

◆ 報 文 ◆

塩害環境下にあるコンクリート橋の自然電位測定手法

中村英佑* 渡辺博志** 古賀裕久***

1. はじめに

既設コンクリート橋を合理的に維持管理していくためには、定期点検時に自然電位法¹⁾や分極抵抗法²⁾などの非破壊試験を併用し、塩害や中性化による鉄筋腐食に伴う劣化損傷が構造物表面に現れる前に、鉄筋腐食の兆候を把握することが効果的と考えられる。ひび割れや剥離などの劣化損傷が表面化した後では、補修に要する費用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になるためである。

自然電位法は、照合電極と電位差計などを使用し、コンクリート内部の鉄筋の電位を測定することにより、鉄筋が置かれた腐食環境を非破壊かつ簡易に推定する検査方法である¹⁾。米国では、1950年代から道路橋床版に適用され始め、ASTM C 876³⁾で測定方法と腐食判定基準が定められた。国内でも土木学会規準⁴⁾として測定方法が規定されたが、測定結果が実際の鉄筋の腐食状態と必ずしも一致しないことや測定値が変動することなど

の問題点も指摘されている。このため、自然電位法に対する信頼感は必ずしも高くなく、維持管理の現場で積極的に活用されるには至っていない。

本報文は、塩害環境下で供用中のコンクリート橋と供試体の測定事例を示し、自然電位法の適切な測定手法と測定結果の活用方法について検討した結果を報告するものである。

2. コンクリート橋の測定事例

2.1 測定の概要

2.1.1 対象としたコンクリート橋

図-1、2のRC床版橋とポストテンション方式PC単純T桁橋（以下、PC橋）の2橋梁を対象とした。両橋梁とも日本海沿岸で約30年間以上供用され、一部でひび割れが確認されたが鉄筋腐食に起因する錆汁や剥離などはなく、目視点検では比較的健全と評価される状態にあった。

