

# 論文 可視化材料を用いた鉄筋の電食実験と分極反応領域の評価検討

青木 宏明\*1・高橋 秀明\*2・前川 宏一\*3

**要旨：**近年、地中送電用洞道で鉄筋の塩害劣化に伴う変状が報告されている。塩害劣化の対策として電気化学的工法を用いた補修が広く用いられているが、地中構造物に適応した場合外部に漏れだした迷走電流が周辺環境に影響を及ぼす可能性があるため、地盤を含む電気的特性の把握が重要である。そこで、本研究ではコンクリートの代わりに透明な可視化材料を使用して鉄筋の電食実験を行い、地盤を含めた構造物の電気化学特性を明らかにした。コンクリートの可視化によって、分極反応領域を目視で把握するとともに、非局所化分極反応モデルを用いた数値解析は、分極反応の領域を精度良く再現できることを確認した。

**キーワード：**地中送電用洞道, 可視化材料, 電食実験, 分極反応領域, 数値解析

## 1. はじめに

首都圏遠隔地から供給される電力は主に架空送電線により首都圏周辺の変電所まで送電され、変電所からは主に地中送電線によって首都圏内へ送電される。地中線の送電用ケーブルを収容する設備は、洞道と呼ばれるシールドトンネルから成っており、これらは首都圏のエネルギー供給を担う重要なライフラインである。これらの設備量は、首都圏の場合平成24年度末現在で全延長420kmを有している<sup>1)</sup>。経年30年を超えた洞道は全体の約4割を超え、経年劣化が問題となっている(図-1)。

近年、海岸付近に位置する地中送電用洞道で塩害劣化の発生が報告されている<sup>1)</sup>(写真-1)。セグメント継手部分から塩化物イオンを含む地下水が流入し、洞道の下部で滞留して鋼材が腐食すると考えられている。塩化物イオン濃度は腐食発生限界塩化物イオン濃度1.2kg/m<sup>2</sup>を超える箇所も多数存在しており、今後さらに部材の劣化が進行すると予想される。こうした鉄筋コンクリートの塩害劣化と地盤沈下や断層変位などの荷重作用が重畳すると、耐久性・安全性を著しく低下させる恐れがある。<sup>2)</sup>

塩害劣化の対策のひとつとして、電気防食工法や脱塩工法などの電気化学的工法が広く用いられている。しか

し、これらの工法は電気化学や化学平衡などの幅広い知識を必要とし、過防食や隣接構造物への影響に留意しなければならない。特に地中構造物は、構造物周辺は地盤に囲まれているため、地下水を含んだ地盤はそれ自身が電解質となり、電流の通り道となる可能性がある。外部に漏れだした迷走電流は隣接している構造物に影響を及ぼす恐れがあり、地中構造物が多数存在する都心部では特に注意を払う必要がある。また、塩害環境下にある構造物に断面修復を適用する場合、未対策部の部材が相対的に卑電位となり、マクロセル腐食の回路が形成される。局部的で腐食進行の速いマクロセル腐食は警戒を要する。これらの塩害に関する劣化因子を考慮した将来予測は、限られた資産内の中で効率的な維持管理を運用する上で重要視されている。

そこで、本研究では、コンクリートの代わりに透明な可視化材料を用いた電食実験を行い、地盤を含む電気化学特性の把握が可能な実験システムを構築した。コンクリートを可視化することで、分極反応領域を目視での把握が可能となる。可視化材料は、イオンや気泡を固定できる程度の粘性を持つ吸水性ポリマーを採用した。

コンクリート及び鉄筋群における酸化還元領域を適

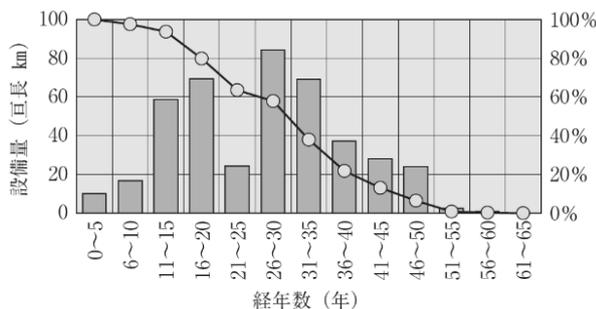


図-1 経年ごとの洞道設備量<sup>1)</sup>



写真-1 腐食による断面欠損<sup>1)</sup>

\*1 東電設計 (株) パワーソリューション本部 PS 土木部基礎技術 G 工修 (正会員)

