

論文 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

竹内 傑^{*1}・宮里 心一^{*2}・横関 康祐^{*3}・親本 俊憲^{*4}

要旨: 鉄筋腐食に対する補修として、断面修復工法が適用されることが多い。しかしながら、断面修復後の防食状況を定量的に確認する方法はなく、マクロセル腐食による再劣化に対する危惧を払拭できない。そこで本研究では、断面修復部における腐食速度を、マクロセルも考慮して連続的にモニタリングする手法を開発した。実験は、3段階に分けて検討した。まず、第一段階では、測定センサの設置方法を検討した。第二段階では、開発した手法による解析結果と実測結果を比較した。第三段階では、解析値と実際の割裂結果を比較した。以上の検討より、断面修復後の防食効果を定量的に評価できる手法を開発できた。

キーワード: 断面修復, 防食効果, マクロセル腐食, モニタリング, 解析

1. はじめに

日本は地形変化に富んでいる。また、国土の周囲は海に囲まれており、一方山間部も多い。したがって、沿岸部では飛来塩分および山間部では凍結防止剤に起因する塩害劣化が、深刻な問題となっている。ここで、この劣化に対する補修のため、断面修復工法がしばしば用いられる。しかしながら、一部では断面修復後に母材の打継目近傍でマクロセル腐食が発生し^{1) 2)}、構造物の耐久性を損ねている。したがって、これらの再劣化の有無を把握することは、社会基盤の維持管理において重要である。

さて、鉄筋コンクリートの腐食速度は経時的に変化する。したがって、断面修復後の腐食を評価する場合にも、長期的にモニタリングすることが望まれる。ここで、既往の手法³⁾では長期的なモニタリングを考慮すると、コンクリート表面に設置する対極板の耐久性や接触不良が危惧される。したがって、コンクリート内部の特に鉄筋近傍に対極板を設置することが望ましい。

以上の背景を踏まえて本研究では、断面修復後の防食効果をモニタリングするため、補修部と母材の打継目を境に形成するマクロセルも考慮して、安定的および連続的に腐食速度を解析する手法を開発した。そのため、埋設型の電極（以下ミニセンサ）⁴⁾を測定ツールとして用いた。ミニセンサは埋設型であることから安定的な測定が可能であり、対極板および参照電極はニッケル下地に金メッキを施した金属から構成されており、高耐久性を有する。ミニセンサの詳細を図-1に示す。このミニセンサを用いて電位、分極抵抗およびコンクリート比抵抗を測定し、これらの値を代入値として腐食速度を解析する方法の構築を試みた。なお、本研究では、図-2に示すとおり3段階の試験を行った。

2. 第一段階試験

2.1 実験手順

(1) 供試体

実験ケースを表-1 および図-3に示す。すなわち、ケース1と比較してケース2では、ミニセンサと鉄筋の間に空隙を生じさせないように処理した。したがって、

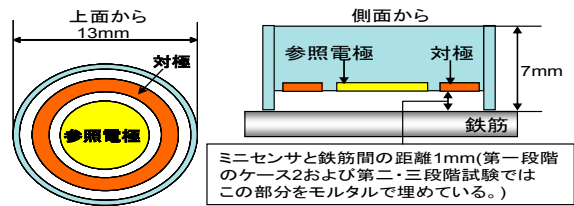


図-1 ミニセンサ寸法⁴⁾

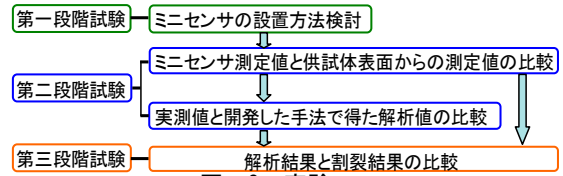


図-2 実験フロー

表-1 第一段階試験のミニセンサ設置手順

| ケース1 | ケース2 | ミニセンサ設置手順 |
|------|------|--------------|
| ○ | ○ | 母材コンクリート掘削 |
| ↓ | ○ | 基盤となるモルタルを敷設 |
| ○ | ○ | ミニセンサ設置 |
| ○ | ○ | 補修モルタル充填 |

