

# 報告 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

福上 大貴\*1・内田 慎哉\*2・鎌田 敏郎\*3・大橋 正弥\*4

**要旨**：本研究では、水セメント比が 35, 50, 65%のモルタル供試体を対象として、二電極法により得られる電気抵抗に影響を及ぼす印加電圧、電極形状、電極間距離の影響を把握するとともに、二電極法の測定結果と四電極法および4プローブ法の測定結果との比較を試みた。その結果、今回設定した計測条件（印加電圧、電極形状、電極間距離）全てが二電極法の測定結果に影響を与えることが明らかとなった。また、二電極法、四電極法、4プローブ法の測定結果には差異が見られ、二電極法により電気抵抗を計測する場合は、接触抵抗の影響を大きく受けることから、この影響を低減する工夫が必要になることがわかった。

**キーワード**：非破壊試験、二電極法、四電極法、4プローブ法、電気抵抗、印加電圧、電極形状、電極間距離

## 1. はじめに

コンクリート中の鉄筋の腐食により生じる腐食電流の大きさは、コンクリートの電気抵抗が大きければ小さく、逆に、コンクリートの電気抵抗が小さければ大きくなる。すなわち、コンクリートの電気抵抗を測定することにより、コンクリート中の鉄筋の腐食に対する抵抗性を把握することが可能となる。したがって、コンクリートの電気抵抗を把握することの意義は大きいといえる。

モルタルやコンクリートなどのセメント系材料の電気抵抗を測定する方法として、四電極法、4プローブ法、二電極法などがある。これらのうち四電極法は、断面修復材の体積抵抗率を測定する方法として、土木学会にて試験方法の規準が整備されている<sup>1)</sup>。しかしながら、この試験は、供試体を対象としたものであり、実構造物に対して現地で四電極法により計測を行うことは困難である。一方、図-1に示す4プローブ法は、非破壊かつ多点での測定が可能な試験方法であり、多くの研究成果が報告されている<sup>2)</sup>。これに対して、筆者らが検討を行っている二電極法（図-2参照）は、4プローブ法と同様、非破壊かつ多点での測定が可能な測定方法である。加えて、電極の設置数が4プローブ法と比較して少ないため、より簡易にセメント系材料の電気抵抗を測定できる方法である。これまでに著者らは、二電極法に関して、再現性のある安定した評価指標を得るための供試体寸法や供試体端部から電極設置位置までの距離などの検討を行っている<sup>3)</sup>。しかしながら、二電極法の研究報告数は、四電極法や4プローブ法などと比べて少なく、二電極法の計測結果に影響を及ぼす電極などに関する計測条件については不明な部分が多い。また、各手法によって得られ

る電気抵抗値の相互比較も十分に行われていないのが現状であった。

そこで本研究では、水セメント比の異なるモルタル供試体を対象として、二電極法による計測を行い、印加電圧、電極形状、電極間距離の違いが電気抵抗に与える影響について検討を行うとともに、二電極法の測定結果と四電極法および4プローブ法の測定結果との比較も併せて行った。

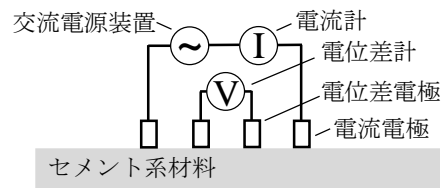


図-1 4プローブ法

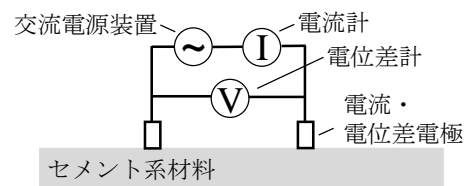


図-2 二電極法

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料および配合

セメントは密度：3.16g/cm<sup>3</sup>の普通ポルトランドセメントを用いた。細骨材は表乾密度：2.62g/cm<sup>3</sup>の三重県宮川産の陸砂を使用した。粗骨材は兵庫県赤穂産で、表乾密度：2.56g/cm<sup>3</sup>と2.55g/cm<sup>3</sup>の砕石を1:1の比率で混ぜ合

