

報告 小径バルーン構造による養生システムを用いたトンネル覆工コンクリートの養生効果の調査

細田 暁^{*1}・揖斐 剛^{*2}・Raphael N. UWAZURUONYE^{*3}・八巻 大介^{*4}

要旨：本報告では、NATM トンネルの覆工コンクリートのための新たな養生システムを開発し、実構造物に試験的に適用し、養生によるコンクリートの緻密化の効果を調査した。小径バルーンを組み合わせた構造で、養生シートを覆工コンクリートに押し当てるシステムであり、断面形状の変化に追従できるシステムである。実構造物において、無養生の箇所、従来の養生システムを用いた箇所との比較を行い、養生シート内がより高い湿度に保たれることと、保温効果に優れることを示した。さらに、表層透気試験と表面吸水試験により、開発した養生システムによるコンクリートの緻密化の効果を示した。

キーワード：NATM, 覆工コンクリート, 養生, 小径バルーン構造, 表面吸水試験, 表層透気試験

1. はじめに

山地の多い我が国の国土において、山岳トンネルのインフラが社会にもたらすストック効果は極めて大きい。一方で、山岳トンネルの覆工コンクリートに変状が生じると、閉鎖空間であることもあり、点検、補修・補強等には多大な手間がかかる。また、覆工コンクリートからの剥落は、深刻な第三者被害を招きかねない。これからも新設の山岳トンネルは多く計画されており、建設後の供用中の性能を確保するための適切な設計と、施工時の品質確保が重要である。

山岳トンネルの施工法は、現在はNATM工法が主流であり、従来の矢板工法に比べると、覆工コンクリートの品質は向上してきていると言える。しかし、筆者らの調査結果^{1) 2)}において、既設のNATMトンネルの覆工コンクリートにおいては、うき・はく離・はく落や、ひび割れなどの劣化が多数生じているトンネルも存在し、施工時の品質確保が十分に達成されているとは言えない。

覆工コンクリートが供用中に不具合を発生しないためには、施工段階での品質確保が重要である。厚さが数十 cm 程度で閉鎖空間への打込みは容易ではなく、流動性の高いコンクリートを用いない場合は特に、適切な打込みが重要である。そして、一般的に脱型強度が確保できた段階で脱型することが多く、材齢1日に満たない時点での脱型がなされることが多い。トンネル内の環境は、地理的位置、季節、トンネル延長、坑口からの距離、トンネルの貫通の有無、坑口の風切りの有無、地山からの湧水の状況などの多くの要因の影響を受ける。覆工コンクリートの耐久性を確保するため

に必要な養生条件は十分に明らかにされているとは言えないが、覆工コンクリートの養生の重要性が着目され、様々な技術開発がなされ、実装されてきている。

我が国の高速道路会社の規準では、「覆工コンクリートの養生は、給水、水分逸散防止、封緘及び膜養生などで覆工コンクリート表面を7日間湿潤状態に保持する方法を標準とする」と表記されている³⁾。また、東北地方整備局の品質確保の手引き(案)では、「覆工コンクリートの十分な耐久性の確保と必要なコンクリートの緻密性を得るために、適切な養生を行うことが望ましい。」とし、特に坑口部の約20m程度は、凍害環境に置かれる可能性も念頭において、型枠の存置を7日以上行うことを推奨している⁴⁾。このように、覆工コンクリートの養生に対する認識は今後も高まっていくと思われ、より効果的で合理的な養生方法が求められ、養生の効果の検証も重ねられていくと思われる。

これまで、様々な養生方法が開発され、実装されてきているものの、さらなる技術開発の余地があると考えている。例えば、トンネルの断面は現場ごとに異なるので、大規模な架台を伴う養生システムは、個別のトンネルごとに作製している状況にある。このやり方では、延長の短いトンネルでは採算性に劣る。また、養生シートを直接貼り付ける方法もあるが、手間がかかり、大量の廃棄物も発生する。

そこで、本報告では、新たな養生方法を開発し、実際のトンネルの覆工コンクリートに試験的に適用したので、養生によるコンクリートの緻密化の効果を非破壊試験により計測した結果を報告する。

本報告で用いる新しい養生方法は、小径バルーンを

*1 横浜国立大学大学院 都市イノベーション研究院教授 博(工)(正会員)

*2 大嘉産業株式会社 産業資材事業部 開発部

*3 横浜国立大学 研究員 博(工)(正会員)

