

報告 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

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

要旨：筆者らは、マクロセル腐食反応による腐食電流に及ぼすコンクリート中の残留塩分の影響について検討するため、様々なケースの補修RC梁を用いた促進・暴露試験を実施している。本報告では、促進試験と暴露1年目までの調査結果を対比することにより、暴露環境がマクロセル腐食に及ぼす影響について検証した。その結果、今回の暴露環境は、JCI-SC3の促進環境と比べひび割れが生じにくく、マクロセル電流の絶対値は最大でも1/4であった。一方、試験環境により腐食進行度が異なる傾向を示したが、いずれにしてもマクロセルの形成に起因すると考えられる鉄筋腐食の占める割合は大きくないことが確認された。

キーワード：補修RC梁、残留塩分、マクロセル腐食、促進試験、暴露試験

1. はじめに

塩害を受けた既設コンクリート構造物を出来るだけ長く供用するため、これまで断面修復工法による補修が数多く行われてきている。この補修方法は、塩分の多い部位を含めた損傷部をはつり取り、鉄筋の防錆処理、補修材の施工により断面を元通りに修復する手順で行われている。また、近年、補修後の寿命をより延長することを目的とした様々な補修材料も開発されつつある。一方、補修を実施する際、施工上や構造性能上の制約を受け、塩分を十分に除去できないケースも考えられる。既設構造物に塩分が多く残留したままでの補修は、マクロセルの形成により鉄筋腐食を引き起こす可能性があるとされている¹⁾。しかしながら、マクロセルの発生を考慮して、断面修復の部位を決定し、補修材の種類を選択することは一般的にはなされておらず、補修工法の効果に対する信頼性の確保が十分に得られていないのが現状である。

そこで、筆者らは、マクロセル腐食反応による腐食電流に及ぼすコンクリート中の残留塩分

の影響について検討するため、様々なケースの補修RC梁を用いた促進・暴露試験を実施している。本報告では、促進試験と暴露1年目までの調査結果を対比することにより、暴露環境がマクロセル腐食に及ぼす影響について検証した。

2. 実験方法

2.1 使用材料

使用材料の物性値を表-1に示す。ここで、母材部には、設計基準強度40N/mm²を想定し、水セメント比40%、単位セメント量408kg/m³、細骨材率45%の配合のコンクリートを用いた。セ

表-1 使用材料の物性値

		圧縮強度*	比重*	備考
		N/mm ²	g/cm ³	
母材部(コンクリート)		50.5	2.339	—
補修部	PCM	76.9	2.257	粉末ポリマー
	CM	43.9	2.175	—
	LPCM	26.7	1.636	液体ポリマー

* 水中養生28日

*1 (独) 土木研究所 技術推進本部構造物マネジメント技術チーム 交流研究員 (正会員)

*2 (独) 土木研究所 技術推進本部構造物マネジメント技術チーム 主席研究員 工修 (正会員)

*3 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻助教授 博(工) (正会員)

*4 (社) プレストレスト・コンクリート建設業協会 (正会員)

メントの種類はOPC、粗骨材の最大寸法は20mmである。また、塩化物イオン (Cl^-) は、必要な塩化物イオン量が入るように原子量に応じて58.5/35.5倍のNaClを混入した。補修部には、市販品より、ポリマーセメントモルタル (PCM)、セメントモルタル (CM)、軽量ポリマーセメントモルタル (LPCM) の3材料を選び、使用した。これらの補修材は、いずれもコテ塗り用であり、セメント、骨材、繊維および混和剤がコンパウンドされたものである。なお、鉄筋はD13を使用し、黒皮は除去しないものとした。

2.2 供試体

供試体のパラメータを表-2に、供試体の形状寸法を図-1に示す。ここで、基本とした供試体は、塩化物イオンの混入量を変化させた“母材部”の長手方向に“補修部”を打ち継いだ100×100×400mmの形状である。この補修を施したものを“補修供試体”と称す。なお、鉄筋のかぶりはいずれの供試体も25mmである。

供試体は、A～Eのグループに分類し、母材部の塩化物イオンの濃度（4水準）と補修材の

種類（3材料）を組み合わせたものをメイングループとした（Group A）。このグループの供試体は、アノード・カソード比を1：1とし、防錆材を用いず、鉄筋の配置を2分割とした。

