

# 論文 乾湿に伴う含水状態の変化がモルタルの電気抵抗率の測定値に及ぼす影響

榎原 彩野<sup>\*1</sup>・齊藤 佑貴<sup>\*1</sup>・皆川 浩<sup>\*2</sup>・久田 真<sup>\*3</sup>

**要旨：**電気抵抗率を用いてコンクリートの品質を評価する場合には、含水状態を把握することが非常に重要である。しかし、既往の研究はコンクリートを飽水状態にした場合での検討に留まっているものが多い。本研究では、水結合材比および結合材の種類が異なるモルタル供試体を用い、乾燥処理および給水処理を行うことで、含水状態の違いが4プローブ法の電気抵抗率に及ぼす影響を整理した。その結果、不飽水状態において電極間隔または配合の違いによって電気抵抗率の変動傾向が異なることが明らかとなった。

**キーワード：**電気抵抗率, 拡散係数, 含水率, 塩化物イオン浸透性, 物質透過性, 4プローブ法

## 1. はじめに

コンクリートの塩害に対する耐久性能を照査するためには、塩化物イオン拡散係数は不可欠な評価項目となっており、コンクリート構造物における塩化物イオン拡散係数の非破壊評価手法の一つとして、電気抵抗率の測定が現在注目されている。コンクリートの電気抵抗率に関する研究は多数の報告例<sup>1)~5)</sup>が存在し、これまでに、測定方法、あるいは、コンクリートの配合や空隙構造、骨材の影響を考慮した評価式<sup>4)</sup>が提案されている。しかしながら、それらの方法はまだ十分に確立されておらず、実構造物への適用には課題が多いのが現状である。なぜならば、コンクリートの含水状態が電気抵抗率に及ぼす影響は他の影響因子と比較して非常に大きい<sup>1)</sup>にもかかわらず、含水状態の影響を的確に把握できないために、コンクリートが水分状態が均質である飽水状態での検討に留まっているものが多いからである。したがって、実構造物の適用に向けては含水状態による影響を考慮した上で電気抵抗率と品質との関連性を検討しなければならない。

以上の背景から、本研究では評価手法の確立に向けてモルタルの含水状態が電気抵抗率に及ぼす影響を整理した。

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体の作製

#### (1) 使用材料と配合

供試体の作製に使用した結合材は、普通ポルトランドセメント(密度: 3.15 g/cm<sup>3</sup>, 比表面積: 3290 cm<sup>2</sup>/g), 高炉スラグ微粉末(密度: 2.92 g/cm<sup>3</sup>, 比表面積: 8240 cm<sup>2</sup>/g, ガラス化率 98%)の2種類であり、高炉スラグ微粉末は重量内割で50%置換した。表-1に配合表を示す。細骨材は宮城県大和町鶴巣産の山砂(密度: 2.53 g/cm<sup>3</sup>, 吸水率: 2.64%,

粗粒率: 2.71)を使用した。また、ブリーディングを防ぐために増粘剤(アルキルアリルスルホン酸塩-アルキルアンモニウム塩系)および消泡剤を使用した。

#### (2) 供試体の作製および養生

供試体の形状は150×150×150 mmの立方体、および40×40×160 mmの角柱とし、JIS R 5201に準拠してモルタルを打設した。打設後24±2時間で脱型を行い、供試体は91日間、20℃の水中で養生した。養生終了後、水分の浸透あるいは逸散を一方向とするために、一面のみを残し、それ以外の面はエポキシ樹脂を塗布あるいは、養生テープを貼付することでシールした。

表-1 配合表

供試体 No.	W/B (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					
		W	OPC	BFS	S	増粘剤	消泡剤
OPC35	35	216	617	-	1542	-	-
OPC50	50	282	564	-	1411	11.28	0.056
OPC65	65	338	520	-	1301	10.4	0.052
BFS 50	50	278	278	278	1411	11.12	0.056

