

論文

## 電気抵抗を用いた各種養生方法による養生効果評価手法の提案

三坂 岳広<sup>\*1</sup>, 伊代田 岳史<sup>\*2</sup>

### Proposal for Evaluating the Curing Effect of Concrete with Various Curing Methods Using Electrical Resistance

Takehiro MISAKA<sup>\*1</sup> and Takeshi IYODA<sup>\*2</sup>

**要旨:** 養生は表層品質を確保するために重要であり、現場では様々な養生を実施している。しかし、実際の工事で養生方法を選定する際に、どのような方法が適切なのかを判断する方法や知見が少ない。筆者らは電気抵抗に着目し、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評価しようとした。電気抵抗はコンクリートの結合水率と相関があること、電気抵抗の測定でコンクリートの表面からの距離毎の含水状態を評価できること、各種養生方法により計測される電気抵抗に差異が生じることなどを明らかにした。以上の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距離ごとの含水状態を評価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, 養生, 結合水率, 含水率

#### 1. はじめに

コンクリート標準示方書〔施工編〕で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<sup>1,2</sup>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。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大きくなる範囲や程度を評価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。

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性能や、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評価することで養生効果を評価できると考えられる。本研究では、養生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増加と増加範囲とする。

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、そ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<sup>3)</sup>。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評価することを目的に一般的に使用されている。既往の研究<sup>4)</sup>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<sup>5,6)</sup>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。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深さごとの含水状態を評価し、養生効果を評価することを考えた。

本研究では、初めに直流四電極法によって計測される電気抵抗が、水和反応による水の消費に受ける影響を明らかにする。次にコンクリートの表層から

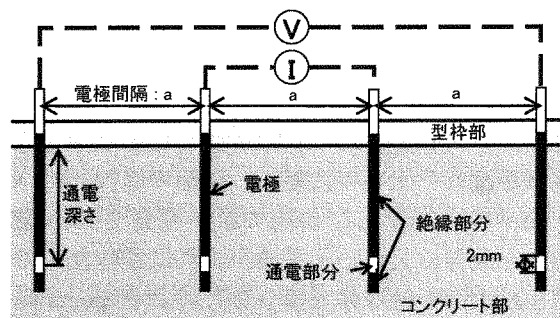


図-1 直流四電極法の概略

\*1 芝浦工業大学大学院理工学研究科地域環境システム専攻 博士課程

\*2 芝浦工業大学工学部土木工学科 教授

表-1 電気抵抗の計測条件

|      | 実験 1    | 実験 2               | 実験 3 |
|------|---------|--------------------|------|
| 計測方法 | 直流四電極法  |                    |      |
| 印加電圧 | 1V      | 10V                |      |
| 電極間隔 | 40mm    |                    |      |
| 電極直径 | φ 2.0mm |                    |      |
| 通電深さ | 30mm    | 5,10,20,30,50,70mm | 30mm |
| 電極金属 | アルミ     | 鉄                  |      |

の深さ毎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毎の含水率を評価できるかを検討する。最後にこれらの結果を用いて、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評価手法を提案する。

## 2. 実験概要

電気抵抗はコンクリート内の含水状態に影響を受ける。封かん養生を行っているコンクリートの電気抵抗は使用材料や配合条件に影響を受けるが水和反応の進行度合いを評価できると考えられる。また、この封かん養生状態の電気抵抗を基準とし、養生や暴露によるコンクリートの含水状態の変化を電気抵抗で評価する。

本研究では、コンクリートの水和反応が電気抵抗に及ぼす影響を明らかにするために、セメントペーストを用いて試験を行った実験 1、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評価する実験 2、コンクリート供試体を作製し、各種養生方法の養生効果について検討した実験 3 の 3 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ている。印加電圧を実験 1 では 1V とし、実験 2, 3 では 10V とした。この理由は、フレッシュコンクリートの場合、コンクリート内に水分が多く電圧が小さくても電気が流れやすいのに対し、材齢の進行したコンクリートは水和反応によって水が消費され、電圧を 10V と大きくしないと電流が流れにくいためである。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 2 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

