

# トンネル覆工コンクリートの湿潤養生管理システムに関する研究

A Study on Wet Curing Control System  
by Internal Relative Humidity Monitoring of Tunnel Lining Concrete

田畑 美紀<sup>\*1</sup> 平間 昭信<sup>\*1</sup> 寺澤 正人<sup>\*2</sup> 筒井 隆規<sup>\*3</sup> 山本 茂夫<sup>\*3</sup>  
Miki Tabata Akinobu Hirama Masato Terazawa Takanori Tsutsui Shigeo Yamamoto  
岩根 康之<sup>\*3</sup> 寺島 佳宏<sup>\*4</sup> 小川 勲<sup>\*4</sup> 高橋 敬<sup>\*4</sup>  
Yasuyuki Iwane Yoshihiro Terashima Isao Ogawa Takashi Takahashi

## 【要旨】

打込み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システムを提案した。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、熱水分同時移動モデルによる湿気移動解析によって検証を行った結果、本システムの有効性が明らかとなった。

【キーワード】 計測管理 相対湿度計測 湿潤養生 覆工コンクリート 湿気移動解析

## 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水和反応を促進するための水の確保である。そのため、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、保水性能を向上させた養生マット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などが開発・実用化されている。しかし一方で、従来から養生方法として用いられてきた塗膜養生剤では、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>1)</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確認するとともに、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、筆

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>2) 3) 4)</sup>によると、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、セメント種類ごとに必要な養生期間を通して、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、コンクリート内部の相対湿度計測による湿潤養生管理システム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概要<sup>5)</sup>

### 2.1 湿潤養生管理システムの概要

JISA 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

1. 技術研究所 第三研究室 2. 本社 土木事業本部 土木技術部 設計グループ  
3. 西日本土木支社 4. 東日本土木支社

困難である。また、シートなどの覆いを設けた場合でも、密閉空間の雰囲気気を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以上）に維持されていれば、コンクリートの硬化作用は、最低限発揮されると考えられる。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システムを考案した。

本システムでは、埋込みタイプの温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し、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実施することによって、養生期間における湿潤状態を保証できると考えられる。

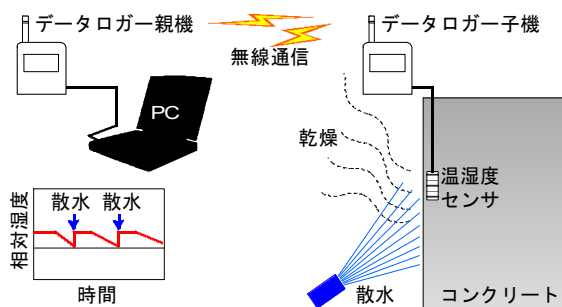


図-1 湿潤養生管理システムの概要



写真-1 防水処理湿度センサ・データロガー

## 2.2 計測機器

本システムでは、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、セラミックセンサ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、センサ部の透湿防水処理および基板・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

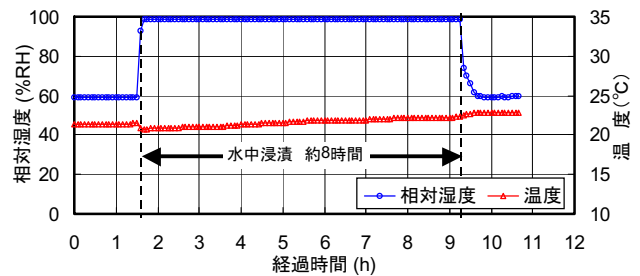


図-2 温湿度センサの耐水性能試験結果

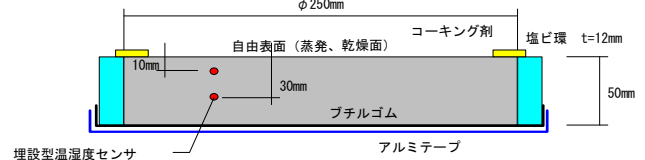


図-3 室内試験の内部相対湿度計測に用いた供試体概要

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。

## 3. 室内試験による内部相対湿度計測方法検証<sup>5)</sup>

### 3.1 室内試験概要

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、高炉セメントB種、高性能AE減水剤標準形I種、砕砂、碎石（最大寸法20mm）とした。水セメント比60%、細骨材率50%、単位水量175kg/m<sup>3</sup>、目標スランプ15cm、目標空気量4.5%の配合を用いて、**図-3**に示すような直径250mm、厚さ50mm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1cmおよび3cm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、側面をプテイルゴムテープ、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°C、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-4**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

