

論文

[1087] 電位ステップ法を用いたコンクリート中鋼材の腐食モニタリングのフィールド適用性

正会員○後藤 信弘 (新日本製鐵第二技術研究所)

松岡 和巳 (新日本製鐵設備技術本部)

正会員 宮田 恵守 (日本電信電話技術協力センタ)

西野龍太郎 (日本電信電話筑波フィールド技術開発センタ)

1. はじめに

近年、半永久構造物と考えられていたコンクリート構造物の劣化が問題視されている。この中でも、コンクリートの中性化や塩害による鉄筋腐食は鉄筋コンクリート構造物の耐久性上重要な問題となっている。しかし、鉄筋腐食の診断技術は未だ確立されておらず、コンクリート表面に劣化現象が顕在化してからの対応が主となっており、大規模な補修が必要となることがある。そこで、初期の腐食時点でコンクリート中の鉄筋の腐食状況を的確に把握し、最適な対策を打つことがコンクリート構造物のランニングコストダウンを図る上で切望されている。

このコンクリート中の鋼材の腐食状況を把握する技術の1つに電気化学的モニタリング法がある。このモニタリング法としては、簡便に腐食発生の可能性を評価できる自然電位法[1]が一般的であり、フィールドで使用されるようになってきている。しかし、この手法に対し、電位は腐食の反応速度に関する情報を与えるものではないこと、またコンクリート中の水分により測定電位値に誤差が生じる可能性があることなどの問題点が指摘されている[2]。一方、この自然電位法の問題点を補完するために腐食の反応速度の定量的モニタリング法として交流インピーダンス法の研究が最近盛んに行われている[3][4]。交流インピーダンスでは、腐食反応の等価回路へのモデル化・分極抵抗の大きさからの腐食速度の評価・ワルブルゲインピーダンスによる酸素拡散の評価など多くの腐食現象に関わる情報を得ることが可能である。しかしながら、これらの情報は印加電流をかなり低い周波数(数mHz以下)まで下げた測定を実施しなければ正確に得ることは難しい。従って、フィールドにおける交流インピーダンス法の測定時間の短縮化は大きな課題の1つであり、この検討も最近行われつつある[5]。

この問題に対し、腐食反応の等価回路に着目しフィールドでの測定時間の大幅な短縮を可能とする電位ステップ法の研究とこの手法を装備したコンパクトなフィールド用計測機器の開発を進めている。本研究では、まずこの電位ステップ法の概要と、コンクリート中での測定電流の拡散を防止する2重対極式センサーの概要を述べる。さらにこれらの手法を組合せたモニタリング手法を開削トンネルおよびシールド式トンネルに試適用し、この手法のフィールド適用性を検討したのでその結果について述べる。

2. 電位ステップ法および2重対極式センサーの概要

2.1 電位ステップ法

電位ステップ法は、金属表面の等価回路において腐食反応に関わる分極抵抗が電気2重層容量との並列回路になっていることに着眼し、電気2重層容量を予め充電し、その後の分極電圧と電流の大きさから等価回路の抵抗成分(コンクリート抵抗+分極抵抗)だけを測定するものである。つまり、予め大きな電圧 V_c で短時間分極を行い電気2重層容量を充電して定常状態(放電も充

電も生じない状態)を作り出し、その後、目的とする分極電圧 V_p に走査した直後の電流変化率が零となる条件を見つけることである。電気2重層容量が定常状態となる状態を見つけ出すために、まず図-1に示すように電圧 V_c をステップ的に増加させ、それぞれの印加電圧 V_c の直後に分極電圧 V_p に走査し、その時の電流値と電流変化率を検出する。図-1において I_{c1}, I_{c2} は電気2重層容量が V_{c1}, V_{c2} により飽和充電されており、 V_p に走査した後も電気2重層容量が充電していることを示している。一方、 I_{c3}, I_{c4} では電気2重層容量が過充電になり放電していることを示している。ここで、これらの電流値と電流変化率との関係を調べると、図-2に示す関係が得られる。この図において、電流変化率が零となる電流値 I_p を直線回帰式から求め、等価回路における抵抗成分を下式にて求める。

$$R_0 = V_p / I_p \quad (1)$$

ここで、 R_0 は等価回路の抵抗成分であり、コンクリート抵抗と分極抵抗の和となる。

次に、 R_0 をコンクリート抵抗と分極抵抗を分離するために、コンクリート抵抗を電圧 V_c 印加直後の電流値から求め、 R_0 から差し引くことで分極抵抗を求める。

