セメント系断面修復材の電気抵抗率に関する研究

内藤　英晴*　　守屋　　進**
皆川　　浩***　川俣　孝治****

要　旨

電気防食を施したコンクリート構造物において、防食効果や防食効果の均一性に影響を及ぼす因子の一つに、電気防食工事の一環として実施される断面修復や、以前に実施した断面修復で使用された補修材料の電気抵抗率の影響が指摘されている。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。本研究では、まず電気抵抗率の測定における電流・電圧・周波数などが測定値に及ぼす影響について実験的検討を行い、簡易な電気抵抗率測定方法を提案した。

次に、この提案した電気抵抗率測定方法を用いて、現在市販されている多様な断面修復材料の電気抵抗率を測定し、各種断面修復材料の電気抵抗率に及ぼす影響因子について検討を行った。その結果、断面修復材の電気抵抗率は、材料自体による差が大きいことや、含水状態に影響されることなどが明らかとなった。

1.　はじめに

コンクリートの耐久性低下要因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表面に陽極を設置し、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。

この電気防食工法において、確実な防食効果を得るためには、防食電流を均一に流すことが必要である。しかし、土木学会「電気化学的防食工法設計施工指針（案）」[1]においては、コンクリート構造物の電気防食の防食効果や防食効果の均一性に影響を及ぼす因子の一つとして、電気防食工事の一環として実施される断面修復や、以前に実施した断面修復で使用された補修材料の電気抵抗率が指摘されている。

そのため、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。

しかし、断面修復に使用されるセメント系材料の電気抵抗率は、材料自体の水分含有量や材料に配合される有機系材料（例えば、ポリマーエマルション等）に影響されると考えられるが[1]、その電気抵抗率自体の測定方法が確立されていない。そのため、電気防食施工範囲に適用されている断面修復材料が電気防食の防食効果や効果の均一性に及ぼす影響を的確に把握することができない現状にあった。

そこで、著者らは、このような問題を解決するための第一歩として、セメント系補修材料の電気抵抗率を簡便かつ適確に測定するための試験方法を提案することを目的として、一連の研究を行ってきた[2), 3)]。

これらの研究では、まず四電極法と二電極法を取り上げ比較検討した[4), 5), 6)]。その比較結果から、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、四電極法をベースにした簡易な電気抵抗率測定方法を提案した[7)]。

また現在、セメント系断面修復材料には、断面修復の方法や材料自体の耐久性などを考慮して、種々の材料を配合したプレミックス材料が多数市販されているが、これらの材料の電気抵抗率は、かなり異なると考えられる。例えば、補修用途（左官・吹付け・注入など）やポリマーの含有率によって、補修材料自体の電気抵抗率は異なるといわれている[1)]。

このような観点から、先に提案した電気抵抗率測定方法を用い、現在市販されている多様な断面修復材料の電気抵抗率の測定を行い、各種断面修復材料の電気抵抗率を共通の水準で比較することで、これらの断面修復材の電気抵抗率について検討を行った[8)]。

本報告はこの一連の研究成果を取りまとめたものである。

*技術研究所
**（独）土木研究所　材料地盤研究グループ新材料チーム
***東北大学大学院　工学研究科土木工学専攻
****住友大阪セメント株式会社　新事業探索プロジェクト

2. 電気抵抗率測定方法に関する検討

セメント系補修材料の電気抵抗率測定方法を提案するに際して、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、養生室内(温度 20℃、湿度 60%R.H.)において、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して、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。

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

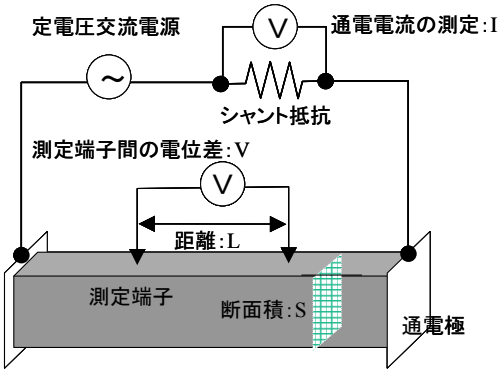
ここに、ρ:抵抗率(Ω・cm)

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)



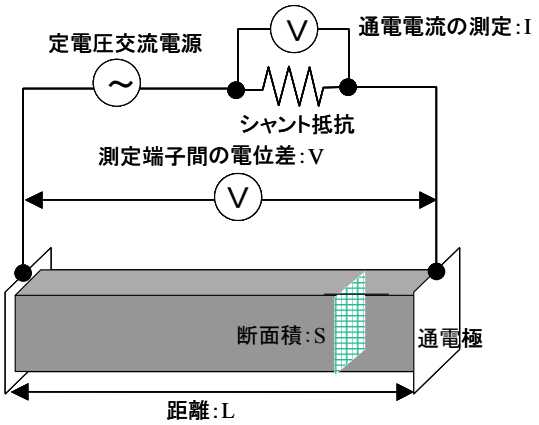
図－1　四電極法の測定概念図

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、式(1)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

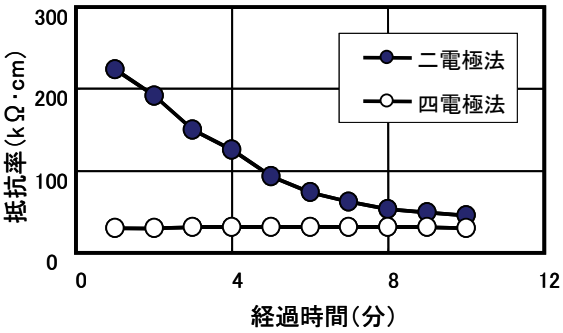
ステンレス製(SUS304 t=2mm)を通電極とし、カルボキシメチルセルロースを塩水(濃度 3%)で練り混ぜたゲル(以下、CMC と呼ぶ)を挟んで供試体に接触させた。印加電圧は5V、周波数は 73.3Hz とし、四電極法での測定端子間の距離は 4cm とした。

