

論文 不均一に腐食した鉄筋コンクリートを対象とした分極抵抗法における電流分散性状および腐食診断精度の把握

大熊 千紗都*1・岡崎 慎一郎*2・吉田 秀典*3

要旨：塩害等により鉄筋腐食したコンクリート構造物の腐食速度を非破壊で評価する手法として、分極抵抗法がある。この手法は、鉄筋に微弱な電流を流し、電位変化量から鉄筋の分極抵抗を測定することで、鉄筋の腐食速度を定量的に評価するものである。本測定で得られる測定値は見かけの分極抵抗であり、真の分極抵抗を得るためには被測定面積を乗じなくてはならないが、被測定面積は腐食の不均一性に強く影響され、腐食速度の評価精度が低下する懸念がある。本研究では、不均一に腐食した鉄筋コンクリートを対象に、電気分散性状が被測定面積および真の分極抵抗値の相違に与える影響を検討するものである。

キーワード：鉄筋コンクリート、分極抵抗法、有限要素法

1. はじめに

わが国では、戦後の高度経済成長期に集中的に建設されたコンクリート構造物が既に 50 年以上を経過しており¹⁾、想定された耐用年数を超過しているものが多い。これらの構造物を管理者がすべて更新することは財政的に困難であるため、点検・診断とともに、補修・補強などを行いながら適切な維持管理を実施する必要がある²⁾。

鉄筋コンクリート構造物の劣化診断では、コンクリート中の鉄筋腐食の有無や程度を評価するが、一般に、鉄筋腐食初期において、コンクリートの外見から判断することは困難である。コンクリートのひび割れ、錆び汁の発生など、著しく鉄筋腐食が進行し、かぶりコンクリートに損傷を与えるなどの損傷に至ってから、劣化を認識し、対応に至る場合が多い。鉄筋腐食が進行すると、補修や補強などの有効な対策の実施が困難になることから、構造物を長期に維持するためには、鉄筋腐食発生に対する早期の発見が望まれている。

コンクリート構造物の内部状態の評価には、非破壊検査が有効である³⁾⁴⁾。特に、鉄筋の腐食に関しては、自然電位法や分極抵抗法が提案されている⁵⁾⁶⁾。自然電位法が鉄筋腐食の可能性を評価する手法であることに対し、分極抵抗法は腐食速度も評価できるという特徴を有する。

分極抵抗法は、鋼材に流れる電流量が、その鋼材を分極させた場合の負荷電圧とそれにより生じる電流の変化量の比である分極抵抗に、理論的に比例することを利用するものである。この方法で鉄筋の腐食速度を定量的に評価することができる。分極抵抗法で得られるのは見かけの分極抵抗であるため、真の分極抵抗を得るには見かけの分極抵抗に、電流の流れる範囲である被測定面積を

乗じる必要がある。しかし、被測定面積は鉄筋の腐食位置や規模、コンクリート中の含水等の影響を受け、電流の分散性状に大きな影響を受けるため、電流の分散性状を正確に把握することは、分極抵抗法による鉄筋の腐食速度の評価精度の向上に資するものと考えられる。

本研究は、部分的に鉄筋腐食させた鉄筋コンクリート部材を対象に、主として電流の分散性状の観点から分極抵抗法の適用性を検討するものである。実験的検討では、鉄筋コンクリート試験体を作製し、腐食させないものと、部分電食を行って鉄筋を不均一にしたものの2種類を用意し、見かけの分極抵抗、真の分極抵抗およびコンクリート抵抗を測定した。また、解析的検討では、実験的検討で用いた試験体のコンクリート抵抗を用いつつ、部分電食を再現し、電気伝導解析を行った。そして、解析的検討で得られた結果より、腐食の有無が電気分散性状に与える影響を把握し、実験的検討で得られた真の分極抵抗値との比較を行う。図-1にフローチャートを示す。

