

論文 コンクリート表面から深さ方向の比抵抗の経時変化

金田 尚志^{*1}・松岡 和巳^{*2}・嶋野 慶次^{*3}・青木 優介^{*4}

要旨: コンクリート比抵抗は、コンクリート中の鋼材の腐食抵抗性を判断する指標や物質移動性の評価等に用いられている。実構造物のコンクリート比抵抗を測定する場合、通常はコンクリート表面側にセンサーを設置して測定されるが、表面と内部では比抵抗が異なることが想定される。表面と内部の比抵抗にどの程度の差が生じているかを確認するため、W/Cの異なるモルタル、コンクリート試験体を作製して、恒温養生室と屋外の2つの環境で暴露した場合の比抵抗の経時変化をかぶり深さごとに測定した。恒温養生室で暴露した試験体の表面側の比抵抗が内部と比較して非常に高くなることが確認された。

キーワード: 比抵抗, 恒温養生, 屋外暴露, セル定数, 分極抵抗測定器, かぶり

1. はじめに

コンクリート構造物中の鋼材の腐食速度はコンクリート比抵抗に依存し、一般にコンクリート比抵抗が低いほど腐食しやすく、高いほど腐食しにくい環境となるため、コンクリート比抵抗は腐食抵抗性を判断する1つの指標として用いられている。また、かぶりコンクリートに求められる性能である外部からの劣化因子等の物質移動特性や耐久性等の評価材料としても用いられる。

コンクリート中の鋼材の分極抵抗を測定する際の測定電流の分散をシミュレーションする際にもコンクリート比抵抗の情報が必要となる^{1), 2)}。

上記の理由から実構造物のコンクリート比抵抗の測定が行われており、コンクリート表面からドリル削孔を利用して内部の比抵抗を直接測定することも可能であるが³⁾、コンクリート表面側から四電極法(四プローブ法)

で測定されるのが一般的である。

コンクリート表面が水に接している環境を除いて、表面側が乾燥して比抵抗が高く、内部の比抵抗が低い状態となっている。そこで、表面側と内部の比抵抗にどの程度の差が生じているのかを確認するため、比抵抗測定用の電極(ステンレス棒)を埋め込んだモルタルとコンクリート試験体を作製し、異なる環境(恒温養生室, 屋外)で暴露して深さごとの比抵抗の経時変化を測定している^{4), 5)}。実験は継続中であるが、今回は材齢98週までの測定結果を報告する。

2. 実験概要

2.1 試験体の作製

試験体寸法は図-1に示すように幅100mm、高さ120mm、長さ460mmの直方体で芯かぶりが10, 20, 30,

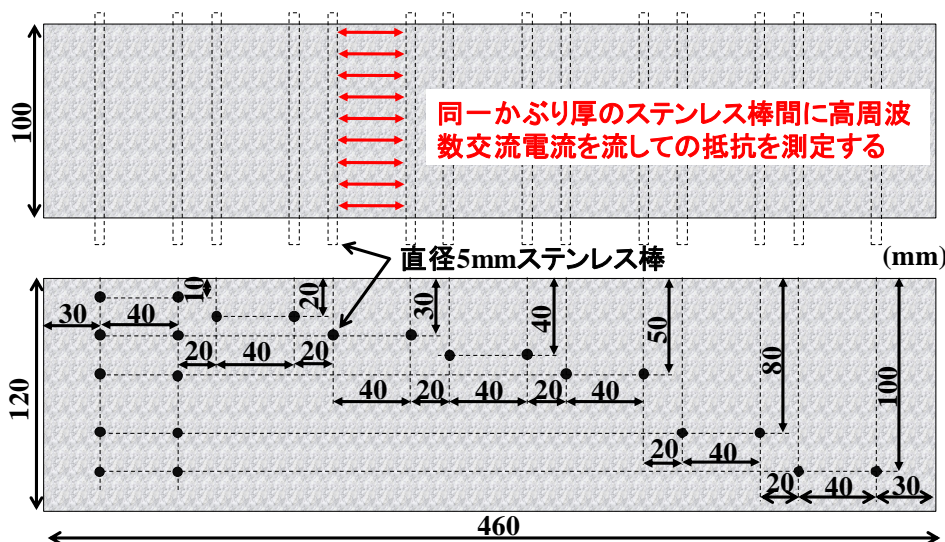


図-1 試験体寸法

*1 日鉄住金テクノロジー(株) 計測・検査事業部 計測検査技術センター 主幹 博士(工学) (正会員)

*2 日鉄住金テクノロジー(株) 富津事業所 材料ソリューション部 部長 博士(工学)

*3 木更津工業高等専門学校 教育研究支援センター 技術専門員

*4 八戸工業高等専門学校 建設環境工学科 准教授 博士(工学) (正会員)