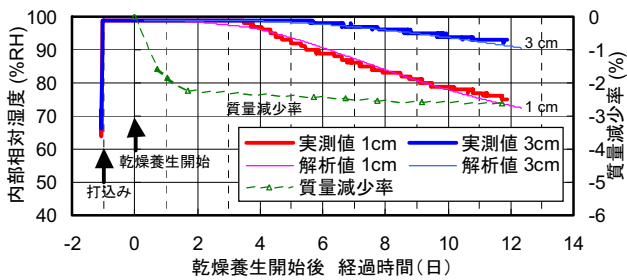


図-4 室内試験における内部相対湿度と質量減少率の経時変化

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1cmで3.6日、深さ3cm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1cmで75%RH、深さ3cmで93%RHに達した。

### 3.3 室内試験結果の湿気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>6)</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>7)</sup>を参考に4 W/m<sup>2</sup>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 kJ/kg、熱伝導率2.7 W/m<sup>2</sup>C、熱伝達率14 W/m<sup>2</sup>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 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>8)</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, 3cmの相対湿度解析結果は、図-4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>9)</sup>で示される湿気伝導率は、水セメント比54%のもので1~5 ng/msPa程度であり、仮定した湿気伝導率3.0 ng/msPaは妥当と考えられる。

## 4. 考案した湿潤養生管理の現場適用事例<sup>5)</sup>

### 4.1 Aトンネルでの適用事例

#### (1) 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環境であるという理由から、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伴う坑内相対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。そこで、Aトンネルにて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、図-5に示すように、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24 N/mm<sup>2</sup>、水セメント比58.1%、単位水量162 kg/m<sup>3</sup>、粗

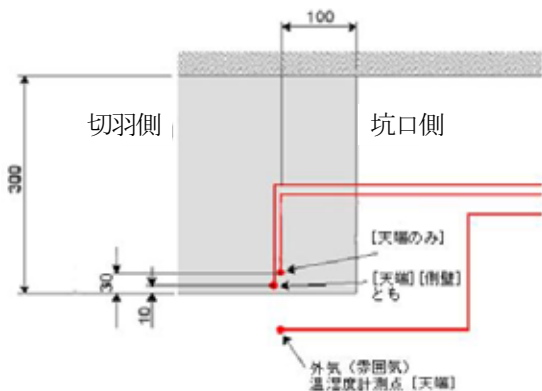


図-5 計測箇所(センサ設置位置)

骨材最大寸法40mm、スランプ15cmであり、高炉セメントB種、AE減水剤標準形I種を用いた。

コンクリートの打込みを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、送风量1600 m<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、0.2~0.7 m/sec程度であった。

#### (2) 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に示すように、脱型後の坑内温度は、20~25°Cで安定して推移した。また、天端部深さ1, 3cm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°C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, 3cmの内部温度は、各センサでほぼ同様の変化を示し、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1cmの内部温度は、天端部に比べて最高温度で4°C程度、脱型後で2°C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

