

さび

149



日本防蝕工業株式会社

さ び 第 149 号

目 次

| | |
|--------------------------------------|---|
| ご挨拶 | 1 |
| 日本防蝕工業株式会社 代表取締役社長 森寫 義雄 | |
| ベイズ推定を用いた海洋鋼構造物の電気防食モニタリング法の開発 | 2 |
| 日本防蝕工業株式会社 技術研究所 齋藤 達哉 | |
| 技術研究所 田代 賢吉 | |
| エンジニアリング部 飯田 知宏 | |
| 東京工業大学大学院 情報理工学研究科 修了 米谷 直樹 | |
| 東京工業大学大学院 情報理工学研究科 天谷 賢治 | |
| 鹿児島大学 工学部 (元港湾空港技術研究所) 審良 善和 | |
| 国立研究開発法人港湾空港技術研究所 山路 徹 | |
| 新型コロージョンハンターの開発と実構造物における腐食調査 | 8 |
| 日本防蝕工業株式会社 技術研究所 竹子 賢士郎 | |
| 技術研究所 山本 悟 | |

日本防蝕工業株式会社「さび」編集室

平成 28 年 1 月 発行 (非売品)

©2016 The Nippon Corrosion Engineering Co., Ltd.

ご挨拶



日本防蝕工業株式会社

代表取締役社長 森 崑 義雄

皆様方におかれましては、健やかに輝かしい新春を迎えられたこととお慶び申し上げます。

当社技術情報誌『さび』をご愛読頂きまして、誠に有難うございます。

昨年度の防食需要は、ここ数年続いている「港湾施設の維持管理」、「水産基盤施設へのストックマネジメント」に伴う防食需要に加え、円安基調による海外プラント向け防食装置の取込みや船舶事業の主要製品取替需要の増加などにより、受注高・売上高とも昨年、一昨年に引続き好調を維持しました。

今年も、民間を含めた港湾施設、漁港施設、水道施設などの老朽化インフラの改修や維持管理関連に伴う調査と対策工事案件が引続き堅調に推移するものと予想しております。

業務遂行にあたっては、今年も社員全員で弛まぬ努力を誓い、このフォローの風に乗って強い熱い思いを持ってスタートしましたので、皆様方のご支援のほど宜しくお願い申し上げます。

今年明るいニュースが多くなることを祈念いたします。

さて、今回お届けする『さび』でご紹介するのは、「ベイズ推定を用いた海洋鋼構造物の電気防食モニタリング法の開発」と「新型コロージョンハンターの開発と実構造物における腐食調査」の技術報告2件です。

・ベイズ推定を用いた海洋鋼構造物の電気防食モニタリング法の開発

海洋鋼構造物を適切に維持・管理していくためには、防食状態を経済的かつ効率的に把握する手法が必要です。これまでに当社は、鋼構造物周辺の電位測定値から未知の犠牲陽極発生電流量を推定する数値解析手法を提案してきました。本報では、実際の鋼構造物周辺の電位から犠牲陽極の電流量・鋼構造物表面電位を推定する手法の実証試験について紹介します。

・新型コロージョンハンターの開発と実構造物における腐食調査

コンクリート構造物の維持管理において、腐食診断は非常に重要です。当社は従来の鉄筋腐食診断計「コロージョンハンター」に、CIPE法による腐食速度測定機能を追加した新型コロージョンハンターを開発いたしました。この1台の機器で、電位分布、表面抵抗率、腐食速度を測定することが可能で、測定対象構造物のより正確な腐食診断が可能となっております。本報では、この新型コロージョンハンターを用いて実構造物の腐食調査を行った例を紹介します。この新型コロージョンハンターが我が国の社会資本維持管理に必ずお役にたてるものと確信いたします。

ベイズ推定を用いた海洋鋼構造物の電気防食モニタリング法の開発

斎藤達哉¹、田代賢吉¹、飯田知宏²、米谷直樹³、天谷賢治⁴、審良善和⁵、山路 徹⁶

¹ 日本防蝕工業株式会社 技術研究所 ² 日本防蝕工業株式会社 エンジニアリング部

³ 東京工業大学大学院 情報理工学研究所 修了 ⁴ 東京工業大学大学院 情報理工学研究所

⁵ 鹿児島大学 工学部(元港湾空港技術研究所) ⁶ 国立研究開発法人港湾空港技術研究所

1. 緒言

現在、海上には鋼材を用いた構造物が数多く建設されている。この海洋鋼構造物は海水という厳しい腐食環境に曝される。金属材料の腐食は構造物の寿命を左右する重要な因子であり、構造物には使用年数を見越した防食が施される。鋼構造物の一つであるジャケット式栈橋では鋼材に対して2種類の防食が施されている。大気と海水の両方に触れる飛沫帯および干満帯には耐海水性ステンレス鋼ライニングなどの被覆防食、海水中鋼材に対しては流電陽極(犠牲陽極)方式の電気防食が行われている¹⁾。犠牲陽極はその性質上時間と共に消耗し、発生電流量が減少する。そのため、発生電流量の測定による陽極寿命の評価が必要となる。現在、寿命評価として、構造物周辺の電位測定による簡易調査、ダイバーによる犠牲陽極の詳細調査が行われている²⁾。しかし、調査結果の信頼性・定量性、さらに大型構造物においては時間・労力のコスト増が問題となる。重要な社会インフラとして今後も増加が予想される海洋鋼構造物を維持・管理していくために、防食状態を経済的かつ効率的に推定する手法の早期確立が望まれる。

我々のグループは、これまでに数値解析を用いて犠牲陽極の電流量を推定する逆解析手法を提案してきた。逆解析とは、周辺の電位測定値より未知の境界条件を推定する手法である。数値計算には、ジャケットのような複雑な形状のモデル化や解析領域中の電気伝導率が不均一でも解析が可能な有限要素法を用いた。本報告では、実際の鋼構造物周辺の電位測定値から、犠牲陽極の電流量および構造物表面電位を推定する逆解析手法の実証試験について報告する。

2. 逆解析手法

2.1 概要

本手法は、実際の鋼構造物周辺の電位の測定値から、犠牲陽極発生電流量を逆解析により推定するものである。構造物形状情報から有限要素モデルを構築し、犠牲陽極の電流量を1Aに仮定した際の電位応答を計算し、電位の測定値と計算値が一致するように電流量を調整し、その時の電流量を推定値とする。しかし、複雑形状をした構造物では、周辺の電位測定値に対して、各境界からの電流量を一意に決定することは困難である。そこでベイズ推定法を用い、推定精度を向上させる。また、実際の港湾施設において実証試験を行い、本手法の有効性を示す。以下に解析の流れを示す。

