共同研究報告書

整理番号第294号

コンクリート構造物の鉄筋腐食診断技術に関する共同研究報告書

― 自然電位法・分極抵抗法による鉄筋腐食診断 ―

平成15年11月

独立行政法人土木研究所
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

Copyright © (2003) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、独立行政法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、独立行政法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

コンクリート構造物の鉄筋腐食診断技術に関する共同研究報告書

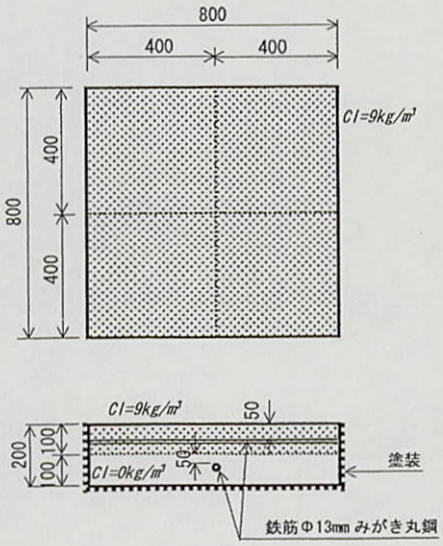
－自然電位法・分極抵抗法による鉄筋腐食診断－

正　誤　表

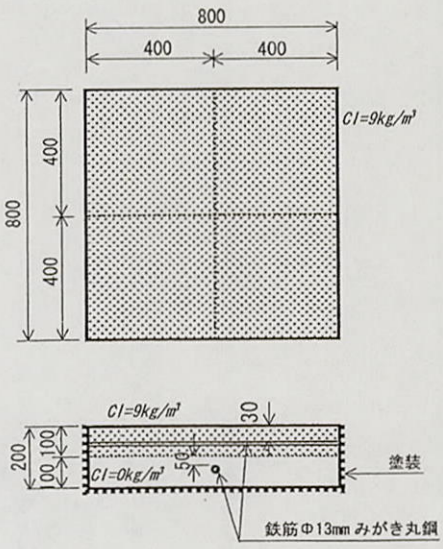
【訂正箇所】9ページ　：　「図－1.2(ｃ)　B-3供試体の寸法図」

上側鉄筋のかぶり寸法が誤り　→　誤：50，正：30

【誤】



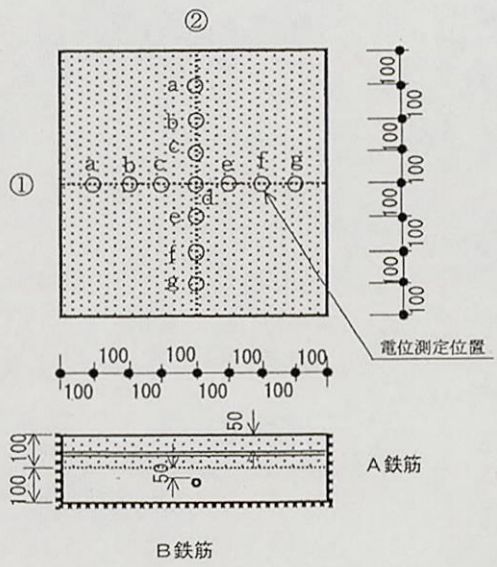
【正】



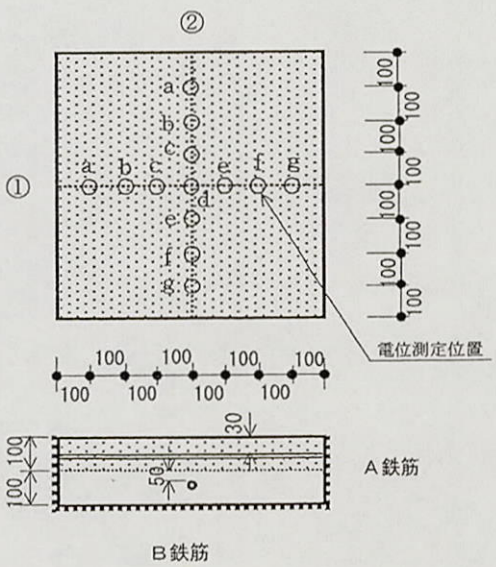
【訂正箇所】12ページ　：　「図－1.4(ｃ)　B-3供試体の測定位置」

上側Ａ鉄筋のかぶり寸法が誤り　→　誤：50，正：30

【誤】



【正】

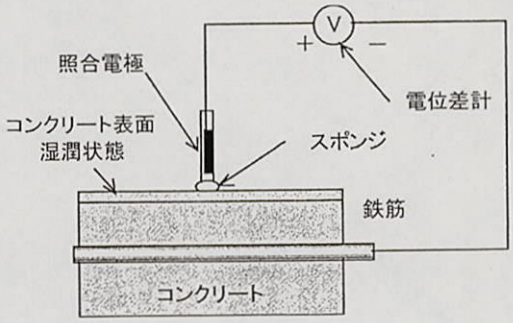


【訂正箇所】73 ページ　：　「図－1.3　自然電位の測定方法」

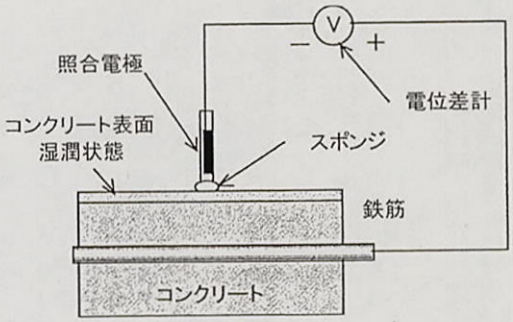
電位差計の端子の符号が逆になっている。

プラス端子を鉄筋、マイナス端子を照合電極に結線するのが正解である。

【誤】



【正】



共同研究報告書
第294号　2003年11月

コンクリート構造物の鉄筋腐食診断技術に関する共同研究報告書

－自然電位法・分極抵抗法による鉄筋腐食診断－

独立行政法人土木研究所
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　河野　広隆　　主任研究員　渡辺　博志

日本構造物診断技術協会

研究委員	渡辺　寛	研究委員	綿貫　輝彦
〃	井川　一弘	〃	柴田　浩司
〃	安田　敏夫	測定協力委員	田代　賢吉
〃	尾之内　和久	〃	根本　正幸
〃	秋山　暉	〃	石原　昌行
〃	上岡　誠一	〃	加納　伸人
〃	酒井　徳久	〃	藤本　賢一郎
〃	毎田　敏郎	〃	外岡　政則
〃	峰村　富夫	〃	青山　敏幸

要旨

構造物マネジメント技術チームと日本構造物診断技術協会は、電気化学的手法を活用したコンクリート構造物中の鉄筋の腐食診断技術における開発・改善を目的として共同研究を行った。

本報告書では、自然電位法と分極抵抗法による鉄筋の腐食度評価について、試験体による実験と実構造物での検査を行って検討した結果を報告する。特に、測定方法の実務への適用性と測定機器の違いによる測定結果への影響について検討した結果を報告する。

キーワード：コンクリート構造物，健全度診断，鉄筋腐食，自然電位法，分極抵抗法

コンクリート構造物の鉄筋腐食診断技術に関する共同研究

担当者名簿

全体とりまとめ

土木研究所構造物マネジメント技術チーム

主席研究員	河野　広隆
主任研究員	渡辺　博志
主任研究員	久田　　真
研究員	田中　良樹※1
研究員	古賀　裕久

日本構造物診断技術協会

理事・技術委員長	飯野　忠雄
技術委員	竹田　哲夫
技術委員	内田　　明
技術委員	松村　英樹

診断マニュアルWG（鉄筋コンクリート構造物の健全度診断マニュアル（案）の改訂を担当）

土木研究所構造物マネジメント技術チーム

主任研究員	渡辺　博志	研究員	古賀　裕久
主任研究員	久田　　真	交流研究員	野田　一弘
研究員	田中　良樹※1	交流研究員	田中　秀治

日本構造物診断技術協会

技術委員		松村　英樹	
研究委員	WGリーダー	野永　健二	
研究委員	WGサブリーダー	猪八重　由之	
研究委員			
	瀬野　康弘	笠井　和弘	込山　貴仁	谷岡　洋一
	森　二三人	吉田　光秀	坂井　　渉	石本　義將
	峰村　富夫	新谷　　毅	鈴木　宏信	遠藤友紀雄※2

鉄筋腐食WG（自然電位法，分極抵抗法による鋼材の腐食度評価についての検討を担当）

土木研究所構造物マネジメント技術チーム　　主任研究員　渡辺　博志

日本構造物診断技術協会

研究委員	WGリーダー	渡辺　　寛	
研究委員	WGサブリーダー	井川　一弘	
研究委員			
	安田　敏夫	尾之内　和久	秋山　　暉	上岡　誠一
	酒井　徳久	毎田　敏郎	峰村　富夫	綿貫　輝彦
	柴田　浩司	田代　賢吉	根本　正幸	

リバウンドハンマーWG（反発度法によるコンクリート品質評価についての検討を担当）

土木研究所構造物マネジメント技術チーム　　研究員　古賀　裕久

日本構造物診断技術協会

研究委員　WGリーダー　福田　暁

研究委員　WGサブリーダー　石井　和夫

研究委員

野永　健二　今尾　勝治　伊藤　祐二　高橋　功

川崎　克己　峰村　富夫　森　正嗣　北園　英明

かぶりWG（電磁誘導法・電磁波反射法による鉄筋位置およびかぶりの測定についての検討を担当）

土木研究所構造物マネジメント技術チーム

主任研究員　久田　真

研　究　員　田中　良樹※1

交流研究員　野田　一弘

日本構造物診断技術協会

研究委員　WGリーダー　毎田　敏郎

研究委員　WGサブリーダー　鈴木　透

研究委員

黒岩　和彦　瀬川　祐司　峰村　富夫　藤原　貴央

※1：2002年3月まで

※2：2002年9月まで

※　本共同研究報告書の内容は，鉄筋腐食WGが主に検討し，執筆した。

目　次

	頁
まえがき	1
第Ⅰ部　供試体に対する測定結果	3
1．測定概要	5
1.1　測定目的	5
1.2　測定時期と測定項目	5
1.3　測定する供試体の概要	6
1.3.1　Ａ供試体の概要	6
1.3.2　Ｂ供試体の概要	8
1.4　測定位置と事前処理	10
1.4.1　Ａ供試体の測定位置と事前処理	10
1.4.2　Ｂ供試体の測定位置と事前処理	11
1.5　測定機器と測定方法	13
1.5.1　自然電位の測定機器と測定方法	13
1.5.2　照合電極の違いによる測定値の換算方法	18
1.5.3　分極抵抗の測定機器と測定方法	19
1.5.4　含水率の測定機器	21
2．自然電位法による鉄筋腐食の推定	22
2.1　測定結果	22
2.1.1　塩分量の違いによる測定結果	22
2.1.2　湿潤時間の違いによる測定結果	24
2.1.3　複数の鉄筋が存在する場合の測定結果	27
2.1.4　測定時期の違いによる測定結果	29
2.2　測定方法に関して明らかになった点と今後の課題	30
3．分極抵抗法による鉄筋腐食の推定	31
3.1　測定結果	31
3.1.1　測定結果と鉄筋の腐食状況との関係	31
3.1.2　交流インピーダンス法でのインピーダンス特性	33
3.1.3　複数の鉄筋が存在する場合の測定結果	34
3.1.4　１本の鉄筋が異なる腐食環境に存在する場合の測定結果	35
3.1.5　２本の鉄筋が交差している場合の測定結果	36
3.1.6　測定時期の違いによる測定結果	36
3.2　今後の課題	37

頁

第Ⅱ部　実構造物に対する測定結果　39

1．地下室側壁の測定結果　41

1.1　測定概要　41

1.2　測定時期と測定項目　42

1.3　測定位置　42

1.4　測定機器　43

1.5　自然電位法による鉄筋腐食の推定　46

1.5.1　測定方法　46

1.5.2　測定結果　46

1.5.3　鉄筋の腐食状況の推定　48

1.6　分極抵抗法による鉄筋腐食の推定　49

1.6.1　測定方法　49

1.6.2　測定結果　49

1.6.3　鉄筋の腐食状況の推定　50

1.6.4　考察　51

2．旧芦川橋Ｇ１桁における測定結果の比較検討　52

2.1　検討概要　52

2.2　測定結果の比較検討　52

3．旧暮坪橋Ｐ３橋脚における測定結果の比較検討　58

3.1　検討概要　58

3.2　測定結果の比較検討　58

第Ⅲ部　測定方法に関する提案　65

1．自然電位法　67

1.1　原理　67

1.2　自然電位法を適用する上での基本的な注意事項　70

1.3　測定方法　71

1.4　測定記録　75

2．分極抵抗法　76

2.1　原理　76

2.2　分極抵抗法を適用する上での基本的な注意事項　79

2.3　測定方法　80

2.4　測定記録　84

まえがき

コンクリート構造物の劣化状況を的確に把握することは、適切な維持管理計画の立案および実施に際して、非常に重要なことである。現状、コンクリート構造物の健全度は、構造物の外観調査、設計・施工・使用材料に関する記録、構造物の置かれる環境条件に関する調査等により、おおよそ把握することが可能である。しかし、維持管理計画を立案するには、これらの調査結果のみでは不十分な場合もあり、より正確な判断を行うためには、何らかの非破壊試験を行う必要もある。

コンクリート中の鋼材の腐食は、構造物の耐荷性能に及ぼす影響が甚大であり、特に塩害による鋼材腐食が生じると、場合によっては急速に腐食が進行するため、鋼材腐食に関しては、可能な限り早期に正確な判断を行うことが望ましい。

コンクリート中の鋼材の腐食を推定するための非破壊検査方法としては、これまでにも自然電位法、分極抵抗法、コンクリートの比抵抗などの、電気化学的な測定方法が用いられてきた。

このうち、自然電位法に関してはASTMやBS等の規格のほか、土木学会試験規準としても取り上げられており、試験方法として確立されたものと考えられ、実構造物への適用実績も増えてきた。測定の簡易さなどからすれば、今後ますます重要度を増す試験法であると思われる。

しかし、一方では、自然電位の測定値についての解釈、鉄筋腐食の判断などに関しては、まだ不明な点が残されている状況である。例えば腐食判定に関して言えば、ASTMやBSの規格に判定手法が提案されているものの、これらの基準をそのまま適用することが必ずしも妥当ではなく、実際には経験を有する専門技術者の解釈が必要となる場合も少なくない。このように、自然電位法による鉄筋腐食の推定結果はまだ信頼を得るまでに至っていないと考えられる。

分極抵抗法は、自然電位法とくらべて、コンクリート構造物の鉄筋腐食診断のための検査手法としての歴史は浅く、規準等で試験方法が定められていない状況にある。このため、分極抵抗法は鉄筋の腐食速度という重要な指標が得られる可能性を有しているにもかかわらず、自然電位法に比べると実績はわずかにとどまっている状況にある。分極抵抗法に関しては、測定方法の違いによって得られる結果にどの程度の影響があるかを明らかにしていくことが、試験方法の普及・定着のために必要であると考えられる。

本報告書は、「コンクリート構造物の鉄筋腐食診断技術に関する共同研究」の一環として、既設コンクリート構造物の鉄筋腐食推定の高度化を目指し、コンクリート構造物の健全度診断マニュアル中に記述されている、鉄筋腐食に関わる検査手法の根拠資料を得ることを目的とした調査の結果を取りまとめたものである。具体的な検討内容としては、電気化学的検査手法として、自然電位法および分極抵抗法を取り上げ、

1）あらかじめ計画的に塩分を混入して製作した供試体への適用結果

2）比較的穏やかな環境におかれた地下構造物内壁への適用結果

3）実際の塩害環境に曝されたコンクリート構造物（道路橋）への適用結果

について、試験結果を示すとともに、試験によって得られた結果に基づき、測定上の留意事項、測定装置の違い、鉄筋腐食の判断に当たっての測定結果の解釈上の注意事項について考察し、測定方法について提案したものである。

なお、本試験で使用した塩分混入供試体の解体調査（供試体中の鉄筋の腐食状況の検証結果）は、供試体製作後の材齢が十分経過していないため見送ることとし、本報告書には収録していない。長期材齢における検証結果については、今後、定期的に実施することとしている自然電位・分極抵抗の測定結果と併せて、報告する予定である。

第Ⅰ部　供試体に対する測定結果

1．測定概要

1.1　測定目的

コンクリート構造物の鉄筋腐食診断技術のうち、非破壊で鉄筋の腐食が診断できる電気化学的方法が、はつり方法により鉄筋の腐食状況を確認する方法よりも合理的であると言われている。

電気化学的方法のうち、自然電位法は鉄筋の腐食確率を推定する方法であり、現在、電気化学的方法の中ではもっとも一般的に使用されている。また、分極抵抗法は鉄筋の腐食速度が評価できる方法である。

しかし、これらの方法は、以下に示すような課題があるため、その測定結果からの鉄筋の腐食診断は、はつり方法による調査ほど正確に鉄筋腐食状況を把握できないのが現状である。

① 自然電位法と分極抵抗法の測定値は、コンクリート中の含有塩分量の違いとどのような関係にあるか。
② 自然電位法と分極抵抗法の測定値は、コンクリート表面の含水率や湿潤時間とどのような関係にあるか。
③ 自然電位法と分極抵抗法の測定値は、測定機器（照合電極の種類）の違いとどのような関係にあるか。
④ 自然電位法と分極抵抗法の測定値は、鉄筋位置に対する測定位置の違いとどのような関係にあるか。

そこで、本書「第Ⅰ部 供試体に対する測定結果」では、上記の課題を明確化して、自然電位法および分極抵抗法による測定値からより正確な鉄筋腐食状況を把握できるようにすることを目的として、それらの測定結果に基づく腐食判定の妥当性を検証した。

具体的には、鉄筋の位置とかぶり深さが明確であり、含有塩分濃度を意図的に変えたコンクリート供試体を作製し、各種測定を行い、測定値を比較評価することにより、自然電位法による測定値が腐食傾向に即した分布を示しているか、また、分極抵抗法による測定値が腐食速度に即した分布を示しているかを検討した。

1.2　測定時期と測定項目

作製したコンクリート供試体の測定時期については、鉄筋腐食の進行状況を経時的に調査することと、測定時の周辺環境（特に湿度）がコンクリート表面の含水率に影響することを考慮し、夏季に第１回測定（平成14年８月）、冬季に第２回測定（同年11月）の合計２回の測定を行った。

また、この２回の測定で実施した主な測定項目は、自然電位測定、分極抵抗測定、コンクリート表面の含水率測定の３項目とし、自然電位測定と分極抵抗測定については、それぞれ照合電極やセンサーの異なる複数の機器で同時に測定を行った（表－1.1）。なお、使用した機器については、1.5.1～1.5.4で詳述する。

表－1.1　測定項目と使用機器数一覧

測 定 項 目	第１回測定 〔測定日 H14.8.8～9〕	第２回測定 〔測定日 H14.11.25～26〕
自然電位測定	5機種（4種類の照合電極）	3機種（3種類の照合電極）
分極抵抗測定	3機種（3種類のセンサー）	3機種（3種類のセンサー）

1.3　測定する供試体の概要

測定に使用したコンクリート供試体は、測定の目的別に、鉄筋の位置とかぶり深さを明確にして含有塩分濃度を変えた２タイプの供試体（Ａ・Ｂ供試体）で、合計７体を作製した。

このうち、Ａ供試体はコンクリートの水セメント比と含有塩分量を変えた４体とし、Ｂ供試体は含有塩分量が異なる２種類のコンクリートから構成される３体とした。使用したコンクリートの種類と配合を表－1.2～1.3に示す。また、以下にＡ・Ｂ供試体のそれぞれの概要を1.3.1～1.3.2に述べる。

表－1.2　コンクリートの種類

水ｾﾒﾝﾄ比 (%)	ｺﾝｸﾘｰﾄの種類による記号	設計基準強度 (N/mm^2)	ｽﾗﾝﾌﾟ (cm)	空気量 (%)	粗骨材の最大寸法による記号	ｾﾒﾝﾄの種類による記号
55	普通	21	8	4.5	25	N
70	普通	13.5	8	4.5	25	N

表－1.3　コンクリートの配合

水ｾﾒﾝﾄ比 W/C(%)	細骨材率 s/a(%)	単位水量 W(kg/m^3)	単位ｾﾒﾝﾄ量 C(kg/m^3)	細骨材量 S(kg/m^3)	粗骨材量 G(kg/m^3)	単位混和剤量 AE(kg/m^3)
55	44.3	158	288	801	1018	3.08
70	45.3	159	228	840	1026	2.44

1.3.1　Ａ供試体の概要

Ａ供試体は、以下の３項目を検討することを目的として作製した。

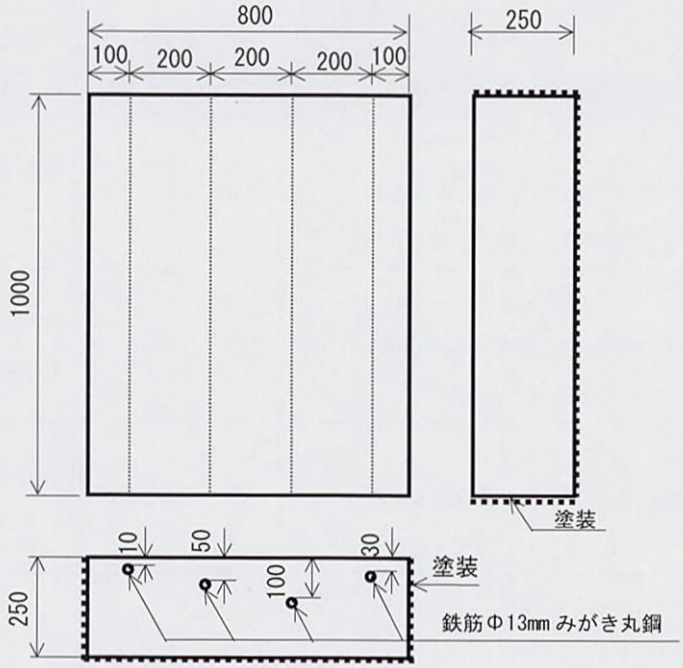
① コンクリート中の含有塩分量と自然電位の測定値が腐食傾向とどのような関係にあるか
② 測定機器（主に照合電極）によって測定値がどのように異なるか
③ 含水率（測定前の湿潤状態）によって測定値がどのように異なるか

Ａ供試体の作製に用いたコンクリートの水セメント比は、55%および70%とした。また、コンクリートに含有する塩分量は０kg/m^3および９kg/m^3とし、この２種類の水セメント比と２種類の塩分量の組み合わせにより、寸法が同規格の４体を作製した。なお、各供試体とも、測定面以外の５面（４側面と底面）については防水材を塗布した。

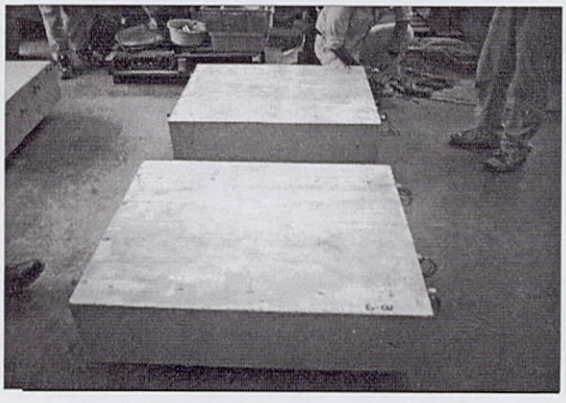
表－1.4と図－1.1に作製したＡ供試体の仕様を、写真－1.1～1.2にＡ供試体の写真を示す。また、表－1.4 中の供試体番号は、供試体の種類－水セメント比－塩分量（例：A-55-0）を示しており、以下同様に記述する。

表－1.4　A供試体の仕様

供試体番号	水ｾﾒﾝﾄ比 W/C (%)	ｺﾝｸﾘｰﾄ中の含有塩分量 (kg/m³)	寸法(mm) 〔幅×長×厚〕	埋込鉄筋	防水材塗布
A-55-0	55	0	800×1000×250	みがき丸鋼 φ13 mm× 4 本/体	4 側面 底 面
A-55-9	55	9			
A-70-0	70	0			
A-70-9	70	9			



図－1.1　A供試体の寸法図



写真－1.1　A供試体　全景



写真－1.2　A供試体　(写真は A-70-0)

1.3.2　B供試体の概要

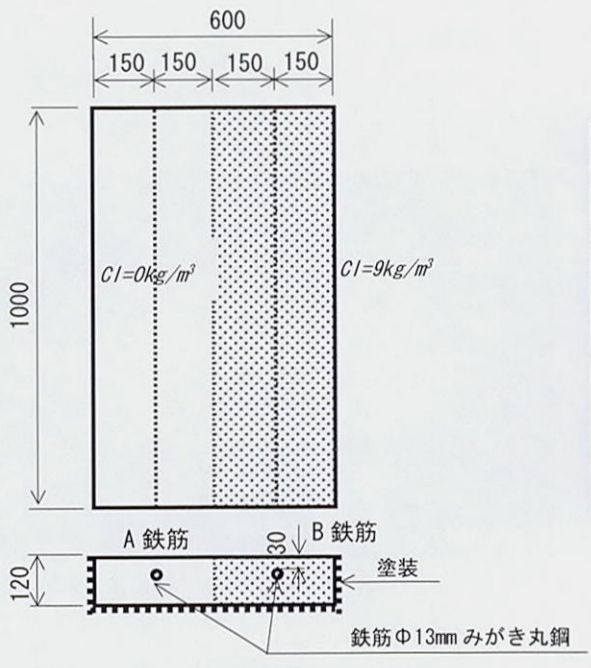
B供試体は、照合電極の設置位置と鉄筋位置との関係で測定値が異なるかどうかを検討することを目的として作製した。

B供試体の作製に用いたコンクリートの水セメント比は55%とした。また、コンクリートに含有する塩分量は、A供試体と同様に0kg/m^{3}および9kg/m^{3}の２種類とした。

B供試体は、形状や構造が異なる３体（B-1、B-2、B-3）を作製・使用した。表－1.5 と図－1.2(a)～(c)に作製したB供試体のそれぞれ仕様を、写真－1.3～1.5にB供試体の写真を示す。なお、各供試体とも、測定面以外の５面（４側面と底面）についてはA供試体と同様に防水材を塗布した。