*4 西松建設株式会社

組み合わせた構造で、養生シートを覆工コンクリートに押し当てるシステムであり、断面形状の変化に追従できることを最大の特徴とするものである。

2. 新たに開発した養生システム

2.1 養生システムの概要

新たに開発した養生システムは、小径のバルーンで組み立てた構造により、養生シートを覆工コンクリートに押し当てるものである。図-1 に養生システムのイメージを示す。緑色の、覆工コンクリートの周方向に配置されるバルーンを養生バルーンと呼んでおり、トンネル軸方向に複数本配置されるバルーンは、構造の剛性や安定性を高めるためのものでサブバルーンと呼んでいる。養生バルーン、サブバルーンともに直径は150mmと小径のものを採用している。

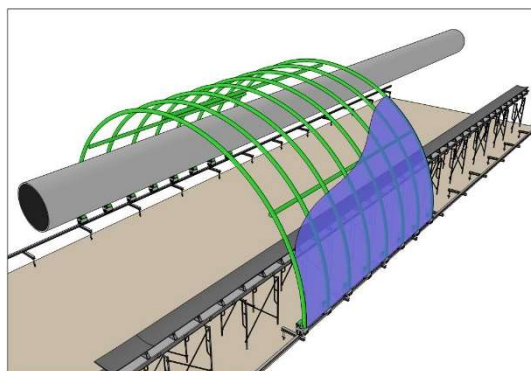


図-1 開発した養生システムのイメージ

本報告で使用した養生システムにおいては、養生バルーンの配置間隔は1.5mであり、断面形状に追従するための養生バルーンの周方向の長さは28m程度であった。

養生バルーンとサブバルーンにより組み立てられた構造の外側に養生シートが配置され、養生シートが覆工コンクリートに適切に押し当てられることで、養生効果が発揮されることを期待している。今回の報告では、ポリエチレンの材質で、厚さ0.36mm、重量が215g/m²の養生シートを用いた。

本システムの最大の特徴は、異なる断面形状への追従性を可能としたところにある。トンネルは構造物ごとに断面形状が異なり、当然に周方向の延長も異なる。本システムにおいては、養生バルーンの長さを自在に変更できるようにした。養生バルーンには0.1MPa程度の空気を注入することで適切な剛性を持たせるが、長さに余裕を持たせた養生バルーンに対して、トンネル断面形状に適した長さを設定し、養生バルーンの両下端部において適切な密閉対策を施すことで、養生バル

ーン内の空気圧を一定に保つ構造とした。さらに、次節の写真-3に示すように、養生バルーンの両下端には、ジャッキで高さ調節を行える構造が取り付けられており、養生バルーンの長さ調整と合わせて、様々なトンネル断面形状に追従できる構造とした。

様々なトンネル断面形状に追従できる性能により、個別のトンネルごとに製作し、廃棄されてきた従来の工法と異なり、養生システムの再利用が可能になると考えている。また、同一トンネルの中の非常駐車帯の大断面に対しても別の養生システムを準備する必要がなくなる、などのメリットも出てくると思われる。これらを実現するためには、使用する材料の耐久性や、養生システムの容易な架設方法についてのさらなる検討が必要である。



写真-1 参考にした農業用シートによる養生方法

なお、本工法の開発に先立ち、東北の復興道路の小槌第一トンネル（施工時名称）において、現場の監理技術者であった故河内正道氏が考案して適用した養生方法が非常に参考になった。写真-1に示すように、農業用シートを10.5mごとの施工目地とその中間に配置した塩化ビニル製の細いパイプを周方向に配置することで固定した、簡易な養生システムである。この養生システムの配置は手作業であるが、300m程度の短いトンネルであったため、高価なシステムを導入するよりもコストダウンのメリットがあった。また、写真-1に見られるように、安価な養生シートはコンクリートに全く密着していないが、養生シート内の湿度は90%程度以上に保たれ、養生シート内に空気が含まれることにより外部への熱伝達が抑制されて保温効果を持つことが、既往の研究により報告されている⁵⁾。この知見を念頭に置き、必ずしも養生シートがコンクリートに全面的に密着する必要はなく、シート内部の湿度が保たれるように端部において密閉性が確保されれば十分である、との考え方を本工法の開発においても採用した。

