

機関番号：82114

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560438

研究課題名(和文) マクロセル腐食の生じたコンクリート構造物の劣化機構解明と維持管理に関する研究

研究課題名(英文) Research on the deterioration mechanism and maintenance of concrete structures deteriorated due to the macro-cell corrosion in concrete

研究代表者

渡辺 博志 (WATANABE HIROSHI)

独立行政法人土木研究所・材料資源研究グループ・上席研究員

研究者番号：90355785

研究成果の概要(和文)：実際のコンクリート構造物で発生するマクロセル腐食に対する診断技術と補修方法を確立するために、屋外暴露した供試体を用いて検討した。その結果、診断においては、アノード部の自然電位が100mVほど貴側に分極することを考慮に入れる必要があること、補修においては、電気抵抗の大きい補修材を用いるとマクロセル腐食の影響を抑制できることなどがわかった。一方で、分離した鉄筋で測定したマクロセル腐食電流量の測定結果だけでは腐食量の増加を十分説明できないおそれがあること、が課題として残った。

研究成果の概要(英文)：In this research, inspection and repairing methods for concrete structures deteriorated by macro-cell corrosion were investigated using concrete specimens exposed outdoor. The following results are obtained. Approximately 100 mV shift of half-cell potential should be considered to detect macro-cell corrosion in concrete. When the patch repair is applied, the macro-cell corrosion can be mitigated by using repairing materials that have high electrical resistance. On the other hand, the increase of corrosion rate under the macro-cell corrosion condition can not be evaluated quantitatively by the measured current between anode and cathode. For this problem, further research is needed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：コンクリート

科研費の分科・細目：土木材料・施工・建設マネジメント

キーワード：コンクリート構造物、鋼材腐食、マクロセル腐食、自然電位

1. 研究開始当初の背景

コンクリート構造物は、適切な設計・施工がなされれば、十分な耐久性を有する。しかし、国内のコンクリート構造物の中には建設から長期経過したものや過酷な環境下で供用されているものも少なくなく、塩害や中性化等によりコンクリート内部の鉄筋に腐食が生じ、安全性が低下することが懸念されている。

特に塩害環境下のコンクリート構造物では、構造物の置かれた地理的条件や環境などにより外部から供給される塩化物イオン(Cl-)の量が部材の位置によって異なるため、腐食が全体的に均一に進行する“マイクロセル腐食”ではなく、腐食が一部で卓越して進行する“マクロセル腐食”となる可能性が高い(図1)。

ところが、既存の研究はひび割れ部や打ち

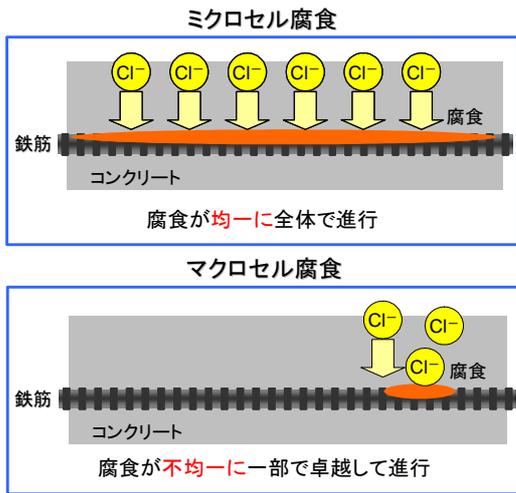


図1 塩害によって生じるマイクロセル腐食とマクロセル腐食のイメージ

継ぎ目などで生じるマクロセル腐食に着目したものがほとんどであり、実環境にあるコンクリート構造物で起こる可能性の高い、部材全体にわたって外部からの Cl⁻の供給量が不均一になるために生じるマクロセル腐食について検討した例は極めて少なかった。

また、このようにして発生したマクロセル腐食による腐食速度を定量的に示した事例は無く、マクロセル腐食の生じたコンクリート構造物の劣化メカニズムは十分には明確でない。

さらに、マクロセル腐食は断面修復工法を施したコンクリート構造物の再劣化要因として指摘されているが、そのメカニズムやこれを考慮した適切な補修方法は未だに確立されていない。

2. 研究の目的

上記の背景を鑑みると、コンクリート構造物を効率的に維持管理していくためには、実構造物で発生する可能性が高いとされるマクロセル腐食の発生機構を明確にした上で、信頼性の高い診断技術と適切な補修方法を確立することが不可欠となる。