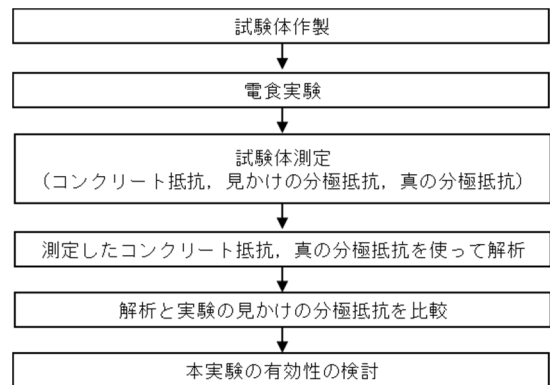


図-1 フローチャート

*1 香川大学大学院 工学研究科安全システム建設工学専攻 大学院生 (学生会員)

*2 香川大学 工学部安全システム建設工学科 准教授 博士(工学) (正会員)

*3 香川大学 工学部安全システム建設工学科 教授 博士(工学) (正会員)

2. 実験的検討

2.1 概要

本研究では、作製した鉄筋コンクリート試験体を室温 20℃ 相対湿度 40% の状態で気中にて養生し、13 週間後に分極抵抗、見かけの分極抵抗、およびコンクリート抵抗を計測した。計測は携帯型鉄筋腐食診断器 (CM-V) を使用した。試験体中央 (図-2 の円領域) のコンクリート表面に電圧を印加し、ガード機能ありの状態 で電流を分散させないように見かけの分極抵抗とコンクリート抵抗を測定し、真の分極抵抗を算出した。

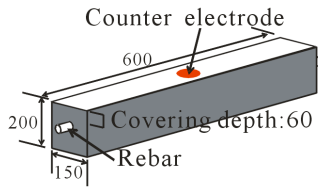


図-2 試験体概要 (単位:mm)

2.2 試験体

本研究では、部分的な鉄筋腐食の有無が電流分散性状に与える影響に焦点を当てており、電流の流れる場であるコンクリート自体の不均一性を極力排除するため、粗骨材を用いずに、モルタルを使用した。鉄筋を埋設したモルタル試験体寸法を図-3、実験条件を表-1 に、モルタル配合を表-2 に示す。セメントは普通ポルトランドセメント (密度 3.15g/cm³)、細骨材は香川県三豊市財田町砕砂 (表乾密度 2.65g/cm³, 粗粒率 2.61) を用いた。水セメント比 40% の試験体にはみワーカビリティ向上のため混和剤を用いた。鉄筋のかぶり厚さは 60mm とし、鉄筋は D25 の異形鉄筋を使用し、鉄筋の両端 100mm にエポキシ樹脂を塗布して絶縁加工を施した。

表-1 実験条件

養生期間	水セメント比(%)	部分電食
13 週	40	○
		×
	60	○
		×

表-2 配合表

水セメント比 (%)	単位量(kg/m ³)			
	水 W	セメント C	細骨材 S	混和剤 A
40	240	603	1506	0.121
60	309	515	1289	-

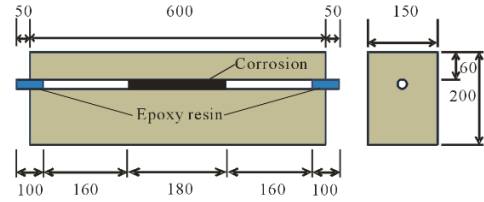


図-3 試験体寸法 (単位:mm)

本研究では、鉄筋が腐食しておらず均一である場合と、部分的に不均一に腐食した場合における試験体の電気伝導性状の相違を評価する。腐食試験体では、図-3 に示した範囲を局部的に腐食させるため、図中のかぶり面の部分電食対象箇所にはのみ多孔質スポンジを設置し、そのスポンジを介して、塩水が部分電食対象箇所にはのみ供給させるようにしたのち、直流安定化電源により 400mA の電流を 24 時間通電することで、鉄筋の電食を行った。準備実験により同じ寸法の試験体を割裂して概ね腐食していることを確認した。

