

論文 直流四電極法により計測される電気抵抗に影響を及ぼす測定方法および計測条件の検討

三坂 岳広*1・太田 真帆*2・伊代田 岳史*3

要旨: 鉄筋コンクリート構造物に必要とされるコンクリートの強度や耐久性を満足するためには、十分な養生を行う必要がある。筆者らは、直流四電極法を用いた養生終了時期判定手法を提案し検討を行ってきた。今後、本手法を実際の現場に適用するためには、計測される電気抵抗に影響を及ぼす各種要因を明らかにし、計測方法や評価手法を検討する必要がある。本研究では、電極の間隔、電極の設置位置、電極の直径、コンクリート温度の各条件が計測される電気抵抗に及ぼす影響について検討した。その結果、電気抵抗は、これらの計測方法および計測条件に影響を受けることを明らかにした。

キーワード: 四電極法、電気抵抗、電極の間隔、電極の位置、コンクリート温度

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の主な劣化現象である塩害や中性化は、塩化物イオンや炭酸ガスがコンクリート表面から内部に浸透することによりおこる。また、鉄筋コンクリート構造物の長寿命化およびライフサイクルコストの低減を図るためには、劣化因子が外部環境からコンクリート内部へ浸透および拡散するのを抑制するため、表層コンクリートを緻密な構造にする必要がある。

コンクリート標準示方書【施工編】では、型枠を取り外してよい時期のコンクリート圧縮強度の参考値¹⁾を示している。この圧縮強度は、コンクリートがその自重および施工期間中に加わる荷重を受けることを考慮したものである。また、養生に関する記載には、湿潤期間の標準¹⁾を日数で示している。この日数は、日平均気温とセメントの種類によって定められている。

表層コンクリートの品質は、配合条件のみならず施工状況によっても影響を受ける^{2),3)}とされており、コンクリートに要求される耐久性は、セメントの種類や日平均気温の他に、かぶりの大きさ、W/Cなどに影響を受けると考えられる。また、湿潤養生期間についても日射や湿度などの施工環境および構造物の断面などに影響を受け、コンクリート構造物の部分ごとに異なることが考えられる。

実際の現場では、一般的に表層コンクリートの品質向上に関する取組みとして養生を行っている。また、養生に関する表層コンクリートの品質向上に関する取組みは、様々な方法が提案されている^{4),5)}。さらに、表層コンクリートの品質を評価する手法として表層透気試験⁶⁾(トレント法)や透水試験⁷⁾などの方法が提案されている。しかし、これらの方法はコンクリートの含水率に影響を

受け、若材齢のコンクリートに対して評価を行うことは難しいとされている。例えば、各種試験によって実構造物の表層コンクリートの品質を評価し、悪い結果が得られた場合、表層コンクリートの品質を向上させる方法は、コンクリート表面改質剤の塗布など費用と手間のかかる方法となる。

筆者らは、直流四電極法によりコンクリートの電気抵抗を計測することにより養生終了時期を判定する手法^{8),9)}を開発した。本手法の特徴は、電極を型枠に設置してからコンクリートを打設することにより、コンクリート内部に電極を埋め込むことにある。これにより、養生期間中のコンクリートに対して電気抵抗を計測することが可能となる。計測された電気抵抗は、各材齢の圧縮強度や中性化速度係数と相関関係が認められており、この関係性を用いることによって養生期間中のコンクリートの性状を評価することができる。これにより、計測結果から適切な養生終了時期が判断できる。例えば型枠脱型時に必要な強度が確保できているかの確認ができるだけでなく、材齢28日の強度が不足すると判断された場合に養生の継続を判断することが可能となる。また、十分な養生がなされたと判断された場合に養生を早期に終了できる可能性があり、施工の合理化ができると考えられる。本手法は既に実際の現場で計測を行っており、実際の現場コンクリートの圧縮強度を推定することができた¹⁰⁾。しかし、実際の現場で使用するには、計測される電気抵抗に影響を及ぼす各種要因について、その影響を明らかにする必要がある。