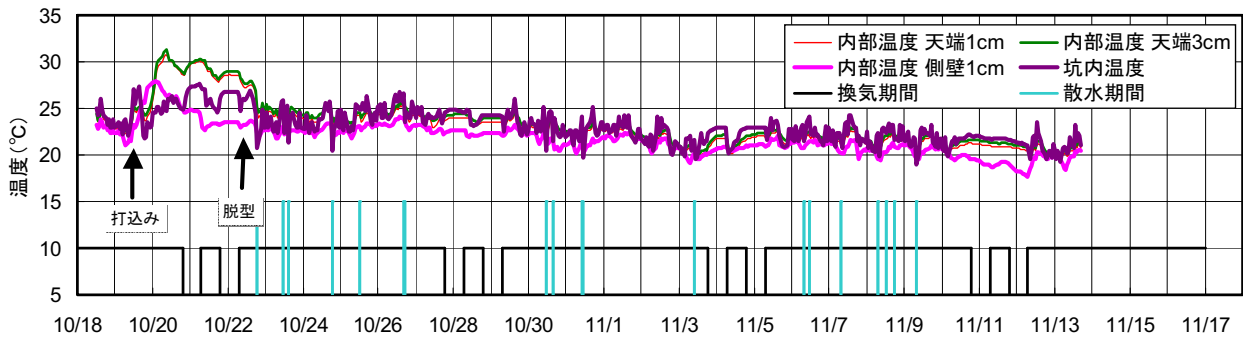


図-6 Aトンネルの覆工コンクリートにおける温度計測結果

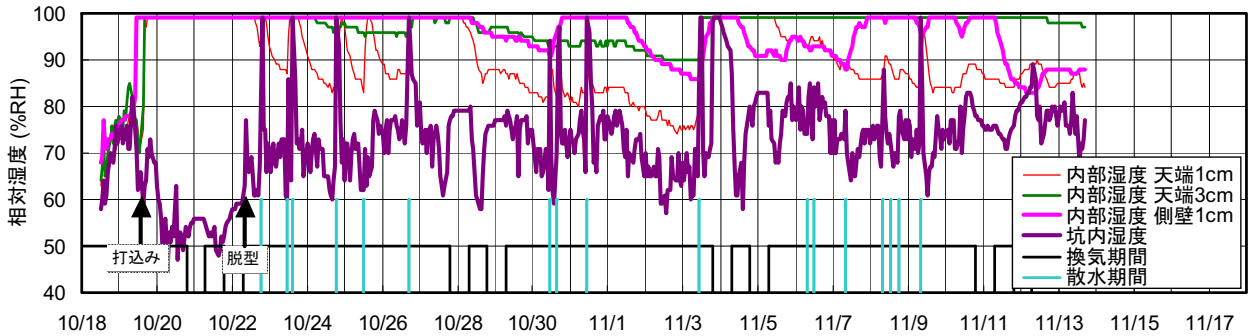


図-7 Aトンネルの覆工コンクリートにおける相対湿度計測結果

の影響によると考えられる。

図-7に示す坑内相対湿度は、散水に伴い大きく変動し、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1cm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3cmと側壁部深さ1cmの内部相対湿度の低下は、天端部深さ1cm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1cmほど急激でなかった。以上から、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、トンネル坑内は低湿環境であり、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、換気の風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。

### (3) 湿気移動解析による計測結果の検証

「3.3 室内試験結果の湿気移動解析による検証」と同様に湿気移動解析によって現場計測結果の検証を行った。解析では、湿気伝導率、気温、外気湿度以外の特性値を

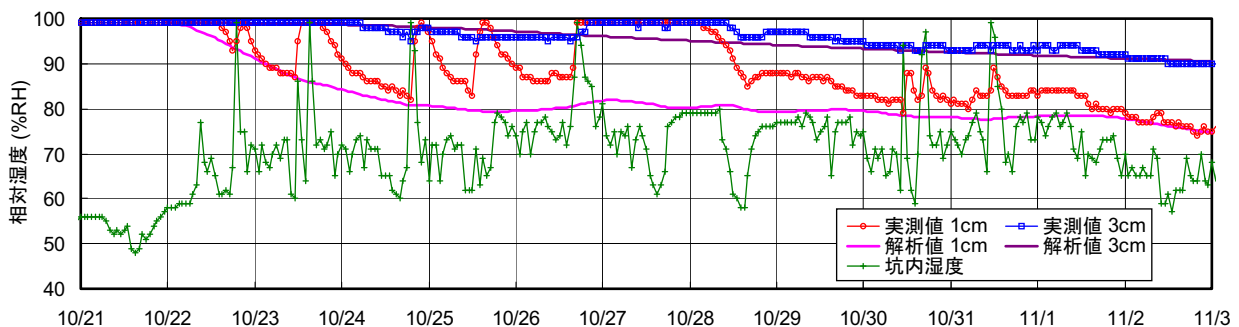


図-8 Aトンネルの覆工コンクリートにおける相対湿度計測結果と解析結果の比較図



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、10月22～11月2日の覆工コンクリートの天端部深さ1, 3cmを選定した。