OPC: 普通ポルトランドセメント BFS: 高炉スラグ微粉末

### 2.2 測定項目

#### (1) 4プローブ法による電気抵抗率

150×150×150 mmの供試体に対しては、4プローブ法により電気抵抗率を測定した。測定概念図を図-1に示す。電圧30 V, 周波数73.3 Hzの交流電流を印加し、その時に得られる電位差電極間の電圧と供試体に流れる電流を測定し、式(1)を用いて電気抵抗率を評価した。

$$\rho = 2\pi \cdot a \cdot \frac{V}{I} \quad (1)$$

\*1 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (正会員)

\*2 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻助教 (正会員)

\*3 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻教授 (正会員)

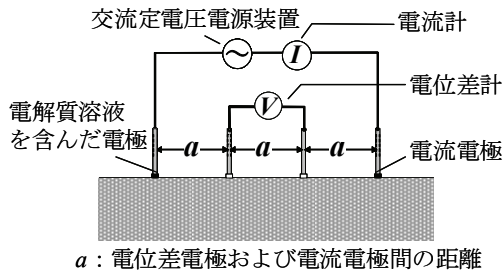
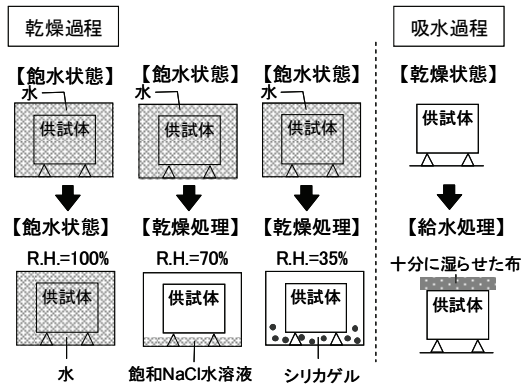


図-1 4プローブ法の測定概念図



※図中の供試体の上面が開放面であり、それ以外の面はシーリングされている

図-2 乾燥過程および吸水過程のフロー

ここに、 $\rho$  : 電気抵抗率[ $\Omega$  m],  $a$  : 電極間の距離[m],  
 $V$  : 電位差電極間の電位差[V],  $I$  : 供試体に流れる電流[A]  
電極間隔を 1, 2, 3, 4cm と変化させて測定を行い、それぞれ 5 回測定した値の平均値を測定値とした。また、各電極の先端には電解質としてカルボキシメチルセルロースを含ませたスポンジを取り付けて測定を行った。

### (2) 四電極法による電気抵抗率

40 × 40 × 160 mm の供試体に対しては、「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) に準拠して電気抵抗率を測定した。電位差電極間の距離は 80 mm である。

### (3) 水分吸水量, 逸散量

供試体の質量を測定し、以下の式(2)によって 40 × 40 × 160 mm 供試体あたりの水分吸水量, 逸散量を算出した。

$$w = W_a - W_b \quad (2)$$

ここに、 $w$  : 水分吸水量, 逸散量(g)

$W_a$  : 供試体の飽和質量(g),  $W_b$  : 測定時の供試体質量(g)。

### 2.3 実験水準

養生終了後、飽水状態の供試体を用いて乾燥または給水処理を行い、それぞれの電気抵抗率および質量を測定した。なお 150 × 150 × 150 mm の供試体では乾燥、または給水処理による質量の変化を捉えにくいため、同様の処理を行った 40 × 40 × 160 mm の供試体を使用して質量の測定を行った。

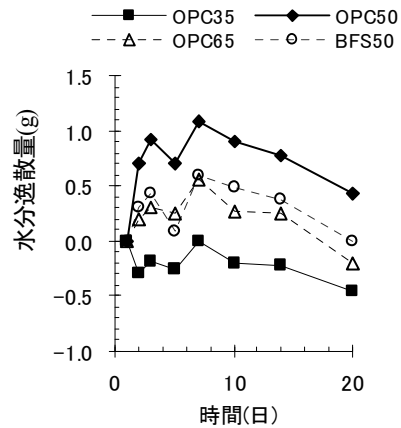


図-3 水分逸散量の変化(R.H.=100%)

