

論文 保湿・保温養生マットを用いた覆工コンクリートの養生効果の研究

東 邦和*1・石井 敏之*2・三澤 孝史*3・齊藤 賢治*4

要旨：山岳トンネルの覆工では、養生条件の整備による品質向上対策が要求されている。保湿・保温機能を持つ養生台車を新たに開発し、養生効果を評価した。現場適用時に、覆工コンクリートの温度、湿度、ひずみ及び坑内の温度、湿度の計測を行った。保湿機能により、コンクリート表面の相対湿度を85%以上に保ち、保温機能により、コンクリート表面温度を坑内温度より3℃以上高く保持できた。保湿・保温の効果により、内部の収縮ひずみが低減し、ひび割れが抑制され、コンクリートの表面品質を向上させることができた。湿気移動を考慮した温度応力解析を適用し、計測結果と比較することにより、養生効果を評価した。

キーワード：覆工コンクリート、養生台車、乾燥収縮、湿気移動、温度応力解析

1. はじめに

山岳トンネルの覆工では、養生条件を整えることにより、温度変化および自己収縮・乾燥収縮を低減させる品質向上対策が要求されている。覆工の養生に関しては、様々な対策が行われており、これまでに、バルーン養生、散水養生、移動式シート養生などを実施してきた¹⁾²⁾。

新たに開発した保湿・保温機能を持つ養生マットを用いた養生台車は、養生マットと不織布を軽量のパイプフレームに貼りつけたものであり、比較的簡単な構造で、移動台車に載せて設置できる。現場適用においては、6連の養生台車により、1BL（ブロック）当たり2週間以上の養生期間を確保した。

室内試験¹⁾と現場適用における計測を実施し、湿気移動を考慮した温度応力解析によって、養生効果の評価を行ったので、その結果を述べる。適用した現場の工事名称を表-1に示す。

2. 養生方法の概要

2.1 覆工コンクリートの仕様と養生方法

トンネル断面（標準部）と計測位置を図-1に示す。計測位置はSL高さとした。養生台車の設置状況を写真-1に示す。養生台車は1BL（1連）ごとに、移動台車により移動・設置する。

覆工コンクリートの使用材料と配合を表-2に示す。高炉セメントB種を使用し、呼び強度24、スランプ15cm、粗骨材最大寸法40mmのコンクリートである。

2.2 養生台車

養生台車の形状を図-2に示す。覆工コンクリートの1BL長は、10.5mである。養生台車は、保温マット（厚さ10mm）の表面に、水分保持用の不織布（厚さ1mm）を貼り合わせたものを、スチール製のパイプ枠に取り付

けている。パイプで支えることにより、養生マットは覆工コンクリート面に密着し自立する。また、不織布への給水は、シート表面に取り付けた給水ホースによって行う。移動台車を用いて1BL分のパイプ枠の上げ下ろしを行い、レール上を最後尾のものを前方に送ることによって移動させる。また、養生台車による養生終了時に、コンクリート表面に、塗布型収縮低減剤を塗布している。

表-1 工事名称

工事名称	津軽ダム県道付替湯ノ沢トンネル工事
発注者	東北地方整備局津軽ダム工事事務所

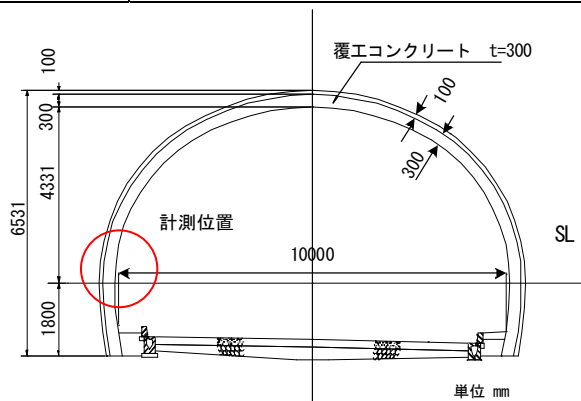


図-1 トンネル断面（標準部）と計測位置



写真-1 養生台車の設置状況

*1 ㈱奥村組 技術研究所 土木研究課 博（工）（正会員）
 *2 ㈱奥村組 技術研究所 土木研究課（正会員）
 *3 ㈱奥村組 技術研究所 土木研究課 課長（正会員）
 *4 ㈱奥村組 東日本支社

