

論文 完全非破壊による RC 構造物の電気化学的鉄筋腐食診断技術の検討

石橋孝一^{*1}・藍郷一博^{*2}・田中淳一^{*3}・原与司人^{*4}

要旨: コンクリート構造物の鉄筋腐食に関する評価方法として分極抵抗と自然電位の測定法を応用して2個のセンサーによりコンクリート表面から完全非破壊で評価する方法の検討を行った。その結果、2個のセンサーにより測定される分極抵抗の抵抗和測定では測定値へ及ぼす影響因子の特定が出来ず実用化にはさらに検討の必要があるが、自然電位の電位差測定に関しては鉄筋の腐食状態をコンクリート表面から完全に非破壊で評価する事ができ、腐食領域の範囲確認などへの実用化が可能であることが明かとなった。

キーワード: 非破壊調査、鉄筋腐食、自然電位、分極抵抗、交流インピーダンス

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の劣化度の診断は、コンクリートの品質調査や目視などによる外観の損傷状況の検査、さらには鉄筋の腐食状況など総合的な評価により判定されており、なかでも鉄筋の腐食は劣化度判定の重要な評価項目となっている。

鉄筋の腐食は電気化学的な現象であるため非破壊診断には電気化学的手法が有効な方法として用いられ、様々な面から評価法の検討が行われている。¹⁾

しかしながら従来から用いられている電気化学的手法は、構造物の一部を破壊する必要があるため、完全な非破壊診断法とは言い難い点があり、測定方法の面からの改良検討も開始され始めている。²⁾

本研究では従来の電気化学的な手法を応用して、全く構造物を傷つけることなくコンクリートの表面からコンクリート内部の鉄筋の腐食劣化状況を診断する完全非破壊診断方法の検討を行ったので報告する。

2. 実験概要

2. 1 試験用供試体

試験用供試体は、15(W) × 15(L) × 15(H) cmの大きさで、内部鉄筋にφ13mmの磨き丸鋼(SR235)をかぶり深さ2, 5, 10cmで含む形状とした。コンクリートの配合を表-1に示す。コンクリート供試体は、鉄筋の腐食レベルを変えるために塩分量が0, 4, 8 kg/m³となるように精製塩(NaCl=99%)を練り水に溶かし打設後、28日間湿空養生した後に鉄筋の腐食を進行させるために供試体表面に1回/日の散水を行いながら室内に約1ヶ月間放置した。試験開始時のコンクリートの圧縮強度はそれぞれ35.4, 30.0, 28.6 N/mm²であった。

2. 2 測定装置

(1) 試作装置

実構造物での電気化学的な測定を対象として

表-1 コンクリート配合

Gmax (mm)	スランプ [°] (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
					W	C	S	G	AEA	Ad
13	18.3	4.1	55	42	179	330	737	1038	0.8	2.6

* 1 電気化学工業(株)青海工場 セメント・特殊混和材研究所(正会員)

* 2 東日本旅客鉄道株式会社 総合企画本部 総合技術開発推進部

* 3 東日本旅客鉄道株式会社 安全研究所

* 4 電気化学工業(株)特殊混和材事業部 施工開発課(正会員)

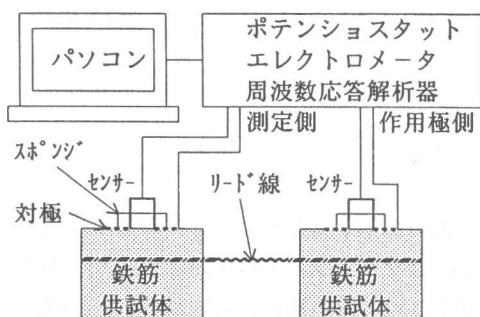


図-1 測定法概要

電位および交流インピーダンス測定が行える装置を試作した。

装置は実構造物での測定に際し容易に持ち運び出来るように430(W)×395(L)×88(H)mmの形状とし、ポテンショスタット、エレクトロメータ、周波数応答解析器(FRA)より構成され、作用極側に1チャンネル、測定側に5チャンネルの信号検出部を持ち小型パソコンでの制御により連続的に測定できる方式とした。また、交流インピーダンス法での分極抵抗測定の周波数は、低周波数を0.25Hz、高周波数を200Hzとした。

