

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1230 March 2011

重防食被覆を適用したハット形鋼矢板の耐久性
に関する基礎的研究

審良	善和
山路	徹
岩波	光保
原田	典佳
吉崎	信樹
村瀬	正次
斎藤	勲
上村	隆之
北村	卓也

独立行政法人 港湾空港技術研究所

Independent Administrative Institution,
Port and Airport Research Institute, Japan

目 次

要 旨	3
1. まえがき	5
2. 重防食鋼矢板の耐久性に関する過去の耐久性評価	6
2.1 概説	6
2.2 U形重防食鋼矢板の劣化限界状態の推定	6
2.3 U形鋼矢板の実構造物調査結果	7
2.4 実験室における劣化進展速度の推定	7
2.5 波浪の影響	10
2.6 維持・管理手法および補修方法	10
2.7 過去の研究成果のまとめ	11
3. ハット形重防食鋼矢板の防食仕様	11
3.1 ハット形鋼矢板の形状	11
3.2 防食層と防食範囲	11
3.3 防食層の物性	13
3.4 ハット形重防食鋼矢板の製造方法	13
4. 重防食鋼矢板の劣化進展に関する耐久性評価	14
4.1 重防食鋼矢板の耐久性評価方法	14
4.2 空気吹き込み塩水浸漬試験	16
4.3 海水シャワー暴露試験	20
4.4 結果および考察	21
4.5 劣化進展速度の推定	24
4.6 重防食層内部への腐食の進展	26
4.7 重防食被覆の耐久性評価	28
5. 被覆層損傷部の劣化進展に関する耐久性評価	28
5.1 概要	28
5.2 試験方法	28
5.3 結果および考察	29
6. ハット形重防食鋼矢板の構造部材としての耐久性評価	33
6.1 ハット形重防食鋼矢板の腐食	34
6.2 ハット形重防食鋼矢板の腐食による断面減少	35
6.3 矢板壁としての長期的な構造性能	37
7. ハット形重防食鋼矢板の維持管理方法に関する一考察	40
7.1 ハット形重防食鋼矢板の性能低下曲線	40
7.2 ハット形重防食鋼矢板の点検・診断	41
7.3 補修対策	42

8. 結論	45
9. あとがき	46
謝辞	46
参考文献	46

Fundamental Study on Durability of Hat-Type Steel-Sheet-Pile Protected by Heavy Duty Coating

Yoshikazu AKIRA*

Toru YAMAJI**

Mitsuyasu IWANAMI***

Noriyoshi HARATA****

Nobuki YOSHIZAKI*****

Masatsugu MURASE*****

Isao SAITO*****

Takayuki KAMIMURA*****

Takuya KITAMURA*****

Synopsis

Hat-type steel-sheet-pile enables to improve drivability, structural reliability and economical merit compared with traditional U-type steel-sheet-piles. To apply hat-type steel-sheet-piles to port structures, it is required to quantitatively evaluate durability and corrosion protection performance of hat-type steel-sheet-piles protected by heavy duty coating. Heavy duty coating method with polyethylene or polyurethane has high performance of corrosion protection. However, adhesiveness between steel and polyethylene/polyurethane will be locally degraded in the edge of the coating due to corrosion of steel. In view of the maintenance and long term service life, adhesion degradation at the edge of protection sheet is one of important problem. Delamination of heavy duty coating and corrosion of sheet-piles have been examined by accelerated test and exposure test. Moreover, structural performance of deteriorated heavy duty coated sheet-pile was evaluated, and suitable maintenance method of heavy duty coated sheet-pile was proposed by revised deterioration degree. The principal results are as follows; (1) Deterioration model and life time prediction method of hat-type steel-sheet-piles coated heavy duty was proposed, and their durability was estimated to be as well or better than traditional U-type steel-sheet-piles coated heavy duty. (2) Delamination rate of coating material from the edge was estimated to be 3.2mm/year. (3) The structural performance was predicted by acceleration test results and the standard corrosion rate in marine environment.

Key Words: heavy duty coating, hat-type steel-sheet-pile, corrosion protection, durability, maintenance

* Researcher, Materials Group, Geotechnical and Structural Department

** Head of Materials Group, Geotechnical and Structural Department

*** Head of Structural and Mechanics Group, Geotechnical and Structural Department

**** Japanese Technical Association for Steel Pipe Piles and Sheet Piles

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-46-844-5059 Fax : +81-46-844-0255 e-mail:akira@pari.go.jp

重防食被覆を適用したハット形鋼矢板の耐久性 に関する基礎的研究

審良 善和*
山路 徹**
岩波 光保***
原田 典佳****
吉崎 信樹****
村瀬 正次****
斎藤 勲****
上村 隆之****
北村 卓也****

要 旨

ハット形鋼矢板は、経済性、施工性、構造信頼性の向上を目的に近年開発された鋼矢板であるが、港湾鋼構造物に適用する際には、適用できる防食対策を確立させる必要がある。そこで、本研究においては、ハット形鋼矢板に重防食被覆工法を適用した場合の鋼材の防食および被覆防食の耐久性について定量評価し、適切な維持管理手法も併せて示すことで、効率的な港湾の施設整備に資することを目的として、実験的検討を試みた。なお、ハット形鋼矢板に適用される重防食被覆工法は、矢板形状からウレタンエラストマー被覆となる。

重防食被覆の劣化は、被覆端部や疵部等の鋼材が露出した箇所から腐食性物質が浸透し鋼材の腐食が生じることで、被覆材の接着力低下によって防食層の剥離が経時的に進行することが主体となる。そこで、被覆端部および疵部の劣化進展および鋼材腐食について検討し、耐久性評価を行った。また、得られた知見からハット形重防食鋼矢板の構造性能評価を行い、最後に、ハット形重防食鋼矢板の維持管理方法および具体的な点検診断方法の提案を行った。主な結果を以下に示す。(1)重防食鋼矢板の劣化進行モデルおよび耐用年数予測式を示した。また、ハット形重防食鋼矢板の耐久性は従来のU形重防食鋼矢板と同等またはそれ以上と推察された。(2)被覆内部への劣化進展速度は、被覆端部、疵部ともに3.2mm/年と推定された。(3)検討で得られた劣化進展モデルをもとに、港湾における鋼材の腐食速度の標準値を用いて断面性能の低下率を予測することができた。(4)ハット形重防食鋼矢板の一般定期点検時の劣化度判定では、劣化度aと判定される劣化進展距離を55mmとして、劣化度判定基準(案)を提案した。

キーワード：重防食被覆，ハット形鋼矢板，防食，耐久性，維持管理

* 地盤・構造部 材料研究チーム 研究官
** 地盤・構造部 材料研究チームリーダー
*** 地盤・構造部 構造研究チームリーダー
**** 一般社団法人 鋼管杭・鋼矢板技術協会
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人 港湾空港技術研究所
電話：046-844-5059 Fax：046-844-0255 e-mail:akira@pari.go.jp

1. まえがき

港湾鋼構造物では、平均干潮面（以下、M.L.W.L.）以下の部分は電気防食工法、さらに朔望平均干潮面（以下、L.W.L.）以下1mよりも上の部分は被覆防食工法により防食されることが一般的である¹⁾。被覆防食工法においては、長期防食を期待して、図-1.1、図-1.2に示すポリエチレン（記号PE）またはウレタンエラストマー（記号PU）を特殊表面処理層および接着層によって接着させた重防食被覆工法が多く用いられている。なお、重防食被覆を施した鋼矢板は、厳しい腐食環境である港湾施設の整備（係船岸・護岸等）において、昭和59年から実用化されている。

重防食被覆工法は、工場の専用設備で製作されるものであり、工場製品として十分に品質管理されたものである。ポリエチレン被覆は、耐候性向上を目的としてカーボンブラックを配合させたポリエチレン樹脂を厚さ2～3mm程度に被覆したもので、耐久性、耐薬品性および耐海水性に優れる。一方、ウレタンエラストマー被覆は、ポリオール樹脂とイソシアネートからなる2液を硬化させてできるウレタン樹脂を、スプレー塗装により厚さ2～3mm程度に被覆されたもので、特に耐摩耗性に優れ、長期耐久性が期待されている。

鋼矢板は、従来、図-1.3に示すU形鋼矢板が適用されてきた。U形鋼矢板は、継手かん合部が側面になる構造で、凸面と凹面が交互に配置されることとなる。近年、図-1.4に示すハット形鋼矢板900（以下、ハット形鋼矢板）が開発され、経済性、施工性、構造信頼性に優れた鋼矢板として、平成17年より、河川分野を中心に実工事に適用されている。ハット形鋼矢板は、継手かん合部が全て凹面に配置される構造である。これら鋼矢板に重防食被覆を適用する場合、継手かん合部を除く海側全面が被覆されることとなる。既往の研究成果から、鋼矢板の腐食パターンとしては、凸面の腐食が特に厳しく、側面および凹面の腐食は比較的小さいとされている。したがって、U形およびハット形鋼矢板の継手かん合部および重防食被覆端部の腐食は、同程度と考えてよいと思われる。しかし、施設の長寿命化を考えた場合、重防食被覆を施した鋼矢板の健全性および耐久性について定量評価する必要がある。

また、港湾の施設における設計体系が性能規定化され、供用期間において要求性能を満足するように、適切に維持管理しなければならない。したがって、鋼構造物の防食においても、その防食設計、施工および維持管理が非常に重要となる。（財）沿岸技術研究センターより「港

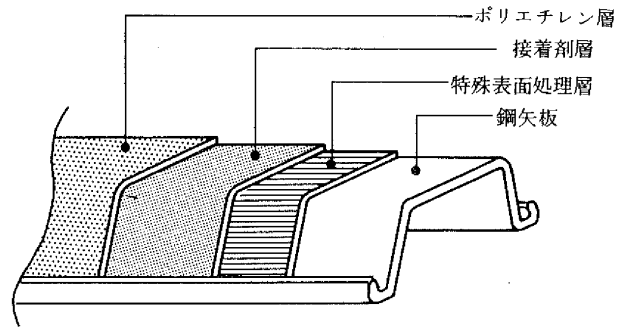


図-1.1 ポリエチレン被覆重防食鋼矢板

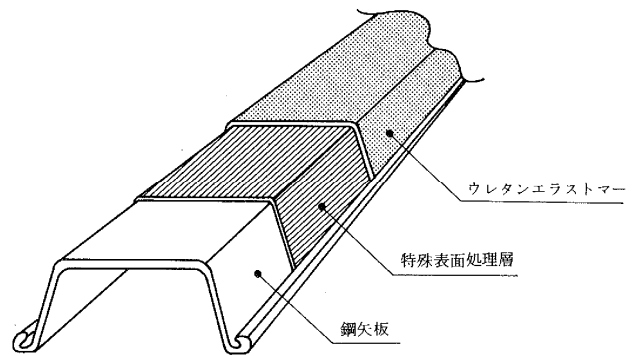


図-1.2 ウレタンエラストマー被覆重防食鋼矢板



図-1.3 U形鋼矢板の例（SP-II型）



図-1.4 ハット形鋼矢板の例（SP-10H型）

湾鋼構造物防食・補修マニュアル²⁾、「港湾の施設の維持管理技術マニュアル³⁾」が刊行され、供用期間中に鋼構造物の要求性能を確保するための計画的な点検・補修に基づく維持管理が提示されている。

本研究においては、ハット形鋼矢板に重防食被覆工法を適用した場合の鋼材の防食および被覆部の耐久性について評価し、適切な維持管理手法も併せて提示することで、効率的な港湾の施設整備に資することを目的とする。なお、ハット形鋼矢板に適用される重防食被覆は、鋼矢板の形状からウレタンエラストマー被覆のみとなる（詳細は3章に示す）。ウレタンエラストマーは化学的に安定であり、紫外線・酸素・海水等による化学的劣化については、白亜化によるわずかな塗膜損耗があるものの、被覆層の膜厚が2mm～3mmと厚膜であることから、

実用上は問題にならない。また、施工時の重機やワイヤあるいは供用時の船舶や漂流物の衝突等による物理的外力によって重防食被覆が損耗・剥離する不確定要因を除けば、被覆端部や疵部等の鋼面露出部から腐食性物質が浸透して、被覆材の接着力低下が経時的に進行することが劣化の主体となる²⁾。したがって、重防食被覆工法の耐久性は、ウレタンエラストマー被覆と鋼矢板の被覆端部または疵部近傍の接着耐久性で評価することができる。

本資料では、2章でU形鋼矢板において過去に実施された耐久性評価試験の概要を、3章で重防食被覆されたハット形鋼矢板（以下、ハット形重防食鋼矢板）の概要を、4章で空気吹き込み塩水浸漬試験と海水シャワー暴露試験の試験方法および試験結果を、5章では疵部周辺の腐食進展状況の調査結果を、6章で構造試算結果等をもとにしたハット形重防食鋼矢板の耐久性評価について報告する。また、7章でハット形重防食鋼矢板の維持管理方法および具体的な点検診断方法について提案する。

2. 重防食鋼矢板の耐久性に関する過去の耐久性評価

2.1 概説

重防食被覆された鋼矢板（重防食鋼矢板）は、海洋の厳しい環境にさらされる。しかしながら、開発当初（1980年代）においては、その劣化進展（被覆層の剥離や腐食）は殆どないと考えられており、1980年代後半までは、その長期耐久性が十分把握されていなかった。

重防食被覆された鋼管杭（重防食鋼管杭）においては、1970年代から阿字ヶ浦での暴露試験（約20年間）^{4),5)}や千葉沖での暴露試験（10年間）⁴⁾あるいは熱帯海域の暴露試験⁶⁾において、また、1980年代では波崎観測栈橋での暴露試験（25年、継続中）における調査⁷⁾や駿河湾の海洋ステーションにおける調査⁸⁾などが実施されている。これらの結果から、重防食鋼管杭における耐久性は確認されている。

重防食鋼矢板においても、耐久性の把握を行うために1992年から（社）鋼管杭・鋼矢板技術協会（当時：鋼管杭協会）と（独）港湾空港技術研究所（当時：港湾技術研究所）で共同研究が実施されている。本共同研究は、実構造物の調査および実験室における促進試験による耐久性の評価が行われ、U形重防食鋼矢板の

耐久性⁹⁾を推定している。本章では、過去のU形重防食鋼矢板における既往の研究結果から、明らかにされている点を述べ、ハット形重防食鋼矢板の耐久性の推定に関する既往検討結果について述べる。

2.2 U形重防食鋼矢板の劣化限界状態の推定

重防食被覆を施したU形鋼矢板（以下、U形重防食鋼矢板）においては、参考文献⁹⁾および1999年発行の「港湾構造物の維持・補修マニュアル」¹⁰⁾に、重防食被覆の劣化進展に応じた劣化度指標が示されている。これを、表-2.1に示す劣化度指標a～dに合わせて書き換えると、図-2.1のようになる。重防食被覆の劣化度

表-2.1 重防食被覆の劣化度判定例³⁾

劣化度	重防食被覆の点検・調査結果	防食の性能評価
a	被覆の劣化が著しく、鋼材が腐食している状態	防食性能が著しく低下している状態
b	一部に鋼材まで達する被覆の劣化が生じ、鋼材の腐食が認められる。	防食性能が低下している状態
c	鋼材まで達しない被覆の損傷が多くみられる。	防食性能の低下はないが、変状が発生している状態
d	初期状態とほとんど変化なく、健全な状態である。	ほとんど変状が認められない状態

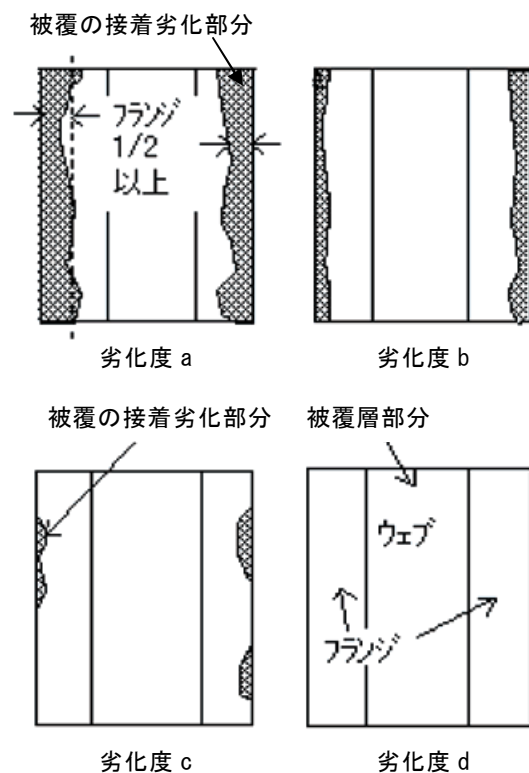


図-2.1 U形重防食鋼矢板の劣化度^{9),10)}

は、被覆端部からの劣化進展距離で評価でき、被覆端部からの剥離劣化が著しく補修が必要となる状態（被覆防食の限界状態）を超える場合が、図-2.1における劣化度 a と定義できる。なお、ここではフランジ部の1/2以上としている^{9),10)}。これは、被覆端部からの剥離による劣化進展に伴い、剥離部に波浪から受ける外力による繰り返し応力が作用することになるが、重防食被覆材の急激な劣化進展が起きない範囲として示されている⁹⁾。このフランジ部の1/2の距離は、従来の最も使用頻度の高いU形重防食鋼矢板 SP-Ⅲ型、SP-Ⅲ_W型で約55mmとなり、これにより、供用時の点検から、重防食鋼矢板における劣化度が具体的に評価できることになる。

2.3 U形鋼矢板の実構造物調査結果⁹⁾

実構造物調査は、北海道から沖縄における15港湾の施設で、設置から5年～12年経過後の重防食鋼矢板の調査が行われた⁹⁾。調査項目を表-2.2に示す。これから、実構造物における重防食鋼矢板の耐久性については以下の知見が得られている。

- (1) 実構造物である重防食鋼矢板の重防食被覆層には、打設時に受けた疵が多く見られた。ただし、疵面積は全被覆面積に対して0.3%以下程度であり、重防食層全体の耐久性を著しく損なうものではない。
- (2) 重防食被覆端部には重防食被覆端部保護のためのシーリング材が施工されているが、この脱落や、重防食被覆端部(下端部および側面被覆端部)からの軽微な劣化進展が観察された。ただし経過7年以下では、重防食被覆端部の剥離劣化の進展は認められず、経過7年以上において重防食被覆層の剥離劣化が進行するものと推定された(図-2.2)。ただし、実構造物調査からは、剥離劣化が進展する速度(以下、劣化進展速度と呼ぶ)は、明確に推定されていない。
- (3) 重防食被覆中央部のポリエチレン被覆層の付着強度(ピール強度)には極端に劣化したものはなく、被覆層自体の物性についても劣化は認められていない。これは、被覆材の劣化の進行が、主に被覆端部から起きることを示しており、重防食被覆中央部の接着力低下による浮きなどの劣化は、端部からの劣化進展と比較して非常に遅いことを示唆している。

2.4 実験室における劣化進展速度の推定

実構造物調査から被覆下端部、継手かん合部近傍の

表-2.2 調査項目

<ul style="list-style-type: none"> ・海生生物付着状況 ・重防食層の外観観察 ・継手かん合部の腐食状況 ・重防食被覆材の補修状況 ・重防食被覆材 (PE および PU) の詳細調査
--

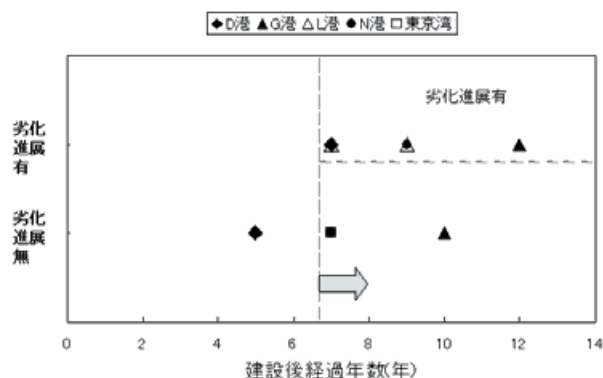


図-2.2 経年調査から明らかになった実構造物の重防食鋼矢板・被覆端部の劣化進展の有無

重防食被覆端部からの剥離による劣化が主たる劣化要因と認められていることから、図-2.1の被覆防食の性能の限界値に達するまでの期間は、以下の式(2.1)で推定できると考えられている⁹⁾。

$$t = T_i + \frac{W}{v} \quad (2.1)$$

ここで、

t : 劣化度 a に達するまでの時間 (年)

T_i : 実構造物で調査された被覆層の剥離による劣化進展が始まるまでの期間 (=7年) (以下、潜伏期間と呼ぶ)

W : 劣化度 a に達する重防食被覆層の劣化進展長さ (mm)

v : 重防食被覆層の劣化進展速度 (mm/年)

従来のU形重防食鋼矢板の研究⁹⁾では、実験室における室内試験において、重防食被覆層の劣化進展速度(v)が推定されている。以下、その検討方法と調査結果について示す。

(1) 劣化進展速度の推定方法

劣化進展が起きる場所は、重防食被覆端部からと考えられるので、図-2.3に示す2種類の供試体を使用している。

試験方法は、図-2.4に示す海水中を模擬した溶液中での空気吹き込み浸漬試験を用いている。

海洋環境下においては、重防食被覆層の劣化進展を引き起こす原因は、鋼材の腐食反応によるものと推定

される。海水中での腐食反応は、酸素還元反応によるカソード反応が律速になるとことから、鋼材の腐食を促進させるために浸漬槽中に空気を吹き込んでいる。また、温度を 40～60℃ とすることで、鋼材の腐食反応および重防食被覆層の劣化進展速度を促進することを目的としている。

空気吹き込み浸漬試験は、ポリエチレン被覆およびウレタンエラストマー被覆ともに実施されている。その推定方法は、空気吹き込み浸漬試験により重防食被覆端部からの劣化進展を経時的に追うことで、劣化進展速度を求め、以下に示す a) および b) の方法で促進環境下における劣化進展速度を実環境下における劣化進展速度に換算した。なお、実験結果では、劣化進展は端部シーラ材を付与した端面からは殆ど劣化進展がなかったことから、試験材の切断端部からの劣化進展を測定し、これを劣化進展距離と定義している。

文献 9) によれば、いずれの方法でも推定は可能であり、a), b) の方法とも概ね一致した値が推定されている。ここで提案されている空気吹き込み浸漬試験方法は、その後も土木学会および日本鉄鋼連盟にて継続検討され、空気吹き込み量、吹き込み方式、試験材の置き方が整理され、土木学会より海洋環境における有機被覆鋼材の促進試験として推奨されている¹¹⁾。

a) アレニウスプロットによる推定

劣化進展速度の温度依存性を利用して 40～60℃ で実施される空気吹き込み浸漬試験で得られた劣化進展速度を、日本近海の平均海水温度 20℃ に外挿して求める方法である。

ここで、アレニウスプロットによる推定法であるが、式(2.2)にアレニウス式を示すが、化学反応速度は温度に依存し、温度が上昇すると反応速度も大きくなる。

$$v = A \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (2.2)$$

ここで、

v : 反応速度

A : 頻度因子

E : 活性化エネルギー (アレニウスパラメータ)

R : 気体定数

T : 絶対温度 (K)

頻度因子 (A)、気体定数 (R) は定数であり、活性化エネルギー (E) は固有値となるため、式 (2.3) のように変換すると、反応速度の対数 ($\ln(v)$) は、絶対温度の逆数 ($1/T$) と直線関係になることから、これを用

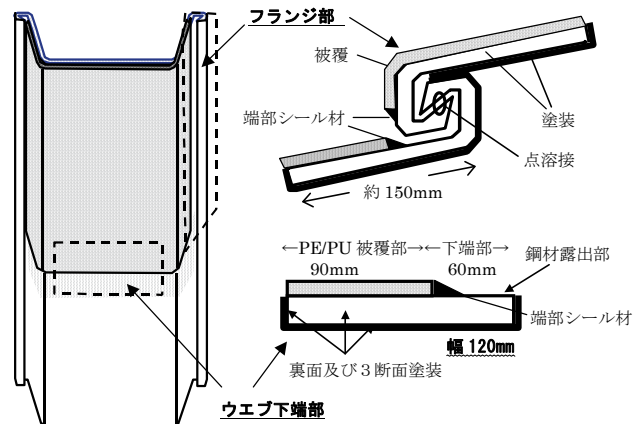


図-2.3 U形重防食鋼矢板の劣化進展速度の推定に使用された供試体の概要⁹⁾

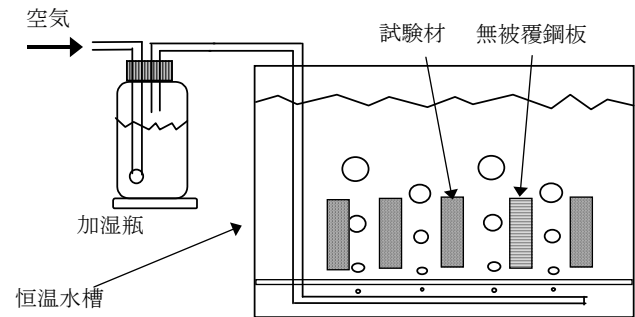


図-2.4 空気吹き込み浸漬試験の概要⁹⁾

いて、高温環境で得られた実験結果から 20℃ における劣化進展速度を予測するものである。

$$\ln(v) = -\frac{E}{R} \cdot \frac{1}{T} + \ln(A) \quad (2.3)$$

b) 無被覆鋼材の腐食速度による推定

空気吹き込み浸漬試験において温度を変化させて実施した場合、反応速度は温度依存性があるため、無被覆鋼材の腐食速度は異なる。重防食被覆層の劣化進展速度は鋼材の腐食反応に起因すると推定されるため、無被覆鋼材の腐食速度と劣化進展速度には相関があると考えられる。これを利用し、海洋環境における一般的な腐食速度 (海中部においては 0.1mm/年) の場合の劣化進展速度を外挿して求める方法である。

