

ことができる。強度の異なる鋼材を接合するときには、一般に、強度の低い方の鋼材に対する値を用いるものとする。

表-2.2.6 溶接部の降伏応力度の特性値<sup>19)</sup> (N/mm<sup>2</sup>)

溶接の種類	鋼種 応力度の種類	SM400	SM490	SM490Y	SM570	SBHS400	SBHS500	SBHS700	
		SMA400		SM520	SMA570	SBHS400W	SBHS500W	SBHS700W	
工場溶接	全断面溶込みグループ溶接	圧縮応力度	235	315	355	450	400	500	700
		引張応力度	235	315	355	450	400	500	700
		せん断応力度	136	182	205	260	231	289	404
	すみ肉溶接部分溶込みグループ溶接	せん断応力度	136	182	205	260	231	289	404
現場溶接	①原則として工場溶接と同じ値とする。 ②鋼管杭や鋼管矢板等の構造部材の溶接の際に、良好な環境条件を確保することが困難な箇所においては、工場溶接の90%に低減するのがよい。								

(b) 現場溶接については、溶接技術が向上し、現場における施工管理及び品質管理が充実してきたことから、**道路橋示方書・同解説<sup>20)</sup>**に規定する適切な技能を有する溶接工が適切な溶接環境のもとで施工するとともに、非破壊検査や施工工程の記録化などにより品質管理等を行うことで、工場溶接と同等の管理を行った上で、現場溶接の降伏応力度を工場溶接と同じ値とすることができる。ただし、鋼管杭や鋼管矢板等の構造部材の溶接の際に、道路橋示方書・同解説に規定されている溶接品質を満足できる良好な環境条件を確保することが困難な箇所においては、現場溶接の降伏応力度を工場溶接の90%に低減するのがよい。

なお、水中溶接については基本的に避けるべきであるが、やむを得ず実施する場合、水中溶接部の降伏応力度の特性値は、作業環境によって品質が大きく変動することを考慮に入れて、適切に設定しなければならない。この際、**港湾鋼構造物防食・補修マニュアル(2022年版)<sup>21)</sup>**を参考にすることができる。

(c) アンカーボルト及びピンの降伏応力度の特性値は、表-2.2.7に示す値を参考にすることができる。なお、ステンレス鋼製のものも多く使用されている(本章8.1 鋼材以外の金属材料参照)。

表-2.2.7 アンカーボルト及びピンの降伏応力度の特性値 (N/mm<sup>2</sup>)

種類	鋼種 応力度の種類	SS400	S35CN
		アンカーボルト	せん断応力度
ピン	曲げ応力度	320	438
	せん断応力度	168	235
	支圧応力度	353	470

(d) ここで規定したアンカーボルトは、コンクリート中に埋め込んだ状態での使用を前提としている。アンカーボルトは一般に施工が不確実になりやすいこと、及びそれを保持するコンクリートと強度的なバランスが必要とされることなどから、設計用値の算定にあたっては、安全の余裕度を十分考慮すべきである。なお、**コンクリートのあと施工アンカー工法の設計・施工指針(案)<sup>22)</sup>**が参考にできる。

(e) ピンは、板や形鋼のようにボルト孔を設けることもなく、一般に切欠きをつくることもないので、応力が集中する心配もない。また、ピンは一般にせん断と支圧で照査されることが多いが、滑りを伴ってもせん断に対する限界値の低下がない。このような点を考慮して、せん断降伏応力度を表-2.2.2及び表-2.2.5に示される値よりも大きく定めている。

(f) 仕上げボルトの降伏応力度の特性値としては、表-2.2.8に示す値を参考にすることができる。なお、表-2.2.8の引張応力度の参考値は、**JIS B 1180**に規定される六角ボルトの降伏応力度である。六角ボルト

トの機械的性質は、JIS B 1051 炭素鋼及び合金鋼製締結用部品の機械的性質において、強度区分ごとに製品の機械的性質として規定されており、このうち、強度区分4.6、8.8、10.9のものについて示している<sup>23)</sup>。

表-2.2.8 仕上げボルトの降伏応力度<sup>23)</sup> (N/mm<sup>2</sup>)

JIS B 1051 による強度区分 応力度の種類	4.6	8.8	10.9
	引張応力度	240	660
せん断応力度	140	380	540
支圧応力度	360	990	1410