2.1.2 自然電位の測定方法

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。

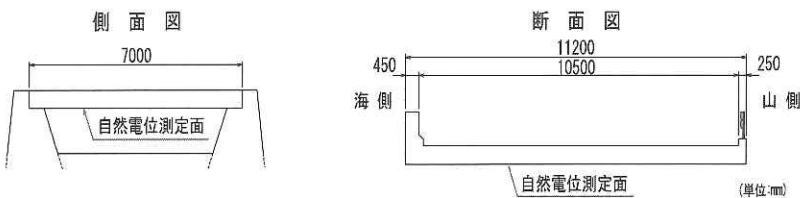


図-1 RC床版橋の概要

竣工年：1963年

海岸線からの距離：約10m

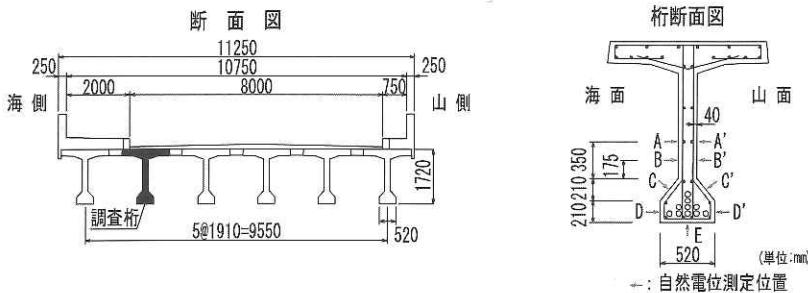


図-2 PC橋の概要

竣工年：1975年

海岸線からの距離：約200m

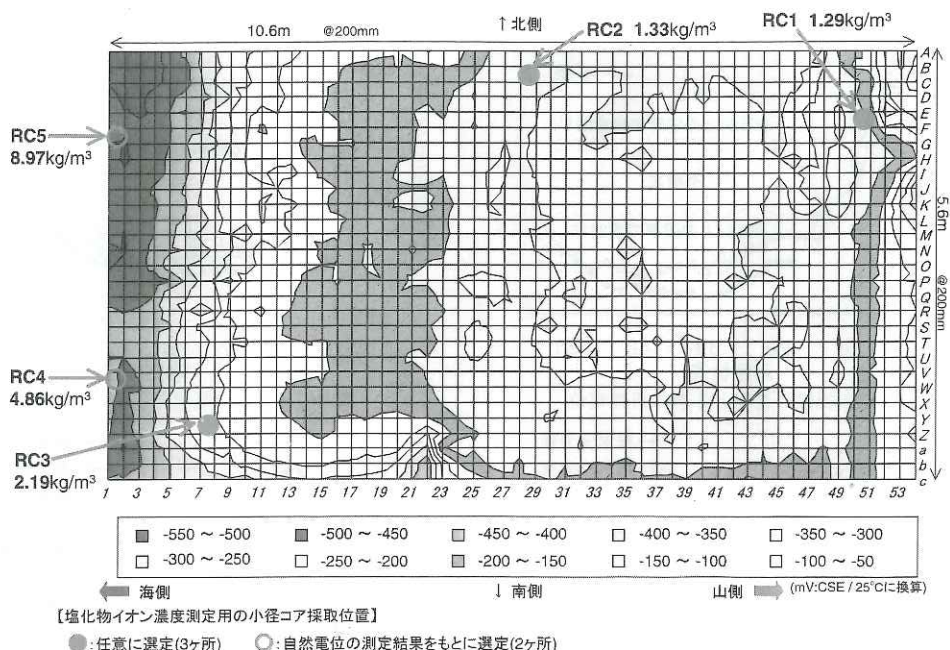


図-3 RC床版橋の夏季の自然電位と塩化物イオン濃度の測定結果

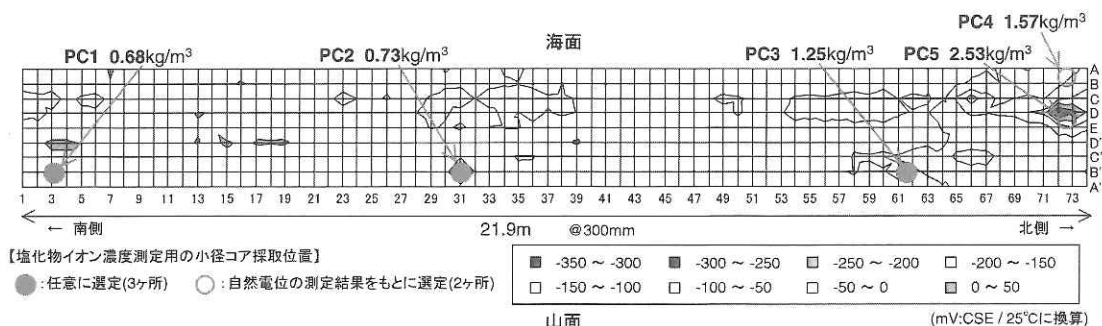


図-4 PC橋の夏季の自然電位と塩化物イオン濃度の測定結果

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、断続的に水道水を噴霧散水した。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、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。照合電極には飽和塩化銀電極を使用し、測定値を25℃の飽和硫酸銅電極基準に換算した。

測定点は、配筋図と電磁波レーダ法による鉄筋探査結果を参考として、鉄筋の直上になるように設けた。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、ウェブとフランジに一断面あたり9点の測定点を設け、橋軸方向に300mm間隔で測定を行った。

2.1.3 塩化物イオン濃度と鉄筋腐食の調査方法

自然電位の測定結果を参考として、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態を確認するためのはつり調査を行った。

まず、自然電位の測定前に、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態の目視観察を行った。その後、自然電位の測定結果をもとに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。このうち最も卑な自然電位を示した箇所では、はつり調査により鉄筋の腐食状態を目視観察した。