2.3 腐食診断器による被測定面積の算出

本研究で使用した腐食診断器による電流の印加を行う前に、十分に水で濡らしたウエスをかぶりコンクリートに 1 時間覆って、かぶりコンクリートを十分に湿潤させた。本機器を用いた場合、電流は分散を極力抑えられると考え、文献⁴⁾を参考に、図-4 に示すとおり、かぶり厚さを t とすると、 $t > 5\text{cm}$ のときには機器の直下 $\{2(t-5)+4\}\text{cm}$ 内の鉄筋の上半分の表面積を被測定面積と仮定できる。実験で用いた試験体のかぶり厚さ t は 6cm、鉄筋は D25 であるため CM-V での被測定面積は、6cm 内の鉄筋上半分の表面積 23.6cm² となる。真の分極抵抗 R_p (kΩcm²) は、式(1)を用いて計測で得られた見かけの分極抵抗 R_p' (kΩ) に被測定面積 A (cm²) を乗じて算出した。

$$R_p = R_p' \cdot A \quad (1)$$

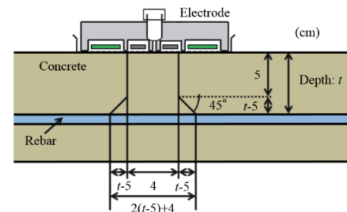


図-4 計測範囲⁴⁾

2.4 実験結果

実験で得られた真の分極抵抗とコンクリート抵抗 R_s を表-3 に、図-5 に得られた真の分極抵抗の値を対数軸上に示す。CEB(ヨーロッパコンクリート委員会) から提案されている腐食の判定基準⁸⁾の分極抵抗 130kΩcm² を示す。CEB によると分極抵抗が 130kΩcm² を下回ると腐食が進んでいるとされている。腐食なしの試験体では、水セメント比によらず 130kΩcm² を上回る一方で、電食

を行った試験体は、分極抵抗が $130\text{k}\Omega\text{cm}^2$ を下回っているため、部分電食が確実に行われていることが確認できた。

図-6 に、コンクリート抵抗値 R_s を対数軸上に示す。水セメント比が小さい試験体は、水セメント比が大きい試験体と比較して、コンクリート抵抗が大きくなった。水セメント比が小さいと、空隙組織構造が緻密であり、電流の移動場である水で飽和された空隙の量が水セメント比の大きいものと比較して少なくなったためと考えられる。また、文献⁹⁾で、コンクリート抵抗が大きくなると分極抵抗が大きくなるとあり、今回の実験でも、同様の傾向が得られている。

また、部分電食を行った試験体では腐食がないものより小さなコンクリート抵抗を示した。これは電食の際に用いた塩水の影響により、コンクリート中に含まれた塩化物イオンが増加し、電気抵抗は小さくなるという既往の研究との共通点が見られる¹⁰⁾¹¹⁾。本研究における実験においても、上述したようなことに起因して、図-6 が示すような傾向が得られたと考えられる。

表-3 実験結果

試験体名	R_p	R_s
	k Ωcm^2	
W/C40%	560	228
W/C40%corrosion	117	26.8
W/C60%	204	59.7
W/C60%corrosion	4.18	6.28

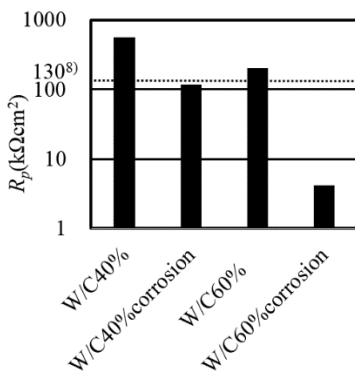


図-5 真の分極抵抗

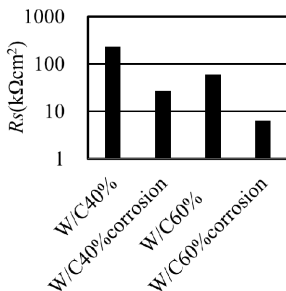


図-6 コンクリート抵抗

3. 解析的検討

3.1 概要

鉄筋コンクリート試験体の部分電食が、電気分性状、被測定面積および真の分極抵抗値に与える影響に関して解析的検討を行う。基礎方程式には、マクスウェル方程式を用い、有限要素スキームにより検討を行った。