2.2 電位測定

電位測定時の機材配置を図1右側に示す。被覆材のステンレスと鋼材は導通しているため、船や足場を用いて構造物に近づき、いずれかに対して磁石等を用いて接地をとった。続いて、2種類の照合電極(海水銀/塩化銀電極)を海水に投入した。1つは移動照合電極(以下、移動電極と称す)で、水深測定用の圧力センサーと複合させた。もう一つは固定照合電極(以下、固定電極と称す)で、海中の鋼材付近に投入

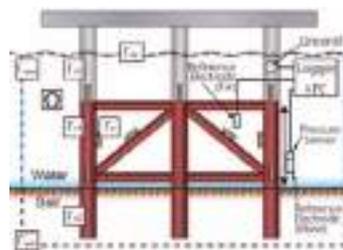


図1 (左)解析領域のモデル
(右)機材配置

し、固定した。

電位測定値とは移動電極-接地間の電位差を指すが、時間変化による電位差の誤差を低減させるために、固定電極を併用した。移動電極-固定電極間の電位差は比較的安定するが、固定電極-接地間の電位差は周辺環境の時間変化による変動が大きい。そこで、移動電極-固定電極間の電位差は各測定点における値をそのまま用い、固定電極-接地間の電位差は時間平均値を用いることで、時間変動の影響を軽減することができた。電位差および圧力センサーによる水深をデータロガーおよび PC に記録した。また、電気伝導率計を投入し、深度方向の電気伝導率を測定した。

2.3 数値計算

本手法では解析領域中の電気伝導率の不均一性を考慮した解析が可能な有限要素法を採用した。図 1 の左側半分に各解析領域を示す。解析領域として、構造物周辺の海水・海土で満たされた領域 Ω を考える。解析領域の境界は、(1)犠牲陽極の表面 Γ_a 、(2)骨組み鋼材の表面 Γ_{c1} 、 Γ_{c2} (各々海水中、海土中の鋼材を表す)、(3)海面付近の耐海水性ステンレス鋼の表面 Γ_{c3} 、(4)海水を仮想的に分割した海水領域の鉛直面(以下、海水壁と称す) Γ_{sea} 、(5)海水領域の上部の境界 Γ_{air} 、(6)海土を仮想的に分割した海土領域の境界 Γ_{soil} で囲まれる。

領域内の電位を ϕ 、電気伝導率を κ とする。領域においてイオンの損失や増加が生じないとし、海水中と海土中の電気伝導率が不均一である点を考慮すると、領域内の電位 ϕ は支配方程式 (1) を満足する。なお、本稿では解析上、電位 ϕ は金属に対する海水の電位を考えているため、通常電気化学で用いられる、溶液に対する金属の電位の符号を逆転させている。

$$\nabla \cdot (\kappa \nabla \phi) = 0 \quad (1)$$

境界条件は未知パラメータを含んだ形で、各々与えた。なお、金属表面の電流密度分布を一様と仮定し、一様電流密度を与えた。一方、海土中鋼材の電流密度分布は深度によって変化するため³⁾、深度と共に電流密度が低減する電流密度分布を与えた。これらの条件のもと、式(1)を数値解析で解くことにより、領域内の電位および境界上の電流密度を計算した。各境界から単独で 1A 発生させた際の鋼構造物近傍の電位変化を計算し、境界ごとの単位発生電流当たりの電位変化のデータベースを作成した。これは後述の観測行列 $A(R_S)$ となる。

2.4 バイズ推定を用いた逆解析

測定点における誤差を含んだ測定値からなる列ベクトルを ϕ' とする。また、同定値からなる列ベクトルを X とする。ここで、 ϕ' を電位の真の値 ϕ と、測定誤差やモデル誤差などの誤差をまとめた ε の 2 つに分離する。領域内における電位は式(1)を満足するため、測定値 ϕ' と同定値 X の間には式(2)で表される観測方程式が成立する。

$$\phi' = A(R_S)X + \varepsilon \quad (2)$$

以下、 $A(R_S)$ の導出方法を述べる。式(2)の電位の真の値 ϕ に注目すると、

$$\phi = A(R_S)X \quad (3)$$

となる。ここで、構造物の各境界の内 1 種類のみ、例えば犠牲陽極の境界 anode(1)のみが機能している場合の電流と測定点での電位変化は次式を満足する。

$$\begin{pmatrix} \Delta\phi_1^{anode(1)} \\ \Delta\phi_2^{anode(1)} \\ \vdots \\ \Delta\phi_m^{anode(1)} \end{pmatrix} = A(R_S) \begin{pmatrix} I_{anode(1)} \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

各種境界の電流および自然電位について式(4)と同様の式が成り立つ。これらを一つにまとめ、観測方程式を作る。 $A(R_S)$ の各成分は、"各境界の電流 1A あたりの鋼構造物近傍の各測定点における電位変化"を表し、有限要素法によりこれらの値を計算した。

2.4.1 ベイズ推定による未知数の同定

構築した観測方程式により、電位の測定値 ϕ から各境界の電流および自然電位を同定した。その際、ベイズ推定により電位測定値の持つ誤差、モデルのパラメータが持つ不確定性による同定精度への影響の評価および技術的知見による事前情報を利用した同定結果の補正を行った。

2.4.2 分極モデル推定による犠牲陽極個々の発生電流評価

同定結果は、犠牲陽極の発生電流は各グループ内では同一と仮定して扱っているが、実際の犠牲陽極では取り付け位置などにより発生電流にばらつきが出る。そこで、発生電流のばらつきを考慮するために、同定結果から犠牲陽極個々の分極モデルの推定を行った。図2の点群は、ある1つの犠牲陽極の電位と電流密度の同定値をプロットしたものである。すなわち、これらの点群の平均値を通り、定数項(自然電位)が1.06Vである直線を推定分極モデルとした。

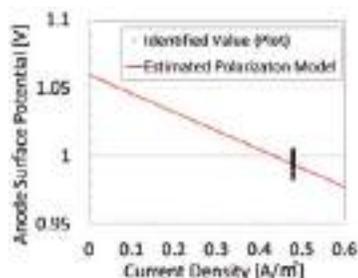


図2 犠牲陽極分極モデルの評価

上記の推定を各犠牲陽極に対して行い、分極抵抗 $R(a)$ (a は犠牲陽極の番号)の推定値を得、推定された分極モデルを新たな境界条件として有限要素法順解析を行い、構造物周辺の電位を計算した。