表－1.5　B供試体の仕様

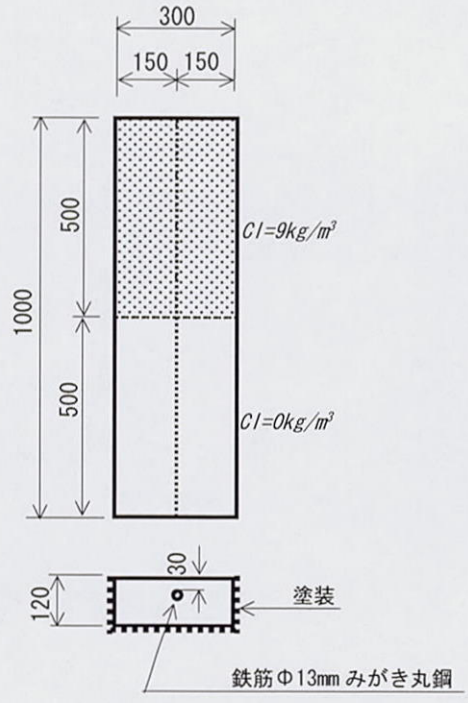
供試体番号	水ｾﾒﾝﾄ比 W/C (%)	ｺﾝｸﾘｰﾄ中の含有塩分量(kg/m^3)と構造	寸法(mm)〔幅×長×厚〕	埋込鉄筋と埋込状況	防水材塗布
B-1	55	0kg/m^3、9 kg/m^3 水平方向に塩分量が異なる環境中に鉄筋がある場合を想定	600×1000×120	みがき丸鋼φ13 mm 2本/体(同深並行)	4側面 底 面
B-2	55	0kg/m^3、9 kg/m^3 1本の鉄筋が塩分量の異なる環境中にある場合を想定	300×1000×120	みがき丸鋼φ13 mm 1本/体	
B-3	55	0kg/m^3、9 kg/m^3 深さ方向に塩分量が異なる環境中にそれぞれ鉄筋がある場会を想定	800×800×200	みがき丸鋼φ13 mm 2本/体(異深直交)	



図－1.2(a)　B-1 供試体の寸法図



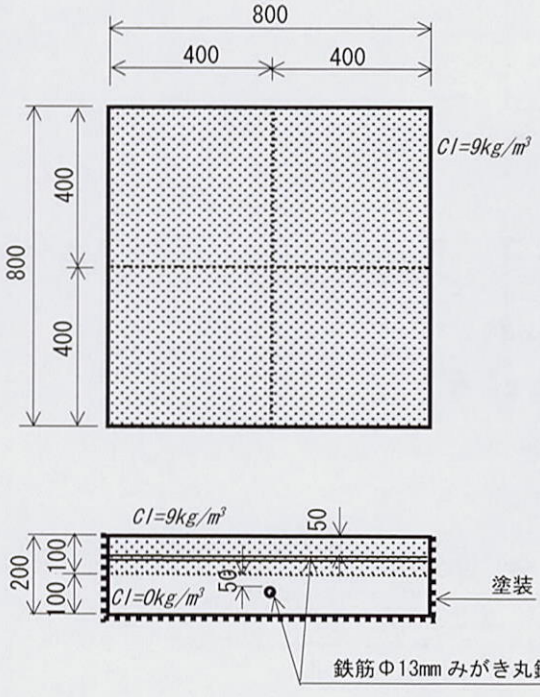
写真－1.3　B-1 供試体



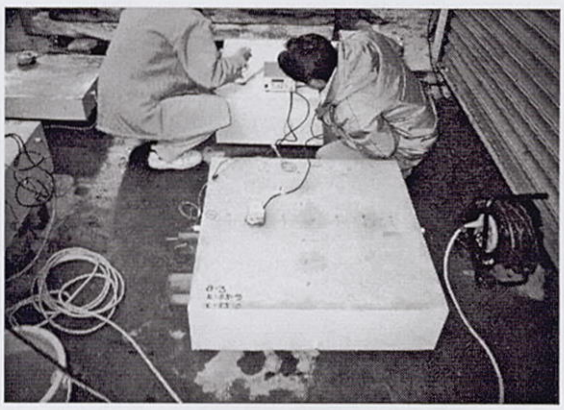
図－1.2（b） B-2供試体の寸法図



写真－1.4 B-2 供試体



図－1.2（c） B-3供試体の寸法図



写真－1.5 B-3 供試体

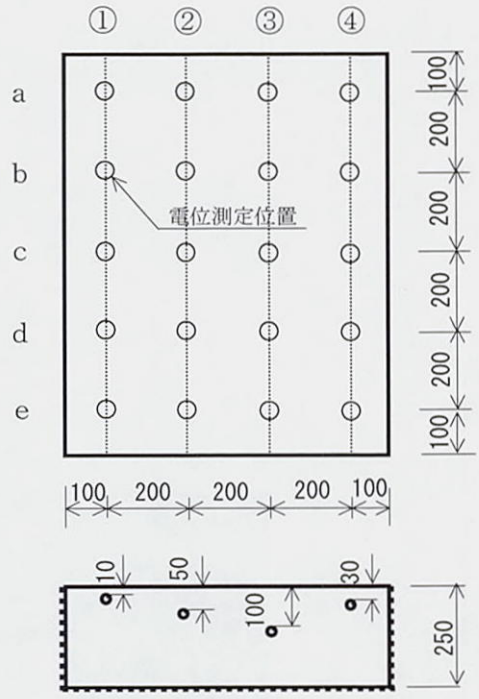
1.4　測定位置と事前処理

前項で述べたＡ供試体４体とＢ供試体３体の合計７供試体のそれぞれについて、自然電位測定と分極抵抗測定を行うにあたり、測定位置を統一した。また、測定するコンクリート表面の湿潤時間およびその後の経過時間による測定電位の変動を調べるために、測定前に、あらかじめ測定面に水道水による散水湿布を施し、測定まで一定時間測定面を湿潤状態に保った後に、水分計により測定面の含水率を測定し、自然電位と分極抵抗のそれぞれの測定を行った。

1.4.1　Ａ供試体の測定位置と事前処理

Ａ供試体での自然電位と分極抵抗の測定位置は、各鉄筋の直上とし、各鉄筋あたり５ヵ所、１供試体（鉄筋４本）あたり合計 20 ヶ所とした。Ａ供試体の測定位置を図－1.3 に示す。

また、事前処理の条件を表－1.6 に示す。



図－1.3　Ａ供試体の測定位置

表－1.6　Ａ供試体測定時の事前処理条件

測定項目	第１回測定〔夏季〕	第２回測定〔冬季〕
自然電位	〔3 ｹｰｽ〕　湿布 10 分後、30 分後、60 分後	
分極抵抗	〔1 ｹｰｽ〕　湿布 30 分後	

1.4.2　B供試体の測定位置と事前処理

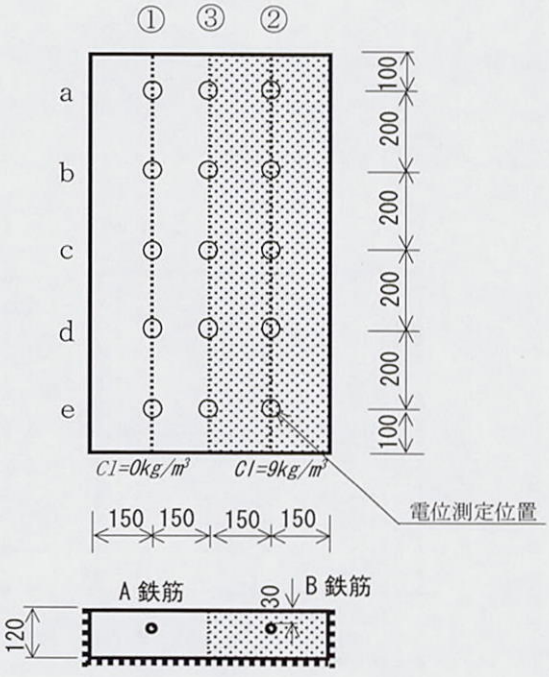
B供試体での自然電位と分極抵抗の測定位置は、以下のとおりとした。また、測定前の事前処理はA供試体と同様とした（表－1.7）。

表－1.7　B供試体測定時の事前処理条件

測定項目	第１回測定〔夏季〕	第２回測定〔冬季〕
自然電位	〔3ケース〕　湿布10分後、30分後、60分後	
分極抵抗	〔1ケース〕　湿布30分後	

(1)　B－１供試体の測定位置

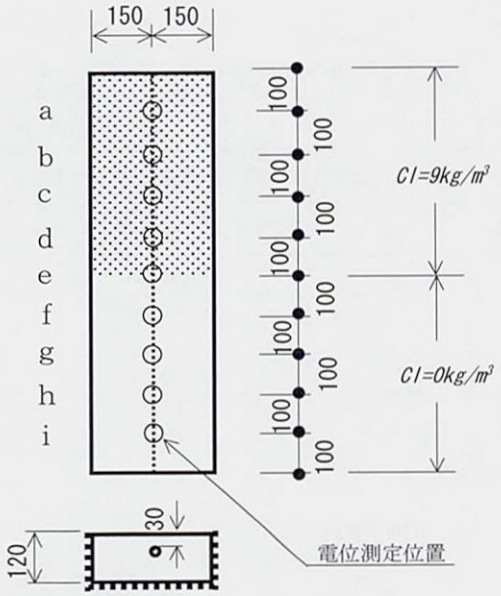
２本の鉄筋（鉄筋A、および鉄筋B）の直上（①ライン、②ライン）の各５ヶ所と、鉄筋の中間線上（③ライン）５ヶ所の合計15ヶ所。B－１供試体の測定位置を図－1.4(a)に示す。



図－1.4(a)　B－１供試体の測定位置

(2)　Ｂ－２供試体の測定位置

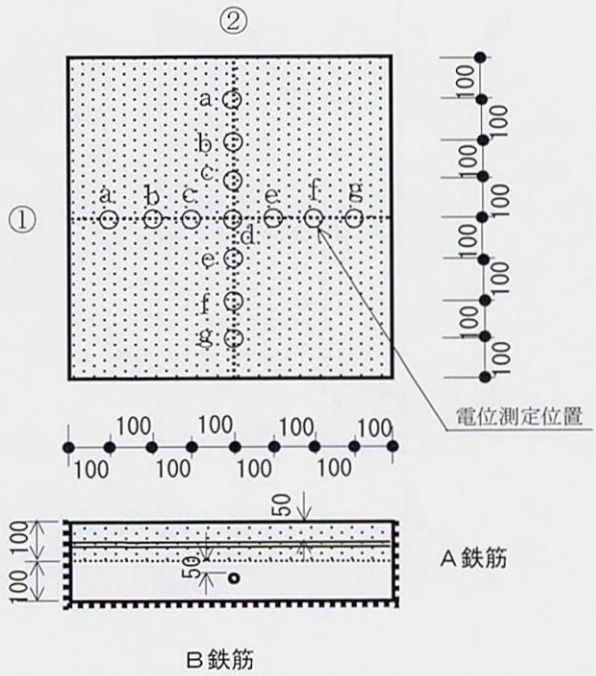
鉄筋の直上の９ヵ所。Ｂ－２供試体の測定位置を図－1.4(ｂ)に示す。



図－1.4(ｂ)　Ｂ－２供試体の測定位置

(3)　Ｂ－３供試体の測定位置

鉄筋（Ａ鉄筋、およびＢ鉄筋）の直上の各７ヶ所で、鉄筋交差部の重複ヵ所を含む 13 ヶ所。Ｂ－２供試体の測定位置を図－1.4(ｃ)に示す。



図－1.4(ｃ)　Ｂ－３供試体の測定位置

1.5　測定機器と測定方法

1.5.1　自然電位の測定機器と測定方法

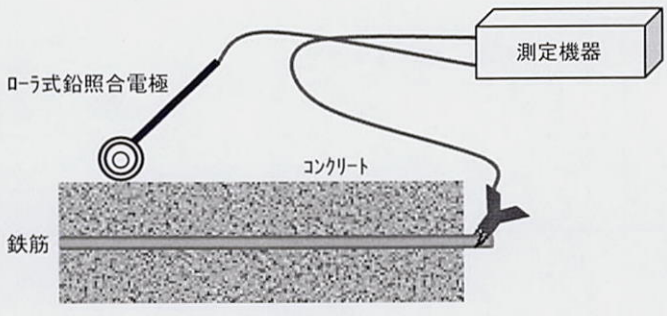
自然電位の測定に使用した測定機器は、表－1.1 に示したように、第１回測定（夏季）では５機種（４種類の照合電極）、第２回測定（冬季）では３機種（３種類の照合電極）とした。各使用機器および照合電極を表－1.8 に示す。また、各機器の測定方法と仕様については、略称を用いて以下の(1)～(3)に示す。

表－1.8　〔自然電位測定〕　使用した機器の一覧

名称（略称）	①	②	③	④	⑤
	Ｎｃ法	Ｆｂ法	Ｎｂ法		
機器名称	ｺﾛｰｼﾞｮﾝﾊﾝﾀｰ TR-01	CANIN	ﾏﾙﾁﾒｰﾀｰ 8060A 型		
照合電極〔記　号〕	鉛電極〔Pb/PbO〕	飽和硫酸銅電極〔$Cu/CuSO_4$〕		飽和塩化銀電極〔Ag/AgCl〕	酸化水銀電極〔Hg/HgO〕
溶　　液〔記　号〕	飽和水酸化カルシウム〔飽和 $Ca(OH)_2$〕	飽和硫酸銅〔飽和 $Cu/CuSO_4$〕		飽和塩化カリウム〔飽和 KCl〕	飽和水酸化カルシウム〔飽和 $Ca(OH)_2$〕
第１回測定（夏季）〔測定 H14.8.8～9〕	○	○	○	○	○
第２回測定（冬季）〔測定 H14.11.25～26〕	○	――	――	○	○
詳細説明参照	1.5.1 (1)	1.5.1 (2)	1.5.1 (3)		

(1)　Ｎｃ法

Ｎｃ法は、Ｎ社製測定機器（コロージョンハンターTR-01）を用いて、図－1.5に示すように、鉄筋からのリード線と機器の端子を接続し、コンクリート表面にローラー式の鉛照合電極〔Pb/PbO〕を当て、高入力抵抗電圧計により測定した。使用した測定機器の仕様を表－1.9に、測定状況を写真－1.6に示す。なお、測定値は表－1.12に示す電位換算方法により飽和硫酸銅電極基準に換算した。



図－1.5　Nb法 自然電位測定イメージ図



写真－1.6　Nc法 測定状況

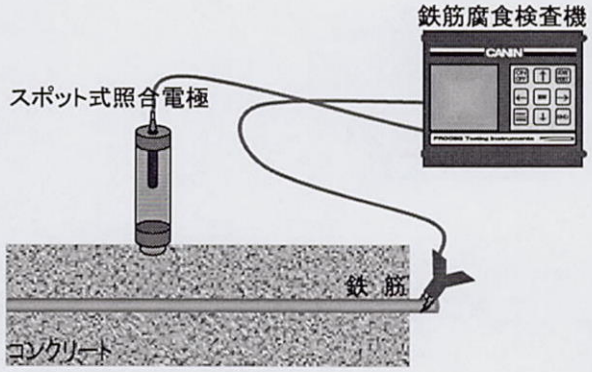
表－1.9　〔Nc法〕　測定機器の仕様

本　体	型　名		TR-01型（LCDｸﾞﾗﾌｨｯｸ表示/内部時計付）
	メモリ	電位測定	最大記憶容量　12,000点　（1ﾌｧｲﾙ400点,30ﾌｧｲﾙ）
		低効率測定	最大記憶容量　600点　（1ﾌｧｲﾙ20点，30ﾌｧｲﾙ）
	測定範囲	電　位	-2000mV ～ ＋2000mV
		測定間隔	１～99cm　任意設定
	ＬＣＤ電位表示		５段階ｸﾞﾗﾌｨｯｸによる濃淡表示
	電　源		単二型ｱﾙｶﾘ電池４本
	寸法／質量		(H×W×D)　188×300×110mm　／　3.2kg
センサ	電位センサ		PE-01型回転式鉛照合電極
	抵抗率センサ		RD-01型交流四電極方式

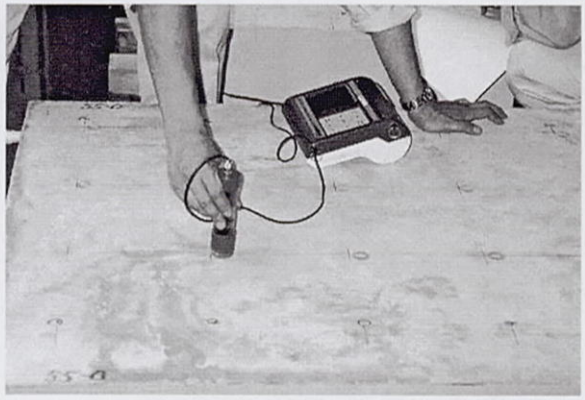
(2)　Ｆｂ法

Ｆｂ法は、Ｐ社製測定機器（キャニン）を用いて、図－1.6 に示すように、鉄筋からのリード線と機器の端子を接続し、コンクリート表面にスポット式の飽和硫酸銅電極〔$Cu/CuSO_4$〕を当て測定した。

使用した測定機器の仕様を表－1.10 に、測定状況を写真－1.7 に示す。



図－1.6　Fb 法 自然電位測定イメージ図



写真－1.7　Fb 法 測定状況

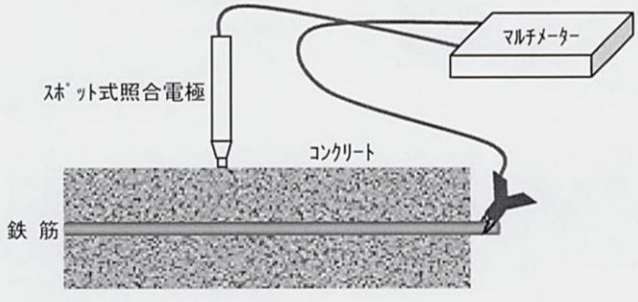
表－1.10　〔Fb 法〕　測定機器の仕様

本　体	型　名		CANIN（LCD ｸﾞﾗﾌｨｯｸ表示）
	メモリ	電位測定	最大記憶容量　120,000 点
	測定範囲	電　位	＋200mV～－950 mV
		測定間隔	1～990mm　任意設定
	LCD 電位表示		9 種類のﾚﾍﾞﾙ表示
	電　源		単三乾電池 6 本
	寸法／質量		（H×W×D）　195×175×80mm　／　0.85kg
センサ	電位センサ		スポット式飽和硫酸銅電極

(3)　Ｎｂ法

Ｎｂ法は、Ｆ社製測定機器（デジタル式電圧測定機／マルチメーター8060A 型）を用いて、図－1.7 に示すように、鉄筋からのリード線と機器の端子を接続し、スポット式の飽和硫酸銅電極〔$Cu/CuSO_4$〕、飽和塩化銀電極〔Ag/AgCl〕、酸化水銀電極〔Hg/HgO〕のそれぞれの照合電極を付け替え、コンクリート表面に当て測定した。

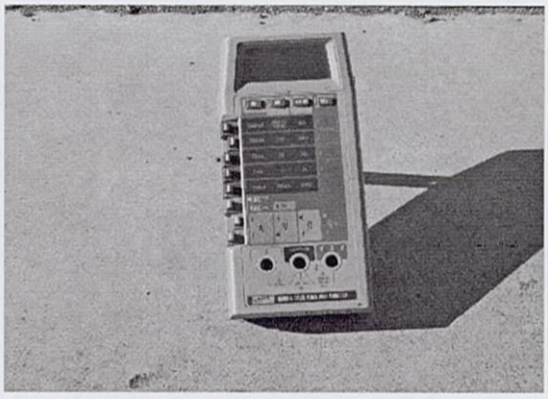
使用した測定機器の仕様を表－1.11 に、機器本体と３種類の照合電極を写真－1.8～1.11 に、測定状況を写真－1.12 に示す。



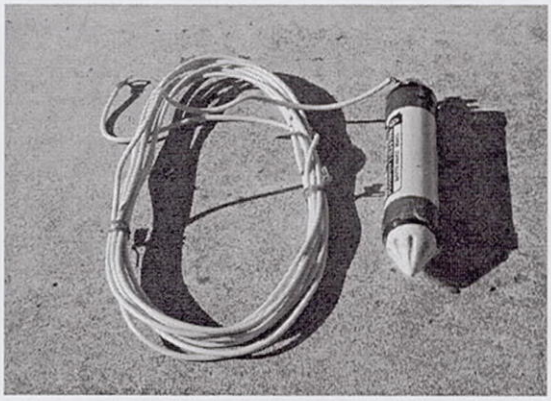
図－1.7　Nb 法 自然電位測定イメージ図

表－1.11　〔Nb 法〕　測定機器の仕様

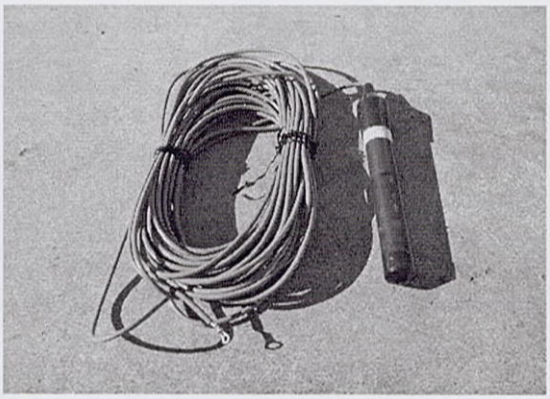
本　体	型　名		ﾏﾙﾁﾒｰﾀｰ 8060Ａ型
	メモリ		――――――
	測定範囲	電　位	0.01～1000V（DC 電圧） （但し、0.01～2.0V では入力ｲﾝﾋﾟｰﾀﾞﾝｽ 100MΩ以上を満足すること）
		測定間隔	任 意
	LCD 電位表示		$4\frac{1}{2}$桁
	電　源		006P 乾電池　１本
	寸法／質量		(H×W×D)　180×86×45mm　／　0.41kg
センサ	電位センサ		飽和硫酸銅電極、飽和塩化銀電極、酸化水銀電極のそれぞれの照合電極の付替えが可能



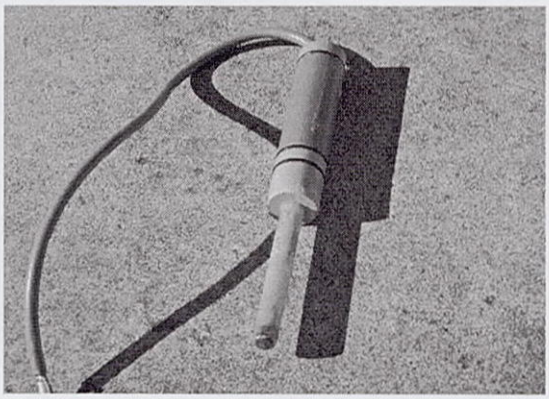
写真－1.8　Nb 法 マルチメーター



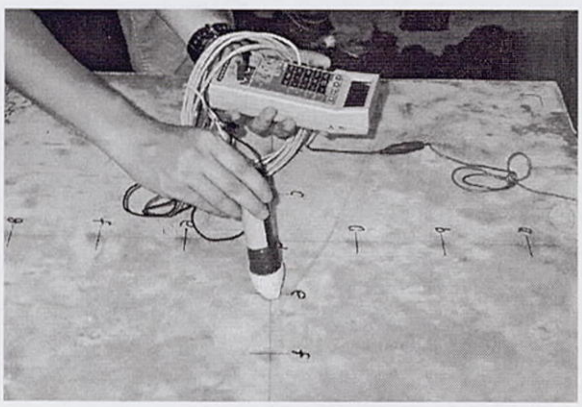
写真－1.9　Nb 法 照合電極〔飽和硫酸銅電極〕



写真－1.10　Nb 法 照合電極〔飽和塩化銀電極〕



写真－1.11　Nb 法 照合電極〔水銀酸化水銀電極〕



写真－1.12　Nb 法 測定状況 例

（照合電極：飽和硫酸銅電極 使用時）

1.5.2　照合電極の違いによる測定値の換算方法

表－1.8 に示したように、本測定では４種類の照合電極により供試体の自然電位を測定した。しかし、これらの各測定値は、照合電極の種類によって測定値が異なる。そこで、種類の異なった照合電極による測定値を相互比較するために、飽和硫酸銅電極で測定した値を標準とした（飽和硫酸銅を照合電極とした場合に変換した）換算方法で補正する必要がある。

照合電極の違いによる電位換算式を表－1.12 に示す。

換算にあたっては、基準温度を 25℃として測定時の気温（t）も考慮した。

表－1.12　照合電極の種類と電位換算式

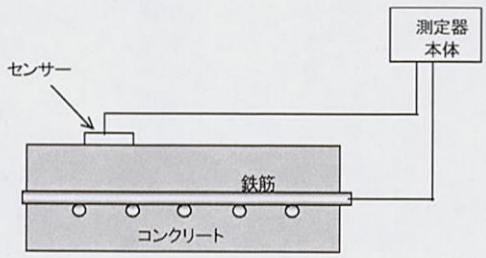
照合電極の種類	換 算 電 位 （飽和硫酸銅電極換算：25℃）
鉛　電　極 〔Pb/PbO〕	−799＋0.24×(t－25)
飽和硫酸銅電極 〔Cu/$CuSO_4$〕	0＋0.9×(t－25)
飽和塩化銀電極 〔Ag/AgCl〕	−120－1.1×(t－25)
酸化水銀電極 〔Hg/HgO〕	−124－1.0×(t－25)

1.5.3　分極抵抗の測定機器と測定方法

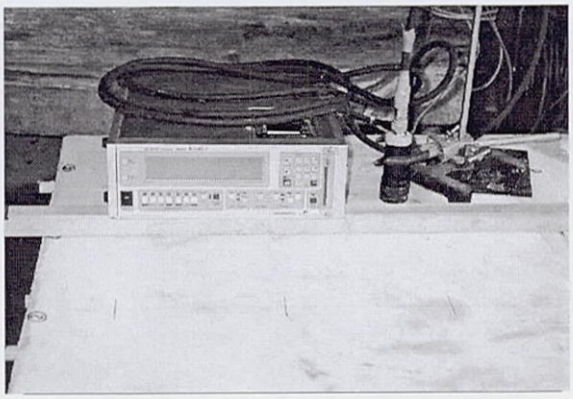
分極抵抗の測定に使用した機器は、表－1.1 に示したように、第１回測定（夏季）、第２回測定（冬季）ともに３機種（３種類のセンサー）とした。各使用機器を表－1.13 に示す。また、各機器の測定方法については、図－1.8 に示すように、鉄筋からのリード線と機器の端子を接続し、それぞれのセンサーをコンクリート表面の測定点に当てて測定した。使用した測定機器と測定状況を写真－1.13～1.15 に示す。