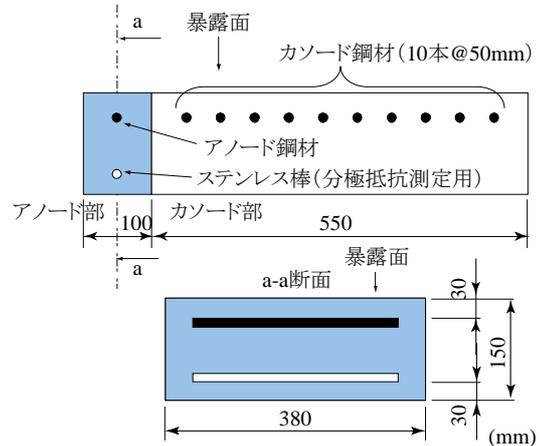
そこで、本研究では、

- (1) 供試体を用いた実験を行い、マクロセル腐食の発生機構とその進行メカニズムを解明する。
- (2) マクロセル腐食の生じたコンクリート構造物を対象として、非破壊試験等を用いた診断技術を確立する
- (3) マクロセル腐食による補修後の再劣化防止を考慮した補修方法を提案することを研究の目的とした。

それぞれの目的に対し、既往の研究事例などを整理し、この研究で検討する具体的な課題を抽出した。その結果を表1に示す。

表1 検討目的と具体的な検討課題

検討目的	具体的な課題	
	大分類	小分類
発生機構、メカニズム	マクロセル腐食が腐食量に与える影響はどの程度か。	マクロセル腐食によって増大する腐食量はどの程度か。
非破壊試験	マクロセル腐食環境下でも自然電位の測定結果は有効か	マクロセル腐食電流の影響で、腐食の診断を誤る可能性がないか。 照合電極と鉄筋の距離によって、測定結果が影響を受けないか。
補修後の再劣化防止	再劣化を防止するためにできることがあるか。	補修材料等によって、その後のマクロセル腐食の影響を低減できるか。



※アノード/カソード鋼材には長さφ13mm長さ300mmの丸鋼（アノード鋼材のみ表面みがき処理）を用いた。

※暴露面は、供試体上面（打設時は底面）とし、それ以外の5面は塗装した。

図2 腐食量の検討を行った供試体の立面図（上）および、側面図（下）

3. 研究の方法

- (1) マクロセル腐食によって増大する腐食量、および補修の影響に関する検討

マクロセル腐食の影響程度を把握するため、これを再現した供試体を作製した。また、この実験シリーズでは、補修の影響についても併せて検討するため、カソード側に補修材を用いた供試体も作製して補修を模擬した。供試体の形状を図2に示す。また、実験ケースを表2に、使用したコンクリートの配合、補修材の種類等を表3、表4に示す。

供試体は屋外（茨城県つくば市）に約2年間暴露した。暴露後約18~23箇月の間に3

表2 検討ケース

供試体 No.	アノード部		カソード部	
	材料	暴露面の塗装有無	材料	暴露面の塗装有無
1	配合 55 塩化物イオン量 10kg/m ³	無し	配合 55	無し
2		有り		有り
3		無し		
4		有り		
6	配合 55 塩化物イオン量 10kg/m ³	無し	配合 35	無し
7			配合 75	
8			CM	
9			PCM	
10			LPCM	
0			-	-

※供試体 No.0 は、マクロセル環境にないケースとして、外形 100×100×400mm のアノード部だけの供試体とした。
 ※供試体 No.5 は、欠番とした。

表3 コンクリートの配合

種類	単位量 (kg/m ³)				空気量 (%)
	W	C	S	G	
55	172	314	819	982	4.5
35		493	751	900	
75		230	851	1020	

※セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は大井川産の川砂、粗骨材は笠間産砕石を用いた。

表4 使用した補修材

種類	備考
塗装	塩害を受けた構造物の補修などに用いられる塗装システムでクロロプレングムを主成分とするもの
CM	断面修復用として販売されているセメントモルタル
PCM	断面修復用として販売されているポリマーセメントモルタル
LPCM	断面修復用として販売されているポリマーセメントモルタル (ガラス繊維入り)

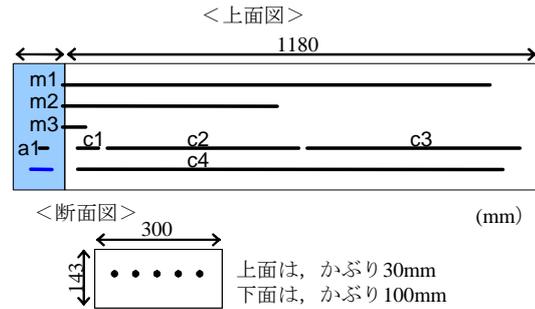
回、データロガーを用いてアノード/カソード鋼材間に流れるマクロセル腐食電流量の測定を行った (各回、約 5 日間)。