\*2 東電設計 (株) パワーソリューション本部 PS 土木部担当職 工博

\*3 横浜国立大学 大学院都市イノベーション研究科都市地域社会専攻 工博 教授 (正会員)

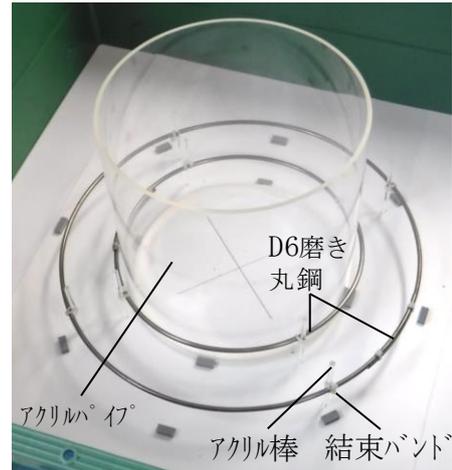
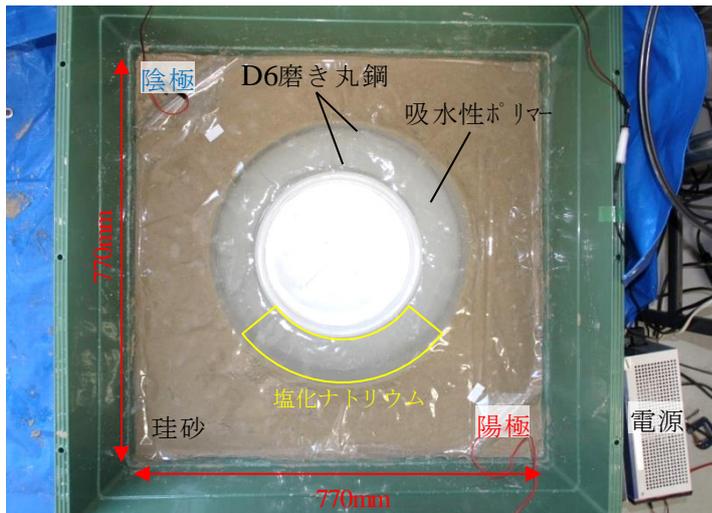


写真-2 可視化材料を用いた模型電食実験の概要

切に評価できる数値解析モデルの構築を目指した。数値解析モデルは、コンクリートと鉄筋それぞれに電場自由度を与えて双方に電位差を生じさせ、要素内にアノード反応及びカソード反応を規定する非局所化分極反応モデル<sup>3)</sup>を使用した。実験で明らかにした分極反応領域を数値解析結果と比較し、本解析手法の有用性を確認する。

## 2. 可視化材料を用いた電食実験

### 2.1 実験の概要

地盤を含む鉄筋コンクリート構造物の電気化学特性の把握を目的とした電食実験の詳細を述べる。本実験ではコンクリートの代替として、イオンや気泡を固定できる程度の粘性を持ち、鉄筋の様子を目視で確認できるほどの透明性を持つ吸水性ポリマーを採用した。吸水性ポリマー材の粘性から、酸化反応によって発生する腐食生成物と還元反応によって発生する水素が鉄筋表面に固着される。この性質から、外部電源に伴うアノード反応領域とカソード反応領域を目視によって把握できる。また、電解質を有する強アルカリ性の環境を再現するために、コンクリート中の代表的な電解質である水酸化カルシウム溶液を吸水性ポリマーに含ませた。

