

## 論文 断面修復部における鉄筋の自然電位モニタリング手法に関する検討

花岡 大伸\*1・中野 雅章\*2・松山 公年\*3・高地 透\*4

**要旨:** 塩害環境下の鉄筋コンクリート構造物を適切に維持管理するためには、鉄筋腐食の状態を把握することが重要である。また、塩害が生じた鉄筋コンクリート部材に対する補修工法のひとつに断面修復工法があるが、塩化物イオンを含む部材に対して部分断面修復を行った場合にマクロセル腐食による再劣化が生じる事例が報告されている。本研究では、断面修復部のマクロセル腐食に対するモニタリング手法について検討を行った。すなわち、断面修復部を模擬した供試体にそれぞれ2種類のセンサを設置し、自然電位のモニタリングを行った。さらに実験結果を踏まえ、断面修復部における自然電位のモニタリングの方法を提案した。

**キーワード:** 断面修復, マクロセル腐食, モニタリング, 小型埋設センサ, 照合電極

## 1. はじめに

塩害環境下の鉄筋コンクリート構造物を適切に維持管理するためには、鉄筋腐食の状態を把握することが重要である。また、塩害が生じた鉄筋コンクリート部材に対する補修工法のひとつに断面修復工法があるが、塩化物イオンを含む部材に対して部分断面修復を行った場合にマクロセル腐食による再劣化が生じる事例が報告されている<sup>1)</sup>。そのため、断面修復による補修効果を適切に把握することが重要である。

また、社会インフラを維持管理する専門技術者の不足や厳しい財政事情などが問題視されているなかで、適切な維持管理手法の導入により、構造物の長寿命化や維持管理・更新のライフサイクルコストの縮減・平準化を図ることが急務となっている。その解決策の一つとして、モニタリング技術が注目されており、近年、様々なセンサやモニタリングに関する研究が行われている<sup>2)</sup>。

ここで、コンクリート中の鉄筋腐食を推定する手法として、電気化学的手法に基づいた自然電位法や分極抵抗法などがある。これらの手法は、鉄筋腐食が懸念される構造物の詳細調査や鉄筋腐食を対象とした研究など、多くの場面で活用されている。なかでも、自然電位法はコンクリート中の鉄筋腐食を推定する際に、最も一般的に用いられている手法であり、鉄筋腐食のモニタリング手段として期待される。自然電位の測定方法には、コンクリート表面に電極を当てて測定する方法と、コンクリート内部にセンサを埋設して測定する方法があるが、構造物での長期的なモニタリングを考慮すると、コンクリートにセンサを設置する方法が望ましいと考えられる。特に、断面修復の施工にあたっては、かぶりコンクリートのはつり作業を伴うため、断面修復の施工時にセンサを

設置し、補修効果をモニタリングすることが有効であると考えられる。既往の研究をみると、竹内ら<sup>3)</sup>は母材と断面修復部に小型埋設センサを設置し、それらで測定した自然電位とコンクリート抵抗などから、解析的に腐食速度を求める手法を提案している。また、岡崎ら<sup>4)</sup>は小型埋設センサを活用した自然電位および分極抵抗のモニタリングにより、自然電位と分極抵抗を組み合わせることで腐食判定の精度が向上することなどを確認している。しかしながら、断面修復部のマクロセル腐食に対する有効なモニタリングの方法(センサの種類, 設置位置)は明らかとなっていない。

以上の背景を踏まえて本研究では、断面修復部のマクロセル腐食に対するモニタリング手法について検討を行った。すなわち、断面修復部を模擬した供試体にそれぞれ2種類のセンサを設置し、自然電位のモニタリングを行った。さらに実験結果を踏まえ、断面修復部における自然電位のモニタリングの方法を提案した。

## 2. 実験概要

## 2.1 供試体概要

本研究では、部分的な断面修復部を模擬するため、供試体の半分に塩化物イオン(7.0kg/m<sup>3</sup>)を混入した母材コンクリートを打設し、もう一方に断面修復材を打ち継いだ供試体を作製した。表-1に母材コンクリートの配合を、図-1に供試体の概要を示す。母材コンクリートの水セメントは60.0%とし、セメントは普通ポルトランドセメント(密度:3.16g/cm<sup>3</sup>, 比表面積:3270cm<sup>2</sup>/g)を使用した。細骨材には手取川産川砂(表乾密度:2.59g/cm<sup>3</sup>, 吸水率:2.49%, 粗粒率:2.68)を、粗骨材には手取川産川砂利(表乾密度:2.60g/cm<sup>3</sup>, 吸水率:2.23%, 粗粒率:

\*1 金沢工業大学 工学部環境土木工学科講師 工博 (正会員)

\*2 日本工営(株) 中央研究所 総合技術開発第2部 第1グループ (正会員)

\*3 日本工営(株) 交通都市事業部 交通インフラマネジメント部 工博 (正会員)

\*4 日本工営(株) 交通都市事業部 交通インフラマネジメント部 (正会員)

6.89) をそれぞれ使用した。混和剤は、AE 減水剤（標準型 I 種，リグニンスルホン酸塩系）を使用した。また，母材コンクリートの塩化物イオン ( $7.0\text{kg}/\text{m}^3$ ) は，練り混ぜ水に  $\text{NaCl}$  として混入した。一方で，補修部（断面修復部）には，市販のポリマーセメントモルタル（ポリアクリル酸エステル系ポリマー）を使用した。ポリマーセメントは，母材コンクリートの打設後にワイヤブラシで打継面を目粗らしし，打継面へのプライマー塗布および鉄筋に防錆処理を施した後に打設した。鉄筋の防錆処理は，亜硝酸塩を含むセメントペーストを補修部の鉄筋に塗布した。

供試体は図-1 に示すように， $100\times 100\times 400\text{mm}$  の直方体とし，芯かぶりが  $50\text{mm}$  となる位置に鉄筋 (SD345, D13) を埋設した。また，本研究ではコンクリート中鉄筋の自然電位を測定するセンサとして，小型埋設センサ（直径約  $13\text{mm}$ ，高さ  $7\text{mm}$ ，電極の材質：ニッケル下地に金メッキを施した金属）<sup>5)</sup> と照合電極（鉛照合電極，直径  $22\text{mm}$ ，長さ  $133\text{mm}$  の円柱型）を使用した。図-1 に示すように，それぞれのセンサはそれぞれ  $50\text{mm}$  間隔で設置した。すなわち，塩化物イオンを含む母材部には 3ヶ所，補修部には 2ヶ所設置した。なお，母材部の小型埋設センサは，母材コンクリートから採取した塩化物イオン入りのモルタルを電極表面に塗布して設置した。一方で，補修部の小型埋設センサは，ポリマーセメントモルタルを電極表面に塗布して設置した。さらに，鉄筋に流れるマクロセル腐食電流を直接測定するため，リード線により電気的に導通させた分割鉄筋を埋設した供試体も同様な手順で作製した。分割鉄筋は，長さ  $50\text{mm}$  の鉄筋をエポキシ樹脂で連結し，リード線で短絡させ電気化学的に 1本の鉄筋を再現した<sup>6)</sup>。

## 2.2 検討ケースおよび曝露環境

表-2 に検討ケースを示す。No.1 と No.2 は小型埋設センサを設置した供試体，No.3 は照合電極を設置した供試体，さらに No.4 は分割鉄筋を埋設した供試体である。また，No.2~No.3 には，予め腐食させた腐食鉄筋（錆ありの鉄筋）を使用した。鉄筋の腐食は，室温  $65^\circ\text{C}$  の環境試験内において  $3.0\%$  の食塩水を 14 日間噴霧させて行った。なお，補修部の鉄筋は腐食させた後に，ワイヤブラシおよびサンドペーパーを用いて除錆処理を行った。

全ての供試体は補修部（ポリマーセメントモルタル）の打設後 2 日間は封緘養生し，材齢 3 日目に脱枠した。その後，供試体中の鉄筋の腐食反応を促進させる目的で，温度  $40^\circ\text{C}$ ，湿度  $90\%$  の環境で供試体を曝露した。