3. 港湾施設における実証試験

3.1 解析対象施設の概要

2012年1月、東京港大井埠頭新第5バースJ1ジャケットにて検証試験を行った。鋼材には耐海水性ステンレス鋼被覆および流電陽極方式の電気防食が施されている。一部の犠牲陽極にシャント抵抗が取り付けられており、発生電流の計測が可能である。

大井ジャケットの寸法は横幅約50m、奥行約35m、高さ約16mであり、主脚である12本の鋼材(レグ)は約26m(A.P.-12.5mからA.P.-38.4m)の鋼管杭に固定されている。A.P.は荒川水系における基準を表しており、本報告における水深はA.P.を基準として表記した。鋼材はA.P.+3.4mからA.P.-1.5mの範囲で耐海水性ステンレス鋼ライニングが施工されており、A.P.-1.5mからA.P.-15.0mは海水中に、A.P.-15.0mからA.P.-38.4mまでが海土中に埋まっている。電位測定点の位置を図3に示す。図中のNo.1(A.P.-3.0m)およびNo.2(A.P.-12.0m)の犠牲陽極にシャント抵抗が取り付けられており、発生電流はNo.1が0.9A、No.2が0.7Aで、共に0.02Aの変動幅で推移した。本検証ではこれらの値を犠牲陽極発生電流の正解値とした。

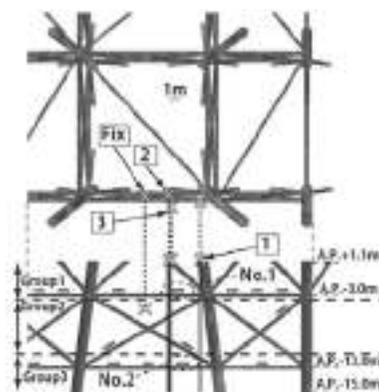


図3 電位測定点の位置

3.2 現場での電位測定

電位測定では、ジャケット上部の足場より照合電極を投入し、図3に示す3箇所の電位を、水深方向に海面から海底まで0.5mおきに測定した。図中の「Fix」は固定電極の位置を表す。移動電極は圧力センサーと一体化させ、波による揺れを抑えるための重りを抱かせた。測定点の水平方向の位置および海面の高さは、レーザー距離計を用いてジャケット天板との距離を測定することで得た。また、海水の電気伝導率は水深によらず3.56S/mとほぼ一定であった。

3.3 数値計算

数値計算に用いる有限要素法モデルを図4に示す。解析領域としては、海水壁からの電流に対する測定値の感度および有限要素法計算の負荷を考慮し、電位測定点を中心に周囲のLEGが6本、犠牲陽極が59個含まれる領域のモデルを作成した。水深方向についてはA.P.+1.1mからA.P.-40.0mの範囲でモデル化を行った。

犠牲陽極は図3に示すように、水深ごとに3グループに分割した。個々の犠牲陽極の発生電流は同一グループ内では同一であると仮定し、グループごとに発生電流を同定した。なお、海水中・海土中の電気伝導率は各々3.56S/m(実測値)、1.0S/m(代表値)を与えた。また、海土中鋼材の分極抵抗は $1.0\Omega\cdot m^2$ とした。

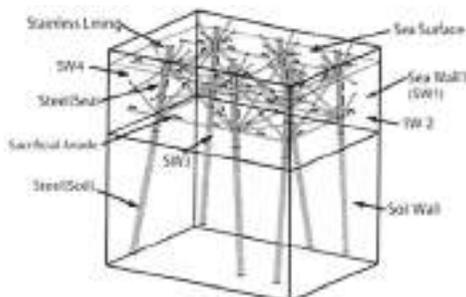


図4 大井埠頭ジャケット構造物のFEMモデル

3.4 ベイズ推定の事前情報

防食状態に保たれた鋼材を模擬し、鋼材表面にエレクトロコーティングが生成した状態での分極抵抗を実験的に求めた。

海水中鋼材の分極抵抗 R_s の事前分布は、天然海水中で-1000mV vs. Ag/AgCl[sw](以降、mVと略記)に約300日間保持したみがき鋼板の分極曲線(図5)を測定し、現場測定データの電位域である-900 から-990mVの範囲で線形近似して取得した。そして、前後数十日の変動を基に、分極抵抗の平均値および標準偏差を定めた。また、犠牲陽極の発生電流は規格値と通電期間を考慮した値を、ステンレス鋼および海土中鋼材への流入電流については設計防食電流を用いた。海水壁の電流については先験情報が無いいため平均値を0Aとし、標準偏差の大きい事前分布を与えた。自然電位も同様に標準偏差の大きい分布とした。

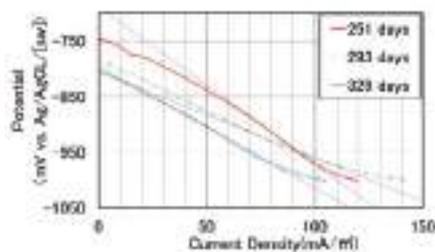


図5 防食みがき鋼板の分極曲線

3.5 同定結果と考察

ベイズ推定の事前情報、同定値および正解値を表1に示す。AVEとSDはそれぞれ正規分布の平均値と標準偏差である。MAX、MINは同定値の最大値、最小値であり、それぞれ犠牲陽極発生電流の安全側(消耗過大評価)および危険側(消耗過小評価)の推定結果である。図3のシャント抵抗付き犠牲陽極No.1およびNo.2はそれぞれグループ1および3に属している。発生電流量をみると正解値が標準偏差(1σ)内に収まっていることが分かる。本手法により、犠牲陽極発生電流量を、平均値による見積もりでは誤差12%、安全側の見積もりでは誤差36%、危険側の見積もりでは誤差24%以内の精度で同定できることが確認できた。

また、各測定場所における電位の測定値(Measurement1、2、3)および同定値(Identified)を図6~8に示す。横軸は電位、縦軸は水深である。海面付近で電位が貴化したのは、測定ラインが犠牲陽極から離れているためである。4m、13mで電位が卑化し、ピークが現れたのは測定ラインが犠牲陽極の直近を通ったためである。Position1は他の2点と比べて構造物との距離が長いいため、水深4m付近でピークは現れなかった。測定時に照合電極の位置誤差の影響が大きい犠牲陽極近傍を除き、同定値はほぼ測定値を再現することができた。また、全測定点の電位は防食管理電位0.8Vより卑であり、構造物は適切に防食されていた。なお、今回は1本のLEGに対し