表-1 試験体配合

供試体 No.	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						高性能減水剤	AE剤	暴露	28日強度 (N/mm ²)	ヤング率 (N/mm ²)
			W	C	S	G							
M301	30		239	797	1196		2.39	0.06		室内	73.0	34,800	
M302										屋外			
M401	40	-	274	685	1197	-	-	0.05		室内	48.6	29,700	
M402										屋外			
M501	50		283	566	1273		-	0.04		室内	36.0	24,700	
M502										屋外			
C301	30		139	463	748	1022	3.24	0.03		室内	67.4	38,800	
C302										屋外			
C401	40	43	147	368	748	1021	1.57	0.02		室内	61.3	39,800	
C402										屋外			
C501	50		150	300	777	1062	1.57	0.02		室内	40.4	33,300	
C502										屋外			

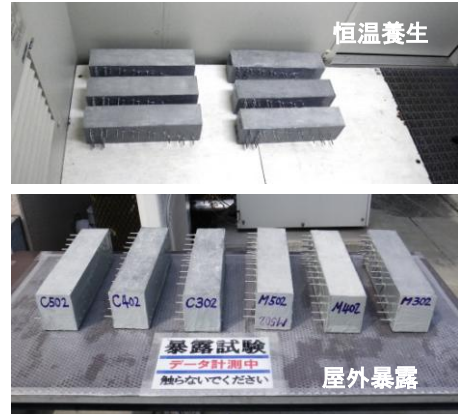


写真-1 恒温養生・屋外暴露状況(12体)

40, 50, 80, 100mm となるように直径 5mm のステンレス棒(SUS304)が 40mm の間隔で配置されており、同一かぶり深さに配置されたステンレス棒間の比抵抗を測定できる。図-1 左端のかぶり 10mm の下には、試験体長手方向の比抵抗のばらつきの有無を確認するため、かぶり 30, 50, 80, 100mm の位置にもステンレス棒を配置した。

表-1 に示すように、W/C が 30%, 40%, 50% のモルタルとコンクリートの試験体を 1 配合につき 2 体、合計 12 体製作した。試験体 No. の頭文字の M はモルタル、C はコンクリート、アルファベットの後の 2 桁が W/C(%), 末尾の 1 が恒温養生、2 が屋外曝露を示している。セメントは普通ポルトランドセメント(密度 3.15g/cm³)、細骨材は千葉県君津産(FM : 2.56, 表乾密度 : 2.64g/cm³)、粗骨材は北海道上磯産(最大寸法 : 15mm, 表乾密度 : 2.72g/cm³)を用いた。

材齢 7 日の測定まで打設面は濡れウエスで湿潤状態を保ち、材齢 7 日の測定後に脱型し、側面と底面をエポキシ樹脂でコーティングして、打設面からのみ水分が逸散するようにした。エポキシ樹脂コーティング終了後、写真-1 に示すとおり、試験体 No. の末尾 1 の試験体は室温 20℃ の恒温養生室(湿度 25% ~ 35%)での養生、末尾 2 の試験体は屋外曝露(千葉県木更津市)とした。恒温養生室での曝露は、屋内の建築構造部材を想定し、屋外曝露は土木構造物を想定している。恒温養生室内の試験体は、送風による局所的な乾燥を避けるため、測定ごとに試験体配置のローテーションを行った。

2.2 セル定数の算定

本実験では、電極間(ステンレス棒間)の抵抗から比抵抗 : $\rho(\Omega \cdot \text{cm})$ を算出するため、セル定数 : $K(\text{cm}^{-1})$ を求めて式(1)で比抵抗に換算する必要がある。 $R_s'(\Omega)$ は電極間の抵抗値(測定値)である。