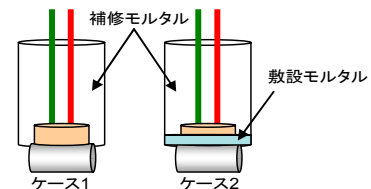


図-3 第一段階試験のミニセンサ設置方法

*1 金沢工業大学大学院 環境土木工学専攻 博士前期課程 (正会員)

*2 金沢工業大学 環境・建築学部 准教授 博(工) (正会員)

*3 鹿島建設株式会社 技術研究所 土木材料グループ 博(工) (正会員)

*4 鹿島建設株式会社 技術研究所 建築生産グループ 修(工) (正会員)

ケース 2 では、基盤となるモルタルを予め敷設し、その後ミニセンサを鉄筋に押し当てることにより、ミニセンサと鉄筋の間における空隙を無くした上で、モルタルを打設した。

ケース 1 及びケース 2 の供試体概要を、図-4 および図-5 に示す。何れも塩害によって劣化した鉄筋コンクリート部材に断面修復を適用した補修部を模擬した供試体である。そのため、既設部のコンクリート(W/C:50%, NaCl:15kg/m³)を打設後に、補修部にミニセンサを設置し、さらに補修部のモルタル(W/C:50%)を打設した。なお、腐食箇所を詳細に検討するため、分割鉄筋を用いた。この分割鉄筋は釣り糸により所定の位置で吊り下げ、打設後に釣り糸を抜き取った。気温 20℃、湿度 80% の環境下へ 3 ヶ月間に亘り暴露した後、既設部コンクリートへφ20mm のドリルを用い、鉄筋が露出する深さまで掘削した。その後、表-1 および図-3 の方法に従いミニセンサを設置した。なお、ミニセンサを設置した後に充填するモルタルは、補修部に使用したモルタルと同じものを使用した。また、ミニセンサを設置した後も、気温 20℃、湿度 80% の環境下で暴露を継続した。

(2) 測定手順

ミニセンサを用いて、交流インピーダンス法により分極抵抗を測定した。また、比較のため、供試体の表面に対極板と参照電極を用いても、分極抵抗を測定した。なお、測定は鉄筋を分割した状態で行った。

2.2 実験結果

(1) ケース 1

ケース 1 の暴露 3 ヶ月目(ミニセンサ設置直後)の鉄筋要素番号 14 に対する測定から得られたボード線図を図-6 に示す。これから認められる様に、ケース 1 ではミニセンサによる分極抵抗の測定が不可能であった。これは、ミニセンサと鉄筋の間に空隙が生じており、不電導であったためと考えられる。

(2) ケース 2

ケース 2 の暴露 3 ヶ月目(ミニセンサ設置直後)の鉄筋要素番号 15 に対する測定から得られたボード線図を図-7 に示す。この図によれば、ミニセンサでも分極抵抗の測定が可能であったことが認められる。これは、敷設モルタルが充填されたことにより、電気的な絶縁が抑制されたためと考えられる。

図-8 にケース 2 のミニセンサと供試体表面に対極板を用いて測定された分極抵抗の分布を示す。これによれば、ミニセンサを用いた測定値からも供試体表面からの測定値からも、補修材側が非腐食になり、一方既設コンクリート側が腐食していることを確認できる。

