

NAKABOH REPORT

国土交通省「みなとSDGsパートナー登録制度」

「みなとSDGs パートナー」に 事業者登録

技術報告／鉄筋表面の環境改善を考慮したコンクリート中鉄筋の電気防食設計
／ねじ込み式電極体を設置する電気防食施工法(Nakaspot工法®)
／千葉港葛南中央地区岸壁(-10m)改良等工事
／塗装と電気防食の併用技術に対する考察

法人向け web販売

「ナカボーテック Official Store」の開始





第 55 号 2024 年

— 目 次 —

● 巻頭言	1
● 技術報告	3
《事例 1》鉄筋表面の環境改善を考慮したコンクリート中鉄筋の電気防食設計 開発統括部 技術開発センター 博士（工学）小林浩之，若林徹，博士（工学）望月紀保	
《事例 2》ねじ込み式電極体を設置する電気防食施工法（Nakaspot 工法®） 大阪支店 森下 優	
《事例 3》千葉港葛南中央地区岸壁（-10m）改良等工事 （供用中の港湾施設における鉄筋コンクリート被覆工事） 東関東支店 酒井 亨	
《事例 4》塗装と電気防食の併用技術に対する考察 開発統括部 技術開発センター 博士（工学）望月紀保	
● 対外発表リスト	29
2024 年	
● トピックス	33
《トピックス 1》国土交通省「みなと SDGs パートナー登録制度」の事業者登録	
《トピックス 2》法人向け web 販売『ナカボーテック Official Store』の開始	

巻頭言



株式会社ナカボーテック
代表取締役社長 木村 浩

平素より当社事業に多大なるご理解とご支援を賜り、誠にありがとうございます。当社技報「ナカボーレポート」をお届けするにあたり、ご挨拶申し上げます。

21世紀最初の四半世紀が過ぎようとしている現代は、科学技術の進歩による豊かさや便利さを享受できる一方で、社会・経済・自然環境の情勢が複雑化し、先行きを見通すことがとても難しい時代でもあります。

社会や経済の不確実性、自然災害、気候変動など多くの課題が相互に影響を及ぼし合う中、社会活動を支える基盤であるインフラが、さまざまな環境変化を受けてもなお、揺るがない真の「基盤」として機能し続けることは、かつてないほど重要になっており、そのために防食技術が果たす役割はますます大きくなっています。

社会インフラを腐食から護ることは、人々の安全・安心な日常を守るだけではなく、経済的持続可能性と環境保全の両面においても大きな意義を持ちます。例えば、施設や設備の長寿命化を図ることは、廃棄物の削減・メンテナンスやスクラップアンドビルドに要する資源やエネルギーの節約と温室効果ガス排出量の削減・防災減災を通じた社会コストの低減といった多様な面で次代への負担軽減に貢献するものです。

さて、1951年に中川防蝕工業株式会社として創業した当社が、株式会社ナカボーテックと社名を変更したのは1991年のことです。「ナカボーさん」と呼ばれていた愛称を社名に取り入れるとともに、技術を象徴する「テック」を付したことに、腐食がもたらす社会課題に技術で応えることが当社の使命であるという先人の強い思いを感じます。この思いを受けて、一昨年制定した当社のパーパスは、ナカボーテックが技術に立脚した会社であることを明確にする「ひたむきに防食技術を追求」するとの文言から始まります。

ここに発刊する「ナカボーレポート」第55号におきましては、当社の技術者が取り組んできた最新の事例や考察を四件紹介いたします。これらの報告は、当社の防食技術がどのよ

うに社会課題の解決に寄与しているかを具体的に示すものです。皆さまにとって当社への理解や信頼を深めていただく機会となり、新しい発見やインスピレーションを得る一助となることを願っております。

これからも私たちは「防食技術」の深化を通じた持続可能な社会の実現に向けてひたむきに歩み続けてまいります。そのためには、皆さまとの協力が欠かせません。引き続きご指導ご鞭撻を賜りますよう、よろしくお願い申し上げます。

鉄筋表面の環境改善を考慮したコンクリート中鉄筋の電気防食設計

技術開発センター 小林浩之, 若林 徹, 望月紀保

1. はじめに

日本国内において、耐久性は半永久的と言われた鉄筋コンクリートが塩害による早期劣化で大きな社会問題となったのは 1970 年代前半のことである。塩害とは、種々の要因でコンクリート中に拡散あるいは混入した塩化物イオンによって鉄筋が腐食し、その腐食生成物(錆)の影響によって鉄筋に体積変化が生じ、その体積膨張圧でコンクリートにひび割れ、剥落が起こり、部材耐力を低下させる現象である。この問題を機に、断面修復や表面塗装などの塩害対策が施されるようになったが、いずれの工法も再劣化の問題を抱えており、定期的な補修が必要であった¹⁾²⁾。一方、電気防食(以下、カソード防食と記す)は、鉄筋に防食電流を供給し続ける限り再劣化は生じないため、今日では塩害劣化に非常に有効な防食対策と認識されるようになった。

現在、カソード防食の適用に際しては、復極量を分極量と等価と考え、通電初期から 100mV 以上のカソード分極が生じるような通電が行なわれている³⁾。しかしながら、復極量と分極量は濃度分極の影響がない場合はほぼ等価と考えられるが、溶存酸素の濃度分極の影響が大きいコンクリート中鉄筋に対するカソード防食では、等価と考えるのは適切ではない。また、分極量を基準にした通電は、水分の少ないコンクリート構造物にとっては過剰な通電となることもある。電流供給用の難溶性アノード表面の水分枯渇によって印加電圧は上昇し、通電不能となる危険性もある。安定したカソード通電を確保するためには、通電初期からの過剰通電を控え、小電流密度であっても一定期間経過後には防食管理指標(復極量 100mV 以上)を満足するような設計をすることが重要である。この考えを裏付けるものとして、通電初期は防食管理指標を満足しなくても、防食電流を供給し続けることによって鉄筋の自然電

位が経時的に上昇し、防食管理指標を満足するようになることが実構造物で確認されている。この現象は、カソード防食による鉄筋表面の副次的な環境改善効果がもたらした結果と考えられており⁴⁾⁵⁾、この環境変化を定量的に評価できれば防食設計に取り入れることが可能となる。

本報告は、カソード防食による鉄筋表面の環境改善効果を取り入れたカソード防食設計法(以下、新設計法と記す)を提案し、その妥当性を確認するための試験を実施したものである。

2. 新設計法の考え方

新設計法の目的は、通電初期から復極量 100mV 以上を満足させるような過度な通電を避け、鉄筋表面の環境改善により経時的に腐食速度を低下させることである。具体的にはカソード防食の適用により、経時的に変化する鉄筋表面の塩化物イオン(Cl^-)濃度と水酸化物イオン(OH^-)濃度の変化を数値解析(差分法)によって評価し、 Cl^- 濃度と OH^- 濃度比($[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-]=r_{\text{ce}}$)がしきい値(r_{crit})以下になるまでの期間(t_a)を求めて、許容範囲内で初期の防食電流密度を決定する方法である。

本設計法では、 t_a までの期間は復極量が 100mV に未達であっても良い(以下、未達許容可能期間と記す)こととし、 t_a 以降に対して現行の防食管理指標を適用することを考えている。これにより、経済的かつ安定したカソード防食の適用が可能であると考えられる。

3. 解析および試験方法

3.1 解析方法

(1) Cl^- 濃度の経時変化

カソード防食を適用している場合、コンクリート中の Cl^- 濃度に対する一次元(x 軸方向)での時間変化は、(1)式のように考えることができる⁶⁾。

$$\frac{\partial C_{Cl^-}}{\partial t} = D_{Cl^-} \frac{\partial^2 C_{Cl^-}}{\partial x^2} + D_{Cl^-} \frac{zFE}{RT} \frac{\partial C_{Cl^-}}{\partial x} \quad (1)$$

C_{Cl^-} : Cl^- 濃度, x : コンクリート表面からの距離, t : 時間, z : 荷電数, D_{Cl^-} : 見かけの Cl^- 拡散係数, F : ファラデー定数, E : 環境電位勾配, R : 気体定数, T : 絶対温度

カソード防食適用前のコンクリート中の Cl^- 濃度分布は、フィックの第2法則を $C_{Cl^-}(x, 0) = 0$, $C_{Cl^-}(0, t) = C_{Cl^-,0}$ (一定) の条件下で得られる(2)式によって求めることができる。本解析では、(2)式をもとに下記解析条件下より求められる分布を初期条件とした。

$$C_{Cl^-}(x_i, \Delta t) = C_{Cl^-,0} \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_{Cl^-} \cdot t}} \right) \quad (2)$$

【解析条件】

$C_{Cl^-}(0, t) = 10 \text{ kg/m}^3$ (コンクリート表面濃度),
 $C_{Cl^-}(\infty, t) = 0 \text{ kg/m}^3$, $D_{Cl^-} = 3.0 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$,
 t : 20年後

(1)式を差分方程式((3)式)に変換し、下記の解析条件下で各位置における Cl^- 濃度の経時変化を求めた。

$$C_{Cl^-}(x_i, t + \Delta t) = D_{Cl^-} \cdot \Delta t \cdot \left\{ \frac{C_{Cl^-}(x_{i+1}, t) - 2C_{Cl^-}(x_i, t) + C_{Cl^-}(x_{i-1}, t)}{\Delta x^2} + \frac{zFE}{RT} \cdot \frac{C_{Cl^-}(x_{i+1}, t) - C_{Cl^-}(x_i, t)}{\Delta x} \right\} + C_{Cl^-}(x_i, t), \quad (3)$$

【解析条件】

鉄筋位置: $x = 5 \text{ cm}$, $C_{Cl^-}(0, t) = 10 \text{ kg/m}^3$, $C_{Cl^-}(\infty, t) = 0 \text{ kg/m}^3$, $D_{Cl^-} = 1.0 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$, $E = -30 \text{ mV/cm}$ ($x \leq 5 \text{ cm}$), $E = 0 \text{ mV/cm}$ ($x > 5 \text{ cm}$), $T = 298 \text{ K}$

(2) pH 経時変化

カソード防食適用によるコンクリート内部の OH^- 濃度の時間変化は、一次元での物質移動を考慮した場合、(4)式および(5)式で与えられたとする。

《鉄筋位置》

$$\frac{\partial C_{OH^-}}{\partial t} = D_{OH^-} \frac{\partial^2 C_{OH^-}}{\partial x^2} + D_{OH^-} \frac{zFE}{RT} \frac{\partial C_{OH^-}}{\partial x} + \frac{i}{zFd} \quad (4)$$

《鉄筋位置以外》

$$\frac{\partial C_{OH^-}}{\partial t} = D_{OH^-} \frac{\partial^2 C_{OH^-}}{\partial x^2} + D_{OH^-} \frac{zFE}{RT} \frac{\partial C_{OH^-}}{\partial x} \quad (5)$$

C_{OH^-} : OH^- 濃度, x : コンクリート表面からの距離, D_{OH^-} : 見かけの OH^- 拡散係数, t : 時間, z : 荷電数, F : ファラデー定数, E : 環境電位勾配, R : 気体定数, T : 絶対温度, i : カソード電流密度, d : pH 定義層の厚み

【解析条件】

鉄筋位置: $x = 5 \text{ cm}$, $D_{OH^-} = 1.0 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$,
 $x = 5 \text{ cm}$ の時: $C_{OH^-}(5, 0) = 1.0 \times 10^{-7} \text{ M}$, $x \neq 5 \text{ cm}$ の時: $C_{OH^-}(\infty, t) = 1.0 \times 10^{-2} \text{ M}$, $i = -10 \text{ mA/m}^2$, $d = 0.05 \text{ cm}$, $E = -30 \text{ mV/cm}$ ($x \leq 5 \text{ cm}$), $E = 0 \text{ mV/cm}$ ($x > 5 \text{ cm}$), $T = 298 \text{ K}$

上記解析条件については以下の点を考慮した。腐食している鉄筋を想定して $C_{OH^-}(x, 0)$ は鉄筋表面を $1.0 \times 10^{-7} \text{ M}$ (pH7) とし、それ以外の部分を $1.0 \times 10^{-2} \text{ M}$ (pH12) とした。また、 D_{OH^-} は Cl^- と OH^- との移動度 η の比を考慮し、 D_{Cl^-} の3倍の値を用いた。

(4)式、(5)式を下記((6)式、(7)式)の差分方程式に変換し、上記解析条件下で各位置における OH^- 濃度を算出し、 $\text{pH} = 14 + \log C_{OH^-}$ の関係より pH に換算して経時変化を求めた。

《鉄筋位置》

$$C_{OH^-}(x_i, t + \Delta t) = \Delta t \cdot \left[D_{OH^-} \cdot \left\{ \frac{C_{OH^-}(x_{i+1}, t) - 2C_{OH^-}(x_i, t) + C_{OH^-}(x_{i-1}, t)}{\Delta x^2} + \frac{zFE}{RT} \cdot \frac{C_{OH^-}(x_{i+1}, t) - C_{OH^-}(x_i, t)}{\Delta x} \right\} + \frac{i}{zFd} \right] + C_{OH^-}(x_i, t) \quad (6)$$

《鉄筋位置以外》

$$C_{OH^-}(x_i, t + \Delta t) = D_{OH^-} \cdot \Delta t \cdot \left\{ \frac{C_{OH^-}(x_{i+1}, t) - 2C_{OH^-}(x_i, t) + C_{OH^-}(x_{i-1}, t)}{\Delta x^2} + \frac{zFE}{RT} \cdot \frac{C_{OH^-}(x_{i+1}, t) - C_{OH^-}(x_i, t)}{\Delta x} \right\} + C_{OH^-}(x_i, t) \quad (7)$$

3.2 r_{crit} 値の評価試験

発錆させた試験片を各種 Cl-濃度の試験溶液中に浸漬し、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ および NaOH の添加によって pH を上昇させた時の腐食速度の変化を AC インピーダンスの周波数特性と、自然電位の経時変化により評価した。試験片は図-1 に示す形状を有しており、材質は SS400 (JIS G 3101) である。SS400 の化学成分を表-1 に示す。室温、大気開放下の海水を用いて 1~2 週間、任意のインターバルで乾湿を繰り返すことにより、試験片の供試面全体に錆を発生させた。試験溶液の pH 上昇は、はじめに $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の添加によって $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の飽和水溶液状態とし、それ以上の pH 上昇は NaOH の添加により調整した。

AC インピーダンスの測定装置を図-2 に示す。

表-1 r_{crit} 値の評価試験に用いた試験片の化学成分(mass%)