覆工コンクリートの相対湿度解析結果を図-8に示す。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再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。

## 4.2 Bトンネルでの適用事例

### (1) 計測概要

前述した、Aトンネルでの計測結果の再現性および、この湿潤養生管理システムの適用性を確認するために、

Bトンネルの覆工コンクリートにて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10m、内空断面積約67m<sup>2</sup>であり、坑口からの距離93.5m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1cmおよび坑内雰囲気と側壁部の深さ1cm、3cm、5cm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21N/mm<sup>2</sup>、水セメント比57.5%、単位水量164kg/m<sup>3</sup>、粗骨材最大寸法40mm、スランブ15cmであり、高炉セメントB種、AE減水剤標準形I種を用いた。

コンクリートの打込みを6月26日に行い、材齢2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、40～100L程度であった。また、送風量2000m<sup>3</sup>/minの換気を行った。

### (2) 計測結果

温度計測結果を図-9に、相対湿度計測結果を図-10に示す。なお、図-9、10中には、作業状況の記録として、散水期間も示した。コンクリート内部の湿度変化が見られないため、7月2日以降は散水を休止しており、本文執筆時点でも計測を継続中である。6月26日の打設から7月4日(材齢8日)までの段階で、現場周辺での降雨は、6月29日に37.5mm、30日に2.5mm程度であり<sup>10</sup>、降雨による坑内相対湿度への影響は、ほぼないものと考えられる。