表-2 覆工コンクリートの使用材料と配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
		水 W	セメント C	細骨材 S1	細骨材 S2	粗骨材 G1	混和剤
55.6	43.6	161	290	630	163	1024	2.900

セメント：高炉セメント B 種，密度 3.04 g/cm³ 水：地下水 空気量 4.5%
 細骨材： S1 砂 産地：つがる市牛潟町鷲野沢 粗粒率 2.0 表乾密度 2.58 g/cm³
 S2 砕砂 産地：東津軽郡平内町内童子 粗粒率 4.0 表乾密度 2.68 g/cm³
 粗骨材： 砕石 産地：弘前市大字湯口字一の下山 実積率 62.0% 表乾密度 2.60 g/cm³ Gmax 40mm
 混和剤： AE 減水剤 標準形 (I 種)

3. 計測方法と計測結果

3.1 計測器の配置

養生効果の把握を目的として、養生のある BL と養生のない BL で計測を行い、結果を比較した。計測対象 BL はインバートのない区間で、覆工コンクリートの厚さは 300mm である。

計測項目を表-3 に、計測器の配置を図-3 に示す。覆工コンクリートには、コンクリートひずみ計と熱電対、温湿度計を埋設した。ひずみ計の設置深さは、覆工厚さの中心部 150 mm，中間部 75mm，表面部 30mm の 3 段階とし、トンネル軸方向と周方向の 2 方向の計測を行った。温湿度計は、覆工コンクリート内部の温度湿度変化を計測するために、表面から深さ 20mm 位置に埋め込んだ。

コンクリートの水分計測は、電気抵抗式水分計による内部水分および高周波容量式水分計による表面水分を測定した。また、シュミットハンマーによる強度測定とトレント法による表面透気係数の測定を行った。

3.2 温度湿度の計測結果

覆工コンクリート表面から深さ 30, 75, 150mm 位置の温度の経時変化を図-4 に示す。本図では、重ねて示すが、養生なし BL と養生あり BL は、9 月中旬の打設であるが 8 日間の打設日の差がある。

養生なし BL の打設温度は 23.2℃，ピーク温度 47.5℃ であり、養生あり BL では打設温度 21.2℃，ピーク温度 42.4℃ である。養生なし BL は打設温度が高く、養生あり BL より打設後 10 日間は温度が高い。養生あり BL で

は養生台車（打設後 7 日～28 日設置）の設置以降は、覆工温度の低下が緩やかになり、覆工内部の深さによる温度差がなく、良好な養生効果を示した。

表-3 計測項目

設置位置	計測項目	計測点数	計測機器
坑内	温度湿度	1	温湿度計
	ひずみ	6	コンクリートひずみ計
覆工コンクリート	温度	6	熱電対
	温度湿度	1	温湿度計 (防水処理)
	表面水分	1	表面水分計
	内部水分	1	削孔内部水分計
	強度	1	シュミットハンマー
	透気係数	1	トレント法