2.2 実構造物への適用

ある大断面のトンネルにおいて、開発した養生システムを試験的に適用した。写真-2に示すように、3本の養生バルーンを用い、トンネル延長方向に3mの養生システムを、実際のトンネル内で架設した。10.5mの16Blockにおいて、15Block側の端部3mを養生した。残りの7.5mは比較のため、脱型後に養生を行わなかった。養生バルーンの長さを適切に調整し、養生バルーンとサブバルーンに空気を適切に注入し、写真-3に示すシステムの両下端部でのジャッキによる高さ調節を行うことで、写真-4に示すように、トンネル天端部を含む各箇所、養生シートを介して養生バルーンを覆工コンクリートに密着させることができた。

なお、開発中の本工法においては、養生システムの下部数mの範囲において、養生バルーンと覆工コンクリートの間に隙間が生じたため、今回の試行においては隙間に詰め物をするにより、シート内の湿度が保たれる配慮を行った。

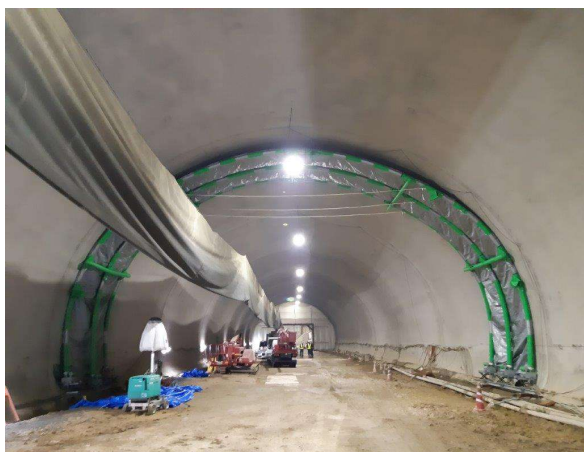


写真-2 養生システムがトンネル断面に適用された状況



写真-3 養生システムの下端部とジャッキにより高さ調節のできる装置



写真-4 養生シートがトンネル天端部に押し当てられている状況

3. 実構造物での養生の効果の調査方法

3.1 実構造物での計測内容

新たに開発した養生システムを試験的に実構造物のトンネルに適用し、養生によるコンクリートの緻密化の効果を調査した。

表-1 実構造物での調査の概要

Block 番号	打込み日	養生方法	表層品質の 調査日
15	2020年11月4日	従来システム	2020年 12月5～6日
16	2020年11月9日	新システム	
16		なし	

表-2 コンクリートの配合

呼び 強度	スランプ	セメント 種類	単位水量	W/C
27	21cm	高炉B種	175kg/m ³	55.9%

表-1に実構造物での調査概要を示した。東北地方の南部に位置するトンネルにおいて、2020年11月上旬に打ち込まれたNo.15とNo.16のブロックにおいて、12月上旬に表層品質の調査を行った。なお、調査期間中は、トンネルは掘削中であり貫通していない。

No.15のブロックでは、打込みの翌日に材齢22時間で脱型し、従来から使用されている一般的な養生方法により材齢9日まで養生を行った。この養生方法は、空気の入った厚さ数十cm程度の布製の膜を鋼フレーム製の架台により支持して、コンクリート壁面に押し当ててものである。

No.16のブロックでは、打込みの翌日に材齢22時間で脱型し、延長方向に3mの区間に2章で説明した小径バルーン構造による養生を材齢9日まで適用した。また、同じNo.16ブロックの残りの部分は脱型後に養生を行わずに、養生による緻密化の効果を比較することとした。

表-2にコンクリートの配合を示した。No.15、16のブロックの配合は共通であり、剥落対策用のPP短繊維が0.30vol%添加されている。



図-2 実構造物における表層品質の計測箇所

養生による緻密化の効果を調査するため、表層透気試験（トレント法）、表面吸水試験（SWAT）を実施することとし、若材齢であるために事前に接触型の含水計で含水率を測定した。

図-2に、表層品質を計測した箇所を示した。天端部A、アーチの肩部B、S.L.（スプリングライン）より上部のC（地面から1.6m程度）、S.L.より下のD（地面から1.1m程度）の4箇所である。なお、この構造物では、S.L.より下の部分に対して、気泡を除去する目的でセントロ（型枠）に透水性型枠の布が配置されている。

また、従来システム、新システム、養生なしの条件に対して、図-2のA、B、Cの箇所に温湿度を計測できるセンサーを配置し、シート内の温湿度も計測し、養生システムの効果を調べた。