て3カ所の電位分布を得たが、実用上は各レグに対して1カ所ずつ、水平距離2m以内で電位分布を測定することができれば、本試験の結果と同じ精度で発生電流量を同定できることを確認した。その他の境界の発生電流同定結果については、ステンレス鋼では電流の流入を表すマイナスの値となった。電流密度に換算すると -34.662mA/m^2 となり、エレクトロコーティングや潮汐の影響を考慮しても妥当な値であると思われる。海土中鋼材については同定値の標準偏差が大きく、不確定性の大きな結果となった。これは、海底の形状が厳密には平らでないことや、海底付近の測定点が少ないことが原因としてあげられる。しかしながら、一般的に海土は海水に比べて電気伝導率が低く、海土中鋼材へ流れる電流は犠牲陽極の総電流量と比べて小さいため、犠牲陽極発生電流量の同定値への影響は小さいと考えられる。また、海水壁については、解析領域に電流量の流入出がみられた。これは、領域内に不均一な電位分布があることを示している。海土中鋼材と同様に、電流の総量が小さいため、同定結果への影響は小さいと考えられる。解析領域の境界付近に測定点を設定し、海水壁周辺の情報量を増加させることで同定値が改善されるものと考えられる。

犠牲陽極の推定分極抵抗および有限要素法順解析で求めた発生電流の最大値、平均値および最小値をグループごとに表2に示す。各グループの犠牲陽極において、分極抵抗は最大約 $0.03\Omega\cdot\text{m}^2$ 、発生電流は最大約 0.007A のばらつきが見られた。また、順解析結果から再計算した測定ラインにおける電位分布(Estimated)を図6~8に示す。犠牲陽極の発生電流が各グループ内で同一と仮定した解析結果(Identified)とほぼ同じ電位分布を示しており、推定した境界条件の妥当性が確認できる。

表1 事前情報に基づく同定値と正解値

| Parameter | A priori | | Identified | | | | Exact |
|--|----------|-----------------|------------|-----------------|--------------------------|--------------------------|-------|
| | AVE | SD(1 σ) | AVE | SD(1 σ) | MAX (AVE+1 σ) | MIN (AVE-1 σ) | |
| $R[\Omega\text{m}^2]$ | 2.18 | 0.40 | 2.18 | 0.59 | 2.77 | 1.59 | -- |
| $I_{\text{anode}(1)}[\text{A}]$ | 1.5 | 1.0 | 0.793 | 0.110 | 0.903 | 0.683 | 0.9 |
| $I_{\text{anode}(2)}[\text{A}]$ | 1.5 | 1.0 | 1.095 | 0.125 | 1.220 | 0.970 | -- |
| $I_{\text{anode}(3)}[\text{A}]$ | 1.5 | 1.0 | 0.770 | 0.183 | 0.953 | 0.587 | 0.7 |
| $i_{\text{stainless}}[\text{mA/m}^2]$ | -130 | 50 | -34.662 | 8.014 | -26.647 | -42.675 | -- |
| $i_{\text{steel-soil}}[\text{mA/m}^2]$ | -10 | 10 | -0.071 | 5.788 | 5.717 | -5.859 | -- |
| $I_{\text{sea}(1)}[\text{A}]$ | 0 | 5.0 | 1.197 | 4.870 | 6.067 | -3.673 | -- |
| $I_{\text{sea}(2)}[\text{A}]$ | 0 | 5.0 | -0.217 | 4.324 | 4.107 | -4.542 | -- |
| $I_{\text{sea}(3)}[\text{A}]$ | 0 | 5.0 | -2.729 | 1.760 | -0.968 | -4.488 | -- |
| $I_{\text{sea}(4)}[\text{A}]$ | 0 | 5.0 | 1.872 | 3.182 | 5.052 | -1.312 | -- |
| $\phi_{\text{offset}}[\text{V}]$ | 1.0 | 1.0 | 0.872 | 0.019 | 0.891 | 0.854 | -- |

表2 犠牲陽極の分極パラメータの再計算結果

| Estimated Parameter | Group1 | Group2 | Group3 |
|------------------------------------|--------|--------|--------|
| $R_{\text{max}}[\Omega\text{m}^2]$ | 0.149 | 0.081 | 0.163 |
| $R_{\text{ave}}[\Omega\text{m}^2]$ | 0.129 | 0.062 | 0.130 |
| $R_{\text{min}}[\Omega\text{m}^2]$ | 0.111 | 0.051 | 0.096 |
| $I_{\text{max}}[\text{A}]$ | 0.794 | 1.105 | 0.769 |
| $I_{\text{ave}}[\text{A}]$ | 0.792 | 1.098 | 0.767 |
| $I_{\text{min}}[\text{A}]$ | 0.791 | 1.094 | 0.765 |

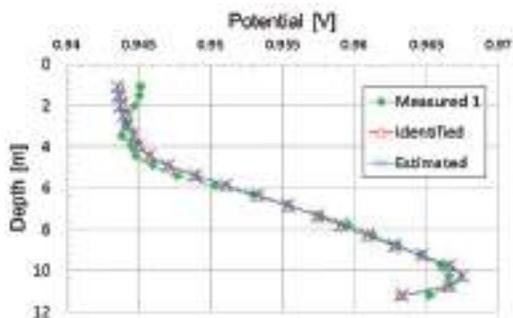


図 6 測定値、同定値、再計算値

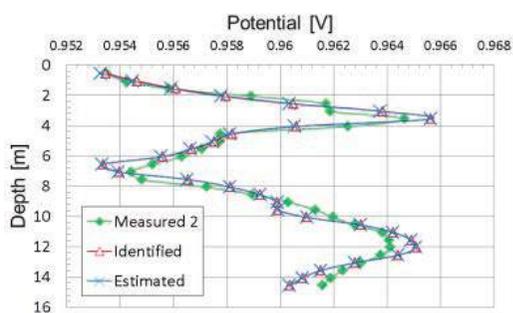


図 7 測定値、同定値、再計算値

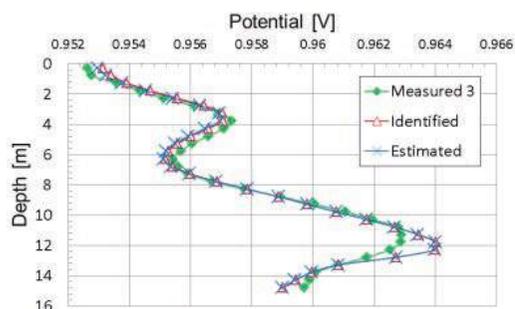


図 8 測定値、同定値、再計算値

4. 結言

大型海洋鋼構造物の犠牲陽極発生電流量を推定する逆解析手法を開発した。

- 1) 海洋鋼構造物において、構造物周辺の海水中電位の測定結果と、構造物形状情報および海水中の電気伝導率を用いた有限要素法による電場計算結果から逆解析を行い、犠牲陽極の電流量を同定した。
- 2) 逆解析において、実験で得られた技術的知見を事前情報として利用するベイズ推定を用いた。
- 3) 犠牲陽極の電流量を、同定値の標準偏差(1σ)以内に正解値が収まる精度で同定できることを示した。

5. 今後の展望

本手法にて、防食状態を経済的かつ効率的に推定する手法を確立することができた。今後はさらに検証試験を進めていく予定である。

参考文献

- 1) Y.Miyata, et al., *Report of PARI*, **45**, 2, 169 (2006).
- 2) Y.Akira, et al., *Proc. JSCE Materials and Environments 2011*, 47 (2011).
- 3) Y.Akira, et al., *Proc. 59th Jpn. Conf. Materials and Environments*, p.253, JSCE (2012).