センサー部は、小型の鉛電極を参照電極とし対極には貴金属メッキのチタンメッシュを用いた。表面法での測定の概要を図-1に示す。

また、従来法での測定の際には作用極側を鉄筋に接続して測定した。

(2) Cole-Coleプロットの測定

交流インピーダンス法によるCole-Coleプロットの測定は、従来より用いられているポテンショ/ガルバノスタットと周波数応答解析器(FRA)をパソコンにより制御するシステムにより周波数を0.1～10000Hzの範囲で変化させ定電圧法により行った。

(3) 含水率測定

コンクリート供試体の含水率測定は電気抵抗式測定器を用い、コンクリート中の内部鉄筋の横3cmの位置に鉄筋深さまでφ6mmの測定孔を所定の間隔で2個開け、ブラシ型センサーを挿入して行った。

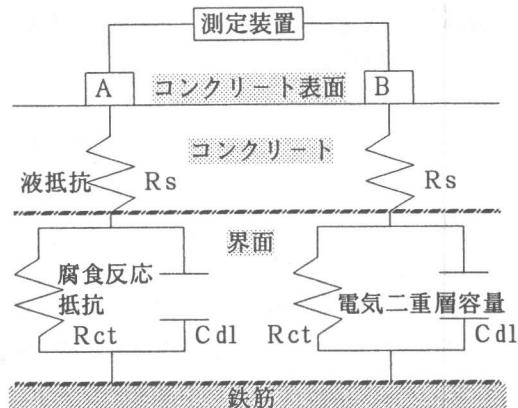


図-2 等価電気回路モデル

3. 結果

3. 1 測定法の確認

コンクリート上の任意の2点での電気化学的測定を行う場合の等価電気回路モデルを図-2に示す。図-2のAとBにおいて電位の測定を行うことによりA-B間の電位差が測定され、分極抵抗の測定を行うことによりA-B間の分極抵抗の和を測定できるものと考えられる。

本測定法の妥当性を確認するために鉄筋の電位測定、分極抵抗測定に関して従来から行われている自然電位、および交流インピーダンス法での分極抵抗測定と、今回検討したコンクリート表面から同時に2つの部位を測定することにより2点間の電位差、および抵抗和の測定を行う表面法での測定結果の比較を行った。

(1) 電位差測定法

鉄筋腐食の程度の異なる2種類のコンクリート供試体の鉄筋をリード線で接続して各々の自然電位の測定を行い、その測定結果から計算した電位差と2種類の供試体間の電位差を表面法により直接測定した一例を表-2に示す。

なお、測定に際して供試体は十分な湿潤状態を保っており測定供試体の含水率は塩分の存在やかぶり深さにより異なるが1.5～5.0%の範囲であった。電位差の計算値(C)と測定値(D)との差(E)は1～1.6mVの範囲であり、相関係数は、 $R^2=0.991$ であった。

表-2 自然電位および電位差の測定結果

No.	供試体A		供試体B		自然電位測定結果		電位差	電位差	差
	塩分量 (kg/m³)	かぶり (cm)	塩分量 (kg/m³)	かぶり (cm)	供試体A (mV:Pb)	供試体B (mV:Pb)	C=A-B (計算:mV)	D=A-B (測定:mV)	E=C-D (mV)
1	0	2	0	5	470	470	0	1	1
2	0	2	0	10	444	610	166	150	16
3	0	2	8	2	462	306	156	154	2
4	0	2	8	5	430	274	156	160	4
5	0	2	8	10	422	458	36	35	1
6	8	2	8	5	316	263	53	49	4
7	8	2	8	10	309	456	147	150	3

本結果より表面からの電位差測定により異なる2点間の自然電位の差の測定を精度良く行うことが可能である事が確認された。

(2) 交流インピーダンス法

電位測定と同様に腐食程度の異なる供試体を組み合わせて従来法と表面法により交流インピーダンス法でのCole-Cole²⁾ロット測定を行った。

塩分を含み鉄筋に腐食が生じている供試体と塩分を含まず鉄筋が腐食していない供試体同志の鉄筋を接続した状態で従来法により各々単独で測定した結果(a), (b)と表面法で2個の供試体を同時に測定した結果(c)を図-3に示す。