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、JIS A 1154に従い電位差滴定法で測定した。

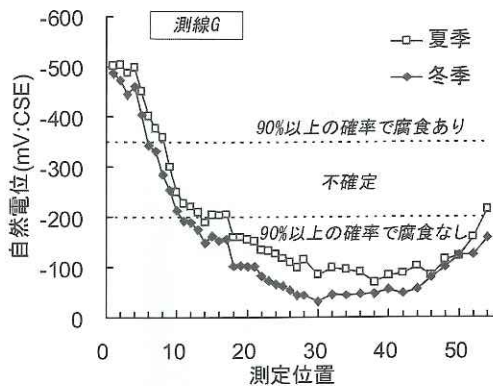


図-5 RC床版橋の夏季と冬季の自然電位

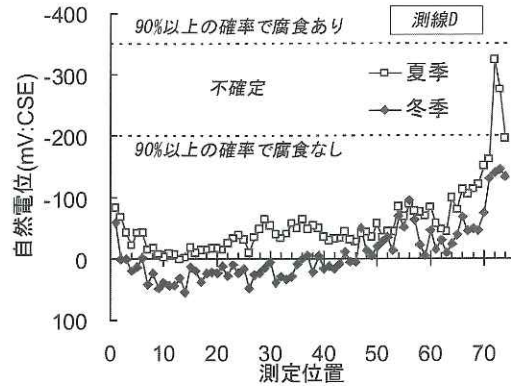


図-6 PC橋の夏季と冬季の自然電位

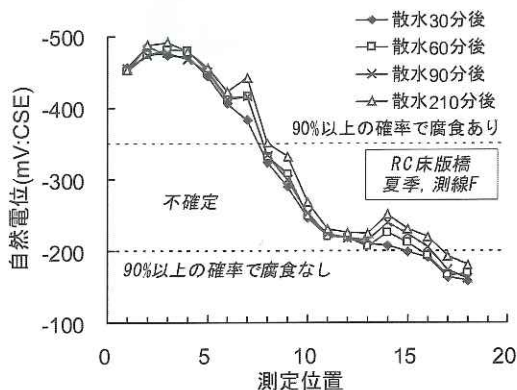


図-7 散水時間を長くした場合の自然電位

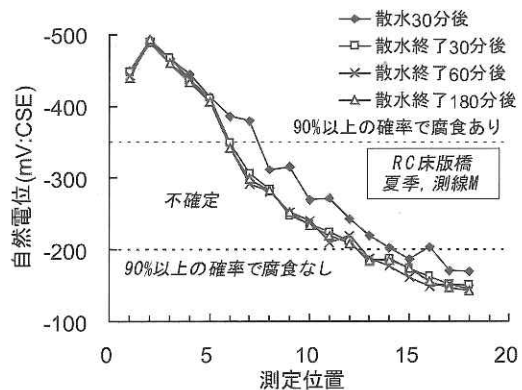


図-8 散水後に乾燥させた場合の自然電位

2.2 測定結果および考察

2.2.1 塩化物イオン濃度と自然電位の関係

図-3、4に、各橋梁の夏季の自然電位測定結果を等電位線図で示す。各図には、鉄筋位置の塩化物イオン濃度の測定結果も併記した。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、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梁とも5.0～8.0%であった。

RC床版橋の自然電位は、海側で卑な値となり、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置（かぶり40mm）における塩化物イオン濃度は、RC床版橋RC5で8.97kg/m³、PC橋PC5で2.53kg/m³となり、各橋梁5ヶ所で測定した塩化物イオン濃度の中では最も高い値となった。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で、鉄筋位置の塩化物イオン濃度が高い箇所を選定することができると考えられる。

2.2.2 測定時の気温、散水時間と自然電位の関係

図-5、6に、各橋梁の夏季と冬季の自然電位を比較して示す。以下、参考のため、ASTM C 876

の腐食判定基準も併記する。両橋梁とも、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、気温の変化とともに鉄筋周辺の腐食環境も変化したためと考えられる。

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RC床版橋の夏季の自然電位を示す。散水時間を長くすると、自然電位は徐々に卑化し、最大210分まで延長すると平均で約50mV卑となった。逆に30分間散水後に表面を乾燥させると平均で約30mV貴となった。