また、暴露後約 23 箇月が経過した時点で、供試体を解体して腐食量の測定を行った。解体直前のひび割れ状況を、表 5 に示す。

(2) マクロセル腐食環境下での自然電位測定結果に関する検討

マクロセル腐食の影響の有無が、ASTM C 876 などによる自然電位測定結果に与える影響を検討するため、マクロセル腐食状態を再現した供試体を作製して自然電位を測定した。

実務での適用を考えると、「さび」が生じているアノード部の測定結果が問題となる。



※コンクリートの配合は表 3 の 55 を用いた。
 ※着色部 (アノード部) には、塩化物イオン量が 10kg/m³ となるように練混ぜ時に NaCl を混入した。

図3 自然電位分布を検討した供試体の形状

表5 屋外暴露供試体の解体前の状況

供試体 No.	暴露面のひび割れの有無、最大ひび割れ幅	側面 (塗装面) の状況
1	有り、0.75mm	-
2	有り、塗膜のため不明	-
3	有り、0.70mm	-
4	無し (塗膜有り)	変状無し
6	有り、0.65mm	-
7	有り、0.50mm	-
8	有り、0.30mm	-
9	有り、0.60mm	-
10	無し	変状有り
0	有り、0.20mm	-

そこで、アノード部の面積 (Aa) に対し、カソード部の面積 (Ac) が大きい供試体を作製した。供試体の形状を図 3 に示す。従来の検討では、Ac/Aa が 100 程度までのものが多いが、今回の供試体では、Ac/Aa が最大 400 (一本の鉄筋の場合 200) と大きい。

また、供試体は上面、底面にかぶりの大きさを変化させ、この両面から測定することで、かぶりの大きさによる違いを検討した。

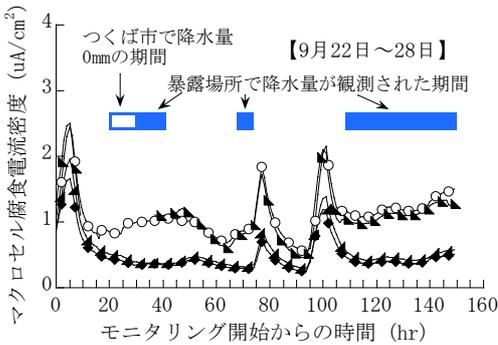
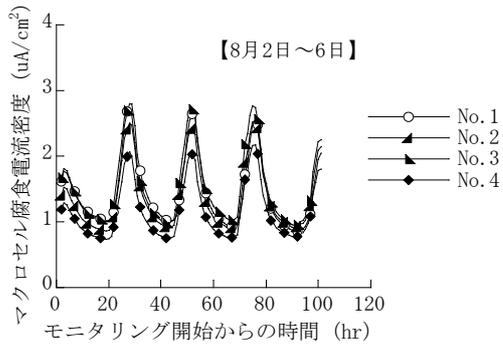
供試体は、材齢 28 日までの養生の後、約 8 箇月間屋外に暴露して腐食を促進させた。自然電位の測定は、供試体を気温 20°C の室内に移設した後、ASTM C 876 に準じて行った。

4. 研究成果

(1) マクロセル腐食によって増大する腐食量

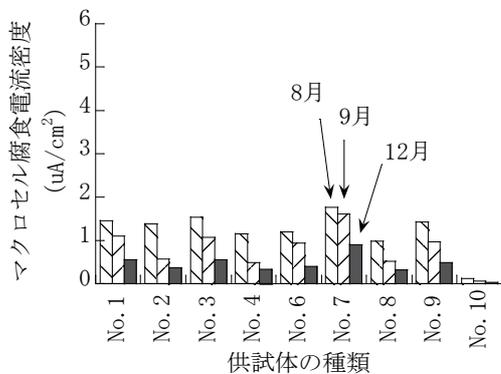
屋外暴露を行った図 2 の供試体で、暴露期間中に測定したマクロセル腐食電流量の一例を図 4 に示す。マクロセル腐食電流は、供試体温度が高くなったと見られる時間帯で大きかった。

測定結果をもとにアノード鋼材表面積あたりのマクロセル腐食電流量の平均値を求め、図 5 に示す。マクロセル腐食電流は、カソード側に水セメント比の大きなコンクリートを用いた供試体 No. 7 で、大きくなった。



