

論文 塩害環境下のコンクリート中鋼材のマクロセル腐食に関する実験的検討

中村 英佑^{*1}・渡辺 博志^{*2}・小松原 健^{*3}

要旨：塩害環境下の構造物では、鋼材位置の塩化物イオン濃度が不均一となりマクロセル腐食が生じる可能性がある。本論文では、異なる塩化物イオン濃度のコンクリートで製作した RC 供試体の自然電位と腐食電流を測定し、塩害環境下でのマクロセル腐食の形成機構を検討した。この結果、塩化物イオン濃度 2.5kg/m^3 のコンクリート中でも鉄筋が腐食状態になればマクロセル腐食は生じにくいこと、アノードとカソードの距離が離れると腐食電流は小さくなること、腐食速度はアノード・カソード鉄筋の面積比に律速されること等を示した。

キーワード：マクロセル腐食，塩害，自然電位，腐食電流

1. はじめに

マクロセル腐食は、マイクロセル腐食と比較して腐食速度が速く、局所的に激しい鋼材腐食を生じさせるため、構造物の耐久性に極めて大きな影響を与える¹⁾。

一般に、マクロセル腐食は、ひび割れや打ち継ぎ目等の欠陥部で、酸素や水、塩化物イオンの浸透が不均一となり生じる。しかし、塩害環境下の構造物では、塩化物イオン濃度が部材位置によって大きく異なるため²⁾、欠陥部の有無に関わらずマクロセル腐食が発生する可能性がある。また、塩害により劣化した構造物は、錆汁やひび割れが顕在化した後の補修が容易でなく、そのコストも膨大となる。このため、塩害環境下の構造物の鋼材腐食は、早期に予兆を発見することが重要であり、これにはマクロセル腐食の形成機構を明確にしておくことが必要となる。

マクロセル腐食の形成機構については、既に多くの検討がなされている。宮里らは、電氣的に導通のとれた分割鉄筋を用いてマイクロセル腐食とマクロセル腐食を区別して評価する方法を提案し³⁾、欠陥部を有する供試体のマクロセル腐食を定量評価している⁴⁾。宮川ら⁵⁾はひび割れを

有する供試体の試験結果からアノードとカソードの距離を平均 $650\sim 850\text{mm}$ とし、土木学会基準⁶⁾では自然電位の測定間隔を $100\sim 300\text{mm}$ としてもマクロセル腐食を把握できるとしている。また、岡田ら⁷⁾はひび割れによるマクロセルの腐食速度にはアノードとカソードの面積比が影響することを示している。ところが、上記は主に欠陥部に発生するマクロセル腐食の検討を行ったものであり、欠陥等がなく鋼材位置の塩化物イオンの濃度差のみによって生じるマクロセル腐食の形成機構は明らかにされていない。

これらのことを踏まえ、本論文では、異なる塩化物イオン濃度のコンクリートを用いて製作した RC 供試体の自然電位と腐食電流を測定することにより、塩害環境下でのマクロセル腐食の形成機構を明らかにすることを目的とした。

2. 実験概要

2.1 供試体

表-1 にコンクリート配合、図-1 に供試体の一例を示す。供試体は、塩分を含むコンクリートと塩分を含まないコンクリートを打ち継ぎ、両コンクリート中に黒皮を剥いだみがき丸鋼(ϕ

*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 研究員 工修 (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 (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)

13mm)を埋設している。両鉄筋端部に接続したリード線を短絡させると、塩分を含むコンクリート中の鉄筋がアノード、塩分を含まないコンクリート中の鉄筋がカソードとなり、マクロセルが形成される。供試体は、コンクリート打設後7日間の湿空養生の後、室内に安置し、材齢40日目に測定面以外の5面を塗装した。