\*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 立命館大学 理工学部環境システム工学科講師 博士(工学) (正会員)

\*3 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)

\*4 立命館大学 理工学部環境システム工学科

わせて使用した。混和剤には、変性ロジン酸系 AE 剤とリグニンスルホン酸系の AE 減水剤を用いた。表-1 に配合を示す。本研究では、水セメント比を 35, 50, 65% の 3 水準とした。

## 2.2 供試体の作製および養生

コンクリートの練混ぜには二軸強制練りミキサーを使用し、セメント、細骨材を投入し、30 秒の空練り後、粗骨材、水、混和剤を投入し、120 秒間の本練りを行った。その後、コンクリートを排出し、ウェットスクリーニングして採取したモルタルを使用した。

供試体は、40×40×160mm とし、各水セメント比につき、それぞれ 1 本ずつ作製し、型枠に打ち込んで 24 時間後に脱型した。脱型後の供試体は、20℃一定の恒温水槽にて材齢 28 日まで水中養生を行った。

## 2.3 電気抵抗の測定方法

本研究では、二電極法、四電極法、4 プローブ法の 3 種類の測定方法により、材齢 28 日目に測定を行った。印加電圧は、二電極法では 5, 30, 100V とし、四電極法および 4 プローブ法は 30V のみとした。また、周波数は既往の研究<sup>2,3,4)</sup>を参考に、いずれの測定方法においても 73.3Hz とした。各種測定方法の詳細は以下にそれぞれ示す。

### (1) 二電極法

二電極法の測定状況を写真-1 に示す。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）により電極に電圧を与えた際、シャント抵抗（電極形状にかかわらず、印加電圧 5, 30V では 10Ω，印加電圧 100V では 100Ω を使用）に加わる電圧を交流電位差計により測定し、回路全体を流れる電流値を測定した。この値と電圧を用いて、オームの法則によりみかけの電気抵抗を算出した。算出式を式(1)に示す。

$$R = V / I \quad (1)$$

ここで、 $R$ ：みかけの電気抵抗(Ω)， $V$ ：電圧(V)， $I$ ：電流(A)である。

本研究で使用した電極を写真-2 に示す。電流・電位差電極の形状は 3 ケース設定した。すなわち、φ9×30mm の円柱型（供試体に接触する面：φ9mm の円形（φ9mm 電極））、8×8×30mm の直方体型（供試体に接触する面：8×8mm の正方形（8×8mm 電極））、8×30×8mm の直方体型（供試体に接触する面：8×30mm の長方形（8×30mm 電極））である。なお、φ9mm 電極と 8×8mm 電極の断面積は同程度であり、接触面の形状の違いが測定値に与える影響を把握するために行うものである。これに対して、8×30mm 電極は、その他の電極と比較して、面で供試体と接するものである。なお、いずれの電極においても、その材質は SUS304 であり、電極を供試体に接触させる

表-1 配合

W/C (%)	s/a (%)	単用量(kg/m <sup>3</sup> )					C×(%)	
		W	C	S	G1	G2	AE剤	AE減水剤
35	38	155	443	657	524	522	0.7	0.6
50	42	155	310	772	521	519	0.7	0.6
65	44	155	238	835	519	517	0.7	0.6

