

# 論文 コンクリート内部の相対湿度計測による湿潤養生管理の提案

岩城 圭介\*1・平間 昭信\*2・加藤 淳司\*3・寺澤 正人\*4

**要旨：**脱型後の湿潤養生を適切に行うための施工管理方法として、コンクリート中の相対湿度計測による湿潤養生管理を提案した。埋込みタイプの防水型温湿度センサを用いた内部相対湿度計測を室内試験および実施工 2 現場で適用し、熱水分同時移動解析による検証を行った結果、本手法の有効性と特にトンネル坑内の厳しい養生条件が明らかとなった。

**キーワード：**内部相対湿度、湿潤養生、散水養生、早期脱型、熱水分同時移動解析

## 1. はじめに

コンクリートの品質を確保するための重要な工程のひとつに、打込み後の湿潤養生がある。湿潤養生の目的は、コンクリートの硬化過程における乾燥防止と硬化作用を発揮するための水の確保である。土木学会コンクリート標準示方書や日本建築学会 JASS5 鉄筋コンクリート工事には、湿潤養生を行う期間として、「普通ポルトランドセメントで 5 日間以上」などが規定されている。また、湿潤養生方法としては、水中、湛水、散水、湿布、湿砂、膜養生などが挙げられる。

最近では、施工性を考慮した湿潤養生方法として、保水性能を向上した養生マット<sup>1)</sup>や粘着テープによりコンクリート表面に貼り付けるタイプの湿布養生<sup>2)</sup>などが開発・実用化されている。しかし一方で、従来から湿潤養生方法として用いられてきた膜養生剤では、その種類や塗布方法により、気中養生と同等の水分逸散が生じたとする報告<sup>3)</sup>もあり、各種の湿潤養生方法が必ずしも効果的でないことが伺える。

以上より施工計画にあたっては、環境条件や施工条件に合致した適切な湿潤養生方法を選定することが重要である。また、施工管理では、適用した湿潤養生方法により期待した効果が発揮されていることを把握するとともに、期せずして有害な乾燥を受けるような場合には、適切な対策が速やかに施される必要がある。そこで、著者らは、施工管理の一環として、コンクリート内部の相対湿度計測に基づき湿潤養生を管理する方法を提案した。

なお、養生における相対湿度がセメント水和およびモルタル物性に与える影響に関する既往の研究<sup>4), 5), 6)</sup>によると、相対湿度 80%RH 以下の養生条件においては、セメントの水和反応が著しく停滞するとともに、細孔量が増加し、結果として強度低下を生じるとある。よ

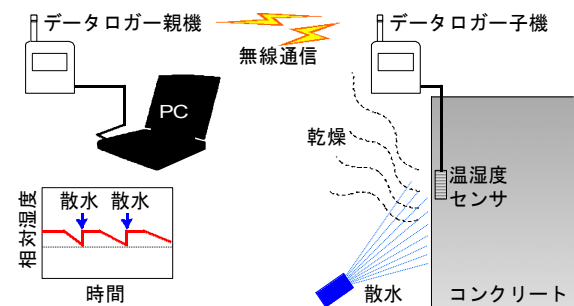
って、養生時のコンクリート内部の相対湿度は、セメントごとに指定される期間を通して、少なくとも 80%RH を上回る必要があると考えられる。

本研究では、コンクリート内部相対湿度計測による湿潤養生管理方法の適用性の検証を目的に、内部相対湿度の計測方法に関する室内試験と現場適用を行った。また、現場適用では、当該コンクリート構造物における湿潤養生の実態を明らかにするとともに、気候条件など外的要因との関連性について検討した。

## 2. 内部相対湿度計測による湿潤養生管理の提案

### 2.1 湿潤養生管理の概要

JIS A 1132 「コンクリート強度試験用供試体の作り方」では、供試体の具体的な湿潤養生の条件として、「水中または 95%RH 以上の雰囲気中」が示されている。しかし、この条件の実施工への適用を考えると、水中・湛水養生が可能な場合を除き、完全な湿潤状態を確保することは困難である。また、シートなどによる覆いを設けた場合でも、密閉空間の雰囲気を 95%RH 以上に維持することは難しい。しかし、これらの場合であっても、コンクリート内部の湿潤状態がセメントの水和を阻害しない程度（例えば 80%RH 超）に維持されていれば、コンクリートの硬化作用は順調に発揮され



