*論文　直流四電極法を用いた各種養生方法による表層コンクリートの含水状態評価手法の提案

Proposal for evaluation method of water content in surface layer concrete by various curing using four probe electrical method

○三坂　岳広[*1]・伊代田　岳史[*2]
Takehiro MISAKA, Takeshi IYODA

要旨：各種養生方法の給水および保水による含水率の変化する深さや程度を計測する手法や知見は少なく，実際に現場で養生方法を選定する際の判断基準が少ない．筆者らは直流四電極法による電気抵抗に着目し，各種養生を行ったコンクリートの給水および保水効果を計測することを試みた．結果から電気抵抗を用いて各種養生によるコンクリートの表面からの深さごとの含水状態を計測できる可能性を示し，その評価手法を提案した．

キーワード：四電極法，電気抵抗，養生，含水率

1.　はじめに

コンクリート標準示方書［施工編］においてコンクリートがその水和反応により，所要の強度，耐久性，ひび割れ抵抗性，水密性，鋼材を保護する性能等を確保するためには，打ち込み後の一定期間はコンクリートを適当な温度のもとで十分な湿潤状態に保ち，有害な作用の影響を受けないようにすることが必要とされている．また，コンクリートを湿潤状態に保つ養生方法として湛水養生，散水養生，湿布養生などを挙げている．コンクリートの養生は，鉄筋コンクリート構造物の表層品質を確保するために重要であり，各建設会社も様々な養生方法を提案し，実際の現場で実施している[1,2 など]．また，脱型後のコンクリートに対して養生剤を塗布する方法も提案されている．湿潤養生による給水および保水効果は，封かん養生等のコンクリート中の水分の逸散防止効果や，水中養生等による水の給水効果と考えられ，コンクリートの含水率を計測することで養生の影響を評価できると考えられる．本研究では，養生の効果を各種養生方法による給水や保水によるコンクリートの含水率の変化と変化深さとする．しかし，これらの各種養生方法の給水および保水により含水率の変化する深さや程度を計測する手法や知見は少なく，実際に現場で養生方法を選定する際の判断基準が少ないのが現実である．

電気抵抗法は，かぶりコンクリートの電気抵抗を測定することによって，コンクリートの腐食性および鋼材の腐食進行のしやすさについて評価する電気的方法である[3]．また，四電極法による電気抵抗の測定は，コンクリートの含水量を計測することを目的に一般的に使用されている．既往の研究[4]では電気伝導率を用いた凝結管理手法も提案されている．

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で養生終了時期を判定する手法[5,6]を考案し，実用化を目指している．本手法は通電部を限定した電極を用いることで，コンクリート表面からの深さごとの電気抵抗を測定することが可能である．また，この直流四電極法によって計測される電気抵抗と結合水率に相関関係が認められ，計測される電気抵抗の値から結合水率を推定できる可能性[7]が示されている．この方法を用いて各種養生を行ったコンクリートの電気抵抗を測定することで，水和反応の進行と深さごとの含水状態を計測し，養生の効果を評価することを考えた．

本研究では，コンクリートの表層からの深さごとに電気抵抗を測定し，計測される電気抵抗が表層からの深さごとの含水率を推定できるかを検討する．次にこれらの結果を用いて，電気抵抗を用いたコンクリートに実施される各種養生方法の保水および給水による養生効果の計測手法を提案する．

2.　実験方法

電気抵抗はコンクリート内の含水状態に影響を受ける．既往の研究[7]より，封かん養生を行っているコンクリートの電気抵抗は水和反応の進行度を評価できる

*1 芝浦工業大学大学院理工学研究科　Div. of Regional Environment Systems Shibaura Institute of Technology
*2 芝浦工業大学　土木工学科　Dept. of Civil Engineering,Shibaura Institute of Technology