表－1.13　〔分極抵抗測定〕　使用した機器の一覧

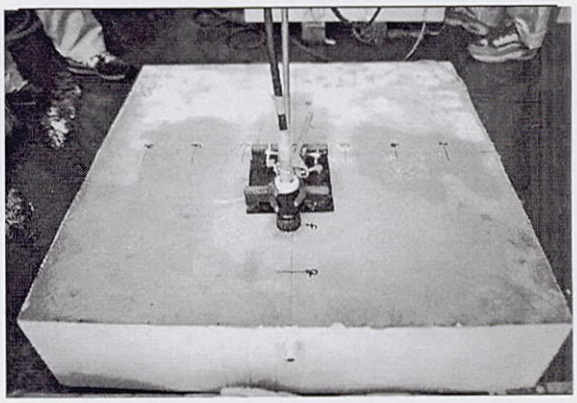
名　称		Ｎｂ法	Ｓｓ法	Ｎｓ法
測定器名称		Ｎ社 鉄筋腐食診断機 RC-M3.1	Ｓ社 携帯型鉄筋腐食診断機 SRI-CM-Ⅲ	ＮＳ社 ｺﾛｷｬｯﾁ 鉄筋腐食診断ｾﾝｻｰ Model3
センサー方式		腐食センサー	２重対極センサー	２重対極センサー
		３電極式	３電極式	３電極式 （１対電極方式と２重対極方式の２方式の測定が可能）
周 波 数	高	10 KHz	10（～1）Hz	可変
	低	0.1 Hz or 0.01 Hz	0.020 Hz	0.25 Hz
第１回測定（夏季） 〔測定 H14.8.8～9〕		○	○	○
第２回測定（冬季） 〔測定 H14.11.25～26〕		○	○	○
写真参照		写真－1.13 (a) (b)	写真－1.14 (a) (b)	写真－1.15 (a) (b)



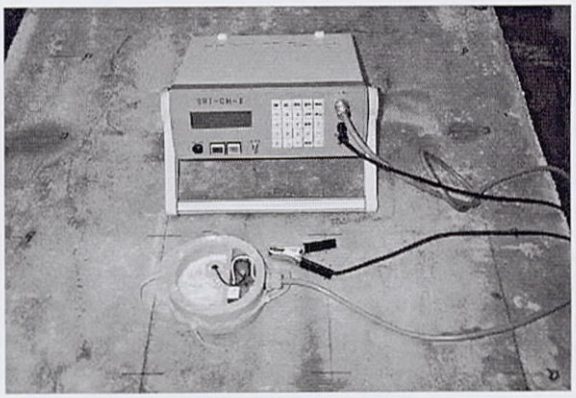
図－1.8　分極抵抗の測定イメージ図



写真－1.13(a)　Nb 法 測定機器



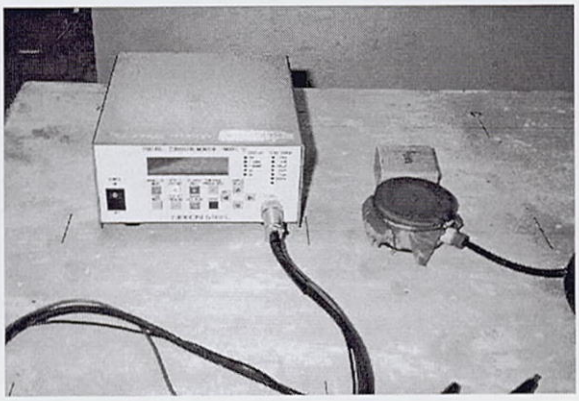
写真－1.13(b)　Nb 法 測定状況



写真－1.14(a)　Ss 法 測定機器



写真－1.14(b)　Ss 法 測定状況



写真－1.15(a)　Ns 法 測定機器



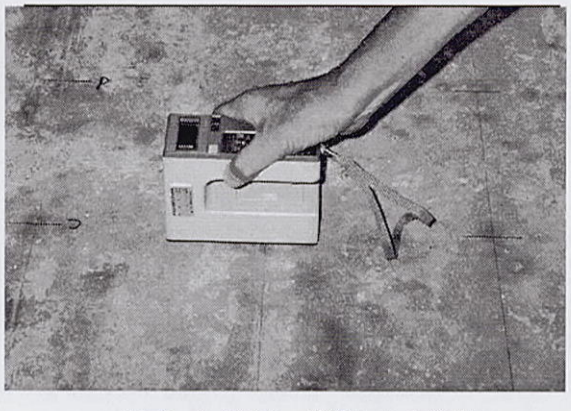
写真－1.15(b)　Ns 法 測定状況

1.5.4　含水率の測定機器

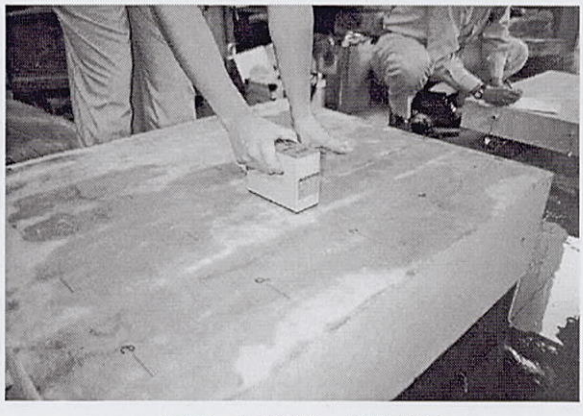
自然電位測定と分極抵抗測定の事前に行った、コンクリート表面の含水率の測定ではコンクリート・モルタル水分計（K社HI-500）を使用した。この測定器は、測定対象のモルタル・コンクリートの表面水分による誘電率（高周波容量）の変化を測定し、あらかじめ定められた含水率と誘電率の関係から、モルタルまたはコンクリートの含水率に換算するものである。また、この測定器は測定時の温度を用いて測定値を補正する機能を内蔵している。測定は機器の平行な２つの電極をコンクリート表面に押し当てて行う。使用した測定器の仕様を表－1.14 に、写真－1.16(a)(b)に測定状況を示す。

表－1.14　水分計の仕様

測定原理	高周波容量式（20MHz）
測定対象	コンクリート・モルタル・ＡＬＣ
測定範囲	コンクリート（0～15%） モルタル　　（0～15%） ＡＬＣ　　（0～100%）
補正機能	厚さ　10～40 ㎜ 温度　①自動(0～40℃)、②0～70℃
寸　法	(高×幅×長)　110×56×130 ㎜
重　量	約 540g
その他	電池式（9Ｖ）



写真－1.16(a)　使用した水分計



写真－1.16(b)　測定状況

2．自然電位法による鉄筋腐食の推定

2.1　測定結果

自然電位法は、コンクリート中にある鋼材の腐食の可能性を判定するための非破壊試験方法として簡易に実施できる長所を有してはいるものの、まだ明らかになっていないいくつかの疑問点が残されている。そのため、今回は次の４項目について実験を行い、その測定結果を検討することとした。

①　自然電位の測定値は含有塩分量の違いによって鉄筋の腐食状況とどのような関係にあるか。

②　測定値は測定前の湿潤時間の違いによって異なるか。

③　測定値は照合電極が異なっても同じ値が得られるか。

④　測定値は測定位置と鉄筋位置とのずれによって違いがあるか。

なお、測定に用いた照合電極は、1.5.1 自然電位の測定機器と測定方法に示した鉛電極、飽和硫酸銅電極、飽和塩化銀電極、酸化水銀電極の４種類である。

2.1.1　塩分量の違いによる測定結果

(1)　A 供試体

酸化水銀電極による測定結果を図-2.1 に、飽和硫酸銅電極による測定結果を図-2.2 に示す。いずれの自然電位も飽和硫酸銅電極基準に換算した値である。

図から、自然電位の測定値がコンクリート中の塩分量の違いによって異なっていることがわかる。また、同一供試体において含水状態を同じにして自然電位を測定した場合、照合電極の種類によらずほぼ同じ値を示していることがわかる。

すなわち、照合電極の違いによる電位の換算を適切に行えば、異なる照合電極を用いたとしても、再現性が非常に高い測定結果が得られるものと考える。なお、かぶりの影響および水セメント比による差は明確には認められなかった。

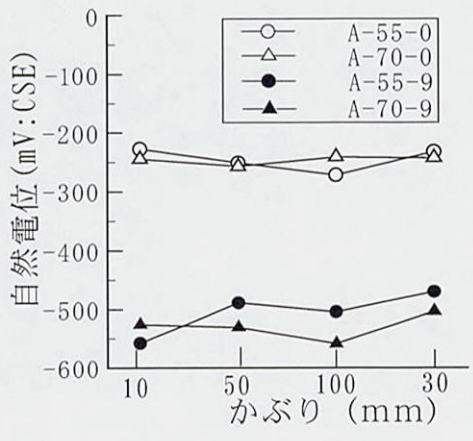


図-2.1　A 供試体における自然電位測定結果
（酸化水銀電極）

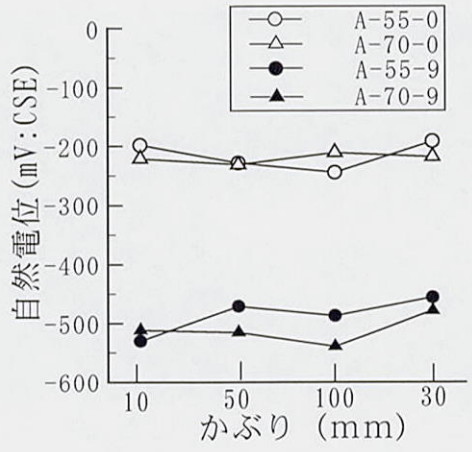


図-2.2　A 供試体における自然電位測定結果
（飽和硫酸銅電極）

(2)　B 供試体

図-2.3 は、供試体中央を境にして塩分量を変化させた B-2 供試体の自然電位の測定結果を軸方向分布で示したものである。

図中には、照合電極として酸化水銀および飽和硫酸銅電極を用いた場合を示している。自然電位は、塩分有り・塩分無しの境界部で測定値も変化し、塩分有りの側が塩分無しの側に比べて卑な値を示している。

この傾向は、塩分量の少ない側で照合電極の異なる場合の測定結果に若干の差が認められるものの、いずれの場合でも明確に認められた。

このことから、一本の鉄筋が、腐食環境条件の異なる領域を貫いている場合でも、塩分量の大小に応じた腐食状況の違いが、自然電位に反映されるものと考えられる。

なお、図-2.3 中には、同一の水セメント比のコンクリートを用いた場合の A-55-0 供試体および A-55-9 供試体で B-2 供試体と同じかぶりを持つ場合の自然電位の測定結果を一点鎖線で示している。A-55-9 供試体での測定結果と比較すると B-2 供試体の塩分量が多い領域での測定結果とほぼ同じ値が得られている。

一方、B-2 供試体で塩分量を含まない領域と、A-55-0 供試体での測定結果を比較すると、B-2 供試体での電位は、かなり卑な方向にずれていることが分かる。これは、マクロセルの形成による分極の影響が表れたためであると考えられるが、詳細については、B-1 供試体での測定結果で述べることとする。

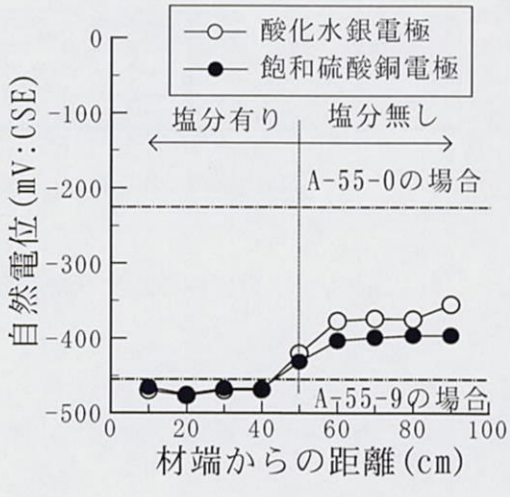


図-2.3　B-2 供試体で測定した自然電位の分布

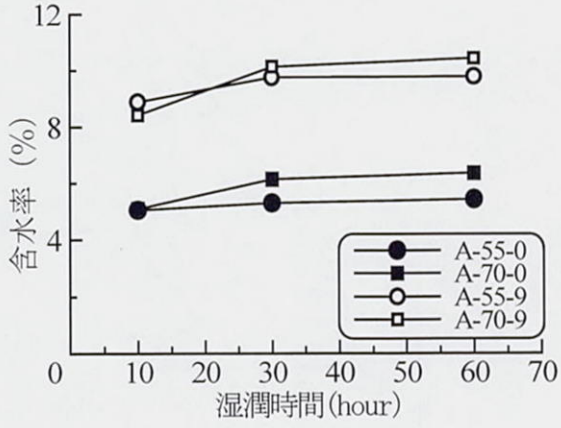
2.1.2　湿潤時間の違いによる測定結果

測定面の含水状態について、湿潤状態にする時間を変化させた場合について以下に記述する。

A 供試体シリーズについて、自然電位を測定する 10 分前、30 分前、および 60 分前に測定面を水道水にて散水湿布し、測定まで湿潤状態に保つこととした。

図－2.4 は各供試体で測定した湿潤直後の含水率測定結果を示したものである。測定点数は、各供試体あたりほぼ等間隔に 20 点であり、図中の値はその平均値である。測定機器は 1.5.3 で示したコンクリート・モルタル水分計を用いた。

図から、含水率の測定値は湿潤時間が長くなるほど大きくなる傾向にあり、その増加量はわずかであることが認められた。また、含水率は塩分量の多い方が大きくなる結果を示し、測定値は水セメント比の違いにかかわらず、コンクリート中の塩分量によって大きな影響を受けることがわかった。

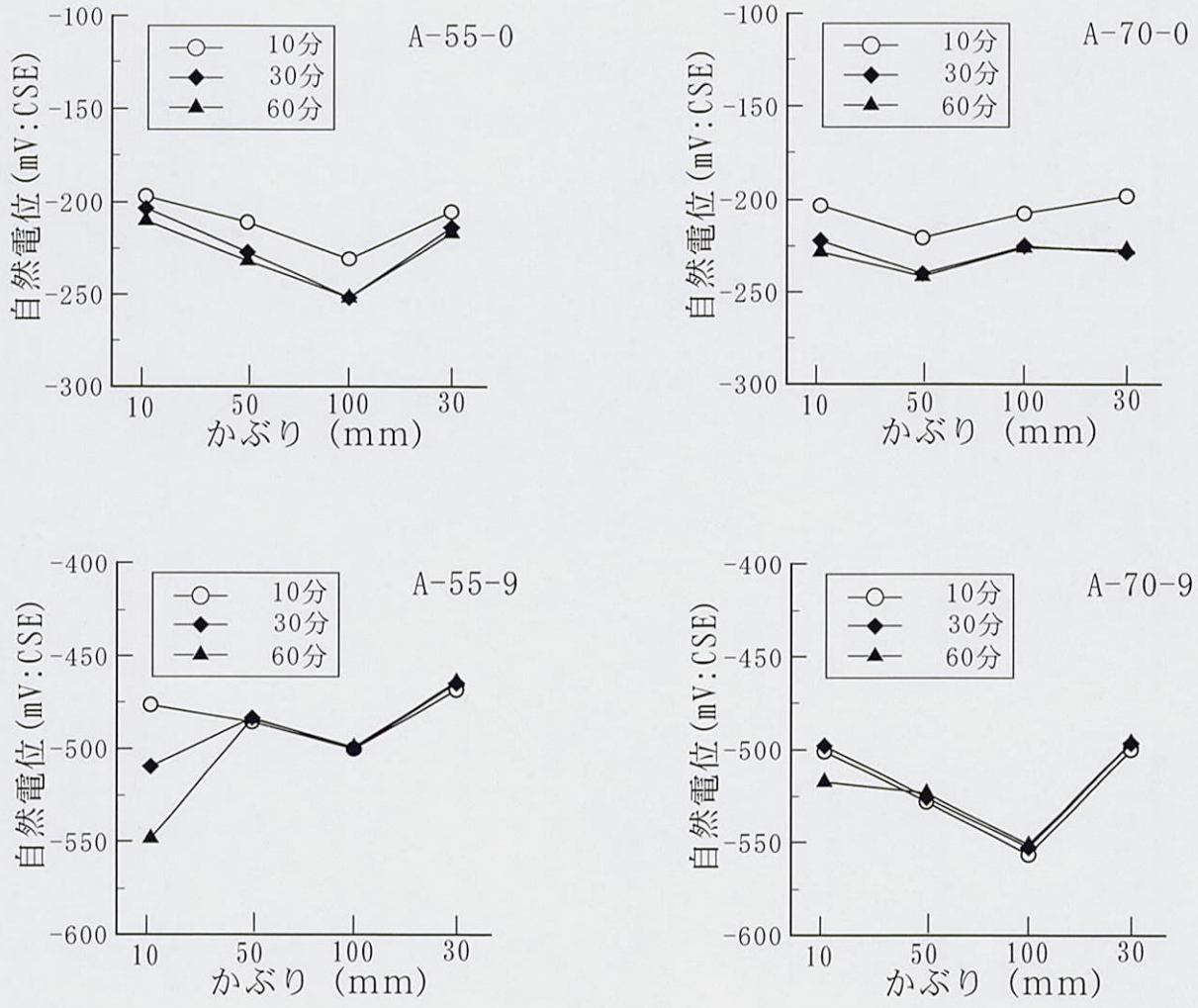


図－2.4 コンクリート供試体の含水率測定結果

また、図-2.5 は湿潤時間を変化させた場合における供試体の自然電位の測定結果を示したものである。照合電極は飽和塩化銀電極である。

図から、塩分を含まない供試体における湿潤時間 10 分の場合の測定値は、湿潤時間 30 分以上の場合に比べて、20mV 程度の差を持つ貴な電位にあることが認められた。湿潤時間 30 分と 60 分の場合の測定値には、ほとんど差が認められなかった。

一方、塩分を含む供試体の場合の測定値は、かぶりが 10mm の場合を除いて、ほぼ同様の値を示しており、湿潤時間の違いによる影響は認められなかった。



図－2.5　湿潤時間を変化させた場合の各供試体の自然電位

以上の結果をまとめると次のことがいえる。

コンクリート表面で測定する含水率はコンクリートの実際の含水率だけではなく、コンクリート中に含有される塩分量によっても影響されるため、必ずしも適切な値が得られるとはいえない。このため、塩分量の大小を考慮せず、表面で測定した含水率のみから、測定された自然電位の値を補正することは不可能であると考えられる。

一方、コンクリート中の塩分量が少ない場合では、測定面の湿潤状態の違いが自然電位の測定結果に及ぼす影響が大きくなる。したがって、自然電位測定の際に測定面の含水状態を一定に保つことは、塩分を含まないコンクリートでは特に重要となる。しかし、図-2.4によれば、湿潤時間を変化させても、含水率の測定結果に与える影響はわずかであり、それよりは、コンクリート中の塩分量の方が多大な影響を及ぼしかねない。このため、本来であれば測定面の標準的な含水状態を含水率の測定値によって定量的に規定することが

理想的であるが、実際には、湿潤時間といったパラメータで表面の湿潤状態を記述せざるを得ないと考えられる。

なお、塩分を多く含むコンクリートでは、今回の試験結果によると、表面の含水状態にあまり注意を払わなくても、ほぼ一定の自然電位が得られる（すなわち、含水状態にあまり依存しない）が、かぶりが非常に小さい場合は、湿潤状態の違いが大きな影響を及ぼす場合もある。この理由については今のところ不明であり、今後の検討課題である。

2.1.3　複数の鉄筋が存在する場合の測定結果

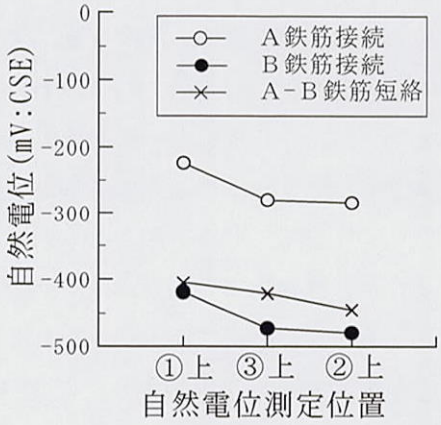
自然電位を測定する場合の測定位置は、鉄筋の直上を原則としている。しかし、場合によっては、鉄筋の直上ではない位置で測定することもあり、このような場合における自然電位の測定結果の解釈は、必ずしも明らかにされていないのが現状である。そのため、ここでは複数の鉄筋が存在する場合の測定点の捉え方について検討することとした。

(1)　2本の鉄筋が平行に配置されている場合（B-1 供試体）

それぞれの鉄筋を単体の状態で自然電位を測定した場合、および2本の鉄筋を短絡させて自然電位を測定した場合について検討を行う。

自然電位の測定位置と鉄筋の位置関係は図-1.4(a)に示すとおりである。

図-2.6 は B-1 供試体における酸化水銀電極を照合電極として測定した自然電位の結果を示したものである。A 鉄筋に接続して自然電位を測定した場合、自然電位の測定結果は-220～-280mV(vsCSE)となっていて測定位置によってわずかに差が生じている。一方、B 鉄筋に接続して自然電位を測定した場合は、-420～-480mV(vsCSE)となっていた。



図－2.6　B-1 供試体自然電位測定結果

A供試体で単体の鉄筋について自然電位を測定した場合、A 鉄筋と同じ条件に相当する場合の測定結果は-220mV 程度、B 鉄筋と同じ条件に相当する場合の測定結果は-460mV となっていた。従って、B-1 供試体において各鉄筋個別に接続した場合に測定された自然電位は、おおむね A 供試体で測定した値に近似していることが分かる。ただし、測定位置と鉄筋位置とが異なる場合は、A 鉄筋および B 鉄筋とも鉄筋直上で測定した値と鉄筋から離れた位置で測定した値には 60mV 程度の差が生じていて、鉄筋直上で測定した値の方がA供試体で単体の鉄筋について測定した値に近くなっている。以上の結果からいえることは、自然電位の概略値を得るには、測定対象となる鉄筋から離れた地点で測定しても良いが、より正確な自然電位の測定結果を得るためには、測定対象となる鉄筋直上で測定することが望ましいといえる。

次に、A 鉄筋と B 鉄筋を短絡させた場合、B 鉄筋の直上の自然電位は短絡によりわずかに貴な方向にシフトし、A 鉄筋直上の自然電位は大幅に卑な方向にシフトした。このような電位のシフトが生じた理由は短絡によりマクロセルが形成され、分極が生じたためであると考えられる。ここで、塩分を含まない A 鉄筋側の分極抵抗が大きいために分極による電位の変動が大きくなったものと考えられる。一般には、実構造物では鉄筋は結束線などにより相互に電気的に導通のある状態に置かれているものと考えられるので、B-1 供試体についていえば、A 鉄筋と B 鉄筋を短絡したような状況で測定しているものと考えられる。従って、マクロセルの形成状況によっては、カソード側となる鉄筋でも分極の影響により卑な電位が測定される場合があると考えられる。

(2)　2本の鉄筋が直交している場合（B-3 供試体）

2本の鉄筋を直交して配置したB-3 供試体の自然電位測定結果について検討する。この場合もそれぞれの鉄筋を単体の状態で自然電位を測定する場合と、短絡させてから測定した場合の2通りの測定とした。

B-3 供試体は、上層部は塩分(9kg/m^3)を含み、下層部は塩分を含んでいない。また、自然電位の測定位置と鉄筋の位置関係は、図-1.4(c)に示すとおりである。

測線①は、塩分を含む上層側にかぶり 3cm で配置されたA鉄筋の直上であり、測線②は、塩分を含まない下層にかぶり 15cm で配置されたB鉄筋の直上に位置している。

自然電位の測定結果を図-2.7 に示す。この結果によると、A鉄筋もしくはB鉄筋を単体の状態で測定した自然電位の値は、自然電位の測定位置によらず、ほぼ一定の値になっていて、A 鉄筋に接続した場合はA鉄筋の、B鉄筋に接続した場合はB鉄筋の自然電位が測定されていると考えられる。

すなわち、接続されていない鉄筋の影響は全くないと考えられる。ここでB-1 供試体では、供試体の鉛直打継位置でコンクリートの含有塩分量が変化していたため、測定位置（①上、②上、③上）によって電位の測定結果に差が生じている（図－2.6 参照)。しかし、B-3 供試体は水平打継位置を境にして塩分量を変化させているため、測線上での塩分量は同一である。このために、B-3 供試体ではB-1 供試体と異なり、測定位置によって自然電位の値にほとんど差が認められなかったものと考えられる。

また、A 鉄筋 B 鉄筋を短絡させた場合の自然電位の測定値は、B-1 供試体の場合と同様に、マクロセルの形成による分極の影響を受け、塩分を含まないB鉄筋の電位が卑な方向に移動したものと考えられる。