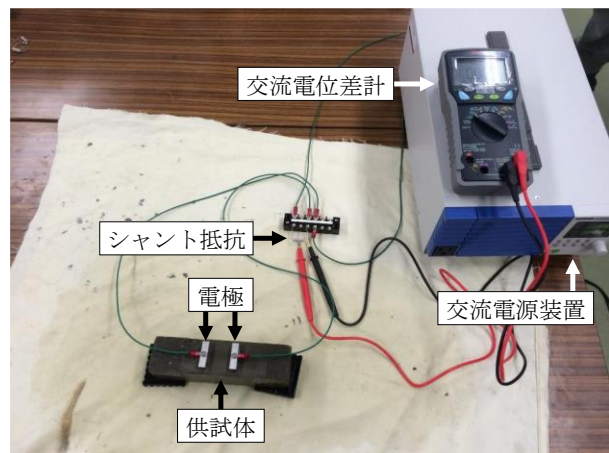


写真-1 二電極法の測定状況

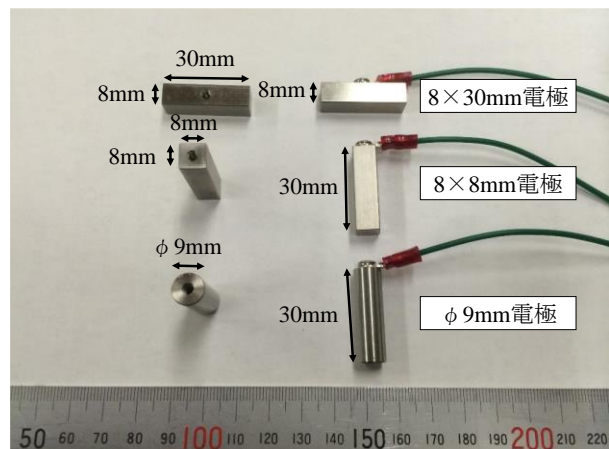


写真-2 本研究で使用した電極

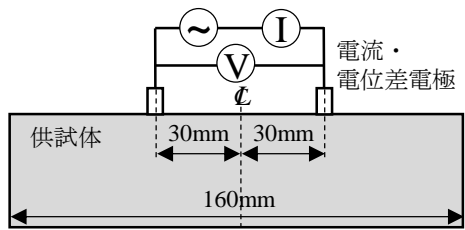
際は、導電性物質を電極の接触面に塗布した。

電極間距離（電流・電位差電極間距離）は、60, 90, 120mm の 3 水準に設定した（図-3 (a)参照）。

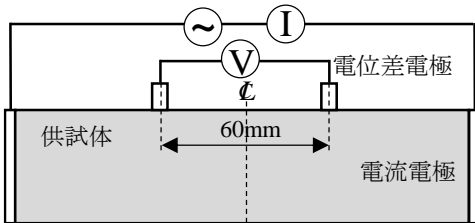
### (2) 四電極法

四電極法で用いた電位差電極は、二電極法で使用した電流・電位差電極と同じものである。一方、電流電極は、40×40×10mm である。ここでは、電位差電極間距離を電極間距離と定義し、60mm に設定した（図-3 (b)参照）。

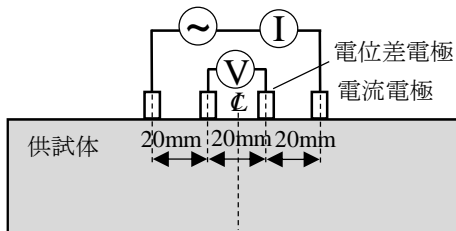
また、四電極法では、シャント抵抗（電極形状にかかわらず 100Ω）に加わる電圧から回路全体を流れる電流値を測定し、この値と電位差電極により測定した電圧を用いて、式(1)よりみかけの電気抵抗を算出した。



(a) 二電極法



(b) 四電極法



(c) 4プローブ法

図-3 各種測定方法の電極設置位置  
(電極間距離：60mm)

### (3) 4プローブ法

4プローブ法における電流電極と電位差電極は、二電極法の電流・電位差電極および四電極法の電位差電極と同じである。また、 $\phi 9\text{mm}$ 電極、 $8\times 8\text{mm}$ 電極ではシャント抵抗の抵抗値を $10\Omega$ 、一方 $8\times 30\text{mm}$ 電極では $100\Omega$ のシャント抵抗を使用した。ここでは、電流電極間距離を電極間距離と定義し、 $60\text{mm}$ に設定した。なお、電位差電極間の距離は $20\text{mm}$ である(図-3(c)参照)。