	C	Mn	P	S
SS400	—	—	< 0.050	< 0.050

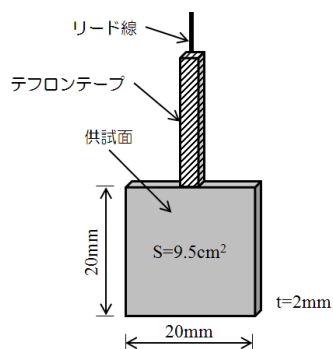


図-1 r_{crit} 値の評価試験に用いた試験片の形状

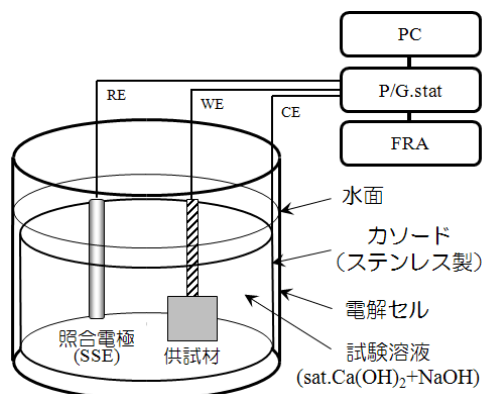


図-2 AC インピーダンス測定装置

装置は P/G.Stat, 周波数特性分析器 (FRA), パーソナルコンピュータからなる計測系と、試験片 (試料極), 対極, 照合電極 (sat.KClAg/AgCl 電極, SSE) からなる電解系によって構成されている。測定条件は、振幅: $\pm 20\text{mV}$, 測定周波数: $10\text{mHz} \sim 10\text{kHz}$ である。

3.3 新設計法の検証試験

新設計法の妥当性を確認するため、コンクリート試験体によるカソード防食試験を実施した。コンクリートの配合を表-2 に示す。コンクリート試験体のセメントには普通ポルトランドセメントを使用し、細骨材には川砂、粗骨材には川砂利を用いた。水セメント比は 0.50, 目標スランプは $10 \pm 2.5\text{cm}$, 目標空気量は $4 \pm 1\%$ とした。また、鉄筋の腐食を促進するため、 10kg/m^3 の NaCl を練り混ぜ水に添加した。コンクリート試験体の形状は図-3 に示すように幅×高さ×長さ = $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 200\text{mm}$ であり、上面から 30mm の位置に $\phi 13\text{mm}$ の鉄筋を設置し、上面を除く周囲 5 面をエポキシ樹脂で被覆した。コンクリート打設後、30 日間の湿潤養生を行い、(国研)海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所の暴露試験場 (1 日につき 3 時間×2 回海水を噴霧) に 1 年間暴露した。暴露終了後、試験体の上面から 10mm の位置に通電するためのリボンメッシュ電極を設置し、試験体底面の樹脂を剥がした後、30mm の高さに水道水を張った試験水槽にコンクリート試験体を設置した。

コンクリート試験体は 2 体作製し、ガルバナスタットを用いてそれぞれ 10mA/m^2 と 30mA/m^2 の定電流カソード通電を行った。通電前にはコンクリート抵抗と鉄筋の自然電位を測定し、通電中には復極量測定 (24h) を定期的の実施した。

表-2 コンクリートの配合

W/C	s/a	W (kg/m^3)	C (kg/m^3)	S (kg/m^3)	G (kg/m^3)
0.50	0.45	166	324	805	1008

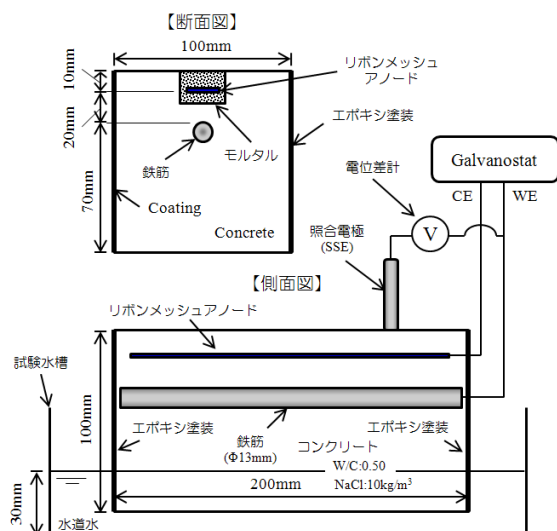


図-3 検証試験に用いたコンクリート試験体の形状

4. 試験結果および考察

4.1 カソード電流によるコンクリート中の Cl⁻濃度経時変化

$\Delta x = 0.1\text{cm}$, $\Delta t = 10^{-3}$ 年として, 3.1 に述べた手法で解析した結果を図-4 に示す. なお, 図中の ● は, 本条件下における定常 Cl⁻濃度分布である. 定常状態における 2 点間の Cl⁻濃度比は, (8) 式⁸⁾に示す 2 点間の環境電位勾配によって一意的に求めることができる.

$$\Delta E = \frac{RT}{zF} \ln \left(\frac{C_{\text{Cl}^-,1}}{C_{\text{Cl}^-,2}} \right) \quad (8)$$

ここで, $C_{\text{Cl}^-,1}$, $C_{\text{Cl}^-,2}$ はそれぞれコンクリート中

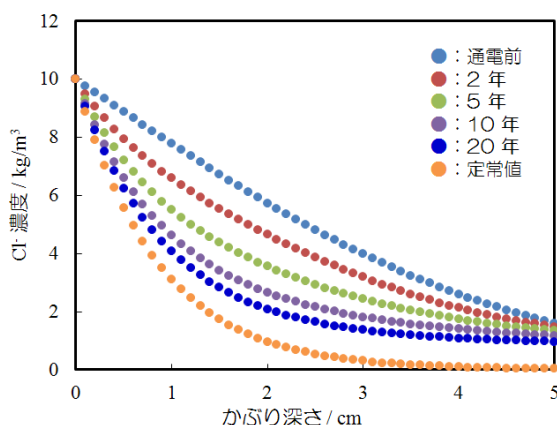
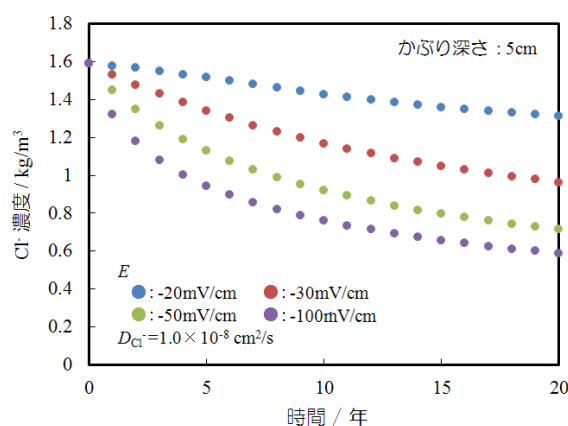


図-4 カソード防食の適用に伴う Cl⁻濃度分布の経時変化

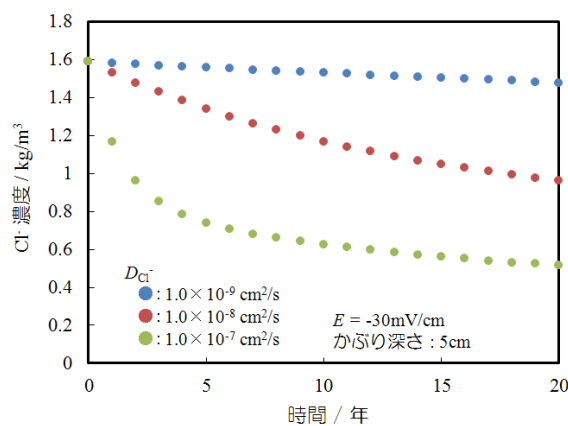
の任意の 2 点の Cl⁻濃度, ΔE はその間に印加されている環境内の電位勾配を表している. $C_{\text{Cl}^-,2}$ をコンクリート表面濃度 (10kg/m^3 で一定) とし, ΔE が距離に対してリニアに変化するとすれば, 任意の位置のコンクリート表面に対する電位勾配が得られるため, (8)式よりその位置の定常 Cl⁻濃度 ($C_{\text{Cl}^-,1}$) を求めることができる.

カソード防食の適用により, コンクリート内部の Cl⁻濃度は, 時間の経過とともに低減するのが確認できる. 特にかぶり厚さ 1~3cm の位置において, その傾向が顕著に現れていた. しかしながら, Cl⁻濃度が定常濃度になるまでには相当の時間を要することが分かる. また, Cl⁻濃度の低減に及ぼす各種パラメータの影響として, 鉄筋位置 (かぶり深さ 5cm) における濃度変化に着目し, D_{Cl^-} と ΔE の影響を調べた. 結果を図-5 に示す.

図中の ● は, 図-4 のシミュレーションにおける



(a) D_{Cl^-} の影響



(b) E の影響

図-5 鉄筋表面における Cl⁻濃度の経時的低減に及ぼす各種パラメータの影響

Cl⁻濃度の経時変化であるが、 D_{Cl^-} 、 ΔE ともに大きい値になるほど Cl⁻濃度の低減速度が速いことが分かる。既存の構造物に対する対応としてはとりわけ ΔE の設定が重要であると考えられる。

4.2 カソード電流によるコンクリート中の pH 経時変化

$\Delta x = 0.1\text{cm}$, $\Delta t = 60\text{sec}$ として解析した OH⁻濃度分布の経時変化を pH に変換し、図-6 に示した。定常値としてプロットした値は、Glass らの論文に基づき(9)式⁹⁾より算出した値である。

$$C_{OH^-,0} = \frac{RT}{RT + zFi\rho\delta} \left(\frac{i\delta}{ZF D_{OH^-}} + C_{OH^-,1} \right) \quad (9)$$

C_{OH^-} : OH⁻濃度 ($C_{OH^-,0}$:カソード表面, $C_{OH^-,1}$:コンクリート表面), i : カソード電流密度, δ : かぶり厚さ, ρ : コンクリート抵抗, z : 荷電数, D_{OH^-} : OH⁻拡散定数, F : ファラデー定数, R : 気体定数, T : 絶対温度

カソード電流の供給に伴う鉄筋表面(かぶり厚さ 5cm)の pH 変化は、定常値に達するまでの時間が先述した Cl⁻濃度の場合と比較するとその速度が非常に速い。本解析条件下では、30 日程度で(9)式より得られる定常 pH の近くまで上昇するという結果になった。

(5)式において $E = i \cdot \rho$ とし、鉄筋位置(かぶり深さ 5cm)での pH 経時変化に及ぼす i と D_{OH^-}

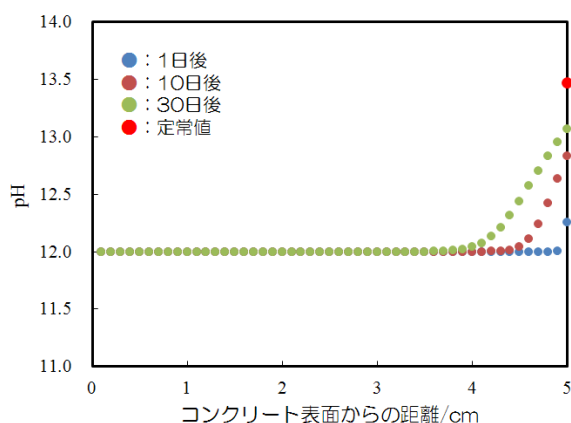
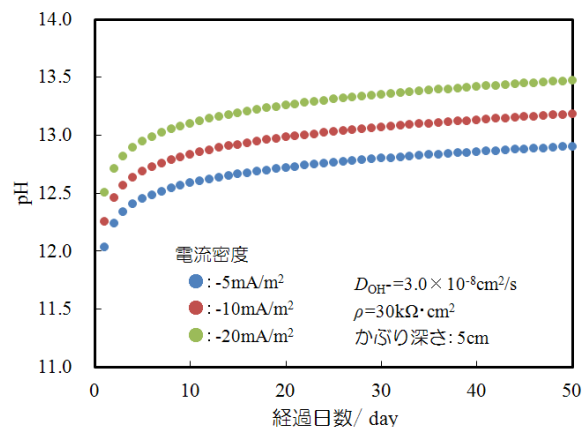
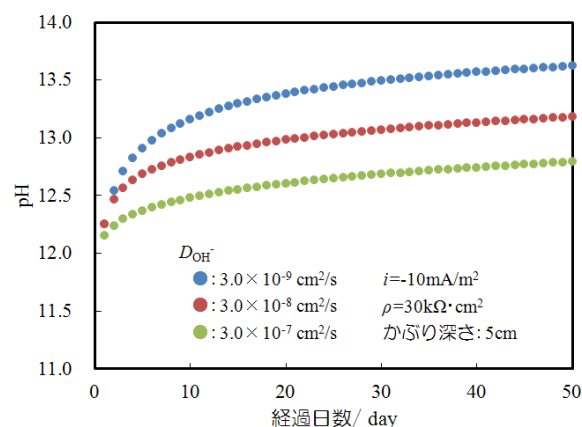


図-6 カソード防食適用に伴う pH 分布の経時変化

の影響を評価した結果を図-7 に示す。●は図-6の数値解析における pH の経時変化である。解析結果より、 D_{OH^-} が大きく、 i が高い条件ほど pH の上昇速度は大きく、鉄筋表面の pH も高くなることが分かる。



(a) i の影響



(b) D_{OH^-} の影響

図-7 鉄筋表面の pH 経時変化に及ぼす各種パラメータの影響

4.3 r_{crit} 値の検討結果

図-8 は、錆試験片の自然電位と pH の関係について検討した結果の一例である。

自然電位は $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の添加により一時的に卑化する挙動を示すものの、その後上昇して定常化した。本試験では、自然電位が定常化した時点での腐食抵抗 R_{corr} (CPE を取り入れたカーブフィッティングより評価) を当該 pH 環境の腐食速度に対応するパラメータと考え r_{ce} との対応を調べた。結果は図-9 に示すように $r_{ce} < 3$ で R_{corr} は $100\text{k}\Omega\text{cm}^2$ 以上を示し、腐食した鋼材もアルカリ

環境を維持することで、問題視しない領域まで腐食速度を低減することが可能であることを確認した。 r_{crit} に関しては、既報文献¹⁰⁾⁻¹¹⁾との対応も考慮し、本試験では $r_{crit}=1$ と評価することにした。

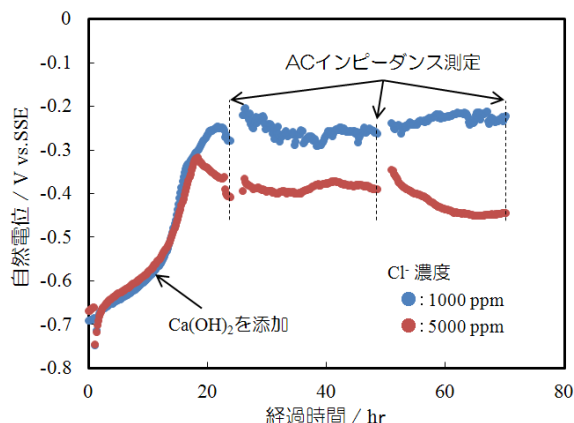


図-8 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 添加前後における供試鋼材の自然電位経時変化

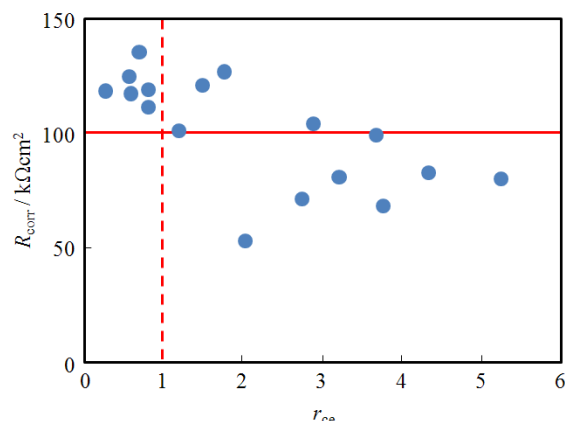


図-9 腐食鋼材に対する r_{ce} と R_{corr} の関係

4.4 鉄筋表面の環境改善を考慮した設計法の検討

図-10 に新設計法のフローチャートを示した。

本設計に必要な関係パラメータは、鉄筋かぶり厚さ、コンクリート抵抗率、コンクリート表面 Cl^- 濃度、構造物の経過年数、 Cl^- および OH^- 拡散定数の 6 項目である。