## 2.3 測定概要

小型埋設センサおよび照合電極を埋設した供試体は，内部抵抗が  $100\text{M}\Omega$  以上のデジタルマルチメータを用い

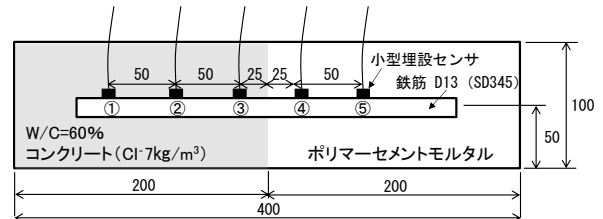
表-1 母材コンクリートの配合

G <sub>max</sub> (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
			W	C	S	G	Ad
25	60.0	43.0	174	290	770	1034	1.45

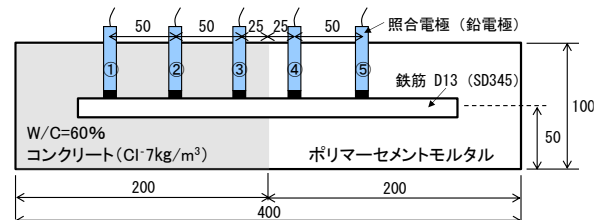
C：普通ポルトランドセメント（密度  $3.16\text{g}/\text{cm}^3$ ，比表面積  $3270\text{cm}^2/\text{g}$ ），S：手取川産川砂（表乾密度  $2.59\text{g}/\text{cm}^3$ ，吸水率  $2.49\%$ ，粗粒率  $2.68$ ），G：手取川産川砂利（表乾密度  $2.60\text{g}/\text{cm}^3$ ，吸水率  $2.23\%$ ，粗粒率  $6.89$ ），Ad：AE 減水剤（標準型 I 種，リグニンスルホン酸塩系）

※塩化物イオンは練り混ぜ水に  $\text{NaCl}$  として混入

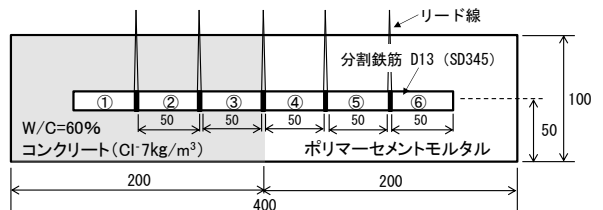
供試体： $100\times 100\times 400\text{mm}$



(1) 小型埋設センサ供試体



(2) 照合電極供試体



(3) 分割鉄筋供試体

(単位：mm)

図-1 供試体の概要

表-2 検討ケース

No.	母材部の鉄筋条件	補修部の防錆処理	供試体の種類
1	錆なし	有り	小型埋設センサ
2	錆あり*		照合電極
3			分割鉄筋
4			

※室温  $65^\circ\text{C}$  の環境試験内において  $3.0\%$  の食塩水を 14 日間噴霧した鉄筋を使用した。

て鉄筋とセンサ（電極）との電位差を測定した。

分割鉄筋を埋設した供試体は，隣接する鉄筋間のリード線に無抵抗電流計を接続し，マクロセル腐食電流を測定した。次に，各鉄筋要素に出入りする電流を合計し，

その電流値を鉄筋要素の表面積で除することにより、鉄筋要素表面でのマクロセル腐食電流密度を求めた。また、鉄の溶解が起こるアノード部はマクロセル腐食電流密度の値を正 (+)、水と酸素を消費するカソード部はマクロセル腐食電流密度の値を負 (-) となるように整理した。なお、自然電位およびマクロセル腐食電流の測定は、材齢 3~5 日までは 1 回/1 日の頻度で、その後は 1 回/週程度の頻度で材齢 113 日まで行った。