$$\rho(\Omega \cdot \text{cm}) = R_s'(\Omega) \div K(\text{cm}^{-1}) \quad (1)$$

セル定数は電極間隔、電極の形状、かぶり深さによっ

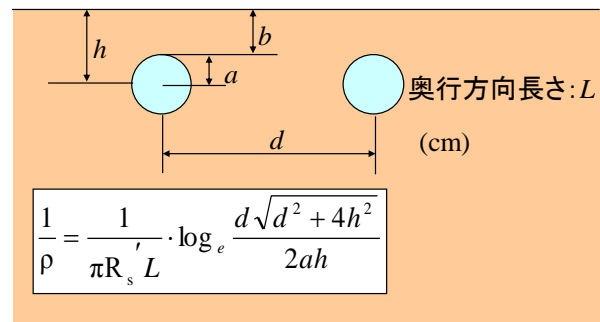


図-2 円柱電極を用いた際の比抵抗の算出方法

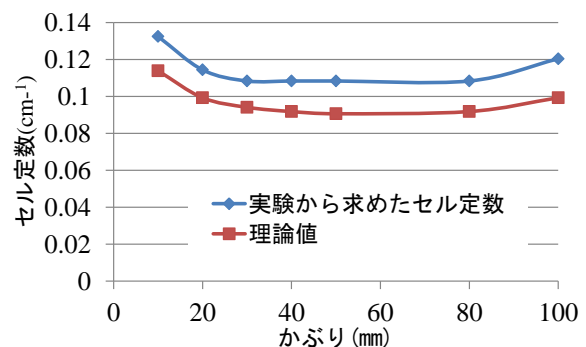


図-3 各かぶりにおけるステンレス棒間のセル定数

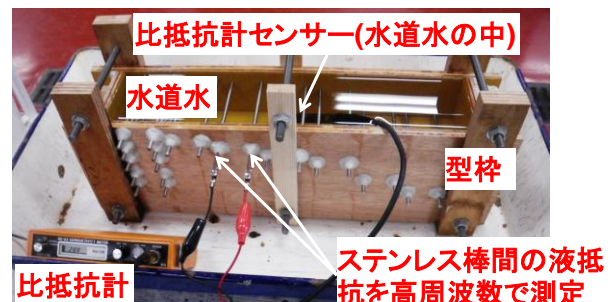


写真-2 セル定数の算出状況

て異なる。円柱電極を平行に配置した場合、図-2 のように R_s' から理論的に ρ 算出することができるが、 R_s' の値が測定周波数によって変化する可能性があることと、試験体端部では、測定電流が流れる範囲が制限されるため、実験に用いる測定装置と測定周波数を用いて実験的に求めた。写真-2 のように試験体打設前の型枠を水道水で満

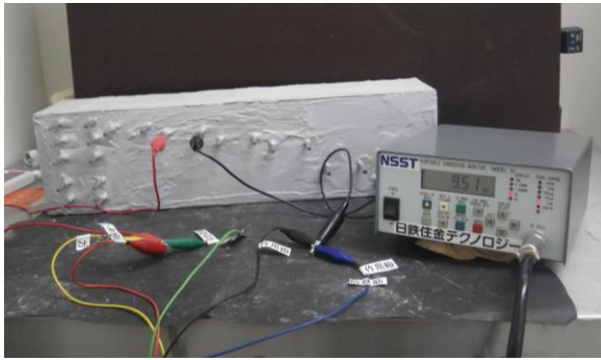


写真-3 比抵抗測定状況

たし、水道水の ρ を比抵抗計で測定しておき、各ステンレス棒間の R_s' を分極抵抗測定器の高周波数成分(400Hz)で測定する。このとき、各ステンレス棒間のセル定数は、式(2)で算出できる。

$$K(\text{cm}^{-1}) = R_s'(\Omega) \div \text{水道水の比抵抗} \rho(\Omega \cdot \text{cm}) \quad (2)$$

図-3 に実験から求めたセル定数と理論的(図-2 の算出方法)に求めたセル定数を示す。両者とも同様な傾向を示していることが確認できる。

2.3 比抵抗の測定

試験体の比抵抗の測定間隔は、材齢 3 日、7 日の後、34 週までは毎週、それ以降は隔週とした。比抵抗は、試験体の温度が高くなると低くなり、温度が低くなると高くなる。温度変化による比抵抗の変化の影響を取り除くため、屋外暴露の試験体は、事前に恒温養生室に移動しておき、毎回 20℃の測定環境となるようにした。

写真-3 のように分極抵抗測定器用いて高周波数(400Hz)でステンレス棒間の抵抗(R_s')を測定し、図-3 で算出したセル定数を式(1)に代入して比抵抗を求めた。

図-1 の左側の縦一列に並んだステンレス棒間とそれと同じ深さにある右側のステンレス棒間で得られた比抵抗値はほぼ同じであり、試験体長手方向の比抵抗のばらつきは無いものとし、右側のステンレス棒間で得られた比抵抗を実験値として採用した。

3. 実験結果

3.1 初期材齢の比抵抗の変化

図-4 に単位水量と材齢 3 日、7 日における全かぶり深さの比抵抗を示す。初期材齢の段階では、比抵抗は単位水量に依存していることが確認できる。材齢 3 日から 7 日への比抵抗の増加率はモルタル、コンクリート試験体ともに W/C の低い方が高い。

材齢 6 週までの各試験体の比抵抗の変化を図-5 に示す。材齢 7 日までは、養生条件が同じため、恒温養生と屋外暴露の試験体の比抵抗はほぼ同じ値を示している。材齢 7 日(図-5 の青、赤線)までは、表面近傍は、ブリージン

