

論文 セメント系材料の電気抵抗率測定方法に関する基礎的検討

川俣 孝治^{*1}・守屋 進^{*2}・内藤 英晴^{*3}・皆川 浩^{*4}

要旨：電気防食工法の最適設計においては、陽極被覆材および断面修復材となるセメント系材料の電気抵抗率を正しく評価することが防食電流の均一性確保の点から重要である。しかしながら、電気抵抗率に及ぼす測定方法の影響については明らかではなく、測定方法により抵抗率の評価が異なるのが現状である。本研究では、簡易な電気抵抗率測定方法の提案することを目的に、電流・電圧・周波数などの試験条件、供試体の養生条件、各種材料配合など、各種条件が電気抵抗率に及ぼす影響について実験的検討を行った。

キーワード：電気抵抗率，電気防食，電気化学的防食工法，防食電流，最適設計

1. はじめに

コンクリートの耐久性低下の一つである塩害の補修対策として、電気防食工法は厳しい塩害環境でも有効な対策工法として着目されている。この電気防食工法は、コンクリート構造物に陽極を設置し、コンクリート内部の鉄筋やPC鋼材などの鋼材を陰極として、直流の防食電流を供給することで鋼材表面の腐食反応を抑制する方法である。電気防食による鋼材の腐食抑制は、鋼材が防食電流により適正量に分極することにより達成される。この防食電流による鋼材の分極は、鋼材自身の分極抵抗に影響し、分極抵抗が大きいほど所要の分極量を得るに必要な防食電流は小さくなる。但し、これは陽極と鋼材との間に存在するコンクリートの抵抗が均一であると仮定した場合である。コンクリートの抵抗に局所的な大小が存在すると、これに反比例した電流が鋼材に供給されるため、分極量に過不足が生じる結果となる。電気防食の効果に影響を及ぼす可能性のあるものとして、土木学会「電気化学的防食工法設計施工指針(案)」¹⁾では、1) 浮き・はく落、2) ひび割れ、3) 補修履歴としている。1) および2) は構造物の劣化

変状に伴い抵抗が変化する可能性のあるものであり、3) は補修材料自身の抵抗に起因するものである。なお、1) および2) については、適切な補修が必要であり、補修後には3) と同様な扱いとなる。したがって、電気防食の最適設計においては、断面修復材などの補修材の抵抗率を正しく評価することが防食電流の均一性確保の点から重要となる。

本研究では、簡易な電気抵抗率測定方法を提案することを目的として、四電極法と二電極法を取り上げ、比較検討した。次に、四電極法に着目し、周波数や電流、電圧など通電条件、電極の種類や間隔などの電極条件、供試体の寸法、養生条件などが四電極法の試験結果に及ぼす影響について検討した。

2. 電気抵抗率測定方法に関する検討

比較的簡易な測定方法として、四電極法と二電極法を取り上げ、比較検討した。

2.1 実験概要

(1) 供試体の作製

検討に用いた供試体は、40×40×160mmの形状である。JIS R 5201のセメント強さ試験に準じ

*1 住友大阪セメント(株) 建材事業部事業推進グループ課長 博士(工学) (正会員)

*2 (独) 土木研究所 材料地盤研究グループ新材料研究チーム主任研究員

*3 五洋建設(株) 土木部門土木本部土木部部长 博士(工学) (正会員)

*4 住友大阪セメント(株) 建材事業部事業推進グループ 博士(工学) (正会員)

て、普通ポルトランドセメントおよびセメント協会標準砂を用いて、W/C=50% S/C=3 の配合で作製した。作製した供試体は、養生室(温度 20°C, 湿度 60%R.H.) にて、それぞれ、気中養生、水中養生、封かん養生を行った。

(2) 抵抗率測定方法

a) 四電極法

四電極法の測定概念図を図-1 に示す。供試体の両端の通電極に交流の定電圧を印加，点接触させた中央の測定端子間の電位差を測定し，次式により抵抗率を算出した。なお，本研究では，単位体積当りの抵抗を抵抗率と定義し，以下の検討を実施した。

$$\rho = \frac{V}{I} \times \frac{S}{L} \quad (1)$$

ここに， ρ : 抵抗率 ($\Omega \cdot \text{cm}$)

V : 測定端子間の電位差 (mV)

I : 通電電流 (mA)

S : 電流の流れる断面積 (cm^2)