2．2　実験結果および考察

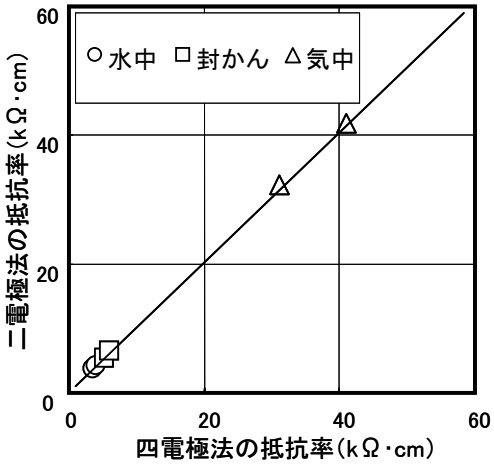
図－3には、気中養生 28 日で測定した抵抗率の測定結果を示す。四電極法は電極を接触させた直後からほぼ安定した測定値が得られたのに対し、二電極法では電極接触直後、四電極法に比べかなり大きな値を示し、約 10 分程度で四電極法と同程度の値に収束する傾向を示した。ただし、封かん養生や水中養生では二電極法の時間依存性は認められなかった。

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ため、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－3　抵抗率経時変化の一例



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には、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

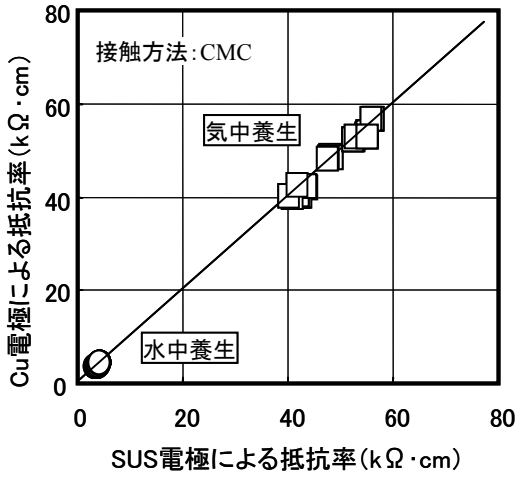
要 因	水 準
電極の種類	ステンレス板 銅板 (t=2mm)
測定端子の間隔	2、4、6、8cm
通電電極の接触法	CMC、湿布(接触圧 大、中、小)
周波数	10、50、73.3、100、1000、10000Hz
印加電圧	1、5、10、30V

(2)供試体の作製

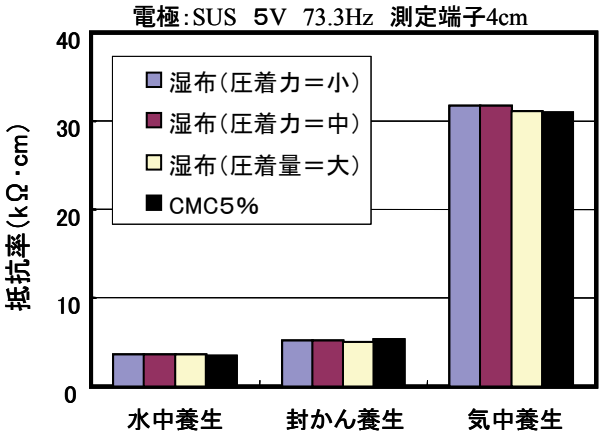
検討に用いた供試体は、40×40×160mm の形状である。JIS R 5201 のセメント強さ試験に準じて、普通ポルトランドセメントおよびセメント協会標準砂を用いて、W/C=50% S/C=3 の配合で作製した。作製した供試体は、養生室(温度 20℃、湿度 60%R.H.)にて、それぞれ水中養生および封かん養生、気中養生を行い、材齢 28 日で測定を行った。

(3)抵抗率の測定方法

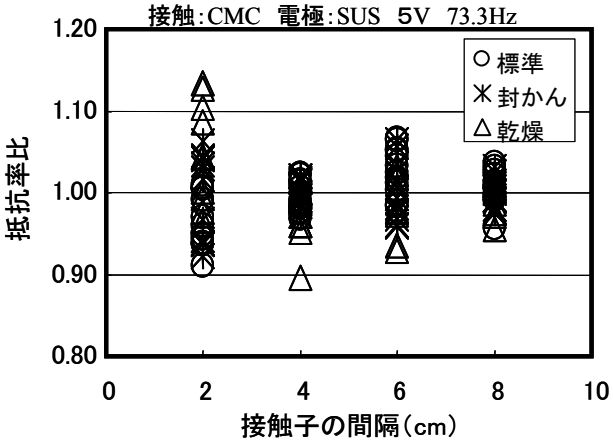
前記「**2. 電気抵抗率測定方法に関する検討**」で記述した四電極法を用いて、**表－1**に示す電極の種類や接触方法、通電条件を変化させて抵抗率の測定を行った。**図－5**は通電電極の種類が抵抗率に及ぼす影響について示したものである。ステンレス板(SUS)電極と銅板(Cu)電極いずれを用いた場合でも抵抗率に差は見られない。また、電極の接触方法



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

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。ただし、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－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。ここで抵抗率比とは、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、ばらつきが大きいことがわかる。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。

図－9は周波数の影響について示したものである。1000Hz 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している。これは、モルタルやコンクリートの等価回路では抵抗に並列なコンデンサーが存在することになり、モルタルのコンデンサー容量が高周波領域で放電されるためと考えられる。そのため、安定した測定値を得るためには 1000Hzより小さな周波数とするのがよく、かつ商用電源周波数や生活雑音の影響を考えると 60Hz 以上の倍数とならない周波数が適すると考えられる。

