

## 2.3 防食

### 2.3.1 一般

- (1) 鋼材については、厳しい腐食環境条件下にあるため、防食に対する検討を行う。特に平均干潮面直下部においては、激しい局部腐食が発生することがあるので、適切な処置を講じるべきである。
- (2) 鋼材はそれを取り囲む環境と反応することによって腐食する。鋼材の腐食環境は多種多様であるが、港湾の施設の設置される海洋、淡水、土壌等 pH がほぼ中性とみなせる環境では、水と酸素が重要な役割を果たす。鋼材を中性の水溶液に浸すと、その表面にはアノード（陽極）とカソード（陰極）からなる無数の腐食電池が形成される<sup>15)</sup>。腐食電池のアノードとカソードでは、一般に、式(2.3.1)、式(2.3.2)で表せる反応が当量ずつ進行する。



式(2.3.1)の鋼材の溶解は腐食のアノード反応、また、式(2.3.2)の酸素の還元は、腐食のカソード反応と呼ばれる。鋼材の腐食反応は、式(2.3.3)で表すことができる。



式(2.3.3)の  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  は鋼材表面に沈殿したのち、さらに酸化や脱水縮合を経て複雑な水和酸化鉄、すなわち「錆」になる。

- (3) 海水中に打込まれた鋼材の深度方向の腐食分布は、一般に、図-2.3.1のように示されている<sup>16)</sup>。すなわち飛沫を浴び酸素の供給も十分な飛沫帯は特に腐食が激しく、なかでも H.W.L.直上部で腐食速度は最大となる。

一方、図-2.3.1の水没部分では干満帯直下部分の腐食速度が最も大きい。この部分の腐食速度は長尺鋼材の環境条件や断面形状等によって大きく異なる。一般に、清浄海水中の鋼矢板構造物や鋼管杭構造物では、平均干潮面 (M.L.W.L.) 直下部分の腐食速度は海中部の値と大差ない場合が多いが、構造物の環境条件によっては M.L.W.L.直下部分の腐食速度が海中部の値より大きくなり、著しい場合には飛沫帯の値を上回ることがあるので注意が必要である。この著しい局部腐食を集中腐食と呼ぶ。

- (4) 防食については、全般的に港湾鋼構造物防食・補修マニュアル<sup>15)</sup>を参考にすることができる。

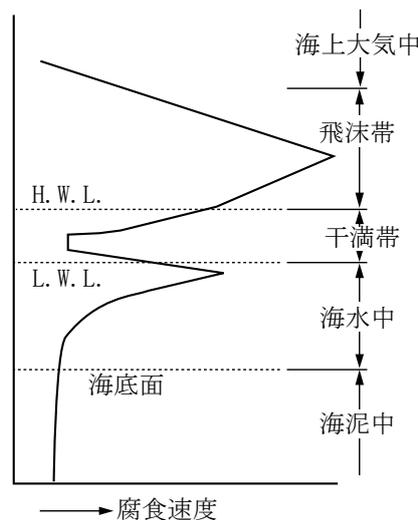


図-2.3.1 鋼材の腐食速度分布<sup>15)</sup>

注意する必要がある。なお、海上大気中、海中部に被覆防食工法を適用し、海底土中部に電気防食を適用するような場合には、電気防食の性能照査において被覆材の劣化や損傷を見込んだ余裕のある設定をしておけば、被覆防食部の劣化、損傷部を電気防食で補うことができる。

- (5) 対象施設が新設か既設かにより適用し得る防食法が異なってくる。すなわち新設では適用できても既設では適用できない工法があり、さらに既設では施工条件が制約される場合がある。また、干満帯か海中部かといった防食対象部位の相違によっても適用工法が異なる。これらの条件のほかに、腐食環境条件、施工条件、耐用年数等に対して、各防食工法の特性を考慮し、信頼性の高い工法を選定する必要がある。
- (6) 防食工の防食性能を長期間発揮させるためには、供用期間中の防食工の維持管理が不可欠であることから、適切な頻度、必要な時点で防食工に関する点検診断を行い、その健全度を評価するとともに、必要に応じて防食工又は鋼材の補修を行う必要がある<sup>15)</sup>。