以上から、自然電位は測定時の気温や散水時間の違いにより変動すると考えられる。ただし、自然電位の貴卑の分布に着目すれば、RC床版橋の測定位置1～7付近、PC橋の測定位置70～74付近で常に卑な測定値が得られており、全体的な傾向としては概ね等しい結果が得られるといえる。

2.2.3 測定点間隔と自然電位の関係

自然電位の測定では、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反面、局所的な腐食箇所を把握できなくなる危険性が高まる。そこで、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、測定点間隔を広くした場合の影響について検討した。

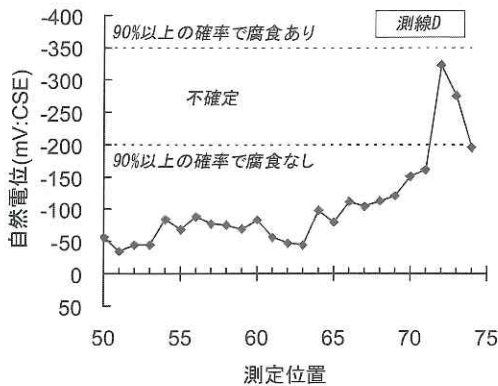


図-9 300mm 間隔で測定した自然電位

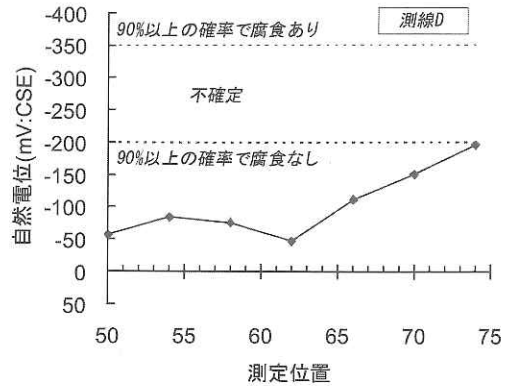


図-10 1,200mm 間隔で測定した自然電位



図-11 RC床版橋RC5の鉄筋腐食状態



図-12 PC橋PC5の鉄筋腐食状態

図-9、10に、測定点間隔を300mm、1,200mmとした場合の測定結果を示す。これらの結果は測定点の取り方にも大きく依存するが、1,200mmまで測定点間隔を広げると、測定位置72と73で測定された比較的卑な自然電位が測定されない可能性があることを示している。図-10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ているが、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可能性が高い。このため、今回の測定結果の範囲では、自然電位の測定点間隔を鉄筋の配筋間隔もしくは300mm程度とすることが望ましいと考えられる。

2.2.4 鉄筋の腐食状態と自然電位の関係

図-11、12に、RC床版橋RC5、PC橋PC5のはつり調査による鉄筋の腐食状態の写真を示す。

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ていた。これらは施工前からのものである可能性もあるが、任意に選定した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。ところが、自然電位は海側ほど卑になり、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示すことは原理的に不可能である。すなわち、RC5の自然電位は、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ていたが、他の位置よりも激しい腐食が発生していること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PC1、PC2、PC3で腐食は生じず、局所的に卑な自然電位が得られた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よりも貴であり、ASTM C 876の腐食判定基準で腐食が生じていると判定される可能性は低い。今回測定したPC橋のように、局所的に塩化物イオンが鉄筋位置まで浸透している場合には、マクロセル腐食が生じている可能性がある。この際、自然電位は分極の影響を受けて変動し、本来の値とは異なった測定値が得られる。すなわち、ここでASTM C 876の腐食判定基準が鉄筋の腐食状態と一致しなかった原因は、マクロセル腐食の影響により本来は卑な自然電位を示すはずの局所的な腐食部が分極して、貴な自然電位を示したためと考えられる。

