

論文 コンクリート供試体を対象とした計測条件の違いが二電極法により得られる電気抵抗率に与える影響

工藤 正智*1・眞下 裕也*2・寺澤 広基*3・鎌田 敏郎*4

要旨：本研究では、二電極法をコンクリートに適用するにあたり、電極と供試体との界面に生じる接触抵抗の低減方法と、計測条件の違いが電流値の経時変化および電気抵抗率に与える影響を検討した。その結果、表面研磨が、モルタルと同様にコンクリートにおいても接触抵抗の低減に有効であること、また、電極間距離および接触面積が電流値の経時変化に与える影響は小さいことが確認された。さらに、接触面積を粗骨材最大寸法より大きくすることにより、二電極法により得られる電気抵抗率は、コンクリート中の粗骨材量による影響が小さくなり、安定した計測が可能であることがわかった。

キーワード：コンクリート、二電極法、電気抵抗率、接触面積、電極間距離、粗骨材体積濃度

1. はじめに

鉄筋コンクリート中の鉄筋の腐食とコンクリートの密実性、特にコンクリートの電気抵抗との間には密接な関係がある。そのため、コンクリートの電気抵抗は、鉄筋コンクリート内部の鉄筋の腐食に対する抵抗性を評価する指標とされている。コンクリートの電気抵抗を計測する手法として、四電極法、4 プローブ法および二電極法がある。このうち、断面修復材の電気抵抗率の計測方法として、四電極法（図-1 参照）に関する土木学会の規準¹⁾があるが、供試体を用いる方法であり、実構造物を対象としたものではない。そのため、実構造物におけるかぶりコンクリートの電気抵抗を評価する方法として、4 プローブ法あるいは二電極法を適用する手法の検討が進められている^{2, 3)}。

上記の背景のもと、筆者らは、二電極法（図-2 参照）に着目し、コンクリートと比較して均質な材料であるモルタルを対象として、電極と供試体との界面の接触抵抗、あるいは供試体において電流が流れる領域などについて基礎的検討を行ってきた^{4, 5)}。これに対して、コンクリートを対象とした二電極法の計測にあたっては、粗骨材の存在が計測結果に影響を与えと考えられる。しかしながら、二電極法では、経時変化する電流値の印加開始から終了までの適切な計測時間に関する検討が十分に行われていない。また、接触抵抗の低減方法として既往の研究⁴⁾で提案されている表面研磨のコンクリートにおける有効性は不明である。

そこで本研究では、コンクリート供試体を対象として、モルタル供試体と同様の接触抵抗の低減方法の有効性を検討した。続いて、電極の接触面積、電極間距離および

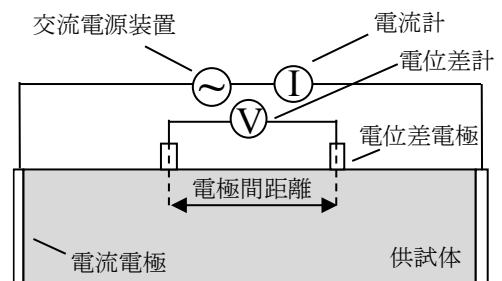


図-1 四電極法の模式図

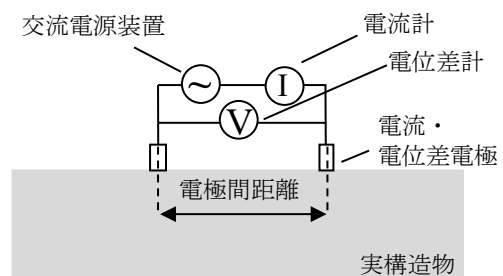


図-2 二電極法の模式図

表-1 角柱供試体の配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					
		W	C	SI	S2	GI	AE 減水剤
61.7	47.6	167	271	266	624	983	2.683

