

報告 自然電位法による塩害を受けたコンクリート橋の鉄筋腐食診断方法に関する検討

中村 英佑^{*1}・渡辺 博志^{*2}・中村 雅之^{*3}・井川 一弘^{*4}

要旨：塩害環境下で供用中の鉄筋腐食による劣化損傷が顕在化していないコンクリート橋を対象として、自然電位法を用いた鉄筋腐食診断方法の検討を行った。自然電位は測定時の気象条件や測定前の散水時間の違いにより変動するが、構造物全体の分布傾向は概ね等しくなること、測定点間隔を広くすると局所的な腐食を把握することが困難となることを確認した。また、等電位線図などを用いて比較的卑な自然電位が測定された位置を特定することにより、鉄筋位置の塩化物イオン濃度の高い箇所や局所的な腐食箇所を検出できることを示した。

キーワード：自然電位法、塩害、鉄筋腐食、塩化物イオン濃度

1. はじめに

塩害環境下にあるコンクリート橋を合理的に維持管理していくためには、構造物表面に鉄筋腐食による劣化損傷が顕在化する前に、鉄筋腐食の兆候を把握することが重要である。劣化損傷が現れた後では、補修に要するコストが増加するだけでなく、構造物の性能を再び健全な状態に戻すことが極めて困難となる。

自然電位法は、既に土木学会規準¹⁾で測定方法が定められ、コンクリート中の鉄筋の腐食状況を容易に把握可能な検査方法として積極的に活用されることが期待されている。特に、劣化損傷が構造物表面に現れていない場合にも、コンクリート中の鉄筋の腐食状態を非破壊で推定できる点は、自然電位法の特長の一つである。

これまでにも、主に鉄筋腐食による劣化損傷が顕在化した構造物を対象に、自然電位と鉄筋の腐食状況の関係が考察されてきた²⁾。ところが、鉄筋の腐食状況が ASTM C 876³⁾の腐食判定基準と必ずしも一致しないとの指摘も多く⁴⁾、コンクリート橋の維持管理で自然電位法を利用する際に十分な信頼感を持っていない原因となっていた。

本報告では、塩害環境下で供用中の鉄筋腐食による劣化損傷が顕在化していないコンクリート橋を対象として、自然電位の適切な測定方法と鉄筋腐食診断方法を検討することを目的とした。このため、測定時の気象条件や測定前の散水時間の違い、測定点間隔などが測定結果に及ぼす影響を考察し、塩化物イオン濃度の測定やはつり調査の実施箇所の選定方法を検討した。

2. 調査の概要

2.1 対象としたコンクリート橋

図-1, 2 に示す 1963 年架設の RC 床版橋と、1975 年架設のポストテンション方式 PC 単純 T 桁橋(以下、PC 橋)の 2 橋を調査対象とした。両橋とも日本海沿岸で約 30 年以上供用され、一部でひび割れが確認されたものの鉄筋腐食に起因するとみられる錆汁や剥離などはなく、目視調査では比較的健全と評価される状態にあった。

2.2 自然電位の測定方法

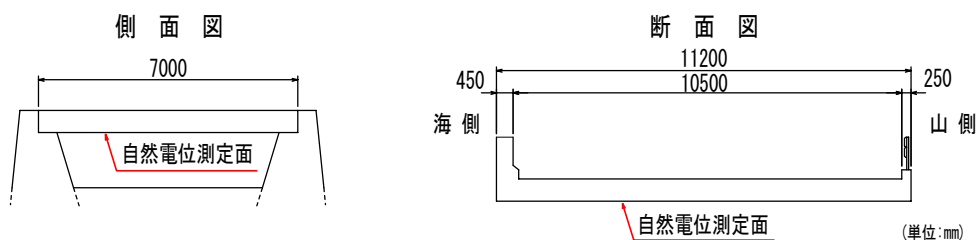
測定時の気象条件や測定前の散水時間の違い、測定点間隔が自然電位に及ぼす影響を明らかにするため、下記の手順で測定を行った。これ以

*1 (独)土木研究所 技術推進本部 構造物マネジメント技術チーム 研究員 工修 (正会員)