### 3. 実験結果

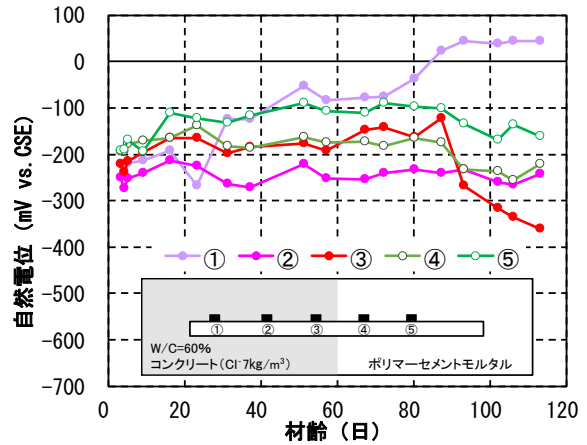
#### 3.1 自然電位のモニタリング結果

図-2 に自然電位のモニタリング結果を示す。なお、自然電位の値は、全て飽和硫酸銅電極基準 (CSE) に換算した値である。まず小型埋設センサで測定した結果をみると、測定を開始した直後から、母材部の自然電位は補修部に比べて卑になっていることが分かる。また、No. 1 と No.2 の母材部の自然電位を比較すると、予め腐食させた腐食鉄筋を埋設した No.2 の自然電位が卑の傾向にあることが認められる。次に No.2 における母材部の自然電位の経時変化をみると、材齢 40 日以降に貴側に変動し、材齢 113 日には ASTM C 876<sup>7)</sup> の鉄筋腐食評価で「90%以上の確率で腐食なし」と評価される値となっている。また、No. 1 の供試体でも同様な傾向が認められる。この結果は、小型埋設センサの設置時に、母材コンクリートから採取した塩分入りのモルタルをセンサの電極表面に塗布したことが影響していると考えられる。すなわち、塩分を含むモルタルをセンサの電極に直接塗布したことで、センサの電極自体が腐食し、測定値に異常をきたした可能性が考えられる。これについては、後述する解体調査でセンサの電極表面を確認した。

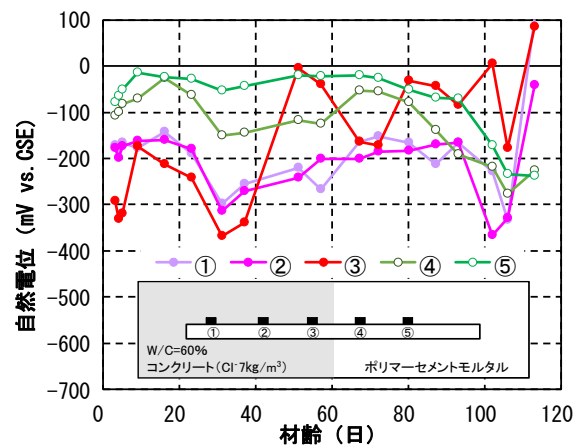
照合電極で測定した補修部の自然電位をみると、母材部の電位と同様に変動しているが、経過日数とともに卑側に変動し、材齢 80 日以降では母材部との電位差がほぼ無くなっている。ここで、補修部の自然電位が卑な値を示した理由は、照合電極による測定範囲が影響していると考えられる。すなわち、補修部に設置した測点④および測点⑤の照合電極の測定値は、塩化物イオンを含む母材の鉄筋電位の影響を受け、卑側に変化したと考えられる。

#### 3.2 マクロセル腐食電流密度の測定結果

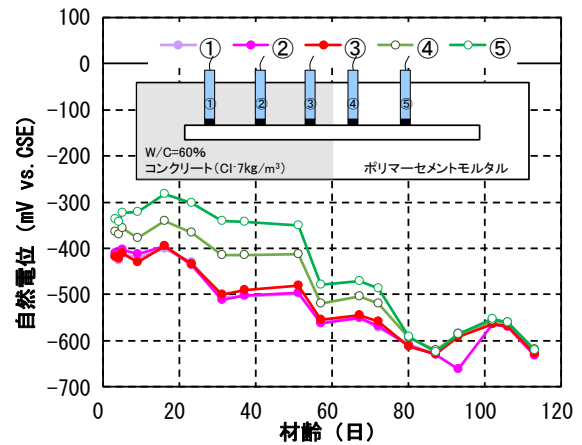
図-3 に分割鉄筋供試体におけるマクロセル腐食電流密度の測定結果を示す。これによると、マクロセル腐食電流密度は、塩化物イオンを含む母材側で正の値 (アノード)、補修部側で負の値 (カソード) となっていることが分かる。腐食箇所をみると、断面修復の打継目に近い母材側の位置 (鉄筋③) で最も腐食が進行している。さらに、本研究で作製した供試体では、材齢 3 日以降から