印加電圧に着目し、これらの計測条件が二電極法により得られるコンクリートの電流値の経時変化および電気抵抗率に与える影響を調べた。さらに、粗骨材体積濃度が異なる供試体に対し、電極間距離および接触面積の違いが得られる電気抵抗率に与える影響についても検討を加えた。

*1 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 (学生会員)

*2 大阪大学 工学部地球総合工学科 (学生会員)

*3 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻助教 博士(工学) (正会員)

*4 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻教授 博士(工学) (正会員)

表-2 円柱供試体の配合

粗骨材体積濃度 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					
			W	C	SI	S2	G1	AE 減水剤
55	55	42.9	248	451	433	186	852	4.51
68	55	43.3	155	282	544	233	1052	2.82
78	55	35.9	155	282	457	196	1207	2.82

2. 実験概要

2.1 使用材料および供試体の作製

まず、計測条件の検討を行うことを目的とした角柱供試体の作製について述べる。コンクリートの配合を表-1に示す。セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。細骨材は大阪府茨木産の砕砂(SI)と滋賀県伊吹産の石灰砕砂(S2)を3:7の比率で混ぜ合わせて使用し、粗骨材は滋賀県土山産の碎石を使用した。混和剤にはAE減水剤標準型を用いた。供試体の寸法は、幅150mm、長さ150mm、高さ70mmとした。モルタルでの計測結果と比較するため、コンクリートをウェットスクリーニングして採取したモルタルでの供試体も併せて作製した。いずれの供試体も、水温20℃一定の恒温水槽にて水中養生を行った。計測時の材齢は1年以上が経過している。

続いて、粗骨材体積濃度の検討を行うことを目的とした円柱供試体の作製について述べる。配合を表-2に示す。セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。細骨材は佐賀県小川島産の海砂(SI)との京都府亀岡市東別院町産の砕砂(S2)を2:5の比率で混ぜ合わせて使用し、粗骨材は京都府亀岡市東別院町産の碎石2010(G1)、碎石1505(G2)を5:3の比率で混ぜ合わせて使用した。混和剤にはAE減水剤標準型を用いた。粗骨材体積をコンクリート全体の体積で除した値を粗骨材体積濃度とし、粗骨材体積濃度は、55%、68%および78%とした。供試体寸法は、直径φ100mm、高さ200mmとして、各配合1体ずつ作製した。計測時の材齢は7日である。

2.2 二電極法の計測方法

二電極法による計測状況を写真-1に示す。計測では、交流電源装置(使用保証電力範囲:1~135V、設定周波数範囲:40~500Hz、内部インピーダンスによる出力電圧変動:±0.15V以内)を使用した。電源周波数は、既往の研究⁹⁾を参考にして、商用電源周波数(本研究では60Hz)と重ならない73.3Hzに設定した。電極は、接触面積を8×8mm、8×30mmおよび40×40mmの3種類とした。電極の種類を写真-2に示す。なお、電極の材質はSUS304とした。電極間距離は、内側の電極端部間の距離を電極間距離と定義し、10、30および50mmとした。印加電圧は5、30および100Vに設定した。接触抵抗の低減処理方法は、接触媒質と表面研磨とを併用する場合を「処理有り」、これら両方の処理を行わない場合を「処理無し」