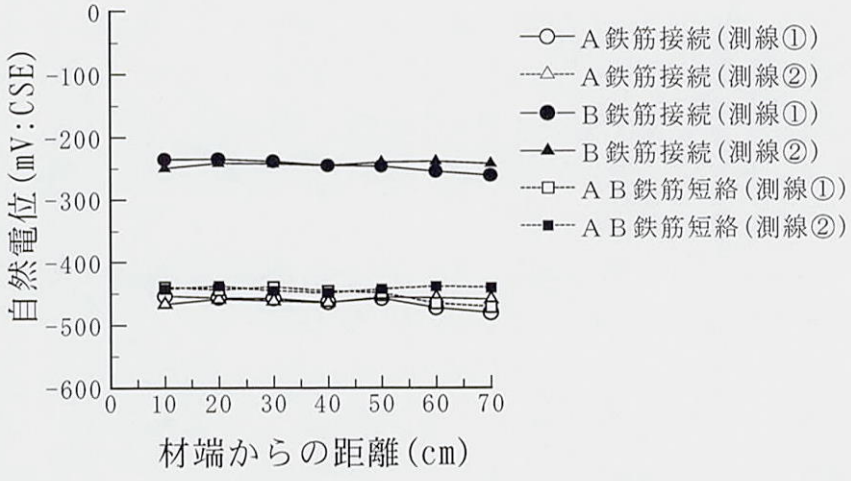
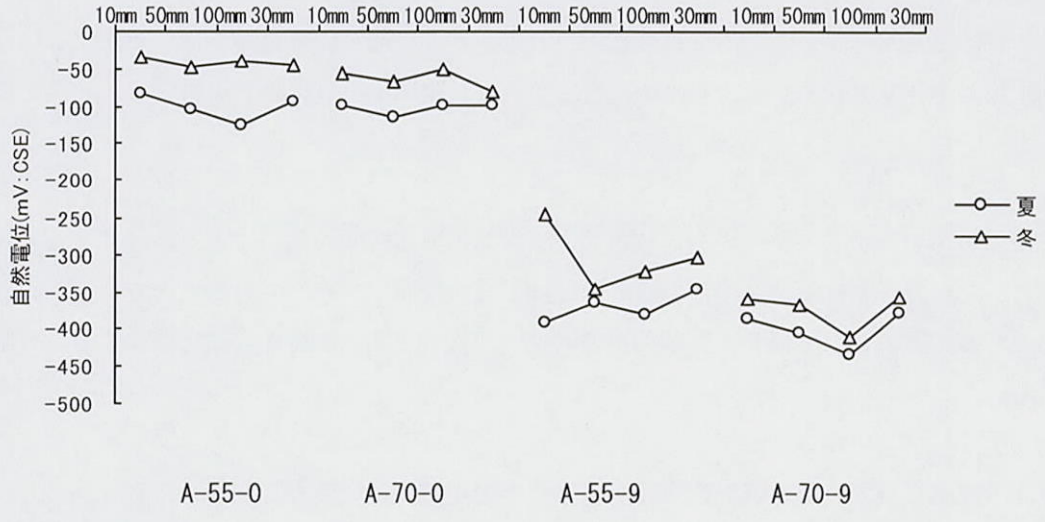


図-2.7　B-3 供試体自然電位測定結果

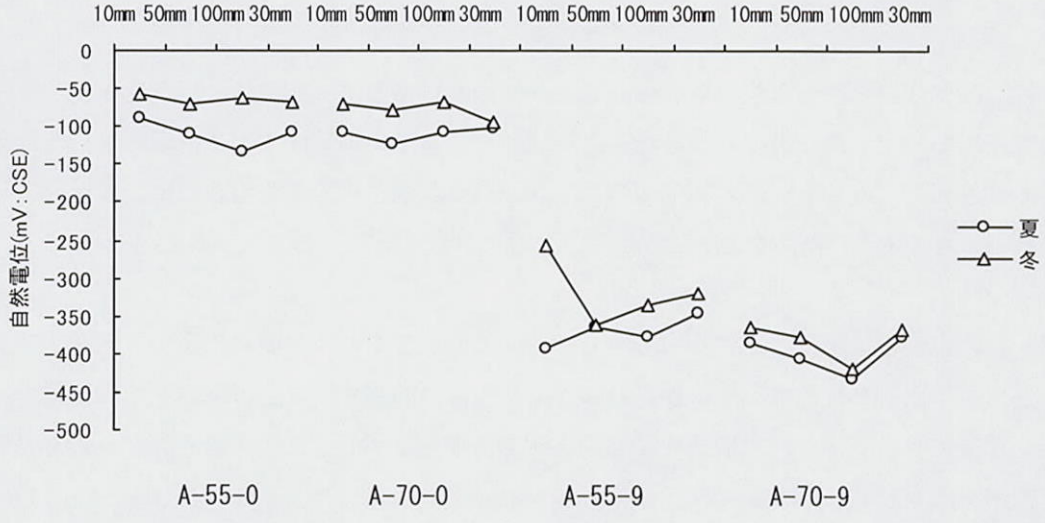
2.1.4　測定時期の違いによる測定結果

図－2.8 は飽和塩化銀電極、図－2.9 は酸化水銀電極を使用して、A供試体を夏季および冬季に測定した結果を比較表示したものである。この結果によると、測定された電位は A-55-9 供試体の鉄筋かぶり 10mm を除いて、ほぼ同じような傾向を示している。

冬季の電位が夏季よりも貴な電位を示したのは、気温の低下によって鉄筋の腐食反応速度が夏季よりも遅くなったことが原因のひとつと考えられる。



図－2.8　測定時期の違いによる自然電位測定結果（飽和塩化銀電極）



図－2.9　測定時期の違いによる自然電位測定結果（酸化水銀電極）

2.2　測定方法に関して明らかになった点と今後の課題

自然電位法の測定方法に関して、今回の実験結果から明らかになった点を以下に示す。

① 今回の実験では、コンクリート中の含有塩分量の違いによって鉄筋の自然電位に明確な差が生じることが確認された。これは、含有塩分量の有無に応じた鉄筋の腐食状況の違いが、電位の差として反映されたものと思われる。

② 異なる照合電極を使用した測定結果でも、キャリブレーションと換算を適切に行えば、換算値には照合電極の違いによる差はほとんどないことが確認された。したがって、測定にあたっては、使用する照合電極の測定前と測定後のキャリブレーションを適切に行うことと、適切な換算を必ず実施することが必要であると思われる。

③ コンクリート中に塩分を多く含む場合の測定値には、測定前の湿潤時間の違いによる差はほとんど認められなかった。しかし、塩分を含まない場合の測定値には、湿潤時間 10 分と 30 分以上とでは差が認められた。したがって、測定にあたっては、測定前の湿潤時間を少なくとも 30 分程度以上確保することが望ましいと思われる。

④ 今回の実験では、鉄筋直上での測定値と鉄筋直上以外での測定値に差はほとんど認められなかった。これは、試験体が均一な含有塩分量のコンクリートであったためと思われる。しかし、実構造物では含有塩分量が不均一である場合もあることを考慮すると、測定点は鉄筋直上を原則とするのがよいと思われる。したがって、測定にあたっては、事前に鉄筋探査機による鉄筋位置の確認を行って、鉄筋直上のコンクリート表面で測定することを推奨する。

⑤ 今回の実験では、腐食状況の異なる鉄筋を短絡させた場合での自然電位の測定値は、腐食を生じていないと考えられる鉄筋であっても卑な電位を示した。これは、マクロセルの形成による分極が生じたためと考えられる。このことから、ＡＳＴＭ等の判定基準で鉄筋の腐食状況を推定する場合には、鉄筋の腐食状況を卑な方向に評価してしまう可能性があることに留意しなければならないことが明らかとなった。

今回の実験結果から、自然電位法はコンクリート中の鉄筋の腐食状況をある程度は推定できるものの、現在広く知られているＡＳＴＭやＢＳ規格の中で鉄筋の腐食度を明確に判定することは現時点では困難であることが確認できた。今後は、より多くの実構造物における測定情報を蓄積し、鉄筋の腐食状況をより高精度で判断できる判定基準を確立していく必要があると考える。

３．分極抵抗法による鉄筋腐食の推定

3.1　測定結果

分極抵抗法は、コンクリート中の鉄筋の腐食速度を直接測定できる非破壊試験方法として大きな可能性を持っているものの、いくつかの点で明らかになっていない検討項目が残されている。鉄筋腐食に関してより正確な判断を下すためには、これらの課題を解決することが望まれている。特に、用いる測定器の違い、測定面の含水状態、測定位置と鉄筋位置の位置関係が分極抵抗値に及ぼす影響については、早急に明らかにすべきであると考えられる。ここでは、２タイプの供試体（Ａ供試体とＢ供試体）を用いて、分極抵抗の測定を行い、上記の課題について検討を行った。なお、測定に用いた３種類の測定方法は、1.5.3 分極抵抗の測定機器と測定方法における表－1.13 に示した機器を使用した。いずれも交流インピーダンス法である。

分極抵抗測定に関し、以下の３つの疑問点について解明すべく実験を実施した。

その結果を以下に述べる。

①　分極抵抗は鉄筋の腐食速度を反映しているか

②　測定方法によって測定値が異なるか

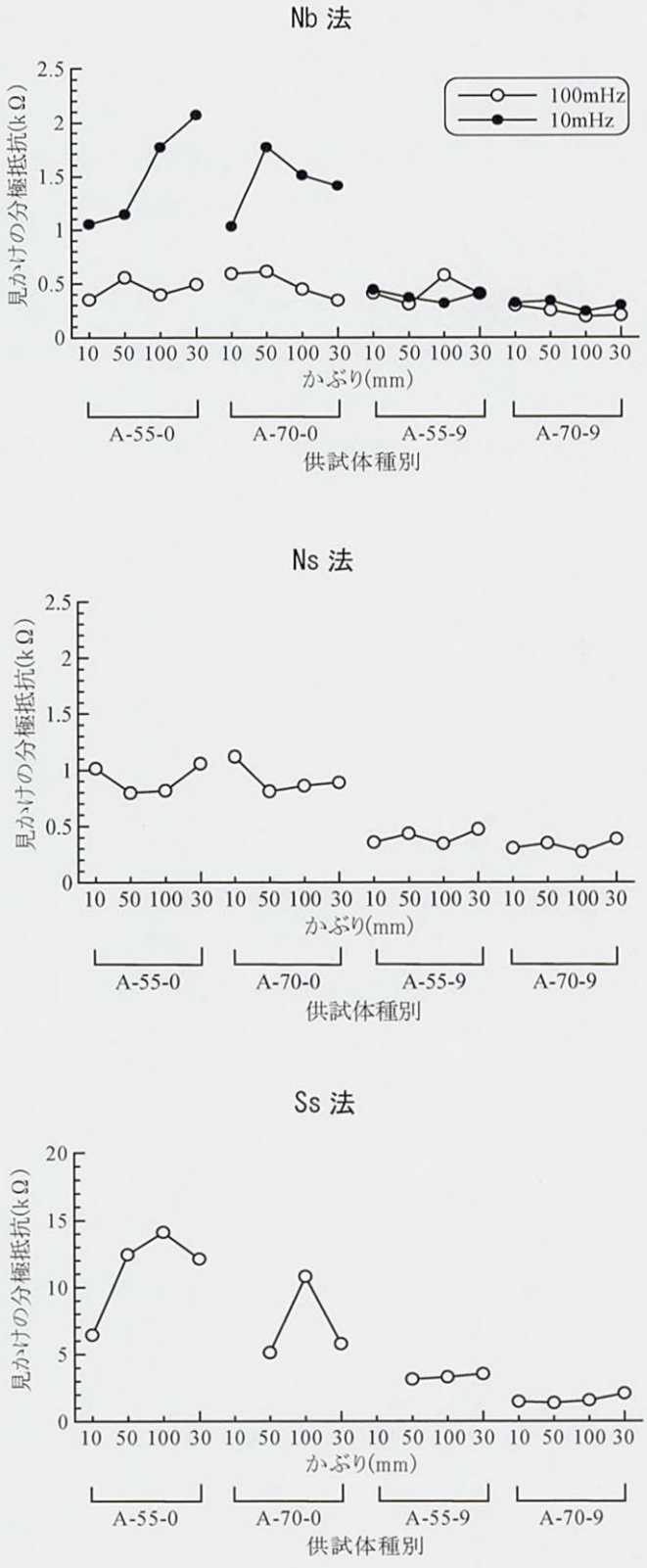
③　複数の鉄筋がある場合の測定結果は妥当か

3.1.1　測定結果と鉄筋の腐食状況との関係

図－3.1 は A 供試体の分極抵抗測定結果を示したものである。ここで、測定装置は 3 種類のもの（いずれも交流インピーダンス法）を用いた。ただし、Nb 法では低周波数側として、100mHz と 10mHz の２通り、高周波側は 10kHz で測定を行っている。Ns 法では低周波数側は 25mHz、高周波側は 1kHz。Ss 法では低周波数側は 20mHz、高周波側は 10Hz で測定を行っている。また Ss 法では、A-70-0 供試体と A-55-9 供試体のかぶり 1cm の場合について、妥当な測定結果が得られなかったので、これを割愛している。

Ns 法および Ss 法の測定結果をみると、見かけの分極抵抗の絶対値には差が生じているものの、塩分量の多い供試体は、塩分量の少ない供試体と比べて見かけの分極抵抗の値は小さくなっていて、鉄筋の腐食速度の違いが捕らえられていると考えられる。

なお、Nb 法では、低周波側を 100mHz に設定した場合は、塩分の有無による区別はできない状況であった。この点については、次に述べることとする。



図－3.1　A供試体の分極抵抗測定結果

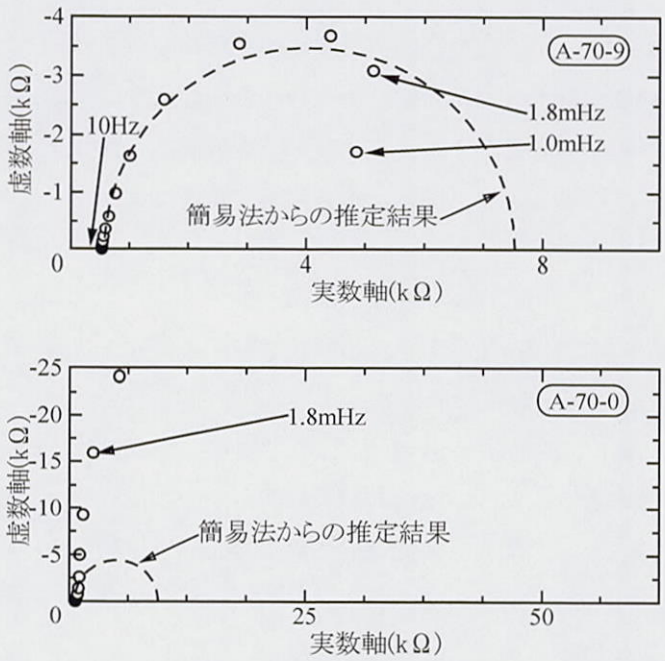
3.1.2　交流インピーダンス法でのインピーダンス特性

図－3.2 は、A 供試体でかぶりが 50mm の鉄筋を測定対象として、用いる周波数とその応答状況を測定した結果をコールコールプロットで示したものである。使用した測定装置は Ss 法のものであり、測定日は、図－3.1 に示した測定の一週間後に行ったものである。この結果によると、コンクリート中の塩分の有無によって、インピーダンスの値は大幅に異なっていることが分かる。図中には、20mHz と 10Hz の２周波数のみを選択して測定した複素インピーダンスから推定される分極抵抗の値に基づいて計算されるコールコールプロットを点線で示している。

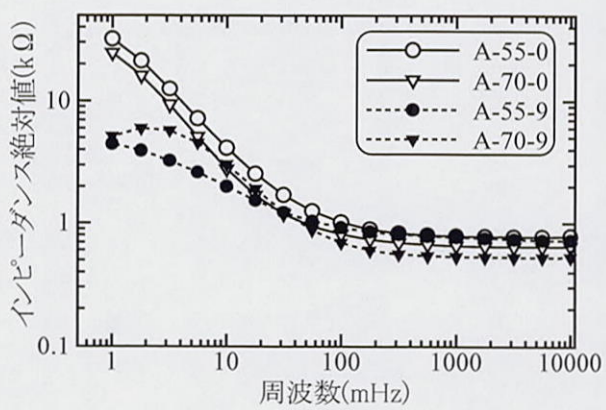
塩分が入っている供試体では、測定した複素インピーダンスの虚数部分について、ある周波数よりも低周波数になったところで、減少傾向が認められるが、塩分の入っていない供試体では、複素インピーダンスの虚数部の絶対値は、周波数の低下に応じて、単純に増加していた。

この結果から、低周波数側の測定は時間的にも限られたものであるので、コンクリート中の塩分がなく不動態被膜が形成されているような場合では、分極抵抗の値を定めることは困難であることが明らかとなった。

図－3.3 は交流インピーダンスの絶対値と周波数の関係を示したものである。これによると、塩分量の大小によって分極抵抗の値に差が生じているのは、10mHz 程度以下の低周波数側であることがわかる。このことは、図－3.1 に示した Nb 法において、低周波数側を 100mHz に設定して分極抵抗を測定した場合、塩分量の大小による差が認められなかった理由を示していると考えられる。したがって、交流インピーダンス法を用いて分極抵抗を求める場合には、低周波数側でできるだけ小さな周波数を選択することが望ましいと考えられる。



図－3.2　交流インピーダンス測定結果（Ss 法）



図－3.3　交流インピーダンスの絶対値と周波数の関係

3.1.3　複数の鉄筋が存在する場合の測定結果（B-1 供試体）

複数の鉄筋が存在していても、分極抵抗の測定では分極を生じさせる部分の面積が限定されているので、自然電位と異なっていて測定箇所の特定が可能である。ただし、マクロセルの形成により腐食電流が流れている場合では、そうでない場合と比べて分極抵抗の値は異なる場合もあり得ると考えられる。これは、分極曲線の非直線性を反映したものであると考えられる。

図－3.4 は、B-1 供試体について、２本の鉄筋の短絡前後に周波数 10mHz で測定した分極抵抗の値を示したものである。

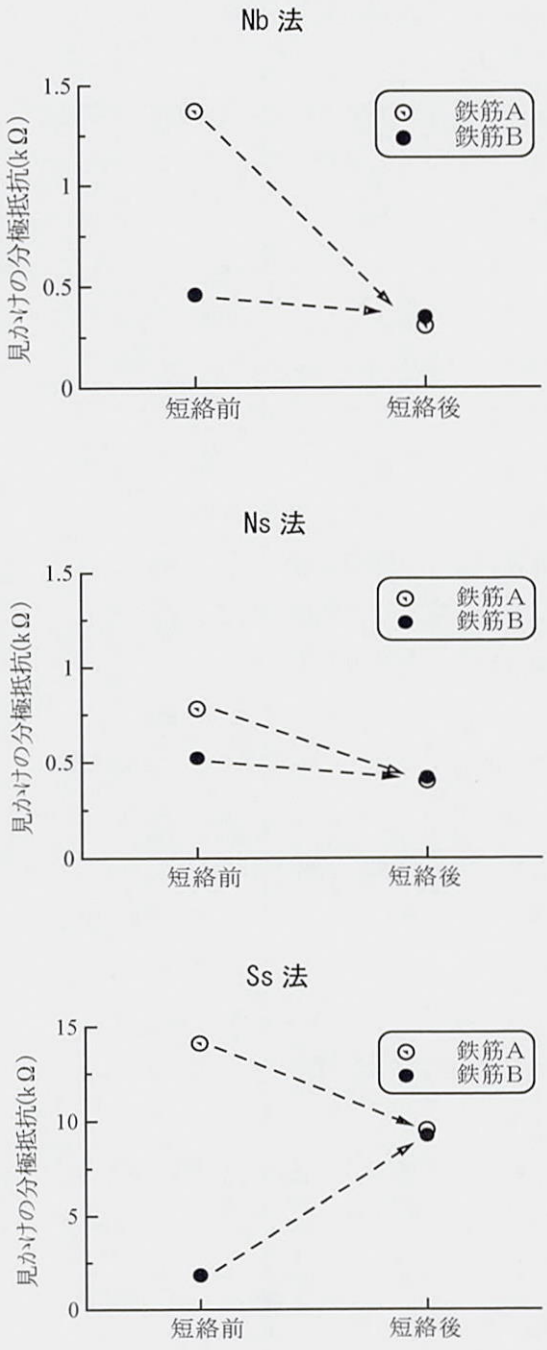
Nb 法では、短絡前の分極抵抗は塩分を含まない側の A 鉄筋では大きな値、塩分を含む側の B 鉄筋では小さな値を示した。また、短絡後の分極抵抗は両鉄筋ともほぼ等しい値となり、短絡前の B 鉄筋にほぼ近い値となった。

Ns 法では、Nb 法とほぼ同様の結果となった。

Ss 法では、短絡後の分極抵抗は短絡前の A 鉄筋と B 鉄筋のほぼ中間値を示した。

Nb 法および Ns 法と Ss 法とで、短絡後の分極抵抗に、このような傾向が生じた原因は明らかではないが、いずれにしても、腐食状況の異なる鉄筋を短絡させた場合、短絡後の分極抵抗は２本の鉄筋がほぼ同じ値に収束するものと考えられる。

したがって、腐食状況の異なる鉄筋が電気的に短絡している場合の分極抵抗は、短絡していない場合に比べて、実際とは異なる分極抵抗が測定される可能性が高く、特に、鉄筋の腐食速度を推定する場合には十分な注意が必要であると思われる。



図－3.4　B－1 供試体での分極抵抗測定結果

3.1.4　1本の鉄筋が異なる腐食環境に存在する場合の測定結果（B-2 供試体）

図－3.5 は B-2 供試体において測定した分極抵抗の結果を示したものである。参考に、同一のかぶりと水セメント比を持つ A-55-0 供試体および A-55-9 供試体での測定結果も併せて記載している。

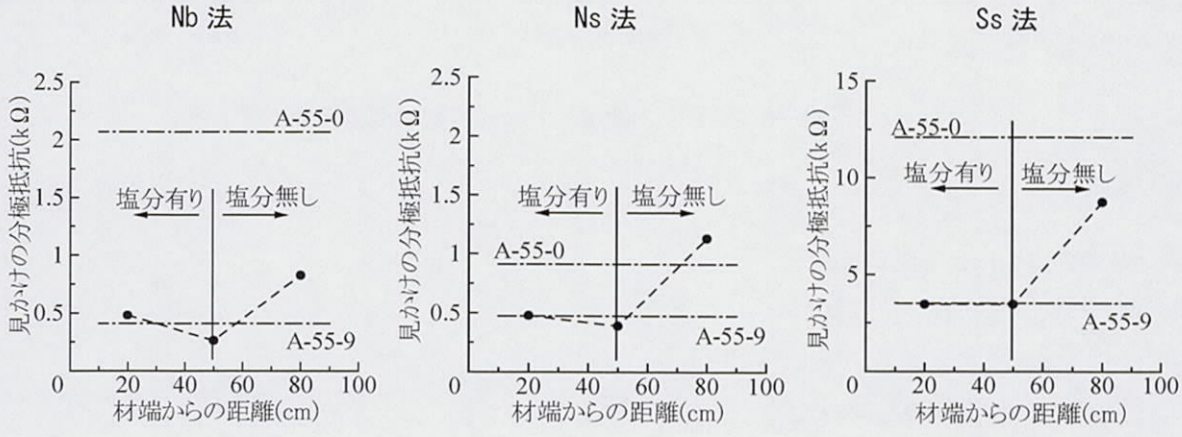
この結果によると、Nb 法では B-2 供試体の塩分を含まない部分で測定された分極抵抗の値は、A 供試体に比較してかなり小さな分極抵抗を示している。

Ns 法では塩分のない部分での測定結果は A 供試体よりもやや大きい値が得られているがその差は小さく、A 供試体での測定値とほぼ等しい結果が得られている。

Ss 法では、塩分のない部分での測定結果は A 供試体よりもやや小さな値が得られていた。図－3.2 に示したとおり、分極抵抗の値が大きくなる場合では、必ずしも安定した測定結果が得られないことが多いので、多少の差が生じるのはやむを得ないと思われる。

一方、いずれの測定方法においても塩分のある部分で測定した分極抵抗は A 供試体で測定した値とあまり差がない結果となっている。

これらの結果を総合すると、B-2 供試体のように一本の鉄筋が異なる腐食環境をまたいで通過している場合では、測定位置の腐食環境におおよそ対応した分極抵抗の値が得られていると考えられる。また、図－2.3 に示す自然電位の測定結果よりも分極抵抗の方が、コントラストは顕著で、より明確に腐食環境の差をとらえられることができると考えられる。



図－3.5　B－2 供試体での分極抵抗測定結果

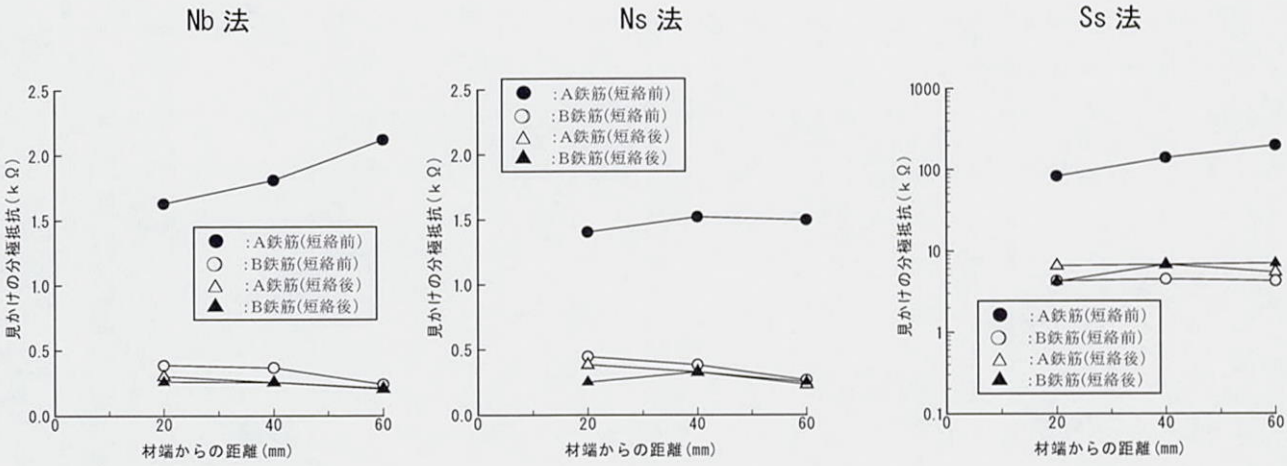
3.1.5　２本の鉄筋が交差している場合の測定結果（B-3 供試体）

図－3.6 はB-3 供試体において測定した分極抵抗の結果を示したものである。

この結果によると、３つの方法とも同様な傾向を示した。短絡前は、B-3 供試体の塩分を含む部分に埋設されたＡ鉄筋に接続して測定された分極抵抗の値は、塩分を含むＡ供試体で得られた測定値と比較してほぼ同じ小さな分極抵抗を示し、塩分を含む層を介して、塩分を含まない部分に埋設されたＢ鉄筋に接続して測定された分極抵抗の値は、塩分を含まないＡ供試体で得られた測定値と比較してほぼ同じ大きな分極抵抗を示した。

