

金沢工業大学大学院 学生会員 矢野真義

金沢工業大学 正会員 宮里心一

1. はじめに

冬期、寒冷地での鉄筋コンクリート製道路構造物では、凍結防止剤に含まれる塩化物イオンによって、塩害が生じる。一方夏期には、大気中の二酸化炭素の影響で中性化が生じる。これらが同一の鉄筋コンクリート部材において進行すると、塩害と中性化の複合劣化が生じることとなる。また同様の構造物において、冬期の気象条件(気温)を鑑みると、塩害と凍害の複合劣化が生じる可能性もある。現在、これらの複合劣化は実構造物において多く生じている¹⁾。但しこれまで、複合劣化した鉄筋コンクリート部材の腐食形態と腐食速度に関する研究は少なく^{2),3)}、腐食抑制策については未だ十分に検討されていないのが現状である。上記の背景を受けて本研究の目的は、複合劣化した鉄筋コンクリート部材に対する腐食形態に応じた腐食抑制策を提案・検証することである。

2. 実験概要

2.1 供試体概要と暴露方法

コンクリート供試体の概要を図1に示す。供試体は、100 mm×100 mm×400 mmの角柱であり、内部には分割鉄筋(φ9mmの丸鋼)と曲げ補強鉄筋を埋設した。分割鉄筋は、電気化学的には一本と見なせる鋼材としてある。作製された供試体を、打設後28日間湿潤気中において初期養生した。その後、3点曲げ載荷により、幅が0.15mmのひび割れを入れた。さらに、腐食形態に応じた補修(マクロセル腐食→ひび割れ閉塞、ミクロセル腐食→表面被覆)を行った。その後、塩害と凍害を促進する環境(塩害：濃度3%の食塩水を噴霧する湿潤環境下3.5日間+凍害：-4℃の乾燥環境下3.5日間)、あるいは塩害と中性化を促進する環境(塩害：濃度3%の食塩水を噴霧する湿潤環境下2日間+中性化：CO₂濃度5%の乾燥環境下5日間)で28日間暴露させた。暴露後に、マクロセル電流およびミクロセル電流を測定した。なお本研究では、鉄筋要素間を流れる腐食電流をマクロセル電流、および鉄筋要素内のみを流れる腐食電流をミクロセル電流と定義して、測定した。

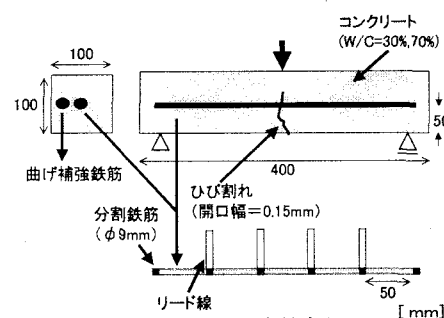


図1 供試体概要

2.2 測定方法および評価方法

①マクロセル電流の測定方法：測定は図2に示す方法で行った。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。次に対象とする鉄筋要素の両端から出入する電流を合計した。この電流を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定した。鉄筋要素*i*のマクロセル電流密度 I_{macro} (μA/cm²) は式[1]で表わせる。

ここで、 $I_{i-1,i}$ は鉄筋要素 *i-1* から鉄筋要素 *i* へ流れる電流 (μA)、 $I_{i,i+1}$ は鉄筋要素 *i+1* から鉄筋要素 *i* へ流れる電流 (μA)、 S_i は鉄筋要素 *i* の表面積 (cm²) を示す。

$$I_{macro} = \frac{I_{i-1,i} + I_{i,i+1}}{S_i} \quad [1]$$

②ミクロセル電流の測定方法：鉄筋要素間を接続するリード線を一度切断した。この時、異なる鉄筋要素間では電流の出入がない。この状態で、各鉄筋要素毎に鉄筋表面の分極抵抗をFRAを用いた交流インピーダンス法により求めた。測定概要を図3に示す。ミクロセル電流密度 I_{micro} (μA/cm²) は文献⁴⁾を参考にして式[2]により算定した。

$$I_{micro} = \frac{K}{R_{pi}} \quad [2]$$

ここで、 R_{pi} は鉄筋要素 *i* における分極抵抗 (Ω・cm²)、 K は文献⁴⁾を参考にし、0.0209 (V) を示す。

③腐食形態の評価方法：著者ら⁵⁾の研究を参考にし、マクロセル電流密度およびミクロセル電流密度を用い、

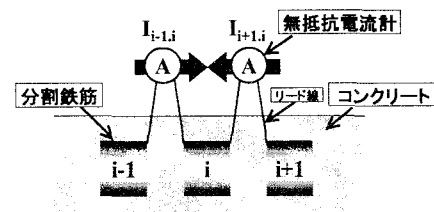


図2 マクロセル電流の測定概要

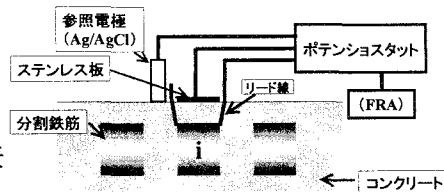


図3 分極抵抗の測定概要

腐食形態を評価した。ここで、腐食形態の評価は、「 $0.67 \geq (\text{マクロセル電流密度} / \text{ミクロセル電流密度})$ 」の時をミクロセル卓越型、「 $1.50 \leq (\text{マクロセル電流密度} / \text{ミクロセル電流密度})$ 」の時をマクロセル卓越型、および「 $0.67 < (\text{マクロセル電流密度} / \text{ミクロセル電流密度}) < 1.50$ 」の時をマクロセル・ミクロセル併存型とした。

