

# 港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE  
OF  
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

**No.1369** March 2020

海洋鋼構造物の集中腐食および電気防食に関する最近の知見

山路 徹・田土 弘人・川瀬 義行・小林 厚史・吉田 倫夫

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所

National Institute of Maritime,  
Port and Aviation Technology, Japan

## 目 次

要 旨 .....	3
1. はじめに .....	4
2. 港湾鋼構造物における集中腐食メカニズムの検証 .....	5
2.1 概要 .....	5
2.2 M. L. W. L. 付近における集中腐食の実態およびメカニズムの検証 .....	5
2.3 鋼材とコンクリート境界部での集中腐食（地際腐食） .....	13
2.4 まとめ .....	15
3. 海中部における電気防食の効果に関する検証 .....	17
3.1 序論 .....	17
3.2 長期にわたる電気防食特性の経時変化例 .....	19
3.3 テストピースによる電気防食の効果に関する検証 .....	21
3.4 実港湾構造物における電気防食の効果の評価 .....	27
3.5 まとめ .....	30
4. 干満帯付近における電気防食の効果に関する検証 .....	32
4.1 概要 .....	32
4.2 実構造物調査による検証 .....	32
4.3 実環境暴露試験による検証 .....	35
4.4 屋外暴露水槽での暴露試験による検証 .....	37
4.5 まとめ .....	40
5. 港湾鋼構造物における電気防食の点検診断に関する検討 .....	42
5.1 概要 .....	42
5.2 調査概要 .....	44
5.3 結果および考察 .....	44
5.4 まとめ .....	47
6. おわりに .....	50
付録	
付録A 肉厚測定時の素地面調整における削りしろの検証実験	
付録B 干満部に位置する鋼材に流出入する電流密度の時間変化（屋外暴露水槽での試験結果）	

## **Recent findings in concentrated corrosion and cathodic protection in marine steel structures**

**Toru YAMAJI\***

**Hiroto TADO\*\***

**Yoshiyuki KAWASE\*\*\***

**Atsushi KOBAYASHI\*\*\***

**Michio YOSHIDA\*\*\***

### **Synopsis**

It is a well-known fact that, in a vertically continuous harbor steel structure, concentrated corrosion occurs near the Mean Low Water Level (M.L.W.L.). In order to prevent this concentrated corrosion, the application of protective coating to parts above L.W.L.-1m, and the application of cathodic protection to parts below M.L.W.L. has been standard in Japan since 1999.

With regard to cathodic protection in the immersed zone, it is highly reliable and widely used. The standard of "corrosion protection efficiency" used in design is 90% in Japan, but this value is set on the safe side in consideration of various conditions. It is empirically known that it is higher than 90%, but the actual situation is not clear. In addition, due to the type of structure and construction conditions at the site, it may be necessary to consider changing the bottom depth of protective coating for steel structures. However, it may be difficult to determine the change of the bottom depth for the following reasons. 1) The standard is to apply protective coating to the area above L.W.L.-1m. 2) There are few reports on the actual state of cathodic protection around L.W.L. 3) The mechanism of concentrated corrosion is not clear.

Based on the above-mentioned issues, in this text, the following items were verified based on actual structure surveys and exposure tests. 1) Concentrated corrosion mechanism, 2) Effect of cathodic protection in the immersed zone and the tidal zone.

The results obtained from this study are shown below.

1) From the exposure test, it was confirmed that rust generated in the tidal zone contributed to the progress of concentrated corrosion just below the L.W.L. 2) From the results of the test piece, it was confirmed that corrosion protection efficiency in the immersed zone was higher than 90%. In addition, it was found that "corrosion rate during cathodic protection" may be more appropriate as an index for the effect of cathodic protection. 3) According to the survey in the two actual sea areas, the effect of cathodic protection was sufficiently exhibited even in the tidal zone when the immersion rate was about 80% or more.

**Key Words:** Marine environment, steel structures, concentrated corrosion, cathodic protection

---

\* Head, Materials Group, Structural Division  
\*\* Trainee, Materials Group, Structural Division  
\*\*\* Japan Association of Cathodic Protection  
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan  
Phone : +81-46-844-5013 Fax : +81-46-844-0255 e-mail:yamaji-t@p.mpat.go.jp

# 海洋鋼構造物の集中腐食および電気防食に関する最近の知見

山路 徹\*・田土 弘人\*\*・川瀬 義行\*\*\*・小林 厚史\*\*\*・吉田 倫夫\*\*\*

## 要 旨

鉛直に連続している港湾鋼構造物（鋼矢板、鋼管杭など）において、平均干潮面(M.L.W.L.)直下付近に集中腐食が生じることは広く知られた事実である。この集中腐食を防ぐため、「港湾の施設の技術上の基準・同解説（以下、技術基準）」では、1999年の技術基準改訂時に、L.W.L.-1m以上には被覆防食、M.L.W.L.以下には電気防食の適用が標準となった。

電気防食（流電陽極方式に限定）について、防食設計で用いられる「防食率」については、技術基準においては90%が標準となっているが、この値は諸条件（実鋼構造物に流電陽極が水中溶接されるまでの無防食期間等）を考慮し、安全側に設定されたものである。適切な設計・施工・維持管理がなされた条件下においては、90%より高いことが経験的に知られているが、その実態は明確ではない。また、現地での施工条件や構造形式の都合上、鋼構造物の被覆防食の下限深度の変更（L.W.L.-1mより引き上げ）を検討する場合もある。しかし、1) 技術基準でL.W.L.-1m以上に被覆防食の適用が標準となっている、2) 干満帯付近での電気防食効果の実態についての報告例が少ない、3) 集中腐食のメカニズムが明確でない、等の理由から、下限深度の変更の判断が難しい場合もある。

上述の課題を踏まえ、本文では、1) 海洋構造物での集中腐食メカニズム、2) 海中部での電気防食効果（防食率等）、3) 干満帯付近における電気防食効果に関して、実構造物調査や暴露試験に基づいた検証を行った。また、電気防食が適用された海洋鋼構造物の維持管理の高度化（省力化）を目的として、4) 電気防食の点検診断手法についても検討を行った。

本検討より得られた成果を以下に示す。

- 1) 暴露試験より、M.L.W.L.直下付近の集中腐食に干満部のさびが寄与していることが確認された。
- 2) テストピースでの調査結果より、海中部での防食率は90%よりも高いことが確認された。また、電気防食効果に関する指標として、「防食時の腐食速度」の方がより適切である可能性を見出した。
- 3) 2つの実海域での調査結果において、干満帯においても浸漬率80%程度以上の場合、電気防食の効果は十分に発揮されていた。
- 4) 過去の調査結果等により、実構造物での電位測定を基に、流電陽極の寿命が設計耐用年数以上であることを推定できる可能性が示された。

キーワード：海洋環境、鋼構造物、集中腐食、電気防食、干満帯

---

\* 構造研究領域 材料研究グループ長

\*\* 構造研究領域 材料研究グループ 依頼研修員

\*\*\* 電気防食工業会

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所  
電話：046-844-5013 Fax：046-844-0255 e-mail: yamaji-t@p.mpat.go.jp

## 1. はじめに

鉛直に連続している港湾鋼構造物（鋼矢板、鋼管杭など）において、平均干潮面(M.L.W.L.)直下付近に図-1.1のような集中腐食が生じることは広く知られた事実である。この集中腐食を防ぐため、「港湾の施設の技術上の基準・同解説（以下、技術基準）」では、1999年の技術基準改訂時に、L.W.L.-1(m)以上には被覆防食（L.W.L.：さく望平均干潮面）、M.L.W.L.以下には電気防食の適用が標準となった（図-1.2 参照）。ここで、M.L.W.L.付近で電気防食と被覆防食が併用されている理由は、この箇所において集中腐食が生じる危険性があるためである。しかし、集中腐食の発生メカニズムについては未だに明確でない。このメカニズムが明確になることで、鋼構造物の腐食に対して、より合理的な対応をとることが可能になると考えられる。

電気防食（流電陽極方式に限定）について、特に海中部への適用に関しては、信頼性が高く、広く普及している。防食設計で用いられる「防食率」については、技術基準においては90%が標準となっているが、この値は諸条件（実鋼構造物に流電陽極が水中溶接されるまでの無防食期間等）を考慮し、安全側に設定されたものである（詳しくは第3章で述べる）。適切な設計・施工・維持管理がなされた条件下においては、90%より高いことが経験的に知られているが、その実態は明確ではない。

また、現地での施工条件や構造形式の都合上、鋼構造物の被覆防食の下限深度の変更（L.W.L.-1(m)より引き上げ）を検討する場合もある。しかし、1) 技術基準でL.W.L.-1(m)以上に被覆防食の適用が標準となっている、2) L.W.L.付近での電気防食効果の実態についての報告例が少ない、3) 集中腐食のメカニズムが明確でない、などの理由から、下限深度の変更の判断が難しい場合もある。

上述の課題を踏まえ、本文では、以下の3つについて、実構造物調査や暴露試験に基づいた検証を行った。

- 1) 港湾鋼構造物での集中腐食メカニズムの検証(第2章)
- 2) 海中部での電気防食効果（防食率等）の検証(第3章)
- 3) 干満帯（主にL.W.L.付近）における電気防食効果の検証(第4章)

また、港湾鋼構造物における電気防食の点検診断において、一般定期点検診断（3～5年に1回が標準）としては目視による劣化度の判定が困難なため、電位測定を行い、劣化度の判定が行われる。そして、詳細定期点検診断（必要に応じて実施）として、陽極消耗量を測定し、完全消耗する時期を予測し、更新が行われる場合もある。電位測定は簡便である一方で、将来予測に現状では用い



図-1.1 M.L.W.L.直下付近の集中腐食  
(鋼管杭の場合)

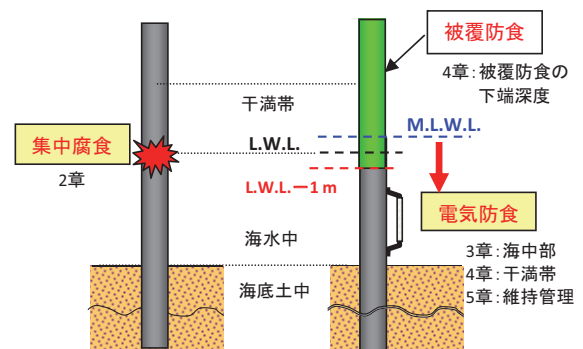


図-1.2 防食工法の適用範囲  
および本文での検討対象

られない。一方、陽極消耗量の測定には潜水士が必要であり、かつ測定精度は必ずしも高くはない。ここで、電位と陽極発生電流の間にはある程度の相関がある。すなわち、電位の測定値からある程度の精度で陽極の残存寿命が評価できる可能性もある。そこで、既往の知見や追加調査結果を基に、電位と陽極発生電流の相関を把握した(第5章)。

## 2. 港湾鋼構造物における集中腐食メカニズムの検証

### 2.1 概要

鉛直に連続している港湾鋼構造物（鋼矢板、鋼管杭など）において、M.L.W.L.直下付近に集中腐食が生じることは広く知られた事実である。一方で、この集中腐食に及ぼす影響要因は多岐にわたっており、そのメカニズムについては未だに明確でない。このメカニズムが明確になることで、鋼構造物の腐食に対して、より合理的な対応がとられるようになると考えられる。例えば、集中腐食が生じない可能性が高い箇所については、被覆防食の適用範囲を削減する、あるいは被覆防食を適用しない、といった対応が考えられる。これにより、大幅なコスト削減が期待できる。本章の2.2では、既往の知見の整理を行い、改めて港湾構造物における集中腐食メカニズムの検証を試みる。

また、鋼材（例えば鋼管杭）がコンクリート内に埋設されている場合、その境界部において集中的に腐食が進行する場合もある。この腐食は一般に「地際腐食」と呼ばれる。しかし、港湾鋼構造物の場合の実態は明確ではない。2.3では波崎観測栈橋での調査結果を報告する。

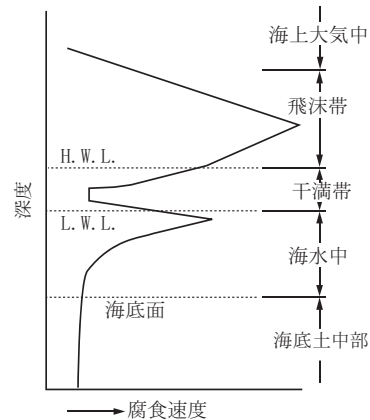
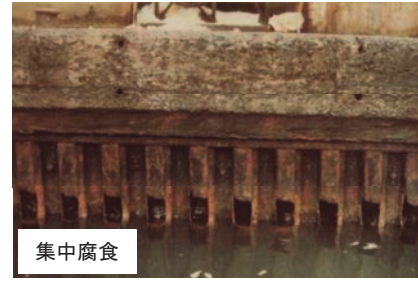


図-2.1 無防食鋼構造物における集中腐食例および腐食傾向の一例<sup>2)</sup>

### 2.2 M.L.W.L. 付近における集中腐食の実態およびメカニズムの検証

#### 2.2.1 概要

港湾空港技術研究所では、過去に全国の鋼構造物の腐食実態調査を行い、M.L.W.L.付近における集中腐食の実態およびその要因についての整理を行っている<sup>1)</sup>。本節2.2では、上記の結果を説明しつつ、集中腐食メカニズムの検証を試みる。

#### 2.2.2 M.L.W.L. 付近における集中腐食の実態

海洋環境下に位置する無防食鋼材は、図-2.1のような集中腐食を起こすことが知られている。この集中腐食が起こる場所は、M.L.W.L.（平均干潮面）直下付近であることが多く、集中腐食が生じた箇所の腐食速度は、激しい場合では1 mm/年を超えた事例も報告されている。その一方で、構造形式や環境条件によっては、このような集中腐食は起こらず、比較的均一に進行する場合もある。全国各地の港湾鋼構造物の調査結果<sup>3)</sup>によると、鋼構造物（杭・矢板）の腐食パターンは図-2.2に示す3通りに分類される。パターンごとの事例を数例ずつ以下に示す。

##### a) パターン a：集中腐食の進行が顕著な事例

顕著な集中腐食の傾向がみられた一例を図-2.3に示

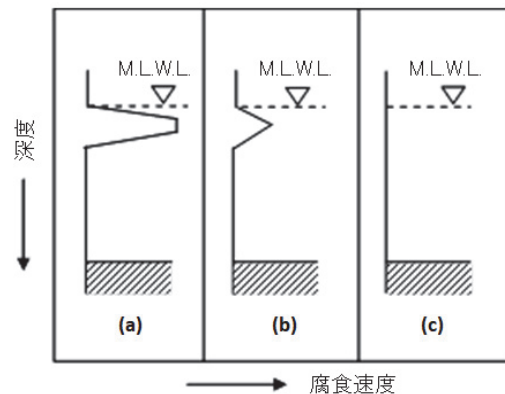


図-2.2 鋼構造物の代表的な腐食パターン<sup>3)</sup>

す。この場合、最大で0.5mm/年程度の大きな腐食速度を示している。なお、干満部の被覆下端がM.S.L.（平均水面）より上の場合、河川水の混入がある場合の例である。

##### b) パターン b：集中腐食の進行が顕著でない事例

集中腐食の進行が顕著でない一例を図-2.4に示す。腐食速度は0.2~0.3mm/年程度であり、aほど大きくはない。なお、いずれも被覆下端深度が比較的深く、河川水の混入がない場合とある場合の例である。

##### c) パターン(c)：集中腐食の進行が見られない事例

集中腐食の進行が見られない一例を図-2.5に示す。腐食の進行は一様で、腐食速度は0.1mm/年程度であった。

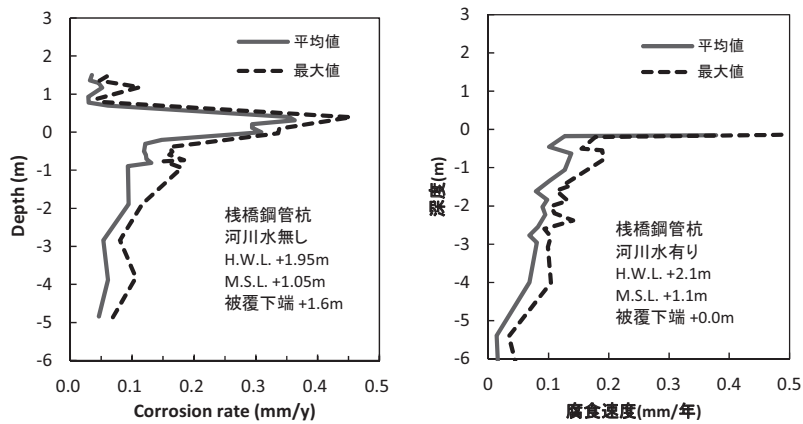


図-2.3 腐食パターン a の例<sup>3)</sup>

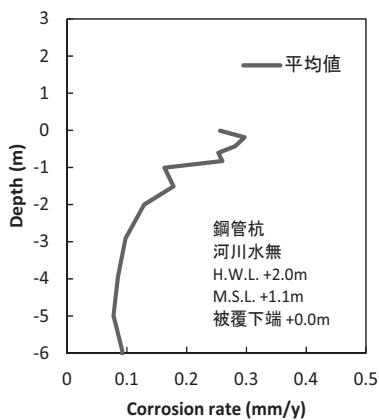


図-2.4 腐食パターン b の例<sup>3)</sup>

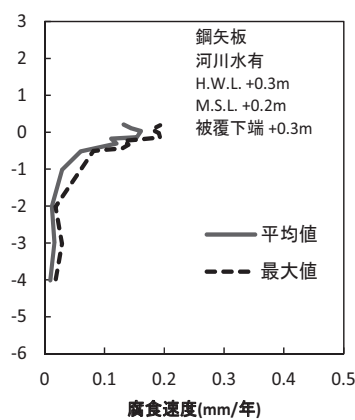


図-2.5 腐食パターン c の例<sup>3)</sup>

2.2.3 M.L.W.L. 付近の集中腐食メカニズムに関する  
既往の知見

2.2.2 で説明した全国調査結果を基に、様々な観点で要因分析を行い、集中腐食に影響を及ぼす主な要因として、以下の項目が挙げられている。ただし、要因の特定には至っていない。

- a) 河川水の流入
- b) 干満部の状態 (干満差の大小, 被覆の有無など)
- c) 水深
- d) 裏込め材の種類

上記の項目について、まず全国調査結果(実構造物での調査結果)を基に、集中腐食に対する上記要因の影響程度などについて述べる。次に、既往の文献で実施されている室内試験を基にした、集中腐食メカニズムに関する検討事例について述べる。

(1) 全国調査結果(実構造物での調査結果)<sup>1)</sup>

a) 河川水の流入

河川水が混ざると集中腐食が進行しやすいとされている。図-2.6(a)は、腐食パターンに及ぼす河川水流入の影響を示す。

河川水の流入がある場合は、パターン a,b が多く、c が少なくなっている。河川水の流入がない場合は、パターン c が増えている一方で、パターン a も多い。腐食パターンに河川水は影響しているようだが、河川水の影響だけではないことが分かる。

図-2.7 は、水溶液の電気抵抗率を変化させ、鋼材界面付近での集中腐食の傾向を調べたものである<sup>3)</sup>。海水の場合(25Ωcm)と比べて、それよりも電気抵抗がやや高い場合(163Ωcm)に、もっとも集中腐食が進行しやすくなっている。一方、抵抗率が大きくなりすぎると、そもそもの腐食反応率が下がり、腐食速度が全体として小さくなっている。この結果は、河川水が混ざる河口付近で、集中腐食が進行しやすいことを裏付ける理由の1つと考える。

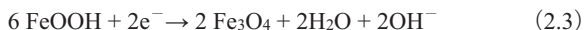
その他、河川水が混ざる海域で腐食が進行しやすい理由として、海水と河川水が層状に分かれた部分では水質が極端に変わり、その環境差により、アノード部とカソード部が明確に分かれて、集中腐食が進行すると言われている。河川水が混ざる海域において、各種の要因が複合し、集中腐食が生じやすくなっていると考えられる。

ここで、アノード部で生じる反応式とカソード部で生じる反応式を示す。なお、一般的な海中環境の場合である。

アノード反応（鉄の酸化反応）



カソード反応（上は酸素、下はさびの還元反応）



b) 干満部の状態（干満差の大小、被覆の有無など）

干満部の状態が影響因子であることを裏付ける現象の1つとして、M.L.W.L.直下付近における集中腐食の発生頻度に上部コンクリートの下端深度が関係していることが挙げられる。図-2.6(b)に集中腐食の発生頻度に及ぼす上部コンクリート下端深度の影響を示す<sup>3)</sup>。コンクリートの下端深度がM.S.L.より上の場合、集中腐食が生じた例が多い。一方、M.S.L.より下の場合、集中腐食の発生頻度が少なくなっている。これは、上部コンクリートの下端深度が下がるほど、無防食鋼の露出部すなわちさびが生じる面積が減るため、上述のカソード反応が減少する。結果として集中腐食が減少すると推測される。

c) 水深

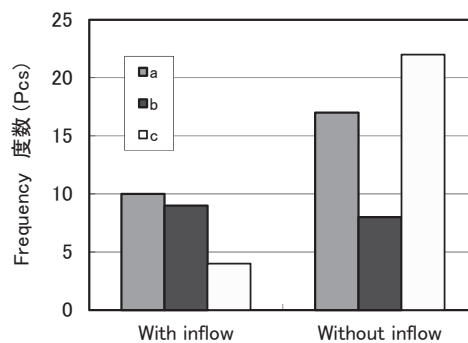
文献3)では、水深が浅い場合の方が集中腐食の例が生じやすいとしている。その理由として、文献では、水中部がアノードとなり、アノード面積が少ないほど、集中腐食が進みやすいため、と考察している。

図-2.6(c)は、腐食パターンに及ぼす水深の影響をまとめたものである。水深の浅い場合にパターンaが多い一方で、水深が深い場合においてもパターンaのものが多い。水深が浅い場合に、河川水の流入が多い、水質が良くない、といった他の要因が影響している可能性もあり、一概に水深と関連付けにくいと考えられる。

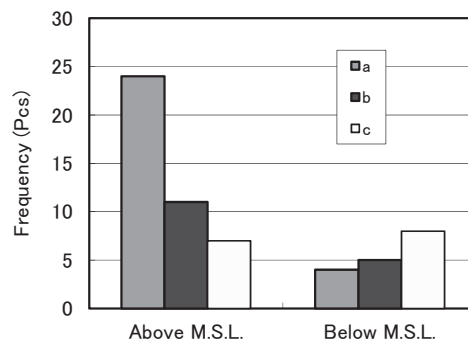
(2) 室内試験を基にした検討事例<sup>4)</sup>

原因の一つの説として「干満帯のさび」が起因しているという報告は多い。文献4)では、これを検証するために、干満を模擬した水槽での暴露実験を行っている。試験体の概要を図-2.8中に示す。無防食の鋼材試験片を2種類（海中部の長さの長いもの(A)と短いもの(B)）と、干満帯が被覆されている試験片を1種類（海中部の長さが短いもの(C)）の3種類が暴露されている。

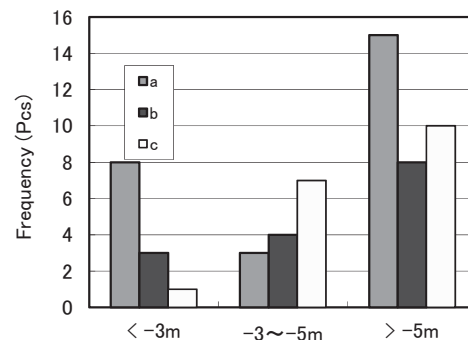
この実験を基に、集中腐食について、1) 干満帯に錆が生じると促進される、2) 海中部の鋼材の長さが長いほど促進される。といった知見が報告されている。以下、その概要を示す。



(a) 河川水流入の影響



(b) コンクリート下端深度の影響



(c) 水深の影響

図-2.6 腐食パターンに及ぼす各種要因の影響

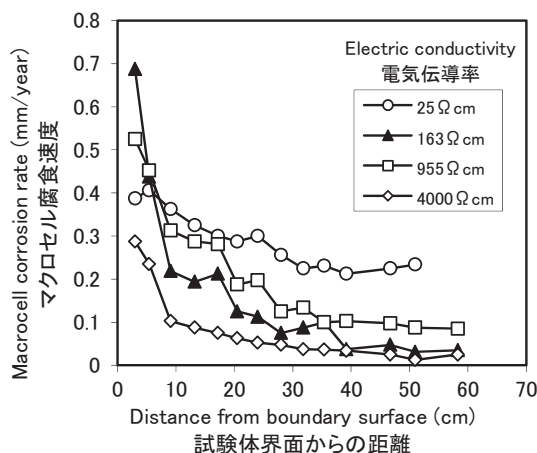


図-2.7 集中腐食に及ぼす水質（電気抵抗率）の影響



1) 干満部の錆による影響

図-2.8 に鋼材の干満部に塗装による被覆を行った場合 (C) と行わない場合 (B) の腐食速度の分布を示す。干満部に被覆を行った C の場合、集中腐食傾向が見られていない。一方、被覆がない B の場合、集中腐食傾向がみられる。この原因として、干満部の錆が満潮時に海中に浸漬された際に、錆が還元される反応(カソード反応、式(2.3))が生じることに起因していると考察している。また、満潮時には干満部に生じたさびがカソード(還元反応が起こる箇所)、M.L.W.L.直下付近がアノード(酸化反応すなわち鉄の溶解が起こる箇所)となり、干潮時においても M.L.W.L.直下付近はアノードのまま、海中部がカソードとなり、M.L.W.L.直下付近が常時アノードとなった結果、集中腐食が常に進行すると考察している。

図-2.9 は文献 4)に示された集中腐食メカニズムのイメージ図である。

2) 海中部の鋼材の長さの影響

図-2.8 に海中部の長さが長い場合 (A) と短い場合 (B)

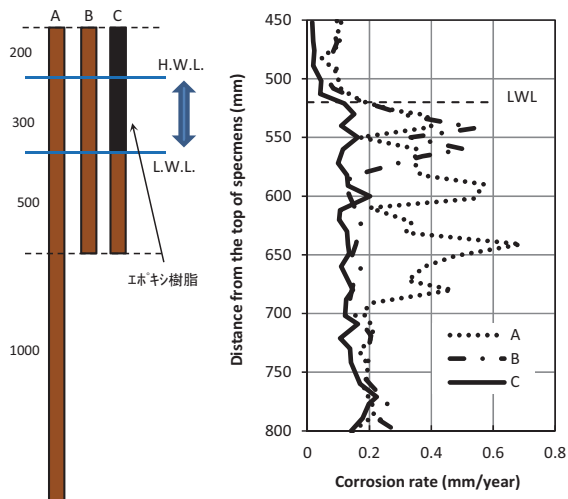


図-2.8 集中腐食に及ぼす干満帯の錆、水深の影響<sup>4)</sup>

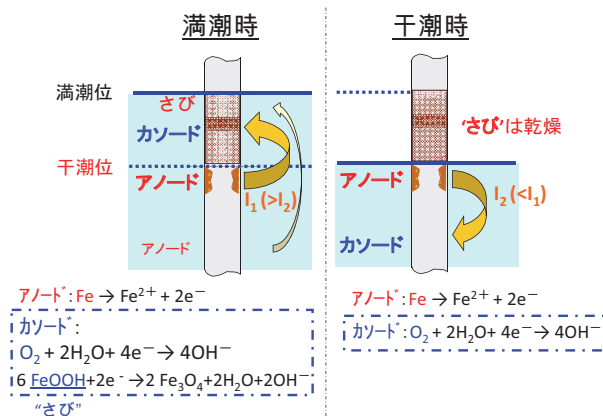


図-2.9 集中腐食メカニズムのイメージ図<sup>4)</sup>

の腐食速度の分布を示す。海中部の長さが長いAの場合、集中腐食の程度(速度、範囲)がより進行している傾向がみられる。この原因として、前述のように、M.L.W.L.直下付近が常時アノードとなる結果、海中部の鋼材はカソードになりやすく、その結果、海中部の長さが長いほど、カソード反応が生じる範囲が広くなり、M.L.W.L.直下付近の集中腐食がより進行しやすくなる、と考察している (図-2.9 参照)。

前述の図-2.6(c)においても、水深が深い場合に、腐食パターン a の場合が多くなっている。上記の考察は、この結果が正しいことを裏付ける理由の1つになる。

2.2.4 実海域での暴露試験に基づく検証

(1) 概要

2.2.3 で紹介した集中腐食メカニズムの検証試験<sup>4)</sup>は室内水槽での試験結果であり、実海域の場合の検証が必要と考える。そこで、実海域において同様な暴露実験を行い、メカニズムの検証を行う。

(2) 現地暴露試験概要

実施場所は鹿島港にある鋼矢板岸壁である。構造物の断面図を図-2.10 に示す。なお、近傍に験潮所があり、詳細な潮位変化の把握が可能である。

1) 試験概要

(a) 実施場所

供用開始後から無防食の状態が長期間続いており、最近になって電気防食が適用された。なお、被覆防食は適用されていない。

(b) 鋼材試験片

鋼材試験片は、供試部分が干満部 750mm、水中部 3500mm または 1500mm となるように既設鋼矢板岸壁に

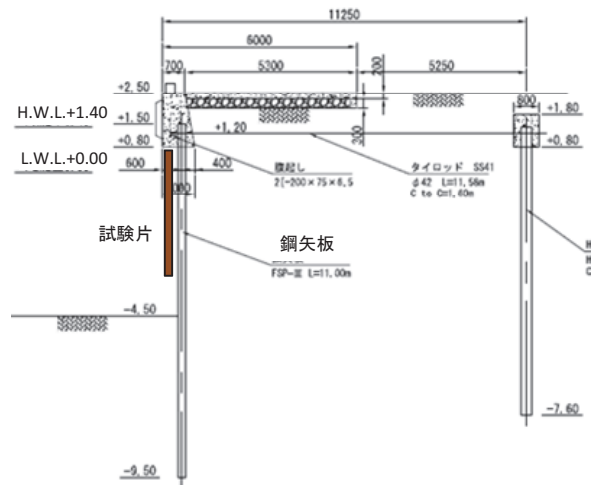


図-2.10 鹿島港位置図および構造物の断面図

設置した。図-2.11に鋼材試験片の概略図を示す。試験体は材質SS400の厚さ6×50mm幅の平鋼を用い、全長は4.25mおよび2.25mの2種類(それぞれL、Sと表記)とした。また、試験体L-Cの干満帯部および試験体の裏面にはエポキシ樹脂塗装を施した。なお、裸部分には黒皮被膜をブラスト処理し表面素地を露出させた。

(c) 試験体設置

鋼材試験片は、それぞれ架台に取り付けた後、鹿島港居切導水路-4.5m岸壁の既設鋼矢板護岸に2014年3月に設置した。なお、本試験体と同じ仕様のものに対し、電気防食を適用した試験体(図-2.11中でCPと表記)の設置も同時に実施している(第4章4.3参照)。

(d) 試験片処理および測定項目

鋼材試験片に付着している錆およびスケールの除去は薬品処理により行った。除錆処理した鋼材試験片は、デジタルマイクロメータにて鋼材試験片の水深方向に50mm間隔、水平方向に3点の残存板厚を測定した。さらに、試験前後の板厚測定結果から、模擬試験と同様に鋼材試験片の各深度方向の腐食速度(mm/y)を算出した。なお、各深度方向の腐食速度は、水平方向3点の腐食速度の平均値としている。暴露期間は1回目が645日間(約1.8年)、2回目が1344日間(約3.7年)であった。