また、フィールド用計測装置は、縦16cm x 横24cm x 高さ11.5cmの大きさであり重量も約3kg程度とコンパクトなものであり、一人での測定作業を可能としている。

2.2 2重対極式センサー

上記の電位ステップ法を実構造物へ適用する上での課題の1つにコンクリート中での印加電流分布の制御および評価法が挙げられる。コンクリート中では、鉄筋径・かぶりおよびコンクリートの抵抗などにより電流分布が異なり、測定面積を算出する上で電流分布の制御・評価法が重要になる。この課題解決のために、コンクリート中での測定電流の拡散による測定値への誤差を最小にするために図-3に示す2重対極式センサー[6]を用いた。

このセンサーの特徴は、電流を印加する対極を2つ備えている点にある。1つは中央に配置した対極、他方は中央の対極を取り囲むように配置したガード対極

である。測定時には、双方の対極から電流を鋼材に対し印加し、ガード対極から流れる電流は、中央の対極から流れる電流が広がらないように制御する犠牲電流である。したがって、測定値は、中央の対極から流れる電流だけを用い、鋼材表面の特定した範囲の情報を得ることを可能としたものである。また、上記2重対極式センサーが測定する面積の評価については、コンクリート中の電流分布をFEM解析にて求め、鋼材面積当りの抵抗値に換算することを可能としている[6]。

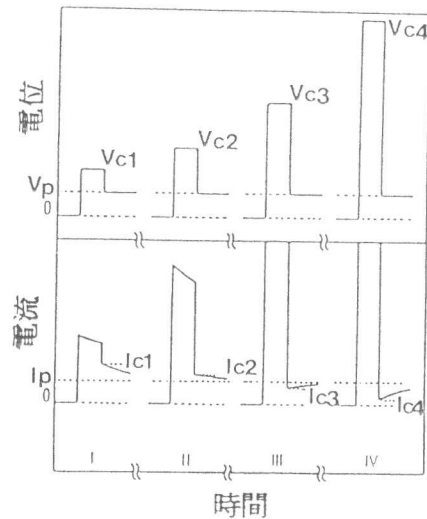


図-1 電位ステップ法の測定概要

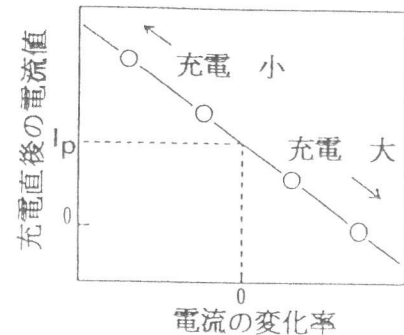


図-2 電流値の算出法

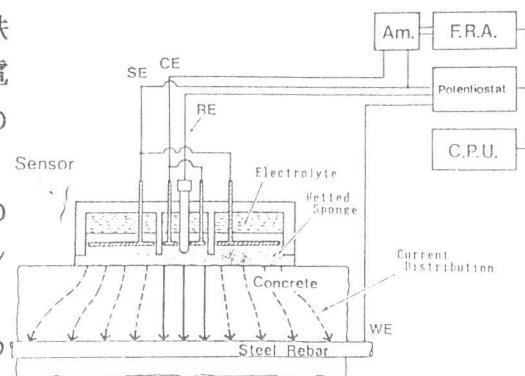


図-3 2重対極式センサー

3. 開削トンネルにおける適用性検討

3.1 測定概要

測定対象物は鉄筋コンクリート造の開削トンネルで、その断面は図-4に示すものである。この構造物は地下約8mに建設され、供用年数20年が経過したものである。コンクリートは、普通ポルトランドセメント、設計基準強度 $\sigma_{28} = 210 \text{ kg/cm}^2$ 以上を用い、最大骨材寸法25mm、スランブ18cm、空気量5%である。

測定点は、図-4に示す構造物内側の側面の縦鉄筋2本（a部およびb部と称する）を対象とし、底板部から10cmと150cmの間を10cm刻みとした点に設置した。また、この測定点以外に、開削トンネル延長方向800m程度の範囲から目視による劣化状況の推定を行い、さらに17箇所の測定点を設けた。

