

塩害劣化した RC 部材における鉄筋腐食モニタリングと劣化予測手法の検討

神戸大学大学院 学生員 山室 俊介 神戸大学大学院 正会員 森川 英典

1. はじめに：本研究では、塩害を想定した供試体に対して定期的に鉄筋腐食モニタリングを行い分極抵抗の値を計測した後に解体し、鉄筋の腐食量を測定した。分極抵抗の経時計測データから腐食量を推定し実際の腐食量と比較することで、分極抵抗によって腐食量が推定できるかを評価した。この評価により得られた知見をもとに、塩害により劣化した RC 部材の劣化予測手法について検討を行った。

2. 供試体概要：供試体の概要を表-1 に、断面図・計測面図を図-1 に示す。供試体には発生限界塩化物イオン濃度  $C_{lim}=1.2\text{kg/m}^3$  を超える  $6.0\text{kg/m}^3$  の塩化物を打設時に混入し、初期含有塩分による塩害を想定した。表-1 の暴露環境について、屋内乾湿繰返しとは湿度 100%、温度 60 の高温湿潤環境で 3 日間、常温乾燥環境で 4 日間を 1 サイクルとし、このサイクルを定期的に繰り返す環境である。

3. 腐食量の評価：暴露終了後、供試体を解体し、腐食(減)量を測定した。腐食量は、鉄筋を 10% のクエン酸二アンモニウム溶液に常温で 48 時間浸漬し、腐食生成物を除去した後に鉄筋の質量を測定した。このとき、腐食生成物のほかに黒皮も剥がれ落ちたため、別途健全な鉄筋を用いて同様の方法で質量を測定し、それらの差を鉄筋の表面積で割った値を腐食量とした。以降の検討では、供試体軸方向の腐食状況のばらつきを考慮するため、鉄筋を鉄筋腐食モニタリングの各計測点に対応する範囲ごとに切断し、質量を測定して求めた腐食量を用いている。

4. 分極抵抗による腐食量の推定：分極抵抗による腐食量の推定は以下の式(1)を用いて行った。

$$G = \left( \frac{M}{2} \cdot \frac{K_v}{F_a} \right) \cdot \sum \left( \frac{\Delta t}{R_p} \right) \dots(1)$$

ここで、 $G$ ：腐食減量( $\text{g/cm}^2$ )  $R_p$ ：分極抵抗( $\text{k} \ \Omega \cdot \text{cm}^2$ )  $t$ ：経過時間(sec)  
 $M$ ：鉄の原子量(55.8g)  $F_a$ ：ファラデー定数(96500 クーロン)  
 $K_v$ ：換算係数(V)

供試体の鉄筋腐食量と分極抵抗の逆数の時間積分値との関係を図-2 に示す。一般的に用いられる換算係数  $K_v$  の値の範囲は 0.026 ~ 0.052V であるため、式(1)から考えると各点の図-2 の 2 直線の間プロットされると考えられるが、今回の供試体では暴露環境に関係なくこの範囲を大きく逸脱しており、評価ができていない時間積分値が存在していることがわかる。このギャップの時間積分値と平均腐食ひび割れ幅との関係を調べた。ギャップの積分値を算出する際の換算係数  $K_v$  の値は 0.026V とした。その結果、図-3 のように暴露環境に関係なく、平均腐食ひび割れ幅の値の増加に伴い時間積分値が増加する傾向が見られた。このことから、このギャップの積分値は分極抵抗の計測値が腐食ひび割れの影響を受けて発生したものと考えられる。そのため、一般的な換算係数  $K_v$  の値を用いて鉄筋の腐食量を精度良

キーワード 塩害, RC 部材, 劣化予測, 分極抵抗, 腐食ひび割れ

連絡先 〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1 神戸大学大学院工学研究科 TEL078-881-1212

表-1 供試体概要

供試体名	鉄筋の種類	鉄筋接触	暴露環境	暴露期間
A1	異形棒鋼	絶縁	屋内乾湿繰返し	2年
A2	異形棒鋼	導通	屋内乾湿繰返し	2年
B1	異形棒鋼	絶縁	屋外	3年
B2	異形棒鋼	導通	屋外	3年
C1	丸鋼	絶縁	屋内乾湿繰返し	2年
C2	丸鋼	導通	屋内乾湿繰返し	2年