3.2 基礎方程式

静電場が満たす方程式は、ここでは定常状態と考え、マクスウェルの方程式の時間の項を省略した次式となる。

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = q \quad (2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0 \quad (3)$$

ここで、 \mathbf{D} は電束密度、 \mathbf{E} は電場の強さ、 q は電荷密度である。物質中では

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad (4)$$

の関係がある。ここで、 ϵ は誘電率で、等方的な物質と考えるとスカラー量として取扱うことができる。式(3)より電場 \mathbf{E} はスカラーポテンシャル ϕ を用いて表せられる。

$$\mathbf{E} = -\nabla \phi \quad (5)$$

ここで、式(2)と(4)を充足するスカラーポテンシャルを探索する。

$$q = \nabla \cdot \mathbf{D} = \nabla \cdot \epsilon \mathbf{E} = -\nabla \cdot (\epsilon \nabla \phi) \quad (6)$$

以上の関係を整理すると、

$$\nabla \cdot (\epsilon \nabla \phi) = -q \quad (7)$$

となる。等方的な物質とし、誘電率 ϵ は一定とすると、

$$\nabla^2 \phi = -q/\epsilon \quad (8)$$

となる。これは、ポアソン方程式と呼ばれ、計算する領域内に電荷がない場合は

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (9)$$

となる。本研究ではこの基礎方程式を離散化し、有限要素解析を行う。詳しくは文献¹²⁾を参照されたい。

3.3 鉄筋コンクリートのモデル

図-7 に本解析で用いた鉄筋コンクリートのモデルを示す。なお、モデル自体は実験で用いたものと等価となるように設定しており、計算負荷軽減のため、対称性を考慮し、全体領域の4分の1を解析対象領域とした。各要素に関する情報を図-8に示す。凡例の Concrete はコンクリート要素を、Rebar は鉄筋要素を、Corrosion はコンクリートと鉄筋の境界部要素である不動態皮膜部を、Isolation には絶縁要素を、そして Electrode は電圧印加領域を表した。コンクリートと鉄筋の境界部付近を拡大した図-8に示すように、鉄筋要素、境界部要素、そして

コンクリート要素を配置し、図-3 に示す通り、コンクリートと鉄筋の境界部のうち鉄筋端から 100mm を絶縁部（図中、両端部絶縁要素）とした。鉄筋の抵抗率は理科学年表より 0°C のときの抵抗率 $8.9 \times 10^{-6} \Omega \text{cm}$ を使用した。絶縁要素は、この要素の電気抵抗率を極めて大きくする ($1.0 \times 10^{16} \text{ k}\Omega \text{cm}$) ことで表現した。なお、要素はすべて 8 節点六面体要素（アイソパラメトリック要素）で、総節点数は 17,799、総要素数は 15,652 であった。分極抵抗、コンクリート抵抗は各ケースそれぞれ表-3 の値を使用した。また、界面皮膜は一般的に 2nm~6nm 程度であるが¹³⁾本解析では図-9 のように不動態皮膜をやや大きめの 10nm と仮定し、以下の式(10)のように分極抵抗を界面被膜の厚さで割ることで抵抗率に換算して入力した。