表-2に製作した供試体の概略を示す。S供試体を基準とし、A、B、Cシリーズの3種類の供試体を製作した。Aシリーズは、塩化物イオンの濃度差とマクロセル腐食の関係を検討するため、アノード側とカソード側の塩化物イオン濃度をパラメータとし0~5kg/m³で変化させた。Bシリーズは、アノードとカソードの距離とマクロセル腐食の関係を明らかにするため、アノード側とカソード側の鉄筋の間隔をパラメータとし100~900mmで変化させた。Cシリーズは、アノード側とカソード側の鉄筋の面積比とマクロセルの腐食速度の関係を検討するため、各側の鉄筋本数を1~3本で変化させ、鉄筋の面積比をパラメータとした。

また、マクロセルの影響が及ぶ距離を検討するため、図-2に示す梁供試体の自然電位を測定した。梁供試体は、1本の鉄筋が塩分を含むコンクリートと塩分を含まないコンクリートを貫通しており、各部の鉄筋がそれぞれアノードとカソードになる形状とした。

塩分は、設定した塩化物イオン濃度となるように、打設時に所定量の塩化ナトリウムをコンクリートに練り混ぜて与えた。また、同時に円柱供試体(φ100×200mm)を製作し、塩化物イオン量を電位差滴定法(JIS A 1154 2003)により測定し、供試体の塩化物イオン濃度を確認した。

2.2 測定方法

材齢97日後に、自然電位を測定した。その後、アノード側とカソード側の鉄筋のリード線を短絡させ、短絡から14日後に自然電位と腐食電流の測定を行った。自然電位の測定は、土木学会基準(JSCE E601 2000)に準拠し、飽和硫酸銅電極を用いた。A~Cシリーズ供試体は各鉄筋の直上

表-1 コンクリート配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
		W	C	S	G	混和剤
54.5	45.2	160	294	827	1036	3.12

最大粗骨材寸法20mm, スランプ8cm, 空気量4.5%

セメント: 普通ポルトランドセメント, 密度3.16g/cm³

細骨材混合比率(質量) 砂: 砕砂=70:30

細骨材1: 砂, 表乾密度2.59g/cm³, 粗粒率2.60

細骨材2: 砕砂, 表乾密度2.65g/m³, 粗粒率2.80

粗骨材: 砕石, 表乾密度2.69g/cm³, 粗粒率60.0

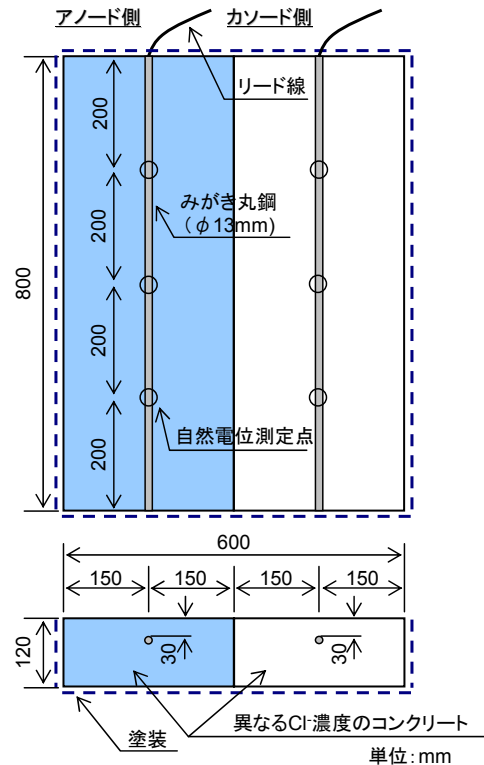


図-1 供試体の形状(S供試体の例)

表-2 供試体の概略

供試体	パラメータ(シリーズ)	Cl ⁻ 濃度(kg/m ³)		鉄筋間隔(mm)	鉄筋面積比	
		アノード	カソード		アノード	カソード
S	基準	5	0	300	1	1
A1	Cl ⁻ 濃度(Aシリーズ)	0.6	0	300	1	1
A2		1.2				
A3		2.5				
A4		5				
B1	鉄筋間隔(Bシリーズ)	5	0	100	1	1
B5				500		
B7				700		
B9				900		
C1	鉄筋面積比(Cシリーズ)	5	0	300	2	1
C2					1	2
C3					1	3

