

モルタルの欠陥部に生じる塩害と中性化による鉄筋腐食の形態と速度の解明

金沢工業大学大学院 学生会員 ○矢野真義 飯田徹之
株式会社明翫組（元金沢工業大学）川端健史
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造路構造物では、融雪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。これらが同じ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。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、塩害あるいは中性化により単独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ついてのみ研究されてきたにすぎない²⁾。即ち、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ついては、未だ充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、モルタル供試体の欠陥部に生じる塩害と中性化による複合劣化について、鉄筋腐食の形態(マクロセル腐食、ミクロセル腐食)と速度を明らかにすることである。なお、今後本研究の成果を踏まえることにより、複合劣化している多くの構造物において、最適な補修方法等が提案できる。これにより、構造物のライフサイクル(寿命)の長期化を図ることができると期待している。

2. 実験概要

モルタル供試体の概要を図1に示す。供試体は、直径50mm、高さ200mmであり、内部には分割した鉄筋(φ9mm)の丸鋼を埋設した。ここで、分割鉄筋の作製方法を記す。各鉄筋要素が接合する側面にリード線をはんだ付けし、接合部をエポキシ樹脂で覆った。その後、5本の鉄筋要素をエポキシ樹脂で絶縁接続し、隣接するリード線を接続することにより、電気化学的には一本と見なせる鋼材とした。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、塩害と中性化を促進する環境(塩害:毎日濃度3%の食塩水約10mlを欠陥部に注入、中性化:CO₂濃度5%、RH60%、30℃)に15日間暴露し、劣化位置の鉄筋へ塩化物イオンを供給させかつ中性化を進行させた。さらに、実際の気象条件を模擬した環境で、56日間本暴露した。ここで、本暴露中の外部環境は、湿潤(RH90%、20℃)、乾燥(RH60%、20℃)、および乾湿繰返し(湿潤1日間+乾燥2.5日間)とした。すなわち実験ケースは、劣化位置が2水準(欠陥、欠陥+近傍)、水セメント比が3水準(0.3、0.5、0.7)および本暴露中の外部環境が3水準(湿潤、乾燥、乾湿繰返し)の計18通りである。

本研究では、本暴露期間中において、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。その後、著者ら²⁾の研究を参考にし、マクロセル電気量密度およびミクロセル電気量密度を算定した。さらに、両電気量密度を用い、腐食形態および腐食速度を評価した。ここで、腐食形態の評価は、「 $0.67 \geq$ (マクロセル電気量密度/ミクロセル電気量密度)」の時をミクロセル卓越型、「 $1.50 \leq$ (マクロセル電気量密度/ミクロセル電気量密度)」の時をマクロセル卓越型、および「 $0.67 <$ (マクロセル電気量密度/ミクロセル電気量密度) < 1.50 」の時をマクロセル・ミクロセル併存型とした。また腐食速度の評価は、総腐食電気量密度が $35C/cm^2$ より高い時を速い、一方低い時を遅いとした。

3. 実験結果および考察

3.1 実験結果の例

図2に、腐食電気量密度の例を示す。これは、劣化位置(欠陥)、水セメント比(0.5)および外部環境(湿潤)の結果である。これによれば腐食形態は、総腐食電気量密度が最高となる欠陥部における「マクロセル電気量密度/ミクロセル電気量密度」が1.85より、マクロセル卓越型であると評価される。また腐食速度は、最高総腐食電気量密度が $57C/cm^2$ であり、速いと評価される。

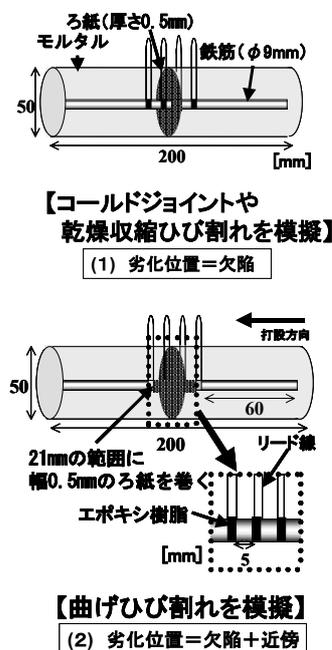


図1 供試体概要

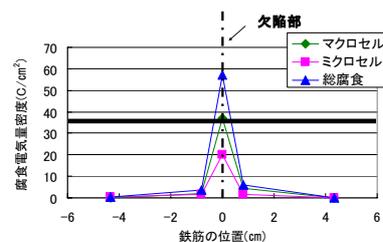


図2 腐食電気量密度の例

キーワード・・・耐久性、複合劣化、欠陥、腐食形態、腐食速度

連絡先・・・〒921-8501 石川県石川郡野々市町扇が丘7-1 TEL:076-248-1305 FAX:076-294-6713

3. 2 実験結果のまとめ

3. 1 に示した評価を、全供試体に対して行った。図 3 に腐食形態の評価結果をまとめる。上段・中段・下段は、水セメント比=0.3・0.5・0.7 の結果である。また、各段の縦軸は、塩化物イオンの供給位置かつ中性化の進行位置を示し、一方横軸は、外部環境すなわち水および酸素の供給条件を示す。これによれば、水セメント比が 0.3 の時にマクロセル腐食が卓越し、水セメント比が 0.5 の時はマクロセル・マイクロセル併存型が卓越し、水セメント比が 0.7 の時はマクロセル・マイクロセル併存型が卓越する傾向が認められる。図 4 に腐食速度の評価結果をまとめる。楕円内の値は最高総腐食電気量密度を示す。これによれば、全体的に水セメント比が高いほど腐食速度は速い傾向が認められた。ただし、一部においては、水セメント比が低い場合に、高い場合と比較して、腐食速度が速くなる傾向が認められた。