測定項目は、電位ステップ法と2重対極式センサーを組み合わせたモニタリング法によるコンクリート抵抗・分極抵抗の測定である。また、測定点では、測定後、鉄筋をはつりだし、腐食面積率の測定と劣化グレードの判定[7]を行っている。この腐食面積率の測定には、碁盤目を印刷した透明なセルロイド紙を用い、鉄筋にこの紙をあて錆のある碁盤目格子点をマーキングし算出している[8]。この測定は、3名で行いその結果の平均値を測定値としている。

3.2 測定結果と考察

(1) 電流波形および電流値と電流変化率の関係

本測定に用いた電圧波形は図-5に示すもので、アノード分極とカソード分極を交互に行った。図-5の電圧波形を用いると1回当りの測定時間は15秒弱となる。この印加電圧から得られる計測電流波形の一例を図-6に示す。図-6の計測電流波形はフィールド用計測装置から得られるもので、計測対象範囲となる波形のノイズを処理したものである。この計測波形（図-6）より、電圧 V_c が大きくなるに従い、分極電圧 V_p 保持時に電気2重層容量からの放電が大きくなる現象が確認できる。

また、測定で得られた電流値と電流変化率との関係の一例を図-7に示す。この図において、アノード分極・カソード分極ともに分極電圧 V_p 保持時の電流値とその後の電流変化率とは相関係数0.99以上の良好な線形関係があることが確認できた。

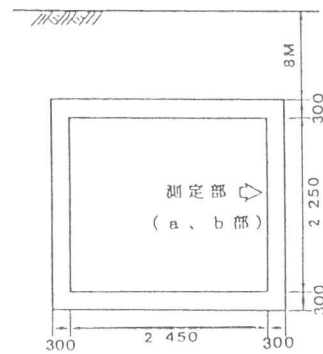


図-4 開削トンネル断面図

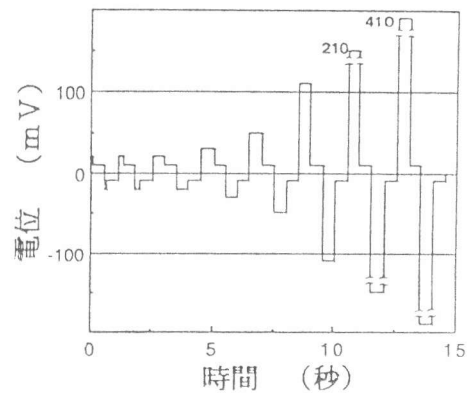


図-5 印加電圧波形

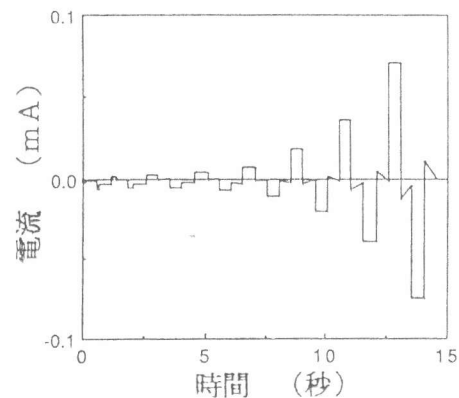


図-6 計測電流波形

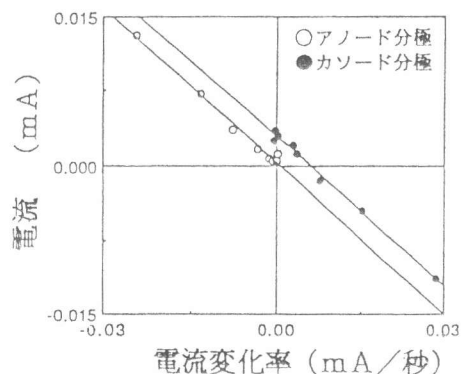


図-7 電流変化率と電流の関係 (開削トンネル)

(2) 測定値の再現性

測定値の再現性を確認するために、測定を3回実施している。この測定における計測電流波形はすべて図-6に示す波形となり、電流値と電流変化率との相関は良好であった。また、電流値と電流変化率との関係から得られるコンクリート抵抗・分極抵抗の測定ごとの変動性を検討した。図-8には、10mmごとのかぶり水準を目安に代表的な測定点を選び、コンクリート抵抗・分極抵抗の変動を記した。この図より、各かぶり水準における測定値の変動性は小さく、かぶり厚さが大きくなってもかなり再現性の良い測定が行われていることがわかる。