$$\rho = \frac{R_p}{l} \quad (10)$$

ここに、 ρ ：不動態被膜の抵抗率(Ωcm)、 l ：不動態被膜の厚さ(cm)、 R_p ：真の分極抵抗(Ωcm^2)である。

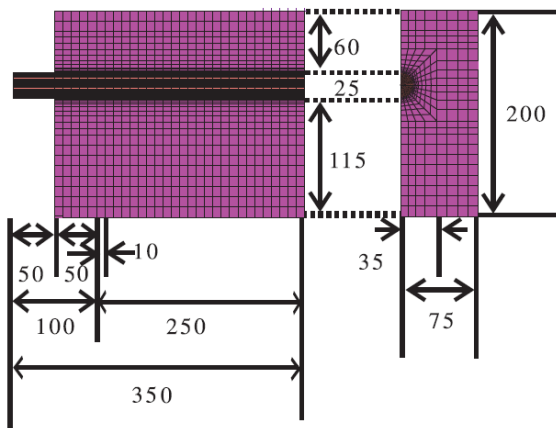


図-7 解析メッシュ（単位:mm, D25, かぶり 60mm）

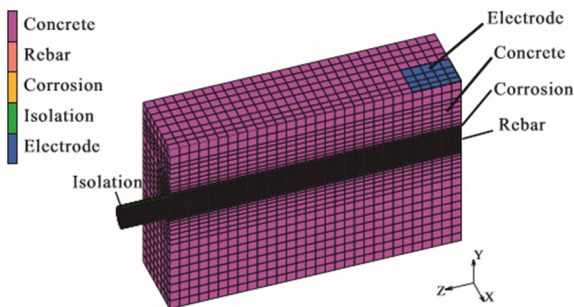


図-8 解析要素（D25, かぶり 60mm）

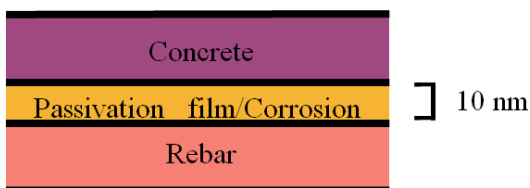


図-9 不動態被膜

3.4 境界条件

境界条件は以下のとおりである。

試験体上部（図-8 における上面右上の Electrode）に電圧 10mV を印加し、鉄筋端の電圧を 0V とした。なお、実際の測定器のセンサ部は図-2 における上面中央の円領域（断面積：約 72cm^2 ）であるが、解析メッシュは直方体を基本としていることから、解析におけるセンサ部（印加箇所）の領域については、実際の機器の面積と同じ面積になるように矩形領域に設定した。

3.5 電気伝導解析における被測定面積

試験体中央の印加部中央に位置する鉄筋の位置から、鉄筋表面に流れる全電流量のうち、25%の電流が流れる範囲が被測定面積とみなせる¹²⁾。各メッシュの電流の代表値は、メッシュ 1 面が 4 節点を有する長方形であるため、4 節点での平均値を採用した。被測定面積は、本研究では、上述した鉄筋要素の不動態被膜に流れる電流が全メッシュの 25%に達するまで加算したメッシュの数にメッシュの面積を乗じた値と定義した¹²⁾。

3.6 実験・解析結果および考察

電気分散状況の把握のため、コンクリート内における電流密度を印加領域の中心直下の電流密度で正規化した正規電流密度分布図を作成した。各水セメント比ならびに鉄筋の腐食部分の有無を勘案した 4 ケースに関する結果を、図-10～図-13 に示す。図-10 と図-11 を比較すると、腐食領域がある試験体の場合に、コンクリート内の電流密度が小さくなり、電流がコンクリート内を分散しにくくなっている。図-12 と図-13 を比較すると、その差はより顕著で、測定値の分極抵抗が著しく小さくなり、コンクリート中に電流が分散せず鉄筋に電流が集中したと考えられる。