3.2 供試体での計測内容

No.16 ブロックの覆工コンクリートの打込み時に、実構造物と同じコンクリートを用いて、角柱供試体を作製した。500×500×1000mmの角柱供試体で、写真-5に示すように、供試体の側面に新養生システムで用いた養生シート等で養生を行い、無養生の供試体との比較を行った。材齢22時間で脱型し、養生シートを設置し、シート内の湿度が保たれるようにシート端部の処理を行った。また、養生シートがコンクリートに密着するようにした側面と、写真-5に示すように、実構造物と同様にシートがコンクリートに密着しないように一本の木角材を介してシートを配置した側面を用意した。

材齢9日で養生を終了し、2020年12月6日に表層品質の計測を行った。

4. 計測結果と考察

4.1 実構造物での計測結果

(1) 温湿度の計測結果

図-3～図-9に、実構造物で温湿度センサーにより



写真-5 角柱供試体の養生の状況

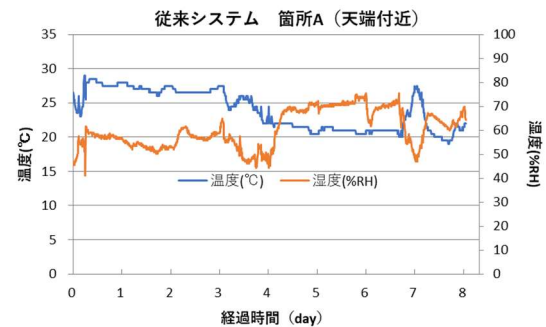


図-3 No.15 ブロックの養生シート内の温湿度の計測結果（従来養生システム、箇所A、天端付近）

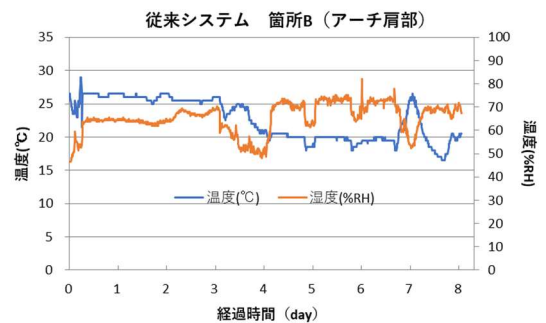


図-4 No.15 ブロックの養生シート内の温湿度の計測結果（従来養生システム、箇所B、アーチ肩部）

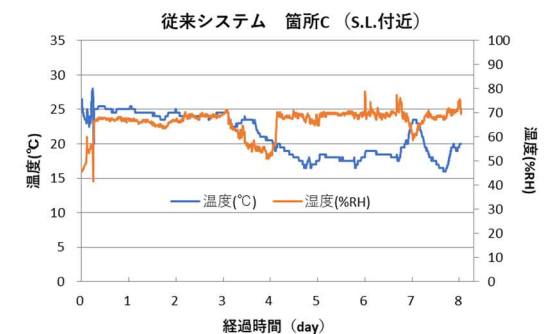


図-5 No.15 ブロックの養生シート内の温湿度の計測結果（従来養生システム、箇所C、S.L.付近）

計測された結果を示した。養生システムを設置する数十分前から計測を開始し、養生を終了するまでの8日間計測した。図-8と図-9の無養生部での結果に見ら

れるように、計測期間中のトンネル内の湿度は低く、地山からの湧水の少ない状況や、季節の影響が反映されていると考えている。また、天端付近において、湿度がやや高い傾向が認められた。

開発した養生システムで養生した箇所については、図-6と図-7に見られるように、無養生部に比べて高い湿度が保たれ、計測期間中、ほぼ90%以上の相対湿度が保たれていた。特に、アーチ肩部では100%の相対湿度が計測された期間もあり、保湿性の高いシートはコンクリートに完全に密着していないものの、小径バルーンがコンクリートに密着していることで、高い湿度保持効果が発揮されたと思われる。また、無養生部に比べると、保温効果も見られ、特に天端付近での保温効果が大きかった。

一方で、従来養生システムで養生した箇所については、図-3～図-5に見られるように、開発した養生システムに比べて保温、保湿効果ともに劣る結果となった。使用した養生シートの材質の影響が大きいと考えられる。

(2) 表層品質の計測結果

図-10に実構造物での表層透気試験の結果を示した。表層透気試験は、静電容量式のCMEX IIによる含水率が5.5%以下での計測が推奨されているが、若材齢であることもあり、無養生のいくつかの計測点で5.5%をわずかに上回る結果となった。