### 2.2 実験方法

#### (1) 供試体の形状と鋼材の配置

地中に埋設されている送電用洞道を想定し、写真-2に示すように洞道の横断面をモデル化した供試体と周辺地盤からなる領域の電食実験を行い、外部電圧を周辺地盤から与えて供試体全体の分極反応領域の把握を行った。供試体のサイズは、770mm×770mm×100mmとした。供試体材料は、コンクリートの代替として使用する吸水性ポリマーと鋼材、周辺地盤は珪砂で構成されている。

鋼材の配筋とアクリルパイプの設置状況を写真-2に示す。洞道の内空空間にあたる部分への吸水性ポリマー

の流入を防ぐため、透明なアクリルパイプを使用し、供試体下部とエポキシ樹脂で接着した。鋼材はD6磨き丸鋼を使用し、周方向に2本配筋した。鋼材を吸水性ポリマー内に固定するために、鋼材にアクリル棒をプラスチック製結束バンドで結び付け、型枠下部から50mm離れた位置に固定した。

#### (2) 溶液の配合

表-1に、吸水性ポリマー材に使用した溶液の配合を示す。溶液は、水酸化カルシウムを水道水に対して0.16kg/100kgの割合で溶解させた溶液を用いた。ポリアクリル酸ナトリウム系の吸水性ポリマーを溶液に対して1kg/100kgの割合で添加した。型枠に鋼材を配筋後、水酸化カルシウム溶液を流し込み、吸水性ポリマーと珪砂の界面をプラスチック製の板で区画した後に、鋼材を配筋した範囲に吸水性ポリマーを添加した。吸水性ポリマー材の吸水、硬化が確認された後、珪砂を用いて吸水性ポリマー材の周辺地盤を形成した。その後、吸水性ポリマーと珪砂の界面に設置していた板を取りだし、供試体上部を絶縁体の透明なビニルシートで封滅した。

実構造物の劣化で、構造物下部に塩化物イオンが滞留しているために、実験では写真-2に示すように吸水性ポリマー材の一部に塩化ナトリウムを混在させた。塩化物イオン濃度は、過度に塩化物イオンが流入した場合を想定し単位量48.5 kg/m<sup>3</sup>となるように添加した。

表-1 溶液の配合

単位量【kg/m <sup>3</sup> 】		
水道水	ポリアクリル酸 ナトリウム (吸水性ポリマー)	水酸化カルシウム Ca(OH) <sub>2</sub>
1000	10	1.6