短絡後は、全て塩分を含むコンクリート中に埋設されている鉄筋の分極抵抗とほぼ同じ値となった。

以上の結果は、3.1.3 で述べた結果と同様である。



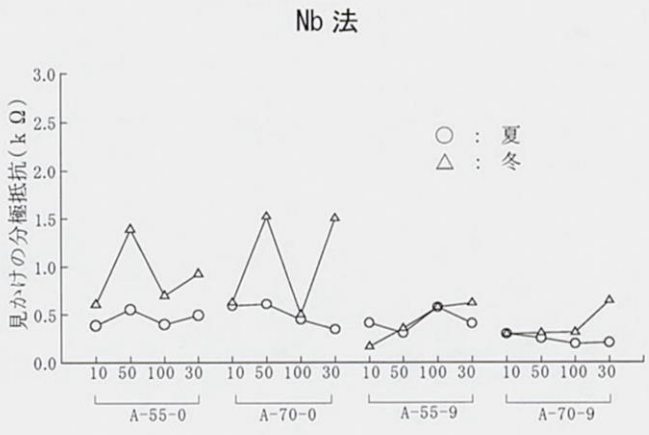
図－3.6　Ｂ－3 供試体での分極抵抗測定結果

3.1.6　測定時期の違いによる測定結果

図－3.7 は、A 供試体において、夏季および冬季に、Nb 法により周波数 10mHz で測定した分極抵抗の測定結果を比較したものである。

図から、A-55-0 供試体のかぶり 10mm の場合を除いて、冬季の分極抵抗の方が夏季に比べて大きな値を示すことが認められた。

これは、冬季と夏季の気温の違いが腐食速度に影響をおよぼしたものと推察される。



図－3.7　Ａ供試体の分極抵抗測定結果（夏と冬の比較）

3.2　今後の課題

今回の実験を通して、分極抵抗法の課題について解決できなかった点について述べる。

分極抵抗法の測定値の評価は、前項の鉄筋腐食速度の推定で述べたように、実測値から単位面積当りの数値に換算することが重要である。しかし、今回の実験では、測定に用いた3種類の測定方法で得られた値を単位面積に換算して比較すると、測定機器間で大きな差が生じて一律な議論ができなかった。そこで、今回の実験結果については実測値で評価した。

今後の課題としては、まず測定機器の違いによる測定結果を同一のテーブルで論議できるようにすることが必要である。さらに、腐食速度と単位面積当りの分極抵抗値との相関を明らかにし、分極抵抗法を将来の鉄筋腐食診断技術のひとつとして確立していくことが重要であると考える。

第Ⅱ部　実構造物に対する測定結果

1．地下室側壁の測定結果

1.1 測定概要

実構造物における自然電位法および分極抵抗法の測定結果と鉄筋腐食の判定の妥当性を検証するため、大型施設の地下室側壁を対象として測定を行った。鉄筋腐食の判定の妥当性については、測定後にコンクリートをはつり取って、目視により鉄筋の腐食状況を確認した。

測定対象である地下室側壁は、一部に、かぶり不足によるかぶりコンクリートのはく落、鉄筋の露出および腐食が確認された。

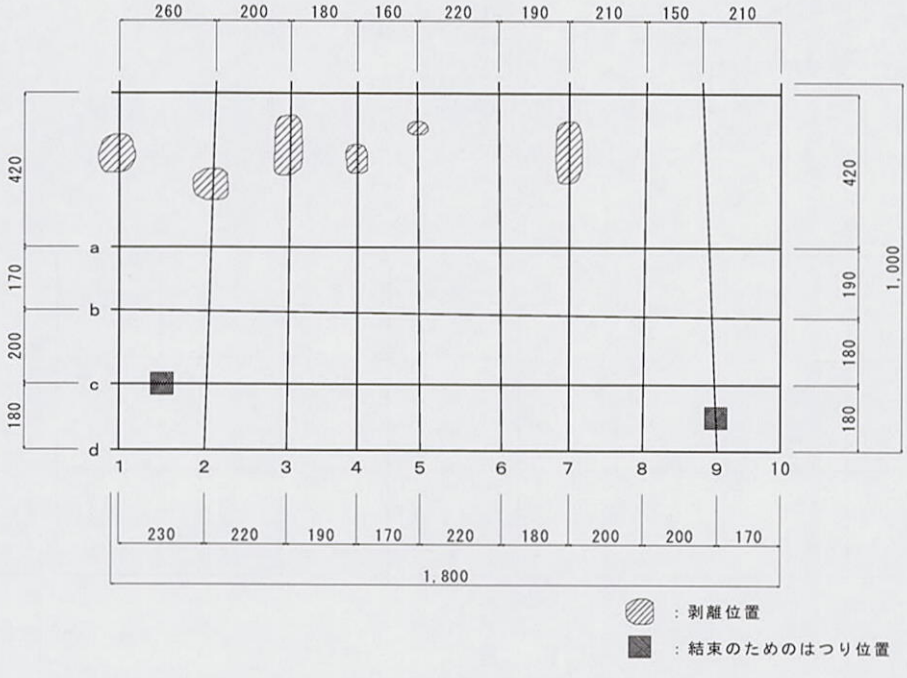
地下室側壁の現況を写真－1.1 および写真－1.2 に示す。また、測定位置の鉄筋配置を図－1.1 に示す。



写真－1.1　地下室側壁の現況



写真－1.2　地下室側壁の現況



図－1.1　測定位置の鉄筋配置

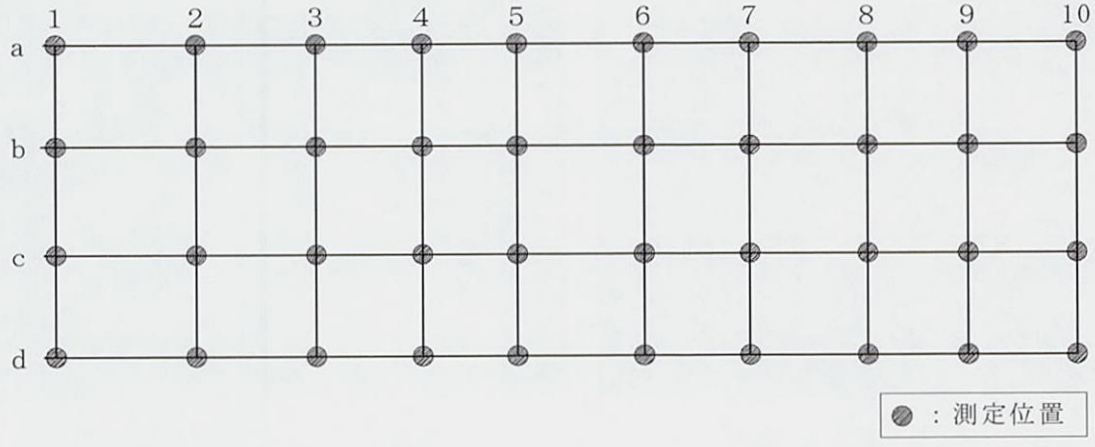
1.2 測定時期と測定項目

地下室側壁の測定は平成 14 年 11 月に行った。測定項目は、自然電位、分極抵抗およびコンクリート表面の含水率とした。

1.3 測定位置

1.3.1 自然電位法の測定位置

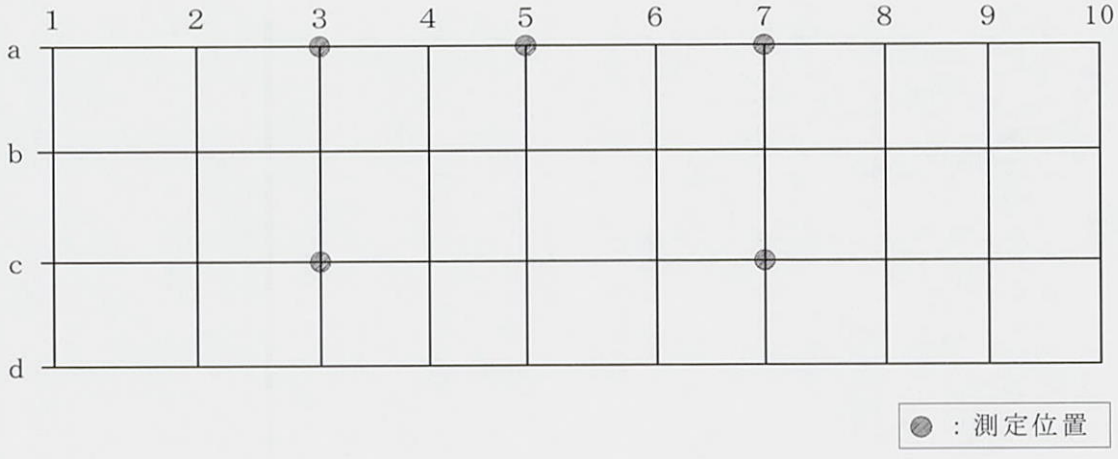
自然電位の測定は、図－1.1 に示した配筋位置の縦筋（1～10）と横筋（a～d）の交点となる図－1.2 に示す 40 点にて行った。



図－1.2 自然電位の測定位置

1.3.2 分極抵抗法の測定位置

分極抵抗の測定は、図－1.1 に示した配筋位置の縦筋（1～10）と横筋（a～d）の交点のうち、図－1.3 に示す 5 点にて行った。



図－1.3 分極抵抗の測定位置

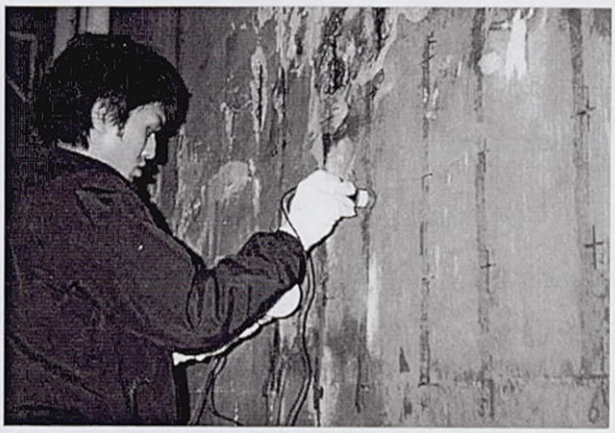
1.4 測定機器

1.4.1　自然電位の測定機器

自然電位の測定に使用した機器は、「第Ⅰ部 1.5 測定機器と測定方法　表－1.8」に示した５機種のうち、Nc 法（鉛電極）、Fb 法（飽和硫酸銅電極）、Nb 法（飽和塩化銀電極）、Nb 法（酸化水銀電極）の４機種とした。各機器による測定状況を写真－1.3～写真－1.6 に示す。



写真－1.3　Nb 法（飽和塩化銀電極）測定状況



写真－1.4　Fb 法（飽和硫酸銅電極）測定状況



写真－1.5　Nb 法（水銀酸化水銀電極）測定状況



写真－1.6　Nc 法（鉛電極）測定状況

1.4.2　分極抵抗の測定機器

分極抵抗の測定に使用した機器は、「第Ⅰ部 1.5 測定機器と測定方法　表－1.13」に示したNb法、Ss法、Ns法の３機種とした。各機器による測定状況を写真－1.7～写真－1.9に示す。



写真－1.7　Ss法 測定状況



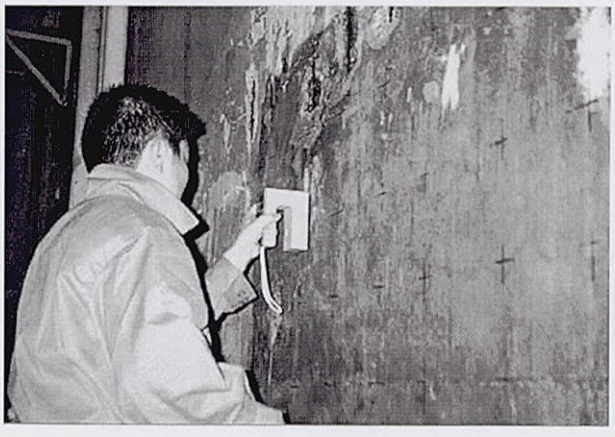
写真－1.8　Ns法 測定状況



写真－1.9　Nb法 測定状況

1.4.3　含水率の測定機器

自然電位測定と分極抵抗測定の事前に行った、コンクリート表面の含水率の測定では「第Ⅰ部 1.5 測定機器と測定方法　表－1.14」に示したK社製コンクリート・モルタル水分計（HI-500）を使用した。使用した機器の測定状況を写真－1.10及び写真－1.11に示す。



写真－1.10　測定状況



写真－1.11　測定状況

1.5　自然電位法による鉄筋腐食の推定

1.5.1　測定方法

使用した照合電極は、「第Ⅰ部 供試体による測定結果」で使用した飽和塩化銀電極、酸化水銀電極、鉛電極、飽和硫酸銅電極の 4 種類である。測定位置は、1.3.1 自然電位法の測定位置に示す通り、高さ方向に a、 b、 c、 d の４列（約 20cm 間隔）、水平方向に１～10 までの 10 列（約 20cm 間隔）の合計 40 ヶ所とした。なお、測定は、測定前のコンクリート表層部の湿潤時間を水道水の随時散水による 30 分とし、事前に測定対象範囲内における鉄筋間の電気的導通を確認して行った。

1.5.2　測定結果

測定結果を図－1.4～図－1.7 に示す。測定値は飽和硫酸銅電極基準（CSE）に換算して表示した。

この結果、側壁内部鉄筋の自然電位は、飽和塩化銀電極で－204～－90mv、酸化水銀電極で－280～－158mv、鉛電極で－376～－225mv、飽和硫酸銅電極で－223～－106mv を示し、照合電極間で測定値に差異のあることが確認された。特に、鉛電極による測定結果は他の電極よりも卑な電位を示していた。これは、今回、測定の前後に照合電極のキャリブレーションを行わずに測定を実施したためと思われる。単に換算式を用いて自然電位を評価するのではなく、測定前後の照合電極のキャリブレーションを適切に行うことの重要性を改めて認識する結果となった。

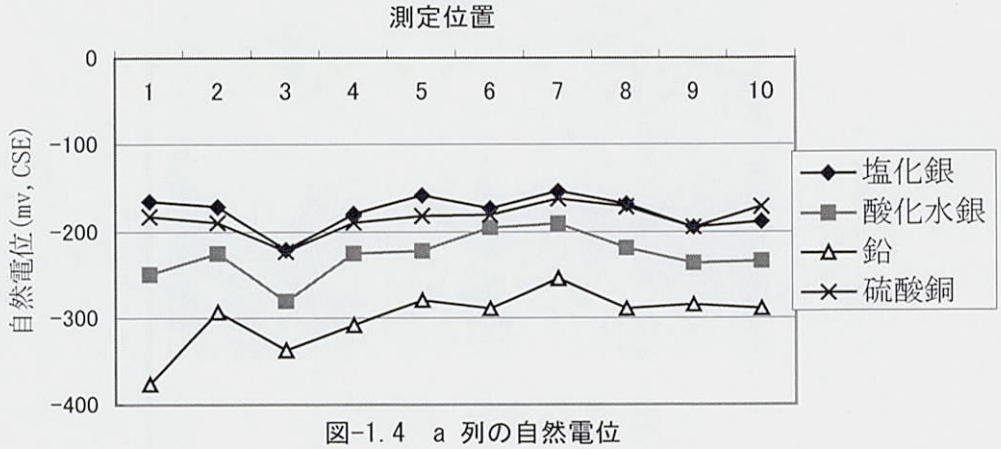


図-1.4　a 列の自然電位

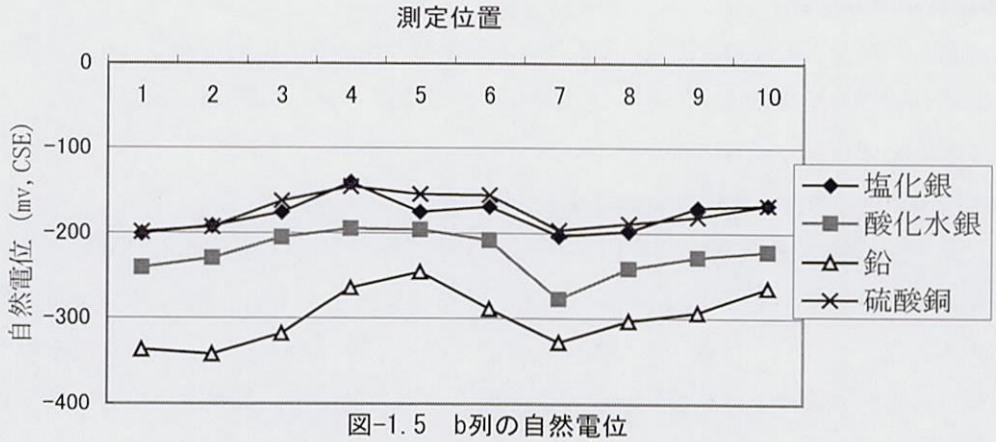


図-1.5　b列の自然電位

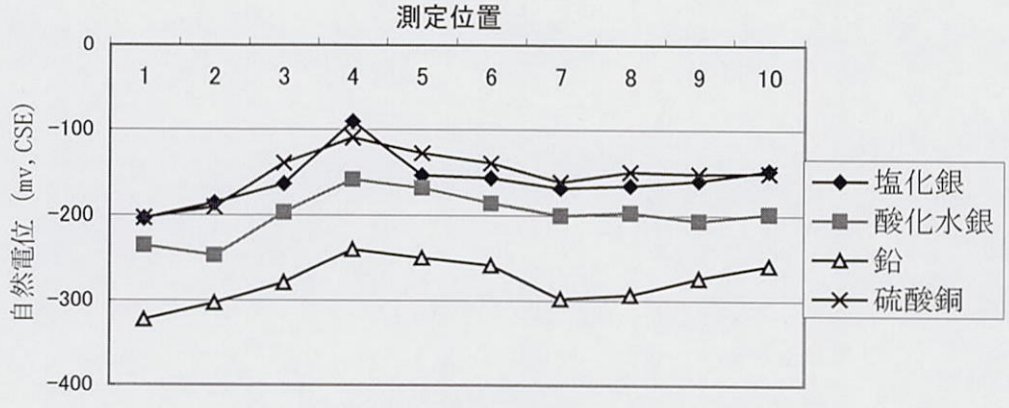


図-1.6　C列の自然電位

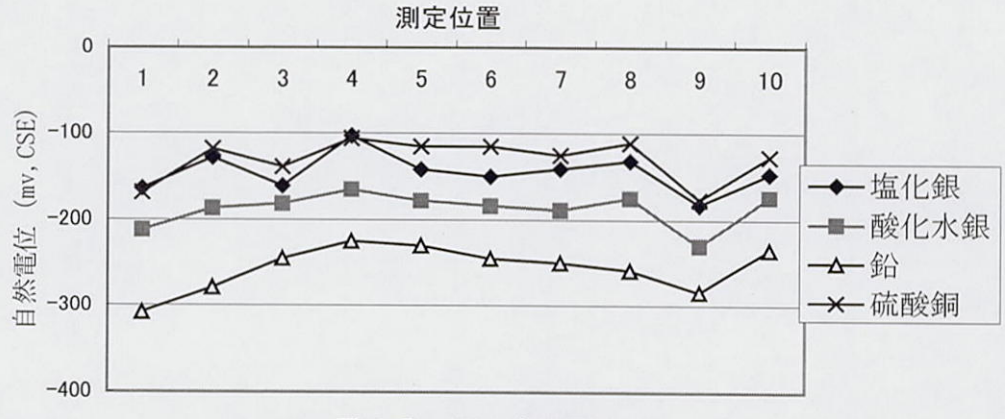


図-1.7　d列の自然電位

1.5.3　鉄筋の腐食状況の推定

自然電位を測定した地下室壁面の状況は、写真－1.1および写真－1.2に見られるように、測定対象壁面の上部で縦方向鉄筋位置の数カ所にかぶりコンクリートのはく離と鉄筋の露出が確認された。かぶりコンクリートがはく離した箇所は、所定のかぶりが確保されておらず、かぶり部のコンクリートがすべてとれてしまった状況にあった。また、鉄筋は表面腐食の状況にあった。

測定の結果、地下室側壁内部の鉄筋の腐食状況は、一部の箇所を除いて全体的に「コンクリート構造物の健全度診断マニュアル（案）平成10年3月（以下、診断マニュアル案)」で示す腐食度Ⅲ（軽微）の状況にあると推定された。しかし、後日、測定箇所のコンクリートをはつり取って腐食状況を観察した結果によれば、鉄筋はほとんど腐食していない状況であった。このことから、自然電位の測定結果のみから鉄筋の腐食状況を推定した場合、その判定結果と実際の鉄筋の腐食状況には若干の差が生じる場合もあると考えられる。

1.6　分極抵抗法による鉄筋腐食の推定

1.6.1　測定方法

測定機器は第Ⅰ部の供試体での実験と同様の３機種を使用し、測定箇所は図－1.3に示す幅1.8m、高さ 1.0m範囲内での５測定点とした（図－1.3)。また、測定前のコンクリート表層部の湿潤時間は、水道水の随時散水による30分とした。なお、測定時の周波数は100 mHz とし、測定範囲内の鉄筋は径D22、かぶり 20 mm と仮定して単位面積当たりの値に換算した。

1.6.2　測定結果

地下室側壁中における鉄筋の見かけの分極抵抗は、Ss法では2.94～11.5 kΩ、Nb法では0.249～1.43 kΩ、Ns法では0.249～1.71 kΩであった。また、分極抵抗は、Ss法では40.6～160 kΩ・cm^2、Nb法では33.4～387 kΩ・cm^2、Ns法では7.0～64.4 kΩ・cm^{2}であった。なお、測定時の含水率は4.0～5.9%であり、平均4.7%であった。

各測定法による見かけの分極抵抗と測定時の含水率を表－1.1に、分極抵抗を表－1.2に示す。

表－1.1 見かけの分極抵抗（単位：kΩ）と測定時の含水率

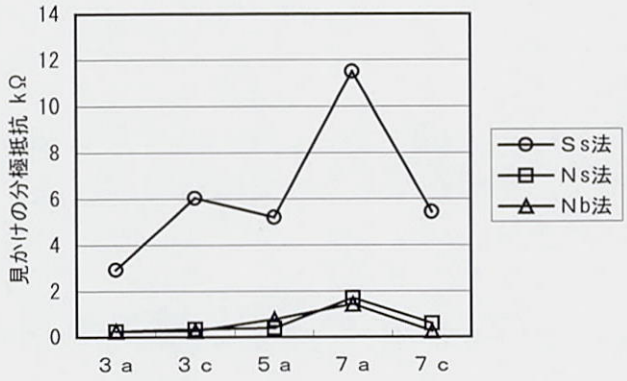
測定点	Ss法	Nb法	Ns法	含水率(%)
３ａ	2.94	0.249	0.249	4.4
３ｃ	6.05	0.257	0.347	5.9
５ａ	5.22	0.768	0.384	4.5
７ａ	11.5	1.43	1.71	4.0
７ｃ	5.45	0.255	0.594	4.8

表－1.2 分極抵抗（単位：kΩ・cm^2）

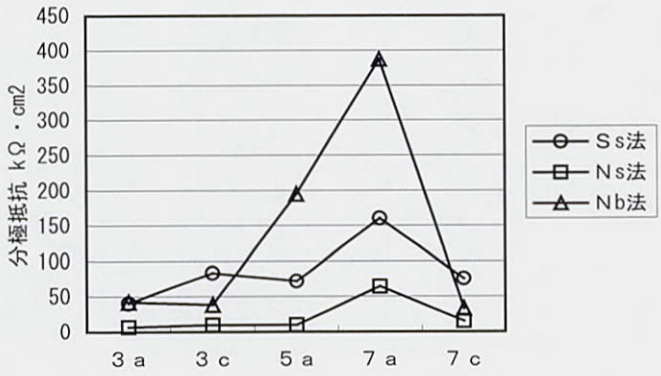
測定点	Ss法	Nb法	Ns法
３ａ	40.6	42.5	7.0
３ｃ	83.6	38.8	9.8
５ａ	72.1	195	10.0
７ａ	160	387	64.4
７ｃ	75.4	33.4	15.3

1.6.3　鉄筋の腐食状況の推定

図－1.10 は見かけの分極抵抗（kΩ）の値を示し、図－1.11 は各測定機器独自の換算方法で分極抵抗（kΩ・cm²）の値に換算したものを示したものである。この結果から、見かけの分極抵抗の場合はNb 法とNs 法が、分極抵抗の場合はSs 法とNs 法が同様の傾向を示し、測定点７ａが他の測定点よりも大きい値を示していることがわかる。



図－1.10 見かけの分極抵抗（単位：kΩ）



図－1.11 分極抵抗（単位：kΩ・cm²）

鉄筋の腐食状況の推定は、「コンクリート構造物の健全度診断マニュアル（案）平成 10 年３月（以下、診断マニュアル案）」における分極抵抗法での腐食性の判定基準を参考として行った。推定の結果、測定点３ａは腐食性あり（腐食度大は 40 kΩ・cm² 以下）、測定点７ａは腐食性なし（腐食なしは 60 kΩ・cm² より大）と評価され、その他の測定点については測定に使用した機種ごとに分極抵抗の測定結果が大きく異なっていて、一律な判断が下せない結果となった。

1.6.4　考察

鉄筋の腐食状況の確認は、診断マニュアル案の詳細調査手法によると、はつり調査により確認することを基本としている。今回の実験でも、はつり調査を行って地下室側壁中の鉄筋の腐食状況を確認した。このはつり調査結果から、はつり出した地下室側壁中の鉄筋は腐食しておらず、健全な状態を保持していることが確認された。

今回の実験では、測定法（使用した測定装置）の違いによって測定値に大きな差異が生じる結果となった。各測定法により測定結果に違いが生じた原因は明らかではないが、以下の項目が理由として考えられる。

1）分極範囲の捉え方が異なっている。

これは、図-1.10と図-1.11を比較してみれば分かるとおり、見掛けの分極抵抗から分極抵抗への換算方法が大きく異なっている。これは、センサーの面積の違いとともに、分極範囲の捉え方が異なっているためであると考えられる。

2）低周波側の周波数の設定値が異なっている。

この点については、第Ⅰ部図-3.3に一例を示しているが、印加する電圧の周波数に関して、特に低周波数側でインピーダンスの値に差が生じている。特に、塩分を含まない場合では、その違いは顕著となる。交流インピーダンス法を用いてより正確に分極抵抗の値を求めるには、低周波数側の周波数の設定値を小さくすることが望ましいが、一方で、周波数を小さくした場合は、一点あたりの測定に要する時間が非常に長くかかる結果となり、実用上の問題が生じかねない。