(g) スタッドは、鋼部材（鋼管杭や鋼矢板など）から鉄筋コンクリートへの断面力を確実に伝達するために用いられる。頭付スタッドの降伏応力度の特性値としては、表-2.2.9に示す値を参考にすることができる<sup>24)</sup>。

用いるスタッドの軸径は16mmまたは19mmを標準とするが、鋼部材の残存肉厚、被覆コンクリートの厚さ、コンクリートの強度等を考慮し、水中部の施工において確実に母材と溶接できるよう、軸径および長さを選定する必要がある。なお、軸径19mmを超えるスタッドを用いる場合には、水中施工において熔融金属の抜け落ちなどにより品質確保が難しいため、採用にあたっては十分な検討が必要である。

表-2.2.9 頭付きスタッドの形状・寸法及び機械的性質<sup>24)</sup> (単位：mm)

呼び名	呼び長さ (参考)	軸径 ( <i>d</i> )		頭部直径 ( <i>D</i> )		頭部厚さ ( <i>T</i> )		首下の丸み ( <i>r</i> )		降伏点または 0.2%耐力 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)
		基準 寸法	許容 差	基準 寸法	許容 差	基準 寸法	許容 差	基準 寸法	許容 差			
10	50, 80, 100	10	±0.3	19	±0.3	7	-0.5 +1.0	1.5	±1.0	235以上	400~550	20以上
13	80, 100, 120	13		25		8		1.5				
16		16		29		8		2.5				
19	80, 100, 130, 150	19	32	10	2.5							
22		22	35	10	3							
25	120, 150, 170	25	41	12	3							

## 2.3 鋼材の腐食

### 2.3.1 一般

港湾の施設に使用される鋼材については、一般に厳しい腐食環境条件下にある。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。

### 2.3.2 鋼材の腐食

(1) 鋼材はそれを取り囲む環境に影響を受け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、土壌等の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>25)</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「さび」になる。

(2) 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のような傾向を示す<sup>26)</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。鋼矢板構造物や鋼管杭構造物では、環境条件によっては M.L.W.L. 直下部分の腐食速度が海水中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。

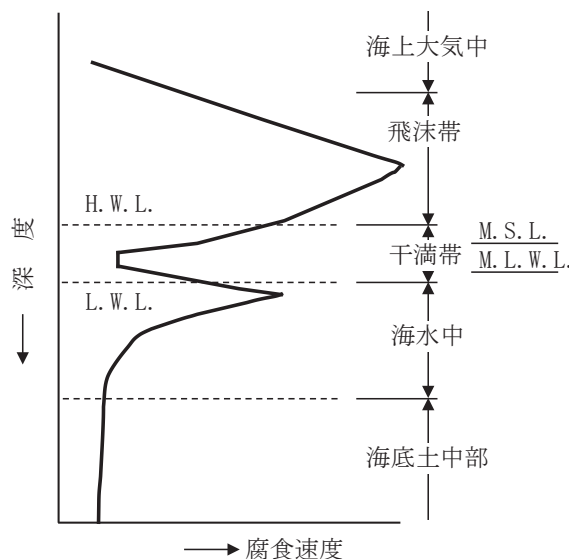


図-2.3.1 無防食鋼管杭の板厚減少のプロフィールの一例<sup>26)</sup>

### 2.3.3 鋼材の腐食速度

(1) 鋼材の腐食速度は、腐食環境条件によって異なる。港湾の施設に用いられる鋼材の腐食速度は、水域の気象条件、海水の塩分濃度及び汚染程度、河川水の流入の有無等、その水域の環境条件の影響を大きく受ける。

(2) 鋼材の腐食速度の標準値を表-2.3.1に示す。なお、既設鋼構造物の調査結果等を基に取りまとめられた、平均的な値を示すものである。なお、集中腐食の腐食速度は表-2.3.1の値を大きく上回ることがある。

(3) 土中部 (海底土中部や背面土中部等) の腐食については、一般に腐食速度は小さい。しかし、土の物理的特性 (粒径、含水比、土壌抵抗率等) や化学的特性 (pH、溶存酸素、微生物の活動度等) によっては、大きな値を示すこともある。