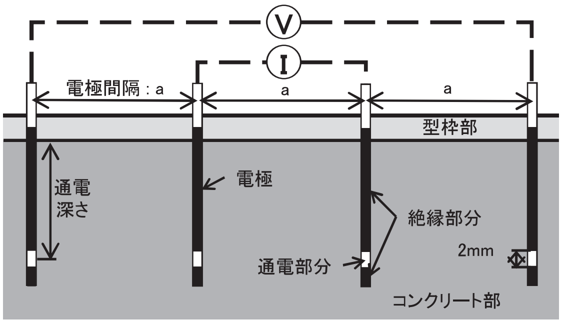

図-1　直流四電極法の概略

と考えられる．この封かん養生状態の電気抵抗を基準とし，養生環境によるコンクリートの含水状態の変化をコンクリート表面からの深さごとに電気抵抗で計測する．

本研究ではコンクリート供試体を作製し，表層からの深さごとに電気抵抗を測定し，深さごとの含水状態を推定する**実験 1**，各種養生方法の養生の効果について検討した**実験 2** の 2 種類の実験を行った．

2.1 直流四電極法による電気抵抗測定

図-1 に直流四電極法の概略を示す．また，**表-1** に電気抵抗の計測条件を記す．直流電源を使用した理由として，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コンクリートの帯電現象を防止した．印加電圧は 10V とした．電極は表面を絶縁体で覆うことにより 2mm の通電部を設けた．これにより通電深さを変化させ，コンクリート表面から任意の位置で電気抵抗計測が可能となる．**実験 1** では通電深さを 5～70mm と変化させ，コンクリート表面からの各深さの電気抵抗を測定した．**実験 2** では一般的な鉄筋コンクリートのかぶり 60mm の中央を計測することを考えて 30mm とした．電極には鉄の針金を使用した．

2.2 使用材料および配合

セメントは普通ポルトランドセメント［OPC］（密度 3.16g/cm^3，粉末度 3240cm^2/g）と，OPC に高炉スラグ微粉末［BFS］（密度 2.89g/cm^3，粉末度 4410cm^2/g）を 50%置換したセメント［BB］の 2 種類とした．また，細骨材として君津産陸砂（表乾密度 2.62 g/cm^3，吸水率 1.49%）を使用し，粗骨材として秩父産硬質砂岩（密度 2.71 g/cm^3，吸水率 0.55%）を用いた．計画配合を**表-2** に示す．水セメント比は 55%とした．実験 1 では目標スランプ 14.0cm で一定とし，セメントに OPC と BB の 2 種類を用いた一般的なコンクリートを作製した．実験 2 では OPC のみとし，目標スランプ 12.0cm の一般的なコンクリートとした．

2.3 供試体および養生条件

図-2 に各実験で使用した供試体の概略を示す．供試体の寸法は**実験 1** で 100×250×1350mm の大型の供試体とし，**実験 2** では 100×100×400mm の角柱供試体とした．**実験 1** では型枠用合板を存置することで封かんした．**実験 2** ではアルミテープを用いて供試体を被覆し，電極とアルミテープの距離に関しては，既往の研究[8]の電極間隔と電極と鉄筋との距離に関する実験結果を参考に，計測される電気抵抗がアルミテープに影響を受けないように考慮した．**実験 1** および **2** の供試体は，供試体側面の電極設置面のみを解放し，その他の面を被覆した．**実験 1** の供試体は解放面より水分が逸散を検討し，**実験 2** の供試体は解放面から水分

表-1　電気抵抗の計測条件

	実験 1	実験 2
計測方法	直流四電極法	
印加電圧	10V	
電極間隔	40mm	
電極直径	φ2.0mm	
通電深さ	5,10,20,30,50,70mm	30mm
電極金属	鉄	

表-2　コンクリートの計画配合（実験 1）

	セメント種類	WC (%)	s/a (%)	単位量(kg/m^3) W	C	S	G
実験 1	OPC	55	50	174	316	906	923
	BB		51			920	900
実験 2	OPC		48	175	318	851	960

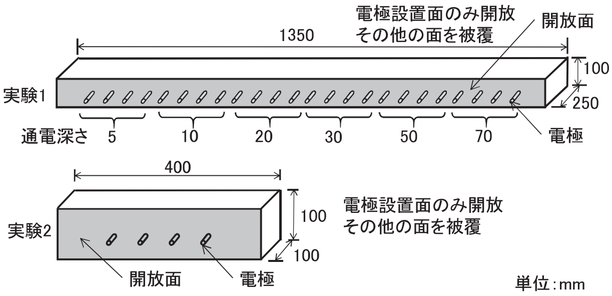

図-2　供試体の概略

表-3　養生方法（実験 2）

	材齢 0 日	1 日	・・・	28 日
RH60%	打込み	脱型	RH60%	
RH80%			RH80%	
型枠存置			型枠存置	
水中			水中養生	
塗膜剤		塗膜剤塗布	RH60%	