また、補修材を打ち継がない母材単体の供試体（Group B）、母材部と補修部の長手方向の寸法を調整してアノード・カソード比を変化させた供試体（Group C）、防錆材を補修部の鉄筋や母材部の表面に塗布した供試体（Group D）、打ち継目を貫通する1本物の鉄筋を埋設した供試体（Group E）を作製した。

表-2 供試体のパラメータ

項 目	パラメータ
母材部の Cl^-	(0.0), 0.9, 1.8, 4.5, 13.5 kg/m ³
補修材の種類	PCM, CM, LPCM, (なし)
アノード・カソード比	(3:1), (2:1), 1:1, (1:2), (1:3)
防錆材の使用	なし, (あり)
鉄筋の配置	(1本物), 2分割
試験環境	促進, 暴露

() 内は、メインの組み合わせではない

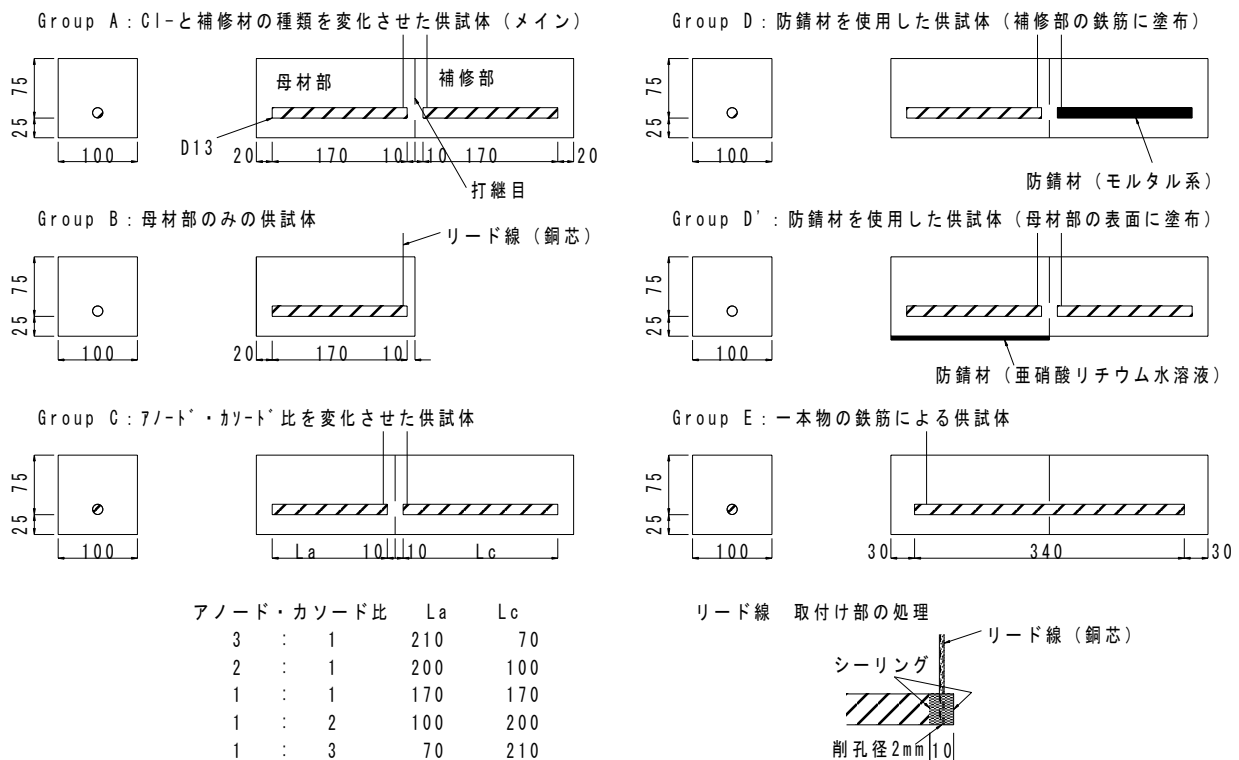


図-1 供試体の形状寸法

単位：mm

供試体の作製は、母材部のコンクリート打設→打継目の処理→養生→打継ぎ面へのプライマー塗布→補修部の施工（鉛直打継ぎ）→養生の手順で行った。ここで、養生方法は、約 20℃の室内で湿布養生 1 ヶ月と 2 週間の放置による乾燥を組み合わせることとした。また、打継目の処理は、あらかじめ端型枠に遅延剤を塗布し、脱枠後、ワイヤーブラシ等によりレイタンスを除去した。なお、プライマーは実施工を想定し、メーカー指定のものをを用いることにした。