このように、自然電位は気温や散水時間、マクロセル腐食などの影響によって変動するが、構造物全体における自然電位の分布から卑な測定値の

表-1 供試体のコンクリート配合

W/C (%)	s/a (%)	単位重量 (kg/m ³)				
		W	C	S	G	混和剤
55	44.3	158	288	801	1018	3.08

普通ポルトランドセメント、塩化物イオン濃度0、9kg/m³
最大骨材寸法25mm、スランプ8cm、空気4.5%

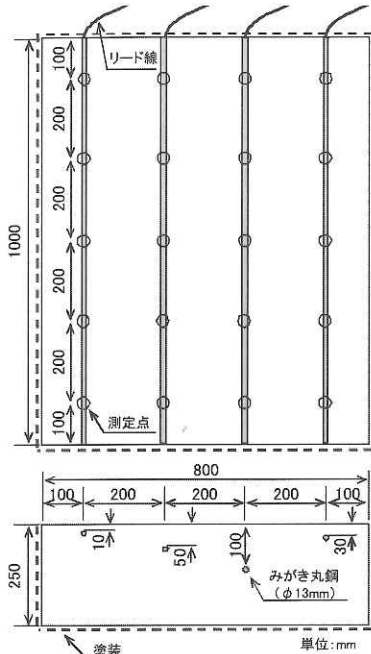


図-13 供試体の形状

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できると考えられる。

3. 供試体の測定事例

3.1 測定の概要

先に示した既設コンクリート橋の測定結果では、測定時の気温により測定値が変動するとの結果を得た。そこで、測定時の気象条件の変化によって生じる測定値の変動を明らかにするため、土木研究所内の屋外に暴露した供試体の自然電位を長期にわたり測定した。表-1にコンクリート配合、図-13に形状を示す。供試体名称はA-（水セメント比）-（塩化物イオン濃度）とし、鉄筋は4本のみがき丸鋼（φ13mm）をかぶり10、30、50、100mmで配置した。2002年7月に製作し、2006年5月に測定を始めたため、測定開始時の供試体材齢は約46ヶ月であった。

測定は、約9ヶ月間、同一技術者が計68回行った。測定頻度は週2回を基本とし、降雨時は供試

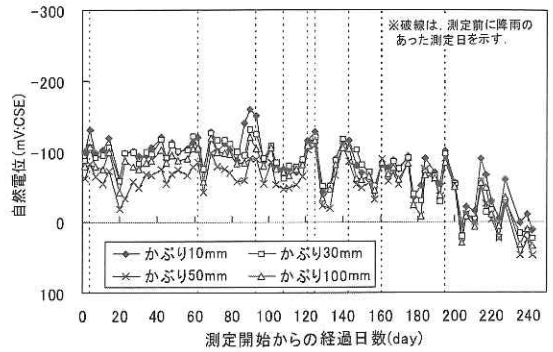


図-14 A-55-0 供試体の自然電位の測定結果

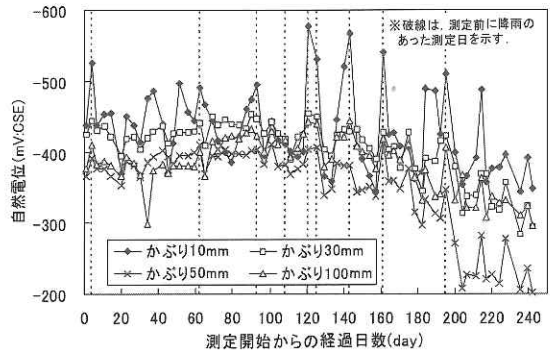


図-15 A-55-9 供試体の自然電位の測定結果

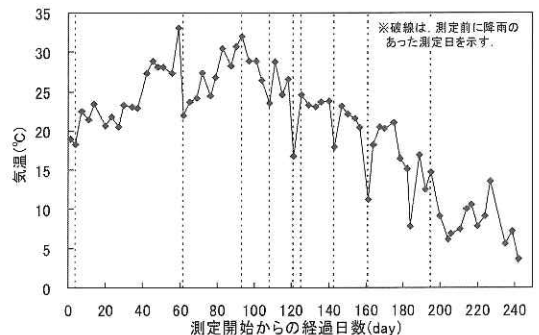


図-16 測定時の気温の推移

体表面が濡れた状態で測定を開始した。降雨時以外は、供試体表面を30分以上湿潤した後に測定を開始し、湿潤開始後60分以内に終えた。照合電極は、測定期間を通じて同一の飽和硫酸銅電極を使用し、測定値は、鉄筋直上の5点で得られた計測値を平均して示した。測定時の気温と降雨量は、土木研究所内に設置している気象観測装置から得た。