の供給・逸散が起こる各種養生を行った．電極は供試体側面の中央部に設置した．**実験 1** では通電深さが異なる電極を設置している．

実験 1 の供試体は，恒温恒湿室（温度 20±1℃，湿度 60±5%）に静置をした. また, 型枠の脱型材齢を 1，3，5，7 日と変化させた．**表-3** に**実験 2** の供試体で行った養生方法を示す．養生方法は温度環境を 20±1℃とし，相対湿度を 60%および 80%，型枠存置，水中養生，塗膜養生剤（塗膜剤）の塗布とした．塗膜養生剤は，材齢 1 日で脱型後に，有機－無機複合型ポリマーを主成分とする塗膜養生剤を塗布した．

2.4 試験項目および方法

実験 1 では OPC および BB コンクリートの供試体に設置した通電深さの異なる電極を用いて電気抵抗の測定を経時的に行い，外部環境への水分の逸散状況を計測した．**実験 2** では，各養生を行ったコンクリートの電気抵抗と供試体の質量を経時的に計測し，供試体から逸散した水分量と電気抵抗を比較した．**実験 1** および**実験 2** の結果は同一条件の供試体数が 1 個の結果である．

3. 試験結果

3.1 通電深さが電気抵抗に及ぼす影響（実験 1）

図-3 に材齢 1 日で脱型を行った OPC 供試体の電気抵抗の測定結果を，**図-4** に材齢 5 日で脱型を行った OPC 供試体の電気抵抗の測定結果を示す. 脱型前の電気抵抗は, 通電深さによる明確な差異は認められない. しかし，脱型後の各通電深さの電気抵抗は，通電深さが小さいものほど大きくなった．通電深さ 5mm の表面に近い部分の電気抵抗は，脱型直後に電気抵抗が大きく増加しているのに対し, 通電深さ 50 および 70mm の電気抵抗は大きな変化が認められない．材齢 1 日と 5 日で脱型を行った結果と比較すると，材齢 5 日で脱型を行った場合の電気抵抗は，脱型後の電気抵抗の増加量が小さくなっている．これは材齢の進行にともなってセメント硬化体組織が緻密化し，コンクリート内部の水分が逸散する速度が遅くなったこと，脱型材齢が延びたことにより水和反応が進行し，コンクリート内部の逸散できる自由水量が減少したことが原因として考えられる．

既往の研究 [7] よりコンクリートの電気抵抗は結合水率と相関があり，水和反応の進行により電気抵抗が増加するとされている．通電深さ 50 および 70mm の内部の電気抵抗は，材齢の進行に伴って大きくなるが，値に大きな差が無い．これはコンクリートの水分逸散による含水率の低下に影響を受けない深さであり，水和反応の進行による自由水の減少を捉えていると考え

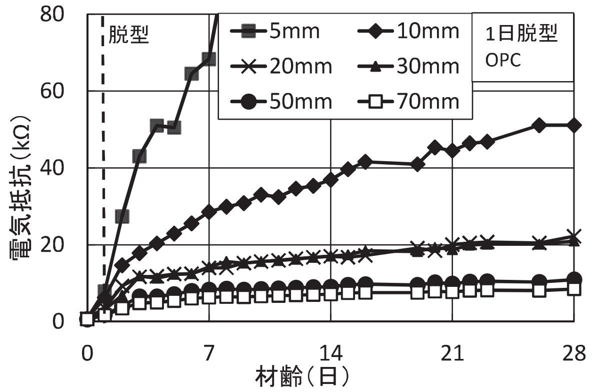

図-3 電気抵抗の測定結果(1 日脱型，OPC)