今後、さらに検討を加え、必要十分な周波数の設定値について明確にすることが望まれる。

3）見かけの分極抵抗の計算方法に違いがある。

見かけの分極抵抗を計算する際、単純に高周波側で測定されたインピーダンスと低周波側で測定されたインピーダンスの差を分極抵抗とする方法と、それぞれの周波数において複素インピーダンスを測定し、位相遅れも加味して分極抵抗を計算する方法が考えられ、このような計算方法の違いも分極抵抗の値に違いを生じさせる一つの原因になるものと推測される。

いずれにしても、分極抵抗法は、自然電位法と比べると、測定機器ならびに方法ははるかに複雑であり、測定機器ごとに測定結果の違いを生じさせる原因も、多岐にわたるものと考えられる。測定方法を標準化できれば、分極抵抗法および分極抵抗の測定結果に基づく鉄筋腐食速度推定に対する信頼性が増すとともに、相互比較も可能となる。しかし、上記のような検討課題が残されているのが現状であり、今後、試験・測定方法の標準化に向けて、一層の調査研究が望まれるところである。

2．旧芦川橋Ｇ１桁における測定結果の比較検討

2.1 検討概要

通常、コンクリート中の鉄筋の腐食状況については、電気化学的手法による非破壊検査の測定結果やはつりによる目視確認によって判断・評価がなされている。しかし、電気化学的手法による非破壊検査の多くは単一の機種で行われており、測定機器の違いや測定者の違いによる測定結果への影響については、横並びに比較検証されていないのが現状である。そのため、これらの判断・評価が真に正しいかどうかの疑問があった。そこで、前回の共同研究の成果である「コンクリート構造物の鉄筋腐食診断技術に関する共同研究報告書－実構造物に対する適用結果－平成１３年３月」(以下、「報告書」と称す)、「第Ⅲ部：第３章：旧芦川橋Ｇ１桁の電気化学的手法による鉄筋腐食の推定」における各社の測定結果を整理して、測定機器の違いによる測定結果の差異について比較検討を行った。

本章では、測定結果の比較検討から明らかになった測定方法の違いによる特徴的事項について述べる。なお、この測定は各測定者が通常使用している測定機器を用いて通常の作業手順により実施されたものであり、測定箇所、使用機器、測定方法等の詳細については前述した「報告書」を参照されたい。

測定者、使用機器の略号、測定項目を表－2.1　に示す。

表－2.1　測定機器・測定項目（旧芦川橋）

測定方法	測定機器	測定項目（○：測定したもの）			
		自然電位	分極抵抗	比抵抗	含水率
Dk 法	Nc 社製 ｺﾛｰｼﾞｮﾝﾊﾝﾀｰ TR-01	○	－	○	○ (K 社製 HI-500)
Fb 法	P 社製 CANIN	○	－	○ （P 社製 RESI）	－
Nb 法	Nb 社製 RC-NICE	○	○	○	－
Tk 法	A社製 鉄筋腐食診断機	○	○	○ (電気抵抗を測定)	－

2.2 測定結果の比較検討

調査結果の一覧表と自然電位法による鉄筋腐食の推定を表－2.2～表－2.5 に示す。また、以下に自然電位、分極抵抗、コンクリート比抵抗の比較検討結果を示す。

2.2.1 自然電位〔４方法４機種で測定：Dk 法、Fb 法、Nb 法、Tk 法〕

① 測定点数は各測定方法により大きく異なる。Dk 法は縦横共に５cm ピッチを基本とし、A面（1.3m×0.8m）では 442 点の測定を行っている。Fb 法は 10cm ピッチ、A面で 126 点である。Nb 法は自然電位、分極抵抗、比抵抗を同時に測定することで鋼材腐食を総合的に判断するシステムであるため、計測点を

鉄筋の交叉部直上とし、A面で８点である。Tk 法は 20cm ピッチ、A面で 18 点である。

② 測定対象である橋桁のA面について測定を実施した 4 方法のうち３方法〔Dk 法、Fb 法、Nb 法〕の自然電位の測定結果は、評価指標のなかの「Ⅱ：腐食やや大、Ⅲ：腐食軽微」の範囲にほとんど入っていた。しかし、Tk 法の測定結果は「Ⅳ：腐食なし」となった。はつり後の写真（「報告書」P.233～234）からは、鉄筋は点錆程度の表面的な腐食状況にあると見られるため、実際の鉄筋腐食度をⅢまたはⅣとすると、前者の３方法の測定結果は過大な評価、後者は過小な評価であったと考えられる。

③ B面については、Dk 法では左上部が「Ⅰ：腐食大」となり、他の部位は「Ⅱ：腐食やや大」となっている。Fb 法ではほとんどが「Ⅱ：腐食やや大、Ⅲ：腐食軽微」である。また、Nb 法と Tk 法はほとんどが「Ⅲ：腐食軽微」である。はつり後の写真（「報告書」P.235～236）からは、左上部のシース管の腐食は大きいが鉄筋は点錆程度で孔食などの腐食まで至っていないように見受けられる。シース部の腐食度をⅡまたはⅠ、鉄筋の腐食度をⅢと判定すると、Dk 法は全体的に過大な評価となり、Fb 法は比較的妥当な評価であったと考えられる。また、Nb 法と Tk 法は全体的に比較的過小な評価であったと考えられる。

④ A面とB面の測定結果から、Dk 法と Fb 法は過大な評価になる可能性があり、Nb 法と Tk 法は過小な評価になる可能性があると考えられる。

2.2.2 分極抵抗〔２方法２機種で測定：Nb 法、Tk 法〕

① 分極抵抗は、Nb 法と Tk 法の測定値における単位の整合性が不明であるため、比較評価ができなかった。

② Nb 法では、A面については 30～90kΩ・c ㎡となり腐食度Ⅰ～Ⅳにあると評価された。また、B面についてはA面より腐食が進行しているにも関わらず、1270～8420 kΩ・c ㎡となって腐食度Ⅳと評価された。

2.2.3 コンクリート比抵抗〔４方法４機種で測定：Dk 法、Fb 法、Nb 法、Tk 法〕

① A面、B面ともに共通しているが、４方法〔Dk 法、Fb 法、Nb 法、Tk 法〕のうち、Dk 法と Fb 法は測定値が概ね 40～50kΩ・cm となった。Nb 法は約 30kΩ・cm と他の２方法に比べて小さな値を示した。Tk 法は他の測定方法と単位の整合性がないために本評価から除いた。

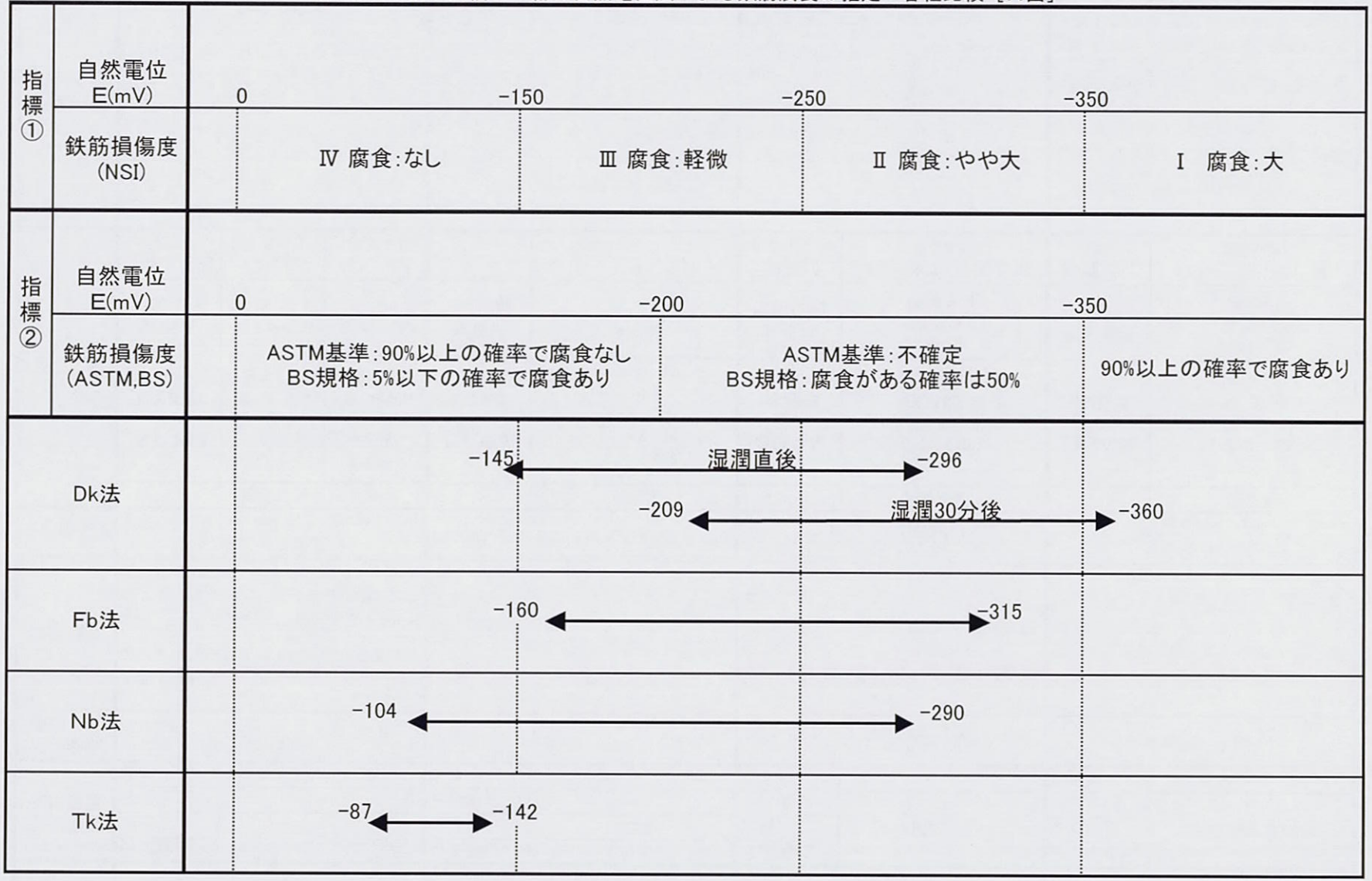
以上より、測定結果には、測定方法の違いによって多少過大あるいは過小な評価となる場合やある程度のばらつきのあることが判明した。この原因は、測定機器の違い、測定環境の違い、測定者の違いなどによるものと考えられる。今後の課題として、測定機器の違いを確認するとともに、測定条件を同一とした測定方法の違いによる結果比較を行うことが必要であるといえる。

表－2.2　旧芦川橋Ｇ１桁の電気化学的手法による鉄筋腐食の推定　結果一覧表　〔Ａ面〕

	Dk法			Fb法		Nb法		Tk法	
計測項目 使用機器	自然電位 比抵抗	ｺﾛｰｼﾞｮﾝﾊﾝﾀｰTR-01		自然電位 比抵抗	CANIN RESI	自然電位 比抵抗	NICEｼｽﾃﾑ	自然電位 電気抵抗 分極抵抗	鉄筋腐食診断機
	分極抵抗	－		分極抵抗	－	分極抵抗			
	含水率	HI-500		含水率	－	含水率	－	含水率	－
測定間隔 測定点数	自然電位　5cmピッチ〔422点〕 比抵抗　５点、　含水率　５点			自然電位　10cmピッチ〔126点〕 比抵抗　１点		３項目同時に測定 測定ポイント→鉄筋交差部　∴８点		20cmピッチ〔18点〕	
測定概要	①ローラー式鉛照合電極による鉄筋の電位測定 ②上記の結果を飽和硫酸銅電極基準に換算 ③かぶりコンクリートの電位を測定し、かぶりコンクリートの影響を補正			ローラー式硫酸銅照合電極による鉄筋の電位測定		飽和甘こう照合電極と通電用対極銀板から構成される３電極方式 (吸水性高分子にKCL飽和水溶液を含浸)		飽和硫酸銅電極による鉄筋の電位測定	
事前処理等	測定面を湿潤 (測定は湿潤直後と30分後)			事前のｺﾝｸﾘｰﾄ表面の加湿処理は不要		測定面を湿潤 (測定は30分後)		測定面を湿潤 (測定は30分後)	
測定結果		湿潤直後	30分後		測定値		測定値		測定値
	自然電位 (mV) NSI基準	-296～ -145 Ⅱ:29.0% Ⅲ:70.8% Ⅳ: 0.2% (表3.1.2)	-360～ -209 Ⅰ: 0.3% Ⅱ:66.7% Ⅲ:33.0% (表3.1.2)	自然電位 (mV) NSI基準	-315～-160 Ⅱ:24.6% Ⅲ:75.4% (表3.2.1)	自然電位 (mV) NSI基準	-290～-104 Ⅲ:37.5% Ⅳ:62.5% (図3.3.11)	自然電位 (mV) NSI基準	-142～-87 Ⅳ:100% (表3.4.1)
	比抵抗 (kΩ・cm)	34.9～82.0 (平均 53.8)	28.5～57.3 (平均 48.0)	比抵抗 (kΩ・cm)	46.0 (表1.2.1)	比抵抗 (kΩ・cm)	12.2～35.9 (図3.3.6)	電気抵抗 (kΩ)	1.1～2.6 (表3.4.1)
	含水率 (%)	4.9～5.9 (平均5.4)	5.6～6.0 (平均5.7)	－	－	分極抵抗 (kΩ・cm^2)	30.5～89.6 (図3.3.4)	分極抵抗 (kΩ)	0.0～2.2 (表3.4.1)
「報告書」の 見解概要	①含水率は、湿潤直後より30分後がやや大きくなった。 ②比抵抗は、湿潤直後と30分後では30分後が小さくなる傾向にあった。 ③自然電位は、湿潤直後より30分後が卑の方向にある。 30分後の自然電位測定結果から、自然電位が-360～-209mVの範囲(損傷度Ⅰ～Ⅲ)にあり、コンクリート中の鉄筋は腐食環境にあると考えられる。また、上面より下面の方が-電位の絶対値が大きかった。			自然電位は-315～-160mVの範囲（損傷度Ⅱ、Ⅲ）にあり、コンクリート中の鉄筋は腐食環境にあると考えられる。 また、上面より下面の方が-電位の絶対値が大きかった。		①鉄筋腐食評価は、腐食大が5.1%、軽微が91.8%、無しが3.1%であった。 ②塩害の影響を受けている領域は、99.9%であった。 ③腐食大に移行する危険性有りの領域は、86.5%であった。		①自然電位(現状の腐食度の評価指標)から判断すると全測定ポイントで-150mV以下であり、本調査箇所における鉄筋は腐食まで至っていないと思われる。 ②分極抵抗を見ると、中央部の上部から下面で分極抵抗が小さく、腐食速度が速い傾向を示している。 ③コンクリート抵抗値(腐食環境の評価指標)を見ると測定面下面及び右側で鉄筋を取り囲むコンクリートの環境が悪い傾向を示している。	

［注］測定結果欄の（表*.*.*）、（図*.*.*）は「報告書」での表、および図番号

表－2.3　旧芦川橋Ｇ１桁の自然電位法による鉄筋腐食の推定　各社比較［Ａ面］

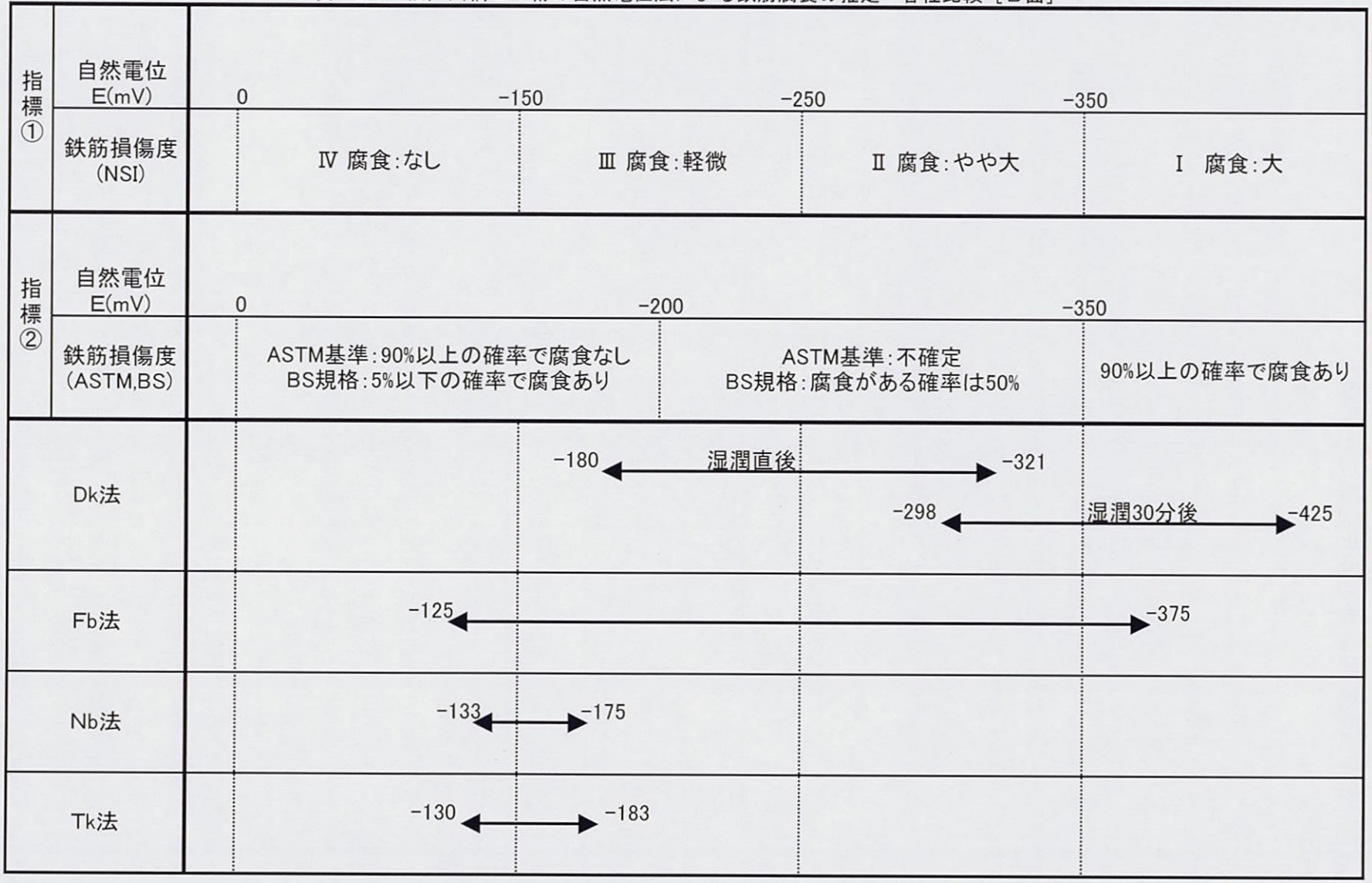


表－2.4　旧芦川橋Ｇ１桁の電気化学的手法による鉄筋腐食の推定　結果一覧表　〔Ｂ面〕

	Dk法			Fb法		Nb法		Tk法	
計測項目 使用機器	自然電位 比抵抗	ｺﾛｰｼﾞｮﾝﾊﾝﾀｰTR-01		自然電位 比抵抗	CANIN RESI	自然電位 比抵抗 分極抵抗	NICEｼｽﾃﾑ	自然電位 電気抵抗 分極抵抗	鉄筋腐食診断機
	分極抵抗	－		分極抵抗	－				
	含水率	HI-500		含水率	－	含水率	－	含水率	－
測定間隔 測定点数	自然電位　5cmピッチ 比抵抗　６点、　含水率　６点			自然電位　10cmピッチ 比抵抗　６点		３項目同時に測定 測定ポイント→鉄筋交差部　∴６点		20cmピッチ〔10点〕	
測定概要	①ローラー式鉛照合電極による鉄筋の電位測定 ②上記の結果を飽和硫酸銅電極基準に換算 ③かぶりコンクリートの電位を測定し、かぶりコンクリートの影響を補正			ローラー式硫酸銅照合電極による鉄筋の電位測定		飽和甘こう照合電極と通電用対極銀板から構成される３電極方式 (吸水性高分子にKCL飽和水溶液を含浸)		飽和硫酸銅電極による鉄筋の電位測定	
事前処理等	測定面を湿潤 (測定は湿潤直後と30分後)			事前のｺﾝｸﾘｰﾄ表面の加湿処理は不要		測定面を湿潤 (測定は30分後)		測定面を湿潤 (測定は30分後)	
測定結果		湿潤直後	30分後		測定値		測定値		測定値
	自然電位 (mV) NSI基準	-321～ -180 Ⅱ:12.7% Ⅲ:87.3％ (表3.1.2)	-425～ -298 Ⅰ:25.2% Ⅱ:74.8% (表3.1.2)	自然電位 (mV) NSI基準	-375～-125 Ⅰ:　2.2％ Ⅱ:44.1％ Ⅲ:51.6％ Ⅳ:　2.2％ (表3.2.1)	自然電位 (mV) NSI基準	-133～-175 (平均-159) Ⅲ:83.3　% Ⅳ:16.7　% (図3.3.11)	自然電位 (mV) NSI基準	-130～-183 (平均-168) Ⅲ:90％ Ⅳ:10％ (表3.4.1)
	比抵抗 (kΩ・cm)	44.2～60.3 (平均 50.8)	37.6～52.5 (平均43.4)	比抵抗 (kΩ・cm)	平均45 (表1.2.1)	比抵抗 (kΩ・cm)	26.6～30.4 (平均28.7) (図3.3.14)	電気抵抗 (kΩ)	0.40～2.21 (平均1.29) (表3.4.1)
	含水率 (%)	4.4～5.5 (平均4.9)	4.5～5.2 (平均4.8)	－	－	分極抵抗 (kΩ・cm^2)	1270～8420(平均3190) (図3.3.12)	分極抵抗 (kΩ)	0.51～2.31(平均1.51) (表3.4.1)
「報告書」の 見解概要	①含水率は、湿潤直後より30分後がやや大きくなった。 ②抵抗率は、湿潤直後と30分後で30分後が小さくなる傾向を示した。 ③自然電位は、湿潤直後より30分後が卑の方向にある。 30分後の結果をみると、自然電位は中央部で-360～-209mVの範囲(鉄筋の損傷度Ⅰ～Ⅲ)、端部で-425～-298mVの範囲（鉄筋の損傷度Ⅰ～Ⅱ）にあり、鉄筋の腐食が中央部より端部で進行していると判断される。			自然電位は、ＰＣ桁上部の方が下部よりも－電位の絶対値が大きくなった。また、調査範囲の左端は局部的に－電位の絶対値が大きくなった。この箇所にひびが入っていたことも－電位が大きく出た原因の一つと考えられる。		測定面積：　0.11m^2 ①　鉄筋腐食評価－腐食無し(青色)：　100.00　% ②　腐食大に移行する危険性－移行領域（紫）　：　96.48　% ③　塩害の影響を受けている領域－塩害影響領域（緑）　：　96.48　%		①自然電位(現状の腐食度の評価指標)から判断すると全測定ﾎﾟｲﾝﾄで-150～　-200mVであり、本調査箇所における鉄筋は腐食まで至っていないと思われる。ただし、供試体Ａ面と比較すると腐食は進んでいる状態にあると思われる。 ②総合的に評価すると測定面中央部付近がやや腐食度が高いと思われる。	

［注］測定結果欄の（表*.*.*）、（図*.*.*）は「報告書」での表、および図番号

表－2.5　旧芦川橋Ｇ１桁の自然電位法による鉄筋腐食の推定　各社比較［Ｂ面］



3．旧暮坪橋Ｐ３橋脚における測定結果の比較検討

3.1　検討概要

本章では、第２章と同様の理由により、前回の共同研究の成果である「コンクリート構造物の鉄筋腐食診断技術に関する共同研究報告書－実構造物に対する適用結果－　平成１３年３月」(以下、「報告書」と称す)、「第Ⅲ部：第２章：旧暮坪橋Ｐ３橋脚の電気化学的手法による鉄筋腐食の推定」における各社の測定結果を整理して、測定機器の違いによる測定結果の差異について比較検討を行った。

ここでは、測定結果の比較検討から明らかになった測定方法の違いによる特徴的事項について述べる。なお、この測定は各測定者が通常使用している測定機器を用いて通常の作業手順により実施されたものであり、測定箇所、使用機器、測定方法等の詳細については前述した「報告書」を参照されたい。

測定者、使用機器の略号、測定項目を表－3.1　に示す。

表－3.1　測定機器・測定項目（旧芦川橋）

測定方法	測定機器	測定項目（○：測定したもの）			
		自然電位	分極抵抗	比抵抗	含水率
Dk 法	Ｎｃ社製 ｺﾛｰｼﾞｮﾝﾊﾝﾀｰ TR-01	○	－	○	○ (K 社製 HI-500)
Fb 法	Ｐ社製 CANIN	○	－	－	－
Nb 法	Ｎｂ社製 RC-NICE	○	○	○	－
Tk 法	Ａ社製 鉄筋腐食診断機	○	○	○ (電気抵抗を測定)	－

3.2　測定結果の比較検討

調査結果の一覧表と自然電位法による鉄筋腐食の推定を表－3.2～表－3.5 に示す。また、以下に自然電位、分極抵抗、コンクリート比抵抗の比較検討結果を示す。なお、Ｔｋ法による自然電位の測定値は、飽和塩化銀電極での測定値であるため、他の照合電極との整合性を図り、「報告書」の測定値に－120mＶを補正した飽和硫酸銅電極基準に換算した。

3.2.1 自然電位〔４方法４機種で測定：Dk 法、Fb 法、Nb 法、Tk 法〕

①　Ａ面の自然電位は、Fb 法を除く３方法〔Dk 法、Nb 法、Tk 法〕で、測定結果が評価指標の「Ⅳ：腐食なし」にあった。Fb 法による測定結果は、他の３方法に比べてばらつきが大きく、評価指標の「Ⅲ：腐食軽微」に占める割合が測定総数の 95.6%となり、他の３方法よりも卑な電位にあった。

②　上記①における Fb 法の-50～-100mV の５測点については、使用したローラー電極の測定誤差が確認されたため、真のデータではないと判断して今回は削除した。また、他の測点については測定面全体を 28