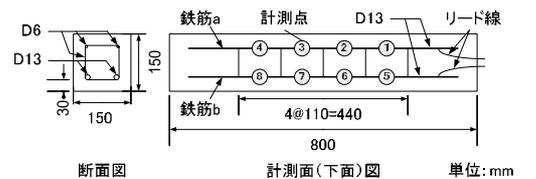


図-1 供試体の断面・計測面図

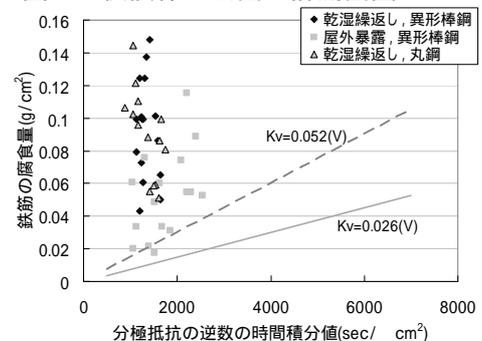


図-2 腐食量と分極抵抗の逆数の時間積分値の関係

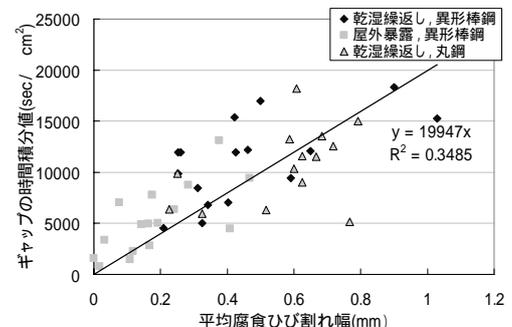
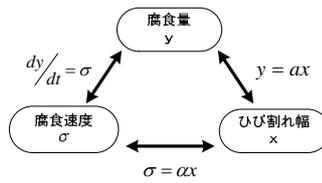


図-3 ギャップの時間積分値と平均腐食ひび割れ幅との関係

く推定するためには、このギャップの積分値を考慮する必要があり、その方法として図-3の平均腐食ひび割れ幅との関係を用いることが考えられる。



5. 点検結果に基づく劣化予測手法の検討: 図-4 加速期のパラメータ

劣化予測は既往の研究<sup>1)</sup>の手法を用いて行った。調査時点の腐食速度が点検データより求めた腐食速度となるように補正係数 a の値を算出して予測を行った。また、図-4 に示す劣化予測の加速期における腐食量と腐食ひび割れ幅に関する係数 a の設定値について文献の整理を行った。その結果を図-5 に示す。図-5 には本研究の供試体の実験値も示している。

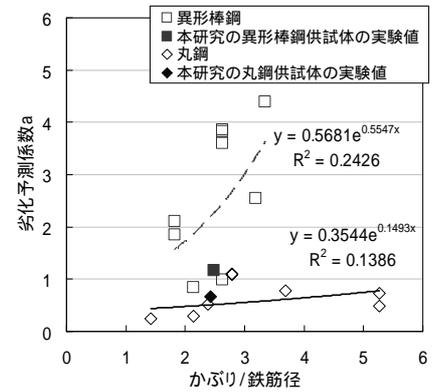


図-5 係数 a の文献調査結果

この文献調査の結果から以下の新たな算出式が得られた。

$$a = 0.5681 \cdot \exp(0.5547 \cdot d/\phi) \quad (\text{異形棒鋼}) \quad \dots(2)$$

$$a = 0.3544 \cdot \exp(0.1493 \cdot d/\phi) \quad (\text{丸鋼}) \quad \dots(3)$$

ここで、d: コンクリートかぶり(mm) ; 鉄筋径(mm)

この式(2),(3)を用いた場合と既往の研究<sup>1)</sup>の算出式を用いた場合、本研究の供試体の実験値を用いた場合の予測結果の違いについても検討した。

鉄筋腐食モニタリングから求められる分極抵抗の逆数の時間積分値と実際の時間積分値とのギャップについて、本研究では図-6 に示すように時間積分値の経時変化に実際の時間積分値とのギャップを考慮して劣化予測を行った。ギャップの積分値の経時変化は図-3 の平均腐食ひび割れ幅との関係と既往の研究<sup>1)</sup>の腐食ひび割れ幅の経時変化式を用いて求めた。この方法で求めた時間積分値の経時変化の 2 時点での増加量から分極抵抗を逆算し、これを換算分極抵抗とした。