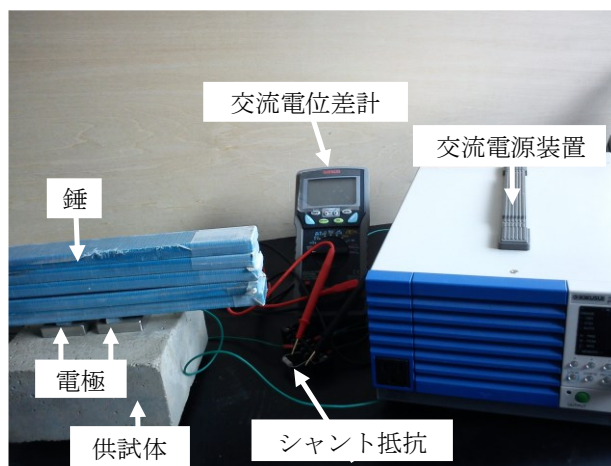


写真-1 二電極法による計測状況

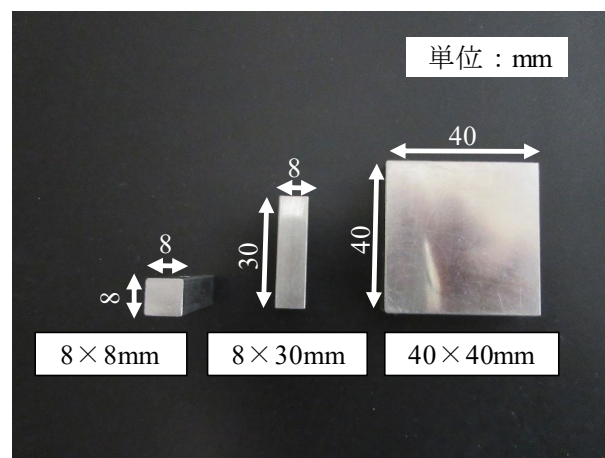


写真-2 電極の接触面積

とした。電極と供試体との界面の接触媒質には、ケラチンクリーム(主材料:塩化ナトリウム、プロピレングリコール)を使用した。表面研磨には粗さ#400の研磨紙を使用し、各供試体の表面を約0.2mm研磨した後、計測を行った。なお、表面研磨の深さは、研磨を行わない表面に当て板を添えて、その面から研磨を行った表面までの距離を定規により計測した。

2.3 電流値および電気抵抗率の算出方法

1秒間隔で60秒間にわたって回路全体に流れる電流値(以降、電流値と呼ぶ)を計測した。電流値は、電極に電圧を与えた際に、供試体と直列に接続するシャント抵抗に加わる電圧を交流電位差計により計測し、式(1)より

算出した。

$$I = \frac{V}{R} \quad (1)$$

ここで、 I : 電流値(A) , V : 印加電圧(V), R : ショント抵抗の抵抗値(Ω) である。

既往の研究⁴⁾により、接触抵抗を低減させた場合、印加開始から1分後以降、電流値が一定の値を示すことが報告されている。そこで、印加開始から60秒後の電流値より、物質固有の値である電気抵抗率を式(2)より算出することとした。

$$\rho = \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{V}{I_{60}} \quad (2)$$

ここで、 ρ : 電気抵抗率($\Omega \cdot m$) , κ : セル定数(1/m), V : 印加電圧(V), I_{60} : 印加開始から60秒後の電流値(A) である。

なお、セル定数は、電極形状、供試体寸法および電極配置により決定される定数である⁷⁾。セル定数は、3次元電流分布解析(VOLT-j ω)を使用し、計測条件と同一寸法のモデルを用いて、セル定数を算出した。角柱供試体および円柱供試体の計測条件のセル定数を表-3 および表-4 に示す。

3. 実験結果および考察

3.1 接触抵抗の低減処理の検討

接触抵抗の低減処理方法の違いによる電流値の経時変化を図-3 および図-4 に示す。図中の値は、接触面積8×30mm、電極間距離30mm、印加電圧30Vの条件で、10回の計測を繰り返した結果である。図-3 および図-4 より、接触抵抗の低減処理無しの場合、毎回の計測値のばらつきは大きく、電流値の変化の傾向に特に類似性は見られない。一方、低減処理有りの場合では、10回の計測とも時間の経過とともに電流値が増加し、概ね一定の値になることがわかった。また、処理無しの場合より、処理有りの場合の方が、印加開始60秒後の電流値が大きくなることが明らかとなった。既往の研究⁴⁾により、低減処置有りの場合、低減処理無しの場合と比較して、印加電圧を電流値で除したみかけの電気抵抗が約0.1倍となることから、本実験結果の値は妥当であると考えられる。