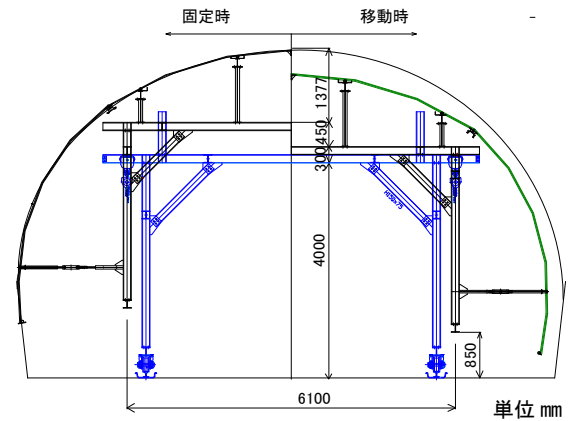


図-2 養生台車の形状

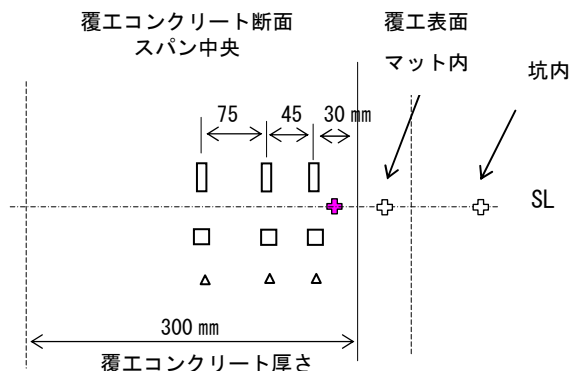
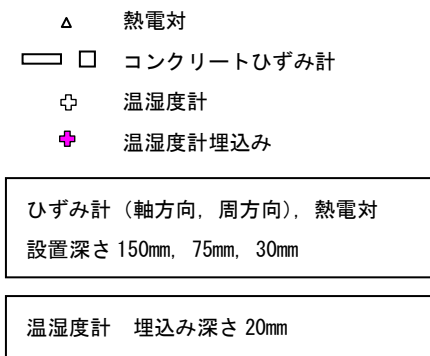


図-3 計測器の配置

坑内温度、坑内湿度および覆工内部（表面から 20mm 位置に削孔して温湿度計を埋込み）の温湿度の測定値を図-5 に示す。坑内温度は9月中旬の 30℃から2か月後の 10℃に低下している。覆工コンクリート深さ 20mm 位置に設置した温湿度計の温度は、養生なし BL では坑内温度とほぼ一致して変動しているが、養生あり BL では、養生中は 3~5℃程度温度が高く推移しており、保温効果が表れている。

坑内相対湿度は、100%~50%と大きく変動している。覆工コンクリート中の湿度は、養生なし BL では、1か月後は 90%に低下しているが、養生あり BL では、養生装置設置期間は 100%を保持している。その後は、外気湿度に近づくが、養生あり BL では、養生終了後も湿度の低下が遅く、保湿効果が表れている。

3.3 覆工コンクリートのひずみ計測結果

覆工コンクリート実ひずみの測定結果を、養生なし BL を図-6 に、養生あり BL を図-7 に示す。ひずみは、コンクリート温度の変化によるひずみを含んでいる。

養生なし BL では、打設時に温度上昇により約 230×10^{-6} の伸びひずみを生じた。水セメント比が 55.6%と比較的大きいことから、自己収縮は小さいと考えられ、温度下降と乾燥により時間経過と共に収縮ひずみが増大した。打設後 70 日で周方向ひずみは 150mm 深さ（中心部）で -252×10^{-6} 、30mm 深さでは -880×10^{-6} に達している。

本トンネルの周方向の覆工コンクリートの長さは約 18.5m あり、扁平な円弧状で、トンネル軸方向に比べて収縮に対する背面拘束が小さいことから、周方向ひずみが大きくなっている。養生あり BL では、打設時の温度による伸びひずみは同じであるが、7 日目の養生台車の設置以降は内部のひずみの深さによる差が小さく、養生期間中はほぼ一定値となっている。また、収縮ひずみの進行が小さく、打設後 60 日で周方向ひずみは 150mm 深さ（中心部）で -135×10^{-6} 、30mm 深さでは -303×10^{-6} である。実際に表面部には、部分的に乾燥収縮ひび割れが発

生したが、養生により発生領域は、養生なしに比べて大きく低減した。

3.4 圧縮強度と透気係数の測定結果

シュミットハンマーで測定した覆工コンクリートの圧縮強度測定値を図-8 に示す。養生あり BL では、材齢 56 日で、 29.6N/mm^2 である。養生あり BL では、養生なし BL を上回った値となった。