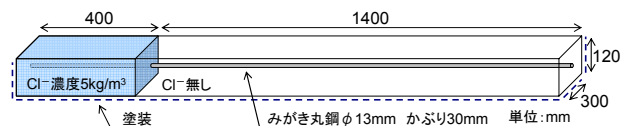


図-2 梁供試体の形状

3点、梁供試体は鉄筋直上200mm間隔で測定を行い、25℃の飽和硫酸銅電極の値に換算し平均した。腐食電流は、無抵抗電流計を用いて測定し、鉄筋全周の表面積(327cm²)で除して電流密度に換算した。なお、電流密度100μA/cm²は、侵食度1.16mm/yearに相当する⁶⁾。

測定時の室温は17℃であった。気温の変化に伴って腐食速度が変化することが報告されているため⁸⁾、S供試体を恒温恒湿槽内に入れ、温度を断続的に変化させ腐食電流を測定した。この際、湿度は60%と一定にした。

3. 各パラメータとマクロセル腐食の形成機構

本章では、供試体の測定結果を用いて、各実験パラメータとマクロセル腐食の形成機構の関係について検討する。

3.1 塩化物イオン濃度

図-3にリード線短絡前後のAシリーズとS供試体の自然電位、図-4にマクロセル電流密度を示す。アノード側に0.6、1.2、2.5kg/m³の塩化物イオンを混入したA1、A2、A3では、短絡前のアノード鉄筋とカソード鉄筋の自然電位は共に-200mV前後を示し、短絡後も電位はほとんど変化しなかった。また、アノード・カソード間の腐食電流もほとんど流れなかった。一方、A4とSでは、短絡前のアノード・カソード鉄筋の電位差が大きく、短絡後のカソード鉄筋の電位が大幅に卑化した。また、A4とSではある程度のマクロセル電流が流れ、アノード・カソード間の塩化物イオン濃度差の大きいSで多くの腐食電流が流れた。A4のようにアノード・カソード両鉄筋が塩分環境中に置かれている供試体でも、アノード鉄筋が腐食状態にあり両鉄筋の電位差が大きい場合には腐食電流が流れた。

上記の結果は、マクロセル腐食が発生する際の塩化物イオン濃度の閾値を示すものと考えられる。本論文の範囲では、アノード側に2.5kg/m³以下の塩化物イオンを混入した供試体においては、アノード・カソード鉄筋の自然電位の差が小さく、マクロセル腐食が生じにくい状態にあ

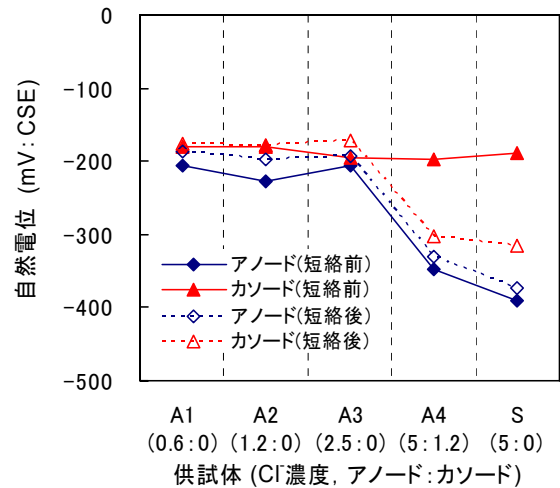


図-3 自然電位測定結果(Aシリーズ)