※9月の測定では、供試体 No.3 に一部欠測あり。
 ※暴露場所の測定結果は、設置した転倒雨量計によるもの。つくば市の測定結果は、気象庁提供の AMeDAS データ (つくば) によるもの。

図4 マクロセル腐食電流密度の変化
 (供試体 No. 1~4)



※一部欠測のあった供試体については、欠測のない期間における測定結果が供試体 No. 1 と類似していたことから、このデータを用いて推測した。

図5 マクロセル腐食電流密度の平均値

このようにとりまとめたマクロセル腐食電流量から推定される腐食量と、暴露後に供試体を解体して実測したアノード鋼材の腐食量と比較して図6に示す。マクロセル腐食電流量から推定される腐食量は、実際の腐食量よりもかなり小さかった。一方で、マクロセル腐食の影響を受ける供試体の腐食量実測値は、これを受けない供試体 (No. 0) やマクロセル腐食電流量が小さい供試体 (例えば、No. 10) と比較して明らかに大きかった。

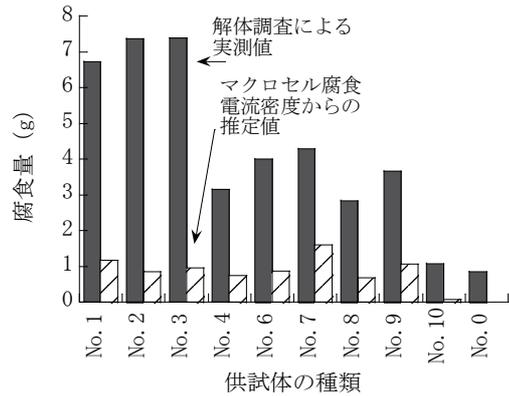


図6 アノード鋼材の腐食量

これらの結果から、以下のことが明らかになった。

① アノード/カソード鋼材間で測定されたマクロセル腐食電流密度から、気温の変動や降雨などの気象条件、カソード部のコンクリート品質などによって、マクロセル腐食の影響程度が異なることを、定性的には評価できる。

② 一方で、マクロセル腐食の影響を大きく受ける供試体の腐食量の増加は、アノード/カソード鋼材間で測定されたマクロセル腐食電流密度から推定される腐食量よりも大きく、モニタリングしたマクロセル腐食電流密度からその影響程度を定量的に評価することは現状では困難である。

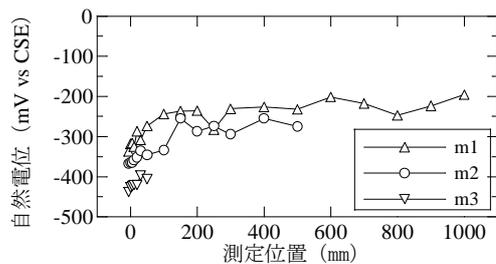
②のような結果となった理由は明確ではないが、マクロセル腐食の影響が継続的に作用することによって、アノード鋼材内部の腐食反応が活性化されていることが考えられ、今後の研究が求められる。

(2) マクロセル腐食環境下での自然電位測定結果に関する検討

本報では代表的な測定結果として、一本の鉄筋の一部 (5mm) 区間をアノード部に設置することによりマクロセル腐食状態を再現した場合 (図3中の m1~m3) を中心に報告する。

かぶり 30mm 側から測定した結果を図7に示す。自然電位は、アノード部で最も卑 (マイナス) 側の値となり、カソード部では、アノード部から離れるほど貴な電位が得られる傾向があった。また、Ac/Aa が大きくなるほどアノード部の自然電位は貴側となった。

鉄筋 m1~m3 の自然電位をマクロセル腐食の影響が無い鉄筋 a1 と比較して、その差を図8に示す。マクロセル腐食の影響がもっとも大きい鉄筋 m1 では、アノード部の自然電位が約 100mV 貴側に移行していた。このとき自然電位は約 -350mV vs CSE であり、ASTM の基準で、腐食の可能性が 90% 以上と判定できるかどうかの境界付近にあった。