図一 相対湿度計測による湿潤養生管理方法の概要

\*1 飛鳥建設 (株) 技術研究所 第三研究室 主任研究員 (正会員)

\*2 飛鳥建設 (株) 技術研究所 第三研究室 室長 (正会員)

\*3 飛鳥建設 (株) 技術研究所 第三研究室 副主任研究員 (正会員)

\*4 飛鳥建設 (株) 土木事業本部 技術統括部 設計グループ担当課長 (正会員)



写真-1 防水処理温湿度センサ・データロガー

ると考えられる。そこで、本研究では、図-1 に示すようなコンクリート内部の相対湿度計測による湿潤養生管理方法を提案した。

本手法では、埋込みタイプの湿度センサを用いて、任意の養生方法によるコンクリート内部の相対湿度を原位置でモニタリングすることで、養生期間における湿潤状態を保証できると考えられる。また、内部相対湿度の低下傾向を検出することで、散水などの湿度回復策を適時に施すことができると考えられる。

## 2.2 計測機器

本手法では、コンクリート打込み後初期から内部相対湿度を計測する必要があることから、既に研究例が多数あるセラミックセンサ<sup>7)</sup>のような埋込みタイプの湿度センサを用いる必要がある。

本研究では、汎用性を考慮し、市販の温湿度センサ（高分子膜・抵抗型）を用いた。しかし、高分子膜型センサは、結露環境下で適用できず、フレッシュコンクリートへの埋込みに課題がある。そこで、写真-1 に示すように、耐アルカリ透湿防水フィルムによるセンサ部の透湿防水処理およびシリコン樹脂・ブチルゴムによる基板・ケーブルの防水処理を施した。

本センサの耐水性能の確認を目的に、8 時間程度の水中浸漬と、その後の気中放置に至る測定を行った。結果の一例を図-2 に示す。防水処理を行った温湿度センサで得られた相対湿度は、水中浸漬で 99%RH（機器の最大表示であり、飽水状態と考えられる。）を示し、その後の気中放置開始から 30 分程度で室内環境を反映する程度に低減した。よって、本センサの耐水性能は、フレッシュコンクリート中への埋込みに耐え得ると判断された。

また、本センサは、相対湿度のみならず温度も測定可能であるため、水和熱による温度上昇や散水養生における急激な温度低下などのモニタリングにも活用できる。さらに、図-1、写真-1 に示したデータロガーは、無線通信により、パソコンへのデータ収録が可能であるため、大規模構造物を対象とした現場での適用性が高い。

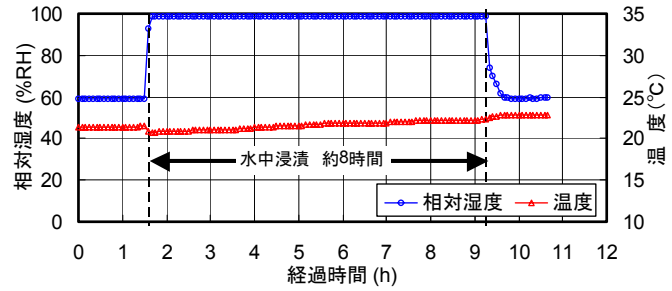


図-2 温湿度センサの耐水性能試験結果

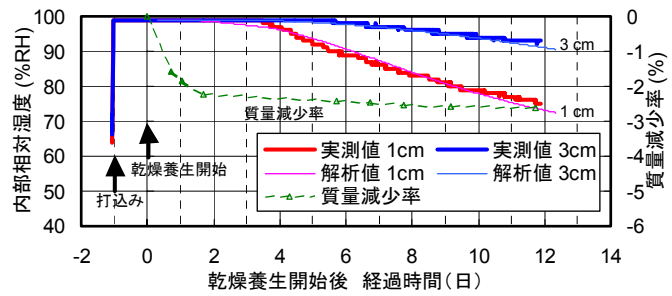


図-3 室内試験における内部相対湿度と質量減少率の経時変化

## 3. 室内試験による内部相対湿度計測方法の検証

### 3.1 試験概要

コンクリート内部の相対湿度計測方法の検証を目的に室内試験を実施した。使用材料は、高炉 B 種セメント、高性能 AE 減水剤標準形 I 種、砕砂、砕石（最大寸法 20 mm）とした。水セメント比 60%、細骨材率 50%、単位水量 175 kg/m<sup>3</sup>、目標スランプ 15 cm、目標空気量 4.5%の配合を用いて、直径 250 mm、厚さ 50 mm の円盤供試体を作成した。なお、温湿度センサは、乾燥面から 1 cm および 3 cm の深さに打込み前に固定した。

