

# 港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE  
OF  
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1113

December 2005

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

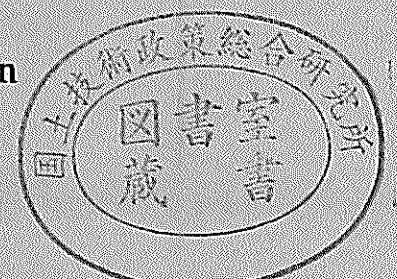
濱田 秀則

兼坂 薫

鈴木 靖庸

宮田 義一

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 .....	4
2. 電気防食および電着防食の概要 .....	4
3. 電着被膜厚と所要防食電流密度の関係の検討(室内試験) .....	5
3.1 実験方法 .....	5
3.2 結果および考察 .....	6
4. 海水循環水槽における適用性の検討(実環境模擬試験) .....	7
4.1 実験方法 .....	7
4.2 結果および考察 .....	8
5. 実環境における適用性評価(実機試験) .....	11
5.1 実験方法 .....	11
5.2 結果および考察 .....	11
6. 結 論 .....	12
7. あとがき .....	13
参考文献 .....	13

# **An Experimental Study on the Steel Corrosion Prevention Effectiveness of Combination of Electro-deposition and Cathodic Protection**

**Hidenori HAMADA \* · Kaoru KANESAKA \*\* · Yasunobu SUZUKI \*\*\***

**Yoshikazu MIYATA \*\*\*\***

## **Synopsis**

The cathodic protection method with adequate sacrifice anodes (i.e., galvanic coupling protection) has generally been applied as an anticorrosion measure for the submerged parts of harbor steel structures. The effectiveness of this method has been confirmed with calcareous films electrodeposited on the steel surface. Electro-deposition Technique has already been developed in which this calcareous film is compulsorily produced by an external power. In this study, the combination of above two methods "combined cathodic protection method" is considered. This new method is composed of the two steps: first, an external power is applied in order to produce enough thickness of calcareous films; second, cathodic protection is subsequently continued with an adequate sacrifice anode in the absence of the external power. The effectiveness of the method was examined by three steps experiments, 1) experiments in the laboratory-scale quiescent seawater, 2) experiments in a tank filled with natural seawater, and 3) experiments in an actual marine environment. The test results obtained in this study are as follows,

1) Laboratory experiments showed that the calcareous film with 100  $\mu\text{m}$  in thickness is at least necessary for reducing the protective current of the cathodic protection.

2) It was proved that by the combination method, the required current density can be reduced to the level of 20% at H.W.L. and to the level of 5% below H.W.L., of the value for the usual cathodic protection solo.

3) The experimental results in actual environment showed that no corrosion was recognized on the steel structures after 5 months exposure in the environment, and the protective current density could be reduced to the level of 21% of the value for the usual cathodic protection.

4) From these results, it can be concluded that the combined cathodic protection method can be effective as a protection method of steel in the marine environment.

---

**Key Words:** corrosion protection, harbor steel structure, cathodic protection method, electrodeposition method, protective current density.

\* Head of Materials Division, Geotechnical and Structural Engineering Department

\*\* Former Trainee of Materials Division, Geotechnical and Structural Engineering Department (Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd.)

\*\*\* Production Engineering Center, Research & Development, Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd

\*\*\*\* Researcher of Materials Division, Geotechnical and Structural Engineering Department

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

Phone: +81-46-844-5061 Fax: +81-46--844-0255 e-mail : [hamada@pari.go.jp](mailto:hamada@pari.go.jp)

# 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

濱田 秀則\*・兼坂 薫\*\*・鈴木 靖庸\*\*\*・宮田 義一\*\*\*\*

## 要 旨

港湾鋼構造物の海中部における腐食対策として一般的に電気防食法が適用されている。港湾鋼構造物へ電気防食法を適用した場合、副生成物として鋼材表面上に電着被膜が析出し、電気防食における所要防食電流密度が低減される効果が確認されている。また、最近ではこの電着被膜を外部電源により強制的に生成させ、電着被膜により防食を図る工法が、“電着工法”として既に開発されている。この電着工法により最大限の防食効果を得るためには、電着被膜を一定の厚膜とする必要があるため施工期間が長期化すること、電着被膜が剥離した場合に自己修復効果がないこと等から、広く適用されるには至っていない。そこで港湾鋼構造物の新しい防食法の試みとして、電着と電気防食を併用して適用することを考えた。本研究では、「初期に外部電源により電着被膜を生成させ、その後電気防食を適用する併用工法」の防食効果を把握するための一連の実験的検討を行った。得られた結果の概要を以下に示す。

(1) 室内試験結果より、電気防食の必要電流密度を低減させるために必要な電着被膜の必要最小膜厚は約 100  $\mu\text{m}$  であることがわかった。また、電気防食における所要防食電流密度は通常の電気防食法と比較して最大で 95%も低減可能であることがわかった。

(2) 海水循環水槽による実環境模擬試験結果より、各環境での所要防食電流密度は、電気防食法と比較して、H.W.L. では約 80%、H.W.L. 以深では最大で 95%低減可能であることが確認された。また、電着被膜を生成させることで電気防食法単独では適用が難しいとされている干満帯上部への適用の可能性も確認された。

(3) 鋼管杭の海中部を対象とした試験施工より、施工 5 ヶ月後の調査では外観上腐食は認められず、電位も防食電位を満たしていることから良好な防食状態であることが確認された。また、電気防食における所要防食電流密度が大幅に低減されることが推定され、実環境においても電着法と電気防食法の併用工法の有効性が確認された。

キーワード：防食，港湾鋼構造物，電気防食法，電着法，防食電流密度

\* 地盤・構造部材料研究室 室長

\*\* 元地盤・構造部材料研究室受託研修生（現石川島播磨重工業株式会社 物流・鉄構事業本部 鉄構事業部）

\*\*\* 石川島播磨重工業株式会社 技術開発本部 生産技術センター

\*\*\*\* 地盤・構造部材料研究室 研究官

〒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：046-844-5061 Fax：046-844-0255 e-mail：[hamada@pari.go.jp](mailto:hamada@pari.go.jp)

## 1. まえがき

港湾鋼構造物の海中部における腐食対策として、電気防食法が最も多く用いられている。電気防食法には外部電源方式と流電陽極方式があり、港湾鋼構造物に対しては施工および設備の維持管理が簡便な Al 合金を用いた流電陽極方式が広く使われている。一方、港湾鋼構造物を含む海洋鋼構造物に電気防食法を適用した場合、鋼材表面上に石灰質被膜が析出・付着することが以前から確認されている<sup>1),2)</sup>。この石灰質被膜は電着被膜（エレクトロコーティング）と呼ばれており、電気防食の微弱な電流により海水中に溶存しているカルシウムイオン(Ca<sup>2+</sup>)、マグネシウムイオン(Mg<sup>2+</sup>)が主に炭酸カルシウム(CaCO<sub>3</sub>)、水酸化マグネシウム(Mg(OH)<sub>2</sub>)として、電気化学的に鋼材表面に析出・付着するものである。数10μm程度の薄い被膜が形成されることで所要防食電流密度の低減、および防食電流分布の改善に対する有効性が既に報告されている<sup>3),4)</sup>。