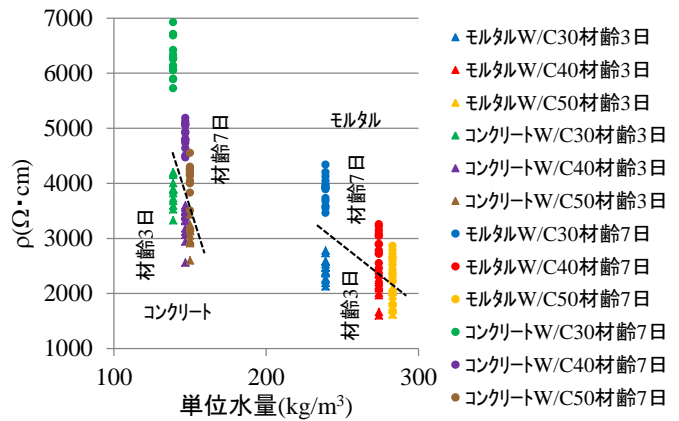


図-4 単位水量と比抵抗(材齢 3, 7 日)

グの影響で水分量が多いことと、打設面を濡れウエスで湿潤状態に保っていたため、表面近傍の比抵抗が低くなっているが、脱型後に濡れウエスを除去し、打設面を乾燥状態にした材齢 14 日(図-5 の緑線)以降の比抵抗測定値は、表面側が高くなっている。屋外暴露の試験体と比較して、恒温養生の試験体の方が先行して比抵抗が高くなっていき、特に恒温養生の試験体の表面側の比抵抗が内部と比較して高くなる。屋外暴露は雨かかり、湿度変化等の影響を受けるのに対し、恒温養生は低湿度で水分の供給も無いことから水合・乾燥が屋外暴露より進行したためと考えられる。

屋外暴露の試験体は材齢 4 週から 5 週にかけて比抵抗が低下している。これは材齢 4 週の測定の後、降雨日が数日あり、表面から水分が供給されたためである。

3.2 中期材齢以降の比抵抗の変化

図-6, 7 に中期材齢以降の比抵抗の変化を示す。恒温養生の試験体は、比抵抗が漸増的に増加している。36 週以降に比抵抗の増加が加速しているように見えるが、これは測定間隔が毎週から隔週になり、横軸が圧縮されたためである。表面側の比抵抗が内部と比較して非常に高い値となる。

屋外暴露の試験体は降雨や湿度変化の影響を受けるため、比抵抗が増減しながら徐々に増加していき材齢 30 週以降は増加の割合が小さくなっている。表面側と内部の比抵抗の差は、恒温養生の試験体と比較すると小さい。

3.3 配合・暴露条件による比抵抗の変化

図-8 に各かぶり深さにおける比抵抗の経時変化を示す。恒温養生の試験体は、表面が常に乾燥状態にあるため、どの試験体もかぶり 40mm から表面に向かって比抵抗が急激に高くなっていることが確認できる。かぶり 50mm~100mm とかぶりが深いところでは比抵抗の差は小さい。屋外暴露の試験体は、表面側の比抵抗が若干高い傾向になるものの、恒温養生の試験体と比較して表面と内部の比抵抗の差は小さい。