(4) 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。

(5) サンドエロージョンは、鋼材面に生じるさび層が砂の動きで除去され裸鋼材面が露出されることにより、

腐食速度が大きくなる現象である<sup>27)</sup>。防砂堤に鋼矢板を使用した場合、サンドエロージョンによって砂面直上部の平均腐食速度が1.25～2.39mm/年となった例がある<sup>28)</sup>。なお、砂面の上下変動が少ないときには、砂面直上部に磨耗箇所が限定されるため、この値より大きくなると言われる。なお、電気防食の適用により、サンドエロージョンの進行を抑制することが可能である<sup>27)</sup>。

表-2.3.1 鋼材の腐食速度の標準値<sup>25)</sup>

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まで	0.1～0.3
	海水中	0.1～0.2
	海底土中部	0.03
陸側	陸上大気中 土中部 <sup>*1</sup>	0.1
	a) 残留水位より上	0.03
	b) 残留水位より下	0.02

\*1：鋼矢板などの背面も含む

## 2.4 鋼材の防食

### 2.4.1 一般

(1) 鋼材の防食対策は、鋼材が存する自然状況に応じて、電気防食工法または被覆防食工法その他の防食工法によって適切に行うものとする。鋼材の防食設計については、[施] 第2章 1.3.5 鋼材の防食設計を参照することができる。

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

### 2.4.2 電気防食工法

(1) 電気防食工法は、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、鋼材よりも卑（マイナス側）な電位の金属であるアルミニウム (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工法としてはほとんどが流電陽極方式が用いられている。流電陽極材料の性能を表-2.4.1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流量が最も大きく、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ている。

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つなぎ、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-2.4.1 流電陽極方式用陽極材料の性能比較<sup>29)</sup>

種類	アルミニウム合金陽極	亜鉛合金陽極	マグネシウム合金陽極		
特性	Al-Zn-In	純Zn, Zn合金	純Mg, Mg-Mn	Mg-6Al-3Zn	
比重	2.6~2.8	7.1~7.2	1.74	1.82	
陽極閉路電位 (mV) (vs. S.C.E.)	-1,050以下	-1,000以下	-1,550以下	-1,450以下	
鉄に対する有効電位差 (mV)	250	200	750	650	
有効電気量理論値 (A·h/kg)	2,700~2,900	820~830	2,200	2,210	
海水中 1 mA/cm <sup>2</sup> * <sup>1</sup>	有効電気量 (A·h/kg) 消耗度 (kg/A) /年	2,600以上 3.4以下	780以上 11.3以下	1,100以上 8.0以下	1,220以上 7.2以下
地中 0.03 mA/cm <sup>2</sup>	有効電気量 (A·h/kg) 消耗度 (kg/A) /年	1,860* <sup>2</sup> 以上 4.8以下	530以上 16.6以下	880以上 10.0以下	1,110以上 7.9以下
適用環境* <sup>3</sup>	海水中、海底土中部	海水中	土壌中、淡水中	土壌中、淡水中	

\*1：腐食防食学会規格：流電陽極試験法 (JSCS-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、一般に1860 A·h/kgの値が設計値として採用されている。

\*3：汽水域、抵抗率変動域及び高流速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。

(2) 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現地施工であるが、陸上で製作されるジャケット式構造物などにおいては、工場での陽極を取り付ける。

(3) 2000年のJIS A 5523 制定前の材料を用いた鋼矢板を用いた鋼矢板係船岸において、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際に、流電陽極が水中溶接された箇所では脆性破断が生じた事例が報告されている<sup>30)</sup>。この結果を踏まえ、水中溶接に適するように鋼矢板の化学成分が改訂された。なお、JIS改訂前の材料を用いた鋼矢板に対して水中溶接を行う際には、以下の点に留意することで、鋼矢板への溶接性の信頼性が向上する<sup>31)</sup>。

- ①溶接時の急熱・急冷に起因する材質劣化の要因を取り除くため、溶接開始及び終了位置を、鋼矢板部とせず、陽極の芯金上で行う。
- ②陽極の仮付けによる材質劣化を防止するため、仮付け溶接位置を本溶接部に限定する。