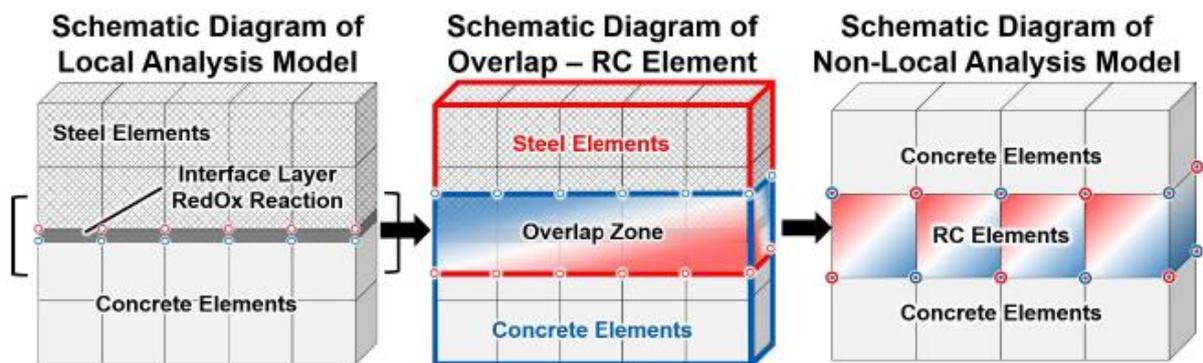


図-2 非局所化モデルの概要<sup>3)</sup>

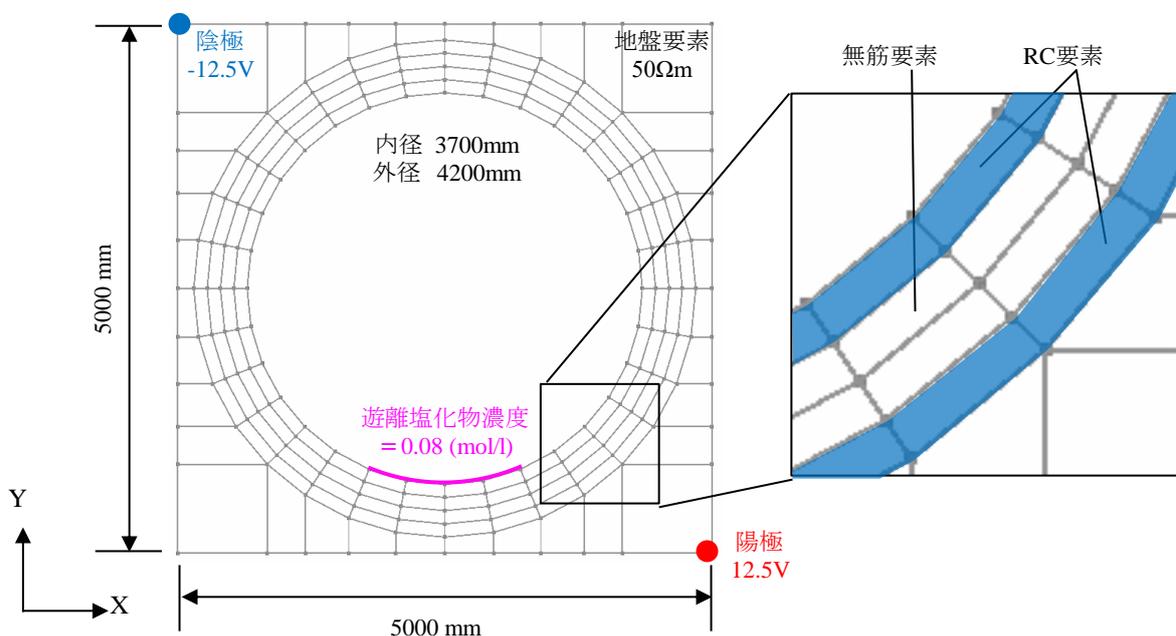


図-3 数値解析モデルの概要

### (3) 印加方法と観察項目

電極は写真-2 に示すように、型枠の対角上に位置する角部の地盤に陽極と陰極を設置し、25V の電圧を印加した。通常、外部電源の印加による電食実験では、鉄筋に陽極を接続し、耐食性をもつ外部電極を用いて対象の鉄筋を腐食させる。本実験では、鉄筋に発生するアノード反応・カソード反応それぞれの反応領域を確認するために、鉄筋に直接印加せず、地盤部に電位差がある条件下で鉄筋腐食に関する経時的变化を探った。電極には、電極自体のイオン化を防ぐために白金めっきチタンを使用した。観察は24h で一回行い、合計216h の試験体の様子を経時的に観察を行った。観察は主に目視で行い、酸化反応による腐食生成物の発生領域と、還元反応に伴う気泡の発生領域を確認した。酸化還元反応領域が固定されたと判断される時点でそれらの領域のスケッチを行った。

### 2.3 非局所化分極反応モデルを用いた数値解析

#### (1) 非局所化分極反応モデルの概要<sup>3)</sup>

本研究では、コンクリート及び鉄筋界面における電位差を適切に考慮し、鉄筋群を解析的に扱うことのできる非局所化解析モデルを採用した。従前、局所型の鋼材腐食解析では、鉄筋要素、コンクリート要素、境界要素をそれぞれ規定し、コンクリート要素および鉄筋要素の節点自由電位を用いて、境界要素におけるアノード反応及びカソード反応を定義した。一方、非局所化解析モデルでは、図-2 に示すように、コンクリート要素と鉄筋要素が、境界要素を含む範囲をオーバーラップし、鉄筋コンクリート要素を構成する。鉄筋を含む要素には、鉄筋及びコンクリートそれぞれに電場自由度を割り当て、同一の節点に鉄筋・コンクリートそれぞれの電場が存在するものとした。塩化物イオンなどの電荷の存在は、電場の発生源として Gauss の法則により電場の形成が表現される。