ブロックに分けて各ブロックにおける腐食度を求めた。各ブロックの自然電位の平均値が-180～-233mVにあり、鉄筋の腐食度はすべて「Ⅲ：腐食:軽微」にあった。

③　A面は、測定後に実施したはつり調査の結果（「報告書」P. 140～）から、鉄筋が腐食していることが明らかとなっている（「報告書」P. 145～146)。本橋脚における鉄筋の腐食度評価に関しては、Fb 法が他の３方法に比べてより現実に近い測定結果を示した。

④　B面の自然電位は、Fb 法の測定結果が他の２方法に比べてばらつきが大きく、卑な方向にあった。

3.2.2 分極抵抗〔２方法２機種で測定：Nb 法、Tk 法〕

①　分極抵抗は、Nb 法と Tk 法の測定値における単位の整合性が不明であるため、比較評価が出来なかった。

②　Nb 法の結果はA面とB面を総合して 224～16500kΩ・cm^2 の範囲にあり、ばらつきが大きく、分極抵抗の指標であるRp〔40kΩ・cm^2～60kΩ・cm^2〕に対してかなり大きい値を示している。

3.2.3 コンクリート比抵抗〔３方法３機種で測定：Dk 法、Nb 法、Tk 法〕

①　A面、B面ともに、３方法〔Dk 法、Nb 法、Tk 法〕のうち２方法〔Dk 法、Nb 法〕は、測定値が概ね 30kΩ・cm と同程度以下の小さい値を示した。結果から、本橋脚は塩害の影響を少なからず受けているのではないかと思われる。Tk 法については、測定値の単位が他の２方法と異なるため比較の対象外とした。

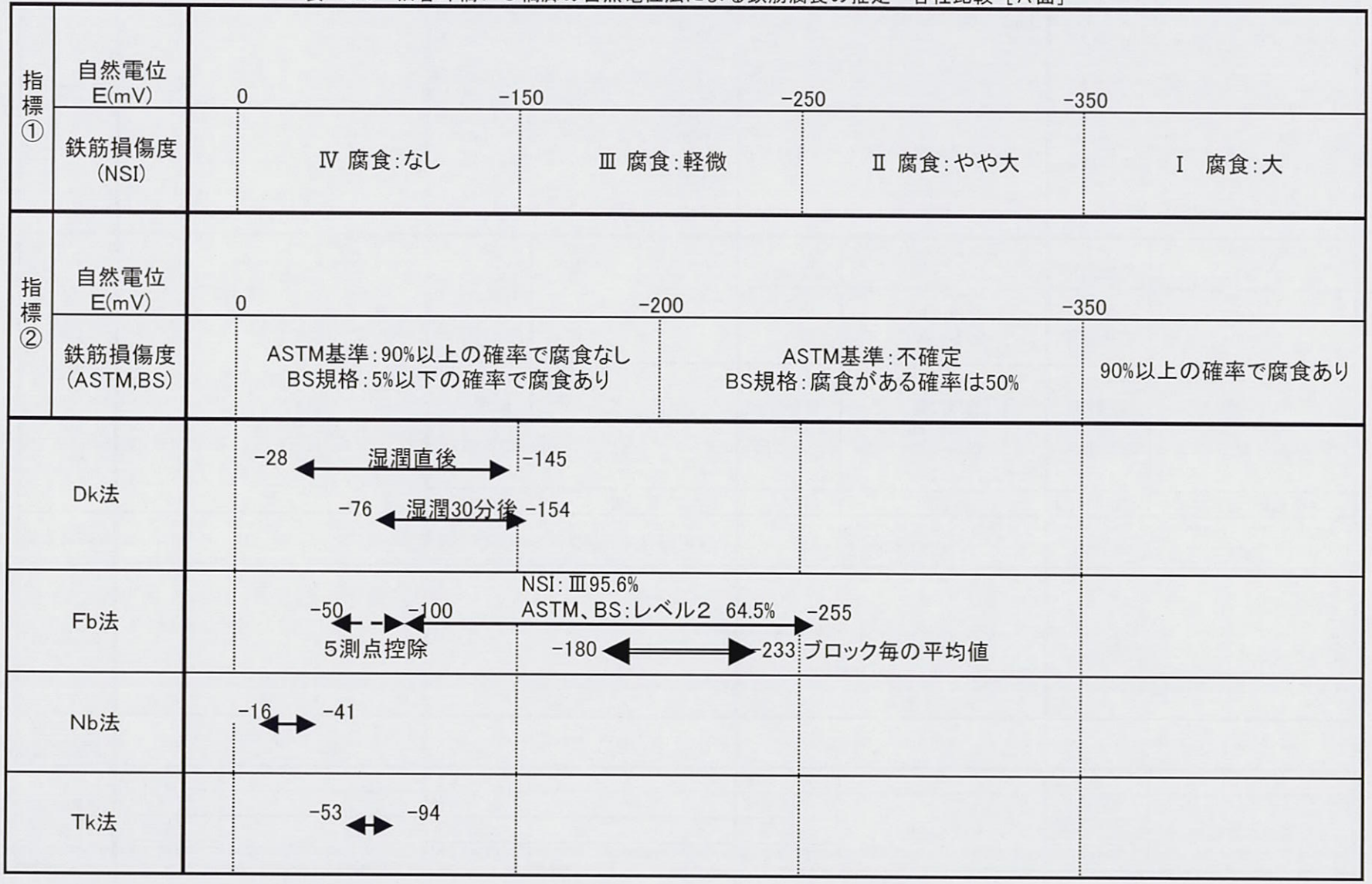
以上より、測定結果には、第２章と同様に測定方法の違いによって多少過大あるいは過小な評価となる場合やばらつきのあることが判明した。この原因は、測定機器の違い、測定環境の違い、測定者の違いなどによるものと考えられる。今後の課題として、測定機器の違いを確認するとともに、測定条件を同一とした測定方法の違いによる結果比較を行うことが必要であるといえる。

表－3.2　旧暮坪橋Ｐ３橋脚の電気化学的手法による鉄筋腐食の推定　結果一覧表　〔Ａ面〕

	Dk法			Fb法		Nb法		Tk法	
計測項目 使用機器	自然電位	ｺﾛｰｼﾞｮﾝﾊﾝﾀｰTR-01		自然電位	CANIN	自然電位	NICEｼｽﾃﾑ	自然電位	鉄筋腐食診断機
	比抵抗			比抵抗	－	比抵抗		電気抵抗	
	分極抵抗	－		分極抵抗	－	分極抵抗		分極抵抗	
	含水率	HI-500		含水率	－	含水率	－	含水率	－
測定間隔 測定点数	自然電位　5cmピッチ〔200点〕 比抵抗　5点、含水率　5点			5cmピッチ〔200点〕		18～51cmピッチ〔12点〕		20cmピッチ〔16点〕	
測定概要	①ローラー式鉛照合電極による鉄筋の電位測定 ②上記の結果を飽和硫酸銅電極基準に換算 ③かぶりコンクリートの電位を測定し、かぶりコンクリートの影響を補正			ローラー式硫酸銅照合電極による鉄筋の電位測定		飽和甘こう照合電極と通電用対極銀板から構成される３電極方式 (吸水性高分子にKCL飽和水溶液を含浸)		飽和硫酸銅電極による鉄筋の電位測定	
事前処理等	測定面を湿潤 (測定は湿潤直後と30分後)			事前のｺﾝｸﾘｰﾄ表面の加湿処理は不要		測定面を湿潤 (測定は30分後)		測定面を湿潤 (測定は30分後)	
測定結果		湿潤直後	30分後		測定値		測定値		測定値(換算後)
	自然電位 (mV) NSI基準	-145～-28 Ⅳ:100% (表3.1.4)	-154～-76 Ⅳ:99.8% Ⅲ: 0.2% (表3.1.4)	自然電位 (mV) NSI基準	-255～-50 Ⅳ:2.7% Ⅲ:95.6% Ⅱ:1.8% (表3.2.3)	自然電位 (mV) NSI基準	-41～-16 Ⅳ:100% (図3.3.12)	自然電位 (mV) NSI基準	-94～-53 Ⅳ:100% (図3.4.4)
	比抵抗 (kΩ・cm)	1.0～27.3 (平均14.1)	20.5～39.8 (平均33.5)	－	－	比抵抗 (kΩ・cm)	9.93～22.4 (図3.3.15)	電気抵抗 (kΩ)	0.4～3.1 (図3.4.4)
	含水率 (%)	4.4～4.8 (平均4.5)	4.5～5.0 (平均4.7)			分極抵抗 (kΩ・cm^2)	224～5140 (図3.3.13)	分極抵抗 (kΩ)	0.3～3.4 (図3.4.4)
「報告書」の 見解概要	①含水率は、湿潤直後より30分後がやや大きくなった。 ②比抵抗は、湿潤直後と30分後でほぼ同等もしくは直後より30分後がやや大きくなる傾向にあった。 ③自然電位は、湿潤直後より30分後が卑の方向にある。 自然電位測定結果から、自然電位が-154mvより貴の方向にあり(損傷度Ⅲ～Ⅳ)、ｺﾝｸﾘｰﾄ中の鉄筋はほぼ健全な状態に保たれていると考えられる。			①橋脚に向かい右側は電位が-200～-250mV、左側が-150～-200mVを示した。 ②ｱｰｽをとった部分の鉄筋の状態から推測すると、内部の鉄筋は健全であると考えられる。 ③この構造物は海中に位置していたことから、ｺﾝｸﾘｰﾄ表面の何らかの影響で比較的大きなﾏｲﾅｽ電位となったものと考えられる。		① 腐食なしの領域(発錆面積率5%未満) 100% ② 塩害の影響を受けている領域 100% ③ 近々に腐食大に移行する領域 100%		①自然電位(現状の腐食度の評価指標)から判断すると全測定ﾎﾟｲﾝﾄで0～+70mVであり、本調査箇所における鉄筋は腐食まで至っていないと思われる。 ②分極抵抗を見ると、測定面上部で分極抵抗が小さく、腐食速度が速い傾向を示している。 ③ｺﾝｸﾘｰﾄ抵抗値(腐食環境の評価指標)を見ると測定面上部で鉄筋を取り囲むｺﾝｸﾘｰﾄの環境が悪い傾向を示している。	

［注］測定結果欄の(表*.*.*)、(図*.*.*)は「報告書」での表、および図番号

表－3.3　旧暮坪橋Ｐ３橋脚の自然電位法による鉄筋腐食の推定　各社比較［Ａ面］



表－3.4　旧暮坪橋Ｐ３橋脚の電気化学的手法による鉄筋腐食の推定　結果一覧表　〔Ｂ面〕

	Dk法		Fb法		Nb法		Tk法	
計測項目 使用機器	自然電位	－	自然電位	CANIN	自然電位	NICEｼｽﾃﾑ	自然電位	鉄筋腐食診断機
	比抵抗	－	比抵抗	－	比抵抗		電気抵抗	
	分極抵抗	－	分極抵抗	－	分極抵抗		分極抵抗	
	含水率	－	含水率	－	含水率	－	含水率	－
測定間隔 測定点数	測定無し		5cmピッチ〔200点〕		21～52cmピッチ〔12点〕		20cmピッチ〔16点〕	
測定概要	－		ローラー式硫酸銅照合電極による鉄筋の電位測定		飽和甘こう照合電極と通電用対極銀板から構成される３電極方式 (吸水性高分子にKCL飽和水溶液を含浸)		飽和硫酸銅電極による鉄筋の電位測定	
事前処理等	－		事前のｺﾝｸﾘｰﾄ表面の加湿処理は不要		測定面を湿潤 (測定は30分後)		測定面を湿潤 (測定は30分後)	
測定結果	－			測定値		測定値		測定値(換算後)
			自然電位 (mV) NSI基準	-175～-40 Ⅳ:91.5% Ⅲ:8.5% (表3.2.3)	自然電位 (mV) NSI基準	-35～-20 Ⅳ:100% (図3.3.12)	自然電位 (mV) NSI基準	-100～-69 Ⅳ:100% (図3.4.5)
			－	－	比抵抗 (kΩ・cm)	10.4～21.6 (図3.3.15)	電気抵抗 (kΩ)	0.4～2.2 (図3.4.5)
					分極抵抗 (kΩ・cm^2)	815～16500 (図3.3.13)	分極抵抗 (kΩ)	1.2～2.8 (図3.4.5)
「報告書」の 見解概要	－		①測定した電位は-200mVより大きく、測定範囲内ではほとんど数値に変化が見られなかった。 ②Ａ面と比較すると、より貴な電位を測定しており、また、ｱｰｽ部分の鉄筋状態から判断しても、Ａ面と同様に健全な状態にあったと言える。 Ａ面およびＢ面の結果から、橋脚は健全な状態を維持していると考えられる。		① 腐食なしの領域(発錆面積率5%未満) 100% ② 塩害の影響を受けている領域 100% ③ 近々に腐食大に移行する領域 100%		①自然電位(現状の腐食度の評価指標)から判断すると全測定ﾎﾟｲﾝﾄで0～+51mVであり、本調査箇所における鉄筋は腐食まで至っていないと思われる。 ②分極抵抗を見ると、測定面全体的に腐食速度が遅い傾向を示している。 ③ｺﾝｸﾘｰﾄ抵抗値(腐食環境の評価指標)を見ると測定面左部でｺﾝｸﾘｰﾄの環境が悪い傾向を示している。	

［注］測定結果欄の(表*.*.*) 、(図*.*.*) は「報告書」での表、および図番号

表－3.5　旧暮坪橋Ｐ３橋脚の自然電位法による鉄筋腐食の推定　各社比較［Ｂ面］

指標①	自然電位 E(mV)	0	−150	−250	−350
	鉄筋損傷度 (NSI)	Ⅳ 腐食:なし	Ⅲ 腐食:軽微	Ⅱ 腐食:やや大	Ⅰ 腐食:大
指標②	自然電位 E(mV)	0	−200		−350
	鉄筋損傷度 (ASTM,BS)	ASTM基準:90%以上の確率で腐食なし BS規格:5%以下の確率で腐食あり		ASTM基準:不確定 BS規格:腐食がある確率は50%	90%以上の確率で腐食あり
Dk法					
Fb法		−40 NSI:Ⅳ91.5% −175			
Nb法		−20 −35			
Tk法		−69 −100			

第Ⅲ部　測定方法に関する提案

1．自然電位法

1.1　原　理

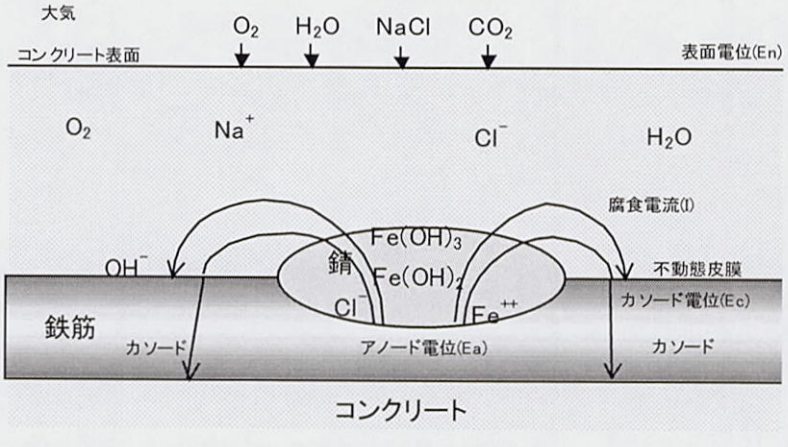
健全なコンクリートはセメントの水和によって生成した水酸化カルシウムにより強いアルカリ性を示す。コンクリート内部の鉄筋は，この高アルカリにより表面に不動態被膜が形成され保護されている。しかし，高アルカリのもととなる水酸化カルシウムは，時間の経過とともにコンクリート表面から徐々に浸透する大気中の炭酸ガスと反応して炭酸カルシウムとなる。これが，中性化であり，式で表すと下式のように示される。

$$Ca(OH)_2 \quad + \quad CO_2 \quad \rightarrow \quad CaCO_3 + H_2O$$

中性化によって鉄筋表面の不動態皮膜の保護能力が低下した所へ，水と酸素の供給があると，鉄筋腐食が生じるようになる。

一方，コンクリート中に浸透した塩化物イオンも，鉄筋表面の不動態皮膜の破壊を引き起こし，鉄筋腐食の原因となる。一般的には，塩化物イオンに起因する鉄筋腐食の方が，中性化による鉄筋腐食よりも進行速度は大きく，構造物の耐荷性能に重大な影響を及ぼしやすい。

鉄筋の腐食機構を図－1.1に示す。



図－1.1　腐食機構

アノード(陽極)部における反応とカソード(陰極)における反応は，同時に進行して下式のように示される。

$$\text{アノード反応} \quad : \quad Fe \quad \rightarrow \quad Fe^{++} \quad + \quad 2e^-$$

カソード反応　：　$1/2\ O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^-$

全反応　：　$Fe + 1/2\ O_2 + H_2O \rightarrow Fe(OH)_2$　　（白～淡緑色）

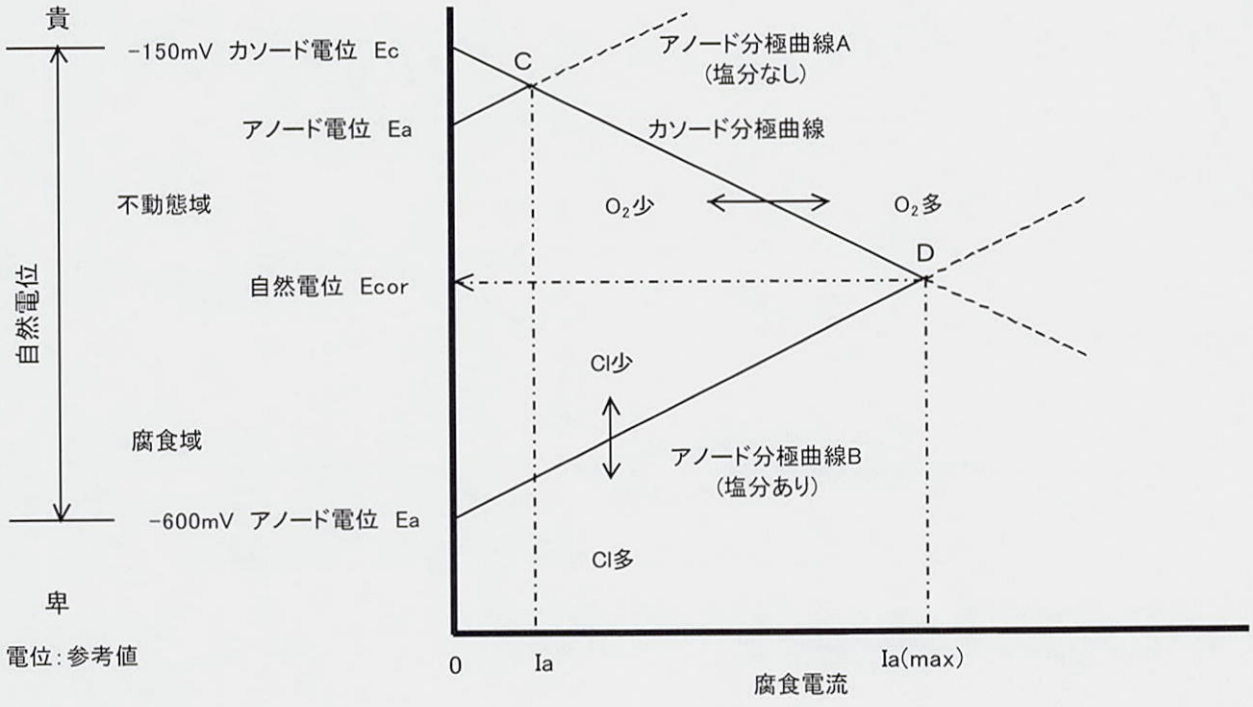
図中のEaはアノード(陽極)部の真の自然電位であり，Ecはカソード(陰極)部の真の自然電位を示したものである。しかし，実際の自然電位は，コンクリート表面で実測されるので，その自然電位値にはEa～Ec間の電位に加えてかぶりコンクリート部分に生じる液間電位差などを含んでいる。

さらに，上記の反応により生じた水酸化第一鉄[$Fe(OH)_2$]に溶存酸素(H_2O+O_2)の供給があれば，水酸化第二鉄[$Fe(OH)_3$]の赤錆が発生する。

$Fe(OH)_2 + 1/4\ O_2 + 1/2\ H_2O \rightarrow Fe(OH)_3$　（赤褐色）

なお，実際の錆は，鉄表面に水酸化第一鉄[$Fe(OH)_2$，溶解度 1.44×10^{-4} g/100gH_2O]があり，その上に水酸化第二鉄[$Fe(OH)_3$，溶解度 4.8×10^{-9} g/100gH_2O]が存在する混合物(赤錆)になっている。

鉄筋の表面に水と酸素が供給され，腐食反応が活性化された状態になると，鉄筋の自然電位にも腐食状況が反映され，腐食反応が進行していない場合とは異なった値になる。



図－1.2　アノード／カソード分極曲線（電位：飽和硫酸銅電極基準）

前述したように，腐食反応はアノード反応とカソード反応から成り立っており，同時に進行している。この関係をアノード分極曲線とカソード分極曲線から解説する。図－1.2はアルカリ性溶液中における塩素イオンを含まない場合のアノード分極曲線Aおよび塩素イオンを含んでいる場合のアノード分極曲線Bの概念図を同時に示したものである。この分極曲線は，強制的に電流を流して得られるものであり，実コンクリート中では起こり得ない分極曲線部は点線で示してある。

図中のアノード分極曲線A，Bとカソード分極曲線との交点C，Dの電位値は，何れも自然電位であり，この図のようにC点の自然電位は不動態域にあり，ごく微小な腐食電流(Ia)では鉄筋腐食は起こらない。これがD点のように腐食域にある場合には，アノード部となる鉄筋表面から腐食電流(Ia)が流出して，その電流に応じた鉄筋腐食を起こす。アノード部から流出した腐食電流は，同じ電流(Ic)だけカソード部へ流入する。

腐食電流は，アノード，カソード間の電位差とそれぞれの接地抵抗の大小によって決まるが，コンクリート中の鉄筋などの場合には，アノード，カソードの電流の流出入する面積を特定できないので求めることはできない。なお，アノード分極曲線およびカソード分極曲線の勾配は，溶存酸素(O_2)や塩素イオン(Cl^-)濃度の多少で変化し，同時に自然電位も変わる。

自然電位法は，このように自然電位と鉄筋の腐食状況との間に密接な関係があると言う原理を利用したものである。

1.2　自然電位法を適用する上での基本的な注意事項

前述のように，自然電位は鉄筋の腐食状況を反映した値となるため，これを適切に測定することができれば，コンクリート構造物の鉄筋腐食診断に利用できる。

しかし，金属の自然電位は本来均一な(液体)電解質中で測定されて始めて精度の高い値が実測されるものであり，コンクリートなどの多孔質な固体電解質では，コンクリート表面から鉄筋の間で様々な不均一状態が存在するので，本質的に精度の高い自然電位測定値を得ることは期待できない。自然電位法をコンクリート構造物に応用する際に心がけておきたいことは，高精度の測定値を得ることよりは，むしろ，誤った測定値を得ることのないよう，適切な測定条件を確保することにある。

自然電位の測定に適切な条件とは，コンクリートと鉄筋とが水分などの電解質を介して密着状態にあることである。

ここで，コンクリート表面に設置された照合電極と鉄筋間に欠陥による空隙があった場合には，測定される自然電位の値は照合電極に近い空隙端部の密着部の平均的な電位であり，測定値の解釈には注意を要する。

また，コンクリート表面への散布水が極部に集中して，連続した水垂れや水膜が生じた状態で測定が行われた場合も，照合電極直下の自然電位を捉えられない場合がある。

それに類した例として，健全な鉄筋直上のコンクリート表面に，水を染み込ませたスポンジを介して照合電極を当てて自然電位の測定を行った場合に，スポンジから水垂れを起こす場合がある。その水垂れが下部のクラック部内部に連続して流れ込み腐食鉄筋に接触したとすれば，測定される自然電位値は，照合電極の設置直下の電位ではなく，腐食部の鉄筋電位を測定することになる恐れがあるので注意しなければならない。

このような基本的な注意事項をふまえ，自然電位の測定に不備が生じないよう，以下に標準的な実施方法についてまとめることとする。

1.3 測定方法

1.3.1 測定対象および測定箇所

測定対象は大気中に曝された土木用鉄筋コンクリート構造物の鋼材とする。測定箇所および測定点数を決める場合には，対象構造物の規模，構造上の特徴あるいは環境条件などを考慮して決定する。

1.3.2 測定機器

測定機器は，①高入力抵抗電位差計(電位差計)，②照合電極，および③鉄筋接続用リード線などから構成されている。

照合電極の種類には種々のものがあり，測定形式の違いにより，一点一点測定するスポット式のものと一度に連続して複数点の測定が可能なローラー式のものがある。

いずれの測定器も現場で使用する際には，測定前後に適切なキャリブレーションを行う必要がある。

1.3.3 測定上の留意事項

自然電位の測定に先立ち，電位差計や照合電極などの機器は，あらかじめ十分な検査，検定や調整を行い，正確に作動することを確認しておかなければならない。また，測定面の湿潤状態の調整にも注意する必要がある。

自然電位を測定する際の，測定装置および測定条件にかかわる注意事項について以下に述べる。

① 自然電位測定に用いる電位差計の入力インピーダンスは，陽分極，陰分極あるいは電圧降下などの誤差を避けるために 100MΩ以上が望ましい。

② 正しい自然電位を測定するには，事前に使用する照合電極の誤差チェックを行う必要がある。そのチェック方法は，常に安定した電位を示す照合電極と使用電極との間の電位差を測定することにより行われる。もし，誤差が大きければ，照合電極あるいは使用電極の改善などが必要となる。

③ コンクリート表面は，時として非常な乾燥状態と中性化などによりイオン電導を失うような状態となり，測定電位に誤差を与える。これを避けるために，事前に測定部位のコンクリート表面を散水器あるいは湿布などを用いて十分に湿潤状態にし，30 分以上の湿潤時間を確保した後に測定を開始する。なお，コンクリート表面に散布する湿潤液(接触液)は，コンクリート表面を汚染させないことを考慮して，水道水あるいは水酸化カルシウム[$Ca(OH)_2$]の飽和溶液を用いるのがよい。