2) 試験結果および考察

図-2.12に水深と腐食速度との関係を示す。干満帯を被覆した試験体L-Cの場合に、試験体L(被覆無し)に比べて深度0~-1m付近の腐食速度が大きくなると予想

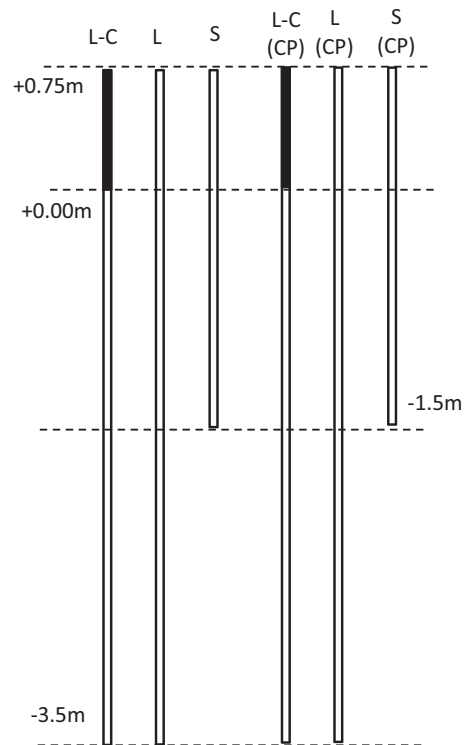


図-2.11 暴露試験用鋼材試験片の概略図

していたが、干満帯の被覆の影響は明確ではなかった。これは他の深度についても同様であった。また、海中部の長さの影響も明確ではなかった。

今回、試験体全長にわたり、フジツボなどの海生生物の付着が見られた。図-2.13に干満帯上部における無防

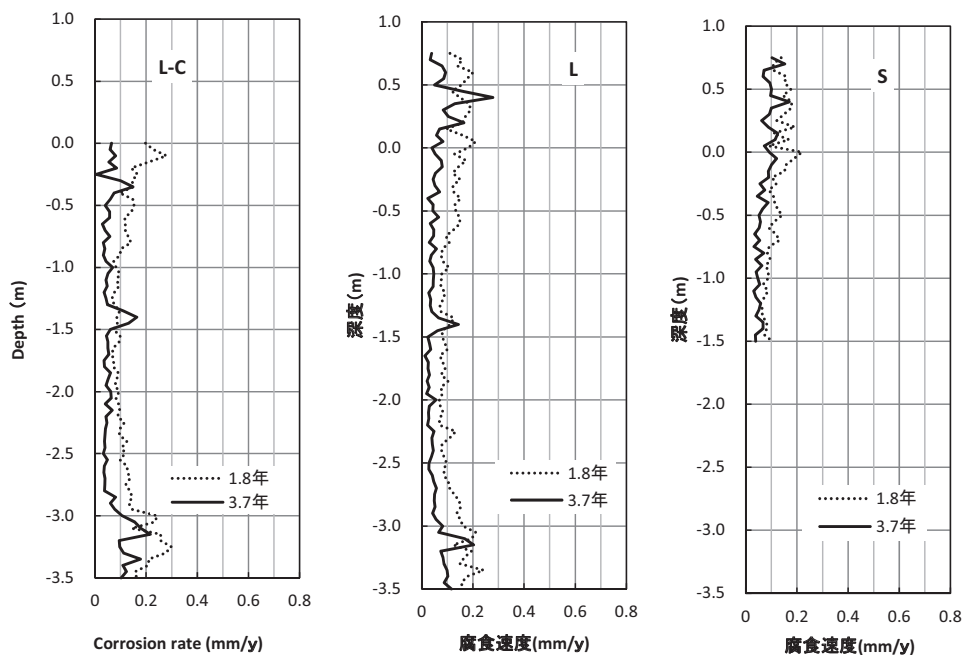
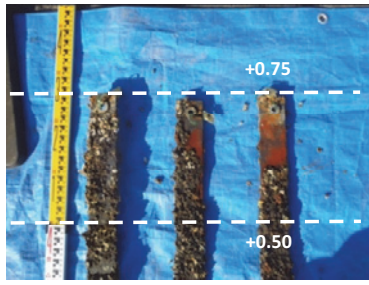
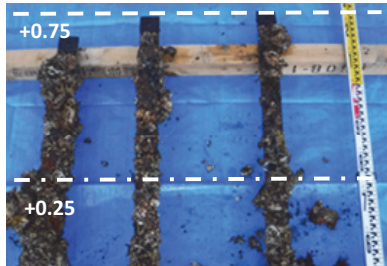


図-2.12 実海域での暴露試験における鋼材腐食速度の深度分布



a) 1.8年



b) 3.7年

図-2.13 干満帯上部における海生生物状況

食片の海生生物状況を示す。このことから、鋼材表面では腐食によるさび層に加え海生生物の層が付着し、鋼材表面への溶存酸素の供給の障壁となってカソード反応が抑制され、全体的に均一な腐食速度になったものと考えられる。この影響もあり、M.L.W.L.直下付近での集中腐食が進行しにくかったものとする。

### 2.2.5 屋外暴露試験に基づく検証

港湾空港技術研究所内の屋外暴露試験水槽において、2つの試験（(1)分割試験片の場合、(2)一体型試験片の場合）を行い、集中腐食メカニズムの検証を行った。

#### (1) 分割試験片を用いた暴露試験

##### 1) 試験方法

図-2.14 に屋外暴露干満試験での試験体設置の概略図を示す。干満部は長さ 15cm×幅 5cm の板状の試験片（SS400）を 10 個、海中部には長さ 150cm×幅 5cm の試験片を 3 個配置した。なお、本試験は、第 4 章 4.4 の干満帯の電気防食効果を確認する際の比較試験体として実施されたものである。

##### 2) 試験項目

各試験体のさびを除去後、マイクロメータで肉厚を測定し、各試験片における試験期間内での腐食速度を算出した。

##### 3) 試験結果および考察

腐食速度の深度分布を図-2.15 に示す。干満帯部で最も小さく、一方、海中部の-1~-2m 付近で局所的に腐食速度が大きくなっている。これは、干満帯がカソード、

海中部の-1~-2m 付近がアノードとして作用したことを意味している。この理由としては、2.2.3 でも述べたように、干満帯に生じた錆が海水中に没した際に還元されることに起因していると考えられる。

2.2.4 の実海域での試験ではこのような傾向は見られなかった。この場合、干満帯が付着生物で覆われていたため、カソード反応が起こりにくく、結果として海中部に顕著なアノードが現れなかったと推測される。一方、今回の暴露試験においては、干満部には付着生物も被覆

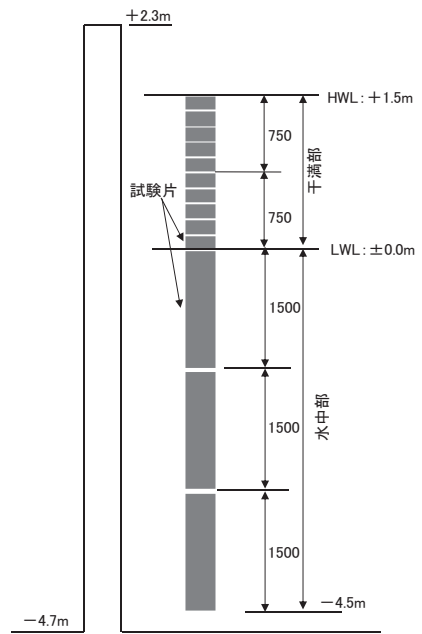


図-2.14 試験体設置状況

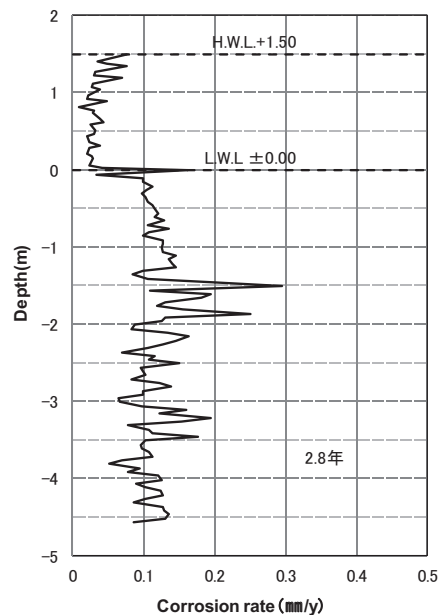


図-2.15 腐食速度の深度分布

も無いため、カソード反応が生じやすく、結果として干満帯直下付近に顕著なアノードが現れたものと推測される。

(2) 一体型試験片を用いた暴露試験

1) 試験方法

2.2.4の実海域での暴露試験においては、干満帯においても生物付着が激しく、これが干満帯でのカソード反応を抑制し、M.L.W.L.直下付近の集中腐食を抑制した可能性が考えられた。また、前述の屋外暴露試験においては、干満部に被覆がなく、かつ海中部の長さが1条件での試験であり、メカニズムの考察が十分ではなかった。

そこで、生物付着がほとんど生じない、港空研内の屋外暴露水槽において、2.2.4の実海域での暴露試験と同様の試験を2017年8月から開始させた。試験片の概略を図-2.16に示す。試験体は材質SS400の平鋼(幅150mm)を用い、全長は6.0mおよび2.6mの2種類(それぞれN-L, N-Sと表記)とした。また、試験体P-Lの干満部にはエポキシ樹脂塗装を施した。2.2.4の試験と異なり、全試験体の裏面は無塗装である。なお、裸部分は黒皮被膜をブラスト処理し表面素地を露出させた。

この試験体を約2年後の2019年8月に回収し、各試験を実施した。

2) 試験項目

(a)肉厚測定

各試験体のさびを除去後、マイクロメータで深度方向に5cm間隔にて肉厚を測定し、各試験体における試験期間内での腐食速度を算出した。

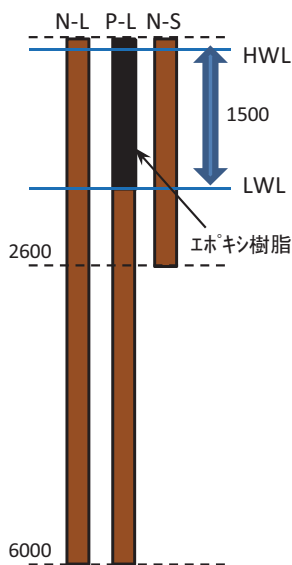


図-2.16 試験片概略図

(b)腐食深さ測定

試験体の表面、裏面からの腐食を把握するためにデプスゲージを用いてそれぞれの面より腐食深さを測定した。

(c)電位測定

LWL(低水位)直下付近, LWLと下端の中間付近, 下端付近の3深度において、数ヶ月ごとに電位を測定した。

3) 試験結果および考察

(a)腐食速度の深度分布

回収後の外観を図-2.17,各試験体の腐食速度の深度分布を図-2.18に、また、腐食速度を25cm間隔で平均した際の深度分布を図-2.19に示す。平均した理由は、深度方向の各分布を比較しやすくするためである。また、図-2.20はLWL以深の試験体の腐食速度を、表面と裏面に分離し、比較した結果である。通常、裏面に塗装し、表面のみが腐食するようにする場合が多いが、今回は裏面に塗装していない。図-2.17の外観を見ると裏面の方が表面より腐食が進行しているようにも見える。上述の実態を踏まえつつ、図-2.19の結果を中心に考察する。

まず干満部において、干満部が無防食であるN-LおよびN-Sは干満部で腐食が最も小さくなっている。これは図-2.15の結果と同様に、干満部がカソードとして作用したためと考えられる。なお、干満部に塗装が適用されているP-Lにおいて、塗装の効果が十分でなく、塗装部においても若干の腐食が生じている。

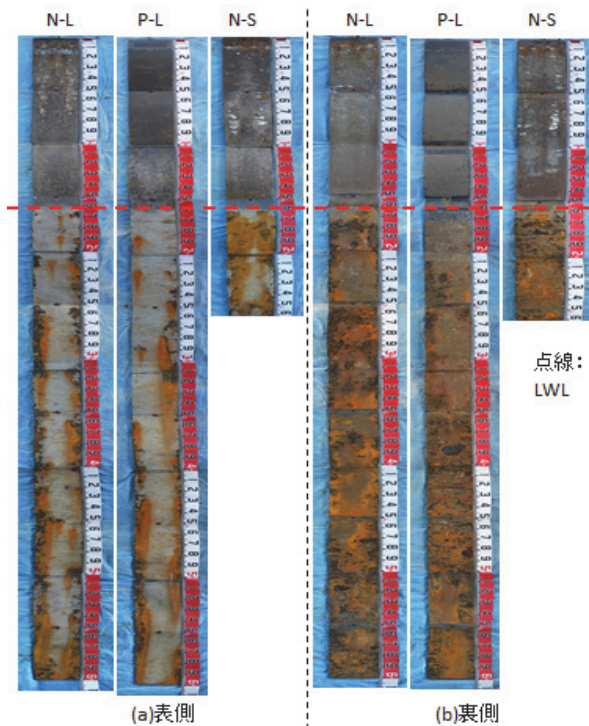


図-2.17 暴露後の状況

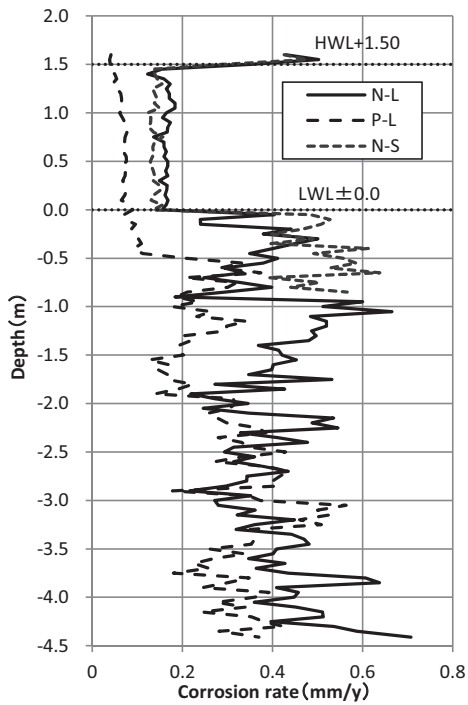


図-2.18 各試験体の腐食

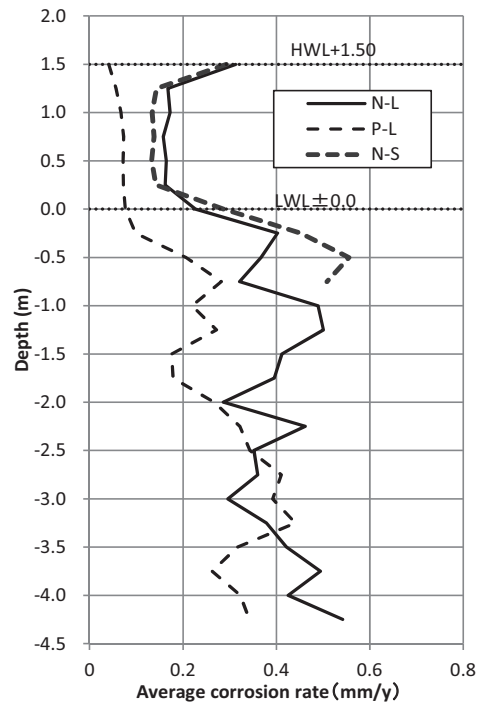


図-2.19 各試験体の平均腐食速度

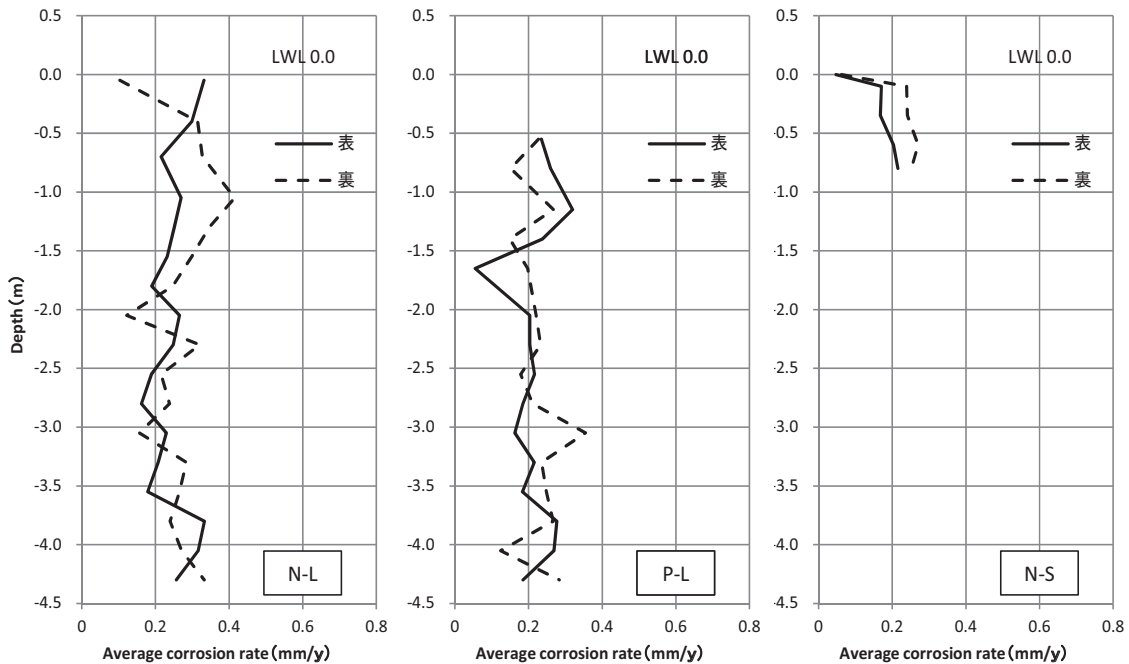


図-2.20 腐食速度の比較（表・裏）

次に集中腐食が生じやすいとされる LWL 直下付近 (0.0m~-1.0m 付近) において、P-L の腐食が最も腐食速度が小さい。これは、干満帯に塗装が適用されているため、満潮時（没水時）に生じる錆の還元反応すなわちカソード反応が抑制されたためと考えられる。一方、N-L と N-S を比べると、LWL 直下付近においては N-S の方

が腐食速度が大きい。これは、N-S の方が海中部の長さが短いため、アノード部が狭い範囲に限定され、腐食が極大化したためと考えられる。ただ、N-L や P-L において、LWL から離れた箇所でも比較的腐食速度が大きくなる場所がある。この理由は明確ではないが、鋼材の表面と裏面や深度方向で、水質などの違いにより、アノード

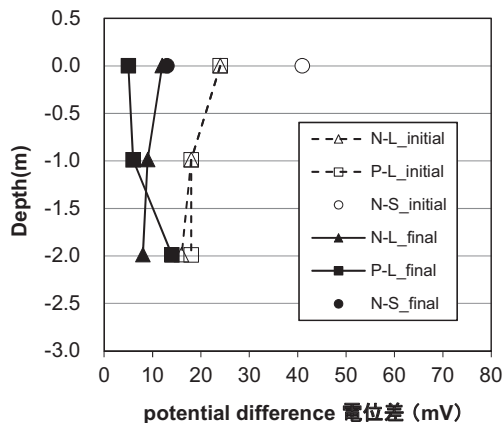


図-2.21 初期と終期の電位差の変化

部とカソード部に分かれ、面や深度によって腐食傾向が異なった可能性がある。なお、酸素濃度が多い個所ではカソード反応が生じやすいため、酸素濃度が少ないと推測される裏面や水深の深い箇所がアノード部、一方、酸素濃度が多いと推測される表面や水深の浅い箇所がカソード部になりやすいと考えられる。

#### (b)試験体内での電位分布

鋼材の腐食は、電位差が生じることにより促進される。ここで対象としている集中腐食も同様であり、試験体内での電位差（最卑値と最貴値の差）が大きいほど、腐食速度が大きくなると考えられる。

暴露初期と撤去前における電位の深度分布を図-2.21に示す。暴露初期において、海中部の長さが短いN-Sの電位差は最も大きかった。一方、海中部の長さが同じであるN-LとP-Lを比較すると、電位における差はほとんどなく、干満帯の塗装の有無の影響は明確に表れなかった。これらの結果は、海中部の長さが短い方（水深が浅い方）が、集中腐食が生じやすいことを示すものである。この理由としては、(a)で述べたように、N-Sの方が海中部の長さが短いため、アノード部が狭い範囲に限定され、腐食が極大化しやすいためと考えられる。

次に、約2年後においては、全体的に電位差が小さくなり、最大であったN-Sの電位差と他の試験体の電位差の差がほとんどなくなった。この理由とは明確ではないが、時間の経過とともに、場所によるアノード部やカソード部の違いが生じにくくなったためであると考えられる。

今回の試験は、干満差が常に一定の環境で実施しており、さらには生物付着や波浪の影響を受けない条件である。今後は、干満差が季節変動し、かつ生物付着や河川水の流入の影響がある実環境下で上記のような試験を実施し、メカニズムの検証を行う必要がある。

## 2.3 鋼材とコンクリート境界部での集中腐食（地際腐食）

### 2.3.1 はじめに

塗装された鋼材とコンクリートの境界部で局所的に腐食が進行する場合がある（地際腐食と呼ばれる）<sup>5)6)</sup>。これは、塗装された鋼材とコンクリートの境界部の狭い範囲がアノード（鉄の溶解反応が起こる場所＝錆が進展する箇所）、コンクリート内部の高アルカリ性を示す箇所がカソード（酸素の還元反応が起こる場所）となり、マクロセル腐食が進行しやすいと考えられている。

地際腐食が激しく進み、崩壊に至った例として、橋梁では木曾川<sup>7)</sup>、栈橋では松山港<sup>8)</sup>がある（松山港の場合は他の要因が存在している可能性もある）。その状況を図-2.22に示す。しかし、港湾構造物において実態調査を実施した事例は少なく、地際腐食の実態については明確ではない。

本検討では、飛来塩分が多量に供給される波崎観測栈橋・陸上杭において、塗装された鋼材とコンクリートの境界部付近での集中腐食の実態把握を行った。

### 2.3.2 調査概要

波崎観測栈橋・陸上杭の配置図の概要を図-2.23に示す。K11およびK12杭の2本に対して、2017年8月に



a)木曾川橋梁<sup>7)</sup>



b)松山港（由良港）栈橋

図-2.22 コンクリート境界部で鋼材の集中腐食が進行した事例

実施した（33年経過）。なお、前回は25年経過時（2009年8月）に実施している（コンクリート内は未実施）。

a) 現地概況

肉厚測定前のK11 およびK12 杭の上部工界面の状況を図-2.24 に示す。塗装表面には激しい錆が確認されている。なお、この塗装は現地で施工されており、コンクリート内は無塗装である。塗装仕様を下記に示す。

- ・ K11：湿潤面用エポキシ樹脂塗装（膜厚 900 $\mu$ m）
- ・ K12：ガラスフレークエポキシ樹脂塗装（膜厚 1000 $\mu$ m）

b) 肉厚測定

鋼材肉厚は1箇所当り 100mm $\times$ 100mm の範囲で5点測定とし、測定位置は+6.17m（コンクリートはつり面）および+6.07m（上部工直下塗膜面）とした。なお、コンクリート内においても、100 $\times$ 100mm の測定範囲が確保できるようにはつりを実施した（図-2.25 参照）。

2.3.3 測定結果

肉厚測定結果を図-2.26 に示す。前回（25年経過時）は海側と陸側、今回は陸側、鹿島側、海側、銚子側の4面で実施した。以下、1) 塗装された鋼材面とコンクリートの境界部、2) コンクリート内部に分けて考察する。

1) 塗装された鋼材面とコンクリートの境界部

33年後において、上部工直下の塗膜部分では1.2mm～4.5mm の減肉が観察された。また、K11 よりも K12 の方が、上部工直下の塗装された鋼材面とコンクリートの境界部における減肉が大きかった。K12 杭が最外側に位置しているため、飛来塩分や飛沫(水分)の供給が多かったためと推測される。

2) コンクリート内部

コンクリート中での鋼材の減肉は0～0.5mm 程度であり、上部工直下の塗膜下と比べてかなり小さい値であった。

文献5) では、高品質のコンクリート（水セメント比 W/C=0.40）内部への腐食侵入深さはコンクリートの打設時に生じた鋼材とコンクリートの隙間部の範囲（文献5) では7～10mm 程度）であり、時間とともに進行していなかった、という室内試験結果を示している。

一方、文献9) では、実コンクリート構造物中における、鋼管杭での地際腐食について調査を行っているが、境界面から160mm 程度の深さまで腐食が進行していた。この原因として、塩化物イオンがコンクリート内部まで侵入したためとしている。

今回、上部工コンクリートの強度を調べていないが、はつり時において非常に硬いことが確認されており、品質は良いと考えられる。上部工コンクリートの品質が良

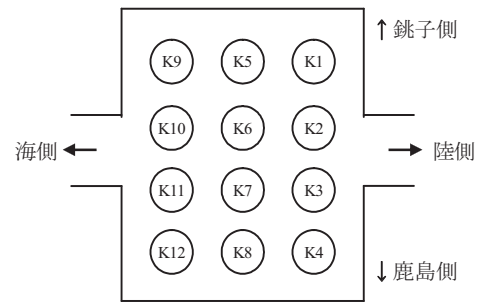


図-2.23 波崎陸上杭配置図



K11 海側



K12 海側

図-2.24 上部工界面付近の状況



図-2.25 肉厚測定前の状況

く、塩分が侵入していないことが要因として挙げられる。よって今回は、文献5) の状態に近い。そのため、コンクリート内に腐食が進行していないと考えられる。

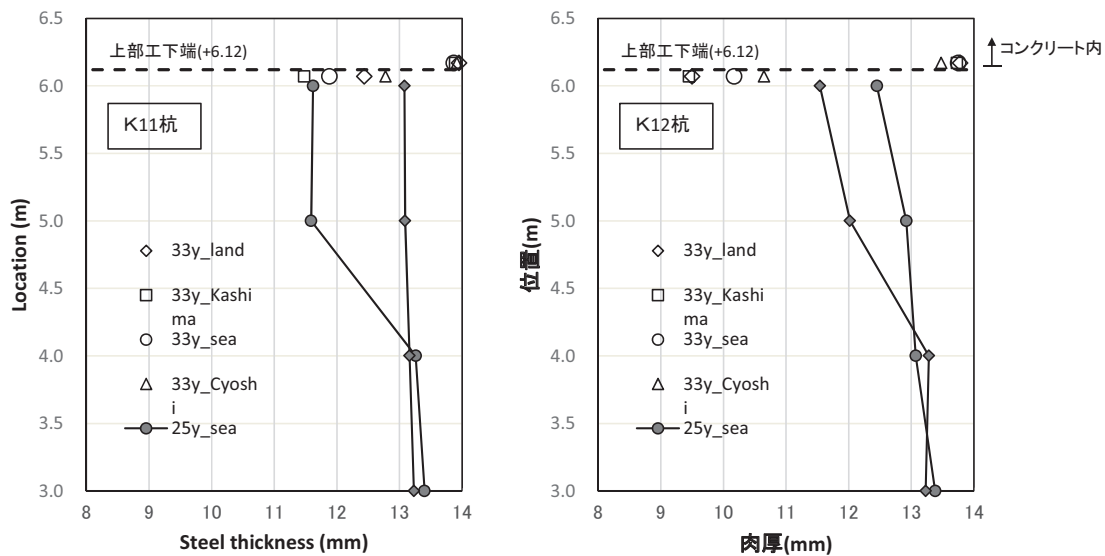


図-2.26 肉厚測定結果 (K11 および K12 杭)

上記のように、特に K12 杭の上部工直下の塗装された鋼材面とコンクリートの境界付近では腐食の進行が比較的早かった。この主要因としては、塗装された鋼材とコンクリートの境界部の狭い範囲がアノード（鉄の溶解反応が起こる場所＝錆が進展する箇所）、コンクリート内部の高アルカリ性を示す箇所がカソード（酸素の還元反応が起こる場所）となり、マクロセル腐食が進行したことが考えられる。

今回の結果を踏まえると、栈橋の鋼管杭や矢板において、コンクリート上部工の打設後に鋼材面に塗装や被覆防食を施工した際に、特に境界部での処理が不十分な場合において、境界部で腐食が進行しやすくなっている可能性がある。また、この腐食の進行は外観からは判別しにくい可能性もある<sup>9)</sup>。上述の観点を踏まえた調査や、維持管理時の点検診断が必要と考える。

また、地際腐食の対策方法としては、鋼管に亜鉛テープを巻く方法<sup>10)</sup>などがあるが、海洋環境下における実績はほとんどなく、設計手法も確立されていない。今後の検討が必要と考える。

## 2.4 まとめ

技術基準において、M.L.W.L.直下付近における集中腐食メカニズムが不明なために、防食に対しては安全側の対応がなされている。メカニズムが明確になることで、将来的に防食設計の考え方が変わる可能性もある。

本章では、M.L.W.L.直下の集中腐食に加え、コンクリート境界部における集中腐食についても検討を行った。各検討結果を以下にまとめる。

### 1) M. L. W. L. 直下付近における集中腐食

実構造物調査および既往の研究により、鋼材の集中腐食に及ぼす要因として、a) 水質（河川水の流入）、b) 干満帯の状態（被覆の有無等）、c) 水深、などが主に影響していることが推測された。ただし、要因が多岐にわたっており、実構造物調査のみでは原因を特定できていないのが現状である。

既往の研究で実験的にメカニズムについて検証を行っている事例はあるものの、事例が非常に少なく、仮説を確証するに至っていない。よって、本調査では、上述の要因のうち、b) 干満帯の状態（被覆の有無等）および c) 水深に着目して現地環境での暴露試験（約 1.7 年間）および屋外水槽での暴露試験（分割試験片の場合（約 2.8 年）と長尺試験片の場合（約 2 年））を行い、集中腐食メカニズムの検証を試みた。

上述の現地環境での暴露試験（約 1.7 年間）の場合、L.W.L.付近への集中腐食の発生は見られなかった。この理由としては、干満帯部への生物付着が激しく、この生物付着がカソード反応（酸素の還元反応）を抑制したため、集中腐食が生じにくくなったことが考えられた。

次に、生物付着がほとんどない、港空研内の屋外水槽において、分割試験片の場合（約 2.8 年）と長尺試験片の場合（約 2 年）の場合、L.W.L.の直下や 1~2m 程度離れた箇所でも腐食速度が極大化する傾向が見られた。また、集中腐食の程度は、海中部の試験体の長さや干満帯の被覆の有無の影響を受けていた。

以上のことから、港湾構造物において、集中腐食は必ず起こるものではないことが改めて確認された。また、



干満帯部分が無防食で、この部分でさびの還元反応が起こる場合に促進される可能性があることが確認された

(河川水が混入する場合については今回の検討からは議論できない)。海中部の長さ(水深)については、短い方(浅い方)が干満部の最低水位の直下付近で腐食速度が極大化しやすくなる可能性が示唆された。

今後は、河川水が混入している箇所が多く、かつ集中腐食が生じた例が多いとされる箇所での検討が必要である。

## 2) コンクリートの境界部での集中腐食(地際腐食)

波崎観測棧橋・陸上杭において、上部コンクリート工の打設後に塗装が適用された鋼材とコンクリートの境界付近では腐食の進行が比較的早かった。この主要因としては、塗装された鋼材とコンクリートの境界部の狭い範囲がアノード(鉄の溶解反応が起こる場所=錆が進展する箇所)、コンクリート内部の高アルカリ性を示す箇所がカソード(酸素の還元反応が起こる場所)となり、マクロセル腐食が進行したことが考えられる。

今回の結果を踏まえると、棧橋の鋼管杭や矢板において、コンクリート上部工の打設後に鋼材面に塗装や被覆防食を施工した際に、特に境界部での処理が不十分な場合において、境界部で腐食が進行しやすくなっている可能性がある。また、この腐食の進行は外観からは判別しにくい可能性もある。上述の観点を踏まえた調査や、維持管理時の点検診断が必要と考える。

また、地際腐食の対策方法としては、鋼管に亜鉛テープを巻く方法などがあるが、海洋環境下における実績はほとんどなく、設計手法も確立されていない。今後の検討が必要と考える。

## 参考文献(第2章)

- 1) 阿部正美, 横井聰之, 大即信明, 山本邦夫: 港湾鋼構造物の腐食調査資料集, 港湾技研資料, No.628, 1988.9.
- 2) H. A. Humble: The cathodic protection of steel piling in sea water, Corrosion, Vol.5 No.9, p.292, 1949.
- 3) 善一章:海中構造物 腐食の実態と対策 -データを中心として-, 鹿島出版会
- 4) 松岡和巳, 山本正弘, 五戸清美:海水中に暴露された鋼材のマクロセル腐食現象の解析, 材料と環境, Vol.56, pp.99-105, 2007.
- 5) 貝沼重信, 細見直史, 金仁泰, 伊藤義人:鋼構造部材のコンクリート境界部における経時的な腐食挙動に関する研究, 土木学会論文集 No.780 /I-70, pp.97-114, 2005.