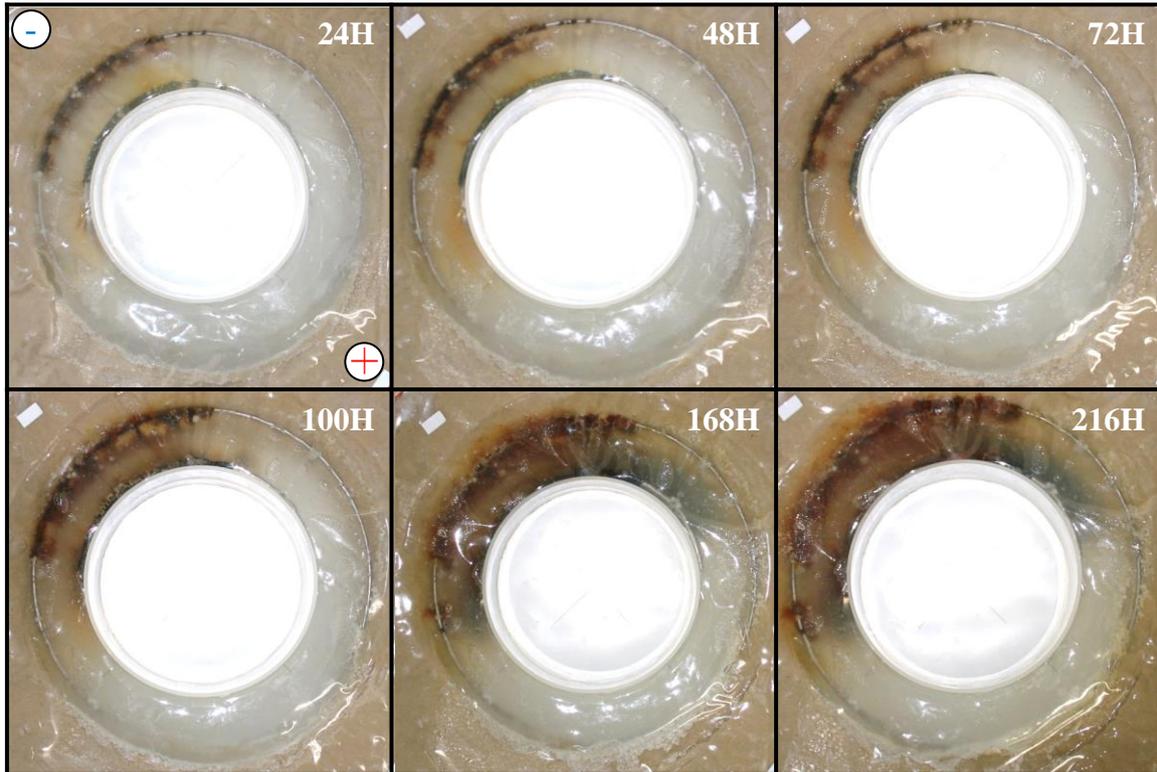


写真-3 腐食の経時変化

## (2) 数値解析メッシュモデル

解析システムは、コンクリートの空隙構造形成、水分移動や塩化物イオンの連成現象を取り扱う解析システムを用いた。数値解析モデルを図-3に示す。数値解析は実構造物への適用性確認を主眼とし、検討の対象とした洞道の実物メッシュを用いて分極反応が安定した状態について酸化還元反応の程度と領域を実験結果と比較した。模型と寸法が異なると腐食速度に影響を与えられ考えられるが、本研究では分極反応領域に着目し、寸法効果の影響は今後検討することとした。数値解析モデルは実験と同様に横断面をモデル化し、コンクリート要素と鉄筋要素と地盤要素で構成した。アノード反応およびカソード反応は鉄筋表面で起きる現象であるため、要素内に鉄筋の比表面積 ( $m^{-1}$ ) を与えた。当該要素における腐食量は鉄筋・コンクリート間の腐食電流密度からファラデーの法則により算出される(式1)。

