

PC 橋の改造技術に関する研究

— その 6 : 断面修復後のマクロセル腐食に関する研究 —

北野 勇一^{*1}・渡辺 博志^{*2}・久田 真^{*3}・北山 良^{*4}

1. ま え が き

既設 PC 構造物をできるだけ長く供用するには、構造物の損傷状況に応じ、的確な補修あるいは補強を施す必要がある。とくに、塩害を受けた PC 橋の補修方法の一つである断面修復工法を適用する場合には、塩分を多く含む部位をできるだけ取り除き、生じている損傷をそれ以上進行させないように手当てを施すことが肝要である。一方、プレストレスの変化が構造物に与える影響を考えると、構造物に侵入した塩分を完全に取り除くには限界がある。このように、既設 PC 構造物に塩分が残留したままの補修は、図 - 1 に示すようなマクロセルが形成され、鋼材腐食を引き起こす可能性があると考えられている。しかしながら、マクロセル腐食を考慮した材料・施工方法の選定手法は確立されておらず、断面修復工法を採用した際の補修効果に対する信頼性が十分に得られていないのが現状である。

そこで、本研究では、鋼材腐食に関わる断面修復材の物性を把握したうえで、種々の要因が既設部と断面修復部との間に形成されるマクロセルに及ぼす影響について実験を行い、マクロセル腐食の発生機構やその後の腐食速度について詳細な検討を行った。また、これらの検討結果を基に、断面修復後の再劣化に配慮すべき事項について整理した。

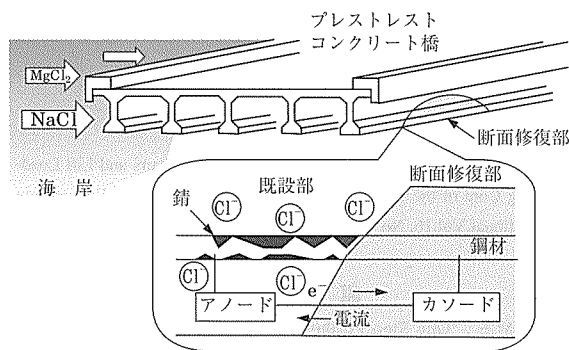


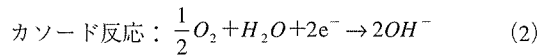
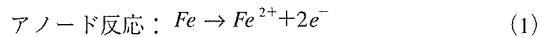
図 - 1 マクロセル腐食の発生機構の模式

2. マクロセル腐食に関する整理

2.1 マクロセル腐食の発生機構

コンクリート中の鋼材の腐食は、式 (1)、(2) に示されるように、アノード域とカソード域の電子の授受に伴う酸

化還元反応により生じたアノード域の鉄イオンが、酸素や水と結びつくことによりもたらされるものである。



この2つの化学反応は同時に同じ速度で進行し、鋼材表面上で微小な距離で近接している場合をマイクロセル腐食反応、ある距離をもって離れている場合をマクロセル腐食反応と呼ぶ。また、断面修復を行った構造物で懸念されているマクロセル腐食は、図 - 2 に示すようなマクロセル電流回路を形成して化学反応が推し進められる。

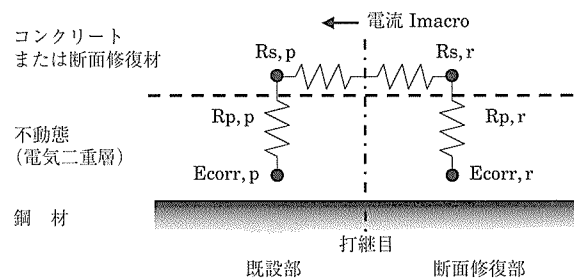


図 - 2 想定されるマクロセル電流回路

2.2 マクロセル形成後の腐食速度に及ぼす要因

コンクリート中の鋼材腐食に及ぼす主な要因については、塩化物イオン濃度や、含水状態、コンクリートの透過性、温度など非常に多岐にわたる。厳密に言えば、これらをすべて考慮することが望ましいが、そのすべてを検討対象とすることは現実的ではなく、とくに影響が大きいと思われる要因を絞ったうえで実験的検討を行うことになる。以下に、マクロセル形成後の腐食速度に関する検討を進めるにあたって解決すべき課題点について概説する。

(1) 塩化物イオン濃度差

塩化物イオン濃度がコンクリート中の鋼材の腐食速度に与える影響は、これまでに多くの研究がなされてきており、その評価手法も提案されている²⁾。しかしながら、これらの研究は、塩化物イオン濃度の分布に大きな変化がないと考えられる新設構造物を対象としており、主にマイクロセル腐食反応に着目したものであるといえる。

一方、断面修復が施された既設構造物中の鋼材の腐食速

^{*1} Yuichi KITANO : プレストレスト・コンクリート建設業協会
^{*2} Hiroshi WATANABE : 独立行政法人土木研究所
^{*3} Makoto HISADA : 東北大学大学院 准教授
^{*4} Ryo KITAYAMA : プレストレスト・コンクリート建設業協会

度は、ミクロセル腐食反応のほかに、塩化物イオン濃度差に起因する既設部と断面修復部との間の電位差が駆動力となって生じるマクロセル腐食反応の影響を加味する必要がある。

(2) 環境条件

構造物の外部環境のうち、温度と湿度がマクロセル形成後の腐食速度に大きな影響を及ぼすことが実験的に確認されている³⁾。しかしながら、これらの要因がマクロセル腐食に直接関与する要因（電位差や抵抗）に及ぼす影響はあまり明確になってない。また、構造物には降雨が直接かかるなど、実環境と試験環境との関連性を検討した事例も少ない。このように、断面修復後の鋼材の腐食速度を定量的に把握するためには、構造物の周辺環境がマクロセル形成に及ぼす影響について明らかにする必要がある。

(3) 電気的性質

マクロセル形成とその後の腐食速度を予測するためには、断面修復材の電気抵抗を把握する必要がある。また、鋼材表面の分極抵抗については、鋼材周囲の pH や塩化物イオンの存在などの影響が大きいとされている。したがって、断面修復材は適度な電気的性質を有するとともに、劣化因子の侵入に対する抵抗性などの適切な物性（とくに、塩化物イオン透過阻止性）を持ち合わせることも求められる。

(4) アノード・カソード面積比

供試体実験によりマクロセル腐食の形成状況を確認した結果によると、アノード面積に比してカソード面積の大きな方が単位面積あたりのアノード反応は大きくなり、電流密度は大きくなる。また、アノード・カソード面積比の影響をもっとも極端に受けるケースとして、コンクリートのひび割れがあげられ、ひび割れ幅が小さい場合ほど、腐食速度は大きくなる⁴⁾。

一方、既設 PC 構造物に対して断面修復工法を適用した場合には、一般的にひび割れが生じていない状態に修復されることから、アノード・カソード面積比がひび割れ部に特有の状況にあるとは考えにくい。ただし、断面によっては、打継目を介した断面修復部の鋼材量が既設部のそれと異なる場合があるため、アノード・カソード面積比の影響についても把握しておく必要がある。

なお、上記の4つの要因とは別に、式(2)に示されるように腐食反応には酸素が必須となることから、カソード域（断面修復部）の鋼材周辺への酸素の供給が不足することにより腐食反応が抑制される場合も考えられる。