以上より、著者らが提案したモルタルでの接触抵抗の低減方法⁴⁾が、コンクリートに対しても有効であることが確認された。以降の検討では、全ての計測条件において接触抵抗を低減処理した後、計測を実施した。

3.2 計測条件の違いが電流値の経時変化および電気抵抗率に与える影響

(1) 電流値の経時変化

接触面積、電極間距離および印加電圧を計測条件とし

表-3 角柱供試体のセル定数

		接触面積		
		8×8mm	8×30mm	40×40mm
電極間距離 (mm)	10	61.2	68.5	71.3
	30	24.7	30.3	32.9
	50	10.6	13.4	15.4

表-4 円柱供試体のセル定数

		接触面積		
		8×8mm	8×30mm	40×40mm
電極間距離 (mm)	10	57.1	23.8	11.9
	30	65.3	—	—
	50	70.1	—	—

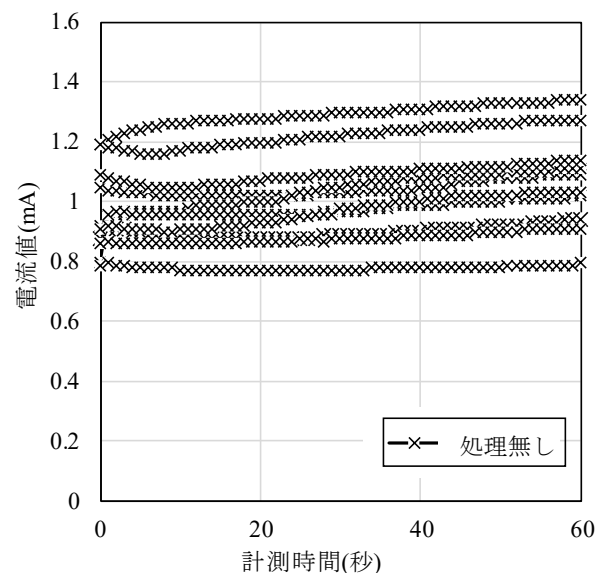


図-3 電流値の経時変化（処理無し）

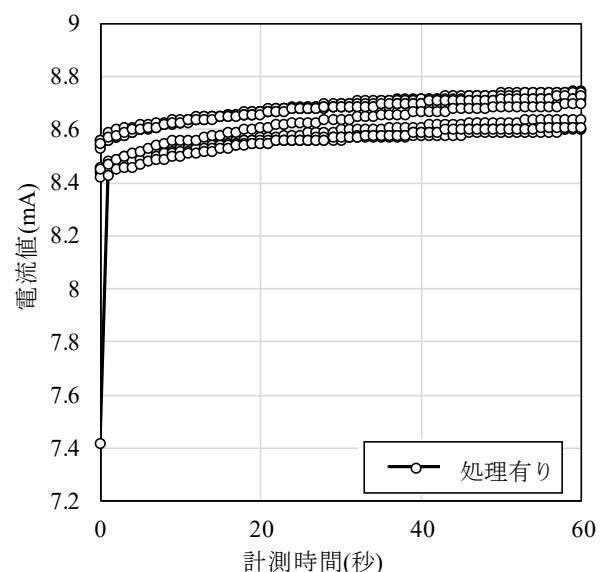
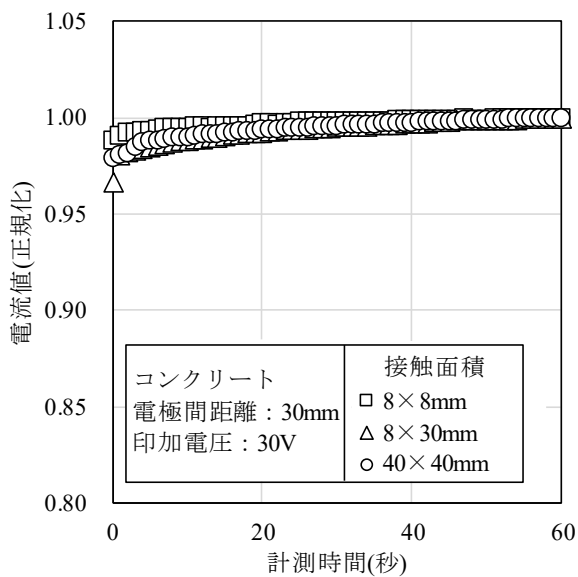
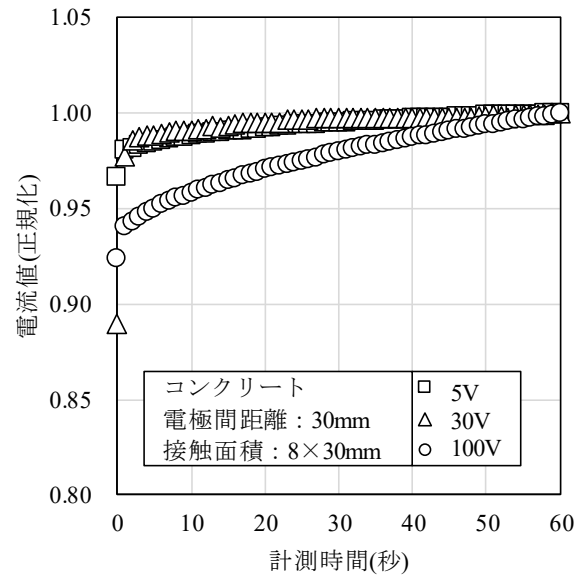