L : 測定端子間の距離 (cm)

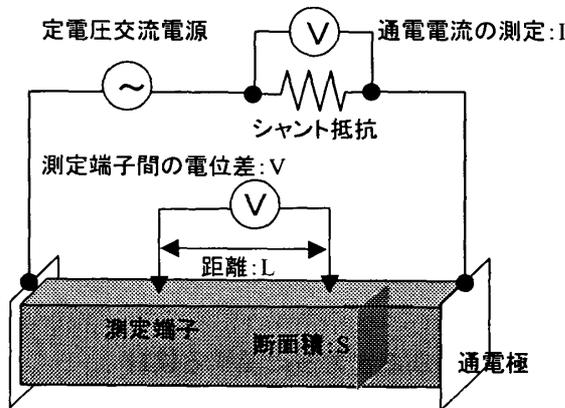


図-1 四電極法の測定概念図

b) 二電極法

二電極法の測定概念図を図-2 に示す。供試体の両端の電極に交流の定電圧を印加して，両通電極間の電位差を測定し，(1) 式により抵抗率を算出した。

ただし， V : 両通電極間の電位差 (mV)

L : 両通電極間の距離 (cm)

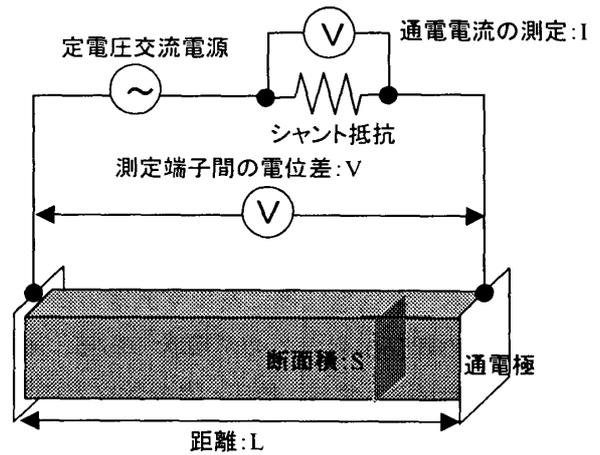


図-2 二電極法の測定概念図

c) 電極および通電条件

ステンレス製 (SUS304) の通電極($t=2\text{mm}$)と測定端子 ($\Phi 1.5\text{mm}$) をカルボキシメチルセルロースを塩水 (濃度 3%) で練ったゲル (以下, CMC) で供試体に接触させた。印加電圧は 5 V, 周波数は 73.3Hz とし，四電極法での測定端子間の距離は 4cm とした。

2.2 実験結果および考察

図-3 は，気中養生 28 日で測定した抵抗率の結果である。四電極法は電極を接触させた直後からほぼ安定した測定値が得られたのに対し，二電極法では電極接触直後，四電極法に比べかなり大きな値を示し，約 10 分程度で四電極法と同程度の値に収束する傾向を示した。ただし，封かん養生や水中養生では二電極法の時間依存性は認められなかった。

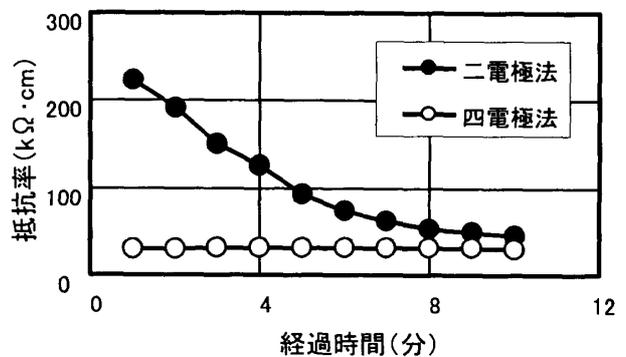


図-3 抵抗率経時変化の一例

四電極法は通電極間の中央で測定端子を用いて電位差を測定するため，通電極の接触抵抗が

測定値に及ぼす影響は小さい。一方、二電極法では通電極間の電位差から抵抗率を求める。気中養生では乾燥により、通電極の接触抵抗が大きく影響したものと考えられる。なお、接触時間を十分確保した場合、図-4に示すように、四電極法と二電極法の測定結果は一致した。