(2) 劣化進展速度の推定結果

空気吹き込み浸漬試験における劣化進展速度は、一例として図 2-5⁹⁾ に示すように、試験期間に対して線形に進行する。したがって、式 (2.1) により劣化進展速

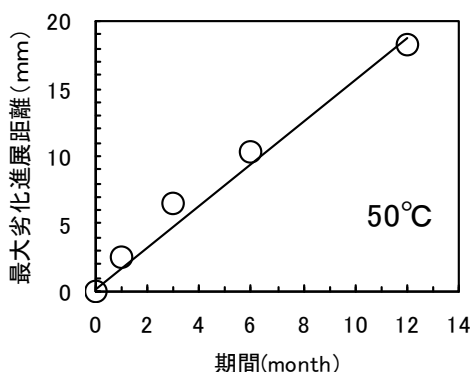


図-2.5 ポリエチレン被覆重防食鋼矢板の空気吹き込み浸漬試験後の最大劣化進展距離と試験期間の関係⁹⁾

度が推定可能としている。

空気吹き込み浸漬試験において実施された供試体の各期間、温度から求めた劣化進展速度のアレニウスプロットによる温度 20°C 環境下におけるウレタンエラストマー被覆鋼材の劣化進展速度の推定結果を図-2.6 に示す。各温度の最大劣化進展速度は大きければつきが認められるが、温度の低下にしたがって最大劣化進展速度が小さくなる傾向を示している。なお、最小二乗近似により求めた近似線から推定した温度 20°C 環境下での最大劣化進展速度は 3.1mm/年と予測された。

図-2.7 に、空気吹き込み浸漬試験結果として得られたウレタンエラストマー被覆鋼材の劣化進展速度と無被覆鋼材の腐食速度の相関を示す。ばらつきが大きな結果であるが、この相関図から外挿して求めた無被覆鋼材の腐食速度 0.1mm/年時（海水中の腐食速度）の最大劣化進展速度は 3.7mm/年であった。

表-2.2 に推定されたポリエチレン (PE) およびウレタンエラストマー (PU) 被覆鋼材の劣化進展速度を、表-2.3 には、これら促進試験法から得られた推定値を使用し、式 (2.1) を用いて、U 形鋼矢板の重防食層劣化限界状態（劣化度 a）に達する期間を推定した結果を示す。これによると、U 形鋼矢板の重防食被覆端部からの剥離による劣化進展の性能の限界値（劣化度 a）に達するまでの期間は、およそ 20 年程度と推定される。

(3) 劣化進展速度に及ぼすその他の影響因子

a) 干満の影響

干満帯を想定した試験として「浸漬および乾燥の繰り返し試験（12 時間浸漬+12 時間乾燥）」を実施し、空気吹き込み浸漬試験との劣化進展距離の比較を行っている。乾湿繰り返しによる影響は小さく、劣化進展速度

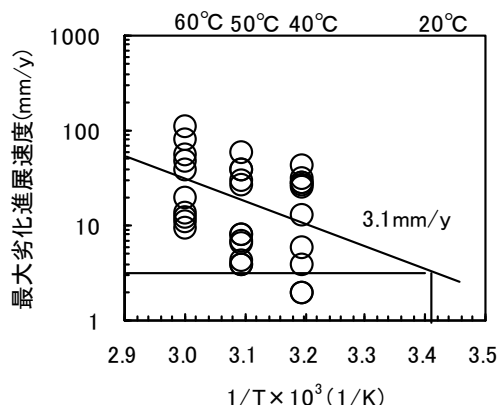


図-2.6 ウレタンエラストマー被覆鋼材の劣化進展速度のアレニウスプロットによる劣化進展速度の推定結果⁹⁾

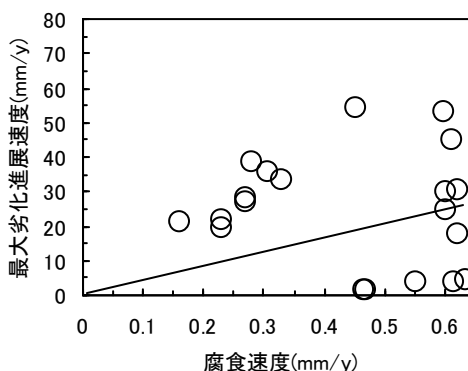


図-2.7 ウレタンエラストマー被覆鋼材の劣化進展速度と無被覆鋼材の腐食速度の相関⁹⁾

の差は、殆どないと示している⁹⁾。

b) 飛沫の影響

飛沫帯については、(独) 港湾空港技術研究所における海水シャワー暴露試験で、重防食被覆材の耐久性および鋼材の防食効果を評価しているが⁹⁾、端部シール面からの劣化進展はなかったと報告されている。よって、端面シール材などによる重防食被覆端部の腐食防止の有効性が示唆されている。

c) 水質の影響

水質については、純水環境における浸漬試験と比較して、純水環境では劣化進展が明らかに小さいことを報告している。したがって、淡水域については、空気吹き込み式の塩水浸漬試験による予測結果よりも高い耐久性および防食効果が期待できる。

d) 電気防食の影響

直接的な影響は認められていない。一般に、重防食

被覆材は高い絶縁抵抗を保持しているため、電気防食適用時に重防食被覆鋼材に電流が流入することはないと思われる。ただし、重防食被覆材自体に水分（海水）が浸透すると、抵抗が小さくなるため電流は流入する。この場合、酸素の還元（カソード反応）が鋼表面で行われるため、アルカリ性の環境となり、被覆材の浮きや剥離が生じる可能性がある。

なお、文献9)では、重防食被覆材への水分の浸透について調査されているが、浸透速度は小さいと示されている。そのため、上記のような現象は生じにくいと考えられる。

以上の室内試験から、標準的なⅢ形については、全面的な補修を要するまで、約20年程度の耐久性が期待できると結論付けられている。

2.5 波浪の影響⁹⁾

重防食被覆鋼矢板の劣化進展に伴い、波浪によって剥離した被覆層部が受ける応力は大きくなることが予測される。これらについて剥離した重防食鋼材を模擬した供試体について、繰り返し荷重を付与したモデル試験が行われている。

図-2.8には、波浪を模擬した繰り返し荷重を重防食層の劣化進展部位に与え、劣化進展速度を調査した結果を示す。波浪から受けると仮定される繰り返し荷重の増加と、接着強度の低下により、剥離速度は増加する。しかしながら、波浪から受ける繰り返し荷重は、例えば波高2m、周期5secの場合、劣化進展（剥離）距離が300mmであっても0.05kgf以下であり、実際の波浪から受ける力は無視できることが示されている。以上の結果から静波時における波浪による繰り返し荷重は、重防食層の劣化進展に殆ど影響がないことが示されている。

2.6 維持・管理手法および補修方法

「港湾鋼構造物防食・補修マニュアル」²⁾によれば、重防食鋼矢板の耐久性は、上記結果を反映して、期待耐用年数は20年程度と結論付けられている。ただし、劣化進展は海水温度や水質（溶存酸素濃度、塩化物イオン濃度）などの影響を受けるため、期待耐用年数はあくまで目安であり、適切な維持管理が必要である。補修方法については、表-2.4に示すように重防食鋼矢板独自の手法が提案されている⁹⁾。なお、これらの補修方法については、2000年から東京都大井埠頭において、補修効果を確認するための実証試験が行われている。2005年に補修経過後5年の調査が実施されたが、

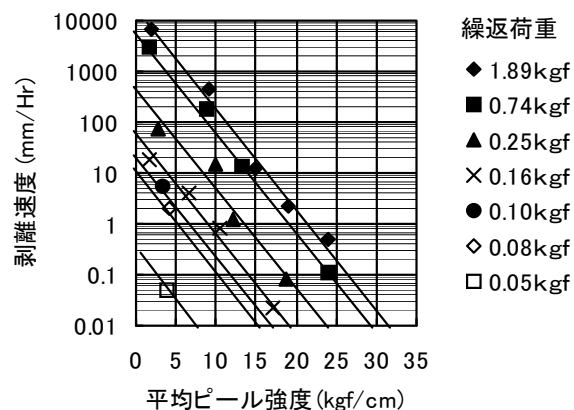


図-2.8 被覆層の剥離部が受ける繰り返し荷重、被覆層の接着強度（ピール強度）が剥離速度に及ぼす影響⁹⁾

表-2.2 アレニウスプロットおよび腐食速度から推定した劣化進展速度⁹⁾

	アレニウスプロット mm/y	環境腐食速度 mm/年
PE材	4.0	3.5
PU材	3.1	3.7

表-2.3 海中部において劣化度 a に到達する年数⁹⁾

	型	劣化度 a 時の 剥離長さ (mm)	劣化度 a 到達年数 (年)	
			アレニウス法 (海水温 0°C)	腐食速度 0.1mm/年
PE材	Ⅲ型	55	21年	23年
PU材	Ⅲ型	55	25年	22年

式(2.1)より算出

表-2.4 提案された重防食鋼矢板の補修法⁹⁾

補修工法	補修対象材料	
	PE	PU
鋸打ち工法	○	△
継手部防護カバー工法	○	○
SUSカバー工法	○	○
チタンカバー工法	○	○
継手部溶着工法	○	×

○：適用可能，△：要検討，×：不適

いずれの工法も、補修後の経過は良好であった¹²⁾。

2.7 過去の研究成果のまとめ

過去の研究において、U形鋼矢板の重防食層の耐久性について、以下のことが明らかとなっている。

(1) 実建造物の調査

- ・ 劣化進展は被覆端部より進行し、被覆中央部の劣化はそれに比較して十分遅い。
- ・ 劣化進展までの潜伏期間は7年程度となる。
- ・ 重防食被覆材には疵が存在していたが、その面積は被覆全体の0.3%以下であった。また、疵部からの劣化進展についての報告はない。

(2) 実験室における促進試験結果

- ・ 重防食被覆層の劣化進展速度は、3～4mm/年程度である。
- ・ 被覆端部からの剥離による劣化は時間に対して線形的に進展する。
- ・ 推定耐用年数は、式(2.1)を用いて推定できる。
- ・ ポリエチレンおよびウレタンエラストマー被覆とも同程度の劣化進展と考えられる。
- ・ 空気吹き込み浸漬試験は妥当な評価方法と考えられ、その予測手法は、アレニウスプロットおよび腐食速度との相関のいずれでも可能と考えられる。

(3) 波浪が劣化進展速度に与える影響は、静穏時には無視できる。

3. ハット形重防食鋼矢板の防食仕様

3.1 ハット形鋼矢板の形状

鋼矢板は、壁構造で使用されるため、その施工効率は、一枚あたりの打設時間が変わらなければ、打設枚数で決まる。したがって、経済性を考慮すれば、より幅の広い鋼矢板が求められている。そのため、鋼矢板はU形鋼矢板(400mm～500mm幅)が従来使用されてきたが、1990年代には広幅U形鋼矢板(600mm幅)が開発され、また、2000年代にハット形鋼矢板(900mm幅)が開発された。ハット形鋼矢板の例として、**図-3.1**および**図-3.2**に、それぞれSP-10H、SP-25Hの断面形状を示す。**図-3.3**に示すようにU形鋼矢板は、鋼矢板を1枚ずつ山側、谷側として交互に打設することにより壁構造を形成したが、ハット形鋼矢板は全て同方向となる点が大きく異なる。

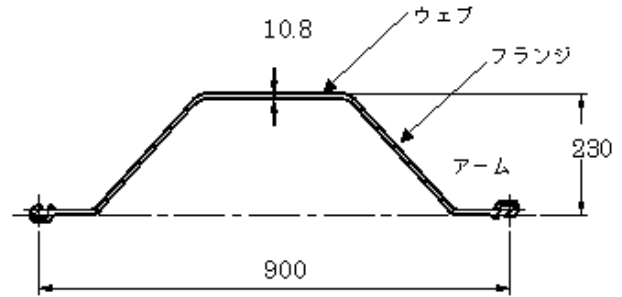


図-3.1 ハット形鋼矢板 (SP - 10H) の断面形状

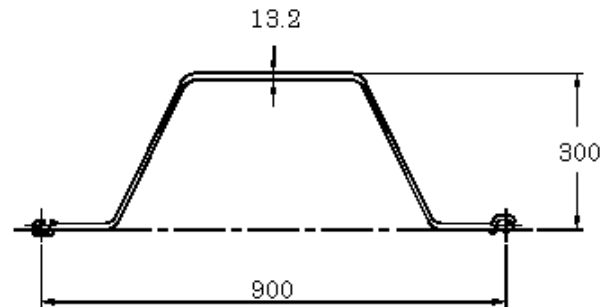


図-3.2 ハット形鋼矢板 (SP-25H) の断面形状

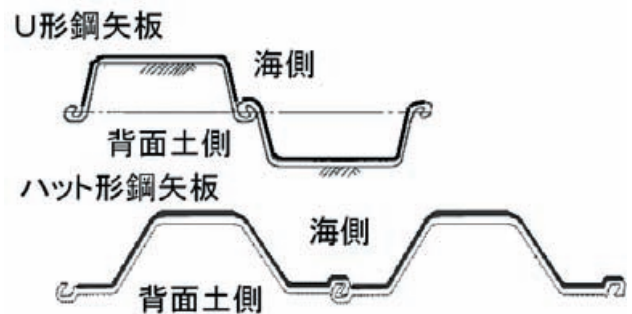


図-3.3 U形重防食鋼矢板とハット形重防食鋼矢板の重防食層被覆面

3.2 防食層と防食範囲

U形鋼矢板はポリエチレン被覆およびウレタンエラストマー被覆のいずれかで防食層を形成したが、ハット形鋼矢板ではウレタンエラストマー被覆のみとなる。従来のポリエチレン被覆は、防食層として最外層にポリエチレンシートを貼り付ける方法が主流である。そのため、鋼矢板の軸方向にポリエチレンシートを張り付けていくため、鋼矢板の幅方向の防食範囲を全てを覆うことのできるポリエチレンシートの幅が必要となる。ポリエチレンシートは工場製品のため、現状では、シート幅は1000mmが限界である。したがって、広幅のハット形鋼矢板のように、1枚あたりの幅方向の防食

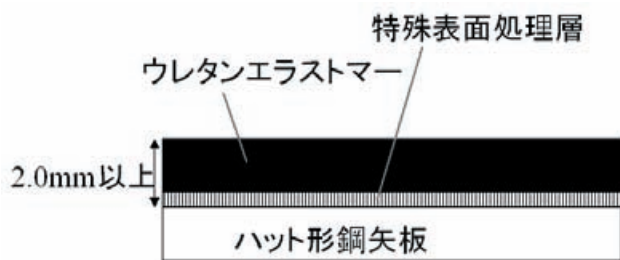


図-3.4 ハット形重防食鋼矢板の断面構成

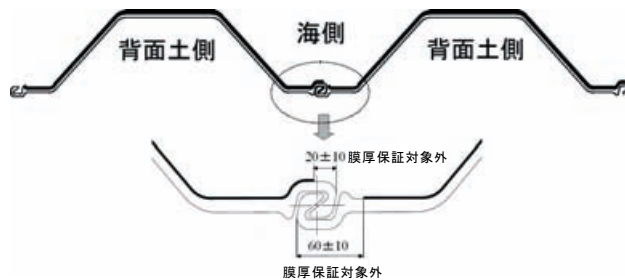


図-3.7 ハット形重防食鋼矢板の継手部の被覆範囲



図-3.5 ハット形鋼矢板 (SP-10H) の重防食範囲



図-3.6 ハット形鋼矢板 (SP-25H) の重防食範囲



写真-3.1 鋼矢板の腐食事例

範囲が 1000mm を超えるものには施工できない。そのため、ハット形鋼矢板（異形含む）では、シート幅の制限がない、ウレタンエラストマー被覆のみとなる。

(1) ハット形重防食鋼矢板の層構成

被覆層の構成は、図-3.4 に示すように従来の U 形鋼矢板で使用された防食層と同様の構成となる。防食層の厚みは、U 形鋼矢板と同様に 2.0mm 以上の厚みとなる。この厚膜樹脂により外部からの腐食因子を遮断し、鋼材が防食される。

(2) 断面方向の重防食範囲

ハット形鋼矢板の断面方向の防食範囲を、図-3.5 および図-3.6 に示す。重防食範囲は、継手部から継手部

をカバーする範囲となる。継手かん合部の詳細な防食範囲を図-3.7 に示す。ハット形重防食鋼矢板は、U 形鋼矢板とは異なり、全て凸面を海側に向けた被覆となり、その継手かん合部は、全て凹面中央部に位置する。そのため、ハット形重防食鋼矢板は、全ての凸面が重防食により防食されることになる。また、継手かん合部のウレタンエラストマーによる被覆層の膜厚保証がされる範囲は、継手かん合部端部から $20 \pm 10 \text{ mm}$ および $60 \pm 10 \text{ mm}$ の範囲となる。この継手かん合部に関しては無防食に近い状態となるため、一般的には、端部シール材を被覆することで、継手かん合部の防食を行っている。

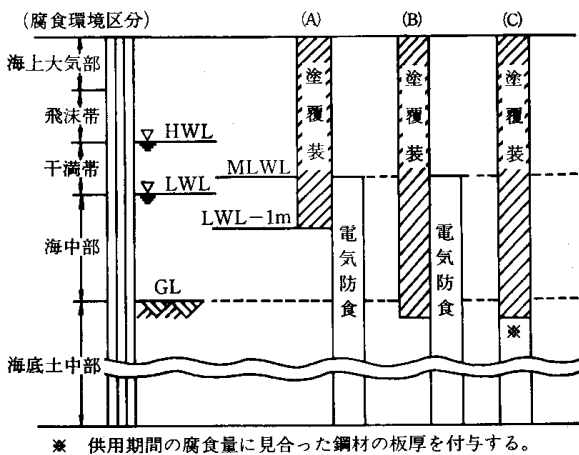


図-3.8 港湾鋼構造物の防食仕様

ここで、鋼矢板の腐食は、写真-3.1 に示すように、凸面が集中的に腐食する傾向にある。これは、鋼矢板特有のもので、凸面と凹面の環境差がマクロセル腐食を引き起こすためであると考えられる。そのため、ハット形鋼矢板の継手かん合部は凹面に位置するため、膜厚保証対象外となる継手かん合部の腐食も比較的緩やかになると考えられる。ただし、長期防食を考えた場合には、継手かん合部周辺の耐久性の照査が必要であると考えられる。

(3) 長手方向の防食範囲

「港湾の施設の技術上の基準・同解説」¹⁾および「港湾鋼構造物の防食・補修マニュアル」²⁾に示されるとおり、長手方向の防食範囲は規定されている。図-3.8 に示すとおり、朔望平均干潮位 (L.W.L.) -1m より上の範囲である干満帯、海上大気中においては、全ての防食仕様において、被覆防食が施されることになる。また、海底土中部までの範囲が被覆長となる場合がある。これは、水深の浅い鋼矢板護岸などに適用されることが多い。したがって、重防食鋼矢板の耐久性を評価するためには、海底土中部から海上大気中における防食効果を確認する必要がある。

3.3 防食層の物性

ハット形重防食鋼矢板に適用されるウレタンエラストマーの物性は、従来より使用されているU形重防食鋼矢板と同様のもので、表-3.1 に示す性能を満足したものである。

したがって、基本的には被覆防食が施されている箇所鋼材の防食性能は、U形重防食鋼矢板と同等の性

表-3.1 ウレタンエラストマーの物性値¹³⁾

項目	数値
比重(JIS K6911)	1.0g/m ³ 以上
引張強さ(JIS K7113)	785N/cm ² 以上
伸び (JIS K7113)	30%以上
硬さ(JIS K7215)	H _D 50 以上
吸水率 (JIS K7209)	0.35%以下
体積抵抗率(JIS K 6911)	1.0×10 ¹² Ω・cm 以上
鋼材との接着力 (DIN 30671 プルオフ法)	295N/cm ² 以上

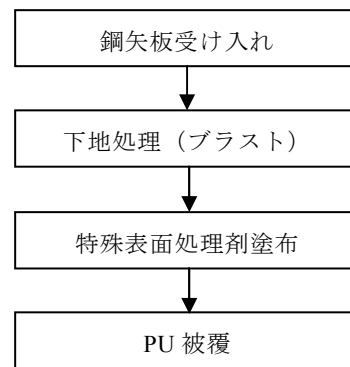


図-3.9 ハット形重防食鋼矢板のウレタンエラストマー (PU) による重防食被覆の製造工程

能を持つと考えられる。したがって、その防食効果は高いと思われる。

3.4 ハット形重防食鋼矢板の製造方法

ハット形鋼矢板の重防食被覆材は、ウレタンエラストマーに限定されるため、図-3.9 の工程で製造される。製造工程は、まず、鋼材表面をブラストにより下地処理され、その後、特殊表面処理剤を塗布し、ウレタンエラストマーを被覆するものである。これらは、全て工場内において一括施工が行われるため、品質のばらつきは小さく、一定の性能が保持されると思われる。

4. 重防食鋼矢板の劣化進展に関する耐久性評価

4.1 重防食鋼矢板の耐久性評価方法

(1) 重防食被覆の劣化進行メカニズム

重防食被覆防食層は非常に高い環境遮断性を持つため、被覆層が健全である場合には腐食は発生しないと思われる。したがって、重防食鋼矢板の劣化は、重防食被覆端部または疵部などの鋼材露出部の腐食に伴う被覆層の剥離によって生じると考えられる。

重防食被覆端部または疵部の劣化メカニズムを図-4.1に示す。鋼材の腐食は、アノード反応である鉄の酸化とカソード反応である酸素の還元によって生じる。重防食被覆端部で発生する腐食は、露出した鋼材表面がアノードとなり、その周囲の重防食被覆層下の鋼材表面がカソードになると考えられる。このため、被覆層下では酸素還元反応（カソード反応）で生成される水酸基（OH⁻）の加水分解作用によって剥離が生じると推定される。ただし、鋼材表面の溶液がアルカリ性を保つこともあり、被覆層に剥離が生じてても、鋼材が不動態化するために、腐食は生じないと考えられる。その後、被覆層の剥離が進展することで被覆端部に浮きが生じ、防食効果が失われた時点で被覆端部から徐々に腐食が内部へ進行する考えられる。

ここで、重防食被覆層の劣化進行について、被覆層の剥離が生じている距離を「劣化進展距離」とし、被覆端部から進行する鋼材腐食の距離を「錆進入距離」

とする。したがって、劣化進展距離と錆進入距離は異なる。重防食被覆の防食の性能に影響する距離は劣化進展距離となるが、鋼構造物の構造性能低下に影響する距離は錆進入距離となる。

(2) 重防食被覆の寿命評価手法の考え方

既往の研究における寿命推定の考え方⁹⁾を踏襲し、重防食被覆材端部の劣化進展に伴う被覆防食の寿命予測を行う。重防食被覆材端部の劣化進行モデルを図-4.2に示す。重防食鋼矢板の劣化は、被覆端部となる継手かん合部付近および鋼材まで達する疵部からの被