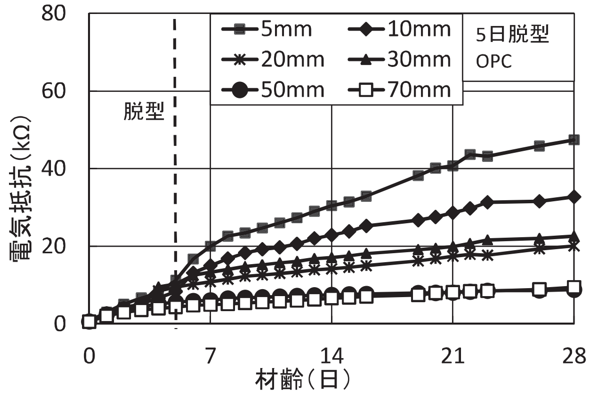

図-4 電気抵抗の測定結果（5 日脱型，OPC）

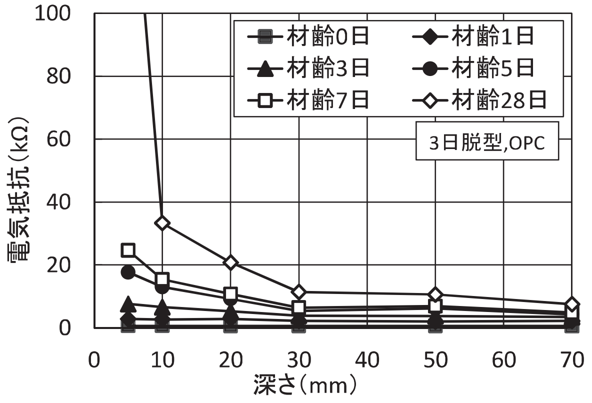

図-5 電気抵抗と通電深さの関係 (3 日脱型, OPC)

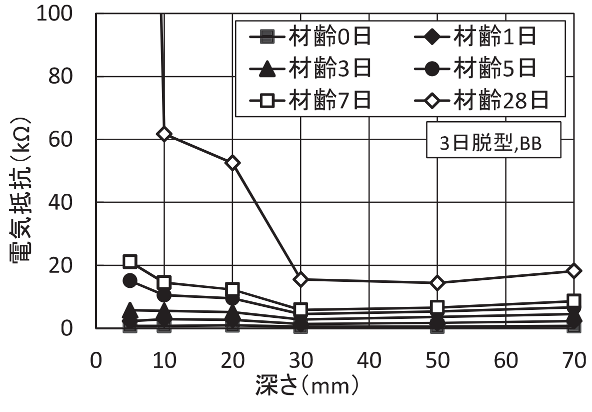

図-6 電気抵抗と通電深さの関係（3 日脱型，BB）

抗を計測することで，コンクリートの水和反応による水の消費のみを計測できると考えられる．

図-5 に材齢 3 日で脱型を行った OPC 供試体の電気抵抗と通電深さの関係を，**図-6** に材齢 3 日で脱型を行った BB 供試体の電気抵抗と通電深さの関係を示す．既往の研究[9] より養生方法が深さ方向の真空吸水面積率に与える結果が明らかとなっており，養生条件によって表層コンクリートの空隙構造等の緻密性が変化する深さは，25mm 程度とされている．本試験結果からも水分逸散による含水率の低下した範囲は深さ 20～30mm であり，同様の傾向が確認された．

図-5 と**図-6** のセメント種類で比較をすると，水分逸散による含水率の低下した深さに明確な差は無い．しかし，30mm 以下の電気抵抗は BB の方が大きな値を示している．これは，OPC と比較して BB の水和反応が遅いことに起因していると考えられる．つまり，OPC および BB 供試体が同じ材齢 3 日で脱型した際の水和反応の進行度の差によりコンクリート内部の逸散できる自由水の量や表層コンクリートの緻密性が異なり，水和反応の遅い BB の方が脱型後に逸散した水分量が多いことが 30mm 以下の電気抵抗を大きくしたと考えられる．通電部を設けた電極を用いて電気抵抗を計測することで，セメントの種類による水和反応の進行度の差異が表層コンクリートの含水状態に及ぼす影響についても計測できる可能性がある．

電極に通電部を設けることで，表面からの深さごとの含水状況を推定できると考えられる．通電深さの異なるコンクリートの電気抵抗は，脱型後の水分逸散による含水率の変化を捉えていると考えられる．

