

リスクベースメンテナンス (RBM) を用いた 港湾鋼構造物の維持管理

Maintenance of Coastal Steel Structures Using Risk-Based Maintenance, RBM

堀川 浩之 HIROYUKI Horikawa JFE エンジニアリング エンジニアリング研究所 エネルギー研究部 副課長
吉川 正樹 MASAKI Yoshikawa JFE エンジニアリング エンジニアリング研究所 エネルギー研究部 副課長・工博
橋本 光行 MITSUYUKI Hashimoto JFE エンジニアリング 鋼構造事業部 課長・Ph.D.

要旨

JFE エンジニアリングでは、設備の維持管理予算の効率的な配分や有効な検査計画の立案を目的として、さまざまな劣化モデルや損傷のデータベースを含む独自のリスクベースメンテナンス (RBM) システムを開発し、構造物維持管理への適用を検討している。本論文では、港湾鋼構造物の腐食損傷に関して、腐食環境区分に対応した劣化シナリオを想定し、定量的な信頼性解析と極値統計法を併用した防食機能の維持管理手法を提案する。

Abstract:

JFE Engineering has developed a unique risk-based maintenance (RBM) system for effective and rational maintenance, and investigates applicabilities to structure maintenance. The system contains various degradation models and database of equipment failures. This paper proposes a new maintenance method for corrosion failures of coastal steel structures in applying quantitative probability evaluation and extreme value statistics.

1. はじめに

港湾鋼構造物は厳しい海洋環境に晒されるため腐食には十分な配慮が必要である^{1~3)}。本論文では、海洋環境下の大型鋼構造物を対象に防食機能の適切な維持管理に関する検討を行った。港湾鋼構造物の腐食環境区分に対しての劣化シナリオを想定し、合理的な評価によって信頼性と経済性を両立させる設備管理手法 RBM (risk-based maintenance)^{4,5)} で用いられている定量的な信頼性解析と極値統計法を併用した防食機能の維持管理手法を提案する。

2. RBM による維持管理

2.1 リスクの定義

RBM は、リスクを指標として維持管理の順位付けや方法の選択を行うことを特徴としている。リスクは以下のよう

$$\text{Risk} = \text{LoF} \times \text{CoF} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、LoF は損傷の発生頻度 (損傷確率)、CoF は損傷発生に伴う被害の規模を示す。すなわち損傷が起こりや

すい、あるいは損傷した場合の被害が大きい事象ほどリスクが高く評価される。

2.2 港湾鋼構造物への適用

港湾鋼構造物の腐食損傷の場合、部材に腐食が発生してもただちに構造不安定に陥ることはない。したがって、CoF は腐食が発生した際の補修コストに該当する。通常、港湾鋼構造物では腐食部の補修において、局部的に防食仕様を異なる系統のものに変更することはなく、同じ防食仕様であれば場所によって補修コストにそれほど大きな差はないと考えられる。そのため、本論文では補修コストの評価は省略し、よりリスクへの寄与が大きい損傷確率を基準とした維持管理手法を示す。

2.3 損傷確率の算出方法

RBM における損傷確率評価方法として、応力-損傷モデルを用いた算出方法を示す。応力-損傷モデルでは、損傷条件を以下のように表す。

$$G = R - L < 0 \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 G は限界状態関数と呼ばれ、抵抗力項 R と外力項 L の差で表される。損傷状態 $G < 0$ は、 $R < L$ すなわち

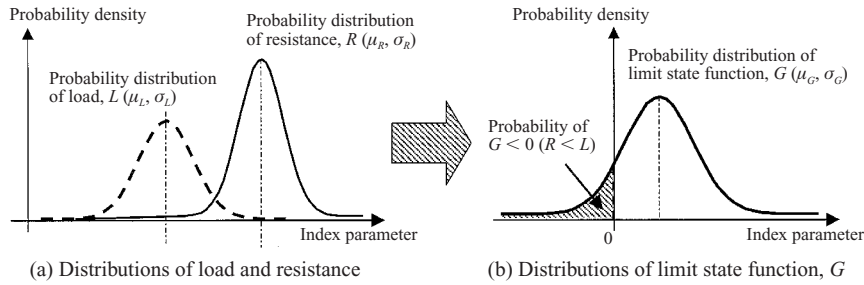


Fig. 1 Probability of failure (Stress-strength model)