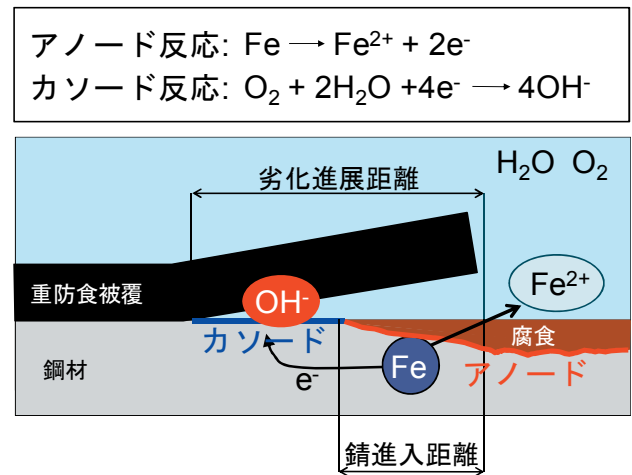


図-4.1 重防食被覆端部または疵部の劣化進行メカニズム

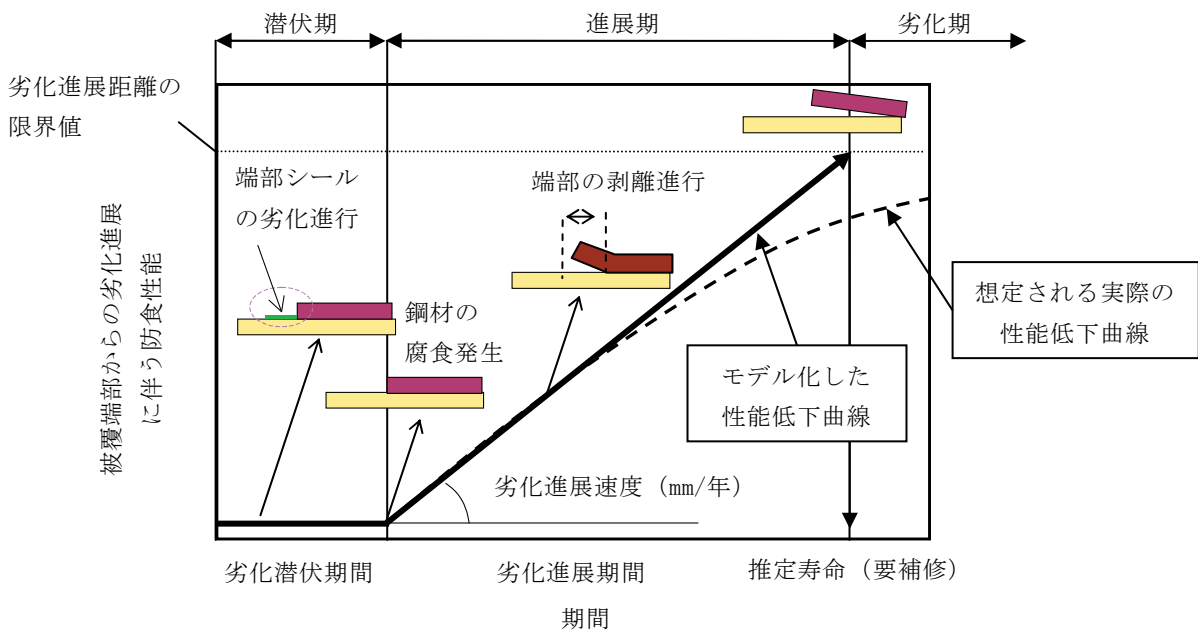


図-4.2 重防食被覆防食の性能低下曲線

覆防食層の剥離によって生じる。ただし、疵の発生は偶発的な作用（船舶や漂流物等の衝突など）による。したがって、経年的な劣化進行による耐久性の評価を行う場合には、継手かん合部からの劣化が主たる劣化要因になると考えられる。

重防食被覆の劣化進行は、図-4.2 に示すように、「潜伏期」「進展期」「劣化期」の3期に分けることができると考えられる。

「潜伏期」は、被覆端部の保護のために、端部シールが継手かん合部に施されるが、その端部シールの劣化が進行する期間とした。したがって、鋼材の腐食は発生しておらず、重防食被覆材は、見かけ上、健全な状態となる。

「進展期」は、端部シールの寿命により鋼材の腐食発生に伴い、重防食被覆端部の剥離が開始する時期から徐々に剥離が進行し、劣化進展距離の限界値（被覆防食の性能の限界値）に達するまでの期間とした。

「劣化期」は、被覆防食の性能の限界値を上回った時期からとした。したがって、「劣化期」については、早急に被覆防食の補修または更新が必要となる期間である。

これら3期に分割することで、重防食被覆の寿命を推定することとした。寿命評価手法の基本的な考え方を以下に示す。

- 1) 無防食鋼材の腐食速度と重防食被覆端部の劣化進展速度は比例関係にあるため、鋼材の腐食速度から劣化進展速度を推定することができる。したがって、実験で得られる鋼材の腐食速度および劣化進展速度をもとに、実環境下における劣化進展速度を予測することとした。なお、実際の重防食被覆端部の剥離による劣化の進展は、被覆端部の剥離距離が大きくなるにしたがって、鋼材表面と被覆層との隙間が小さいことや被覆層内部に生成する錆によって酸素の供給が減少する可能性があり、劣化進展速度は若干小さくなると考えられるが、図-4.2 に示すように、劣化進行モデルでは、劣化進展速度は一定とした。これは、安全側の照査になると考えられる。
- 2) ハット形重防食鋼矢板と、U形重防食鋼矢板の端部シール材の効果は同等とみなし、ハット形重防食鋼矢板の劣化進行モデルでの劣化潜伏期間は、既往の研究結果から7年とした。
- 3) 補修が必要となる被覆防食の寿命は、劣化進行モデルの潜伏期間を7年とし、それに劣化進展期間を加えたものとして推定する。式(4.1)に重防食被覆防食の寿命推定の予測式を示す。

$$t = T_i + \frac{W}{v} \quad (4.1)$$

ここで、

t : 重防食被覆鋼矢板の被覆防食の寿命（劣化度 a に達するまでの時間）（年）

T_i : 実構造物で観察された劣化進展（剥離）が始まるまでの期間。潜伏期間（=7年）

W : 劣化度 a に達する時の劣化進展距離（mm）

v : 重防食層の劣化進展速度（mm/年）

式(4.1)を用いることで、重防食被覆工法の期待耐用年数を予測するとともに、維持管理時においては、定期点検で得られた劣化進展速度を用いることで、被覆防食の余寿命を推定することもできる。

ここで、重防食被覆端部の劣化進展に伴い防食性能の限界値に達する重防食被覆の寿命（要補修となる寿命）と構造性能（部材耐力）の低下による構造物自体の寿命は異なる。本試験での評価は、あくまで防食層自体の寿命を評価するもので、鋼材腐食による構造物の性能の限界値は、部材耐力の限界値によって定まる。したがって、鋼材の腐食発生が要求性能の限界値と定められる場合には、長期にわたり完全に腐食を防止させる対策が策定される必要がある。ただし、鋼構造物の場合、使用される鋼部材の肉厚は構造計算上必要な肉厚より若干大きくなると考えられ、結果的に「腐食しろ」をもった構造になることが多いと思われる。したがって、被覆防食層の性能の限界までの期間の方が、構造物の腐食による構造性能の限界までの期間よりも短期間になるように設定し、適切に維持管理することで、供用期間全体において要求される性能を満足することができると考えられる。また、防食工の補修を適切に行うことができれば構造物自体の補修・補強・（更新）の必要性は小さくなると考えられる。

(3) 耐久性評価のための検討方法

重防食被覆端部の剥離による劣化進展に対する長期耐久性を実環境下で評価するためには、長期間の調査が必要になる。そこで、劣化促進試験を実施し、その促進倍率を定量的に評価することで、長期耐久性を評価することとした。

重防食被覆層の劣化は、4.1(1)および(2)で示した劣化メカニズムによって進行すると考えると、鋼材の腐食との相関がある。したがって、促進倍率の決定は、供試体の被覆端部（端部シールあり、端部シールなし、切断端部）の劣化進展速度を測定するとともに、無被

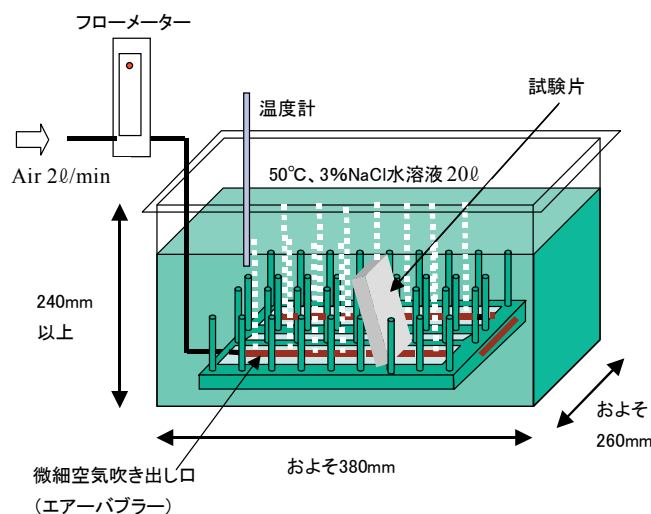


図-4.3 空気吹き込み塩水浸漬試験装置概略図¹¹⁾

覆鋼材の腐食速度を測定し、これらの関係から実環境下での劣化進展速度を推定することとする。また、同時に、ハット形鋼矢板では調査事例のない継手かん合部における腐食形態を調査する。

劣化促進試験は、海水中・干満帯の促進試験として空気吹き込み塩水浸漬試験を、飛沫帯に相当する試験として(独)港湾空港技術研究所の暴露試験施設を用いた海水シャワー暴露試験を行った。

4.2 空気吹き込み塩水浸漬試験

(1) 試験概要

空気吹き込み塩水浸漬試験は、海水中や干満下部のような塩水環境における腐食を模擬した促進試験である。既往の研究であるU形重防食鋼矢板の耐久性評価も、空気吹き込み塩水浸漬試験が実施されたが、当時は試験方法の統一化が図れていなかった。空気吹き込み塩水浸漬試験は、その後、検討が加えられ、再現性と腐食の促進性を高めた試験方法として、土木学会において、構造工学シリーズ19「海洋構造物における鋼構造物の耐久・耐荷性能評価ガイドライン、付録I：海中部および干満帯下部を模擬した環境における有機被覆鋼材の標準腐食促進試験方法」に示された¹¹⁾。したがって、本検討では、より信頼性の高いガイドラインに示される方法に準拠して実施した。

(2) 空気吹き込み塩水浸漬試験装置の概要

試験装置の概略図を図-4.3に示す。試験水槽下部に写真-4.1に示すような微細な泡を噴出するエアーバブラーを設置することで、試験水槽内部に設置する供試体に均一に泡を当て、酸素を供給することで腐食を



写真-4.1 エアーバブラーの例

促進させることができる装置である。また、浸漬溶液の温度を上げることで、腐食反応を促進させた。

試験条件としては、浸漬溶液として3%NaCl水溶液を用い、試験温度は $50 \pm 2.0^\circ\text{C}$ とした。また、空気吹き込み量は、溶液量比が0.1に相当するように2L/分とした。なお、試験槽は380mm(L)×260mm(W)×240mm以上(H)のものを用い、浸漬溶液の容積は18~20Lとした。

(3) 供試体の概要

試験に用いる供試体は、実際の工場製品となるハット形重防食鋼矢板の性能を調査するために、実際に10H型および25H型のハット形鋼矢板の凸面をブラスト処理による下地処理を行い、ウレタンエラストマー被覆を施したものをを用いた。供試体は、ハット形重防食鋼矢板を切断加工し、継手かん合部を模擬したものと、被覆下端部を模擬した2種の試験片を準備し、そ

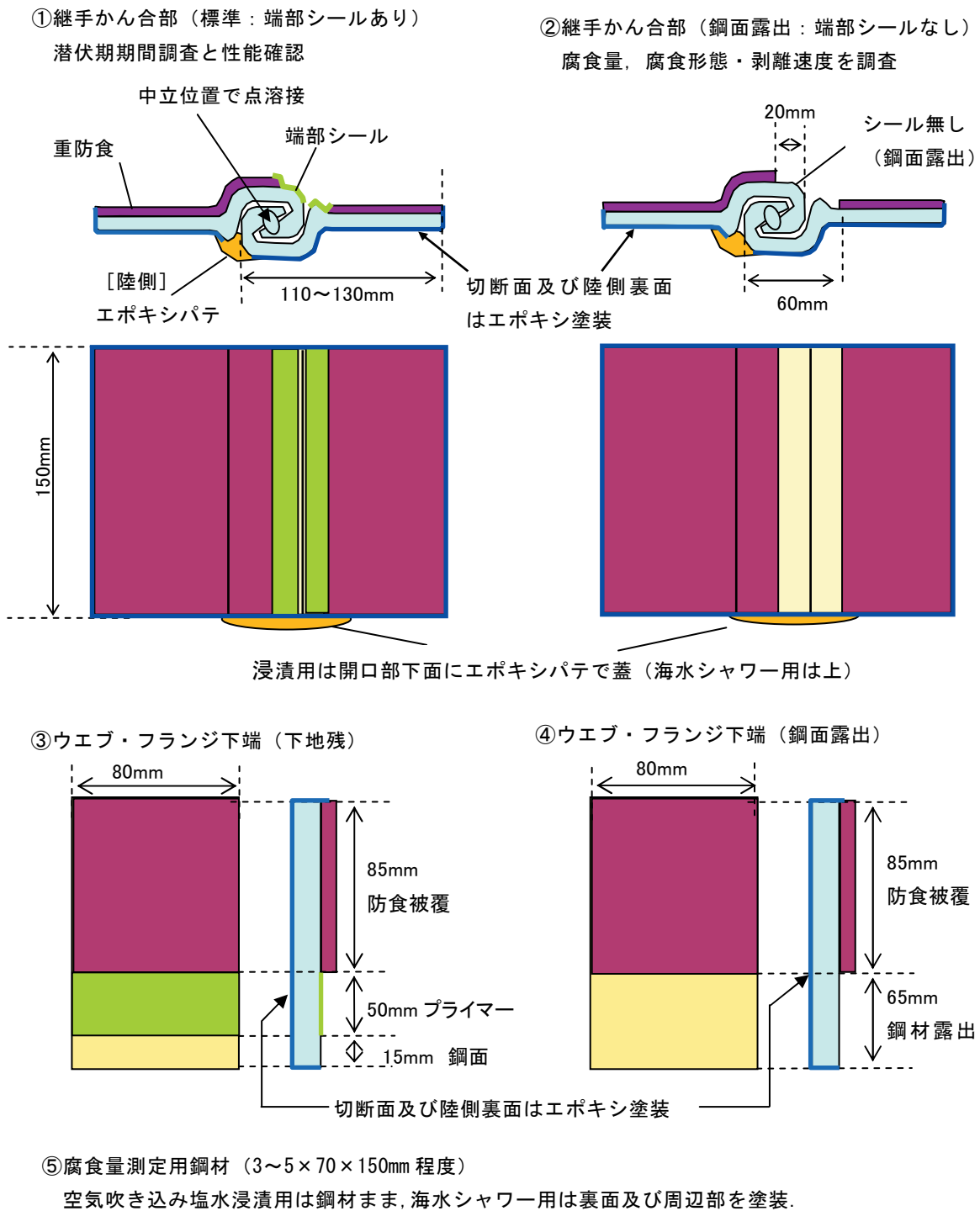


図-4.4 供試体の形状

それぞれの部位での耐久性を検討した。供試体の形状を図-4.4に示す。供試体は5種類あり、「供試体①」は、標準的な仕様となる継手かん合部の供試体である。これは、継手かん合部の無被覆部に端部シールを施したもので、潜伏期からの耐久性を評価するものである。

「供試体②」は、進展期からの劣化進行を評価するものである。端部シールを除去した継手かん合部付近の供試体である。「供試体③」および「供試体④」については、いずれもウェブおよびフランジ下端に位置する重防食層端部の劣化進行を評価するもので、継手かん合部と

同様に、「下地あり」と「下地なし」となる。また、各試験環境における無被覆鋼材の腐食量を測定するために、「供試体⑤」を準備した。表-4.1 に供試体の種類と検討内容について示す。

(4) 空気吹き込み塩水浸漬試験方法

空気吹き込み塩水浸漬試験槽への供試体の設置方法を図-4.5 に示す。バブリングによる試験面への酸素供給が均一かつ十分に行えるように、試験面となる重防食被覆層側の鋼材面は、隣りあう供試体と30mm以上の間隔を確保するように配置した。ただし、検討対象外となる継手かん合部背面土中側（供試体裏面）については、供試体を合わせて設置した。試験状況を写真-4.2

に示す。

供試体は、空気吹き込み塩水浸漬試験槽に所定の期間継続して浸漬し、重防食被覆層の防食性能を評価し

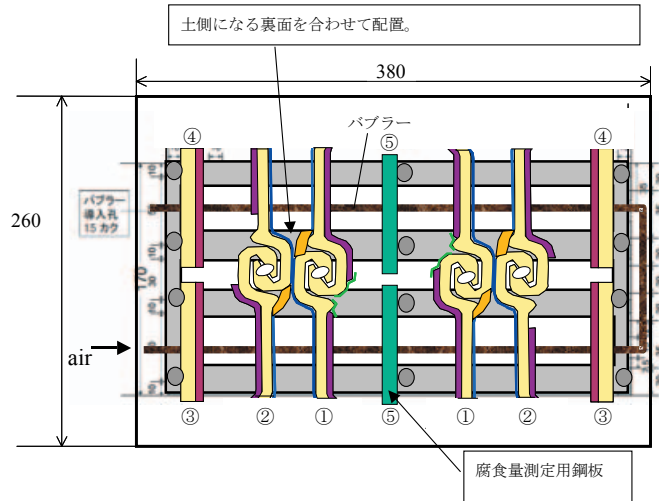


図-4.5 浸漬試験におけるサンプル配置

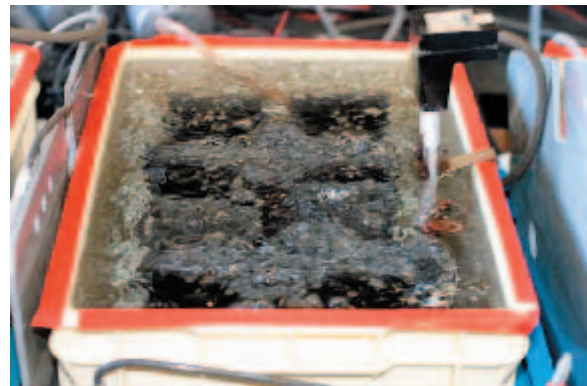


写真-4.2 浸漬試験状況

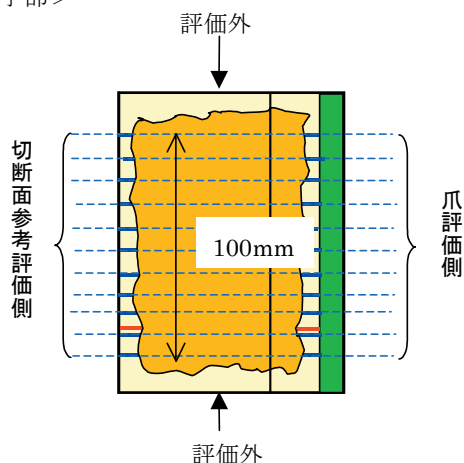
表-4.1 供試体の種類と検討内容

No.	供試体	検討内容
①	継手かん合部 端部シールあり	潜伏期間の防食性能調査 ・端部シール部の腐食 ・重防食層の剥離の有無
②	継手かん合部 端部シールなし	進展期以降の性能調査 ・腐食量 ・腐食形態 ・剥離進展距離 ・劣化進展速度
③	ウェブ・フランジ下端 下地あり	潜伏期間の防食性能調査 ・端部シール部の腐食 ・重防食層の剥離の有無
④	ウェブ・フランジ下端 下地なし	進展期以降の性能調査 ・腐食量 ・腐食形態 ・剥離進展距離 ・劣化進展速度
⑤	無被覆鋼材	各試験環境における鋼材の腐食量調査

表-4.2 測定項目

	供試体	測定箇所		測定範囲	測定方法	図
		評価箇所	参考箇所			
剥離進展距離	継手かん合部	継手側被覆端部からの剥離距離	継手方向切断面からの剥離距離	中央 100mm 区間	最大値：目視で最も剥離していると判断した箇所の距離 平均値：10mm 間隔で11点測定した平均距離	図-4.6
		ウェブ・フランジ部	継手側被覆端部からの剥離距離	中央 30mm 区間	最大値：目視で最も剥離していると判断した箇所の距離 平均値：10mm 間隔で4点測定した平均距離	
継手部腐食量	継手かん合部	継手かん合部断面		無被覆部	保管材と断面形状を比較し、腐食状況を調査	図-4.8
被覆付着強度	継手かん合部	重防食被覆部中央		2箇所	ブルオフ法	
鋼材腐食速度	腐食量測定用鋼材	供試体全体		供試体全体	酸洗処理後、質量変化による腐食減量を測定し、腐食速度を算出	

<上継手部>



<下継手部>

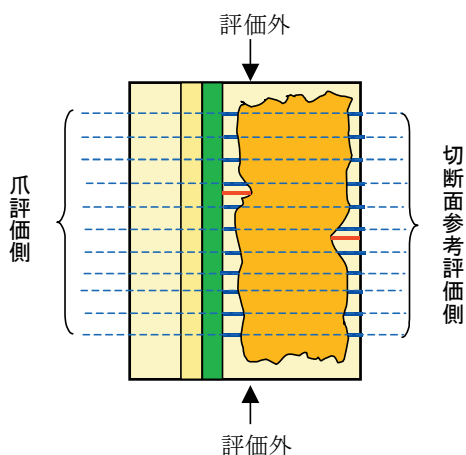


図-4.6 継手かん合部供試体の測定位置

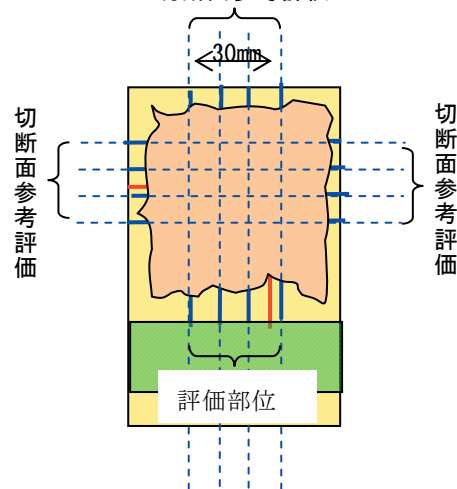
た. 試験期間は最長 12 ヶ月とした. なお, 浸漬期間が 3, 6, 12 ヶ月経過した時点で, 3 体の供試体を取り出し, 被覆端部の耐久性を調査した. したがって, 実験では, 1 種類の供試体につき 9 体用いた.

(5) 空気吹き込み塩水浸漬試験後の評価方法

空気吹き込み塩水浸漬試験後の被覆層の健全性評価には, 劣化進展距離, 無被覆部(継手かん合部)の腐食量および被覆層の付着強度を調査した. また, 無被覆鋼材の腐食量も測定した. 表-4.2 に測定項目およびその方法について示す.

劣化進展距離の測定位置について, 継手かん合部供試体(①および②)の場合を図-4.6 に, ウェブ・フランジ下端部供試体(③および④)の場合を図-4.7 に示す. ハット形重防食鋼矢板の被覆防食工法の耐久性評価には, 重防食層端部からの劣化進展の状況を主に評価することとした. 劣化進展距離は, 重防食被覆をスクレーパーなどで剥がす際, 接着力が低下していると判

断面参考評価



参考の切断端部は上下左右の3端部を評価.

図-4.7 ウェブ・フランジ下端部供試体の測定位置

保管材と断面形状を比較し, 腐食状況を調査

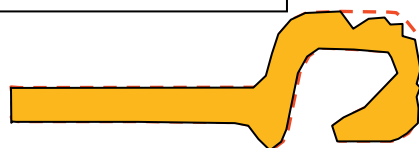


図-4.8 継手部腐食断面形状の調査

断した部分の端部から重防食被覆端部までの距離とした. これは, 図-4.1 で示したように, 被覆下の鋼材がカソードとなることで, 被覆下がアルカリ性環境となる. そのため, 鋼材の腐食は生じないものの, 接着剤のアルカリ劣化により接着強度が低下する. 接着強度の低下は防食性能を著しく低下させることになるため, 本報告では, この強度低下した時点, 重防食被覆防食の劣化と判断した. なお, 調査時の劣化進展距離の測定は, 基本的には継手かん合部側の劣化進展距離によって評価するが, 既往の研究成果⁹⁾との比較のために, 参考データとして, 鋼材切断端部からの距離も測定することとした. ただし, 継手かん合部供試体の場合には, 供試体の上下切断面は, バブリングの影響差を大きく受けるため測定していない.