本研究は、直流四電極法により計測される電気抵抗に影響を及ぼす各種要因を明らかにし、その影響の程度について考察を行ったものである。

*1 佐藤工業(株) 技術研究所 (正会員)

*2 芝浦工業大学 工学部土木工学科

*3 芝浦工業大学 工学部土木工学科准教授 博士(工学) (正会員)

2. 実験方法

本実験では計測される電気抵抗に影響を及ぼすと考えられる各種要因について評価するため、電気抵抗に及ぼす電極間隔、電極直径、打設面からの距離およびコンクリート温度の影響について検討を行った。電気抵抗の計測は、材齢1日から経時的に行った。

2.1 直流四電極法による電気抵抗計測

図-1 に直流四電極法の概略を示す。本計測方法の特徴は、型枠に電極を設置した後にコンクリートを打設することでコンクリート内部に電極を埋め込むことと、コンクリート内部に埋め込まれる電極の表面を絶縁体で覆うことで2mmの通電部を設けることである。これにより型枠内部のコンクリートの電気抵抗を測定することが可能となり、通電深さを変化させることでコンクリート表面から任意の位置での電気抵抗計測が可能となる。

表-1 に電気抵抗の計測条件を示す。直流電源を選択した理由としては、交流電源と比較して計測装置が小型で安価なことが挙げられる。また、パルス波を使用することで帯電現象を防止している。通電深さは、電極間隔と同様に50mmを標準とした。電極にはステンレスの針金を使用した。理由としては、コンクリートの表面を錆汁等で汚さないためである。電圧の印加時間は5秒とし、5秒後の電流からオームの法則を用いて電気抵抗を求めている。

2.2 実験概要

電気抵抗の計測は、図-2 に示す1680×780×320mmの床版を模した試験体の側面と、写真-1 に示す100×100×400mmの角柱供試体の側面で行った。図-2 の床版を模した試験体は、屋外で作製し、材齢3日まで打設面の湿潤養生を行っている。本試験体は、型枠側面に電極間隔、電極直径、打設面からの距離を変化させた電極を設置した後にコンクリートを打設し、電気抵抗の計測を行った。型枠は電気抵抗の計測が終了するまで型枠を存置した。電気抵抗の計測は、打設の翌日から材齢32日まで経時的に行った。写真-1 の角柱供試体は、恒温恒湿室(温度:20±2℃,湿度:60±5%RH)で作製した。側面型枠に電極を設置し、コンクリートを打設することで電極を角柱供試体内部に埋め込んだ。写真の7本の電極から隣りあう4本の電極を選択し、4回の計測を行った。床版型試験体は、同様の方法で計測条件によって1~3回の計測を行っている。角柱供試体は、材齢3日で脱型後、材齢半年まで20℃水中養生を行って水和反応を進行させた。水中養生終了後は、含水率の変化を防止するために角柱供試体全面をエポキシ樹脂で覆った。

表-2 に使用したコンクリートの配合を示し、表-3 に使用材料を示す。使用したコンクリートは、普通30-8-20Nで表記される一般的なコンクリートに膨張材

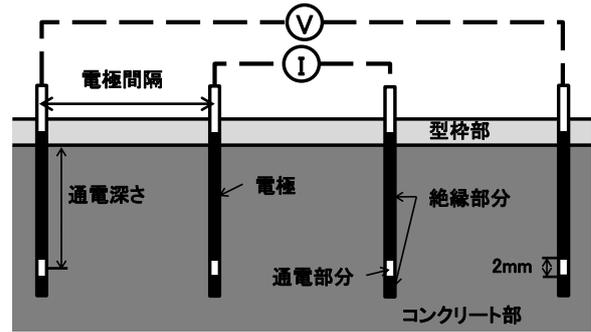


図-1 直流四電極法の概略

表-1 電気抵抗の計測条件

	標準計測	検討実験
計測方法	直流四電極法	
印加電圧	10V(パルス波)	
電極間隔	50mm	20, 30, 40, 50, 70, 100mm
電極直径	φ1.6mm	φ0.9, φ1.6, φ2.0mm
打設面からの距離	200mm	50, 100, 150, 200, 250mm
通電深さ	50mm	
電極金属	ステンレス	