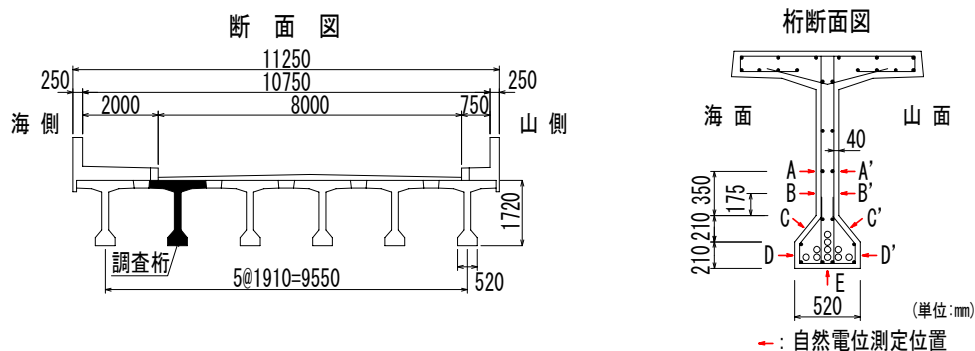
*2 (独)土木研究所 技術推進本部 構造物マネジメント技術チーム 主席研究員 工修 (正会員)

*3 日本構造物診断技術協会 (正会員)

*4 日本構造物診断技術協会



図－1 RC 床版橋の概要



図－2 PC 橋の概要

外については、全て土木学会規準に準拠した。

測定は、夏季(2006 年 8 月、約 30℃、晴)と冬季(2005 年 12 月、約 6℃、雨)の 2 回実施した。

測定前のコンクリート表面への散水は 30 分間を基本とし、この間断続的に水道水を噴霧散水した。ただし、散水時間の違いが測定結果に及ぼす影響を検討するため、両橋の一部で、散水時間を 30 分間以上とした場合と、逆に 30 分間散水後に表面を乾燥させた場合の測定も行った。

測定点は、鉄筋の直上となるように設けた。

RC 床版橋では、縦方向と横方向に鉄筋が 200mm 間隔で配置されていたため、200mm の格子状に測定点を設定した。PC 橋では、せん断補強鉄筋が 300mm 間隔で配置されていたため、一断面当たりウェブとフランジに計 9 点の測定点を設け、これが橋軸方向に 300mm 間隔となるようにした。

なお、測定には飽和塩化銀電極を用い、測定値は 25℃の飽和硫酸銅電極基準に換算した¹⁾。

2.3 塩化物イオン濃度と腐食状況の調査方法

自然電位の測定前後で、塩化物イオン濃度測定用の小径コア(φ25mm)の採取と鉄筋の腐食状況を確認するためのはつり調査を行った。

自然電位の測定前では、鉄筋の導通確認のために任意に 3 ヶ所を選定し、小径コアの採取と

鉄筋の腐食状況の目視観察を併せて行った。その後、自然電位の測定結果を参考にして、全測定値中で比較的卑な値を示した 2 ヶ所を選定し、小径コアを採取した。また、このうち最も卑な自然電位を示した箇所でははつり調査も行い、鉄筋の腐食状況を目視観察した。

なお、塩化物イオン濃度は、小径コアを 10mm ごとにスライスし、電位差滴定法(JIS A 1154)で鉄筋位置の塩化物イオン濃度を測定した。

3. 調査結果および考察

3.1 自然電位と塩化物イオン濃度の測定結果

図－3、4 に、各橋の夏季の自然電位の測定結果を等電位線図で示す。図中には、自然電位の測定前後に実施した塩化物イオン濃度の測定結果も併記している。なお、JIS A 1152 に準拠し小径コアを用いて測定した中性化深さの平均値は、RC 床版橋で約 18mm、PC 橋で約 9mm であり、コンクリート・モルタル水分計による測定前の計測値は、両橋とも 5.0～8.0%の範囲にあった。

RC 床版橋の自然電位は、海側ほど卑な値となり、中央では比較的貴な値となった。PC 橋の自然電位は、北側の海面の一部のみで卑な値となった。最も卑な自然電位を示した箇所の鉄筋位