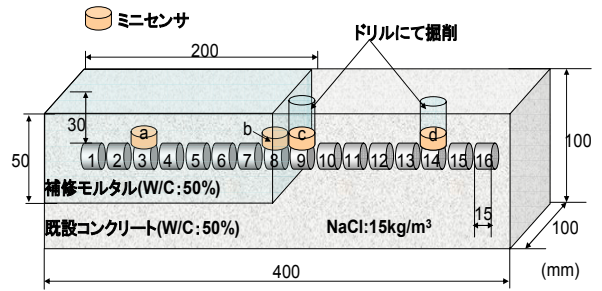


図-4 ケース 1 供試体概要

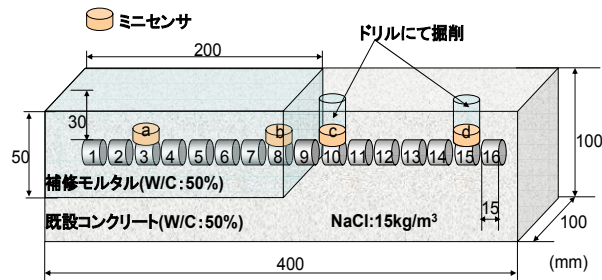


図-5 ケース 2 供試体概要

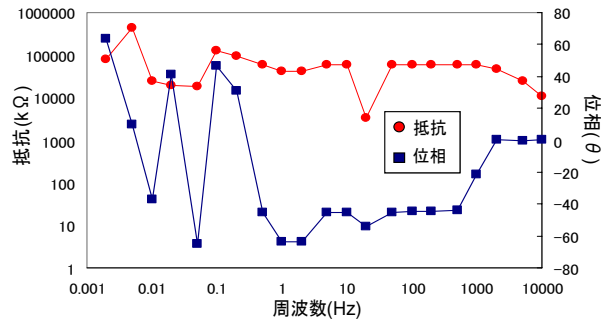


図-6 ケース 1 で測定されたボード線図

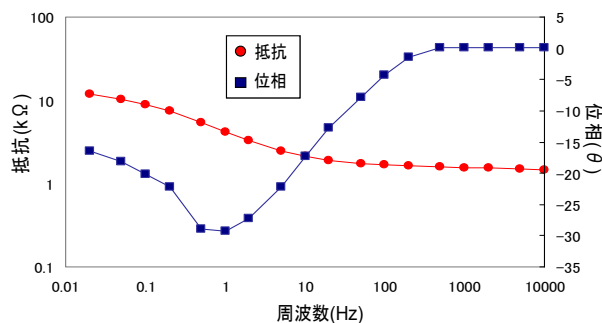


図-7 ケース 2 で測定されたボード線図

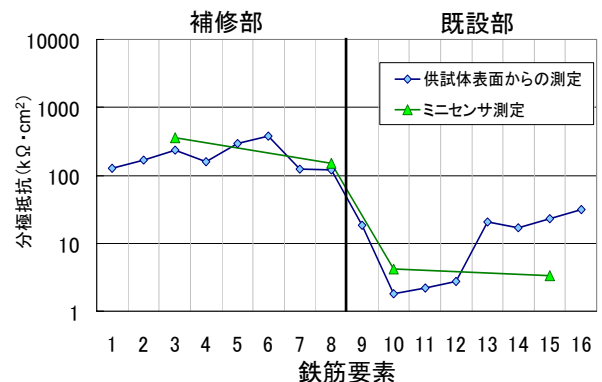


図-8 異なる測定ツールを用いた分極抵抗の比較

3. 第二段階試験

3.1 実験手順

(1) 供試体

本章では、第一段階試験で測定可能なことを確認できたケース 2 を元に検討を行った。すなわち、図-5 に示す供試体で実験した。

(2) 測定手順

測定項目およびそれぞれの概要を、表-2 および図-9 に示す。

ここで、項目 4 において、マクロセル電流を実測する方法を説明する。まず、全ての隣接する鉄筋要素間に無抵抗電流計を接続し電流を求めた。そして、任意の鉄筋要素の両端から流入するマクロセル電流を合計し、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電流密度を算出した。例えば、図-10 に示す鉄筋要素 i のマクロセル電流密度 (a_i) は、式(1)で表せる。

$$a_i = \frac{A_{i-1,i} - A_{i+1,i}}{d_i \cdot \pi \cdot L_i} \quad (1)$$

ここに a_i : マクロセル電流密度 (A/cm²)