- 6) 栗栖孝雄:鋼管柱の地際腐食, 腐食センターニュース, No.066, pp.24-44, 2013.2.
- 7) 山田健太郎:木曾川大橋の斜材の破断から見えるもの, 土木学会誌, Vol.93, pp.29-30, 2008.1.
- 8) <http://www.ehime-np.co.jp/news/local/20160310/news20160310764.html>
- 9) 田中良樹, 村越潤:鋼コンクリートの境界部の腐食に関する調査, 土木技術資料, No.54, Vol.4, pp.38-43, 2010.
- 10) 谷口幸一郎, 森本和成, 濱田秀則, 平崎敏史, 阿部正美:海洋環境下における亜鉛系防食材料による防食効果の検討, 防錆管理, Vol.49, No.5, pp.178-183, 2005.

### 3. 海中における電気防食の効果に関する検証

#### 3.1 序論

まず電気防食の概要を述べ、本章で取り上げる電気防食の効果を表す指標である防食率の意味と課題、電気防食特性の経時変化に関する現状と課題について述べる。

##### (1) 電気防食概要

日本の港湾施設に電気防食が適用されたのは、1952年の尼崎港での試験施工が最初であり、それから60年以上が経過している。電気防食に関連する設計基準類および防食施工管理基準の過去の履歴を表-3.1に示す。

港湾鋼構造物への電気防食適用における防食理論<sup>1)</sup>を図-3.1に示す。水中で腐食している鋼材はその表面において電位の卑なアノード部と電位の貴なカソード部からなる腐食電池を形成しており、アノード部から電流が流出して腐食する。電気防食法はこのような腐食している鋼材の表面全体をカソードとして外部アノードから防食電流を供給し、カソード部の電位を次第に低下させ、当

初のアノード電位にまで低下させることで鋼材表面の電位差をなくし、鋼材の腐食速度をゼロにするものである。

電気防食は、外部電源方式と流電陽極方式の2つに分かれる。現在の主流は流電陽極方式電気防食であり、一般にアルミニウム合金製の流電陽極が実構造物に設置される。流電陽極の設置されるタイミング（パターン）としては、図-3.2のようなパターンに分かれる。一般的なのは、実海域に存在する鋼部材に水中溶接で設置する方法である。新設構造物の場合も、杭や矢板が打設された後、数か月の無防食期間が存在する場合が一般的である（ケース1）。既設構造物の場合は、無防食期間が長期間継続した後に陽極が新規に設置される場合（ケース3）、既に陽極が設置されていて、消耗した段階で更新される場合（ケース4）に分かれる。また、ジャケット式構造物や沈埋函の場合、陸上で新規に製作する際に陽極を設置し、最初から陽極が取り付けられた状態で実海域に設置される場合もある（ケース2）。

表-3.1 電気防食に関連する設計基準類および防食施工管理基準の過去の履歴

年代	年月	防食設計基準の制定	防食施工管理基準の制定
昭和30年代	1959年	港湾工事設計要覧 塗覆法と電気防食法について記述	港湾工事共通仕様書、解説書発行 ①電気防食有効範囲を平均水面と明記 (M.W.L.→現在の記号M.S.L.) ②防食電流密度について 海水中、海土中、陸土中について明記
	1960年3月		
昭和40年代	1967年4月	港湾鋼構造物設計基準 ①各水位での鋼材の腐食速度の明記 ②電気防食有効範囲を平均水面と明記 (M.W.L.→現在の記号M.S.L.) ③腐食代(しろ)を採用できることが明記 ④ <b>防食電位の明記</b> -770mV以下(飽和甘こう照合電極 (vs.SCE)) -780mV以下(海水塩化銀照合電極 (vs.SSE[SW])) -850mV以下(飽和硫酸銅照合電極 (vs.CSE))	港湾工事共通仕様書、改定 ①電気防食は流電陽極方式のみと明記 ②防食電流密度は特記仕様書に記載することが明記
	1970年4月	港湾鋼構造物設計基準、改定 ① <b>電気防食の効果として防食率90%が明記</b> ②防食電流密度については記載はない	港湾工事共通仕様書、改定 ①電気防食用陽極はアルミニウム合金陽極と明記 ②電気防食適用時の陽極効率80%以上と明記
	1971年3月		
	1976年4月		
昭和50年代	1979年3月	港湾施設の技術上の基準：同解説 ①海水中、石積中、海土中、陸土中の防食電流密度が規定	
	1986年3月	港湾鋼構造物防食マニュアル発行 (港湾施設の技術上の基準・同解説の防食補修分野より詳細に記載されたもの) ①電気防食の適用範囲を平均水面M.S.L.から平均干潮面(M.L.W.L.)に変更 ②電気防食用陽極の効率を80%から90%に変更 ③腐食代(しろ)採用に制限	
平成元年代	1989年2月	港湾施設の技術上の基準：同解説 ①腐食代(しろ)採用の制限	港湾工事共通仕様書、改正 ①電気防食用陽極の効率を80%から90%に変更
	1991年3月		
	1997年4月	港湾鋼構造物防食・補修マニュアル発行 防食マニュアルと補修マニュアルが統合 ①塗覆装下端レベルはL.W.L.-1mを標準として推奨	
平成10年代	1999年4月	港湾施設の技術上の基準：同解説 ①塗覆装下端レベルはL.W.L.-1m、それ以下は電気防食の適用が標準 ②腐食代(しろ)は仮設のみに適用可 ③汚染海域における電流密度の解説追加	

(2)電気防食の効果を表す指標：防食率

現在、電気防食の効果の評価指標として、「港湾施設の技術上の基準・同解説（以下、技術基準）<sup>2)</sup>」に記載されている防食率という指標が一般的に用いられている。防食率は下記(3.1)式で表されるとおり、無防食時の腐食速度(C[mm/y])と防食時の腐食速度(P[mm/y])の差を無防食時の腐食速度で除して算出されるものである。

$$\text{防食率} = \frac{C-P}{C} \times 100 = \left(1 - \frac{P}{C}\right) \times 100 \quad (3.1)$$

日本の港湾鋼構造物における電気防食の設計時において、適用範囲は平均干潮面 M.L.W.L.以下とし、その際の防食率は90%を用いることが標準となっている。これは、1970年「港湾鋼構造物設計基準」<sup>3)</sup>に規定されたのが最初であり（表-3.1 参照）、上述のケース1のように、流電陽極を設置する前の無防食期間における腐食しるなどを踏まえ、安全側の値として設定されたものであった。一方、ケース2のように、最初から陽極が設置される場合、前述の無防食期間は存在しないため、90%よりも高い防食効果が期待できる。

ここで、防食設計時において、防食率は以下のように用いられる。防食率を90%とした場合、式(3.1)の定義より、防食時においても、無防食時の腐食速度の10%の腐食速度で腐食が進行することになる。例えば、無防食時の腐食速度を0.2 mm/y、設計供用期間を50年と設定した場合、 $0.2 \times (100-90) / 100 \times 50 = 1 \text{ mm}$ が腐食することになる。この程度の腐食量は、新設構造物の場合であれば、腐食しるを付与することで対応できる。しかし、既設構造物の場合で、過去の無防食期間が長く、かつ今後の供用年数が長い場合においては（例えば図-3.2のケース3）、電気防食を適用した場合においても、上述のように計算上では鋼材腐食は進行することとなり、設計供用期間内において部材に要求される肉厚（耐力）を満足しなくなる場合も起こり得る。

電気防食が継続的に適用されるような場合、理論上にも経験的にも、鋼材の腐食速度はゼロに近いと考えられる。しかし、防食率に関して、適切な設計・施工・維持管理がなされた条件下においては、経験的には90%を上回っていることが知られているが、その実態を取りまとめた事例は少ない。また、実構造物において防食率を評価する際には無防食時の腐食速度が必要であるが、電気防食が適用された構造物において、無防食時の腐食速度を精度よく設定することは困難である。上記と電気防食効果に関する最新の知見を踏まえ、電気防食効果を表す指標に関しての検証も必要であると考えられる。

上記の課題を踏まえ、本章の3.3では、実環境に設置

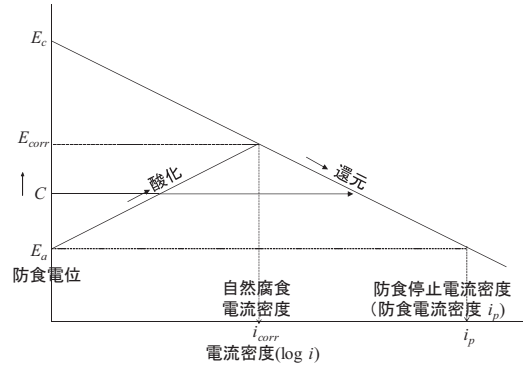


図-3.1 電気防食の理論<sup>1)</sup>

ケース1	新設構造物	鋼管杭および鋼矢板等	←--- 未防食期間 ---> ↓ 電気防食開始 →
ケース2		ジャケット式(上部)	↓ 電気防食開始 →
ケース3	既設構造物	無防食期間あり	←--- 未防食期間 ---> ↓ 電気防食開始 →
ケース4		無防食期間なし	↓ 電気防食開始 →

→ : 電気防食適用      → : 海水暴露期間

図-3.2 実港湾鋼構造物への電気防食適用時期の例

されたテストピースの調査結果を基に、上記についての検証を行っている。また、3.4では、実鋼構造物での電気防食による防食の効果の評価を試みた例を紹介しつつ、実環境での防食の効果の評価する際の課題について述べている。

(3)電気防食特性の経時変化

電気防食の設計において、必要な防食電流密度（初期値）が対象環境ごとに設定される。一般の海域（清浄海域）では、海水中部で100 mA/m<sup>2</sup>、海底土中部では20 mA/m<sup>2</sup>とされる。汚染海域の場合は、海水抵抗が増加し、防食電流が流れにくくなる等の理由から、30～50%程度増加させる必要がある。なお、上記の値は初期の値であり、実際は時間とともに徐々に低下し、やがて定常状態に至る。現状の設計において、この低下率は、電流低減率（=流れる電流/初期電流）と呼ばれ、陽極の設計耐用年数が15年以上の場合、0.5が用いられる。この電流低減率について、防食状態が良好な場合において、0.5よりも低減する場合がある。しかし、実構造物において連続モニタリングを実施する必要があるため、その実態を取りまとめた事例は非常に少ない。

上記の課題を踏まえ、本章の3.2では、実構造物において10年以上にわたり、電気防食特性の経時変化をモニタリングした事例を報告する。

### 3.2 長期にわたる電気防食特性の経時変化例

#### 3.2.1 概要

3.1 (3) で述べたように、電位や陽極発生電流（防食電流密度）といった電気防食特性は、時間とともに変化する。しかし、長期にわたりこれらをモニタリングし、かつ公表されている事例は少なく、その実態は必ずしも明確ではない。

ここで、東京港・大井ふ頭新5バースのジャケット式栈橋は、干満帯より上の部分に「耐海水性ステンレス鋼被覆」が大規模に適用された最初の栈橋式構造物であり、海中部には流電陽極方式の電気防食が適用されている。実構造物に対して両者が併用された際の電気防食特性の経時変化に関する情報は全く存在しなかったため、この構造物において電気防食特性に関する連続モニタリングが開始された。

ここでは、長期にわたる電気防食特性の経時変化の一例として、上述の栈橋において16年以上の長期にわたり、海中部の鋼管杭の電位及び設置された流電陽極の発生電流をモニタリングした事例を紹介する。

#### 3.2.2 対象構造物における防食設計概要

本栈橋の電気防食設計の概要を図-3.3に示す。各部位における防食仕様と防食電流密度を整理した。電気防食の設計上、東京湾の対象海域は汚染海域<sup>1)</sup>と判定されるため、初期防食電流密度の設計値は海水中部：130 mA/m<sup>2</sup>、海底土中部：30 mA/m<sup>2</sup>と設定されている。流電陽極の耐用年数は50年であり、電流低減率50%（耐用年数15年以上の場合の標準値）として設計された。なお、干満帯（H.W.L.～L.W.L.）においては、金属被覆であることを考慮し、初期防食電流密度の設計値は海水中の1/2に相

当する65 mA/m<sup>2</sup>が設定されている。

#### 3.2.3 調査概要

ここでは、2箇所の水深において、鋼材の陰極電位と陽極からの発生電流の経時変化を連続的に測定した。図-3.4に陽極発生電流測定装置と電位測定装置の概要、図-3.5に調査箇所の概要を示す。陽極発生電流は、シャント抵抗を内蔵した防食電流測定装置（5A-50mV仕様）を陽極に取付け、抵抗間の電位降下から発生電流を求めた。鋼材の陰極電位は、陽極近傍に照合電極（海水-銀/塩化銀電極）を取付け、経時変化も測定した。

陽極発生電流測定装置は、ステンレス鋼被覆の影響を確認するため、ステンレス鋼被覆近傍である水深-3mの位置と海底面近傍の-12mに設置した。電位測定装置（照合電極）は海底面近傍（-12m）では陽極発生電流測定装

腐食環境区分	防食仕様	設計防食電流密度
海上大気部	水深 +3.4m	
飛沫帯	ステンレス鋼被覆	
干満帯	H.W.L. +2.1m M.S.L. --- L.W.L. 0m	干満帯全域： 65mA/m <sup>2</sup> L.W.L.～M.S.L.: 130mA/m <sup>2</sup>
海水中部	-1.5m Al陽極 -12.6m 炭素鋼	海水中部：130mA/m <sup>2</sup>
海底土中部	-38.4m	海底土中部：30mA/m <sup>2</sup>

※水深は荒川工事基準面(A.P.)基準で表記

図-3.3 対象栈橋での電気防食設計の概要

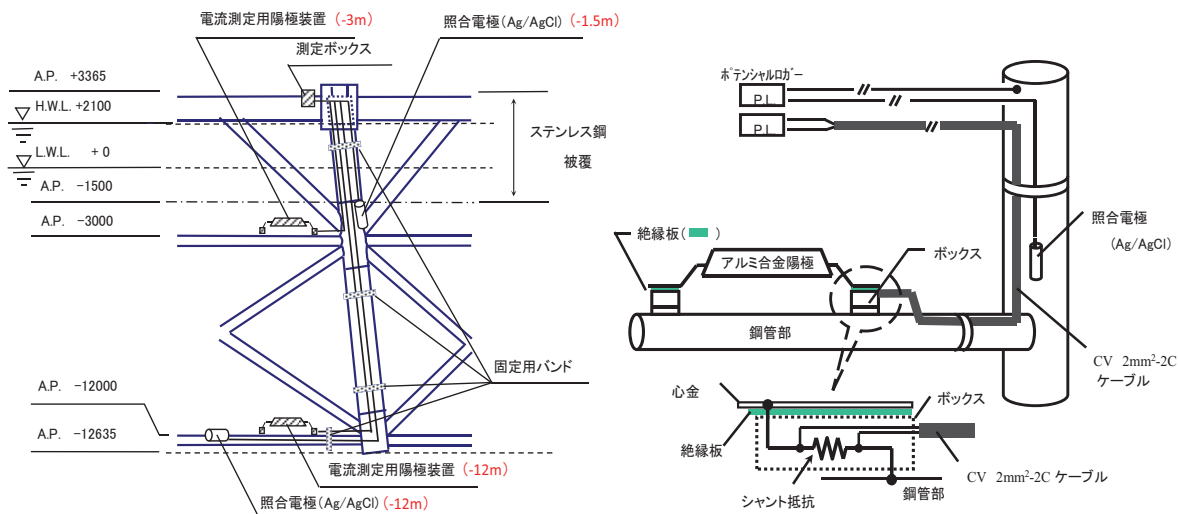


図-3.4 陽極発生電流計測装置と電位測定装置の概要

置と同じ高さに設置した。ステンレス鋼被覆近傍については、ステンレス鋼被覆の影響を詳細に捉えるために、被覆下端付近 (-1.5m) に設置した。

試験開始直後は発生電流および陰極電位の測定間隔を10分間隔で実施し、その後は1時間間隔でデータロガーにて収集した。

### 3.2.4 調査結果

図-3.6 に陰極電位、図-3.7 に陽極からの発生電流の経時変化を示す。

陰極電位は、冬季に貴側、夏季に卑側に推移していることがわかる。また、開始1年目の電位の挙動に関して、

ステンレス被覆付近の冬季の電位（上側電位）は、防食管理基準である-800mV より貴な値を示している。全体的な電位の推移から一時的なものであったと推察できるが、いずれにしても、陽極設置開始時は十分な防食電流が供給できていなかったことが示唆される。これは、近傍陽極（3.5A×50年型）からの電流値が設計値3.5Aを上回っていることから推察される。この理由としては、通常の被覆防食材と異なり、ステンレス被覆部には電流が流入するため、通常とは異なる電気防食特性の挙動を示したと考えられる。ただし、陰極電位は時間の経過とともに卑化し、初年度以降は-900~-1000mVの防食状態が良好とされる値の間で推移した。

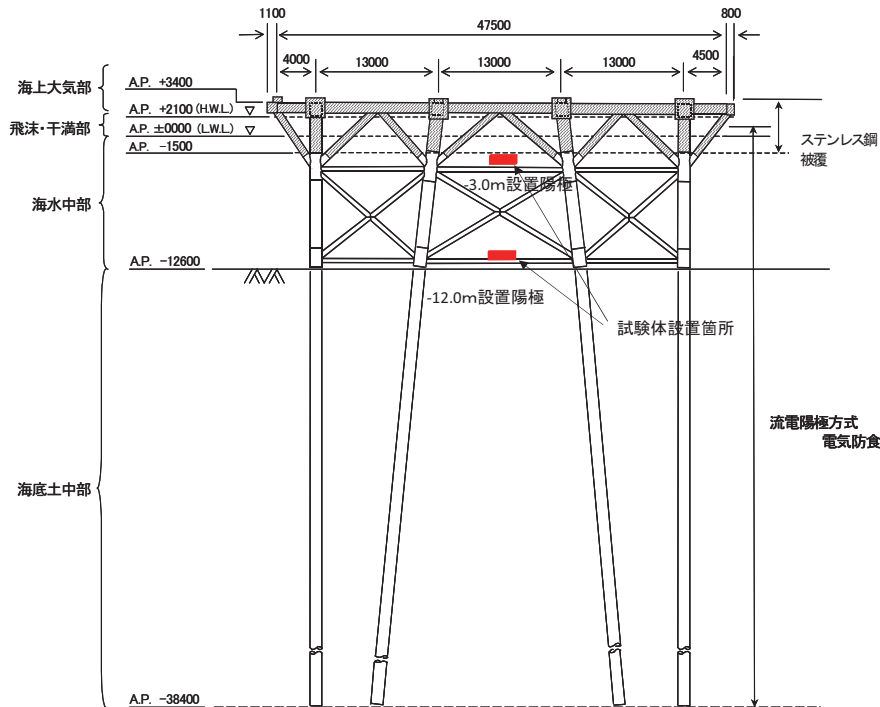


図-3.5 調査箇所概要（海側から見た位置）

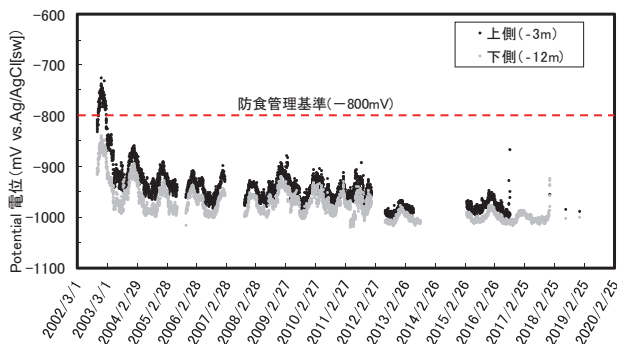


図-3.6 陰極電位の経時変化

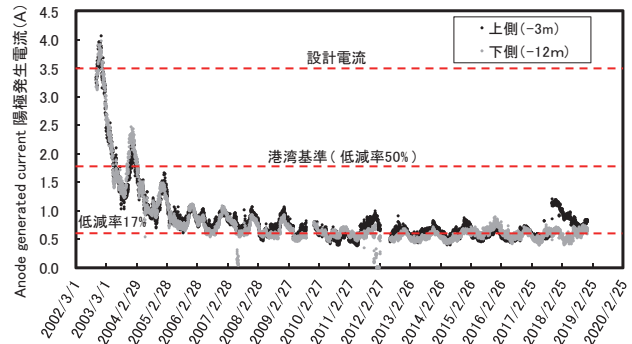


図-3.7 陽極発生電流の経時変化

次に水深-1.5mと-12mの陰極電位を比較すると、-1.5mの方が貴な値(4年目以降20~30mV)を示した。これは金属被覆であるステンレス鋼の電位が鋼(炭素鋼)の電位に比べて貴であることが影響していると考えられる。

陽極発生電流については、前述のように防食開始直後は設計値より大きな値を示したが、その後徐々に低下し、10年以上が経過した現在においては、0.5~1.0A(設計値の約1/3程度)まで低下し、「技術基準」の電流低減率50%を大きく下回った状態で安定した。この電流値の低下は、鋼材表面にエレクトロコーティング(石灰質皮膜)が徐々に形成されたためと考えられる。

また、電位、電流のいずれも季節変動があり、電流値は冬季に多く、夏季に小さくなる傾向を示し、電位は冬季に卑な値(マイナス側に大きな値)、夏季に貴な値(マイナス側に小さな値)を示した。この理由としては、溶存酸素濃度の季節変動が影響している可能性がある。一般的に、溶存酸素濃度が高いと、鋼材表面での腐食反応が進行しやすくなるため、より多くの防食電流が必要とされる。ただし、冬季においても、電位は管理基準電位を大きく下回っており、非常に良好な防食状態が維持されている。

以上の結果より、異種金属接触腐食が懸念される耐海水性ステンレスを被覆防食として鋼構造物に適用した場合でも、流電陽極方式電気防食により、防食対象の鋼部材は十分な防食状態に至っていると考えられた。また、今回対象の構造物において、陽極発生電流値は、適用後から時間とともに低減し、定常状態に至った段階において、設計で用いられている「電流低減率」は、設計値0.5を大きく下回っていた。

### 3.3 テストピースによる電気防食の効果に関する検討

#### 3.3.1 概要

現在、電気防食の効果の評価指標として、「技術基準」に記載されている防食率という指標が一般的に用いられている。防食率は(3.1)式で表されるとおり、無防食時の腐食速度( $C$ [mm/y])と防食時の腐食速度( $P$ [mm/y])の差を無防食時の腐食速度で除して算出されるものである。日本の港湾鋼構造物における電気防食の設計時において、適用範囲は平均干潮面M.L.W.L.以下とし、その際の防食率は90%を用いることが標準となっている。これは、1970年「港湾鋼構造物設計基準」<sup>3)</sup>に規定されたのが最初であり、流電陽極を設置する前の無防食期間における腐食しろなどを踏まえ、安全側の値として設定されたものであった。一方、最初から陽極が設置される場合、前述の

無防食期間は存在しないため、90%よりも高い防食効果が期待できる。

前述のように、既設構造物に電気防食が継続的に適用される場合、理論上にも経験的にも、鋼材の腐食速度はゼロに近いと考えられる。しかし、防食率に関して、適切な設計・施工・維持管理がなされた条件下においては、経験的には90%を上回っていることが知られているが、その実態を取りまとめた事例は少ない。また、実構造物において防食率を評価する際には無防食時の腐食速度が必要であるが、電気防食が適用された構造物において、無防食時の腐食速度を精度よく設定することは困難である。上記と電気防食効果に関する最新の知見を踏まえ、電気防食効果を表す指標に関しての検証も必要であると考えられる。

上述の課題に対して、電気防食の効果に関する最新の知見を踏まえ、電気防食の効果の実態および電気防食の効果を表す評価指標に関して検証が必要であると考えられる。そこで本論では、まず、国内の4港(東京港、四日市港、大阪港、北九州港)において、テストピースを用い4年間にわたる電気防食の効果の経時変化を調査した結果を基に、電気防食の効果を表す指標の経時変化を整理した。次に、上記の調査結果を踏まえ、全国の港湾施設に設置された多数のテストピース(計650組)を用い、電気防食の効果の実態の把握および電気防食の効果を表す指標に関し比較検証を行った。最後に、既往の知見も踏まえ、最適な電気防食の効果の評価指標について考察を行った。

#### 3.3.2 電気防食の効果の経年変化に関する検討

ここでは、適切に維持管理(定期的に防食状態を点検し、鋼材の電位が防食管理電位-800mV(vs.Ag/AgCl[SW])以下を常に維持)された4つの実構造物にテストピースを設置し、経年的に防食の効果を検査している事例<sup>4)</sup>を基に、電気防食の効果を表す複数の評価指標(防食率、防食効果)の経年変化の把握をまず行った。そして、この結果を踏まえ、電気防食の効果の評価指標の比較検討を行った。

##### 1) 試験方法

図-3.8に各4港(東京港、四日市港、大阪港、北九州港)に設置したテストピースの設置図を示す。各海域の海水抵抗率は $20\sim 30\Omega\cdot\text{cm}$ 程度であり、一般的な値と同様であった。また、各施設における設計防食電流密度(海水中)は、東京港及び大阪港が $130\text{mA}/\text{m}^2$ 、四日市港及び北九州港が $100\text{mA}/\text{m}^2$ であった。

テストピースは直径20mm、長さ50mmの円筒形で、材質はSS400である。これにハンドルとナットを取付け、

試験片表面を残して全面被覆した。このテストピースを図-3.8に示すように取付け、栈橋の鋼管杭の M.L.W.L. 以下の所定の水深に固定した。ここで、既設の陽極と電気的導通を確保することで、海中に設置すると同時に陽極からテストピースへ防食電流が流れるようにした。

このテストピースは、所定期間が経過後に回収され、表面の付着物（腐食生成物、電解生成物）を薬品処理にて除去した後、質量測定を行った。この質量を基に、無防食時の腐食速度  $C$  (mm/y)、防食時の腐食速度  $P$  (mm/y) を式(3.2)で算出し、これらを式(3.1)に代入し、防食率を求めた。

$$\text{腐食速度}(C, P) = \frac{(W_0 - W_1) \times 10}{\rho \times T \times S} \quad (3.2)$$

ここで、 $W_1$ : 試験後の質量 (g)、 $W_0$ : 試験前の質量 (g)、 $\rho$ : 密度 7.86 (g/cm<sup>3</sup>)、 $T$ : 試験期間 (y)、 $S$ : 表面積 (cm<sup>2</sup>) である。

ここで、防食率という指標は、無防食時の腐食速度  $C$  が必要となる。しかし、電気防食が適用された実構造物において、無防食時の腐食速度の評価は困難である。そこで、(3.3) 式で示すように、無防食時の腐食速度が不要な「防食効果 PE<sup>d)</sup>」という指標を用いた評価も行った。この指標の場合、電気防食が適用されたテストピースのみで評価が可能である。

$$\text{防食効果 PE} = \frac{W_1}{W_0} \times 100 \quad (3.3)$$

## 2) 試験結果

### ①電位の経年変化

各テストピースが設置された各 4 施設の陰極電位の経

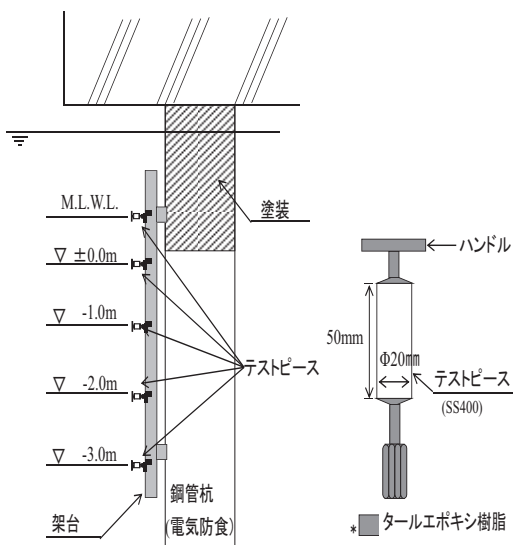


図-3.8 テストピース設置図

年変化を図-3.9に示す。各施設とも、防食管理電位-800 mV (vs.Ag/AgCl[SW]) を大きく下回っており、試験期間中を通して、良好な防食状態が維持されていた。

### ②電気防食の効果の経年変化

防食率と防食効果 PE の経時変化を図-3.10に示す。防食率は、各港湾とも時間とともに増加したが、港によ

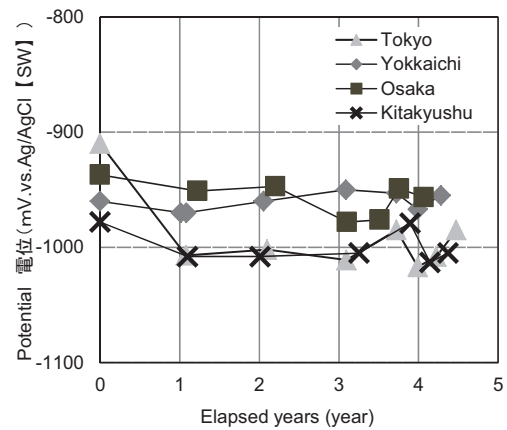


図-3.9 電位経時変化

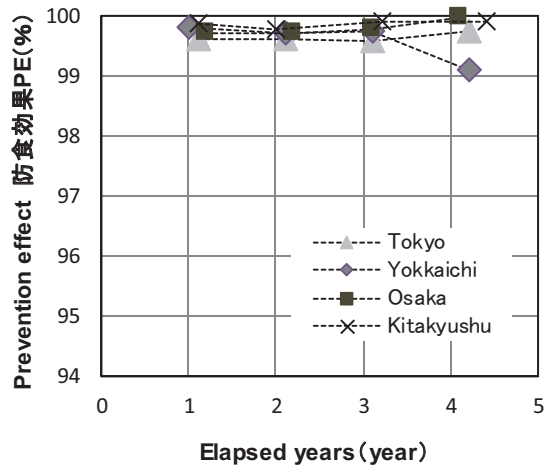
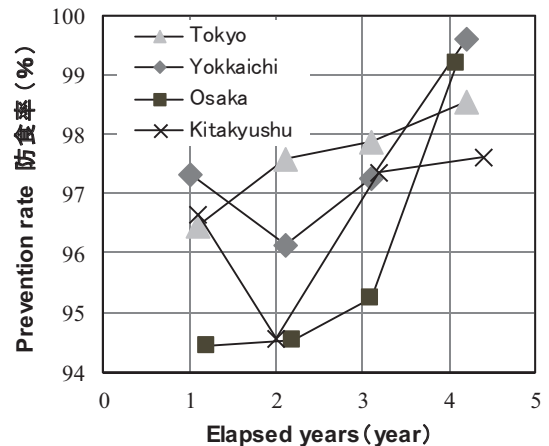


図-3.10 防食率、防食効果 PE の経時変化

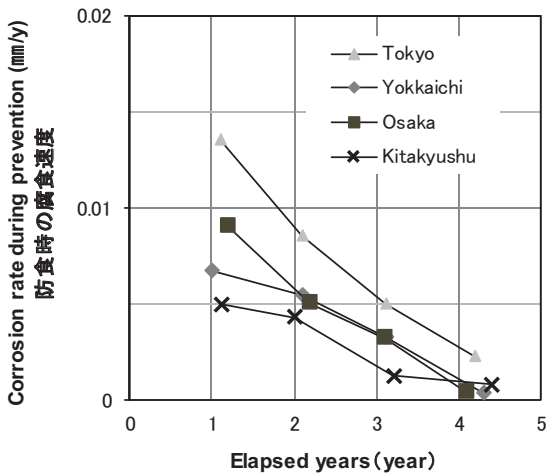


図-3.11 防食時の腐食速度と経過年数との関係

てばらつきが見られた。一方、防食効果 PE は、4 年間の範囲では大きな変化は見られなかった。

各港湾の防食時の腐食速度の経年変化を図-3.11 に示す。各港湾とも、時間の経過とともに、腐食速度（＝減量/時間）が小さくなる傾向が見られた。一方、図-3.10 の防食効果 PE（＝現在の質量/初期の質量）は時間と共に減少していない。これは、電気防食適用時において、腐食が進行していたのは初期のみで、ある程度時間が経過した後はほとんど腐食が進行していなかった（減量し

ていなかった）ことを表していると考えられる。言い換えると、陰極電位が定常状態に達した後（十分な防食状態に達した後）は腐食しにくいことを示唆していると考えられる。

### 3.3.3 テストピースを用いた電気防食の効果における全国調査

ここでは、日本の各地域におけるテストピースの調査結果を基に、電気防食の効果の実態をまず把握した。その際、電気防食の効果を表す評価指標として、一般的に用いられている防食率に加え、防食効果、防食時の腐食速度について比較し、防食時における最適な評価指標について検討した。