Cl^- 濃度と OH^- 濃度の初期条件は、 Cl^- 濃度の場合、Fick の第 2 法則の解析解である(2)式より求めた。 OH^- 濃度は、鉄筋表面を $1.0 \times 10^{-7} \text{ M}$ とし、それ以外の部分を $1.0 \times 10^{-2} \text{ M}$ とした。電気防食系は、2 枚の平板電極が対向するモデルとして扱い、鉄筋以深の電場については無視した。

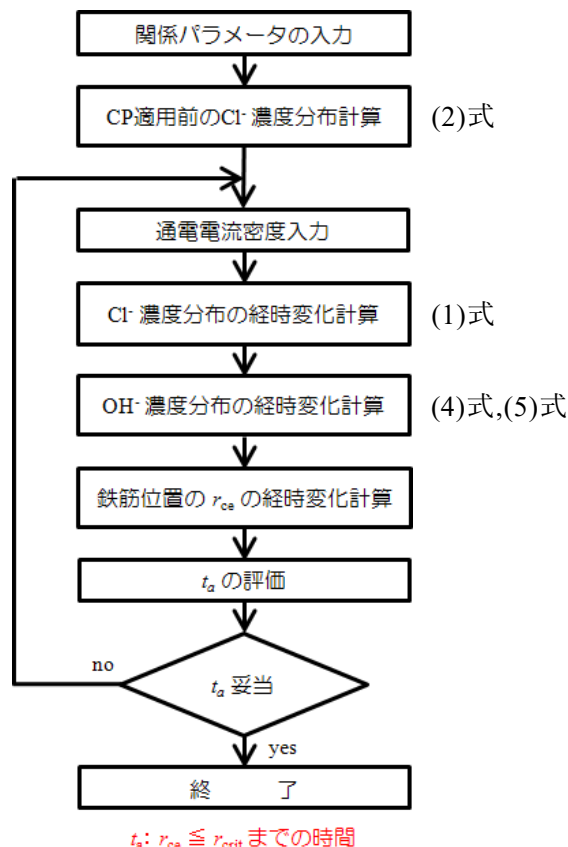


図-10 設計フローチャート

通電に伴う Cl^- および OH^- 濃度分布の経時変化は、それぞれ(1)式、(4)式、(5)式の微分方程式を差分方程式に変換して求めた¹²⁾。

r_{ce} 経時変化の算出は、(2)式、(6)式、(7)式より求められる各位置の Cl^- および OH^- 濃度の経時変化より、鉄筋位置における各濃度をピックアップし、同時期における $[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-]$ の計算を時系列で実施し r_{ce} 経時変化データとした。その際、 Cl^- 濃度として通常用いられる kg/m^3 単位はモル濃度への換算が必要であるが、本設計では、 NaCl を添加した $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 飽和水溶液環境で孔食電位が出現する $[\text{Cl}^-]=2000\text{ppm}$ をコンクリート中鉄筋の腐食発生限界濃度である 1.2kg/m^3 に相当するとした¹³⁾。 $r_{ce} \leq r_{crit}$ となる期間 t_a を評価し、カソード防食基準の未達許容可能期間内であれば当該電流密度で通電することとし、見直しが必要であれば通電電流密度を再入力し t_a の再評価を試みる。

表-3 に示す条件下で実施した設計結果の一

例を図-11 に示す. 1 年以内で鉄筋近傍の環境を $r_{ce} \leq 1$ に改善するという条件であれば, 2mA/m^2 という非常に小さい電流密度で通電すればよいことになる.

コンクリートは水溶液のような高電流密度での通電は困難であるが, 物質の拡散速度が遅いので, 小さい電流密度で生成した鉄筋表面の OH^- は蓄積しやすいという特性を持っている. 新設計法に基づく小さい電流密度での通電は, 鉄筋とコンクリート界面の付着に悪影響を及ぼすことなく鉄筋の腐食速度を低減し, 鉄筋の不動態化後は断続通電での防食も可能と考えられることから, 省エネルギー効果の高い防食法となる可能性がある.

表-3 シミュレーション条件

【試験体条件】	
コンクリートかぶり深さ:	5cm
初期 Cl^- 濃度:	10kg/m^3
D_{Cl^-} :	$1.0 \times 10^{-8}\text{cm}^2/\text{s}$
【電気防食条件】	
i :	-2, -5, -10 mA/m^2
ρ :	$30000\Omega \cdot \text{cm}$
E :	$i\rho\delta$
D_{OH^-} :	$3.0 \times 10^{-8}\text{cm}^2/\text{s}$
d :	0.05cm
初期 OH^- 濃度:	
・鉄筋位置:	$1.0 \times 10^{-7}\text{M}$
・鉄筋位置以外:	$1.0 \times 10^{-2}\text{M}$
T :	298K

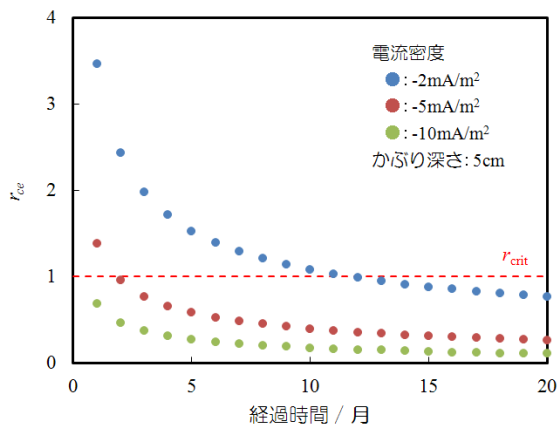


図-11 各種通電条件における r_{ce} 経時変化

4.5 新設計法の検証試験

カソード防食適用下におけるコンクリート中鉄筋の復極量の経時変化を図-12 に示す. いずれの試験体も通電初期の復極量は, カソード防食基準である 100mV に到達しなかった. この原因は, 通電前の鉄筋の自然電位が -500mV vs.SSE 前後を示していたことから, 鉄筋腐食が著しく進行し表面の pH も低下(中性化)していたことにより錆の還元により多くの防食電流が消費されたためと考えられる. しかしながら, 時間の経過とともにいずれの試験体の復極量も増加していくのが確認された. 復極量の増加速度は 30mA/m^2 で通電していた試験体のほうが速く, カソード防食基準を約 16 日で満足した. 一方, 10mA/m^2 で通電していた試験体は非常に緩やかに増加し, 100mV に到達するまでに約 90 日を要した.

通電オフ 24 時間後のコンクリート中鉄筋の自然電位の経時変化を図-13 に示す. 30mA/m^2 で通電した試験体は, 時間の経過とともに電位が貴化する傾向が見られた. これはカソード防食によって鉄筋近傍の pH が上昇し, 鉄筋表面が再不働態化することによって生じた現象であり, カソード防食による環境改善効果を裏付けるデータである. 10mA/m^2 で通電した試験体は, 通電初期は目立った電位の貴化は認められなかったが, 50 日頃から電位の貴化が認められるようになった. また, 復極量は自然電位の貴化とともに増加する傾向を示していることから, 所定の復極量が得られない場合でも, 経時的な自然電位の貴化が認められれば, いずれはカソード防食基準を満足するものと考えられる.

表-4 の条件下で解析した電流密度と $t_a (r_{ce} < 1)$ に達するまでにかかった日数の関係を図-14 に示す. いずれの試験体においても, 解析結果よりも実測値の t_a のほうがやや大きい傾向を示すものの, 概ね整合しているといえる. 今後は, 試験体の数量を増やして検証試験を実施し, データのばらつき等を確認する予定である.

新設計法は, 鉄筋腐食が生じているコンクリート試験体に対して有用であることが実証された.

今後は実構造物に対しても検討を行う予定であるが、試験体に比べて配筋が複雑であるため、電流分布の不均一などが問題となることが予想される。修正しながら実用化に結び付けたい。

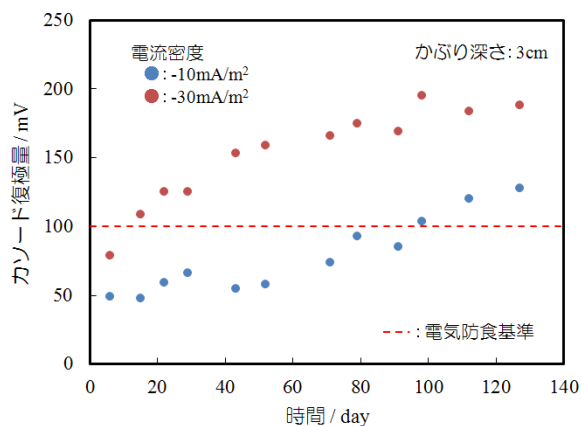


図-12 通電オフ 24 時間後のカソード復極量の経時変化(検証試験)

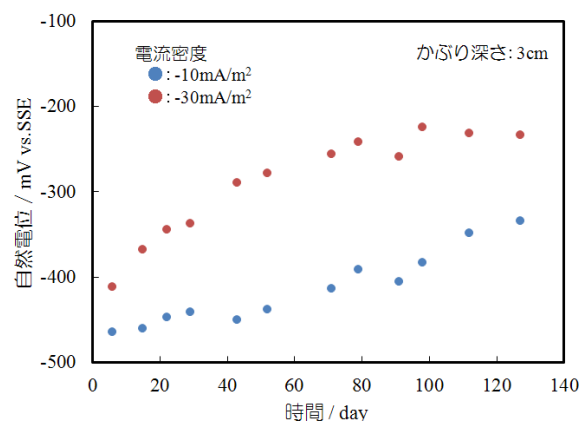


図-13 通電オフ 24 時間後の鉄筋自然電位の経時変化(検証試験)

表-4 シミュレーション条件

【試験体条件】

コンクリートかぶり深さ: 3cm
初期 Cl^- 濃度: 10kg/m^3
 $D_{\text{Cl}^-} = 1.0 \times 10^{-8}\text{cm}^2/\text{s}$

【電気防食条件】

$i = -10, -30\text{mA/cm}^2$
 $\rho = 18500\Omega \cdot \text{cm}$
 $E = ip\delta$
 $D_{\text{OH}^-} = 3.0 \times 10^{-8}\text{cm}^2/\text{s}$
 $d = 0.05\text{cm}$
初期 OH^- 濃度
・鉄筋位置: $1.0 \times 10^{-7}\text{M}$
・鉄筋位置以外: $1.0 \times 10^{-2}\text{M}$
 $T = 298\text{K}$

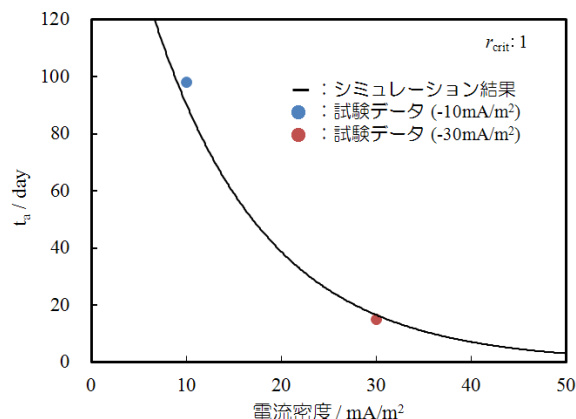


図-14 試験データとシミュレーション結果の比較

5. まとめ

本試験によって得られた知見を以下に示す。

- 1) コンクリート中鉄筋にカソード防食を適用した場合、鉄筋表面では経時的に塩化物イオン濃度の減少および pH の上昇が生じるが、とりわけ pH の上昇が顕著に現れることが分かった。
- 2) コンクリート中鉄筋に対するカソード防食設計法として、鉄筋表面の Cl^- と OH^- の濃度比 (r_{ce}) がしきい値 (r_{crit}) 以下になるまでの期間 (t_a) を評価して通電電流密度を決定する新しい設計手法を提案した。
- 3) 鉄筋腐食が生じているコンクリート試験体を用い、新設計法の検証試験を実施した。数値シミュレーションで推定した t_a よりも実測値は若干大きい値を示したが、概ね整合しており、本設計法の妥当性を確認できた。

新設計法は、 r_{crit} 値の設定や実構造物に対しての検証試験などさらに検討すべき課題は多いが、コンクリートという特性を有効利用した省エネルギー効果の高い防食法となる可能性がある。

参考文献

- 1) 宇野祐一, 魚本健人, 元売正美, 松田敏, 各種要因が補修後の再劣化に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.2, p.p.1559-1156, JCI, (2003)
- 2) David K Phillips, Proc. Cathodic Protection of

Reinforced Concrete Bridge Decks, p.5,
NACE (1985).

た論文の一部を加筆・修正したものである.