いずれの場合も, 測定対象となる範囲において目視で最も剥離していると確認された箇所を劣化進展距離の最大値とした(図中赤線). また, 測定範囲内におい

て 10mm 間隔で劣化進展距離を測定し（図中青線），その平均値を平均劣化進展距離とした。

継手かん合部の腐食状況調査について図-4.8 に示す。継手かん合部の腐食量の評価は，まず，腐食の状態を目視で確認し，その後，別途保管してある初期の継手かん合部の断面形状と比較することで，鋼材の腐食が認められる箇所の腐食量を測定した。一例として，浸漬9ヶ月後の試験片の外観とはつり後の外観を写真-4.3 および写真-4.4 に示す。

重防食被覆層の付着強度は，被覆端部からの劣化の影響を受けない位置として，供試体中央付近(写真-4.3

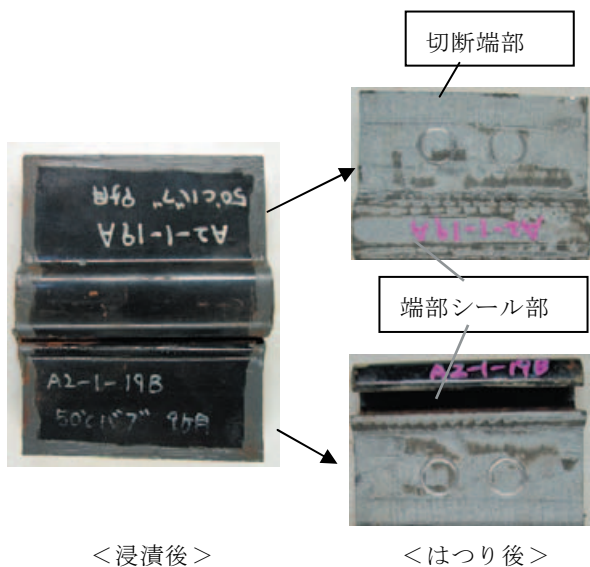


写真-4.3 標準端部供試体の試験終了後およびはつり後の外観（浸漬9カ月）

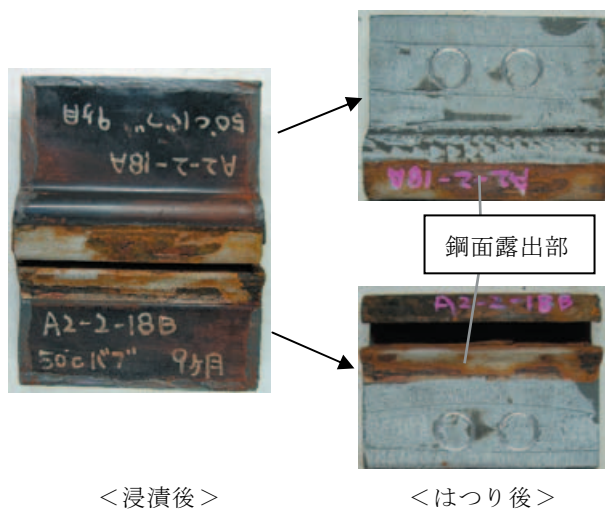


写真-4.4 端部シールなし供試体の試験終了後およびはつり後の外観（浸漬9カ月）

の円形の跡がみられる部分）において，プルオフ式の引張試験によって評価した。

無被覆鋼材の腐食速度測定に関しては，供試体の初期重量を予め測定しておき，浸漬試験後の供試体との質量変化により平均腐食量を算出することで，腐食速度を求めた。なお，浸漬試験後の腐食生成物（錆）は，酸洗処理により除去した。

4.3 海水シャワー暴露試験

(1) 試験概要

飛沫帯および干満帯上部の乾湿繰返しの腐食環境を模擬する試験として，(独) 港湾空港技術研究所の長期暴露試験施設である海水シャワー暴露試験施設において試験を実施した。本試験施設は，海洋環境の飛沫帯を模した暴露場である。久里浜湾（神奈川県）の自然海水を使用し，約4時間のシャワー散布と約8時間の自然乾燥を繰り返す乾湿繰返し環境となる。したがって，鋼材の腐食の試験条件としては，特に激しい環境になる。写真-4.5 に海水シャワー暴露試験施設を示す。試験施設は，南側護岸に面した試験施設で，乾湿繰返し作用のほかに，日射の影響も評価できる。

海水シャワー暴露試験施設の環境は，平均気温 16.5℃，最高気温 38.5℃，最低気温 -1.0℃，平均湿度 78%である。また，海水の塩化物オン濃度は平均で

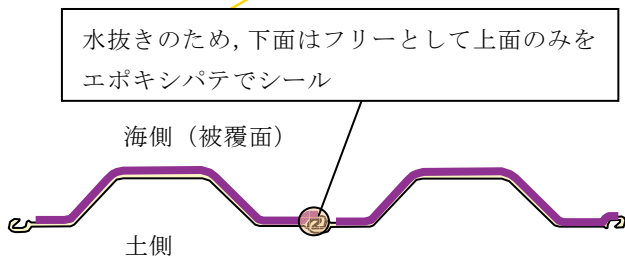


写真-4.5 海水シャワー試験施設



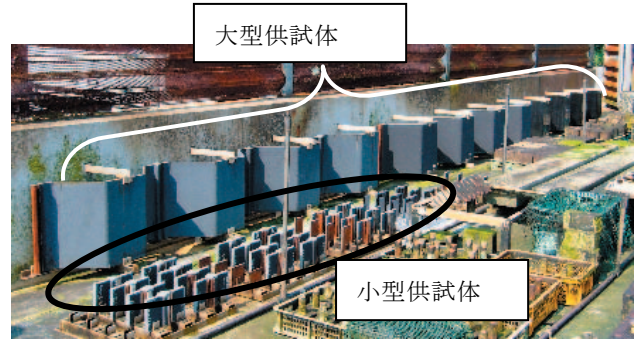
(鋼面露出) (標準)

写真-4.6 継手かん合部供試体の暴露状況



海水シャワー用大型試験体（10H, 25H）：高さ 50 cm

図-4.9 大型試験体の断面図



50cm 大型供試体 : 25H を 4 体, 10H を 4 体+4 体
15cm かん合部供試体 : 25H (16 枚), 10H (16 枚)

写真-4.7 供試体の暴露状況

16,500ppm である。

(2) 供試体概要

供試体は、空気吹き込み塩水浸漬試験と同様に継手かん合部の劣化進展を調査の対象として、図-4.4 に示す形状のものを用いた。継手かん合部供試体の暴露状況を写真-4.6 に示す。暴露は、試験面を南向きに直立させて設置した。

また、より実環境に近い試験を実施するために、実構造物に近い大型供試体による試験も実施した。図-4.9 に大型供試体の断面図を示す。供試体は、ハット形重防食鋼矢板（SP-10H および SP-25H）を長手方向に 50cm で切り出し、それを 4 体連結させたものを一組の供試体として暴露した。写真-4.7 に供試体の暴露状況を示す。いずれの供試体も、暴露は、試験面を南向きに直立させて設置した。

4.4 結果および考察

(1) 無被覆鋼材の腐食量

無被覆鋼材の腐食量について、空気吹き込み塩水浸漬試験の結果を図-4.10 に、海水シャワー暴露試験の結果を図-4.11 に示す。いずれの試験結果も、時間の経過とともに、ほぼ線形的に腐食量は増加する傾向にある。ただし、空気吹き込み浸漬試験結果に顕著に現れているが、試験期間が長くなると腐食量がやや線形を外れる傾向にある。これは積層錆の影響で、鋼材表面まで拡散する酸素量が低下したためであると思われる。

試験結果から、鋼材の腐食量は空気吹き込み塩水浸漬試験の方が海水シャワー暴露試験に比べて大きいことが分かる。各試験の平均の腐食速度は、空気吹き込み塩水浸漬試験が約 1.1mm/年、海水シャワー暴露試験が約 0.4mm/年となった。いずれにしても、港湾の施設における海中部から飛沫帯での腐食速度の標準値（集中腐食を除く）である 0.1~0.3mm/年と比べると、腐

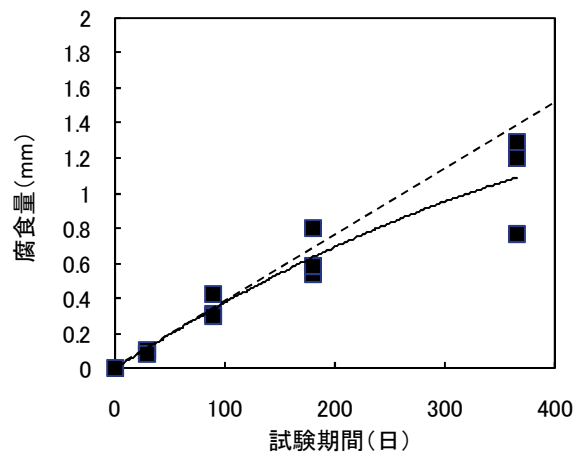


図-4.10 空気吹き込み塩水浸漬試験における無被覆供試体の腐食量

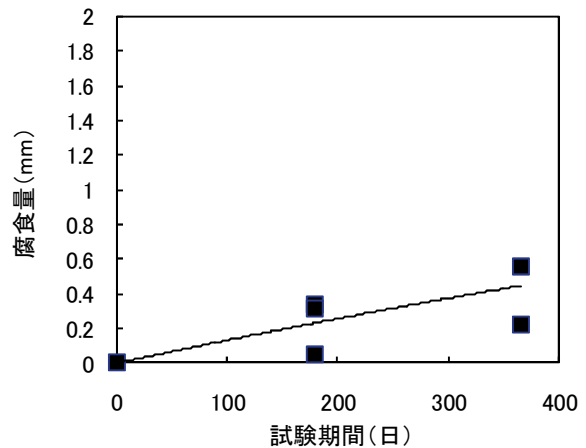


図-4.11 海水シャワー暴露試験における無被覆供試体の腐食量

食速度は大きく、厳しい環境下での試験であることが分かる。

(2) 空気吹き込み塩水浸漬試験結果

劣化進展距離の経時変化について、供試体①（継手標準端部、端部シールあり）の場合を図-4.12 に、供試体②（端部シールなし）の場合を図-4.13 に示す。供試体①の標準端部では、1本の供試体で浸漬初期からの劣化進展がみられたが、その他の供試体に関しては、劣化の進行は認められず、端部シールによる潜伏期間の効果が認められた。劣化の進展がみられたものに関しては、端部シールの保護が不十分であったことが原因であったと考えられ、潜伏期を確実に確保するためには、適切なシール保護が大切であると考えられる。劣化が進展しなかった供試体については、空気吹き込み塩水浸漬試験での無被覆鋼材の腐食速度は約1.1mm/年であり、一般的な海中部の腐食速度を0.1mm/年と仮定すると、空気吹き込み塩水浸漬試験は約11倍の促進倍率となる。また、干満帯の腐食速度を0.3mm/年とすると4倍程度の促進倍率となる。したがって、港湾環境における腐食速度で4～11倍の促進倍率をもった空気吹き込み塩水浸漬試験を1年実施した場合も、継手標準部の端部シールは、健全であったという結果から、継手標準部（端部シールあり）では、4～11年程度では剥離は発生しないと推測される。したがって、端部シールによって適切に保護した場合には、2章で示した潜伏期間の7年は期間として妥当であると考えられる。

一方、供試体②の鋼面露出端部では365日の浸漬期間で全ての供試体において劣化が顕著に現れ、経時的

にみると線形的に劣化進展距離が増加する傾向を示した。鋼材露出部での、空気吹き込み浸漬試験の劣化進展速度は、4.6mm/年となる。したがって、実環境となる干満帯および海中部を考えた場合、空気吹き込み浸漬試験は4～11倍の促進倍率であることから、実環境では0.4～1.1mm/年の剥離が生じる可能性がある。

継手かん合部の腐食について、供試体②（端部シールなし、鋼面露出）の試験後の腐食状態を写真-4.8に示す。その結果、継手かん合部内部は殆ど腐食しておらず、鋼面が大気中に露出する部分の腐食が著しいことがわかる。これは、継手内部は爪同士による拘束や周辺に生成する錆によって環境遮断されることで、腐食速度が極めて小さくなるためであると推察される。露出箇所の腐食に関しては、浸漬期間1年でおおよそ1.1mm程度の腐食量となった。これは、空気吹き込み浸漬試験の無被覆鋼材の腐食量と同程度の値である。したがって、実環境下においても、劣化進展期に入った時点（端部シールの防食効果がなくなった時点）から、海側鋼材露出面は、無防食の鋼材の腐食速度と同程度の速さで進行すると考えられる。

図-4.14 に健全部におけるウレタンエラストマー被覆と鋼材との付着強度の経時変化の一例を示す。重防食被覆層の付着強度は、10N/mm²を超える高い値で推移し、浸漬期間1年までの結果では、付着強度に低下は認められなかった。長期的にみると、被覆下への水分および酸素の浸透や鋼矢板に生じる繰返し応力などによって付着強度は減少していくものと予想されるが、今回の試験結果からも重防食被覆は非常に高い環境遮断性を持つことが確認できる。よって、付着力低下に

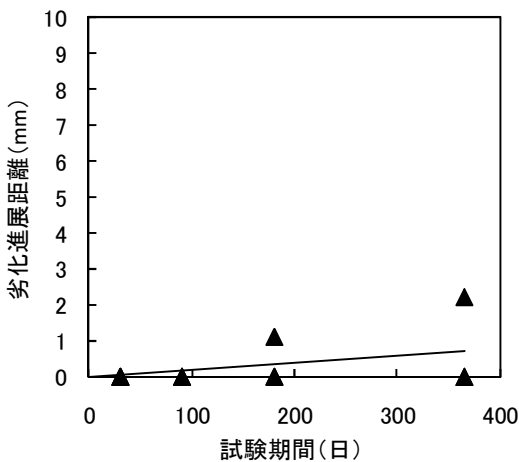


図-4.12 供試体①（端部シールあり）の劣化進展距離（空気吹き込み塩水浸漬試験結果）

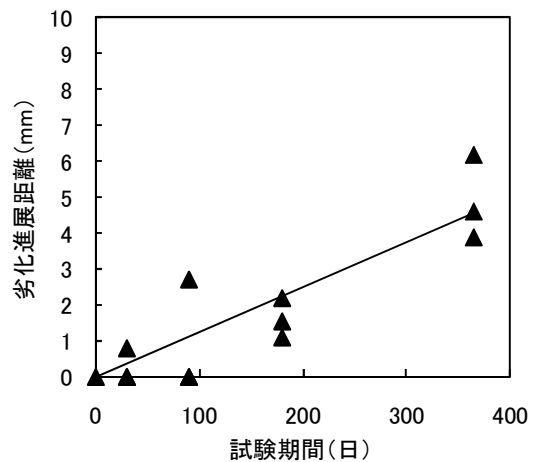
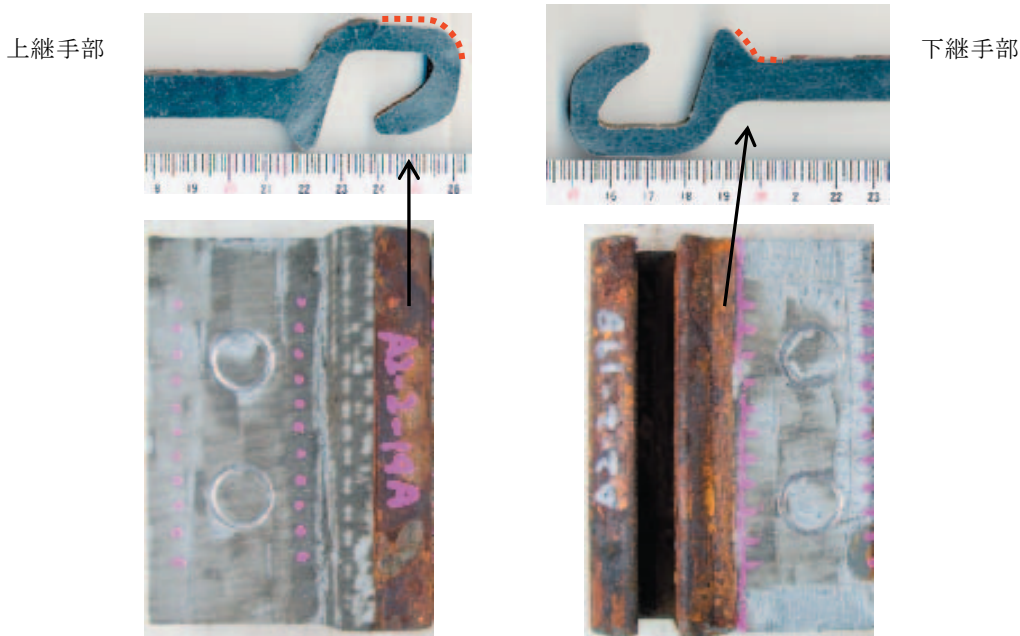


図-4.13 供試体②（端部シールなし）の劣化進展距離（空気吹き込み塩水浸漬試験結果）



※鋼面露出部のみが腐食（上写真の赤破線部）し、継手かん合内部の腐食進行は殆ど見られない
写真-4.8 空気吹き込み塩水浸漬試験（浸漬1年後）の継手かん合部供試体（鋼面露出）の腐食状況の一例

比べ重防食被覆端部からの剥離による劣化進展速度の方が非常に大きいことが予想されるため、重防食鋼矢板の耐久性から定まる限界値は、端部からの剥離に伴う性能低下によると考えられる。

(3) 海水シャワー暴露試験結果

図-4.15 および図-4.16 に海水シャワー暴露試験後に重防食端部の劣化進展距離を測定した結果を示す。なお、図-4.16 には、空気吹き込み塩水浸漬試験の結果も併せて示す。図-4.15 の供試体①「標準継手端部（端部シールあり）」では、暴露1年経過後においても重防食層の剥離はいずれの供試体も発生しておらず、屋外環境である海水シャワー暴露試験でも鋼材が露出していなければ剥離は生じないことが確認できる。一方で、図-4.16 の供試体②「端部シールなし、鋼面露出」の結果においては、ばらつきがあるものの、被覆端部からの劣化進展が非常に大きく、1年の暴露期間で最大10mm程度の劣化進展距離となった。図-4.10 および図-4.11 で示した無被覆鋼材の腐食は、海水シャワー暴露試験に比べ空気吹き込み塩水浸漬試験の方が3倍程度大きな腐食速度を示したが、劣化進展距離は、海水シャワー暴露試験と空気吹き込み浸漬試験の結果がほぼ同程度となった。これは、海水シャワー暴露試験の場合は乾湿繰返しの環境作用が重防食被覆端部剥離部に生じることで酸素が供給されやすい状態になったためであると推察される。したがって、両試験

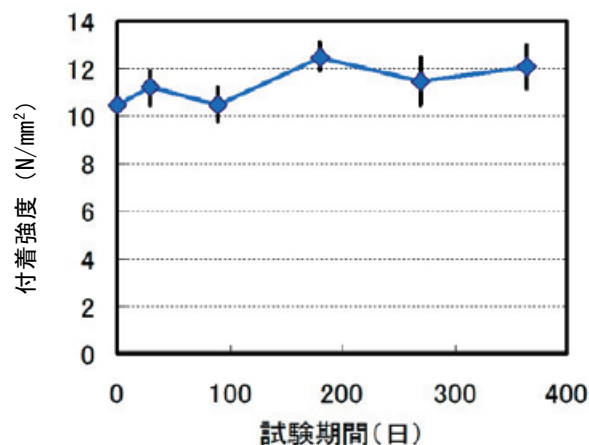


図-4.14 健全部におけるウレタンエラストマー被覆と鋼材との付着強度の一例

の鋼材の腐食速度に基づいた促進倍率を考えると、重防食被覆端部からの劣化進展は、海中部よりも干満帯および飛沫帯の方が大きくなる可能性がある。単純に腐食速度から求めた促進倍率で考えると、海中部に比べ飛沫帯および干満帯の劣化進展速度は3倍程度大きくなる可能性があることを示唆している。これについては、長期的な経過観察も必要になると考えられるため、今後の課題とする。なお、大型供試体の暴露1ヶ月後および暴露1年3カ月後の外観を写真-4.9および写真-4.10に示すが、被覆端部の腐食はみられず、現状では防食状態は非常に良好であると考えられる。若

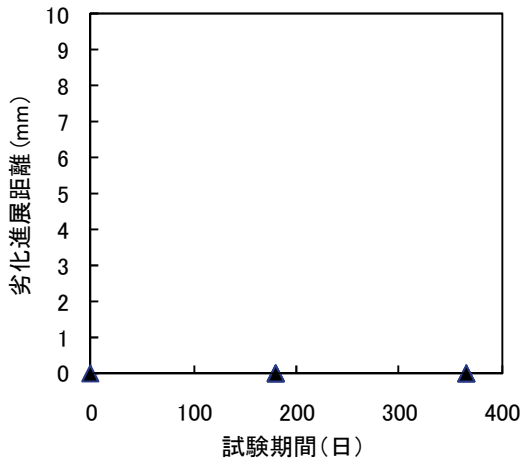


図-4.15 供試体①（端部シールあり）の劣化進展距離（海水シャワー暴露試験結果）

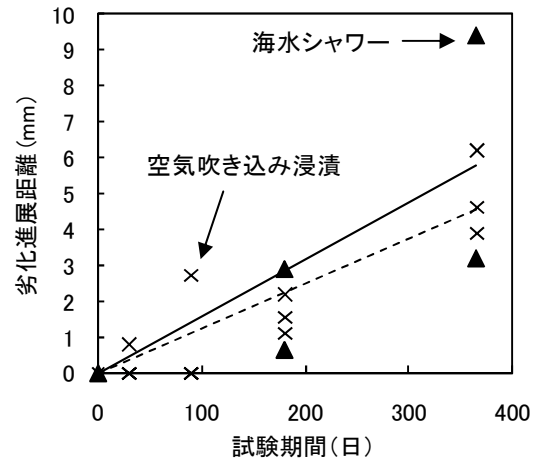


図-4.16 供試体②（端部シールなし）の劣化進展距離（海水シャワー暴露試験結果）

干，重防食層全体において，白亜化による変色がみられるが，これについても，極表層のみであると推察される．今後も，供試体の暴露を継続し，経過の観察を行う予定である．

4.5 劣化進展速度の推定

今回得られた実験結果と既往の研究結果であるU形鋼矢板結果⁹⁾との比較を行った．既往の研究では切断端部の最大剥離距離の平均値を用いてアレニウスプロットおよび鋼材腐食量との関係による寿命推定を行っている．そこで，空気吹き込み塩水浸漬試験においては，切断端部の最大劣化進展距離を測定し，既往の研究結果との比較を行った．

図-4.17 にアレニウスプロットによる最大劣化進展速度の推定結果を示す．アレニウスプロットは，2.4a) で示したように，反応速度の温度依存性を利用したもので，既往の試験結果とともに今回の試験温度である50℃の浸漬試験結果をプロットした．また，同様な試験方法であること，および，劣化進展は鋼材の腐食に起因することなどから，既往の試験結果および今回の試験結果を併せたデータをもとに，アレニウス式を変換した式(4.1)を用いた最小二乗近似線を図中に示す．

$$\ln(v) = -\frac{E}{R} \cdot \frac{1}{T} + \ln(A) \quad (4.1)$$

ここで，

v ：反応速度

A ：頻度因子



写真-4.9 大型供試体の暴露1ヶ月後の外観



写真-4.10 大型供試体の暴露1年3ヵ月後の外観

E ：活性化エネルギー（アレニウスパラメータ）

R ：気体定数

T ：絶対温度（K）

また，図中には，比較用として，海水シャワー暴露試験で得られた供試体②（端部シールなし）の劣化進展距離の結果も併せて示す．

これによると，全体的な傾向として，ばらつきは大きいものの，温度の低下とともに最大劣化進展速度は小さくなる傾向を示している．したがって，重防食層の劣化進展も温度依存性によると推察される．なお，今回実施した空気吹き込み塩水浸漬試験結果は，最小二乗近似線よりも小さな最大劣化進展速度となった．これは，現在使用されているウレタンエラストマー被覆の被覆端部の接着耐久性が向上していることによると予想される．よって，現在，施工されている被覆層は，

既往のものに比べて同等またはそれ以上の性能があると推察される。

一方、実環境に近いと考えられる海水シャワー暴露試験結果と促進試験結果を比べると、被覆端部からの劣化進展速度は、既往の試験結果のばらつきを持った状態で、同程度の最大劣化進展速度内において分布していることが分かる。これは、乾湿繰返し作用や温度変化および日射などの影響によって、劣化進展速度が大きくなったものと推察される。

今回実施した試験結果および既往の試験結果から、アレニウスプロットによる劣化進展速度の推定式は、式(4.2)で表すことができる。

$$\ln(v) = -4.86 \cdot \left(\frac{1}{T} \times 1000 \right) + 17.75 \quad (4.2)$$

ここで、

v : 劣化進展速度 (mm/年)

T : 絶対温度 (K)

空気吹き込み塩水浸漬試験結果から、海水中での劣化進展速度に関しては、重防食被覆層の特殊表面処理層の品質向上の効果から最大劣化進展速度は小さくなると思われるものの、概ね式(4.2)で示した最小二乗近似式で評価できると考えられる。飛沫帯および干満帯においても、海水シャワー暴露試験の結果から、同様に最小二乗近似式で評価できると考えられる。よって、いずれの環境においても、式(4.2)から、20°C (3.41 × 10³ (1/K)) の環境下における劣化進展速度は 3.2mm/年と推定される。