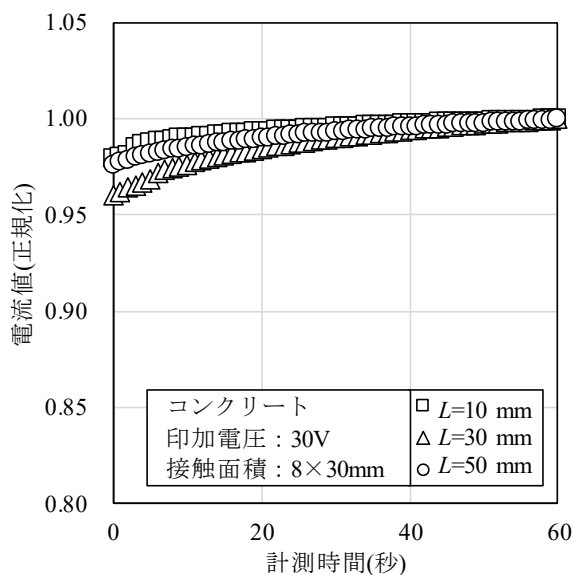
図-4 電流値の経時変化（処理有り）



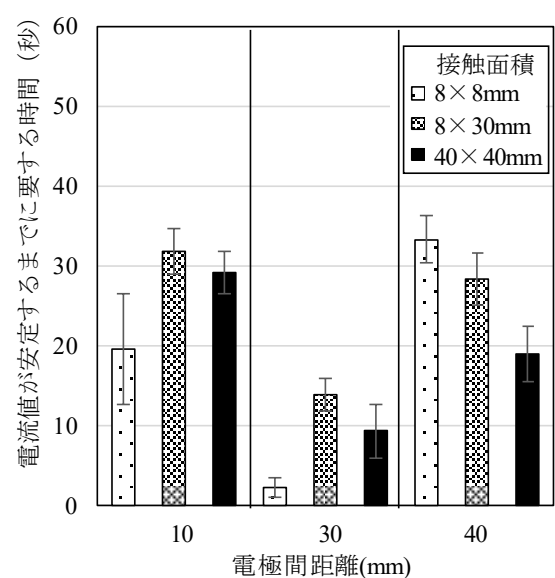
図－５ 計測された電流値の経時変化（接触面積）



図－７ 計測された電流値の経時変化（印加電圧）



図－６ 計測された電流値の経時変化（電極間距離）

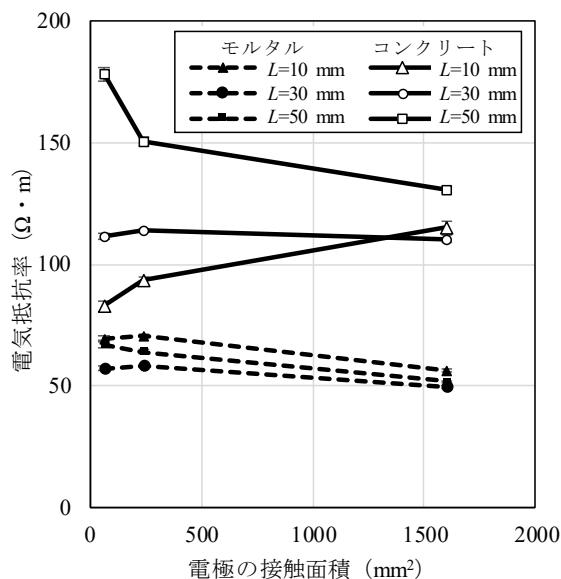


図－８ 電流値が安定するまでに要する時間

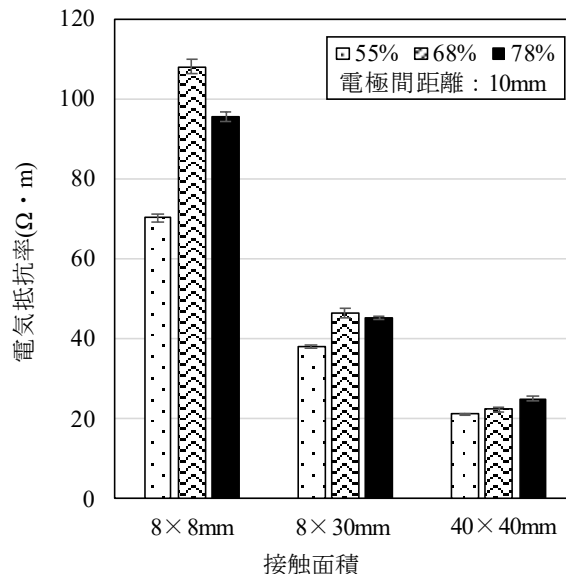
て、計測された電流値の経時変化を図－５、図－６および図－７に示す。図中の値は、印加開始から 60 秒後の値で正規化した電流値の 10 回計測の平均値とし、 L は電極間距離を示している。図－５ および図－６ より、電極間距離および接触面積の違いが電流値の経時変化に与える影響は小さいことが確認できた。既往の研究⁸⁾によれば、電流が流れる領域が電極間距離により変化することが報告されているが、本検討の結果が、この影響に起因するものであるかどうかについては、現時点では不明である。また、図－７ より、各電圧を比較すると、印加電圧 30V 以下では、直ちに一定の値を示すことがわかる。一方、印加電圧 100V では、今回設定した計測時間で計測され

る電流値が一定の値を取るまでに時間を要する。これについては、印加電圧が大きくなることで、コンクリート内部温度が変化すること、コンクリート中に流れる電流密度が大きくなることなどが考えられるが、現時点では不明である。