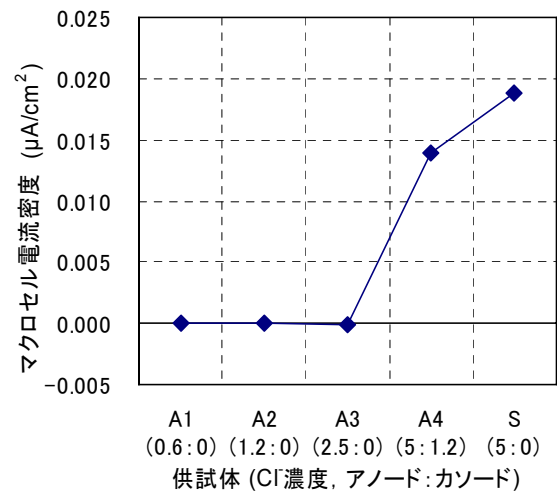


図-4 マクロセル電流密度(Aシリーズ)

った。このため、マクロセル腐食は、アノード側とカソード側の塩化物イオンの濃度差が比較的大きく、アノード・カソード鉄筋の電位差が大きい場合に生じると考えられる。

3.2 アノードとカソードの距離

図-5に短絡前後のBシリーズとS供試体の自然電位、図-6にマクロセル電流密度を示す。いずれの供試体においても、リード線短絡前の自然電位は、アノード鉄筋で-400mV前後、カソード鉄筋で-200mV前後であった。ところが、短絡後では、マクロセルの形成により、アノード鉄筋は若干貴に、カソード鉄筋は大幅に卑になり、両鉄筋の電位差はアノードとカソードの距離に関わらずほぼ等しくなった。

また、カソード鉄筋の電位の卑化量とマクロ

セル電流密度は、アノードとカソードの距離が離れた供試体で小さくなる傾向にあった。しかし、B9 供試体においてもカソード鉄筋の自然電位の卑化や腐食電流が確認されており、マクロセルはアノードとカソードの距離が 900mm となっても形成すると考えられる。

図-7 に、梁供試体の自然電位を示し、B1～B9 と S 供試体のリード線短絡前のアノード・カソード両鉄筋の自然電位の平均値を併記する。塩化物イオン 5kg/m^3 を含んだ部分は短絡前のアノード鉄筋とほぼ同じ電位を示し、塩化物イオンを含まない部分は分極により短絡前のカソード鉄筋の電位よりも卑になった。また、アノード部から 1400mm 離れたカソード部までマクロセルの影響が及び電位が卑化しているものの、この電位はアノード部と比較すれば貴である。このため、1 本の鉄筋が異なる塩化物イオン濃度のコンクリート中に位置しマクロセルを形成していても、自然電位の測定結果からアノード部とカソード部を判別することは可能とみられる。ただし、B シリーズの測定結果からマクロセルの腐食速度はアノードとカソードの間隔が離れるほど小さくなること示されており、自然電位の測定結果のみからマクロセルの腐食速度までを推測することは困難と考えられる。

3.3 アノードとカソードの面積比

図-8 に、短絡前後の C シリーズと S 供試体の自然電位を示す。図-5 と同様に、どの供試体においても、短絡後の自然電位は、アノード鉄筋で若干貴に、カソード鉄筋で大幅に卑になった。また、カソード鉄筋の表面積(A_c)とアノード鉄筋の表面積(A_a)の比(A_c/A_a)が大きいくほど、卑化する電位量は小さくなった。

次に、図-9 に、アノード鉄筋とカソード鉄筋各々 1 本あたりに流れるマクロセル電流密度と A_c/A_a の関係を示す。 A_c/A_a が大きくなるに伴い、アノード鉄筋 1 本あたりのマクロセル電流密度は大幅に増加している。一方、カソード鉄筋 1 本あたりの電流密度は、 A_c/A_a が小さくなると若干大きくなるものの、アノード鉄筋と比べれば