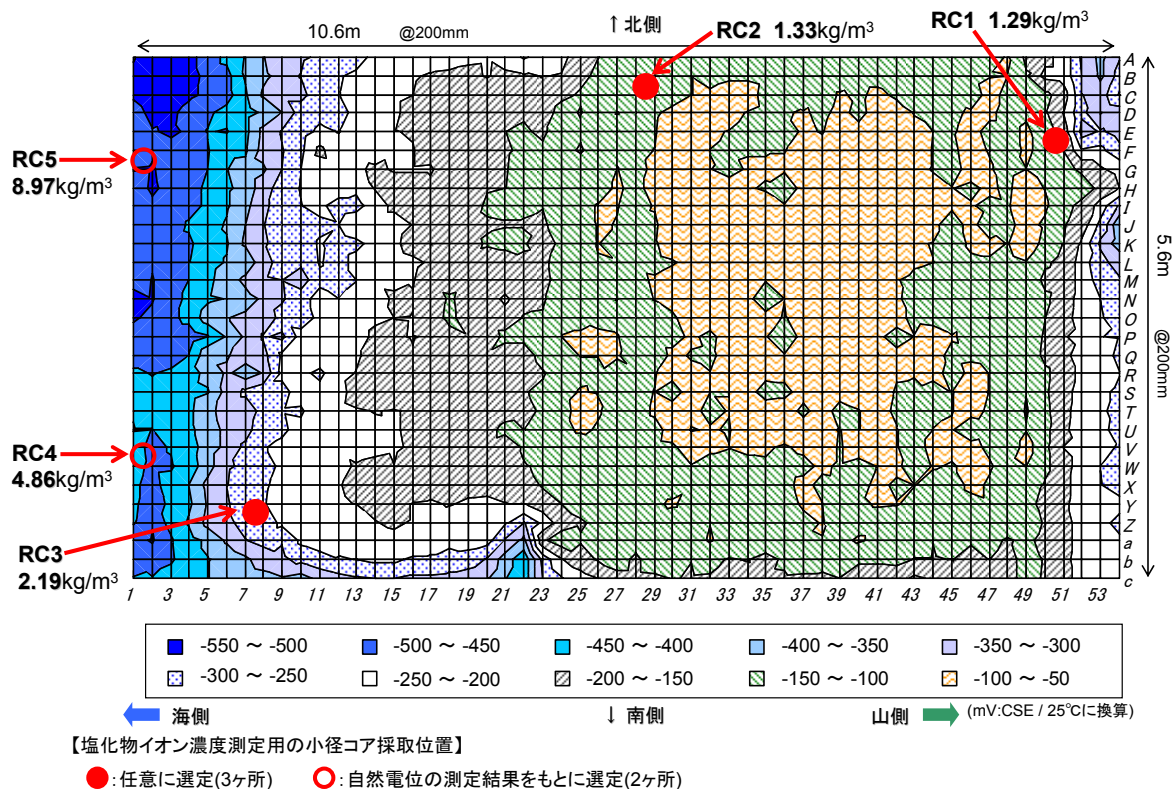


図-3 RC 床版橋の夏季の自然電位と塩化物イオン濃度の測定結果

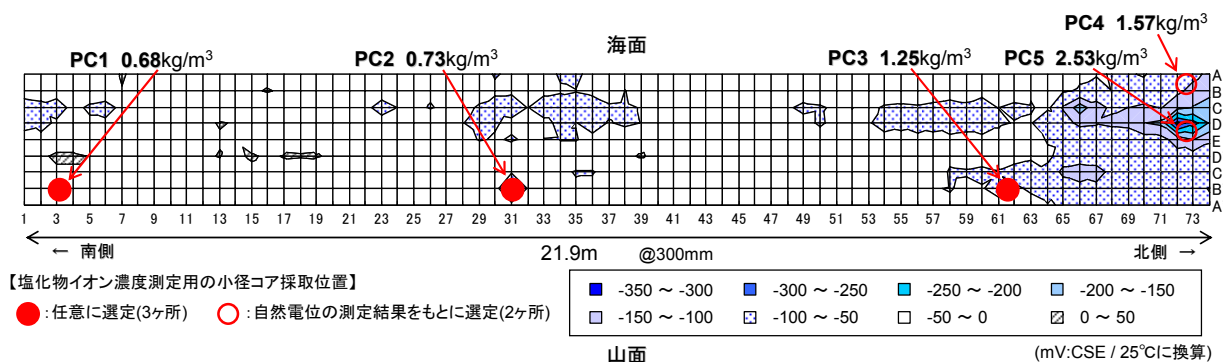


図-4 PC 橋の夏季の自然電位と塩化物イオン濃度の測定結果

置(両橋ともかぶり 40mm)の塩化物イオン濃度は、RC 床版橋の RC5 で 8.97kg/m^3 、PC 橋の PC5 で 2.53kg/m^3 となり、各橋で最も高い値となった。逆に自然電位が貴な箇所では、塩化物イオン濃度は小さくなる傾向にあった。すなわち、自然電位の分布から比較的卑な測定値の得られた位置を特定することにより、塩化物イオン濃度の高い箇所を選定することができると考えられる。