従来法による単独供試体の測定の場合は、塩分を含み鉄筋が腐食している供試体の測定結果(a)に較べ、塩分を含んでおらず鉄筋が腐食していない供試体の測定結果(b)の方が、低周波数側に直線となる部分がより多く認められた。

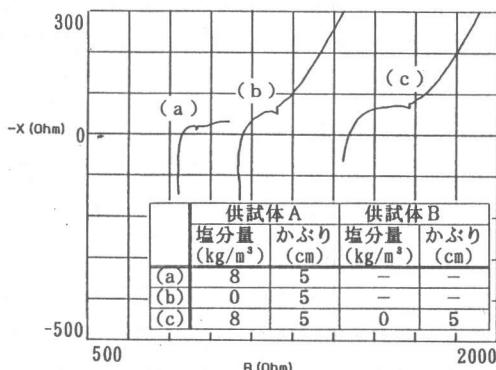
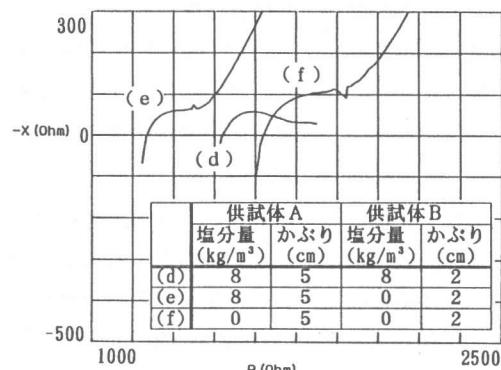
今回検討した2個のセンサーを用いた表面からの測定(c)では、塩分を含まない供試体と同様

に低周波数側に直線となる部分が認められた。

さらに異なる2種類の供試体を組み合わせて表面から測定した場合を図-4に示す。塩分を含み鉄筋が腐食している2個の供試体の組合せの場合(d)は低周波数側に直線部分は認められなかったのに対し、塩分を含まず鉄筋が腐食していない供試体が関与している場合(e), (f)は(c)と同様に低周波数側に直線部が認められた。この様な低周波数側での直線部はコンクリートを等価電気回路モデル(図-2)で表した場合の腐食反応抵抗(R_{ct})が、電荷移動に加え物質の拡散の影響を受ける場合に現れると言われている。³⁾ 本結果よりセンサーを2個使用して行う表面法での測定においても従来から行われている方法と同様に鉄筋の腐食環境の検出が可能であるものと考えられる。

3. 2 測定条件の影響確認

表面法での測定がコンクリートの含水状態、

図-3 Cole-Cole²⁾ロット測定 [(a), (b), (c)]図-4 Cole-Cole²⁾ロット測定 [(d), (e), (f)]