- 3)(社)土木学会, コンクリートライブラリー107 電気化学的防食工法設計施工指針(案), p.p.67-68, (2001)
- 4)布田仁美, 松田芳範, 篠田吉央, コンクリート鉄道橋における電気防食効果の経時変化について, 第56回材料と環境討論会講演予稿集, p.111, (社)腐食防食協会, (2009)
- 5)布田仁美, 篠田吉央, 松田芳範, 栗林健一, 小林真也, アルミニウム系流電陽極パネル方式電気防食工法の鉄道橋への適用試験, 第57回材料と環境討論会講演予稿集, p.402, (社)腐食防食協会, (2010)
- 6) A.M.Hassanein, G.K.Glass and N.R.Buenfeld, *Corrosion*, 55, 9 (1999).
- 7)大畑公嗣, 杉山隆文, 辻幸和, Supratic Gupta, コンクリート中の電気伝導現象における塩化物イオンの役割, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, p.p.511-516, JCI, (2001)
- 8) G.K.Glass, J.Z.Zhang and R.N.Buenfeld, *Corrosion*, 51,9 (1995).
- 9) G.K.Glass and J.R.Chadwick, *Corrosion Science*, 36, 12 (1994).
- 10) D.A.Hausmann, *Mater.Protection*, 6, 11 (1967).
- 11) Lianfang Li and A.Sagues, *CORROSION/2000*, No.801, NACE (2000).
- 12) 若林徹, 小玉俊明, 望月紀保, 被覆欠陥を有する防食体の電位降下に関する伝送線モデルによる解析, 材料と環境 2011 講演予稿集, p.102, (社)腐食防食協会, (2011)
- 13) 雨宮佑太, 福手勤, 望月紀保, コンクリート中鉄筋の電気防食効果評価基準に対する考察, 材料と環境 2008 講演予稿集, p.111, (社)腐食防食協会, (2008)

※本報告は, (公社)腐食防食学会発行「材料と環境」の第 62 巻第 4 号(2013 年)に掲載され

ねじ込み式電極体を設置する電気防食施工法 (Nakaspot 工法®)

大阪支店 森下 優

1. はじめに

埋設された鋼構造物の電気防食には、多様な形状の電極体を使用されている。電気防食の計画段階（設計・調査）では、必要な電流の大きさや腐食形態、施工環境を考慮し、適切な電極体と施工方法の選定を行う。図1に示す電極体を設置する工法（施工方法）のうち、開削工法およびボーリングなどの機械掘削工法が主流であり、これらには豊富な施工実績がある。

これらに対し、『マクロス®工法』や『Nakaspot 工法』は「施工環境に制限のある現場」に対応するために開発された。

マクロス工法は、主にコンクリートピット貫通部で生じる C/S マクロセル腐食形態に対応する。本工法は油圧ジャッキを使用して釘形状の電極体を水平に設置し、電極体を中心に付近へ陽極（防食）効果を近接的に与える。小型サイズの機材を使用しており、施工空間が限られていても実施可能であることが特徴である。

一方の Nakaspot 工法は、ネジ形状の電極体を、電動式アースドライバーを用いて鉛直設置する。人力運搬可能な小型の機材を使用するため、重機が進入できない環境にも適している。この工法は、河川や山岳部、市街地など、「施工環境に制限のある現場」への適応が期待されている。

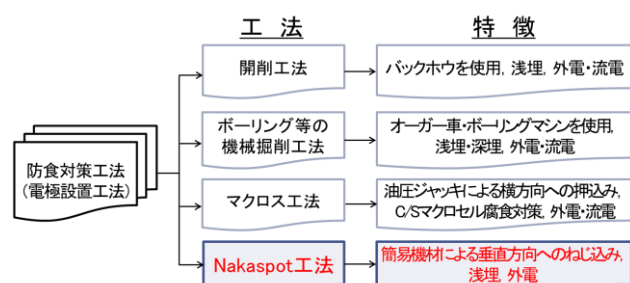


図1 電極設置工法の種類

Nakaspot 工法の開発にはもう1つ狙いがある。従来はボーリングマシンを用いて深い深度に電極体を設置する「深埋式」が主流だった。これは、電気防食に必要な電流が大きい場合に適している。防食電流が大きいということは、長距離ラインや塗覆装がある程度劣化した防食対象物に対して有効な手段

であると言える。しかし、近年では地下埋設配管（水道管やガス導管）の防食対策として高塗膜抵抗値を有するポリエチレン系の塗覆装が一般的になり、長距離ラインの防食案件も減少傾向にある。そのため、新たな防食提案の矛先としては、従来の「深埋式」に比べてより局所的な小さな防食電流が必要となる環境が考えられる。例えば、水管橋アバット部（配管立ち上がり部のコンクリート巻き箇所）や配管ライン上の空気弁、制水弁などで C/S マクロセル腐食が生じている箇所では、近接陽極法を用いた電気防食設計が効果的である。これは、防食対象の近くに電極体を設置して、陽極（防食）効果を与える方法である。このような局所的な防食対策には、「浅埋式」の Nakaspot 工法が適していると考えられる。

Nakaspot 工法は従来工法を代替するものではなく、従来工法では施工が困難であった環境や、部分防食が有効な箇所に対応するための手段として位置付けられる。本稿で紹介する事例は、市街地にある中圧ガス導管ガバナ敷地内での施工報告であり、この施工は重機が乗り入れられない環境下で行われた。

2. Nakaspot 工法の特徴

Nakaspot 工法は、2018年に専用の通電用電極体『ねじねじ君®』と共に商標登録および特許権取得された工法・商品である。ねじねじ君には、その他に意匠権もある。図2に示す通り、ねじ形状の電極体をディーアースドライバー（以下、ドライバーと略す）などの機材を用いて、地表面に対して垂直にねじ込んで設置する工法である。電極体の設置深度はロッド（1.0m/本）を用いて管理し、おおむねロッド2本分の2.0mが標準の土被り（電極体長さは1.0mであるため先端部はG.L.-3.0m）となる。電極上部には、ロック機能付きレデューサーが備えられており、専用ロッドの下部に接続可能である。ロッドの上部に、ケーブル収容用兼接続用アタッチメントを取り付け、これを介してドライバーと接続する。また、電極体をねじ込む際には、ドライバーを保持する作業者に反力が作用するため、このドライバー

に反力棒を接続し、先端部を固定してその反力を受け止める。

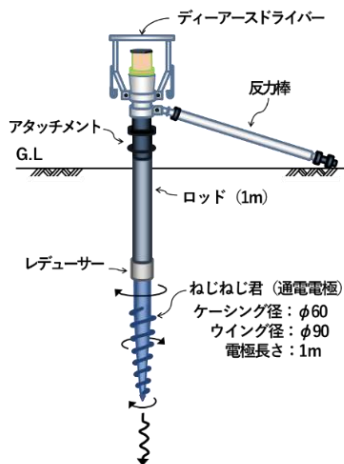


図 2 Nakaspot 工法模式図

標準の施工手順については、図 3-1, 3-2 に示すような 7 手順である。各手順について以下に詳細を示す。

①電極体の設置箇所を試掘を行う。試掘孔は他埋設物の確認や BOX (マンホールなど) の設置、埋設配線配管設置溝、作業高さの確保などに利用できる。また試掘孔をさらに穿孔することで、電極体を仮設置する地点を確定させる。

②電極体を仮設置するとき、これを人力で軸周りに数回転させて掘削推進させる。この際に、電極体は水平器などを用いて可能な限り地面に垂直となるように調整する。

③電極体、アタッチメント、ドライバーおよび反力棒を相互に連結させて電極体設置ユニットを組み立てる。ドライバーを稼働させて電極体をねじ込むときには、地面に打ち込まれる支持金具に反力棒の先端部を強固に固定する。試掘深さが比較的深いときには、電極体とアタッチメントとの間に予めロッドを連結しても良い。

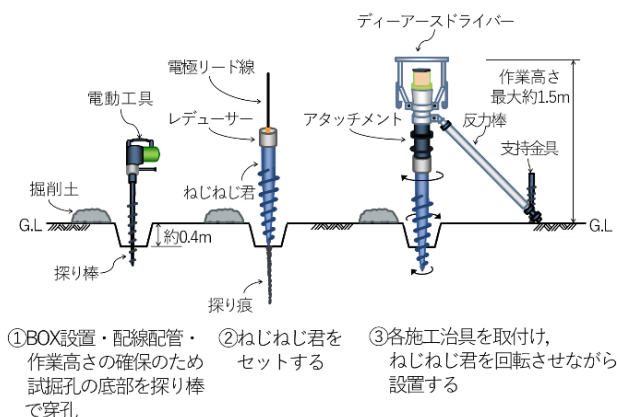


図 3-1 Nakaspot 工法の施工手順①～③

④⑤電極体のほぼ全体が土壌に埋まった時点で、ロッドを用いて電極体をさらに地下深くに掘削推進させる。④は 1 本のロッド、⑤は 2 本のロッドを連結した場合である。電極体とロッドとの連結において、電極体の付属ケーブルは、電線管にて保護された状態で、電極体の上端からロッド内部を通してアタッチメント部まで配線する。このケーブルは、電線管の装着やロッドの連結の際に傷つかないように留意する。

⑥電極体設置深さは、ロッドの本数および高さにて管理する。規定深さに到達した後、ロッドより上部の機材を全て取外す*。ロッドはチェーンブロックなどを利用して回収が可能な構造となっている。

*電極体上部に設けられたレデューサーとロッド下部とは、鍵状の係合部を介して相互に繋がっており、ロッドが正回転するときは接続が外れないが、逆回転すると約 45 度で接続が外れる構造である。

⑦ロッドを回収した後の空隙は、試掘時の発生土などで埋め戻しを行い、その後に配線配管工、BOX 設置工などに移行する。

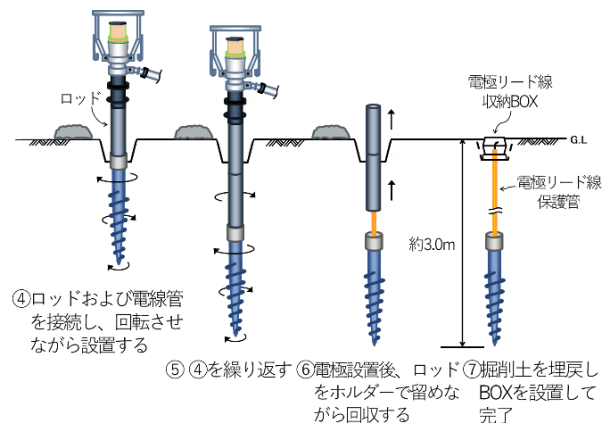


図 3-2 Nakaspot 工法の施工手順④～⑦

Nakaspot 工法の特徴として、電極体の回収が挙げられる。施工手順のとおり、電極体はドライバーによる正回転で地中にねじ込まれる。これに対し、逆回転させる（ドライバーは逆回転可能）ことで電極体を回収することが可能である。当然、機材の自重が電極体に負荷されるため、三脚やチェーンブロックを利用して引き上げる形態となるが、人力で回収可能という利点がある。例えば、施工途中で電極体の設置箇所を変更したい（土中に玉石や他埋設物

がある）場合は、この特徴が生じる。機材が比較的小型であり、電極体の設置に係る材料や機材をすべて回収できるため、施工時間や費用に大きなロスが生じない。

次に挙げる特徴は、制限のある現場での適用能力の高さである。特に高さ制限のある環境に対し有効である。例えば、人が屈んだ状態でやっと入れるようなタンク下部でも、人力掘削にてある程度の小さな作業スペースを設けることで、電極体を設置することができる。

3. 工事事例

大阪ガスネットワーク株式会社殿中圧ガス導管の電気防食用電極体の更新工事にて Nakaspot 工法を用いた施工事例を紹介する。

現場である中圧ガバナは、**図4**および**写真1**に示すように重機が進入できない構造であるが、敷地内に新設電極体（以下、「電極体」とも言う。）を3本追加設置する計画であった。中圧ガバナの敷地広さはおおよそ幅2.3m×奥行14m程度である。電極体の設置位置は、入口付近に設置されているガバナの裏側であり、従来の工法（ボーリングマシンやアースオーガ車を使用）では施工困難な条件であるため、Nakaspot 工法による電極体設置が採用された。

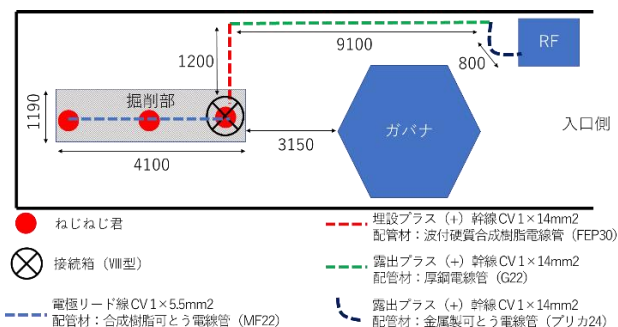


図4 電極体設置概略図

電極体の主な施工条件について、下記に示す。

1. 既設電極体の通電と合わせて 10A 出力すること
2. 可能な限り深い位置に電極体を設置すること

本施工は試験的なものではなく、中圧ガス導管ラインの防食状態を維持するために必要な電流を供給することが可能な電極体を設置することを目的としている。そのため、電極体の電流出力と電流分布を向上させるために、新設電極体ねじねじ君 3 本 (2A/本) と既設電極体 (4A/1 式) を合わせて使用し

可能な限り深い位置に設置することを目標とした。



写真1 中圧ガバナ外観写真

電極体の施工箇所は、コンクリートの床となっており、コンクリート厚みと合わせて G.L.-2.0m まで試掘（御支給項目）した。試掘面積は**図4**に示すとおり、約 1.2m×4.1m とし、土留めのため鋼矢板を設置（御支給項目）した。この時、コンクリート構造物（梁形状）が試掘範囲の中央部に出てきたため、実際の施工は、**図5**、**写真2**に示すような狭い範囲での作業となった。

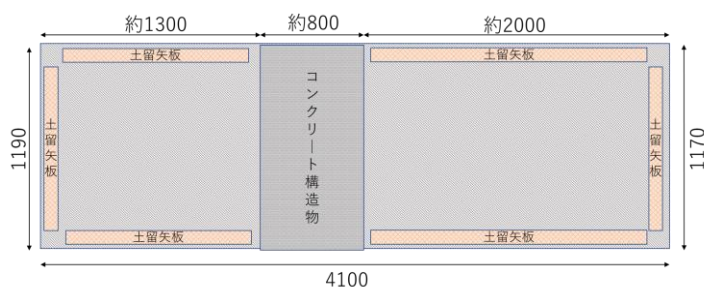


図5 試掘箇所 全体図



写真2 施工箇所 奥側

写真3に示すとおり、作業範囲は限定されたものの、標準の手順どおり機材を組み立て、電極体を深くまで設置した。本工法の強みである「施工環境に制限のある現場」に十分に適応しているといえる。



写真3 施工状況 奥側

施工は、図6に示す出来形のとおり完了した。試掘時に発見したコンクリート構造物や土留め鋼矢板などを避けたため、No.1とNo.2の電極体の設置位置が近くなった。一般的に、電極体同士の距離が近い場合、陽極干渉が起こり、発生電流が小さくなることが知られている。干渉を軽減するため、No.2の電極の設置深さを1mほど高くして差を設けた。

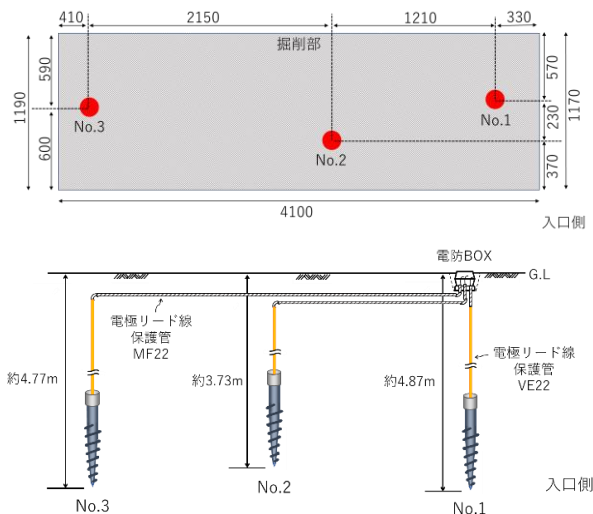


図6 電極体設置出来形図

完工測定の結果を表1,2に示す。測定点は、施工箇所である中圧排流点ガバナおよび中圧ガス導管ラインの遠方点ガバナとした。表1,2に示すとおり、最大10Aの出力電流の調整と、良好な管対地電位への調整が可能であることを確認した。また、設置した3本の電極体の分散電流値も大きな差はなく、同等かつ良好な設置状態であると判断した。