$A_{i-1,i}$, $A_{i+1,i}$: 流入する電流 (A)

d_i : 鉄筋要素 i の直径 (0.9cm)

L_i : 鉄筋要素 i の長さを表す。(1.5cm)

次に、項目 3 において、マイクロセル電流を実測する方法を説明する。ここではまず、各鉄筋要素の分極抵抗を測定した。例えば、図-11 に示す鉄筋要素 i のマイクロセル電流密度 (b_i) は、式(2)で表せる。

$$b_i = \frac{K}{R_{pi} \times A} \quad (2)$$

ここに b_i : マイクロセル電流密度 (A/cm²)

R_{pi} : 分極抵抗 (Ω)

K : 0.0209 (V)

A : ミニセンサの測定対象となる表面積 (4.24cm²)

(3) 解析手順

文献 3) および文献 6) に基づき、ミニセンサによって測定された電位、分極抵抗およびコンクリート比抵抗を代入値として、マクロセル腐食電流およびマイクロセル腐食電流を解析した。次にその概要を述べる。

表-2 測定項目 (第二段階試験)

| 項目番号 | 測定ツール | 設置箇所 | 測定項目 | 鉄筋状態 |
|------|-----------|---------|-----------------------|------|
| 1 | ミニセンサ | 供試体内部 | 電位, 比抵抗 | 分割 |
| 2 | | | 分極抵抗, | 接続 |
| 3 | 参照電極, 対極板 | 供試体表面 | 分極抵抗 | 分割 |
| 4 | 無抵抗電流計 | 分割鉄筋要素間 | マクロセル電流 ⁵⁾ | 接続 |

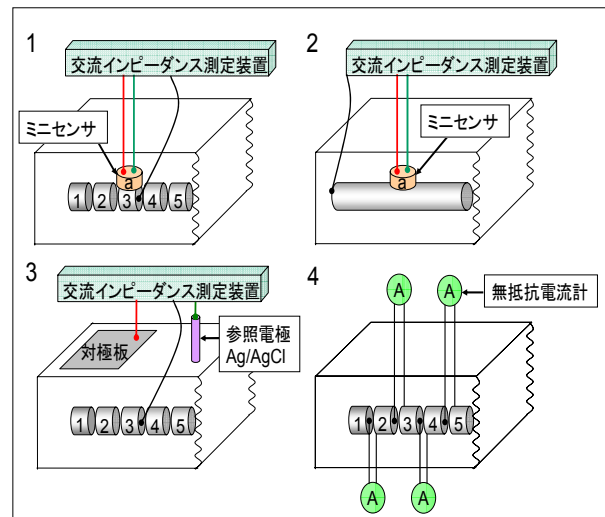


図-9 測定概要 (第二段階試験)

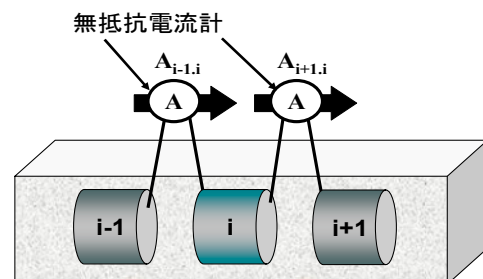


図-10 マクロセル電流の測定

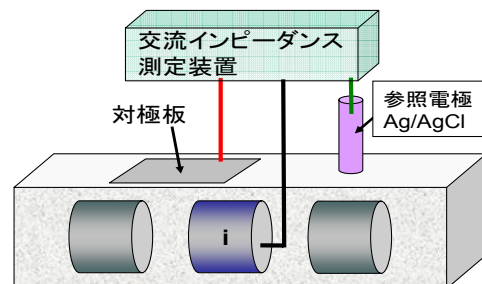


図-11 マイクロセル電流の測定

図-12に、鉄筋コンクリート中に形成するマクロセルをモデル化した電気回路を示す。この回路は、分極抵抗およびコンクリート比抵抗により構成される。さらに、鉄筋電位を、電気回路の境界条件として代入する。ここで、式(3)に示すオームの法則に基づき、任意の2点間に流れる電流を算定する。