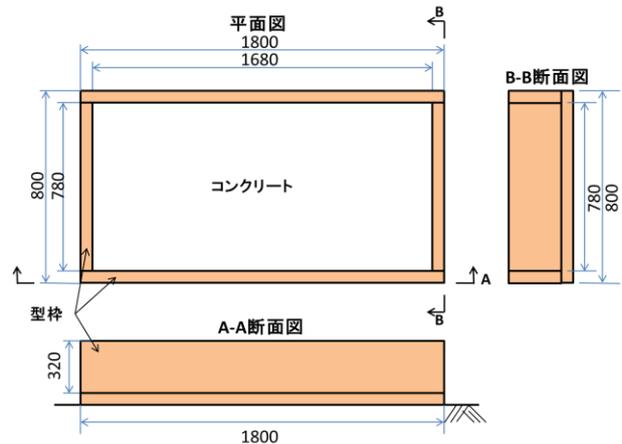


図-2 床版型試験体の概略

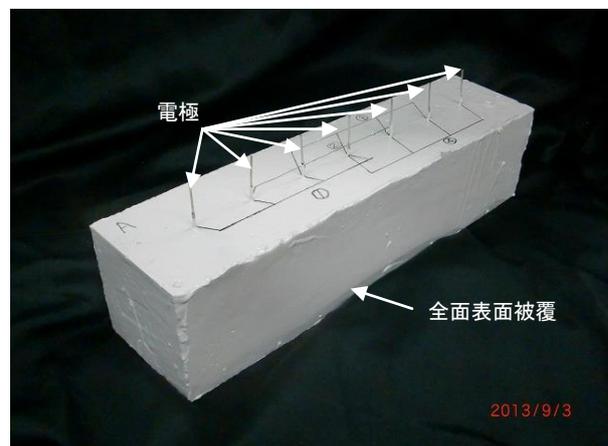


写真-1 角柱供試体

表-2 コンクリートの配合

Gmax (mm)	W/C (%)	Air (%)	s/a (%)	単用量(kg/m ³)					
				W	C	E	S	G	Ad.1
20	49.0	4.5	43.7	163	313	20	777	1053	2.66

を添加したものである。

2.3 電極間隔の影響

写真-2 に計測を行った試験体の電極設置状況を示す。写真は、側面型枠の一面を撮影したものである。側面型枠表面から出ているのが電極である。電極は、打設面からの距離が 200mm、電極直径がφ1.6mmとし、電極の間隔を 20, 30, 40, 50, 70, 100mm の 6 水準とした。

2.4 電極直径の影響

計測は、屋外の床版型試験体で行った。型枠に直径が異なる電極を設置し、電気抵抗の比較を行った。電極は電極間隔が 50mm、打設面からの距離が 200mm となるようにし、電極の直径をφ0.9, φ1.6, φ2.0mm の 3 水準とした。

2.5 電極の打設面からの距離の影響

計測は、屋外の床版型試験体で行った。電極は、電極間隔が 50mm、電極直径φ1.6mm とし、打設面からの高さ方向の距離の異なる位置に設置し、計測を行った。電極の設置位置は、打設面からの距離を 50, 100, 150, 200, 250mm の 5 水準とした。