(1) 小型埋設センサ供試体 (No.1)



(2) 小型埋設センサ供試体 (No.2)



(3) 照合電極供試体 (No.3)

図-2 自然電位のモニタリング結果

母材部の鉄筋をアノード、補修部の鉄筋をカソードとするマクロセルの回路が形成されていたことが確認された。

#### 3.3 供試体の解体調査

材齢 118 日目に供試体を解体し、鉄筋の腐食状況およびセンサの状態を確認した。図-4 に鉄筋の腐食状況を

示す。これによると、No.1～No.3 のいずれも母材側の鉄筋が腐食していることが確認された。一方で補修部の鉄筋には、目立った腐食は認められなかった。

また、図-5 にはNo. 2 供試体から取り出した小型埋設センサの状況を示す。これによると、母材部から取り出した小型埋設センサの電極表面において、錆色や腐食生成物のようなものが確認された。これらは、鉄筋の錆によるものなのか、センサの電極が錆びたものなのかは明確に判断できないが、この影響で自然電位の測定値に異常をきたしたと推察される。なお、供試体から取り出した小型埋設センサの動作確認（新品のセンサとの比較）を行ったところ、母材部から取り出した小型埋設センサの測定値は、異常値を示すことを確認した。一方、照合電極は外観上の異常はとくに認められなかった。

図-2、図-3 および解体調査の結果を踏まえ、以降、小型埋設センサの測定結果は、自然電位が正常に測定できていたと考えられる材齢 37 日までのモニタリング結果を用いて検討を行うこととした。

### 3.3 小型埋設センサと照合電極による測定値の比較

図-6 に小型埋設センサで測定した自然電位の分布を示す。まず、使用した鉄筋の影響をみると、No.1 の錆なしに比べてNo.2 の錆ありの自然電位が卑となっていることが分かる。これは、No.2 の錆ありの供試体は、母材コンクリートの打設前に鉄筋を腐食加工したことで鉄筋の不動態被膜が全体的に破壊され、その影響が自然電位の測定結果に表れたと考えられる。また、小型埋設センサで測定した自然電位の分布をみると、母材部の電位が補修部の電位に比べて卑側になっており、測点ごとの電位に変動がみられる。これは小型埋設センサ自体の直径が約 13mm 程度で小さく、かつ鉄筋の近傍に設置していることから、センサを設置した位置（13mm 程度の領域）のみの自然電位を測定しているためと考えられる。特に、No.2 供試体における自然電位の分布をみると、測点③が最も卑な電位となっており、図-3 に示したマクロセル腐食電流密度の測定結果と整合している。

図-7 に照合電極で測定した自然電位の分布を示す。これによると、照合電極で測定した結果は、小型埋設センサで測定した結果に比べ、測点ごとにおける電位の変化が小さいが、材齢 50 日頃までをみると、補修部では電位勾配がみられる。また、補修部の電位は材齢 3 日目から -300mV vs.CSE を下回っており、ASTM C 876 の腐食評価でみると、「90%以上の確率で腐食あり」と判定される領域にある。さらに材齢 80 日以降になると、供試体内における電位勾配が無くなり、補修部においても -600mV vs.CSE の値を示している。これは、材齢とともにマクロセル腐食が進行したことで、母材部の鉄筋において負の電荷が多くなり、補修部に設置した照合電極でも

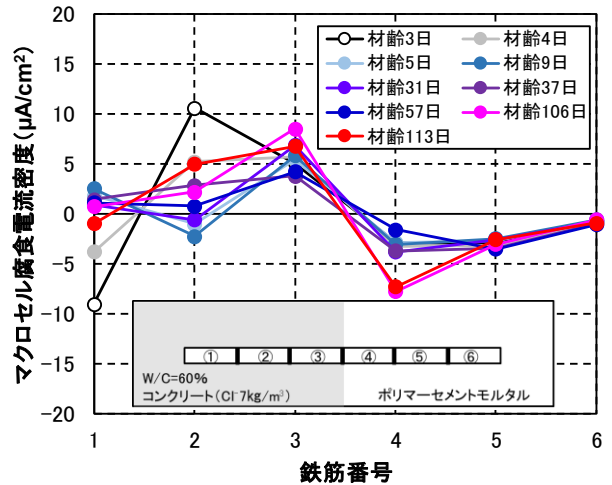


図-3 マクロセル腐食電流密度の測定結果 (No.4)