表1 完工測定結果（出力調整）

測定箇所	直流電源装置 出力電流[A]	管対地電位 [mV]	出力 OFF-ON 電位変化量[mV]	備考
中圧 排流点 ガバナ	一次側	-2220(-2230)~2300	-1540	出力調整時
		-1460	-10	
	二次側	-5020(-5180)~5200	-3900	出力最大時
		-1500(-1550)~1600	-120	
中圧 遠方点 ガバナ	一次側	-1440(-1640)~1750	-450	出力調整時
		-1200	0	
	二次側	-2100(-2310)~2420	-1050	出力最大時
		-1210	-10	

※管対地電位は最貴(平均)最卑の表示。数字1種類は変動なしの表示。

表2 完工測定結果（分散電流測定）

測定対象	測定結果	
	出力調整時	出力最大時
電極 No.1	1.26	2.31
電極 No.2	0.90	1.84
電極 No.3	1.08	2.11
旧電極	0.77	3.62
総 合	4.01	9.88

4. おわりに

鋼構造物に電流を供給する電極体としてねじねじ君を用いた Nakaspot 工法の本施工実績により得られた知見を下記に示す。

- ・施工完了後の完工測定の結果、防食対象物は十分な防食状態であった。また、電極体は既設電極体と合わせて最大10Aの出力が可能であった。
- ・電極体を設置するための作業環境が狭い空間でも、作業効率に影響を与えることなく施工できた。本施工では、3本の電極体を1日で設置した。
- ・電極体と連結するロッドの本数によって、電極体の設置深さを容易に変更できることが強みの1つである。電極体が他の電極体と近接する場合には、電極体相互の設置深さに差異を設ける工夫を通して、これら電極体の発生電流の低減（干渉）を抑制できる。
- ・接地抵抗計を用いれば、電極体の設置作業中に於いても、電極体の接地抵抗値を測定できる。そのため各設置深さに応じた接地抵抗値を計測し、適切な接地抵抗値を示す電極体の設置深さを決定できる。具体的には、電極体の接地抵抗値が計画値付近または計画値より低い値を示すよう、電極体を設置できる。また、その接地抵抗値が極端に低い値を示すときは、電極体が鋼構造物と接触している可能性も判断できる。

【謝辞】

本稿を作成するにあたり、大阪ガスネットワーク株式会社総合保安部保全マネジメントチーム防食グ

ループおよび本工事関係会社の方々には、貴重な情報を御提供頂き、さらに本施工時には多大なる御協力を賜りました。

ここに記して心より感謝申し上げます。



いまある“価値”を次代へ!

わたしは、
今日という日を、
リレーしていく。

電気の食で守る、暮らし、社会、未来

株式会社 ナカボーテック

本店：〒104-0033 東京都中央区新川一丁目17番21号 営業本部 03-5541-5813
支店：東京/東北/東関東/名古屋/大阪/中国/九州 営業所：北海道/北陸/四国/南九州/沖縄



千葉港葛南中央地区岸壁（-10m）改良等工事 （供用中の港湾施設における鉄筋コンクリート被覆工事）

東関東支店 酒井 亨

はじめに

当該施設は 15,000DWT 級の貨物船の利用を目的とした昭和 52 年築造の矢板式係船岸（タイ材で連結した組杭の控工）岸壁で、平成元年と平成 2 年に液状化対策を施工し設計供用期間 50 年（2047 年まで）を目標とした施設である。

当該工事では工期内に工事を完了させると同時に、施設の利用を妨げないよう配慮する必要があった。そこで作業機械の配置工夫と潜水士の配置管理により、日々の施工進捗を促進し、予定通りに工事を完了させた。また、この功績として国土交通省関東地方整備局千葉港湾事務所より「優良工事等の千葉港湾事務所長表彰」を受賞した。

1. 工事概要

1.1 工事名：千葉港葛南中央地区岸壁
（-10m）改良等工事

1.2 工事期間

当社担当工種の工事期間は、令和 4 年 5 月 15 日から令和 4 年 9 月 30 日までである。この期間を超えたときは、当社担当外の工種であるエプロン舗装改修工事に支障を来したり、荷役作業に不利益をもたらす可能性がある。



図 1 施工位置図

- 1.3 工事場所：千葉県船橋市潮見町地先
1.4 元請業者：株式会社小島組 東京支店
1.5 当社施工内容：
当社施工内容を表 1 に示す。

表 1 当社施工内容

工種名	数量
電気防食工 3.5A×20 年型	
陽極撤去（心金のみを含む）	142 本
陽極再設置（残存寿命 10 年以上）	46 本
被覆防食工	
鋼管矢板 φ914.4mm	714m ²
ペトロラタム被覆	579m
端部処理	541m ²
既設被覆材（エポキシ樹脂）撤去	
鉄筋コンクリート被覆	
鋼管矢板 φ711.2mm 延長 8.604m	83.5m ²
FRP パネル取付	1,584 本
スタッドジベル設置	622kg
鉄筋（D22）	3,176kg
鉄筋（D16）	44m ³
水中不分離性コンクリート	7.0m ²
妻枠（注 1）被覆	

（注 1）妻枠とは、鉄筋コンクリートの妻側を閉塞する型枠である。

1.6 施工体制

当社施工内容の施工体制を表 2 に示す。

表 2 当社施工内容の施工体制

工種名	協力業者
電気防食工	コハラ工業株式会社
被覆防食工	
鉄筋コンクリート被覆	荒沢工業株式会社



図 2 施工区分

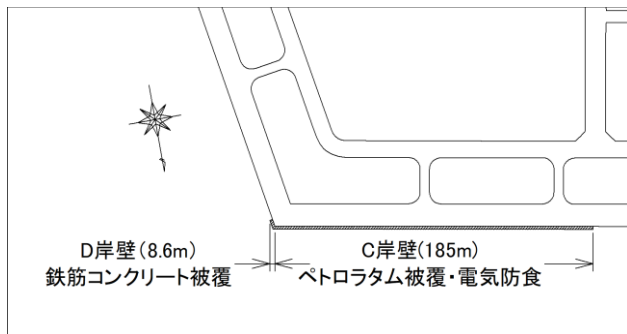


図3 施工平面図

2. 施工内容

2.1 電気防食工（陽極再利用）

C岸壁
水中硬化形被覆撤去・電気防食

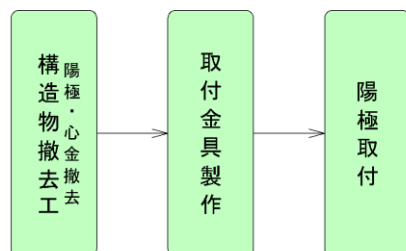


図4 電気防食工施工フロー

電気防食工の対象となるC岸壁には、水深方向上下2段にアルミニウム合金陽極3.5A×20年型が既に取り付けられており、この2段のうち上段の陽極の取付金具を水中アーク溶断により切断して地上へ引き上げた。この引き上げられた陽極の本数は142本であり、142本のうち46本を秤量したところ、残存寿命が10年以上と推定した。この46本は、経済性を踏まえて再利用するため、陽極の取付金具からフランジを除去してウェブを残存させ、このウェブに新規の取付金具を取り付け、これを後述する被覆防食工の下端(A.P. -1.0m)より下方に設置した。また陽極設置後、岸壁の電位を測定し、良好な防食状態であることを確認した。



図5 既存陽極再利用

2.2 被覆防食工（ペトロラタム被覆）

被覆防食工の対象となるC岸壁には、水中硬化

C岸壁
ペトロラタム被覆防食

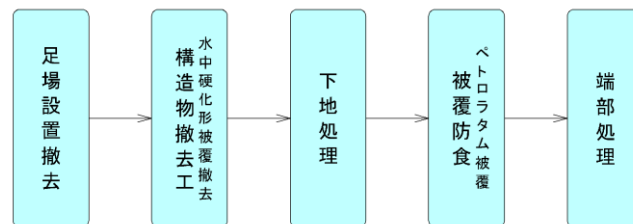


図6 被覆防食工施工フロー



図7 水中硬化形被覆撤去

形被覆が A.P. +1.50mから A.P. -0.40mにわたって施されていたが、この水中硬化形被覆は経年劣化や様々な変状を生じていたので新たな被覆防食を行った。被覆防食としては、経済性、作業性、耐久性、信頼性、実績等の観点からペトロラタム被覆が選定された。ペトロラタム被覆は、ペトロラタム系の防食材を防食層とし、この防食層の外側に繊維強化プラスチック等の保護カバーを被せた防食である。ペトロラタム被覆の施工は、以下の手順で実施した。まず、水中に足場を設置し、水中硬化形被覆および付着海生生物を動力工具等により潜水土が除去して素地調整の程度がISO St2以上となるように素地調整を行った。なおこの動力工具等の振動によって引き起こされる白蟻病（血管性運動神経障害）を潜水土が発症する恐れがあったため、作業時間と休憩を厳守するよう日々の作業管理の徹底を行った。次に、鋼管矢板の継手部に、スタッドボルトを植設した保護カバー取付具を溶接により固定し、鋼材面にペトロラタム系防食ペーストを直接塗布した。このスタッドボルトは、隣り合う保護カバーのフランジどうしを重ね合わせて固定するために使用する。次に、ペースト塗布面に保護カバーを設置した。この保護カバーは、内層のペトロラタム系防食シート、中間層の緩衝材および外層の保護カバーを有し、各層どうしは一体となっている。保護カバーの設置は、具体的には、固定済みのスタッドボルトを保護カバーのフランジのボルト孔に挿通させ、ナットを螺合し、スタッドボルトの先端部にボルトキャップを被せた。また、保護カバーの端部の挿通孔にリベットを挿通させた。この

リベットは、保護カバーにおいて、連結方向の両端部のうち、鋼管本体に対応する側の端部どうしを重ね合わせて固定するために使用する。さらに、鋼材面と保護カバーとの間に隙間が生じやすい部位には、パテ状のペトロラタム系防食材を充填した。加えて、保護カバーにおいて、岸壁の高さ方向の両端部には、水中硬化形エポキシ樹脂を充填してその内部に水や酸素が侵入しないよう措置した。



図8 ペトロラタム被覆完了

2.3 鉄筋コンクリート被覆

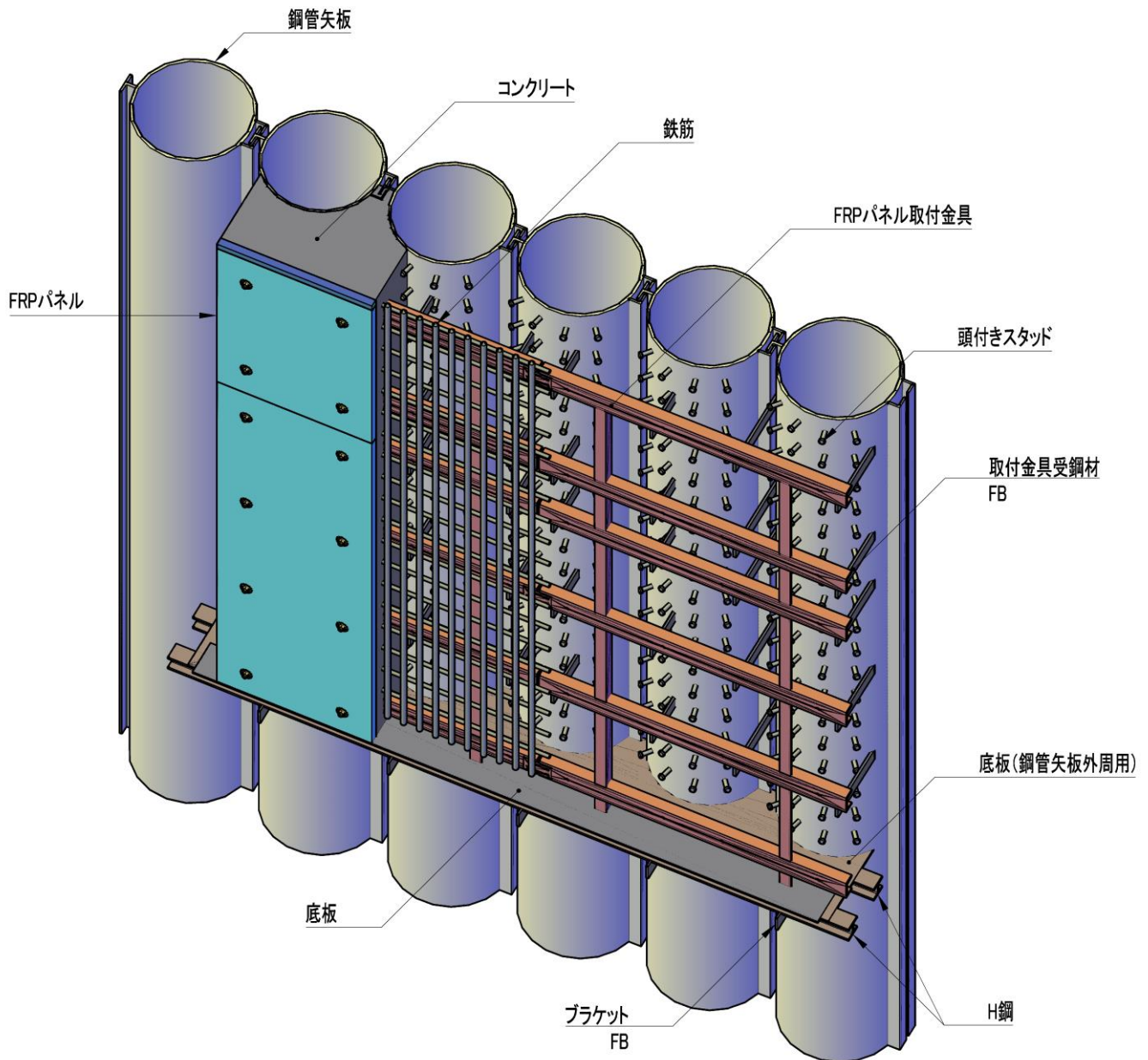


図9 鉄筋コンクリート被覆の構成を示す斜視図

D岸壁
鉄筋コンクリート被覆

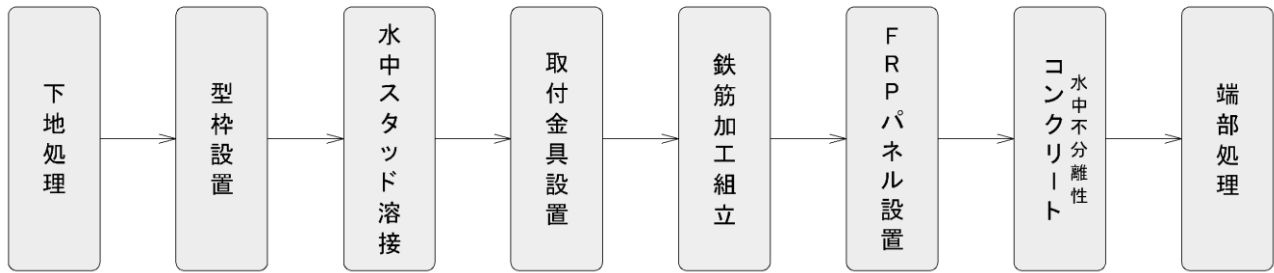


図 10 被覆防食工施工フロー



図 11 H 形鋼



図 12 ブラケット



図 13 底板

2.3.1 下地処理

C 岸壁と D 岸壁との間にまたがる取付部岸壁(図 3 参照)の鋼管矢板に付着した海洋生物を動力工具などで除去し、素地調整の程度が ISO St2 以上となるように素地調整を行った。さらに鉄筋コンク