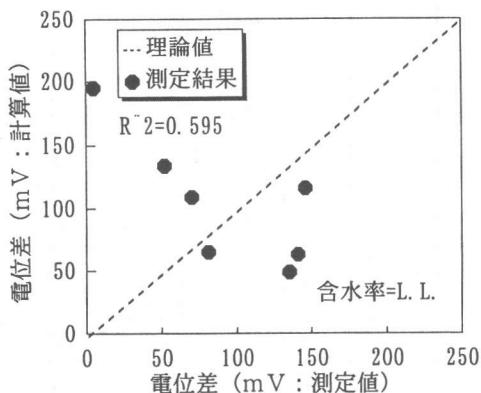


図-5 電位差測定結果（20℃：乾燥）

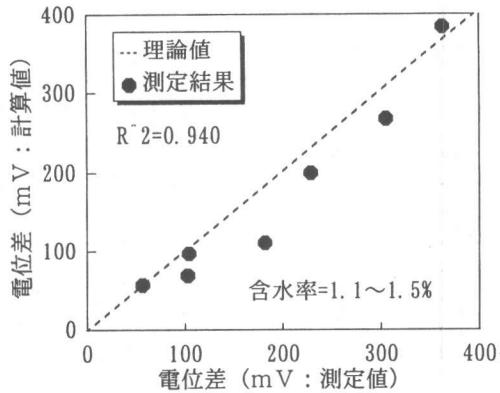


図-7 電位差測定結果（20℃：湿潤）

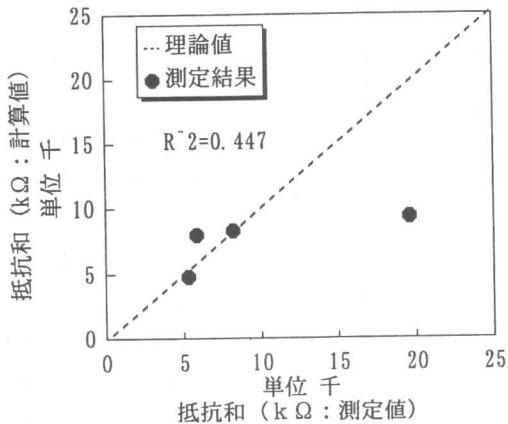


図-6 抵抗和測定結果（20℃：乾燥）

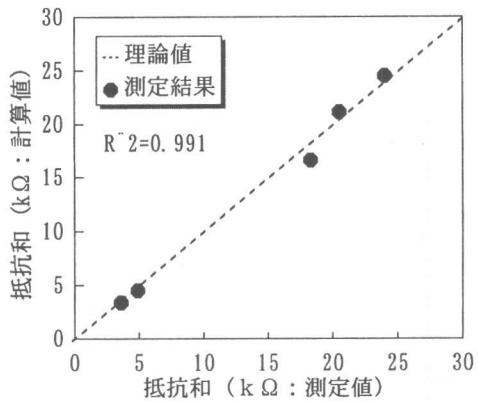


図-8 抵抗和測定結果（20℃：湿潤）

測定温度、かぶり深さ等の測定条件の変化により受ける影響を確認するために従来法での測定結果より算出した電位差、抵抗和の計算結果と表面法により測定した結果を図-5～図-12に示す。測定に使用した供試体は表-2に示した供試体A、供試体Bと同様のものを用いた。

(1) コンクリートの含水率

測定用供試体を110℃で24時間乾燥させた後、20℃のデシケーター中に24時間放置しコンクリートの含水率を極端に少なくして測定した結果を図-5、図-6に示す。本測定でのコンクリートの含水率はいずれも測定下限値(1%)以下であった。電位差、抵抗和とともに従来法からの計算値と表面法での測定値の相関係数(R^2)はそれぞれ、 $R^2=0.595$ (電位差)、 $R^2=0.447$ (抵抗和)といずれも良い相関は得られなかった。

これは、コンクリートの抵抗が非常に大きい

ために測定の際に等価回路の測定の様な理想的な測定ができなかったためと考えられる。

さらに、供試体に散水後20℃×80%R.H.の室内に1週間放置した後に測定した結果を図-7、図-8に示す。

本測定時の供試体の含水率は1.1～1.5%の範囲を示し、電位差、抵抗和の計算値と測定値は相関係数は、 $R^2=0.940$ 、 $R^2=0.991$ と良好な相関を示した。

しかし、抵抗和では20kΩ以上の大きな値を示す場合がありこの時点では乾燥処理の影響が残っている可能性があるものと考えられる。

(2) 測定温度

測定雰囲気の温度の影響を確認するために供試体を測定温度の5℃、30℃で1週間温空養生した後に測定した結果を図-9～図-12に示す。本測定時の供試体の含水率は2～5%を示した。