また、4プローブ法におけるみかけの電気抵抗は、四電極法と同様にして求めた。

なお、いずれの測定方法においても、測定は供試体を水中から取り出した後、表面の水分を拭き取った状態で行った。また、いずれの計測においても、図-3に示す供試体中央部において、各電極間距離にて3回ずつの測定をそれぞれ行った。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 各種計測条件の違いが電気抵抗に与える影響

#### (1) 印加電圧

図-4に、 $\phi 9\text{mm}$ 電極を使用して二電極法(電極間距

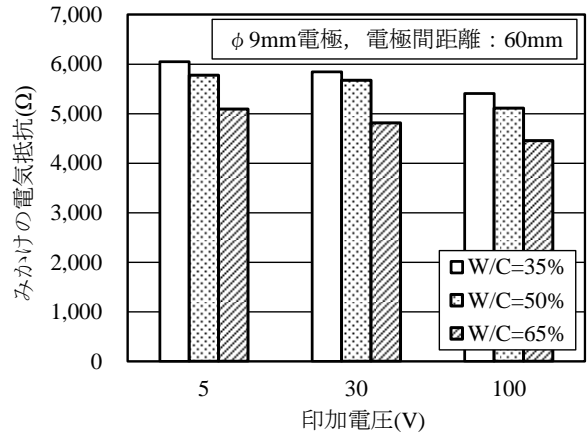


図-4 印加電圧とみかけの電気抵抗の関係

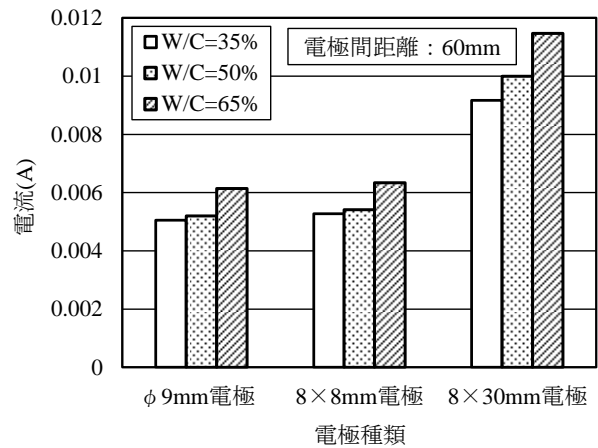


図-5 二電極法により測定した電流

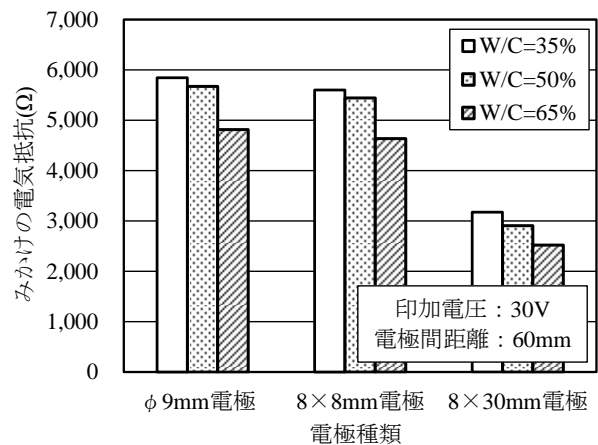


図-6 二電極法により算出したみかけの電気抵抗

離： $60\text{mm}$ )により算出したみかけの電気抵抗と印加電圧との関係を示す。図より、水セメント比の違いにかかわらず、電圧が大きくなると、みかけの電気抵抗は小さくなった。また、いずれの電圧においても、水セメント比が小さくなるとみかけの電気抵抗は大きくなった。こ

れは、既往の研究で報告されているように、水セメント比が小さくなることで、モルタルの内部組織が緻密になったことによるものと推察される<sup>5,6)</sup>。