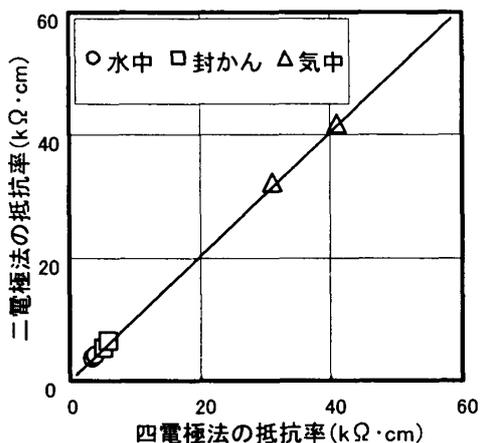


図-4 四電極法と二電極法の比較

3. 四電極法の試験方法に関する検討

3.1 実験概要

(1) 実験の要因と水準

表-1に四電極法の試験方法に関して実施した実験の要因と水準を示す。四電極法による抵抗率測定に影響する要因として、電極の種類、測定端子の間隔、通電電極の接触方法、周波数、印加電圧を取り上げ、検討した。

表-1 実験の要因と水準

要因	水準
電極の種類	ステンレス板 銅板 (t=2mm)
測定端子の間隔	2、4、6、8cm
通電電極の接触	CMC、湿布(接触圧 大、中、小)
周波数	10、50、73.3、100Hz、1、10、100kHz
印加電圧	1、5、10、30V

(2) 供試体の作製

検討に用いた供試体は、40×40×160mmの形状である。JIS R 5201のセメント強さ試験に準じて、普通ポルトランドセメントおよびセメント協会標準砂を用いて、W/C=50% S/C=3の配合で作製した。作製した供試体は、養生室(温度 20℃、

湿度 60%R.H.)にて、それぞれ水中養生および封かん養生、気中養生を行った。

(3) 抵抗率の測定方法

2.で記述した四電極法により、表-1に示す電極の種類や接触方法、通電条件を変化させ、抵抗率の測定を行った。

3.2 実験結果および考察

図-5は通電電極の種類が抵抗率に及ぼす影響について示したものである。ステンレス板(SUS)電極と銅板(Cu)電極いずれを用いた場合でも抵抗率に差は見られない。また、電極の接触方法についても、図-6に示すようにその影響は認められなかった。但し、銅板電極は腐食物が電極表面に沈着しやすいこと、湿布は接着面以外に水が飛散する可能性があることなどを考慮すると、ステンレス板によるCMC接着が測定時の簡便性に優れていると考えられる。