表-2 セメントペーストの配合条件 (実験 1)

| セメント種類 | BFS 置換率(%) | W/B(%) | 略称  |
|--------|------------|--------|-----|
| OPC    | 0          | 50     | N   |
|        | 45         |        | B45 |
|        | 70         |        | B70 |

表-3 コンクリートの計画配合 (実験 2, 3)

|      | セメント種類 | WC (%) | s/a (%) | 単位量(kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |     |
|------|--------|--------|---------|-------------------------|-----|-----|-----|
|      |        |        |         | W                       | C   | S   | G   |
| 実験 2 | OPC    | 55     | 50      | 174                     | 316 | 906 | 923 |
| 実験 3 |        |        | 48      | 175                     | 318 | 851 | 960 |

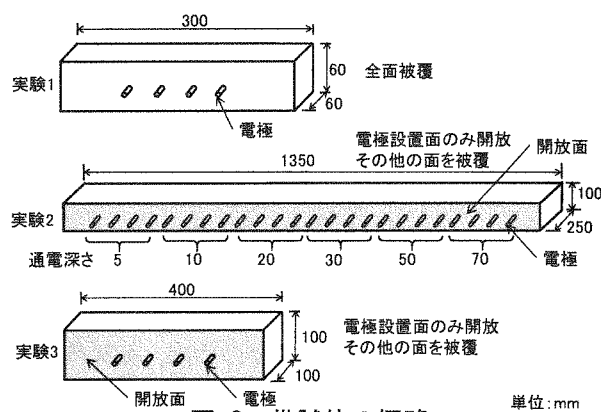


図-2 供試体の概略

単位:mm

表-4 養生方法 (実験 3)

|       | 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% |

定した。電極にはアルミニウムや鉄の針金を使用した。電極やコンクリートからの発泡等の現象は確認されなかった。

### 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<sup>3</sup>, 粉末度 3240cm<sup>2</sup>/g) と、OPC に高炉スラグ微粉末 [BFS] (密度 2.89g/cm<sup>3</sup>, 粉末度 4410cm<sup>2</sup>/g) を 45%置換したセメント [B45] と 70%置換した [B70] の 3 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<sup>3</sup>, 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<sup>3</sup>, 吸水率 0.55%) を用いた。実験 1 のセメントペーストの配合条件を表-2 に示す。水セメント比は 50%で一定とし、BFS の置換率を変化させた。表-3 に実験 2 および 3 の計画配合を示す。使用セメントは OPC

とし、コンクリートの配合は AE 減水剤を使用した水セメント比が 55% 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。供試体は実験 1 のセメントペーストを用いる場合に  $60 \times 60 \times 300\text{mm}$  の角柱供試体とし、実験 2 のコンクリートを用いる供試体は、 $100 \times 250 \times 1350\text{mm}$  の大型の供試体とし、実験 3 では  $100 \times 100 \times 400\text{mm}$  の角柱供試体とした。実験 1 と実験 3 ではアルミテープを用いて供試体を被覆し、実験 2 では型枠用合板を存置することで封かんした。電極とアルミテープの距離に関しては、既往の研究<sup>7)</sup>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 2 および 3 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 2 の供試体は解放面より水分が逸散し、実験 3 の供試体は解放面で各種養生を実施した。

電極は供試体側面の中央部に設置した。実験 2 では通電深さが異なる電極を設置している。実験 1 および 2 の供試体は、恒温恒湿室（温度  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、湿度  $60 \pm 5\%$ ）に静置をした。表-4 に実験 3 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  $20 \pm 1^\circ\text{C}$  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 ではセメントペーストに対して強熱減量試験と電気抵抗の測定を行った。試料は各材齢時に粉碎しアセトン浸漬により水和反応を停止した。その後、吸引ろ過しをして乾燥させた粉末を試料として用いた。アセトン浸漬および乾燥の処理により自由水は除去されている。結合水率は、各試料を室温から  $750^\circ\text{C}$  で加熱した場合の質量減少量から算出した。また、加熱温度を  $750^\circ\text{C}$  とすることで BFS のガラス相が結晶化することを防止し、3 種類のセメントペーストに対し同様の試験を行った。実験 2 ではコンクリート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し、外部環境への水分の逸散の影響範囲を評価した。実験 3 では、各養生期間中の電気抵抗と供試体の質量を経時的に計測することで、供試体から逸散した水分量と電気抵抗を評価した。