3. 鋼材腐食に関わる断面修復材の物性

2.2節で述べたように、断面修復に用いる材料は、既設部と断面修復部の塩化物イオン濃度差や異なる材料を用いること等によりマクロセル形成が起こりにくいものを選定することが望ましい。そこで、本研究その5⁵⁾で取り上げた材料を用い、電気的性質および塩化物イオン透過阻止性について調査した結果について、以下に詳述する。

3.1 断面修復材の電気的性質

(1) 測定および評価方法

使用材料の配合および圧縮強度を表-1に示す。ここで、

表-1 各種材料の配合および圧縮強度

項目	単位	断面修復材				母材
		PCM	CM	LPCM	高流動	
W/C*	%	(36.5)	(36.4)	(33.7)	40.0	40.0
単位水量	kg/m ³	292	335	273	175	163
圧縮強度**	N/mm ²	40.0	59.1	26.4	65.8	62.1

* () 内は洗い出しによる推定値。また、高流動の水粉体比は 30 %（石灰石微粉末と膨張材を加えている）である。

**圧縮強度試験は JIS A 1108 による（供試体は 28 日間の湿空養生を行った。供試体形状は、モルタルが $\phi 50 \times 100$ mm、コンクリートが $\phi 100 \times 200$ mm）。

モルタル系断面修復材には、ポリマーの有無と種類が異なるものとしてポリマーセメントモルタル（PCM）、セメントモルタル（CM）、軽量骨材を用いたポリマーセメントモルタル（LPCM）を選定した。また、コンクリート系断面修復材として、本研究その4⁶⁾で取り上げた高流動コンクリート（高流動）、既設部のコンクリートとして PC 部材に使用される設計基準強度 40 N/mm² 程度の AE コンクリート（母材）を用いることにした。

各材料の電気的性質を測定するための試料は、これらの材料を用いて JIS A 1132 の圧縮強度に用いる供試体を作製し、材齢 14 日まで水中で養生した後、 $\phi 100 \times 50$ mm を 3 個切り出し、それぞれの環境下（ただし、温度は 20 ℃）で所定の材齢まで静置するものとした。測定方法は、この試料にカルボキシ・メチル・セルロース（略称：CMC）水溶液を塗布した後、銅製の電極板に挟み込み、LCR メータを用いて交流インピーダンス測定を行った（図-3、4）。

交流周波数を変化させて測定した抵抗値より比抵抗を算出した結果を図-5に示す。図より、各材料とも周波数に対する依存性があるものの、今回測定した範囲のどの周波数でも比抵抗の順位は変わらないことが分かる。このことから、今回用いた断面修復材にかぎれば、コンクリート材料で用いられている周波数 1 kHz 程度の測定値を用いて電気抵抗を評価しても差し支えないと考えられる。

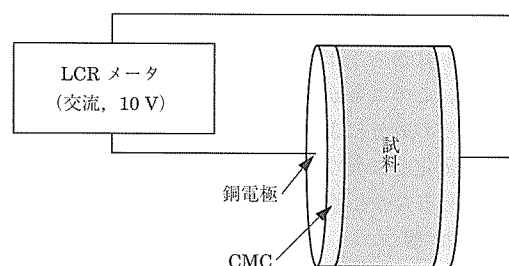


図-3 電気抵抗測定装置

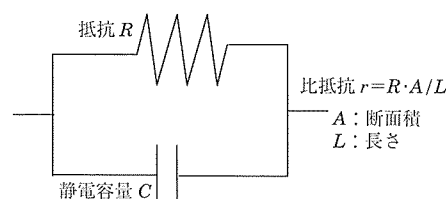


図-4 電気抵抗測定のモデル

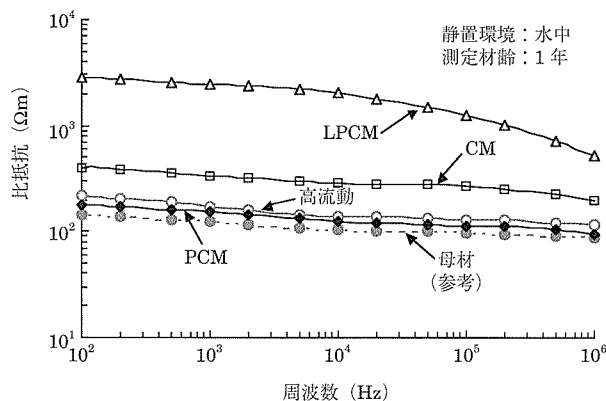


図-5 各種断面修復材のインピーダンス特性

(2) 各種要因が電気的性質に及ぼす影響

a) 断面修復材の種類

飽水状態における各試料の比抵抗を測定した結果を表-2に示す。これより、断面修復材の電気抵抗は、水セメント比40%の母材コンクリートと同等のものから断面修復材LPCMのように10倍以上の値を示すものまでであった。一方、材齢3ヵ月まで湿空環境で静置したコンクリート試料の抵抗を測定した結果、水セメント比40%の場合に113 Ωmであったのに対し、同50%で99 Ωm、同70%で75 Ωmであった。このことから、コンクリートの密実性が比抵抗に及ぼす影響よりも断面修復材の種類の影響の方がはるかに大きいことが分かった。

表-2 各種断面修復材の比抵抗 (単位: Ωm)

材 齢	断面修復材				母 材 (参考)
	PCM	CM	LPCM	高流動	
3ヵ月	76	279	1 015	151	88
1年	152	337	2 495	172	123

* 静置環境を水中とした試料を用い、測定周波数は1 kHzとした。

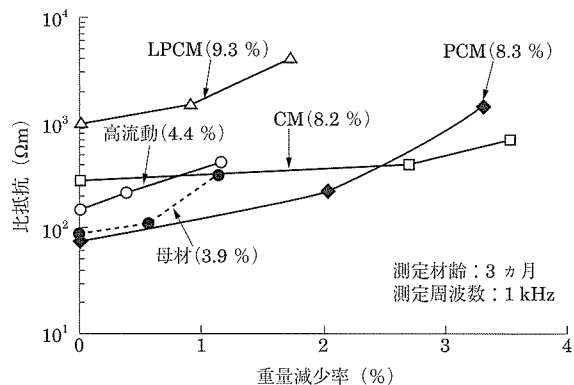
また、各材料とも材齢の進行とともに電気抵抗が増す傾向を示し、とくに、断面修復材PCMと断面修復材LPCMでは材齢3ヵ月から1年までの間に比抵抗が2倍以上に増大していた。このことから、断面修復材に混入されているポリマーなどの成分によっては、セメントの水和反応による組織の緻密化とは異なる要因で長期的に密実になっている可能性があるものと考えられる。

b) 含水状態

所定の養生後、水中、湿空（湿度約90%）および気乾（湿度約60%）のそれぞれの環境にて材齢3ヵ月まで静置した試料を用いて重量減少率および比抵抗を測定した結果を図-6に示す。これより、試料の重量がほとんど変化しない水中環境と比べ、乾燥を受ける環境では材料の比抵抗が数倍から10倍程度まで大きくなっていることが分かる。このように、断面修復部の含水状態が電気抵抗に及ぼす影響は、断面修復材の種類の影響と同様に大きいことが確認された。

c) 塩化物イオンの侵入

塩化ナトリウムを練混ぜ時に混入し、湿空環境で材齢3



() 内は、φ100×20 mm の供試体を105℃で絶乾した状態からの吸水率。

図-6 各材料の含水状態が比抵抗に及ぼす影響

ヵ月まで静置した試料を用いて電気抵抗を測定した。その結果、各断面修復材において塩化ナトリウムを混入しない場合と比べ、塩化物イオン量を1.8 kg/m³混入した場合の平均が87%、4.5 kg/m³混入した場合で平均が78%となった。このように、塩化物イオンの侵入により、断面修復部の電気抵抗は低下するものの、断面修復材の種類や含水状態が電気抵抗に及ぼす影響よりも小さいことが分かった。