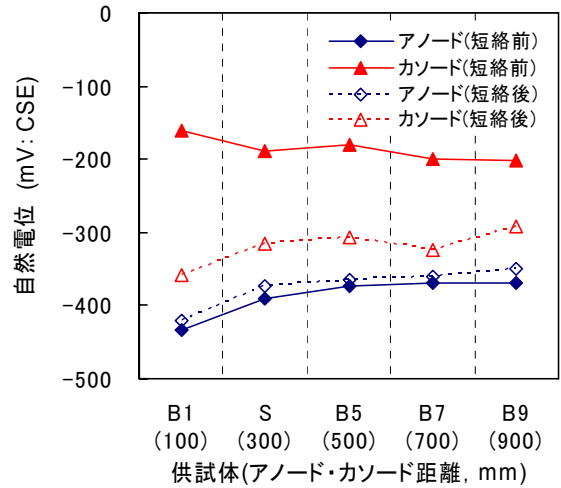


図-5 自然電位測定結果(B シリーズ)

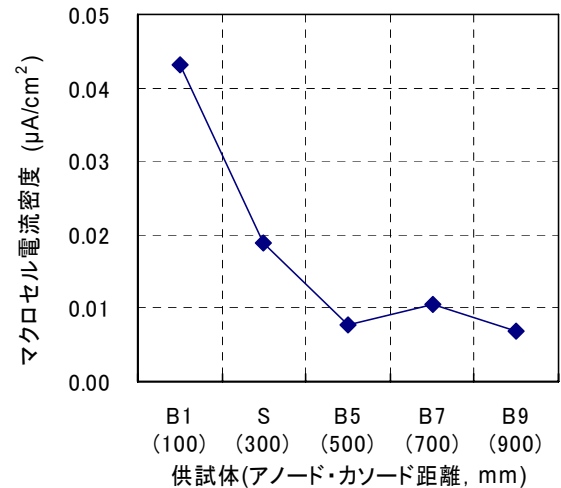


図-6 マクロセル電流密度(B シリーズ)

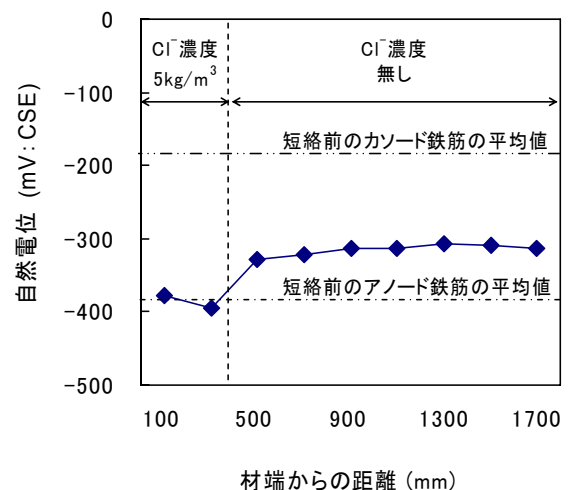


図-7 自然電位測定結果(梁供試体)

A_c/A_a の影響は極めて小さく、ほぼ横ばいとなっている。

マクロセル腐食は、アノード反応とカソード

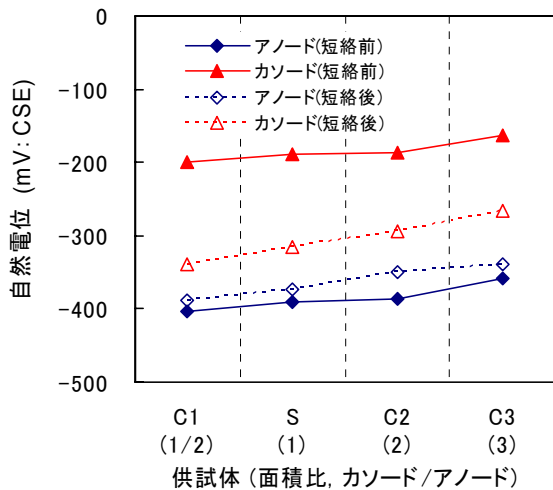


図-8 自然電位測定結果(Cシリーズ)