外力が抵抗力を超えている状態を意味する。

損傷確率評価を行うにあたっては、抵抗力項 R と外力項 L の変動を考慮する。材料強度や構造強度、波浪荷重など分布を有するパラメータは、通常設計において抵抗力項は小さい側に、外力項は大きい側に安全率を設定するが、確率評価を用いる RBM ではこれらの値が実際に取り得る分布を用いることで、合理的な評価を達成している。

Fig. 1(a) に抵抗力と外力の分布の例を示す。この2つの分布を Fig. 1(b) に示すように限界状態関数 G の分布として統合し、 $G < 0$ の確率が求める損傷確率となる。抵抗力項 R の分布を正規分布 $N(\mu_R, \sigma_R^2)$ 、外力項 L の分布を正規分布 $N(\mu_L, \sigma_L^2)$ とすると、限界状態関数 G の分布の平均値 μ_G 、標準偏差 σ_G は一次近似二次モーメント法により、次のように表される。

$$\mu_G = \mu_R - \mu_L \dots\dots\dots (3)$$

$$\sigma_G = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_L^2} \dots\dots\dots (4)$$

限界状態関数 G の正規分布 $N(\mu_G, \sigma_G^2)$ において、 $G < 0$ の確率を求めることは、標準正規分布 $N(0, 1)$ で標準正規変数 $u = -\mu_G/\sigma_G$ の下側確率 $\Phi(u = -\mu_G/\sigma_G)$ を求めることに等しい。したがって、損傷確率は (5) 式で表される。

$$\Phi(u = -\mu_G/\sigma_G) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{-\mu_G/\sigma_G} \exp(-u^2/2) du \dots (5)$$

2.4 損傷確率のしきい値による維持管理時期の設定

損傷確率評価によって得られた損傷確率と、あらかじめ定めた検査・補修・更新の基準となる確率のしきい値とを比較して、状態基準維持管理 (CBM) としての検査・補修・更新時期を設定する。このしきい値の設定としては、たとえば許容損傷確率⁶⁻⁸⁾を参考として、正規分布の 3σ 信頼下限値に相当する確率 0.001 ($\cong 0.0013 = \Phi(u = -3)$) を採用できる。

3. 検討対象とする港湾鋼構造物

3.1 港湾鋼構造物の構造形式

本論文で対象とする港湾鋼構造物は、ジャケット構造とする。ジャケット構造は、床版をレグと斜材・水平材とで構成される立体鋼管トラス骨組で支持し、これらを鋼管杭で海底に固定する構造形式である。ジャケット構造は Fig. 2 に示すように腐食環境で区分され、それぞれ異なった防食方法が用いられる。最近の大型鋼構造物では長寿命化が要求され、耐用年数を 100 年とした超重防食技術の開発が進められている⁹⁾。

本論文では防食仕様を以下のように設定する。

- (1) 海上大部：有機ライニングまたは重防食塗装
- (2) 飛沫・干満部：耐食金属ライニング
- (3) 海中・土中部：電気防食 (流電陽極法)

3.2 劣化のシナリオ

各部の劣化シナリオを以下のように設定した。

- (1) 海上大部

一般的に、有機ライニングや重防食塗装面の腐食は、水分、酸素、塩分などが膜を浸透して鋼面に達して生じる。ここでは表面に海塩粒子が付着することで、次第に塩化物イオン Cl^- が膜内に浸透し、膜下の鋼表面に Cl^- が到達することで腐食が加速されると考える。