材齢 1 日で、底面のみを脱型し、打込み面、側面をブチルゴムテープ、アルミテープでシールすることで、乾燥面を一面に制限した。この供試体を低湿度室内で養生し、内部相対湿度の計測と質量測定を行った。なお、試験中の室内温度は平均 18.0℃、相対湿度は平均 26.4%RH でほぼ定常状態であった。

### 3.2 室内試験結果

コンクリート内部の相対湿度と供試体の質量減少率の経時変化を図-3 に示す。なお、図中の経過時間は、材齢 1 日の乾燥養生開始を 0 日としている。質量は、乾燥養生開始後早期に減少し始め、2 日目以降に安定化した。一方、内部相対湿度は、打込み後から乾燥養生開始後も 99%RH を維持し、乾燥開始から深さ 1 cm で 3.6 日、深さ 3 cm で 5.7 日経過後に低下をはじめた。各深さとも、以後徐々に相対湿度が低下し、11 日目には、深さ 1 cm で 75%RH、深さ 3 cm で 93%RH に達した。

### 3.3 室内試験結果の熱水分同時移動解析による検証

計測された内部相対湿度変化を検証する目的で、熱湿気同時移動モデル<sup>8)</sup>を基本とする二次元非定常熱水分同時移動解析プログラムによる試験結果のフィッティングを行った。

ここで、雰囲気とコンクリートの境界条件を反映する乾燥面の対流熱伝達率は、文献<sup>9)</sup>を参考に  $4 \text{ W/m}^2\text{C}$  と仮定した。また、コンクリートの熱特性値は、土木学会コンクリート標準示方書に示される標準値を参考に、比熱  $1.155 \text{ kJ/kg}$ 、熱伝導率  $2.7 \text{ W/m}^2\text{C}$ 、熱伝達率  $14 \text{ W/m}^2\text{C}$  に設定した。さらに、コンクリートの湿気伝導率は、解析結果と実測値のフィッティングの良否から  $3.0 \text{ ng/msPa}$  を仮定した。なお、質量基準の平衡含水率  $\phi$  (kg/kg) と相対湿度  $h$  ( $100\%RH = 1.0$ ) の関係は、式 (1) に示す Shiligersky の近似式により与えた。ここで、定数  $a \sim d$  は、文献<sup>10)</sup> より  $a = 0.05$ 、 $b = 0.87$ 、 $c = -0.13$ 、 $d = 16.12$  (放湿過程) とした。

$$\phi = a \cdot h^b \exp[c \cdot (1 - h)^d] \quad (1)$$

深さ 1, 3 cm の相対湿度解析結果は、図-3 中の各解析値に示すように、実測値をよく表現しており、与えた解析入力値が適切であったと考えられる。なお、文献<sup>11)</sup>で示される湿気伝導率は、水セメント比 54% のもので  $1 \sim 5 \text{ ng/msPa}$  程度であり、仮定した湿気伝導率  $3.0 \text{ ng/msPa}$  は妥当と考えられる。よって、考案した防水型温湿度センサにより、コンクリート内部の相対湿度を計測可能であると考えられる。

## 4. 内部相対湿度計測の現場適用

### 4.1 地上壁構造物での現場計測

#### (1) 地上壁構造物の計測概要

一般的な地上施工によるコンクリート構造物への内部相対湿度計測の適用として、貯水槽構造物の中壁を対象とした内部相対湿度の現場計測を行った。

当該中壁の形状は、厚さ 1.2 m の底版と厚さ 50 cm のスラブに連結する厚さ 35 cm、高さ 5.8 m の壁であり、対象とした部位は、高さ 2.9 m の 1 リフト分である。計測箇所は、日射や乾燥の影響を比較的受けやすい南面の壁頂部から 10 cm 下の深さ 1, 5 cm および外気とし、コンクリート打込み前に防水処理を施した温湿度センサを所定の位置に固定した。