印加領域の中心直下の点を原点として、鉄筋軸方向の位置を横軸に、鉄筋上部の電流密度を縦軸にとったグラフを図-14 に示す。解析から得た被測定面積と実験での被測定面積の比較を図-15 に示す。図-14 で腐食のない試験体同士を比較すると、図-5 から見られるように水セメント比が小さい方の分極抵抗が大きい結果になったにも関わらず、電流は分散せずに印加部直下の鉄筋に電流が集中し、水セメント比が大きい方がコンクリート中に電流が分散された。これは、水セメント比が大きいとコンクリートに含まれる水分が、水セメント比の小さいものよりも多くなり、コンクリート抵抗が小さくなったためと考えられる。これにより、水セメント比の大きいコンクリートでは相対的に電流が流れやすくなり、印加部直下の鉄筋に電流の流入が集中せずにコンクリート中に分散されたと考えられる。一般に水セメント比が小さいと、コンクリート中を拡散する塩化物イオンの拡散の程度が軽減するため、腐食に対する抵抗性が向上する。

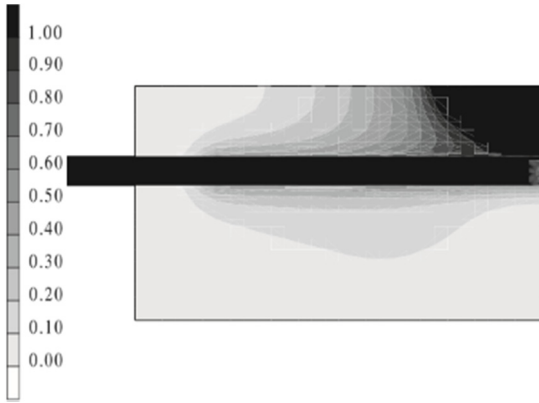


図-10 電流密度分布図 (W/C 40%)

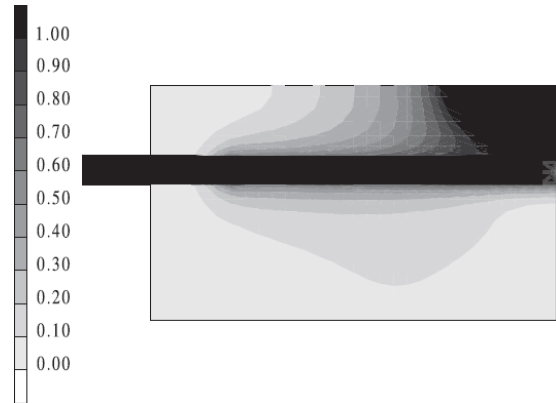


図-12 電流密度分布図 (W/C 60%)

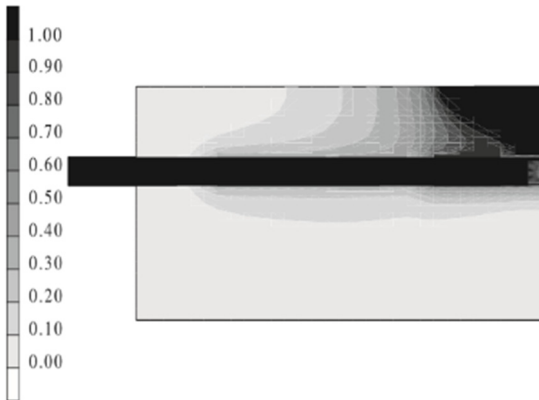


図-11 電流密度分布図 (W/C 40%鉄筋腐食あり)

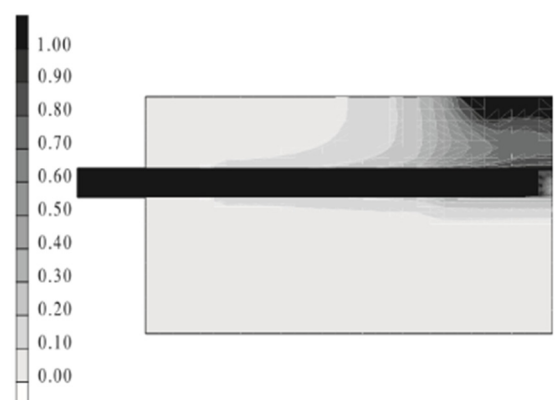


図-13 電流密度分布図 (W/C 60%鉄筋腐食あり)