2.6 コンクリート温度の影響

計測は、写真-1 の角柱供試体を使用して行った。この角柱供試体は、水和反応が十分に進行しており、温度環境を変化させてもセメント硬化体組織の変化は小さいと考えられる。また、角柱供試体はエポキシ樹脂により全面被覆することで、コンクリート温度が変化しても水分が逸散しないように設定した。2 体の角柱供試体は水中養生終了時からエポキシ樹脂の全面塗布を行った時間が異なるために、コンクリートの含水率が異なる。電極は、電極間隔 50mm、電極直径φ1.6mm の条件とした。角柱供試体の電気抵抗の計測は、冷蔵庫、乾燥炉および恒温室を利用して-20℃~45℃までの範囲で温度環境を変化させ、同一温度環境下に 48 時間以上の静置期間を設けた後に行っている。2 体の角柱供試体の 1 体は 20℃より段階的に温度上昇をさせ、もう 1 体は 20℃より段階的に温度を低下させ電気抵抗の計測を行った。

3. 実験結果

3.1 電気抵抗に及ぼす電極間隔の影響

図-3に電極の間隔を変化させた電気抵抗の計測結果を示す。図は1ヶ所の計測結果から作成したものであり、計測結果の補正を行っていない。凡例は電極の間隔である。計測結果の中で、30mm, 40mm, 50mm の材齢32日

表-3 コンクリートの使用材料

材料	詳細
C	普通ポルトランドセメント 密度3.16g/cm ³
S	神奈川県山北産 表乾密度2.60g/cm ³
	千葉県君津産 表乾密度2.55g/cm ³
G	神奈川県山北産 表乾密度2.72g/cm ³
E	膨張材 主成分は石灰系 密度3.16g/cm ³
Ad.1	AE減水剤標準形 I 種 主成分はポリカルボン酸化合物系



写真-2 側面型枠の電極設置状況

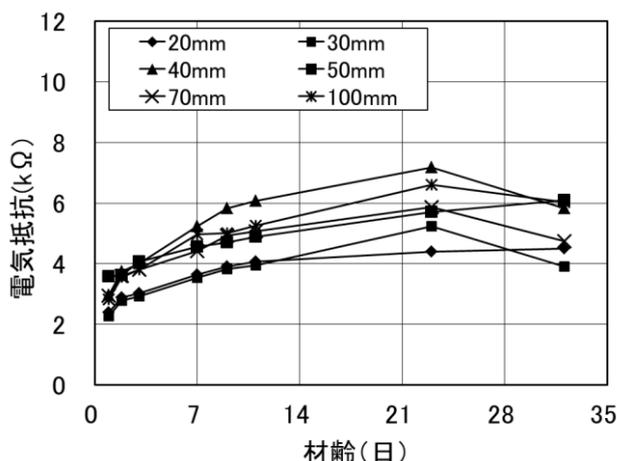


図-3 電極間隔の異なる電気抵抗

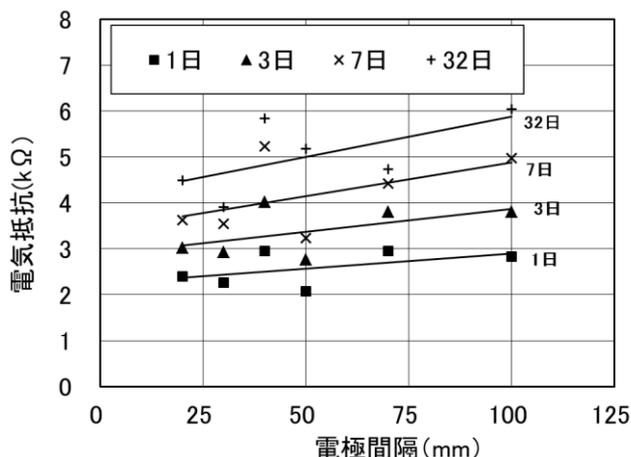


図-4 電気抵抗と電極間隔の関係

に電気抵抗が小さくなっている。この傾向は、電極が試験体の南面に設置されたもので確認されており、他の南面に設置した電極からも同様の傾向が確認されている。原因として直射日光により試験体のコンクリート温度が高温だったことに起因していると考えられる。計測時に北面かぶり50mm位置のコンクリート温度を計測した結果は、48.3℃であった。直射日光の当たった南面は、もっと高温となったものと予測されるが、南面の正確な温度が不明である。したがって、電気抵抗値はコンクリート温度による補正を行わなかった。

