

論文 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

山室 俊介*1・森川 英典*2

要旨：塩害を想定した供試体を作製し、定期的な鉄筋腐食モニタリングを実施した。鉄筋腐食モニタリングのパラメータである分極抵抗の逆数の時間積分値と実際の鉄筋の腐食量との比較を行った結果、鉄筋腐食モニタリングにより計測された分極抵抗では評価できていない時間積分値が存在し、これを評価する手法が必要であることがわかった。その手法の検討をしたところ、分極抵抗と腐食ひび割れ幅の経時点検データを用いることで評価できる可能性が示された。得られた知見をもとに劣化予測手法を検討した結果、この知見を考慮しない場合に比べて、腐食量の予測精度が向上することが確認できた。

キーワード：塩害劣化, RC 部材, 分極抵抗, 腐食ひび割れ, 劣化予測

1. はじめに

塩害などによりコンクリート中の鉄筋が腐食し性能が低下する RC 構造物の維持管理を合理的に行うには、各種の点検が適切に行われ、鉄筋の腐食状況を正確に把握することが重要であり、その点検結果に基づく劣化の予測が必要である。コンクリート中の鉄筋の腐食状況を把握するための手段として、電気化学的パラメータを計測する方法が提案されている。パラメータの一つである分極抵抗から鉄筋の腐食速度を推定できるが、その信頼性についての検討は十分とはいえないのが現状である。また、分極抵抗の計測は鉄筋が腐食し、かぶりコンクリートに腐食ひび割れが発生するまでの期間(潜伏期～進展期)に対して有効とされているが、既設の RC 構造物では腐食ひび割れが発生しているものも多く、腐食ひび割れ発生後(加速期以降)の適用性について検討することも重要である。

そこで、本研究では塩害を想定した暴露環境の異なる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。これらの供試体を腐食ひび割れ幅などの調査を行った後に解体し、鉄筋の腐食量を計測した。分極抵抗の経時計測データをもとに鉄筋の腐食

量を推定し、その結果と供試体内部の鉄筋の腐食状態との比較を行い、分極抵抗によって鉄筋の腐食量が推定できるかを評価した。供試体軸方向の腐食状況のばらつきを考慮するため、この評価は鉄筋腐食モニタリングの各計測点の範囲の腐食量と鉄筋腐食モニタリングの結果を用いて行った。そ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

供試体の配合を表 - 1 に、供試体の概要を表 - 2 に、供試体の断面図・計測面図を図 - 1 に示す。供試体には発錆限界塩化物イオン濃度 $C_{lim}=1.2\text{kg/m}^3$ を超える 6.0kg/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 - 2 の暴露環境について、屋内乾湿繰返しとは、屋内の高温スチーム室にて湿度 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返す環境である。鉄筋の種類や暴露環境の違いのほか、主鉄筋をスターラップによって電気的に導通させた供試体と絶縁させた供試体を設け、絶縁させた供試体はスター

表 - 1 示方配合

水セメント比 (%)	粗骨材最大寸法(mm)	細骨材率(%)	単位量(kg/m ³)				
			水	セメント	細骨材	粗骨材	塩化物量
75	20	48	180	240	842	955	6

表 - 2 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

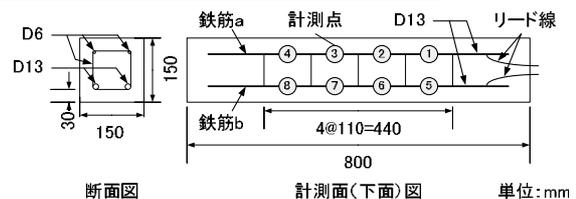


図 - 1 供試体の断面図・計測面図

*1 神戸大学大学院 工学研究科市民工学専攻 (正会員)

*2 神戸大学大学院 工学研究科市民工学専攻教授 工博 (正会員)

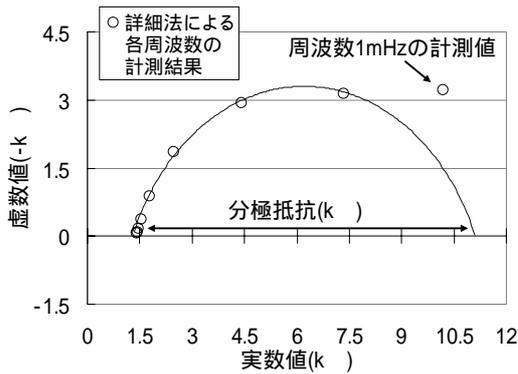


図 - 2 簡易法との比較のための詳細法による交流インピーダンスの計測結果



写真 - 1 供試体のひび割れ状況 (写真は供試体 A2)