劣化予測の精度を検証した結果を図-7 に、図-7 の凡例の説明を表-2 に示す。結果を見ると、計測分極抵抗を用いた場合に比べ、換算分極抵抗を用いた場合に精度が大きく向上している。また、今回の換算分極抵抗を用いた予測は鉄筋を短く切断して行っていることから、短い区間で予測を行っても換算分極抵抗を用いれば精度良く推定できることがわかる。ただし、式(3)を用いた推定 8 の精度が若干劣るといった結果が得られており、この係数 a を含め劣化予測の設定値の検討を今後も継続する必要がある。

6. まとめ: 得られた知見をまとめる。(1)鉄筋腐食モニタリングの計測分極抵抗から求められる分極抵抗の逆数の時間積分値と実際の時間積分値とのギャップは、腐食ひび割れによって発生した可能性が示された。(2)このギャップを考慮して求めた換算分極抵抗を用いて劣化予測を行った場合、計測分極抵抗を用いた場合に比べて、予測精度が大幅に向上した。(3)鉄筋の短い区間で予測を行っても換算分極抵抗を用いれば精度が良く推定できる。

【参考文献】1)山本, 森川, 小島, 権: 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, 第 6 巻, pp.401-406, 2006.10.

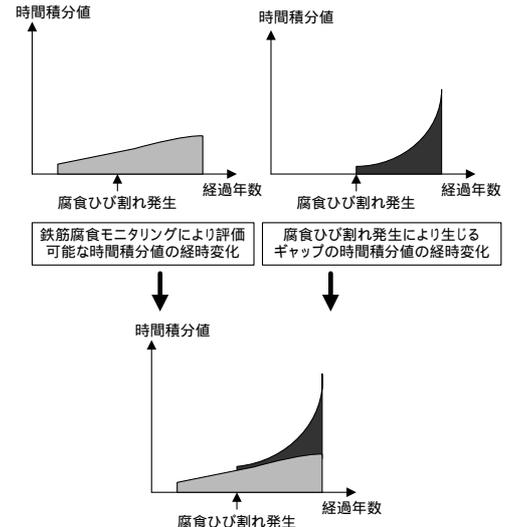


図-6 分極抵抗の逆数の時間積分値の経時変化の算出イメージ

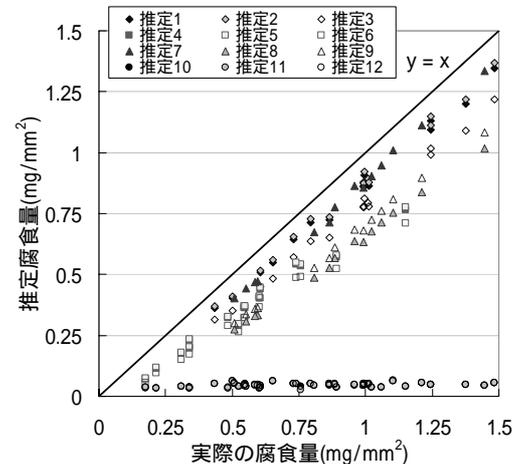


図-7 劣化予測精度の検証結果

表-2 図-7 の凡例の説明

	暴露環境	鉄筋の種類	推定に用いた分極抵抗	パラメータaの設定値
推定1	屋内	異形棒鋼	換算分極抵抗	既往の式
推定2	屋内	異形棒鋼	換算分極抵抗	式(2),(3)
推定3	屋内	異形棒鋼	換算分極抵抗	実験値
推定4	屋外	異形棒鋼	換算分極抵抗	既往の式
推定5	屋外	異形棒鋼	換算分極抵抗	式(2),(3)
推定6	屋外	異形棒鋼	換算分極抵抗	実験値
推定7	屋内	丸鋼	換算分極抵抗	既往の式
推定8	屋内	丸鋼	換算分極抵抗	式(2),(3)
推定9	屋内	丸鋼	換算分極抵抗	実験値
推定10	屋内, 屋外	異形, 丸鋼	計測分極抵抗	既往の式
推定11	屋内, 屋外	異形, 丸鋼	計測分極抵抗	式(2),(3)
推定12	屋内, 屋外	異形, 丸鋼	計測分極抵抗	実験値