3.2 各種養生方法による養生効果の比較（実験 2）

既往の研究[7] よりコンクリートの電気抵抗は，結合水率と相関があり，水和反応の進行による水の消費を捉えていると考えられる．また，**実験 1** の結果より，電極の通電深さを変化させたコンクリートの電気抵抗は，通電深さごとの含水状態に影響を受けると考えられる．そこで各種養生を実施し，電気抵抗から含水状態の変化を計測できれば，養生による含水状態の変化とその深さを評価できると考えた．

図-7 に質量変化率と材齢のイメージを示す．材齢の進行に伴って結合水量が増加し，自由水が減少する．この結合水量の変化は，**実験 1** の通電深さ 50mm 以上の電気抵抗から推定できると考えられる．各種養生条件により自由水量から蒸発した水量が減少すると考えられる．この養生環境によって逸散する自由水量は**実験 1** の結果から通電深さ 30mm 以下の電気抵抗で計測ができると考えられる．つまり電気抵抗は，図中の矢印部分を表していると考えられる．したがって，電気

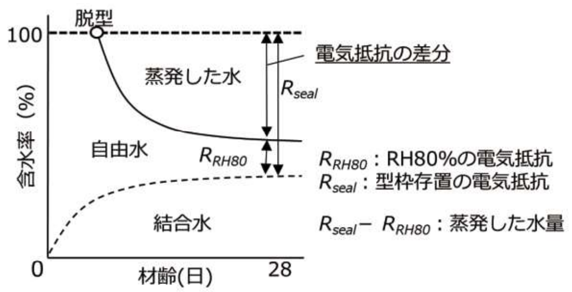

図-7　含水率と材齢のイメージ

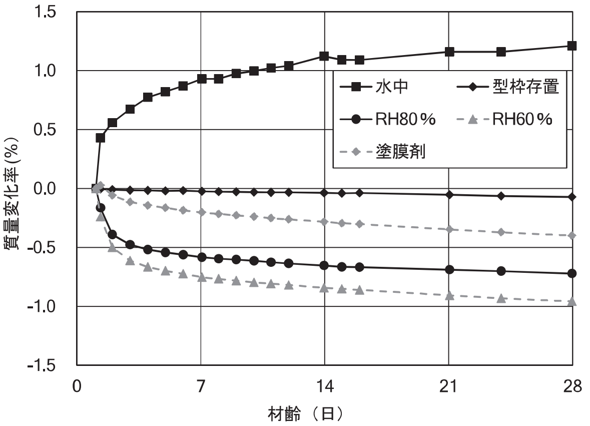

図-8　各種養生の質量変化率

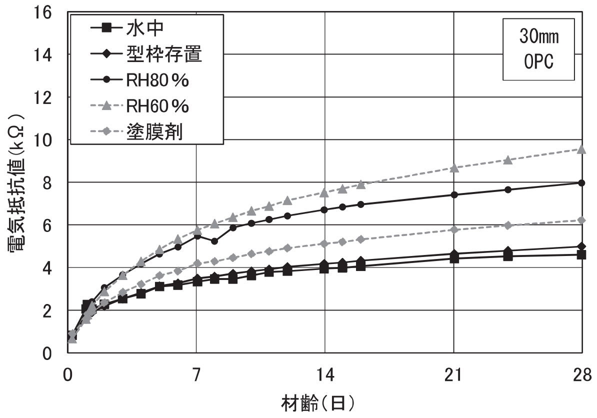

図-9　電気抵抗の測定結果

抵抗の差分が各種養生条件により蒸発した水の量を計測していると考えられる．

図-8 に各養生を行った供試体の質量変化率を示す．塗膜剤は塗布後の質量増加量を減じている．質量変化率は水中，型枠存置，塗膜剤，RH80%，RH60%の順に小さくなった．水中養生を行った供試体は給水効果によって質量が増加し，型枠存置による養生は型枠により封かんされており質量変化率が小さくなった．その他の養生を行った供試体の質量は，各種養生環境により質量変化率が異なった．これは，各種養生環境により水分の逸散状況が異なるためと考えられる．塗膜剤の質量変化率は，塗布後に RH60%と同様の環境に暴露されているが，RH60%の質量変化率に対して 3%

ほど小さくなっており，塗膜養生剤塗布による水分逸散抑制効果が確認できる.