3.2 測定結果および考察

図-14、15に、各供試体の自然電位の測定結果を示す。ここでは測定値の温度補正は行わず、図中の破線は測定前4時間以内に10分間雨量で0.5mm以上の降雨があったことを示している。A-

55-0 供試体では、測定期間全体を通じて4本の鉄筋の自然電位がほぼ等しい傾向で推移したが、A-55-9 供試体では、かぶり 10mm の鉄筋の自然電位が他の鉄筋よりも大きく変動した。

図-16 に、自然電位測定時の気温を示す。測定日によって多少ばらつきはあるが、夏季から冬季にかけて測定を行ったため、気温は測定開始からの経過日数 90 日前後まで増加しその後低下した。各供試体の自然電位は、140 日を越えた付近で徐々に貴に変化し、200 日以降で測定初期と比較して平均で 100mV 程度貴になった。この間、気温は、200 日以降で概ね 10℃ 以下に低下しており、測定時の気温が高い夏季ほど卑な自然電位が得られる傾向にある。夏季で比較的卑な自然電位が多く得られた原因は、気温とともにコンクリート内部の温度も上昇して鉄筋近傍の環境が変化したためと考えられるが、鉄筋が腐食環境にあるかどうかに関わらず、全ての鉄筋で同様の傾向が窺える。

一方、降雨時は、多くの場合で自然電位が卑に変化し、特に A-50-9 供試体のかぶり 10mm の鉄筋の自然電位の変動は極めて大きい。かぶり 10mm の位置では降雨によるコンクリートの含水率の上昇に伴って鉄筋近傍の環境が急激に変化したため、卑な自然電位が測定されたと推察される。

4. まとめ

本報文で得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 自然電位は、気温や散水時間の違いにより変動したが、構造物全体における貴卑の傾向としては概ね等しい結果が得られた。また、測定点間隔を広くすると、局所的な鉄筋腐食を検出できなくなる可能性が高くなった。
- 2) ASTM C 876 の腐食判定基準は必ずしも実際の鉄筋腐食状況とは一致しないこともあるが、等電位線図などを参考に卑な自然電位が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。

- 3) 暴露供試体の測定結果では、自然電位は季節間の気温の変化に連動する形で変動し、かぶりが小さく腐食環境にある鉄筋では降雨の影響により短期的に変動した。このため、測定結果の解釈にあたっては注意を要する。

なお、本報文の内容は、(独) 土木研究所と日本構造物診断技術協会による「自然電位法を用いた鉄筋腐食診断技術に関する共同研究」の成果⁵⁾の一部をまとめたものである。

謝 辞

コンクリート橋の自然電位の測定を実施するにあたり、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) 渡辺博志：コンクリート用非破壊検査の原理と応用 (第3回)、鉄筋の錆の検査その1 自然電位法、土木技術資料, pp.17-18, Vol.46, No.11, 2005
- 2) 渡辺博志：コンクリート用非破壊検査の原理と応用 (第4回)、鉄筋の錆の検査その2 分極抵抗法、土木技術資料, pp.21-22, Vol.46, No.12, 2005
- 3) ASTM C 876-91: 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) 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)、コンクリート技術シリーズ 30, pp.248-256, 2000
- 5) (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、日本構造物診断技術協会：自然電位法による鉄筋腐食診断技術に関する共同研究報告書、共同研究報告書第357号, 2007

中村英佑*



独立行政法人土木研究所つくば
中央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
Eisuke NAKAMURA

渡辺博志**



独立行政法人土木研究所つくば
中央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、工博
Dr. Hiroshi WATANABE

古賀裕久***



独立行政法人土木研究所つくば
中央研究所技術推進本部構造物
マネジメント技術チーム主任研
究員
Hirohisa KOGA