ラップと主鉄筋の接触部分をエポキシ樹脂とVMテープで絶縁加工を行った。

3. 供試体の非破壊調査と内部鉄筋調査

3.1 鉄筋腐食モニタリング概要

鉄筋腐食モニタリングは SRI-CM- (株四国総合研究所製)を用いて行った。計測方法には、多周波の交流インピーダンス計測し、その交流インピーダンスの軌跡から分極抵抗を推定する詳細法と代表的な高低2周波の交流インピーダンス値から分極抵抗を求める簡易法がある。詳細法で行うことでより正確な分極抵抗の値を計測することが可能であるが、簡易法に比べ1点あたりの計測時間が長くなり実用に適さない。そこで、簡易法と詳細法との計測結果に大きな違いが見られないか確認を行った。簡易法の計測は10Hzと10mHzの2周波で行い、詳細法の計測は10Hzから1mHzの間の周波数で行った。印加電圧はともに10mVである。その結果、簡易法の見かけの分極抵抗の値が10.6kであったのに対し、詳細法の交流インピーダンスの計測結果(図-2)から推定される分極抵抗も約10kであった。図-2において、周波数1mHzの計測値が円弧から外れる結果となったが、これは、カソード反応が酸素の拡散過程に律速されていることが原因であると考えられる。簡易法でも詳細法と同程度の計測結果が得られることが確認できたため、簡易法によって分極抵抗の計測を行うことにした(印加電圧10mV,周波数は10Hzと10mHz)。その他、気温()と湿度(%)はデジタル式温湿度計にて、コンクリート温度()は熱電対にて、コンクリート含水率(%)は電気抵抗

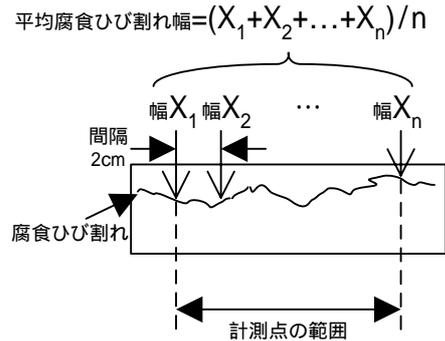


図 - 3 平均腐食ひび割れ幅の算出方法

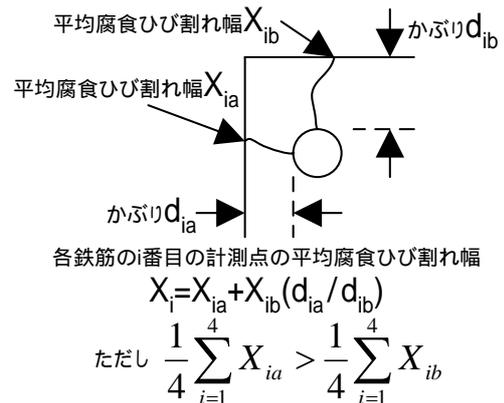


図 - 4 腐食ひび割れが2面に発生している場合の平均腐食ひび割れ幅

式水分計にて計測した。ここで、コンクリート温度・含水率はかぶり深さに相当する位置で得られた値である。

計測時には、計測値を安定させるために噴霧器を用いて供試体に散水した。散水方法は、計測30分前に対象供試体全体の表面が十分湿潤状態となるように散水し、計測時まで適宜散水して計測を開始した。

乾湿繰返し暴露の供試体については常温乾燥環境下にて計測を行った。

3.2 腐食ひび割れの評価方法

供試体のひび割れの発生状況を写真-1に示す。

供試体の腐食ひび割れを評価するために、コンクリート表面に発生した腐食ひび割れ幅を供試体の端から2cm間隔で計測を行った。これを鉄筋腐食モニタリングの各計測点の範囲(スターラップの間隔11cmの範囲)で図-3に示すように、計測した幅の値の合計を計測数で割ることで平均腐食ひび割れ幅を算出し、この値を以降の検討に用いることにした。図-4のように腐食ひび割れが2面に発生している場合には、コンクリートのかぶりの大きさの違いの影響を考慮するために、かぶりの比を片方の面の平均腐食ひび割れ幅の値にかけたものと、もう一方の面の平均腐食ひび割れ幅の値を足したものを、その計測点に対する平均腐食ひび割れ幅とした。