2.3 暴露試験

作製した供試体は、養生完了後、土木研究所内の 4 階建て施設の屋上に移動し、かぶり側を上面として人工芝の上に設置した（写真－1）。ここで、リード線は、鉄筋を分割した供試体において、常時、隣接する鉄筋と接続し、接続部は防水テープで保護した。また、暴露試験は、2004 年 11 月に開始し、現在も継続中であるが、ここでは 2005 年 12 月（56 週）までの結果を取り扱うこととした。

試験中には、季節ごとに数回、ひび割れ観察、電気化学的測定を実施した。ここで、後者の内、自然電位（銅硫酸銅電極を使用）と分極抵抗およびかぶり部の抵抗（市販機器²⁾）を使用はリード線を接続した状態で電位勾配が緩やかである打継目より 60mm 離れた鉄筋直上で測定した。また、マクロセル電流はリード線は無抵抗電流計に接続し直して電流の読みが一定となる時点測定値とした方法と、データロガーを用いた



写真－1 供試体の暴露状況

マクロセル電流の自動測定³⁾を実施した。マクロセル電流の数値は、母材部がアノードとなる場合を負、補修部がアノードとなる場合を正で表した。

一方、促進試験は、暴露試験とペアで作製した供試体を用いて、ほぼ同時点より、JCI-SC3の乾湿繰返し法（3 日間の湿潤期間（温度 65℃±3℃、湿度 90～95%）と 4 日間の乾燥期間（温度 13±2℃、湿度 60%以下）を組み合わせる 1 サイクルとして計 20 サイクル行う）を実施している。

3. 実験結果

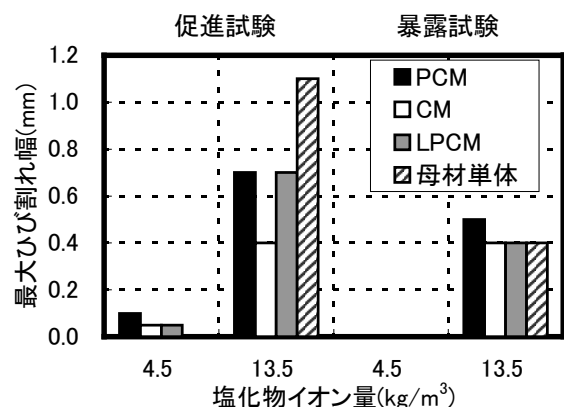
3.1 ひび割れ観察の結果

ひび割れ観察の結果を図－2に示す。ここで、図には Group A, B の内、母材部の鉄筋直上に沿いひび割れが生じた供試体の含まれる $CI^- = 4.5, 13.5 \text{ kg/m}^3$ のものに関して、確認されたひび割れ幅の最大値を示した。また、観察時期は、促進試験で 20 サイクル（20 週）終了後であり、暴露試験は暴露開始から 56 週目の時点である。

図より、促進試験の $CI^- = 4.5 \text{ kg/m}^3$ の補修供試体に生じたひび割れは、暴露試験では生じることがなかった。また、 $CI^- = 13.5 \text{ kg/m}^3$ の場合、促進試験の供試体と比較すると、暴露試験ではひび割れ幅が狭く、補修材の種類による明確な差異も見られなかった。

3.2 自然電位測定の結果

自然電位測定の結果を図－3に示す。ここで、測定結果は母材部を対象とし、図中(a)(b)には、



図－2 ひび割れ観察の結果

Group A の供試体で測定された自然電位の最大・最小値の範囲および最終値を、(c)にはすべての供試体の最終値を示した。なお、測定条件は促進試験ではほぼ同一環境の乾燥期間に実施しているが、暴露試験では温度等の環境は一定でなく、測定された電位の補正もしていない。

図より、補修部に PCM を用いた供試体では、 $CI=0.9$, 1.8 kg/m^3 の場合において他の補修材を用いた場合よりも卑な電位を示す傾向であるが、同一の補修材で比較すると、塩化物イオン量が増加するに従い、自然電位も卑な値を示す傾向であった。また、促進試験と暴露試験を比較すると、電位の経時的な変化量が異なることや、 $CI=4.5 \text{ kg/m}^3$ 以下では暴露試験の方がより貴な値を示すなどの傾向も見られた。一方、自然電位の最終値で判断すると、いずれの供試体も、ひび割れが発生した供試体では -300mV より卑な値を示し、そうでない供試体では経時的に貴