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

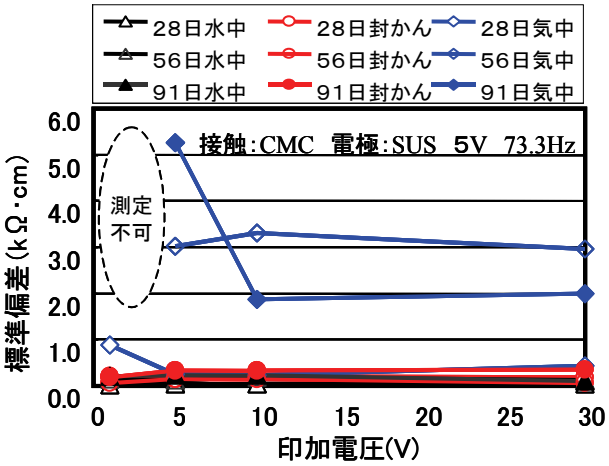
表－2には環境条件に関して実施した実験の条件を示す。

表－2　実験の要因と水準

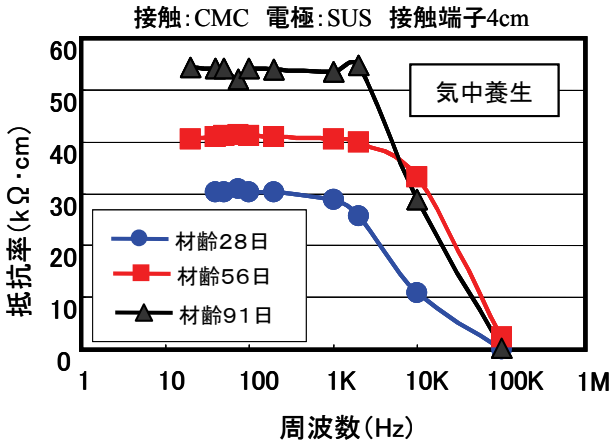
要　因	水　準
水セメント比	40、50、60%
含水量	水中、気中、封かん養生
材齢	7、14、28、91、182 日
力学的特性	圧縮強度
寸法効果	4×4×16、10×10×40cm

(2)供試体の作製

供試体は、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作製した。配合は、水量をセメント強さ試験の 1 バッチ 225g、S/C=3 とし、各水セメント比について一定とした。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。



図－8　印加電圧の影響



図－9　周波数の影響

（3）抵抗率の測定方法

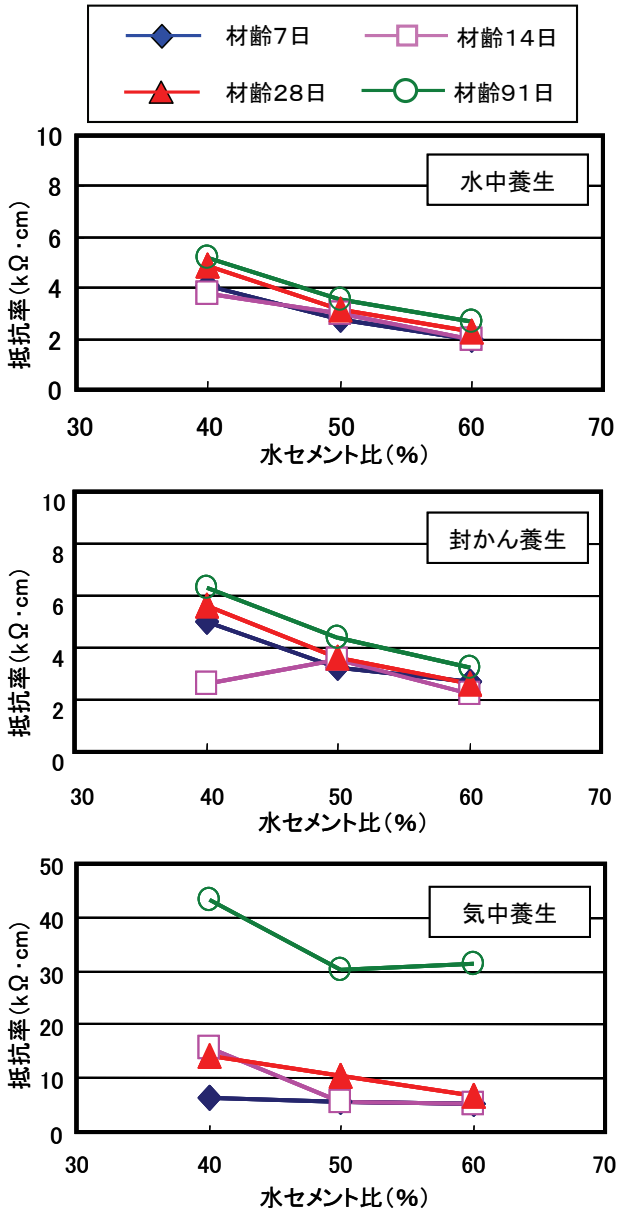
先述の「3. 四電極法の試験方法に関する検討」で得られた結果を基に、表－3に示す四電極法の条件により測定を行った。なお、10×10×40cm のコンクリート供試体では測定端子間隔を 20cm とした。

表－3　抵抗率の測定条件

項　目	設　定
通電極の材料	ステンレス板(t=2mm)
測定端子の間隔	4cm
通電電極の媒体	CMC
周波数	73.3Hz
印加電圧	10V

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。

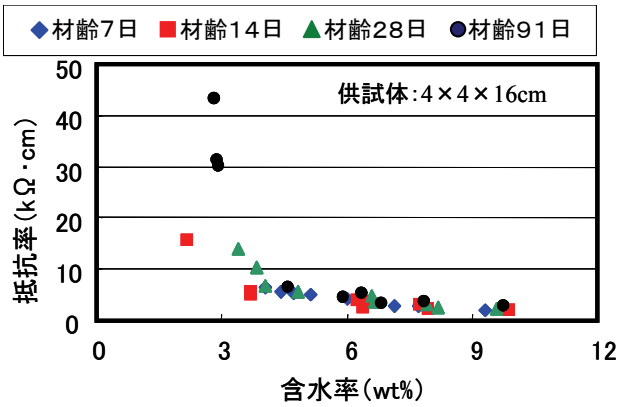


図－10　各養生条件での抵抗率の変化

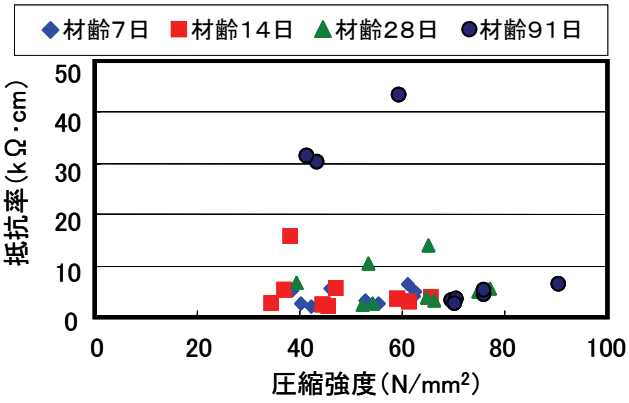
これより、いずれの養生条件においても水セメント比が小さくなるほど、抵抗率は大きくなる。また、材齢の経過に伴い、抵抗率は増加する。この傾向は、気中養生で特に著しい。これは、いずれの養生条件でも水和反応の進行に伴う組織の緻密化により、材齢経過に伴い抵抗率が増加するためである。また、水中養生の場合、外部からの水分供給により空隙が水で飽和されるのに対して、気中養生の場合には乾燥により不飽和空隙が増加したため、養生条件による相違が生じたものと考えられる。