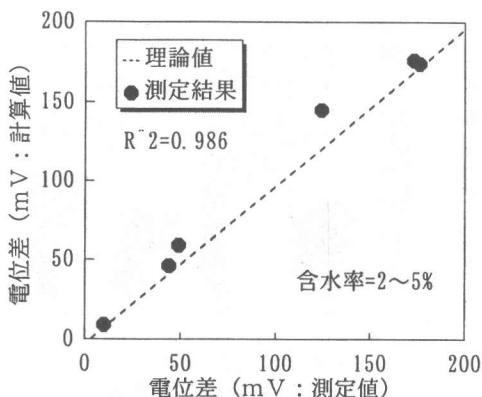


図-9 電位差測定結果（5℃：湿潤）

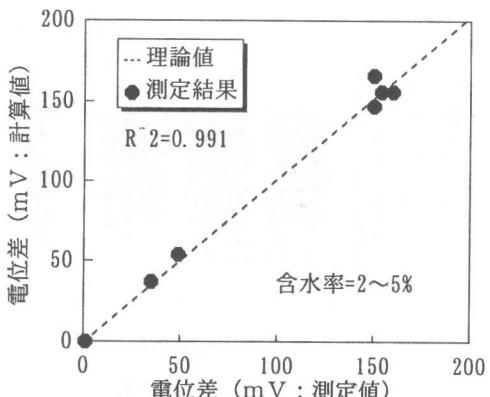


図-11 電位差測定結果（30℃：湿潤）

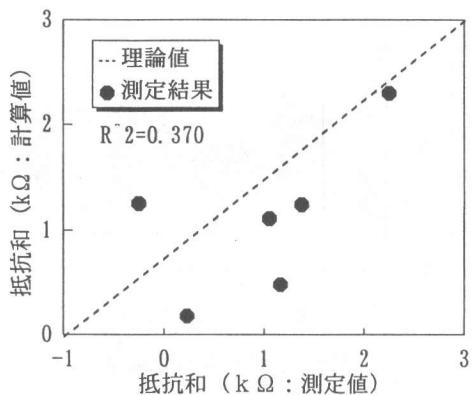


図-10 抵抗和測定結果（5℃：湿潤）

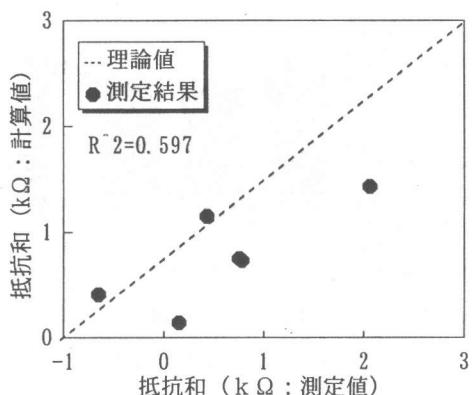


図-12 抵抗和測定結果（30℃：湿潤）

電位差に関しては計算値と測定値の相関係数は、 $R^2=0.986$ (5℃), $R^2=0.991$ (30℃)と20℃での結果と同様に良好な相関を示した。

抵抗和に関しては計算値と測定値の相関係数は、 $R^2=0.370$ (5℃), $R^2=0.597$ (30℃)と電位差測定ほど相関は良くなかった。

(3) かぶり深さ

図-5～図-12に示した結果は表-2に示す供試体の組み合わせでの測定結果であり、コンクリートの湿潤状態が保たれている場合ではかぶり深さが異なる組み合わせの場合でも電位差は計算値と測定値の相関は良く、かぶり深さの影響は無いものと考えられる。抵抗和測定の場合は計算値と測定値の相関は電位差測定より劣っていた。

以上のように表面法による測定での抵抗和の測定は電位差の測定に比べ従来法からの計算値

との相関は劣っていた。これは電位測定の場合には図-2に示した様な等価電気回路の測定が比較的安定な状態で行えるのに対し、分極抵抗の測定では回路を構成している鉄筋に外部から電圧をかけて分極させた状態での測定が要求されるため、コンクリート抵抗等の測定環境の僅かな変化に対して敏感になるためと考えられる。今後、測定方法の検討に加えコンクリート強度等の影響についても検討が必要と考えられる。

(4) 腐食領域の検出

部分的に鉄筋腐食の生じた実構造物への適用を想定して自然電位の異なる供試体を横方向に4個、縦方向に3個格子状に並べ、各鉄筋をリード線で接続して測定した一例を図-13～図-16に示す。なお表面法での供試体の配列と基準とした供試体の位置を図-15の上部に示す。