な値に移行していくことが認められた。

3.3 マクロセル電流測定の結果

(1) 試験環境がマクロセル電流に及ぼす影響

暴露試験におけるマクロセル電流の自動計測結果の一例を図-4に示す。ここで、図示した例は、マクロセル電流の最も生じた Group A に属する $CI=13.5 \text{ kg/m}^3$ の PCM を用いた供試体であり、外気温の日変動が比較的小さい 2005/7/24～8/12 の 20 日間の結果を示した。また、図には、24 時間当たりの積算電流量に換算した結果と、供試体温度、外気温および降水量の観測結果を併記した。この図より、暴露試験におけるマクロセル電流は、①降雨後の数日間は電流の絶対値が大きくなる、②降雨がないと電流の絶対値が小さくなる、③電流の絶対値の日変化は外気温や供試体温度に対する依存性があることが確認された。

また、環境温度とマクロセル電流の関係を図

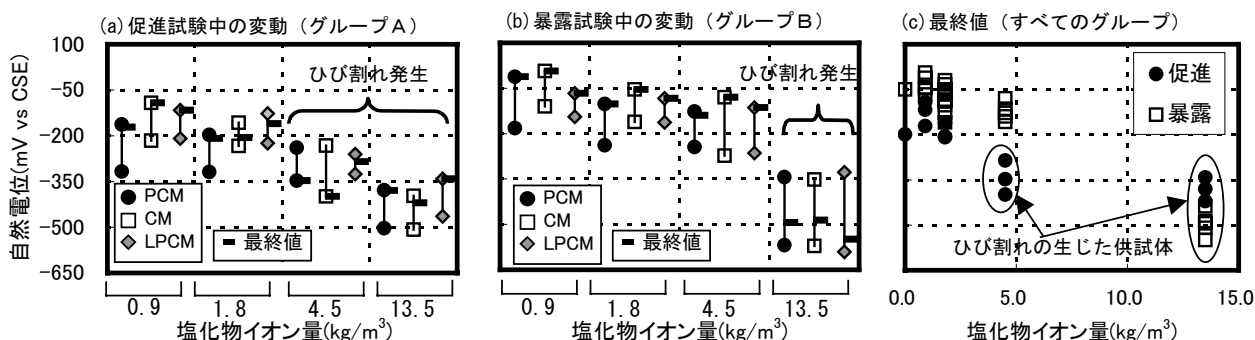


図-3 自然電位測定の結果

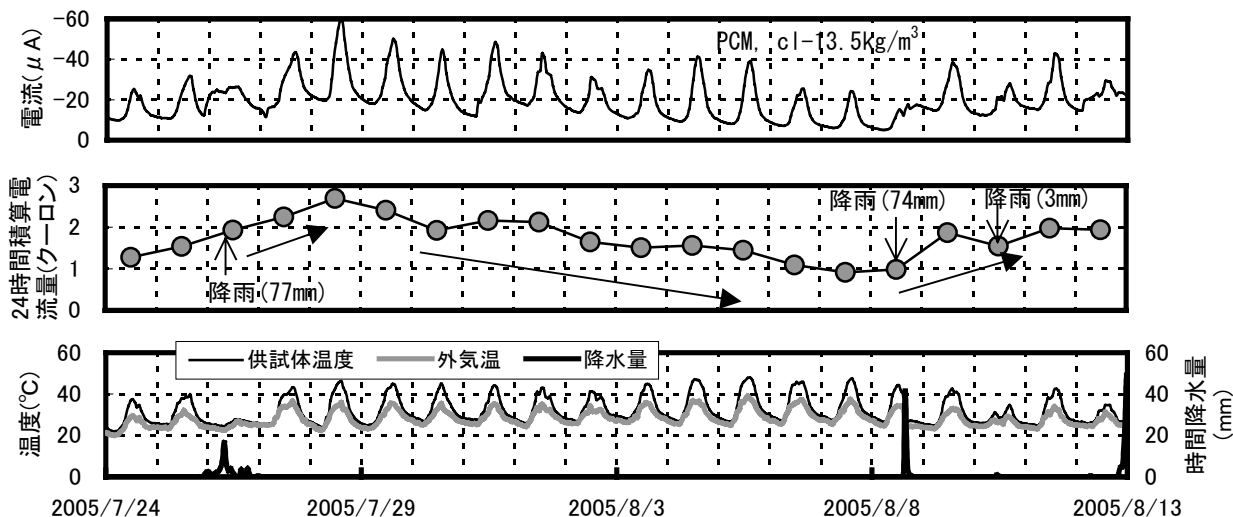


図-4 暴露試験におけるマクロセル電流の自動計測結果の一例

－5に示す。ここで、暴露試験は図－4に示した結果より供試体温度と2時間おきに測定したマクロセル電流の関係を日変化毎に抽出し、促進試験は湿潤および乾燥期間の槽内温度と測定された電流の平均値を示している。なお、マクロセル電流は、母材部がアノードとなる負の値であるが、ここでは、その絶対値として表示した。この図より、暴露環境におけるマクロセル電流は、降雨後（7/29，8/9）が最も大きく生じており、アレニウス型の温度依存性を示している。一方、乾燥を受ける過程では、8/5と8/8のように、マクロセル電流は相対的に生じにくくなる傾向であるが、降雨を受けることにより、再び、電流が増大する過程に移行していることが分かる。