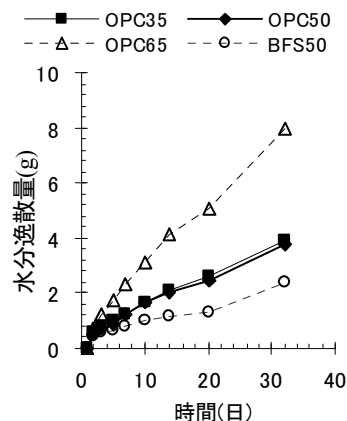


図-4 水分逸散量の変化(乾燥過程, R.H.=70%)

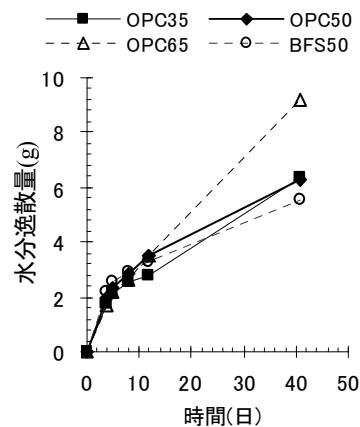


図-5 水分逸散量の変化(乾燥過程, R.H.=35%)

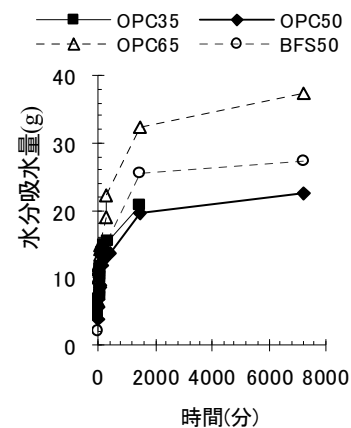


図-6 水分吸水量の変化(吸水過程)

図-2に乾燥過程および吸水過程のフローを示す。乾燥過程では、供試体を R.H.=70%および 35%に調整した容器に設置し、1ヶ月程度定期的に測定を継続した。ここで、R.H.=75%は飽和 NaCl 溶液を、R.H.=35%はシリカゲルをそれぞれ容器内に入れることで、容器内の相対湿度をそれぞれ調整した。また、吸水過程では、供試体を絶乾状態にするために炉内温度 40°Cの炉乾燥機で 10 日間、1 日毎の質量変化が 2%以下になるまで乾燥させた。その後、十分に湿らせた布で供試体の一面から吸水させ、測定値が安定し、それ以上の変化がなくなるまで測定を継続した。

### 3. 結果と考察

#### 3.1 水分吸収量、逸散量の変化

##### (1) 乾燥過程

図-3~図-5に OPC35, OPC50, OPC65, BFS50 の飽水状態(R.H.=100%), 乾燥過程(R.H.=70%), 乾燥過程(R.H.=35%)における水分逸散量の変化をそれぞれ示す。

図-3より、供試体を飽水状態に調整し測定を行った場合であるにもかかわらず、水分逸散量が変動していることがわかる。しかしながら、図-3~図-5より、飽水状態における水分逸散量の変動は R.H.=70%および R.H.=35%にした場合と比較して相対的に小さく、内部の空隙の水分逸散量は少なかったことが推測される。図-4より、湿潤状態から R.H.=70%にした場合においては、水分逸散量の変化は OPC65 が最も大きく、OPC35 および OPC50 は同程度、そして BFS50 が最も小さくなっていることが認められる。また、図-5より、湿潤状態から R.H.=35%にした場合においては、水分逸散量の変化は OPC65 が一番大きく、その他の配合については同程度であることがわかる。これは、組織が密であるほど水分の逸散は抑制され、反対に粗なものは水分が逸散しやすい傾向を示唆していると考えられる。