また、コンクリートの緻密性と腐食速度には相関関係があり、水セメント比の小さい試験体ではコンクリート抵抗が増加し、腐食電流が流れにくくなる¹¹⁾。水セメント比が小さい場合は電食の程度が同じでも水セメント比が大きい場合よりその程度が小さく、つまり、水セメント比が大きい方が腐食の程度が大きいことから、印加された電流は、腐食している印加部直下の鉄筋に集中して流れ、被測定面積が小さくなった。また、実験から得られた真の分極抵抗と被測定面積から、解析値の見かけの分極抵抗を求めるため、式(1)を変形させた式(11)を用いて計算を行った。

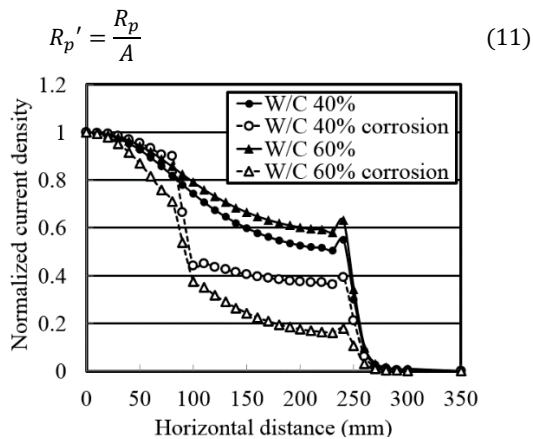


図-14 正規電流密度分布

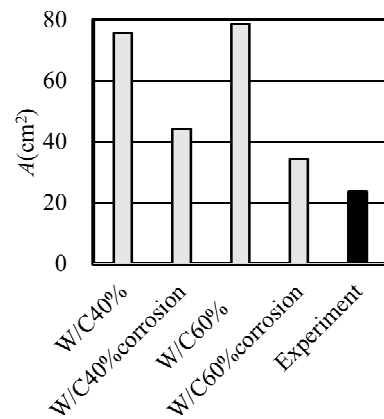


図-15 被測定面積

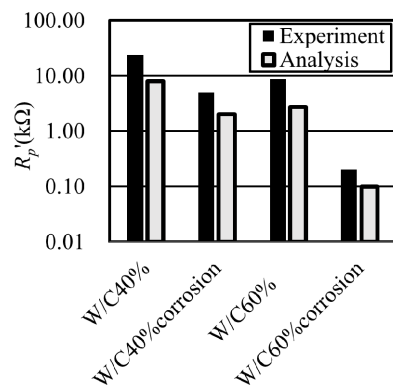


図-16 見かけの分極抵抗

見かけの分極抵抗に関する解析値と実験値を比較したものを図-16に、対数軸上で示す。いずれのケースにおいても、見かけの分極抵抗は、解析値の方が実験値よりも小さい。これは前述したことと図-15に示す結果から、実験で用いた計測器ではかぶり深さと鉄筋径のみで被測定面積が算出されるため、実験での被測定面積は正しいとは限らず、また、この面積はすべての解析値に対して実験値は過小評価したことが要因の1つと考えられる。さらに解析では、試験体の鉄筋腐食を、ある一部に集中させているものの、実際の試験体は、細骨材の試験体中の偏り、気泡の存在などの影響で不均一となっている可能性があり、解析のように完全に均一な場での検討が実験で行われていないことも、過小評価の要因と考えられる。ただ、すべてのケースで、解析は実験に対して1/2~1/3程度の値を示しており、定性的には実験と同様の傾向を示している。実際のコンクリート構造物の鉄筋腐食評価を行う際には、被測定面積を正しく算出し、分極抵抗を求めることで腐食評価の判定を行う必要がある。