④ 自然電位の測定は，測定面の含水状態が最初と最後で大きく変化しない間に格子状(碁盤目)に迅速に行う必要がある。

⑤ 塩害を受けない内陸の鉄筋コンクリート構造物で，中性化が進んだ上に高乾燥状態にあるコンクリート中の鉄筋の自然電位は，鉄筋近傍の内部電位とコンクリート表面で測定される表面電位との間には数 10mV～100mV 程度の液間電位差などを生じていることがある。そのための補正電位を測定することが必要となる。なお，一般的には内部電位が表面電位よりも卑な電位である。

1.3.4　測定準備

測定準備に際しては，自然電位の測定に必要な機材の準備，鉄筋のはつり出しおよびコンクリート表面への散水および湿布による測定環境の調整を行う。

(1)　自然電位測定用準備機材

測定に必要な機材は，主に①～⑥の機材であり，⑦～⑯の機材は一般的に準備する機材である。

① 高入力抵抗電位差計 …… 自然電位を測定するための計器
② 計測用照合電極 …… 自然電位を測定するためのセンサー
③ 電位照合用電極 …… 測定に使用する照合電極を照合するための基準電極
④ テスター(鉄筋導通試験用) …… 市販のテスター（①を用いてもよい）
⑤ 鉄筋接続用リード線 …… 鉄筋と電位差計間を接続するためのリード線
⑥ 散水器／噴霧器 …… コンクリート表面を湿潤させるために必要
⑦ 鉄筋位置探査計 …… 鉄筋位置およびコンクリートかぶり厚さを測定する機器
⑧ フェノールフタレイン溶液 …… 中性化状況の判断に必要
⑨ カメラ …… 種々の現場写真を撮るために必要
⑩ コードリール …… 測定現場と電源間の配線に必要
⑪ 巻尺 …… 測定対象物あるいは位置などを測定するために必要
⑫ コンクリートハンマードリル …… 鉄筋のはつり出しに必要
⑬ 打検ハンマー …… コンクリートの浮きあるいは剥離状態の確認のために必要
⑭ ヤスリ …… 鉄筋へのリード線の接続のための鉄筋表面の研磨に必要
⑮ スケッチブック …… ひび割れ状態などのスケッチに必要
⑯ ノギス，スケールなど …… 中性化深さの測定，ひび割れ長さの測定などに必要

(2)　鉄筋のはつり出し

鉄筋のはつり出しは，

① 必要に応じて補正電位の測定
② 鉄筋の腐食状態の観察(スケッチ，腐食面積率などの記録)
③ 鉄筋接続用リード線の接続（接続部分の錆は研磨して落としておく）

に必要となる。はつり箇所はできるだけ測定面内か，その近傍が望ましく，はつり作業に際しては鉄筋を傷つけないように丁寧に行う。

(3)　測定箇所のマーキングと散水および湿布による測定環境の調整

測定面となるコンクリート表面に指定された測定間隔で格子状に油性黒色ペンなどで測定位置をマーキングする。次に，測定面には十分にかつ均一に散水または湿布し，湿潤時間を 30 分以上確保した後に測定に入る。

1.3.5　測定手順

(1)　スポット式の照合電極を用いる場合の測定手順

スポット式の照合電極を用いる場合の自然電位の測定は，図－1.3 に示すように，脱脂綿やスポンジなどに水を含ませ，十分に絞ってコンクリート表面に当て，その上に筒型の照合電極を設置させて，鉄筋直上あるいは格子状に一点づつ測定し記録する。

(2)　ローラー式の照合電極を用いる場合の測定手順

ローラー式の照合電極の外周に高吸水性のスポンジを装着した回転式照合電極を用いる場合の手順を以下に示す。なお，回転式照合電極と組み合わせる電位差計は，何れもコンピューターが内蔵されている。

ただし，測定準備の段階で既に図－1.4 に示すように測定位置がマーキングされ，散水による測定面の調整が行われているものとする。

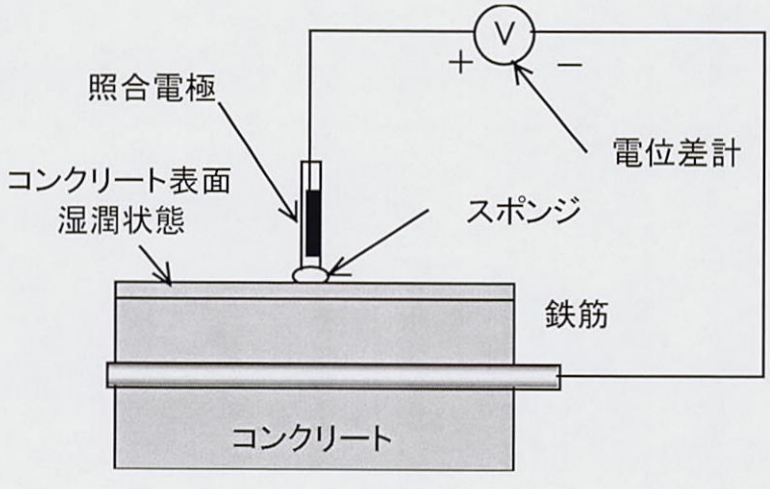
① 鉄筋とコンピューター内蔵型電位差計(計器本体)間を鉄筋接続用リード線で接続する。

② 計器本体のファンクションキーなどを用いて測定条件を入力し，測定開始状態にセットする。

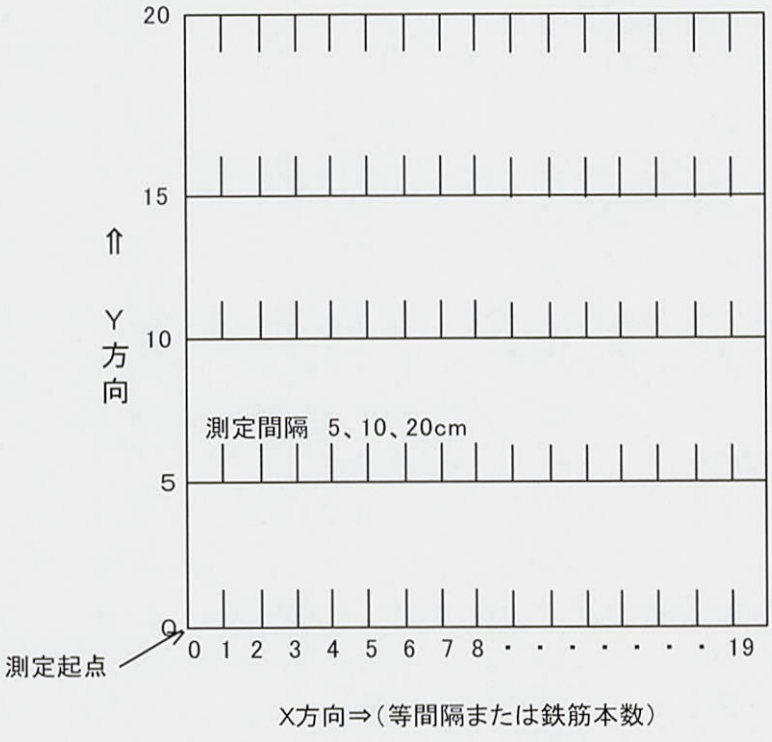
③ 回転式照合電極を測定点に接触させ，Y 方向にセンサーを連続走査させて記憶・保存する。

なお，計器本体に記憶・保存されたデータは電位分布図として処理される。

さらに，測定データはコンピューターに転送され，等電位線図として表示した後にプリントアウトする。



図－1.3　自然電位の測定方法



図－1.4　測定範囲のマーキング

1.4 測定記録

測定結果の報告には，以下の項目のうち必要なものを記録する。

① 対象構造物名，測定箇所の位置

② 測定年月日，測定者

③ 環境条件（天候，気温，湿度など）

④ 対象構造物のプロフィル（竣工年月日，コンクリート配合，配筋図など）

⑤ 測定箇所（コンクリート表面）のスケッチまたは写真

⑥ 測定点の位置

⑦ 使用した測定機器名

⑧ 自然電位の等電位線図，累加頻度図

⑨ 影響因子（含有塩分量，中性化深さ，かぶり厚さなど）

⑩ 腐食状況の評価

⑪ その他特記事項

各測定点での個々の自然電位の絶対値は重要ではあるが，自然電位の等電位線図や累加頻度図を作成し，測定箇所の自然電位を面的かつ総合的に捉えることも，測定部位の腐食状態を推定する上で重要である。

2．分極抵抗法

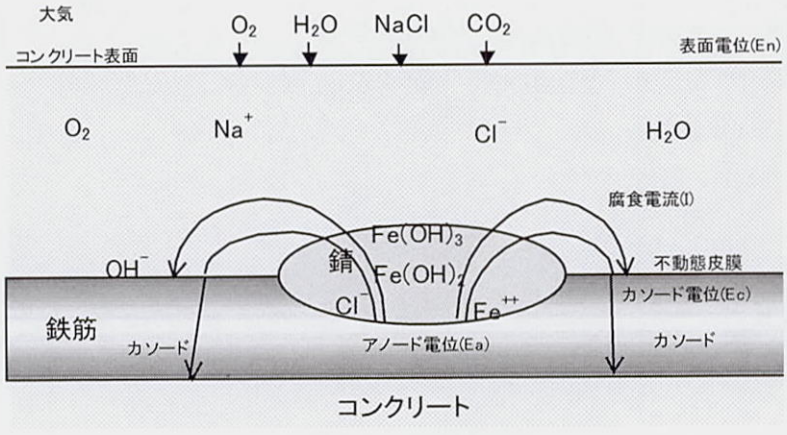
2.1 原　理

2.1.1 分極抵抗の原理

1.1に示したように，コンクリート中の鉄筋表面に腐食が生じると，腐食した箇所がアノード部となり，カソード部（腐食していない部分）と間での電子の授受に伴い腐食電流が発生する（図－2.1 参照）。この腐食電流は，鉄筋の腐食速度を表すものであり，鉄筋の腐食状況を評価するための重要な情報となる。

腐食電流は鉄筋表面でやりとりされる内部電流であるため，直接測定することはできない。

ここで，鉄筋に外部から微小な電位差（10～20mV）を負荷すると，加えた電位差⊿Eと負荷により生じた微小電流⊿Iとの間に式－2.1 に示すような直線関係がある。分極抵抗法は，このことを利用し，式－2.2 に示すような分極抵抗と腐食電流との関係から，腐食電流を推定しようとするものである。



図－2.1　腐食機構

$$\Delta E = \Delta I \cdot Rp \quad \cdots\cdots (2.1)$$

$$I\,corr = K \cdot \Delta I / \Delta E = K / Rp \quad \cdots\cdots (2.2)$$

ここで，

Rp　：分極抵抗（Ω・cm²）

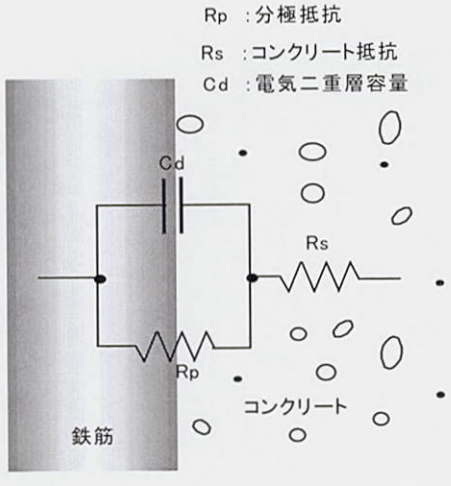
I corr　：腐食電流（A／cm²）

K：金属の種類，環境等によって決定される定数(V)

（既往の研究結果ではKは0.020～0.030V 程度）

分極抵抗を求めるための手法として，直流分極抵抗法および交流インピーダンス法がある。

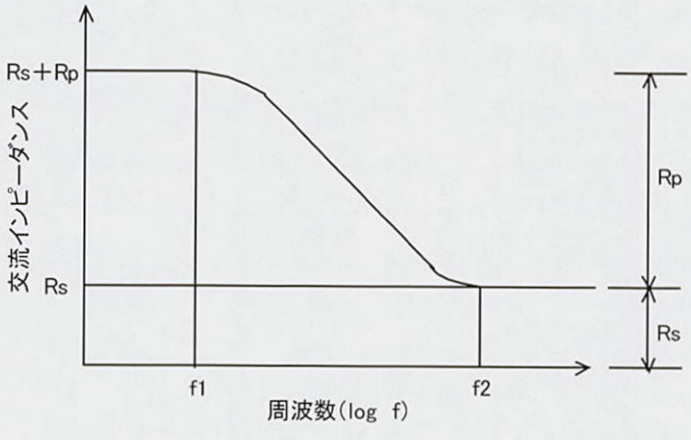
交流インピーダンス法では，コンクリート中の鉄筋腐食反応を，図－2.2 に示すように分極抵抗およびコンクリート抵抗に相当するような電気回路と考える。このような等価回路が形成されるコンクリート中の鉄筋表面に高周波（100～10000Hz）の交流電流（電圧）を与えると，容量成分 Cd は充電されず，電流は図中 Rp の経路を通り，逆に，低周波（0.01～0.001Hz）を与えると，容量成分 Cd は充電され，電流は Cd



図－2.2　腐食模擬回路

の経路を通ることから，周波数を漸次変化させていけば，図－2.3 に示すような周波数とインピーダンスの関係が得られ，分極抵抗 Rp とコンクリート抵抗 Rs を求めることができる。交流インピーダンス法の利点としては，測定された分極抵抗 Rp の信頼性が高いことと分極抵抗 Rp とコンクリート抵抗 Rs を同時に測定できることが挙げられる。

直流分極抵抗法では，直流電圧（電流）を負荷し，式－2.2 を用いて分極抵抗を測定する。直流を用いた場合も基本的な原理は同じであるが，分極抵抗を捉えるためには，図-2.2 に示す容量成分 Cd が充電されるまで負荷を継続する必要がある。直流分極抵抗法で求めた Rp は交流インピーダンス法の Rs の成分を含んでいるため，両者の Rp では意味が異なることを注意する必要がある。



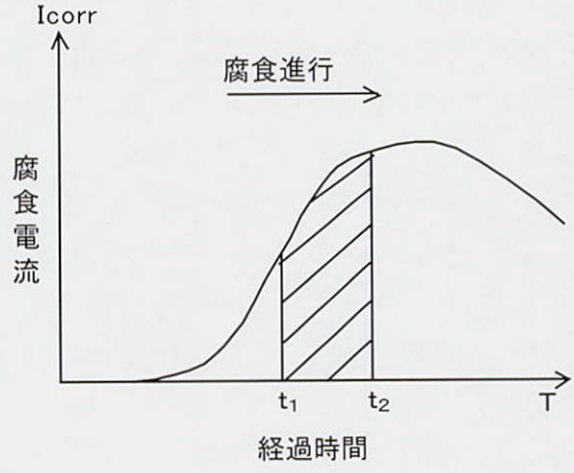
図－2.3　周波数とｲﾝﾋﾟｰﾀﾞﾝｽの関係

2.1.2　腐食速度の推定原理

分極抵抗から得られる腐食電流を用いて，コンクリート中の鉄筋の腐食速度を推定することができる。

前項で示したように，分極抵抗Rp が測定されれば式－2.2から腐食電流密度 I corr が求められる。

腐食電流は腐食の進行に伴い，図－2.4のように変化するものと推測され，調査時に得られた分極抵抗値から，その時点での腐食速度の推定が可能となる。現状では，まだ十分に信頼性の高い指標とは言えないため，評価の信頼性を増すために，測定箇所を面的に捉え，測定値の相対的な評価を行うことが必要である。腐食の可能性が高いと推定される箇所（分極抵抗値の小さい箇所）を選定し，かぶりコンクリートをはつり，鉄筋腐食の有無を確認することが望ましい。



図－2.4　腐食速度の経時変化

また，期間 t_1～t_2 間の腐食電流密度 I corr の時間積分値（図－2.4）から，ファラデーの第二法則より，その期間の鉄筋の腐食減量と正の相関を有し，腐食減量は式－2.3から，腐食速度は式－2.4から求められる。

$$\text{腐食減量}\quad W(\text{mg}/\text{cm}^2)=\frac{a}{c}\times\int_{t_1}^{t_2} Icorr\ \ dt \qquad \cdots\cdots (2.3)$$

$$\text{腐食速度}\quad \dot{W}(\text{mg}/\text{cm}^2)=\frac{1}{(t_2-t_1)}\times\frac{a}{c}\times\int_{t_1}^{t_2} Icorr\ \ dt \qquad \cdots\cdots (2.4)$$

ここで，

I corr：腐食電流密度（A／cm^2）

W　：腐食減量　　（mg／cm^2）

$\dot{W}$　：腐食速度　　（mg/cm^2/s）

a　：鉄の１グラム当量（27900mg）

c　：１クーロン（96500A・s）

上述のとおり，腐食電流は経時的に変化する。一つの測定結果は，その時点での腐食状況評価の目安になるものの，信頼性を向上させるためには，１回／年程度の定期的な測定を行うことが望ましい。特に，腐食進行の将来予測を行う場合，腐食電流の経時変化を把握することが必要不可欠になるものと考えられる。

2.2　分極抵抗法を適用する上での基本的な注意事項

分極抵抗法も電気化学的モニタリング手法の一つであるため，自然電位法の場合と同様に，電流の経路となるかぶりコンクリートおよび鉄筋が良好な通電性を有していることが，精度の高い測定結果を得るための条件となる。たとえば，コンクリート表面に通電性の悪い表面被覆がある場合やかぶりコンクリートの浮きなどが認められる箇所では適用は困難となる。また，測定点直下に大きな空隙やジャンカ等の不均一な状態が存在する場合は，電流の経路が電気抵抗の大きな空隙やジャンカ部を避けて流れるため，必ずしも精度の高い測定値が得られないことがある。

2.3　測定方法

2.3.1　測定対象および測定箇所

測定対象は大気に曝されたコンクリート構造物中の鉄筋とし，その測定箇所はその構造物の規模，構造あるいは環境などを考慮して決定する。

分極抵抗法はコンクリート構造物のコンクリート表面部分に適用できるが，一般に１測定点当たりの測定時間が10 分程度かかるので，測定対象面積が大きい場合は全体を調査するための膨大な時間と労力が必要となる。そのため，構造物の規模，構造あるいは腐食環境などを考慮して，適切な測定範囲と測定箇所を選定する必要がある。

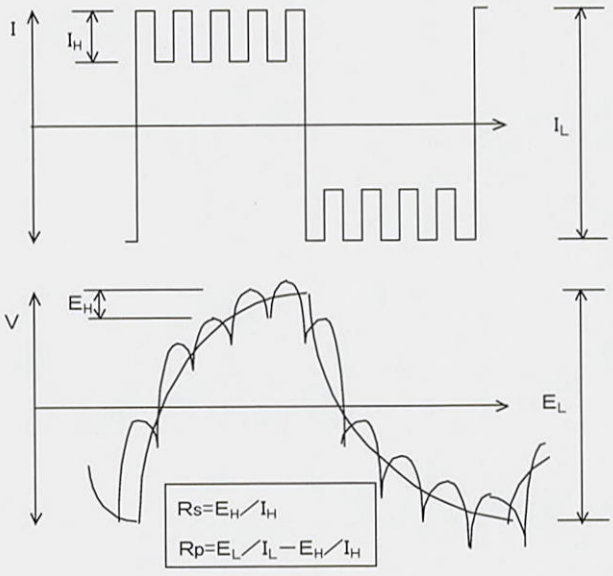
2.3.2　測定機器

測定機器は，①ポテンショスタット，②照合電極等を含むプローブ，③鉄筋接続用リード線などから構成されている。

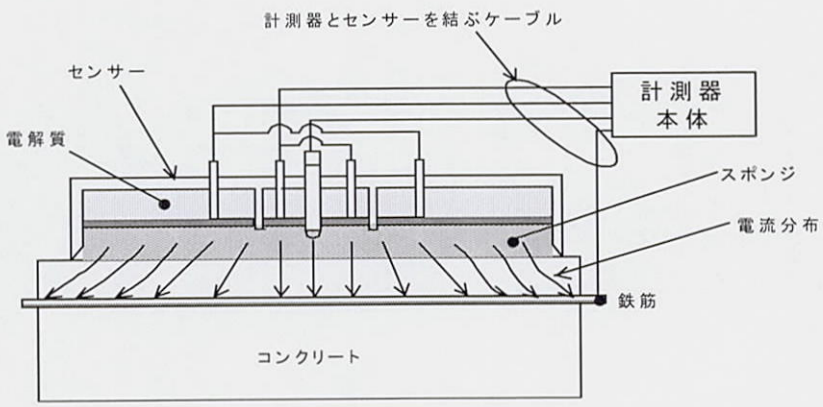
交流インピーダンス法では，高周波と低周波を重畳させた定電流パルス（図－2.5 参照）を与えられる装置が測定時間の短縮に有効である。

また，測定対象としている鋼材の領域を明確にするため，コンクリート中を流れる電流の広がりを限定するセンサー（図－2.6 参照）も開発されている。

ただし，対極の材質によっては，正しい測定ができない場合があるので留意が必要であるとの指摘もある。



図－2.5　定電流パルスの模式図



図－2.6　二重対極方式

2.3.3 測定上の留意事項

分極抵抗の測定に先立ち，測定器はあらかじめ十分な検査，検定や調整を行い，正確に作動することを確認しておかなければならない。また，測定面の湿潤状態の調整にも注意する必要がある。測定装置および測定条件にかかわる注意事項について以下に述べる。

測定値に影響を及ぼす主な因子を以下に示す。

① 測定器に起因するもの：測定器（照合電極）の精度・安定性など。

② 測定方法に起因するもの：測定の前準備（散水），鉄筋との接続状況，センサーとコンクリート表面との接触状況など。

③ コンクリートの品質に起因するもの：含有塩分量，かぶり，中性化，鉄筋間の電気的接続状況など。

分極抵抗測定時（測定前）においては，できる限り上記の影響因子を取り除くこと，あるいは影響因子を定量的に把握しておく必要がある。特に，コンクリートの電気抵抗は，かぶりコンクリートの品質（かぶり，含有塩分量，含有水分量など）の影響を強く受け，その影響程度が著しく大きな場合には，分極抵抗がマスキングされ，正しい測定値が得られない場合がある。影響の程度の定量的把握は，まだ十分に解明されていないものの，影響程度を極力小さくするため，測定時に測定箇所のかぶりコンクリートを十分湿潤し，コンクリートの電気的な抵抗を小さくすることが重要となる。場合によっては，別途四極法によるコンクリートの電気抵抗を測定することも併せて実施し，かぶりコンクリートの電気的な性状に大きな変動がないか確認すると良い。

2.3.4 測定準備

測定に先立ち，測定面，測定点の選定，コンクリート表面の研磨，鉄筋のはつり出しなどの準備を行う。

測定準備の手順例を以下に示す。

① 調査対象面を選定し，入手可能であれば設計図，配筋図などを揃える。

② 鉄筋探査計器などを用い，鉄筋位置およびかぶりを調べ，鉄筋位置にマーカーなどで印を付ける。

③ コンクリート表面にモルタル仕上げなどがなされている場合，モルタル層とコンクリート層の間の剥離などにより電気的に大きな抵抗が生じ，測定が困難になったり，あるいは間違った測定結果を得ることがあるため，注意が必要となる。また，モルタル仕上げをしていない場合でもコンクリート表面の凹凸が激しい場合，表面を平滑にし，ゴミなどを取り除くために電動ブラシなどで表面を研磨する。

④ 測定点の設定は，上記①，②での鉄筋位置調査結果を基に，鉄筋上に設定する。特に，鉄筋が格子状に配置され，縦筋と横筋を区別して測定したい場合は，縦筋と横筋の交点を避け，各辺中央に測定点を設定する必要がある。

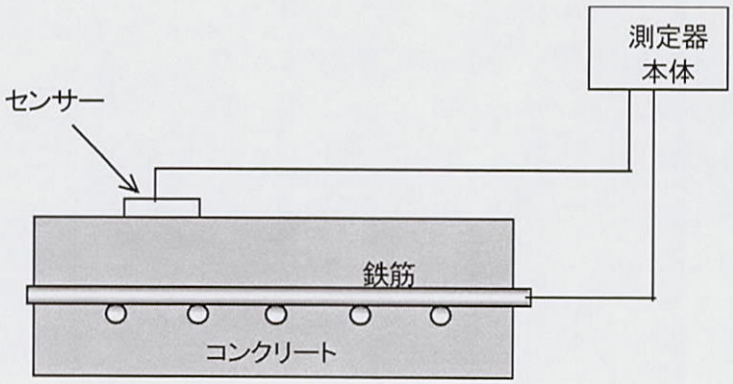
⑤ 測定面において，鉄筋の露出している箇所がある場合は，そこから鉄筋リード線を取る。鉄筋が露出していない場合は，構造物への影響がなるべく少なくなるような適切な箇所のコンクリートをはつり取って鉄筋を露出させ，鉄筋接続部をヤスリなどで磨いて錆を除去し，接触抵抗を小さくする。また，すべての鉄筋間に導通があるか否かを確認するため，接続部と異なる箇所の鉄筋を露出させ，電位差計を用いて鉄筋間の導通を確認する。電位差が 1 mV 以下であれば，導通があるものとする。

⑥ 測定面のかぶりコンクリートを十分な湿潤状態にするため，水道水を 30 分以上前から散水器および噴霧器を使用して散水または湿布する。また，測定途中でコンクリート表面が乾燥する場合には，随時水道水を散水して湿潤状態を保つ。

⑦ センサーの点検およびセンサーがコンクリート表面と十分接触しているか否かを確認する。

2.3.5　測定方法

測定の準備が終了した後，測定対象の鉄筋を図－2.7に示すように接続する。次に，定めた測定点にセンサーを当て，測定値を読み取る。場合によってはコンピューターなどのメモリーに記憶させる。



図－2.7　接続方法

2.4 測定記録

測定結果の報告には，以下の項目のうち必要なものを記録する。

① 対象構造物名，測定位置
② 測定年月日，測定者
③ 環境条件（天候，気温，湿度など）
④ 対象構造物のプロフィル（竣工年月日，コンクリートの配合，配筋図など）
⑤ 測定箇所（コンクリート表面）のスケッチまたは写真
⑥ 使用した測定機器名（センサーの種類，測定周波数を含む）
⑦ 単位面積当りの分極抵抗値への換算方法
⑧ 分極抵抗の等分極線図
⑨ 影響因子（含有塩分量，中性化深さ，かぶり厚さなど）
⑩ 腐食状況の評価
⑪ その他特記事項