3.3 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。

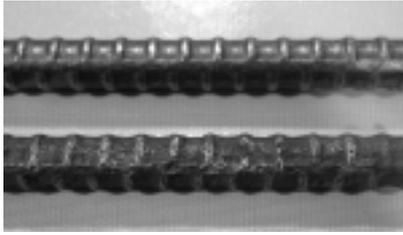


写真 - 2 鉄筋の腐食状況
(上: 健全鉄筋, 下: A1 供試体の腐食鉄筋)

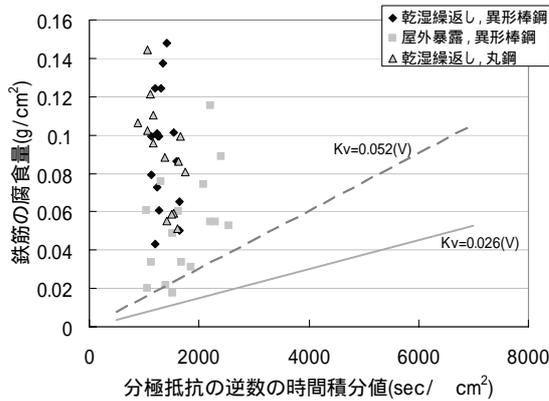


図 - 5 腐食量と分極抵抗の逆数の時間積分値の関係

供試体より採取した鉄筋の腐食状況を写真 - 2 に示す。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、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、腐食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、計測点ごとに算出した腐食量を用いている。

4. 鉄筋腐食モニタリングによる鉄筋腐食量の評価

腐食反応において鉄がすべて 2 価のイオンになると仮定すると、鉄筋の腐食量と鉄筋腐食モニタリングのパラメータである分極抵抗の間には、ファラデーの第 2 法則によって以下の式(1)が成り立つ。

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

ここで、 G : 腐食減量(g/cm^2),

M : 鉄の原子量(55.8g),

K_v : 換算係数(V),

F_a : ファラデー定数(96500 クーロン),

R_p : 分極抵抗(cm^2),

t : 経過時間(sec),

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 - 5 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)から考えると各点は図 - 5 の 2 直線の間にプロットされると考

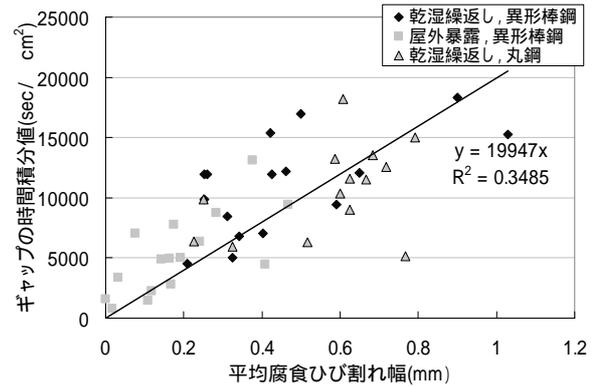


図 - 6 ギャップの時間積分値と平均腐食ひび割れ幅との関係

えられるが、今回の供試体では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。鉄筋腐食モニタリングの実施環境と腐食の進行が異なる環境が暴露期間において存在する乾湿繰返し暴露の供試体では、鉄筋腐食モニタリングを行った常温乾燥環境に比べて、温度が高く水分供給量が多い高温湿潤環境の方が腐食の進行がしやすく、この環境下での分極抵抗値は常温乾燥環境下で計測された値よりも小さくなり、時間積分値としては大きくなるため、このようなギャップの時間積分値が発生したとも考えられる。しかし、上述のような腐食環境に大きな変化がない屋外暴露の供試体においても類似した傾向を示したことから、このギャップは別の理由で発生したと考えられる。