3.2 断面修復材の塩化物イオン透過阻止性

(1) 測定および評価方法

塩化物イオンの侵入に対する抵抗性を評価する方法としては、①浸せき試験や屋外暴露試験から評価する方法、②成分や配合（水セメント比など）から推定する方法、③急速塩分浸透性試験⁷⁾により評価する方法などがある。このうち、方法①では緻密な断面修復材について定量的な評価結果を得るのに年月を要し、方法②に関してはさまざまな断面修復材に適用できる推定方法が確立されていない。そこで、本研究では電気泳動（非定常）法を利用した急速塩分浸透性試験（略称、RCPT）を用い、各種断面修復材の塩化物イオン透過阻止性を評価することにした。

測定に用いる試料は、3.1節にて電気的性質を調べた試料と同じ要領で作製し、材齢3ヵ月まで湿空環境で静置したものを3対用意した。この試料を真空状態で飽水にした後、図-7に示す電気泳動装置に設置し、30 Vの直流電圧をそれぞれ6時間、15時間、30時間まで通電した。通電終了

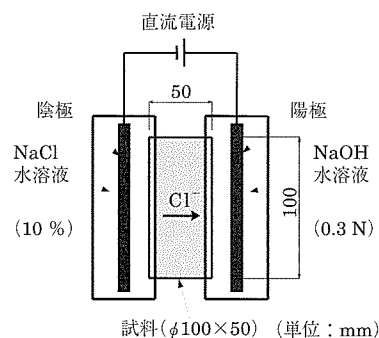


図-7 RCPT に用いる電気泳動装置

後、試料の割裂面に 0.1 N 硝酸銀水溶液を噴霧し、呈色状況より陰極側からの塩分浸透深さを測定した。また、通電時間と塩分浸透深さの関係から求められる塩化物イオン移動速度 k を基に、式 (3) により各試料の拡散係数 D を算出した。

$$D = k \cdot \frac{RT}{zF} \cdot \frac{L}{\Delta\phi} \quad (3)$$

ここで、 k ：塩化物イオン移動速度 (m/sec)
 R ：気体定数 (= 8.3145 J/mol · K)
 T ：溶液温度 (K)
 z ：塩化物イオンの価数 (= 1)
 F ：ファラデー定数 (= 96 485.3 C/mol)
 L ：試料の厚み (= 0.05 m)
 $\Delta\phi$ ：試料にかけた電圧 (V)

(2) 各種要因が塩化物イオン透過阻止性に及ぼす影響

a) 断面修復材の種類

RCPT において試料を通過した電流量と、通電後の塩分浸透深さの関係を調べた結果を図 - 8 に示す。ここで、各試料とも、通電中の電流量はおおむね一定値を示し、陰極－陽極間の電圧は平均 28.2 ～ 29.6 V、陰極側の溶液温度は平均 15.5 ～ 22.1 °C (288.6 ～ 295.3 K) であった。図より、母材コンクリートを含め、いずれの断面修復材とも通過電流量と塩分浸透深さに相関性が見られた。

図 - 8 の結果を基に算出した塩化物イオンの拡散係数と 3.1 節にて測定した比抵抗との関係を図 - 9 に示す。これより、いずれの断面修復材においても、 $W/C = 40\%$ で作成した母材コンクリートが有する塩化物イオン拡散係数と同等かそれ以下となった。このことから、今回用いた断面修復材にかざれば、既設 PC 構造物に用いられるコンクリートと比較して、同等以上の塩化物イオン透過阻止性を有すると考えられる。

また、圧縮強度がもっとも低い断面修復材 LPCM (表 - 1) で塩分浸透深さがもっとも小さくなるなど、圧縮強度や水セメント比などから塩化物イオン透過阻止性を一律には評価できないことも分かった。この点については、断面修復材の成分や配合を明らかにしたうえで、劣化因子の侵入に対する抵抗性について検討されることが望まれる。

b) 初期膨張量

水平打継面を上面とする充てん工法、いわゆる“逆打ち”により断面修復を行う場合、既設部との一体性を高めることを目的に、発泡剤の使用などによる適当な初期膨張性が求められる⁹⁾。この発泡剤は、練混ぜ後数時間から凝結が終了するまでの間に、空気連行剤と同様な気泡分布を導入できるものを用いているが、過度な使用は塩化物イオンの侵入に対し悪影響を及ぼしかねない。そこで、ここでは、前項 a) の検討で用いた試料に加え、発泡剤を 0.3 L/m³、および 1.0 L/m³ 添加した試料を用いて RCPT により塩分浸透深さに及ぼす影響について検討した。

発泡剤の添加量を変えた場合の初期膨張率を表 - 3、塩分浸透深さの測定結果を図 - 10 に示す。ここで、初期膨張率に関しては、導入された空隙率を指標すると、添加量 0.3

L/m³ でおおむね 0.2 %、1.0 L/m³ で 0.6 % 以上の膨張量が得られた。これに対し、塩分浸透深さは発泡剤を添加しない場合と同等かあるいは塩分の浸透を抑制する傾向を示した。

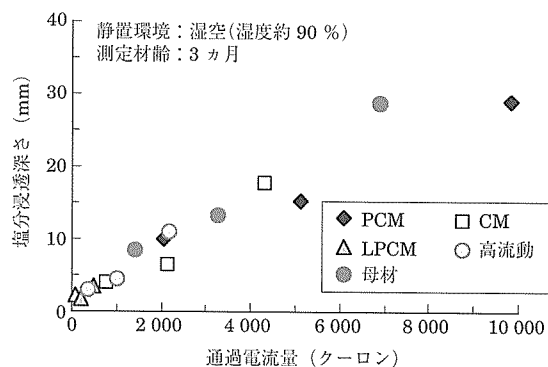


図 - 8 RCPT による通過電流量と塩分浸透深さの関係

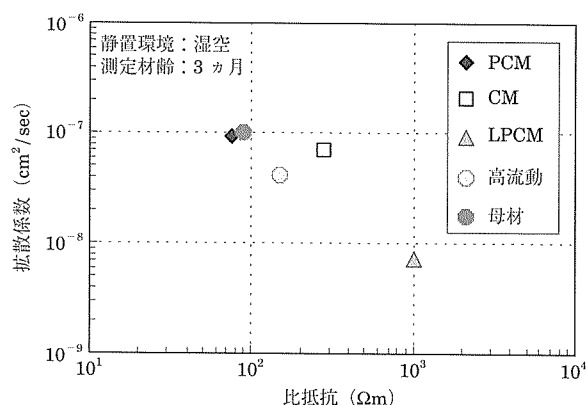


図 - 9 塩化物イオンの拡散係数と比抵抗の関係

表 - 3 発泡剤の添加量と初期膨張率の関係 (単位：%)