#### 1) 調査方法

調査に用いた代表的なテストピースの概略と設置した港を図-3.12 に示す。電気防食が適用された対象物に対し、電氣的に導通させた防食テストピースと絶縁材を介在させることで電氣的に絶縁させた無防食テストピースを 1 組とした試験体を設置した。調査対象となったテストピースは、1966 年から 2007 年の間に設置・回収され、L.W.L. で深に設置されていたものを検討対象とした。なお、平均的な設置期間は約 6 年である。また、テストピース設置時の陰極電位は不明である。

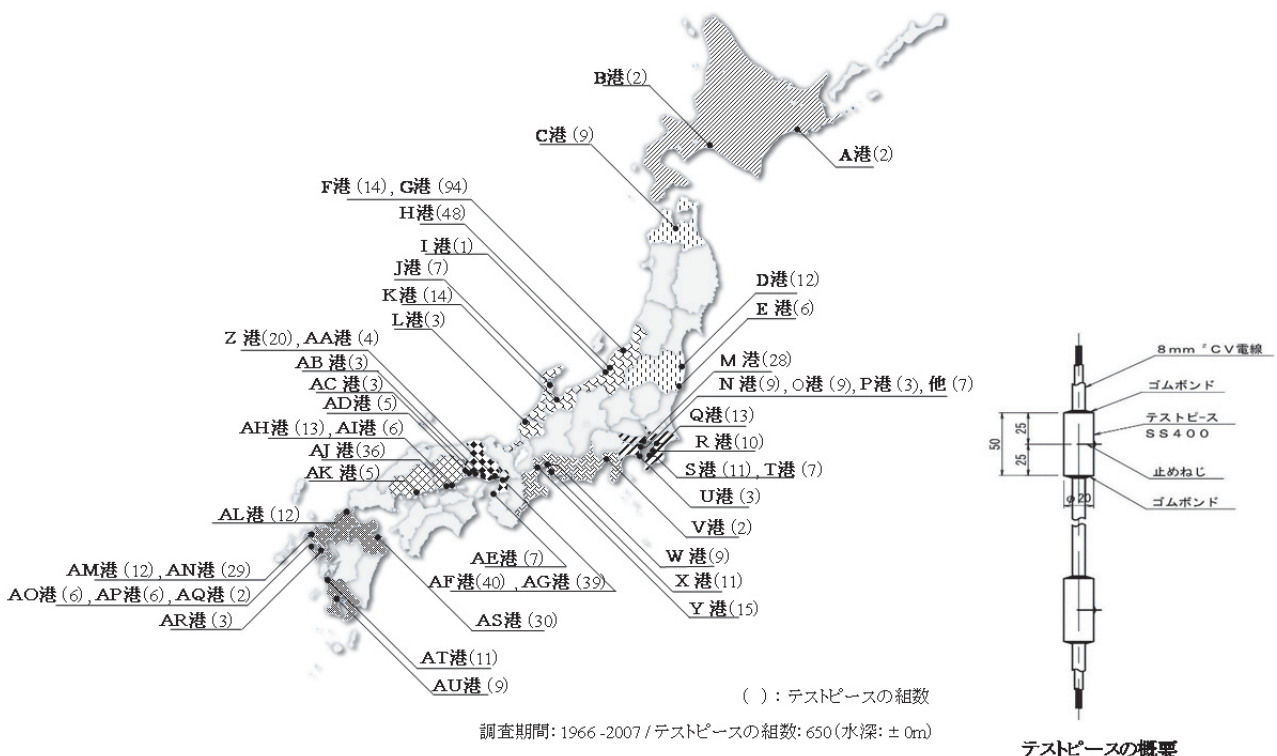


図-3.12 テストピースの概要及び全国の設置箇所



表-3.2 各港湾におけるテストピースの調査結果

地区区分	供試体	平均腐食速度 (mm/y)		平均防食率	平均防食効果
	Pcs	C	P	(%)	(%)
北海道	4	0.0644	0.0009	98.3	98.8
東北地方	27	0.1148	0.0026	97.5	99.8
北陸地方	181	0.1489	0.0015	98.9	99.7
東京湾	100	0.1818	0.0033	98.2	99.6
伊勢湾	37	0.1423	0.0022	98.6	99.8
大阪湾	121	0.1578	0.0019	98.7	99.8
瀬戸内	60	0.2279	0.0049	98.0	99.7
九州地方	120	0.1118	0.0021	97.9	99.8
全地方	650	0.1481	0.0024	98.2	99.7

C: 無防食試験体 P: 防食試験体

2) 調査結果

①無防食および防食時の腐食速度

各地域における無防食時および防食時の腐食速度を表-3.2に示す。なお、各地域の全数の平均値である。地域により無防食テストピースの腐食速度に差が見られた。北海道の腐食速度が低い値を示したのは、他の地域に比べて平均気温が低いことが原因と考えられる。一方、防食時の腐食速度は、いずれも非常に小さい値を示し、地域差がほとんど見られなかった。

腐食速度の累積確率分布図として、無防食時の場合を図-3.13、防食時の場合を図-3.14に示す。なお、累積確率は、データが出現する順番をデータの総数で除したものである。無防食時の腐食速度の平均値は0.148 mm/yであった。また、データの約80%程度が一般的な海水中の腐食速度0.1~0.3mm/yの範囲内の値を示した。一方、防食時の腐食速度の平均値は0.0024 mm/yであった。また、データ総数の97%程度が0.01 mm/y以下の非常に小さな値を示した。

②無防食時および防食時の腐食速度の比較

無防食時および防食時の腐食速度を比較したものを図

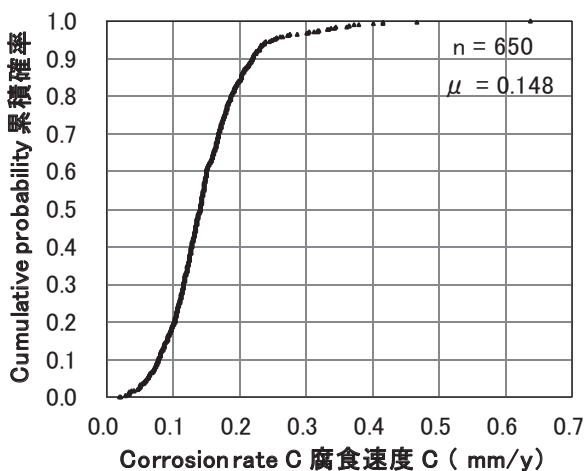


図-3.13 無防食テストピースの腐食速度の累積確率分布

-3.15に示す。なお、図中の点線は防食率(式(3.1))を90%とした場合の両者の関係式を示したものである。式(3.1)において、防食時の腐食速度と無防食時の腐食速度は相関があることが前提となっているが、防食時の腐食速度は防食率90%とした直線からかなり下方に外れており、両者の相関は不明確である。この結果は、電気防食の効果を表す指標として、防食率は適切でない場合があることを示唆するものである。

②電気防食の効果とその経年変化

各地域における防食率と防食効果PEを表-3.2に、図-3.16に防食率および防食効果PEの累積確率分布図を示す。防食率の平均値は98.2%、防食効果PEの平均値は99.7%であった。いずれの指標の場合においても、平均値は100%に近い値であった。

また、防食率と防食効果PEの経年変化を図-3.17に示す。防食率は、試験開始直後はばらつきが見られたが、経年的にばらつきが小さくなっている。試験開始直後にばらつきが見られた理由の1つとして、前述のように、防食率は無防食時の腐食速度と防食時の腐食速度の両者から計算されるが、試験開始直後は無防食時の腐食速度がばらつきやすく、結果として値がばらついたことが考えられる。一方、防食効果PE(=現在の質量/初期の質量)については、試験開始直後はばらつきが比較的少ない。この理由の1つとしては、防食効果PEは無防食時の腐食速度の影響を受けないことが考えられる。一方、時間とともに値が低下傾向にある。これは、防食効果PEの式が時間的な要因を含まないことが主に影響していると考えられる。以上のことは、電気防食の効果を表す指標として、防食効果PEは適切でない場合があることを示唆するものである。

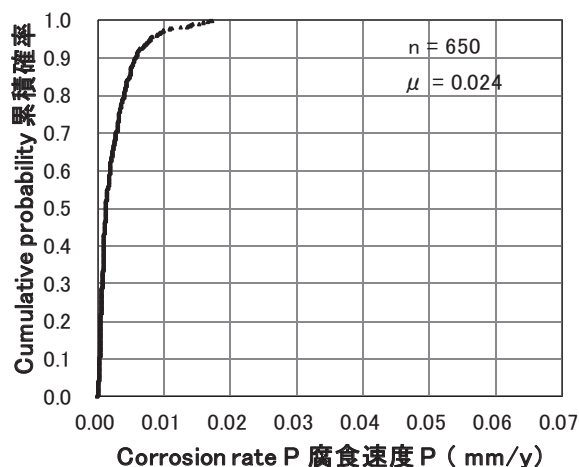


図-3.14 防食テストピースの腐食速度の累積確率分布

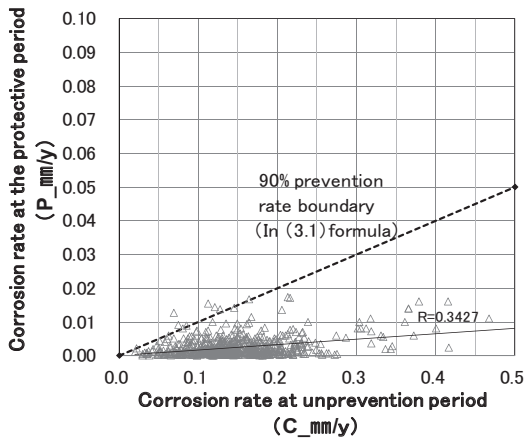


図-3.15 無防食時と防食時の腐食速度の比較

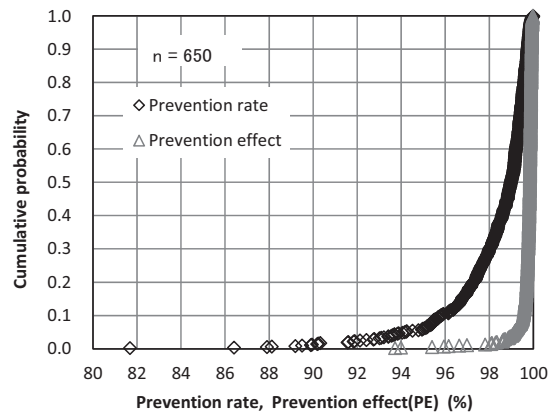


図-3.16 防食率および防食効果の累積確率分布図

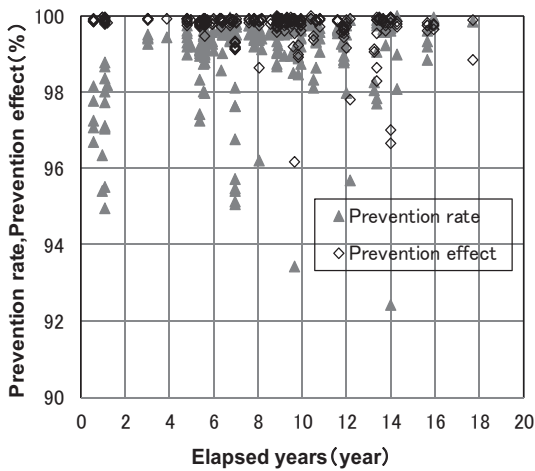


図-3.17 防食率と防食効果の経時変化

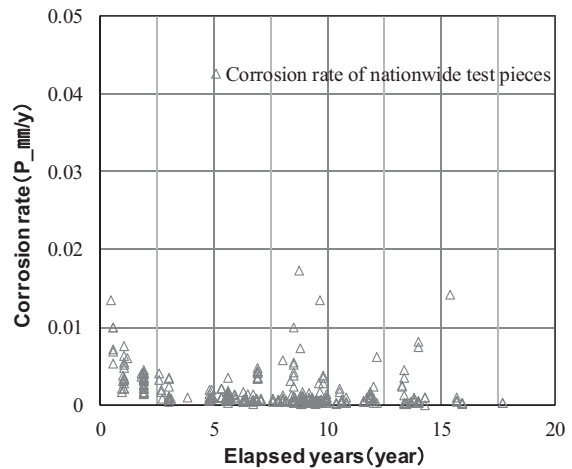


図-3.18 防食時の腐食速度の経時変化

次に、防食時の腐食速度の経年変化を図-3.18に示す。4年程度経過した頃までは全体的に腐食速度に減少傾向が見られるが、5年経過以降、一部にはばらつきが見られるものの、0に近い値に収束する傾向がみられる。これは3.2.2で示したように、防食適用初期には減肉しやすいが、定常状態に達した後は減肉しにくいことを示唆している。

上記の結果と、一般的な港湾施設に対する電気防食適用期間が10年以上の長期にわたる場合が大半であることを踏まえ、経過年数5年以上の場合におけるテストピースの結果を抽出し、防食時の腐食速度の累積確率分布を求めた結果を図-3.19に示す。なお、平均値と標準偏差を正規分布曲線に代入して累積確率分布を求めたものも図中に併記した。経過年数が5年以上の場合、防食時の腐食速度は0.01mm/y以下の値(実測値)が99%程度であった。

### 3.3.4 電気防食適用時における最適な評価指標の検討

これまでの結果より、電気防食の効果を表す指標の条件として、防食時の状態のみを用い、かつ時間的な要因を含む場合、すなわち「防食時の腐食速度」で評価することがより適していると考えられた。

ここで、「防食時の腐食速度」として電気防食の効果を評価するためには、施設の防食状態が適切に維持されていることが前提となる。その際の「防食時の腐食速度」の値を検証するため、陰極電位が防食管理電位-800mV(vs.Ag/AgCl[SW])を満足する場合の腐食速度について、既往の試験結果(室内試験および実海域での試験)を基に整理を行った。

室内試験と実海域での試験における、陰極電位(鋼材電位)と腐食速度の関係を図-3.20に示す<sup>5)</sup>。ここで、室内試験においては、水槽中に試験片を浸漬し、陰極電位の設定値を変化させた際の、陰極電位と腐食速度との関係が試験されている。実海域における試験では、試験

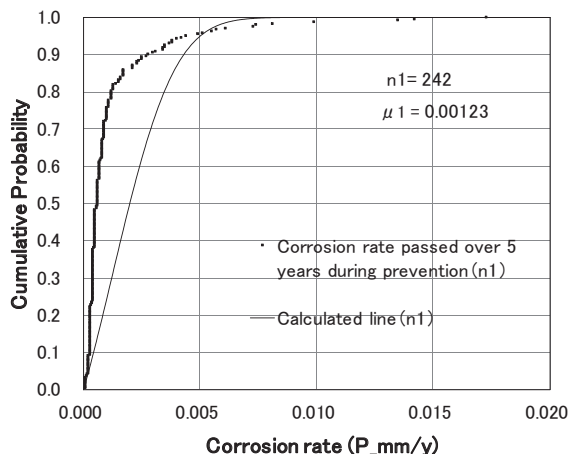


図-3.19 防食時の腐食速度の累積確率分布

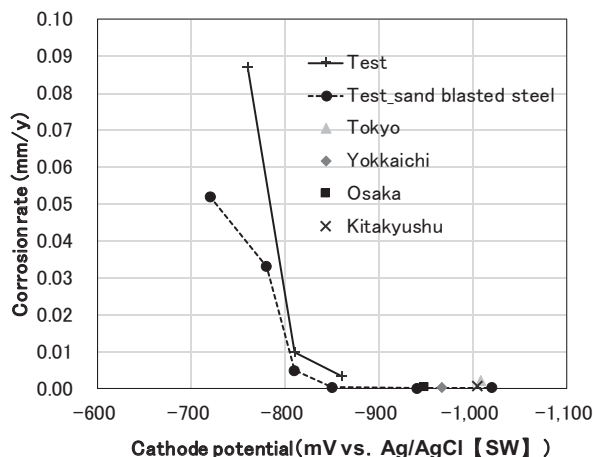


図-3.20 陰極電位と腐食速度の関係

開始から5年程度経過後の陰極電位と腐食速度の関係が測定されている。陰極電位が防食管理電位 $-800\text{mV}$  (vs. Ag/AgCl[SW]) 以下<sup>6)</sup>に維持されていた場合、いずれの試験結果においても、鋼材の腐食速度はほぼ $0.01\text{mm/y}$  以下であった。また、 $-800\text{mV}$  よりも陰極電位を低下させた場合、腐食速度はさらに減少した。

以上より、電気防食効果の指標として、下記 i)ii)の港湾構造物における一般的な2つの前提条件を満足する場合には鋼材の腐食速度は $0.01\text{mm/y}$  程度以下となると考えられる。

i)一般の海洋環境下（高波浪海域は除く）におけるM.L.W.L.以下の範囲である場合

ii)適切な防食設計、施工および維持管理がなされている場合

なお、防食時の腐食速度に関して、ISO 12472 ‘General Principles of cathodic protection in seawater’ においても同様な記述がある<sup>7)</sup>。以下に原文を示す。

‘For industrial structures, residual corrosion rates less than  $10\mu\text{m/yr}$  ( $=0.01\text{mm/年}$ ) are typically achieved with a fully effective cathodic protection system.’

ただし、今回の検討はテストピースによる調査結果のみに基づいているため、今後は実構造物（もしくは模した試験体）での確認が必要と考える。

### 3.3.5 まとめ

経年変化を記録した4港湾の調査結果、様々なケースでのテストピースの全国調査結果より、電気防食の効果を表す評価指標について検証した結果を以下に示す。

・防食率という評価指標は、無防食時および防食時の腐食速度から算出される。今回、防食時の腐食速度には変

化は少なかったが、無防食時の腐食速度は大きくばらつきが見られた。結果として、防食率の値には若干のばらつきが見られた。しかし、その値の大半は90%を上回っており、今回の全平均値は98.2%、標準偏差 $\sigma$ は2.05であった。

・防食効果 PE という評価指標は、防食時の状態のみで算出するものであり、無防食時の腐食速度の影響を受けないため、ばらつきが少ない。ただし、本指標は時間的な要因を含まないため、経年的に現在質量が減少することにより、値は減少する傾向を示した。なお、今回の全平均値は99.7%、標準偏差 $\sigma$ は0.25であった。

・以上を踏まえ、電気防食の効果を表す指標の条件として、防食時の状態のみを用い、かつ時間的な要因を含む場合、すなわち「防食時の腐食速度」で評価することがより適していると考えられた。下記 i)ii)の港湾構造物における一般的な2つの前提条件を満足する場合には鋼材の腐食速度は $0.01\text{mm/y}$  程度以下となると考えられる。

i)一般の海洋環境下（高波浪海域は除く）におけるM.L.W.L.以下の範囲である場合

ii)適切な防食設計、施工および維持管理がなされている場合

ただし、今回の検討は、テストピースによる調査結果のみに基づいているため、今後は実構造物（もしくは模した試験体）での確認が必要と考える。

### 3.4 実港湾構造物における電気防食の効果の評価

#### 3.4.1 はじめに

実港湾鋼構造物における電気防食の効果を「防食率」や「防食時の腐食速度」として評価する場合、「時間」の要因が必要となるため、異なる2時期で、かつ同一の場所で肉厚を測定する必要がある。

また、鋼管杭及び鋼矢板において、工場製作後の鋼材肉厚に「許容差」があり、設計値と実際の肉厚が異なる場合がある。実港湾鋼構造物における電気防食の効果を確認する際においては、電気防食適用後の減肉量が非常に小さいため、上述の許容差を極力除去する必要がある。

上記を踏まえ、異なる2時期に鋼材肉厚測定が実施されており、初期値の許容差による影響が無い2施設（A港、B港）における調査結果を基に、実港湾鋼構造物における電気防食の効果（ここでは「防食時の腐食速度」のみ）の評価を試みた。また、実鋼構造物における評価時の課題についても整理を行った。

#### 3.4.2 鋼管矢板における事例（A港）

##### 1) 調査施設の概要

調査対象は、1981年に建造され、下部工に鋼管矢板（φ914.4mm t14.0mm）が打設された計画水深-12.0mの延長260mの岸壁である。上部工下端からL.W.L.-1.0mまでタールエポキシ樹脂により被覆防食が適用されている。また、建設当時から電気防食が適用され、陽極の更新が継続的に実施されている。施設の断面および調査位置の概要を図-3.21に示す。なお、電気防食設計において、初期防食電流密度は海中部：100mA/m<sup>2</sup>、海底土中部：20mA/m<sup>2</sup>である。

##### 2) 鋼材電位

流電陽極の更新（取替え）前後に実施した電位測定の深度分布（6測線の平均値）を図-3.22に示す。電気防食の陽極更新前の電位は-996～-1006mV（vs.SSE[SW]）であり、防食管理電位（-800mV vs.SSE[SW]）を大幅に下回っており、良好な防食状態であった。また、陽極更新1週間後の電位は-1049～-1058mV（vs.SSE[SW]）となっており、陽極閉路電位（-1050mV vs.SSE[SW]）に近い値となった。陽極の更新の直後においても良好な防食状態が維持されていることが分かる。

##### 3) 鋼材肉厚および防食時の腐食速度

鋼管矢板の肉厚測定は、超音波式肉厚測定器を用いて実施した。なお、肉厚測定箇所は10年前（2002年実施）に肉厚測定を実施した箇所と極力同じ箇所、追跡調査を実施した。

2002年と2012年に実施した肉厚測定結果の比較を表

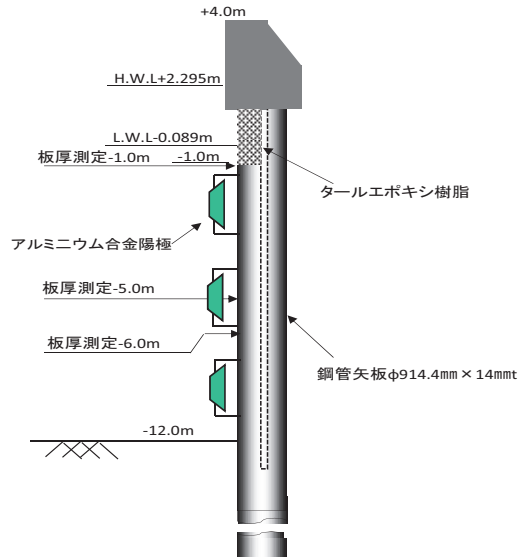


図-3.21 断面図および板厚測定位置図

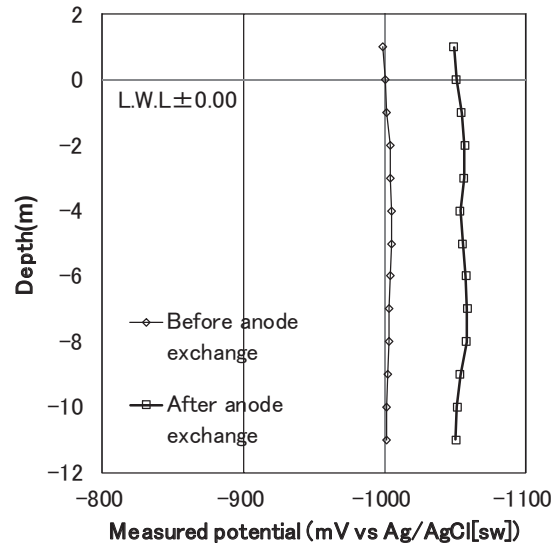


図-3.22 電気防食取替え前後の水深別平均電位

表-3.3 水深別肉厚測定結果および腐食速度（A港）

調査水深 (m)	公称元厚 (mm)	平均肉厚 (mm)		電気防食時の腐食量 (mm)	素地面調整を考慮した腐食速度 (mm/y)		
		2002年	2012年		0 μm	55 μm	200 μm
-1.0	14.0	13.82	13.56	0.26	0.022	0.017	0.003
-5.0		13.74	13.45	0.29	0.023	0.011	0.005
-6.0		13.81	13.41	0.4	0.034	0.026	0.016

素地面調整の削りしろを考慮しない場合0 μm、55 μm (=0.055mm)の場合および200 μm (=0.2mm)の場合として腐食速度を算出した。

-3.3、各測定地点の鋼材肉厚の深度分布を図-3.23、素地面調整（削りしろ）を考慮した場合の腐食速度の深度分布を図-3.24に示す。なお、素地面調整（削りしろ）の値（55 μmおよび200 μm）については、付録Aの結果を基に設定した。素地面調整時の鋼材の削りしろを55 μm

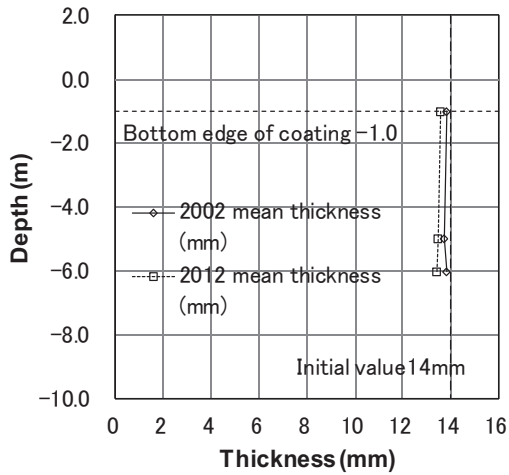


図-3.23 鋼材肉厚の深度分布

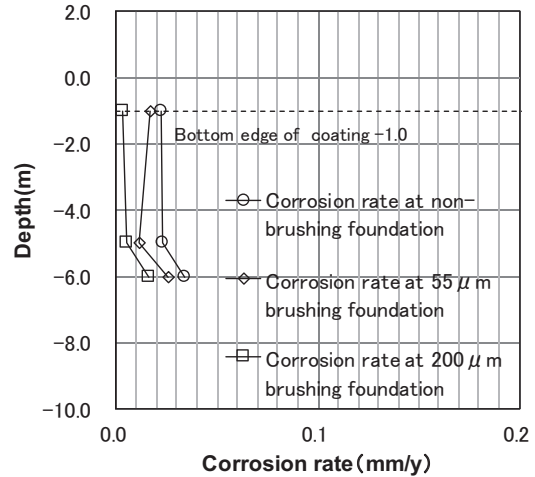


図-3.24 防食時の腐食速度の深度分布

とした場合の腐食速度は0.017~0.029mm/y、削りしろを200 $\mu$ mとした場合の腐食速度は0.003~0.016 mm/yの範囲にあった。一方、削りしろを考慮しない場合、0.026~0.04mm/yとなり、3.3の結論で示した0.01mm/yよりもかなり大きい値を示した。図-3.22の電位測定結果からも、本施設は電気防食状態が非常によく、腐食速度がこの程度の値(0.026~0.04mm/y)を示すことは考えにくい。今回の調査結果には削りしろの影響や、その他の測定誤差(計測地点のずれ等)が含まれている可能性が高いと考える。

上記のように、電気防食を適用した場合の鋼材の腐食速度は、減肉量が小さいため、肉厚測定時の鋼材表面の素地調整による削りしろや、各種の計測誤差が大きな影響を与えやすいため、肉厚測定を基に防食効果を評価するのは非常に難しいことが分かる。

### 3.4.3 鋼管杭式棧橋における事例 (B港)

#### 1) 調査施設の概要

調査対象は、1975年1月に建造された鋼管杭式棧橋(計画水深-12.0m、延長300m)であり、下部工は $\phi$ 1050~1200mm、 $t=12.0$ mmの鋼管杭である。施設の断面を図-3.25に示す。上部工下端から-0.5mまでモルタル被覆が適用されている。

建設当時(1976年2月)から電気防食が適用され、陽極の更新が継続的に実施されている(2000年3月に4回目の更新が実施)。なお、電気防食設計において、初期防食電流密度は海中部130 mA/m<sup>2</sup>、海底土中部26 mA/m<sup>2</sup>である。

#### 2) 鋼材電位

鋼材電位(平均値)の経時変化を図-3.26に示す。2002年以降、電位は-1000mV(vs.SSE[SW])以下であった。防食管理電位-800mV(vs.SSE[SW])を大幅に下回って

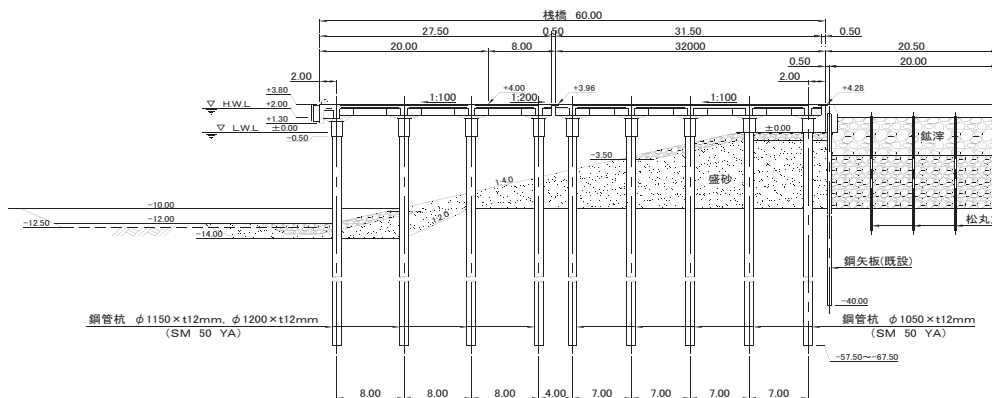


図-3.25 調査施設断面

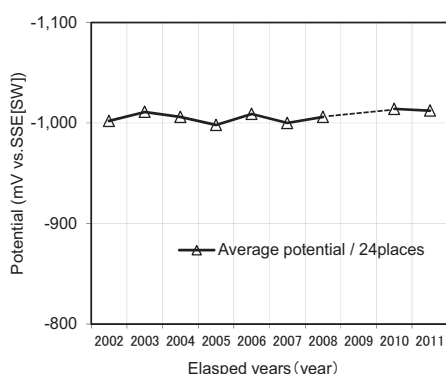


図-3.26 電位の平均値の経時変化

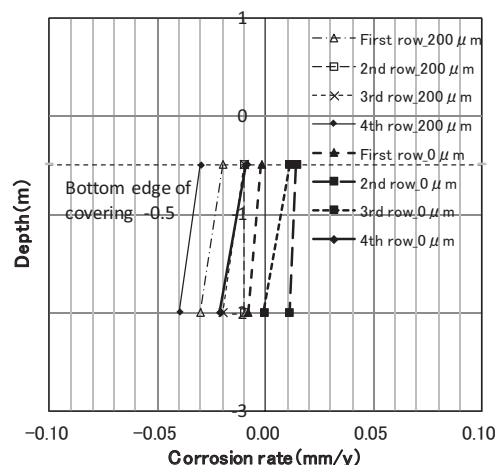


図-3.27 防食時の腐食速度の深度分布  
(削りしろ 0, 200μm の場合)

表-3.4 鋼材肉厚および腐食速度 (B 港)

	測定水深	年度	平均肉厚 (mm)	素地面調整を考慮した腐食速度 (mm/y)		
				0 μm	55 μm	200 μm
第1列目	-0.5	H13	11.26	-0.002	-0.008	-0.024
		H22	11.27	-0.002	-0.008	-0.024
	-2	H13	11.41	-0.008	-0.014	-0.030
		H22	11.49	-0.008	-0.014	-0.030
第2列目	-0.5	H13	11.14	0.014	0.008	-0.009
		H22	11.02	0.014	0.008	-0.009
	-2	H13	11.53	0.011	0.005	-0.012
		H22	11.43	0.011	0.005	-0.012
第3列目	-0.5	H13	11.26	0.011	0.004	-0.012
		H22	11.16	0.011	0.004	-0.012
	-2	H13	11.42	-0.001	-0.007	-0.023
		H22	11.43	-0.001	-0.007	-0.023
第4列目	-0.5	H13	11.12	-0.009	-0.015	-0.032
		H22	11.20	-0.009	-0.015	-0.032
	-2	H13	11.44	-0.021	-0.027	-0.043
		H22	11.63	-0.021	-0.027	-0.043

おり、非常に良好な防食状態であった。

### 3) 鋼材肉厚および防食時の腐食速度

鋼管杭の肉厚測定は、超音波式肉厚測定器を用いて実施した。なお、2010年度に実施した肉厚測定箇所は、2001年度の実施箇所と極力同じとなるように測定箇所を設定した。2001年度と2010年度の鋼材肉厚および腐食速度を表-3.4に示す。また、素地調整による削りしろを0および200μmとした場合の腐食速度の深度分布を図-3.27に示す。削りしろを考慮した場合でも、腐食速度はマイナスの値を示した。これは、2010年度の方が鋼材肉厚が大きく計測されたためである。この理由としては、厳密には場所を同じに設定できなかったことや、作業者の違い(技量)による影響等が考えられる。