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。ギャップの時間積分値は、質量測定から求めた腐食量を式(1)に代入することで実際の時間積分値を推定し、その時間積分値と鉄筋腐食モニタリングから求まる時間積分値との差として求めた。式(1)から実際の時間積分値を推定する際の換算係数 K_v の値は 0.026V とした。その結果、図 - 6 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ギャップの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。大津らの研究¹⁾では、鉄筋とコンクリートの間に空隙を設けた供試体ではコンクリート抵抗の値が大きくなるという結果が出ており、また分極抵抗とコンクリート抵抗との間には高い相関性があることから²⁾、腐食ひび割れの発生によりできた空隙の影響を受け、本来計測されるべき値よりも分極抵抗の値が大きくなり、その結果として時間積分値を過小に評価してしまったと推察される。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く推定するためには、腐食量推定の過程において、このギャップの積分値を考慮する必要があり、その方法

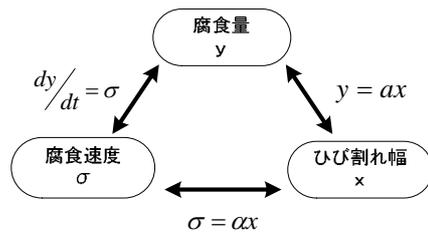
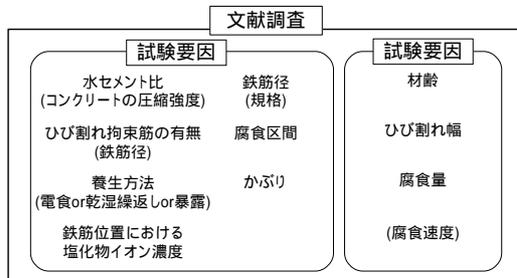


図 - 7 加速期のパラメータ



試験要因と試験結果から相関関係を導出

図 - 8 文献の整理方法

として図 - 6 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。その手法については次章で述べる。

5. 点検結果に基づく劣化予測手法の検討

5.1 劣化予測モデル

劣化予測は既往の研究³⁾の手法を用いて行った。この手法の加速期のモデルでは、腐食量、腐食速度、腐食ひび割れ幅が図 - 7 のような関係を持つとしており、この関係から腐食量、腐食ひび割れ幅、腐食速度は以下の式(2)、(3)、(4)によって表すことができる。

$$y = a \cdot C \cdot \exp\{(\alpha/a) \cdot t\} \quad (2)$$

$$x = C \cdot \exp\{(\alpha/a) \cdot t\} \quad (3)$$

$$\sigma = \alpha \cdot C \cdot \exp\{(\alpha/a) \cdot t\} \quad (4)$$

ここで、 $a = 0.141 \cdot \exp(1.078 \cdot d/\phi)$ 、

$$\alpha = 54.82 \cdot d^{-1.17}$$
、

C : 腐食開始直後のひび割れ幅(mm)、

t : 腐食ひび割れ発生からの時間(year)、

d : かぶり(mm)、

ϕ : 鉄筋径(mm)

加速期の腐食量と腐食ひび割れ幅に関する係数 a は確立された設定値はないのが現状である。そこで、図 - 8 に示す方法で文献⁴⁾⁻⁹⁾の整理を行うことによって、係数 a の設定値について検討を行った。検討結果について図 - 9 に示す。図 - 9 のデータでは電食の結果のみを用い、腐食区間が 100mm ~ 200mm のデータを採用している。図 - 9 より、以下の新たな算出式(5)、(6)が得られた。