## 2. 3. 4 電気防食工法

### (1) 適用範囲

- ① 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。
- ② 平均干潮面以上については、被覆防食による防食を行うことが必要である。この場合、平均干潮面からL.W.L.までの間はL.W.L.以下に比べて、海水に浸せきする時間が短いため、防食率が若干劣ること、また平均干潮面の直下部は腐食しやすい箇所であることから、平均干潮面以下ある程度の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。
- ③ 港湾工事においては、鋼管杭や鋼矢板が打込まれた後、上部工が施工されるまで無防食期間が存在したり、電気防食の陽極更新時期に無防食期間が存在することがある。この無防食期間の間に、鋼材に著しい集中腐食が発生することがあるので、十分な配慮をすることが望ましい。
- ④ 電気防食の効果（防食率）は、表-2.3.2に示すように、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。

また、干満帯へ流入する防食電流は海中部と比べるとかなり大きくなるため、陽極の消費量が大きくなる。このようなことから、電気防食工法の適用範囲として平均干潮面以下を原則としている。なお、海水浸せき率及び防食率は式(2.3.4)及び式(2.3.5)で表される。

$$\text{海水浸せき率} = \frac{\text{試片の全浸せき期間}}{\text{全試験期間}} \times 100 (\%) \quad (2.3.4)$$

$$\text{防食率} = \frac{\text{不通電試片の質量減} - \text{通電試片の質量減}}{\text{不通電試片の質量減}} \times 100 (\%) \quad (2.3.5)$$

表-2.3.2 電気防食の防食率

海水浸せき率 (%)	防食率 (%)
40 未満	40 未満
40 以上 80 未満	40 以上 60 未満
80 以上 100 未満	60 以上 90 未満
100	90 以上

- ⑤ 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。
- ⑥ 電気防食は、通電方式によって流電陽極方式と外部電源方式とに分けられる。  
流電陽極方式はアルミニウム（Al）、マグネシウム（Mg）、亜鉛（Zn）等の陽極を鋼構造物に接続し、両金属間の電位差で発生する電流を防食電流として利用する方式である。主としてメンテナンスが容易なことから、我が国では港湾鋼構造物の電気防食としてはほとんどが流電陽極方式を用いている。流電陽極材料の性能を表-2.3.3に示す。アルミニウム合金陽極は単位質量当たりの発生電気量が最も大きく、経済性に優れており、海水中、海底土中の環境に適している。このため港湾鋼構造物に対しては一般にアルミニウム合金陽極が用いられる。

外部電源方式は外部の直流電源の正極に電流を流す対極を、負極に鋼構造物をつないで、電流を

流す対極から鋼構造物に向かって防食電流を流入させる方式で、電流を流す対極としては海水中では白金系電極や酸化物被覆電極が使用されることが多い。外部電源方式では出力電圧を自由に調節できるので、高流速や河川水の混入等で変化の激しい環境や、きめ細かな電位制御が必要な場所に対応できる。

表-2.3.3 流電陽極材料の性能比較<sup>15)</sup>

特性		Al-Zn-In	純 Zn, Zn 合金	純 Mg-Mn	Mg-6Al-3Zn
比重		2.6~2.8	7.14	1.74	1.77
陽極閉路電位 (V) (vs S.C.E.)		-1.05	-1.00	-1.55	-1.45
鉄に対する有効電位差 (V)		0.25	0.20	0.75	0.65
有効電気量理論値 (A·h/kg)		2,700~2,900	820	2,200	2,210
海水中 1mA/cm <sup>2</sup> *1	有効電気量 (A·h/kg)	2,600	780	1,100	1,220
	消耗量 (kg/A)/年	3.4	11.8	8.0	7.2
地中 0.03mA/cm <sup>2</sup> *1	有効電気量 (A·h/kg)	1,860*2	530	880	1,110
	消耗量 (kg/A)/年	4.7	16.5	10.0	7.9
適用環境*3		海水中、海底土 中部	海水中	土壌中、淡水中	土壌中、淡水中

\*1：“腐食防食協会規格：流電陽極試験法(JSCE S-9301)”に規定されている陽極材料試験片に通電する電流密度。

\*2：アルミニウム合金陽極を海底土中部で使用する場合の発生電気量（有効電気量）は、以前より 1,860A·h/kg の値が設計値として採用されている。アルミニウム合金陽極を設置する環境によっては、有効電気量や有効電位差が変わることが考えられることから、関係機関により、それらの性能を確認する目的で、試験を実施中である。今後、海底土中部にアルミニウム合金陽極を設置する場合は、その研究成果を陽極設計に採用することができる。