### (2) 電極形状

電極種類を変化させた場合に、二電極法（電極間距離：60mm）で測定した電流を図-5に、その時のみかけの電気抵抗を図-6にそれぞれ示す。図-5より、水セメント比の違いにかかわらず、供試体中を流れる電流は、φ9mm電極と8×8mm電極で概ね同じ値となった。また、これらと8×30mm電極とを比較すると、後者の場合の電流が大きくなっていることもわかる。これは、供試体に接触する電極の面積が大きくなったことにより、供試体中に電流が流れやすくなったためと考えられる。また、図-6に示すみかけの電気抵抗は、φ9mm電極と8×8mm電極がほぼ等しい値となり、8×30mm電極がそれらよりも小さな値を示した。これは、図-5に示す電流の大小関係から自明である。

### (3) 電極間距離

φ9mm電極を用いた場合の電極間距離とみかけの電気抵抗との関係を図-7に示す。印加電圧や水セメント比にかかわらず、電極間距離の増加に伴い、みかけの電気抵抗は大きくなった。これは、電極間距離が大きくなると、供試体中を流れる電流の経路が長くなったためであり、著者らの既往の研究結果<sup>3)</sup>とも一致する。

### 3.2 各種測定方法により得られる結果の比較

水セメント比35%の供試体を対象として、電極間距離60mmの場合に、各種測定方法により算出したみかけの電気抵抗を図-8にそれぞれ示す。図より、みかけの電気抵抗は、二電極法、四電極法、4プローブ法の順番で小さくなった。また、二電極法では電極形状によってみかけの電気抵抗が大きく変化したが、四電極法および4プローブ法では電極形状を変えてもみかけの電気抵抗は概ね同じ値になることが明らかとなった。

表-2に、各種測定方法により測定した供試体の電位差の測定値（電極間距離：60mm）を示す。表に示す電位差の実験値は、全実験ケース（水セメント比3種類、電極3種類）で測定した範囲を示している。ただし、二電極法の場合は印加電圧30Vからシャント抵抗に加わる電圧を差し引いた値を、四電極法および4プローブ法の場合は供試体に設置した電位差電極により測定した値とした。一方、電位差の理論値は、印加電圧30Vを電流電極の間隔で除した後、電位差電極の間隔を乗じたものである。表中の二電極法の電位差の実験値と理論値は、同程度の値となっている。二電極法では、電流電極と電位差電極を共通としているためである。続いて、四電極法では、電位差の実験値と理論値が、二電極法と同様、概ね同じ値となった。四電極法では、電流が供試体断面全