表面透気試験であるトレント法による透気係数測定値

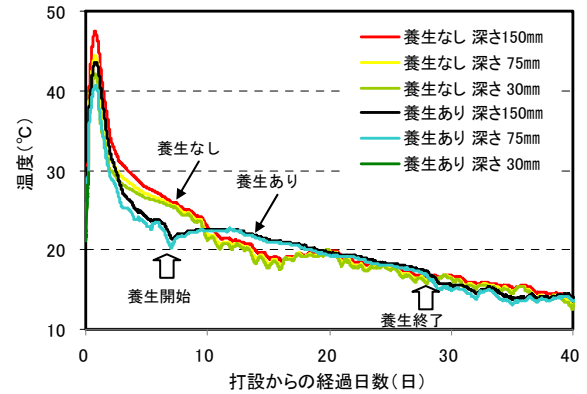


図-4 覆工内部温度

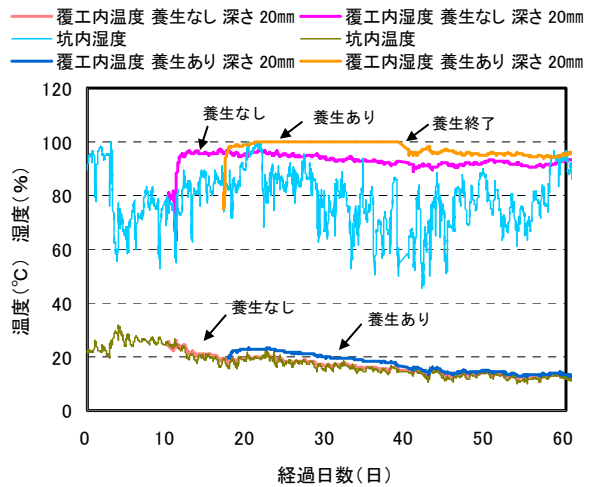


図-5 坑内および覆工内部温湿度

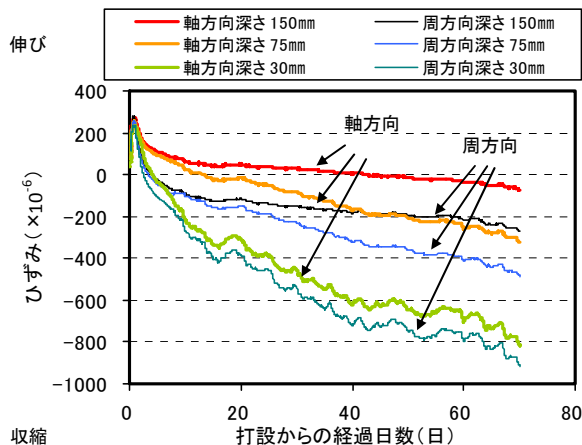


図-6 実ひずみ（養生なしBL）

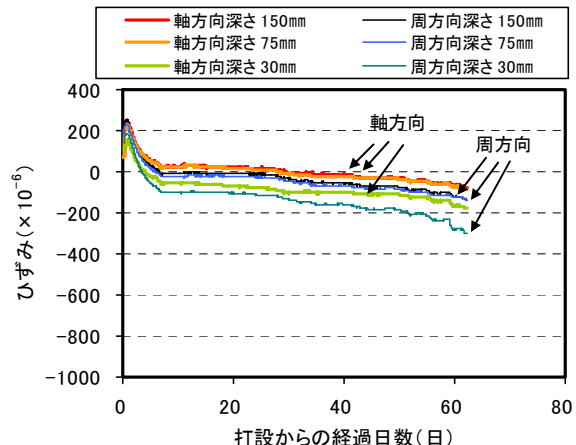


図-7 実ひずみ（養生ありBL）

を図-9 に示す。透気係数は表面部の水分に影響される。いずれの BL も打設後 28 日より、56 日の方が乾燥により透気係数が大きくなっている。養生あり BL では、打設後 56 日で $0.67 \times 10^{-16} \text{m}^2$ になったが、養生なし BL の値より小さく良好である。いずれの BL も透気係数 $0.1 \sim 1 \times 10^{-16} \text{m}^2$ の値であり、透気性グレード 3 の範囲で透気性評価は「一般」である³⁾。