発泡剤 (L/m ³)	断面修復材				母 材
	PCM	CM	LPCM	高流動	
0.0	-0.23	-0.17	-0.15	-0.16	-0.47
0.3	0.05 (0.28)	0.02 (0.19)	0.01 (0.16)	0.07 (0.23)	-0.23 (0.24)
1.0	1.45 (1.68)	2.33 (2.50)	0.51 (0.66)	1.32 (1.48)	0.22 (1.69)

() 内は、発泡剤 0.0 L/m³ との初期膨張率の差。空隙導入率 (%) と称す。

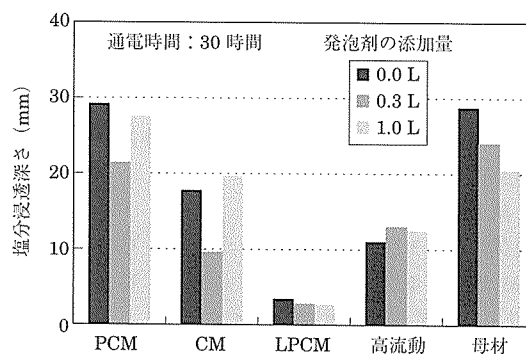


図 - 10 発泡剤の添加が塩分浸透深さに及ぼす影響

このことから、今回確認した初期膨張率の範囲であれば、発泡剤の使用が塩分浸透性に悪影響を及ぼすことがないことが分かった。

4. マクロセル腐食に関する実験的検討 8, 9, 10)

4.1 検討概要

2章で述べたように、マクロセル腐食に影響を及ぼす要因として、塩化物イオン濃度差、環境条件、電気的性質、アノード・カソード面積比があげられ、これらの組合せによる影響について検討する必要がある。そこで、本研究では、マクロセル腐食電流量を直接評価することを目的として、表 - 4 に示す 3 シリーズの実験を行うことにした。ここで、実験Ⅰ、Ⅱは、モルタル系断面修復材に着目し、黒皮付きの異形鉄筋を用いて供試体を作製し、JCI - SC3 の乾湿繰返し法による促進環境あるいは屋外環境で同時期より試験を実施した。また、実験Ⅲは、鋼材の質量減少率の測定精度を向上させるため、みがき棒鋼に変更し、コンクリート系断面修復材を含め、促進試験を実施した。

なお、本研究では既設 PC 構造物を想定しているため、既設部には水セメント比 40 % のコンクリートを用い、中性化やひび割れの影響については考慮しないものとした。

表 - 4 マクロセル腐食評価試験のパラメータ設定

パラメータ		実験シリーズ		
		I	Ⅱ	Ⅲ
Cl ⁻ 混入量 (kg/m ³)	既 設 部	0.9 ~ 13.5		0 ~ 9.0
	断面修復部	0		0 ~ 1.8
断面修復材の種類	モルタル系	3		
	コンクリート系	0		1
アノード・カソード面積比 (Lp/Lr)		1/3 ~ 2		1
鋼 材		D 13 (黒皮付き)		φ 13 (みがき棒鋼)
試験環境		促進	暴露	促進
試験期間		140 日	710 日	140 日

4.2 マクロセル腐食評価試験方法

(1) 供 試 体

供試体は、図 - 11 に示すように既設部の長手方向に断面修復部を打ち継いだ 100 × 100 × 400 mm の形状を基本とし、鋼材は一般的な PC 橋の最小かぶりである 25 mm を確保するように、それぞれの部位に分割して配置した。この分割鋼材は、供試体の外部でリード線を接続し、電気的に 1 本の鋼材となるようにした。また、既設部（実験Ⅲの一部は断面修復部）には、所定の塩化物イオン量になるように原子量に応じて 58.4 / 35.5 倍の塩化ナトリウムを練混ぜ時に混入した。このように作製した供試体は、約 1.5 ヶ月まで湿空養生を行った。

(2) 試験方法

促進試験は、3 日間の湿潤期間（温度 65 °C ± 3 °C、湿度 90 ~ 95 %）と 4 日間の乾燥期間（温度 13 °C ± 2 °C、湿度 60 % 以下）を組み合わせ 1 サイクルとし、合計 20 サイクルまで実施した。

暴露試験は、内陸環境（茨城県つくば市）にて、かぶり

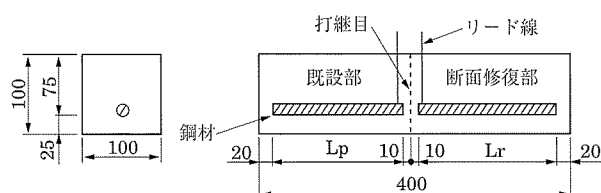


図 - 11 マクロセル腐食評価試験に用いる供試体

側を上面とした供試体を人工芝の上に設置した。暴露試験は 2004 年 11 月に開始し、2 年弱（710 日間）まで実施した。

(3) 測定方法

試験中には、ひび割れ観察を行うとともに、文献 8) を参考にして、自然電位およびマクロセル電流量を測定した。ここで、マクロセル電流は、断面修復部から既設部に流れる場合、すなわち、既設部がアノードとなる場合を正の電流とした。また、試験後には、供試体を解体して鉄筋を取り出し、腐食状況の確認と質量減少率の測定を実施した。

4.3 各種要因がマクロセル腐食に及ぼす影響

(1) 塩化物イオン濃度差

促進試験を行った実験Ⅰのうち、断面修復材 LPCM を用いた場合の鉄筋の腐食状況を確認した結果を図 - 12 に示す。これより、塩化物イオンを混入した既設部で腐食が生じており、塩化物イオン濃度差が大きくなるにしたがい、軽微な腐食から全面腐食へと移行した。この傾向は、他の断面修復材でもおおむね同様であったが、断面修復材 PCM では、いずれの供試体の断面修復部にも、軽微な腐食が見られた。

また、実験Ⅰの湿潤期間に着目し、マクロセル電流量を測定した結果を図 - 13 に示す。ここで、乾燥期間中の電流量は、湿潤期間よりも大幅に小さい値であった。これより、断面修復材の種類によって電流の大きさは異なるものの、塩化物イオン濃度差の増加に伴い電流量も増大する傾向を示した。このことから、既設部により多くの塩分を残留させるほど、マクロセル電流が増大し、しいては鋼材腐食を助長することが分かった。

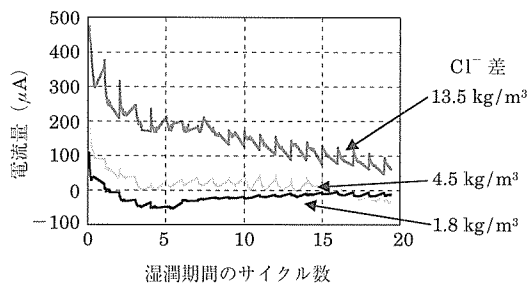
なお、各サイクルにおけるマクロセル電流は、断面修復材 LPCM を除き、大きく増減する傾向は見られなかった。このことから、断面修復材 PCM と断面修復材 CM では、促進試験の乾燥期間中に十分な酸素の供給があったものと

Cl ⁻ 差 (kg/m ³)	腐食状況		備 考
	既設部	断面修復部	
0.9			ひび割れなし
1.8			
4.5			既設部に 0.05 mm のひび割れ発生
13.5			既設部に 0.7 mm のひび割れ発生