使用したコンクリートの配合は、設計基準強度  $24 \text{ N/mm}^2$ 、水セメント比 54.0%、単位水量  $169 \text{ kg/m}^3$ 、粗骨材最大寸法 20 mm、スランプ 15 cm であり、中庸熱ポルトランドセメント、AE 減水剤標準形 I 種を用いた。

コンクリートの打込みを 2007 年 8 月 29 日に行い、材齢 9 日で脱型した。脱型後は、適宜散水を行う予定であったが、雨天・曇天が続いたため行わなかった。

#### (2) 地上壁構造物の計測結果

温度計測結果を図-4 に、相対湿度計測結果を図-5 に示す。なお、図-4, 5 中には、それぞれ気象データ(神奈川県海老名)<sup>12)</sup>の日照時間、降雨量も示す。

コンクリート内部の温度は、図-4 に示すよう計測深さの影響をあまり受けず、各位置ではほぼ同様の変化を示した。また、打込み後にセメントの水和熱による温

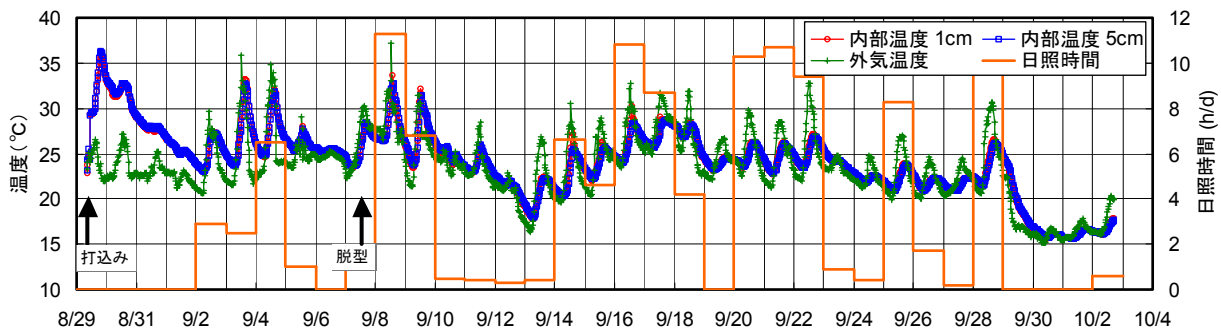


図-4 地上壁構造物における温度計測結果

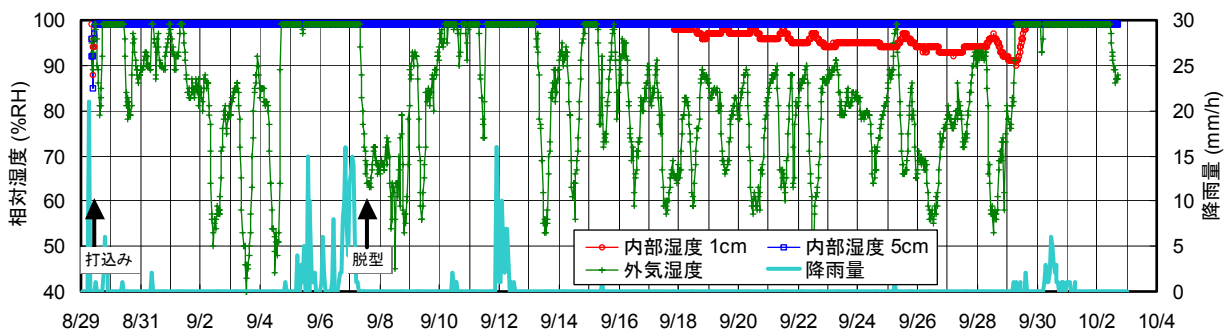


図-5 地上壁構造物における相対湿度計測結果

度上昇を生じ、36℃程度の最高温度を記録したが、9月2日（材齢4日）には外気と同レベルに低下し、以降は外気温度に比べて少ない変動幅で推移した。

一方、図-5に示す外気の相対湿度は、天候・昼夜により大きく変動し、降雨時に99%RHであり、晴天時に昼間50~60%RH、夜間80~90%RHの範囲であった。なお、計測期間を通しての平均的な相対湿度は、84%RHであった。また、コンクリート内部の相対湿度は、打込み・脱型以降、99%RHを保持し、9月17日（材齢19日）から、深さ1cmのみで、ようやく低下傾向がみられた。相対湿度の低下傾向は、降雨がほとんどなかった12日間継続したが、9月29日の降雨により、再び99%RHに回復した。なお、深さ5cmの内部湿度は、計測期間中まったく低下を示さなかった。