これに対し、促進試験におけるマクロセル電流は、暴露試験で供試体が降雨を受けて水分を多く含む期間の温度依存性におおよそ近似していることが確認できる。

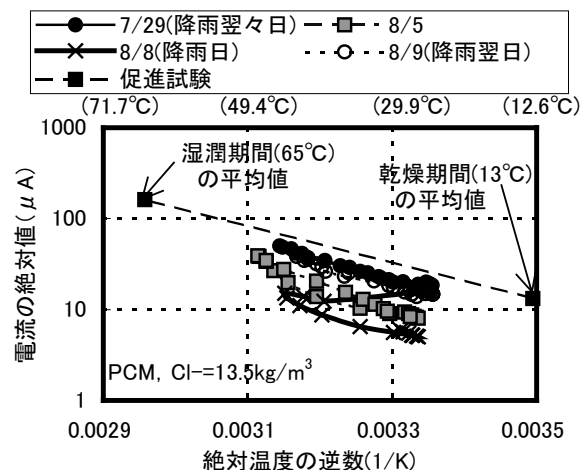
(2) 残留塩分および補修材の種類の影響

マクロセル電流測定の結果（Group A）を図－6に示す。ここで、図に示した数値は、促進試験が湿潤期間の平均値であり、暴露試験は無抵抗電流計による測定の最大値とした。

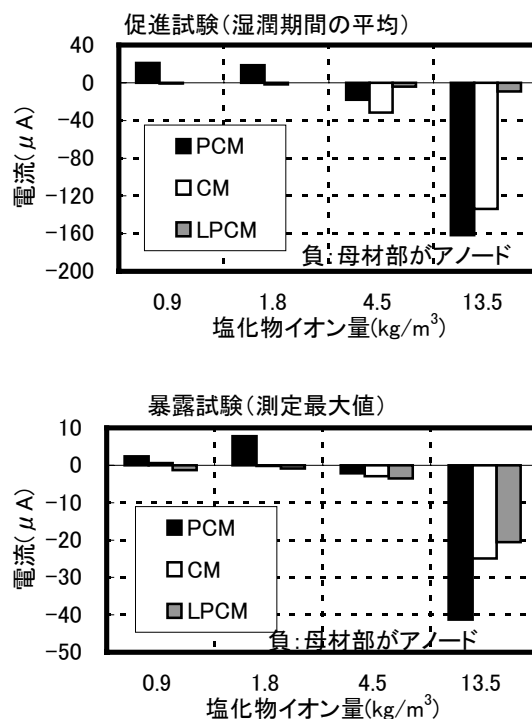
この図より、マクロセル電流は、試験条件によらず、塩化物イオン量が増加するにつれ母材側がアノードとなる条件下で電流が増大した。ここで、環境条件の違いを比較すると、促進試験に比べて暴露試験を行ったほうが、マクロセル電流量は全般的に小さくなり、およそ1/4の値を示した。

一方、補修部にPCMを用いて $\text{Cl}^- = 1.8 \text{ kg/m}^3$ 以下とした場合では、逆に補修部がアノードとなる傾向を示した。

補修部にLPCMを用いた場合、促進試験においてあまり生じてないマクロセル電流が、暴露環境では他の補修材に近い値を示すようになった。この理由は定かではないが、補修材かぶり部の抵抗を測定した結果によると、促進試験終了時にはおおよそ $100 \text{ k}\Omega$ とコンクリートに比べ