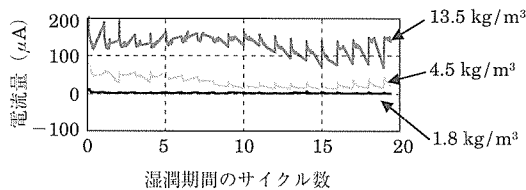
* 腐食状況は、上側をかぶり側として、側面(黒が腐食部)を描写した。

図 - 12 腐食状況（実験Ⅰ，断面修復材 LPCM）

a) 断面修復材 PCM



b) 断面修復材 CM



c) 断面修復材 LPCM

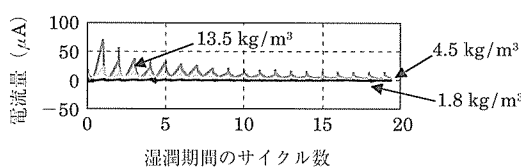


図 - 13 マクロセル電流量の測定結果 (実験 I)

考えられる。一方、断面修復材 LPCM では各サイクルとも、湿潤期間の途中でマクロセル電流が急激に小さくなっており、断面修復部の酸素が不足し、マクロセル腐食反応が抑制されていた可能性がある。

(2) 環境条件

暴露試験を行った実験Ⅱにおいて、もっとも電流量が大きく生じた夏場の期間のマクロセル電流を測定した結果を図 - 14 に示す。図には、測定された電流の瞬時値より、24 時間あたりの積算電流量を算出した結果や、外気温、降水量の観測結果を併記した。これより、暴露環境におけるマクロセル電流は、短時間に大きく変化していることが分かる。また、1 日ごとの 24 時間あたりの積算電流量の変動に着目すると、降雨後の数日間は電流量が大きくなることと、降雨がないと電流量はしだいに小さくなることが分かる。

図 - 15 には、実験Ⅱにおいて降雨前後の 1 日のマクロセル電流の変化を供試体温度との関係として示した。図には、同じ条件の供試体で促進試験を行った実験Ⅰの結果も併せて示した。これより、降雨前の電流量は降雨後と比べ相対的に小さくなっていることが分かる。また、マクロセル電流は、降雨の有無にかかわらず、温度が高くなるにしたがい、電流量が増大するアレニウス型の温度依存性を示した。これに対し、促進試験におけるマクロセル電流は、暴露試験の降雨後の温度依存性におおむね一致した。

以上のことから、実環境におけるマクロセル電流は、湿度や降雨が直接かかる場合の影響を強く受けるとともに、湿度の影響は緩やかではあるが、乾燥が進むとしだいにマクロセル電流が小さくなる傾向が示された。また、今回実

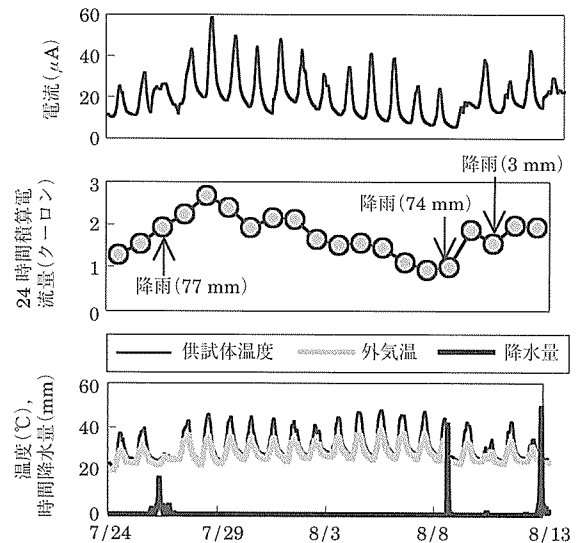


図 - 14 実環境におけるマクロセル電流の推移 (実験Ⅱ, 断面修復材 PCM, Cl⁻差 13.5 kg/m³)

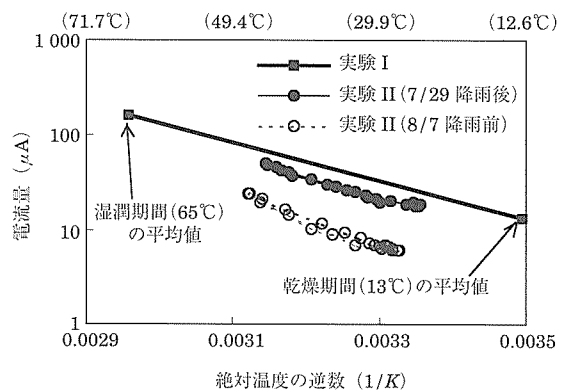


図 - 15 環境温度とマクロセル電流の関係 (断面修復材 PCM, Cl⁻差 13.5 kg/m³)

施した促進試験は、温度範囲の違いを無視すれば、実環境の降雨直後に近い腐食環境を再現していることが分かった。

(3) 断面修復材の電気的性質

3.1 節で述べたように、断面修復材の種類や含水状態の影響が電気抵抗に及ぼす影響が大きい。そこで、促進試験における湿潤期間で測定されたマクロセル電流と電位差の関係を調べた結果を図 - 16 に示す。ここで、自然電位は、リード線を接続しない状態で測定し、既設部と断面修復部の電位差を求めた。また、図には、断面修復部の電気抵抗の仮定値を変化させた場合に式 (4) ¹¹⁾ より算出される電流値を併せて示した。

$$I_{macro} = \frac{E_{corr,r} - E_{corr,p}}{R_{p,p} + R_{s,p} + R_{s,r} + R_{p,r}} \quad (4)$$

ここで、 I_{macro} : マクロセル電流の大きさ

$E_{corr,p}$, $E_{corr,r}$: 既設部または断面修復部のマクロセル形成前の自然電位

$R_{s,p}$, $R_{s,r}$: 既設部または断面修復部の電気抵抗

$R_{p,p}$, $R_{p,r}$: 既設部または断面修復部の分極抵抗

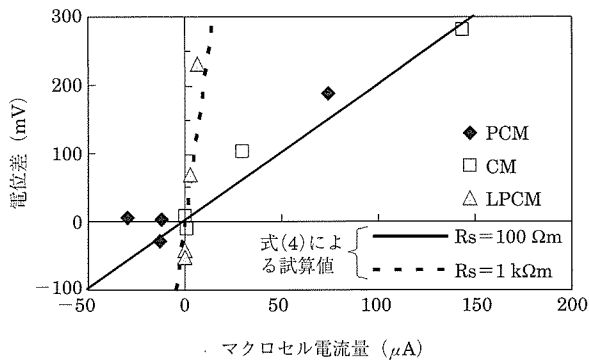


図-16 電位差とマクロセル電流量の関係（実験Ⅰ，湿潤期間20サイクル目に測定）

この試算値は、電流が通過する断面を100×100mm、既設部と断面修復部の重心距離を200mmと仮定して求めた。なお、アノードとカソードの距離が離れるほど電気抵抗が増大し、分極抵抗がマクロセル電流回路の抵抗に占める割合が小さくなることから、ここでは便宜的に分極抵抗を無視して試算した。

これより、マクロセル電流量は、断面修復材の種類により異なるものの、同一の断面修復材に着目すれば、電位差との間におおむね線形的な相関性が見られた。また、断面修復材PCMと断面修復材CMは電気抵抗を100Ωmとして試算した電流値に近く、これに比べ、断面修復材LPCMの電流量は小さく、電気抵抗を1kΩmとした試算値に近似した。このように、マクロセル電流量は、断面修復材の電気的性質の影響を大きく受け、より高い電気抵抗を有するものを適用することで、マクロセル形成が抑制されることが予想される。