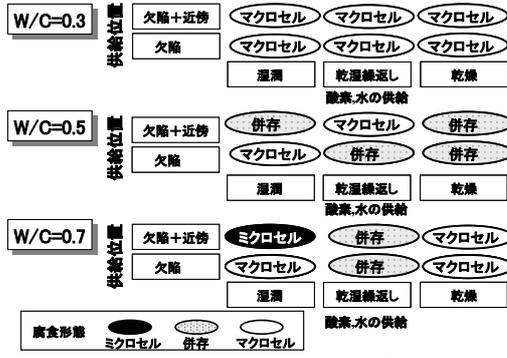


図 3 腐食形態の評価結果

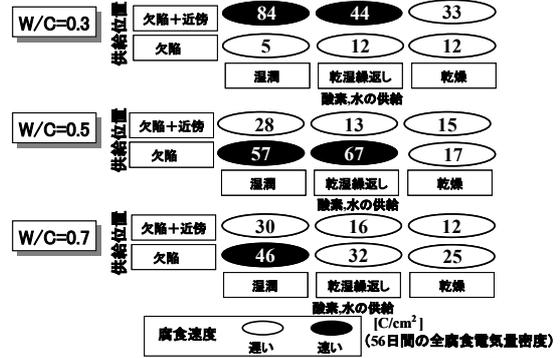


図 4 腐食速度の評価結果

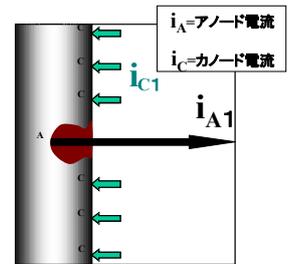
3. 3 腐食形態の考察

低水セメント比の場合、モルタル内部は緻密になる。よって、モルタル内部では腐食要因物質が供給されにくくなる。その結果、欠陥部のみにおいて腐食要因物質が供給される。従って、モルタル内部と欠陥部における腐食要因物質の供給量の偏りが大きく、マクロセル卓越型腐食が進行すると考えられる。

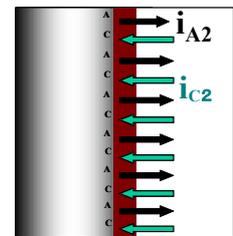
一方、高水セメント比の場合、モルタル内部は粗になる。よって、欠陥部のみならずモルタル内部でも腐食要因物質が供給されやすくなる。その結果、モルタル内部と欠陥部における腐食要因物質の供給量の偏りは小さく、マイクロセル卓越型腐食が進行すると考えられる。

3. 4 腐食速度の考察

低水セメント比の時に、腐食速度が速くなる場合がある理由を、図 5 を用いて考察する。3. 3 に示した通り、低水セメント比の場合、マクロセル腐食が生じる。この腐食においては、アノード及びカソードの場所的分離が生じ、前者の面積は、後者の面積より狭くなる。ここで、一般に、コンクリート中鉄筋の腐食速度は、カソード反応に律速される。また、カソード電流は、単位面積当たりの鉄筋へ供給される酸素量により制限される。これらの条件を踏まえると、 $i_{A1} = 6 i_{C1}$ となる。一方、高水セメント比の場合、マイクロセル腐食が生じる。この腐食において、鉄筋表面の何れの位置でも、アノード反応及びカソード反応が進行し、アノード面積とカソード面積は等しくなる。その結果、 $i_{A2} = i_{C2}$ となる。従って、 i_{C2} が i_{C1} の 5 倍²⁾ 未満とすれば、 i_{A1} は i_{A2} より大きくなる。即ち、低水セメント比の場合に、腐食速度が速くなる傾向が考察された。



$i_{A1} = 6i_{C1}$
【マクロセル腐食】



$i_{A2} = i_{C2}$
【マイクロセル腐食】

図 5 アノード、カソードの場所的分布と反応速度

4. 結論

- 腐食形態は、水セメント比が低いほど、マクロセル卓越型となる傾向がみられた。一方、水セメント比が高いほど、マクロセル・マイクロセル併存型となる傾向がみられた。
- 腐食速度は、全体的に水セメント比が高いほど速い。ただし、水セメント比が低い時でも速くなる場合があった。

謝辞：(財)前田記念工学振興財団に誠意を表す。

【参考文献】

- 三浦尚ほか：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、Vol.21, No.1, pp.29-38, (1999)
- 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)