##### (2) 吸水過程

図-6に吸水過程における水分吸収量の経時変化を示す。図-6より、吸水開始から約 500 分までは含水率が急激に上昇し、それ以降は緩やかな増加曲線を辿っている。また、配合の違いによって大きな差がみられないことがわかる。これは、絶乾状態の供試体を使用したために、吸水が急速に進行し、配合の違いによる影響が小さくなってしまった可能性がある。

#### 3.2 電気抵抗率の経時変化

##### (1) 乾燥過程

図-7~図-9に OPC35, OPC50, OPC65, BFS50 の飽水状態(R.H.=100%), 乾燥過程(R.H.=70%), 乾燥過程(R.H.=35%)における電気抵抗率の経時変化を電極間隔別にそれぞれ示す。飽水状態の供試体における四電極法の測定結果はほぼ一定値となったため、本研究においてはこれを基

準値とし、四電極法および 4 プローブ法の測定値を飽水状態の供試体における四電極法の測定値で除して電気抵抗率比を算出した。また、図には示されていないが、飽水状態の供試体における四電極法の測定結果の平均値は、OPC35, OPC50, OPC65, BFS50 の順に 53, 37, 26, 95 $\Omega$ m となった。

図-7より、どの配合においても、電気抵抗率比は 0.5~3.0 の幅で増減していることがわかる。振れ幅がみられた原因としては、4 プローブ法の測定方法、あるいは供試体中の異種物質が考えられる。すなわち、電極間隔が小さい場合には電位差電極間の表面の僅かな含水状態の違い、また、供試体の電極設置箇所近傍に粗大空隙や骨材の違い、さらに、局所的な含水率の変化があった場合において電極設置位置の僅かな違いが測定値に影響を及ぼしたと考えられる。

本研究においては、電気抵抗率の測定を各供試体につき 1 箇所の測定点で計測を実施しており、生じたバラツキは供試体の局所的な電気抵抗率を測定している可能性が高い。したがって、測定方法の信頼性を確保するためにはできるだけ多数の箇所で測定を実施し、それを統計的に処理する方法を確立する必要があると考えられる。

次に、図-8より、乾燥過程(R.H.=70%)において電気抵抗率比の経時変化は、配合の違いによらず電気抵抗率比は 0.5~3.0 の間で飽水状態と同程度の変動であったことがわかる。一般に、水分逸散による電気抵抗率の増加は著しいことが考えられ、乾燥により 10000 $\Omega$ m 程度となる事例も報告されている。したがってこのことを考慮すると、本研究における電気抵抗率比は乾燥の影響を受けることで 100 以上となることが予測される。ところが、R.H.=70% の条件下では、どの配合においても電気抵抗率比は 0.5~3.0 の間での変動に留まっており、図-4より、水分逸散量は増加しているものの電気抵抗率比の変化は小さく、乾燥による影響は小さかった可能性がある。

図-9より、乾燥過程(R.H.=35%)においては、電気抵抗率比は時間経過と共に大きくなっており、1ヶ月を経過した時点において、OPC35 は 0.5~45 の間、OPC50, OPC65, BFS50 は 0.5~25 の間での変動している。また電気抵抗率比の変動は、R.H.=70%の環境下に設置した場合と比較して大きくなっていることがわかる。これらの変動傾向は各配合で異なっており、電極間隔を 1cm, 2cm にした場合による測定結果が比較的大きくなっているものの、明確な関連性は認められない。また、乾燥時間に比例して単調増加するのではなく、増減を繰り返しながら徐々に大きくなっていることがわかり、供試体の乾燥により電気抵抗率は大きくなる傾向が認められるものの、影響の受けやすさには必ずしも統一性がないといえる。ここで、4 プローブ法において、電流は電流電極間を直径とする半円弧状の領域を