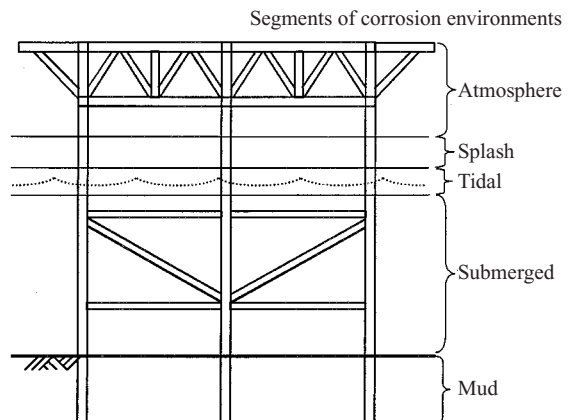


Fig. 2 Corrosion environments of coastal steel structures

Table 1 Degradation levels of organic lining and anti-corrosion stainless lining

Degradation levels	Survey results	Evaluation criteria
0	No defects	Nearly equal to the initial conditions
1	Minor defects	Shallow flaws or corrosions without penetrating the linings
2	Partial defects with corrosion protection functions	Flaws or corrosions with penetrating the linings shortly
3	Overall defects without corrosion protection functions	Deep flaws or corrosions with almost penetrating the linings

(2) 飛沫・干満部

耐食金属ライニングには通常は安定した不動態膜が形成され、著しい腐食は進展しないと考えられているが、長期的には表面の発錆、もらい錆などの局部腐食が進展する可能性を想定しておくことが必要と考えられる。また、漂流物などによりライニングが機械的に損傷し、鋼面が露出した場合は耐食金属と鋼で異種金属接触状態になり、陽極側の鋼が腐食減肉する可能性がある。

(3) 海中・土中部

電気防食は信頼性が高く、定期的な防食電位の確認により陽極の管理を行うことで防食性能が保たれる。脱落などの機械的な損傷が生じない限り腐食は発生しないと考える。

本論文では、海上大気部と飛沫・干満帯の腐食に対して評価方法を示すものとする。

3.3 劣化度の判定方法

本論文では、Table 1 に示すように有機ライニング・耐食金属ライニング部の劣化度を4段階で評価する^{10,11)}。

4. 港湾鋼構造物の維持管理方法

本論文では、飛沫・干満部と海上大気部に対して、防食材の経年劣化を確率評価し、検査・補修時期を設定するモデルを提案する。

4.1 飛沫・干満部の維持管理

Fig. 3 に本研究で提案する飛沫・干満部の損傷の内、局部腐食に対する維持管理方法を示す。全レグの頻繁な詳細点検を合理化する手段として、ここでは極値統計法を適用する。最初に、Fig. 4 に示すように、同一腐食環境とみなされるエリア内のレグを多数の区画に分ける。その中から、モニタリングを実施するサンプル区画をランダムに複数設定する。サンプル区画内のレグについて飛沫・干満部の腐食深さを検査し、各サンプル区画での最大値を把握する。