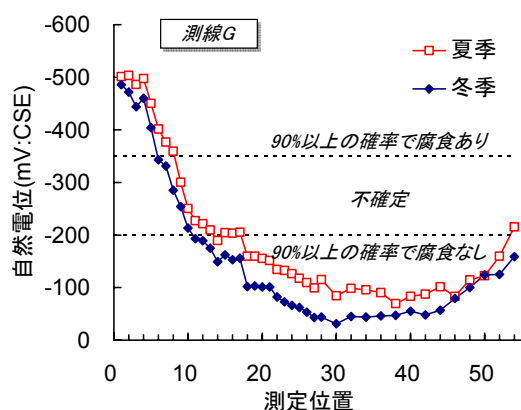
3.2 測定時の気象条件と自然電位の関係

図-5、6 に、各橋の夏季と冬季の自然電位の測定結果を示す。以下、参考のため、ASTM C 876 の腐食判定基準もグラフ中に併記する。

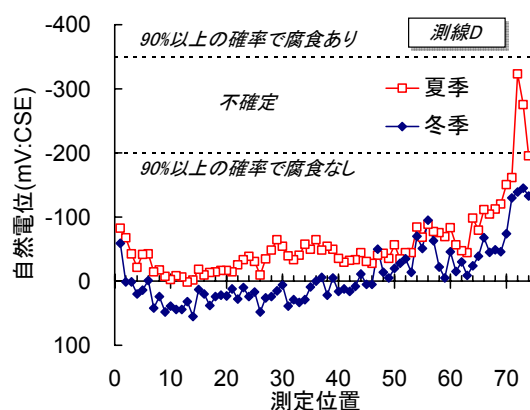
両橋とも、夏季の方が冬季よりも平均で約 40mV 卑な自然電位が測定された。これは、気温の高い夏季に鉄筋周辺の腐食環境が変化し、これを反映して自然電位が卑な値となったためと考えられる。しかし、自然電位の分布傾向に着目すれば、RC 床版橋の測定位置 1～7 付近、PC 橋の測定位置 70～74 付近で最も卑な自然電位が測定され、全体的な自然電位の分布傾向は夏季と冬季で概ね等しい結果が得られた。

3.3 散水時間の違いと自然電位の関係

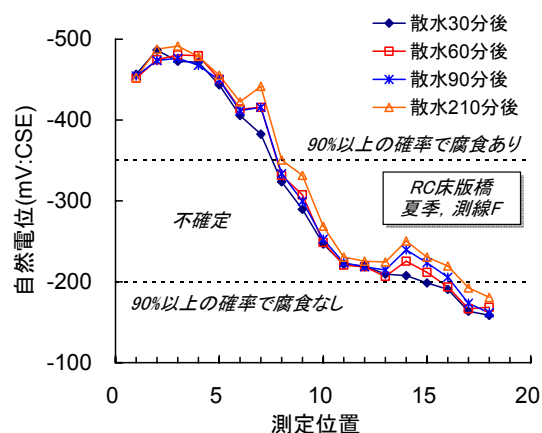
図-7 に散水時間を長くした場合、図-8 に散水後に乾燥させた場合の自然電位を示す。両図