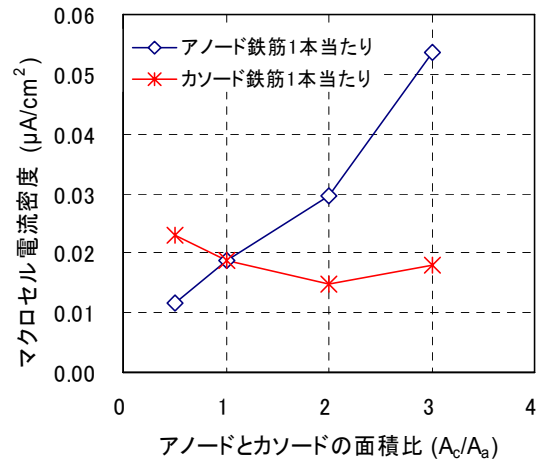


図-9 自然電位測定結果(Cシリーズ)

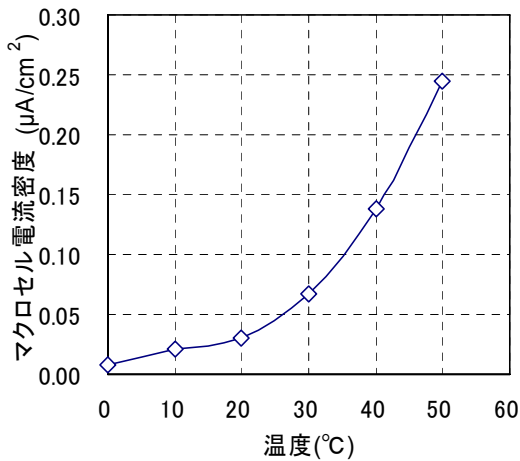


図-10 温度変化とマクロセル電流密度

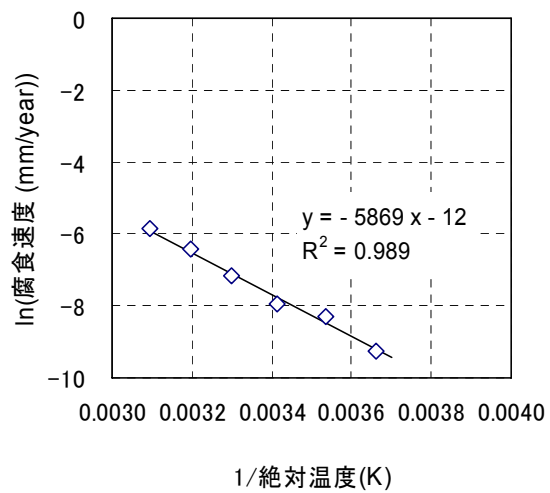


図-11 温度と腐食速度の関係

反応が平衡状態となり、各々が離れた場所で生じる。実際に腐食が生じるのはアノードであり、アノード鉄筋 1 本当たりに流れる電流密度が大きいほど激しい鋼材腐食が生じる。図-9 では、 A_c/A_a が大きくなるほどアノード鉄筋 1 本当たりのマクロセル電流密度が増加している。この結果は、マクロセルによる腐食速度が A_c/A_a によって律測されることを示すものと考えられる。このため、実構造物において局部的に高濃度の塩化物イオンが鋼材位置まで浸透した場合などには、 A_c/A_a が極めて大きくなり、激しいマクロセル腐食が発生することが懸念される。

また、これまでで示してきたマクロセル電流密度の値は全て $0.06 \mu A/cm^2$ 以下であり、文献 4) 等で示されている欠陥部のマクロセル電流密度

に比べて小さい。これは、本論文で用いた供試体と比較して、ひび割れ等の欠陥部を持つ供試体ではアノードとなる鉄筋の面積が極めて小さく、 A_c/A_a が大きくなるために、マクロセル電流密度が大きくなったことが原因と考えられる。