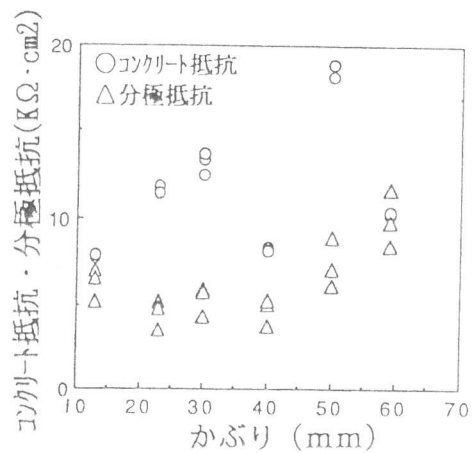


図-8 かぶりと測定値の変動性

(3) 測定値と腐食程度の関係

分極抵抗は、理論的には腐食反応速度と対応する[9]。また、腐食反応により生成される錆が鉄筋径方向に進行する孔食ではなく鉄筋表面に広く発生するものであれば、曝露期間が同じ時、腐食反応速度と腐食面積率は対応関係にある。試験結果では、腐食による鉄筋径の減少が生じている測定点は非常に少なく、腐食程度の指標として腐食面積率を用いることにした。

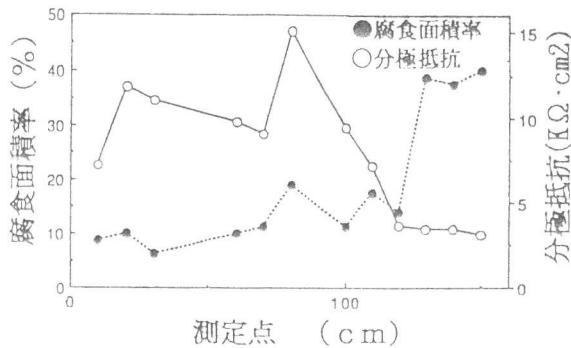


図-9 測定位置と分極抵抗・腐食面積率 (a部)

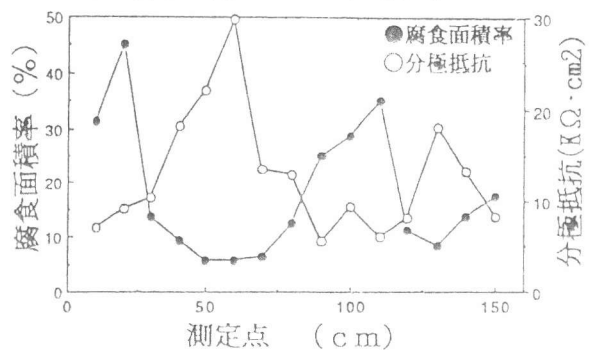


図-10 測定位置と分極抵抗・腐食面積率 (b部)

測定部位a部b部での分極抵抗と腐食面積率の関係を図-9、図-10にそれぞれ示す。a部b部とも、分極抵抗が大きい測定点では腐食面積率が低く、逆に分極抵抗が小さい測定点では面積率は大きくなる傾向がある。また、これらの図より縦鉄筋の150cmの範囲において、腐食面積は5%~45%と分布しており、鉄筋全長にわたった同一程度の腐食状況を示していない。この結果からは、コンクリート構造物の部位レベルでのマクロセルよりは鉄筋レベルでのマクロセルが生じていたと推測できる。分極抵抗はこれらの腐食状況を精度良く検出していると言える。

図-11に分極抵抗と腐食面積率の関係を示す。この図から、分極抵抗と腐食面積率とは対数関係があることが確認できる。分極抵抗が10KΩ・cm²以上であれば腐食面積率の多くは10%

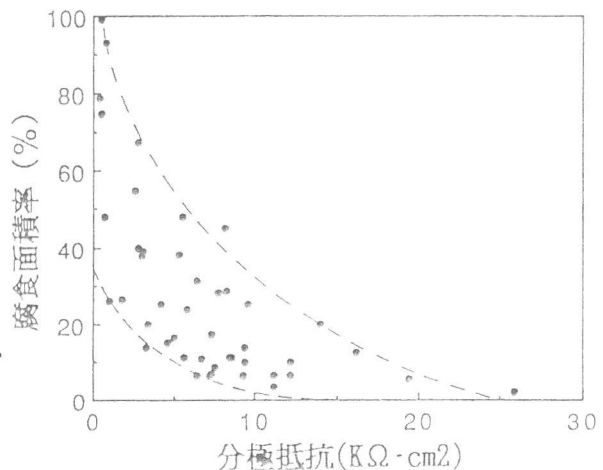


図-11 分極抵抗と腐食面積率の関係

以下である。また、分極抵抗が $3\text{K}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 以下であれば、面積率の多くは40%以上となっている。