図-4.18 に無被覆鋼材の腐食速度と劣化進展速度との関係をプロットした結果を示す。なお、既往の試験結果および空気吹き込み塩水浸漬試験の結果は最大劣化進展速度を、海水シャワー暴露試験の結果は平均の劣化進展速度を示した。この関係は重防食層の劣化進展は鋼材の腐食に起因すると考えられることから、鋼材の腐食速度と劣化進展速度は比例関係にあるという考え方によるものである。

既往試験結果と比べて、空気吹き込み塩水浸漬試験の結果は、無被覆鋼材の腐食速度が大きく、また、最大劣化進展速度が小さくなる傾向を示した。また、試験結果のばらつきも小さくなる傾向を示している。これは、試験条件が若干異なることなどが要因として挙げられるが、それに加えて、劣化進展が鋼材の腐食に起因することを考えると、現在使用されている重防食被覆の品質向上に伴う接着耐久性の向上であると考え

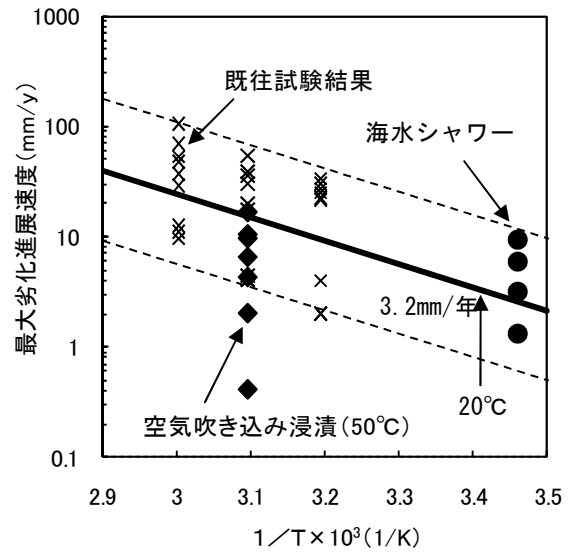


図-4.17 アレニウスプロットによる最大劣化進展速度の推定結果 (供試体切断端部の結果)

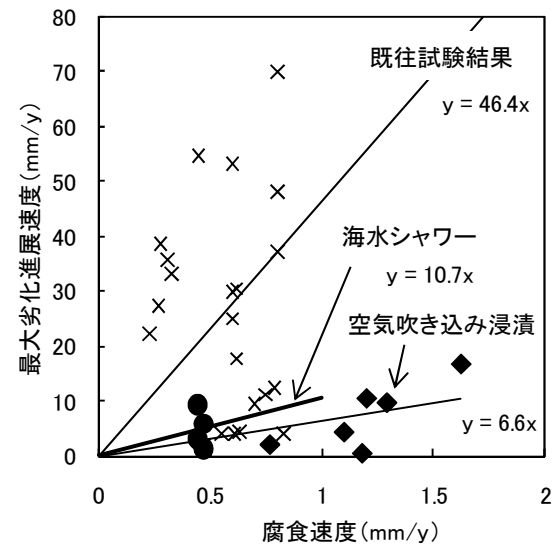


図-4.18 無被覆鋼材の腐食速度に対する最大劣化進展速度の関係 (供試体切断端部の結果)

られる。試験結果を比較すると、現在使用されている被覆層の最大劣化進展速度は、7 倍程度改善していることになる。海水シャワー暴露試験の結果については、既往の試験結果に比べると明らかに劣化進展速度は小さなものの、今回の空気吹き込み試験結果と比べると、劣化進展速度が若干大きくなる傾向にあった。

今回の結果から、腐食速度と劣化進展距離の関係は、海水中の場合は空気吹き込み塩水浸漬試験の結果より式(4.3)によって、また、干満帯、飛沫帯の場合は海水シャワー暴露試験の結果より式(4.4)によって予測できると考えられる。

表-4.3 アレニウスプロットおよび腐食速度から推定した劣化進展速度

推定方法	20℃環境における劣化進展速度 (mm/年)			腐食速度の標準値に対する劣化進展速度 (mm/年)			推定された実環境における劣化進展速度 (mm/年)		
	海中部	干満帯	飛沫帯	海中部	干満帯	飛沫帯	海中部	干満帯	飛沫帯
ハット形重防食鋼矢板 (PU 被覆)	3.2	3.2	3.2	0.7~1.3	1.1~3.2	3.2	3.2	3.2	3.2
U形重防食鋼矢板 (PU 被覆)	3.1	—	—	3.7	—	—	3.7	—	—

$$v = 6.6 \times v_{corr} \quad (4.3)$$

$$v = 10.7 \times v_{corr} \quad (4.4)$$

ここで、

v : 劣化進展速度 (mm/年)

v_{corr} : 鋼材の腐食速度 (mm/年)

この関係式から港湾鋼構造物における鋼材の腐食速度の標準値を用いることで、各環境の劣化進展速度を推定することができる。海中部の場合、鋼材の腐食速度の標準値が 0.1~0.2mm/年となることから、劣化進展速度は 0.7~1.3mm/年と推定できる。また、飛沫帯および干満帯については、鋼材の腐食速度が 0.1~0.3mm/年となることから、劣化進展速度は 1.1~3.2mm/年と推定できる。

表-4.3 にアレニウスプロットおよび腐食速度の標準値から推定した劣化進展速度の推定結果を示す。また、それぞれの推定結果をもとに、耐久性評価を行う際に安全側の判定となるように、各推定方法および各環境の推定結果の最大値を実環境における劣化進展速度として表中に追記した。海洋環境下に重防食被覆を施した場合には、海中部、干満帯、飛沫帯の環境に関わらず、被覆端部から剥離する速度である劣化進展速度は、3.2mm/年と推定される。

4.6 重防食層内部への腐食の進展

前述しているように、重防食層の劣化進展は、鋼材の腐食に起因するものである。重防食被覆端部で発生する腐食は、露出した鋼材表面がアノードとなり、その周囲の重防食被覆層下の鋼材表面がカソードになるため、被覆層下では酸素還元反応（カソード反応）で生成される水酸基（OH⁻）の加水分解作用によって、接着力が低下し剥離が生じると推定される。ただし、鋼

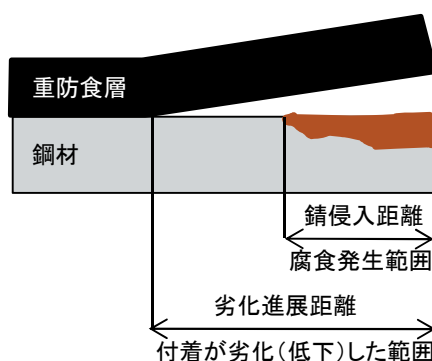


図-4.19 劣化進展距離と錆侵入距離の定義

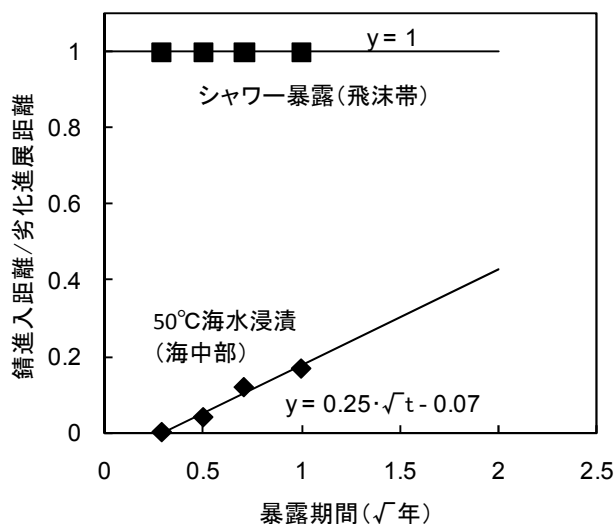


図-4.20 劣化進展距離と錆侵入距離との比率⁹⁾

材表面の溶液がアルカリ性を保つこともあり、被覆層に剥離が生じて、鋼材が不動態化するために、腐食は生じ難い。その後、被覆層の剥離が進展することで被覆端部に浮きが生じ、防食効果が失われた時点で被覆端部から徐々に腐食が内部へ進行する考えられる。

したがって、図-4.19 に示すように劣化進展距離と被覆層内部への錆進入距離は異なる。これを定量評価することで、重防食鋼平板の供用期間中における鋼材の腐食量の推定が可能となる。

図-4.20 に暴露期間 1 年までの海水シャワー暴露試験および 50℃海水浸漬試験によって得られた劣化進展距離と錆進入距離との比率の経時変化を横軸に時間の平方根をとって示す。

干満帯や飛沫帯など乾湿繰返しの作用を受ける環境の場合の比率は暴露初期からほぼ 1.0 となり、劣化進展距離と錆進入距離は等しいと考えてよいと思われる。これは、乾湿繰返し作用によって、被覆層下の環境が変化することで鋼材の不動態が破壊されるため、被覆材の接着力低下と同時に腐食が発生するためであると推察される。図-4.21 に干満帯、飛沫帯における劣化進展距離と錆進入距離の時間変化を示す。なお、潜伏期間は、7 年とした。これより、劣化進展距離および錆進入距離ともに式 (4.5) によって予測することがで

きると考えられる。

$$W = 3.2 \times (T - T_i) \quad (4.5)$$

ここで、

W : 劣化進展距離および錆進入距離 (mm)

T : 供用期間 (年)

T_i : 潜伏期間 (年)。ここでは、7 年

また、干満帯、飛沫帯の被覆層内部の腐食量分布については、鋼材の腐食は時間に比例すると考えることができるため、図-4.22 に示すように、鋼材露出面の腐食量と錆進入距離の三角形分布になると考えられる。

一方、海中部の場合には、暴露初期において、時間の経過とともに劣化進展距離と錆進入距離との比率が増加する傾向を示した。これは、暴露初期においては、鋼材露出部の腐食に伴う被覆層下のカソード領域の進展と被覆層の劣化進展に差が生じているためであると想定される (図-4.1 参照)。海中部の場合、大きな環

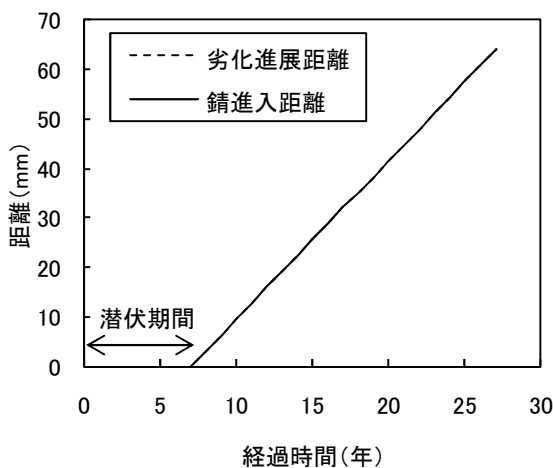


図-4.21 干満帯、飛沫帯における劣化進展距離と錆進入距離

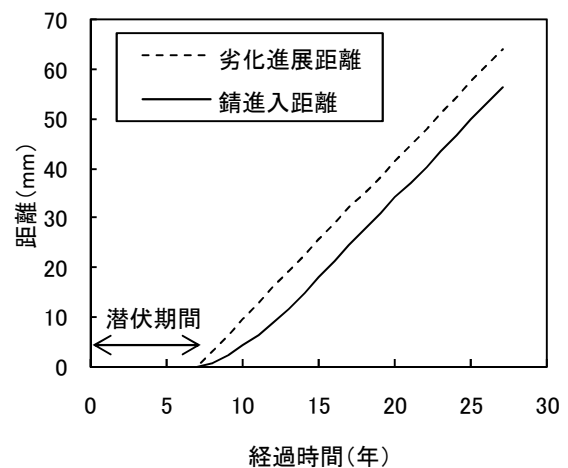
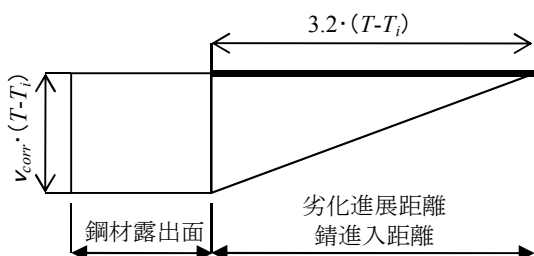
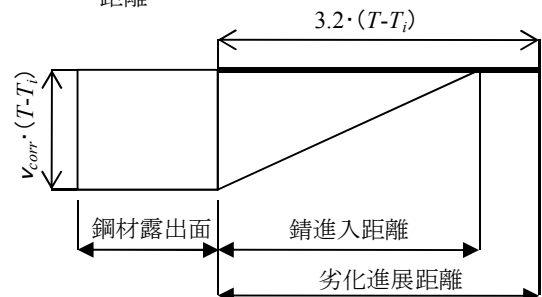


図-4.23 海中部における劣化進展距離と錆進入距離



v_{corr} : 腐食速度 (mm/年), T : 期間 (年),
 T_i : 潜伏期間 (年)

図-4.22 干満帯、飛沫帯における鋼材の腐食量分布



v_{corr} : 腐食速度 (mm/年), T : 期間 (年),
 T_i : 潜伏期間 (年)

図-4.24 海中部における鋼材の腐食量分布

境変化がないために、時間の経過に伴い定常状態になると予想される。よって、潜伏期間後の進展期初期には、式(4.6)に示すように、鏽進入距離は \sqrt{t} 則にしたがって漸増し、劣化進展距離と鏽進入距離との差が最大となった時点で、式(4.7)に示すように、その差を維持しつつ、鏽進入距離は増加すると考えられる。図-4.23 に海中部における劣化進展距離と鏽進入距離の経時変化を示す。長期の暴露試験によって、確認する必要があると思われるが、被覆層下においては、幅8mm程度のカソードが徐々に内部に進展すると予想される。

$$W_{corr} = W_c \times 0.25 \times \sqrt{(T - T_i)} \quad (T \leq 14) \quad (4.6)$$

$$W_{corr} = W_c - 7.6 \quad (T > 14) \quad (4.7)$$

ここで、

W_{corr} : 鏽進入距離 (mm)

W_c : 劣化進展距離 (mm)

T : 供用期間 (年)

T_i : 潜伏期間 (年)。ここでは、7年

なお、被覆層下の腐食量分布に関しては、図-4.24 に示すように、鋼材露出面の腐食量と鏽進入距離の三角形分布になると考えられる。

4.7 重防食被覆の耐久性評価

これまでの検討結果より、ウレタンエラストマー被覆を用いた重防食鋼矢板の性能低下曲線は、図-4.25 のように示すことができる。潜伏期間が7年、海中部、干満帯および飛沫帯における劣化進展速度が3.2mm/年、劣化進展距離の性能の限界値が55mmとすると、重防食鋼矢板の被覆防食の寿命は24.2年と予測できる。

ただし、実海域においては、重防食被覆の劣化進展速度は、付着海生生物による被覆材の固着や積層鏽の生成による酸素供給の低下などの現象により、時間の経過とともに小さくなる可能性がある。今回は、空気吹き込み塩水浸漬試験による促進試験および短期間の海水シャワーによる暴露試験の結果から、被覆材の寿命を推定した。より詳細な寿命推定のためには、実海域における調査等を通じ、劣化進展速度の経年変化を調査していくことが望まれる。

また、重防食被覆の劣化は、被覆端部からの剥離によるものである。鋼矢板全面を考えた場合には、その劣化の範囲は限定され、継手かん合部端部55mmの範囲が鋼矢板長手方向に連続して劣化することになる。ハ

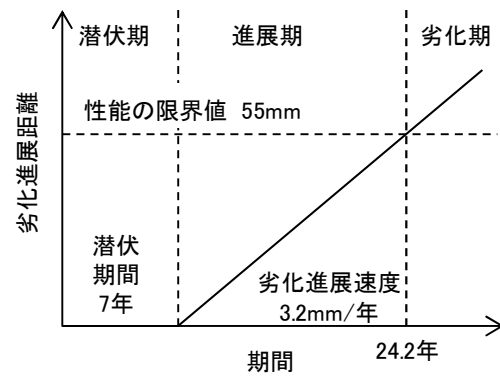


図-4.25 重防食鋼矢板の性能低下曲線
(ウレタンエラストマー被覆の場合)

ット形鋼矢板 (SP-10H) の場合 (図-3.5)、被覆面積が1.05m²/mに対して、劣化範囲は0.11m²/mとなる。また、ハット形鋼矢板 (SP-25H) の場合 (図-3.6) には、被覆面積が1.20m²/mに対して、劣化範囲は0.11m²/mとなる。したがって、被覆材の劣化面積は、被覆面積の10%程度となる。重防食被覆による効率的な防食を確立するためには、劣化部の効果的な補修工法の確立が望まれる。

5. 被覆層損傷部の劣化進展に関する耐久性評価

5.1 概要

鋼構造物に適用される被覆防食の維持管理は、目視による点検が基本である。特に、船舶や漂流物等の衝突などによる被覆防食層の損傷は、偶発的に生じる損傷現象であるため、被覆防食層の変状を目視により点検し、適切に維持補修を行わなければならない。ここで、この点検の頻度を定める際には、重防食被覆層に損傷が生じ鋼面が露出した場合に、その鋼面露出部の腐食速度がある一つの指標になり得ると考えられる。そのためには、重防食の損傷部を放置した際に、損傷部の腐食状況がどのように変化するかを把握する必要がある。しかしながら、現状として、重防食被覆損傷部の腐食に関する知見は、ほとんど得られてない。そこで、重防食部に損傷を人工的に設けた供試体を作製し、損傷部の鋼材の腐食速度を定量的に評価することを目的とする。

5.2 試験方法

供試体は、表-5.1 および写真-5.1 に示すように、

15cm×7.5cm の鋼板に、重防食ハット形鋼矢板と同じウレタンエラストマー被覆による重防食を施し、その重防食被覆面の中央部に、損傷部としてφ10mmの円形の疵を設けたものである。これにより、重防食鋼矢板の施工中あるいは供用中に、なんらかの物理的な要因によって被覆部の鋼面が露出した損傷（疵）を模擬したものである。

この供試体を用いて、表-5.2 に示す促進試験および暴露試験を想定される腐食環境に応じて実施した。空気吹き込み塩水浸漬試験および海水シャワー暴露試験の概要は、4.1 および 4.3 に示したものであり、塩水噴霧試験については、JIS Z 2871 に基づく方法で実施した。海水浸漬試験は、(独) 港湾空港技術研究所の長期暴露試験施設である海水循環水槽（海中部）に暴露したものである。循環水槽は屋外にある自然海水を 1 日 2 回循環させる水槽で、供試体は、常時自然海水に浸漬させた。

5.3 結果および考察

(1) 無被覆供試体の鋼材腐食

無被覆供試体の腐食量分布を図-5.1 に示す。腐食量の測定は、所定の期間暴露させた供試体を酸洗処理し、レーザー照射により減肉深さを 200 μm ピッチで測定し、腐食による減肉量の面分布を測定した。海水浸漬、海水シャワーおよび空気吹き込み塩水浸漬試験ともに、一様な腐食と同時にマクロセル腐食による孔食も確認

表-5.1 供試体の概要

形状	□15cm×7.5cm, 板厚 10.8mm
塗装仕様	ウレタンエラストマー被覆重防食
種類	損傷有り(φ10mmの円形損傷)



写真-5.1 損傷供試体の外観

表-5.2 試験体の概要

試験方法	調査時期	備考
海水シャワー暴露試験	1 年	飛沫帯
海水浸漬試験 (海水循環水槽内)		海中部
塩水噴霧試験	0.5 年	促進 試験
空気吹き込み塩水浸漬試験	1 年	

海水浸漬（海中部）

試験期間：1 年

平均腐食量：147 μm

最大腐食量：434 μm



海水シャワー（飛沫帯）

試験期間：1 年

平均腐食量：359 μm

最大腐食量：805 μm



空気吹き込み塩水浸漬試験 (促進試験)

平均腐食量：463 μm

最大腐食量：813 μm

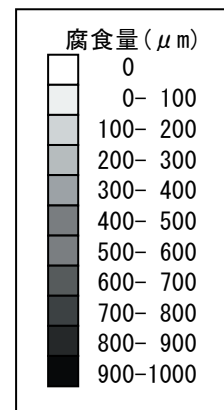


図-5.1 無被覆供試体の腐食量分布（測定範囲：25mm×90mm）

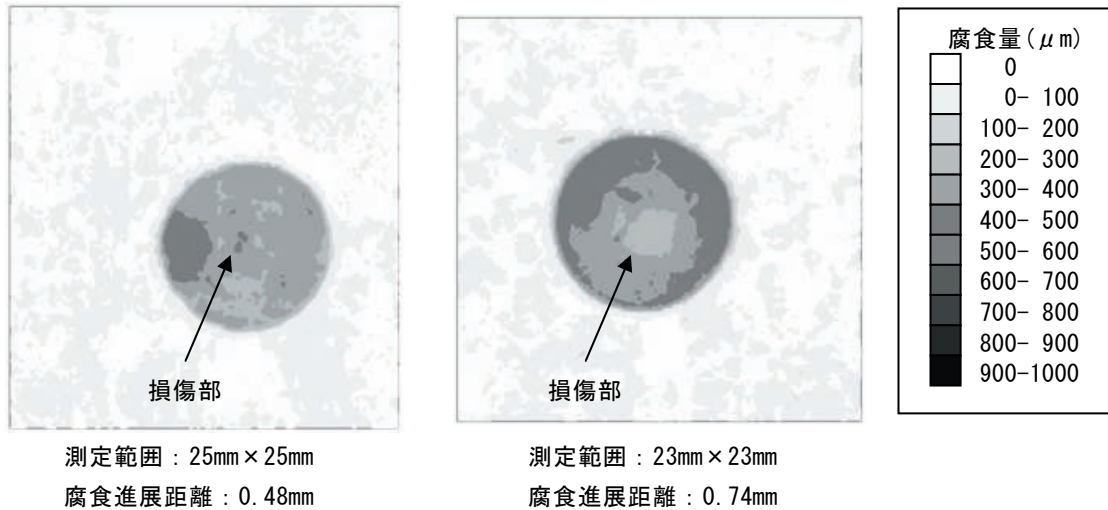


図-5.2 海水浸漬供試体の疵部周辺の腐食量（暴露1年）

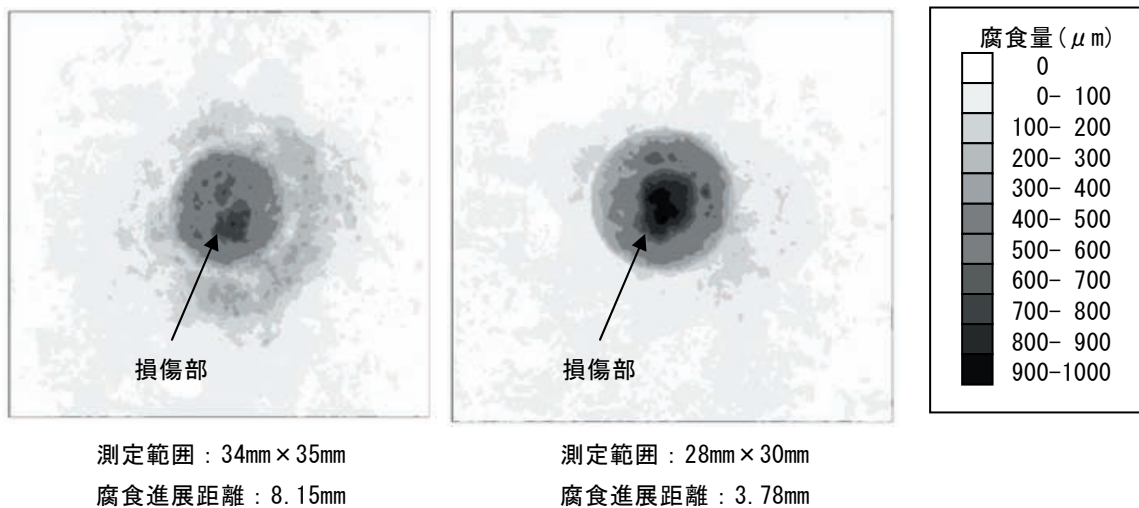


図-5.3 海水シャワー暴露供試体の疵部周辺の腐食量（暴露1年）

できる。孔食位置となる最大腐食量は、いずれの試験方法も平均腐食量の2倍程度となった。なお、それぞれの試験方法の腐食速度は、海水浸漬試験が約0.15mm/年、海水シャワー暴露試験が約0.36mm/年、空気吹き込み塩水浸漬試験が0.9mm/年となった。これは、4章で示した無被覆鋼材の腐食速度と同程度の腐食速度である。

(2) 被覆損傷供試体の被覆下の鋼材腐食

海水浸漬させた供試体の暴露1年の腐食量分布を図-5.2に示す。海中部の被覆層が損傷した場合には、損傷部の腐食は徐々に進行するものの、被覆内部への腐食はほとんど進行していないことが分かる。1年間の腐食進入距離は、平均で約0.6mmとなった。重防食被覆端部の劣化進展速度である3.2mm/年と式(4.5)で示した劣化進展距離と錆進入距離の関係から推定した