このように電着被膜は通常、電気防食の副生成物として知られていたが、最近では外部電源により鋼構造物に人為的に通電して通常の流電陽極方式による電気防食では得られない厚い電着被膜を形成し、この電着被膜により防食を図る工法として電着法が認知されつつあり<sup>5)</sup>、多くの基礎的検討がなされている<sup>5),6),7),8),9),10),11)</sup>。しかし、電着法単独で防食効果を得るためには、1~5mmの厚い被膜厚を設ける必要があるために、通電期間として数ヶ月~1年程度の長期間が必要となり、また施工後、流木などにより被膜が欠損した場合の自己修復効果はない。このような理由もあり、港湾工事の鋼矢板、鋼管杭など一般の港湾鋼構造物に対しては適用されていないのが現状である。そこで、著者らは、電着被膜生成後に電気防食を行う併用工法の開発を考えた。電気防食法の観点からは、電着被膜により所要防食電流密度の低減が期待でき、従って Al 合金陽極の寿命延長を図ることができる。一方、電着法の観点からは、被膜厚の低減すなわち電着施工期間の短縮が期待できる。さらに、電着被膜の欠損部に対しても、電気防食により電着被膜の再生、つまり自己修復効果も付与することが可能となる。

このように、各々が有効な防食法である電気防食法と電着法を複合活用することにより、ミニマムメンテナンスを目標とした新たな長期防食法を開発することが本研究の目的である。本資料は、電着法と電気防食法の併用工法における防食性能の検証を、電着法の施工条件の観点から検討したものである。

## 2. 電気防食および電着防食の概要

電気防食法は鋼構造物の表面から流出する電流(腐食電流)を抑止する目的で、外部から腐食電流とは逆向きの電流を流して腐食を防止する工法である。腐食電流の流出を阻止できれば、鋼構造物が鉄イオン(Fe<sup>2+</sup>)として溶出すること(いわゆる腐食)を原理的には完全に防ぐことが可能である。電気防食の特長は、1) 適正な防食電位を維持すれば、腐食をほぼ完全に抑止できる、2) 新設、既設の鋼構造物を問わず適用できる、という2点が挙げられる。

電気防食法には、前述したように流電陽極方式と外部電源方式の2種類があり、港湾鋼構造物に対しては、一般に Al 合金を陽極として用いる流電陽極方式が広く使われている。

一方、電着法は、海洋鋼構造物の電気防食法と類似の技術であり、鋼材側(カソード、陰極)に流入する電流により鋼材表面に石灰質被膜を生成させ、防食を図る工法である。鋼材に流入する電流により、鋼材(カソード)表面に隣接する溶液のpHが上昇する。このpH上昇によって、海水中のCa<sup>2+</sup>またはMg<sup>2+</sup>は、次式に従ってCaCO<sub>3</sub>またはMg(OH)<sub>2</sub>の形で沈殿し、鋼材表面上に石灰質被膜が形成される<sup>1),2),6),7)</sup>。図-1にこのメカニズムの概要を示す。



または



および

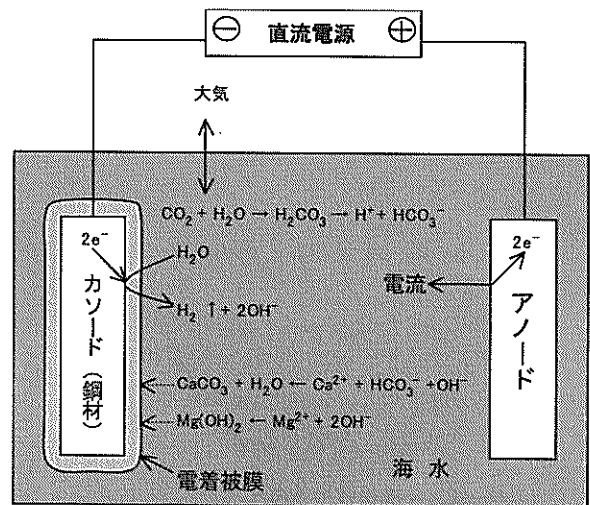


図-1 電着被膜生成反応の概略

このようにして形成される石灰質電着物が海洋鋼構造物の防食にとって重要な役割を果たすことは広く知られている。例えば、電気防食を止めた後でも、石灰質電着物が海水に暴露された海洋鋼構造物を 10 数年間以上防食できたとの報告もある<sup>12)</sup>。

港湾鋼構造物に電気防食を適用すると、所要防食電流密度の定常値は初期に比べて時間の経過とともに約 50% まで低下するが、その要因の一つが鋼材表面に電着被膜が生成されることである<sup>3),4)</sup>。この現象に着目し、初期に外部電源を用い強制的に通電を行うことで電着被膜を短期間で生成させ、電気防食における所要防食電流密度の低減を図ることを考えた。本研究においては、まず基礎的検討として、①電着被膜厚と所要防食電流密度の検討(3章)、②海水循環水槽による適用性の検討(4章)、③実環境による適用性評価(5章)、を行った。

### 3. 電着被膜厚と所要防食電流密度の関係の検討 (室内試験)

本章では、初期の電着時の諸条件を変化させることにより、鋼板表面に様々な被膜厚、被膜組成の電着被膜を生成させた。次に、異なる電着被膜を有する鋼材に対して電気防食を適用し必要防食電流密度を求めた。これより、防食電流密度を十分に低減することのできる電着被膜について検討を行った。

#### 3.1 実験方法

##### (1) 電着被膜生成条件

図-2 にシステム概略図を示す。試験片の材質およびサイズは、“SM400(JIS G 3015), 40×70×3.2mm, 有効面積: 48cm<sup>2</sup>”であり、図-3 に概略図を示す。この試験片を陰極とし、陽極として Mg 棒(φ20×150mm)を用いた。水温が 25℃, 静水環境(無攪拌)下において陰極-陽極間にポテンシヨ・ガルバノスタット(北斗電工(株)製, HA-151)を用いて直流電流を印加することで電着被膜を生成した。なお、被膜組成比(CaCO<sub>3</sub>/Mg(OH)<sub>2</sub>)を変化させるために電流密度(Dk)を 0.5A/m<sup>2</sup>, 1.0A/m<sup>2</sup>, 2.0A/m<sup>2</sup>の3水準とし、さらに膜厚を変化させるために表-1 に示す通電時間で電着を行った。また、試験に用いた自然海水の化学分析結果は、pH が 8.00 (分析時水温: 26.5℃), 塩分濃度(NaCl)が 3.2%, Mg<sup>2+</sup>濃度が 1283ppm, Ca<sup>2+</sup>濃度が 385ppm である。