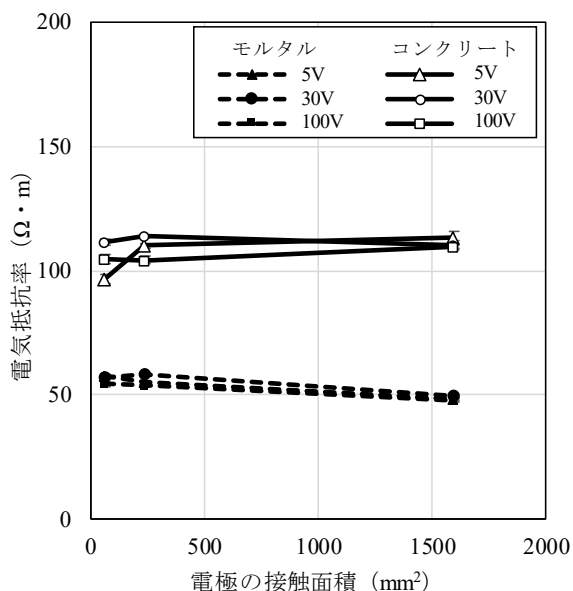
続いて、最適な計測時間の検討を行う。低減処理有りの場合では、10 回の計測全てにおいて図－５ および図－６ に示すように、時間の経過とともに電流値が増加し、概ね一定の値になる傾向が確認されており、ばらつきも小さいことから、各電極間距離およびにおける電流値の 10 回の平均値により評価した。印加開始から 60 秒後に計測された電流値の 99.0%の値を電流値が安定した値と



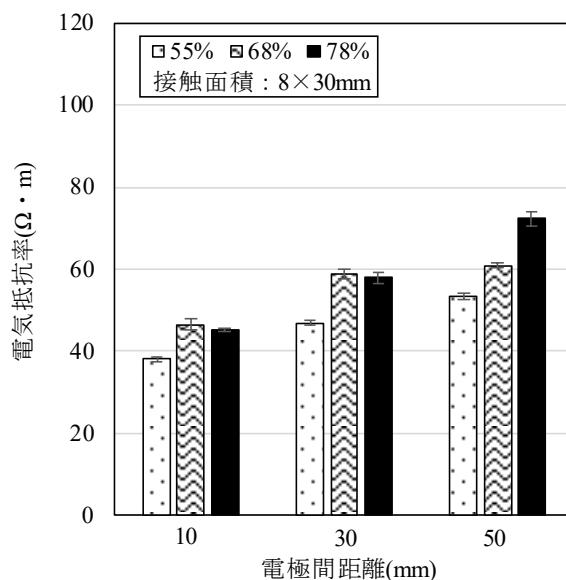
図－9 モルタルおよびコンクリートの電気抵抗率
(電極間距離)



図－11 粗骨材体積濃度ごとの電気抵抗率
(接触面積)



図－10 モルタルおよびコンクリートの電気抵抗率
(印加電圧)



図－12 粗骨材体積濃度ごとの電気抵抗率
(電極間距離)

定義した。印加電圧 30V の場合における電流値が安定するまでの時間を図－8 に示す。図より、いずれの計測条件においても印加開始から 40 秒以内で電流値が安定することが確認された。ただし、既往の研究⁹⁾より、コンクリートの含水状態等により接触抵抗が変化し、電流値の経時変化に影響を与える可能性があることが指摘されていることから、本計測結果にも、この影響が含まれていることに留意する必要がある。

(2) 電気抵抗率

電極の接触面積とモルタルおよびコンクリートの電気抵抗率との関係について、電極間距離および印加電圧

を変化させた場合の結果を図－9 および図－10 にそれぞれ示す。図中の値は、印加開始から 60 秒後の電気抵抗率を各 10 回計測した結果の平均値を示している。図－9 より、全ケースにおいて、既往の研究⁹⁾と同様に、モルタルよりもコンクリートの電気抵抗率が大きくなった。また、モルタルでは電極間距離に依らず電気抵抗率がほぼ同じ値を示すが、コンクリートでは電極間距離の違いが計測される電気抵抗率に影響を与えることが確認された。さらに、コンクリートの場合、電極の接触面積が小さいと、電極間距離が大きくなるに従い電気抵抗率が大きくなった。これは、粗骨材量が増えることで電気抵抗率が

大きくなるためと考えられる。また、モルタル、コンクリートに依らず、計測によるばらつきが非常に小さいことが確認された。既往の研究²⁾により、4プローブ法においては、電極間距離が小さくなるとばらつきが大きくなることが指摘されているが、二電極法では、電極間距離がばらつきに与える影響は小さく、電極間距離が小さい場合においても、ばらつきが小さいことが確認された。