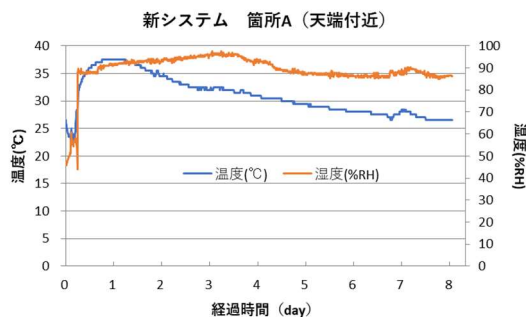


図-6 No.16ブロックの養生シート内の温湿度の計測結果（新養生システム、箇所A、天端付近）

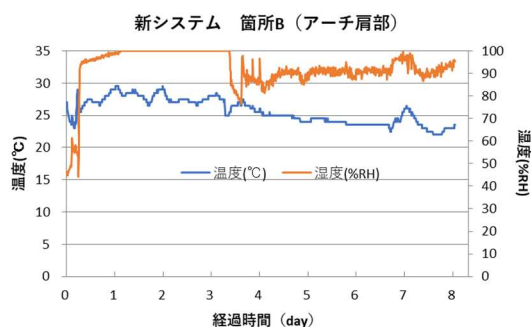


図-7 No.16ブロックの養生シート内の温湿度の計測結果（新養生システム、箇所B、アーチ肩部）

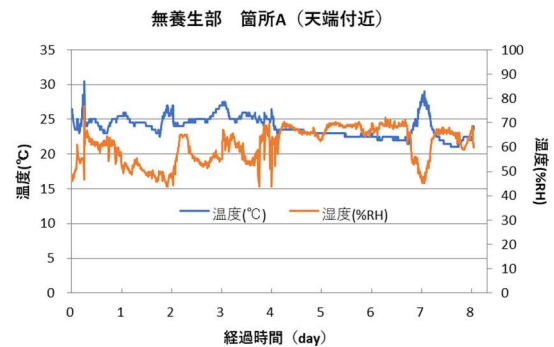


図-8 養生開始後の経過時間の計測結果（箇所A、天端付近）



図-9 No.16ブロックの無養生部の温湿度の計測結果（箇所C、S.L.付近）

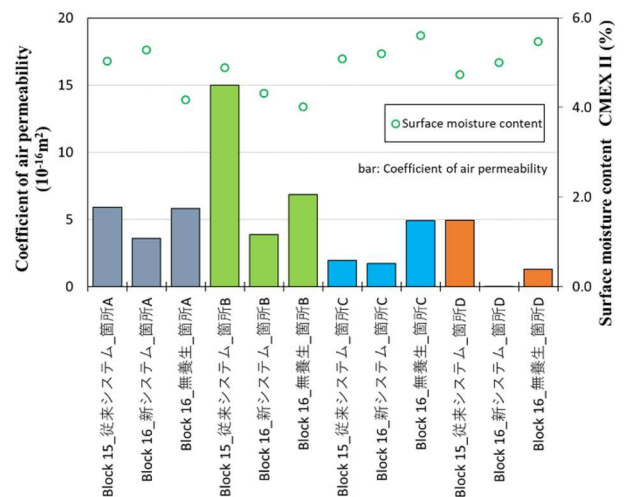
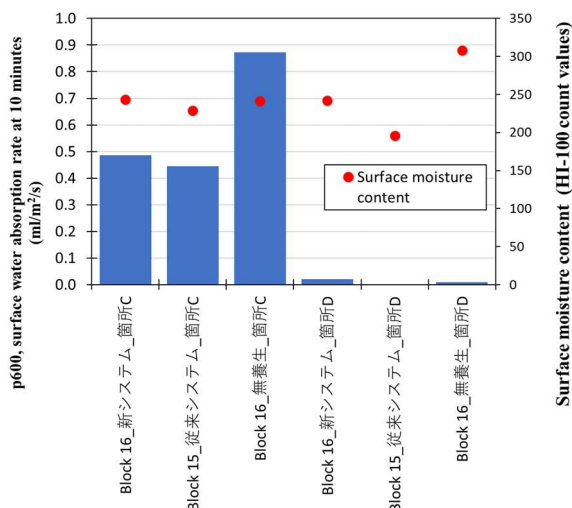
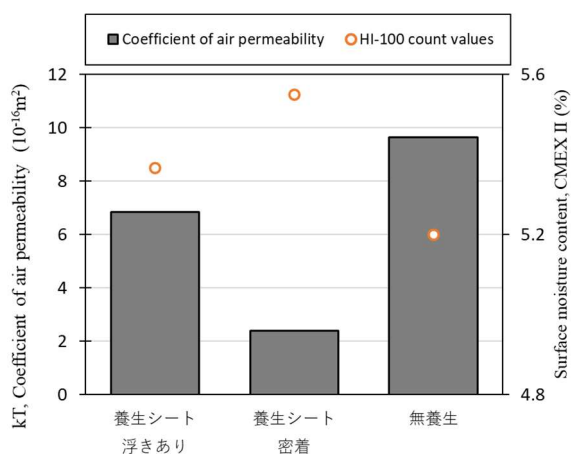