## 3. 試験結果

### 3.1 電気抵抗と結合水率の関係（実験 1）

図-3 に強熱減量試験により算出した結合水率を

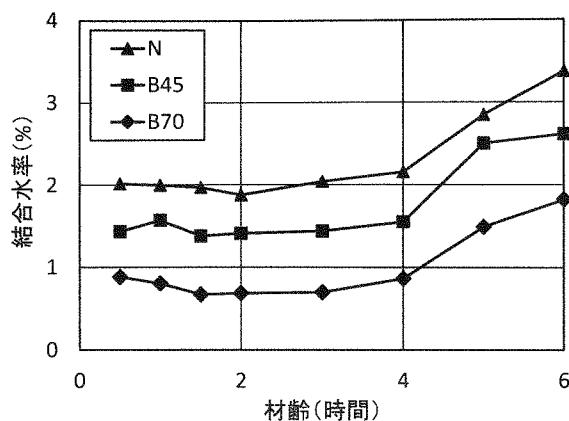


図-3 結合水率の測定結果

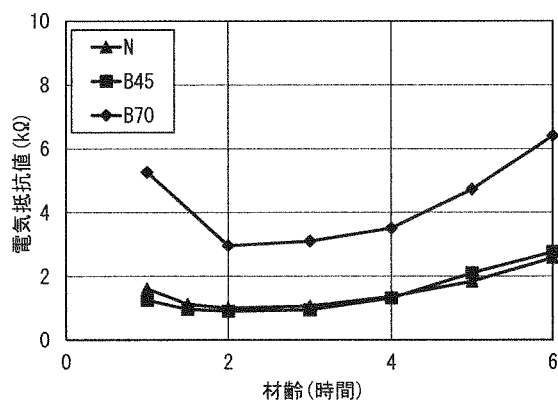


図-4 電気抵抗の測定結果

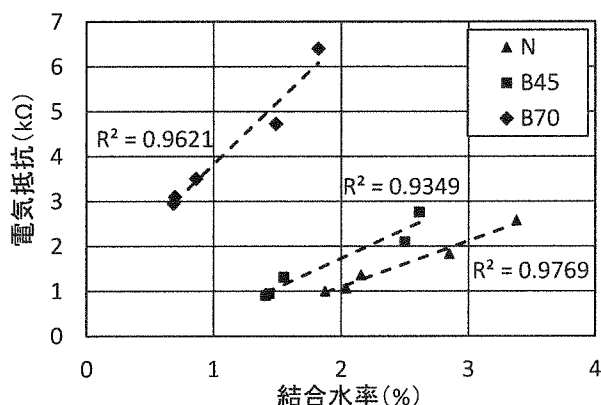


図-5 電気抵抗と結合水率の関係（120 分以降）

示す。各材齢の結合水率は、N、B45、B70 の順に小さくなっている。これは、BFS の置換率が影響していると考えられ、BFS の置換率が大きくなるほど結合水率が小さくなっている。また、各セメントの接水から 120 分以降の電気抵抗は、時間の経過と共に大きくなった。

図-4 に電気抵抗の測定結果を示す。電気抵抗は接水から 120 分程度まで減少傾向を示し、接水から約 120 分以降の電気抵抗は、増加傾向を示した。この傾向は、電気抵抗の逆数である電気伝導率を測定した既往の研究結果<sup>8)</sup>と同様の傾向である。

図-5に接水から120分以降の電気抵抗と結合水率の関係を示す。電気抵抗と結合水率の間に相関関係が認められる。既往の研究<sup>7)</sup>より接水から120分程度までの電気抵抗の減少の傾向は、セメントから水へのイオンの溶出により電気が流れやすくなることが原因と考えられる。また、接水から約120分以降の電気抵抗の増加は、セメントの水和反応によりコンクリート内の自由水が徐々に減少することにより電気が流れにくくなったことが原因と考えられる。また、既往の研究<sup>5)</sup>では材齢1~91日の圧縮強度と電気抵抗の間に相関関係が認められている。この結果は圧縮強度と電気抵抗の相関を裏付けるものであると考えられる。