$$a = 0.5681 \cdot \exp(0.5547 \cdot d/\phi) \quad (\text{異形棒鋼}) \quad (5)$$

$$a = 0.3544 \cdot \exp(0.1493 \cdot d/\phi) \quad (\text{丸鋼}) \quad (6)$$

そのため、既往の算出式とこの式(5)、(6)を用いた場合との予測結果の違いについても検討する。

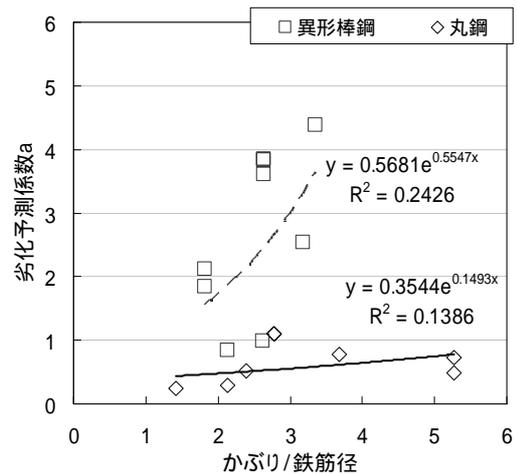


図 - 9 劣化予測の係数 a の文献調査結果

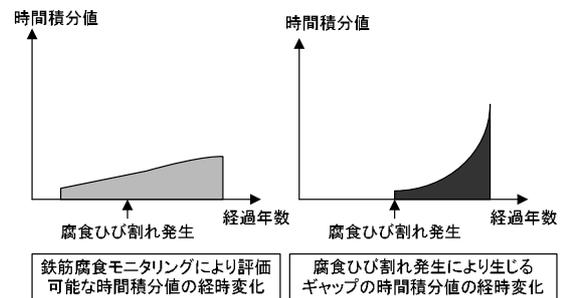


図 - 10 分極抵抗の逆数の時間積分値の経時変化の算出イメージ

この劣化予測のモデルを以下の式のように補正をすることで調査時の腐食量が推定される。

$$\sigma = \eta \cdot \alpha \cdot C \cdot \exp\{\eta \cdot (\alpha/a) \cdot t\} \quad (7)$$

$$y = a \cdot C \cdot \exp\{\eta \cdot (\alpha/a) \cdot t\} \quad (8)$$

ここで、 η : 補正係数

点検などにより、腐食速度を求めて式(7)に代入し、補正係数 η の値を求め、その η の値を式(8)に代入して鉄筋腐食量の推定を行う。そのため、腐食速度の推定精度が予測に大きく関わることになる。

5.2 ギャップの時間積分値の評価手法

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を評価する手法として、鉄筋腐食モニタリングを行うことで評価が可能な時間積分値の経時変化と、ギャップの時間積分値の経時変化を別々に表現し、最終的にその2つを合成することで、時間積分値の経時変化を求めることにした。このプロセスのイメージ図を図 - 10 に示す。

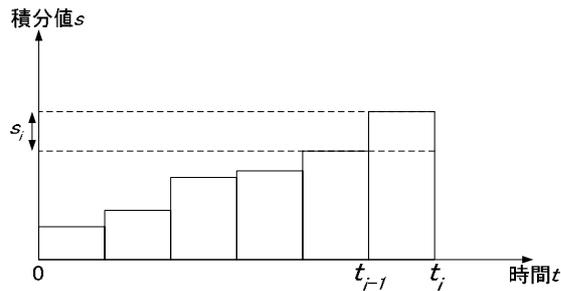


図 - 11 時間積分値 s の経時変化イメージ

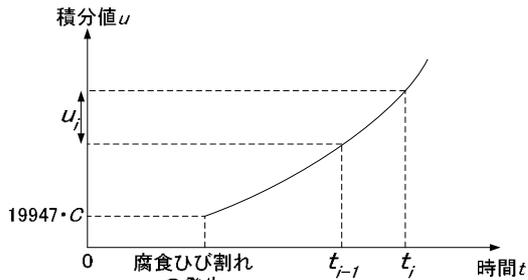


図 - 12 時間積分値 u の経時変化イメージ

(1) モニタリングで評価可能な積分値の経時変化

この時間積分値の経時変化(積分値 s とする)については、鉄筋腐食モニタリングの分極抵抗の計測結果によって評価を行う。

$i - 1$ 回目の計測時点 t_{i-1} から i 回目の計測時点 t_i の間に増加した時間積分値を s_i とすると

$$s = \sum \left(\frac{\Delta t}{R_p}\right)_i \quad s_i = \left(\frac{\Delta t}{R_p}\right)_i \quad (9)$$

となる。この積分値 s の経時変化のイメージ図を図 - 11 に示す。

(2) ギャップの積分値の経時変化

図 - 6 において鉄筋腐食モニタリングから求められる時間積分値 s と質量測定から求めた腐食量を式(1)に代入することで求めた実際の時間積分値の推定値とのギャップの時間積分値(積分値 u とする)と平均腐食ひび割れ幅とが線形関係を持っていた。この関係から、積分値 u の経時変化を腐食ひび割れ幅の経時変化式である式(3)を用いて構築することにした。