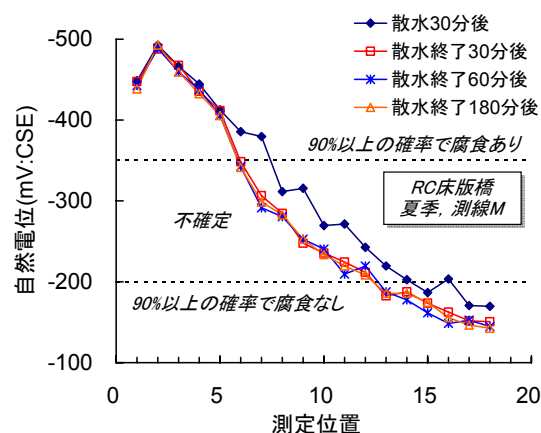
図－5 RC床版橋の夏季と冬季の自然電位



図－6 PC橋の夏季と冬季の自然電位



図－7 散水時間を長くした場合の自然電位



図－8 散水後に乾燥させた場合の自然電位

とも夏季のRC床版橋の測定結果である。

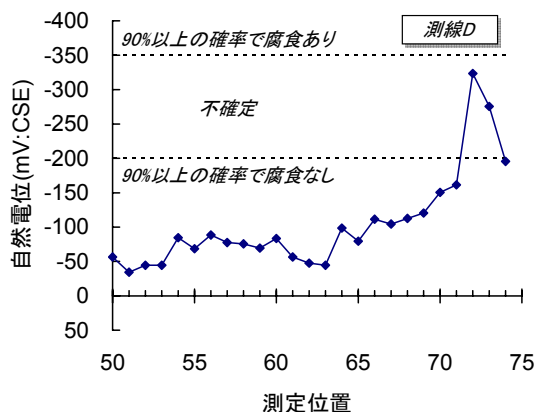
散水時間を長くすると、自然電位は徐々に卑化し、210分まで延長すると平均で約50mV卑となった。逆に30分間散水後に乾燥させると、平均で約30mV貴となった。この傾向は、主に中性化の作用を受けた構造物の測定結果とも一致する⁵⁾。いずれの場合も、散水30分後の場合と比較して自然電位の分布傾向は概ね等しい。すなわち、自然電位は散水時間の違いによっても変動するが、全体的な分布傾向にはそれほど違いは生じないと考えられる。

3.4 測定点間隔と自然電位の関係

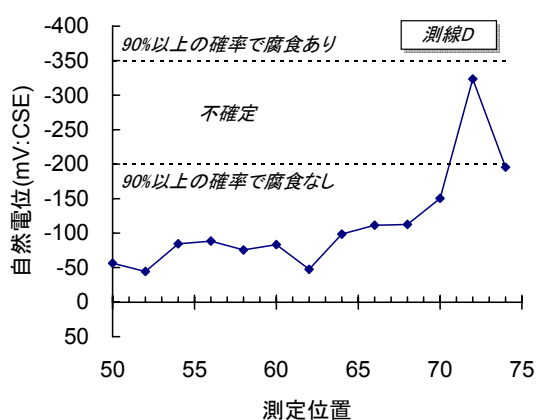
自然電位を測定する際、測定点間隔を広くすると測定に要する時間と手間を減らすことができる。しかし、測定点間隔を広くした場合、局所的な腐食箇所を把握できなくなる可能性が高まるため、土木学会規準は100～300mmを推奨し、ASTM C 876は1200mmとし、隣接する測定

値の差が150mV以上の場合に測定点間隔を狭めることとしている。ここでは、局所的に卑な自然電位が測定されたPC橋の測定結果を用いて、測定点間隔を広くした場合の影響を検討する。

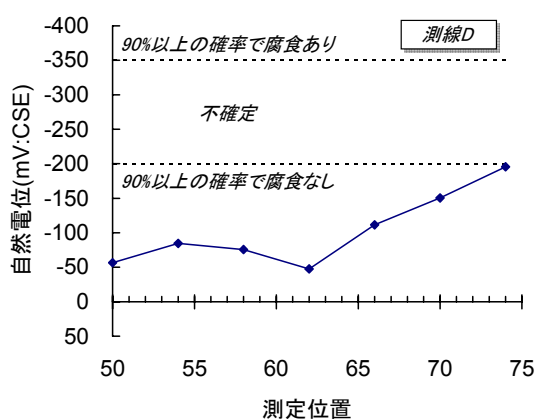
図－9, 10, 11に、測定点間隔を300mm, 600mm, 1200mmとした場合の測定結果を示す。この結果は測定点の取り方にも大きく依存するが、測定点間隔を1200mmまで広げると、測定位置72と73の比較的卑な自然電位が測定されなくなる可能性があることを示している。図－11において、測定位置74では他の箇所よりも卑な自然電位が測定されたが、この値はASTM C 876で「90%以上の確率で腐食なし」と判定される可能性が高い。すなわち、測定点間隔を広くした場合、局所的な腐食箇所を適切に検出できなくなる危険性が高まる。このため、自然電位の測定点間隔としては、鉄筋の配筋間隔もしくは300mm程度以下を確保することが望ましいと考えられる。