電気防食適用時の鋼材の肉厚の変化により腐食速度を用いて、電気防食の効果を評価するための肉厚測定の留意点として、作業面において出来るだけ同一箇所で測定できるように記録(例えば、調査水深、方向のズレが無いような位置出しを実施)し、作業面から生じる誤差を無くす必要がある。

### 3.4.4 実構造物での防食効果の評価時の課題

#### (1) 本調査結果のまとめ

A港およびB港の実港湾構造物において、異なる2時期に測定された鋼材肉厚調査結果を基に、実構造物での防食効果についてまとめた。

- ・A港の結果において、素地面調整時の削りしろを考慮した場合、0.01mm/y(テストピース調査結果より提案された電気防食適用時の腐食速度)程度以下であった。
- ・B港の結果において、一部の鋼材肉厚は、前回の測定時に比べて増加した。この理由としては、測定場所が厳密には同じでは無かったこと等が考えられる。

上記のように、電気防食適用時には、鋼材の減肉量が少ないため、各種の計測誤差(初期値のずれ、素地面調整、場所のずれ等)の影響が非常に大きくなる。現地での防食効果の評価時には、肉厚測定を精度よく行う必要があることが改めて確認された。

#### (2) 実構造物での防食効果の評価時の課題

実構造物調査により防食効果(防食率、腐食速度等)を評価する場合、初期値もしくはある時点での測定値が必要となる。しかし、実際において、これが不明もしくは無い場合が大半と考えられる。この場合、手法としては以下の2つが考えられる。

##### i) 異なる2材齢で肉厚を測定する

##### ii) (陽極更新時に向けて) テストピースを予め数年間設置し、評価する

なお、i)の場合、電気防食適用時には、鋼材の減肉量が少ないため、各種の計測誤差(初期値のずれ、素地面調整、場所のずれ等)の影響が非常に大きくなる。

異なる2時期での肉厚測定時においては、出来るだけ同一箇所測定できるように記録（例えば、調査水深、方向のズレが無いような位置出し方法）し、作業面から生じる誤差を軽減する必要がある。

ii)の場合、第3章で示しているように、テストピースの設置期間が長い方が腐食速度は小さい値に収束する傾向がある。そのため、理想としてはできるだけ長期間（5年間程度以上）設置する方が望ましい。また、通常テストピースは水中溶接により設置される。より簡便な設置方法があると、調査の実施がより容易となる。

i) ii)の調査が難しい場合、実構造物における電気防食の効果の評価は、「既往の知見を踏まえて（安全側に）評価する」ということになる。この際に用いる設定値としては、対象部材が置かれる地点と同様の環境条件でのテストピースによる調査結果や、本文の知見が参考になる。

### 3.5 まとめ

#### 1) 電気防食特性の経時変化

東京港・大井ふ頭のジャケット式栈橋において、14年以上の長期にわたり、電気防食特性（鋼材電位および陽極発生電流）についてモニタリングを実施した結果、得られた主な知見を以下に示す。

(1)鋼材電位は、季節変動しており、冬季に貴側（プラス側）、夏季に卑側（マイナス側）に推移した。また、時間とともに定常値に収束しており、今回の場合、初年度以降は-900~-1000mVの防食状態が良好とされる値を示した。

(2)陽極発生電流は、鋼材電位と同様に季節変動があり、冬季に多く、夏季に小さくなる傾向を示した。この理由としては、溶存酸素濃度の季節変動が影響している可能性がある。一般的に、溶存酸素濃度が高いと、鋼材表面での腐食反応が進行しやすくなるため、より多くの電流が必要とされる。ただし、冬季においても、電位は管理基準電位を大きく下回っており、非常に良好な防食状態が維持されている。

また、時間の経過とともに徐々に値が低下し、10年以上が経過した現在においては、0.5~1.0A（設計値の約1/3程度）まで低下し、電気防食設計で用いられている電流低減率50%を大きく下回った状態で安定していた。これは、鋼材表面にエレクトロコーティング（石灰質皮膜）が徐々に形成されたためと考えられる。

#### 2) テストピースによる電気防食の防食効果

経年変化を記録した4港湾の調査結果、様々なケースでのテストピースの全国調査結果より、電気防食の効果を表す評価指標について検証した結果を以下に示す。

・防食率は「無防食時の腐食速度」および「防食時の腐食速度」から算出される（式(3.1)参照）。全国で実施された、多数のテストピースによる調査結果において、「防食率」の大半は90%を大きく上回っており、全平均値は98.2%、標準偏差は2.05であった。なお、「防食時の腐食速度」はほぼゼロに近い値を示しており、結果として、「無防食時の腐食速度」と「防食時の腐食速度」の相関は高くない。また、「防食率」の評価時に「無防食時の腐食速度」が必要となるため、電気防食が適用された構造物において、「防食率」の実態を直接的に求めることはできないという課題もある。

・防食効果PEという評価指標は、防食時の状態のみで算出するものであり、無防食時の腐食速度の影響を受けないため、ばらつきが少ない。ただし、本指標は時間的な要因を含まないため、経年的に現在質量が減少することにより、値は減少する傾向を示した。なお、今回の全平均値は99.7%、標準偏差σは0.25であった。

・以上を踏まえ、電気防食の効果を表す指標の条件として、防食時の状態のみを用い、かつ時間的な要因を含む場合、すなわち「防食時の腐食速度」で評価することがより適していると考えられた。下記i)ii)の港湾構造物における一般的な2つの前提条件を満足する場合には鋼材の腐食速度は0.01mm/y程度以下となると考えられる。

i)一般の海洋環境下（高波浪海域は除く）におけるM.L.W.L.以下の範囲である場合

ii)適切な防食設計、施工および維持管理がなされている場合

ただし、今回の検討は、テストピースによる調査結果のみに基づいているため、今後は実構造物（もしくは模した試験体）での確認が必要と考える。

#### 3) 実構造物での防食効果

A港およびB港の実港湾構造物において、異なる2時期に測定された鋼材肉厚調査結果を基に、実構造物での防食効果についてまとめた。

・A港の結果において、素地面調整時の削りしろを考慮した場合、0.01mm/y（テストピース調査結果より提案された電気防食適用時の腐食速度）程度以下であった。

・B港の結果において、一部の鋼材肉厚は、前回の測定時に比べて増加した。この理由としては、測定場所が厳密には同じでは無かったこと等が考えられる。

上記のように、電気防食適用時においては、鋼材の減肉量が少ないため、各種の計測誤差（初期値のずれ、素地面調整、場所のずれ等）の影響が非常に大きくなる。現地での防食効果の評価時においては、肉厚測定を精度

よく行う必要があることが改めて確認された。

in seawater.

#### 4) 実構造物での防食効果の評価時の課題

実構造物調査により防食効果（防食率、腐食速度等）を評価する場合、初期値もしくはある時点での測定値が必要となる。しかし、実際において、これが不明もしくは無い場合が大半と考えられる。この場合、手法としては以下の2つが考えられる。

i) 異なる2材齢で肉厚を測定する

ii)（陽極更新時に向けて）テストピースを予め数年間設置し、評価する

なお、i) の場合、電気防食適用時においては、鋼材の減肉量が少ないため、各種の計測誤差（初期値のずれ、素地面調整、場所のずれ等）の影響が非常に大きくなる。異なる2時期での肉厚測定時においては、出来るだけ同一箇所でも測定できるように記録（例えば、調査水深、方向のズレが無いような位置出し方法）し、作業面から生じる誤差を軽減する必要がある。

ii)の場合、第3章で示しているように、テストピースの設置期間が長い方が腐食速度は小さい値に収束する傾向がある。そのため、理想としてはできるだけ長期間（5年間程度以上）設置する方が望ましい。また、通常テストピースは水中溶接により設置される。より簡便な設置方法があると、調査の実施がより容易となる。

i) ii)の調査が難しい場合、実構造物における電気防食の効果の評価は、「既往の知見を踏まえて（安全側に）評価する」ということになる。この際に用いる設定値としては、対象部材が置かれる地点と同様の環境条件でのテストピースによる調査結果や、本文の知見が参考になる。

#### 参考文献（第3章）

- 1) H.H.Uhlig, R.W.Revie : Corrosion and Corrosion Control(第3版), pp.59-61, 1989.
- 2) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説, 2009.
- 3) 運輸省港湾局：港湾鋼構造物設計基準, p.2-3-8, 1970.
- 4) 山路徹, 審良善和, 佐藤俊二, 白石弘, 吉田倫夫, 船山嘉美, 阿部正美：電気防食を適用した港湾鋼構造物の適切な維持管理下における防食効果（全国4港湾における試験結果）, 防錆管理, Vol.52, No.2, pp.41-44, 2008.
- 5) 建設省土木研究所：海域における土木構造物の電気防食に関する共同研究報告書, pp.6-7, 1991.
- 6) 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）, 2009.
- 7) ISO 12472:2017 : General Principles of cathodic protection



## 4. 干満帯付近における電気防食の効果に関する検証

### 4.1 概要

港湾鋼構造物において、M.L.W.L.直下付近の集中腐食を抑制するために、図-4.1 に示すように L.W.L.-1(m)以浅は被覆防食，M.L.W.L.以深は電気防食を行うのが一般的である<sup>1) 2)</sup>。一方、浸漬率（鋼材が水中に浸漬している時間の割合）の大きい範囲までは十分に電気防食の効果が発揮される場合があることも経験的にも知られている。この場合、被覆防食については、電気防食の効果が十分に及ばない浸漬率が小さい範囲に対して適用しておけば、鋼部材に対する防食性能上は問題ないこととなる。

上述の知見を踏まえ、現地での施工条件や構造形式の都合上、鋼構造物の被覆防食の下限深度の変更（L.W.L.-1(m)より引き上げ）を検討する場合もある。しかし、1) 技術基準で L.W.L.-1(m)以上への被覆防食の適用が標準となっている、2) L.W.L.周辺での電気防食効果の実態についての報告例が少ない、3) 集中腐食のメカニズムが明確でない、などの理由から、下限深度の変更の判断が難しい場合もある。

そこで本章では、干満帯付近での電気防食の効果の実態、特に防食効果と浸漬率の関係について検討を行うため、1) 被覆防食の下端が M.L.W.L.である実構造物での

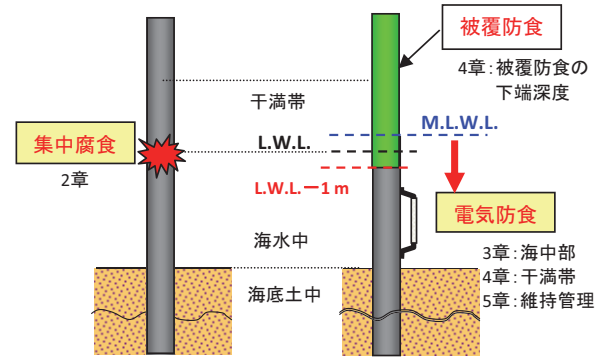


図-4.1 防食工法の適用範囲

調査、2) 実環境での長尺試験体による暴露試験を実施した。また、3) 干満帯周辺における電気防食の設計条件（防食電流密度）が防食効果に及ぼす影響を確認するため、屋外水槽（海水循環水槽）における暴露試験を実施した。

### 4.2 実構造物調査による検証

#### 4.2.1 概要

4.1 で述べたように、港湾鋼構造物において、L.W.L.周辺での電気防食の効果の実態についての報告例は少ない。ここでは、被覆防食の下端深度が M.L.W.L.（平均干潮面）である実構造物に対し、電気防食の効果の実態調査を行った。

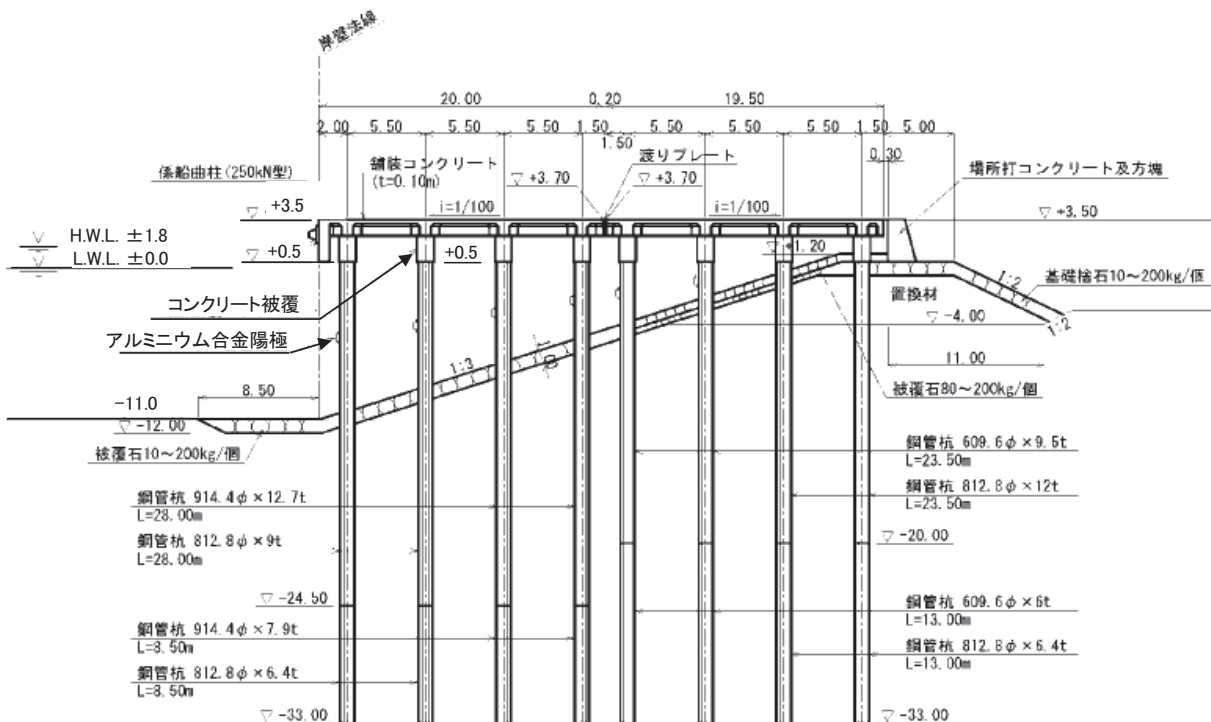


図-4.2 標準断面図

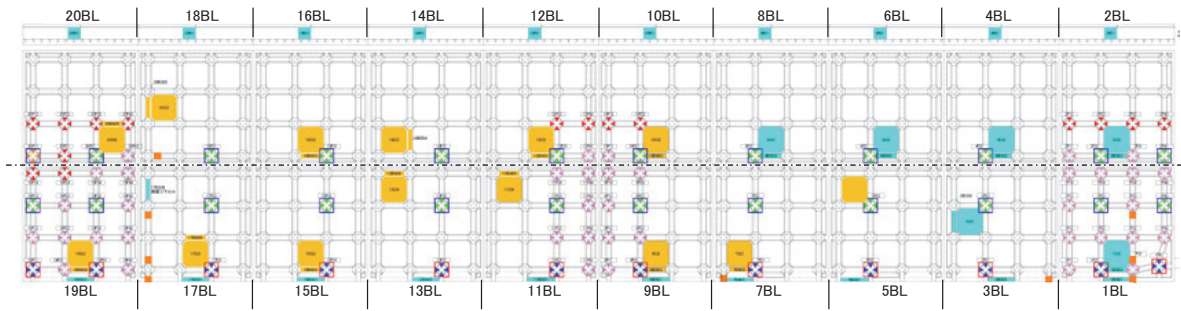


図-4.2 栈橋平面図（着色杭：調査対象杭）

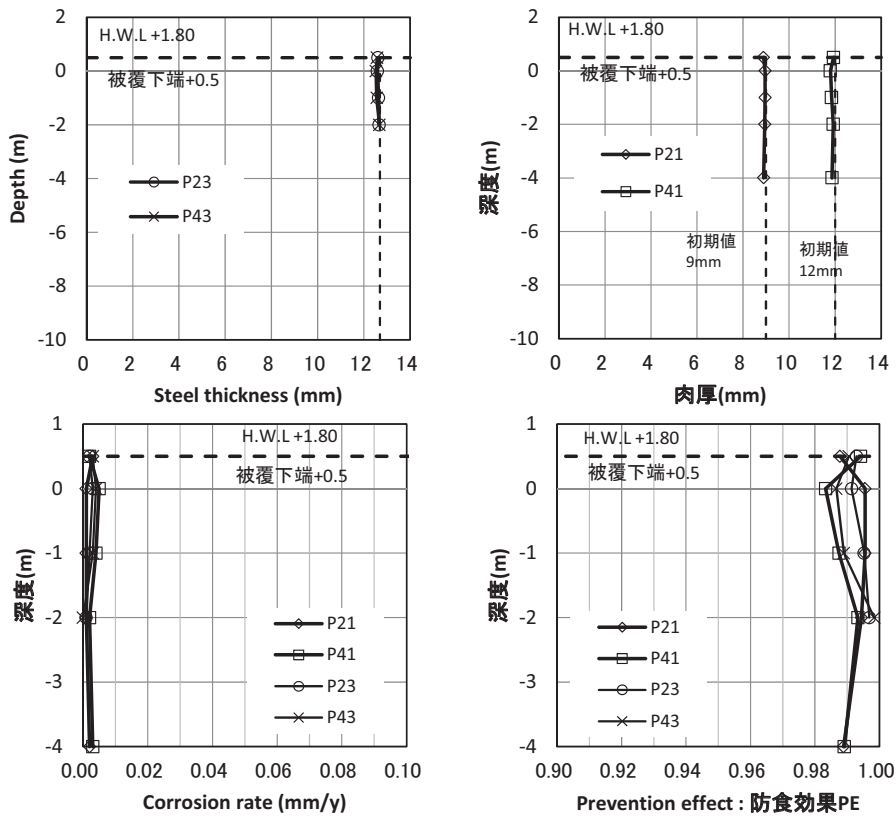


図-4.3 1ブロックにおける調査結果（肉厚，腐食速度，防食効果PE）の一例

表-4.1 防食効果の測定結果一覧

BL	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	全
個数	42	16	9	4	9	4	9	4	21	8	21	8	9	4	9	4	9	4	40	14	248
平均	0.989	0.973	0.984	0.983	0.990	0.975	0.984	0.964	0.966	0.976	0.963	0.976	0.970	0.984	0.967	0.960	0.967	0.973	0.985	0.979	0.977
標準偏差	0.008	0.014	0.014	0.009	0.005	0.018	0.020	0.004	0.023	0.009	0.031	0.011	0.027	0.002	0.023	0.021	0.015	0.006	0.010	0.017	0.020

	+0.5m	0m	-1m	-2m	-4m	海中*
個数	36	90	36	74	12	212
平均	0.979	0.974	0.982	0.979	0.972	0.977
標準偏差	0.015	0.023	0.012	0.017	0.026	0.020

\*海中:+0.5mを除いたデータ

#### 4.2.2 調査概要

徳島県小松島港栈橋の標準断面図を図-4.1 に示す。  
H.W.L.は+1.80m，M.L.W.L.は+0.50m，コンクリート被覆

下端は+0.50m である。今回の調査時までの経過年数は44年である。なお、この間、電気防食が途切れた時期はないとの記録がある。

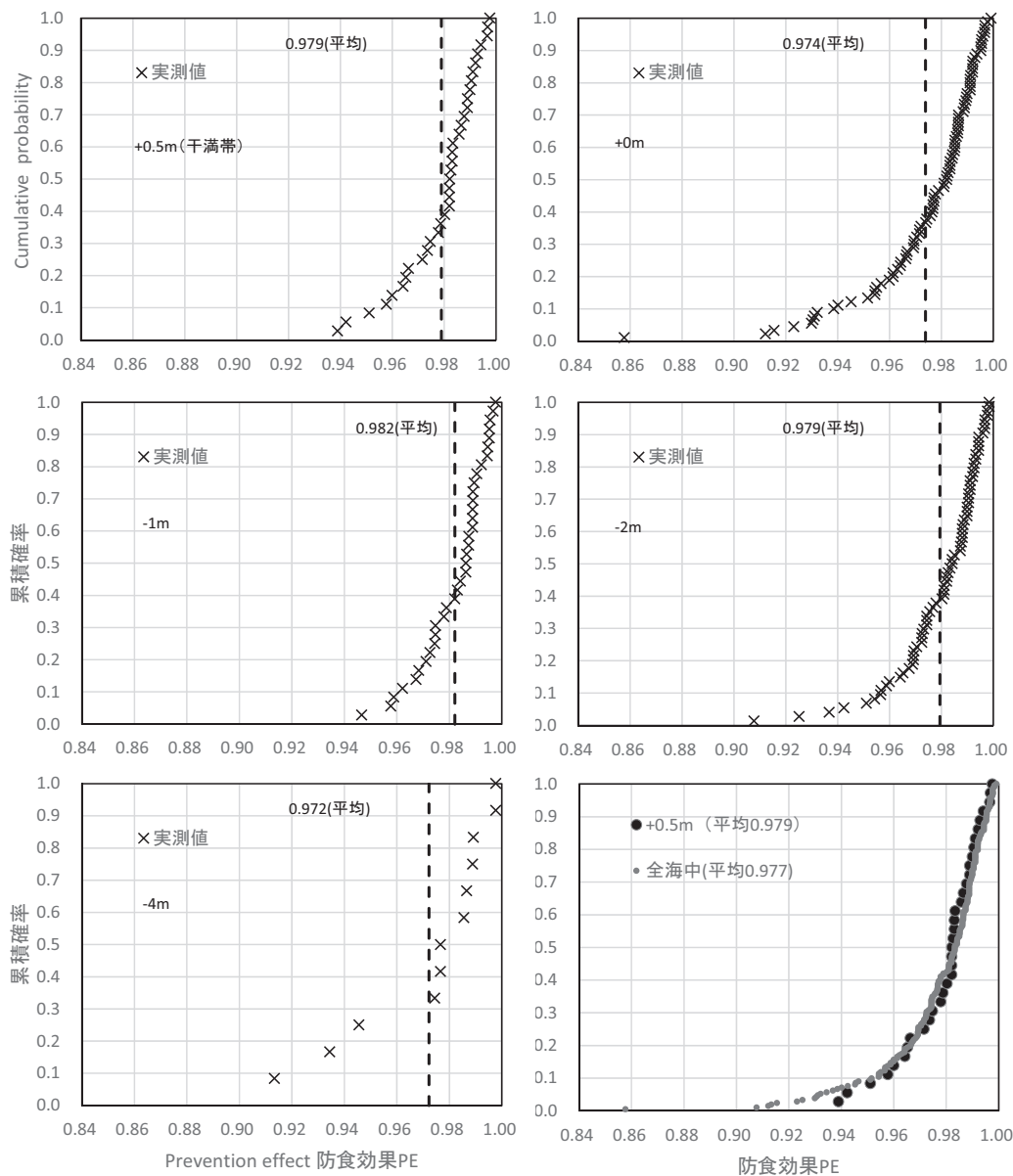


図-4.4 防食効果 PE の累積確率（実測値）

栈橋平面図を図-4.2 に示す。なお、調査対象杭も示している。計 20 ブロック(BL)の杭 90 本、計 248 箇所に対して調査を実施している。調査深度は、+0.5、0、-1、-2、-4m の 5 深度である。なお、コンクリート被覆下端+0.5m の位置の浸漬率は、2015 年の 1 年間の潮位変化（気象庁 HP）を用いると 88.0%と算定された。

#### 4.2.3 調査結果

図-4.3 に 1BL における調査結果（肉厚、腐食速度、防食効果 PE）の一例を示す。なお、いずれも対象深度における 5 点の平均値である。また、防食効果 PE（=現在厚/初期厚、と定義）は、第 3 章 3.3 で検討したものと

同じである。

全 BL および深度別の結果（測定箇所数、平均値、標準偏差）を表-4.1 に、各深度ごとの防食効果 PE の累積確率（データが出現した順番の数をデータ全個数で除したものを図-4.4 に示す。主な結果は以下の通りである。

- ・+0.5 の位置までほとんど減肉が無い場合が大半である。
- ・防食効果 PE は、全平均が 0.977（約 98%）であり、一般に用いられる防食率（無防食時および防食時の腐食速度から算出）90%（第 3 章参照）を大きく上回った。
- ・防食効果 PE の累積確率の分布について、干満帯（+0.5 m）と全海中部を比較すると、傾向はほぼ同じであった。

以上より、M.L.W.L. (平均干潮面) と同じ深度である、被覆下端の+0.5m (浸漬率 88%程度) の位置まで、電気防食は十分発揮されており、集中腐食は生じていなかったことがわかる。なお、現在の「港湾の施設の技術上の基準・同解説 (以下、技術基準)<sup>2)</sup>」においては、電気防食の適用範囲の上限は M.L.W.L.とされている。なお、文献 3)においては、浸漬率 80%以上 100%未満の場合、防食率は 60%以上 90%未満とされている。

現在の「技術基準」において、L.W.L.-1(m)まで被覆防食を適用することが標準となっているが、今回のように標準範囲より浅い位置まで電気防食が実態として機能している場合、L.W.L.-1(m)まで被覆防食を追加で適用しない方策も考えられる。なお、このような対応を行う際の前提条件としては、まず実態調査を行い、鋼部材の残存耐力が十分であること、電気防食が確実に機能していることを確認する必要があると考える。

#### 4.2.4 まとめ

- ・徳島県小松島港の栈橋鋼管杭において、被覆下端の+0.5m (=M.L.W.L. (平均干潮面)、海水浸漬率 88%程度と推定) の位置まで、電気防食の効果は十分発揮されていた (防食効果 PE の平均値は約 98%)。なお、防食効果 PE の値においては、初期の鋼材肉厚の精度、施工時の陽極の未設置期間の影響が現れている可能性もあるが、今回の結果より、少なくとも、+0.5m 付近と海中中部 (LWL 以深) の防食効果 PE は同等であったと言える。

- ・この結果は、実態として電気防食が十分機能している場合、実態に応じて、被覆防食の適用範囲を設定可能であることを示唆するものである。

### 4.3 実環境暴露試験による検証

#### 4.3.1 試験概要

##### a) 実施場所

実施場所は鹿島港にある鋼矢板式岸壁である。構造物の断面図を図-4.5 に示す。なお、すぐ近くに検潮所があり、詳細な潮位の変化が可能である。なお、平均潮位は 0.89m (正確には 0.886) , M.L.W.L. (平均干潮面) は 0.46m (正確には 0.459) である。

供用開始後から無防食の状態が長期間続いており、最近になって電気防食が適用された。なお、被覆防食は適用されていない。

##### b) 鋼材試験片

鋼材試験片は、供試部分が干満部 750mm、水中部 3500mm または 1500mm となるように既設鋼矢板岸壁に 2014 年 3 月に設置した。図-4.6 に鋼材試験片の概略図を

示す。試験体は材質 SS400 の厚さ 6×50mm 幅の平鋼を用い、全長は 4.25m および 2.25m の 2 種類 (それぞれ L、S と表記) とした。また、試験体 L-C の干満帯部および試験体の裏面にはエポキシ樹脂塗装を施した。なお、裸部分は黒皮被膜をブラスト処理し表面素地を露出させた。さらに設置時においては、実構造物と通電させ防食電流が流入する場合 (CP と表記) と、非通電 (無防食) の 2 条件を設定した (無防食時の結果は第 2 章 2.2.4 参照)。

なお、2015 年の 1 年間の潮位変化 (気象庁 HP) を用いると試験体上端+0.75m の位置の浸漬率は約 70%と算

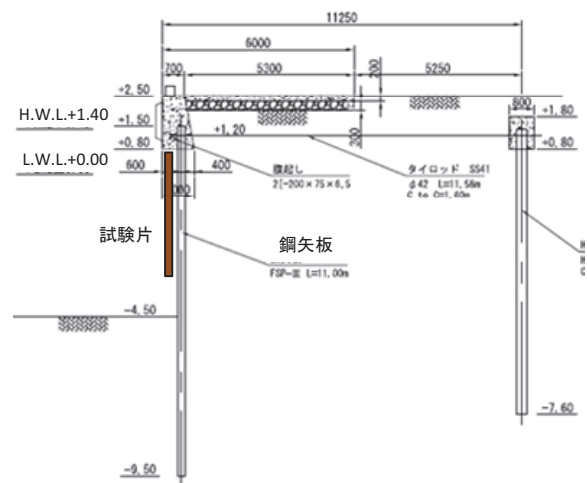


図-4.5 鹿島港・岸壁断面図

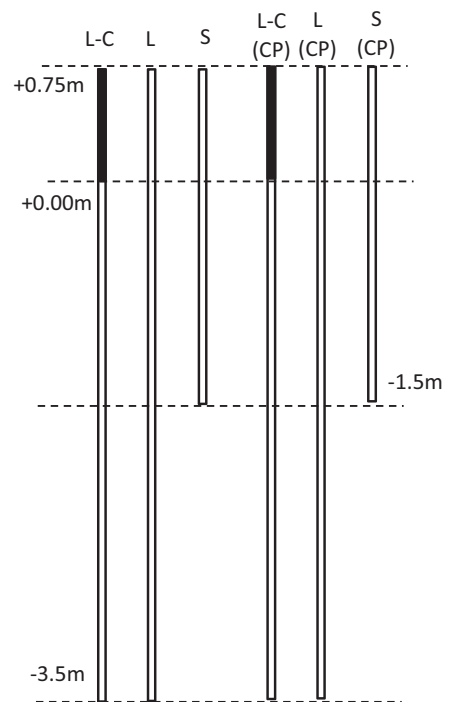


図-4.6 暴露試験における鋼材試験片概略図

定された。

#### c) 試験片処理および測定項目

鋼材試験片に付着している錆およびスケールの除去は薬品処理により行った。除錆処理した鋼材試験片は、デジタルマイクロメータにて鋼材試験片の水深方向に50mm 間隔、水平方向に3点の残存板厚を測定した。さらに、試験前後の板厚測定結果から、模擬試験と同様に鋼材試験片の各深度方向の腐食速度 (mm/y) を算出した。なお、各深度方向の腐食速度は、水平方向3点の腐食速度の平均値としている。暴露期間は645日間であり、645日/365日/年=1.77年(約1.8年)であった。

#### 4.3.2 試験結果および考察

電気防食適用時の腐食速度の深度分布を図-4.7に示す。試験体 L(CP)と S(CP)の試験体上端付近においては、0.04~0.05mm/y 程度の比較的大きな値を示した。これは上方になるほど浸漬率が小さくなり、電気防食が及ぶ時間が減ったためと考えられる。

一方、+0.5m 以深では、干満部の被覆の有無や海中部の鋼材長さによる影響は見られず、腐食速度はほぼ一律で0.02mm/y 以下の値を示した。また、3章の結果(図-3.11など)より、電気防食適用時の腐食速度は時間の経過に伴い低減する傾向がある。今回よりもさらに時間が経過すれば現状より値が低減する可能性もある。

#### 4.3.3 電気防食の効果と浸漬率との関係

浸漬率と防食時の腐食速度 (L(CP)と S(CP)の平均値) の関係を図-4.8に示す。浸漬率が80%程度の範囲では、海中部の結果と同程度の腐食速度を示した。また、4.2で示した小松島港(河川水混入の影響は軽微)における実構造物の結果を掲載している。これも、今回と同様に、浸漬率が88%においても十分な防食効果が発揮されていた。したがって、浸漬率が約80~90%程度の位置まで、海中部と概ね同等の電気防食の効果が発揮される可能性が十分にある。

また、浸漬率70~80%程度の範囲(+0.65~+0.75mの範囲)においても、腐食速度は0.05mm/y程度に抑えられており、電気防食の効果はある程度発揮されていた。

#### 4.3.4 まとめ

鹿島港での長尺試験体の暴露試験(3.7年間)において得られた知見を以下にまとめる。

今回環境(生物付着が多い、H.W.L.が+1.5m、河川水混入なし)の環境において、浸漬率80%程度の位置(+0.5m)までは十分な電気防食の効果が確認され、M.S.L.