$$c_i = \frac{V_j - V_k}{R} \quad (3)$$

ここに c_i : マクロセル電流 (A)

V_j, V_k : 任意の点における電位 (mV)

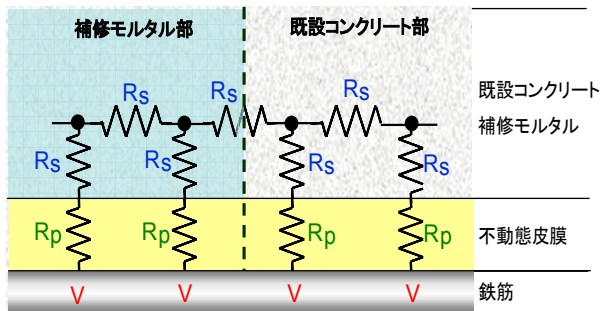
R : 任意の点の間の電気抵抗 (kΩ)

また、コンクリート内部の任意の点において、隣接する点から流入する電流の和は0となる。例えば、図-13に示す点0においては、次式が成立する。

$$\sum_n I_i = I_1 + I_2 + I_3 = 0 \quad (4)$$

式(4)に、式(3)を代入すると、次式が導かれる。

$$\frac{V_1 - V_0}{R_1} + \frac{V_2 - V_0}{R_2} + \frac{V_3 - V_0}{R_3} = 0 \quad (5)$$



R_p 分極抵抗(kΩ) R_s コンクリート比抵抗(kΩ) V 電位(mV)

図-12 マクロセルを模擬した電気回路

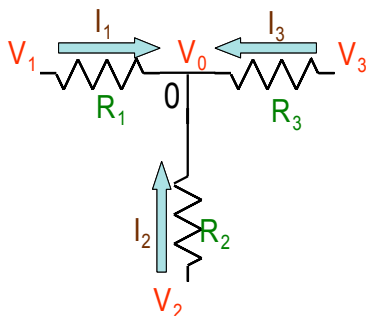


図-13 任意の点における電流

対象部材内部の全点において、式(5)に相当する式を構築する。その後、全ての式を連立方程式として、全点の電位を算定する。最後に、隣接する2点の電位および2点間の電気抵抗を式(3)に代入して、要素間を流れるマクロセル電流を算定する。すなわち、鉄筋コンクリート部材において、コンクリート比抵抗、分極抵抗および鉄筋電位を測定し、これらよりマクロセル電流を解析した。さらに、各ミニセンサの測定対象を図-14に示すとおりに仮定し、該当する鉄筋の表面積で除すことで、マクロセル電流密度に変換した。これは、打継目近傍では、電位分布および分極抵抗分布の変化が大きいことが予想されるため、細かく評価した。一方、打継目から離れた鉄筋では、電位分布および分極抵抗分布が概ね均一になるため、平均化した値を使用した。また、ミニセンサで測定された分極抵抗は、式(6)を用いてマイクロセル電流密度に変換した。なお、本実験で算出するマイクロセル腐食電流密度はミニセンサにより測定された項目2を使用する。すなわち、鉄筋を接続状態で測定した分極抵抗を使用する。

$$b_i = \frac{K}{R_{pi} \times A} \quad (6)$$

ここに b_i : マイクロセル電流密度 (A/cm²)

R_{pi} : 分極抵抗 (Ω)

K : 0.0209 (V)

A : ミニセンサの測定対象となる表面積 (cm²)