生成した電着被膜の膜厚は、電磁式膜厚計(株)サンコウ電子研究所製, SDM-mini R 型)を用いて計測(18 点平均)した。

##### (2) 所要防食電流密度の測定

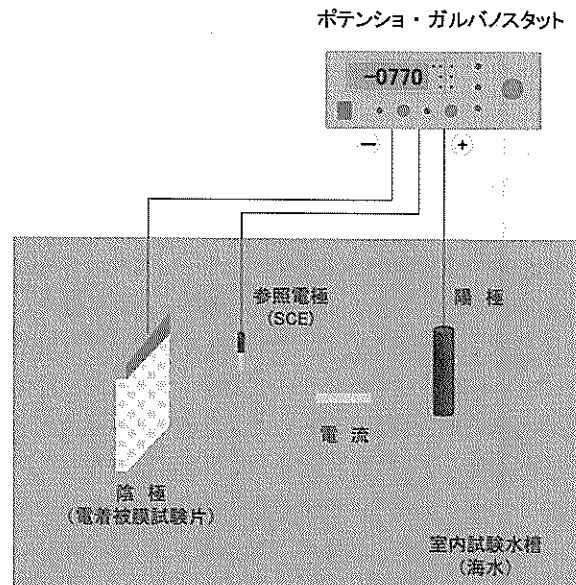


図-2 実験システム概略図

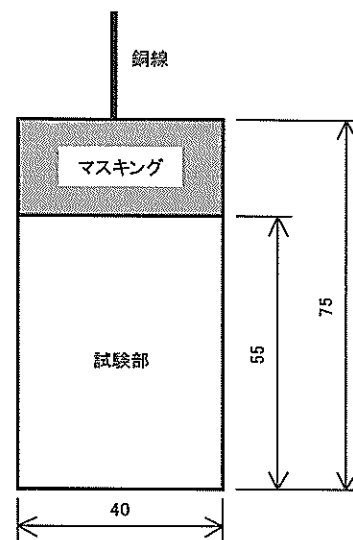


図-3 鋼板(試験片)の概略図

表-1 各Dkにおける通電時間

Dk(A/m <sup>2</sup> )	通電時間(day)
0.5	0.56, 2.8, 5.6, 16.7, 27.8, 33.6, 44.8, 55.6
1.0	0.22, 1.1, 2.2, 6.7, 11.2, 13.2, 17.6, 22.4
2.0	0.1, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 5.1, 6.0, 8.0, 10.2

(1) で生成した「電着被膜付試験片」およびこれと比較するための「電気防食用試験片」(図-3 と同様の未処理試験片: 裸鋼板) に対して電気防食を適用した。図-2 に示したシステム概略図において、陽極として Zn 棒(φ20×150mm), 参照電極として飽和甘コウ電極(SCE)を用い、試験片の電位をポテンシヨ・ガルバノスタット(北斗電工

(株)製, HA-151)にて, 防食電位である-770mV vs. SCEに保持し, その際に流れる防食電流密度を計測した.

### 3.2 結果および考察

図-4に電着被膜厚と防食電流密度の関係を示す. 図-4より, 電着被膜付試験片の防食電流密度は, 電着被膜生成時の電流密度に関係なく, 膜厚が100 $\mu$ mより大きくなると急激に低下し, その後は膜厚の増加とともに緩やかに低下することがわかる. これは, 電着被膜が腐食因子( $O_2$ ,  $H_2O$ )を遮断していることによる. また, 同じ膜厚で防食電流密度を比較した場合, 電流密度0.5A/m<sup>2</sup>で生成した電着被膜が, 他に比べわずかであるが低くなっている. 表-2に電着生成時の電流密度と被膜組成の関係を示す. 0.5A/m<sup>2</sup>で電着した場合, 結晶質であるCaCO<sub>3</sub>が43mass%となり, その他の電流密度の場合と比較してCaCO<sub>3</sub>含有率が高いことから(Mg(OH)<sub>2</sub>は非結晶質), 被膜の緻密性が高くなり, 環境遮断効果が向上していることが推察される.

また, 電気防食用試験片における防食電流密度の測定

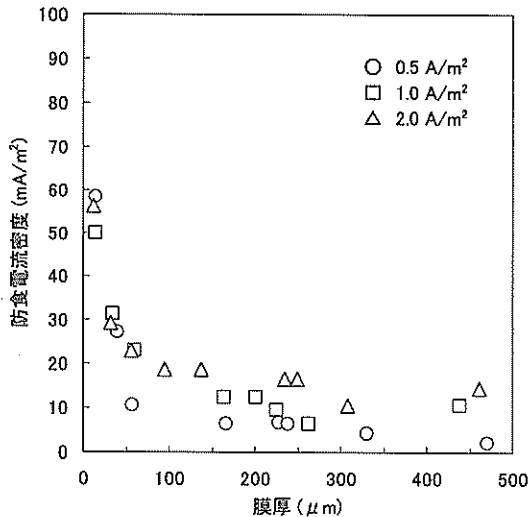


図-4 電着被膜厚と防食電流密度の関係

表-2 電着時の電流密度と被膜組成の関係

Dk (A/m <sup>2</sup> )	CaCO <sub>3</sub> (mass%)	Mg(OH) <sub>2</sub> (mass%)	CaCO <sub>3</sub> /Mg(OH) <sub>2</sub>
0.5	43	57	0.8
1.0	17	83	0.2
2.0	3	97	0.03

注1) CaCO<sub>3</sub>/Mg(OH)<sub>2</sub>: mass%比

結果を図-5に示す. 図-5において, 電気防食用試験片の防食電流密度は浸漬1時間後で108.3mA/m<sup>2</sup>, 浸漬3日後の定常値では45.8mA/m<sup>2</sup>となった. この値は海水中での鋼材の必要防食電流密度に関する既往の報告と良く一致している<sup>13)</sup>. この電気防食用試験片の定常的防食電流密度(Dk<sub>CP</sub>: 45.8mA/m<sup>2</sup>)と膜厚100 $\mu$ m以上の電着被膜付試験片の防食電流密度(Dk<sub>EC</sub>)から, 防食電流密度の低減効果を算出した結果を表-3に示す. なお, 低減効果の算出は次式による.

$$\text{低減効果(\%)} = (Dk_{CP} - Dk_{EC}) \times 100 / Dk_{CP} \quad (6)$$

表-3より防食電流密度の低減効果は, 膜厚と電着被膜組成に依存するが, 初期に電着被膜を強制的に生成させた後に電気防食を適用することで, 今回生成した試験片では通常の電気防食(電気防食用試験片)と比較して所要防食電流密度が最大で95%も低減される結果となった.

以上の結果から, 電着と電気防食を併用する場合, 電気防食における電着の必要最小膜厚は約100 $\mu$ mであること, また, 電着皮膜を生成させることにより, 電気防食における所要防食電流密度を大きく低減できることを確

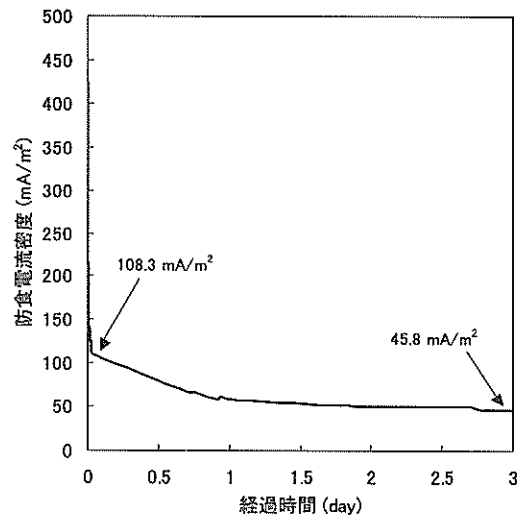


図-5 裸鋼板における防食電流密度測定

表-3 電着被膜厚100 $\mu$ m以上の防食電流密度

CaCO <sub>3</sub> /Mg(OH) <sub>2</sub>	防食電流密度(mA/m <sup>2</sup> )	低減効果(%)
0.8	6.3 (167 $\mu$ m) ~ 2.1 (470 $\mu$ m)	86~95
0.2	12.5 (164 $\mu$ m) ~ 6.3 (438 $\mu$ m)	73~86
0.03	18.8 (137 $\mu$ m) ~ 10.4 (308 $\mu$ m)	59~77