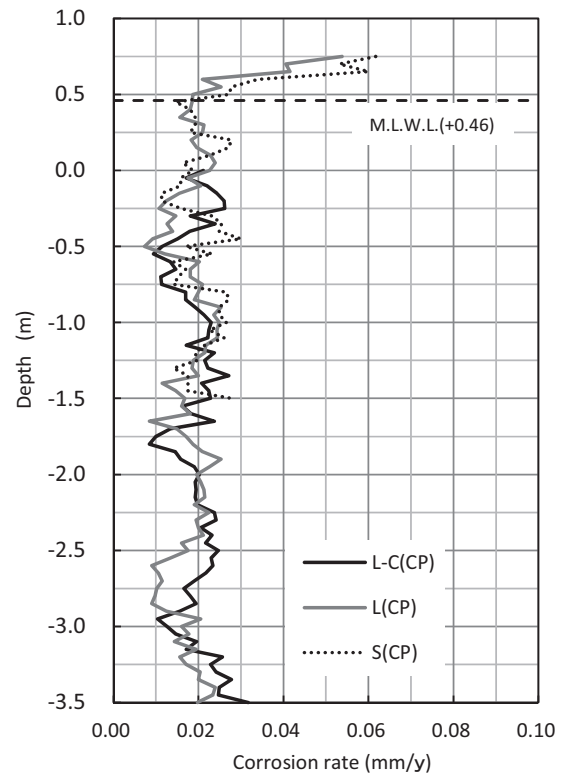


図-4.7 腐食速度の深度分布

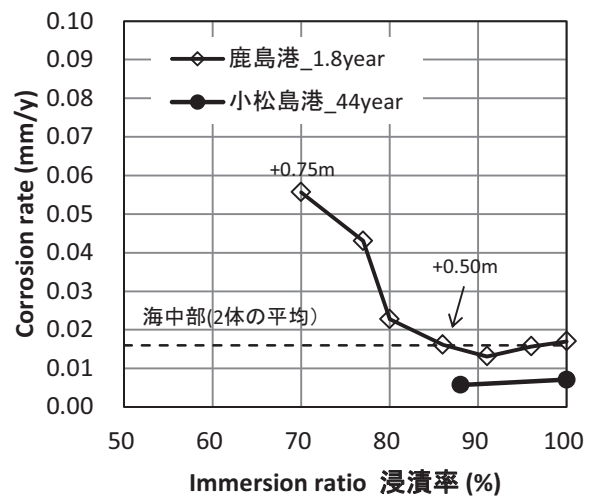


図-4.8 浸漬率と防食時の腐食速度の関係

付近(+0.75m)においてもある程度の効果が発揮されていた。

ただし、対象構造物の環境条件次第では今回のようなならない可能性も十分にある。対象の環境、構造物において、どの程度の防食効果が得られるのかは確認が必要である。

#### 4.4 屋外水槽での暴露試験による検証

##### 4.4.1 試験概要

###### a) 試験体概要

干満を模擬した水槽に設置した試験体概要を図-4.9、模擬した干満サイクルを図-4.10に示す。干満差は1.5mである。試験体は、干満部に鋼材試験片 L15×W5cm を試験条件に応じて5~10個配置し、海中部には L150×W5cm の試験片を3段配置し、試験片に防食電流を供給するためにアルミニウム合金陽極を設置した。また、試験片とアルミニウム合金陽極とは計測ボックスの中で抵抗を介して電氣的導通を取り、各試験片の電位および流出入する電流値をデータロガーを用いて一定時間隔で自動計測できるように配線した。照合電極は、飽和銀・塩化銀電極（以下 SSE）を使用し、各試験片の近傍に設置することで、試験片と照合電極による誤差を無くすようにした。

###### b) 各試験体への通電電流密度

試験体は、干満部および海中部に通電する電流密度により No.1~3 の3試験体とした。各試験体について設定した通電電流密度を表-4.2に示す。試験体 No.1 と No.2 は、干潮時に海中部に流入する電流密度を  $100\text{mA/m}^2$  として設定した。そのため、満潮時における電流密度は No.1 が  $76\text{mA/m}^2$ 、No.2 は干満部の範囲が No.1 の半分であるため  $86\text{mA/m}^2$  となる。一方、試験体 No.3 は、満潮時に流入する電流密度を  $100\text{mA/m}^2$  と設定した。そのため、干潮時における電流密度は  $131\text{mA/m}^2$  となる。

##### 4.4.2 試験結果

###### a) 鋼材に流出入する電流の経時変化

試験開始当初および2年経過時における、流出入電流密度の時間変化を図-4.11に示す。なお、図-4.11 (a)は各試験体の最上段（浸漬率27.5%または52.5%）、図-4.11 (b)はLWL（最低水位）付近（浸漬率72.5%）の結果の代表例である。なお、試験体 No.2 については、最上段位置が干満帯の中央付近のため、試験体内で浸漬率が最小である浸漬率52.5%の結果を示した。ここで、浸漬率とは、水中に没している時間の割合である。また、全試験片の結果は付録Bに掲載した。

まず(a)最上段付近の場合について、No.1の結果を基に説明する。干潮（最低水位）から満潮（最高水位）に移る際においては、試験体 No.1~3 のいずれも、試験片が浸漬した際に電流量が急激に上昇する。これは、鍍を還元するために電流が流れるためであると考えられる<sup>1)</sup>。ただし、その後は電流が急激に低減し、試験片より水位が下がると電流は流れなくなる。

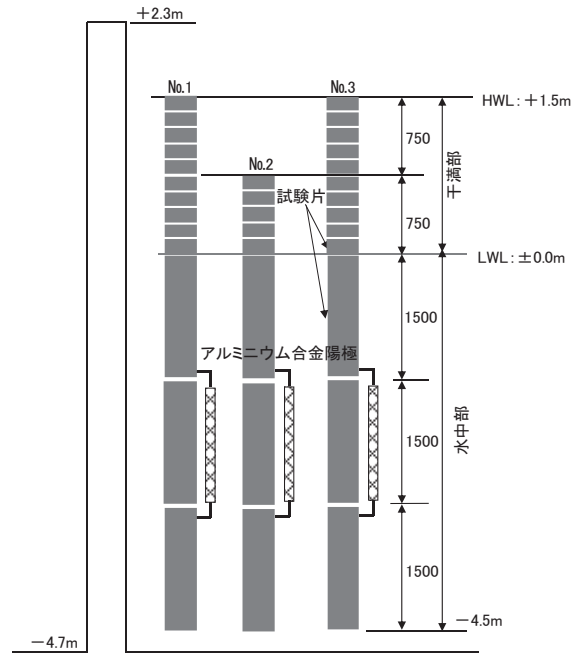


図-4.9 試験体概要

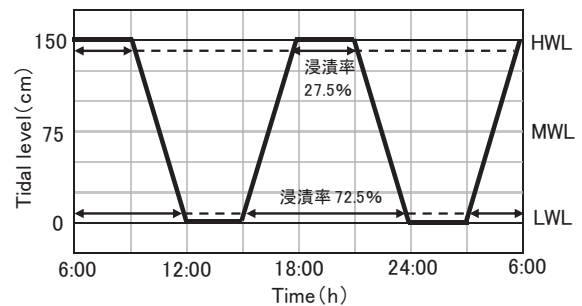
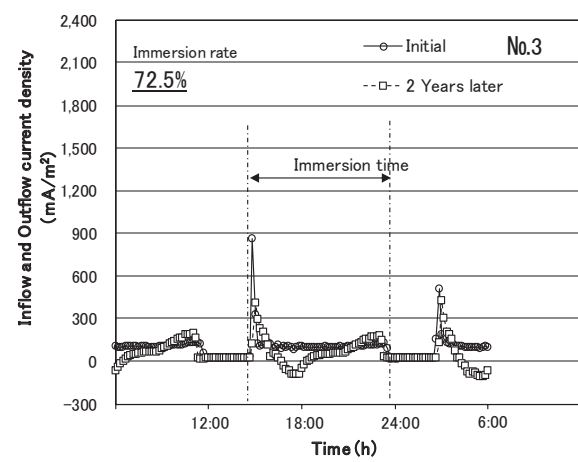
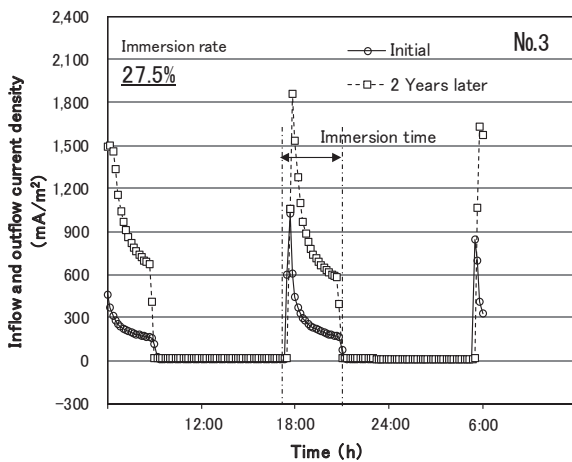
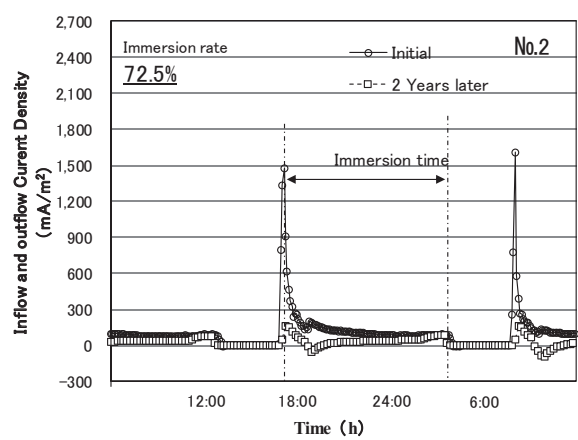
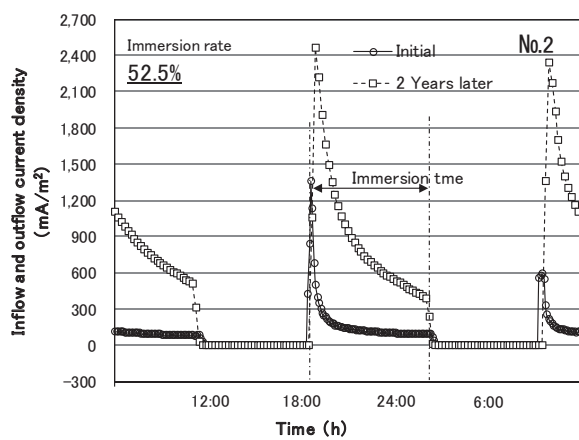
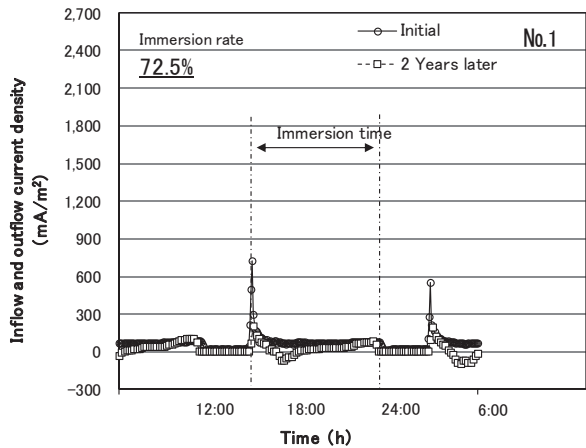
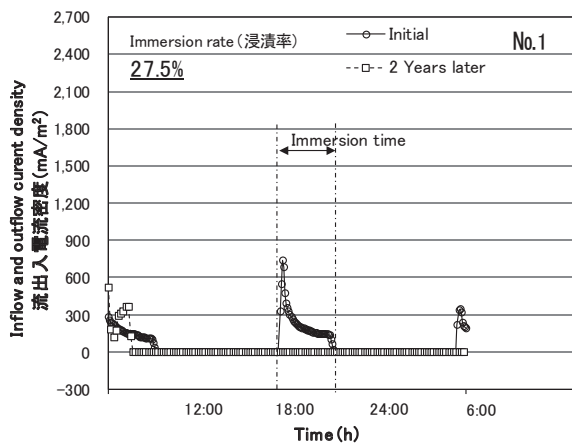


図-4.10 干満サイクル

表-4.2 各試験体における設定電流密度

設定項目	試験体	試験体		
		No.1	No.2	No.3
設計防食電流密度	H.W.L.~海中部	76	86	100
$i_p$ [mA/m <sup>2</sup> ]	海中部のみ	100	100	131
挿入した抵抗値R [Ω]		11.2	11.2	8.5
有効電位差ΔE [mV]		250		
干満帯の供試面積Sn1 [×10 <sup>-1</sup> m <sup>2</sup> ]		0.7	0.35	0.7
海中部の供試面積Sn2 [×10 <sup>-1</sup> m <sup>2</sup> ]		2.235	2.235	2.235
テストピースの供試総面積St [×10 <sup>-1</sup> m <sup>2</sup> ]		2.935	2.585	2.935

次に、(b)LWL 付近の場合について、No.1の結果を基に説明する。干潮（最低水位）から満潮（最高水位）に移る際においては、(a) 最上段付近の場合と同様で、試験片が浸漬すると電流量が急激に上昇する。そして、その後電流が低減する。しかし、その後、電流の値がマイナスとなり、電気防食を適用しているにもかかわらず、鋼材試験片から外部に流出している。この理由としては、



(a)最 上 段 付近

(b)LWL 付近

図-4.11 試験体 No.1～3 における流出入電流密度の時間変化（開始当初および2年経過時）

水位が上昇するにつれて、干満帯において没水し始める試験体が増え、その試験体の錆を還元するための電流が一時的に過度に増加し、流電陽極から供給する電流量では足りず、LWL 付近の鋼材部分から不足分が供給されることが考えられる。ただし、錆の還元電流はすぐに低減するため、時間が経過するとプラス方向の値に徐々に戻り、再び満潮から潮位が下がり始める頃には、防食電流

が流入する状態に戻っている。そして水位が LWL 以下まで下がると電流は流れなくなっている。上記の傾向は、試験体 No.2 および 3 についても概ね同様な傾向を示した。

b) 浸漬率における鋼材の電位および平均積算電流密度との関係

試験開始当初と2年経過後の満潮時における、浸漬率と積算電流密度および電位の関係を図-4.12 に示す。な

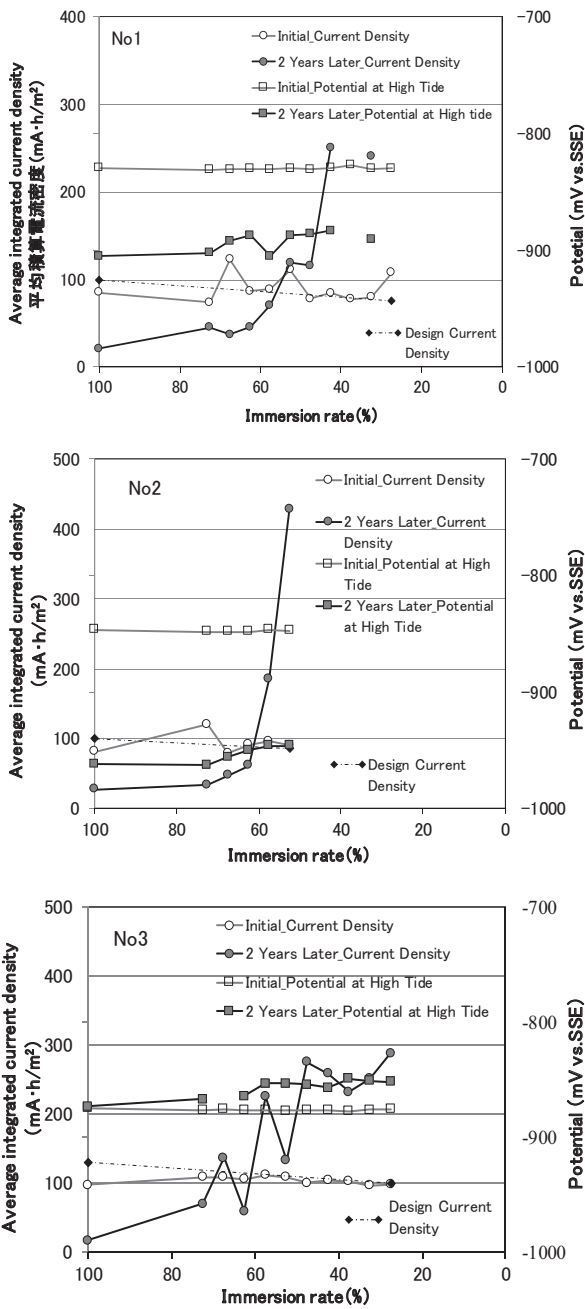


図-4.12 浸漬率と平均積算電流密度および電位との関係

お、平均積算電流密度とは30日間(720h)の電流密度を積算し、1h当たりの平均値として表したものである。

以下、試験体No.1の結果を基に説明する。電位に関して、2年経過後、干満帯にある鋼材の電位は卑化していた。これは、防食電流の流入により鋼材表面にエレクトロコーティング(以下EC)が生成したためであると考えられる。なお、目視により、全ての試験片表面にECの生成が確認されている。

平均積算電流密度に関して、試験開始当初は、浸漬率

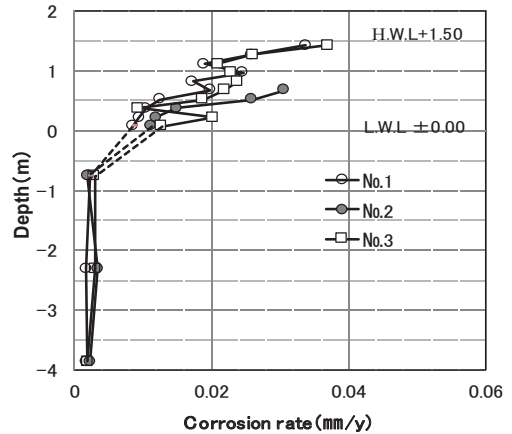


図-4.13 各試験体における腐食速度の深度分布

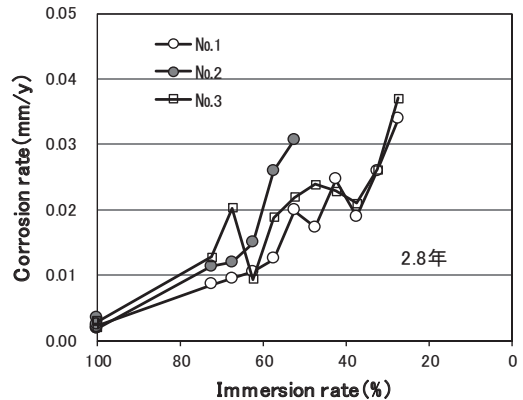


図-4.14 浸漬率と腐食速度の関係

に関わらずほぼ設計防食電流密度と同程度の電流が流れていた。一方、2年経過後は浸漬率が60%付近(MWL付近)までは平均積算電流密度が低下していたが、60%以下になると平均積算電流密度が設計値より3~5倍程度増加した。これは、LWL付近においては、鋼材表面に生成したECが比較的緻密だったため電流が低減したと考えられる。一方、最上段付近においては、鋼材が乾燥される時間が長い時間、錆の乾燥程度が進行し、錆の還元電流がLWL付近の場合よりも大きくなったと考えられる。また、流入する電流量が過大な場合、EC被膜の組成はポーラスな(粗な)構造になるという既往の知見がある<sup>4)</sup>。EC被膜が粗な場合、流入する電流は増加する。これらの影響により、最上段付近では、平均積算電流密度が設計防食電流密度より増加したと推測される。

試験体No.2および3においても、試験片上端付近で平均積算電流密度が最も大きくなる傾向は変わらなかった。また、設定した電流密度(表-4.3参照)による違いは明確ではなかった。



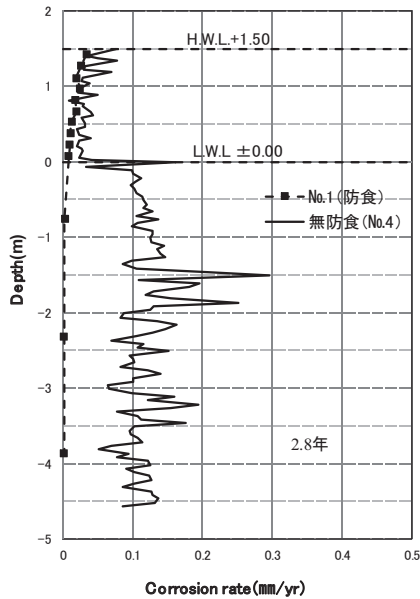


図-4.15 防食時(No1)および無防食時における腐食速度の深度分布の比較

c) 各試験体における干満帯付近における防食効果

各試験体における腐食速度の深度分布を図-4.13, 浸漬率と腐食速度の関係を図-4.14 に示す。LWL から離れるほど(浸漬率が小さくなるほど)腐食速度が増加した。

一般的な設計条件である試験体 No.1 の場合, 浸漬率 60%付近 (+0.37m 付近) まで 0.01mm/y 程度の小さい腐食速度を示した。浸漬率 40%程度 (+0.97m 付近) においても, 0.02mm/y 程度の腐食速度に抑えられていた。ただし, 本試験は, 波浪の作用しない条件であるため, 実際の環境よりも防食効果が大きい結果である可能性もある。なお, 試験体間の違いは明確ではなかった。今回通電した電流密度の違いでは腐食速度にあまり影響していないと考えられる。

d) 無防食の場合との比較

防食時(No.1)および無防食時における腐食速度(第2章図-2.15 参照)の深度分布を比較したものを図-4.15 に示す。第2章で述べたように, 本水槽においても LWL 以深で集中腐食が進行する傾向が確認されていたが, 今回のいずれの防食電流密度においても, 図-4.13 に示すように海中部の腐食速度は 0.01 mm/y 以下で均一であり, 集中腐食は抑制されていた。この結果は, 既往の知見同様<sup>5)</sup>, 電気防食の適用により, 集中腐食は抑制可能なことを示している。

4.4.3 まとめ

海中部に電気防食を適用した場合における, 干満帯(今回は干満差 1.5m)における鋼材の電気防食特性および防

食効果について検討を行った。その結果を以下に示す。

1)試験開始当初は, 浸漬率に関わらずほぼ設計防食電流密度の電流が流れていたが, 2 年経過後では浸漬率による違いが現れ, 浸漬率が小さい場合に流入電流量が大きくなり, 平均積算電流密度は設計値の 3~5 倍程度となった。浸漬率が小さい部位においては, 鋼材が乾燥される時間が長いこと, 錆の乾燥程度が進行し, 錆の還元電流が増加したためと考えられる。

2)一般的な設計条件(干潮時の海中部の設計防食電流密度が 100mA/m<sup>2</sup>)の場合, 浸漬率 60%付近まで 0.01mm/y 程度の小さな値を示した。また, 浸漬率 40%程度においても, 0.02mm/y に抑えられていた。ただし, 本試験は, 波浪の作用しない条件であるため, 実際の環境よりも防食効果が大きい結果である可能性もある。

3)同じ仕様の試験体において, 電気防食を適用していない場合においては, LWL 以深で集中腐食が進行する傾向が確認されていたが, 今回のいずれの電流条件においても, 海中部の腐食速度は 0.01 mm/y 以下で均一であり, 集中腐食は抑制されていた。この結果は, 既往の知見同様, 電気防食の適用により, 集中腐食は抑制可能なことを示している。

4.5 まとめ

本章では, 実構造物調査, 実環境での暴露試験および屋外水槽での暴露試験結果を基に, 干満帯付近の電気防食特性について検討を行った。

1) 実構造物調査に基づく海水浸漬率と電気防食の効果の関係

徳島県小松島港の棧橋鋼管杭において, 被覆下端の +0.5m (=M.L.W.L., 海水浸漬率 88%程度と推定) の位置まで, 電気防食の効果は十分発揮されていた(平均値で約 98%)。なお, 防食効果 PE の絶対値については, 初期の鋼材肉厚の精度, 施工時の陽極の未設置期間の影響が現れている可能性もあるが, 今回の結果より, 少なくとも, +0.5m 付近の防食効果と海中部(L.W.L.以深)の電気防食による効果は同等であった。

この結果は, 実態として電気防食が十分機能し, かつ適切に維持管理されている場合, 実態に応じて, 被覆防食の適用範囲を設定可能であることを示唆するものである。

2)実環境暴露試験に基づく干満帯付近の電気防食効果(3.7年間)

実環境(鹿島港)での長尺試験体の暴露試験(3.7年間)において得られた知見を以下にまとめる。

- ・今回環境(生物付着が多い, H.W.L.が+1.5m, 河川水

混入なし)の環境において、浸漬率80%程度の位置(+0.5m付近。M.L.W.L.(平均干潮面):0.46m)までは十分な電気防食効果が確認され、M.S.L.(平均水面:0.89m)やや下の+0.75m付近においてもある程度の効果が発揮されていた。

・ただし、対象構造物の環境条件次第では今回のようにならない可能性も十分にある。対象の環境、構造物において、どの程度の防食効果が得られるのかは確認が必要である。

### 3) 屋外水槽での暴露試験(2.8年間)

・干満部の各試験片に対しては、浸漬時間が短い試験片の方が鋼材に流入する電流密度は大きくなる傾向があり、瞬間的には、初期設計電流密度の10倍近い値を示す場合も見られた。干潮から満潮に移る際に、鋼材表面に生成した錆が還元され、多くの防食電流が消費されていると考えられる。この結果は、第2章の集中腐食の検討において、干満帯の被覆の無い場合にL.W.L.直下付近で腐食速度が極大化しやすかったことを裏付けるものである。

・一般的な防食電流密度(干潮時に100mA/m<sup>2</sup>)の場合、浸漬率60%付近までは、0.01mm/y程度の小さい値を示した。また、浸漬率が40%程度であっても、0.02mm/y程度に抑えられていた。なお、本試験は、波の作用しない条件であるため、実際の条件よりも穏やかな環境であった可能性がある。

上記より、干満帯においても、浸漬率が高い場所については、十分な電気防食効果が及ぶことが改めて確認された。ただし、鋼部材が海水に没する際に過大な電流が生じるため、その分を考慮する必要がある。

以上のように、今回の検討において、被覆防食がL.W.L.-1(m)まで適用されていなくても、浸漬率が高い場所については、十分な電気防食の効果が発揮されていた。河川水の混入が著しいといった特殊な環境の場合でない限り、現在の電気防食の適用範囲の上限であるM.L.W.L.程度まで被覆されていれば、電気防食の効果としては十分であると考えられる。ただし、対象構造物や近隣の環境での電気防食の効果の実態を事前に確認することが必要である。事前の確認が難しい場合は、適用後に電気防食の効果の追跡調査を行い、仮に電気防食の効果が十分ではなかった場合は追加対応を行うとするのがよいと考える。

また、実構造物に対する定期的な点検診断により、当該環境においてM.L.W.L.より上の位置においても十分な電気防食の効果が得られることが確認されていれば、今後の供用期間等を加味した上で、さらに適用範囲の下限を引き上げることも可能であると考えられる。

ただし、4.4で示したように、干潮時に大気中に露出した鋼材部には、満潮時に没水した際に過大な防食電流が陽極から流入するため、陽極の消耗が早くなる可能性がある。また、電気防食が完全に消耗した際に、L.W.L.直下付近で集中腐食が進行する可能性もある(特に河川水が混入する場合)。緊急的な予算措置ができないことにより、電気防食の補修(陽極の交換)が即時に行えないリスクを踏まえると、新設構造物においては、これまでと同様にL.W.L.-1(m)程度まで被覆防食を適用する方が合理的であると考えられる。

### 参考文献(第4章)

- 1) (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)，2009.
- 2) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，2018.
- 3) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，p.439，2007.
- 4) 浜田秀則，兼坂薫，鈴木靖庸，宮田義一：鋼材における電着および電気防食併用工法の防食性能に関する実験的検討，港湾空港技術研究所資料，No.1113，2005.12.
- 5) 例えば，善一章，阿部正美：集中腐食に対する電気防食の適用性，港湾空港技術研究所報告，第22巻第2号，1983.6.