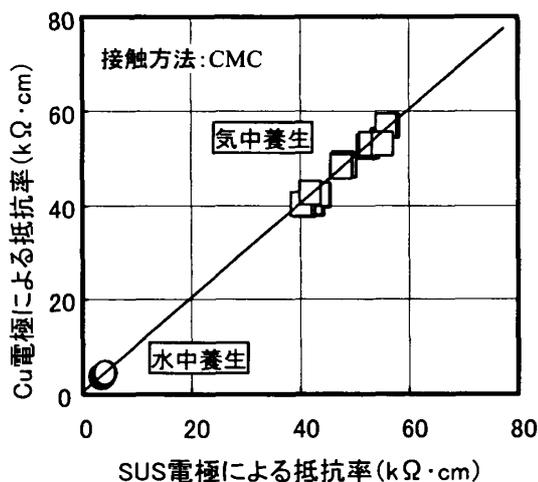


図-5 通電電極の種類の影響

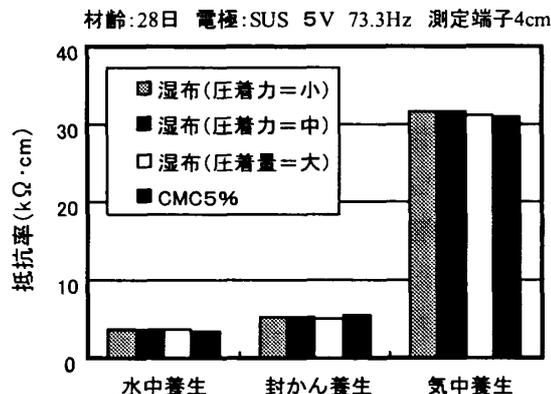


図-6 通電電極の接触方法の影響

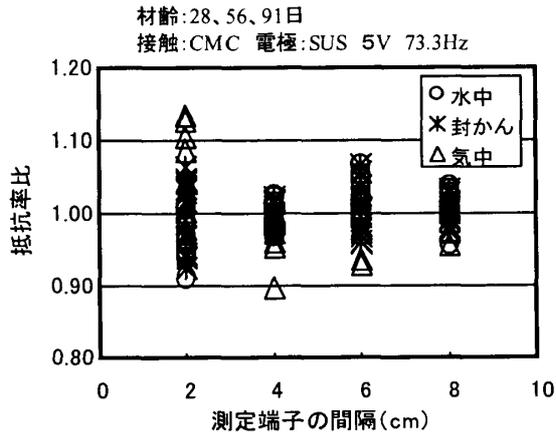


図-7 測定端子距離の影響

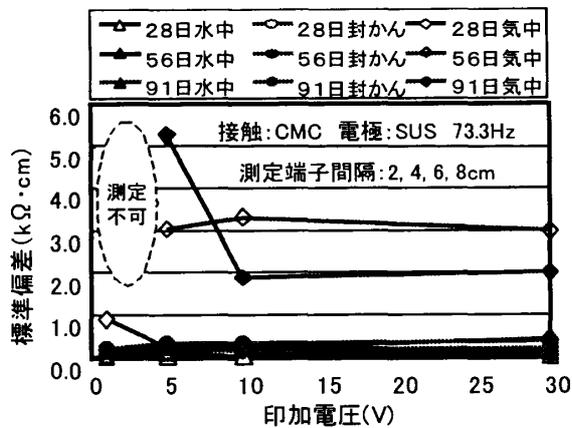


図-8 印加電圧の影響

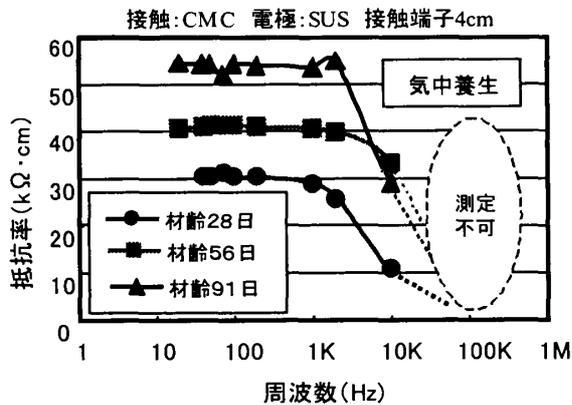


図-9 周波数の影響

図-7は、測定端子の間隔が抵抗率に及ぼす影響について示したものである。抵抗率比とは、各測定端子距離毎の平均値に対する測定値の比である。これより、測定端子間隔が2cmでは、ばらつきが大きくなる。これは、モルタル内部に存在する空隙などの欠陥が測定端子の距離が短いほど大きく影響するためと考えられる。

図-8は、印加電圧の影響について示したものである。水中養生と封かん養生では、印加電圧の影響は認められなかった。一方、気中養生では、材齢経過に伴い5V以下の低い電圧では測定が不可能となり、10V程度の電圧の印加が必要であった。

コンクリート中に置かれた鋼材の電気化学的等価回路のインピーダンス定義式から、周波数が増加するとインピーダンスは減少する。図-9は周波数の影響について示したものであるが、1kHz以下の領域では周波数の異なることによる抵抗率の値に違いは見られない。しかし、これを超える高周波領域では抵抗率が急激に減少する。以上より、測定周波数としては商用周波数と高調波の重なりにくい値として、73.3Hzを選定した。

3.3 四電極法による標準的試験方法の提案

以上の検討結果から、電極の種類や通電方法に影響を受けない抵抗率試験方法として、四電極法標準試験方法を以下に示す。

表-2 標準的試験方法の提案

項目	条件
電極の種類	ステンレス板
測定端子の間隔	4cm以上
通電電極の接触	CMC
周波数	73.3Hz
印加電圧	10V以上

4. 環境条件に関する検討

4.1 実験概要

(1) 実験の要因と水準

表-3に環境条件に関して実施した実験の要因と水準を示す。

表-3 実験の要因と水準

要因	水準
水セメント比	40、50、60%
含水量	水中、気中、封かん養生
材齢	7、14、28、70、182日
力学的特性	圧縮強度
寸法効果	4×4×16、10×10×40cm