### 2.4.3 被覆防食工法

#### (1) 一般

- ①港湾鋼構造物で、海水への浸漬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5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
  - (e) 金属被覆
- ③被覆防食工法は、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ものと海水中にも適用できるものがある。また、海水中では電気防食工法と併用する場合と被覆防食工法のみによる場合がある。さらに、新設の施設にのみ適用できる工法と既設の施設にも適用可能な工法がある。
- ④被覆材の防食性能は、施工 (特に下地処理) の影響を受ける。下地処理の目的は、被覆面のさび、油脂、汚れ等の被覆材の付着性及び防食性に有害となる物質を取り除くとともに、被覆材の初期付着強度の確保に有効な表面粗さを与えることである。被覆材の防食効果と耐用年数を保持するために、被覆材の種類に応

じて必要とされる下地処理は異なる。

下地処理後の鋼材面は化学的に活性で空気中では酸化の進行が速いので、下地処理後速やかに被覆材の施工を行わなければならない。また、施工時には被覆面に損傷を与えないように十分注意しなければならない。

## (2) 塗装

塗装は、塗料を塗布・乾燥により鋼材表面に塗膜を形成させるものであり、環境遮断効果やさび止め顔料の働きによって鋼材が防食される。なお、塗料は、顔料、塗膜の主成分となる樹脂、添加剤及び溶剤で構成されている。塗装は、他の防食法と比較して「塗る」という簡単な操作により施工することができるなど、多くの利点を有している。古くから鋼構造物の防食法として利用されており、塗料や塗装技術の発達とともに防食性能も向上し、港湾鋼構造物の防食法として多く使用されている。

主な塗装には次の種類がある。

- ・海洋塗装（海洋厚膜エポキシ塗装等）
- ・その他塗装（フッ素樹脂塗装、ポリウレタン樹脂塗装、ポリエステル樹脂塗装等）

## (3) 有機被覆

有機被覆は、塗装と比較して膜厚が厚いことから、施工性、補修性及び施工コスト等に難点があるが、耐食性は優れている。特に有機被覆は、海水中、干満帯、飛沫帯等の過酷な腐食環境において、厚膜であるため環境遮断効果が高く、長期防食性を期待できるものとして、採用されている。

現在広く採用されている有機被覆には次の種類がある。

### ①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）

重防食被覆は、鋼管杭・鋼矢板・鋼管矢板を対象に、工場の専用設備で被覆を行うものであり、ポリエチレン被覆とウレタンエラストマー被覆がある。品質管理が行き届き、量産も可能である。厚さは2～3mm程度に被覆したものである。

### ②超厚膜形被覆

超厚膜形被覆は、塗装と同様に液状の被覆材料を被覆する方法であり、塗装では困難である1～3mm厚さを少ない回数で確保でき、耐久性のある被膜を形成することができる。超厚膜形被覆は、複雑な形状のものや大型構造物にも適用可能であり、一般に工場において施工が行われる。

### ③水中硬化形被覆

水中硬化形被覆は、水中施工が可能な材料を用いて干満帯や海水中の鋼材を被覆する方法である。その主たる材料は、水中硬化形エポキシ樹脂塗料である。水中硬化形被覆には、パテ状のものを粘土細工の要領にて手で圧着して厚膜に施工するパテタイプ、及び流動性のある材料をゴム製へら等を用いて施工するペイントタイプなどがある。

## (4) ペトロラタム被覆

ペトロラタム被覆は、原油から減圧蒸留により分離された石油ワックスの一種であるペトロラタム系の防食材料により鋼材を被覆する防食法である。被覆した防食材を波浪や漂流物の衝突などの外力から守り、長期の耐久性を確保する目的のため、保護カバーを取り付ける。保護カバーの材質により、樹脂製保護カバー方式と耐食性金属保護カバー方式に大別される。

ペトロラタム系防食材料には、ペトロラタムを主成分とし、腐食抑制剤など添加して不織布に含浸させたテープ状のものやシート状のもの、下塗り材であるペトロラタムペースト、ペトロラタムペーストを含有したペトロラタムペーストテープなどがある。ペトロラタム系防食材料は、粘着性と柔軟性に富み鋼材表面によく密着する。また、長期にわたって硬化や蒸発しにくい粘性を保ち、水をはじく性質を有しているため水分や空気を遮断し、さらにペーストに含まれている腐食抑制剤によって鋼材表面に薄い防食性の被膜が形成され、さびの進行を抑制する。