図から、若材齢では電気抵抗の大きさに明確な差異は確認されない。しかし、材齢7日以降の電気抵抗は、電極の間隔が大きくなるほど電気抵抗が大きい傾向がある。

図-4に電極の間隔と電気抵抗の関係を示す。また、材齢1, 3, 7, 23日の計測結果を線形近似したものも示す。その関係は、ばらつきがあるが材齢の進行に伴って傾きが大きくなるように見える。

電気抵抗は電極間隔に影響を受け、電極の間隔が大きくなるほど電気抵抗も大きくなる。また、この傾向は、若材齢の電気抵抗の小さい時に影響が小さく、材齢の進行に伴って計測される電気抵抗が大きくなると電極間隔の影響が大きくなる。

この原因として、若材齢のコンクリートの電気抵抗は、コンクリート内部の水分量やイオン濃度に強く影響を受けること。また、材齢の進行に伴ってコンクリート内部の含水率が低下し電気抵抗が大きくなるとセメント硬化体組織の影響が大きくなり、電極間隔の影響を大きく受けるようになると思われる。

電気抵抗の結果は、材齢3日程度の若材齢の場合に電極間隔で補正する必要性は低いと考えられる。しかし、材齢7日以上での計測結果は、電極間隔の影響を受けるので、比抵抗で整理することが望ましいと考えられる。

3.2 電気抵抗に及ぼす電極直径の影響

図-5に電極直径の異なる電気抵抗の計測結果を示す。図は3ヶ所の計測結果の平均値である。凡例は電極の直径である。電気抵抗は、電極の直径が大きくなるほど小さな値を示した。また、この傾向は、計測材齢によって変化しないことから、水和反応の進行に影響を受けていないと考えられる。