リート被覆範囲内 (A. P. +0.70m~-9.0m) の既存陽極は撤去し、この範囲より下方に移設した。

2.3.2 型枠設置 (底板)

型枠固定用のブラケットを鋼管矢板の所定の位置に溶接し、その後、ブラケットの上に H 型鋼と底板を順に載せて、ブラケットと H 型鋼、H 型鋼と底板をそれぞれ溶接した。底板は鋼管矢板に対して直交する方向に張り出し、鋼管矢板の外周に合わせた。また、妻枠は後述する FRP パネルを設置した後に配置し、固定した。

2.3.3 水中スタッド溶接

水中スタッド溶接は、アーク溶接を使用して鋼管矢板に頭付スタッドを水中で溶接する方法である。この方法で溶接された頭付スタッドは、鋼管矢板から鉄筋コンクリートへの断面力を確実に伝達する役割を果たす。初めに、水中で頭付スタッドを鋼板に溶接して試験片を製作し、この試験片に対して陸上打撃角度試験や引張試験などを実施し、適正な品質が確保されていることを検証した(図 15 参照)。次に、鋼管矢板に溶接する箇所は、金属光沢を呈するまで研磨し、頭付きスタッドを溶接した。この溶接作業には、溶接個所の水を気体で抜いて空気中の状態にするドライ式スタッド溶接ガンを使用した。品質管理の一環として、溶接部に溶接欠陥がないか目視で検査し、一定の品質を満たしていることを確認した。



図 14 頭付スタッド

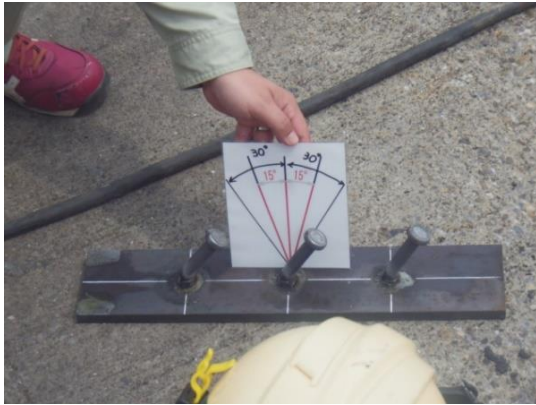


図 15 陸上打撃角度試験



図 16 ドライ式スタッド溶接ガン



図 17 スタッドボルト溶接完了

2. 3. 4 FRP パネル取付金具設置

FRP パネルを設置するための取付金具として、溝形鋼を格子状に地組した。次に、岸壁の所定の位置に受鋼材を溶接し、取付金具をクレーンで吊り下げて受鋼材に仮配置した。最後に、法線の位置や延長、鉛直位置を確認した後、取付金具を受鋼材に溶接した。



図 18 FRP パネル取付金具

2. 3. 5 鉄筋加工組立

異形棒鋼 (D16、D25) を所定の寸法に加工した。使用する異形棒鋼は地組に先立って清掃し、浮き錆びその他鉄筋とコンクリートの付着を害する恐れのあるものは、ワイヤーブラシなどを使用して除去した。清掃した異形棒鋼を補強用鉄筋とするため、格子状に地組し、部材同士を結束線で強固に緊結した。地組した補強用鉄筋をクレーンで吊り下げ、法線の位置や延長、鉛直位置を確認し、コンクリートのかぶりが十分確保できるように配置し、取付金具に固定した。その後、コンクリート打設時の圧力に耐えられるように、堅固に補強し組み立てた。



図 19 鉄筋加工組立完了

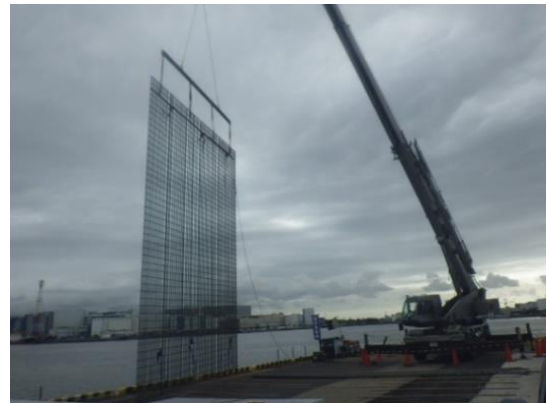


図 20 組立鉄筋吊下げ



図 21 組立鉄筋設置完了



図 22 組立鉄筋かぶり厚さ確認

2.3.6 FRP パネル設置・妻枠設置

本工事では、11 種類（標準 30kg/枚）の FRP パネルを使用した。一部の FRP パネルには、注入口が設けられており、この注入口には、水中不分離性コンクリートを注入する際に使用するシャッター弁が取り付けられている。FRP パネルをクレーンで吊り下げ、所定の位置に誘導した後、取付金具の水平梁鋼材にボルトで固定し、横設した。さらに、岸壁を高さ方向に 4 層に分け、下から順に水中不分離性コンクリート（以下、「生コンクリート」とも言う。）を打ち重ねた（各層高さ 1.5m）。なお、FRP パネルは保護カバーとしての役割を果たすため、コンクリートの打設後に取り外す必要はない。最後に妻枠を水中溶接で固定した。



図 23 FRP パネル注入口(シャッター弁付)



図 24 注入口閉塞パネル



図 25 FRP パネル吊下げ



図 26 FRP パネル設置完了

2.3.7 水中不分離性コンクリート

生コンクリートについては、配合試験を実施し、その品質が監督職員によって承認された。また打設前には試験練りを行い、圧縮強度試験を通して測定値が設計値に達していることを確認した。この試験結果も監督職員の承認を得ている。

打設は、ピストン式ポンプ車を使用し、このピストン式ポンプ車に設けた打設管を FRP パネルに取り付けた注入口に接続して生コンクリートを圧送した。また打設管の途中にシャッター弁を設けた。これによって、注入口を順次移動させながら圧送し、移動時の生コンクリート分離を防ぐことができた。

注入口は、生コンクリートの水中落下高さ 50 cm 以下および水平流動距離 5m 以下となるように注入状況に合わせて変え、1 層の打設に当たり 15 個

所の注入口を使用した。

打設時は、FRP パネルの動揺、打音試験などによって生コンクリートの位置および外部の遮蔽状態を確認した。



図 27 生コンクリート工場の配合量確認



図 28 打設前の監督職員による立会検査



図 29 生コンクリート打設



図 30 シャッター弁設置



図 31 生コンクリート受入検査

2.3.8 端部処理

FRP パネル上端部と上部工との間で生じた隙間は、水中硬化形エポキシ樹脂で充填した。さらに、妻枠外表面も水中硬化形エポキシ樹脂で被覆した。



図 32 妻枠樹脂被覆完了

3. 施工まとめ

本工事は、着工が 1 ヶ月遅れ、かつ完了日を遵守しなければならない厳しい工程であったが、予定された工期内に何とか順調に完了した。

本施工現場で実際に生じた特有の課題とその対応方法を表 3 に示す。

表 3 課題とその対応方法

	課題	対応方法
1	(工期圧縮) 1 ヶ月の着工遅れにより工期が短縮した。 工事が完了した直後に、第三者による水中検査を実施した。(工事完了日と検査日が同一となった。)	工事を円滑に進めるために、適切な潜水士を配置し、岸壁利用者や陸上作業関係者との打ち合わせを日常的に行った。

	課題	対応方法
2	(生コンクリート (注2) の調達) 型枠となる FRP パネルの耐荷重を考慮して生コンクリートを4回に分けて打設した結果、打設工程が長期化し、生コンクリートの手配が困難になった。	生コンクリートのある商社に注文したが、お盆明け以後の希望日の注文は断られたため、コンクリートポンプ車会社や生コンクリート工場に直接交渉して手配した。
3	(水中不分離性コンクリートの高粘性がもたらす課題 (その1)) 水中不分離性生コンクリートは、普通生コンクリートと比較して粘性が高く、生コン車のアジテータ内やポンプ車の圧送管内部に残留しやすい。そのため注文量に対し毎回約1.0m³以上のロスが発生する。	生コンクリートの実際の打設量と注文量の差を潜水土による調査を行った。 調査結果を参考にし、毎回の注文量を決定し、材料ロスを最小限に抑えるよう心を配った。
4	(水中不分離性コンクリートの高粘性がもたらす課題 (その2)) 生コンクリートを圧送するとき、管内部が高压となる。また、配管内部と生コンクリートとの管内摩擦が増加するため、長距離圧送が困難である。 (具体例) 1. 生コンクリートは、スランプ試験方法の規定値内 (流動化しやすい数値) を用いたが、途中で打設できなくなる (打設管内を流れなくなる)。 2. 生コンクリートを打設しているとき、FRP パネルにボルトで取り付けたコンクリート注入口が FRP パネルから脱落する。	1. 打設が難しいときに、打設管を回収し分解したところ、鉛直距離の長い鉛直部の内部に、水中不分離性混和剤を含むモルタル分が抜けた骨材のみが詰まり、この骨材を除去した。そこで出来る限り鉛直部を短くし打設管内に生コンクリートを充填させて打設する。 2. コンクリート注入口と鉄筋との隙間や FRP パネルと鉄筋との隙間に生コンクリートの粗骨材が滞留して隙間を閉塞させる恐れがあるため、生コンクリート注入口周囲における配筋ピッチ及びかぶり厚さを規定範囲内で少し広げることで、隙間に加わる圧力を減らし、粗骨材の滞留を減らす様に配慮する。

(注2) 生コンクリートは、添加される水中不分離混和剤 (増粘剤) によって水の洗い作用に耐える設計となっているため、製造後のロット替え洗浄に多量の水を使用しなければならない、それだけ製造ロスが生じてしまうので、コンクリートポンプ車会社または生コンクリート工場に注文を断られる場合が多いと言われている。

4. あとがき

当社の施工管理の経験が少ない鉄筋コンクリート被覆および当社の主要となる電気防食工と被覆防食工について、これらの使用材料を手配して協力業者2社を監督するとともに手戻りがないうような日々の打合せと調整をすることは大変苦慮した。いろいろと問題の起きた現場であったが、無事故、無災害で工期末日までに施工完了できた点は大いに誇りに思う。

5. 謝辞

本工事を遂行するにあたり、国土交通省千葉港湾事務所、株式会社小島組、荒沢工業株式会社、株式会社ダイトー、スミセ建材株式会社、コハラ工業株式会社および株式会社椎津工業の方々をはじめとする工事関係者各位には多大なるご協力を賜りました。ここに記して心より感謝申し上げます。

1. はじめに

構造物に電気防食を適用する場合、防食電流の均一な分配を考慮した設計が行われる。その過程において、塗装との併用は、形状の複雑な構造物や高抵抗環境下の構造物に対しては必須技術である。一方で塗装との併用においては、塗膜劣化を促進するような過度の通電を避けることが指摘されている。

本稿では、塗膜劣化のメカニズムを整理し、それを防止するために設定されている下限電位の電気化学的意味付け、塗装仕様の観点から、過防食防止に対する下地ジンクリッチペイント（ZRP）の効果について考察した。

2. 過防食時における塗膜劣化メカニズム

塗膜が適切な選択および仕様を満たしていない場合、または過剰な防食電流を供給しているような場合、塗膜下では図1に示すような電気化学反応および化学反応が進行し以下に示すようなトラブルが生ずる恐れがある。

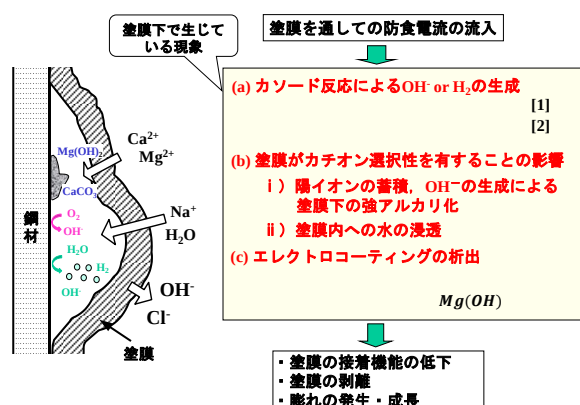


図1 電気防食による塗膜劣化促進メカニズム

塗装系にカソード電流を供給すると、塗膜は通常カチオン選択性を示す¹⁾ため、防食電流は主として「①カチオンの塗膜内への移動」によって供給される。この時、同時に「②電気浸透作用により鋼材表面には水分も供給される」。鋼材界面では、防食電流による「③カソード反応によってOH⁻またはH₂が生成される」が、OH⁻は塗膜のイオン選択性の

影響で塗膜外には移動しにくい状況下にあるため、結果として「④鋼材界面ではpHが上昇する（アルカリ化する）」という現象が生ずる。

②の現象は、水分の増加による塗膜膨れを生ずる可能性がある。また、①と④の相互作用により、鋼材界面にエレクトロコーティングが生成し、鋼材・塗膜間の層間剥離に繋がる可能性がある。③のH₂ガスの発生は、ガス圧上昇による塗膜膨れを生ずる恐れがある。また、これらの現象を助長する作用として、④の現象は有機系塗膜の劣化を促進し、鋼材との付着力を低下させる。

3. 電気防食を適用した場合の下限電位について

塗装系に電気防食を適用する場合、塗膜劣化要因となるH₂およびOH⁻の生成抑制の観点から種々の規格²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾で防食対象物の電位が、一定の電位（下限電位）以下にならないように運用することが明記されている。その一部を表1（左側列）に示す。なお、一部についてはオリジナル値を各種照合電極基準（25℃）に換算した値を斜字にても併記した。〔 〕内数値は、当該文献で最適と推奨している電位である。