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。

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。

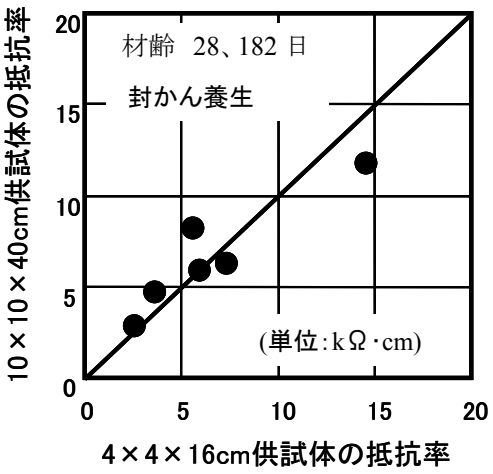


図－11　含水率と抵抗率の関係



図－12　圧縮強度と抵抗率の関係

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

5. 電気抵抗率測定方法に関する考察

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。その結果、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、十分に通電電極を供試体に接触させた場合、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) 4×4×16cm と 10×10×40cm 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。

6. 電気抵抗率測定方法の提案

本実験で得られた結果から、セメント系断面修復材の電気抵抗率測定方法として、四電極法をベースにした以下の方法が良いと考える。

(1) 適用範囲

コンクリート構造物を補修あるいは補強する目的で、断面を修復する場合に用いるセメント系断面修復材料の電気抵抗率を四電極法によって測定する場合について適用する。

(2) 装置

電気抵抗率の測定装置は、定電圧交流電源、電流計、通電極、測定端子および電位差計によって構成される。

(3) 供試体

モルタルの場合は 40×40×160mm、コンクリートの場合には 100×100×400mm の角柱供試体を標準とする。

(4) 測定方法

①2つの通電極の間に定電圧交流電源と電流計をリード線により直列に接続する。

②2つの測定端子と電位差計をリード線により接続する

③供試体断面に通電極を固定する。この際、供試体断面と通電極を密着させるために、ゲル状の電解質(CMC)などを含浸させた多孔質材料(例えばスポンジなど)を供試体断面と通電電極との間に介在させるとよい。

④定電圧交流電源より交流電圧を印加する。交流電圧は 30V 以下とする。また、周波数は、60～100Hz とする。

⑤測定端子は供試体の打設面および打設底面を除く側面に設置する。測定端子の間隔は通電極の間隔の 1/4～1/2 の長さとする。測定端子は、その先端を供試体に流れる電流に対して平行になるように設置する。測定端子の先端と供試体表面を密着させるため、ゲル状の電解質(CMC)などを含浸させた多孔質材料(スポンジなど)を供試体表面と測定端子との間に介在させるとよい。

⑥通電開始後、測定値が安定したことを確認し、電位差計を用いて測定端子間の電位差を測定する。また、その時の供試体に流れる電流を電流計により測定する。測定ごとに測定端子の位置を変えて、同一供試体の電位差および電流を 3 回測定する。同様に、残りの供試体についても測定する。

(5) 電気抵抗率の算定

$$\rho = \frac{V}{I} \times \frac{S}{L}$$

ここに、ρ:抵抗率(Ω・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)

7. 断面修復材料の電気抵抗率

7．1 検討対象としたセメント系断面修復材

実験に使用したセメント系断面修復材の種類は、**表-4**に示すA～Vの22種類であり、いずれも現在市販されているプレミックス材料である。**表-4**では、各メーカーの技術資料等に基づき、ポリマーの有無、ポリマーの種類および用途で各材料を分類している。ポリマーの種類の①、②、③は、SBR（スチレンブタジエン系ラテックス）、PAE（ポリアクリル酸エステル系ポリマー）、VAV（酢酸ビニルビニルバーサテート）である（順不同）。

なお、本試験の目的は現在市販されているこれらのプレミックス材料の電気抵抗率の把握であるため、ポリマーの種類を含め、材料自体の詳細な特性の記述は、材料の特定につながることから、これを割愛している。

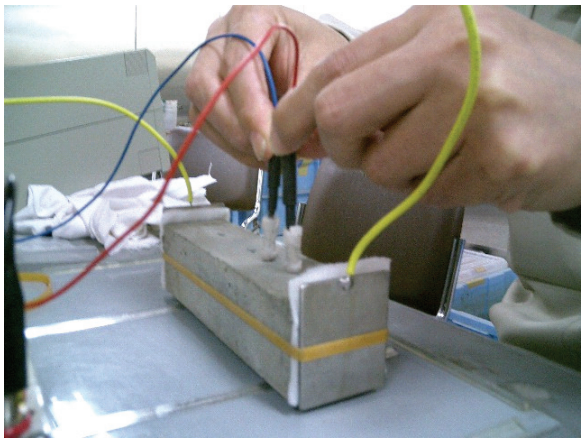
7．2 供試体の作製及び実験因子

供試体の作製は、これらの断面修復材を製造するメーカーが推奨する水量、練混ぜ方法、供試体作製方法を適用し、40×40×160mmの供試体を作製した。電気抵抗率の測定は、材齢28日、91日、182日および440日で実施し、作製した供試体を養生室（温度 20℃、湿度 60%R.H）において水中養生および封かん養生を行った。

また、電気抵抗率の測定が終了した供試体では、供試体中の含水率の測定も併せて実施した。

7．3 電気抵抗率の測定方法

断面修復材の電気抵抗率の測定方法としては、先述の「**6. 電気抵抗率測定方法の提案**」に基づく四電極法とした（**図－1**）。なお、具体的な測定に関する設定は**表－5**のようにした。**写真－1**には四電極法による測定状況を示す。