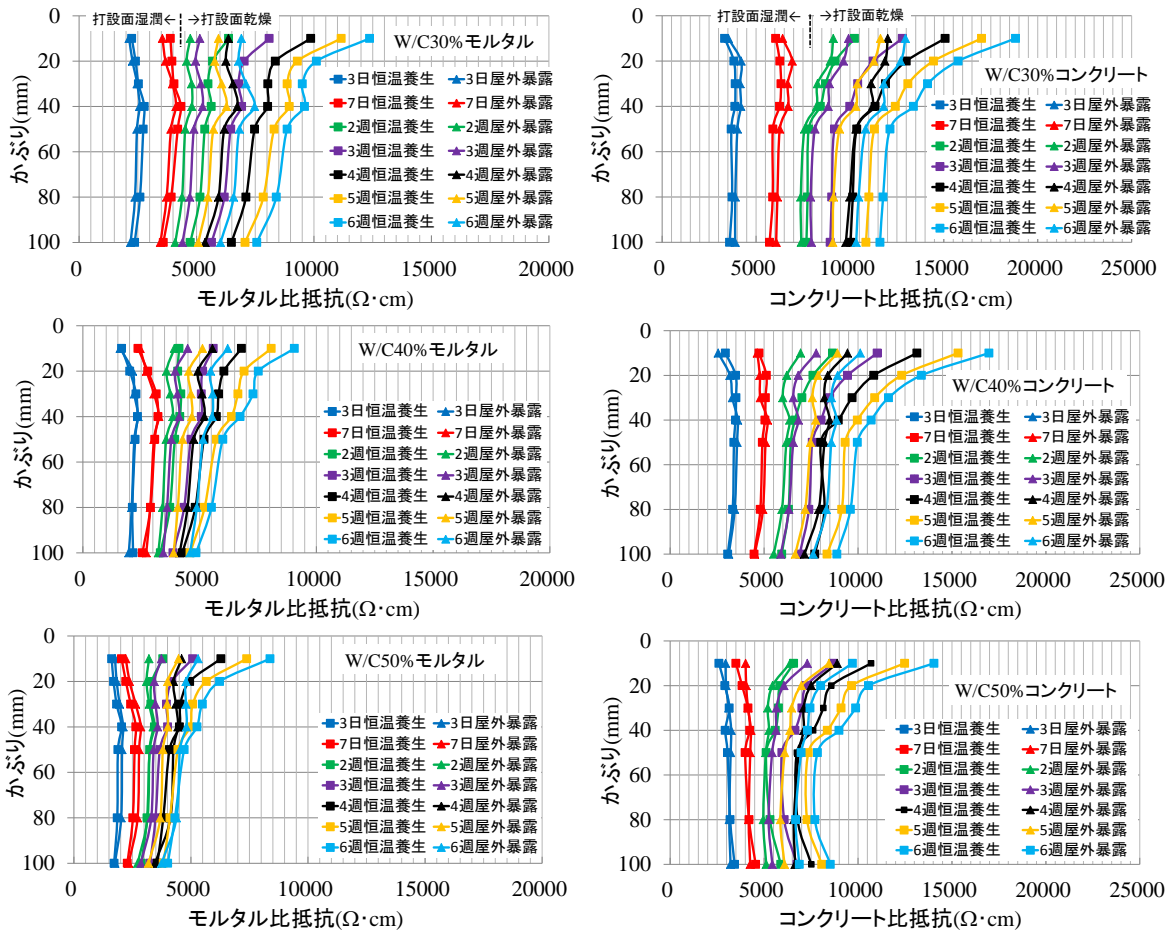


図-5 初期材齢の比抵抗の変化

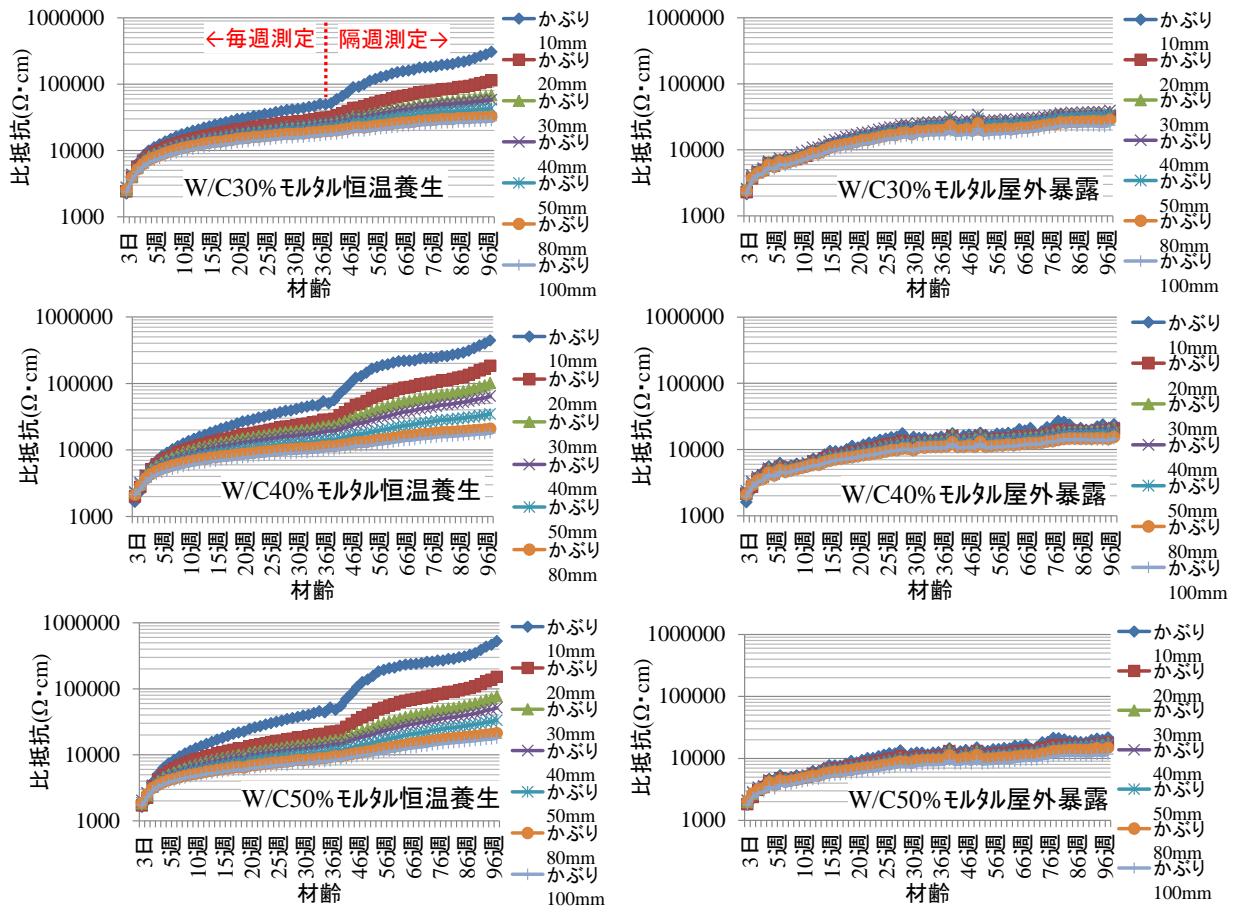