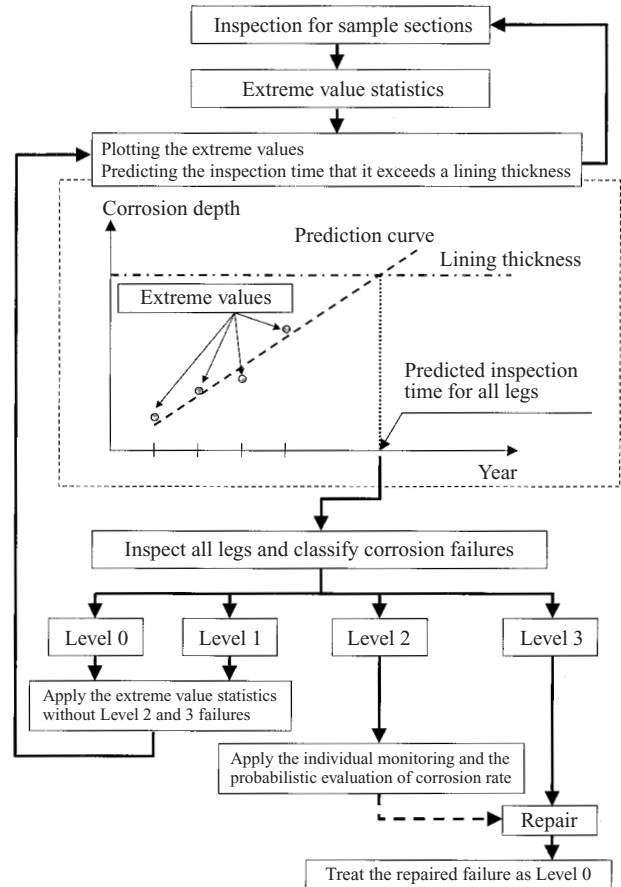


Fig. 3 Maintenance flowchart for corrosion failures in splash and tidal segments

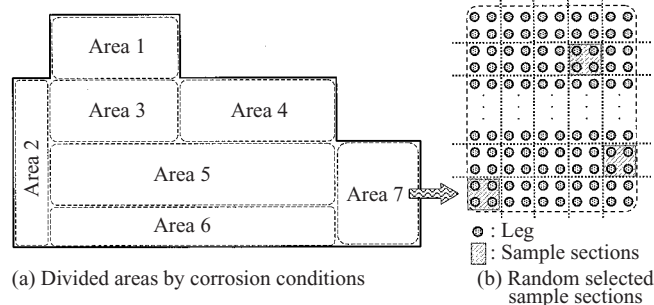


Fig. 4 Example of sampling sections

次に、極値統計解析^{12,13)}を用いて、エリア内の全レグに対する最大腐食深さの推定値を求める。このような計測・診断を定期的の実施し、得られた最大腐食深さの推定値がライニング板厚を超える時期を予測し、これを総点検時期と設定する。この総点検時期に、はじめてすべてのレグについて腐食深さを調査し、その状態を劣化度0~3に分類する。劣化度3の腐食部に対してはただちに補修を行い、劣化度0相当に処置する。劣化度2の腐食部は、個別にライニング板厚を貫通する確率を評価し、次回の検査時期を設定する。