写真－1 四電極法による測定状況

表-4 検討対象のセメント系断面修復材

材料記号	ポリマーの有無	ポリマーの種類	施工方法（用途）
A	有	①	左官・吹付け用
B	無	—	左官・吹付け用
C	有	①	左官・吹付け用
D	無	—	左官・吹付け用
E	有	記載なし	注入用
F	無	—	注入用
G	有	記載なし	左官・吹付け用
H	有	②	左官・吹付け用
I	有	記載なし	左官・吹付け用
J	有	②	左官・吹付け用
K	有	③	左官・吹付け用
L	無	—	注入用
M	有	①	注入用
N	無	—	左官・吹付け用
O	無	—	注入用
P	有	③	左官・吹付け用
Q	無	—	左官・吹付け用
R	有	記載なし	左官・吹付け用
S	有	①	左官・吹付け用
T	無	—	注入用
U	有	記載なし	注入用
V	有	①	左官・吹付け用

表－5 四電極法による測定条件の設定

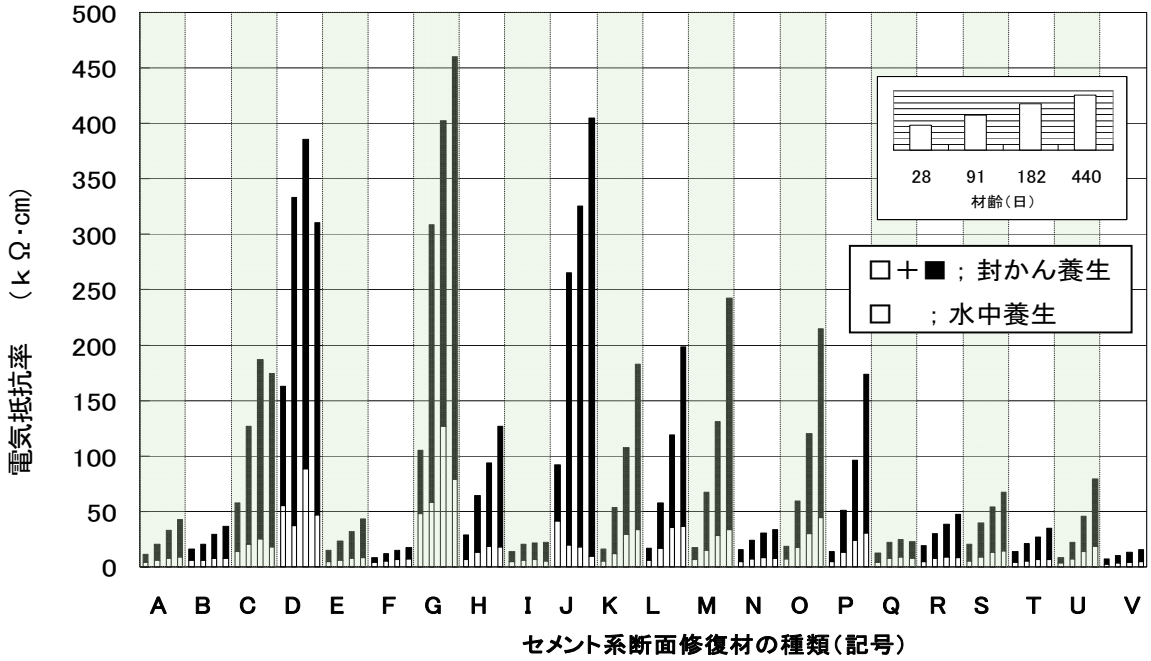
設定項目	設定
通電極の材料	ステンレス板（t=2mm）
測定端子の間隔	4cm
通電電極の媒体	CMC
周波数	73.3Hz
印加電圧	10V

8. 実験結果および考察

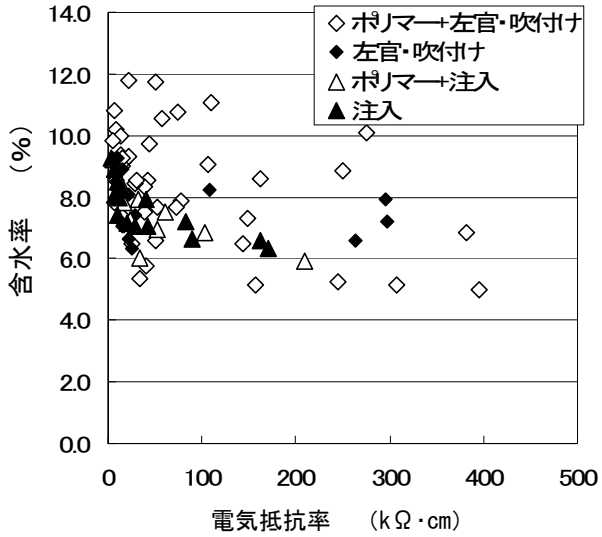
8．1 各種断面修復材の電気抵抗率

図－14は、本実験において検討対象とした22種類の断面修復材の電気抵抗率の測定結果であり、材料ごとに材齢および養生方法の違いによる差を示している。なお、図中の白抜きの棒グラフの値は水中養生を行った場合の測定値であり、白抜きと黒抜きを合わせた値は封かん養生を行った場合の測定値を示す。

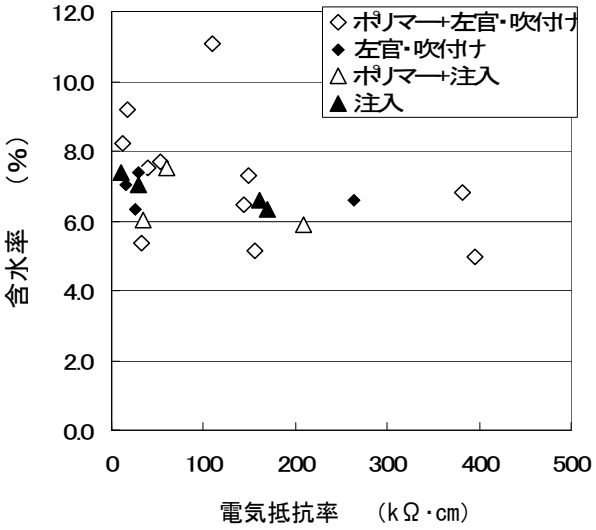
この図に基づくと、全ての材料および材齢において封かん養生の電気抵抗率の方が水中養生より大きいこと、一部の修復材を除き、概ね材齢の経過とともに電気抵抗率は増加することが把握できる。なお、着目すべき最大の特徴は、断面修復材の種類によって電気抵抗率の測定値に大きな違いが認められることである。これは、塩害により劣化したコンクリート構造物に電気防食工法を適用する際に、事前に付随して実