本報告は「米谷直樹, 他, *材料と環境*, **62**, 326 (2013)」で報告された内容を要約したものである

新型コロージョンハンターの開発と実構造物における腐食調査

日本防蝕工業株式会社 技術研究所 竹子 賢士郎
日本防蝕工業株式会社 技術研究所 山本 悟

1. はじめに

我が国の社会資本の多くは、1955年頃からの高度成長期に建造され、現在は維持管理を必要とする時期に入っている。対象構造物の腐食状況を正確に診断することは、構造物の寿命予測や劣化対策を講じるうえで非常に重要である。我が社ではコンクリート構造物の腐食診断計として、コロージョンハンターを開発、腐食診断を行ってきた。しかし、交換部品の枯渇等により、現状のコロージョンハンターの運用が困難になったことを受けて、その場における腐食速度測定機能である CIPE 法¹⁾を加えた、新しいコロージョンハンターを開発した。これにより、旧型コロージョンハンターの機能である、電位測定、抵抗率測定に加え、コンクリート中鋼材の現在の腐食速度が測定可能になり、より正確な腐食診断が可能になった。

本報では、この新型コロージョンハンター（コロージョンハンターⅡと称す）を用いて実構造物の腐食調査を行い、精度よく腐食診断を行うことができたので報告する。

2. コロージョンハンターによる測定の手順

2.1 電位分布測定

コロージョンハンターⅡによる電位分布測定の手順を図-1に示す。まず、鋼材間の電気的導通を確認するために、鋼材の露出部やはつり出した鋼材間で導通確認を行った。導通確認後、測定範囲をマーキングし、測定面に散水機を用いて散水を行った。これは、測定対象となるコンクリートが乾燥していると、正確な電位の測定が困難なためである。測定状況を図-2に示す。電位分布の測定は、回転式照合電極を測定面に転がして測定を行った。電位分布測定を行うことによって、測定面の相対的な腐食位置が推定できる。

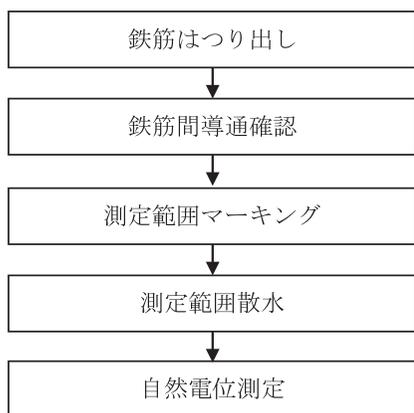


図-1 電位分布測定フロー



図-2 電位測定状況（回転式照合電極）

2.2 抵抗率測定

コロージョンハンターによる抵抗率測定の手順は、1) 測定面の決定、マーキング、2) 測定面散水（適宜）、3) 測定面に抵抗率センサを当てて測定、である。外観観察および電位分布の結果より、測定場所を決定しマーキングを行う。この時点で測定面が乾燥していた場合、抵抗率は高く測定さ

れるため、適宜散水を行う。測定条件が整ったら、**図-3**に示すように測定位置にセンサを押し当て測定する。抵抗率測定を行うことによって、相対的な腐食電流の流れやすさが測定できる。



図-3 抵抗率測定状況

2.3 電位分布および抵抗率の評価

自然電位と腐食の関係を**表-1**²⁾に、抵抗率による腐食性の判定例を**表-2**³⁾に示す。あくまでこれらの評価表は、目安を示すものであり、評価結果が実際の腐食程度と一致しない場合がある。

表-1 自然電位と腐食の関係 (ASTM-C876)

| 自然電位 E (mV CSE) | 鉄筋腐食の確率 |
|----------------------|----------------|
| $-200 < E$ | 90%以上の確率で腐食なし |
| $-350 < E \leq -200$ | 不確定 |
| $-500 < E \leq -350$ | 90%以上の確率で腐食あり |
| $E \leq -500$ | 約半数の供試体にクラック発生 |

表-2 抵抗率と腐食性の判定

| 抵抗率 ρ ($\Omega \cdot m$) | 腐食性 (水分量) |
|---------------------------------|-----------|
| $\rho > 100$ | 小さい (少ない) |
| $50 > \rho > 100$ | 不確定 (中程度) |
| $\rho < 50$ | 大きい (多い) |

2.4 腐食速度測定 (CIPE 法)

対象とする構造物が劣化過程のどの段階にあるかを把握するためには、鋼材の腐食速度を測定することが重要であるため、コンクリート中鋼材の腐食速度測定方法である CIPE 法に基づいた腐食速度測定を行った。CIPE 法の測定方法概要図を**図-4**に示す。CIPE 法の測定手順は、1) 測定面の決定、マーキング、2) 測定面に測定用電極を取り付け、3) 適宜散水を行い測定、である。分極の方法は、電流密度 $0.1\text{mA}/\text{m}^2$ から、段階的に電流密度を上昇させ、各段階の通電時間を1秒間とし、通電後 0.05 秒後のインスタントオフ電位を測定、通電間には 10 秒間の休止期間を挟んで行う。分極はカソード分極から行い、最終的に電流密度 $1000\text{mA}/\text{m}^2$ まで分極を行う。カソード、アノード分極間には 60 秒間の休止期間を挟んで測定を行う。CIPE 法による腐食速度の評価は**表-3**に従って行う。すなわち、CIPE 法では測定前の自然電位 E_{cor} や測定時の分極量 η 等から腐食速度を評価する。