過防食による弊害は、主として図1の[2]式に示す電気化学反応によるH₂、OH⁻の生成に起因すると考えられる。一定のカソード電位 E_c （ E_c は[2]式反応の平衡電位 $E_{H_2}^0$ より卑電位）で電気防食を適用している場合、防食対象物界面のpHは[2]式の反応により上昇するが、同時に下記[3]式より求まる $E_{H_2}^0$ はpHの上昇とともに低下する。 $E_{H_2}^0$ が適用しているカソード電位 E_c に到達した時点で水素ガスの発生とpH上昇は止まる。

$$E_{H_2}^0 \text{ (mV, SHE)} = -59.1 \cdot \text{pH} \quad [3]$$

$$\langle E_{H_2}^0 \text{ (mV, SSE)} = -196 - 59.1 \cdot \text{pH} \rangle$$

従って、表1に示す電気防食適用時の下限電位は、環境中に緩衝能がない場合、下限電位が示す[3]式のpHがその系における最大pH（pH_{max}と記す）に

表 1 各種規格における下限電位とその電位における水素発生平衡電位の pH

規格および文献	下限電位 / mV				下限電位における水素発生平衡電位の pH			
	SCE	SSE	Ag/AgCl/s.w.	CSE	SCE	SSE	Ag/AgCl/s.w.	CSE
河川・ダム施設防食ガイドライン(案)	-1050	-1005			13.7	13.7		
港湾構造物防食・補修マニュアル			-1100				14.4	
ISO_13174_2012 Cathodic protection of harbour installations			-1100				14.4	
ISO15589-1 Cp Oil pipeline onland				-1200				15.0
Corrosion Prevention by Protective Coatings Third Edition ,NACE (2014).	-926 [-776]	-880 [-730]	-934 [-784]	-1000 [-850]				11.6 [9.0]

なると考えられることから、その pH に対する塗膜の耐アルカリ性という観点でも下限電位の妥当性を評価できると思われる。表 1 (左側列) に示す下限電位に対する[3]式の pH を表 1 (右側列) に示した。Charles らが 5 段目の成書⁶⁾で示した下限電位 -1000mV,CSE は、最大 pH が 11.6 である。この値は、鋼構造物用耐候性塗料の耐アルカリ性を評価する試験液 (飽和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 水溶液 : pH 12.4)⁷⁾ の pH より小さいことから、電気防食との併用条件下でも塗料に対して耐アルカリ性を問題視する環境にはならないということになり、下限値として妥当な値であると言える。

一方、他の下限値に対しては、最大 pH が 13 以上となることから、特別なアルカリ対策を施した塗装系に限定して適用すべきと思われる。実際、表中に示した日本の規格中には、適用すべき塗装系が明記されている。その一部を表 2 に示す。具体的対策として適用されていると思われるのは下地に ZRP の適用である。この他にも塗膜の物理的強度を高めた 1000 μm 以上の高膜厚系塗装の適用が考えられる。中でも、下地に対する ZRP の適用は、 H_2 ガス発生と耐アルカリ性に対してどのような影響を及ぼすのかが興味深い。この点について、次章で考察することにする。

4. 過防食に対する下地 ZRP 適用の効果

塗装と電気防食の併用系では ZRP の適用を避ける規格⁸⁾⁹⁾も認められるが、良好な効果を示す文献も多い¹⁰⁾¹¹⁾。利点として以下に示す 3 項目が考えられ、筆者は有効な対応と考えている。

(1) ZRP 表面での H_2 発生の抑制

Zn が被防食体 (鋼材) 表面の多くを覆った場合、[2]式の主たる反応サイトは Zn 表面になる。Zn は

表 2 日本における水中鋼材に対する塗装仕様 (一部抜粋)

(a) 港湾構造物防食・補修マニュアル

塗装系	工程	塗料名	標準膜厚 (μm)
ジnkリッチペイント + エポキシ樹脂系	防食下地	厚膜形 有機ジnkリッチペイント	75
	防食樹脂塗料	厚膜形エポキシ樹脂塗料 (1~2回塗装)	480
	合計		555

(b) 河川・ダム施設防食ガイドライン(案)-電気防食編-

塗装系	工程	塗料名	標準膜厚 (μm)
ジnkリッチペイント + エポキシ樹脂系	一次プライマー	無機ジnkリッチプライマー	15
	第一層目 (下塗)	無機ジnkリッチペイント	75
	ミストコート	ミストコート	—
	第二層目 (下塗)	エポキシ樹脂塗料下塗 (水中部用)	100
	第三層目 (下塗)	エポキシ樹脂塗料下塗 (水中部用)	60
	第四層目 (中塗)	エポキシ樹脂塗料中塗	40
	第五層目 (上塗)	エポキシ樹脂塗料上塗	40
	合計		315
ガラスフレーク塗料系 (ビニルエステル樹脂系)	一次プライマー	無機ジnkリッチプライマー	15
	第一層目 (下塗)	ガラスフレーク含有塗料 (下塗)	*
	第二層目 (中塗)	ガラスフレーク含有塗料 (ビニルエステル樹脂系)	300
	第三層目 (上塗)	ガラスフレーク含有塗料 (ビニルエステル樹脂系)	300
	合計		600
ガラスフレーク塗料系 (エポキシ樹脂系)	一次プライマー	無機ジnkリッチプライマー	15
	第一層目 (下塗)	有機ジnkリッチプライマー	15
	第二層目 (中塗)	ガラスフレーク含有塗料 (エポキシ樹脂系)	200
	第三層目 (中塗)	ガラスフレーク含有塗料 (エポキシ樹脂系)	200
	第四層目 (上塗)	ガラスフレーク含有塗料 (エポキシ樹脂系)	200
	合計		615

*: 膜厚はメーカー推奨値

水素過電圧が大きいと、水素発生量を抑制する。水素発生平衡電位が過電圧分卑化すると考え、表 1 (右側列) に示した最大 pH を評価すると図 2 のような結果が得られる。比較として、先に ZRP を適用しない条件下での下限電位として考察した -1000mV,CSE における pH_{max} も併記した。

ここで、Zn 過電圧は、鋼材と Zn 表面における水

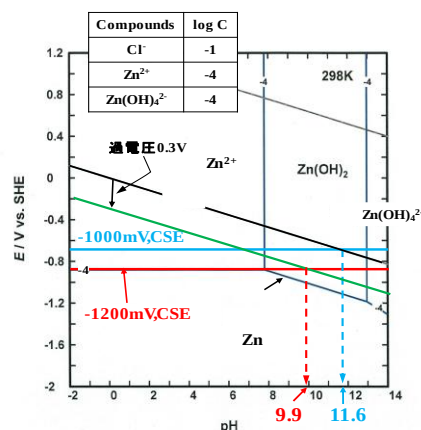


図 2 ZRP を施し，-1200mV,CSE の防食条件下における塗膜下の pH_{max}

素発生電位を比較した参考資料 6) より両者の差に相当する 0.3V とした．表 1 で示した下限電位の中で最も卑電位である-1200mV,CSE で運用しても Zn 表面の pH は最大 10 までしか上昇しないことから ZRP の下地処理は電気防食との併用においては重要であることが分かる．

(2) Zn 腐食生成物によるカソード反応の抑制

一例として，Li Zhang らの実験結果¹⁰⁾を紹介する．

Li Zhang らは，エポキシ単独塗料と ZRP 含有エポキシ塗料に対して，表 3 に示す実験条件下で -0.9V,SCE の定電位電解を行い，それぞれの塗膜イオン透過抵抗や維持電流密度経時変化などを調べている．図 3，図 4 にそれぞれ塗膜イオン透過抵抗 R_c および維持電流密度 J の経時変化データを示す．

表 3 実験条件

Sample	Coating	Thickness / μm	Experimental condition
A	Epoxy coating	60 ± 5	Without CP
B	Epoxy coating	60 ± 5	CP
C	ZRP	120 ± 5	Without CP
D	ZRP	120 ± 5	CP

- ・炭素鋼：形状 (150×70×2mm) ・ZRP：Zn80wt% 含有エポキシ塗料
- ・通電条件：定電位電解 (-0.9V,SCE) in 3.5% NaCl sol. (pH=7)
- ・試験期間：エポキシ (30日)，ZRP (47日)

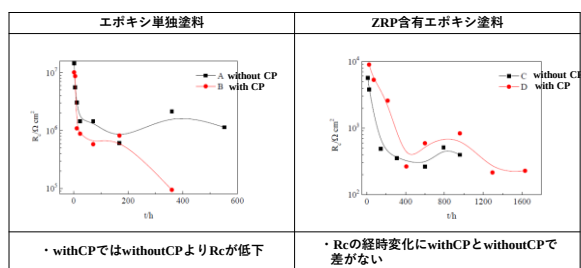


図 3 ZRP の有無が塗膜のイオン透過抵抗 R_c 経時変化に及ぼす影響

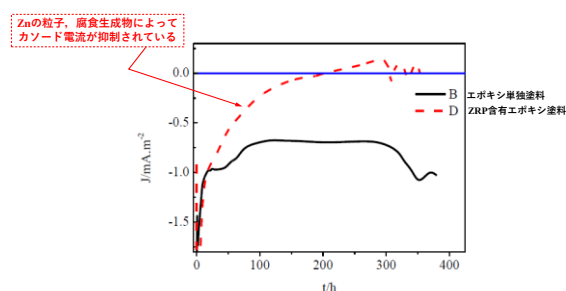


図 4 ZRP の有無が定電位維持電流密度 J の経時変化に及ぼす影響

図 3 から，ZRP 含有エポキシ塗料では， R_c の経時的低下がエポキシ単独塗料に比べて小さいこと，図 4 から，ZRP 含有エポキシ塗料は， J の低減がエポキシ単独塗料に比べて大きいことがわかる．こうした挙動について，当該文献では試験前後の試料表面の FT-IR 分析データをもとに，エポキシ単独塗料ではエポキシの加水分解が進行しているのに対し，ZRP 含有エポキシ塗料ではそのような挙動は認められないだけでなく，Zn の腐食生成物の存在が確認され，これが酸化剤の拡散障壁として機能しているとして，ZRP の有益を強調している．このことは，電気防食適用上の電位が，Zn に対しては腐食域の電位であることの重要性を指摘している．図 2 に示した Zn の電位-pH 図において，最卑値下限電位である-1200mV,CSE は，pH8 以上では E_{Zn}^0 (Zn/Zn(OH)₂ 平衡電位) より貴電位で，明らかに腐食域にある．従って，表 1 に示す管理電位下で運用されている電気防食条件下であれば，ZRP の腐食生成物によって供与される塗膜劣化軽減効果は期待できると考えてよいであろう．

(3) Zn 腐食生成物の緩衝能による pH 上昇の抑制

海水環境下に存在する Zn 腐食生成物の緩衝能を確認する目的で以下の実験を行った．

海水 100mL に ZnCl_2 を 0.2 モル濃度添加し，NaOH で pH を 7～8 に調整した水溶液 (Zn(OH)_2 とと思われる沈殿物で白濁している) を亜鉛腐食生成物が存在する海水とした．一方，Zn 腐食生成物が存在しない試験液として通常海水を用い，それぞれの試験液に対して，1M NaOH でアルカリ方向への滴定曲線測定を行った．

測定結果を図 5 に，測定水溶液中の主要イオン (Zn^{2+} ， Ca^{2+} ， Mg^{2+}) に対するイオン平衡図を図 6

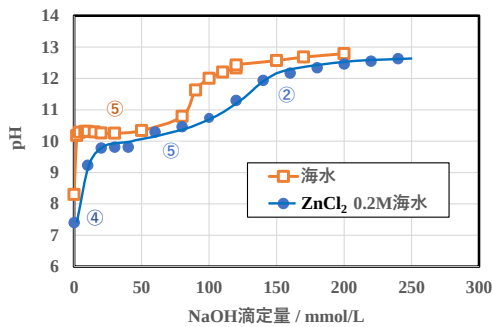


図 5 ZnCl₂ 添加による海水滴定曲線の変化

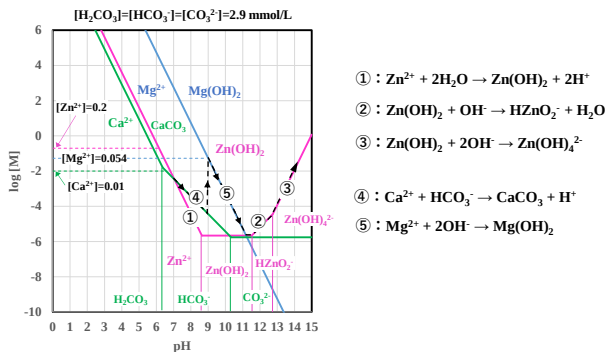


図 6 ZnCl₂ を添加した海水のイオン平衡図

に示した．図中の縦軸に破線で示した各イオンの濃度は初期濃度である．

図 5 に示すように，通常海水では pH10 近傍に⑤式の反応による pH 緩衝作用が確認できる．一方，ZnCl₂ 添加海水の場合は，アルカリ側において②式の反応による pH 緩衝作用が加わるため，系全体の緩衝能が増加（滴定曲線が右側に移行）している．このことを，図 6 のイオン平衡図で考察すると，アルカリの添加と共に，破線（黒点が始点）の矢印で示すように pH 支配のイオン平衡系が変化していったためと考えられる．

Zn の酸化物（腐食生成物）は，水溶液のアルカリ化に対しては，イオンの状態では①式，Zn(OH)₂ では②，③式の反応により pH 上昇を抑制する効果があると言える．

5. おわりに

塗装と電気防食の併用系では，塗膜の物理的強度および接着力を向上させた膜厚 1000μm 以上の高膜厚塗装系も増加しているが，それ以下の塗装系の場合は，下地に ZRP を適用する塗装仕様が陰極剥離防止に非常に有益であることを本論文中で考察し

た．この点において，表 2 に示した日本の塗装仕様は理にかなった仕様と言える．

一方，論文中に示した Zn の防食作用を有効に機能させるためには，Zn 粒子の多くが鋼材表面を覆い，鋼材および粒子間の電氣的導通の確保が重要である．佐々木ら¹²⁾は，粗粒亜鉛末を併用した ZRP は耐陰極剥離性を向上することを報告している．ZRP の適正仕様についても明文化が必要かもしれない．

塗装系と電気防食の併用においては，耐アルカリ性試験をパスした塗料を適用し，下地に ZRP を適用しない場合は，下限電位 -1V,CSE (-934mV, Ag/AgCl/s.w.) を管理値とし，ZRP 適用の場合は，表 1 で示した現行の下限電位で運用して問題はないと考える．

〔 参考資料 〕

- 1) 藤田 清水：'83 春季学術講演大会 B-203 (1983).
- 2) 土木研究所：河川・ダム施設防食ガイドライン（案）-電気防食編- (2006).
- 3) 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 (2022).
- 4) ISO_13174_2012, Cathodic protection of harbour installations (2012).
- 5) ISO15589-1, Cp Oil pipeline onland (2015).
- 6) Charles G. Munger , Louis D. Vincent, Ph.D. : Corrosion Prevention by Protective Coatings , Third Edition ,NACE (2014).
- 7) JIS K5659, 7.15 耐アルカリ性 (2018).
- 8) DNV-RP-B401, CATHODIC PROTECTION DESIGN (2010).
- 9) ISO 12944-9, Protective paint systems and laboratory performance test methods for offshore and related structures (2018).
- 10) Li Zhang , Xiangyu Lu , Yu Zuo : J. Electrochem. Sci., 9 , 6266 - 6280 (2014).
- 11) M.Echeverrfa, C.M.Abreu, K.Lau, and C.A. Echeverrfa : Corrosion, 71,11 (2015).
- 12) 佐々木 徹，野村繚一，奥山正之，星野 稔：防錆管理，35，4 (1991).