Fig. 5 に劣化度2の腐食部に対する個別管理の方法を示す。劣化度2の腐食部に対しては、ライニング板厚の分布

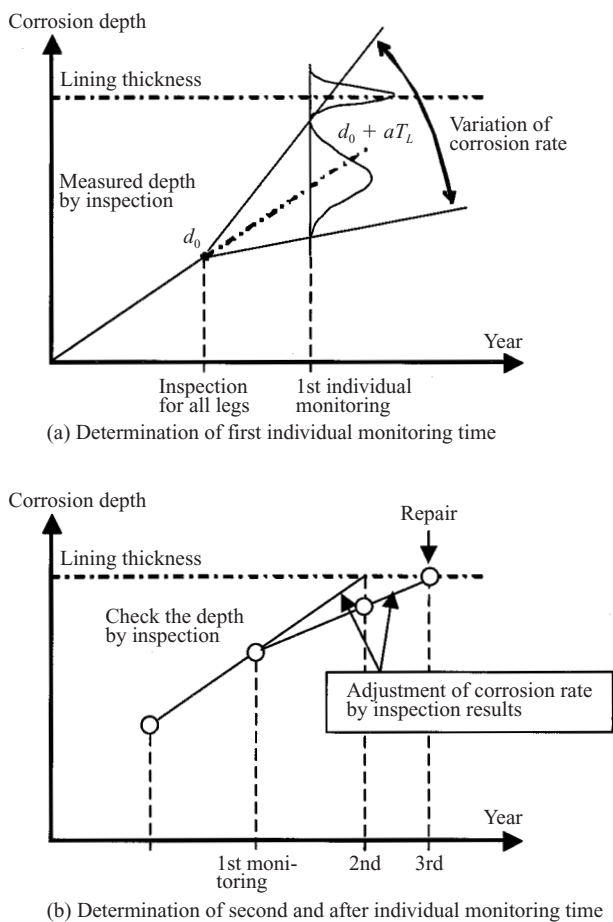


Fig.5 Individual monitoring method for level 2 corrosion failures

と腐食深さの分布を考慮し、限界状態関数 G を (6) 式のように設定する。

$$G = t_L - d_L \dots \dots \dots (6)$$

ここで、 t_L : 板厚 (mm), d_L : 腐食深さ (mm) とする。
腐食深さ d_L は、(7) 式で表される。

$$d_L = d_0 + a \cdot T_L \dots \dots \dots (7)$$

ここで、 T_L : 経過年数 (年), d_0 : 検査で確定した腐食深さ (mm), a : 腐食進展率 (mm/年) とする。

腐食進展率 a は、ばらつきを持つとして分布 $N(\mu_a, \sigma_a^2)$ を考える。Fig. 5(a) における 1 回目の腐食進展率 a の分布は、総点検で判明した腐食深さ d_0 に対する腐食進展率を平均腐食進展率 μ_a とし、総点検で得られた劣化度 2, 3 すべてのデータを統計処理して腐食進展率の標準偏差 σ_a を設定する。また、ライニング板厚 t_L の分布は、施工時の品質検査においてライニング材料の板厚計測を行うことで把握できる。

損傷確率は t_L, d_L の分布から、 μ_G, σ_G を求めることで、

(5) 式より得ることができる。

個別管理以降の検査時に劣化度 3 の状態であれば、直ちに補修を行う。ライニングが貫通に至らない状態であれば、Fig. 5(b) に示すように現在の腐食深さと前回の検査年における腐食深さから外挿し、次回の検査時期を設定する。一般に、ステンレス鋼の腐食速度は、経過時間のべき乗の形 ($a \cdot T_L^b: 0 < b < 1$) で表される¹⁴⁾ ことから、この直線外挿は安全側の検査時期を与える。

劣化度 1 の腐食部については、発生位置の記録に留め、次回の総点検時に腐食深さを再測定する。次回の総点検時期は、定期的にサンプル区画のモニタリングを実施し、個別管理に移行した劣化度 2 の腐食部位を除いた劣化度 0, 1 の腐食部のうちで最大の腐食深さを測定し、Fig. 3 にしたがって極値統計解析を用いて決定する。本手法による評価例を参考文献¹⁵⁾ に示す。なお、供用期間中にモニタリングとは別途実施する定期検査で物理的なライニング貫通 (劣化度 3) が発見された場合、直ちにライニング補修を施す。

以上のような方法で、劣化状態に応じて重点的に管理する部位と簡易に管理する部位に区分し、防食機能の健全性を確保した上で不要な補修を回避する。

4.2 海上大気部の維持管理

海洋環境下では供用開始直後から表面に海塩粒子が付着することにより、次第に Cl^- が被覆膜内に浸透し (誘導期間), 被覆膜下の鋼表面に到達することで腐食が進展する (進展期間) 可能性がある。

Cl^- の浸透時間に関する Menges, G. と Schneider, W. らの提案¹⁶⁾ を採用し、(8) 式の拡散係数 - 被覆膜厚 - 耐用年数の関係を用いる。

$$L = \frac{tc^2}{6D} + \tau \dots \dots \dots (8)$$

ここで、 L : 耐用時間 (s), D : 拡散係数 (mm^2/s), tc : 被覆膜厚 (mm), τ : 接着力およびその他の要因項とする。(8) 式の右辺第 1 項は腐食の誘導期間を、第 2 項はその後の進展期間で腐食が表面化するまでの時間を示しているが、ここでは進展期間に入る前に補修を行うことを考えて (8) 式の第 2 項を省略し、被覆膜への Cl^- の浸透深さとして (9) 式を用いる。