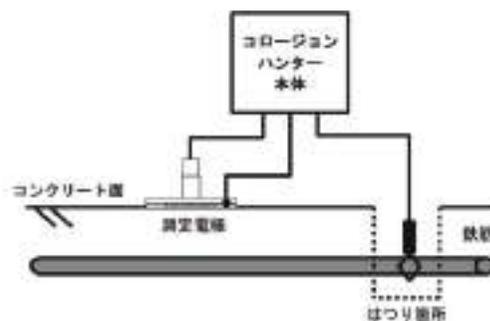


図-4 CIPE 法の測定概要

表-3 CIPE 法による腐食速度評価

| 自然電位 E_{cor} (mV vs. CSE) | $1\text{mA}/\text{m}^2$ の分極量 η (mV) | 腐食速度 i_{int} (mA/m^2) |
|------------------------------------|--|--|
| $E_{\text{cor}} \leq -725$ | η_a と η_c 共に 10 以下 | i_{int} は 1 以下 (高含水) |
| $E_{\text{cor}} > -725$ | η_a が 10 以上 | i_{int} は 1 以下 (不動態) |
| $E_{\text{cor}} > -725$ | その他 | i_{int} を読む |

3. 実構造物における腐食調査例

3.1 RC 構造の栈橋床版下面（瀬戸内海）

施設の概要図を図-5 に示す。図中の赤色網掛け部が調査範囲である。当該施設はコンクリートに海砂を使用しており、供用開始から 35 年が経過していた。その間の補修はなく、床版下面には 1mm 程度のひび割れが多数入っている状態であった。鉄筋は $\phi 16$ の異形棒鋼を使用しており、鉄筋のかぶりは 70mm であった。また、本施設では腐食速度測定部分の鉄筋をはつり出し、切断して腐食減量調査を行った。

電位分布測定の結果を図-6 に示す。自然電位分布はほぼすべての範囲で $-200 \sim -300 \text{ mV vs. CSE}$ を示した。また、図中の丸印の箇所は抵抗率測定を行った点で、黒色箇所の抵抗率は $133 \Omega \cdot \text{m}$ 、黄色箇所の抵抗率は $102 \Omega \cdot \text{m}$ であった。表-1 および表-2 に示した基準より、「腐食確率は不確定」で、「腐食性は小さい」であった。

CIPE 法による腐食速度測定結果と、採取した鉄筋の腐食減量を表-4 に示す。また、採取した鉄筋の位置関係を図-7 に示す。図-7 中の正方形は一辺が 25cm で測定した際の対極の位置を示している。鉄筋は 35 年間で、 $971 \sim 2509 \text{ g/m}^2$ ほど腐食し、かぶり 70mm におけるひび割れを生じるとされる腐食量 $60 \sim 150 \text{ g/m}^2$ の数十倍であり、非常に激しく腐食していた。CIPE 法による腐食速度は 87 mA/m^2 と、こちらも採取した鉄筋の腐食量の結果と同様に、非常に高い値を示した。表-4 の実際の腐食減量から求めた腐食面積当たりの電流密度が、CIPE 法から求めた腐食電流密度と差があるのは、CIPE 法は測定した瞬間の腐食速度を測定するのに対し、腐食減量から求めた電流密度はこれまでの供用期間における腐食速度（平均値）であるためである。腐食の推定経時変化を図-8 に示す。一般に、かぶりコンクリートにひび割れが生じると、ひび割れから「酸素」、「水分」、「塩分」、「中性化を生じる二酸化炭素」などが容易に侵入するため、腐食速度は加速度的に増加する。このことから、対象構造物はここ数年のうちに急激に劣化し始めたものと考え

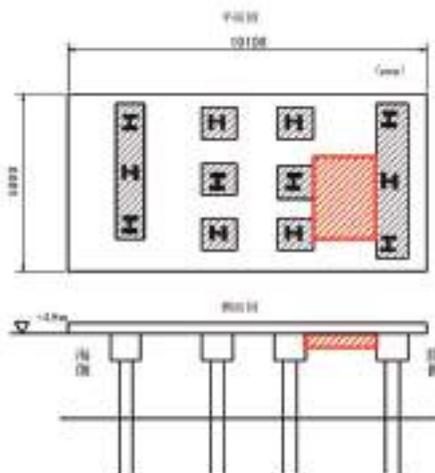


図-5 調査栈橋概要 1

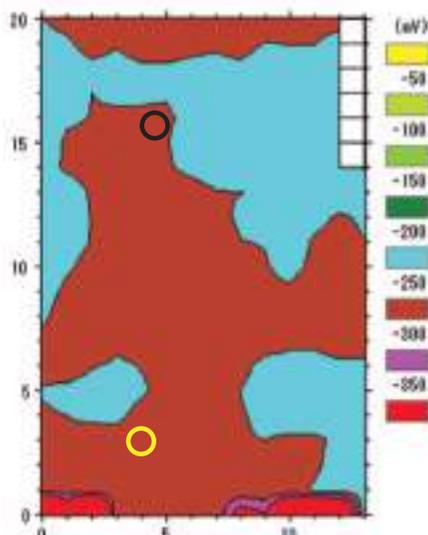


図-6 電位分布図 1

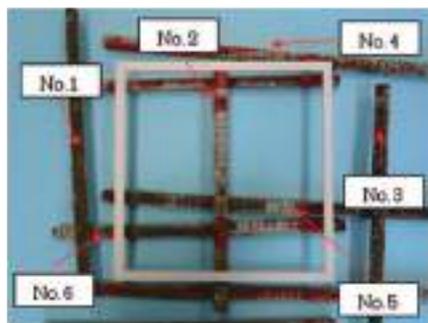


図-7 採取鉄筋配置 1

表-4 腐食減量と腐食速度 1

| 鉄筋の番号 | 鉄筋面積当たりの腐食量 (g/m^2) | 鉄筋面積当たりの電流密度 (mA/m^2) | CIPE法による腐食電流密度 (mA/m^2) |
|-------|--------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|
| No.1 | 4864 | 15 | 87 |
| No.2 | 971 | 3 | |
| No.3 | 3780 | 12 | |
| No.4 | 1582 | 5 | |
| No.5 | 2509 | 8 | |
| No.6 | 2039 | 6 | |

平均値 2624 g/m^2

られる。図中の計算は、対極の面積（0.0625m²）を鉄筋の面積（0.051m²）で割り、鉄筋の面積当たりの腐食電流密度に換算し（1.24 倍）、腐食電流 1mA/m² で 1 年間腐食すると、9.13g/y・m² ほど腐食することになるので、CIPE 法による腐食速度 87mA/m² の場合、985g/y・m² と見積もった。これを実際の腐食減量の平均値（≒ 2600g/m²）から考えると、腐食の積算量の計算から、対象構造物は約 5 年前からひび割れが生じ始め、急激に腐食が進行したと考えられる。

