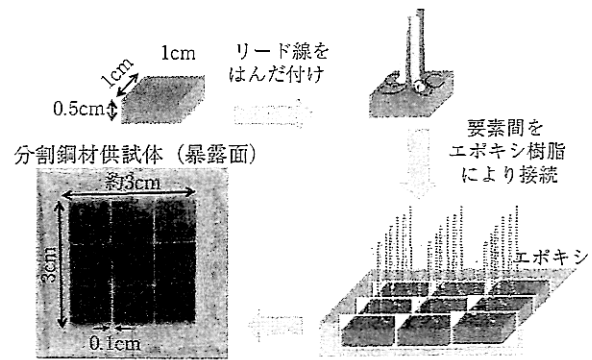


図14 供試体概要

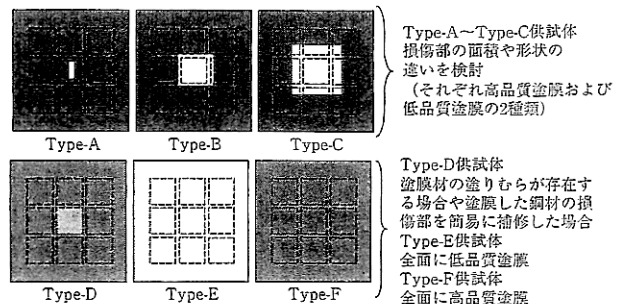


図15 暴露面の状況

$$I_{mac} = \frac{I_{in} - I_{out}}{S} \quad \text{式(1)}$$

ここで、 I_{mac} はマクロセル電流密度（A/cm²）、 I_{in} は鉄筋要素に流入する総腐食電流（A）、 I_{out} は鉄筋要素から流出する総腐食電流（A）、 S は鉄筋要素の面積（cm²）である。

また、各鉄筋要素におけるミクロセル電流密度は交流インピーダンス法により分極抵抗を測定し、式2により算出した。

$$I_{mic} = \frac{K}{R_p \cdot S} \quad \text{式(2)}$$

ここで、 I_{mic} はミクロセル電流密度（A/cm²）、 K は実験定数（0.0209）（V）、 R_p は交流インピーダンス法（印加電圧：50mV、周波数：0.05Hz-5000Hz）により測定された分極抵抗（Ω）、 S は鉄筋要素の面積（cm²）である。

(2) 実験結果

図16にType-A～Type-F供試体における塗装損傷部と塗装部との間のマクロセル電流密度を示す。なお、ここで示すマクロセル電流密度は、周囲の8要素の鋼材から中心の鋼材に流出入する電流の密度を示している。すなわち、中心に存在する鋼材（欠陥部や中心のデータ）に関しては、周囲の8要素の鋼材から流出入する電流密度の総和を、周囲に存在する鋼材（厚塗り/薄塗りや周囲のデータ）に関しては、中心に存在する鋼材から流出入する電流密度の平均値（8要素）を示している。これより、Type-A～Type-C供試体においては塗装損傷部がア

ノード、塗装部がカソードとなるマクロセル腐食が確認される。また、時間の経過に伴い周囲の鉄筋要素がアノード部、中心の鉄筋要素がカソードとなるマクロセル腐食が確認される。これは、鋼材のマクロセル腐食のカソード反応の進行に伴い塗装が剥離し、アノード部が周辺へ拡大したためと考えられる。同様に、Type-D供試体においても、塗装の程度の違う部分でマクロセル腐食が形成されることが確認される。一方、全体を均質に塗装したType-E供試体及びType-F供試体においてはマクロセル腐食がほとんど確認されない。これらより、鋼材に塗装する場合、その厚さの管理が非常に重要となり、その後の腐食速度に大きな影響を及ぼすと考えられる。

一方、図17にType-A～Type-F供試体におけるマイクロセル電流密度を示す。これより、初期においては塗装損傷部においてマイクロセル腐食が生じ、その後周辺に広がっていくことが確認される。これは、上記に示したマクロセル腐食のカソード反応の進行に伴い塗装が剥離し、それまで遮断されていた腐食要因物質が進入しやすくなったためと考えられる。なお、ここで得られた結果では、塗装損傷部と塗装部で大きなマイクロセル腐食の差が確認されなかったが、これは、本モデル試験における腐食の進行を短期間で評価するため、下塗り材のみを使用したためと考えられ、実際の塗装においては、両者の差がより顕著に現れることが想定される。

