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0,4,8kg/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35.4,30.0,28.6N/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

表一1 コンクリート配合

Gmax	スランフ゜	空気量	W/C	S/a	単 位 量 (kg/m³)					
(mm)	(cm)	(%)	(%)	(%)	W	С	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㈱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㈱特殊混和材事業部 施工開発課(正会員)



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ー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。





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1~16mVの範囲であり,相関係 数は, R²=0.991であった。

	供試	体A	供試体B		自然電位	則定結果	電位差	電位差	差
	塩分量	かぶり	塩分量	かぶり	供試体A	供試体B	C=A-B	D=A-B	E=C-D
No.	(kg/m³)	(cm)	(kg/m³)	(cm)	(mV:Pb)	(mV:Pb)	(計算:mV)	(測定:mV)	(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	1 0	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

表-2 自然電位および電位差の測定結果

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-Coleプロ小測定を行った。

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



図-3 Cole-Coleブロット測定 [(a), (b), (c)]

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ー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(Rct)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-4 Cole-Coleプロット測定 [(d), (e), (f)]

-301 -



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(R²) はそれぞれ, R²2=0.595(電位差), R²2=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,R²2=0.940,R²2=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週間湿空養生し 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。



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 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 -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



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



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

-304-