図-9 に各種養生を行った供試体の電気抵抗の測定結果を示す．電極の通電部は，コンクリートの表面からの深さが 30mm であり，計測される電気抵抗は，30mm 部分のコンクリートの含水状態を計測していると考えられる．各養生の電気抵抗は，材齢 1 日の脱型まで大きな差がない．しかし，脱型後の材齢の進行にともなって差異が大きくなった．材齢 28 日の電気抵抗は，水中，型枠存置，塗膜剤，RH80%，RH60%の順に大きくなった．これは，各種養生環境による水分の逸散や水中養生による給水による含水状態の変化を捉えていると考えられる．質量変化率では，水中養生の給水による質量増加が確認できた．しかし，電気抵抗の測定結果では，水中の電気抵抗が最も小さい値を示しているが，型枠存置の電気抵抗と大きな差異が認められない. これは，電気抵抗がコンクリートの表面から 30mm の位置のコンクリートの含水率を計測しているためと考えられる．すなわち，水中養生によってコンクリートに給水された水は，主に表層部分に浸透しており，表層から 30mm の電気抵抗ではあまり大きな差異が生じなかったことが考えられる．このように通電深さを変化させた電気抵抗を測定することで，各種養生による給水および保水の影響深さを得ることが可能と考えられる.

図-10 に電気抵抗差分の経時変化を示す. 電気抵抗の差分は，各種養生条件と型枠存置の電気抵抗の差分である．電気抵抗の差分は図-8 で説明したようにコンクリート内部の自由水量を表していると考えられる．また，実験条件から表層から 30mm 部分の結果である.

電気抵抗の差分は脱型直後の差異は小さいが，材齢の進行に伴って RH60%， RH80%，塗膜剤，型枠存置，水中の順に小さくなった．また，水中に関しては電気抵抗の差分が 0 より小さくなっており，給水による含水状態の変化を捉えていると考えられる. これは，電気抵抗の差分が表層から 30mm の含水状態を表しているためと考えられる.

図-11 に各種養生の電気抵抗と型枠存置の電気抵抗の差分と質量変化率の関係を示す．各養生方法の電気抵抗の差分と質量変化率は，質量変化率が正側でデータが少ないものの概ね相関が認められる. したがって，電気抵抗の差分を計測することで供試体全体の質量変化率を推定することが可能であり，電気抵抗の差分は通電深さ部分の養生による含水状態を表していると考えられる.