3.4 温度

図-10 に、各温度におけるマクロセル電流密度を示す。ここから、温度の上昇に伴ってマクロセル電流密度は増加する傾向にあることがわかる。前節までで示した電流密度は室温 $17^\circ C$ の屋内での測定結果であるため、気温等の変化によってマクロセルの腐食速度が変化することが予測される。

また、一般に、鉄筋腐食は化学反応であり、式(1)に示すアレニウスの定理に従って、温度の

上昇に伴い腐食反応速度が増加するとされる。

$$\ln(v) = a \cdot \frac{1}{T} + b \quad (1)$$

ここで、 v :マクロセル腐食速度(mm/year), a , b :定数とする。

図-11に、絶対温度の逆数と腐食速度の対数の関係を示す。ここから、両者は概ね線形関係にあり、塩分濃度の違いにより生じるマクロセルの腐食速度もアレニウス則に従うことが確認できる。

4. 結論

本論文では、異なる塩化物イオン濃度のコンクリートを用いて製作した RC 供試体の自然電位と腐食電流を測定し、塩害環境下のマクロセル腐食の発生機構について検討した。本論文の範囲内で得られた知見を、以下にまとめる。

- 1) アノード側に 2.5kg/m^3 以下の塩化物イオンを含むコンクリート中でも、鉄筋が腐食状態になく、アノード鉄筋とカソード鉄筋の電位差が小さい場合には、マクロセル腐食は生じにくいことがわかった。
- 2) マクロセル腐食電流は、アノードとカソードの間隔が離れるほど小さくなるものの、アノードとカソードが 900mm 離れた場合にも生じていた。また、分極による自然電位の卑化は、アノードから 1400mm 離れた位置でも確認された。
- 3) マクロセルの腐食速度はカソード鉄筋とアノード鉄筋の面積比に律速されることが示された。このため、実構造物において、局所的に塩化物イオンが鋼材位置まで浸透した場合には、カソード鉄筋に対してアノード鉄筋が微小となり、激しいマクロセル腐食が生じることが懸念される。
- 4) マクロセル電流密度は温度が高くなるほど大きくなり、塩化物イオンの濃度差によって生じるマクロセルの腐食速度はアレニウス則に従うことが示された。

上記は、材齢 111 日目までの測定結果から得

られた知見をまとめたものである。今後は、供試体を屋外に暴露し、長期的な腐食速度の変化等について検討することが必要である。

なお、本論文は、独立行政法人土木研究所と日本構造物診断技術協会の「自然電位法による鉄筋腐食診断技術に関する共同研究」の成果の一部をまとめたものである。

参考文献

- 1) 岸谷孝一ほか: コンクリート構造物の耐久性シリーズ, 塩害(I), 技報堂出版, p.158, 1986
- 2) 例えば, 徳光卓ほか: 弁天大橋の塩化物イオン含有量測定結果に基づく調査方法の一案, セメント・コンクリート論文集, No.56, pp.378-382, 2002
- 3) 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
- 4) 例えば, 宮里心一ほか: モルタルの欠陥部に生じる塩害あるいは中性化による鉄筋腐食の形態と速度, 土木学会論文集, No.690, V-53, pp.83-93, 2001
- 5) 宮川豊章ほか: 鉄筋の腐食機構に与える水セメント比の影響について, 土木学会第 37 回年次学術講演会講演概要集, 第 V 部門, pp.317-318, 1982
- 6) 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)-コンクリート委員会腐食防食小委員会(2 期目)報告-, コンクリート技術シリーズ 40, p.325, 2000
- 7) 岡田清ほか: 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, Vol.281, pp.75-87, 1979
- 8) 例えば, 中島活哉ほか: 中性化によるコンクリート中の鉄筋腐食に及ぼす温度の影響, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.4, pp.1-4, 2000