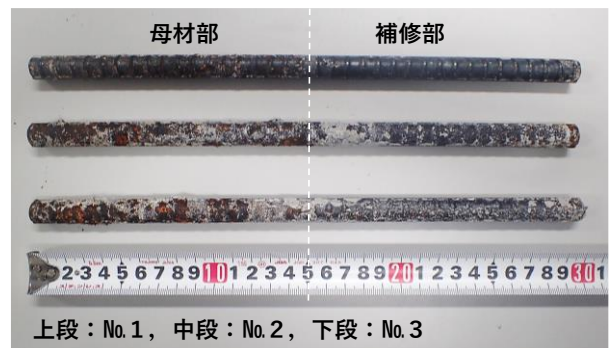


図-4 鉄筋の腐食状況 (材齢 118 日目)

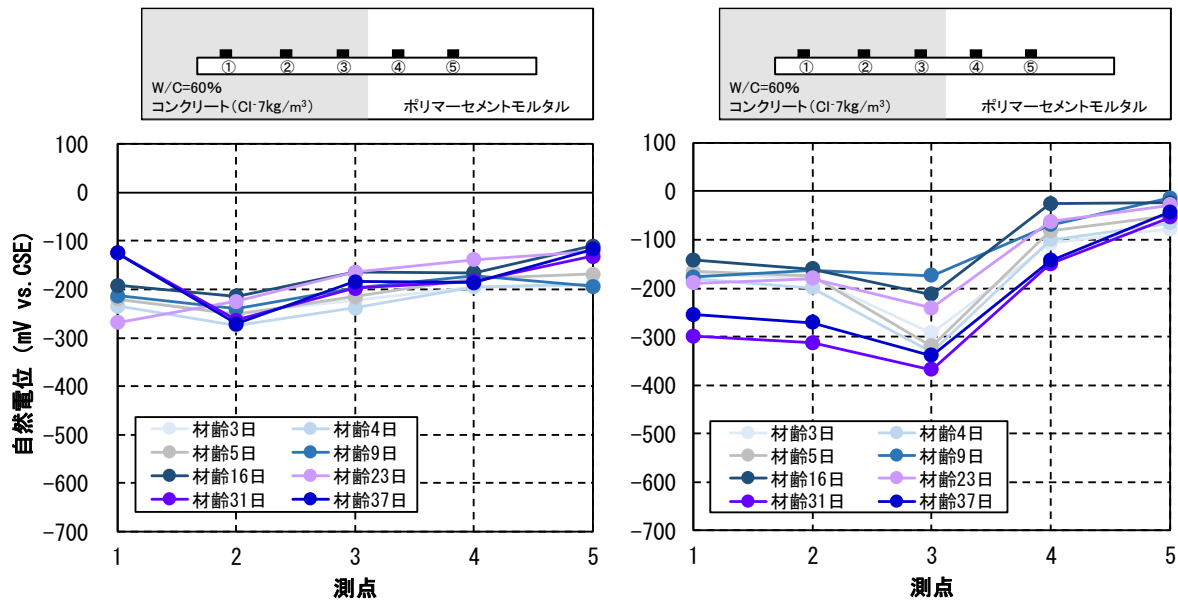


図-5 小型埋設センサの状況 (材齢 118 日目 No.2)

これらの電荷を検知したためと考えられる。照合電極でどこまでの範囲の電荷を検知できるかは明確に分からないが、少なくとも打継目から 75mm 以内の補修部に設置した照合電極の測定値は、母材部の鉄筋の影響を受けていると考えられる。

また、材齢 37 日目までの小型埋設センサと照合電極で測定した自然電位の値を比較すると、照合電極で測定した値の方が小型埋設センサで測定した値に比べて低いことが分かる。これはセンサ(電極)自体の差に加えて、





(1) No.1 供試体 (母材部の鉄筋：錆なし) (2) No.2 供試体 (母材部の鉄筋：錆あり)