図-12に分極抵抗と劣化グレードの関係を示す。劣化グレード1、2ではかなり分極抵抗にばらつきがあるが、グレード3、4では抵抗値の小さい範囲に比較的ばらつきのない関係となっている。各グレードでの平均値を求めると図中実線で示すように、平均値が小さいほど劣化グレードが大きくなるのがわかる。

これらより、電位ステップ法と2重対極式センサーで測定された分極抵抗はフィールドでの鉄筋の腐食状況を検出する1つの指標になる可能性があることが確認された。

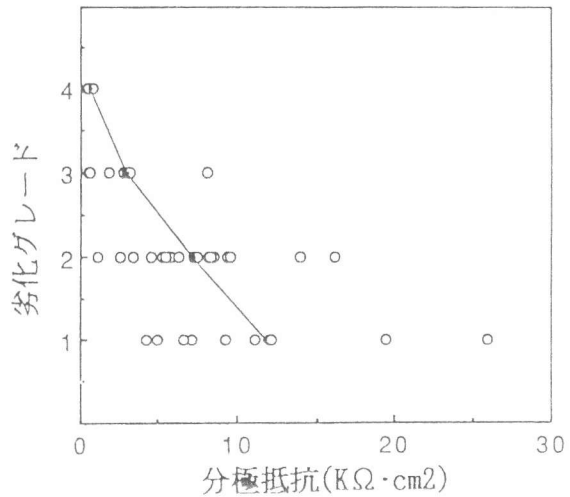


図-12 分極抵抗と劣化グレードの関係

4. シールド式トンネルにおける適用性検討

4.1 測定概要

測定対象物は30cm以上のコンクリートにより2次覆工が施されたシールド式トンネルであり、断面図を図-13に示す。この構造物は地下約30mに設置されており、建設年度は1979年で、供用年数は11年である。

コンクリートは、普通ポルトランドセメント、設計基準強度 $\sigma_{28}=210\text{kg}/\text{cm}^2$ 以上を用い、最大骨材寸法25mm、スランプ18cm、空気量5%である。

測定部位は、図-13に示す断面図でかぶり厚さが45cmである上部を対象とした。測定点は、スチールセグメント

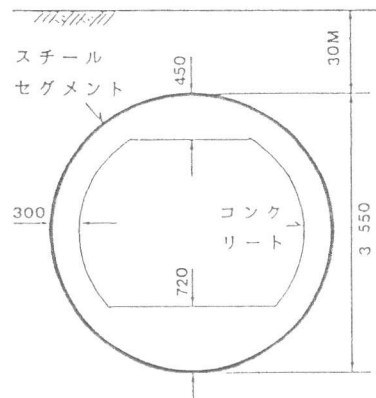


図-13 シールド式トンネル断面図

の主桁および縦リブの位置を考慮して、断面円周方向は16cmピッチで96cmの範囲、断面直角方向は30cmピッチで1.2mの範囲で、合計35箇所である。測定項目は、開削トンネルと同様に電位ステップ法と2重対極式センサーを組み合わせたモニタリング法によるコンクリート抵抗・分極抵抗の測定である。また、測定点では、測定後、コンクリートのかぶり部を撤去し、腐食状況を目視調査している。なお、測定用の作用極はこの構造物内部に埋め込み金具として設置されていたものを用いた。この金具とスチールセグメントとの導通確認は、コンクリートをはつりだした後、行っている。

4.2 測定結果と考察

(1) 電流値と電流変化率の関係

本測定に用いた電圧波形は開削トンネルに用いた図-5に示すものである。この印加電圧から得られる計測電流波形も図-6に示す波形と同様で、電圧 V_c が大きくなるに従い分極電圧 V_p 保持時に電気2重層容量からの放電は大きくなっていった。また、測定で得られた電流値と電流変化率との関係の一例を図14に示す。この図に