$$R_{Cor} = \frac{i_{Corr} * \Delta t * M_{Fe}}{Z_{Fe} * F} \quad (1)$$

ここに、 $R_{Cor}$ :腐食量( $g/cm^2$ )、 $i_{Corr}$ :腐食電流密度( $A/m^2$ )、 $\Delta t$ :時間増分、 $M_{Fe}$ :鉄の原子量(=55.85)、 $Z_{Fe}$ :鉄の電荷数(=2)、 $F$ :ファラデー定数(=96500)である。また、全電流密度におけるアノード反応割合  $P_a$  を式(2)に規定している。

$$P_a = i_a / (i_a + i_c) \quad (2)$$

ここに、 $i_a$ :アノード電流密度( $A/m^2$ )、 $i_c$ :カソード電

流密度( $A/m^2$ )である。アノード反応割合が1に近いとアノード反応が卓越し、0に近いとカソード反応が卓越していることを表す。

## (3) 解析における諸条件

解析における諸定数を表-2に示す。コンクリート要素には、別途実施した実験結果から算出した吸水性ポリマー材の電気抵抗値を設定した。実験では洞道下部に滞留した地下水を表現するため、吸水性ポリマー材の一部に塩化ナトリウムを混ぜた。数値解析は図-3に示す位置の節点に塩化物濃度  $0.08(mol/l)$  を拘束し、塩化物イオンが構造物下部で常に遊離している状態を再現した。電極は実験と同様に解析モデルの対角線上の節点に、電位差が  $25V$  となるように設定した。実験との寸法差による電位勾配の差は、分極反応の反応速度に影響を与えることが考えられる。本研究では、洞道全断面に対する相対的な分極反応領域の範囲を模型実験と比較した。

表-2 解析における諸定数

項目	定数
コンクリート要素の電気抵抗率【 $\Omega m$ 】	1.46E+01
鉄筋要素の電気抵抗率【 $\Omega m$ 】	1.0E-02
地盤要素の電気抵抗率【 $\Omega m$ 】	5.0E+01
節点に作用する外部電圧【V】	12.5, -12.5
遊離塩化物濃度【 $mol/l$ 】	0.08