以上の計測結果から、当該壁構造物は、材齢19日まで相対湿度99%RH（飽水状態）の湿潤養生が行われ、以降も90%RH以上の高い湿度環境での湿潤養生が行われたと考えられる。

また、外気の相対湿度と深さ1cmの内部相対湿度では、計測値の変化が逆転し、温度上昇と外気相対湿度の低下にともなう内部相対湿度の増加が認められた。この現象は、文献<sup>13)</sup>で示される温度上昇による空隙中の液状水の蒸発に起因すると考えられる。

#### 4.2 トンネル覆工コンクリートでの現場計測

##### (1) トンネル覆工コンクリートの計測概要

山岳トンネルの覆工コンクリートでは、坑内環境が安定しており一般に高湿度であるという理由から、従

来から打込み後十数時間で脱型され、その後、特に養生が行われなかった。しかし、近年では、坑内の粉じん低減を目的とした換気量の増加にともなう坑内湿度の低下が報告されており、早期脱型および乾燥環境に起因するひび割れ低減策として湿潤養生の適切な実施が求められている<sup>14)</sup>。そこで、トンネル覆工コンクリートを対象とした内部相対湿度の現場計測を行った。

当該覆工コンクリートは、厚さ30cm、延長10.5m、内空断面積65m<sup>2</sup>であり、坑口からの距離約70mに位置する。計測箇所は、対象ブロックの坑口側妻部から10cm、天端部の深さ1, 3cmおよび坑内雰囲気と側壁部の深さ1cmとし、コンクリート打込み前に防水処理を施した温湿度センサを所定の位置に固定した。

使用したコンクリートの配合は、設計基準強度24N/mm<sup>2</sup>、水セメント比58.1%、単位水量162kg/m<sup>3</sup>、粗骨材最大寸法40mm、スランプ15cmであり、高炉B種セメント、AE減水剤標準形1種を用いた。

コンクリートの打込みを2007年10月19日に行い、材齢3日で脱型した。脱型後は、噴霧散水機による散水を適宜行った。1ブロックあたりの散水量は、60~400L程度であった。また、送風量1600m<sup>3</sup>/minの換気を週2回の整備期間を除き継続した。なお、対象ブロックでの風速は、0.2~0.7m/sec程度であった。