## 5. 港湾鋼構造物における電気防食の点検診断に関する検討

### 5.1 概要

港湾鋼構造物における電気防食の点検診断<sup>1)</sup>において、一般定期点検診断(3~5年に1回が標準)としては目視による劣化度の判定が困難なため、電位測定を行い、劣化度の判定が行われる。そして、詳細定期点検診断(必要に応じて実施)として、陽極消耗量を測定し、完全消耗する時期を予測し、更新が行われる場合もある。電位測定は簡便である一方で、将来予測に現状では用いられない。一方、陽極消耗量の測定には潜水士が必要であり、かつ測定精度は必ずしも高くはない。本章では、海洋鋼構造物における電気防食の点検診断の高度化、特に省力化を目的とし、一般定期点検診断に用いられている電位測定を基にした、陽極消耗量の推定について、以下に示す方法を試みる。

鋼構造物の電気防食は電流が流れ、防食電位に達することで防食が達成される<sup>2)</sup>。この際の電位と電流の時間変化の一例を図-5.1(3.2の図-3.6および図-3.7と同じ)に示す。電位は時間とともに防食電位に達し、定常状態に到達し、電流は徐々に低減し、定常値に到達している。この電位と陽極からの発生電流の間には、理論的には相関が存在する。図-5.1においても、季節的な変動などのばらつきを含みつつも相関がみられる。

電気防食の設計においては、鋼材の防食電位と陽極の電位の差を250mVと設定している<sup>2)</sup>。一方、陽極発生電流は、経験的に初期の値の1/2(0.5)まで時間とともに低減するとして陽極の質量が計算される(3.1および3.2参照)。電位と電流の両者に線型的な関係が存在した場合、電流が定常値(初期の1/2)に到達した場合、電位の値は、鋼材の防食電位と陽極の電位の差が250mVの中間値よりも小さい値になると推測される。

電気防食が適用された鋼構造物の点検診断時においては、「電位」が判断の指標として用いられている<sup>1) 2)</sup>。一般に、電位が防食管理電位(-800mV vs 海水塩化銀電極)より小さければ劣化度d(電気防食は機能)、大きければ劣化度a(電気防食は機能していない)と判定される。可/不可の2段階しか評価指標がないのが現状である。一方、文献3)では、図-5.2の考え方を踏まえ、新たな電気防食の劣化度の判定基準値(-935mV)を提案している(表-5.1参照)。これを踏まえると、設置後数年経過時の電位を測定することで、陽極の残存寿命が設計を満足しているか否かが簡単に判定できることとなる。ただし、上記の文献では、陽極残存寿命との相関を明確に比較でき

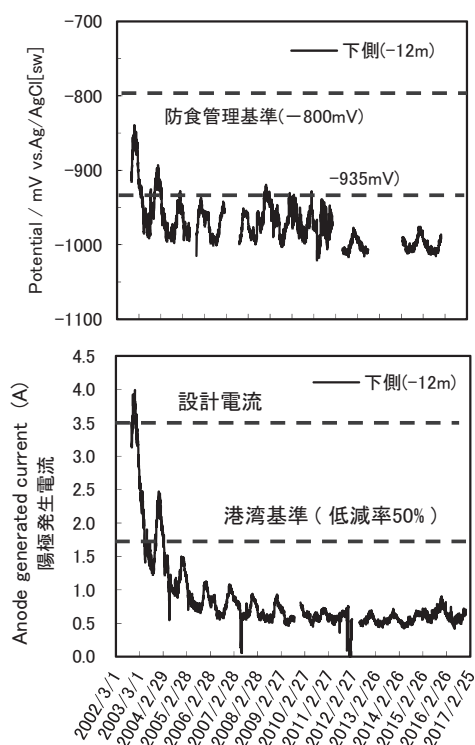


図-5.1 陽極発生電流と電位の経時変化の一例

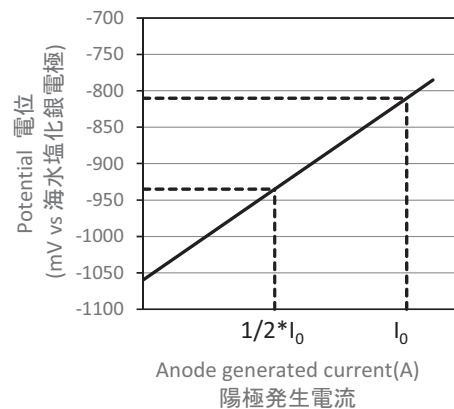


図-5.2 設計時に想定されている電位と電流の関係<sup>2)3)</sup>

ていない。上記の新たな判定基準の信頼性を高めるには、電位と残存寿命の関係について整理する必要があると考ええる。

ここで、過去に、電気防食の防食電流密度についての知見を整理することを主目的として、電気防食に関する実態調査が多数実施されている<sup>4)~7)</sup>。この際、陽極の推定残存寿命と電位の両者が測定されている。本検討では、まずこの既往の文献における調査結果を整理し、電位と

表-5.1 電気防食に関する劣化度判定表<sup>1)3)</sup>に加筆修正

電位(mV vs 海水塩化銀電極)	文献3)		維持管理技術マニュアル <sup>1)</sup>	
	劣化度	電気防食の評価	劣化度	判定基準
	-800	a	防食管理電位を満足しておらず、防食できていない	a
-850	b~c	防食管理電位を満足しており、防食できている。 ただし、陽極消耗に関して、陽極からの発生電流は電流低減率0.5を満足していない可能性があるため、陽極寿命が設計寿命より短くなる可能性がある。	d	防食管理電位が維持されている(変状が認められない状態)
-935	d	非常に良好な防食状態にある		

表-5.2 既往の文献(4~7)における調査対象一覧

文献	港名	構造形式	鋼材種類	HWL (m)	RC 下端 (m)	塗装		陽極		電防 経過年数	推定 寿命	設計/ 推定 寿命	電位 (mV)	電流 低減 率 <sub>r</sub>	水質(最表面・干潮時)								
						下端 (m)	種類	電流 **	設計 寿命						Cl	DO	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	水温	抵抗 率	海域 種類			
6)	2-A	セル式	鋼管杭	0.4	0.0	-		2.5	20	12.1	21.7	1.09	-867	0.37	20,500	7.1	0.05	3.6	26				
			鋼矢板					2.5	20	12.1	21.2	1.06	-873	0.36									
			矢板式					3.1	20	16.1	24.3	1.22	-795	0.26						19,000	9.1	0.1以下	7.0
4)	0-A	矢板式	鋼管矢板	1.5	0.5	-		3.5	30	7	36.2	1.21	-909	0.33	17,000	9.1	0.43	9.0	32	汚染			
			鋼管矢板					3	10	10	24.3	2.43	-1018	0.15	18,200	7.5	0.01以下	10.5	21				
5)	1-A	矢板式	鋼管矢板	1.3	0.6	-		3	10	10	24.3	2.43	-1018	0.15	18,200	7.5	0.01以下	10.5	21				
			鋼管杭					2.0	0.0	-	3	10	2.8	10.8	1.08	-961	0.50	18,000	7.7	2.10	11.5	27	
4)	0-B	矢板式	鋼管矢板	2.1	1.0	-		3	10	6	9.1	0.91	-878	0.65	18,200	3.0	0.16	21.0	21	汚染			
			鋼管矢板					2.1	0.5	-	3	20	6	16.9	0.85	-898	0.24	14,000	6.4	0.52	20.0	31	汚染
7)	3-A	棧橋式	鋼管杭	2.0	0.0	-		1.9	10	9	10.7	1.07	-927	0.28	17,100	6.4	0.67	6.5	24	汚染			
			鋼矢板					2.0	1.4	-	2.5	12	3.3	10.7	0.89	-910	0.45	17,200	8.0	1.00	8.7	23	汚染
			鋼矢板					1.6	1.0	-	2.5	5	4.3	8.3	1.66	-879	0.26	7,100	1.1	0.19	12.0	50	汚染
5)	1-F	矢板式	鋼管矢板	0.7	0.0	-		2.2	20	13.9	24.8	1.24	-994	0.23	16,000	5.7	0.01以下	11.5	24				
			鋼管矢板					0.3	0.3	-	3.1	20	15.5	18.9	0.95	-767	0.27	3,000	7.9	0.83	10.0	110	汚染
			鋼管杭					2.4	1.0	-	2.6	20	12.8	17.5	0.88	-860	0.44	17,000	7.3	0.48	11.0	29	
4)	0-D	矢板式	鋼管矢板	2.6	1.0	-		3.2	20	10.6	18.2	0.91	-926	0.39	15,900	4.4	0.17	22.0	30	汚染			
			鋼管杭					2.2	20	15.8	20.8	1.04	-809	0.42	16,400	7.1	0.14	8.8	24	汚染			
5)	1-D	矢板式	鋼管矢板	2.5	1.5	-		2.84	20	9	16.5	0.83	-945	0.39	17,300	8.7	0.21	12.5	21	汚染			
			鋼管杭					0.3	0.0	-	3	20	11	18.7	0.94	-877	0.28	17,000	6.9	0.1以下	11.0	27	
7)	3-E	セル式	鋼管杭	1.75	1.0	0	錆止め	2	20	12.8	18.8	0.94	-903	0.33	16,700	7.1	0.05	7.7	24				
4)	0-E	鋼管矢板	2					20	7.7	14.6	0.73	-921	0.65	16,300	6.8	0.55	22.0	29	汚染				
7)	3-E	鋼管杭	2					20	12.8	20.1	1.01	-894	0.30	16,700	7.1	0.05	7.7	24					
5)	1-E	棧橋式	鋼管杭	1.6	0.5	-		3.15	20	12.8	14.4	0.72	-844	0.35	17,500	6.0	2.20	12.5	31	汚染			
6)	2-C	棧橋式	鋼管杭	1.8	0.5	-		3	20	12.8	29.1	1.46	-998	0.32	17,100	8.4	0.06	11.0	21				
4)	0-F	矢板式	鋼管矢板	1.85	0.7	-0.5	塗装	3.5	20	8.7	18.1	0.91	-867	0.25	15,000	7.2	0.01	14.5	34				
7)	3-F	鋼管杭	3.5					20	13.8	21.3	1.07	-862	0.26	17,000	6.9	0.03	8.1	24					
4)	0-G	鋼管杭	2.5					10	12.8	15.8	1.58	-961	0.11	12,500	8.2	0.02	13.8	39					
7)	3-G	(土留矢板)	鋼管杭	0.6	0.3付近	-		3	10	2.2	12.4	1.24	-968	0.42	14,500	6.9	0.23	7.0	27.5	汚染			
7)	3-H	棧橋式	鋼管杭	2.86	2.05	0	塗装	3	20	10.2	18.9	0.95	-913	0.33	19,500	7.1	0.12	10.0	22				
4)	0-H	矢板式	鋼管矢板	4.0	1.5	-		2.9	25	10.7	16.0	0.64	-934	0.29	15,000	8.6	0.28	13.0	30	汚染			
7)	3-I	鋼管杭	4.05	1.7	-			2.8	25	15.8	19.1	0.76	-904	0.35	19,300	7.5	0.21	11.0	22				
6)	2-D	矢板式	鋼管矢板	1.85	0.5	-		2.5	20	10.3	21.8	1.09	-991	0.26	18,500	8.3	0.78	15.0	20				
			鋼管杭					4.2	4.2付近	-	2.8	20	13.2	23.7	1.19	-934	0.16	19,000	8.7	0.1以下	12.0	28	
4)	0-I	棧橋式	鋼管杭	1.7	2.5付近	-1	塗装	2.5	20	7.5	40.1	2.01	-1010	0.27	18,700	9.8	0.08	16.8	26				
			橋脚 橋脚外板*					不明	-	-	錆止め	1.5	20	6.7	65.1	3.26	-1032	0.29	19,200	11.0	0.00	17.8	25
6)	2-F	矢板式	組合せ矢板	2.1	0.8	-		3	20	10	26.9	1.35	-957	0.14	19,000	6.8	0.1以下	22.0	21				

\*海中部のみ

\*\*設計発生電流

表-5.3 2015~2019年に実施した調査対象一覧

実施 時期	港名	構造 形式	鋼材 種類	HWL (m)	上部工 下端 (m)	被覆		陽極		電防 経過年数	海域 種類 (設計)
						下端 (m)	種類	電流*	設計 寿命		
2015	X	棧橋式	鋼管杭	+2.1	-	-1.5	耐海水性 ステンレス	3.5	35	5.7~ 6.8	汚染*
2017	Y	矢板式	鋼管矢板	+1.4	+0.8	-	なし	3.5	不明	不明	清浄
2019	Z	棧橋式*	鋼管杭	+2.1	-	-1.0	重防食	3.5	50	10.8	清浄

\*ストラット有

\*設計発生電流

\*表層部のみ

推定残存寿命の関係について整理を行った。そして、2015~2019年にかけて3港で行った調査結果を用い、本手法

の適用性の検証を行った。

## 5.2 調査概要

今回対象とした構造物および主な測定結果の一覧を表-5.2に示す。なお、文献4)～7)に記載されている情報を整理したものであり、新たに取得した情報の記載はない。また、2015～2019年にかけてX、Y、Z港で追加調査を行った。その情報を表-5.3に示す。

### 5.2.1 構造物に関する情報

構造形式は、栈橋式、鋼矢板式、鋼管矢板式、セル式、橋脚の4つに大別される。表-5.2および表-5.3には、H.W.L.、コンクリート上部工の下端位置、被覆防食（今回は塗装のみ）の種類・下端および陽極仕様（電流・設計寿命）について示した。

### 5.2.2 測定結果に関する情報

#### (1) 電位

照合電極（海水銀塩化銀電極）を海中に投入し、深度方向の分布が測定されている。表-5.2の値は、文献4)～7)中に掲載されている電位の深度分布図（図-5.4参照）から値を読み取り、その値の平均値を求めたものである。

#### (2) 陽極発生電流

陽極の芯金を切断後、シャント抵抗を挿入し、電圧降下法により陽極発生電流が測定されている。なお、表-5.2には電流低減率  $r$ （=陽極発生電流/設計発生電流）として記載した。

XおよびY港での調査においては、水中で使用可能なクランプメータを陽極の芯金部に適用し、陽極発生電流の測定を行った。測定器および測定状況のイメージ図を図-5.3に示す。

#### (3) 陽極消耗量

陽極の芯金を切断して陸上に引き上げ、付着物を除去後、陽極残存質量が測定されている。これを基に陽極消耗量、推定残寿命を求め、表-5.2には推定寿命（全寿命）として記載した。

Z港での調査においては、周囲の長さを測定することにより計測を行った。

#### (4) 水質

文献4)～7)では、表層、中間、海底面付近について、干潮時および満潮時に計12項目が測定されている。表-5.2には5項目について、干満時の表層での測定値のみを示した。なお、電気防食の設計において、以下の3条件 (i)  $Cl < 17,800ppm$ , (ii)  $DO$  (溶存酸素)  $< 6ppm$ , (iii)  $NH_4^+ > 0.1ppm$  のうち、2条件を満足する場合は「汚染海域」、それ以外の場合は「清浄海域」と判定される<sup>2)</sup>。表-5.2には干満時の表層の値を基に判定した結果を記載した。

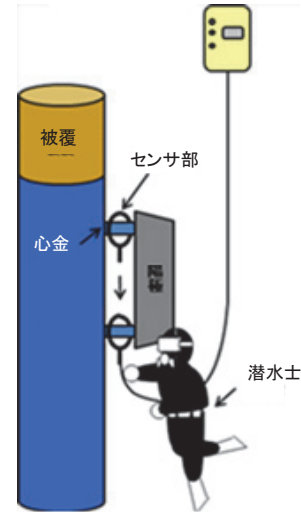


図-5.3 水中で使用可能なクランプメータの一例および測定状況イメージ

なお、X～Z港の調査時においては測定は行っておらず、設計資料に記載されている海域の区分を示した。

現技術基準においては、汚染海域と判定された場合、設計防食電流密度を3～5割増加させている（海中の場合100→130～150 mA/m<sup>2</sup>）。ただし、文献4)～7)の調査時には、汚染海域という概念は無く、全て清浄海域として設計がなされている。このことは、今回、「清浄海域」と判定されている場合は陽極寿命が設計寿命を満足する可能性が高いが、一方、「汚染海域」と判定されている場合は陽極寿命が設計寿命を満足しない可能性があることを示唆している。そのため本検討では、清浄海域と汚染海域とに分けて結果の整理を行う。

## 5.3. 結果および考察

### 5.3.1 電位の測定結果

文献4)～7)の結果のうち代表例を図-5.4に示す。場所、構造形式によって、様々な傾向が見られた。なお、全事例の大半（33/35事例=94%）が防食管理電位（-800mV）を満足していた。一方、図-5.5は2019年に実施したZ

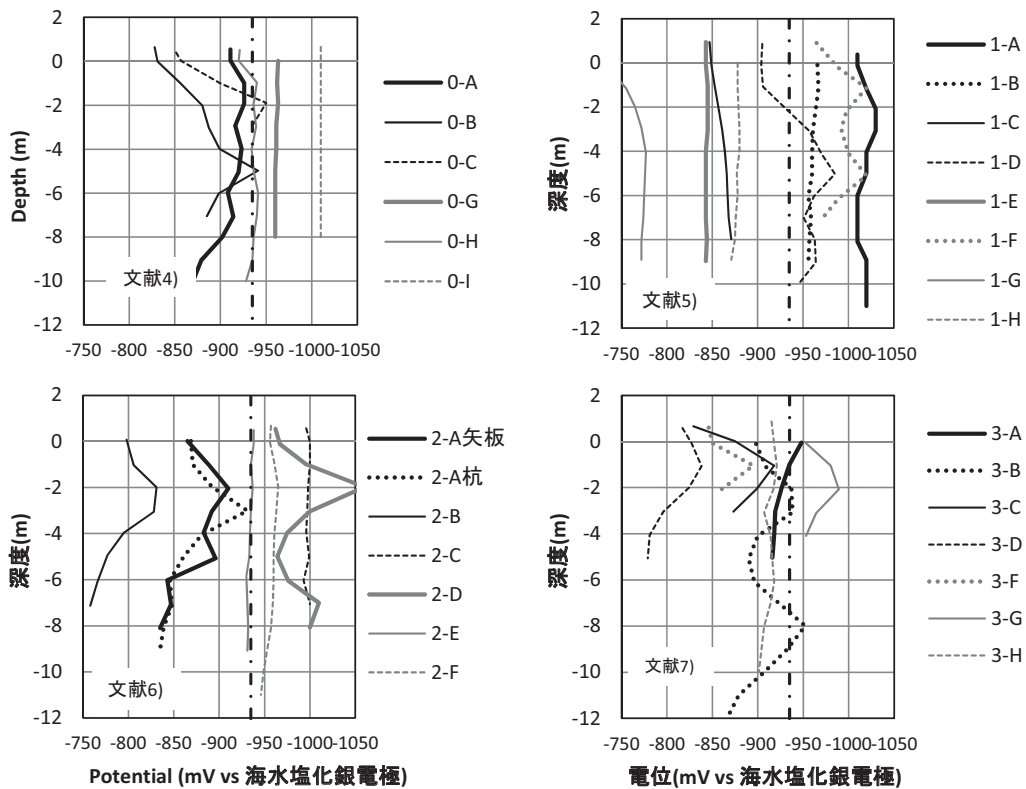


図-5.4 電位の深度分布の測定例（文献4～7）

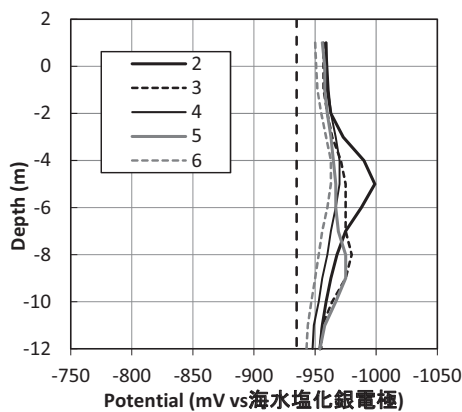


図-5.5 電位の深度分布（Z港）

港での調査結果である。この結果においても全て防食管理電位（-800mV）を満足していた。

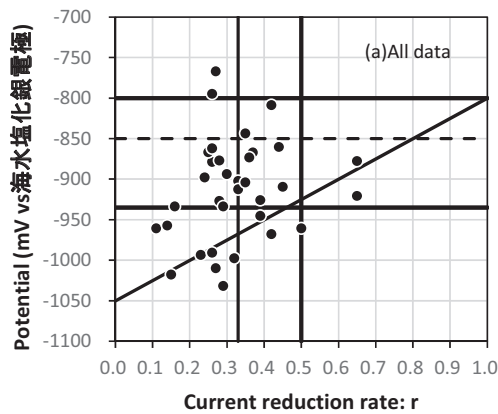
### 5.3.2 電位と電流低減率の関係

#### (1) 既往の文献での調査結果

図-5.6 に、全データ(35 事例)における電位の測定値(平均値)と電流低減率  $r$  の関係を示す ((a)全データ, (b)清浄海域, (c)汚染海域)。なお、図中には電位の基準値として-800 および-935mV, また図-5.3 中の直線式も

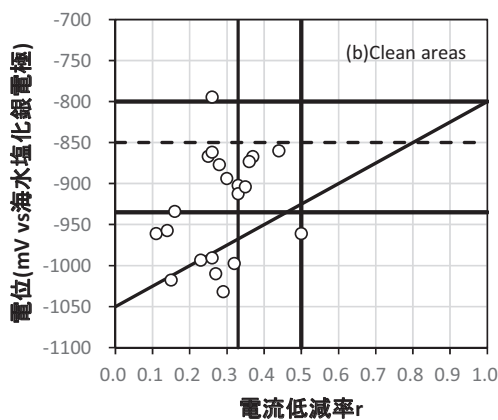
示した。

ばらつきはあるものの、電位が卑な際に  $r$  が小さい場合が多い。設計が適切であったと推測される「清浄海域」の場合だと、 $E < -935\text{mV}$  の場合、 $r < 0.33(1/3)$  となるのが 8/9 事例(89%)であった。一方、 $E > -935\text{mV}$  の場合においても、 $r < 0.33$  となるのは 7/11 例(64%)存在した。理論的には、図中の直線式付近の値を示すと考えられるが、今回ばらつきが大きくなった理由としては、1) 電位は、陽極発生電流に比べると潮位や水質等の諸要因の影響によ



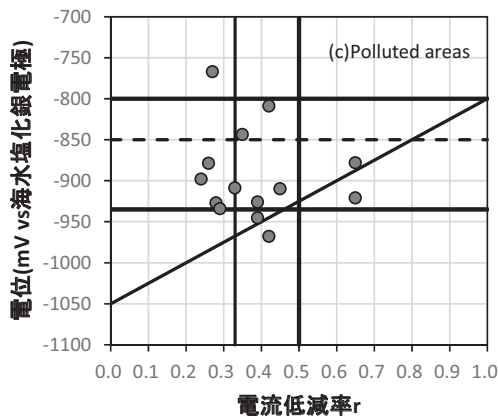
電位	電流低減率			計
	$r \leq 0.33$	$0.33 < r \leq 0.5$	$0.5 < r$	
$E > -800$	2	0	0	2
$-935 < E < -800$	12	8	2	22
$E \leq -935$	8	3	0	11
計	22	11	2	

(a) 全データ All data



電位	電流低減率			計
	$r \leq 0.33$	$0.33 < r \leq 0.5$	$0.5 < r$	
$E > -800$	1	0	0	1
$-935 < E < -800$	7	4	0	11
$E \leq -935$	8	1	0	9
計	16	5	0	

(b) 清浄海域 Clean areas



電位	電流低減率			計
	$r \leq 0.33$	$0.33 < r \leq 0.5$	$0.5 < r$	
$E > -800$	1	0	0	1
$-935 < E < -800$	5	4	2	11
$E \leq -935$	0	2	0	2
計	6	6	2	

(c) 汚染海域 Polluted areas

図-5.6 電位の測定値と電流低減率  $r$  の関係

って変化しやすいにもかかわらず、今回の測定値はある一時期に得られた値であり、経時的に平均化された値ではないため、ばらつきがより大きく現れた可能性が高いこと、2) 図-5.4 のようにばらつきを含む電位の深度分布の平均値を基に結果を整理していること、等が考えられる。なお、図-5.1 においては季節変動に伴い、50mV

以上の値が変化している。

ここで、電流低減率  $r$  は設計時には一般に 0.5 が用いられている<sup>2)</sup>。しかし、今回の結果においては、全体では 22/35 事例(63%)、清浄海域に限定すると 16/21 事例(76%)が 0.33 以下に低減していた。この結果は、現状の設計がやや安全側であることを示唆するものである。

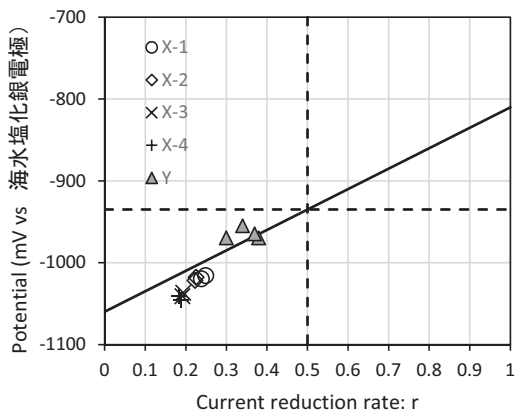


図-5.7 電位の測定値と電流低減率  $r$  の関係  
(X および Y 港)

(2) 追加調査結果

図-5.7 に X および Y 港での電位の測定値（平均値）と電流低減率  $r$  の関係を示す。図-5.6 同様に、電位は  $-935\text{mV}$  以下かつ電流低減率  $r$  は  $0.5$  以下であった。

5.3.3 電位と残存寿命/設計寿命の関係

(1) 既往の文献での調査結果

図-5.8(a)に、全データ(35事例)における電位の測定値（平均値）と陽極の全寿命の推定値/設計寿命（以下、 $R_E$ ）の関係を示す。なお、図中には、 $-800\text{mV}$  および  $-935\text{mV}$  を実線で示した。電位が卑になるほど、 $R_E > 1$ （全寿命が設計寿命を上回る場合）となるものが多くなっている。 $-935\text{mV}$  よりも卑な場合、10/11事例(91%)が  $R_E > 1$  であった。ただし、1/11事例(9%)については、 $R_E < 1$  となった。ここで、上述のように、図-5.8(a)の結果には、「汚染海域」を考慮して設計されていない場合が含まれている。以下、清浄海域と汚染海域に分けて述べる。

図-5.8(b)に清浄海域の場合(21事例)における電位と  $R_E$  の関係を示す。この場合、 $-935\text{mV}$  よりも卑な場合、全事例(9/9事例)が  $R_E > 1$  であった。すなわち、清浄海域の場合、設置後数年経過時の電位が  $-935\text{mV}$  を満足していれば、100%の確率で設計寿命よりも残存寿命が長かったことを意味する。

次に、図-5.8(c)に汚染海域の場合(14事例)における電位と  $R_E$  の関係を示す。この場合、そもそも  $E < -935\text{mV}$  となる事例が少なく、2/14事例(14%)であった。

5.3.1でも述べたように、電位の測定値にはばらつきを含んでいる可能性がある。このばらつきの影響は、図-5.8の結果にも含まれていると考えられる。しかし、今回の結果を踏まえると、 $-935\text{mV}$  を下回っていれば、ばらつきの影響が多少あったとしても、「残存寿命が設計

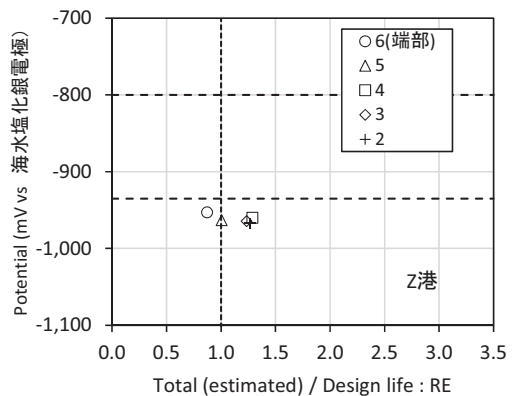


図-5.9 電位の測定値と陽極寿命の推定値/設計寿命 ( $R_E$ ) の関係 (Z 港)

値より長くなる」と判断できる可能性は高いと考える。

(2) 追加調査結果

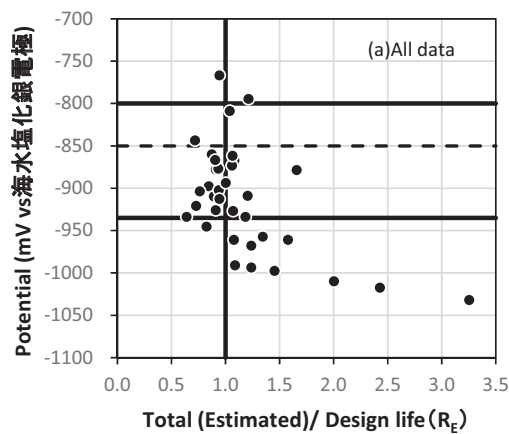
図-5.9にZ港での電位の測定値（平均値）と陽極の全寿命の推定値/設計寿命 ( $R_E$ ) の関係を示す。5点中1点が、設計寿命を若干満足しなかった。ただし、まだ設計耐用年数の1/5の経過年数であり、陽極の消耗量が少ないため、計測誤差の影響が顕著に表れている可能性もある。

5.4. まとめ

本検討では、まず既往の文献の情報を基に、28施設(35事例)において、鋼材の電位と陽極の残存寿命の関係を整理した。その結果、鋼材の電位が  $-935\text{mV}$  (vs 海水塩化銀電極) を下回った 10/11事例(91%)において残存寿命が設計寿命を上回った。清浄海域に限定すると全事例(100%)が設計寿命を上回った。このことは、設計が適切であった場合に、設置後数年経過時の電位が  $-935\text{mV}$  を満足していれば、高い確率で設計寿命を満足していることを示唆するものと考えられる。なお、今回、ある一時期に得られた測定値、かつ深度方向での平均値を基にデータ整理を行っている。特に鋼材の電位については、温度や水質によって値が大きく変動するため、ばらつきの影響を相当含んでいる可能性が高い。温度や水質などの環境条件等、諸要因の影響も加味することで、ばらつきの影響を低減できる可能性もある。

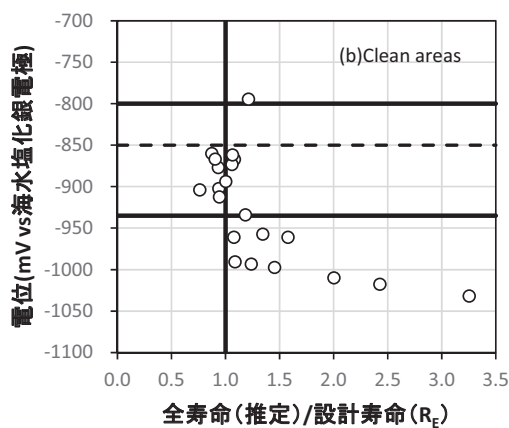
次に、2015~2019年において、追加調査を行い、上記の検証を実施した。電流低減率のみを調査したX港およびY港については、上記の調査同様、電位は  $-935\text{mV}$  以下かつ電流低減率  $r$  は  $0.5$  以下であった。一方、電位と残存寿命の関係を把握できたZ港においては、5点中1点が、設計寿命を若干満足しなかった。ただし、まだ耐





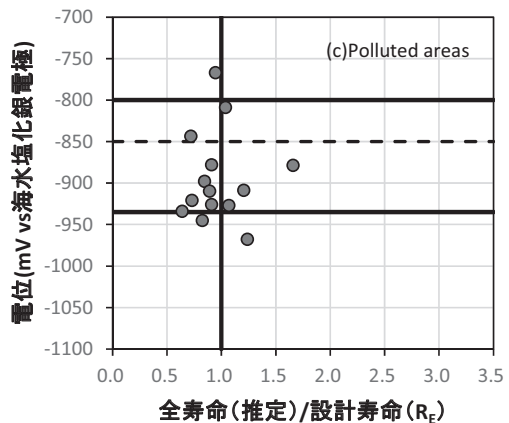
電位	全残存/設計寿命		計
	$R_E < 1$	$R_E > 1$	
$E > -800$	1	1	2
$-935 < E < -800$	13	9	22
$E < -935$	1	10	11
計	15	20	

(a) 全データ All data



電位	全残存/設計寿命		計
	$R_E < 1$	$R_E > 1$	
$E > -800$	0	1	1
$-935 < E < -800$	6	5	11
$E < -935$	0	9	9
計	6	15	

(b) 清浄海域 Clean areas



電位	全残存/設計寿命		計
	$R_E < 1$	$R_E > 1$	
$E > -800$	1	0	1
$-935 < E < -800$	7	4	11
$E < -935$	1	1	2
計	9	5	

(c) 汚染海域 Polluted areas

図-5.8 電位の測定値と陽極の寿命の推定値/設計寿命 ( $R_E$ ) の関係

用年数の 1/5 の経過年数であり、陽極の消耗量が少ないため、計測誤差の影響が顕著に表れている可能性もある。

今後は、さらにデータを蓄積し、今回検討を行った電位の判定基準に関する新たな指標の有効性について引き続き検討する予定である。

参考文献 (第 5 章)

- 1) (一財) 沿岸技術研究センター, 港湾の施設の維持管理技術マニュアル (改訂版), 2018.
- 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), 2009.

- 3) 審良善和, 山路徹, 岩波光保, 小林浩之: 港湾鋼構造物の電位計測による電気防食管理方法に関する一提案, 材料と環境 2012 講演集, pp.313-316, 2012.
- 4) 善一章, 阿部正美: 港湾構造物の所要防食電流に関する調査, 港湾技研資料, No.365, 1980.
- 5) 善一章, 横井聰之, 阿部正美: 港湾構造物の電気防食調査 (その1), 港湾技研資料, No.475, 1984.
- 6) 横井聰之, 阿部正美: 港湾構造物の電気防食調査 (その2), 港湾技研資料, No.502, 1984.
- 7) 横井聰之, 阿部正美: 港湾構造物の電気防食調査 (その3), 港湾技研資料, No.532, 1985.