注1) ( ): 電着被膜厚

注2) CaCO<sub>3</sub>/Mg(OH)<sub>2</sub>: mass%比

認できた。

#### 4. 海水循環水槽における適用性の検討 (実環境模擬試験)

電着法と電気防食法の併用工法における適用範囲および実用性能を評価するため、港湾空港技術研究所内の海水循環水槽を利用して実環境模擬試験を行った。本章においては、この実環境模擬試験の概要と結果を取りまとめる。

##### 4.1 実験方法

###### (1) 試験片設置条件および海水循環水槽運転条件

図-6 に試験片の設置環境を示す。試験片の設置環境は、図に示す5環境 (A, B, C, DH, DL) とした。A環境は満潮面 (H.W.L. 没水率：25%)，B環境は平均水面 (M.S.W.L. 没水率：50%)，C環境は干潮面 (L.W.L.)，DH環境は海中部 (L.W.L. -0.24m 以深)，また、DL環境は海中部 (L.W.L. -0.48m 以深) である。また、図-7 に海水循環水槽の水位変動を示す。1日に4サイクル、すなわち、12時間で2サイクルの水位変動である。

###### (2) 電着被膜生成条件

図-8 にシステム概略図を示す。試験片の材質およびサイズは、“SM400 (JIS G3015)，70×150×3.2mm，有効面積：220cm<sup>2</sup>”である。A～DL環境に設置したこれらの試験片を陰極とし、陽極として鉛・銀合金電極 (φ25×250mm) を用いた。電着被膜生成時には、計測用抵抗を介

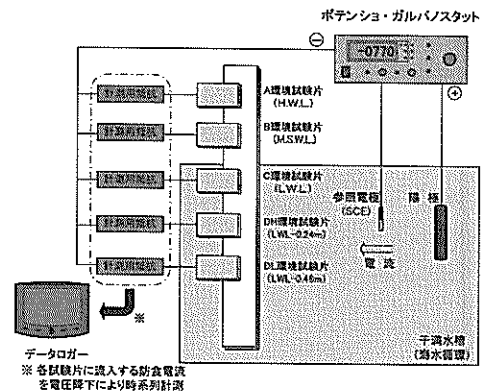


図-8 実験システム概略図

表-4 各環境における通電条件

	電流密度 (A/m <sup>2</sup> )	通電時間 (day)	通電量 (A・day/m <sup>2</sup> )
A環境	2	3.5*	7 (6.05×10 <sup>5</sup> )
B環境	2	7*	14 (1.21×10 <sup>6</sup> )
C環境	2	7	14 (1.21×10 <sup>6</sup> )
DH環境	2	7	14 (1.21×10 <sup>6</sup> )
DL環境	2	7	14 (1.21×10 <sup>6</sup> )

注1) \*: 没水率を考慮した実際の通電時間

注2) ( ): C/m<sup>2</sup>

さず、表-4 に示す通電条件で試験片 (陰極) -陽極間にポテンシヨ・ガルバノスタット (北斗電工 (株) 製, HA-151) を用いて直流電流を印加することで電着被膜を生成した。また、試験に用いた自然海水の化学分析結果は、pHが7.94 (分析時水温：26.5℃)，塩分濃度 (NaCl) が2.8%，Mg<sup>2+</sup>濃度が1144ppm，Ca<sup>2+</sup>濃度が314ppmである。

###### (3) 所要防食電流密度と腐食速度の関係

初期電着被膜を生成した「電着被膜付試験片 (記号：

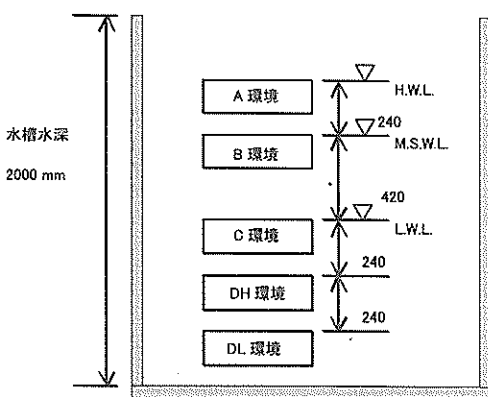


図-6 試験片設置環境

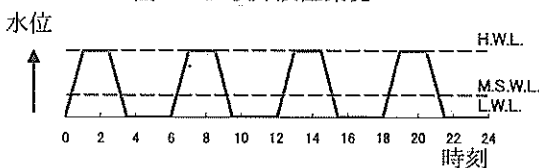


図-7 干満水槽潮位経時変化図

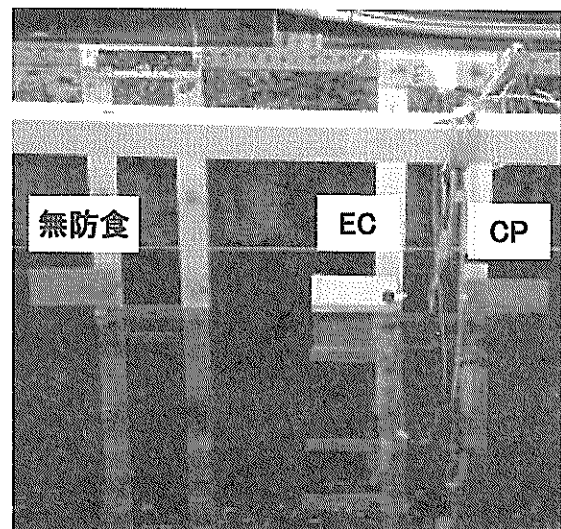


写真-1 各種試験体の設置



EC)」と比較するために、「電気防食用試験片（記号：CP）」および「無防食試験片」を水槽内の同位置（A, B, C, DH, DL）に設置した。

写真-1 に海水循環水槽に設置した試験片の様子を示す。なお、電着被膜付試験片を EC-A~DL とし、電気防食用試験片を CP-A~DL とし、無防食試験片を A~DL とした。

所要防食電流密度の測定は、電着被膜付試験片（EC-A~DL）、および電気防食用試験片（CP-A~DL）の試験片に対し、図-8 に示したシステムで、陽極として鉛・銀合金電極（φ25×250mm）、参照電極として飽和甘コウ電極（SCE）を用い、ポテンシヨ・ガルバノスタット（北斗電工（株）製、HA-151）にて、各試験片の電位を防食電位である -770mV vs. SCE に保持し、各試験片とポテンシヨ・ガルバノスタット間に挿入した計測用抵抗（100Ω）の電圧降下をデータロガーにて時系列計測し、防食電流密度を算出した。

また、各試験片における腐食速度の測定は、初期質量からの腐食減量（W）により（7）式に従って算出した。

$$\text{腐食速度 (mm/year)} = (W \times 4.64) / (D \times S) \quad (7)$$

ここで、W: 腐食減量 (g)、D: 浸漬日数 (day)、S: 試験片面積 (dm<sup>2</sup>) である。なお、防食状態の指標である防食率を、次の（8）式のように定義した。

$$\text{防食率 (\%)} = (W_A - W_B) \times 100 / W_A \quad (8)$$

ここで、W<sub>A</sub>: 各環境における無防食試験片の腐食量 (g/dm<sup>2</sup>)、W<sub>B</sub>: 対応する環境での電着被膜付試験片、電気防食用試験片の腐食量 (g/dm<sup>2</sup>) である。