図-10より、コンクリートにおいて、電極の接触面積が大きくなると、印加電圧に依らず、ほぼ同じ値をとることが確認された。これは、粗骨材最大寸法より接触面積が大きい電極を使用することにより、粗骨材の影響が小さくなったためと考えられる。

3.3 粗骨材体積濃度の違いが電気抵抗率に与える影響

接触面積あるいは電極間距離と電気抵抗率との関係について、コンクリートの粗骨材体積濃度の影響を調べた結果を図-11および図-12に示す。図-11より、電極間距離を10mmで一定とした場合、接触面積が大きくなると粗骨材体積濃度が電気抵抗率に与える影響は小さくなる傾向が見られる。特に接触面積が40×40mmでは、その影響はほとんど見られない。これは、接触面積が粗骨材最大寸法より大きい場合、接触面積が小さい場合と比較して、電流が流れる領域内に存在する粗骨材の割合が小さくなるためと考えられる。

図-12より、電極間距離が小さい場合、粗骨材体積濃度が電気抵抗率に与える影響は、やや小さくなった。これは、電極間距離が小さい場合、電流が流れる領域に存在する粗骨材量が小さくなるためと推察される。

以上より、粗骨材量が増加すると電気抵抗率に影響を与えるが、接触面積を粗骨材最大寸法より大きくすることにより、粗骨材量の影響を小さくすることが可能であると考えられる。

4. まとめ

本研究で得られた結論を以下にまとめる。

- (1) モルタルに対する二電極法の接触抵抗の低減方法として提案されている表面研磨は、コンクリートに対しても有効である。
- (2) 印加電圧が電流値の経時変化に与える影響は大きくなった。一方、電極間距離および電極の接触面積が電流値の経時変化に与える影響は小さく、印加開始から約40秒程度で電流値は安定する。
- (3) 電極の接触面積を粗骨材最大寸法より大きくすることで、二電極法により得られる電気抵抗率は、コンクリート中の粗骨材量の影響が小さくなり、安定した計測が可能である。

謝辞

本研究を取りまとめるにあたり、大阪大学の服部晋一氏、立命館大学の内田慎哉講師および東北大学の皆川浩准教授にご協力いただいた。また、電場解析(VOLT-jω)実施にあたり、小林篤史氏をはじめとする株式会社フォトンの方々にご助力いただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) コンクリート委員会・規準関連小委員会：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-K 562-2008)」の制定，土木学会論文集E，Vol.64，No.3，pp.427-434，2008.7
- 2) 皆川浩，齊藤佑貴，榎原彩野，久田真：電極の設置条件が4プローブ法による体積抵抗率の測定結果に及ぼす影響についての基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.1087-1092，2009.7
- 3) 福上大貴，内田慎哉，鎌田敏郎，大橋正弥：二電極法により得られるモルタル供試体の電気抵抗に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.1699-1704，2015.7
- 4) 工藤正智，内田慎哉，鎌田敏郎，服部晋一，福上大貴：電極の設置条件の違いが二電極法により測定されるモルタル供試体の電気抵抗に与える影響，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第16巻，pp.207-212，2016.10
- 5) 工藤正智，内田慎哉，鎌田敏郎，福上大貴：モルタル供試体の高さおよび電極間距離の違いが二電極法により測定される電気抵抗に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，pp.2199-2204，2016.7
- 6) 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，pp.1107-1112，2004.7
- 7) 大塚利行，加納健司，桑畑進：ベーシック電気化学，化学同人，pp.10-11，2000
- 8) 福上大貴，内田慎哉，鎌田敏郎，服部晋一，工藤正智：二電極法におけるモルタル中の電流密度分布に関する解析的検討，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第16巻，pp.329-334，2016.10
- 9) 関博，宮田克二，北峯博司，金子雄一：比抵抗によるコンクリートの緻密性に関する実験的一考察，土木学会論文集，V-17，No.451，pp.49-57，1992.8