\*3：汽水域、抵抗率変動域および高速流域など特殊な環境については、調査・試験によって適切な陽極を選定するのがよい。

- ⑦ 流電陽極方式における陽極の鋼材への取付けは、一般に水中溶接で行われる。鋼矢板式係船岸で、地震動作用時に背後の地盤が液状化して鋼矢板に過大な土圧が作用したときに、水中溶接部で脆性破断した事例が報告されている<sup>15)</sup>。この対策として、1) 水中溶接に適するよう鋼矢板の化学成分を調整する、2) 矢板を打設する前に、陽極取付部に陸上で SM 材による「あて板」を溶接し、水中でその「あて板」に陽極を溶接する、等の対策を講じることが望ましい。
- ⑧ 平均干潮面は、全ての干潮時の潮位を平均した水面であり、平均水面 (M.S.L.) より主太陰半日周潮 (M<sub>2</sub>) の半潮差 (H<sub>m</sub>) 分を差し引いた値で求められている。調和常数のデータのないところでは平均水面と朔望平均干潮面 (L.W.L.) の中間とみなしてもよい。

## (2) 防食電位

- ① 港湾鋼構造物の防食電位は、一般に、海水塩化銀電極基準で-780mV とする。
- ② 鋼構造物に電気防食工法を適用して防食電流を流すとき、鋼構造物の電位は次第に低い電位になり、ある電位に達すると腐食が抑制される。この電位を防食電位という。
- ③ 電位の測定には、環境が変化しても安定な値を指示する電極を基準として用いる。基準となる電極を照合電極といい、海水中では海水塩化銀電極以外に、飽和甘こう電極、飽和硫酸銅電極が用いられることもある。防食電位の値は、測定に使用する照合電極により異なり、次の値となる。

海水塩化銀電極基準 -780mV  
 飽和甘こう電極基準 -770mV  
 飽和硫酸銅電極基準 -850mV

- ④ 被覆防食と電気防食（特に外部電源方式）を併用する場合には、過剰な電流により塗膜が劣化しないように注意する必要がある。この場合の電位は $-800\sim-1,100\text{mV}$ （海水塩化銀電極基準）が望ましい。

(3) 防食電流密度

- ① 防食電流密度は、海域環境によって大きく変動するので、適切な値を設定する。
- ② 電気防食を適用するとき、鋼材の電位を防食電位より卑な値まで分極するために要する鋼材単位表面積当たりの電流を防食電流密度という。防食電流密度の値は、電気防食開始時の初期値から時間の経過とともに減少して定常値になる。定常値は初期値の40～50%程度である。
- ③ 防食電流密度は、水温、流速、波浪、水質等により変動する。河川水や諸排水の流入するところ、あるいは硫化物濃度の高いところでは一般に所要防食電流は増大する。また、流速の大きいところ

でも所要防食電流は増大する。性能照査に当たっては、当該地区の既設の施設の実績等を参考にし、特性値を設定するのが望ましい。

- ④ 電気防食開始時の防食電流密度は、通常の海域においては、裸鋼材面に対し、表-2.3.4 に示される値を用いることができる。
- ⑤ 防食期間の経過とともに、発生電流は低減するため、陽極の寿命を求めるときに用いる平均発生電流は、防食期間に応じて、次のように取られることが多い。

5 年間防食の場合 初期発生電流×0.55  
 10 年間防食の場合 初期発生電流×0.52  
 15 年間防食の場合 初期発生電流×0.50

なお、15 年以上防食の場合は、15 年の値を適用する。

- ⑥ 電気防食の適用範囲内に被覆防食された部分がある場合には、被覆防食材の導電性（耐食性金属被覆など）および劣化・損傷を想定し、表-2.3.4.1 のように防食電流密度の係数を設定する<sup>15)</sup>。表-2.3.4 の防食電流密度の値にこの係数を乗じることで、被覆防食された部分に流入する防食電流密度を求めることができる。なお、防食電流を算出する際の電流の流入する範囲は、さく望平均満潮面（H.W.L）または、平均水面（M.S.L）以下とすればよい。

表-2.3.4 電気防食開始時の防食電流密度<sup>15)</sup> (mA/m<sup>2</sup>)