3.5 水分率の測定結果

覆工コンクリートの SL 高さにおいて、電気抵抗式水分計をドリル削孔穴に挿入し水分測定を行った。養生なし BL と養生あり BL の水分率計測結果を図-10、図-11 に示す。

打設直後の水分率の値は、10%程度であるが、養生なし BL では、表面の水分の低下が早く、覆工コンクリート中心（表面から 150mm）の値も早期に 8%を下回っている。養生あり BL では養生期間中（打設後 28 日まで）は表面で 6~7%の範囲であり、覆工コンクリート中心の値も 8~10%を維持しており、乾燥の進行が遅いことが分かる。他のトンネルの測定結果では、乾燥状態が続く場合には、3 か月経過で、表面部で 4%、中心部で 6%程度に水分が低下した。

3.6 使用後の養生マットの性能

現場では養生装置を 7~8 回転用したことから、マット表面の傷やパイプ材の押しつけのため、マットの吸水性能が劣化する可能性が考えられた。現場で使用したものと未使用（新品）のもの、吸水と乾燥の繰返しを行い、吸水性能の比較を行った。養生マットの繰返し吸水量を図-12 に示す。初期には未使用の吸水量が大きいが、試験の繰返しにより、大きな差がなくなり、10 回未満の転用では、マットの性能が劣化することはなかった。

4. 湿気移動を考慮した温度応力解析による検討

4.1 覆工コンクリート解析モデルによる湿気移動の検討

覆工コンクリートの解析モデルを図-13 に示す。覆工コンクリート表面を蒸発面とした湿気移動解析を JCMAC3 を用いて行った。

湿気移動解析では、コンクリート表面部における湿気移動伝達境界として式 (1) を用いた⁴⁾。

$$-\lambda_p \frac{\partial p}{\partial n} = \alpha(P - P_0) \quad (1)$$

ここに、

λ_p : 透湿率 (g/hr・m・mmHg)

P : コンクリート中の蒸気圧 (mmHg)

α : 蒸発率 (g/m²・hr・mmHg)

P_0 : コンクリート周囲の蒸気圧 (mmHg)

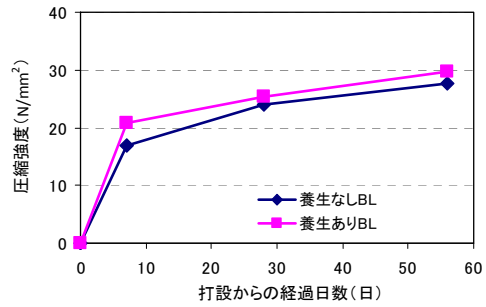


図-8 圧縮強度 (シュミットハンマー)

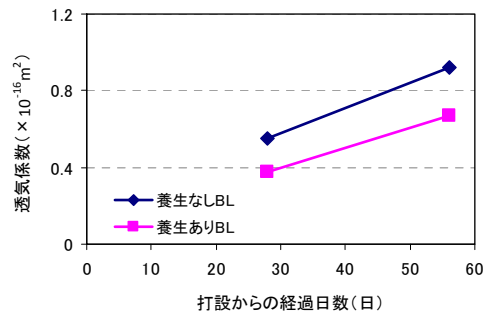


図-9 透気係数 (トレント法)

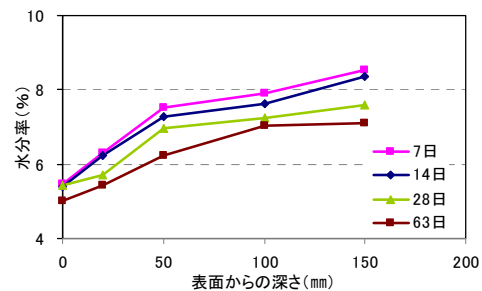


図-10 水分率 (養生なし BL)