(2) 供試体の作製

検討に用いた供試体は、R 5201 のセメント強さ試験に準じて、普通ポルトランドセメントおよびセメント協会標準砂を用いて作製した。配合は、水量をセメント強さ試験の 1 バッチ 225 g, S/C=3 とし、各水セメント比で一定とした。作製した供試体は、養生室（温度 20℃, 湿度 60%R.H.）にて、それぞれの養生条件で養生した。

(3) 抵抗率の測定方法

3.で提案した四電極法の試験条件（表-2）により測定を行った。なお、10×10×40cm の供試体では測定端子間隔を 20cm とした。

4.2 実験結果および考察

図-10 に 4×4×16cm 供試体の各養生条件における抵抗率の材齢変化を水セメント比毎に示す。

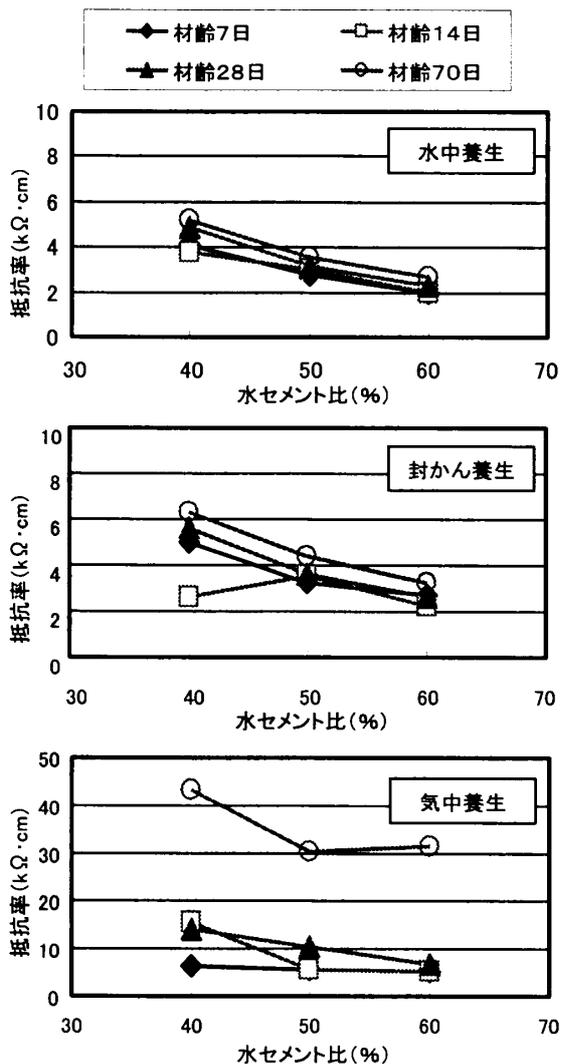


図-10 各養生条件での抵抗率の変化

これより、いずれの養生条件においても水セメント比が小さくなるほど、抵抗率は大きくなる。また、材齢の経過に伴い、抵抗率は増加する。この傾向は、気中養生で特に著しい。これは、いずれの養生条件でも水和反応の進行に伴う組織の緻密化により、材齢経過に伴い抵抗率が增加する。しかし、水中養生の場合、外部からの水分供給により空隙が水で飽和されるのに対して、気中養生の場合には乾燥により不飽和空隙が増加したため、養生条件による相違が生じたものと考えられる。

各養生条件の抵抗率測定が終了した供試体を用いて、含水量および圧縮強度の測定を行った。含水率は、24 時間 110℃で乾燥後の重量に対する乾燥前後での減少重量の比として表した。それらの結果を図-11 および図-12 に示す。これより、抵抗率は含水率が 4% を下回ると急激に増加する。しかし、抵抗率と圧縮強度の関係に明確な相関は認められない。