なお、本研究では、マクロセル電流密度とマイクロセル電流密度の和を、総腐食電流密度とした。

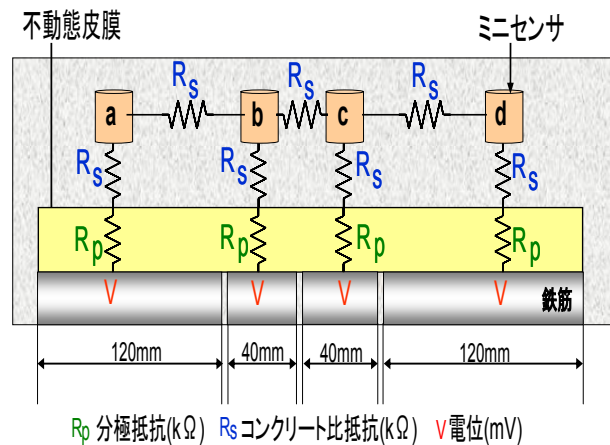


図-14 各ミニセンサの解析範囲

3.2 実験結果

(1) 測定結果

図-15は、暴露3ヶ月目(ミニセンサ設置直後)および暴露4ヶ月目(ミニセンサ設置1ヶ月後)に、供試体内部のミニセンサで測定された項目1による分極抵抗と、供試体表面から測定された項目3による分極抵抗の関係を示す。これによれば、ミニセンサで測定された分極抵抗と、供試体表面から測定された分極抵抗の両者は、概ね同等であることが確認できた。

(2) 解析結果

図-16は、暴露3ヶ月目(ミニセンサ設置直後)および暴露4ヶ月目(ミニセンサ設置1ヶ月後)に、3.1(2)項目3および4によって実測された総腐食電流密度と、3.1(3)によって解析された総腐食電流密度の関係を示す。なお、解析に要するミニセンサ測定値は、鉄筋を接続した状態での測定値、すなわち項目2を適用した。この図によれば、両者はともに補修部で腐食電流密度が無く、一方既設部で腐食電流密度は高い。すなわち、両者は同等の傾向であることが認められる。

4. 第三段階試験

4.1 実験手順

(1) 供試体

図-17に供試体の概要を示す。これも、第二段階試験と同様な供試体である。ただし、鉄筋は分割しておらず、長さが32cmの連続したものである。また、補修材料は、表-3に示す3種類を用いた。ここで、ケースCに用いたPCMの配合を表-4に示す。この供試体を気温20℃、湿度80%の環境下で17ヶ月間に亘り暴露した。その後、室温40℃、湿度60%の環境下で4ヶ月促進暴露した。

(2) 測定手順

測定項目を表-5に示す。ここで、項目8の測定には、各補修材から採取した1gの試料を、蒸留水10mlに溶かし、50℃で24時間保管した後に、20℃の環境で24時間静置した。その溶液の塩化物イオン含有量を測定した。

4.2 実験結果

図-18に、項目番号6により解析された結果を示す。また、図-19、図-20および図-21に、項目番号7により観察された結果を示す。これらによれば、非腐食状態での総腐食電流密度を0とすると、解析結果より腐食電流密度が卓越している箇所と、実際に腐食していた箇所は、合致していることがわかる。

なお、実験結果によれば、ケースAおよびケースBにおいては補修部(ケースAのaとケースBのb)で腐食が確認された。この結果を踏まえて、項目8によって補修部腐食箇所付近の可溶性塩化物イオン濃度を測定した。その結果を表-6に示す。ここで、可溶性塩化物イオン

濃度は全塩分濃度よりも小さいにも拘わらず、ケースAおよびケースBにおける補修部での可溶性塩化物イオン濃度は、腐食発生限界塩化物イオン濃度⁷⁾の1.2kg/m³を超えている。このことから、補修部での腐食は既設部からの塩化物イオンの移動に起因するためと示唆される。