4.3 まとめ

本章では、これまで不明確であった防食工を施した鋼

材の損傷部での腐食メカニズムに関して実験的な検討を行った。暴露試験とモデル試験の結果は、塗装材の種類や供試体寸法、暴露環境などが異なることから、直接結果の整合性を議論することは難しいが、得られた結果を総合的に判断すると、塗装により防食された鋼材においては損傷部における腐食が最も激しく、部材の耐久性を議論する上で最も重要となることが明らかとなった。また、損傷部における腐食では、マクロセル腐食及びマイクロセル腐食の両者を考慮しなければならず、特にマクロセル腐食においては干満部、感潮部、水中部など、暴露される海洋環境の特性（特に水や酸素の供給条件）によって、アノード部及びカソード部の形成場所が経時的に変化すると考えられる。したがって、実際の部材の塗装損傷部での腐食進展を予測する場合は、周辺の水分量、酸素量及びこれらの物質の浸透性を考慮した上で腐食セルの形成を適切にモデル化し、欠損部の深さと面積がどのように変化するかを議論する必要がある。

5. おわりに

無防食鋼材の沿岸環境における腐食については、暴露試験及び既設部材の観察より、腐食速度の概略傾向をはじめとして、かなり理解が進んでいる。また、20年間にわたる暴露試験の結果から、適切な防食工を選定すれば、防食工に損傷がない場合、母材についても耐久性状問題が認められない。一方、防食工に損傷がある場合、損傷部において激しい腐食が生じる可能性が高く、部材の耐

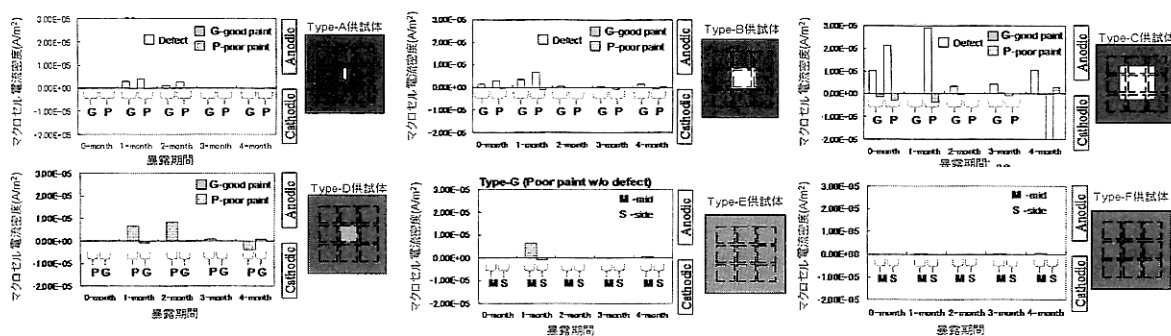


図16 塗膜損傷部と塗膜部との間のマクロセル電流密度の経時変化

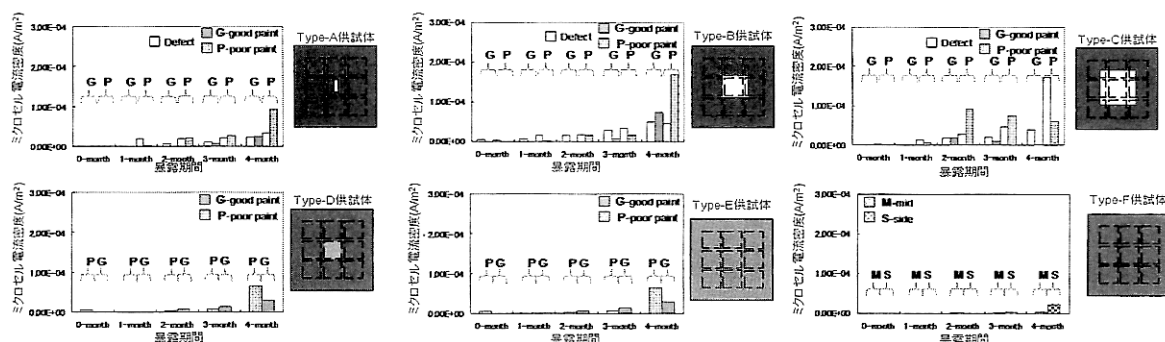


図17 ミクロセル電流密度の経時変化

久性を議論する上で最も重要となる。したがって、防食工を施した鋼材の耐久性予測を行う際は、損傷部を適切にモデル化するとともに、暴露される海洋環境の特性(特に水や酸素の供給条件)を考慮する必要がある。