通電部を設けた電極を使用し，コンクリートの表面からの深さごとの電気抵抗を測定することで，コンク

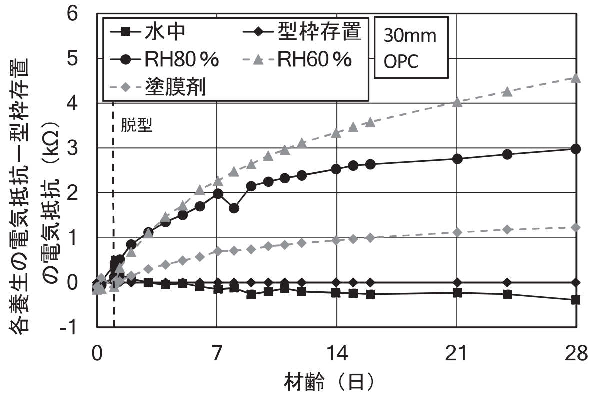

図-10　各種養生の電気抵抗と型枠存置の電気抵抗の差分の経時変化

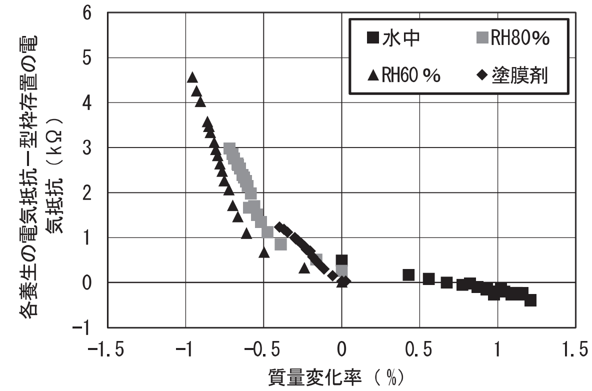

図-11　各種養生の電気抵抗と型枠存置の電気抵抗の差分と質量変化率の関係

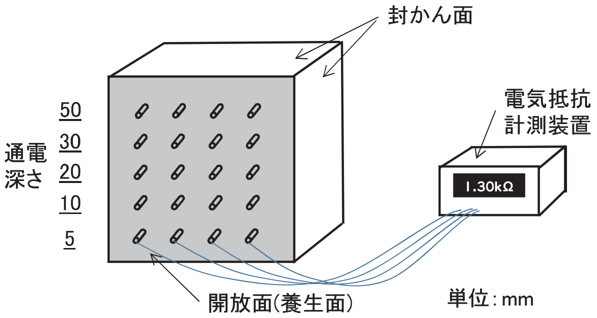

図-12　養生評価方法の概略

リートの表面からの深さごとの含水状態を計測でき，各養生による給水および保水効果を評価できる可能性が示された.

図-12 に養生評価方法の概略を示す. 図のように通電深さを変化させた電極を設置した試験体を作製し，コンクリート表面に様々な養生を実施する．通電深さ 50mm の電気抵抗は養生環境による含水率の変化の影響を受けない深さである．各通電深さの電気抵抗と通電深さ 50mm の電気抵抗の差分から，表層からの深さごとの含水状態が計測できる．これにより様々な養生

方法によって変化するコンクリートの含水状態や含水状態の変化する深さに関する知見を得られると考えられる．

4. おわりに

電極に通電部を設けた四電極法の電気抵抗を用いて，コンクリートの表層からの深さごとに電気抵抗を測定することで，各種養生の給水および保水効果を計測でき，養生による給水および保水効果の影響深さについても検討できる可能性が示された．また，得られた結果から様々な養生方法による表層コンクリートの含水状態と含水状態の変化する深さを評価できる方法を提案した．

以下に得られた結果を列挙する．

1) 通電深さを変化させた電極を用いて計測したコンクリートの電気抵抗は，脱型後の水分逸散による含水率の変化を捉えていると考えられる．
2) 電極に通電部を設けて表面からの深さごとの電気抵抗を計測することで，脱型時間の変化やセメントの種類による表面からの深さごとの含水状況の変化を捉えることができた．
3) 脱型の材齢によってコンクリートの含水率が変化する深さは，30mm 程度と考えられる．
4) 各養生方法で計測された電気抵抗と封かん養生で計測された電気抵抗の差分は，コンクリート内部の自由水量を評価していると考えられる．
5) コンクリートの電気抵抗は供試体の質量変化率と相関があり，計測される電気抵抗はコンクリート内部の含水状態を表していると考えられる．
6) コンクリートの電気抵抗を測定することでコンクリートの含水状態を計測でき，各養生による給水および保水状態を評価できる可能性が示された．
7) 通電深さを変化させた電極を供試体に埋め込み，電気抵抗の計測を行うことで，様々な養生方法によって変化する含水状態やその含水状態の変化する深さの情報を得ることが可能と考えられる．

参考文献

1) 温品達也，渡邉賢三，坂井吾郎，石田哲也：種々の結合材を用いたコンクリートに対する長期特殊シート養生の効果，コンクリート工学年次論文，Vol.38，No.1，pp.747-752，2016.7
2) 大友鉄平，塩永亮介，戸田勝哉，武田三弘：暑中における養生マットの使用がコンクリートの品質に与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.1587-1592，2016.7
3) 日本コンクリート工学会：コンクリート診断技術‘18 基礎編，pp198-200，2016.2
4) 村上拡，阿保寿郎，伊代田岳史：コンクリートの新たな凝結管理手法の有効性に関する検討，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，No. 11，pp.87-92，2011.10
5) 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方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，pp.1606-1611，2014.7
6) 三坂岳広，太田真帆，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現場適用および計測方法の検討，コンクリート構造物の非破壊検査シンポジウム，No.5，pp.123-126，2015.8
7) 三坂岳広，太田真帆，伊代田岳史：まだ固まらないコンクリートの水和反応が直流四電極法で計測する電気抵抗に与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.1，pp.1297-1302，2015.7
8) 三坂岳広，太田真帆，伊代田岳史：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.505-510，2017.7
9) 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，混和剤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，pp.69-74，2013.3