図 - 6 の線形近似曲線式について、式の切片を 0 になるように指定した。これは、ギャップの発生が腐食ひび割れによるものと考えているため、腐食ひび割れが発生していない場合にはギャップが生じないことによる。上述の内容を踏まえて得られた関係式は

$$u = 19947x \quad (10)$$

ようになる。この式(10)と式(3)を用いるとギャップの時間積分値 u の経時変化式は以下のように表すことができる。

$$u = 19947 \cdot C \cdot \exp\{q \cdot (\alpha/a) \cdot t\} \quad (11)$$

	鉄筋の種類	推定に用いた分極抵抗	推定に用いたパラメータ α の算出式
推定腐食量-1	異形棒鋼	換算分極抵抗	既往の式
推定腐食量-2	丸鋼	換算分極抵抗	既往の式
推定腐食量-3	異形棒鋼	換算分極抵抗	式(5), (6)
推定腐食量-4	丸鋼	換算分極抵抗	式(5), (6)
推定腐食量-5	異形棒鋼	計測分極抵抗	既往の式
推定腐食量-6	丸鋼	計測分極抵抗	既往の式
推定腐食量-7	異形棒鋼	計測分極抵抗	式(5), (6)
推定腐食量-8	丸鋼	計測分極抵抗	式(5), (6)

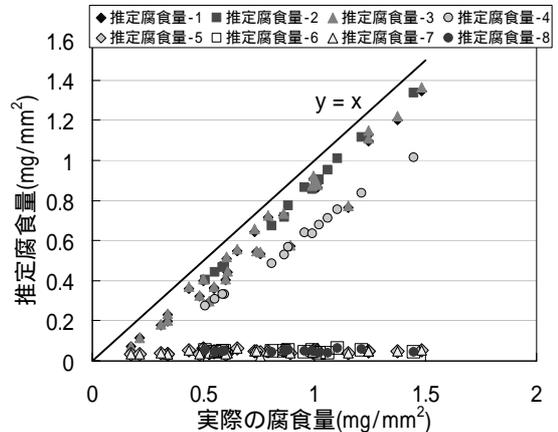


図 - 13 劣化予測精度の検証結果

ここで、 q : 腐食ひび割れ幅の拡大傾向を補正する係数

係数 q の値については供試体解体時点のギャップの積分値 u を式(11)に代入することで算出した。算出した係数 q の値を用いてギャップの積分値 u の関数を表す。

$i - 1$ 回目の鉄筋腐食モニタリングの計測時点 t_{i-1} から i 回目の計測時点 t_i の間に増加したギャップの時間積分値 u_i は

$$u = F(t) \quad \text{とすると} \quad u_i = F(t_i) - F(t_{i-1}) \quad (12)$$

となる。このギャップの積分値 u の経時変化のイメージ図を図 - 12 に示す。

(3) ギャップの積分値を考慮した分極抵抗値の算出

鉄筋腐食モニタリングで評価可能な分極抵抗の逆数の時間積分値 s とギャップの時間積分値 u の経時変化を組み合わせることで、本来の時間積分値の経時変化を求めることが可能であると考えられる。この経時変化を用いて、ある期間に増加した時間積分値から分極抵抗を逆算し、その分極抵抗値から劣化予測の腐食速度の点検データを求める。

$i - 1$ 回目の鉄筋腐食モニタリングの計測時点 t_{i-1} から i 回目の計測時点 t_i の間に増加した時間積分値 $s_i + u_i$ は次式で表される。

$$s_i + u_i = \Delta t_i / R'_{pi} \quad (13)$$

ここで、 R'_{pi} : 換算分極抵抗値 ($k \text{ cm}^2$) ,

$$t_i : t_i - t_{i-1}$$

この式(13)から求まる換算分極抵抗の値が劣化予測に用いる値となる。

5.3 劣化予測の精度の検証

劣化予測の精度を検証した結果を図 - 13 に示す。図で

は鉄筋が異形棒鋼か丸鋼か、補正係数 α を求めるための腐食速度の算出に用いたのは供試体解体直前に計測された分極抵抗か換算分極抵抗か、劣化予測の腐食量と腐食ひび割れ幅に関わる係数 a の算出式は既往の式か文献調査で得られた式かを分類している。

結果を見ると、計測分極抵抗を用いて予測を行った場合は推定腐食量が実際の腐食量に比べて小さく予測精度があまり良くないのに対し、換算分極抵抗を用いて予測を行った場合の予測精度が良いことが確認できる。