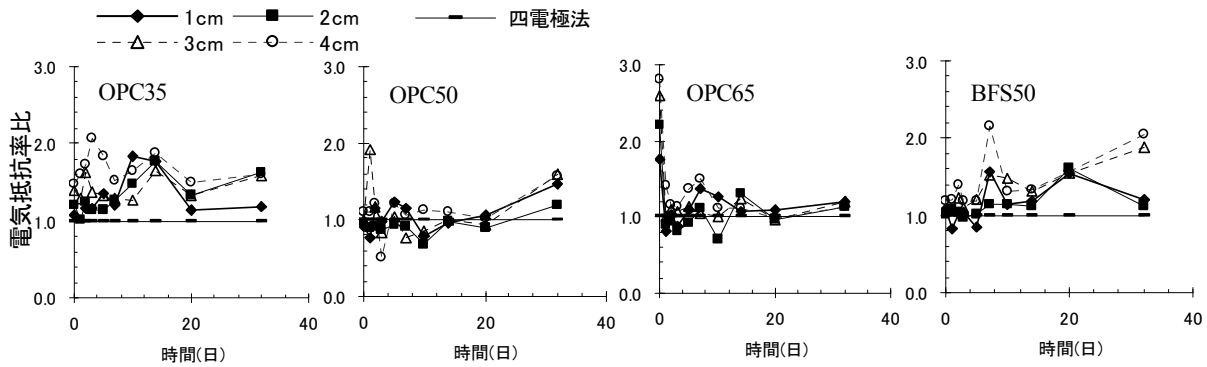


図-7 各配合の電気抵抗率比の変化 (R.H.=100%)

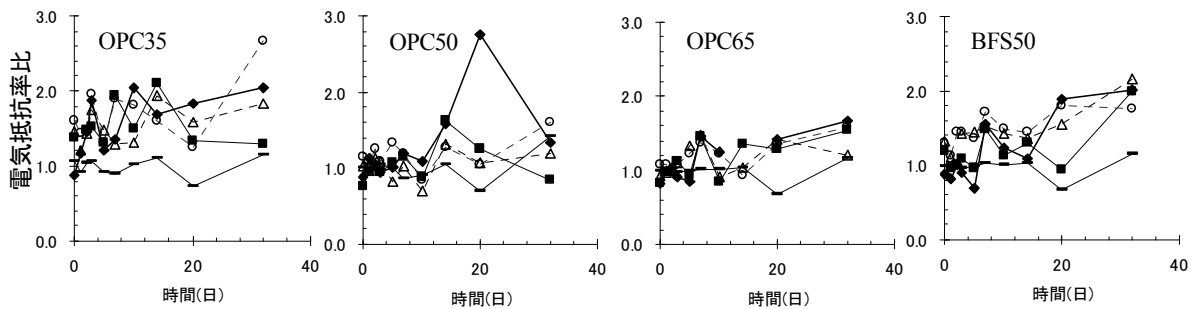


図-8 各配合の電気抵抗率比の変化 (乾燥過程, R.H.=70%)

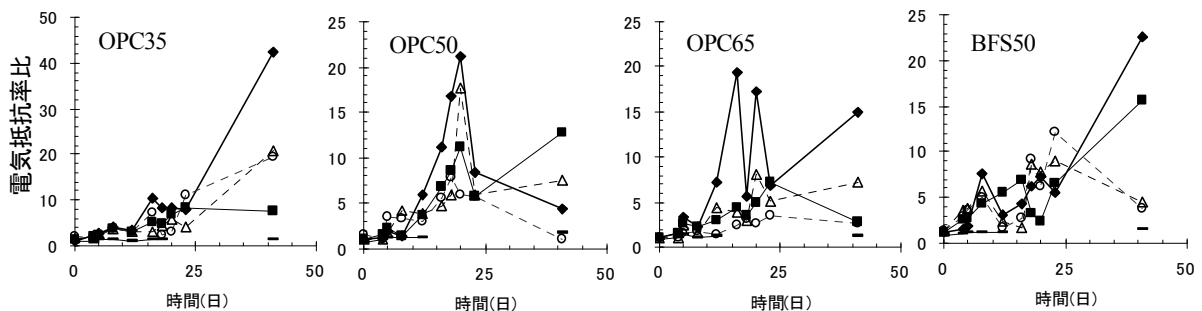


図-9 各配合の電気抵抗率比の変化 (乾燥過程, R.H.=35%)