図-6 中期材齢以降の比抵抗の変化(モルタル試験体)

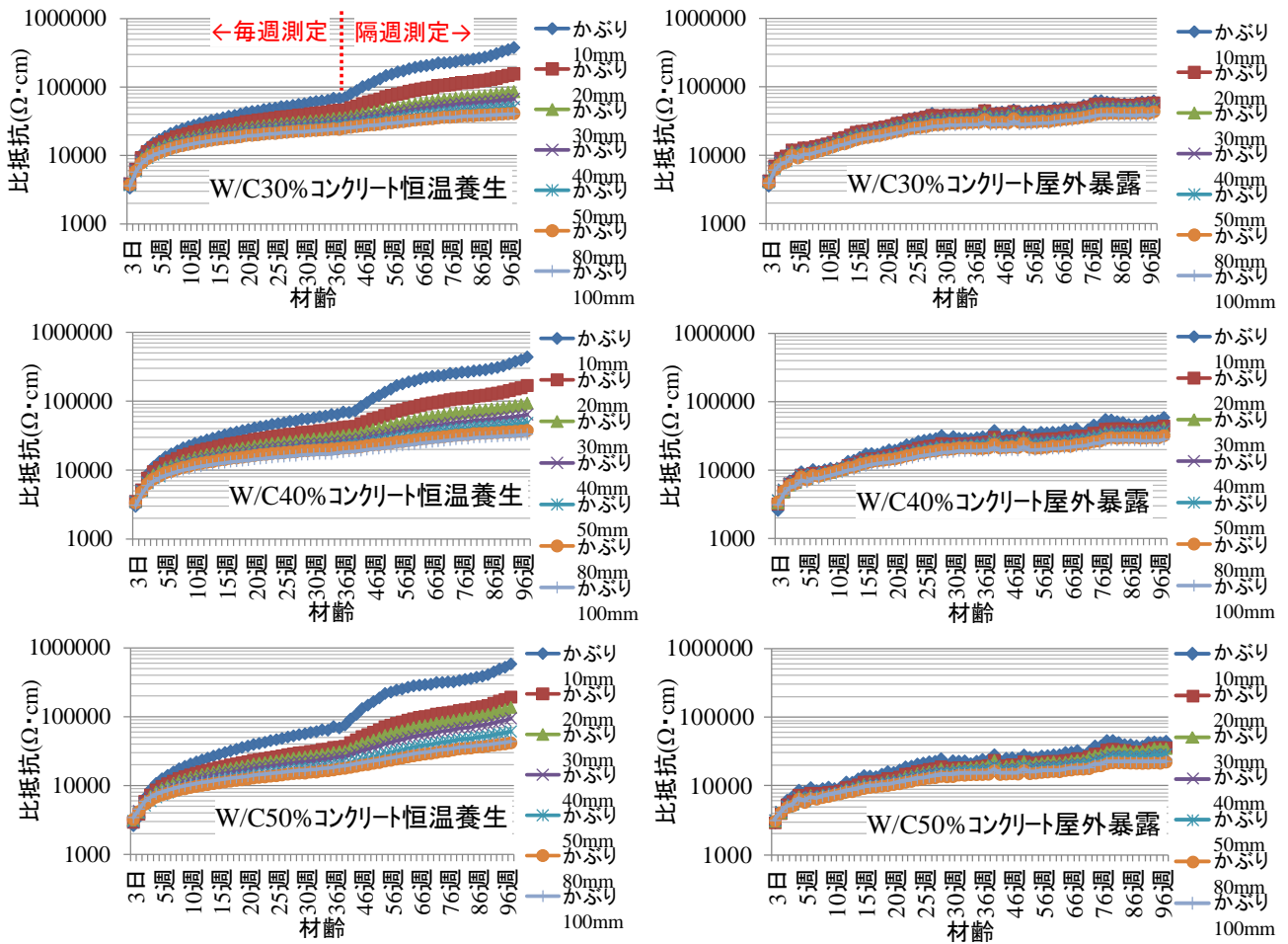


図-7 中期材齢以降の比抵抗の変化(コンクリート試験体)