#### 4.2 結果および考察

初期電着被膜の分析結果を表-5 に示す。表-5 より、EC-A (H. W. L.)、EC-B (M. S. W. L.) の電着被膜では被膜中に CaCO<sub>3</sub> が 30mass% 程度含有されているが、海中部で生成した電着被膜 (EC-C, EC-DH, EC-DL) では、Mg(OH)<sub>2</sub> が 95mass% 以上であり、ほぼ全体が Mg(OH)<sub>2</sub> から構成されていた。な

お、干満帯上部 (H. W. L. ~ M. S. W. L.) に位置する試験片 (EC-A, EC-B) の通電量は、海中部のその 2 倍程度が必要であった。

図-9 に電着被膜付試験片 (EC) における各環境での防食電流密度の経時変化を示す。EC-A (H. W. L.)、EC-B (M. S. W. L.) の試験片においては、防食電流密度が電気防食開始 14 日後からほぼ一定値となっているが、海中部試験片 (EC-C, EC-DH, EC-DL) においては、経過時間とともに緩やかに減少する傾向が継続する。この原因を図-10 により考察する。図-10 に電気防食開始時と試験終了時 (電気防食開始 56 日経過後) の電着被膜組成変化を示す。図よりわかるように、すべての試験片において電着被膜中の

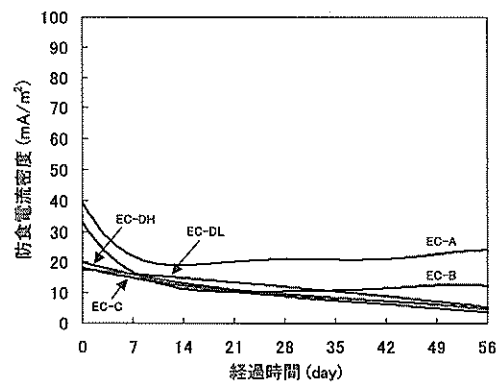


図-9 電着被膜付試験片の防食電流密度経時変化

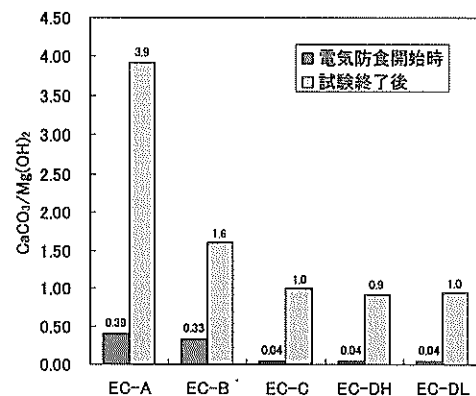


図-10 電着被膜組成変化

表-5 初期電着被膜分析結果

試験片名	膜厚 (μm)	CaCO <sub>3</sub> (mass%)	Mg(OH) <sub>2</sub> (mass%)	CaCO <sub>3</sub> /Mg(OH) <sub>2</sub>	C. E. (%)
EC-A	65 (55~80)	28.2	71.8	0.4	30.2
EC-B	135 (93~203)	24.8	75.2	0.3	29.6
EC-C	152 (120~179)	4.1	95.9	0.04	54.0
EC-DH	156 (125~186)	3.7	96.3	0.04	57.4
EC-DL	180 (123~232)	3.7	96.3	0.04	65.3

注1) CaCO<sub>3</sub>/Mg(OH)<sub>2</sub>: mass%比

注2) C. E. : Current Efficiency (電着効率)

$$C. E. = (\text{実際の付着量}) \times 100 / (\text{通電量から算出される理論付着量})$$

Mg(OH)<sub>2</sub> が減少し、CaCO<sub>3</sub> が増加している。これは電着被膜中の Mg(OH)<sub>2</sub> と CaCO<sub>3</sub> が置換されるためであり<sup>14)</sup>、被膜中の CaCO<sub>3</sub> 含有率が増加することで被膜の緻密性が高くなっていることによる。また、図-11 に電気防食用試験片 (CP) における各環境での防食電流密度の経時変化を示す。すべての試験片において、防食電流密度は電気防食開始後 49 日程度までは継続的に減少しているが、それ以降ではほぼ一定値となっている。これは試験片表面にごく薄い電着被膜が生成<sup>3),4)</sup>したことに起因すると考えられる。表-6 に、試験終了時における EC と CP の防食電流密度 (図-9、図-11 における 56 日経過時の数値)、および電着被膜による防食電流密度の低減効果を各環境別に求

めた結果を示す。なお、低減効果は、各環境における EC と CP の防食電流密度から、(6)式により算出した。この表より、初期に電着被膜を生成させておくことにより、電気防食の所要防食電流密度が A 環境 (H. W. L.) では約 80%、B~DL 環境では約 90~95% も低減することがわかった。

次に、EC、CP および無防食試験片の各環境ごとの外観状況を写真-2 に示す。これらの写真よりわかるように、試験終了時 (電気防食開始 56 日経過後) の EC と CP を比較すると、EC は全ての試験片において発錆が認められないが、CP では、A 環境 (H. W. L.)、B 環境 (M. S. W. L.) において発錆が認められた。図-12 に各環境における腐食速度 ((a) 図) と防食率 ((b) 図) を示すが、EC では A 環境、B 環境とも腐食速度がゼロ (防食率 100%) であるのに対し、CP では腐食速度が 0.04mm/year 程度 (防食率: 90%程度) となっており、初期に生成した電着被膜が防食効果を有することが確認された。

以上の結果より、電着法と電気防食法の併用工法では、電気防食単独の方法と比較して所要防食電流密度を大幅

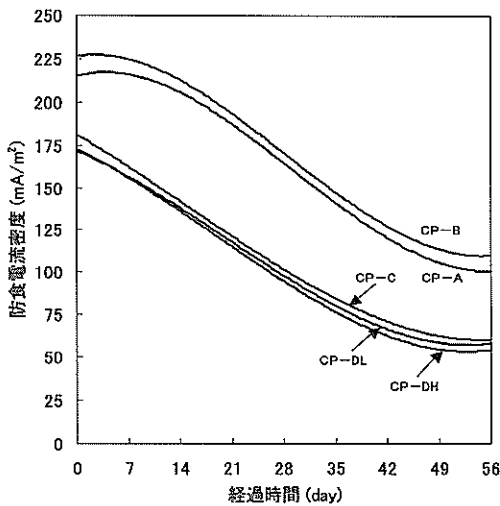
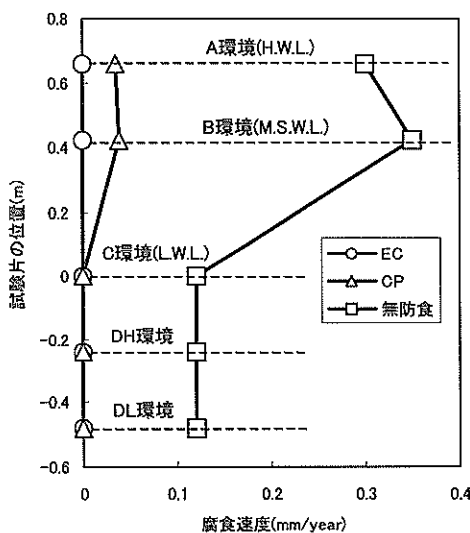