(4) アノード・カソード面積比

既設部と断面修復部との長さの比（ L_p / L_r ）を調節することによりアノード・カソード面積比を変化させた供試体を用い、促進試験の湿潤期間中にマクロセル電流を測定した結果を図-17に示す。ここで、既設部には1.8kg/m³に相当する塩化物イオンを混入したものの、いずれの供試体でも断面修復部がアノードとなった。このため、マクロセル電流量は、断面修復部側の鋼材表面積当たりの平均電流密度に換算して表記することにした。また、 $L_p / L_r = 1 / 3$

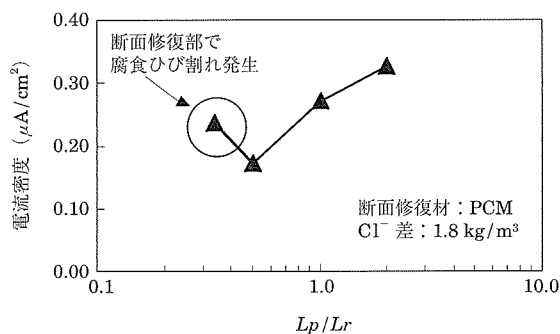


図-17 アノード・カソード面積比がマクロセル電流密度に及ぼす影響（実験Ⅰ，湿潤期間の平均）

の供試体では、腐食ひび割れが発生していた。この供試体を除くと、 L_p / L_r の比率が増加するにつれ、電流密度も増大する傾向が確認された。このことから、アノード面積に比してカソード面積が大きくなるほど、鋼材表面の平均的な腐食速度に関しては上昇することが分かった。

これとは別に、 $L_p / L_r = 1$ の供試体で、既設部と断面修復部の分割鋼材をそれぞれ3分割（合計6分割）にした供試体を作製し、マクロセル電流の分布を確認した結果を図-18に示す。図には、リード線を接続した場合と未接続の場合の自然電位を25mm間隔で測定した結果を併せて示した。これより、自然電位の分布に着目すると、リード線を接続することにより、カソード域となっている断面修復部の電位が接続しない場合よりも全体的に卑な方へ変化（いわゆる、カソード分極）し、打継目付近ではなだらかな電位勾配を有していることが分かる。しかし、打継目から断面修復部に向かい50mmほど離れた付近より、自然電位が一定値に近づく傾向を示した。また、マクロセル電流量に関していえば、打継目で最大値を示し、打継目から遠ざかるほど、電流量の絶対値が小さくなっていることが分かる。

以上より、既設部と断面修復部との間に形成されるマクロセルの影響範囲には広がりがあるものの、腐食速度に大きな影響を及ぼす範囲は打継目近傍に限定されるようである。したがって、今回検討しているアノード・カソード面積比のように、打継目からの長さ比を取る場合の影響については、それほど大きな変化を生じるものではないと考えられる。

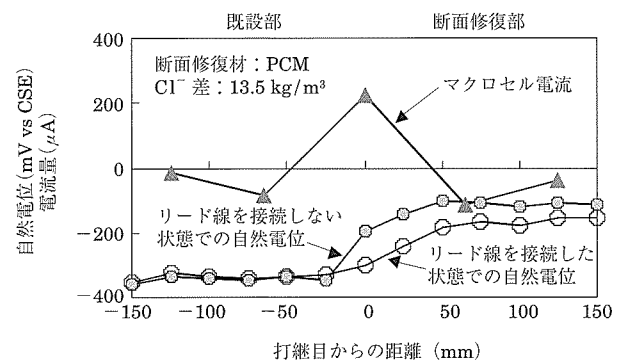


図-18 自然電位およびマクロセル電流の分布（実験Ⅰ，湿潤期間3サイクル目に測定）

4.4 マクロセル形成が鋼材腐食に及ぼす影響

(1) 塩化物イオン濃度差が鋼材腐食に及ぼす影響

促進試験を行って得られた鋼材の質量減量率（WL）と塩化物イオン濃度差（CL）の関係を図-19に示す。ここで、実験Ⅰの結果より、既設部に1.8～13.5kg/m³の塩化物イオンを含む場合には、質量減少率との間に式（5）の関係が認められた⁸⁾。

$$WL (\%) = 0.03 \cdot CL^{1.72} \quad (5)$$

一方、実験Ⅰでは、既設部に存在する塩化物イオン量を

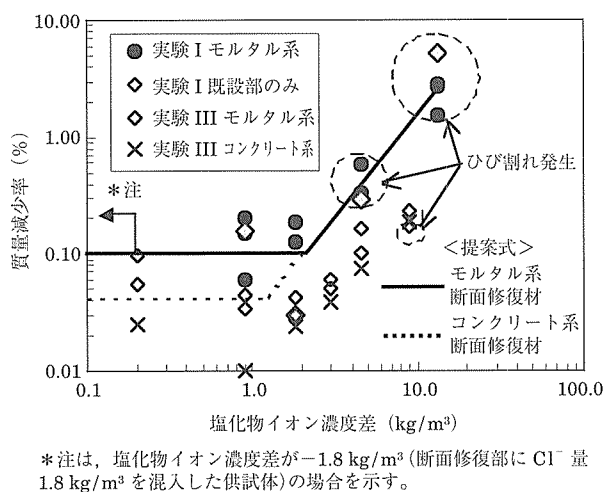


図 - 19 塩化物イオン濃度差と質量減少率の関係

1.8 kg/m^3 以下としても、多少の質量減少率が認められる場合があった。実験Ⅲにより、塩化物イオン濃度差が小さい範囲での質量減少率を確認した結果、同様な傾向を示し、コンクリート系断面修復材に比べ、モルタル系断面修復材では鋼材腐食を完全に抑制できない場合があった。このように、塩化物イオン濃度差のほかに、異なる材料を用いることによりマクロセルが形成される影響を考慮するため、実験Ⅲにおいて塩化物イオン濃度差 1.8 kg/m^3 以下の範囲で実測された質量減少率の最大値を用い、式(6)、式(7)として設定した。

モルタル系断面修復材を使用する場合：

$$WL = 0.10 \% (CL \leq 2.0 \text{ kg/m}^3) \quad (6)$$

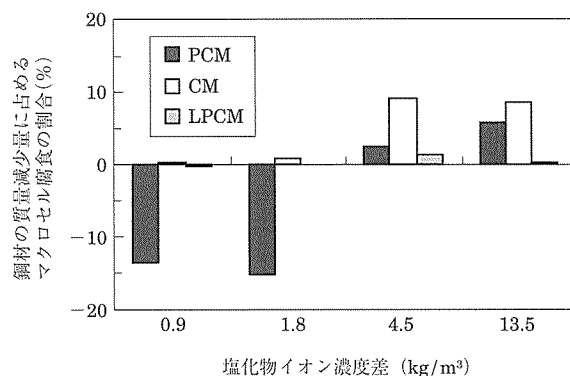
コンクリート系断面修復材を使用する場合：

$$WL = 0.04 \% (CL \leq 12 \text{ kg/m}^3) \quad (7)$$

なお、実験Ⅲでは、既設部に $1.8 \sim 9.0 \text{ kg/m}^3$ の塩化物イオンを含む供試体の質量減少率が、式(5)で推定される値を下回っていた。これは、鋼材腐食に起因するひび割れが生じなかったため、腐食速度が抑制されていたものと推察される。