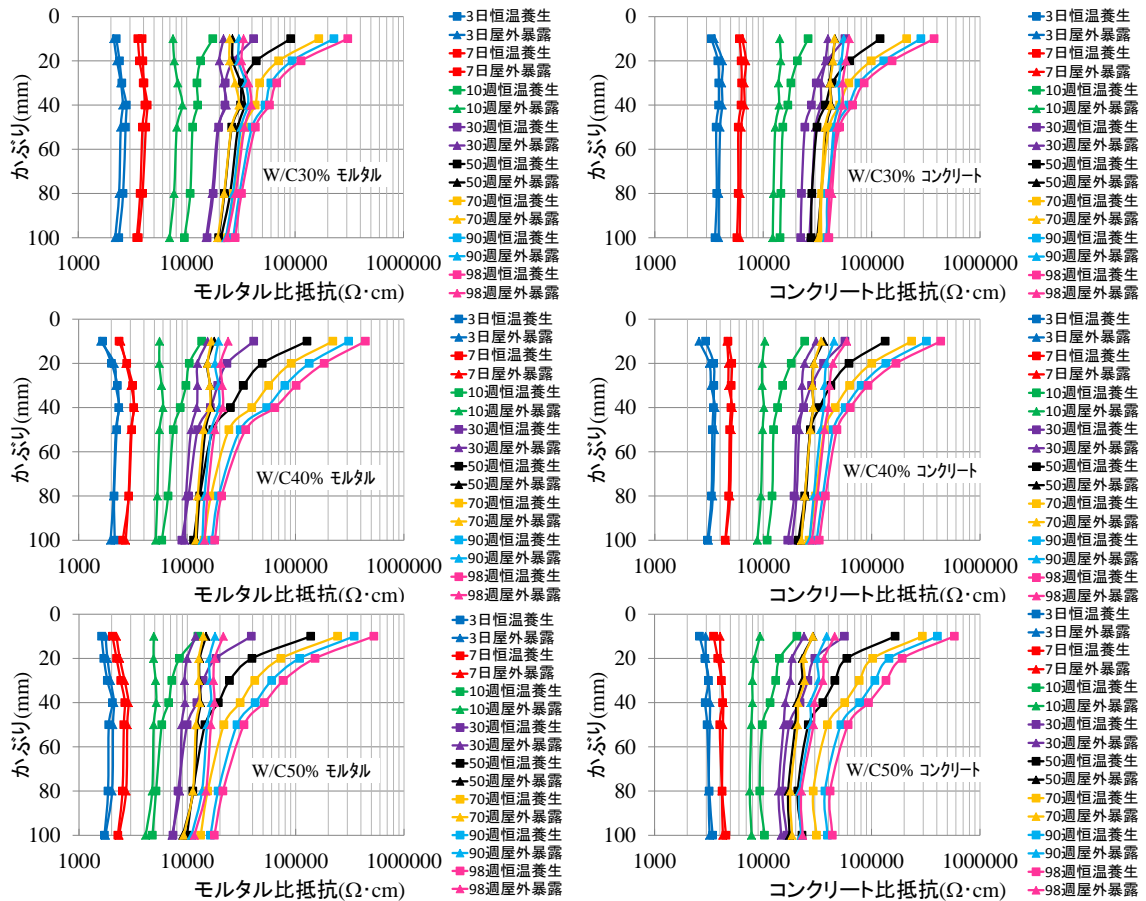


図-8 各かぶり深さにおける比抵抗の経時変化

材齢 98 週におけるかぶり 50mm の比抵抗に対するかぶり 10mm の比抵抗の比率は、配合によって異なるが恒温養生の試験体が約 7 倍～16 倍、屋外暴露の試験体が約 1.0～1.6 倍となった。

図-9 に材齢 98 週における比抵抗と打設時の単位水量の関係を示す。屋外暴露の試験体は、図-4 の傾向と同様に打設時の単位水量が少ないほど比抵抗が高く、単位水量が多くなると比抵抗が低いことが確認できる。恒温養生の試験体は、単位水量が多い(又は W/C が高い)ほど表面側と内部の比抵抗の差が大きくなる。また、かぶり 10mm の比抵抗は、W/C の高い M501, C501 の比抵抗が W/C の低い M301, C301 より高くなっている。図-10 に恒温養生の試験体のかぶり 10mm の比抵抗の経時変化を示す。材齢 30 週を過ぎたあたりで、W/C の高い試験体が W/C の低い試験体の比抵抗を上回る現象が確認された。これは、初期材齢段階では比抵抗は W/C に依存して W/C の高い試験体の比抵抗が低い状態であるが、組織が粗であるため、時間の経過に伴う水分の損失量が多いためと考えられる。