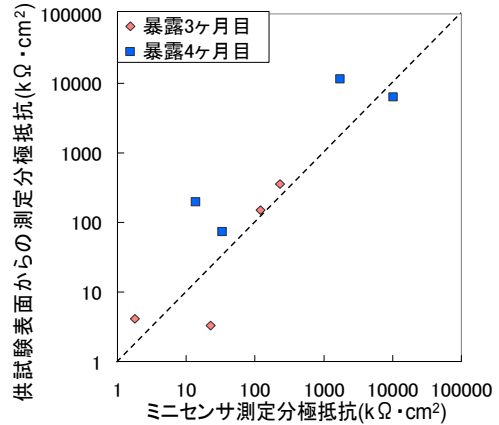


図-15 異なる測定ツールを用いた分極抵抗の比較

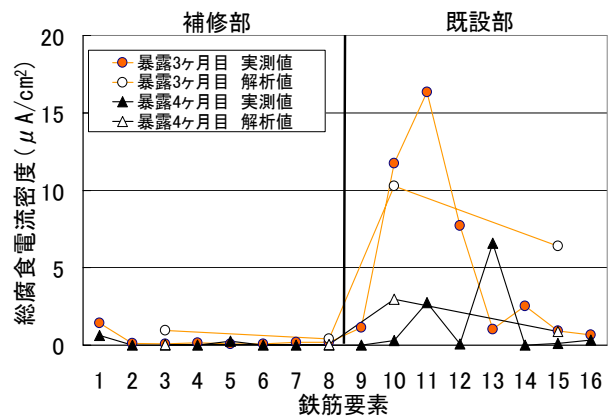


図-16 総腐食電流密度の実測値と解析値の比較

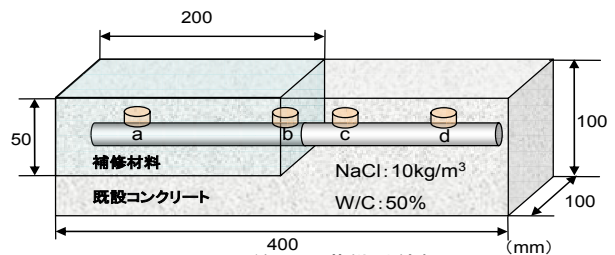


図-17 第三段階供試体概要

表-3 各ケースの補修材料

| ケース | 補修材料 |
|-------|-----------------|
| ケース A | W/C : 50% モルタル |
| ケース B | W/C : 100% モルタル |
| ケース C | PCM |

表-4 PCM 配合

| 水 | 結合材 | ポリマー混和材 |
|-----------|-----------|------------|
| 0.90 (kg) | 0.44 (kg) | 10.00 (kg) |

表-5 測定・解析項目(第三段階試験)

| 項目番号 | 項目 |
|------|-------------------------|
| 5 | 電位, 分極抵抗, ミニセンサ間の比抵抗の測定 |
| 6 | 3章で開発した手法による腐食電流密度の解析 |
| 7 | 割裂による腐食箇所の確認 |
| 8 | 可溶性塩化物イオン含有量の測定 |