図－１４　各種セメント系断面修復材の電気抵抗率測定結果



図－15　含水率と電気抵抗率との関係（全材齢）



図－16　含水率と電気抵抗率との関係（材齢 440 日）

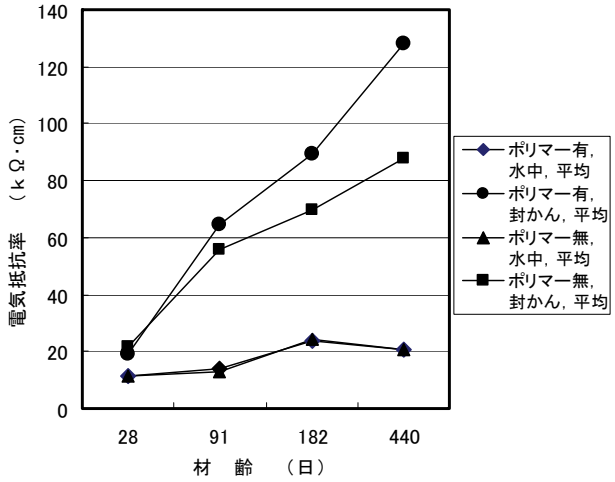
施される断面修復工に適用される補修材料の選定においては、断面修復材の電気抵抗率も十分に考慮した選定を行わなければならないことを示唆している。

また、図－15は、電気抵抗率の測定が終了した封かん養生の供試体の含水率を測定した結果と電気抵抗率との関係を示したもので、図－16は、図－15のうちから材齢 440 日のデータのみを抽出して示したものである。

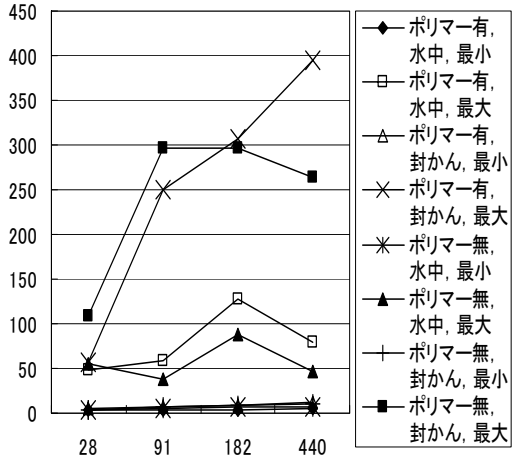
これらの図から、電気抵抗率は、試料の乾燥状態との相関がある程度認められるが、そのバラツキは、かなり広範囲にわたる分布になっていることがわかる。

８．２　断面修復材の電気抵抗率とポリマーとの関係

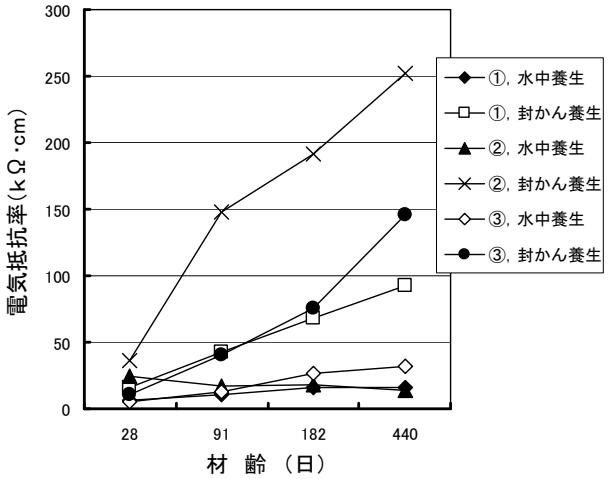
図－17は、本実験において電気抵抗率を測定した各種セメント系断面修復材を、ポリマー添加の有無で分類し、測定値の平均を養生条件ごとに示したものである。



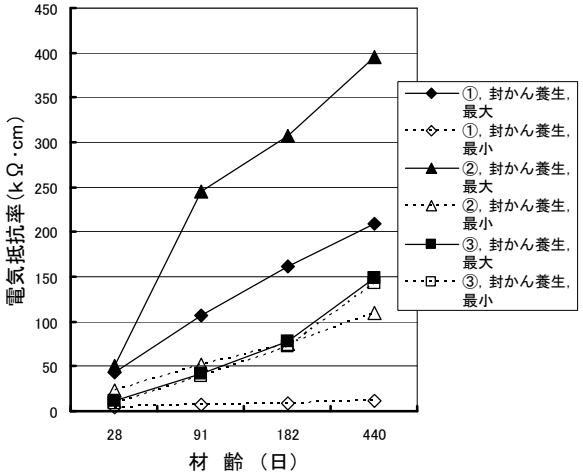
図－17 ポリマーの有無と電気抵抗率（平均値）



図－18 ポリマーの有無と電気抵抗率（最大・最小）



図－19 ポリマーの種類と電気抵抗率（平均値）



図－20 ポリマーの種類と電気抵抗率（最大・最小）

この図から、水中養生ではポリマー添加の有無による電気抵抗率の違いは認められなかった。しかし、封かん養生ではポリマー添加有の方の電気抵抗率が大きく、水分の逸散はポリマーの造膜を促進するため、ポリマーを添加した材料の乾燥は、電気抵抗率の増加に大きく関与することがうかがえる。

なお、電気抵抗率の測定結果には、同一条件であっても材料による違いが大きい傾向があったため、**図－18**には、電気抵抗率の測定値の最大値と最小値をポリマー添加の有無および養生条件で分類して示している。

この図によると、測定値の最小値は、ポリマー添加の有無および養生方法の違いによる差がほとんど認められない。

一方、最大値についてみると、水中養生では、ポリマー添加有の電気抵抗率の方が大きくなる傾向がうかがえるのに対して、封かん養生では、ポリマー添加の有無による影響に顕著な違いを認めることができない。このことから、各々の断面修復材の配合組成から得られる電気抵抗率の特性の方が、ポリマー添加の有無の影響より卓越していると判断できる。