劣化予測の係数 a の算出式の違いによる予測結果の差については、異形棒鋼を用いた供試体では大きな差が見られなかったが、丸鋼を用いた供試体では文献調査で得られた式(6)で係数 a の値を求めた場合の精度が劣る結果となったため、この係数 a の算出式については今後検討が必要である。

6. まとめ

本研究では、塩害を想定した供試体を作製し、定期的に鉄筋腐食モニタリングを行った。供試体の非破壊調査の結果と実際の内部鉄筋の腐食量を比較することで得られた知見に基づく劣化予測手法の検討を行った。その結果を以下に示す。

- (1) 鉄筋腐食モニタリングの電気化学的なパラメータである分極抵抗の逆数の時間積分値と実際の鉄筋の腐食量とを比較したところ、暴露環境に関係なく時間積分値のギャップがあることがわかった。
- (2) 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ところ、平均腐食ひび割れ幅の値が大きくなるほど評価がギャップの時間積分値が増加する傾向が得られた。これは腐食ひび割れによって鉄筋腐食モニタリングの計測面と鉄筋との間に空隙が生じ、その影響によって本来計測されるべき分極抵抗の値よりも大きな値が計測されたためである可能性が示された。
- (3) 精度良く劣化予測を行うにあたり、このギャップの時間積分値を評価に加える必要があった。その方法として、既往の研究の腐食ひび割れ幅の経時変化式とギャップの積分値と平均腐食ひび割れ幅の線形関係から、ギャップの積分値の経時変化を求め、鉄筋腐食モニタリングによって評価可能な時間積分値の経時変化と合わせることで、本来の時間積分値の経時変化を求めた。
- (4) 2 時点の間で増加した時間積分値から換算分極抵抗の値を求め、それを劣化予測の補正に用い

る腐食速度の算出に用いた場合と解体直前の分極抵抗を用いて腐食速度を算出した場合とで腐食量の予測の結果を比較した。その結果、計測分極抵抗を用いた場合に比べて、予測の精度が大幅に向上することが確認できた。

- (5) 劣化予測モデルの腐食量と腐食ひび割れ幅に関わる係数 a の算出式について、既往の式と文献調査により新たに得られた式との腐食量の予測結果を比較した。その結果、異形棒鋼を用いた供試体については大きな差は見られなかったが、丸鋼を用いた供試体については、文献調査により得られた算出式を用いた場合に予測精度が劣る結果となった。

参考文献

- 1) 大津政康, 慶済運, 横田優: コンクリート中の鉄筋腐食の非破壊検査法の実用化に関する研究, コンクリート工学論文集, Vol.15, No.3, pp.33-38, 2004.9.
- 2) 森川英典, 山本尚樹, 小林秀恵, 古田久人: 電気化学的手法に基づくコンクリート中の鉄筋腐食モニタリング, 建設工学研究所論文報告集, 第 47 号, pp.39-49, 2005.11.
- 3) 小島大祐, 森川英典, 岡本早夏, 岸紗百合, 現場試験に基づいた RC 橋梁における塩害劣化予測と安全性評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.2, pp.1579-1584, 2005.
- 4) 武若耕司, 松本進: コンクリート中の鉄筋腐食が RC 部材の力学的性状に及ぼす影響, 第 6 回コンクリート工学年次講演会論文集, pp.177-180, 1984.
- 5) 田森清美, 丸山久一, 小田川昌史, 橋本親典: 鉄筋の発錆によるコンクリートのひびわれ性状に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文報告集, 10-2, pp.505-510, 1988.6.
- 6) 濱田宏, 丸山久一, 下村匠, 青山敏幸: 腐食性環境下における鉄筋コンクリート構造物の劣化予測モデル, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.811-816, 1997.6.
- 7) 中川貴之, 堤知明, 松島学: 塩害劣化を受ける RC 構造物の劣化予測, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.1, pp.415-420, 2000.6.
- 8) 岩波光保, 横田弘, 佐藤文則: 鉄筋腐食が RC はりの耐荷性能に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.2, pp.1501-1506, 2002.6.
- 9) 松島学, 横田弘, 関博: 鉄筋腐食膨張によるひび割れ発生時の腐食量, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.1669-1674, 2004.6.