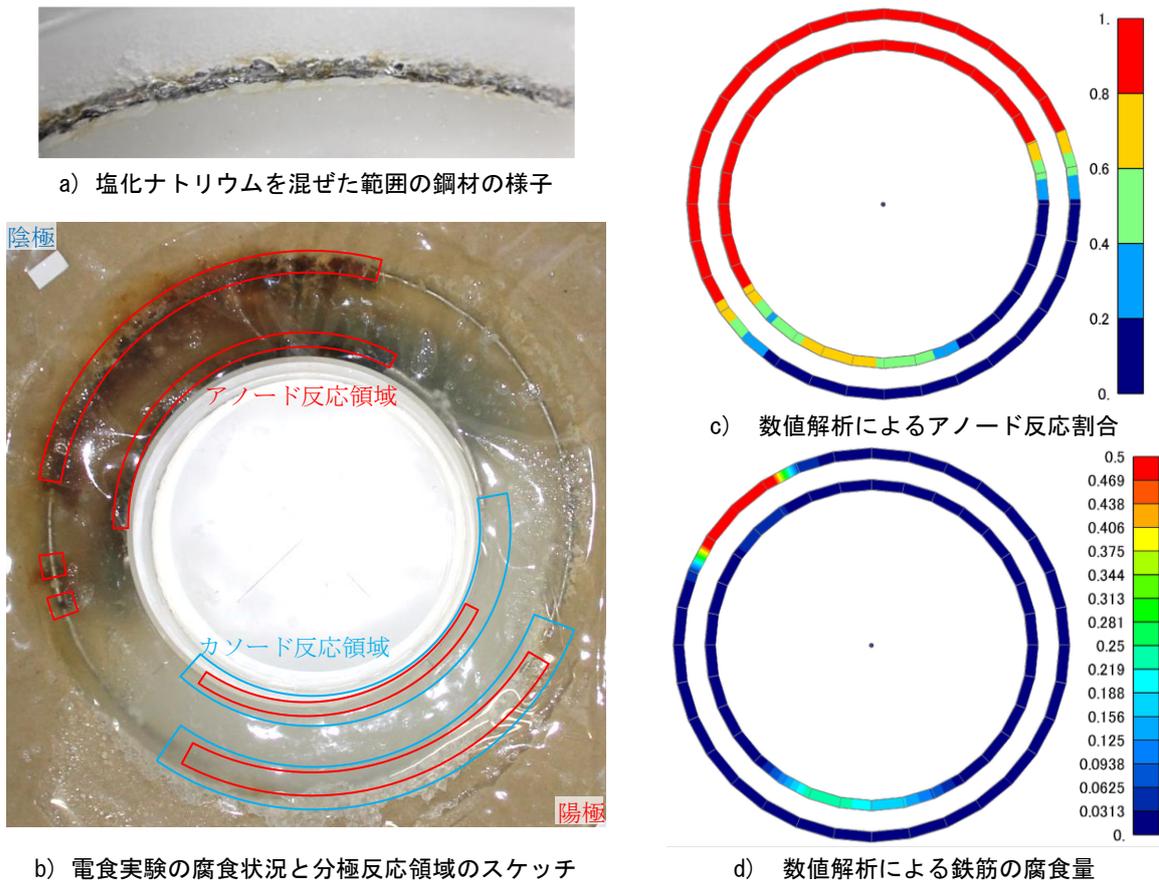


図-4 実験と解析の比較

## 2.4 実験結果の概要と数値解析結果

### (1) 電食実験の分極反応の状況

写真-3 に印加開始から終了までの供試体の酸化還元反応の時系列変化の様子を示す。陰極側の鉄筋群では、印加開始直後から腐食が始まり、腐食範囲は時間の経過とともに広がった。印加開始から 168h 程度経過した時に腐食範囲はほぼ固定され、同一範囲の鉄筋のみ腐食が進行した。一方、陽極側の鉄筋群では、印加直後から還元反応による気泡の発生が目視で確認できた。この範囲の鉄筋群に関しても、印加開始から 168h 程度経過したときに、気泡の発生領域が図-4 b) に示す範囲で固定され、その後は気泡の発生のみが続いた。吸水性ポリマー材に塩化物イオンを混ぜた範囲では、図-4 a) に示すように気泡と腐食の両方の発生が確認された。この範囲の電極電流は、アノード電流とカソード電流が拮抗した状態にあると考えられる。

### (2) 数値解析結果と実験結果の比較

図-4 b) c) に分極反応領域が固定された後に行ったスケッチと解析から式(2)で求めたアノード反応割合を示す。スケッチは腐食生成物の発生範囲をアノード反応領域、気泡の発生が確認できた範囲をカソード反応領域とした。解析結果のアノード反応割合は、前述の通り 1 に近いとアノード反応、0 に近いとカソード反応が支配的

であることを示す。アノード反応割合 0.8 以上の領域は、実験のスケッチのアノード反応領域とよく対応している。アノード反応割合が 0.2 以下の領域は陽極側の右側に集中しており、この領域がカソード反応に対応する。陽極側の中央と左側のアノード反応割合は 0.4~0.6 の範囲にあり、アノード電流とカソード電流が拮抗している。この状態は吸水性ポリマーに塩化ナトリウムを添加した影響が表れたものである。実験スケッチには陽極側で鉄筋腐食と気泡発生が同時に生じている領域と気泡のみ発生している領域が確認でき、それらの範囲は解析結果と概ね調和的である。

図-4 b) d) に数値解析から得られた鉄筋の腐食量 ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) と、実験の腐食状況の比較を行った。腐食量に関しても、陰極側の腐食が著しく、塩化ナトリウムを添加した範囲で微少な腐食生成物が発生した状況を、数値解析で再現できた。