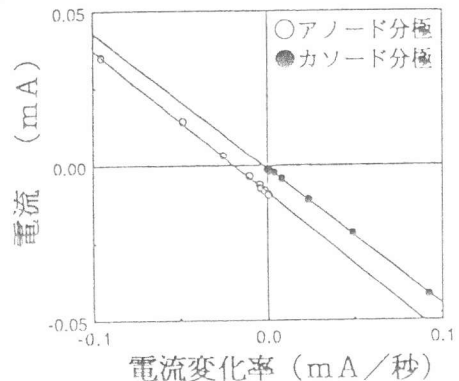


図-14 電流変化率と電流の関係 (シールド式トンネル)

において、アノード分極・カソード分極ともに分極電圧 V_p 保持時の電流値とその後の電流変化率とは相関係数0.99以上の良好な線形関係があり、かぶりが30cm以上になっても良好な測定が可能であることが確認できた。

(2) 測定値と腐食状況との関係

図-15に測定範囲の分極抵抗の分布を示す。この図より分極抵抗値は30~120k Ω ・cm²のばらつきはあるが、開削トンネルでの測定値に比べかなり高い値となっている。

一方、腐食状況は、コンクリートはつり後のセグメント表面の目視調査では錆はほとんど確認されなかった。

本測定での分極抵抗値が30k Ω ・cm²以上であり、コンクリート中の鉄筋での測定結果からはこの抵抗値で鉄筋はほとんど腐食しておらず、この点からシールド式トンネルでの測定値も腐食状況をよく検出していると推定できる。

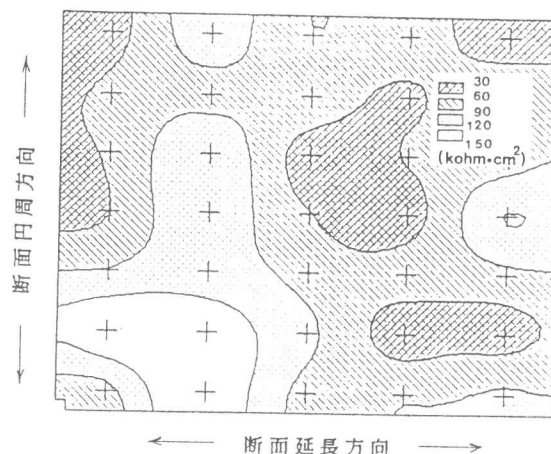


図-15 分極抵抗の分布図

5. まとめ

- (1) 測定時間短縮と特定面積の測定を目的とした電位ステップ法と2重対極式センサーを組み合わせたモニタリング法をフィールド測定に用いた結果、計測波形は測定原理に従う波形となり、その再現性が高いことが確認された。
- (2) 開削トンネルでは、両手法を組み合わせたモニタリング法にて得られる分極抵抗は腐食面積率と良好な関係があり、また、劣化グレードとの関係も示唆され、鉄筋の腐食状況を非破壊にて検出できる可能性が確認された。
- (3) かぶり厚さが30cm以上のシールド式トンネルにおいても本手法は良好な測定が可能であり、この構造物における鋼材の腐食状況の検出にも適用できる可能性が示唆された。

参考文献

- 1) ASTM C-876: "Half Cell Potential of Reinforcing Steel in Concrete.
- 2) 武若耕司: コンクリートの非破壊検査方法(鋼材腐食), コンクリート工学, 1989, pp. 69-74
- 3) N. Goto, K. Matsuoka, H. Kihira: "Corrosion Monitoring Method of Reinforcing Bars in Concrete." ISIJ, EVALMAT89, 1989, paper90.
- 4) Dawson, J.L. et al.: "Electrochemical Impedance Measurements Applied to the Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete." NACE. Corrosion/78. 1978. paper125.
- 5) 後藤信弘ほか: 交流インピーダンス法による鉄筋腐食モニタリング法, 土木学会年次学術講演会 1990, pp. 554-555
- 6) 後藤信弘ほか: 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モニタリング, コンクリート工学年次講演会 1990, pp. 527-532
- 7) 建築物耐久性向上普及委員会: 鉄筋コンクリート造建築物の耐久性向上技術, 技報堂出版, 1986
- 8) 樫野紀元: コンクリート造構造物の耐久性, 鹿島出版, 1988
- 9) 水流徹: 交流インピーダンス法とその腐食・防食への応用, 防錆管理, 1986. 11, pp13-19