3. 実験結果

3. 1 実験結果の例

腐食電流密度の例を図4および図5に示す。これらは、水セメント比が30%、劣化因子が塩害・凍害の結果である。ここで、図4によれば、最高マクロセル腐食電流密度は $1.2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ および最高ミクロセル腐食電流密度は $0.7 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ である。したがって、腐食形態はマクロセル卓越型である。また、最高総腐食電流密度は $1.9 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ である。

一方、図5によれば、最高マクロセル腐食電流密度は $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ および最高ミクロセル腐食電流密度は $0.2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ である。したがって、腐食形態はミクロセル卓越型である。また、最高総腐食電流密度は $0.3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ である。

以上のことから、図4と図5を比較すると、補修(ひび割れ閉塞)を施すことによりマクロセルの形成を抑制でき、腐食速度を約16%に低減できることが確認された。

3. 2 補修効果の評価

補修の有無が腐食形態と腐食速度に及ぼす影響を表1に示す。これによれば、補修ありの場合は、補修なしの場合と比較して、腐食速度を20%以下に低減できることが認められる。したがって、腐食形態に応じた補修をすることによって、腐食要因物質の浸透を抑制でき、腐食の進行を防げることが可能であることが明らかとなった。

表1 実験結果のまとめ

水セメント比	劣化因子	補修なし		補修方法	補修あり		低減率(%)
		腐食形態	腐食速度 ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)		腐食形態	腐食速度 ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	
30%	塩害・凍害	マクロセル卓越型	1.918	ひび割れ閉塞	ミクロセル卓越型	0.312	16.27
	塩害・中性化	マクロ・ミクロ併存型	0.991	ひび割れ閉塞	ミクロセル卓越型	0.123	12.41
70%	塩害・凍害	ミクロセル卓越型	4.159	表面被覆	マクロセル卓越型	0.005	0.12
	塩害・中性化	ミクロセル卓越型	4.039	表面被覆	マクロ・ミクロ併存型	0.001	0.03

4. 結論

- 1) マクロセル腐食に対しては、欠陥部の腐食要因物質の浸透を抑制するひび割れ閉塞を施せば、腐食の進行を防げることが確認できた。例えば、塩害・凍害を受ける水セメント比が30%のコンクリートにおいて補修された場合の腐食速度は $0.0004(\text{mm}/\text{年})$ であり、未補修の腐食速度と比較して約16%に相当する。
- 2) ミクロセル腐食に対しては、全面的な腐食要因物質の浸透を抑制する表面被覆を施せば、腐食の進行を防げることが確認できた。例えば、塩害・中性化を受ける水セメント比が70%のコンクリートにおいて補修された場合の腐食速度は $0.000001(\text{mm}/\text{年})$ であり、未補修の腐食速度と比較して約0.03%に相当する。

謝辞：(財)前田記念工学振興財団に誠意を表する。

【参考文献】

1) 三浦 尚、外門正直、川村満紀、関 博、原 忠勝：融雪剤によるコンクリート構造物の劣化研究委員会報告、コンクリート工学年次論文報告集、No. 1/Vol-21、pp. 29-38、(1999)

2) 矢野真義、飯田徹之、川端健史、宮里心一：塩害と凍害により複合劣化した鉄筋コンクリート部材のひび割れ部における腐食形態と腐食速度の解明、第57回セメント技術大会講演要旨、pp. 124-125、(2003)

3) 日本コンクリート工学協会編：複合劣化コンクリート構造物の評価と維持管理計画に関するシンポジウム論文集、(2001)

4) 水流徹、前田龍、春山志郎：交流法腐食モニターの局部腐食への適用：防食技術、No. 28、pp. 638-644、(1979)

5) 宮里心一、大即信明、木村勇人、水流徹：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)

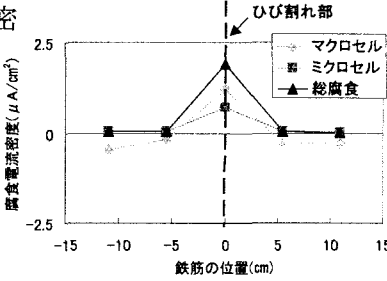


図4 補修前の腐食電流密度の例

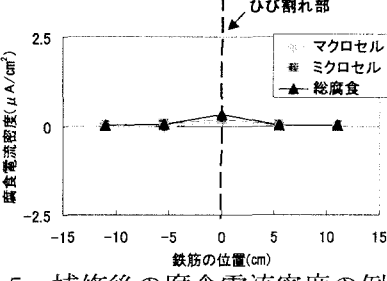


図5 補修後の腐食電流密度の例