##### (2) トンネル覆工コンクリートの計測結果

温度計測結果を図-6に、相対湿度計測結果を図-7に示す。なお、図-6, 7中には、作業状況の記録として、換気期間と散水期間も示した。

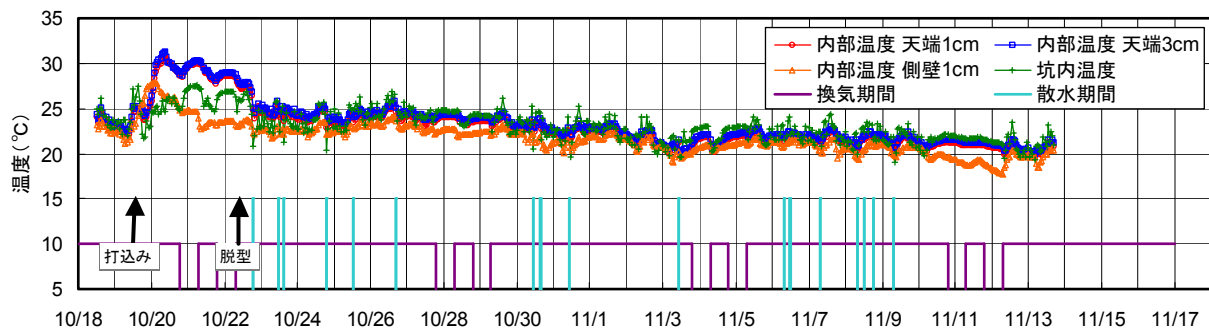


図-6 トンネル覆工コンクリートにおける温度計測結果

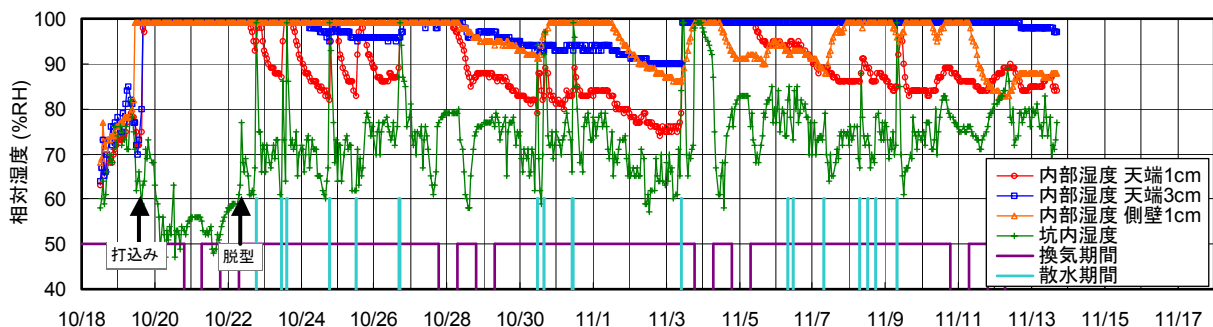


図-7 トンネル覆工コンクリートにおける相対湿度計測結果

図-6 に示すように、脱型後の坑内温度は、20～25℃で安定して推移した。また、天端部深さ1, 3 cmのコンクリート内部温度は、打込み後に温度上昇を生じ、32℃程度の最高温度を記録した後、脱型後の最初の散水以降は坑内温度と同様に変動が少ない結果であった。また、天端部深さ1, 3 cmの内部温度は、各センサでほぼ同様の变化を示し、深さの影響をあまり受けない結果であった。一方、側壁部深さ1 cmの内部温度は、天端部に比べて最高温度で4℃程度、脱型後で2℃程度低い傾向を示した。天端部と側壁部の温度差は、坑内温度の上下差の影響によると考えられる。

図-7 に示す坑内相対湿度は、散水にともない大きく変動し、散水直後は99%RHを示す場合もあった。しかし、散水による変動を除くと、60～80%RHで安定した。天端部深さ1 cmの内部相対湿度は、打込み後に99%RHを保持したが、脱型後に急激に低下し、85%RH以下となった。その後の散水による湿度の回復は、一時的なものであったが、湿度回復後の湿度低下傾向は、材齢とともに緩やかになるように見受けられた。

一方、天端部深さ3 cmと側壁部深さ1 cmの内部相対湿度の低下は、天端部深さ1 cmのそれより遅く、それぞれ脱型後2日後、6日後でみられ、低下傾向も天端部深さ1 cmほど急激でなかった。深さや部位により乾燥の程度が異なることが明らかとなった。

各計測位置の内部相対湿度が、比較的高いレベルで維持された期間として、10月26日～28日、11月3日～4日の2期間が挙げられる。この2期間は、共通して

換気を停止した期間と関連づけられる。

以上より、トンネル坑内の雰囲気は、低湿度であり、コンクリートの養生として厳しい環境であり、特に天端部で比較的乾燥しやすい状況であった。この要因としては、坑内気温の上下差や気流の影響も考えられるが、天端部への散水が適切でなかった可能性もある。適切な湿潤養生を行わなければ、内部相対湿度が容易に80%RH程度以下まで低下する可能性があるため、前述した相対湿度が80%RH以下におけるセメント水和の著しい停滞を考慮すると、トンネル覆工コンクリートにおける湿潤養生の重要性が示された結果であった。また、換気の間による乾燥に対しても十分考慮した湿潤養生を検討する必要があると考えられる。