封かん養生期間のコンクリートの電気抵抗は水和反応による含水量の低下を評価しており、結果として電気抵抗の測定により水和反応の進行度を評価できると考えられる。

### 3.2 通電深さが電気抵抗に及ぼす影響 (実験2)

図-6に材齢1日で脱型を行った供試体の電気抵抗の測定結果を示す。図-7に材齢5日で脱型を行った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。また、通電深さ5mmの表面に近い電気抵抗は、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の電気抵抗に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ためと考えられる。

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。このように電極に通電部を設けることで、表面からの距離ごとの含水状況を推定できると考えられる。

既往の研究<sup>8)</sup>より養生期間が深さ方向の真空給水面積率に与える影響が明らかとなっており、OPCをセメントの用いた場合に25mm程度とされている。この結果からも同様の傾向が確認された。

### 3.3 各種養生方法による養生効果の比較 (実験3)

前述のように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、電極の通電深さを变化させたコンクリートの電気抵抗は、通電深さの含水状態を評価していると考えられる。これらの結

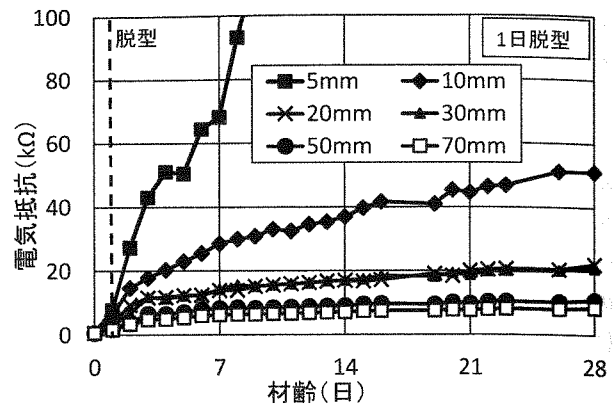


図-6 電気抵抗の測定結果 (1日脱型)

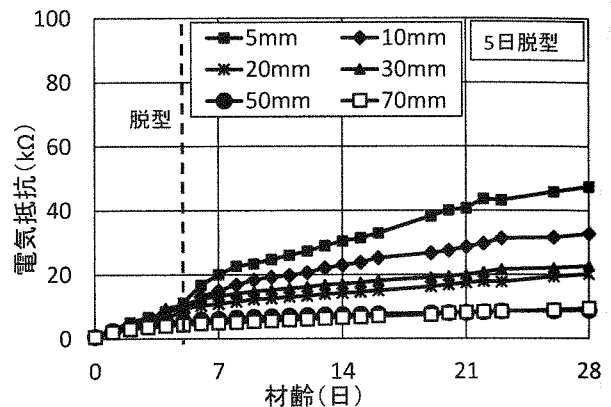


図-7 電気抵抗の測定結果 (5日脱型)