図-11 電気防食用試験片の防食電流密度の経時変化

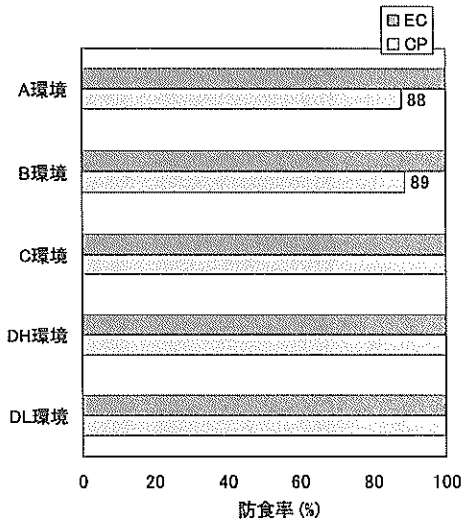
表-6 試験終了時の防食電流密度の比較

試験片設置環境	防食電流密度 (mA/m <sup>2</sup> )		低減効果 (%)
	CP	EC	
A	116.3	24.9 (96 μm)	79
B	118.7	13.0 (153 μm)	89
C	60.7	3.3 (173 μm)	95
DH	53.4	4.0 (189 μm)	93
DL	58.0	5.0 (224 μm)	91

注1) ( ): 試験終了時の電着被膜厚



(a) 各環境における腐食速度



(b) 各環境における EC, CP の防食率

図-12 各試験片の腐食速度と防食率

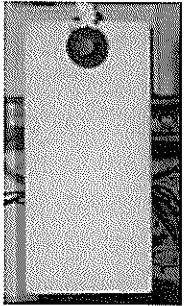
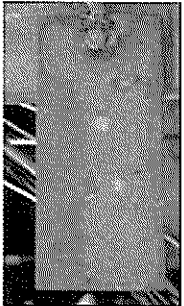
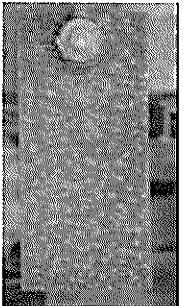
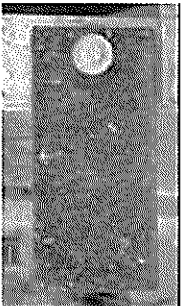
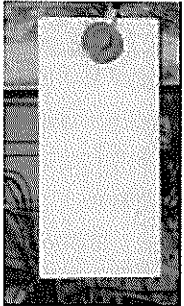
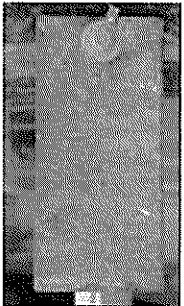
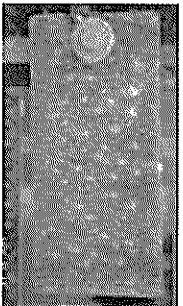
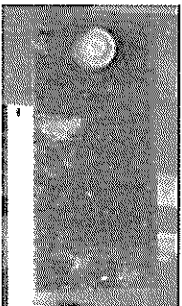
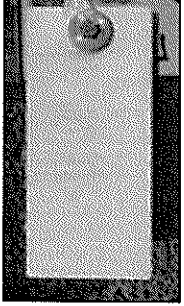
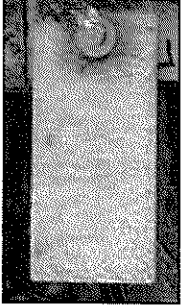
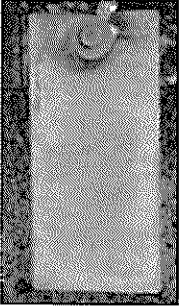
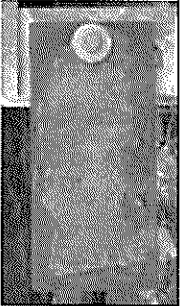
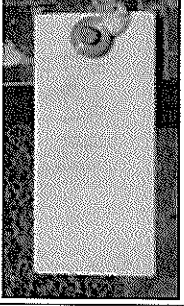
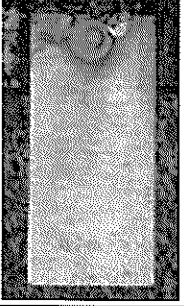
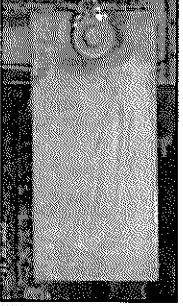
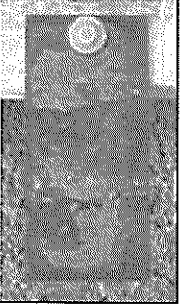
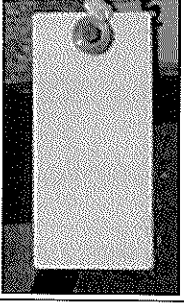
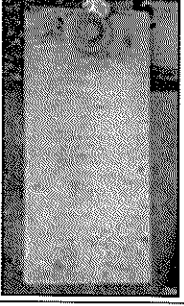
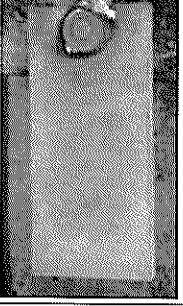
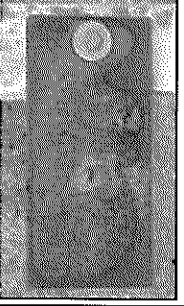
	電着終了時	試験終了時(56日経過後)		
	EC	EC	CP	無防食
A 環境				
B 環境				
C 環境				
DH 環境				
DL 環境				

写真-2 各環境における試験片外観写真

に低減することが可能であることが確認された。さらに電気防食法のみでは腐食を抑制することが難しい干満帯上部 (H. W. L. ~M. S. W. L.) の防食も十分可能であることも確認された。

## 5. 実環境における適用性評価 (実機試験)

電着法と電気防食法の併用工法の防食効果を実海域における構造物で確認する目的で、国土交通省九州地方整備局管内の関門航路舷外排送施設 (新北九州空港北側護岸、北九州市門司区地先沖合 3km) における管理橋鋼管杭 (海中部) に対し、5ヶ月間にわたり実証試験を行った。本章においては、この実機試験の概要と調査結果を取りまとめる。

### 5.1 試験方法

#### (1) 施工概要

試験を実施した鋼管杭の外観状況を写真-3 に示す。この鋼管杭は設置後1年が経過している。対象とした鋼管杭は2本で、それぞれ同じ処理を行った。まず初めに、高圧洗浄により杭表面の除錆処理を行った。図-13 に電着システムの概要を示す。施工対象は、鋼管杭 ( $\phi 600 \times 8m \times 2$ 本) の L. W. L. 以深であり、電着施工面積は  $30.2m^2$  である。なお、被膜分析用試験片を L. W. L.、L. W. L. -2m、L. W. L. -4.7m の3箇所に取り付けました。試験片の材質および