#### 4.3 熱水分同時移動解析による現場計測結果の検証

「3.3 室内試験結果の熱水分同時移動解析による検証」と同様に二次元非定常熱水分同時移動解析プログラムによる現場計測結果の検証を行った。熱水分同時移動解析では、湿気伝導率、気温、外気湿度以外の特性値を室内試験結果の解析と同値を設定し、気温、外気湿度は、現場計測結果を用いた。この条件のもとで湿気伝導率を変化させ、現場計測結果と解析結果のフィッティングを行うことで、湿気伝導率を同定した。なお、解析対象は、現場計測結果のうち内部相対湿度の低下傾向が継続した期間および計測位置として、地上壁構造物で9月17日～9月30日の深さ1, 5 cm、トンネル覆工コンクリートで10月22～11月2日の天端部深さ1, 3 cmを選定した。

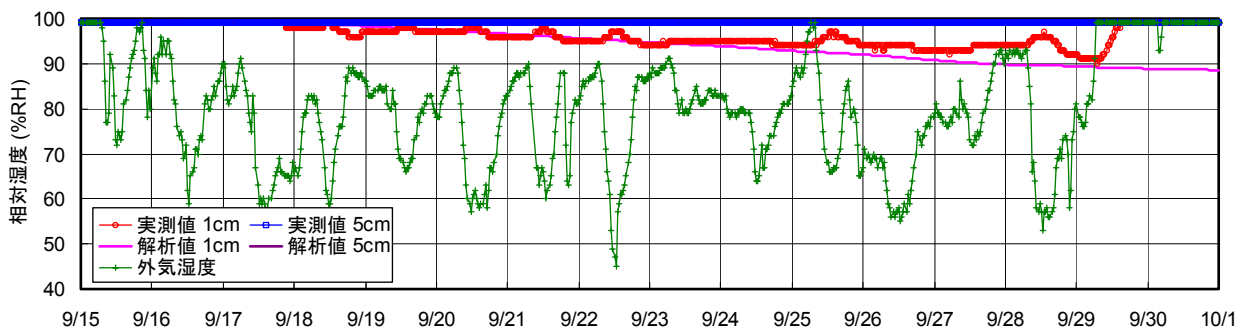


図-8 地上壁構造物における相対湿度計測結果と解析結果

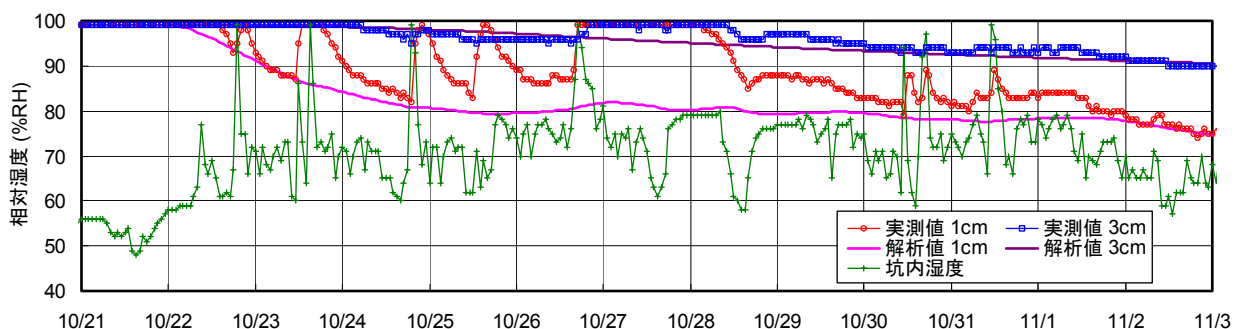


図-9 トンネル覆工コンクリートにおける相対湿度計測結果と解析結果

地上壁構造物とトンネル覆工コンクリートの相対湿度解析結果をそれぞれ図-8, 図-9 に示す。なお、これらの解析により同定された湿気伝導率は、地上壁構造物で 2.5 ng/msPa, トンネル覆工コンクリート 14.0 ng/msPa であった。

地上壁構造物の解析結果に関しては、図-8 に示すように、各深さの解析値が実測値を比較的よく表現していた。湿気伝導率は、文献<sup>11)</sup>で示される水セメント比 54%, 雰囲気相対湿度 80%RH での値と同等の 2.5 ng/msPa であった。初期材齢を対象とした室内試験で得られた湿気伝導率 3.0 ng/msPa に比べて低い値であり、この低下は、材齢にともなうコンクリートの細孔構造の緻密化によるものと考えられる。