対外発表リスト（2023-24）

年度	タイトル	文献
2023	海水中の溶存酸素濃度と流電陽極方式の設計電流密度の関係について	腐食防食学会 材料と環境2023
	海洋環境に暴露した鉛直方向に長い鋼材試験体の腐食速度分布	腐食防食学会 材料と環境2023
	電気化学測定によるステンレス鋼の局部腐食性評価	日本防錆技術協会 第43回防錆防食技術発表大会
	白金めっき電極の劣化挙動の解明	日本防錆技術協会 第43回防錆防食技術発表大会
	港湾構造物に適用する電気防食工法におけるLCC低減を考慮した合理的な設計手法の提案	日本防錆技術協会 第43回防錆防食技術発表大会
	海水練りコンクリート中の鉄筋への外部電源方式電気防食の適用に関する研究－材齢4年までの経過報告－	日本防錆技術協会 第43回防錆防食技術発表大会
	下部工鋼材に電気防食を適用したときの上部工コンクリート中铁筋の復極挙動に関する実験的検討	日本防錆技術協会 第43回防錆防食技術発表大会
	下部工鋼材に適用した電気防食の防食電流が上部工コンクリート中铁筋に及ぼす影響	日本コンクリート工学会 コンクリート工学年次大会2023
	Experimental study on corrosion characteristics of steel bars in concrete located in tidal zone.	EFC EUROCORR2023
	加工誘起マルテンサイト相を導入したオーステナイト系ステンレス鋼の電気化学挙動	表面技術協会 第148回講演大会
	ステンレス鋼の局部腐食発生に及ぼす応力の影響	表面技術協会 第148回講演大会
	鉄鋼材料における亜鉛含有塗膜の腐食挙動解析	表面技術協会 第148回講演大会
	白金めっきチタンの電極特性	表面技術協会 第148回講演大会
	大気腐食環境における鉄鋼材料表面の電位測定	表面技術協会 第148回講演大会
	PC定着部における電気化学的補修工法の適用に関する検討	土木学会 第78回年次学術講演会
	港湾鋼構造物への新しい被覆防食材の開発	土木学会 第78回年次学術講演会
	電気防食を施工した橋りょうにおける陽極チタン溶射皮膜の剥離に関する調査	土木学会 第78回年次学術講演会
	シラン系表面含浸材塗布後のコンクリートに対する流電陽極方式の電気防食の適用方法	土木学会 第78回年次学術講演会
	30年超海洋環境下に暴露されたPCはり試験体の劣化性状について	日本材料学会 コンクリート工事用樹脂部門委員会 第23回コンクリート構造物の補修、補強、アップグレードシンポジウム
	塩害により腐食ひび割れが生じた鉄筋コンクリートに適用する電気防食工法の前処理方法に関する検討	日本材料学会 コンクリート工事用樹脂部門委員会 第23回コンクリート構造物の補修、補強、アップグレードシンポジウム
	結露と乾燥との繰返しが生じる鋼材の腐食速度の研究	日本材料学会 コンクリート工事用樹脂部門委員会 第23回コンクリート構造物の補修、補強、アップグレードシンポジウム
	高流動淡水中における既設鋼製水路への電気防食の長期適用結果	日本水道協会 全国会議
	高波浪海域に建設された鋼構造物における電気防食特性と波浪観測情報の比較	腐食防食学会 第70回材料と環境討論会

対外発表リスト（2023-24）

年度	タイトル	文献
2024	直流電源装置の通電方式が電気防食効果に及ぼす影響	日本材料学会 第73期学術講演会
	水掛かりを受けるRC構造物の腐食調査に基づくコンクリート中の鉄筋腐食に及ぼす乾湿繰り返しの影響に関する考察	日本コンクリート工学会 コンクリート工学年次大会2024
	種々の現場測定から見出された非破壊分極抵抗法の注意点と課題	日本コンクリート工学会 コンクリート工学年次大会2024
	塩害範囲を限定した実大模擬試験体における電気化学計測と解体調査に基づく鋼材腐食の評価	日本コンクリート工学会 コンクリート工学年次大会2024
	海水練りコンクリートへの材齢初期からの電気防食の適用による防食効果	日本防錆技術協会 第44回防錆防食技術発表大会
	海水練りコンクリート中铁筋への太陽光発電を用いた電気防食の適用に関する研究	日本防錆技術協会 第44回防錆防食技術発表大会
	過去に断面修復した高架橋への線状流電陽極による電気防食工法の適用	土木学会 第79回年次学術講演会
	亜鉛めっき表面の腐食挙動解析	表面技術協会 第150回講演大会
	白金めっきチタン電極の電気化学挙動解析	表面技術協会 第150回講演大会
	加工誘起マルテンサイト相を導入したSUS304鋼の局部腐食挙動	表面技術協会 第150回講演大会
	ステンレス鋼の局部腐食発生における溶液環境と応力の効果	表面技術協会 第150回講演大会
	二電極式ステンレス鋼電極による腐食モニタリング	表面技術協会 第150回講演大会
	ステンレス鋼の大気腐食過程における表面pH変化	表面技術協会 第150回講演大会
	ジンクリッチペイントによる鋼材の防食	表面技術協会 第150回講演大会
	RC造建築物の鉄筋腐食に及ぼすひび割れおよび降雨の影響に関する検討	日本材料学会 コンクリート工事用樹脂部門委員会 第24回コンクリート構造物の補修、補強、アップグレードシンポジウム

トピックス 1

本記事は、弊社のホームページのトピックス、2024 年 10 月 21 日に掲載しております。

「みなとSDGs登録パートナー制度」について

このたび、当社は「みなとSDGsパートナー」として登録されましたので、お知らせいたします。

「みなとSDGsパートナー登録制度」とは、「みなと」をフィールドとして事業を展開する企業等を対象として、SDGs達成に向けた取り組みの更なる推進を図ることにより、港湾関連産業の魅力向上・将来にわたる持続的な発展への貢献を目的として国土交通省により創設されたものです。

ナカボーテックは、今後とも防食事業活動と能動的なESGへの取り組みを通じ、持続可能な社会の実現に貢献してまいります。



[みなとSDGsパートナー登録制度について🔗](#)

[みなとSDGs達成にむけた具体的な取組🔗](#)



トピックス 2

本記事は、弊社のホームページのトピックス、2023年9月1日に掲載しております。

現場での防食材料購入の利便性を飛躍的に高めます ～法人向け Web 販売『 ナカポーテック Official Store』の開始～

株式会社ナカポーテック（本社：東京都中央区、代表取締役社長：木村 浩、以下「当社」）は、法人向けの EC サイト「ナカポーテック Official Store」を開設し、このたび販売を開始いたしました。

本サイトにおきましては、鋼材の腐食を抑制する犠牲陽極作用を有した亜鉛防食材料「ZAP シリーズ」※1 を販売いたします。当該製品の需要の拡がりを受け、本サイトを通じて多様な法人顧客に対し購入の利便性を高め、施設や設備の管理や建設工事などの現場をサポートしてまいります。

◆亜鉛防食材料への需要と期待

亜鉛防食材料は、国内のインフラ整備においてその利用が広く普及しており、各種施設に対し官公庁をはじめとする管理者から、設置・施工を行う企業に至るまで幅広い層に需要があります。こうした需要の背景には、亜鉛防食材料が、鋼製支柱の地際部※2

（用途例画像 1・2）、鋼管の溶接部（同画像 3）、各種機器の脚部（同画像 4）、鋼製架台やサポートの隙間（同画像 5）など様々な用途が考えられ、従来の塗装や亜鉛めっきでは長寿命が期待できなかった部位において有効に活用できる製品であることが大きく影響しています。主な事例では、高速道路の防護柵支柱の地際部において多数の実績があり、近年発生している腐食に起因した支柱等の倒壊事故への予防保全に対して効果的な材料であると期待されています。

【用途例】



画像 1



画像 2



画像 3



画像 4



画像 5

◆購入手続きの簡易化

迅速且つ効率的な製品の提供を図るため、本サイト開設により Web 上で亜鉛防食材料の販売取引を可能にいたしました。施工現場からも注文手続きを行っていただける等、購入手続きの簡易化、利便性の飛躍的な向上を目指してまいります。

◆今後のラインアップ拡充

今後は本サイトを通じて、当社の適用事例を広く紹介する予定であり、将来的には電気防食用アルミニウム合金陽極など商品のラインナップを拡充し、防食事業を通じて社会インフラの延命化と持続可能な社会の実現に一層貢献できるよう取り組んでまいります。

◆ナカボーテック法人向け EC サイト 概要

1. ショップ名称：「ナカボーテック Official Store」
2. U R L： <https://nakabohtec-officialstore.jp>
3. 販 売 製 品：亜鉛防食材料「ZAP シリーズ」(NETIS 登録番号 KT-180033-A)
 - (1) 貼る防食材「ZAP テープ」「ZAP シール」
 - (2) 塗る防食材「ZAP ペースト」
 - (3) 敷く防食材「ZAP シート」
4. 決 済 方 法：クレジットカード、コンビニ、代引き
5. 運 用 方 法：会員登録制（法人向け）
6. サイト 内 容：以下の QR コードからご覧ください

ナカボーテック Official Store

ZAPシリーズ

"Zinc Anode for Protection" Series

亜鉛による厚膜を実現し、犠牲防食作用と被覆防食性を合わせた防食剤

オンラインショップへ



ZAPテープ 亜鉛防食厚膜 (10)
ZAPペースト 亜鉛防食厚膜
ZAPシール 亜鉛防食厚膜 (10)
ZAPシート 亜鉛防食厚膜

※1. 「ZAP」は三井金属鉱業株式会社の登録商標（第4980705号）。

※2. 地際部…（じぎわぶ）設備の接地部分

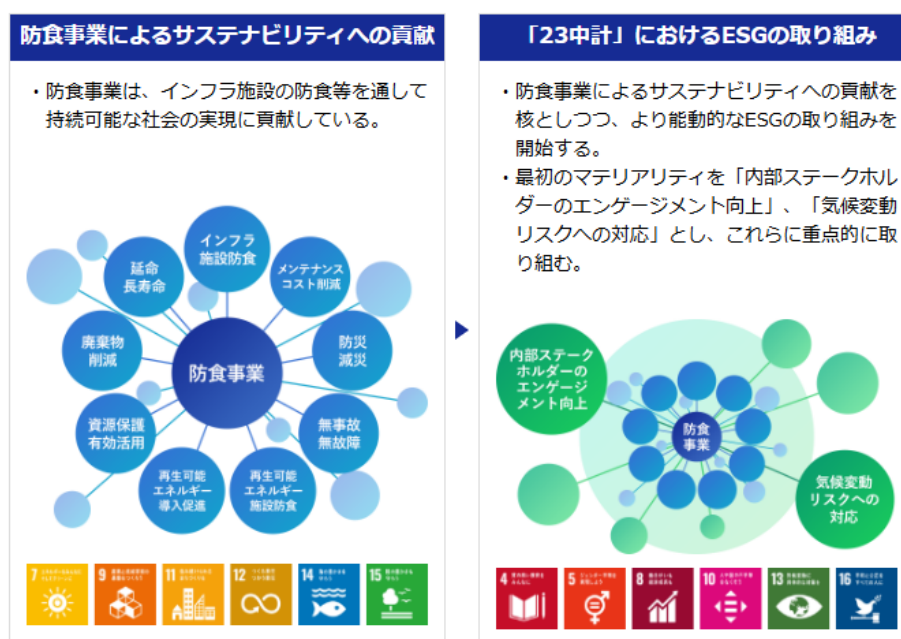
【本件に対するお問い合わせ】 営業統括部 : 03-5541-5813
総務部 : 03-5541-5801

サステナブルな社会に向けた ESG の取り組み

当社が営む防食事業は、社会基盤の維持延命・長寿命化に無くてはならない仕事であり、施設や設備の資産価値を護り、人々の安全安心な日常を守りつづけています。経済・生活・環境といった貴重な日常の”価値”を次の世代へと残し繋げていくこと、それが社会に対して当社が提供する価値であり当社の存在意義であると考えます。

その中で、防食事業そのものによるサステナビリティへの貢献のみならず、「23 中計」始動とともに ESG の取り組みを本格的に開始しました。

マテリアリティを「内部ステークホルダーのエンゲージメント向上」、「気候変動リスクへの対応」とし、これらに重点的に取り組んでいます。



編集後記

NAKABOH REPORT No.55 をお読みいただきありがとうございます。

本誌は、コンクリート中鉄筋の新電気防食設計、ねじ込み式電極体を設置する電気防食施工法、千葉港葛南中央地区の鉄筋コンクリート被覆工事および塗装系と電気防食の併用に対する考察を詳しく説明しております。巻頭言執筆の木村社長を筆頭に各執筆者は、ひたむきに防食技術を追求する熱き思いを持ち、著しい功績を挙げられている方々です。私自身も本誌の編集活動を通して執筆者から大きなパワーをもらいました。本誌が皆様のお役に立てると嬉しいです。

結びではございますが、私どもは、これからも、長年の実績に基づいて皆様から頂いた信頼を大切に、情熱をもってひたむきに防食事業に取り組んでいきます。引き続きご支援をよろしくお願い申し上げます。



ぼくは、
今日という日を、
リレーしていく。

私たちの仕事は、人と社会の何気ない日常を守ることにある。
昨日と変わらない今日、今日と変わらない明日。
その絶え間のないくり返しの中に、私たちの力が息づいている。

いま、世界がサステナブルな社会に向かう中、

「ひたむきに防食技術を追求し、
社会基盤の価値をまもり続けることにより、
安心安全な日常を次代につなげます」

未来に向かって掲げた企業としての存在意義こそがこれからの指針。

先進の防食技術で社会基盤の長寿命化を進めていけば、
豊かな資源や環境を次の世代へと受け渡すことができる。
昨日と変わる今日、今日を進めた明日。
絶え間のないくり返しの中でこそ、私たちは日々新化していこう。

大船支店 技術一課
太田 優輔



いまある“価値”を次代へ!



株式会社 ナカボーテック



株式会社 **ナカボーテック**
NAKABOHTEC CORROSION PROTECTING CO.,LTD.



いまある
“価値”を
次代へ!

NAKABOH REPORT
No.55 2025年3月10日発行

編集発行人／山田 好昭 発行所／株式会社ナカボーテック 技術本部 技術統括部 技術管理部
〒104-0033 東京都中央区新川1丁目17番21号 Tel.03-5541-5826 Fax.03-5541-5832

©2025 NAKABOHTEC CORROSION PROTECTING CO.,LTD.

非売品, 無断転載を禁ず