図－19は、ポリマーを使用している断面修復材のうち、使用しているポリマーの種類に着目し、ポリマーの種類ごとの電気抵抗率の平均値を示したものである。

この図に基づくと、今回の実験対象の断面修復材に使用されている3種類のポリマーでは、ポリマー添加の有無の場合と同様に、水中養生の場合には、ポリマーの種類が断面修復材の電気抵抗率に及ぼす影響をほとんど把握すること

ができない。一方、封かん養生では、ポリマーの種類で、②、③≒①の順に電気抵抗率が大きくなっていることがわかる。

また、**図－20**は封かん養生の場合の、ポリマーの種類と電気抵抗率の最大値と最小値との関係を示した図である。

この図からは、**図－19**の平均値で最も大きい電気抵抗率を示したポリマー②と、平均値の小さなポリマー①では、最大値と最小値に大きな差があるが、ポリマー③は最大値と最小値にほとんど差がない性状を示した。

また、ポリマー①の封かん養生の電気抵抗率の最小値は、水中養生の場合と同程度の非常に小さい結果であった。

このような傾向を考慮すると、ポリマーの種類が断面修復材の電気抵抗率に及ぼす影響としては、**図－19**の平均値で最大の電気抵抗率を示したポリマー②は、他のポリマーの種類より電気抵抗率を増加させる傾向がうかがえるが、他のポリマーについては、ポリマーの影響よりもプレミックス材としての他の使用材料や配合など、断面修復材全体としての電気抵抗特性の方が優先するものと考えられる。

８．３　断面修復材の施工方法と電気抵抗率との関係

図－21は、断面修復材の施工方法（用途）を左官または吹付けで施工する材料と注入で施工する材料とに分類し、この施工方法（用途）と電気抵抗率の測定値の平均との関係を示したものである。

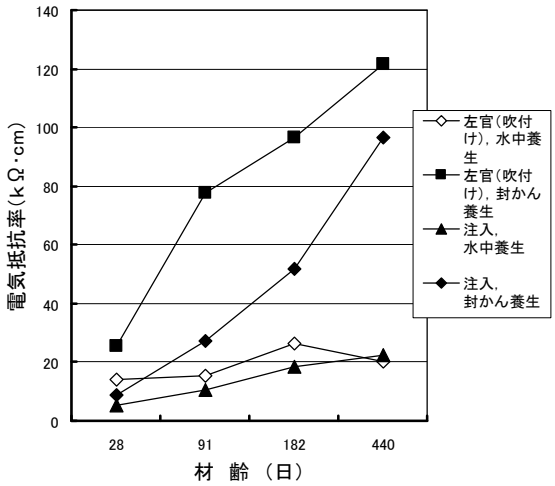
この図から、断面修復材の施工方法（用途）が電気抵抗率に及ぼす影響としては、全体的な傾向として、左官や吹付けに適用する断面修復材の電気抵抗率の方が大きく、特に封かん養生の場合に、その差が顕著で、左官や吹付けに用いる断面修復材の電気抵抗率の方が大きくなっている。また、封かん養生での電気抵抗率の経時変化は、注入用の断面修復材の方が、左官や吹付け用の断面修復材より大きい傾向にあることがわかる。

これは、注入用の断面修復材は、流動性を考慮したプレミックス材となっていることやそのために使用する単位水量が大きいためと考えられる。

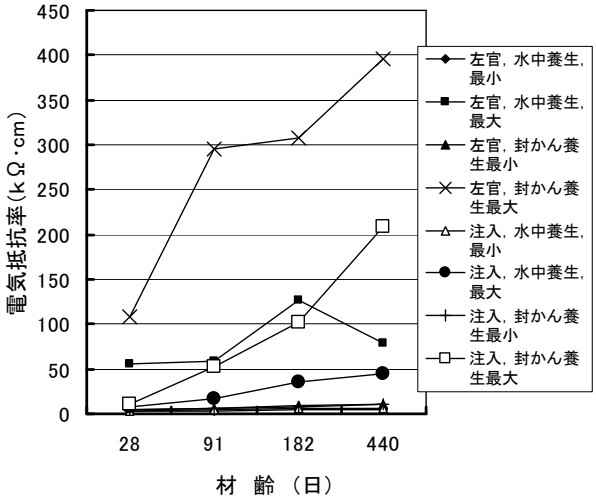
図－22は、断面修復材の施工方法（用途）の違いを電気抵抗率の最大と最小で示したものである。

この図からは、先に述べたポリマーの有無の場合と同様に、測定された電気抵抗率の最小値での断面修復材の施工方法（用途）による電気抵抗率の違いは、ほとんど認められないが、封かん養生時の最大値では、施工方法（用途）による差が大きく、平均値と同様に、注入材の方が小さくなっている。

８．２の**図－18**のポリマー添加の有無による影響の場合と同様に、プレミックス材料として配合された材料並びにこの材料の練混ぜに用いられる単位水量も含めたこの断面修復材自体の電気抵抗特性は、一般的に言われている単位水量が大きく、ポリマー無添加の場合の電気抵抗率が小さくなる傾向と大きく異なっていることが推察できる。このことは、通常、電気抵抗率に影響を及ぼすと考えられるポリマーの有無や材料の施工方法などでの電気抵抗率の推定や判断をプレミックス材料に適用するには、問題があると考えることができる。