図-6に電極断面積と電気抵抗の関係を材齢ごとに整理をした。使用したデータは1日, 3日, 7日, 11日, 32日とした。図から、線形関係を得ることができた。

計測される電気抵抗は、電極直径に影響を受け、電極断面積と電気抵抗の間に相関関係が認められた。したがって、その影響は、電極の断面積で補正する必要がある。

3.3 電気抵抗に及ぼす打設面からの電極の距離の影響

図-7に電極の打設面からの距離による抵抗と材齢の関係を示す。図は3ヶ所の計測結果の平均値である。図

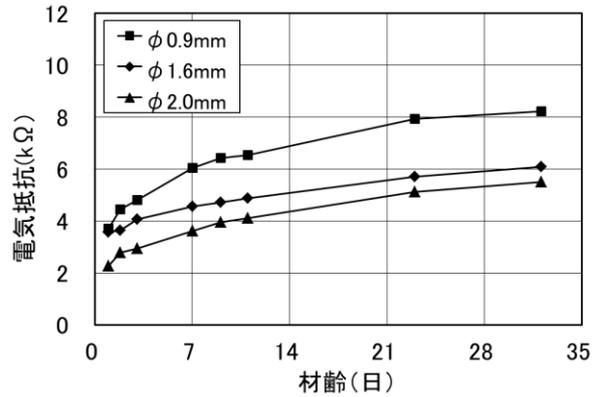


図-5 電極直径の異なる電気抵抗

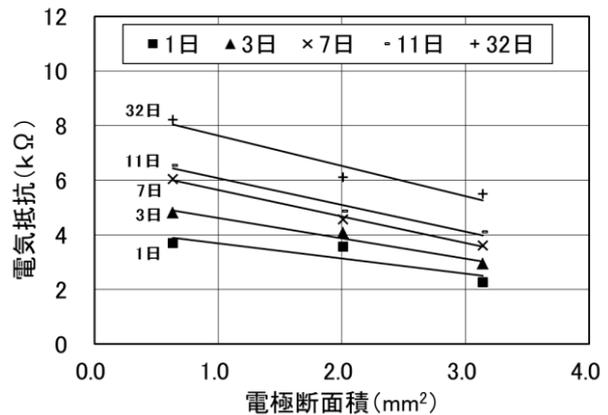


図-6 電気抵抗と電極断面積の関係

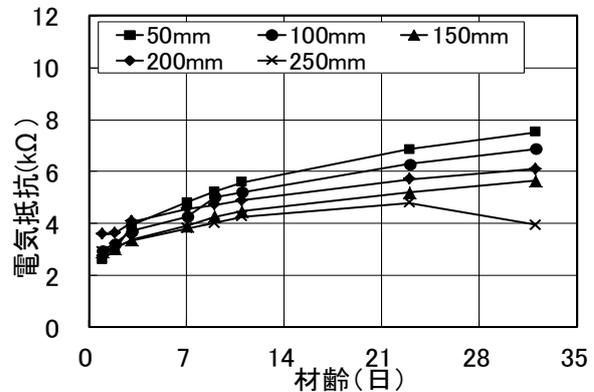


図-7 打設面からの距離の異なる電気抵抗

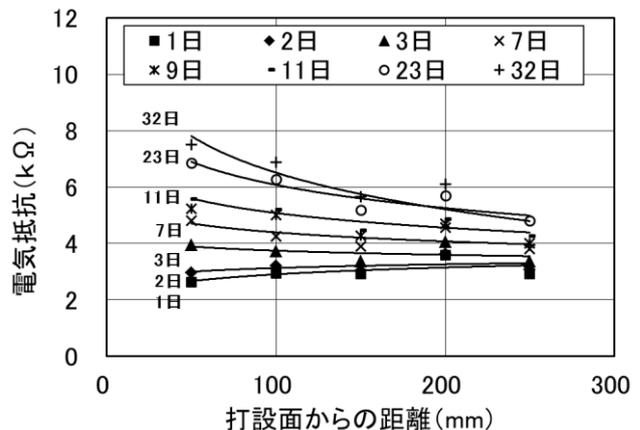


図-8 電気抵抗と打設面からの距離の関係

中の打設面からの距離 250mm, 材齢 32 日の電気抵抗が小さい値を示している。これは、前述のように打設面からの距離が 250mm の電極のみを南面で計測していたことに起因しており、コンクリート温度が高温だったことが原因として考えられる。床版型試験体の打設面は、材齢 3 日まで養生マットによる湿潤養生を行っている。材齢 3 日まで 50mm の電気抵抗が小さいことや、材齢 7 日まで 100mm の電気抵抗が小さいことは、コンクリート打設面の湿潤養生により水が供給されたため小さくなったと考えられる。

図から、材齢3日以降の電気抵抗は、打設面からの距離が小さくなるほど大きくなる傾向が得られた。この原因として、コンクリート打設面からの水分逸散が考えられる。しかし、既往の研究では、表層から30mm 程度まで乾燥の影響を受けるが50mm 以降は影響を受けない⁹⁾とされている。図から電気抵抗は、100mm 程度まで電気抵抗が大きくなっており、既往の研究より影響範囲が大きい。