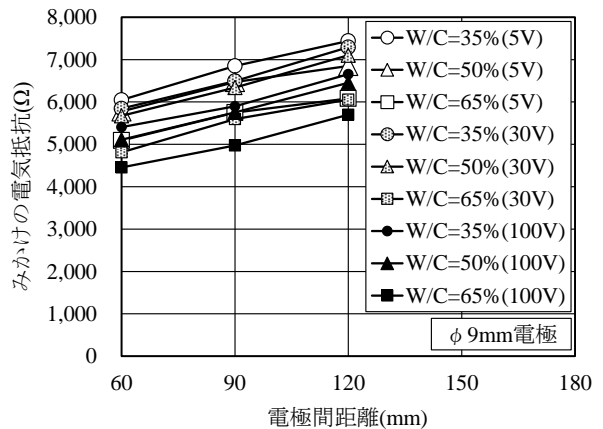


図-7 電極間距離とみかけの電気抵抗の関係

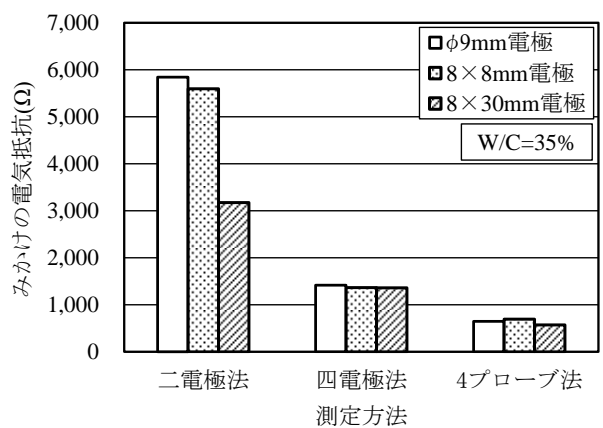


図-8 各種測定方法により算出したみかけの電気抵抗

表-2 供試体の電位差の測定値

測定方法	電位差(V)	
	実験値	理論値
二電極法	29.0~29.5	30.0
四電極法	10.2~10.9	11.25
4プローブ法	2.3~5.5	10.0

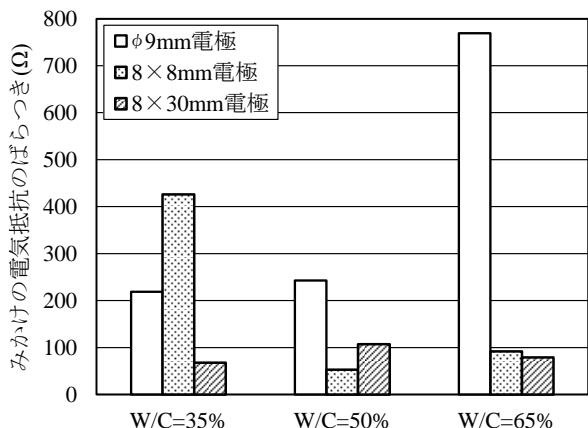


図-9 二電極法におけるみかけの電気抵抗のばらつき

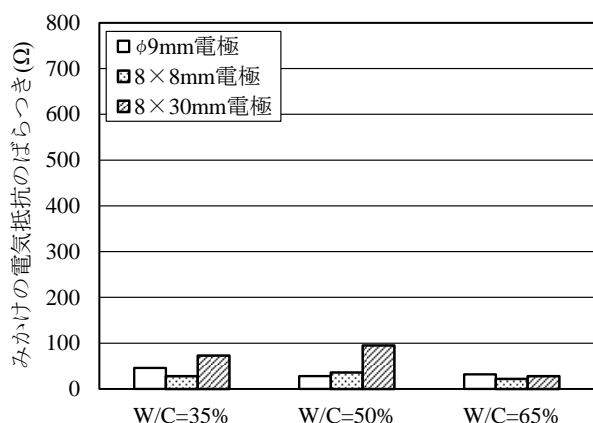


図-10 四電極法における  
みかけの電気抵抗のばらつき

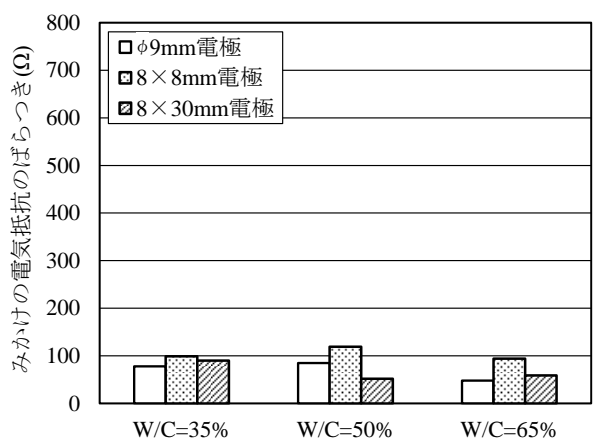


図-11 4プローブ法における  
みかけの電気抵抗のばらつき

体を流れるため、等電位面が供試体の長手方向に直交して一様に分布する。そのため、電位差の両者の値が同じになったと考えられる。これに対して、4プローブ法では、実験値と理論値に差異が見られた。この方法では電位は通電点を中心として同心円状に分布するため<sup>2)</sup>、両者に差異が生じたと推測できる。