$$dc = \sqrt{6DTc} \dots \dots \dots (9)$$

ここで、 dc : Cl^- の浸透深さ (mm), Tc : 経過時間 (s) である。

実際の被覆膜厚のばらつきと浸透深さのばらつき、すなわち拡散係数のばらつきを考慮することで、 Cl^- の浸透深

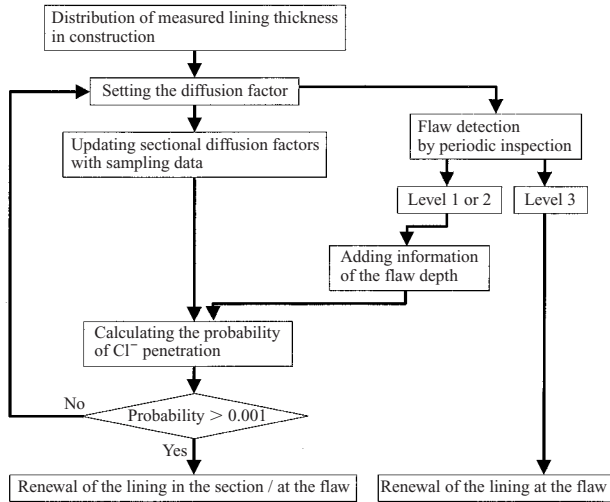


Fig.6 Maintenance flowchart for corrosion in atmosphere segments

さ d_c が被覆膜厚 t_c を超える確率を求めることができる。 Cl^- の拡散係数に関しては多くの公表値¹⁷⁻²⁰⁾があるが、環境条件によってオーダーが大きく変わる場合もある。したがって、ここでは鋼構造物の供用開始と同時に同一の実環境に曝露された複数の試験片のデータから求められた拡散係数 D の分布 $N(\mu_D, \sigma_D^2)$ を用いることで環境条件の影響を包含させる。

海上大気部の腐食損傷確率評価における限界状態関数 G を (10) 式に示す。

$$G = t_c - d_c \dots \dots \dots (10)$$

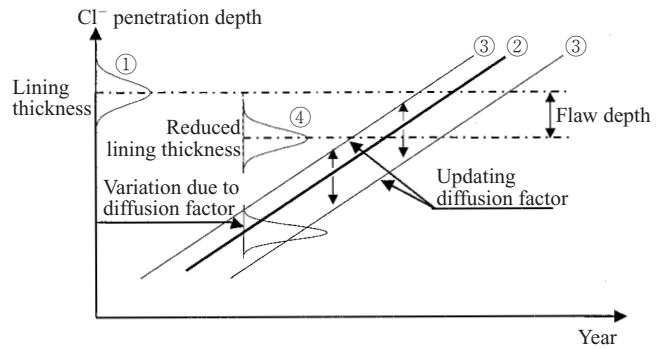
ここで、 t_c : 被覆膜厚 (mm), d_c : 浸透深さ (mm) とする。

被覆膜厚 t_c の分布は、施工時の品質検査における膜厚測定²¹⁾のデータを活用し、浸透深さ d_c の分布は拡散係数 D の分布から求める。

損傷確率は t_c, d_c の分布から、 μ_G, σ_G を求めることで、(5) 式より得ることができる。

Fig. 6 に本論文で提案する海上大気部の維持管理方法を示す。損傷確率の評価後、しきい値に到達したサンプルレグの区画については区画内の再ライニングを実施する。供用期間中にサンプルレグによるモニタリングとは別途実施する定期検査で劣化度3の物理的な膜損傷(ライニング膜の損傷深さが確認できる傷)が発見された場合、直ちに再ライニングを施す。劣化度1および2の損傷が発見された場合、**Fig. 7** に示すように個別にそのライニング膜損傷深さを測定し、膜厚分布の平均値を下げて損傷確率評価を継続する。本手法による評価例を参考文献¹⁵⁾に示す。

以上のような方法で劣化状況に合わせて区画ごとに再ライニングを施し、防食機能の健全性を確保した上で不要な補修と維持管理費用の特定時期への集中を回避する。



①	Measurement of the distribution of the lining thickness
②, ③	Setting and updating the diffusion factor
④	Addition of information of flaw depth