図-8に電極の打設面からの距離と電気抵抗の関係を示す。図中の近似線は対数近似したものである。図から、材齢1日および2日の表層コンクリートの電気抵抗が小さい傾向は50mm 程度までしか影響していない。その後、材齢の進行に伴って打設面に近いコンクリートほど電気抵抗が大きくなる傾向に関しては、表層コンクリートからの水分の蒸発だけで説明が難しく、コンクリートの材料分離の影響を捉えている可能性がある。材料分離によって密度の小さい水が試験体上面に移動し、密度の大きいセメントや骨材が試験体下面に移動する。電気抵抗はコンクリートの含水率の評価にも使用され、コンクリート内部の水分量に影響を受ける。既往の研究⁸⁾では、W/Cの異なるコンクリートで電気抵抗に差異が認められている。材料分離を起こすことでコンクリート内部の上下方向でW/Cが変化し、その影響が電気抵抗に現れたと考えられる。さらに、材料分離をの影響を受けることで、コンクリート打設面のW/Cが大きくなり、表面からの水分の蒸発量が大きくなった可能性もある。今後、さらなる検討を加える必要がある。

電気抵抗を計測する電極を設置する位置は、材料分離等の影響を考慮して打設面から 100mm 以上の距離を確保する必要があると考えられる。

3.4 電気抵抗に及ぼすコンクリート温度の影響

計測は 2 体の角柱供試体で行った。図-9 にコンクリート温度と電気抵抗の関係を示す。角柱供試体 A と B はコンクリート温度 20℃の時点で電気抵抗の値が異なる。この原因として角柱供試体の含水率が異なることが挙げられる。図は 0~45℃の範囲で線形関係を示しており、この傾向は既往の研究結果¹¹⁾と同様である。この結果から通電部を限定する本手法においても抵抗値の温度補正係数を適用することで、コンクリート温度 20℃の際の電

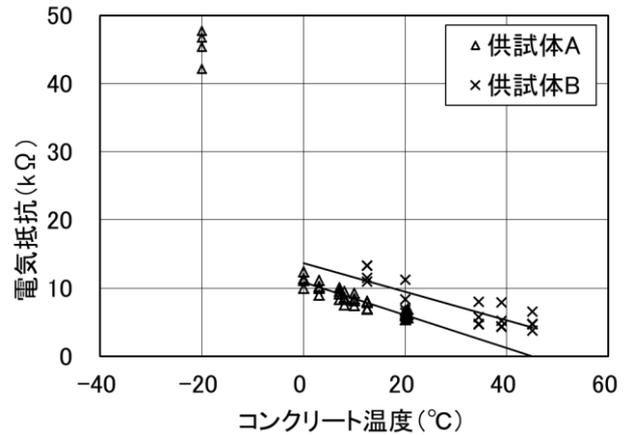


図-9 電気抵抗とコンクリート温度の関係

気抵抗を算定できることがわかった。また、コンクリート温度-20℃の電気抵抗は、大きな値を示している。これは既往の研究のコンクリートの電気抵抗が細孔溶液の電気抵抗に強く影響を受ける¹¹⁾という考えを裏付ける結果であり、水より氷の電気抵抗が大きいためだと考えられる。

結果より、実際の現場で計測を行う場合には、コンクリート温度を計測する必要がある。計測された電気抵抗はコンクリート温度で補正する必要がある。また、冬季などでコンクリート温度が 0℃を下回る場合には、コンクリート温度による補正ができない可能性があるため、データの取り扱いに注意をする必要がある。

3.5 重回帰分析による有意性の検討

床版型試験体の電気抵抗計測結果に対し、電気抵抗を目的変数とし、材齢、電極間隔、電極断面積、打設面からの距離を説明変数として有意水準 5%で重回帰分析を行った。その結果、補正 R2 は 0.68 となり、この重回帰式が実測値を 68%説明する¹²⁾こととなり、良い精度が確認された。

表-4 に重回帰分析結果の P-値を示す。P-値は、0.05 以下となり総ての項目が影響があると言える。また、各項目の P-値は、材齢、電極の直径、打設面からの距離、電極の間隔の順に小さくなり、特に材齢と電極の直径の変数の影響が大きいと評価される。材齢の効果が大きいことは容易に想像ができる。また、その他の項目の中でも電極の直径の効果は、比較的に大きいと考えられる。