流れると仮定しており、この理想状態においては電極間隔が小さいほど、測定範囲も浅く、逆に電極間隔が大きいほど、測定範囲も深くなると考えられる。したがって、電気抵抗率は比較的大きな値を示した原因の一つとして、供試体を通る電流が乾燥による含水率分布の影響を受け、理想状態から乖離して流れたという可能性が考えられる。

次に、配合別で比較を行うと、電気抵抗率は連続してなだらかな増加傾向を辿っていないものの、最大値で比較するとおおよそ OPC65, OPC50, BFS50, OPC35 の順に大きくなっていることが認められる。電気抵抗率はセメント硬化体の物質透過性と相関性が認められており、空隙の連続性、かつ、その空隙の含水状態に大きな影響を受けていることから、低水セメント比、または混和材の使用によって内部組織が緻密化した場合、電流の通り道となる水分で満たされた空隙の連続性が離断されやすい可能性が示唆される。

## (2) 吸水過程

図-10 に OPC35, OPC50, OPC65, BFS50 の吸水過程

における電気抵抗率比の経時変化を電極間隔別に示す。図-10 より、給水開始 10 分を経過した時点で配合別に比較すると、OPC35, および BFS50 の電気抵抗率比は電極間隔によって異なっているが、30 を超えている場合もある一方で、OPC50, および OPC65 の電気抵抗率比はおおむね 5 以下であることがわかる。これは前述した通り、内部組織が密のものほど物質透過性が小さく、水分の浸透が抑制されるために、電気抵抗率比も大きい値を示すと考えられる。

次に、電極間隔に比較すると、電極間隔 3cm, 4cm において測定される電気抵抗率の値が、電極間隔 1cm, 2cm, において測定される値よりも小さくなっていることが認められる。これは、電極間隔が大きいほど、電流の流れる深さも深くなっていくことが考えられ、電極間隔を小さくして測定した場合においては、電流は表面の不飽和状態の影響を強く受ける一方で、電極間隔を大きくして測定した場合においては、電流は供試体内部の比較的湿潤部分を流れている可能性があったためと推測される。さらに、吸水

の進行に伴い、電極間隔の違いによる電気抵抗率値の差は次第に小さくなっていき、約 100 分を経過した時点においては、どの配合においても、各電極間隔に設定して測定される電気抵抗率はそれ以上低下しない値に収束していることがわかる。これは、吸水させていくにしたがって、徐々に水分が浸透していき、含水状態による影響が小さくなっていったためだと考えられる。電極間隔 1cm, 2cm において測定される値が、電極間隔 3cm, 4cm において測定される電気抵抗率の値に近づいていくということは、供試体内部の含水状態が深さ方向に一樣な湿潤状態に近づいていることが考えられ、また、各電極間隔に設定して測定される電気抵抗率がある値に収束するという事は、その含水状態が飽水状態になっていると推測される。このことは、実環境において、電極間隔を変化させて測定することにより、飽水状態を確認できる可能性があることを示している。

#### 4. 結論

本研究では、評価手法の確立に向けてモルタルの含水状態が電気抵抗率に及ぼす影響を整理した。以下に本研究で得られた知見をまとめる。

- (1) 供試体の含水状態による影響の受けやすさには必ずしも統一性がないものの、飽水時と比較して不飽和時において電気抵抗率は大きくなり、また配合によって異なる傾向を示した。
- (2) 表面が乾燥している場合において、電極間隔が小さい方が電極間隔が大きい場合よりも、電気抵抗率は変動しやすい傾向を示した。
- (3) 吸水過程において、電気抵抗率が一定値に収束したことから、電極間隔を変化させて測定することにより飽水状態を確認できる可能性がある。