4. 結論

鉄筋コンクリート試験体を用いて、不均一に腐食した場合での電気分散性状が、被測定面積および真の分極抵抗値の相違に関する実験的および解析的検討を行った。

以下に結論を示す。

・実験的検討により、腐食の有無と各種抵抗値には、従来の知見通りの傾向が得られたことを確認した。

・実験で得られたコンクリート抵抗値を用いて、有限要素法による電気伝導解析を行った。コンクリートの水セメント比や鉄筋の分極抵抗、非均一領域の有無が、コンクリート中の電気分散性状に影響を与えることを把握することができた。

・数値解析により得られた電流分布より、分極抵抗の値が小さくなるほど、鉄筋に電流が集中し、被測定面積が小さくなること、電流がコンクリート内に分散されると被測定面積が小さくなることが確認された。

・実験から得た見かけの分極抵抗と電気伝導解析から求めた被測定面積を基に見かけの分極抵抗を算出し、両者を比較した結果、いずれの試験体も実験値の方が見かけの分極抵抗は大きくなった。

・正しい被測定面積を用いることで、鉄筋の真の分極抵抗を正確に算出し、鉄筋の腐食速度を正確に評価できることを確認した。

謝辞

本研究は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議「SIP インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」(管理法人:JST)、四国総合研究所および、JCI 四国支部次世

代のコンクリート構造物の劣化診断に関する特別研究委員会により実施されました。ここに謝意を記します。

参考文献

- 1) 国土交通省：平成 25 年度国土交通白書，pp.28-29，2014
- 2) 土木学会：2001 年制定コンクリート標準示方書維持管理編，pp.102-104，2001
- 3) 横田優，浮田和明，幸英昭：交流インピーダンス法によるコンクリート中の鉄筋腐食評価，土木工学における非破壊評価シンポジウム講演論文集，pp.241-246，1991
- 4) 横田優，上田隆雄：建設後 24 年経過した地下道側壁の鉄筋腐食モニタリング結果について，土木学会第 55 回年次学術講演会，V-467，pp.936-937，2000
- 5) 小林孝一，宮川豊章：分極抵抗法を用いた鉄筋の腐食速度評価に関する研究，土木学会論文集，No.669，V-50，pp.173-186，2001
- 6) 独立行政法人土木研究所：コンクリート構造物の鉄筋腐食診断技術に関する共同研究報告書－自然電位法・分極抵抗法による鉄筋腐食診断－，pp.5-37，2003
- 7) 金田尚志，松岡和巳：BEM による電流分布シミュレーションと鉄筋の分極抵抗値の推定，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.1715-1720，2011
- 8) CEB：Working Party V/4.1, Strategies for Testing and Assessment of Concrete Structures Affected by Reinforcement Corrosion(draft 4), BRI-CSTC-WTCB, 1997
- 9) 星野富夫，魚本健人：コンクリート抵抗による耐久性評価に関する実験的検討，土木学会年次学術講演概集，V-425，pp.850-851，2001
- 10) 濱田秀則，平崎敏史，山路徹，Tarek U.M.：コンクリート中鉄筋の電気化学的計測に影響を及ぼす要因に関する実験的考察，コンクリート工学論文集，Vol.15，No.1，pp.57-67，2004
- 11) 山本佳城，衣笠秀行，古賀一八，梶田佳寛：コンクリートの含水状態が鉄筋腐食に及ぼす影響に関する基礎的実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.2，pp.535-540，2001
- 12) 吉田秀典，川上純，荒木志帆，横田優：電流分散範囲を考慮した分極抵抗評価に関する数値解析的研究，土木学会論文集 A2，Vol.69，No.2，pp.I_667-I_688，2013
- 13) 松浦聰：橋梁保全のための電気防食工法の施工，2010 年 第 31 回夏季研修会論文，藤井基礎設計事務所，pp.85-96，2011