	清浄海域	汚染海域
海水中	100	130~150
石積部	50	65~75
海底土中	20	26~30
陸土中	10	10

表-2.3.4.1 被覆防食に対する防食電流密度の係数<sup>15)</sup>

被覆防食法		防食電流密度の係数*1	備考
塗装		0.25	初期に損傷率を設定
有機被覆	重防食被覆（鋼管杭）	—*2	劣化・損傷率小
	重防食被覆（鋼矢板・鋼管矢板）	0.10	継手嵌合部を考慮*3
	超厚膜形被覆	—*2	劣化・損傷率小
	水中硬化形被覆（ペイントタイプ）	0.25	初期に損傷率を設定
	水中硬化形被覆（パテタイプ）	—*2	劣化・損傷率小
ペトロラタム被覆		—*2	劣化・損傷率小
無機被覆	モルタル被覆	0.10	導電性あり*4
金属被覆		1.00	導電性

\*1 本係数の適用は、〔裸鋼材面積／被覆面積〕 > 1 の場合とする。

\*2 絶縁性が高く、劣化・損傷が生じにくいいため、電気防食対象面積から除外してよい。

\*3 重防食被覆鋼矢板や鋼管矢板は、継手嵌合部に一部未被覆部がある。鋼矢板の型式によって、被覆面積に対する継手嵌合部の未被覆部の面積比は 8~13% と幅があるが、ここでは未被覆部の面積として被覆面積の 10% を設計に織り込むこととする。

\*4 モルタル被覆の導電性は、金属の 10% として設計に織り込むこととする。なお、モルタル被覆の保護型枠として FRP 等の絶縁性の高い材料を使用する場合には、電気防食対象面積から除外してよい。

## 2. 3. 5 被覆防食工法

### (1) 適用範囲

- ① 港湾鋼構造物で、海水への浸せき時間が短い部位には電気防食が適用できないため、被覆防食工法を用いる方がよい。

2. 3. 4 電気防食工法に示したように、電気防食工法の適用範囲を平均干潮面以下としたが、

その近傍は集中腐食が発生しやすいこと、また波浪の影響、季節的な潮位変動等で海水への浸せき時間が短くなることがあるので、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。

- ② 水深の浅い海域の鋼矢板護岸等では、施設の深さ方向の全長に被覆防食工法を適用することもある。海中部を被覆防食工法と電気防食工法を併用することにより、流電陽極の延命を期待することができる<sup>15)</sup>。

## (2) 適用工法

- ① 港湾鋼構造物に適用される被覆防食工法としては、一般に、次の4種類が挙げられる。

- (a) 塗装
- (b) 有機被覆
- (c) ペトロラタム被覆
- (d) 無機被覆

- ② 被覆防食工法は基本的には被防食体を腐食環境要因から遮断することにより防食する方法である。被覆防食工法の適用範囲はその種類により異なり、干満帯、飛沫帯、海上大気中を主な対象とする

(i) 当初の設計条件

既設鋼構造物の場合、部材の形状、寸法を確認する。また、旧被覆防食工の仕様を調査する。施設の設計供用期間との関係も確認しておくことが必要である。

② ①に示す各事項は互いに関連するので、総合的に検討して工法を選定することが望ましい。

[参考文献]

- 1) 日本規格協会：JIS ハンドブック 鉄鋼 I, II, 日本工業規格, 2002
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II鋼橋編, p.111, 2004
- 3) 文献 2)参照, p.153
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編, p.59, p.82, 2004
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書 構造性能照査編, pp.38～44, 2002
- 6) 文献 2)参照, p.116
- 7) 文献 2)参照, pp.136～141
- 8) 文献 4)参照, p.71
- 9) 文献 2)参照, pp.151～180
- 10)日本規格協会：JIS ハンドブック 鉄鋼 II, 日本工業規格, 2002
- 11)文献 4)参照, p.73
- 12)文献 7)参照
- 13)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編, 2004
- 14)日本規格協会：JIS ハンドブック ねじ I, 日本工業規格, p.461, 2002
- 15)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(2009年版), 沿岸技術ライブラリーNo.35, 2009
- 16)H. A. Humble: The cathodic protection of steel piling in sea water, Corrosion, Vol.5 No.9, p.292, 1949
- 17)阿部正美, 福手勤, 清水一夫, 山本郁雄：波浪海域におけるサンドエロージョンに対する電気防食効果, 第 42 回腐食防食討論会講演集 C-203, pp.371～374, 1995
- 18)C.W.Ross : Deterioration of steel sheet pile groins at Palm Beach, Florida, Corrosion, Vol.5 No.10, pp.339～342, 1949