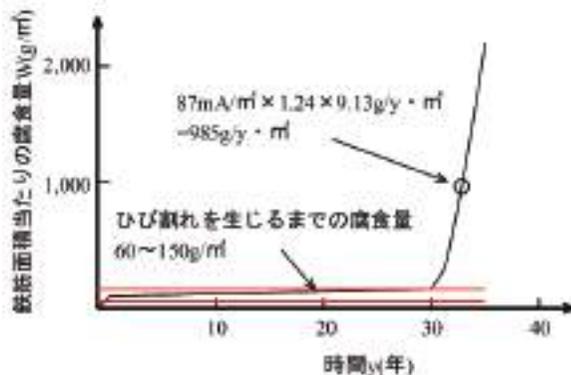


図-8 腐食推定経時変化

以上のことから、CIPE 法を用いることによって、正確に腐食診断を行うことができることが確認できた。

3.2 RC 構造の栈橋梁側面（太平洋側）

他の測定例の施設概要を図-9 に示す。図中の赤点線部が調査場所である。当該施設は荷役用の栈橋で供用開始から約 34 年が経過しており、床版面は過去に補修を行っている。測定対象の両側杭頭下部は腐食によりひび割れ、剥落が生じ始めた状態であった。主筋に φ22 の異形棒鋼を、フープ筋に φ16 の異形棒鋼を使用しており、主筋までのかぶり厚は 70mm、フープ筋までのかぶり厚は 50mm であった。本施設においても測定場所の鉄筋を採取し、腐食減量調査を行った。

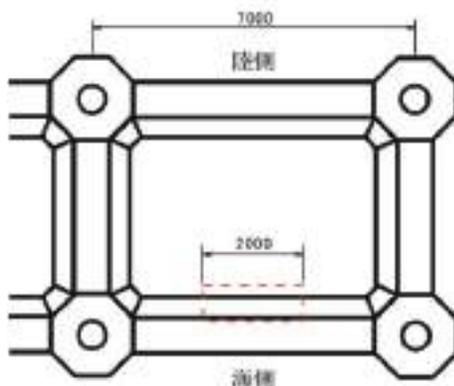


図-9 調査栈橋概要 2

図-10 に自然電位分布を示す。自然電位分布はほぼすべての範囲で -350mV vs.CSE より卑な値を示した。

測定範囲中央の空白部は足場用鋼管の配置により測定できなかった部分である。また、図中の丸部は抵抗率測定を行った箇所で、黒色箇所の抵抗率は 31Ω・m、黄色箇所の抵抗率は 52Ω・m で、CIPE 法による測定は黒色箇所付近で行った。表-1 および表-2 に示した基準からは「90%以上の確率で腐食あり」で、「腐食性は大きい」であった。

採取した鉄筋の位置関係を図-11 に示す。図-11 中の赤い四角は CIPE 法による測定を行った位置で、対極の大きさを表しており、寸法は 50mm×100mm である。青い四角は鉄筋を採取した場所である。また、表-5 に CIPE 法による腐食速度測定結果と、採取した鉄筋の腐食減量を示す。主筋直上で CIPE 法による腐食速度は 85.2mA/m² で激しく腐食していたと考えられる。鉄筋の交差

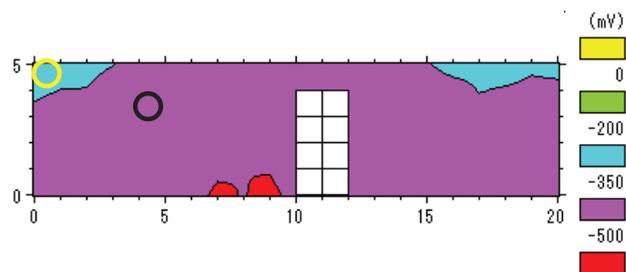


図-10 電位分布図 2

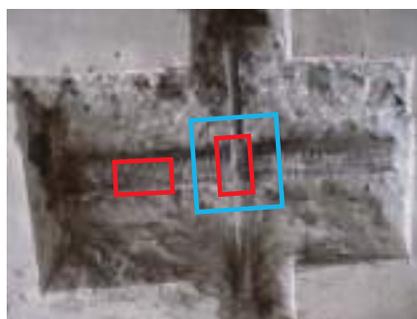


図-11 採取鉄筋配置 2

部分では 341.6mA/m^2 の非常に高い腐食速度が測定された。採取した鉄筋の腐食量は $1563\sim 2555\text{g/m}^2$ であった。これは、前述したかぶり 70mm におけるひび割れを生じるとされる腐食量の $60\sim 150\text{g/m}^2$ の数十倍であり、非常に激しく腐食していた。図 - 12 に除錆処理した採取鉄筋の写真を、図 - 13 に

表-5 腐食減量と腐食速度 2

| 採取鉄筋 | 実際の腐食量 (g/m^2) | 鉄筋面積当たりの腐食速度 (mA/m^2) | CIPE法による腐食速度 (mA/m^2) | |
|------|------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------|
| | | | 主筋直上 | 交差筋 |
| フープ筋 | 1822.29 | 5.87 | 85.2 | 341.6 |
| 主筋① | 2555.40 | 8.23 | | |
| 主筋② | 1563.63 | 5.04 | | |

CIPE 測定時の内部鋼材と対極の位置関係を示す。採取鉄筋を観察すると、フープ筋は異形鉄筋のリブ部が欠損するほど激しく腐食しており、主筋も局部的に腐食していた。測定時の対極の位置関係と、図 - 11、12 の腐食状況から、主筋の直下では激しく腐食しているフープ筋の影響を受けて、高い腐食速度が測定されたと考えられる。フープ筋の直下では採取鉄筋からも、激しく腐食していることが伺えるので、CIPE 法が腐食速度の瞬時値を測定する点から、実際に測定時の腐食速度は 300mA/m^2 以上あったものと考えられる。



図 - 12 鉄筋除錆処理後

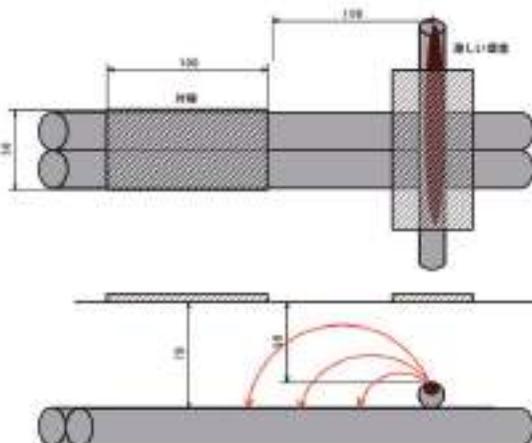


図 - 13 測定時の内部鋼材と対極の位置

また、深さ方向の塩化物イオン濃度を測定したところ、フープ筋のあるかぶり 50mm 付近では 12.7kg/m^3 、主筋のあるかぶり 70mm 付近でも 7.6kg/m^3 と、コンクリート標準示方書に記載されている腐食発生限界塩化物イオン濃度の 1.2kg/m^3 、港湾の技術基準の 2kg/m^3 を大きく超える塩化物イオン濃度が測定された。このことから、測定箇所は過酷な塩害環境であったと考えられる。