図-6 小型埋設センサで測定した自然電位の分布

小型埋設センサと照合電極の電荷を検知している範囲の違いなども影響していると考えられる。すなわち、照合電極は小型埋設センサに比べて、負の電荷を検知する範囲が広いいため、小型埋設センサに比べて多くの電荷を検出したと推察される

#### 4. 断面修復部における鉄筋の自然電位モニタリングの提案

##### 4.1 センサの特徴

以下に、本研究の実験で得られた小型埋設センサと照合電極の特徴を示す。

##### (1) 小型埋設センサの特徴

センサを設置した位置付近 (13mm 程度の領域) のみの電位を測定していると考えられる。このことから、打継目近傍の母材部や補修部に小型埋設センサを複数設置すれば、自然電位の測定結果 (電位分布) から、マクロセル腐食の傾向を判断することができると思われる。

##### (2) 照合電極の特徴

打継目近傍の補修部に設置した照合電極の測定値は、塩分を含む母材部の鉄筋電位の影響を受け、卑側に变化する。本研究では、少なくとも打継目から 75mm の位置に設置した照合電極がその影響を受けていた。言い換えれば、打継目近傍の補修部に照合電極を設置すれば、母材部における鉄筋腐食の傾向を把握できると考えられる。

##### 4.2 断面修復の施工時にセンサを設置する場合の提案

図-8 (1) に断面修復の施工時にセンサを設置する場合のイメージ図を示す。断面修復の施工時にモニタリング用のセンサを設置する場合は、補修側 (コンクリートをはつり取った側) で、かつ母材部 (未補修部) になる

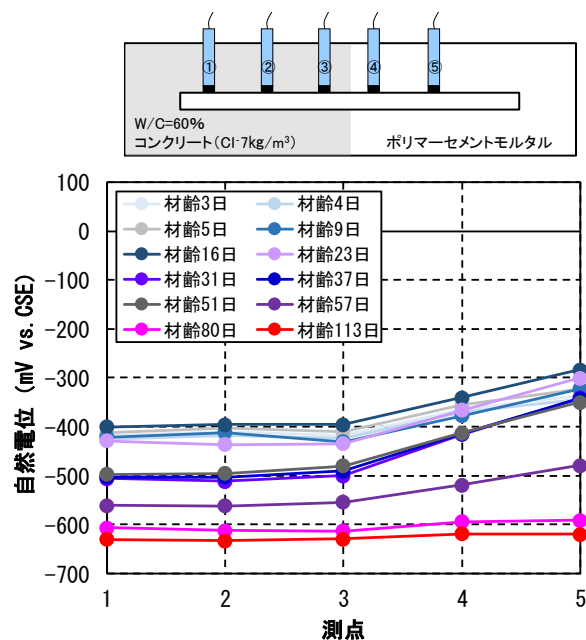


図-7 照合電極で測定した自然電位の分布 (No.3)

べく近い位置に照合電極を設置することが望ましいと考えられる。これは、上述したとおり、補修側に照合電極を設置しても母材部 (未補修部) に近い位置 (打継目から 25~75mm 程度) であれば、マクロセル腐食が生じる打継目近傍の自然電位を概ね検知できると考えられるためである。また、母材部 (未補修部) の厳密な自然電位の値とは差が生じるが、補修効果やマクロセル腐食による再劣化の傾向をモニタリングするには有効な手段と考えられる。さらに構造物の損傷を極力少なくする意味でも、断面修復時のはつり箇所だけに照合電極を設置するのが望ましい。