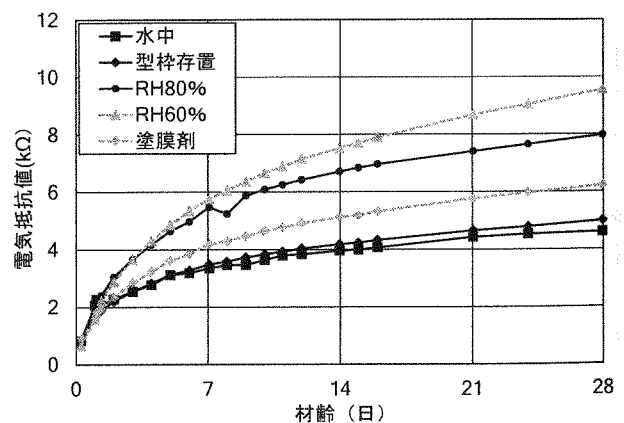


図-8 各種養生の質量変化率

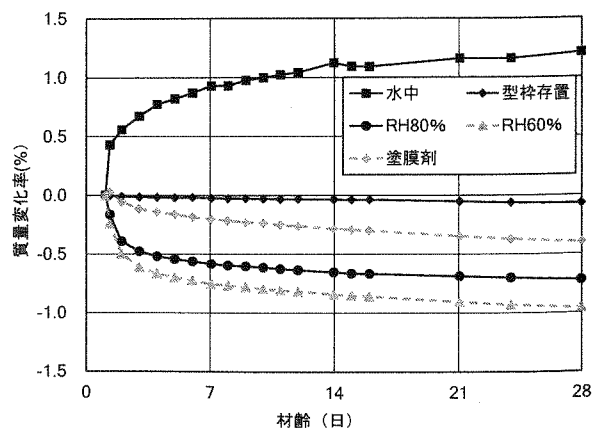


図-9 電気抵抗の測定結果 (養生)

果から電気抵抗を測定することで各種養生方法の養生効果を評価できると考えた。

図-8 に各養生を行った供試体の質量変化率を示す。実験3の結果は同一条件の供試体数が1個の結果である。塗膜剤は塗布後の質量の質量増加量を減じている。これは、材齢1日で塗膜養生剤を塗布したためである。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。各養生方法の質量変化率は、養生方法ごとに異なる。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養生効果が確認できる。

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評価している。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を評価し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評価しているからと考えられる。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、主に表層部分にしか浸透しておらず、表層から30mmの電気抵抗では明確な差異が生じないものと考えられる。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範囲を得ることが可能と考えられる。

図-10 に各種養生の電気抵抗と型枠存置の電気抵抗の差と質量変化率の関係を示す。各養生方法の電気抵抗は相関があると考えられる。したがって、コンクリートの電気抵抗を測定することで質量変化率を推定することが可能であり、電気抵抗は通電部の

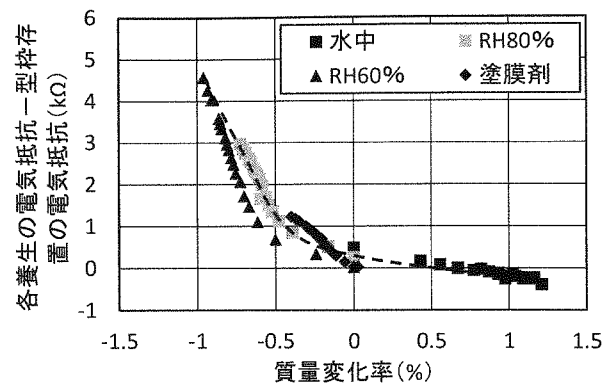


図-10 各種養生の電気抵抗と型枠存置の電気抵抗の差と質量変化率の関係

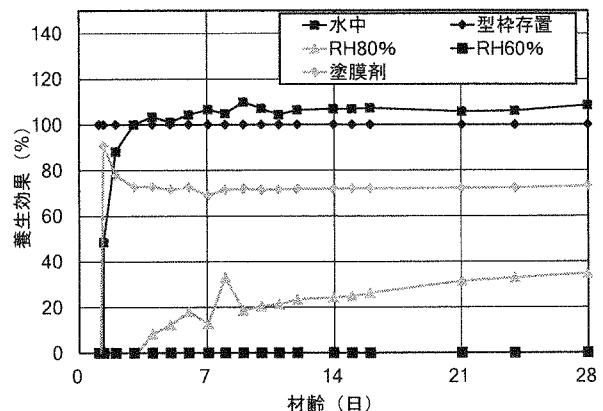


図-11 養生効果の経時変化

養生による含水状態を評価していると考えられる。

図-11 に養生効果の経時変化を示す。図中の養生効果は、封かん養生と同等の型枠存置を100%とし、東京の年平均湿度と同等の RH60%が0%となるように設定することで、その他の養生方法の養生効果を評価しようと考えた。

$$E_c = \left( \frac{R_c - R_{60\%}}{R_{seal} - R_{60\%}} \right) \times 100 \quad (1)$$