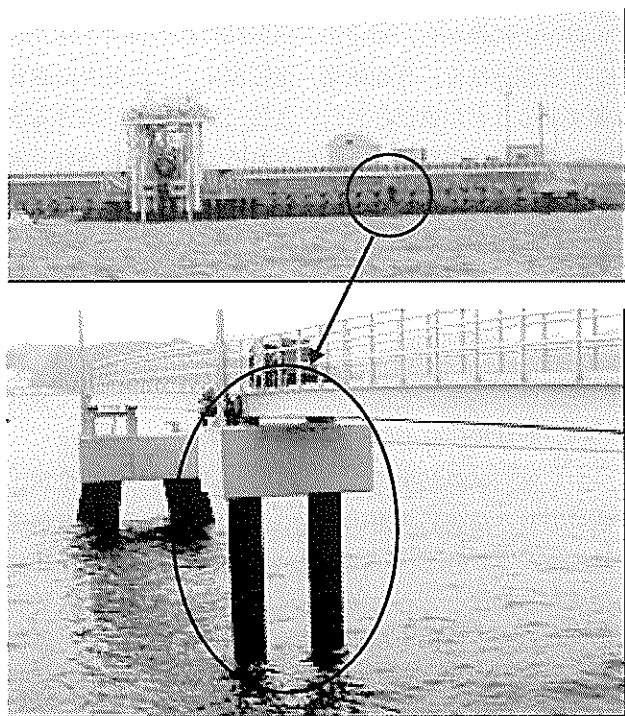


写真-3 施工対象鋼管杭

サイズは、“SM400 (JIS G3015)、 $70 \times 150 \times 3.2mm$ 、有効面積:  $220cm^2$ ” である。通電用陽極として Zn 棒 ( $\phi 45 \times 750 \times 6$ 本) を用い、通電条件を  $5 A/m^2 \times 7$  day (通電量:  $35 A \cdot day/m^2$ ) とし、直流電源にて電流を印加することで電着被膜を生成した。この電着被膜厚は、同一環境・条件で行った予備試験により  $670 \mu m$  程度と推定される。

電着被膜生成後の各鋼管杭に対し、電気防食を併用するため、流電陽極として Al 合金を L. W. L. +2m (寸法:  $(75+87) \times 89 \times 500$ ), L. W. L. -1m (寸法:  $(85+96) \times 90 \times 720$ ) および L. W. L. -4m (寸法:  $(85+96) \times 90 \times 720$ ) の3箇所に取り付けました。

なお、施工海域の平均的な気象・海象条件 (1995~2000年) は、平均風速が  $15m/s$ 、有義波高が  $1.5m$ 、平均波周期が  $5.0s$ 、潮流速度が  $0.3m/s$ 、干満差が  $4.0m$ 、平均水温が  $27^\circ C$  (2004年9月) である。

#### (2) 計測項目

電着法と電気防食法の併用工法における防食効果を確認するため、定期的に電位計測、外観観察を行った。また、鋼管杭に取り付けた被膜分析用試験片を回収し、被膜組成分析、所要防食電流密度測定 (3章 3.1(2)と同様の手法) を行った。

### 5.2 結果および考察

写真-4 に海中部に位置する鋼管杭の外観写真を示す。この写真からわかるように、電着被膜生成後5ヶ月が経過した時点では、外観上腐食は認められず良好な状態で

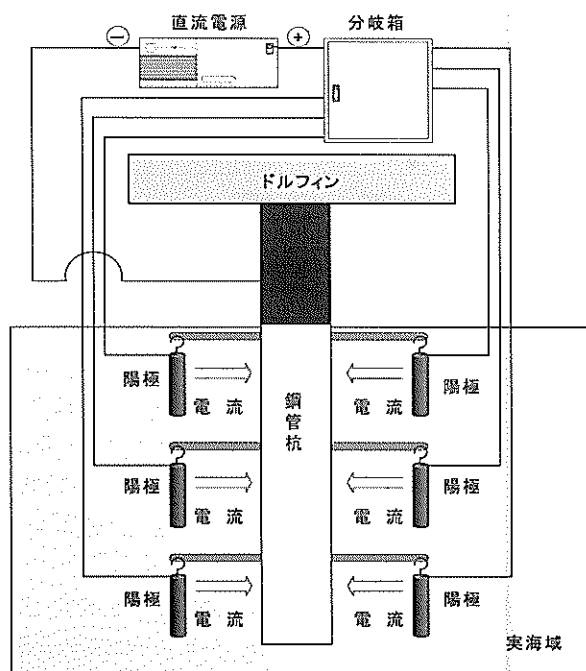
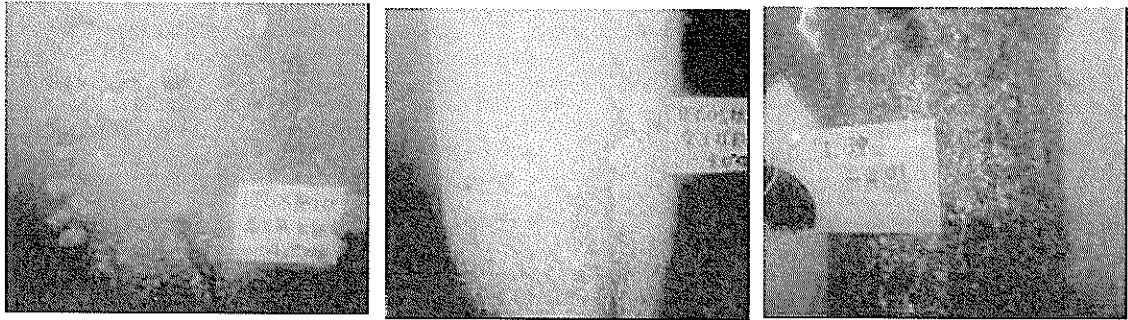


図-13 電着システム概略図



(a) 施工前

(b) 電着被膜生成直後

写真-4 海中部の外観写真

表-7 試験片分析結果

	被膜組成			防食電流密度 (mA/m <sup>2</sup> )
	CaCO <sub>3</sub> (mass%)	Mg(OH) <sub>2</sub> (mass%)	CaCO <sub>3</sub> /Mg(OH) <sub>2</sub>	
電着被膜生成直後	9.3	90.7	0.1	-
5ヶ月経過後	62.0	38.0	1.6	9.7

注1) CaCO<sub>3</sub>/Mg(OH)<sub>2</sub> : mass%比

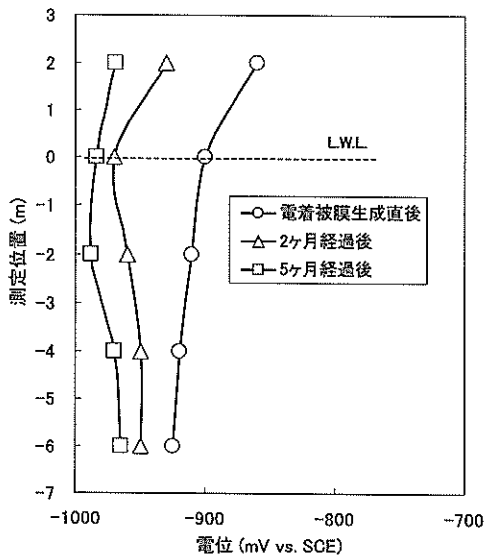


図-14 電位計測結果

ある。図-14に鋼管杭の電位計測結果を示す。なお、計測値は、同一条件の鋼管杭(2本)における各測定位置での平均値である。この図より鋼管杭の電位はすべての測定位置において海水中での鋼材の防食電位である“-770mV vs. SCE”<sup>15)</sup>を満たしており、防食がほぼ完全に達成されていることが確認された。