図-9, 10, 11に、電極間距離 60mm における二電極法、四電極法および4プローブ法により算出したみかけの電気抵抗のばらつきを示す。ここでいうばらつきとは、3回の測定によって得られた結果のうち、最大値から最小値を差し引いた値とした。図-9, 10, 11を比較すると、二電極法は、四電極法および4プローブ法と比べて、みかけの電気抵抗のばらつきが著しく大きくなっている。これは、川俣らが報告しているように<sup>4)</sup>、二電極法で得られた電気抵抗が電極と供試体との間の接触抵抗の影響を受けたことによるものと考えられる。二電極法では、電流・電位差電極を共通とし、電極間での電位差から電気抵抗を求める。そのため、供試体表面の状態や供試体

への電極の接着状況などにより接触抵抗が変化し、電気抵抗に影響を及ぼしたと考えられる。一方、四電極法および4プローブ法では、二電極法と同様に接触抵抗の影響は受けるものの、電流電極間に設置した電位差電極の測定値より電気抵抗を求めるため、電流電極の接触抵抗が測定結果に及ぼす影響は小さくなった<sup>4)</sup>。以上のことから、二電極法による測定を実施する際は、例えば、測定する周波数を大きくするなどして、接触抵抗を低減することが重要となる。

電極接触面積を同程度としたφ9mm電極と8×8mm電極の結果を比較すると、みかけの電気抵抗のばらつきの大小は、測定方法や水セメント比により異なる傾向を示し、明瞭な関係性を見出すことができなかった。また、電極接触面積を大きくした8×30mm電極の場合も同様であった。既往の研究では、供試体との接触面積が大きい長方形の電流電極を使用した方が測定結果が安定すると報告されていたが<sup>2)</sup>、本研究ではこれを確認することはできなかった。以上より、本研究の範囲内では、ばらつきが小さい安定した計測を行うのに適した電極形状を決定することが困難であった。

#### 4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

二電極法：

- (1) 印加電圧が大きくなると、みかけの電気抵抗は小さくなる。また、水セメント比が小さくなると、みかけの電気抵抗は大きくなる。
- (2) 供試体に対する電極の接触面積が大きくなると、供試体に流入する電流は大きくなり、みかけの電気抵抗は小さくなる。
- (3) 電極間距離が長くなると、みかけの電気抵抗は小さくなる。

二電極法、四電極法、4プローブ法での比較：

- (4) みかけの電気抵抗は、二電極法、四電極法、4プローブ法の順番で小さくなる。また、二電極法では、電極形状によってみかけの電気抵抗が大きく変化するが、四電極法および4プローブ法では、電極形状が異なっても、みかけの電気抵抗は概ね同じ値となる。
- (5) 二電極法は、四電極法および4プローブ法と比べて、みかけの電気抵抗のばらつきが著しく大きくなる。これは、接触抵抗に起因するものと考えられるため、二電極法による測定を実施する際は、接触抵抗を低減することが重要となる。

#### 謝辞

本研究を行うにあたり、大阪大学大学院服部晋一氏、

楊 昭明氏に多大なるご助力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) コンクリート委員会・規準関連小委員会：土木学会基準「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
- 2) 例えば, 矢野貴行, 皆川 浩, 宮本慎太郎, 久田 真：低水セメント比のコンクリートに生じた微細ひび割れが4プローブ法による電気抵抗率の測定結果に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.2086-2091, 2014
- 3) 加藤大基, 内田慎哉, 鎌田敏郎, 楊 昭明, 服部晋一：モルタル供試体を対象とした電気抵抗率を測定するための二電極法に関する基礎的研究，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14巻，pp.33-38, 2014
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 榎原彩野, 皆川 浩, 久田 真：モルタルの電気抵抗率と塩化物イオン拡散係数との関係に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.789-793, 2008