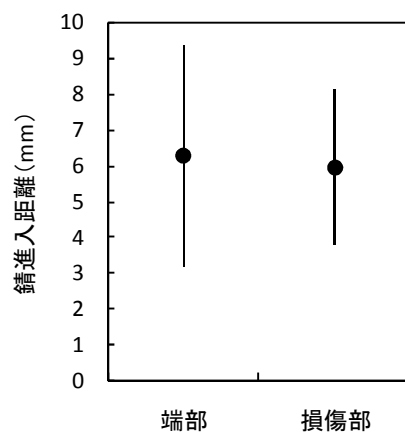


図-5.4 海水シャワー暴露試験における被覆端部および損傷部の錆進入距離（暴露1年）

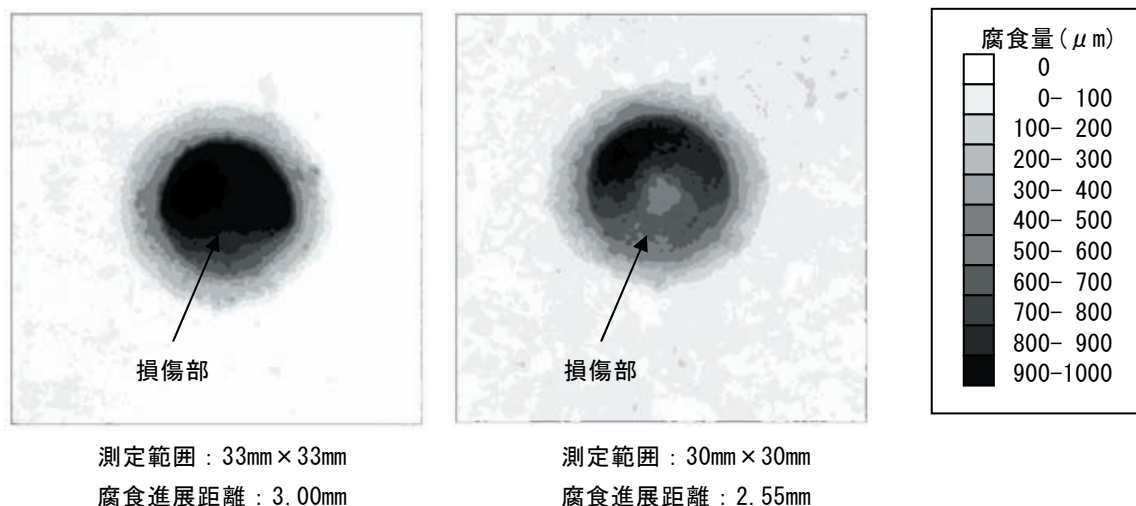


図-5.5 空気吹き込み塩水浸漬試験供試体の疵部周辺の腐食量（暴露0.5年）

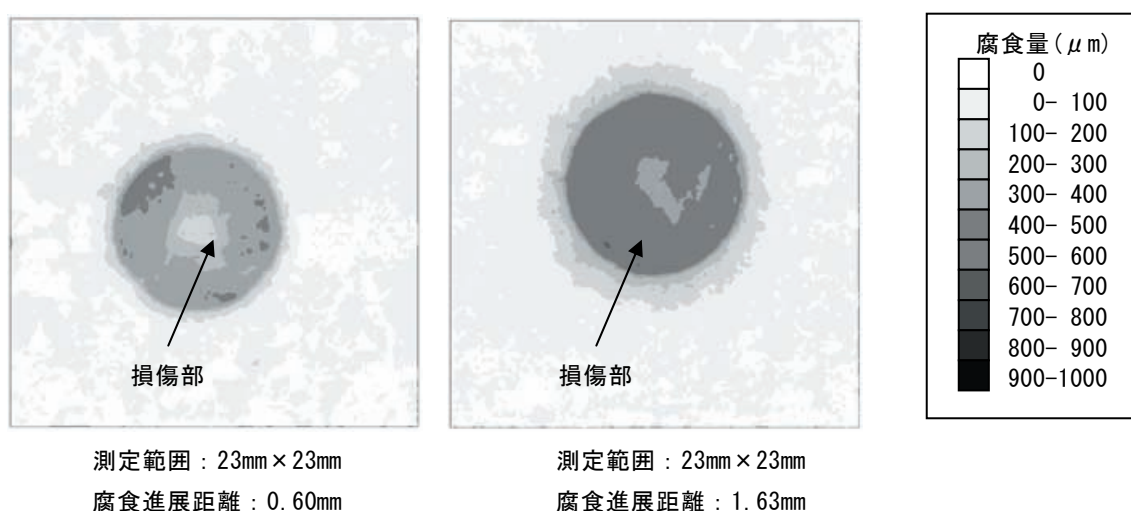


図-5.6 塩水噴霧試験供試体の疵部周辺の腐食量（暴露0.5年）

海水中における被覆端部の錆進入距離は0.8mmとなる。したがって、被覆損傷部と被覆端部の劣化進展は、ほぼ同程度であると推察できる。

海水シャワー暴露試験の結果を図-5.3に示す。海水浸漬試験の供試体では、被覆層内部への腐食の進展はほとんど見られなかったが、飛沫帯の環境となる海水シャワー暴露では、被覆層内部への腐食の進展が顕著に現れ、1年間の錆進入距離は平均で約6.0mmとなった。これは乾湿繰返し作用によって大気中からの酸素の供給が多くなったため腐食が促進されたとともに、被覆層内部は疵部に比べ鋼材表面に遮蔽物となる被覆層があるため酸素の供給が鋼材露出面よりも少なく、一般にすきま腐食といわれる酸素濃淡電池が形成されたためであると推察される。図-4.20で示したように干満帯および飛沫帯の劣化進展距離と錆進入距離は等

しいと考え、海水シャワー暴露試験（暴露1年）の被覆端部および損傷部の錆進入距離を比較した。その結果を図-5.4に示す。これによると、被覆端部の劣化進展と被覆損傷部の劣化進展は、ほぼ同程度であると推察される。損傷の大きさがφ10mmと比較的小さな疵が生じた場合においても同程度の劣化進展となったことから、鋼材露出面の大きさに相当するアノード面積の大きさに関わらず劣化は進展すると予想される。劣化進展は、4章で示した被覆端部と同様に予測することが可能と考えられるが、被覆層の損傷による劣化進展の場合は、被覆端部のように潜伏期間がなく、損傷と同時に劣化が進行することになる。そのため、疵の発生時期を明確にし、適切に維持管理する必要があると考えられる。ここで、被覆層の損傷原因として、船舶や漂流物の衝突などの物理的作用を考える場合には、

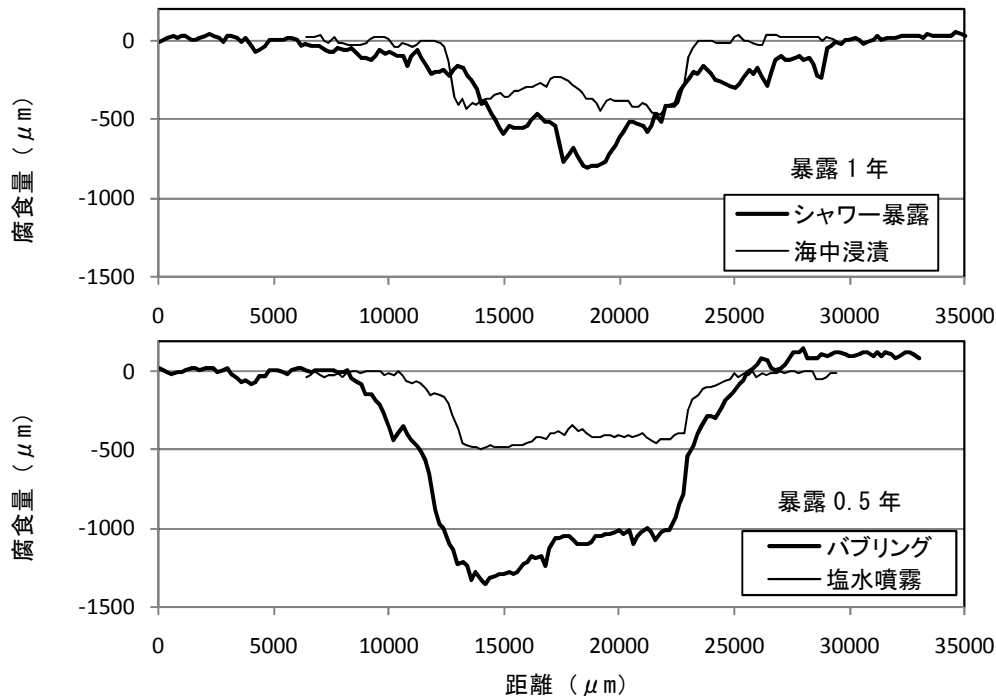


図-5.7 供試体断面の腐食量分布

その発生位置は飛沫帯や干満帯がほとんどであると予想される。よって、外観目視等による定期的な点検が重要である。

促進試験結果として、空気吹き込み塩水浸漬試験および塩水噴霧試験の結果を図-5.5 および図-5.6 に示す。被覆層内部への腐食の進展には差があるものの、いずれの場合も一様な腐食が疵部から広がっているのが分かる。その錆進入距離は、空気吹き込み塩水浸漬試験供試体の場合は平均で 2.7mm、塩水噴霧試験供試体の場合は平均で 1.1mm となった。いずれの場合も 0.5 年の結果であるため、それぞれの錆進入速度は、5.5mm/年および 2.2mm/年となる。

損傷部周辺の被覆層内部の腐食量について、図-5.7 に供試体断面の腐食量分布を示すが、いずれの試験結果も疵等の損傷箇所の腐食量が最大となる傾向を示している。また、被覆層内部の腐食量は、いずれの場合も疵端部から徐々に線形的に減少する傾向を示している。したがって、4.6 で示したように被覆端部の腐食進展と同様に損傷部の腐食量も断面方向に三角形の分布で評価できると考えられる。

図-5.8 に無被覆鋼材の腐食速度と錆進入速度または最大劣化進展速度の関係を示す。これは図-4.18 で示した図中に疵部からの劣化進行のデータを追加したものである。乾湿繰返し作用を受ける海水シャワー暴露試験の結果については、ばらつきはあるが、被覆損

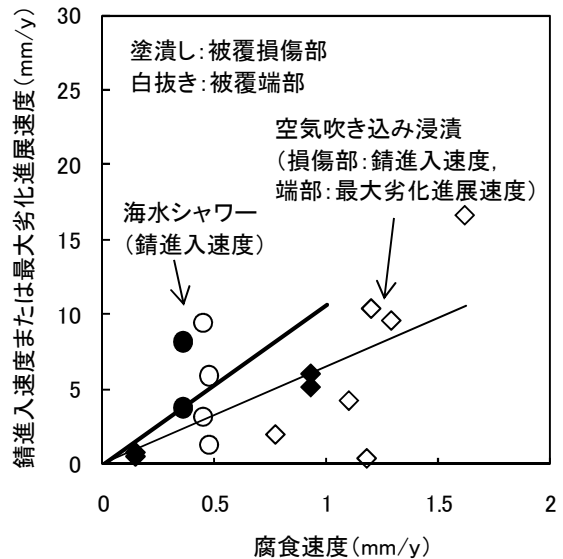


図-5.8 無被覆鋼材の腐食速度と錆進入速度または最大劣化進展速度の関係

傷部と被覆端部の錆進入速度の結果は同様な傾向を示している。このことから、劣化の進展は、損傷部、被覆端部ともに同程度であると考えられる。一方、海水中の環境となる空気吹き込み塩水浸漬試験の結果においては、被覆損傷部の錆進入速度と被覆端部の最大劣化進展速度の結果が同程度の傾向を示した。4 章で示したように、海水中の環境においては、錆進入距離と

劣化進展距離は異なり、錆進入距離の方が劣化進展距離より小さくなると予想される。しかし、図-5.8より、被覆損傷部の平均の錆進入速度と被覆端部の最大劣化進展速度が同程度となることから、被覆損傷部の劣化進展速度の方が若干大きくなる傾向にあると思われる。

以上の結果より、被覆損傷部の劣化進展は、被覆端部の劣化進展と同程度かそれ以上の速度で進行することが予想されるため、鋼材の防食性能の保持および被覆層の健全性確保のためには、定期的な点検診断および残存性能評価、将来予測が必要であると考えられる。特に、劣化進展速度および腐食速度の大きい環境となる干満帯および飛沫帯については、注意が必要であると考えられる。

6. ハット形重防食鋼矢板の構造部材としての耐久性評価

ウレタンエラストマー被覆の劣化は被覆端部および疵部から進展する被覆層の剥離およびそれに伴う腐食に起因すると考えられる。被覆端部のうち、上端部については、上部コンクリートに被覆層が埋込まれるため、高い防食性が確保されていると考えられる。また、下端部については、基本的には、平均干潮面(M. L. W. L.)-1m以深の範囲まで被覆されるため、電気防食と併用する場合には、電気防食の適用範囲内になることが一般的で、高い防食性が確保されている。または、被覆防食のみで防食する場合には、腐食速度の小さな海底土中部まで被覆防食を施し埋設するため、ある程度の防食性は確保されている。したがって、被覆端部のうち鋼材の腐食が懸念される箇所は、重防食被覆の左右

端部となる。これは、鋼矢板の継手部に位置する。

U形鋼矢板の場合、継手部は矢板による壁体の壁厚中央にあり、中立軸に位置するため、重防食被覆が劣化し腐食が進展しても矢板壁の断面性能に及ぼす影響は小さく、構造強度上の問題となることは少ない。一方、ハット形鋼矢板は、継手が矢板壁の外縁に位置するため、重防食被覆が劣化し腐食が進展した場合には矢板壁の断面性能も低下する。したがって、ここでは、重防食被覆左右端面の矢板継手部から被覆が劣化し腐食が進展した場合について、構造性能の面からハット形重防食鋼矢板の耐久性を評価することを試みた。なお、検討にあたって、疵等の損傷部については、適切な補修が行われるものとし、孔食や集中腐食の影響については考慮せず、平均的な腐食量を用いて耐久性を評価した。また、鋼材の腐食速度に関しては、「港湾の施設の技術上の基準・同解説(H.19)」に示されている

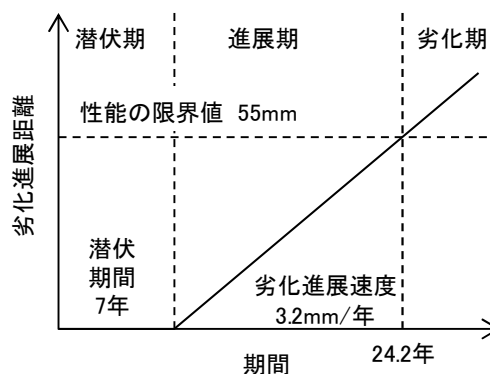


図-6.1 重防食鋼矢板の性能低下曲線
(ウレタンエラストマー被覆の場合)

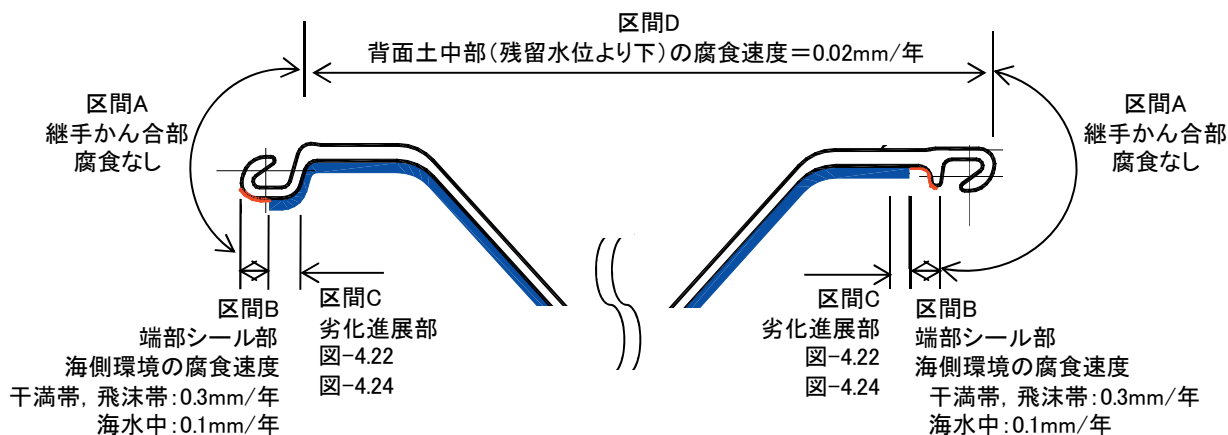


図-6.2 ハット形重防食鋼矢板の腐食

腐食速度の標準値¹⁾を用いた。

6.1 ハット形重防食鋼矢板の腐食

4章の結果から、ハット形鋼矢板のウレタンエラストマー被覆の被覆端部からの劣化進展に対する抵抗性は、U形鋼矢板のウレタンエラストマー被覆と同等またはそれ以上の性能を有していることが分かる。ここでは、4.7に示した空気吹き込み式塩水浸漬試験および短期間であるが海水シャワー暴露試験の結果に基づいた図-6.1に示す重防食鋼矢板の被覆材の性能低下曲線とした。この性能低下曲線では、既往の研究結果に基づいた端部シールによる7年間の潜伏期間の後、劣化進展速度が3.2mm/年で線形的に劣化が進行していくこととなる。実際の構造物の場合には、性能低下曲線は、定期点検診断の結果に基づいた残存性能評価により見直されると考えられるが、現時点においては、重防食被覆端部からの劣化進展に関するデータが十分でないため、試験結果から仮定した性能低下曲線を用いた。

ハット形重防食鋼矢板を港湾鋼構造物に用いた場合、背面土中側には防食を施さないと仮定すると、図-6.2に示すように、それぞれの部位によって腐食量を推定することができると考えられる。

(1) 継手かん合部の腐食 (区間 A)

区間 A は、継手かん合部の爪部となる範囲で、継手同士が重なりあう範囲である。

写真-4.8に示すとおり、浸漬期間1年後の継手かん合部内の腐食はほとんど進展していない。継手かん合部内は、無防食の状態となるが、暴露後の経年とともに腐食生成物の表面堆積等により、継手の遊間は次第に閉塞されていくと予想される。したがって、継手かん合部内の腐食は、継手の遊間が閉塞され酸素の供給が断たれることにより、実用上無視し得る範囲に留まるものと推測される。空気吹き込み塩水浸漬試験の結果からは、無被覆鋼材の腐食速度である1.1mm/年と比べると、継手かん合部内部の腐食は極めてわずかであり、腐食は生じないと考えてよいと思われる。したがって、ここでは、式(6.1)で示すように、腐食量は0mmとした。

$$V_{corr} = 0.0 \quad (6.1)$$

ここで、

V_{corr} : 腐食量 (mm²)

ただし、暴露または浸漬期間が短く、定性的な腐食

傾向に基づく推測であることから、今後、実環境での調査や供用期間中の定期点検診断結果等によって、確認することが望まれる。

(2) 端部シール部の腐食 (区間 B)

区間 B は、端部シールが施された海側かん合部の20±10mm、背面土中部側かん合部の区間 A を除く60±10mmの範囲である。

端部シールの防食効果によって、潜伏期間内は腐食が生じないと考えられるが、それ以降は、シール部の劣化とともに腐食が進行すると考えられる。したがって、潜伏期間においては、腐食が生じないが、それ以降は、各環境における腐食速度によって腐食が進行すると考えられる。なお、端部シールによる潜伏期間は7年と仮定した。

$$V_{corr} = 0.0 \quad (0 \leq T < 7.0) \quad (6.2)$$

$$V_{corr} = v_{corr} \cdot W_{corr} \cdot (T - T_i) \quad (7.0 \leq T) \quad (6.3)$$

ここで、

V_{corr} : 腐食量 (mm²)

v_{corr} : 各環境における腐食速度 (mm/年)

W_{corr} : 端部シールの幅 (mm)

T : 期間 (年)

T_i : 潜伏期間 (年)

(3) 重防食被覆内部の錆侵入部の腐食 (区間 C)

区間 C は、重防食被覆端部からの劣化進展に伴い生じた腐食範囲(錆侵入範囲)である。

被覆層内部への腐食の進展については、4.6に示したとおり、干満帯や飛沫帯など乾湿繰返しの影響を受ける範囲については、錆進入距離は劣化進展距離と同じと考えてよいが、海中部に関しては、式(4.6)および式(4.7)に示すように、劣化進展距離に比べて錆進入距離は小さくなる。また、被覆層内部の腐食量分布は、図-4.22および図-4.24に示すような三角形の分布になると考えられる。

$$V_{corr} = 0.0 \quad (0 \leq T < 7.0) \quad (6.4)$$

$$V_{corr} = \frac{v_{corr} \cdot W_{corr} \cdot (T - T_i)}{2} \quad (7.0 \leq T) \quad (6.5)$$

ここで、

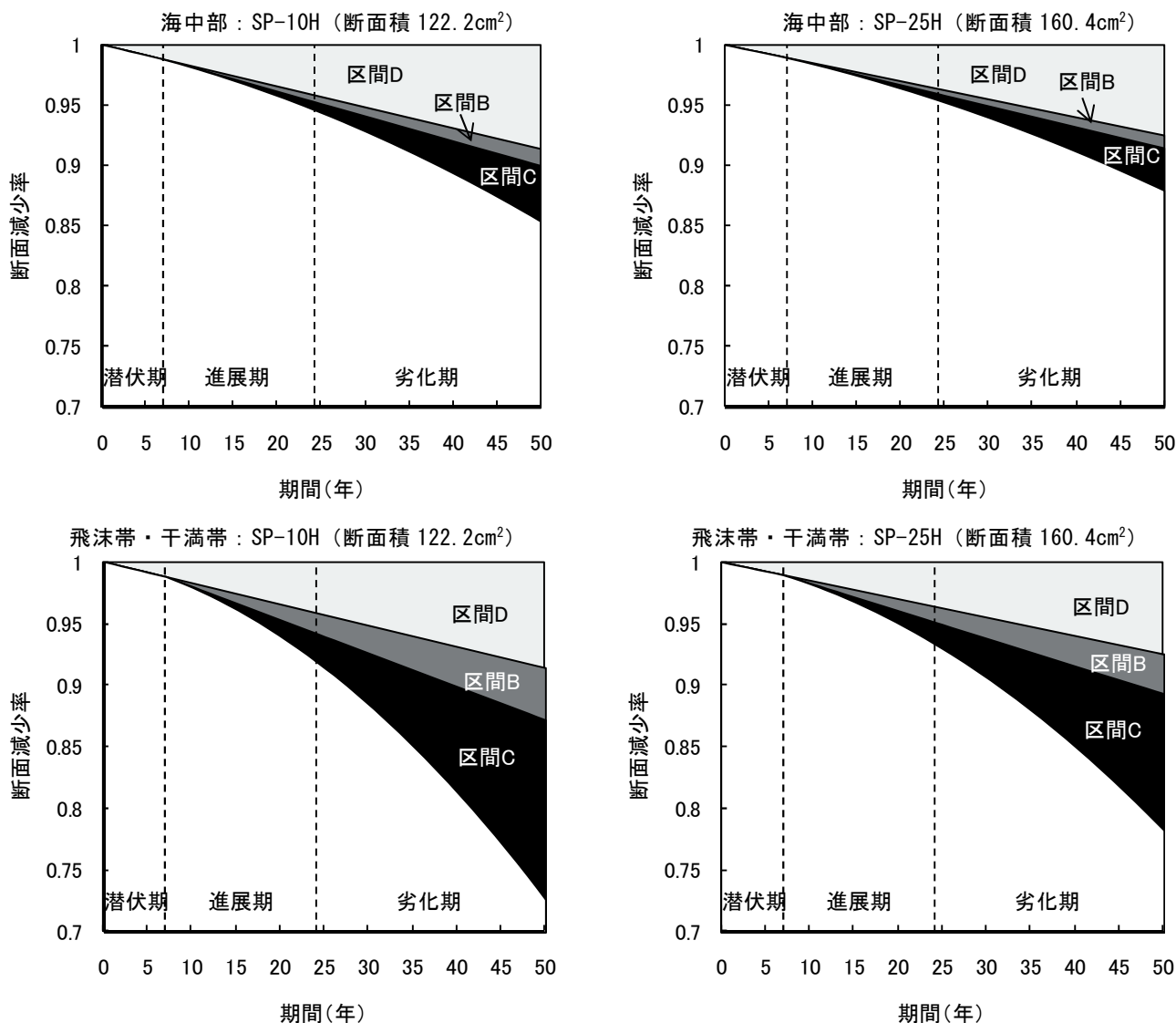
V_{corr} : 腐食量 (mm²)

v_{corr} : 各環境における腐食速度 (mm/年)

W_{corr} : 錆進入距離 (mm)

T : 期間 (年)

T_i : 潜伏期間 (年)