表-7に鋼管杭から回収した試験片分析結果を示す。なお、分析値は、L.W.L., L.W.L.-2m, L.W.L.-4.7mの位置から採取した試験片(3枚)の平均値である。被膜組成は、電着被膜生成直後のCaCO<sub>3</sub>/Mg(OH)<sub>2</sub>は0.1であるのに対し、

電着被膜生成後5ヶ月が経過した時点では1.6とCaCO<sub>3</sub>含有率の高い良質(緻密)な被膜に変化していることがわかる。また、電着被膜生成後5ヶ月が経過した試験片における所要防食電流密度は9.7mA/m<sup>2</sup>であり、電気防食用試験片(図-5)の45.8mA/m<sup>2</sup>と比較して約79%低減された。このことは、鋼管杭においても所要防食電流密度が大幅に低減されていることを示唆するものである。

以上の結果から、電着法と電気防食法の併用工法を施工した鋼管杭は、外観観察、電位測定より良好な防食状態であることが確認された。また、電気防食における所要防食電流密度が大幅に低減されることが推定され、実環境においても電着法と電気防食法の併用工法の有効性が確認された。

## 6. 結論

電着法と電気防食法の併用工法の有効性について検討を行った結果、以下の結論を得た。

(1) 室内試験結果より、電着法と電気防食法の併用工法における所要防食電流密度は、初期に生成される電着被膜厚が100μmより大きくなると急激に低下し、その後は膜厚の増加とともに緩やかに低下することから、電着と電気防食を併用する場合の電着被膜の必要最小膜厚は100μmであることがわかった。また、この所要防食電流密度は、被膜厚、被膜組成に依存するが、通常電気防食法と比較し本試験で生成した電着被膜では、最大で95%

も低減可能であることがわかった。

(2) 実環境模擬試験結果より、電着法と電気防食法を併用することで、各環境における所要防食電流密度は、電気防食単独の方法と比較して、大幅に低減可能であることが確認された。また、電着被膜を生成させることで電気防食法のみでは腐食を抑制することが難しい干満帯上部の防食も可能となることが確認された。

(3) 実環境における鋼管杭の海中部を対象とした試験施工（施工5ヶ月後の観察）より、外観上腐食は認められず、電位も防食電位を満たしていることから良好な防食状態であることが確認された。また、電気防食における所要防食電流密度が大幅に低減されることが推定され、実環境においても電着法と電気防食法の併用工法の有効性が確認された。

## 7. あとがき

本研究では電着法と電気防食法の併用工法における防食性能を、電着法の施工条件、特に膜厚の観点から検討を行った。その結果、電気防食における所要防食電流密度は、すべての試験において大幅に低減し、電着法と電気防食法の併用工法の有効性が確認できた。このことは電気防食における流電陽極の寿命延長が可能であることを示しており、従って超長期防食の可能性が期待される。5ヶ月間の実環境模擬試験において、電着法と電気防食法の併用工法は干満帯上部においても適用の可能性が示唆されたが、海水循環水槽は潮流・波浪等のない静水環境であるため、腐食環境が厳しい実環境での実証（通電条件、防食電流密度の低減効果、防食率）が今後必要である。また、鋼管杭（海中部）に対する実機試験においても電着法と電気防食法の併用工法における長期耐久性、流電陽極の寿命延長を実証する必要がある。今後も追跡調査（外観観察、電位計測、陽極消耗量、被膜量・被膜組成比の計測）が必要である。さらに、電着被膜により所要防食電流密度が低減することは、電気防食における流電陽極の有効到達範囲が拡大することが考えられ、最適な流電陽極配置、形状（発生電流）、個数の検討が必要である。

また、電着被膜を施工する際、施工条件、構造物の形状によっては被膜厚にバラツキが生じることが考えられ、被膜を均一に効率良く生成させるためには対極である陽極の最適配置を見出す必要がある。これまで別途室内試験での検討を行っているが<sup>9)</sup>、さらに実環境での検証を行う必要がある。

本研究は、港湾空港技術研究所と石川島播磨重工業株

式会社による共同研究「港湾鋼構造物への電着工法適用に関する研究（平成14年度～15年度）」の成果を取りまとめたものである。本研究を遂行するに際し多くの関係各位のお世話になった。ここに記してお礼申し上げる次第である。

（2005年8月1日 受付）

## 参考文献

- 1) G. C. Cox: Anticorrosive and Antifouling Coating and Method of Application, U. S. Patents No. 2, 200, 1940年, p. 469
- 2) R. A. Humble: Cathodic Protection of Steel in Sea Water with Magnesium Anodes, Corrosion, 4, 1948年, pp. 358-370
- 3) 福沢秀刀: 防錆管理, 27, [10], 1983年, p. 301
- 4) R. Johnsen and E. Bardal: Cathodic Properties of Different Stainless Steels in Natural Seawater, Corrosion, 41, 1985年, pp. 296-302
- 5) 阿部正美, 濱田秀則: 防食鋼管杭の長期暴露試験結果—波崎海洋観測栈橋における現地試験—, 基礎工, 28 (12), 2000年, pp. 40-44
- 6) K. Akamine and I. Kashiki: Corrosion Protection of Steel by Calcareous Electrodeposition (Part 1) —Mechanism of Electrodeposition—, Zairyo-to-Kankyou, 51, 2002年, pp. 496-501
- 7) K. Akamine and I. Kashiki: Corrosion Protection of Steel by Calcareous Electrodeposition in Seawater (Part 2) —Mechanism of Growth—, Zairyo-to-Kankyou 52, 2003年, pp. 401-407
- 8) K. Akamine and I. Kashiki: Corrosion Protection of Steel by Calcareous Electrodeposition in Seawater (Part 3) —Effects of Dilution—, Zairyo-to-Kankyou (Corr. Eng.), 53, 2004年, pp. 354-357
- 9) I. Kashiki, A. Suzuki and K. Akamine: Corrosion Protection of Steel by Calcareous Electrodeposition in Seawater (Part 4) —Method of Proper Anodes Arrangement—, Zairyo-to-Kankyou (Corr. Eng.), 53, 2004年, pp. 358-365
- 10) K. Akamine, N. Maruyama and I. Kashiki: Corrosion Protection of Steel by Calcareous Electrodeposition in Seawater (Part 5) —Structure of Double Layers in the Deposit—, Zairyo-to-Kankyou (Corr. Eng.), 53, 2004年, pp. 495-501
- 11) 大即信明: 電気化学的防食工法技術と今後の研究, セ

メント新聞, 2002年9月16日, p4

- 12) F. L. Laque: Marine Corrosion, John Wiley and Sons  
1975年, p. 104
- 13) 日本学術振興会: 金属防蝕技術便覧, 日刊工業新聞社,  
1972年, pp. 580-581
- 14) 赤嶺健一, 鈴木靖庸: 防食膜形成方法, 特願  
2004-140715
- 15) 日本学術振興会: 金属防蝕技術便覧, 日刊工業新聞社,  
1972年, p. 578

港湾空港技術研究所資料 No.1113

2005・12

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 横浜ハイテクプリンティング株式会社

Copyright © (2005) 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。