電位差測定の場合は自然電位からの計算値と

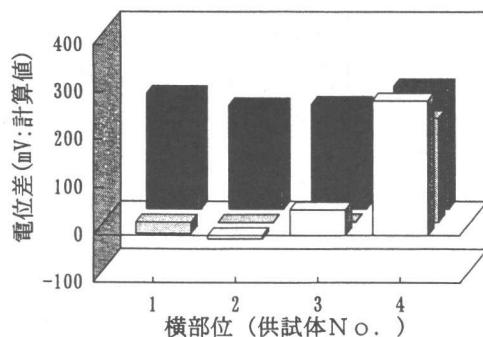


図-13 電位差計算結果

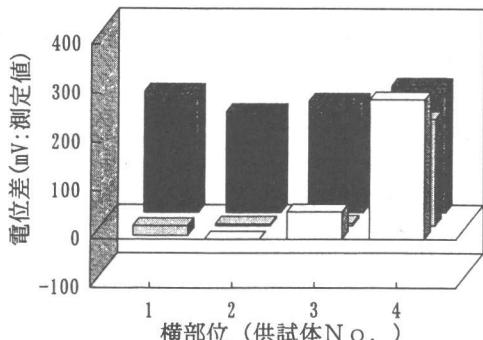


図-14 電位差測定結果

電位差の測定値はほぼ一致しており表面法での腐食領域の検出が可能であった。抵抗和測定に関しては大まかなプロファイルの形状は類似しているが計算値と測定値の値が大きく異なる部分が認められた。

4.まとめ

コンクリート構造物の鉄筋腐食に関する完全非破壊の評価方法の検討を行った結果、以下のことが確認された。

測定対象の鉄筋の腐食状態をコンクリート表面からの電位差測定により評価する事が可能であることが確認された。分極抵抗の抵抗和測定では測定値へ及ぼす影響因子の特定が出来ず実用化にはさらに検討が必要であるが、自然電位の電位差測定に関しては測定時の影響等はほとんど問題がなく、実構造部への適用も可能と考えられる。

また、本測定法は鉄筋腐食の評価法としてだ

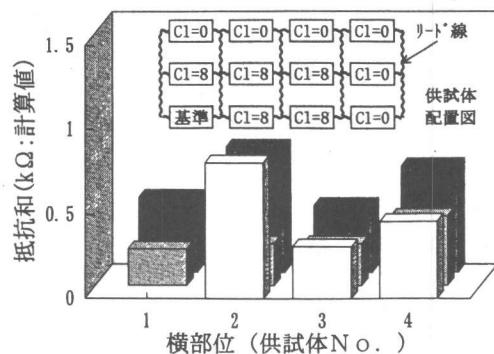


図-15 抵抗和計算結果

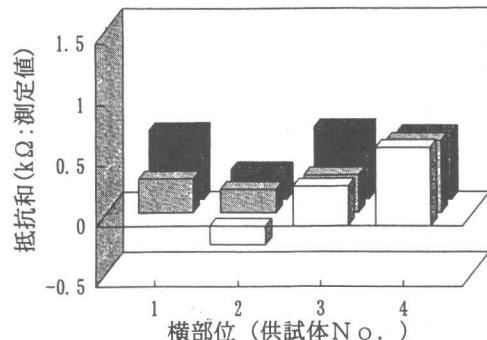


図-16 抵抗和測定結果

けではなく、補修を行う際に補修範囲を決める場合にも応用可能な方法であると考えられる。

謝辞

本検討を行うに当たり、早稲田大学理工学部土木工学科 関博教授、および東日本旅客鉄道株式会社建設工事部 松田芳範氏よりご助言をいただき深く感謝致します。

参考文献

- 1) 横田優:コンクリート中でマクロ腐食を起こしている鉄筋の交流インピーダンス特性、土木学会第52回年次学術講演概要集、第5部、pp668、1997
- 2) 田中淳一:完全非破壊による構造部の鉄筋腐食診断、土木学会第52回年次学術講演概要集、第5部、pp678、1997
- 3) 小林一輔編:鉄筋腐食の診断、森北出版、1993