Fig.7 Probabilistic evaluation for lining in atmosphere segments

5. おわりに

本論文で提案した維持管理方法について以下にまとめる。

- (1) RBM の考え方を港湾鋼構造物の防食に適用し、定量的損傷確率を基準とした超長期間の維持管理方法を提案した。
- (2) 検査コスト効率化のため、同一腐食環境にあるサンプルから全レグの劣化度を予測する方法を導入した。
- (3) 飛沫・干満部では局部腐食の進展率のばらつき、海上大気部では Cl^- の浸透深さのばらつきを考慮して損傷確率を評価した。
- (4) 適切な損傷確率のしきい値を設定することにより、従来の時間基準維持管理 (TBM) と比べて、構造物の健全性に応じた合理的な状態基準型の維持管理が期待できる。

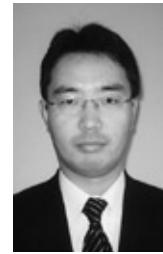
参考文献

- 1) 尾島啓介, 石田雅巳. 棧橋式空港施設の超長期防食法. 沿岸開発技術研究センター研究論文集. no.2, 2002, p.5-8.
- 2) 松島巖. 低合金耐食鋼と表面被覆による鋼構造物の防食. 材料と環境. vol.53, 2004, p.167-171.
- 3) 鋼材倶楽部. 海洋鋼構造物の防食. 技報堂出版, 2001, 202p.
- 4) American Petroleum Institute. Risk-Based Inspection Base Resource Document. API Publication 581, 2000, 349p.
- 5) 堀川浩之, 吉川正樹, 高須展夫. Structural integrity assessment for various failure modes using a risk-based maintenance method. ASME PVP, vol.490, 2004, p.261-270.
- 6) 神田順. 7. 目標安全性をどうやって決めるか, 限界状態設計法のすすめ. 建築技術. 1993, p.118-121.
- 7) Construction Industry Research and Information Association (CIRIA). Rationalization of Safety and Serviceability Factors in Structural Codes. Report 63, 1977, 226p.
- 8) Allen, D. E. Criteria for design safety factors and quality assurance expenditure. The 3rd Inter. Conf. on Structural Safety and Reliability. 1981, p.666-678.
- 9) 玉田明宏. 長寿命重防食技術の開発とその耐海水性支配因子の効果.

- 材料と環境. vol. 45, 1996, p. 244-255.
- 10) 沿岸開発技術研究センター. 港湾構造物の維持・補修マニュアル. 1999, 150p.
 - 11) 沿岸開発技術研究センター. 港湾構造物防食・補修マニュアル (改訂版). 1997, 470p.
 - 12) 今川博之. 更新時期を決めるプラントの余寿命評価. 日本プラントメンテナンス協会, 1998, 309p.
 - 13) 柘植宏之. 鋼材の腐食現象への極値統計の適用. 腐食防食シンポジウム資料. vol. 51, 1983, p. 16-21.
 - 14) 武藤泉. ステンレス鋼の耐候性. 防錆管理. vol. 38, 1944, p. 193-199.
 - 15) 堀川浩之, 吉川正樹, 橋本光行, 玉田明宏. 超長期防食法を適用した港湾鋼構造物の維持管理手法の提案. 鋼構造論文集. vol. 47, 2005, p. 1-9.
 - 16) 日本造船研究協会. 海洋構造物の重防食に関する研究 報告書. 1981, p. 113.
 - 17) 古玉悟ほか. 栈橋の維持補修マネジメントシステムの開発. 港湾技研資料. no. 1001, 2001, 44p.
 - 18) 日本造船研究協会. 塗膜の耐久性評価法に関する調査研究 総合報告書. 1990, p. 170-174.
 - 19) コンクリート委員会編. エポキシ樹脂塗装を用いる鉄筋コンクリートの設計施工指針 (改訂版). 土木学会, 2003, 216p.
 - 20) Hu, J.M.; Zhang, J.Q.; Cao, C.N. Determination of water uptake and diffusion of Cl⁻ ion in epoxy primer on aluminum alloys in NaCl solution by electrochemical impedance spectroscopy. Prog. Org. Coating. vol. 46, no. 4, 2003, p. 273-279.
 - 21) 関西国際空港, 土木研究センター. 空港連絡橋の鋼構造物の防錆防食指針 (案). 1986.



堀川 浩之



吉川 正樹



橋本 光行