### (3) pH の計測

本実験では、ハンディ型の pH 計測器を用いて、吸水性ポリマーの範囲の pH を計測した。図-5 に計測地点と pH の計測結果を示す。地点番号を陰極側から陽極側にかけて 1 から 13 を割り当てた。右回りを青色、左回りを赤色で示している。右回り方向に関しては、陰極側から陽極側にかけて pH が減少する傾向がみられた。左回

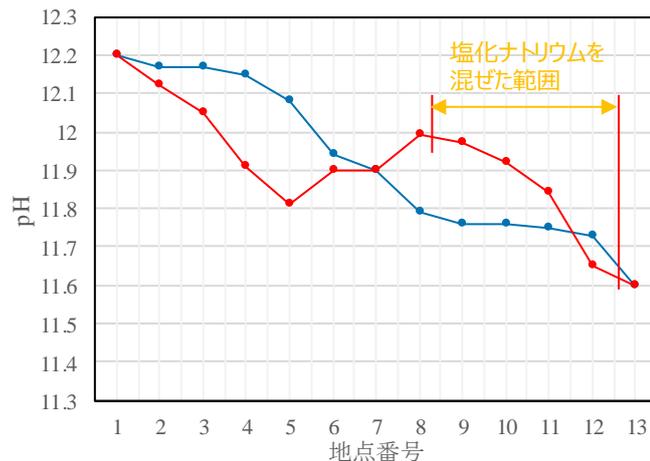


図-5 吸水性ポリマー材の pH の計測

り方向については塩化ナトリウムを混ぜた範囲の pH が上昇している。アノード反応域では水酸化鉄の生成に伴い水酸化物イオンが消費されるため、鉄筋表面の pH は減少する<sup>4)</sup>。鉄筋周辺の吸水性ポリマーでは、マイナス電荷である水酸化物イオンがアノード反応域に引き寄せられ、その結果アノード反応域の吸水性ポリマーでは水酸化物イオン濃度が高くなり pH が上昇する。図-4 b) に示すアノード・カソード反応域のスケッチと pH の測定結果を比較すると、アノード反応域の pH が高く、pH を計測すれば分極反応領域が定性的に評価できることがわかった。

### 3. まとめ

本研究では、コンクリートを可視化材料とした洞道と地盤の全体系で電食実験を行い、コンクリート部材の分極反応領域の評価を行う実験的手法を検討した。その結果、分極反応領域は目視によって確認でき、pH の計測から定性的に評価できることを示した。さらに、非局所化分極反応モデルを用いた数値解析を行い、実験の腐食状況と分極反応領域を精度良く再現できた。

今後はこの電食実験を用いて、周辺地盤を有する地中構造物に有効な塩害劣化の対策工を模索する。また、数値解析モデルの実用化に向けて、セメントの水和反応によって生成されるイオンと海水に含まれるイオンの相互

作用や、マクロセル腐食などの回路が発生する際のイオンの動きを考慮したマルチスケール解析の構築を目指す。さらに、この高度化された数値解析モデルを用いて、塩害劣化を受ける構造物の将来寿命の予測を可能とし、今後の維持管理に活用する予定である。

### 参考文献

- 1) 岡滋晃, 梶原誠, 実広拓史: 電力用シールド洞道での内空変形と鋼材腐食事例, 電力土木, No379, 53-56, 2015
- 2) Aoki H, Yamanoi Y, Takahashi H, Maekawa K: Failure mode and safety assessment of corroded RC tunnel sections subjected to subsidence and localized shear of soil foundation, CoRASS 2019
- 3) Maekawa K, Okano Y, Gong F: Space-Averaged Non-Local Analysis of Electric Potential for Polarization Reactions of Reinforcing Bars in Electrolytes, Journal of Advanced Concrete Technology 17(11):616-627, November 2019
- 4) 山本悟, 田代賢吉, 立林喜子, 石井浩司, 関博: 湿潤環境にあるコンクリート中鋼材の電気防食基準に関する検討, コンクリート工学論文集 22(3), 1-11, 2011