#### 謝辞

本研究の進行にあたり、三井造船(株)井上浩男氏、江澤一明氏、酒井正和氏、ドーピー建設工業(株)立神久雄氏、市川聖芳氏にご協力を承りました。ここに謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 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
- 2) 守屋進，川俣孝治：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，V49，2007
- 3) 親本俊憲，横関康祐，平石剛紀，宮里心一：モルタルの電気抵抗特性に関する電気化学的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.907-912，2005
- 4) 皆川ら：電気抵抗率によるモルタルの塩化物イオン拡散係数の推計手法に関する基礎的研究，第 62 回セメ

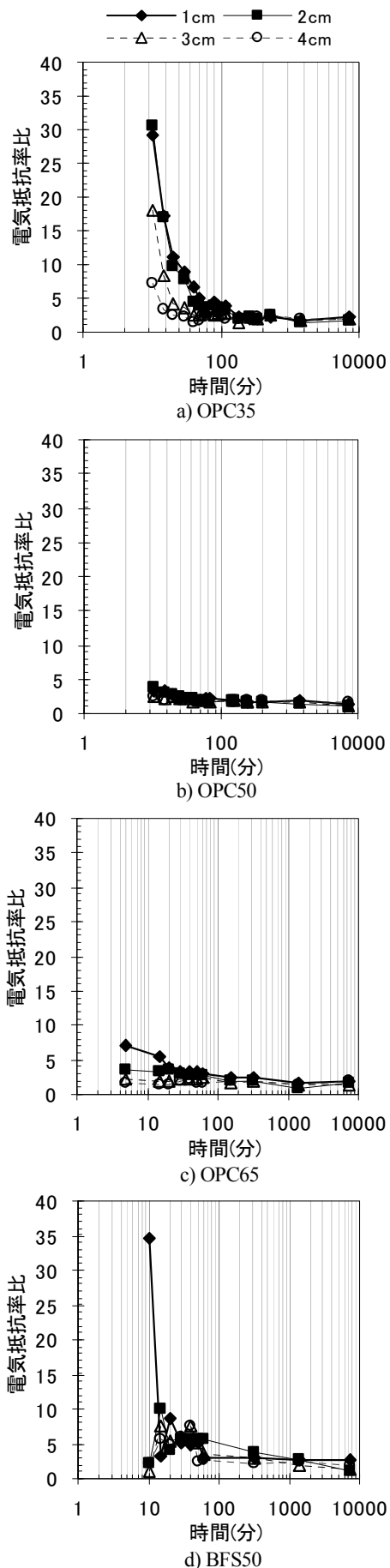


図-10 各配合の電気抵抗率比の変化 (吸水過程)

- ント技術大会公演要旨, pp. 232-233, 2008
- 5) 関博, 宮田克二, 北峰博司, 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. 19-57, 1992
  - 6) 榎原彩野ら: 電気抵抗率により推計される塩化物イオン拡散係数に関する一考察, 土木学会論文集, Vol.63, No.2, pp. 427-428, 2008
  - 7) 齊藤佑貴ら: 骨材量が電気抵抗率から推計される塩化物イオン拡散係数に及ぼす影響, 土木学会論文集, V-088, No.2, pp. 173-174, 2009
  - 8) 細田喜子, 村田康一, 菊池順, 関博: コンクリートの比抵抗と含水量に関する実験的研究, セメント技術大会公演要旨, pp.312-313, 2006
  - 9) 鳥居和之: セメント・フライアッシュ硬化体の比抵抗と塩化物イオンの拡散係数, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No1, 1996
  - 10) 野田一弘, 河野広隆, 久田真, 森濱和正: 交流作用時の硬化コンクリートの電気的性質に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.258, No1, 2003