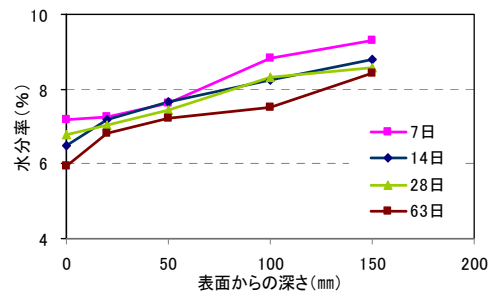


図-11 水分率 (養生あり BL)

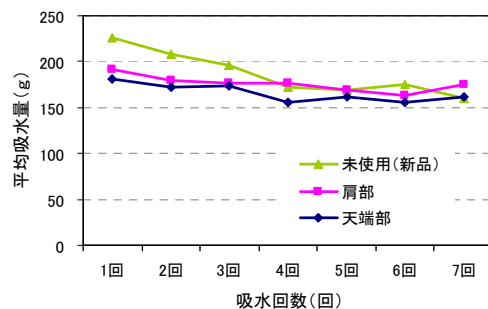


図-12 養生マットの繰返し吸水量

解析条件を表-4 に示す。解析における壁体の外部相対湿度は、測定値 (図-5) を用いた。本解析モデルは、

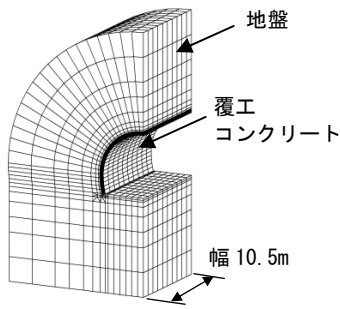


図-13 覆工コンクリート解析モデル (1/2 モデル)

表-4 解析条件

解析	温度応力, 乾燥収縮, 自己収縮 : JCI 式 ⁵⁾
外気温	30°C~10°C
表面湿度	乾燥時 70%~湿潤時 100%
湿気移動解析	透湿率, 湿気容量, 蒸発率 : 標準値

覆工コンクリート厚さ方向の解析要素は表面から140mm 間は10mm ピッチ, 140~300mm 間は20mm ピッチと細かくして, 湿度変化を検討している。

覆工コンクリート温度解析結果を図-14 に示す。養生あり BL と養生なし BL の覆工コンクリート厚さ中心部の温度は, 養生期間中は養生あり BL が約 3°C 高く, 保温マットの効果を示している。

相対湿度解析結果の「養生なし」を図-15 に, 「養生あり」を図-16 に示す。

表面から 50mm までの深さでは, 表面の乾湿の影響を大きく受ける。表面から 100~150mm 深さでは, 相対湿度の低下は見られるが, 大きな低下はない。この解析結果は, 養生なしの水分率(図-10)に見られる表面部 50mm までの水分が早期に低下し, それより内部は低下が遅い傾向と一致している。

養生ありの場合は, 表面から 50mm 深さでは, 養生期間中は外部湿度が 100% に保たれており, その期間中の内部湿度の大きな低下は見られない。これは養生ありの水分率の低下傾向(図-11)と傾向が一致している。養生が終了すると, 内部湿度の低下が起こるが, コンクリートの強度発現の大きい期間では良好な養生条件を維