※2種類のコンクリートの境界をゼロとし、塩分を含まない側への距離をプラス側として位置を表現した（以降、同様）。

図7 自然電位の分布（マクロセル腐食の影響が有る1本の鉄筋、かぶり30mm側）

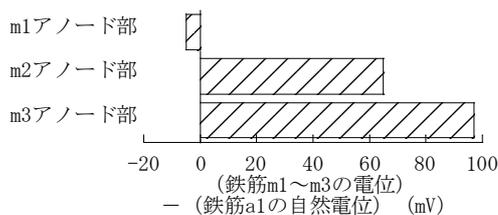


図8 アノード部の分極量

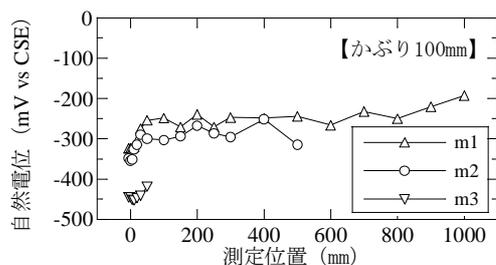


図9 自然電位の分布（マクロセル腐食の影響が有る1本の鉄筋、かぶり100mm側）

一方で、自然電位の分布を見ると、マクロセル腐食の影響が顕著な場合でも、アノード部が相対的に卑な値を示しており、腐食可能性が高い部位を検出する点では、有効と考えられた。

次に、かぶり100mm側から自然電位の分布を図9に示す。自然電位の分布は、かぶり30mm側から測定した結果と顕著には異ならなかった。通常のかぶりの範囲では、かぶりの厚さが多少増減しても、自然電位の値に与える影響は顕著ではないと考えられる。

これらの結果から、以下のことが明らかになった。

- ① マクロセル腐食の影響が顕著な場合、アノード側の鋼材の自然電位が貴側に移行していることも考慮に入れて判定することが望ましい（本研究では100mVほど）。
- ② マクロセル腐食の影響がある場合でも、自然電位が最も卑な部位に着目することで、腐食リスクの高い部位を検出できる。
- ③ かぶり30~100mmの範囲で、かぶりコン

クリートの厚さに大小があっても、マクロセル腐食の検出精度には大きな影響はないものと考えられる。

これらの成果は、今後、実構造物の調査で自然電位を測定した場合などに、測定結果を解釈する上で参考にすることができる。

(3) マクロセル腐食環境下での自然電位測定結果に関する検討

腐食量の検討を行った供試体（図2）のマクロセル腐食電流モニタリング結果（図4）に着目すると、降雨の影響を受けた9月の測定では、暴露面の塗装の有無による傾向の違いが認められた。塗装を施していない供試体No.1やカソード部のみに塗装を施した供試体No.3では、マクロセル腐食電流量が比較的大きい状態に保たれた。降雨があるとコンクリート中の含水率が上昇し、電気抵抗が低下するのでマクロセル腐食電流量が流れやすくなったと考えられる。

これに対し、適切に塗装を行った場合や、雨水の侵入が少なく電気抵抗の高い状態を保てる補修材を用いるとマクロセル腐食電流を抑制できると考えられる。

図5に示したマクロセル腐食電流密度の平均値を見ると、断面修復用のポリマーセメントモルタルを用いた供試体のうち一つは、マクロセル腐食電流が非常に小さい値に抑制されていた。また、この供試体では、アノード鋼材の腐食量もマクロセル腐食環境にない供試体No.0と同程度であった。同様に、全面を塗装した供試体No.4についても、マクロセル腐食電流量の抑制効果が認められるが、供試体No.10ほどではなかった。

このようにマクロセル腐食電流の抑制という観点では、屋外環境下でも電気抵抗の大きい補修材を用いることが有効であると認められた。ただし、電気的性質が異なる材料が混在する部材では、電気防食などの電気化学的な補修を行うことが困難である。したがって、補修材の選定においては、補修後の維持管理計画についてもよく検討しておく必要がある。

これらの知見は、今後、国土交通省が管理する実構造物の維持管理等について技術相談の依頼があった際などに、有効に活用する予定である。

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕（計1件）

- ①古賀裕久、中村英佑、渡辺博志、マクロセル環境が自然電位測定結果に与える影響に関する研究、コンクリート工学年次大会2011、2011年7月、12日予定、大坂

〔図書〕（計1件）

- ①渡辺博志、他、独立行政法人土木研究所、塩害環境下にあるコンクリート中鉄筋のマ

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡辺 博志 (WATANABE HIROSHI)

独立行政法人土木研究所・材料資源研究グループ・上席研究員

研究者番号：90355785

(2) 研究分担者

古賀 裕久 (KOGA HIROHISA)

独立行政法人土木研究所・材料資源研究グループ・主任研究員

研究者番号：20355788

中村 英佑 (NAKAMURA EISUKE)

国土交通省国土技術政策総合研究所・企画部国際研究推進室・研究官

研究者番号：80391605

(H20：長期海外出張のためH21から辞退)