図-10 実構造物における表層透気試験の計測結果

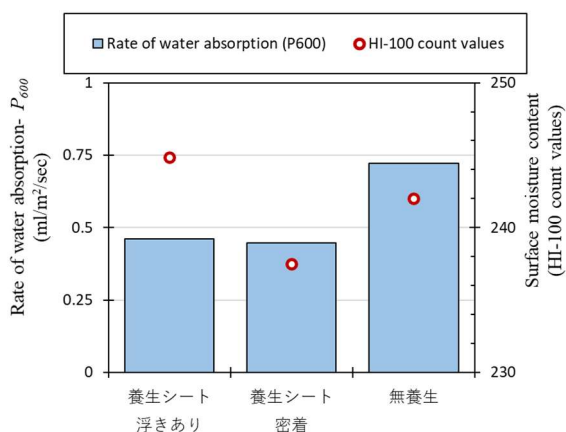
新システムで養生した箇所は、A～Dのすべての箇所において、無養生に比べて小さい透気係数を示した。特に、透水性型枠を使用した箇所Dにおいては、極めて小さい透気係数を示した。無養生の箇所では含水率が5.5%を超える箇所もあったが、この影響を考慮しても、新システムの養生による緻密化の効果が明らかである。また、新システムは、従来システムと比較して、小さい透気係数を示し、優れた養生効果が確認された。



図－11 実構造物における表面吸水試験の計測結果



図－12 角柱供試体における表層透気試験の計測結果



図－13 角柱供試体における表面吸水試験の計測結果

図－11には表面吸水試験の結果を示した。表面吸水試験は、電気抵抗式の HI-100 による含水率（カウント値）が 210 程度以下での計測が推奨されているが、若材齢であることもあり、やや高い含水率が計測された。

S.L より少し上の箇所 C においては、無養生に比べ

て、新システムは高い吸水抵抗性を示し、従来システムと同程度の値となった。東北地方整備局の手引き⁴⁾においても、0.5ml/m²/s の p_{600} （10 分時点での吸水速度）が吸水抵抗性の目標値として示されており、十分な吸水抵抗性が得られたと言える。一方で、S.L.より下の箇所 D においては、透水性型枠の影響が大きく、すべての養生の条件において極めて高い吸水抵抗性が見られた。

4.2 供試体での計測結果

図－12 に角柱供試体における表層透気試験の結果を、図－13 に表面吸水試験の結果を示した。実構造物に用いられたのと同じコンクリートで作製したため、コンクリートの緻密性のポテンシャルを把握することができる。養生シートによる緻密化の効果が見られているが、養生シートの密着の程度は、表面吸水試験においては顕著な差をもたらさなかった。

5. まとめ

本報告では、NATM トンネルの覆工コンクリートを対象として、小径バルーン構造で、養生シートを覆工コンクリートに押し当て、断面形状の変化に追従できるシステムを用いて、実構造物における養生の効果进行调查した。養生シート内の高い保湿効果と保温効果が確認された。表層透気試験では、無養生や従来システムと比較して、より緻密なコンクリートが得られた。表面吸水試験では、従来システムと同程度で、無養生よりも緻密なコンクリートが得られた。

参考文献

- 1) 岩間 慧大, 細田 暁: NATM トンネル覆工コンクリートの変状に関する点検データの分析, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.2, pp.1501-1506, 2016
- 2) 馬場 崇史, 細田 暁: トンネル覆工コンクリートの定期点検データの分析による品質確保の取り組みの効果の検証, 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, 第 29 巻, pp.243-248, 2020.10
- 3) NEXCO 総研: トンネル施工管理要領, 2020.7
- 4) 東北地方整備局: コンクリート構造物の品質確保の手引き (案) (トンネル覆工コンクリート編), 2016.6
- 5) 岩間 慧大, 細田 暁, 小宮 隆之, 宮田 和実: NATM トンネル覆工コンクリートのひび割れシミュレーションの施工・点検記録による検証, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.1221-1226, 2018