謝辞

本稿は、「土木学会構造工学委員会沿岸環境における鋼・複合構造物の防食及び耐久性評価に関する研究小委員会(委員長:渡邊英一京都大学名誉教授)」で得られた成果を基に取りまとめたものであり、委員長をはじめ委員の皆様、関係者各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) (財)沿岸開発技術センター編、港湾構造物防食・補修マニュアル(改訂版)、1997年4月
- 2) 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、第15巻、第3号、pp.147~247, 1976. 3

- 3) (独)土木研究所、(社)日本鉄鋼連盟 共同研究報告書第347号、海洋構造物の耐久性向上技術の関する共同研究、2006
- 4) 吉崎信樹、守屋 進:20年海洋曝露での鋼材腐食と一般塗装鋼材の劣化挙動について、土木学会論文集(投稿中)
- 5) 中村知道:第41回腐食防食討論会講演集、pp.255~258, 1994.
- 6) 増子 昇:塗膜下腐食の発生と進行、防食技術、第30巻、pp.699~704, 1981.
- 7) Funke, W.: Blistering of paint films and filiform corrosion, Progress in Organic Coatings, Vol.9, No.1, pp.29~46, 1981.
- 8) 水流 徹、浅利満頼、春山志郎:塗膜下腐食の交流インピーダンス特性と物質移動、金属表面技術、Vol.39, No.1, pp.2~9, 1988.
- 9) Miyazato S., Otsuki N., Kimura H., Estimation Method of Macrocell Corrosion Rate of Rebar in Existing Concrete Structures using non-destructive Tests, East Asia-Pacific Conference (EASEC 8), 2, pp.531~542, 2001.

受理日:平成19年7月18日

お知らせ

第31回 鉄鋼塗装技術討論会

主 催 社団法人日本鋼構造協会
協 賛 当協会ほか
会 場 自動車会館2階大会議室
東京都千代田区九段南4-8-13
TEL 03-3264-4719

内 容

第1日 10月16日(木)

- ・鋼構造物塗装のVOC削減に関する検討
水性塗料の適用性検討(その1)
- ・鋼構造物塗装のVOC削減に関する検討
無溶剤形塗料の適用性検討(その1)
- ・長期耐久性評価環境にやさしい塗装系(VOC削減)
の長期耐久性評価

特別講演(司会=守屋 進)

木曽川大橋の斜材破断から見える塗り替え塗装の課題
山田健太郎氏

- ・ふっ素樹脂塗料の性能調査と評価(6)
- ・無機ジンクリッチペイントのはく離に関する調査
- ・鋼鉄道橋防食塗装の適切な維持管理に向けた調査結果
- ・北海道における鋼道路橋塗装点検とデータベース整備の現状
- ・凍結防止剤の塗装橋梁への影響

第2日 10月17日

- ・異常劣化した溶融亜鉛めっき橋の補修塗膜調査
- ・溶融亜鉛めっき上塗装・ふっ素樹脂塗料の大气ばく露試験
- ・アルミニウム溶射の防食性評価
- ・動力工具ケレン後の残存さび中の塩分が溶射皮膜に与える影響

特別講演(司会=江成孝文氏(財)鉄道総合技術研究所)

- ・既存ストックの有効活用一鋼橋のリユースー
- ・各種鋼橋防食法の補修塗装に関する検討一暴露・促進試験による塗装耐候性鋼の劣化挙動一
- ・美浜大橋における耐候性鋼材の塗装による補修工事
- ・重防食塗装系の性能評価試験
- ・重防食塗装系の塗装方法の検討

参 加 費 当協会会員10,000円

(消費税、発表予稿集代込み)

一般13,000円(消費税、一発表予稿集代込み)

申 込 先 社団法人日本鋼構造協会

『第31回鉄鋼塗装技術討論会』係

〒160-0004 東京都新宿区四谷3-2-1

四谷三菱ビル9階

TEL 03-5919-1535 FAX 03-5919-1536