図－9 300mm 間隔で測定した自然電位



図－10 600mm 間隔で測定した自然電位



図－11 1200mm 間隔で測定した自然電位

3.5 鉄筋の腐食状況

図－12, 13, 14, 15 に、各橋のはつり調査による鉄筋の腐食状況の写真を示す。紙面の都合上、RC2, RC5, PC2, PC5 の写真を示す。

RC 床版橋では、全てのはつり調査箇所でごく表面的な腐食が生じ、任意に選定した 3 ヶ所

(RC1, RC2, RC3)と自然電位が最も卑な RC5 の腐食は同程度であった。しかし、等電位線図では海側ほど卑な自然電位が測定され、これに伴い塩化物イオン濃度も高くなる傾向にあった。自然電位は鉄筋が腐食環境にあるかどうかを示す指標であり、腐食の程度や速度を表すことは原理的に不可能である。すなわち、RC5 で測定された卑な自然電位は、鉄筋位置の塩化物イオン濃度が高く厳しい腐食環境にあることを反映したものであったが、他の位置と比較して激しい腐食が発生していることまでを示すものではなかったと考えられる。

一方、PC 橋では、任意に選定した 3 ヶ所(PC1, PC2, PC3)で腐食は生じておらず、等電位線図で局所的に卑な自然電位となった PC5 で軽微な腐食が生じていた。PC 橋の自然電位の測定結果は全て -350mV よりも貴であったため、ASTM C 876 の腐食判定基準に従えば、腐食が生じていると判定される可能性は低い。ASTM C 876 の腐食判定基準が実際の腐食状況と一致しなかった原因は、マクロセル腐食の形成により本来は卑な自然電位を示すはずの局所的なアノード部が分極し、貴な自然電位を示した⁶⁾ためと考えられる。前述したように、測定時の気象条件や測定前の散水時間の違いにより自然電位は変動したが、全体的な分布傾向は概ね同様の結果が得られた。従って、ASTM C 876 の判定基準は必ずしも実際の鉄筋の腐食状況とは一致しないこともあるが、等電位線図を精査することで局所的な腐食箇所を検出できると考えられる。

4. 結論

本報告では、塩害環境下にある劣化損傷の顕在化していないコンクリート橋を対象として、自然電位法を用いた鉄筋腐食診断方法を検討した。本報告の範囲内で得られた知見をまとめる。

- 1) 自然電位は、測定時の気象条件や測定前の散水時間の違いにより変動したが、全体的な分布傾向は概ね等しくなった。また、測定点間隔を広くすると、局所的な腐食箇所を検出で



図-12 RC床版橋 RC2 の鉄筋腐食状況



図-13 RC床版橋 RC5 の鉄筋腐食状況



図-14 PC橋 PC2 の鉄筋腐食状況



図-15 PC橋 PC5 の鉄筋腐食状況

きない可能性が高まることを確認した。

- 2) 鉄筋腐食による劣化損傷が現れていないコンクリート橋において、等電位線図などを用いて比較的卑な自然電位の得られた位置を特定することにより、鉄筋位置の塩化物イオン濃度の高い箇所や局所的な腐食箇所を検出することができた。

なお、本報告は、独立行政法人土木研究所と日本構造物診断技術協会による「自然電位法による鉄筋腐食診断技術に関する共同研究」の成果の一部をまとめたものである。

今回の調査を行うにあたり、国土交通省北陸地方整備局高田河川国道事務所の関係各位にご協力を賜りました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート構造物における自然電位測定方法(JSCE-E601-2000)・同解説、鉄筋腐食・防食および補修に関する研究の現状と今後の動向(その2)-コンクリート委員会腐食防食小委員会(2期目)報告-, コンクリート

技術シリーズ 30, pp.248-256, 2000.12

- 2) 例えば、葛目和宏、宮川豊章：自然電位測定による鉄筋腐食の調査、非破壊検査, Vol.34, No.10, pp.756-760, 1975.10
- 3) ASTM C 876-91(Reapproved 1999) : Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, Annual Book of ASTM Standards, Vol.03.02, pp.457-462, 1999
- 4) 例えば、山本悟ほか：自然電位測定によるコンクリート中の鉄筋の腐食診断、コンクリート構造物の耐久性診断に関するシンポジウム論文集, pp.67-72, 1988.5
- 5) 足立幸郎ほか：自然電位・分極抵抗法による鉄筋腐食現地追跡調査、コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.1, pp.1243-1248, 1995.6
- 6) 例えば、丸屋剛ほか：コンクリート中の鋼材のマクロセル腐食に関する解析手法の構築、土木学会論文集 E, Vol.62, No.4, pp.757-776, 2006.11