区間 A: 継手かん合部内の腐食(腐食速度: 0.0mm/年)
 区間 B: 端部シール部の腐食(腐食速度: 海水中 0.1mm/年, 飛沫帯・干満帯 0.3mm/年)
 区間 C: 重防食被覆内部の錆侵入部の腐食(腐食速度: 海水中 0.1mm/年, 飛沫帯・干満帯 0.3mm/年)
 区間 D: 背面土中部の腐食(腐食速度: 0.02mm/年)

図-6.3 ハット形重防食鋼矢板の腐食による断面減量率の経年変化の推定結果

(4) 背面土中部の腐食 (区間 D)

区間 D は、継手かん合部を除く背面土中側の範囲となる。背面土中側は、供用開始時から腐食が進行するものとし、また、矢板式構造の場合、ほとんどの場合が残留水位より下になると予想されるため、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」に示すとおり、鋼材の腐食速度は 0.02mm/年とした。

$$V_{corr} = v_{corr} \cdot W_{corr} \cdot T \quad (6.6)$$

ここで、

V_{corr} : 腐食量 (mm²)

v_{corr} : 背面土中部 (残留水位より下) の腐食速度 (mm/年)

W_{corr} : 背面土中部の矢板幅 (mm)

T : 期間 (年)

6.2 ハット形重防食鋼矢板の腐食による断面減少

6.1 で示したハット形重防食鋼矢板の腐食量の仮定に基づいて鋼材の腐食に伴う減肉による断面減少率の

経年変化を試算した結果をを図-6.3に示す。なお、図中には、参考として、4章の空気吹き込み式塩水浸漬試験および海水シャワー暴露試験の結果から検討したウレタンエラストマー被覆材の性能低下曲線として推定された「潜伏期（7年）」および「進展期（24年）」を点線で併せて示す。

区間Dとなる背面土中側の腐食によって、腐食速度は0.02mm/年と非常に小さいものの、その対象面積が大きいために、供用開始時から断面減少率の低下に大きな影響を与えていることが分かる。一方、海側の腐食となる区間B（端部シール部）および区間C（被覆内部への錆侵入部）の断面減少については、進展期までに関しては、あまり大きな影響を与えていないものの、劣化期以降は急激な断面減少が認められる。特に、飛沫帯および干満帯の腐食は著しく、供用50年間を無補修で使用した場合には、断面積がSP-10Hで73%、SP-25Hで78%程度まで減少することになる。鋼材の肉厚減少

は、その断面耐力の低下につながるため、ハット形重防食鋼矢板を用いる場合には、適切な補修または補強が必要であると考えられる。なお、被覆材の性能の限界と考えられた劣化進展距離が55mm（被覆材の寿命24年）の時の鋼材の断面減少率は、表-6.1に示すとおり海中部で95%程度、飛沫帯および干満帯で92%程度に減少すると考えられる。重防食鋼矢板の場合、被覆端部からの局所的な腐食が卓越するために、平均減肉量での評価は難しいと考えられるが、海中部で0.7mm程度、

表-6.1 鋼材の断面減少率と平均減肉量の推定結果

	供用期間	SP-10H	SP-25H
海中部	24年	95% (0.6mm)	95% (0.7mm)
	50年	85% (1.7mm)	88% (1.8mm)
飛沫帯 干満帯	24年	92% (0.9mm)	93% (1.0mm)
	50年	73% (3.2mm)	78% (3.3mm)

*括弧内は、平均減肉量（mm）を示す。

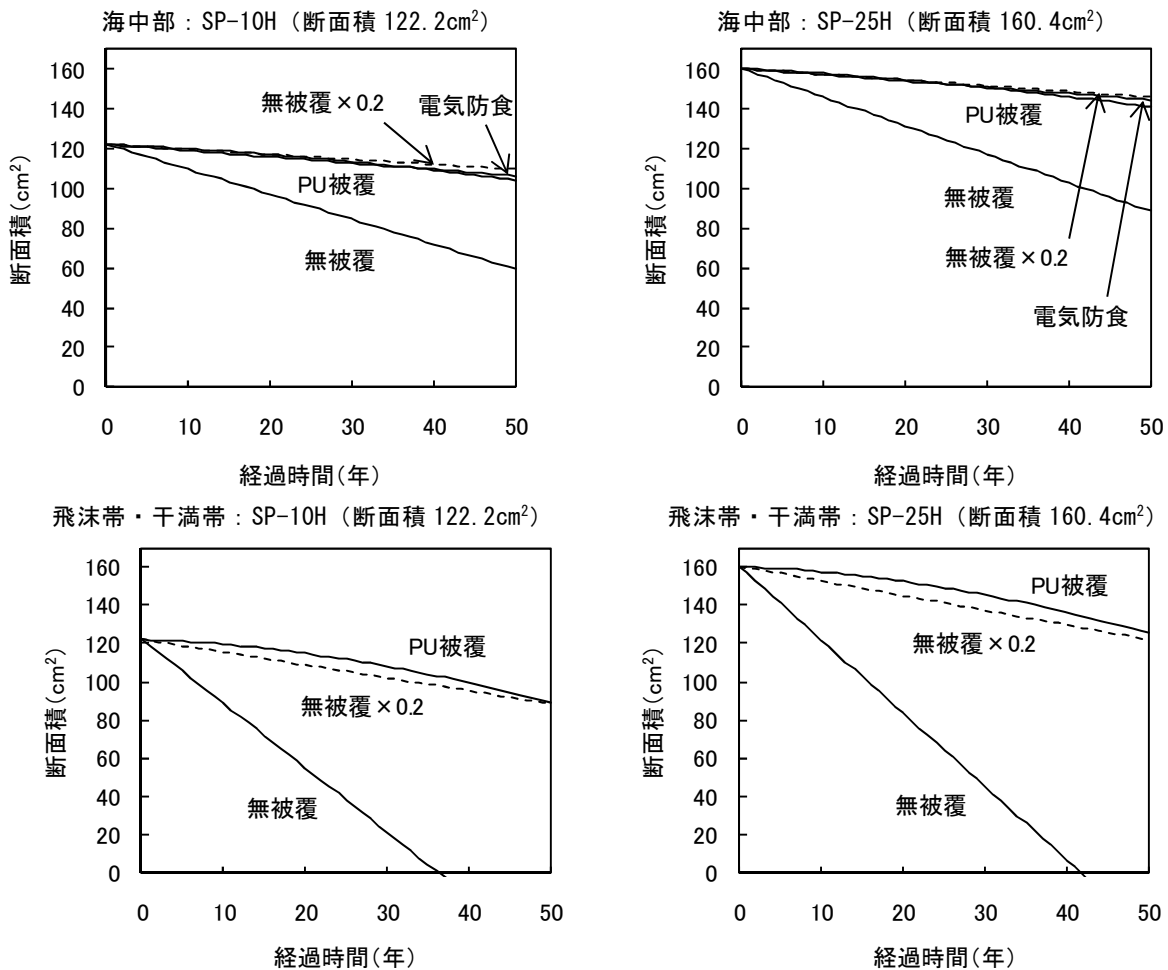


図-6.4 無被覆鋼矢板と重防食鋼矢板（PU被覆）の断面積の経年変化の推定結果

飛沫帯および干満帯で 1.0mm 程度の減肉となる。なお、供用 50 年目の平均減肉量は、海中部で 1.8mm 程度、飛沫帯および干満帯で、3.3mm 程度と算出される。ただし、今回試算した条件によると飛沫帯および干満帯での環境においては海側の腐食速度が大きいため、図-6.2 に示した区間 B（端部シール部）がハット形重防食鋼矢板における最大の腐食速度となる。ハット形鋼矢板の初期肉厚は、SP-10H が 10.8mm、SP-25H が 13.2mm であり、干満帯、飛沫帯における区間 B の局所的な腐食による貫通孔は、予測結果として SP-10H の場合が供用 40 年目に、SP-25H が供用 48 年目に生じる可能性がある。

これらのことを踏まえると、被覆防食工法全般にわたり言えることであるが、海側鋼材表面をハット形重防食鋼矢板による防食によって、背面土中部を無防食によって対策する構造物の長期供用を考える場合には、背面土中部および継手部に予め適切な腐食しろを設定するとともに、飛沫帯および干満帯において、定期的な点検と適切な補修および補強が必要になると思われる。

ハット形重防食鋼矢板の防食性能について、図-6.4 に無被覆鋼矢板と重防食鋼矢板の断面積の経年変化を比較した結果を示す。腐食の厳しい環境となる海側を重防食被覆によって防食しているため、ハット形重防食鋼矢板の方が断面減少が小さい。重防食被覆の被覆端部からの腐食は、腐食による肉厚の減少と被覆端部からの錆の進入が時間と比例するため、鋼材断面積は時間の二乗で減少することとなる。したがって、時間

の経過とともに、見かけの平均腐食速度は大きくなる傾向を示す。図-6.4 から、ハット形重防食鋼矢板の断面減少は、いずれの環境においても、無被覆鋼矢板の 20%程度に低減できると考えられる。これは、海中部における防食を考えた場合、一般的には流電陽極方式電気防食が適用されるが、その防食率は 90%で設計されることが一般的で、背面土中部の腐食を考慮すると、図-6.4 に示すとおり、断面減少は、無防食の場合の 20%程度に低減される結果となる。ここで、電気防食適用時の腐食量の算出方法については、海側の腐食量は、海中部の腐食速度を 0.1mm/年と設定し、電気防食適用時はその腐食速度の防食率 90%として 0.01mm/年として求めた。また、背面土中部については、腐食速度を 0.02mm/年に設定して求めた。この結果によると、ハット形重防食鋼矢板の断面減少の経年変化と電気防食適用時の断面減少は同程度ととなる。この結果からも、重防食被覆は、非常に高い防食性能を有していると考えられる。一方で、干満帯および飛沫帯の場合については、その他の被覆防食工法の定量的な評価は十分に分かっていない。したがって、比較検討することができないが、断面減少が海中部と同じく無被覆鋼矢板の 20%程度に低減できていることから、高い防食性能を有していると思われる。

6.3 矢板壁としての長期的な構造性能

既往の研究である「矢板式係船岸の構造諸元などに関する統計的解析¹⁴⁾」によると、我が国の矢板式係船岸のうちタイロッド式矢板が全体の 89%を占めている。

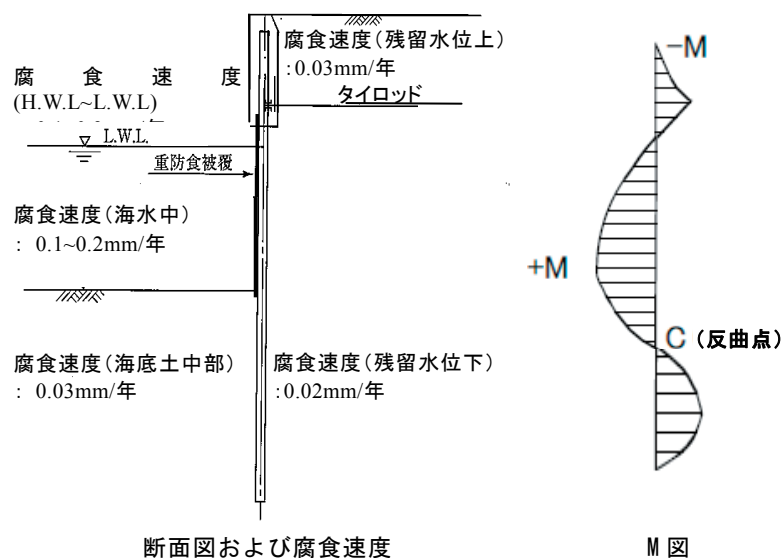


図-6.5 タイロッド式矢板の曲げモーメント分布(模式図)

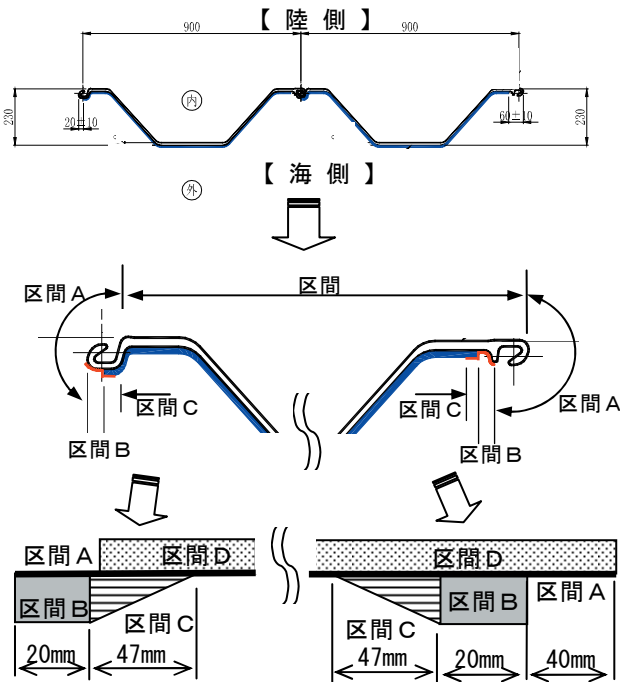


図-6.6 腐食箇所の詳細（概念図）

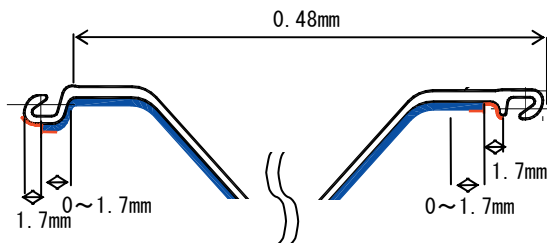


図-6.7 重防食被覆端部の劣化進展距離が55mmに到達した時点の鋼材の減肉量の推定値

同構造の矢板に生じる曲げモーメントの分布は、図-6.5に示すフィクストアースサポート法にて計算した形状に近いものとなり、曲げモーメントの最大値は海中部に生じると考えられる。

また、負の曲げモーメントの極大値はさく望平均干潮面（L.W.L.）上のタイロッド取り付け点付近と海底土中部で発生する。このうち海底土中部の腐食速度は十分に小さく、鋼材腐食による構造的な低下は、その他の環境に比べて明らかに小さいと考えられる。一方、L.W.L.付近は、干満帯に位置するため、海側の腐食速度は、海中部に比べ大きくなる可能性があり、特に重防食鋼矢板の場合には乾湿繰返し作用の影響も受けることが予想されるため、構造的な性能について確認する必要があると思われる。

したがって、ここでは正の曲げモーメントの最大値が作用する海中中部と負の曲げモーメントが発生する

表-6.2 ハット形重防食鋼矢板の断面性能低下率の推定結果

重防食層の劣化進展距離55mm到達時点
検討部位：海中中部

	断面積	断面係数	断面二次モーメント
矢板型式：SP-10H			
PU被覆部	0.94	0.93	0.94
電気防食	0.93	0.93	0.93
(参考値) 供用開始時	122.2 (cm ² /m)	902 (cm ³ /m)	10,500 (cm ⁴ /m)
矢板型式：SP-25H			
PU被覆部	0.95	0.95	0.95
電気防食	0.94	0.95	0.95
(参考値) 供用開始時	160.4 (cm ² /m)	1,610 (cm ³ /m)	24,400 (cm ⁴ /m)

- ※1. 表中の値は、供用開始時の値（参考値）を1としたときの比率を示す。
- ※2. 断面係数、断面二次モーメントの算定に際しては、腐食による重心軸のずれを考慮した。

L.W.L.近傍について、ハット形重防食鋼矢板により形成した矢板壁の耐久性を評価した。なお、海中中部においては、港湾鋼構造物の場合、流電陽極方式電気防食による防食が適用されることが多いが、この場合には、鋼材の腐食速度は実際の1/10以下に低減されると考えられるため、ここでは電気防食を併用しない場合（海底土中部まで被覆防食で防食する方法）について検討を行った。

なお、構造的な性能評価では、供用期間中において被覆材の性能の限界値と考えられる劣化進展距離が55mm（供用24年後）の時点がハット形重防食鋼矢板の寿命であると考え、その時点における断面性能を評価した。それ以降については、適切な補修が実施されることで、防食性能の改善によって構造的な性能も変化すると考えられる。補修後の防食性能および構造的な性能の評価は、十分に解明されておらず、予測することができないのが現状である。これについては、今後の課題とする。

(1) 海中中部における構造的な性能評価

4章で検討した結果をもとに図-6.2で示した区間ごとの腐食速度を仮定し、重防食被覆端部の劣化進展距離が55mmに到達したと予測した時点（供用24年目）の海中中部における鋼矢板の腐食量の予測結果を図-6.6および図-6.7に示す。ここで、継手周辺の腐食量の分布については図-4.23および図-4.24を用い、錆進入距離については式(4.6)を用いた。なお、海中中部の腐食速

度は0.1mm/年とし、背面土中部の腐食速度は0.02mm/年とした。当然であるが、被覆端部の減肉量が大きく、特に、継手部付近の減肉量が最大となり、背面土中部の腐食量と併せると2.2mm程度減肉することとなる。ハット形鋼矢板の初期肉厚は、SP-10H型が10.8mm、SP-25H型が13.2mmである。したがって、局所的な腐食をみると、P-10H型で20%程度、SP-25H型で17%程度の減肉となる。

ハット形鋼矢板で形成した鋼矢板壁について、重防食被覆端部の劣化進展距離が55mmに到達した時点の断面性能の低下率の推定結果を表-6.2に示す。なお、港湾鋼構造物の海中部に多く適用されている流電陽極方式電気防食を施した場合についても比較用として併せて示す。なお、電気防食適用時の腐食量の計算にあたっては、海側を防食率90%として腐食速度0.01mm/年と設定し、背面土中部の腐食速度を0.02mm/年として、重防食被覆端部の劣化進展距離が55mmに到達した年数として推定される24年分の腐食量を算出し、腐食量とした。

継手かん合部および背面土中側鋼材の腐食が構造的な性能に及ぼす影響は、矢板の形式により若干違いがあるが、重防食被覆端部の劣化進展距離が55mmに到達した時点における断面性能は初期性能の5~7%程度低減すると推察される。これは、電気防食を適用した場合の

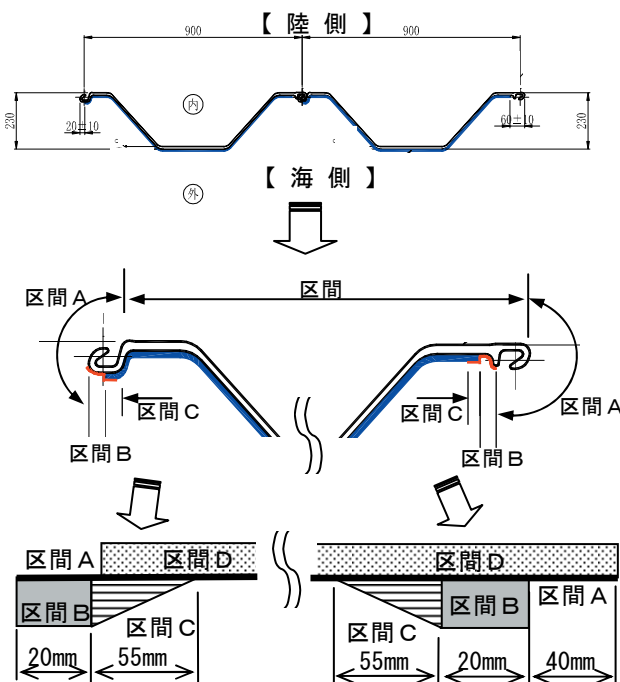


図-6.8 腐食箇所の詳細（概念図）

構造的な性能の低下率と同程度の値となる。したがって、ハット形重防食鋼矢板は、新規建設時から被覆材の性能限界に達するまでの期間においては、構造的な性能上、電気防食を適用した場合と同等またはそれ以上の耐久性を維持できると考えられる。ただし、更新時期を迎えた（重防食が寿命となった）場合には、構造的な性能の低下率は大きくなるのが懸念されるため、更新または電気防食への移行など適切に維持管理する必要があると考えられる。

(2) L.W.L. 付近における構造的な性能評価

4章で検討した結果をもとに図-6.2で示した区間ごとの腐食速度を仮定し、重防食被覆端部の劣化進展距

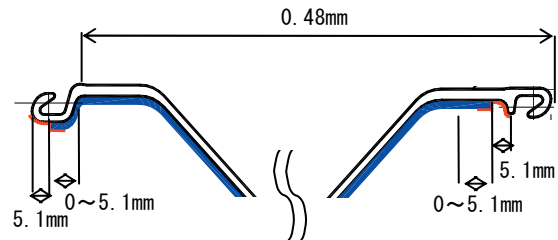


図-6.9 重防食被覆端部の劣化進展距離が55mmに到達した時点の鋼材の減肉量の推定値

表-6.3 ハット形重防食鋼矢板の断面性能低下率の推定結果

重防食層の劣化進展距離55mm到達時点

検討部位：L.W.L 付近

	断面積	断面係数	断面二次モーメント
矢板型式：SP-10H			
PU被覆部（干満帯）	0.90	0.87	0.89
無防食部（海底土中部）	0.88	0.89	0.89
（参考値） 供用開始時	122.2 (cm ² /m)	902 (cm ³ /m)	10,500 (cm ⁴ /m)
矢板型式：SP-25H			
PU被覆部（干満帯）	0.92	0.89	0.92
無防食部（海底土中部）	0.90	0.91	0.91
（参考値） 供用開始時	160.4 (cm ² /m)	1,610 (cm ³ /m)	24,400 (cm ⁴ /m)

※1. 表中の値は、供用開始時の値を1としたときの比率を示す。

2. 断面係数、断面二次モーメントの算定に際しては、腐食による重心軸のずれを考慮した。

離が 55mm に到達したと予測した時点（供用 24 年目）の海中における鋼矢板の腐食量の予測結果を図-6.8 および図-6.9 に示す。ここで、継手周辺の腐食量の分布については図-4.21 および図-4.22 を用い、錆進入距離については式(4.5)を用いた。なお、干満帯の腐食速度は 0.3mm/年を、背面土中部の腐食速度は 0.02mm/年を用いた。干満帯の場合、減肉量の最大値は、海側、陸側の腐食量を合わせると 5.6mm 程度となる。継手かん合部付近の局所的な腐食であるが、この腐食量は非常に大きく、P-10H 型で 50%程度、SP-25H 型で 40%程度の減肉となる。

局所的な腐食が構造性能に与える影響は、十分に分かっておらず、現状では平均肉厚を用いて耐力推定されることになる。しかし、構造物の使用性、安全性を考えた場合には、局所的な肉厚の減少は、最終的には、時間の経過とともに貫通孔が発生し、背面土砂の流出による上部工の破壊が生じる可能性もある。重防食被覆端部の劣化進展距離が 55mm に到達した年数として仮定した 24 年時点では、およそ半分程度の減肉となると予想されるが、環境によっては、集中腐食等も考えられるため、注意が必要であると考えられる。

ハット形鋼矢板で形成した鋼矢板壁について、重防食被覆端部の劣化進展距離が 55mm に到達した時点の断面性能の低下率の推定結果を表-6.3 に示す。なお、環境は全く異なるが、参考値として海底土中部における無防食鋼矢板の断面性能の低下率も併せて示す。ここで、海底土中部の腐食速度を 0.03mm/年と設定し、背面土中部の腐食速度を 0.02mm/年として、重防食被覆端部の劣化進展距離が 55mm に到達した年数として予測した 24 年分の腐食量を算出し腐食量とした。

重防食鋼矢板における継手かん合部および背面土中部鋼材の腐食が構造性能に及ぼす影響は、矢板の形式により若干違いがあるが、本モデルを適用した場合には、重防食被覆端部の劣化進展距離が 55mm に到達した時点における断面性能は初期性能の約 10%程度低減すると推察される。これは、無防食鋼矢板の海底土中部における断面性能低下率と同程度となる。したがって、端部シール部（図-6.2 中の区間 B）において局所的な腐食が生じる重防食鋼矢板の干満帯および飛沫帯ではあるが、中立軸は若干変化すると考えられるが、構造的な性能低下は海底土中部の場合と同程度になると言える。いずれにしても、構造性能の低下率は海水中の結果より明らかに大きくなるのが分かる。矢板式構造の場合、飛沫帯および干満帯に作用する断面力は比較的小さいと予想されるが、構造物の安全性を考慮す

ると、干満帯から飛沫帯の維持管理が重要であることが伺える。

維持管理にあたっては、孔食や集中腐食の発生に十分に留意するとともに、適切な補修を施し、極端な減肉を抑えることが必要と考えられる。また、ハット形重防食鋼矢板の場合、本検討結果では、継手部周辺の腐食が最大になると予測された。したがって、点検時において、一般定期点検診断であれば目視および打音調査などにより、また、詳細定期点検診断では肉厚測定などによって、特に厳しい部位となる干満帯および飛沫帯における継手部周辺を中心に点検し、残存性能評価や将来予測を行う必要があると思われる。