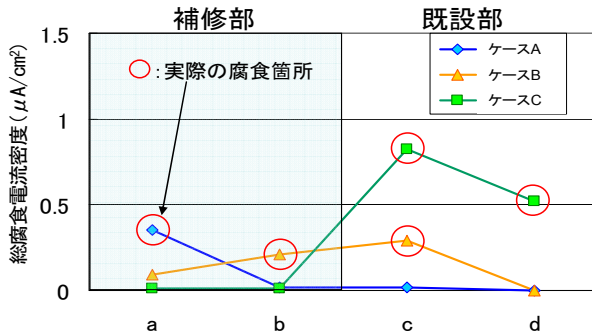


図-18 第三段階試験における解析結果

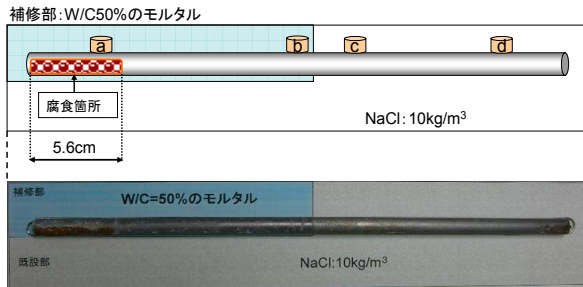


図-19 ケース A 割裂結果

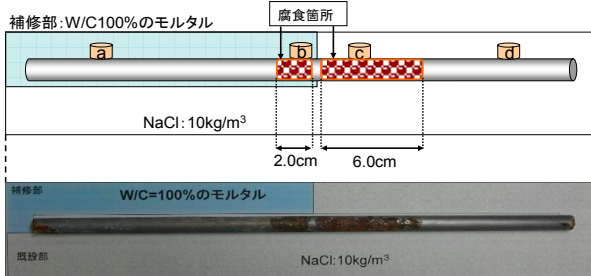


図-20 ケース B 割裂結果

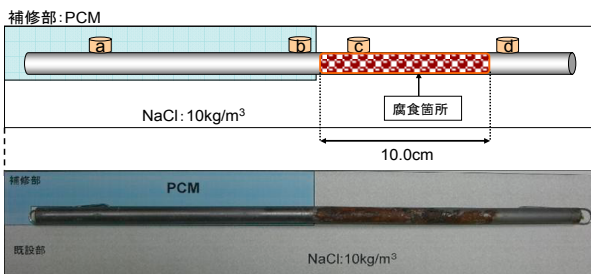


図-21 ケース C 割裂結果

表-6 補修部での可溶性塩化物イオン濃度

| | 可溶性塩化物イオン濃度 |
|-------|-------------|
| ケース A | 1.9kg/m³ |
| ケース B | 2.0kg/m³ |

5. まとめ

本研究で得られた主な結論を以下に示す。

- (1) 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を開発できた。すなわち、開発された手法による腐食電流の解析値は、従来の方法⁵⁾による腐食電流の実測値と同等であった。
- (2) 分極抵抗について、供試体表面に設置された参照電極と対極板を用いて測定された値と、供試体内部に埋設されたミニセンサを用いて測定された値は、同等になった。
- (3) 塩化物イオンが既設部から補修部に拡散することによって発生した再劣化や、既設部の打継目近傍で発生したマクロセル腐食を、開発された手法によって検知することができた。また、これらの結果は割裂結果と合致していた。

参考文献

- 1) 長滝重義, 大即信明, 守分敦郎, 宮里心一: 鉄筋コンクリート部材の断面修復部における腐食形成に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.544/V-32, pp.109-119, 1996
- 2) 出村克宜, 大濱嘉彦, 伊部博: 補修後5年を経過した鉄筋コンクリート構造物の鉄筋腐食, コンクリート構造物の補修工法と電気防食に関するシンポジウム論文報告集, pp.29-32, 1994
- 3) 平石陽一, 宮里心一, 海野統彦, 藤本一男: 既存鉄筋コンクリートにおけるマクロセル腐食速度モニタリング手法の提案, 材料, Vol.57, No5, pp.502-508, 2008
- 4) 下澤和幸, 田村博, 永山勝, 山本祐子: コンクリート構造物の鉄筋腐食遠隔モニタリング, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No2, pp.878-882, 1998
- 5) 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集, Vol.23, No2, pp.547-552, 2001
- 6) 宮里心一, 大即信明: 既存鉄筋コンクリート部材中のマクロセル腐食速度の推定, コンクリート工学論文集, Vol.12, No.2, pp.93-103, 2001
- 7) 土木学会: コンクリート標準示方書維持管理編, pp.115, 2007