ただし、 $E_c$ : 養生効果(%),  $R_c$ : 各種養生を行った供試体の電気抵抗,  $R_{60\%}$ : 恒温恒湿室で暴露を行った供試体の電気抵抗,  $R_{seal}$ : 温度 20°Cで封かん養生を行った供試体の電気抵抗

脱型直後は各養生方法の電気抵抗の差異が小さいため算出される養生効果にばらつきがある。しかし、電気抵抗の差と質量変化率に相関関係が認められ、水中は材齢1日の脱型後の吸水で養生効果が大きくなり、材齢7日程度で最大値を示した。RH80%は材齢3日まで RH60%と同様の養生効果しかないのに対し、材齢3日以降は養生効果が大きくなっていく。相対湿度がモルタルの物性に与える影響に関

する既往の研究<sup>9,10)</sup>では、相対湿度 80%以下の養生条件においてセメントの水和反応が停滞し、細孔量が増加するとされている。RH80%の養生効果は材齢が進行しても増加している。これは、水和反応が停滞していないためと考えられる。

図-12 に算出した材齢 28 日の養生効果を示す。養生効果は水中が 108%となり、型枠存置と比較すると給水による養生効果が確認できる。また、RH80%は 35%ほどの養生効果となった。これは、コンクリート内部の水分が逸散したことにより含水率が低下したためと考えられるが、RH60%よりはコンクリート内部に水分が保持されている。塗膜剤は RH60%と比較すると養生効果を有するが、型枠存置による養生の 70%ほどの養生効果となった。

RH80%は電極の通電部である表層から 30mm の位置であっても湿度によって水分が供給されるため、材齢の進行にともなって養生効果が大きくなったと考えられる。

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評価でき、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。

## 5. 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距離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評価でき、養生による給水および保水効果の影響範囲についても検討できる可能性が示された。

以下に得られた結果を挙げる。

- (1) 封かん養生のコンクリートの電気抵抗を測定することで結合水率を推定することが可能であり、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度を評価できると考えられる。
- (2) 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。電極に通電部を設けることで、表面からの距離ごとの含水状況を推定できると考えられる。
- (3) コンクリートの電気抵抗を測定することで質量変化率を推定することが可能であり、計測される電気抵抗はコンクリート内部の含水状態を評価していると考えられる。
- (4) 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評価でき、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。

## 参考文献

- 1) 温品達也, 渡邊賢三, 坂井吾郎, 石田哲也: 種々

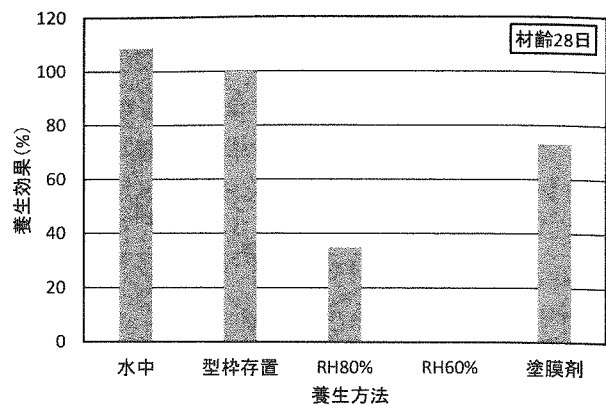


図-12 養生効果 (材齢 28 日)

殊シート養生の効果, コンクリート工学年次論文の結合材を用いたコンクリートに対する長期特集, Vol.38, No.1, pp.747-752, 2016.

- 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.
- 3) 日本コンクリート工学会: コンクリート診断技術 '16 基礎編, pp198-200, 2016.
- 4) 村上弘, 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, p.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.1297-1302, 2015.7
- 7) 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班的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, 2015.
- 8) 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, pp.69-74, 2011.
- 9) 小野吉雄: クリンカー鉱物の水和活性と平衡水蒸気圧, セメント・コンクリート論文集, No. 44, pp.24-29, 1990.
- 10) 近田孝夫: モルタル硬化体中の空隙生成に及ぼす相対湿度の影響: セメント・コンクリート論文集, No.36, pp.199-202, 1982.