7. ハット形重防食鋼矢板の維持管理方法に関する一考察

7.1 ハット形重防食鋼矢板の性能低下曲線

防食工法に要求される性能は、構造物の種類や防食工法の種類などにより異なると考えられる。完全防食を考えた場合、理想としては腐食が発生した時点（構造性能の低下が始まった時点）が性能の限界であると

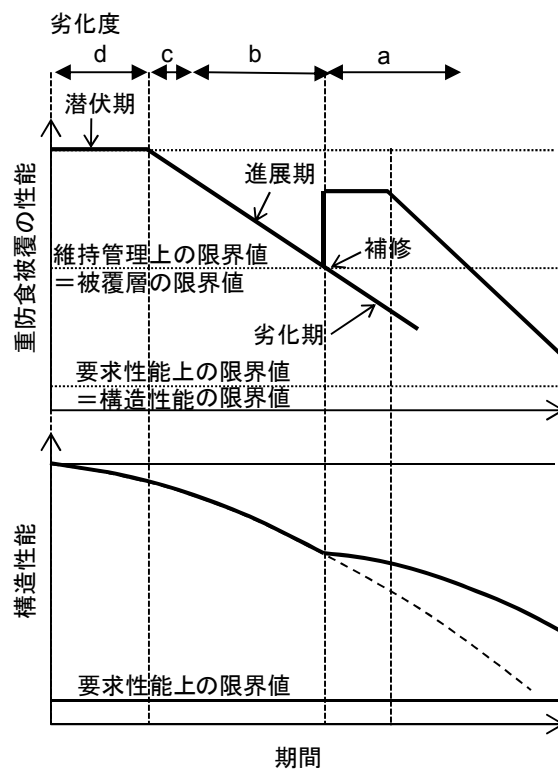


図-7.1 ハット重防食鋼矢板の性能低下曲線の模式図

考えることができる。ただし、港湾環境は特に厳しい環境であり、現状の港湾鋼構造物に適用される防食技術では、ある程度腐食を許容した維持管理手法が効率的であると思われる。

図-7.1 にハット形重防食鋼矢板の想定される性能低下曲線を示す。重防食被覆部は、潜伏期間には背面土中部側の鋼材の腐食のみで、海側は腐食しないと考えてよいと思われる。進展期以降に関しては、錆侵入距離が供用年数に比例して進展するとともに腐食量も供用年数に比例して増加するため、部材の断面性能は、供用年数の二乗で減少していくことになる。社会資本施設整備では、供用期間中において要求性能（ここでは、構造性能の限界値）を常に満足させなければならない。被覆防食の劣化に伴う構造性能低下を十分に把握した上で、被覆防食工法を適切に維持管理する必要がある。

検討では、重防食被覆端部の剥離進展距離が 55mm に達した段階で、重防食被覆工法の維持管理上の限界値と設定した。これは、既往の研究成果によるものであるが、重防食層の急激な劣化進展が起きない範囲と考えられる。このときの構造性能の低下率は、6 章で示したように、海中部で 5%程度、飛沫帯および干満帯で 10%程度となることが予想されるため、適切な対策を施し、施設の長寿命化を図る必要がある。そのためには、定期的な点検診断を行い、残存性能を定量的に評価する必要がある。

7.2 ハット形重防食鋼矢板の点検・診断

(1) 点検診断項目と点検・調査方法

ハット形重防食鋼矢板においても、その他の重防食被覆と同様な方法で、点検診断が可能であると考えられる。

ただし、疵部からの劣化進展は、海洋環境下の鋼材の深さ方向の腐食傾向に依存することが予想され、海中部は小さく、干満帯、飛沫帯で大きくなる傾向にある。また、供用期間中に生じる船舶または漂流物等の衝突による疵の発生は、干満帯および飛沫帯に多く発生すると予想される。飛沫帯は比較的簡易に目視で点検できる部位であり、日常点検、一般定期点検診断等での調査が可能であると考えられる。飛沫帯における重防食被覆の表面損傷、被覆の剥離、被覆の膨れ、被覆の割れ等の疵部を目視点検していくことは、重防食鋼矢板を維持管理していく上で非常に重要であると考えられる。ここでは、目視点検で評価可能な劣化度判定基準について、ハット形重防食鋼矢板の特徴を踏ま

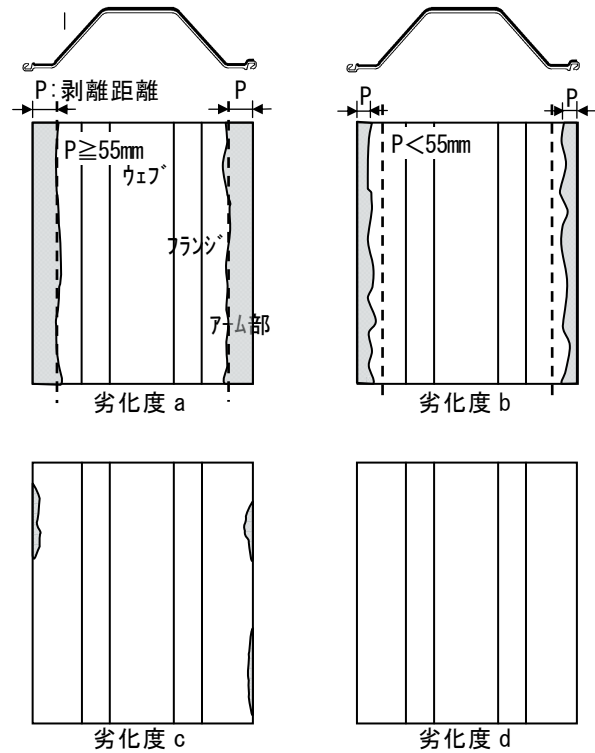


図-7.2 継手かん合部からの接着性低下進行に着目したハット形重防食鋼矢板の劣化度（案）

表-7.1 継手かん合部からの劣化進展に着目したハット形重防食鋼矢板の劣化度判定（案）

劣化度	点検・調査結果	防食性能の評価
a	継手かん合部の被覆端面からの重防食層の劣化進展距離が 55mm 以上となり、その剥離部で鋼材が著しく腐食している状態	防食性能が著しく低下している状態
b	継手かん合部の被覆端面からの劣化進展距離が 55mm 以内の剥離が生じ、剥離部で鋼材の腐食が認められる状態	防食性能が低下している状態
c	端部シール材の劣化が進み、継手かん合部の被覆端面からの重防食層の剥離が部分的な範囲で生じている状態	防食性能の低下は非常に小さいが、変状が発生している状態
d	初期状態とほとんど変化がなく、健全な状態	ほとんど変状が認められない状態

注：港湾鋼構造物防食・補修マニュアルに示されている劣化度判定例を基に、本研究結果よりゴシックで示した内容を追加した。

表-7.2 被覆部の疵に着目したハット形重防食鋼矢板の劣化度判定（案）

劣化度	点検・調査結果	防食性能の評価
a	重防食被覆層に鋼面まで達するすり疵、あて疵、はがれ、割れ等があり、疵部の鋼材が腐食している状態	防食性能が著しく低下している状態
b	重防食被覆層に鋼面まで達するすり疵、あて疵、はがれ、割れ等があり、疵部の一部に軽微な腐食がある状態	防食性能が低下している状態
c	重防食被覆層に鋼面まで達していない浅いすり疵、あて疵、割れ等が点在しているが、疵部の鋼材は腐食していない状態	防食性能の低下はないが、変状が発生している状態
d	初期状態とほとんど変化がなく、健全な状態	ほとんど変状が認められない状態

注：港湾鋼構造物防食・補修マニュアルに示されている劣化度判定例を基に、本研究結果よりゴシックで示した内容を追加した。

えた劣化度判定基準（案）を提案することを目的とする。また、ハット形重防食鋼矢板の維持管理手順例および対策例についても示す。

(2) 点検診断結果に基づく劣化度判定

6章および参考文献¹⁰⁾を踏まえた継手かん合部の被覆端部からの剥離に着目した劣化度判定（案）を表-7.1 および図-7.2 に示す。重防食被覆の劣化度 a~d の防食性能の評価は参考文献²⁾を基本とした。被覆端部は継手かん合部の他に、被覆下端部もあるが、この部分の被覆層の剥離による劣化進展については、海中部にあることから、一般には電気防食が併用されているため、剥離後の鋼材の腐食は、電気防食の防食効果によって極めて小さいと考えられる。一方、継手部の被覆端部は飛沫帯等の厳しい腐食環境にある。そこで、目視等による点検結果に伴う劣化度判定を劣化進展距離で設定し、表-7.1 のようにまとめた。

また、施工時の重機やワイヤあるいは供用時の船舶や漂流物の衝突等による物理的外力での損耗・剥離がハット形重防食鋼矢板の劣化要因となることも十分に考えられる。このような偶発的な劣化損傷が耐久性に大きな影響を及ぼすため、目視による疵部調査は重要な点検項目となる。被覆面の疵部に着目した劣化度

表-7.3 現地補修部の劣化に着目したハット形重防食鋼矢板の劣化度判定（案）

劣化度	点検・調査結果	防食性能の評価
a	現地補修部の劣化または剥離が著しく、補修部で鋼材が腐食している状態（再劣化）	防食性能が著しく低下している状態
b	現地補修部に部分的な劣化または剥離が生じ、補修部分の一部で鋼材軽微な腐食が認められる状態	防食性能が低下している状態
c	補修部の膨れ等の接着劣化が生じているが、剥離までには至っておらず、鋼材の腐食が認められない状態	防食性能の低下はないが、変状が発生している状態
d	初期状態とほとんど変化がなく、健全な状態	ほとんど変状が認められない状態

注：港湾鋼構造物防食・補修マニュアルに示されている劣化度判定例を基に、本研究結果よりゴシックで示した内容を追加した。

判定（案）を表-7.2 に示す。偶発的な劣化損傷は、飛沫帯や干満帯に生じる可能性が高いと考えられる。疵部の劣化進展速度は、被覆端部からの劣化進展速度と同程度であると考えられるが、その発生時期を正確に把握できないことや、損傷が小さな場合は劣化進展距離を把握することが難しいと考えられる。したがって、腐食が発生した時点で、対策の検討が必要になると考えられる劣化度 b または劣化度 a とした。ただし、疵部の劣化度判定に関しては、局所的な劣化の状態を判定するもので、部材全体の防食の性能を評価するものでないことを付記する。

また、部分的な重防食層の劣化について、重食被覆の疵部における現地補修部の劣化が非常に速いことも知られている²⁾。そこで、本研究の検討外の範囲であるが、現地補修部に着目した想定される劣化度判定（案）を表-7.3 に示す。

7.3 補修対策

ここでは、維持管理レベルⅡを前提としたハット形重防食鋼矢板の維持管理の考え方について述べる。なお、維持管理レベルⅡとは、維持管理段階において予防保全的な対策を実施することを設計時点から計画し

ておくことで、維持管理上の限界状態に至る前に維持補修が行えるよう配慮された維持管理レベル³⁾である。

7.2 に示した劣化度判定（案）に対応した対策の例について、表-7.4 に示す。また、ハット形重防食鋼矢板の維持管理の手順の例を図-7.3 に示す。ハット形重防食鋼矢板の劣化部は、重防食層の剥離や錆汁の発生など外観の変状を確認することで評価できると考えられる。また、飛沫帯および海上大気中の劣化進展距離についても、目視または打音検査等を実施することで判定できると考えられる。これらを劣化度判定により被覆防食の性能を評価するとともに、式(7.1)に示す寿命予測式により将来予測も可能になると思われる。

$$t = T_1 + \frac{W}{v} \quad (7.1)$$

ここに、

t : 劣化度 a に達するまでの時間（年）

T_1 : 潜伏期間（劣化（剥離）進展が始まるまでの期間）（年）

W : 劣化度 a に達する時の劣化進展距離（mm）

v : 重防食層の劣化進展速度（mm/年）

ハット形重防食鋼矢板の補修・補強対策については、本研究では検討できていないため、評価することができない。ここでは、現状技術で考えられる補修工法について、参考として参考文献2)の方法を示す。被覆部の部分補修および全面補修に関しては、表-7.5 に示す方法が示されている。重防食被覆工法は、工場製品であり、現場での被覆は極めて難しい。したがって、補修用ポリウレタンを用いる方法以外に関しては、現地施工が可能であり、また、港湾鋼構造物の防食工法として確立されているものが適用されている。補強に関しては、鉄筋コンクリートを用いる方法および鋼板を用いる方法がある。いずれも、参考文献2)にしたがって設計できる。

表-7.4 ハット重防食鋼矢板の劣化度判定に対応した対策の例

劣化度	対策の例
a	重防食被覆の全面的な補修、または、継手かん合部および疵部等周辺の補修を実施する必要がある。特に、鋼材腐食が著しい場合は、鋼矢板部材の補強あるいは鋼矢板壁の更新等を実施する必要がある。
b	劣化した箇所に対する部分的な補修を実施し、詳細臨時点検の実施、または、以降の定期点検診断時期を早める等の配慮が必要である。
c	特に補修の必要はないが、以降の定期点検診断時期を早める等の配慮が望まれる。
d	従来どおりの定期点検診断を継続する。

表-7.5 ハット重防食鋼矢板の補修区分および方法の例

環境 \ 区分	部分補修	全面補修
海上大気中	<ul style="list-style-type: none"> 補修用ポリウレタンを用いる方法 水中硬化形被覆 	<ul style="list-style-type: none"> 補修用ポリウレタンを用いる方法 水中硬化形被覆 ペトロラタム被覆 モルタル被覆
飛沫帯 干満帯	<ul style="list-style-type: none"> 水中硬化形被覆 ペトロラタム被覆 	<ul style="list-style-type: none"> 水中硬化形被覆 ペトロラタム被覆 モルタル被覆
海水中		

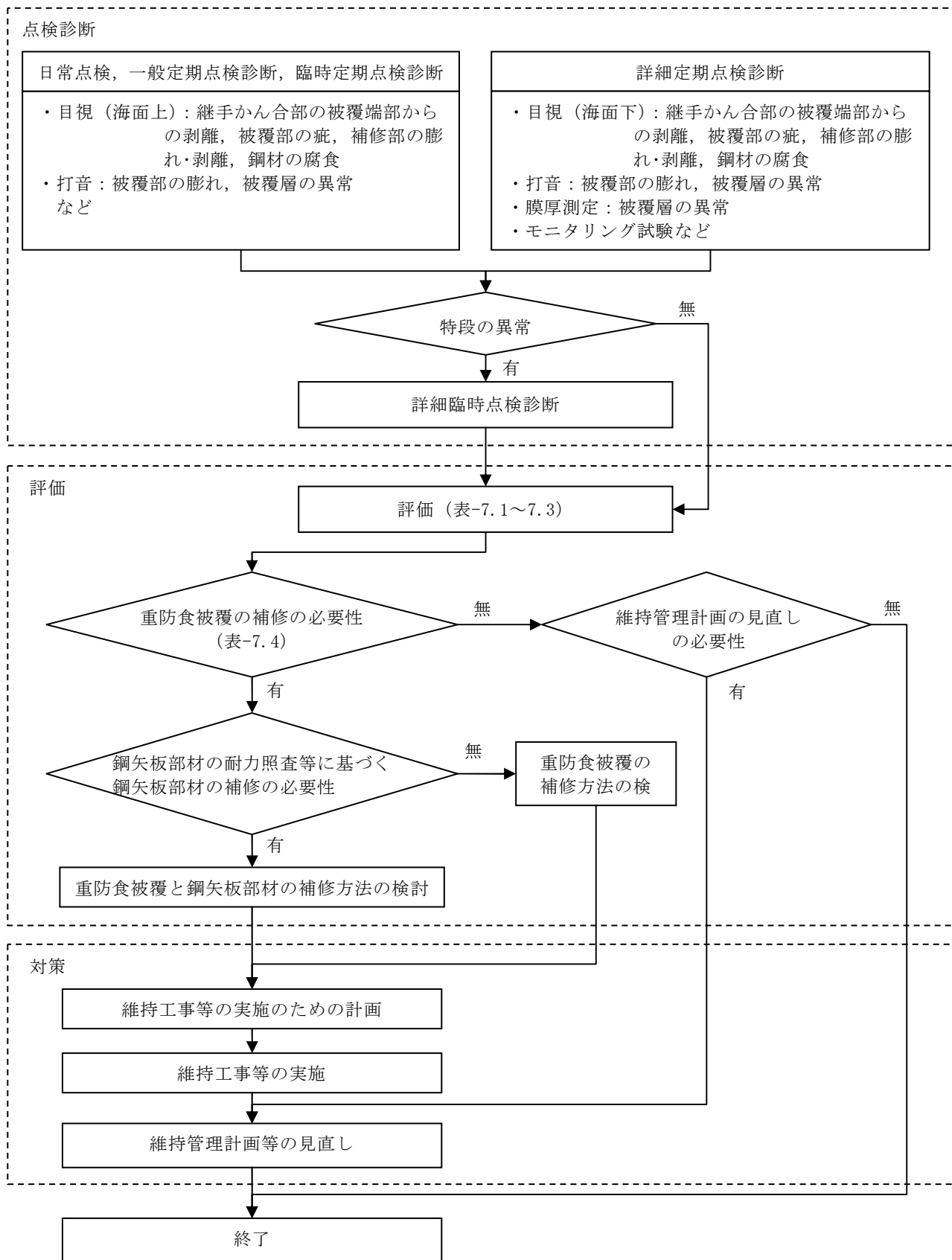


図-7.3 ハット形重防食鋼矢板に対する維持管理の手順の例

8. 結論

本研究は、ハット形鋼矢板に重防食被覆工法を適用した場合の鋼材の防食および被覆部の耐久性について評価し、適切な維持管理手法も併せて提示することで、効率的な港湾の施設整備に資することを目的に検討を行った。本研究で得られた結果を以下に示す。

- (1) 重防食被覆工法を鋼矢板に適用した場合の防食工法の耐用年数は、式(8.1)で予測することができると考えられる。

$$t = T_i + \frac{W}{v} \quad (8.1)$$

ここで、

t : 重防食被覆の耐用年数 (年). 劣化度 a と判定されるまでの期間である。

T_i : 潜伏期間 (年). 劣化の進展が始まるまでの期間である。

W : 劣化度 a と判定される劣化進展距離 (mm).

v : 重防食層の劣化進展速度 (mm/年)

空気吹込み式塩水浸漬試験及び短期間の海水シャワー暴露試験等の限られた試験・調査結果からではあるが、港湾環境下における重防食層の劣化進展速度は 3.2mm/年となり、その結果を用いれば、ウレタンエラストマー被覆防食の性能低下曲線は **図-8.1** のように示すことができる。既往の実構造物調査結果から潜伏期間は 7 年と想定され、劣化度 a となる継手かん合部の劣化進展距離は、重防食層の急激な劣化進展が起きない範囲として 55mm が閾値と考えられる。

これらの予測値を用いることで、ハット形重防食鋼矢板の期待耐用年数は約 24 年と予測される。それに対し、従来から用いられている U 形重防食鋼矢板の期待耐用年数は 20 年程度と考えられていることから、ハット形重防食鋼矢板の耐久性は U 形重防食鋼矢板と同等またはそれ以上と推察される。

- (2) 施工時の重機やワイヤによる疵等の損傷、あるいは供用期間中に起こる船舶や漂流物などの衝突等による損傷によって生じる重防食被覆面の被覆損傷部の劣化進展は、被覆端部の劣化進展と同程度かそれ以上の速度で進行することが予想される。また、疵部の腐食速度は、裸鋼材の腐食傾向に依存すると考えられる。U 形鋼矢板、ハット形鋼矢

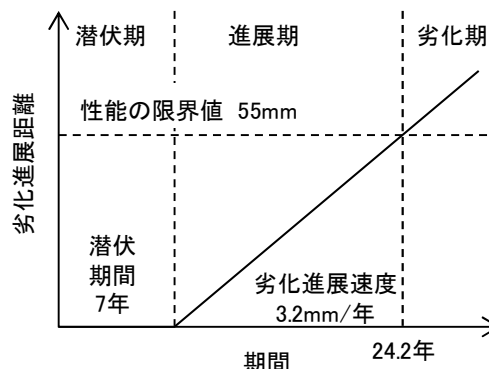


図-8.1 重防食鋼矢板の性能低下曲線
(ウレタンエラストマー被覆の場合)

板を問わず、特に厳しい環境となる飛沫帯や干満帯に重点を置き、速やかに補修等の対策を施すことで、適切な維持管理が可能になると考えられる。

- (3) U 形鋼矢板の継手部は中立軸に位置するため、重防食被覆が劣化し腐食が進展しても矢板壁の断面性能に及ぼす影響は小さい。しかし、ハット形鋼矢板は、継手が矢板壁の外縁に位置するため、重防食被覆が劣化し腐食が進展した場合には矢板壁の断面性能が低下する。鋼材の腐食速度を港湾における標準値と仮定し、本検討で得られた劣化進展モデルを用いて予測した断面性能は、重防食層被覆端部の劣化進展距離が 55mm に達した時点において、海中では 5%程度、干満帯・飛沫帯では 10%程度減少すると予想された。

また、断面性能の低下は、重防食被覆端部から重防食層内部に進行する腐食に伴う部材断面積の減少は時間の 2 乗に比例するため、適切な時期に補修を行い、劣化の進展を抑制させることが必要であると考えられる。

- (4) ハット形重防食鋼矢板の維持管理時における一般定期点検の劣化度判定では劣化度 a と判定される劣化進展距離を 55mm として、劣化度判定 (案) を提案した (表-7.1, 表-7.2, 表-7.3)。これは、構造的な性能上の要求される性能の限界値と異なり、防食性能の限界値である。これにより、構造的な性能低下と合わせた維持管理計画の策定が可能になり、戦略的な維持管理に貢献できるものと考えられる。

9. あとがき

ハット形重防食鋼矢板について、過去のU形重防食鋼矢板に関する研究成果と対比しながら、空気吹込み塩水浸漬試験、海水シャワー暴露試験の結果に基づいて被覆端部および疵部からの被覆材の劣化進展ならびに鋼材腐食について評価を行った。さらに、供用時の構造性能に与える影響が限定的であることを把握した上で、具体的な点検・診断方法を含む維持管理方法を提案した。今後は、実海域暴露データ、実工事に供用された重防食鋼矢板の点検・診断結果等を蓄積していくことにより、耐久性評価や点検後の防食性能や余寿命評価等に反映させ、より精度の高いライフサイクルマネジメントに基づく維持管理手法の確立が必要であると考え。

(2010年8月13日受付)

謝辞

本研究は、平成19年4月から平成22年9月まで実施された一般社団法人 鋼管杭・鋼矢板技術協会との共同研究「ハット形鋼管矢板の重防食被覆の耐久性評価に関する研究」の成果の一部である。ここに付記する。

一般社団法人 鋼管杭・鋼矢板技術協会の喜田浩氏、元一般社団法人 鋼管杭・鋼矢板技術協会の辻本和仁氏および釣之郎氏の各氏をはじめ、本研究の実施にあたり、ご協力いただいた方々に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 国土交通省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説，(社)日本港湾協会，2007.7
- 2) (財)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.35，2009.11
- 3) (独)港湾空港技術研究所編著：港湾の施設の維持管理技術マニュアル，(財)沿岸技術研究センター，沿岸技術ライブラリー，No.26，2007.10
- 4) 鋼管杭協会：防食鋼管杭の開発とその海洋暴露試験報告書，1993.3
- 5) 建設省土木研究所施設 材料化学研究室 他：外洋に20年間暴露した防食鋼管杭の耐食性試験報告書，土木研究所資料，第3687号，2000.1
- 6) 鋼管杭協会：熱帯海域における鋼材と防食鋼材の暴露試験-暴露10年間の結果報告-，1997.1
- 7) (独)港湾空港技術研究所 他：鋼管杭の防食法に関する研究 20年の長期暴露試験総括報告書，2006.3
- 8) (独)土木研究所 他：海洋鋼構造物の耐久性向上技術に関する共同研究報告書，共同研究報告書，第354号，2007.1
- 9) 原田佳幸，阿部正美，福手勤，濱田秀則，是永正，江田和彦，岩倉肇，元木卓也，佐藤一昌：重防食鋼矢板における被覆材の接着耐久性に関する研究，港湾技研資料，No.984，2001.3
- 10) (財)沿岸開発技術研究センター：港湾構造物の維持・補修マニュアル，pp.71-73，1999.6
- 11) 土木学会：海洋環境における鋼構造物の耐久・耐荷性能評価ガイドライン，2009.3
- 12) 鋼管杭協会：重防食鋼矢板の各種補修方法の5年目調査結果，2005年
- 13) 鋼管杭協会：重防食鋼矢板製品仕様書，改訂4版，2001.9
- 14) 岩崎直晃，長尾毅：矢板式係船岸の構造諸元などに関する統計的解析，港湾技研資料，No.780，1994

港湾空港技術研究所資料 No.1230

2011.3

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社シーケン

Copyright © (2011) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。



古紙配合率70%再生紙を使用しています