図－5 環境温度とマクロセル電流の関係



図－6 マクロセル電流測定の結果（Group A）

1桁以上大きい値を示したが、暴露試験では、測定時期によるバラツキがあるものの、10～数 $10 \text{ k}\Omega$ と他の補修材の抵抗値に近い水準となっており、これによりマクロセル電流が増大したものと考えられる。

(3) マクロセルの形成が鉄筋腐食に及ぼす影響

促進試験における腐食減量およびマクロセル電流の割合を図－7に示す。ここで、測定したマクロセル電流から計算で得られる腐食減量をA（図中の棒グラフ）、鉄筋を取り出してその鉄筋の腐食減量を測定した値をBとし、A/Bをこ

ここではマクロセル腐食の割合（図中の折れ線グラフ）と定義した。

この図に示されるように、マクロセル電流が母材部の腐食全体に占める割合は、今回の試験範囲内では、多くても 10%に満たない。一方、母材単体の腐食状況と補修供試体を比較すると、ひび割れが生じる程度の塩分（ $\text{Cl}^- = 4.5, 13.5 \text{ kg/m}^3$ ）を混入した供試体では、補修供試体の腐食量が母材単体のものと同等かそれ以下（PCM, $\text{Cl}^- = 4.5 \text{ kg/m}^3$ を除く）となっている。このようなことから、マクロセルの形成が鉄筋の腐食減量に大きな割合を占めるには至っていないことが分かる。

これに対し、暴露試験では、図-2のように補修材の種類によるひび割れ幅の差異が小さいことや、図-6のようにマクロセル電流が促進試験よりも数分の1程度であるということが確認されており、現時点では、暴露環境がマクロセル電流の割合を増大させる作用があるとは考えにくい。

4. まとめ

本研究で作成した補修RC梁の促進試験および暴露試験を行った結果、暴露環境がマクロセル腐食に及ぼす影響について以下のことが明らかとなった。

- (1) ひび割れ観察の結果より、今回実施した 56 週間の暴露試験と 20 週間の促進腐食試験について、ひび割れ発生状況を比較すると、暴露試験の方がひび割れ幅は小さく、かつ、補修材の違いによるひび割れ幅の違いが明確ではなかった。
- (2) 自然電位の測定結果について、暴露試験と促進試験とで比較すると必ずしも同様な値が測定されるわけではなかった。しかし、ひび割れが発生した供試体については、いずれの試験環境においても著しく卑な自然電位が計測されており、ひび割れの発生の有無と自然電位の測定結果には因果関係があると考えられる。

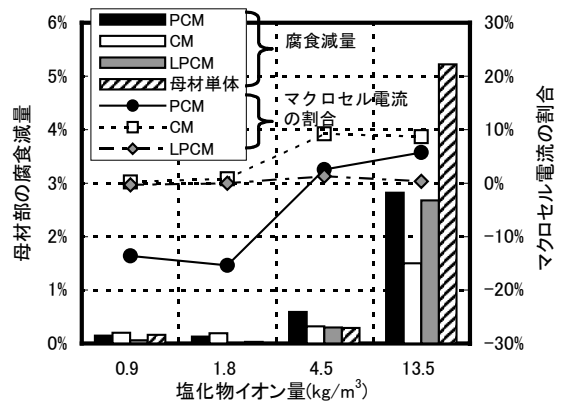


図-7 促進試験における腐食減量およびマクロセル電流の割合

- (3) 暴露試験において測定されたマクロセル腐食電流の日変化については、環境温度と相関性があり、供試体温度を用いたアレニウス則によって表現可能であると考えられる。
- (4) マクロセル電流は、残留塩分や補修材の種類が同一の供試体であっても、試験環境による影響を受けているようである。今回の暴露環境の電流量は、おおまかな傾向として、JCI-SC3 の促進環境の湿潤期間と比べ、最大でも 1/4 であることが確認された。
- (5) 残留塩分が多いほど母材部がアノードとなるマクロセル電流は大きくなる傾向にあった。ただし、マクロセルの形成に起因すると考えられる鉄筋腐食減量の占める割合は必ずしも大きくなく、マクロセル腐食が母材側の鉄筋腐食の主要因ではないと考えられる。

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, 1996.8
- 2) 横田 優: 鉄筋腐食診断器の開発, 電力土木, No.257, pp64-71, 1995.5
- 3) 山口光俊, 徳光 卓, 藤田数正, 鈴木 丘: マクロセル電流計測の自動測定方法に関する実験的検討, 土木学会第 60 回年次学術講演会, 5-185, pp.369-370, 2005.9