一方、トンネル覆工コンクリートの解析結果に関しては、図-9 に示すように各深さの解析値が実測値の下側包絡線を表現した。適用した解析手法では、散水などによる水分の供給を考慮していないが、実測した雰囲気湿度を与えることで、内部湿度の下限値を模擬できると考えられる。また、湿気伝導率は、室内試験や地上壁構造物に比べて大きい 14.0 ng/msPa が同定された。この結果は、早期脱型や厳しい養生条件などの施工要因により、湿気伝導性が著しく大きくなる可能性を示唆するものと考えられる。

以上の検証により、同定された湿気伝導率の妥当性が認められ、さらに内部相対湿度の解析結果も実測値をよく表現する結果であった。このことから、提案した相対湿度計測方法により、コンクリート内部の相対湿度、温度の履歴を計測可能であると考えられる。

## 5. まとめ

本研究では、コンクリート内部の相対湿度計測による湿潤養生管理方法を提案し、その適用性を検証した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 防水型温湿度センサを用いて計測した内部相対湿度履歴は、降雨や散水などの外的要因を反映した。
- 2) 内部相対湿度の計測結果から熱水分同時移動解析により同定した湿気伝導率は妥当な値を示した。
- 3) 防水型温湿度センサを用いた内部相対湿度計測は、高い適用性を有していると考えられる。
- 4) 現場計測の結果、トンネル坑内の厳しい養生条件が明らかとなり、湿潤養生の重要性が再確認された。

今後は、内部相対湿度計測および熱水分同時移動解析を活用することで、環境条件や施工条件に合致した効果的な湿潤養生方法の検討を行う必要がある。また、得られるコンクリート内部の湿度分布は、乾燥収縮ひずみの推定やひび割れ予測にも応用可能と考えられる。

## 参考文献

- 1) 藤井弘三ほか：新しい養生マットによるコンクリートの湿潤養生について（その 1：コンクリート表面付近の相対湿度およびプルアウト試験について）、土木学会第 58 回年次学術講演会講演概要集, V-222, pp.443-444, 2003.9
- 2) 近松竜一, 近藤紀人, 中嶋智史：コンクリートの表面貼付型養生テープの開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1035-1040, 2002.
- 3) 榊原泰造, 近松竜一, 十河茂幸：コンクリートの乾燥防止用各種養生剤の適用効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.817-822, 2005.
- 4) 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.
- 5) 住学, 桂修, 鎌田英治：普通ポルトランドセメントの水和反応の進行程度に及ぼす相対湿度の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1, 材料施工, pp.843-844, 1995.
- 6) 近田孝夫ほか：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.
- 7) 湯浅昇, 笠井芳夫, 松井勇：埋め込みセラミックセンサの電気的特性によるコンクリートの含水率測定方法の提案, 日本建築学会構造系論文集, No.498, pp.13-20, 1997.8
- 8) 坂本雄三, 渡辺一正：実大試験壁体における熱湿気同時移動モデルの検証, 日本建築学会計画系論文集, No.457, pp.39-47, 1994.3
- 9) 吉田伸治ほか：(1 方程式+WET 型) Two-Layer モデルによる建物外表面の対流熱伝達率分布の数値解析, 第 14 回数値流体力学シンポジウム, D07-1, 2000.12
- 10) 日本建築学会編：建築材料の熱・空気・湿気物性値, 丸善, 2001.
- 11) 恩村定幸ほか：強度の異なるコンクリートの熱・湿気物性, 日本建築総合試験所 GBRC, Vol.119, pp.24-32, 2005.1
- 12) 気象庁：<http://www.jma.go.jp/>
- 13) 柳東佑, 高正遠, 兼松学, 野口貴文：外部温・湿度がコンクリート内の含水状態に及ぼす影響に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1, 材料施工 pp.1185-1186, 2005.
- 14) 馬場弘二ほか：施工中のトンネル坑内環境と覆工コンクリートの湿度変化に関する研究, 土木学会論文集 No.742/VI-60, pp.27-35, 2003.9