(2) 鋼材腐食に占めるマクロセル腐食の割合

実験Ⅰにおいて測定されたマクロセル電流の積算値から計算した鋼材の化学反応量を、試験終了後に取り出した鋼材の質量減少量に対する割合として算出した結果を図-20に示す。これより、断面修復材 LPCM では、4.3 節で示したようにマクロセル電流が小さく、鋼材腐食に占めるマクロセル腐食の割合もわずかであった。また、断面修復材 PCM では、塩化物イオン濃度差が 1.8 kg/m^3 まで断面修復部がアノードとなっており、既設部の鋼材腐食を促進させる方向には働いてなかった。いずれにしても、マクロセル電流から推定される鋼材の質量減少量に占める割合は、本実験の場合では最大 10 % 程度であった。ただし、図-17に示すとおり、アノードに対するカソードの面積比が大きくなると、マクロセル腐食電流量が増加する傾向にあり、そのような場合ではマクロセル腐食の影響が若干大きくな

図 - 20 既設部の鋼材腐食に占めるマクロセル腐食の割合 (実験Ⅰ, $L_p/L_r=1$)

るものと考えられる。

(3) 断面修復後の腐食速度に関する検討

実験Ⅰの促進試験(140日)と実験Ⅱの暴露試験(710日)が終了した後、既設部に設置していた鋼材を取り出して質量減少率を調べた結果を図-21に示す。これより、両者はよい相関性を示しており、その比率はおおむね 1 : 1 であった。また、これらの傾向は分割鋼材のみでなく、既設部と断面修復部を 1 本の鋼材とした貫通鋼材の場合でも、同様な傾向を示した。

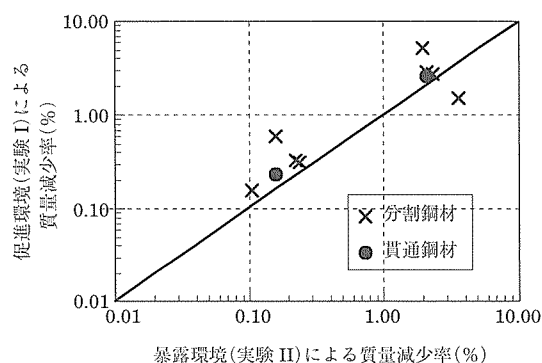


図 - 21 促進・暴露環境による質量減少率の関係

以上より、今回の暴露環境に対する促進環境の促進倍率は 5 倍程度であると算定される。また、今回の暴露環境における腐食速度 (WL_y) は、促進試験の結果より得られた式(5)～(7)が暴露 2 年分に相当することから、式(8)として表すことができる。

$$WL_y (\% / \text{年}) = 0.015 \cdot CL^{1.72} \quad (8)$$

ただし、モルタル系断面修復材で $WL_y \geq 0.05 \% / \text{年}$ 、コンクリート系断面修復材で $WL_y \geq 0.02 \% / \text{年}$ とする。

5. 断面修復後の再劣化に配慮した補修計画

5.1 マクロセル形成に関する検討

すでに述べてきたように、既設部に塩分を多く残留させるほど、鋼材腐食が進行し、早期に再劣化を引き起こす可能性がある。断面修復後の再劣化を防ぐには、塩分を多く

含んだ部位をできるだけ除去し、既設部と断面修復部との塩化物イオンの濃度差を小さくする必要がある。この目安としては、図 - 19 に示されるように、鋼材位置に残留する塩化物イオンの濃度差が 2.0 kg/m^3 を超えると、鋼材の腐食速度が増大する傾向になることから、これ以下の範囲内に留めるのがよいものと考えられる。

また、残留する塩化物イオンの濃度差が 2.0 kg/m^3 以下であっても、既設部とは異なる材料を用いることによりマクロセルが形成され、腐食を完全には停止できない場合もあった。このことから、補修計画では、適切な材料・施工方法の選定に注力するばかりでなく、断面修復後の補修効果を検証するための維持管理手法を策定しておく必要があると考えられる。

5.2 断面修復材の選定

図 - 13 あるいは図 - 20 に示されるように、断面修復材 PCM の場合、塩化物イオン濃度差が 1.8 kg/m^3 程度までは既設部から断面修復部へ電流が流れ、断面修復部がアノード域となっていた。このことから、断面修復材の種類によっては、断面修復部中の鋼材の腐食を助長させる場合があることには注意を要する。

また、断面修復部には、既設部に残留した塩化物イオンが拡散するなどして、将来的に多少の塩分が侵入するおそれがある。図 - 22 には、断面修復材に塩化物イオンを 1.8 kg/m^3 混入した場合の自然電位を測定した結果を示したが、これによると、コンクリート系よりもモルタル系の断面修復材の方が自然電位が卑な値を示す傾向となった。とくに、断面修復材 LPCM では断面修復部の自然電位が -350 mV より卑な電位となり、軽微な腐食が見られた。このようなことから、断面修復材の種類によっては、塩化物イオン濃度が低い場合でも鋼材腐食が生じることがあることにも注意を要する。

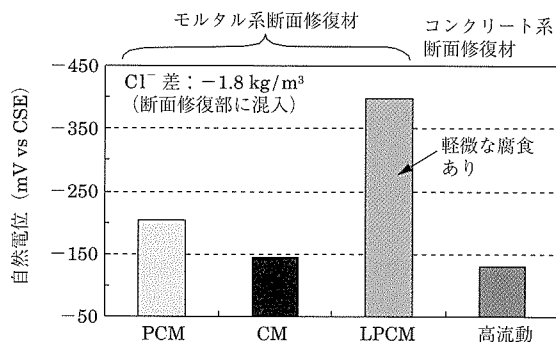


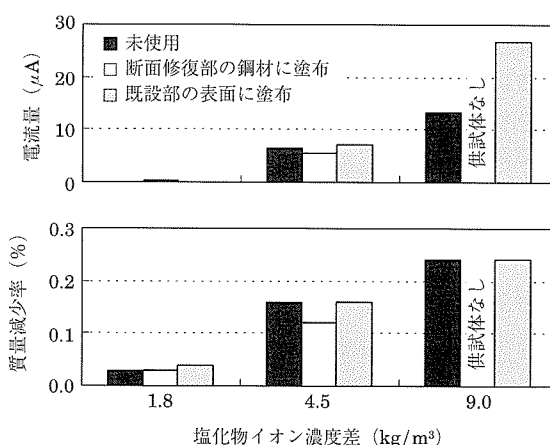
図 - 22 断面修復部に塩化物イオンを混入した場合の自然電位の測定結果（実験Ⅲ、湿潤期間中）

なお、断面修復材の電気的性質については、マクロセル腐食を抑止する観点からは高い電気抵抗を有する方がよいと考えられるが、既設 PC 構造物の断面修復に限れば、マクロセル腐食が断面修復後の鋼材腐食に及ぼす影響がそれほど大きくないことから、既設部と同等程度であってもよいものとする。