図-9に示すように、脱型後の坑内温度は、20～30℃

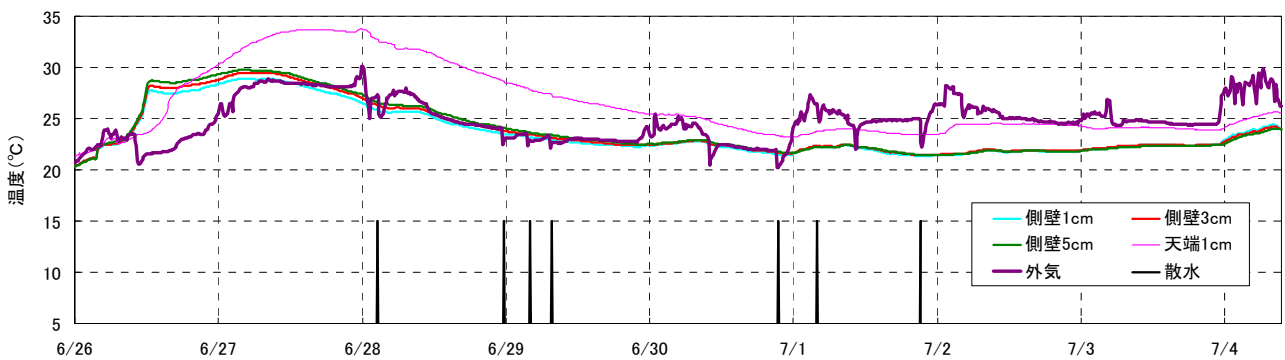


図-9 Bトンネルの覆工コンクリートにおける相対温度計測結果

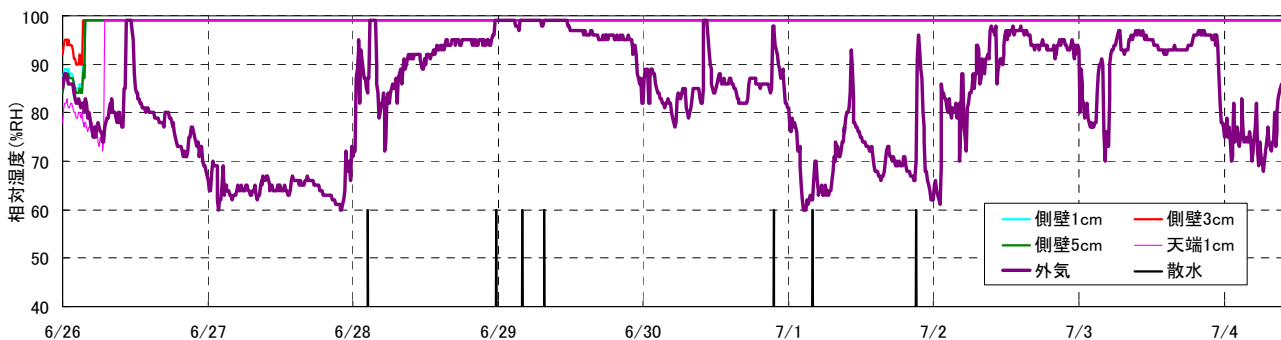


図-10 Bトンネルの覆工コンクリートにおける相対湿度計測結果

の間で、日中に温度が上昇し、夜間に下降して推移した。また、天端部深さ1 cm、側壁1, 3, 5cmのコンクリート内部温度は、打込み後に温度上昇を生じ、30~33°C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する結果となった。

また、天端部深さ1 cmの内部温度は、側壁部に比べて最高温度で3°C程度、脱型後で2°C程度高い傾向を示した。Aトンネルと同様に、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-10に示す坑内相対湿度は、散水にともない上昇し、散水直後は概ね95%RHを確保した。7月2日以降の散水休止後も、湿度が95%RH程度まで回復することがあった。これは、夏季の高湿な外気の影響を受けているためと考えられる。よって、冬場の乾燥する時期には、坑内もその影響を受ける可能性があるため、外気の湿度変動時におけるデータの蓄積が必要である。

また、天端部深さ1 cm、側壁部深さ1, 3, 5cmの内部相対湿度は、打込み後から7月4日現在まで99%RHを保持している。散水休止後も、99%RHの湿潤状態を保持していることから、坑内の湿潤状態を保持していると考えられる。

以上より、現段階でのBトンネル坑内の湿度環境は、Aトンネルの傾向と違い、ある程度の湿度を保持し、コンクリート内部も湿潤状態を保持できる環境である。ただし、坑内温度が上昇すると坑内相対湿度が低下する傾向があるため、この時の内部湿度を注意してモニタリングする必要がある。

各トンネルによって、坑内環境に差異があるため、現場環境に応じた散水パターンや養生方法を適切に検討するためにも、この湿潤養生管理システムは有効な手法であるといえる。

## 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システムを提案し、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湿気移動解析により同

定した湿気伝導率は妥当な値を示した。

- ③ 以上より考案した湿潤養生管理システムは有効なもので、これを使用することで、現場環境に応じて適切な養生方法を検討し、養生の効率化および湿潤状態の確実な管理が可能である。

- 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湿気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、本湿潤養生管理システムを乾燥収縮ひび割れ防止をも目的とするシステムに発展させる必要がある。

## 【参考文献】

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 岩城圭介ほか: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp.211-216, 2008
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 日本建築学会編: 建築材料の熱・空気・湿気物性値, 丸善, 2001.
- 9) 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
- 10) 気象庁: <http://www.jma.go.jp/>

**Summary** A wet curing control system through the measurement of relative humidity using a hydrometer installed in the concrete was proposed for appropriate wet curing after concrete placement. Internal relative humidity was measured by an embedded waterproof temperature and humidity sensor in a laboratory and at two actual construction sites, and moisture transfer analysis was made using a simultaneous heat and moisture transfer model. As a result, the wet curing control system was found to be effective.

**Key Words** : monitoring control, relative humidity analysis, wet curing, tunnel lining concrete, moisture transfer analysis