図－21　材料の施工方法と電気抵抗率（平均値）

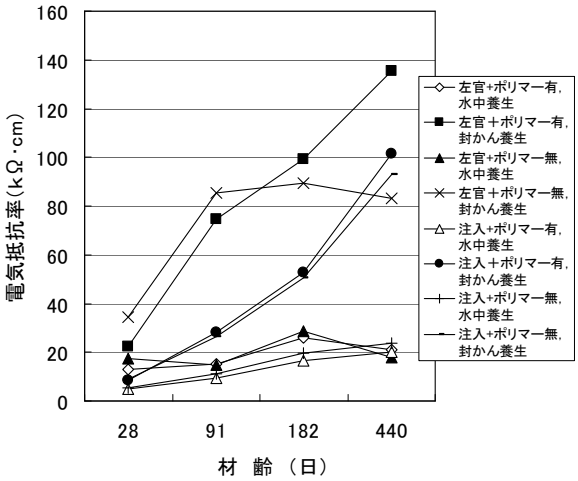


図－22　材料の施工方法と電気抵抗率（最大・最小）

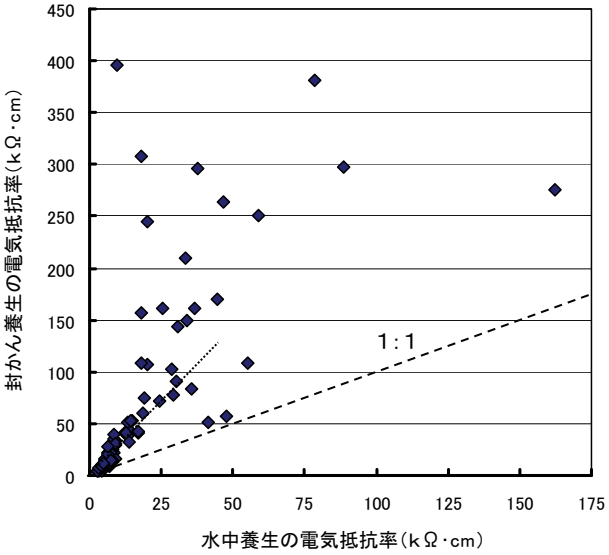
８．４　ポリマーの有無および断面修復材の施工方法と電気抵抗率との関係

図－23は、ポリマー添加の有無と断面修復材の施工方法（用途）とを分類し、その電気抵抗率の測定値の平均を示したものである。

この結果では、水中養生においては、ポリマー添加の有無および材料の施工方法（用途）の違いによる電気抵抗率の差



図－23 ポリマー添加の有無および材料の施工方法（用途）と電気抵抗率との関係



図－24 養生方法と電気抵抗率との関係

は小さく、これを明確に論ずることはできないが、ポリマー添加の有無に関わらず、材齢1年程度までは注入用の方の電気抵抗率が小さい傾向にある。また、封かん養生の場合では、注入用の断面修復材の電気抵抗率が小さくなる傾向がうかがえ、また、ポリマー無添加の方の電気抵抗率が小さくなる傾向がうかがえる。

8．5 養生条件の違いが電気抵抗率に及ぼす影響

図－24は、同一材齢での水中養生と封かん養生による電気抵抗率の測定結果の相関関係を示したものである。

この図から、電気抵抗率の測定値が比較的小さい（水中養生で30kΩ・cm程度）領域での、本実験で検討した断面修復材の電気抵抗率は、双方の間にかなりの相関関係が確認できるが、電気抵抗率の測定値が大きい領域でのバラツキは非常に大きいことがわかる。

このことは、電気抵抗率が大きい領域での電気抵抗率の測定は、材料自体の電気抵抗率や乾燥程度の影響を大きく受ける可能性があるため、電気抵抗率が比較的小さい領域での電気抵抗率の測定に比べ、その測定に際しての注意が必要であることも示唆していると判断できる。

9. 断面修復材の電気抵抗率に関する考察

コンクリート構造物への電気防食工法を適用する際の防食効果の均一性に着目し、新たに提案したセメント系材料の電気抵抗率の測定方法を用い、現在市販されているセメント系断面修復材の電気抵抗率を測定した。その結果、全体的な傾向として、以下のようなことが明らかとなった。

(1) 現在市販されているセメント系断面修復材の電気抵抗率は、材料自体による差が非常に大きい。

(2) セメント系断面修復材の電気抵抗率は、材料自体の乾燥により増加する傾向にある。

(3) 水中養生での電気抵抗率には、断面修復材へのポリマーの適用や材料の用途による影響がほとんど認められない。

(4) 封かん養生での電気抵抗率では、断面修復材にポリマーを適用した場合や左官や吹付け用に適用される断面修復材の電気抵抗率が大きくなる傾向にある。

(5) 市販されているセメント系断面修復材料の中には、ポリマー添加無で、通常、単位水量が小さい左官や吹付け用の材料でも非常に大きい電気抵抗率を有する材料（例えば、本実験のＤなど）があり、また、逆にポリマー添加有の注入材で比較的小さい電気抵抗率を有する材料（例えば、本実験のＥなど）もある。このことは、電気抵抗率は、材料個々に測定を実施し、これを把握なければならないことを示唆している。

(6) 電気防食工事における具体的な断面修復材の選定に当っては、電気防食の対象となる構造物のコンクリート自体も環境の影響を受け、乾燥程度によって電気抵抗率が変化することも考慮しなければならない。

10. あとがき

コンクリート構造物への電気防食工法の適用において、均一な防食電流を流し鋼材の防食を確実なものとする上で、新たに施工する補修材料や既に施されている補修材料の電気特性を把握することが必要である。本報告は、著者らがこれまでに行ってきた研究の成果を、あらためてとりまとめたものである。

一連の研究の成果として、補修材料の電気抵抗率を簡便に測定するための方法を提案することができた。

この電気抵抗率測定方法（案）は、市販の補修材料の電気抵抗率の測定結果とともに、コンクリート構造物へ適用される電気防食工法の確実性と信頼性を向上させ、電気防食が施された構造物をより耐久性の高いものとすることに活用されるものと期待する。

なお、本研究の成果である電気抵抗率測定方法（案）は、平成 20 年3月制定の土木学会規準「四電極法による断面修復材の体積抵抗率測定方法(案)」（JSCE-K562-2008） のベースとなっている。

【謝辞】

本研究は、独立行政法人　土木研究所と日本エルガード協会が主体となって共同で実施した成果の一部であるが、本研究を実施するに当っては多くの材料メーカーから材料の提供をいただくほか、多大なご協力を受けました。ここに、謝意を表します。

【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107，2001

2)川俣孝治，守屋進，内藤英晴，皆川浩：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,コンクリート工学年次論文集,Vol.26，No.1，2004

3)皆川浩，守屋進，内藤英晴，川俣孝治：セメント系断面修復材の電気抵抗率測定法の試験条件に関する基礎的検討,土木学会第 59 回年次講演会，2006.9

4)高橋武彦：接地技術入門，オーム社，1990

5)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

6)電気学会：電食・土壌腐食ハンドブック，1977

7)守屋進，川俣孝治，内藤英晴，皆川浩：セメント系断面修復材の電気抵抗率測定方法に関する検討,土木技術資料,Vol.49,No.7, pp.64-69,2007.7

8) 内藤英晴，守屋進，皆川浩，川俣孝治：各種セメント系断面修復材の電気抵抗率に関する検討，コンクリート工学年次論文集,Vol.30，No.2，pp.595-600，2008