5.3 防錆剤の使用

亜硝酸塩などを含む防錆剤の適正な使用は、鋼材表面の不動態形成を促す効果がある。しかしながら、塩分が残留する既設部の鋼材に防錆剤を直接塗布することはできない。そこで、防錆剤を断面修復部の鋼材に塗布した場合と、既設部の表面に塗布した供試体を作製し、防錆剤の使用がマクロセル腐食に及ぼす影響を調べた結果を図 - 23 に示す。図には、防錆剤を使用しない場合についても併せて示した。これより、断面修復部の鋼材に塗布した場合は、未使用の場合に比べ、電流量および質量減少率とも、若干ではあるが、減少する傾向が確認された。また、防錆剤を既設部の表面に塗布した場合には、未使用の場合とあまり変化がなかった。

以上より、断面修復部に配置されている鋼材への防錆剤の使用は、マクロセル腐食を抑制させる効果が多少ともあるものと推察される。一方、既設部のコンクリート表面に防錆剤を塗布する場合では、その効果を確認することができなかった。これは、今回の実験では、塗布後の短期間で試験を開始したため、防錆剤が鋼材位置にまで浸透していないことが一因であると考えられる。



* 防錆剤の塗布後の養生期間は 1.5 ヶ月である。

図 - 23 防錆剤の使用がマクロセル電流や鋼材腐食に及ぼす影響（実験Ⅲ、湿潤期間中、断面修復材 PCM）

6. 結 論

本研究では、断面修復工法を適用することで懸念されるマクロセル腐食の発生機構やその後の腐食速度について、4.2 節において考案したマクロセル腐食評価試験方法を用いて検証した結果、以下の結論を得た。

- (1) 4.3 節においてマクロセル腐食反応に関与する各種要因の影響を調べた結果、塩化物イオン濃度差、環境条件、および、断面修復材の電気的性質の影響はいずれも大きいことが確認された。一方、アノード・カソード面積比に関しては、既設 PC 構造物の断面修復に限れば、極端に影響を及ぼすことはないものと考えられる。

- (2) 4.4 節においてマクロセル腐食反応が鋼材の質量減少に占める割合を調べた結果、最大 10 % 程度であり、マクロセル形成が断面修復後の腐食速度に著しい影響を及ぼすことはなかった。しかしながら、既設コンクリートとは異なる材質の断面修復材を用いることで、鋼材の不動態の形成やその安定性を損なう場合もあることには注意を要する。
- (3) 上記 (1), (2) の検討結果を基に、断面修復後のマクロセル腐食を考慮した鋼材腐食の評価手法を式(8)に、断面修復後の再劣化に配慮すべき事項について 5 章に提示した。これらについては、引き続き検討を加えていくとともに、実際の PC 構造物の補修において検証される必要がある。

参考文献

- 1) 土木学会：鉄筋腐食・防食および補修に関する研究の現状と今後の動向，コンクリート技術シリーズ 26 巻，pp.23 ~ 27, 1997
- 2) 土木学会：鉄筋腐食・防食および補修に関する研究の現状と今後の動向（その 2），コンクリート技術シリーズ 40 巻，pp.200 ~ 205, 2000
- 3) 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, 1996.8
- 4) 岡田 清，小柳 治，宮川豊章：コンクリート部材のひびわれと鉄筋腐食に関する研究，土木学会論文報告集，第 281 号，pp.75 ~ 87, 1979.1
- 5) 北野勇一，渡辺博志，久田 真，北山 良：PC 橋の改造技術に関する研究—その 5：断面修復部の耐久性と維持管理に関する研究—，プレストレストコンクリート，Vol.50，No.3，pp.78 ~ 86, 2008.5
- 6) 谷口秀明，渡辺博志，竹中秀樹，三加 崇：PC 橋の改造技術に関する研究 — その 4：大規模な断面修復の材料および施工に関する検討 —，プレストレストコンクリート，Vol.50，No.2，pp.92 ~ 100, 2008.3
- 7) 土木学会：コンクリートの塩化物イオン拡散係数試験方法の制定と標準化が望まれる試験方法の動向，コンクリート技術シリーズ 55 巻，pp.72 ~ 78, 2003
- 8) Kitano, Y., Watanabe, H., Hisada, M., Tezuka, M. and Tokumitsu, S.: A Study on the Macro - cell Corrosion Due to the Remaining Chloride in Repaired RC Beam, Proceedings of the Second fib Congress, Condensed Papers (2), pp.620 ~ 621, June 2006
- 9) 北野勇一，渡辺博志，久田 真，北山 良：補修 RC 梁中の残留塩分に起因するマクロセル腐食に関する暴露試験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.28，No.1，pp.1787 ~ 1792, 2006.7
- 10) 北野勇一，渡辺博志，久田 真，北山 良：補修 RC 梁中の残留塩分と鋼材腐食に関する検討，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.29，No.1，pp.1107 ~ 1112, 2007.7
- 11) Glinkers, J. and Shlangen, E.: Numerical analysis of galvanic interaction in reinforcement corrosion, Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction, pp.3 ~ 12, 1996.

[2008 年 5 月 26 日受付]

なお、本研究その 5（本誌 Vol. 50, No.3, pp. 78-86）の図 - 11 に誤りがありました。ここに、お詫びを申し上げますとともに、訂正をさせていただきます。

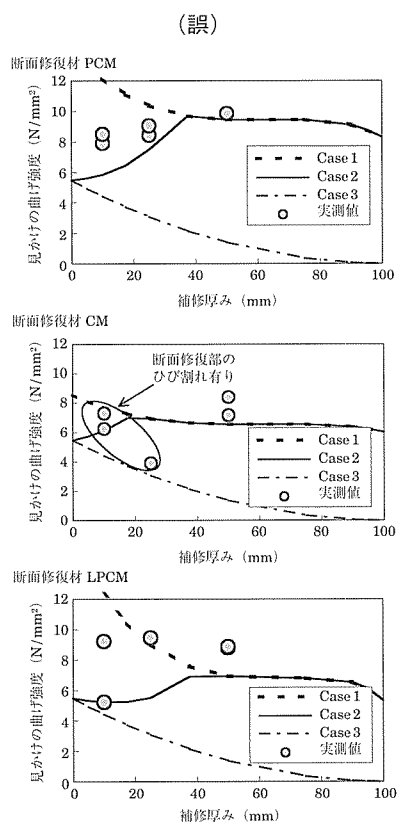


図 - 11 構造一体性試験の結果

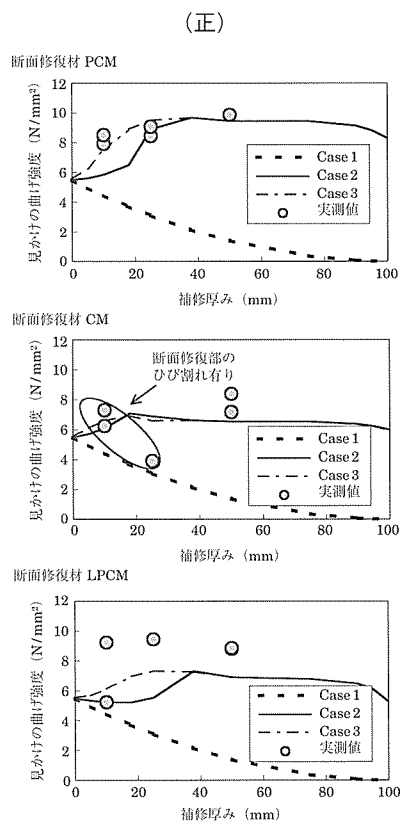


図 - 11 構造一体性試験の結果