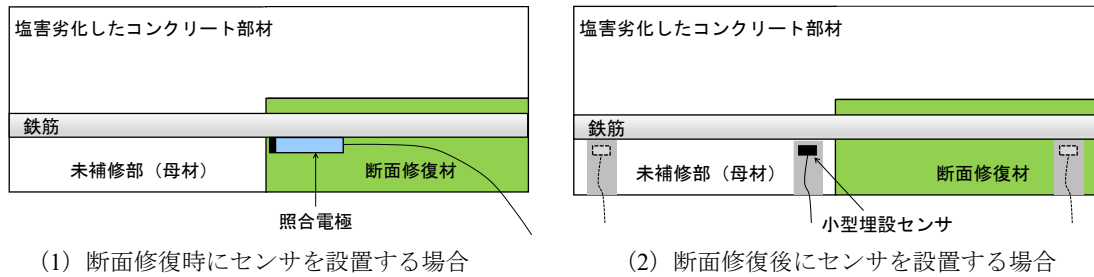


図-8 断面修復部における鉄筋の自然電位モニタリング用センサの設置イメージ

#### 4.3 断面修復の施工後にセンサを設置する場合の提案

図-8 (2) に断面修復の施工後にセンサを設置する場合のイメージ図を示す。断面修復による補修を既に実施している箇所モニタリング用のセンサを設置する場合は、母材部（未補修部）で、なるべく断面修復部との打継目に近い位置をドリル等で削孔し、小型埋設センサを鉄筋付近に設置することが望ましい。また、断面修復部近傍のマクロセル腐食を検知するには、そのセンサから少し外れた位置にもセンサを設置することも有効である。さらに補修部にも同様にセンサを設置するすれば、そのセンサで測定された電位が母材部の値よりも貴で、かつ電位差が大きいほどマクロセル腐食の可能性が高いと判断できる。

最後に、センサ自体の耐久性や施工方法などにも十分に留意が必要であるため、実構造物でのモニタリング検証も予定している。

#### 5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 小型埋設センサは、センサを設置した位置付近（13mm 程度の領域）のみの電位を測定していると考えられる。このことから、小型埋設センサを複数設置すれば、自然電位の電位分布から、詳細な腐食箇所の推定が可能と考えられる。
- (2) 打継目近傍の補修部に設置した照合電極の測定値は、塩分を含む母材部の鉄筋電位の影響を受け、卑側に変化する。本研究では、少なくとも打継目から75mm の位置に設置した照合電極がその影響を受けていた。
- (3) 断面修復の施工時にセンサを設置する場合は、補修側でかつ母材部になるべく近い位置に照合電極を設置することが望ましいと考えられる。
- (4) 断面修復による補修を既に実施している箇所にセンサを設置する場合は、母材部で、なるべく断面修復部との打継目に近い位置をドリル等で削孔し、小型埋設センサを鉄筋付近に設置することが望ましいと考えられる。また、断面修復部近傍のマクロセル腐食を検知するには、そのセンサから少し外れた

位置にもセンサを設置することが有効である。

#### 謝辞

本研究の一部は、内閣府の SIP「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」の一環として、国土交通省が実施する「社会インフラへのモニタリングシステム技術の活用推進に関する技術研究開発」委託事業研究の成果である。また、本研究の実施にあたり、2018 年度金沢工業大学卒業生の三宅晃平氏（現：アイサワ工業（株））の協力を得ました。ここに謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 長瀧重義, 大即信明, 守分敦郎, 宮里心一: 断面修復部における打継目の物質透過性が鉄筋のマクロセル腐食に及ぼす影響, 土木学会論文集, No.578, V-37, pp.31-42, 1997.
- 2) 松山公年, 園田宗博, 中野雅章, 高地透, 中津井邦喜: 塩害モニタリングにおける対象位置決定方法に関する研究, 土木学会第 72 回年次学術講演会講演概要集, CS9-020, pp.39-40, 2017.9
- 3) 岡村博, 永山勝, 下澤和幸: 偽参照電極使用埋設二極プローブによる鉄筋腐食モニタリング, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.1, pp.777-782, 1993.9
- 4) 竹内傑, 宮里心一, 横関康祐, 親本俊憲: 断面修復後の防食効果に対する定量的モニタリング手法の開発, 材料, Vol.60, No.11, pp.1043-1048, 2011.11
- 5) 岡崎慎一郎, 加藤絵万, 川端雄一郎, 岩波光保: 埋設型センサによる栈橋上部工 RC 部材の鉄筋腐食モニタリングに関する研究, 港湾空港技術研究所資料, No.1294, pp.2-26, 2014.12
- 6) 宮里心一, 大即信明, 小長井彰祐: 分割鉄筋を用いたマクロセル電流測定方法の実験的・理論的検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.23, No.2, pp.547-552, 2001.
- 7) ASTM C876-91, Standard Test Method for Half-Cell Potential of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, Annual Book of ASTM Standards, Vol.03.02, pp.457-462, Jan.1999