表-4 重回帰分析結果の P-値

	P-値
材齢	4.27×10^{-21}
電極の直径	2.59×10^{-9}
電極の間隔	2.67×10^{-3}
打設面からの距離	7.18×10^{-3}

4. おわりに

直流四電極法により計測される電気抵抗に影響を及ぼす計測方法や計測条件を明らかにするために、各種計測条件を変化させて計測を行った。結果を以下に記す。

- 1) 電気抵抗は電極間隔に影響を受け、電極間隔が大きくなるほど電気抵抗も大きくなる。また、この傾向は、電気抵抗の小さい若材齢で影響が小さく、材齢の進行にともなって計測される電気抵抗が大きくなると影響も大きくなる。
- 2) 電気抵抗は電極の断面積に影響を受け、電極の断面が大きくなるほど電気抵抗は小さくなる。
- 3) 電気抵抗は打設面からの電極の距離に影響を受ける。その影響範囲は打設面からの距離が 100mm 程度までである。
- 4) 電気抵抗はコンクリート温度に影響を受け、コンクリート温度が高くなるほど電気抵抗は小さくなる。
- 5) 電気抵抗は 0°C 以下の低温になると電気抵抗が著しく大きくなる。これは電気抵抗が細孔溶液の電気抵抗に強く影響を受けるためと考えられる。
- 6) 重回帰分析の結果から電気抵抗は、電極の直径、打設面からの距離、電極の間隔の影響を受け、特に電極の直径の影響は大きい。

参考文献

- 1) 土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書 [施工編]，土木学会，2013.3
- 2) 岡崎慎一郎，八木翼，岸利治，矢島哲司：養生が強度と物質移動抵抗性に及ぼす影響感度の相違に関する研究，セメント・コンクリート論文集，V-60，pp.227-234，2006.2
- 3) 井ノ口公寛，豊村恵理，伊代田岳史：高炉コンクリートの養生相違が乾燥の影響範囲に与える影響，日本コンクリート工学会，混和材を積極的に使用するコンクリートに関するシンポジウム，pp69-74，2011
- 4) 福留和人，庄野昭，古川幸則：各種セメントを用いたコンクリートの強度発現特性に及ぼす養生の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.32-1，pp.1307-1312，2010.7
- 5) 歌川紀之，宇野洋志城，藤谷三千男，加藤公章：覆工コンクリートの湿潤養生効果の現地測定，土木学会年次学術講演会概要集，VI-312，pp.623-624，2008
- 6) 土木学会：構造物表層のコンクリート品質と耐久性能検証システム研究小委員会(JSCE335 委員会)第二期成果報告書およびシンポジウム講演概要集，コンクリート技術シリーズ，97，pp137-144，2012
- 7) 土木学会：構造物表層のコンクリート品質と耐久性能検証システム研究小委員会(JSCE335 委員会)第二期成果報告書およびシンポジウム講演概要集，コンクリート技術シリーズ，97，pp152-162，2012
- 8) T, Misaka. and T, Iyoda.: Study on curing of concrete by the end time judgment of the DC specific resistance, SCMT-3, e-313, August, 2013
- 9) 豊村恵理，上原菜津葵，伊代田岳史：直流比抵抗を用いたコンクリートの養生終了タイミング判断手法に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp1348-1353，2012
- 10) 三坂岳広，原沢蓉子，伊代田岳史：直流四電極法による養生終了時期判定手法の確立および現場適用性の検討，コンクリート工学年次論文集 Vol.36, No.1, pp1606-1611，2014
- 11) 佐藤道生，酒井隆行，皆川浩，久田真：比抵抗に着目したコンクリートの長期耐久性モニタリング，コンクリート工学年次論文集，Vol.33, No.1, pp785-790，2011
- 12) 星川佳広：論文の書き方 6 分散分析 (その 2)，NSCA JAPAN，Vol.21，No.3，pp20-25，