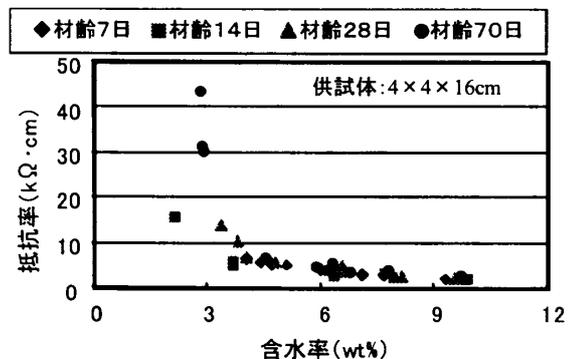


図-11 含水率と抵抗率の関係

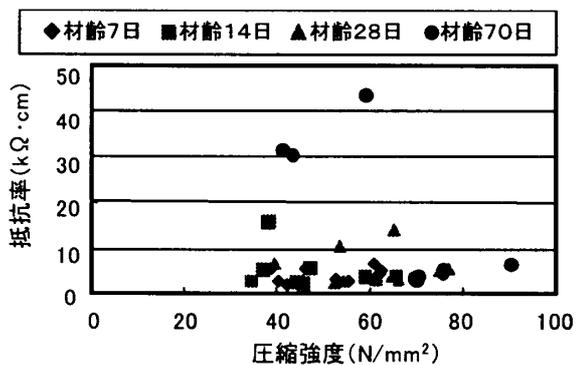


図-12 圧縮強度と抵抗率の関係

以上のことから、抵抗率は水和反応に伴う組織の緻密化と組織の水分消失の二つの影響を受けるが、環境条件による水分消失の影響が支配的であることがわかる。このことは、コンクリートや補修材など各種材料について、抵抗率と含水量の関係を把握することで、実環境での抵抗率の変動の整理が可能であることを示している。つまり、抵抗率の評価において含水率の把握が極めて重要であり、これらを整理することにより電気防食の最適設計に反映できることも示唆している。

図-13は、供試体の形状寸法が抵抗率に及ぼす影響について検討したものである。これより、供試体形状による寸法効果は認められない。ただし、供試体形状により空隙等の内部欠陥の大きさも異なる可能性があるため、図-7に示したように測定端子間の距離の選定には十分な考慮が必要である。

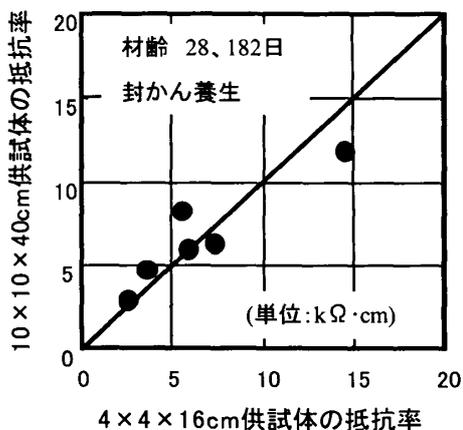


図-13 抵抗率の寸法効果

6. まとめ

本研究では、セメント系材料の簡易な電気抵抗率測定方法を提案することを目的として、四電極法と二電極法を取り上げ、比較検討した。次に、四電極法に着目し、周波数や電流、電圧など通電条件、電極の種類や間隔などの電極条件、供試体の寸法、養生条件などが四電極法の試験結果に及ぼす影響について検討を行った。本研究では、以下の事項が明らかとなった。

(1) 二電極法による抵抗率測定方法は、通電極の

接触抵抗の影響を受ける可能性がある。しかし、十分に通電極を接触させた場合、二電極法と四電極法による抵抗率は一致する。

- (2) 四電極法による抵抗率測定方法は、測定端子間の距離、印加電圧、周波数の影響を受けるので選定に注意が必要である。
- (3) 抵抗率の測定値は、組織の緻密性に比べ、不飽和空隙の存在など含水状態の影響が支配的であるものと思われる。
- (4) $4 \times 4 \times 16 \text{cm}$ と $10 \times 10 \times 40 \text{cm}$ の形状の範囲では、四電極法による抵抗率測定方法に供試体の寸法の影響は認められないと考えられる。

【謝辞】

本研究は、日本エルガード協会技術委員会（委員長五洋建設古田部長）において実施した成果をとりまとめたものである。日本エルガード協会技術委員会（オリエンタル建設呉委員，化工建設大久保委員，佐伯建設永池委員，ショーボンド建設久委員，ナカボーテック浅見委員，日本防蝕工業山本委員，ピーエス三菱穴沢委員）の委員各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：電気化学的防食工法設計施工指針（案），コンクリートライブラリー107
- 2) 高橋武彦：接地技術入門，オーム社，1990
- 3) 市野瀬比路実，石川光男，玉利昭一：コンクリートの抵抗率測定，腐食防食，88A-308，pp.97-100，1988
- 4) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の電気防食法研究委員会実験報告書，1995.6
- 5) 電気学会：電食・土壌腐食ハンドブック
- 6) 建設省土木研究所：コンクリートの電気抵抗による耐久性評価の基礎的研究，土木研究所資料第3716号，2000.3