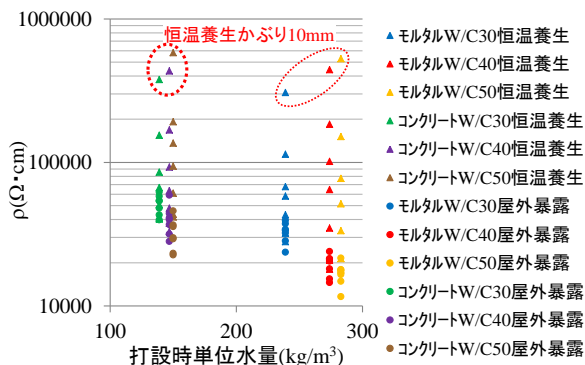


図-9 打設時単位水量と材齢 98 週の比抵抗

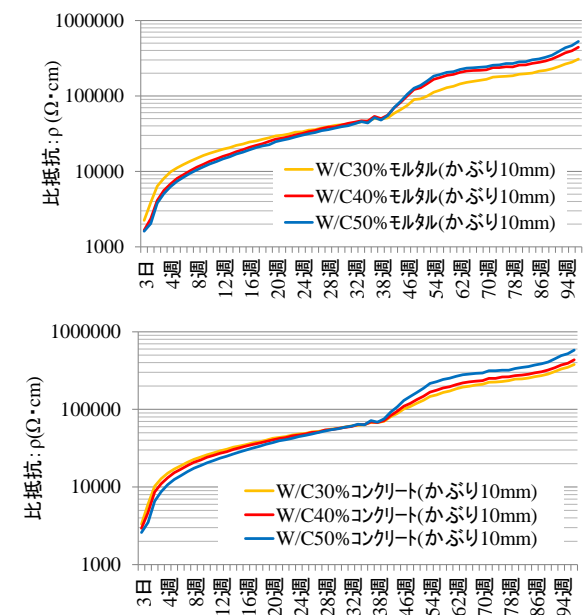


図-10 恒温養生試験体のかぶり 10mm の比抵抗の経時変化

4. まとめ

モルタルとコンクリート試験体を作製して恒温養生室内と屋外暴露の 2 つの条件で暴露を行い、深さ方向の比抵抗の経時変化を測定したところ以下の知見が得られた。

- (1) 恒温養生の試験体の比抵抗は漸増的に増加していき、表面側の比抵抗が内部と比較して非常に高くなる。
- (2) 屋外暴露の試験体の比抵抗は降雨や湿度変化の影響を受け、増減しながら徐々に増加していく。表面側の比抵抗が内部と比較して若干高い傾向を示すものの恒温養生の試験体と比較して比抵抗の表面と内部の差は小さい。
- (3) 初期材齢では、比抵抗は単位水量に依存するが、今回の実験条件である恒温養生室内温度 20℃、湿度 25%～35% のような表面が常に乾燥を受ける環境では、W/C が高い試験体の表層部の水分の損失が多くなり、表層部の比抵抗が高くなる。

謝辞：本実験を行うにあたり、日鉄住金テクノロジー㈱の小倉清明氏、ならびに永沼直樹氏に協力いただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 金田尚志, 松岡和巳：セル定数を用いたコンクリート比抵抗と等価被測定面積を用いたコンクリート中の鉄筋の分極抵抗の推定, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.1834-1839, 2012.7
- 2) 吉田秀典, 川上純, 荒木志帆, 横田優：電流分散範囲を考慮した分極抵抗評価に関する数値解析的研究, 応用力学論文集 Vol. 16, I677-I687, 2013.8
- 3) 下澤和幸, 田村博, 永山勝, 今本啓一：かぶりコンクリートの非破壊耐久性評価に関する一実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.1, pp.523-528, 2001.7
- 4) 金田尚志, 松岡和巳, 嶋野慶次, 青木優介：コンクリート表面から深さ方向のコンクリート比抵抗の変化, 土木学会第 67 回年次学術講演会概要集, V-018, pp.35-36, 2012.8
- 5) 金田尚志, 松岡和巳, 嶋野慶次, 青木優介：暴露条件によるコンクリート比抵抗の深さ方向の変化の違い, 土木学会第 68 回年次学術講演会概要集, V-368, pp.735-736, 2013.8