## 6. おわりに

本文では、以下の4つの内容について検討を行った。

- 1) 港湾鋼構造物の集中腐食メカニズム (第2章)
- 2) 海中部における電気防食の効果 (第3章)
- 3) 干満帯付近における電気防食の効果 (第4章)
- 4) 電気防食の点検診断 (第5章)

上記4つを、実務上の具体的な課題という観点で整理すると、以下の3つにまとめられる。

- a) 海中部における電気防食の効果 (第3章)
- b) 被覆防食の下端深度の設定 (第2章, 第4章)
- c) 電位測定による陽極寿命の簡易判定 (第5章)

ここで、b)に第2章の内容が含まれているのは、下端深度の設定根拠の中に、集中腐食の不確定さ(メカニズムの不明確さ)が含まれているためである。

以下、上記のa)~c)について、本検討で得られた知見も踏まえつつ、今後の展望、実務への影響等を整理する。

### a) 海中部における電気防食の効果

#### 【本検討のまとめ】

現技術基準では、海中部における電気防食の効果は「防食率」という指標で表されている。防食率は「無防食時の腐食速度」および「防食時の腐食速度」から算出される(式(3.1)参照)。

全国で実施された、多数のテストピースによる調査結果において、「防食率」の大半は90%を大きく上回っており、全平均値は98.2%、標準偏差は2.05であった。

なお、「防食時の腐食速度」はほぼゼロに近い値を示しており、結果として、「無防食時の腐食速度」と「防食時の腐食速度」の相関は高くない。また、「防食率」の評価時に「無防食時の腐食速度」が必要となるため、電気防食が適用された構造物において、「防食率」の実態を直接的に求めることはできない。

上述のように、「防食率」という指標にはいくつかの課題がある。本検討では、防食率の代わりとなる電気防食の効果を表す指標として、「防食時の腐食速度」を提案した。なお、港湾構造物における、一般的な下記2つの前提条件を満足する場合において、防食時の腐食速度は0.01 mm/年程度以下であると考えられた。

i) 一般の海洋環境下(高波浪海域は除く)におけるM.L.W.L.以下の範囲である場合

ii) 適切な防食設計、施工および維持管理がなされている場合

ここで、一般の新設鋼構造物の場合、鋼管杭や鋼矢板の打設後から流電陽極を設置するまでの無防食期間が存在

する。この場合、上記の考え方を適用すべきでない。

なお、上述の本文での成果は、テストピースによる調査結果のみに基づいているため、今後は実構造物(あるいは実構造物を模した試験体)での確認が望まれる。

#### 【今後の課題】

実構造物における電気防食の効果(防食時の腐食速度等)の実態を、現地での調査によって評価する場合、鋼材肉厚の初期値が必要となる。しかし、初期値には許容差(設計値とのずれ)が存在するため、精度の高い評価は困難である(3.4参照)。上記を踏まえると、現地での調査により、実構造物における電気防食の効果の評価する手法として、それぞれ課題は多いものの、現状では以下の2つが考えられる。

i) 異なる2材齢で鋼材肉厚を測定する

ii) (陽極更新時に向けて) テストピースを予め数年間設置し、評価する

#### 【実務への影響の一例】

既設構造物の改良設計時において、鋼材の腐食しろの残りが非常に少ない場合に、上記で提案した「防食時の腐食速度」の考え方が効果を発揮できる可能性がある。以下、具体的な例を示す。

標準的な設計条件(防食率90%、無防食時の腐食速度0.2 mm/年、設計供用期間50年)では、 $0.2 \text{ mm/年} \times (100-90) / 100 \times 50 \text{ 年} = 1.0 \text{ mm}$ の腐食しろが計算上必要となる。一方、「防食時の腐食速度」とし、この値を0.01 mm/年と設定できれば、50年間で腐食するのは $0.2 \text{ mm/年} \times 50 \text{ 年} = 0.5 \text{ mm}$ となり、上記の半分となる。なお、上記の標準的な計算条件で防食率を95%と設定した場合と同じ値である( $0.2 \text{ mm/年} \times (100-95) / 100 \times 50 \text{ 年} = 0.5 \text{ mm}$ )。

また、腐食しろの残存状態にかかわらず、構造物の設計供用年数を当初の50年間から延長し、さらに長期にわたり継続して施設が使われる際に、電気防食が継続的に適用され続ける場合、電気防食の効果を表す指標としては、無防食期間の腐食しろ等の諸要因を含んだ「防食率」ではなく、「防食時の腐食速度」の考え方を採用した方が合理的と考える。なお、「防食時の腐食速度」の値の設定については、実態を踏まえた設定が望ましい。

### b) 被覆防食の下端深度

#### 【本検討のまとめ】

#### 1) M.L.W.L. 付近における集中腐食メカニズム

港湾鋼構造物において、集中腐食は必ず起こるものではないことが改めて確認された。また、干満帯部分が無防食状態の場合に、この部分で生じた「さび」の還元反応が起こる場合に促進される可能性があることも改めて

確認された。なお、集中腐食に及ぼす水深（海中部の鋼材長さ）の影響に関して、今回実施した屋外水槽での暴露試験結果においては、水深が浅い（海中部の長さが短い）場合に、干満部の最低水位の直下付近での腐食速度が極大化しやすくなる可能性が示唆された。

ただし、集中腐食に対して影響が大きいとされる「河川水流入」の影響については、今回は検討できなかった。

## 2) 干満帯付近での電気防食効果

被覆深度が L.W.L.-1m まで適用されていなくても、浸漬率（海水中に没している時間の割合）が高い場所については、十分な電気防食の効果が発揮されていた。以上より、河川水の流入が著しいといった特殊な環境の場合でない限り、現技術基準における、電気防食の適用範囲の上限である M.L.W.L.程度まで被覆されていれば、電気防食の効果としては十分である可能性が高い。ただし、設計対象の構造物やその近隣の環境での電気防食の効果の実態を事前に確認することが必要である。事前の確認が難しい場合は、施設の供用後に電気防食の効果の追跡調査を行い、仮に効果が十分ではなかった場合は追加対応を行うとするのがよいと考える。

また、実構造物に対する定期的な点検診断により、当該環境において M.L.W.L.より上の位置においても所要の防食効果が得られることが確認されていれば、施設の重要性や、今後の供用期間等を加味した上で、さらに適用範囲の下限を引き上げることも可能であると考えられる。

ただし、干満帯付近に被覆防食が適用されていない場合において、第4章4.4で示したように、干潮時に大気中に露出した鋼材部には、満潮時に再び没水した際に過大な防食電流が流電陽極から流入するため、流電陽極の消耗が早くなる可能性がある。また、電気防食が完全に消耗した際に、M.L.W.L.直下付近で集中腐食が進行する可能性もある（特に河川水が混入する場合）。さらには、緊急的な予算措置ができないことにより、電気防食の補修（陽極の交換）が即時に行えないことも考えられる。以上のことを踏まえると、新設構造物においては、これまでと同様に L.W.L.-1 m 程度まで被覆防食を適用する方が合理的であると考えられる。

### 【今後の課題】

河川水が混入している箇所、本文と同様な検討を行う必要がある。

### 【実務への影響の一例】

新設構造物において、構造形式、水深等の理由で被覆下端を L.W.L.-1m に設定できない場合に、被覆防食の下端深度の変更を検討する際の参考になる。

また、既設構造物において、被覆防食あるいはコンクリート上部工の下端深度が L.W.L.～M.L.W.L.付近の状態に供用されている場合に、被覆防食の追加（下端深度の引き下げ）の必要性を判断する際の参考になる。

## c) 電位測定による陽極寿命の簡易判定

### 【本検討のまとめ】

過去のデータおよび実構造物で実施した調査結果より、電位の測定値を基に、流電陽極の残存寿命が設計耐用年数を満足しているか否かを判定できる可能性が示された。

### 【今後の課題】

今回検討を行った電位の判定基準に関する指標の有効性について、さらにデータを蓄積し、検証を継続して実施する必要がある。この際、港湾施設の維持管理において実施される「定期点検診断」の際に取得されたデータも活用可能である。

また、電位の測定については、計測装置は比較的簡易なものであるが、一部（特に照合電極）は定期的な維持管理（測定精度の確認）が必要である。そのため、港湾管理者（特に規模の小さい港湾の場合）が直営で継続的に測定を実施することは必ずしも容易ではない。支援体制の確立（例えば計測装置のリース等）も重要と考える。

### 【実務への影響の一例】

本手法が確立されれば、水中作業が必要である「陽極消耗量調査」の実施頻度を減らすことが可能になる。また、電位測定が普及すれば、重大な事故に至る可能性のある鋼構造物（特に矢板式構造物）の維持管理がより容易かつ信頼性の高いものとなると考える。

## 謝辞

本研究の一部は、電気防食工業会との共同研究として実施したものである。第3章は、第二著者（田土弘人）が、九州大学大学院 濱田秀則教授を主査とし、貝沼重信准教授、武若耕司教授（鹿児島大学）を副査として、これらの先生方のご指導のもとにまとめた学位論文（工博甲第2907号、取得日2019年9月25日）の一部を再編したものである。

また、第3章3.2の調査は東京港埠頭（株）の長期間にわたるご協力の下、実施したものである。第4章4.2の調査結果は国土交通省四国地方整備局からご提供いただいた。さらには、本文全体において、過去長期間にわたり、運輸省港湾技術研究所 材料研究室の諸先輩方が実施された調査結果を参考にしている。

関係者の皆様に対し、厚くお礼申し上げます。

（受付年月日：2020年3月6日）

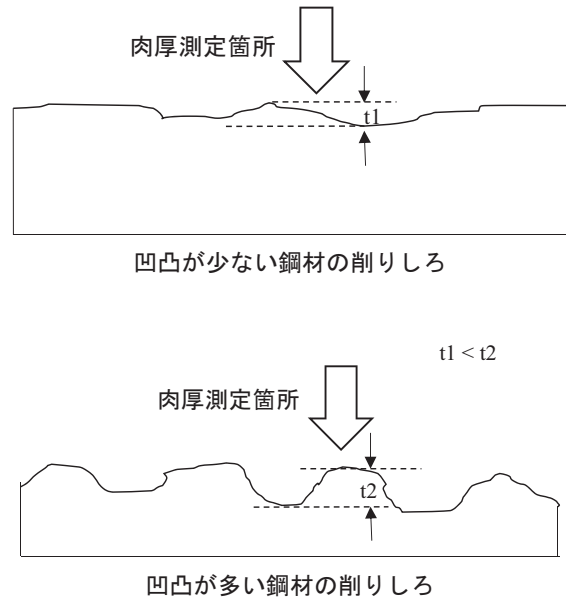
付録A 肉厚測定時の素地面調整における削りしろの  
検証実験

鋼材の肉厚測定を実施する前に鋼材面の前処理として、鋼材面の凹凸を除去する素地面調整が実施される。この素地面調整時に削られる肉厚（削りしろ）は、一般的には1回の測定につき30~100 $\mu\text{m}$ であるとされている。これは、ある期間内の腐食量が多い場合は無視できるオーダーであるが、電気防食が適用され、腐食量が非常に少ない場合、無視できないオーダーとなりうる。一方で、削りしろに関して、詳細に確認した事例は少ない。そこで、素地面調整前における鋼材の凹凸状況の違いに着目し、以下の検証実験を行った。

本実験では、肉厚が既知である2種類の鋼材試験片に対し、水中で素地面調整を実施し、その後、水中で鋼材の超音波測定を実施した。なお、試験片は、約2.7年間屋外水槽に暴露されたものであり、1つは無防食状態であったもの（腐食による表面の凹凸が多い）、もう1つは電気防食が適用された状態（腐食による表面の凹凸が少ない）のものである。また、素地面調整の方法は、実際の水中の実構造物において実施する方法と同様とした。

検証実験の結果を付表-A.1に示す。腐食による表面の凹凸が少ない場合、削りしろは40~100 $\mu\text{m}$ 程度であり、平均値で55 $\mu\text{m}$ であった。一方、腐食による表面の凹凸が多い場合、削りしろは80~290 $\mu\text{m}$ 程度であり、平均値で200 $\mu\text{m}$ であった。これは、付図-A.1に示すように、腐食による表面の凹凸が少ない場合、鋼材表面は比較的

平滑であるため素地面調整による削りしろは小さいと考えられる。一方、腐食による表面の凹凸が多い場合、鋼材表面は平滑でないため、素地面調整による削りしろが比較的大きくなると考えられる。



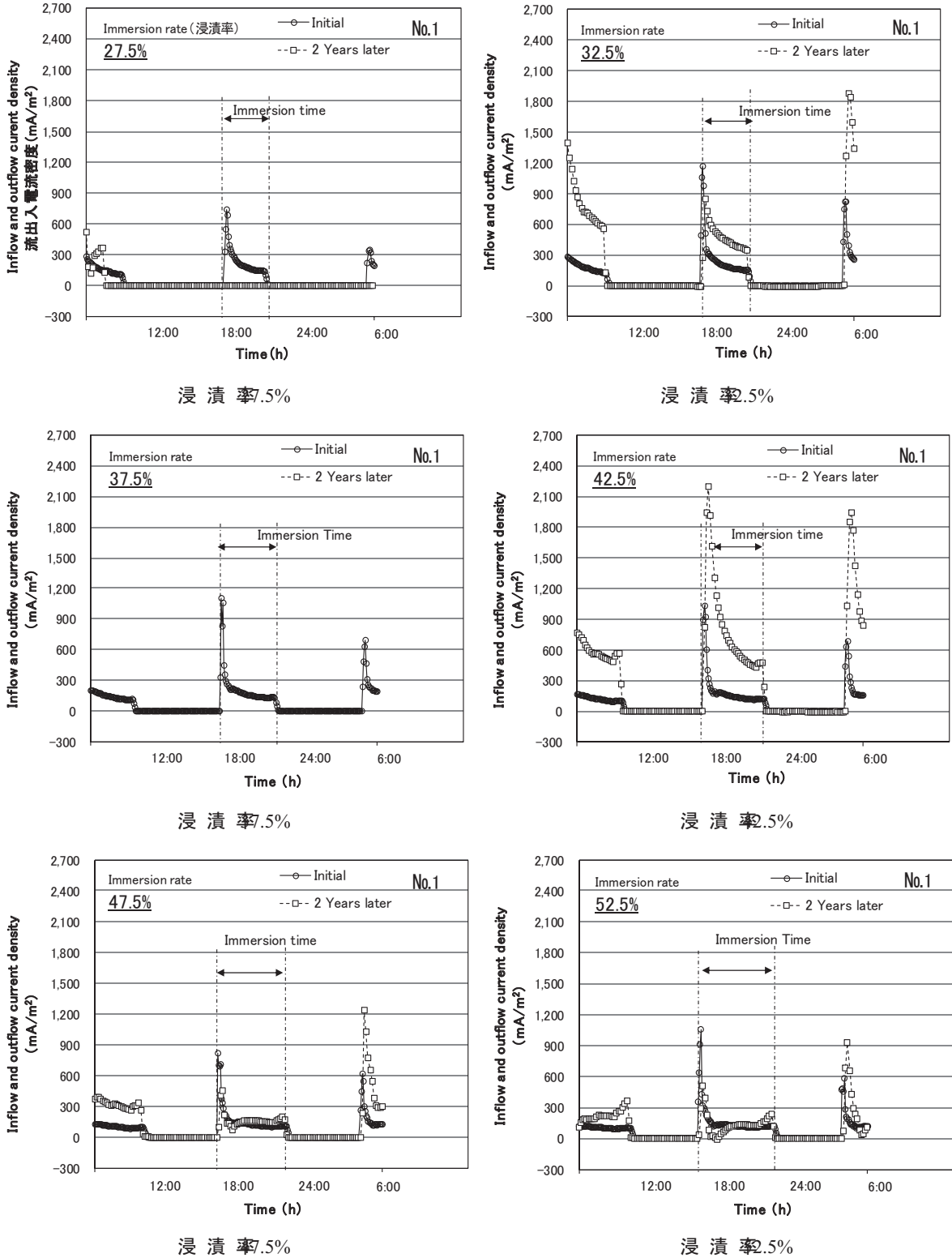
付図-A.1 鋼材の凹凸が素地面調整に及ぼす影響  
(イメージ)

付表-A.1 検証実験の結果

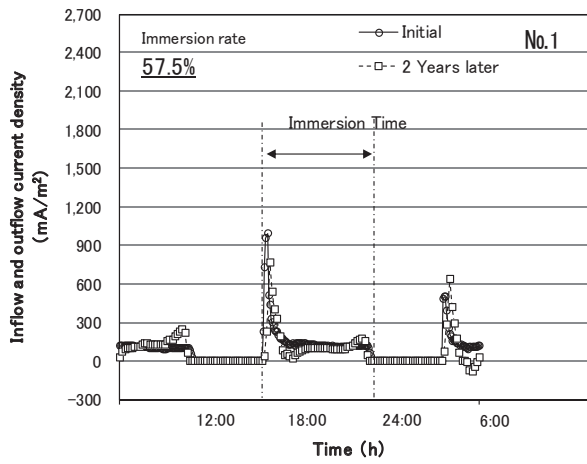
試験片	調査箇所	元厚(mm)	調整前肉厚(mm)	調整後肉厚(mm)	削りしろ(mm)	削りしろ( $\mu\text{m}$ )	削りしろ平均値( $\mu\text{m}$ )
凹凸が少ない (電気防食)	1	2.85	2.79	2.75	0.04	40	55.0
	2	2.85	2.79	2.75	0.04	40	
	3	2.85	2.80	2.75	0.05	50	
	4	2.85	2.79	2.73	0.06	60	
	5	2.85	2.81	2.77	0.04	40	
	6	2.85	2.82	2.78	0.04	40	
	7	2.85	2.82	2.72	0.10	100	
	8	2.85	2.79	2.72	0.07	70	
凹凸が多い (無防食)	1	2.89	2.76	2.68	0.08	80	200.0
	2	2.89	2.73	2.44	0.29	290	
	3	2.89	2.70	2.44	0.26	260	
	4	2.89	2.64	2.41	0.23	230	
	5	2.89	2.67	2.53	0.14	140	
	6	2.89	2.72	2.47	0.25	250	
	7	2.89	2.65	2.40	0.25	250	
	8	2.89	2.56	2.46	0.10	100	

付録B 干満部に位置する鋼材に流出入する電流密度の時間変化（屋外暴露水槽での試験結果）

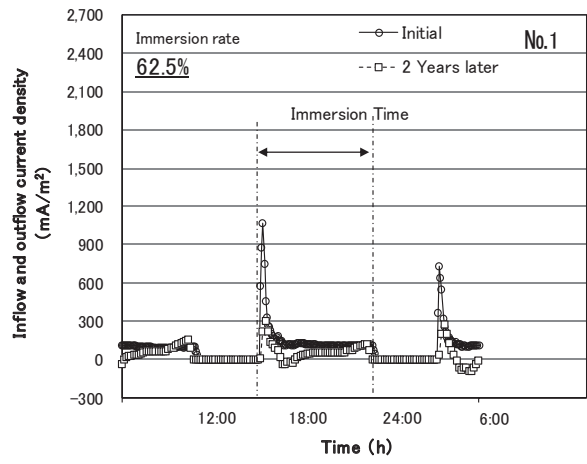
4.4で実施した試験における、各試験体 No.1~3 での、水位の変化（干満）に伴い、鋼材に流出入する電流密度の時間変化を付図-B.1~B.3に示す。なお、試験開始初期と2年後の各1日間における時間変化である。また、浸漬率（水中に没している時間の割合）ごとに示した。



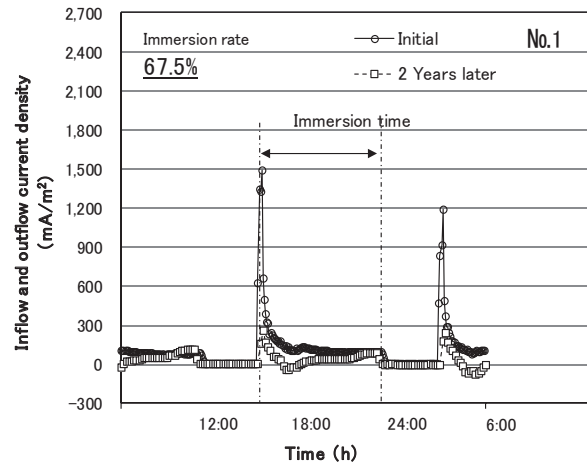
付図-B.1(a) 鋼材に流出入する電流密度の時間変化（試験体 No.1）



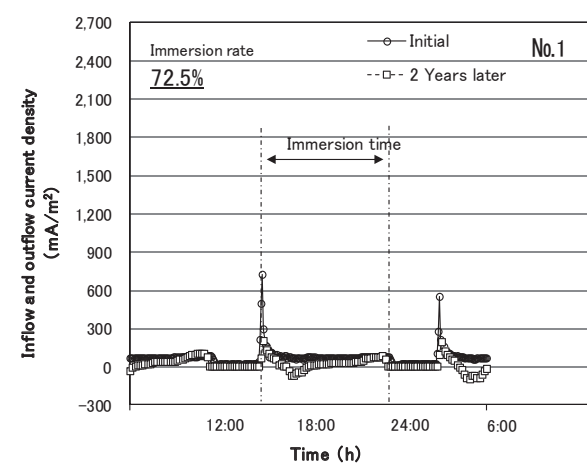
浸漬率 57.5%



浸漬率 62.5%

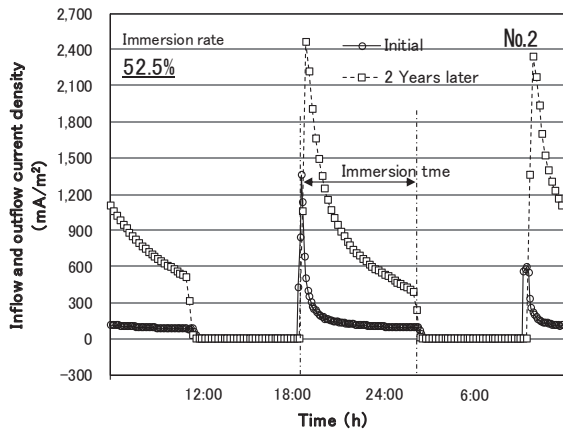


浸漬率 67.5%

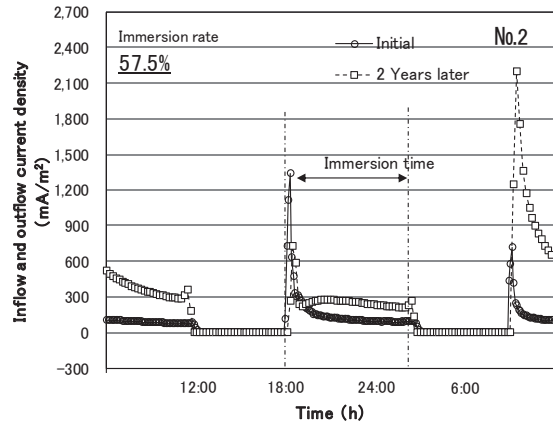


浸漬率 72.5%

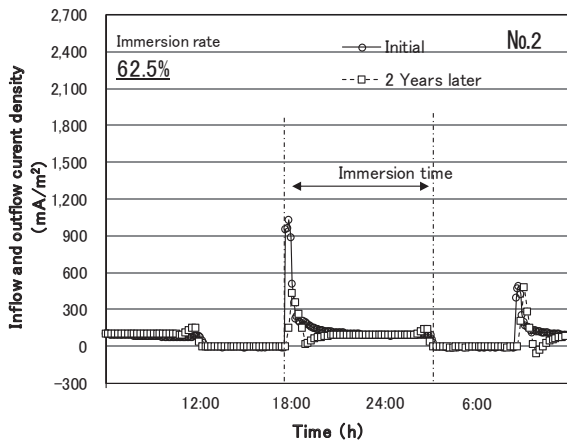
付図-B.1 (b) 鋼材に流出入する電流密度の時間変化 (試験体 No.1)



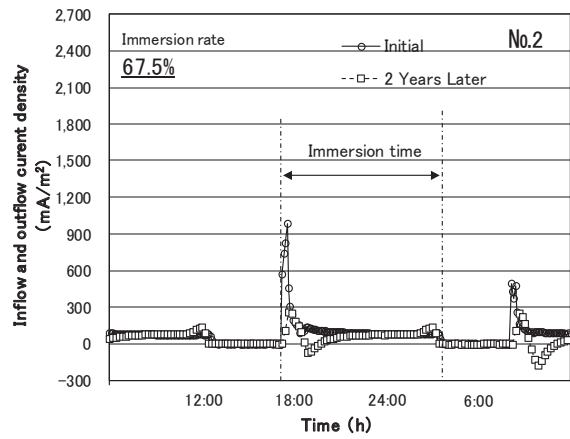
浸漬率5.5%



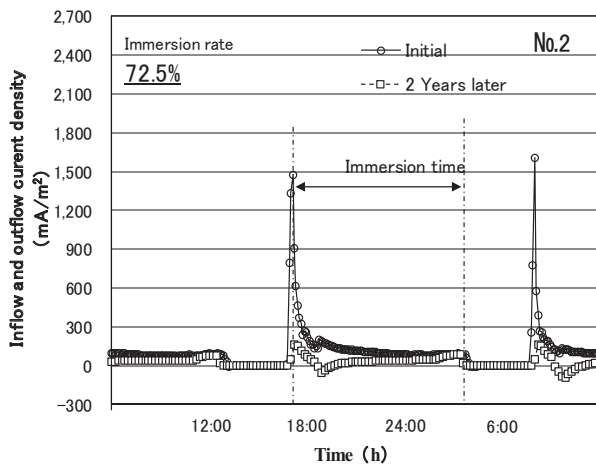
浸漬率7.5%



浸漬率5.5%



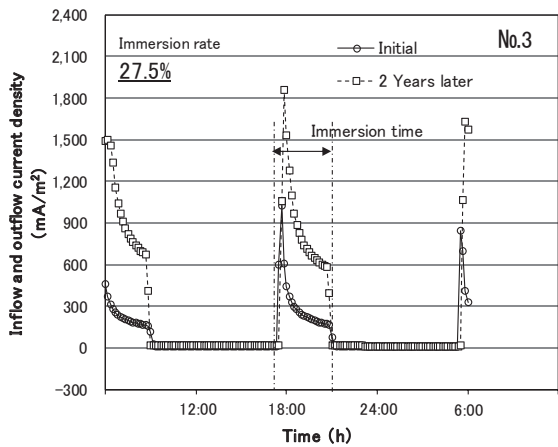
浸漬率7.5%



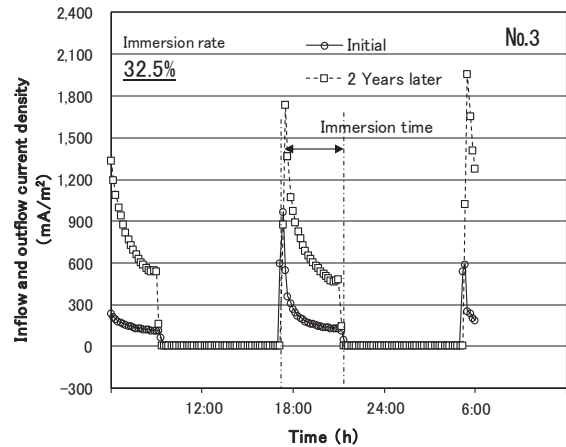
浸漬率5.5%

付図-B.2 鋼材に流出入する電流密度の時間変化 (試験体 No.2)

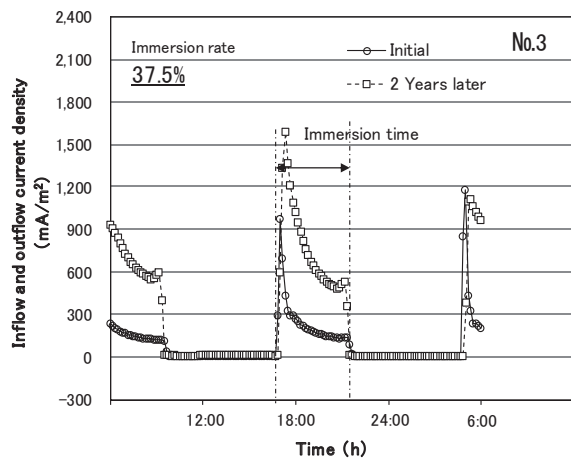




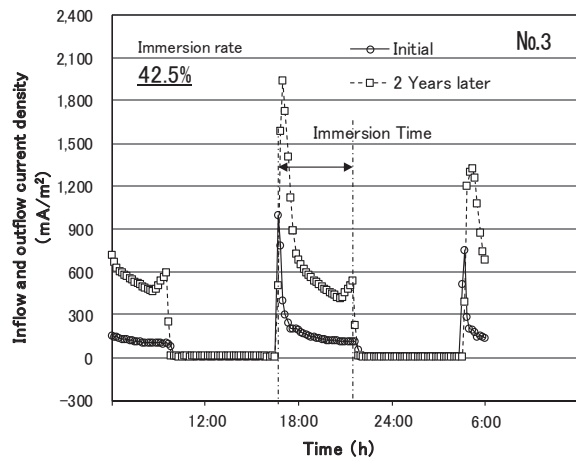
浸漬率7.5%



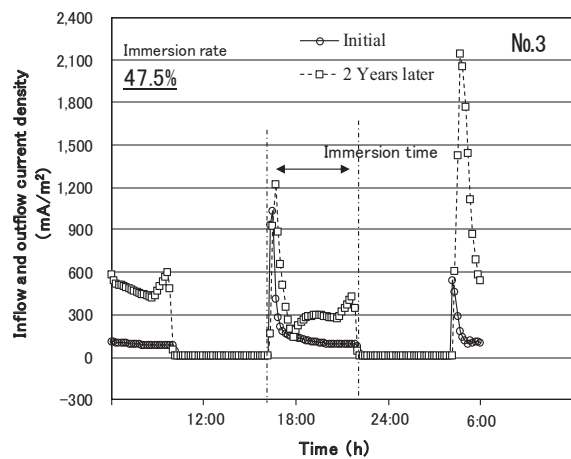
浸漬率2.5%



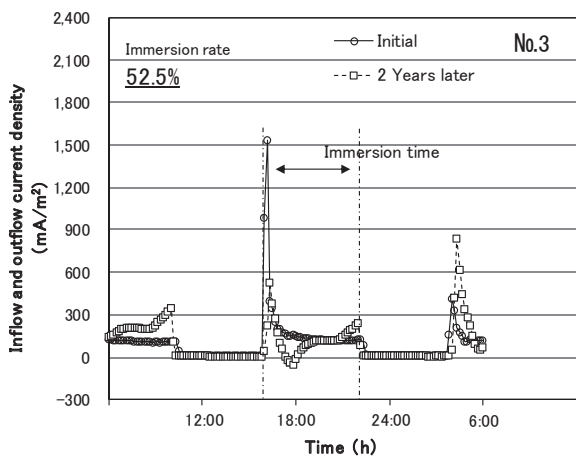
浸漬率7.5%



浸漬率2.5%

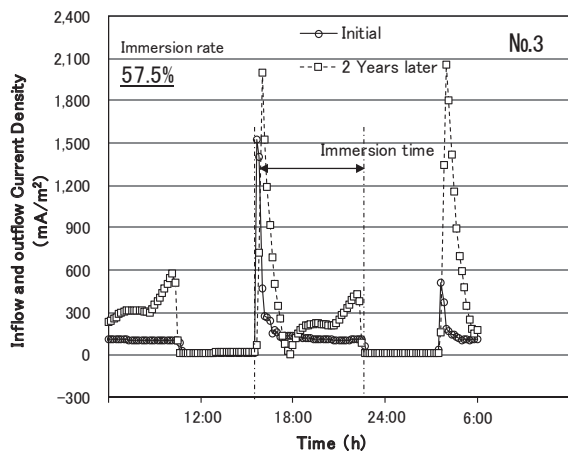


浸漬率7.5%

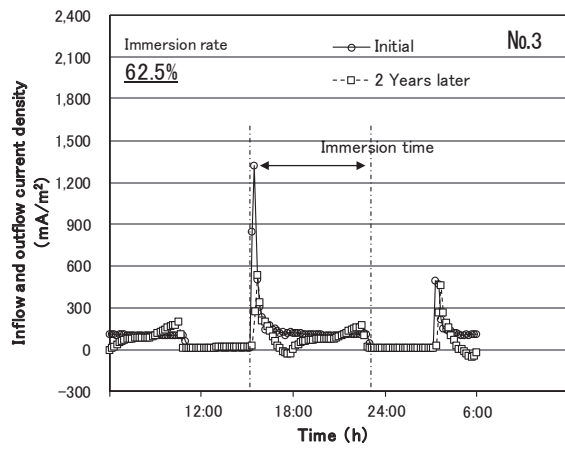


浸漬率2.5%

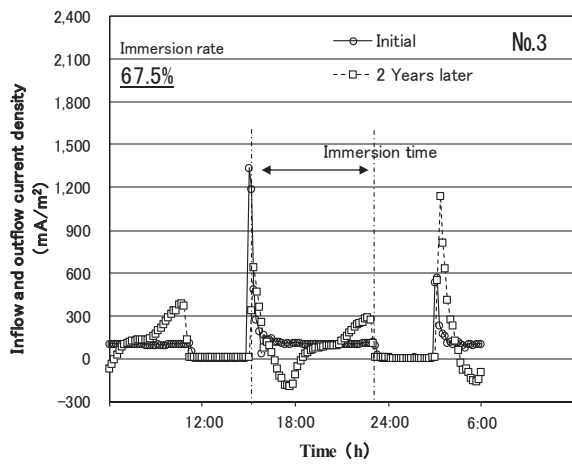
付図-B.3(a) 鋼材に流出入する電流密度の時間変化 (試験体 No.3)



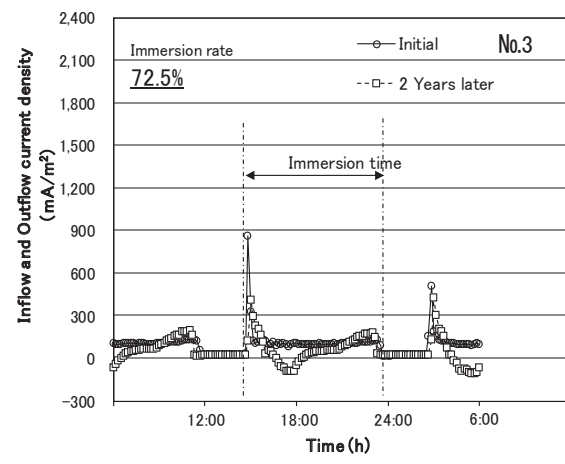
浸漬率57.5%



浸漬率62.5%



浸漬率67.5%



浸漬率72.5%

付図-B. 3(b) 鋼材に流出入する電流密度の時間変化 (試験体 No.3)

港湾空港技術研究所資料 No.1369

2020.3

編集兼発行人 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

発行所 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 © (2020) by MPAT

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

この資料は、海上・港湾・航空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、複写は海上・港湾・航空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