4. まとめ

新型コロージョンハンターを開発し、実構造物による腐食診断を行った結果、CIPE 法による腐食速度測定結果およびはつり出した鉄筋の腐食減量より、新型コロージョンハンターは構造物の腐食状況を正確に診断することができることが確認できた。

参考文献

- 1) 竹子賢士郎, 山本悟, 高谷哲: 分極曲線測定によるコンクリート中鋼材の腐食速度測定方法の開発, 日本コンクリート工学協会年次論文集, Vol. 36, No. 1, pp. 2092-2097, 2014
- 2) ASTM C876: Half-cell Potentials of Reinforcing Steel in Concrete, 1977
- 3) 武若耕司: コンクリートの非破壊検査方法 (原理と手法) - 鋼材腐食 -, コンクリート工学, Vol. 27, No. 3, 1989
- 4) 田森清美, 丸山久一, 小田川昌史, 橋本親典: 鉄筋の発錆によるコンクリートのひびわれ性状に関する基礎研究, コンクリート工学年次論文集, 10-2, pp. 505-510, 1988

臨海プラント海水ライン防汚装置

省エネ海水電解防汚装置：SP型

臨海プラント工場等の海水ライン防汚を目的とした海水電解装置は**大電流**で電解するため設備投資費用が**高く**電力消費量も**大きい**等の問題がありました。

日本防蝕工業(株)は、およそ半世紀に渡り海水電解方式の海洋生物付着防止装置を 3,000 基以上製造、販売してきた実績のもと、初期費用を抑え低ランニングコストを実現した**省エネ**海水電解防汚装置をご提供します。



SP06-KF 型 「塩素発生量：9.4kg/h」

電解槽

SP06KA(塩素発生量：1.57kg/h)×6 槽

設置寸法：

120W×90D×1,900H(cm)

SP06KA 重量：

20kg/樹脂製槽、33kg/金属製槽

電源装置

電力消費量：40kW

設置寸法：95W×90D×165H(cm)

重量：700kg

省エネ海水電解防汚装置：SP 型の特徴（従来品との比較）

初期設置費用：

電源装置、電解槽の小型化により搬入、設置場所が従来に比べ大幅改善されております。

また、電解電流がおよそ従来品の 1/20 になるため電力配線系統の設置費用も安価です。

ランニングコスト：

「メンテナンスフリー」

従来品は電解槽内部に発生する電解生成物等を除去するために定期清掃を必要としておりましたが、SP 型は自社開発による電解生成物付着防止機構を採用しメンテナンスフリー*です。

*メンテナンスフリー：ただし、2 年程度を目処に当社立会による点検確認をご推奨します。

「陽極更新作業」

重機不要、電解槽(SP06KA)の重量が 20kg (樹脂製)、33kg (金属製) と軽量ですので、作業員 1～2 人、所要時間半日程度と経済性に優れています。

「電力費用」

電源装置の変換効率が高く従来品比較で電力費用の約 **48%低減**を実現しています。

例：塩素発生量 9.4kg/h の電力使用量は従来 77kW でしたが本装置は 40kW で年間電力費用換算すると約 **500万円**低減できます。(16 円/kW 換算；当社比)

日本防蝕工業(株)

全国を網羅するサービスネットワーク

- 北海道地区 ●北海道支店
〒060-0807 札幌市北区北七条西 1-1-2 (SE 札幌ビル 6 階)
TEL (011) 736-6591 FAX (011) 736-6593
- 東北地区 ●東北支店
〒980-0804 仙台市青葉区大町 2-15-28 (藤崎大町ビルディング 1 階)
TEL (022) 264-5511 FAX (022) 265-6506
- 関東甲信越地区 ◎本社
〒144-8555 東京都大田区南蒲田 1-21-12 (昭和ビル)
TEL (03) 3737-8400 FAX (03) 3737-8479
- 広域営業部 (本社内)
TEL (03) 3737-8441 FAX (03) 3737-8459
- 東京支店 (本社内)
TEL (03) 3737-8450 FAX (03) 3737-8458
- 千葉営業所
〒260-0834 千葉市中央区今井 1-20-1 (Y's21 ビル 2 階)
TEL (043) 263-2118 FAX (043) 263-2558
- 新潟営業所
〒950-0086 新潟市中央区花園 2-1-16 (三和ビル 3 階)
TEL (025) 244-0911 FAX (025) 247-6030
- 中部地区 ●名古屋支店
〒464-0075 名古屋市千種区内山 1-10-10
TEL (052) 735-3481 FAX (052) 735-3480
- 四日市営業所
〒510-0093 四日市市本町 1-1 (服部ビル 3 階)
TEL (059) 351-7163 FAX (059) 353-8599
- 関西地区 ●大阪支店
〒530-6004 大阪市北区天満橋 1-8-30 (OAP タワー 4 階)
TEL (06) 6356-9800 FAX (06) 6356-9820
- 神戸営業所
〒651-0085 神戸市中央区八幡通 4-1-38 (東洋ビル 7 階)
TEL (078) 242-2535 FAX (078) 242-5426
- 本四営業所
〒700-0818 岡山市北区蕃山町 4-5 (岡山繊維会館 2 階)
TEL (086) 227-0280 FAX (086) 235-4450
- 中国地区 ●中国支店
〒730-0051 広島市中区大手町 4-6-24 (重岡ビル 2 階)
TEL (082) 243-2720 FAX (082) 248-2364
- 徳山営業所
〒745-0073 周南市代々木通り 1-30 (山陽ビル 4 階)
TEL (0834) 31-3762 FAX (0834) 31-3791
- 九州地区 ●九州支店
〒810-0013 福岡市中央区大宮 1-4-34 (五常物産ビル 2 階)
TEL (092) 523-8001 FAX (092) 523-8002
- 沖縄営業所
〒900-0006 那覇市おもろまち 4-10-18 (タカダ新都心マンション 2 階)
TEL (098) 862-0226 FAX (098) 864-2383