持できている。養生あり BL では, 覆工表面から 50mm 深さの相対湿度は, 高く保持できており, 測定結果と一致している。

コンクリートひずみの解析結果について, 覆工厚さ方

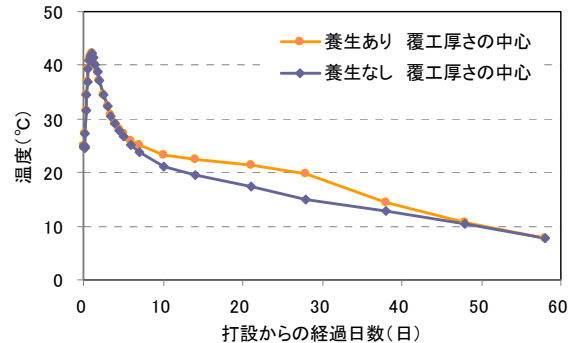


図-14 覆工コンクリート温度

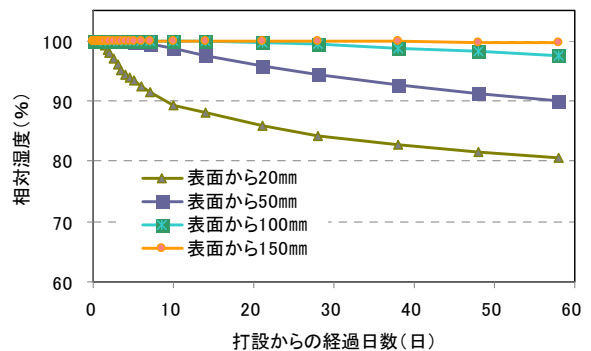


図-15 相対湿度 (養生なし)

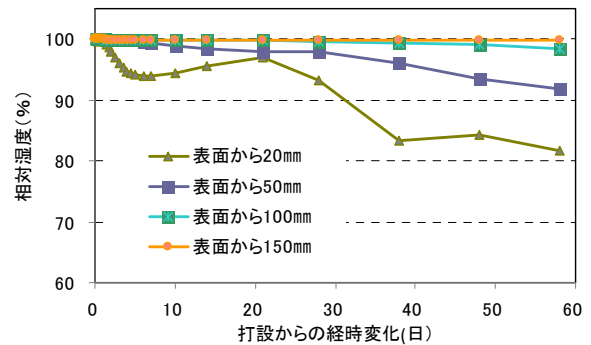


図-16 相対湿度 (養生あり)

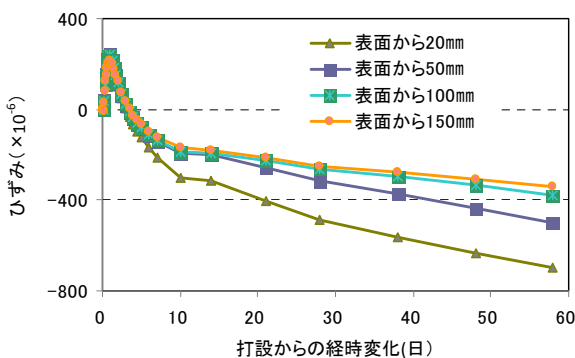


図-17 コンクリートひずみ (厚さ方向 養生なし)

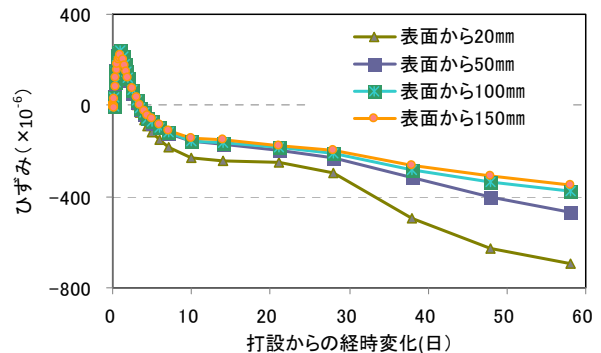


図-18 コンクリートひずみ (厚さ方向 養生あり)

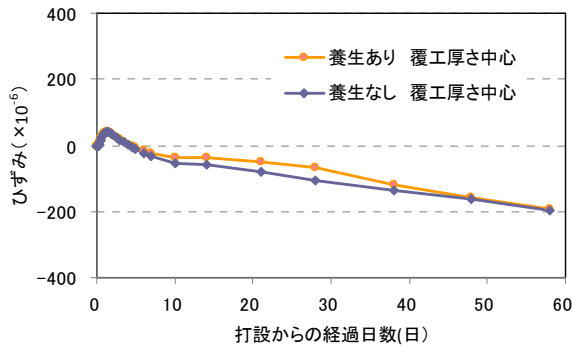


図-19 コンクリートひずみ（軸方向 養生の有無）

向ひずみの養生なしを図-17に、養生ありを図-18に示す。養生なしの場合に、収縮ひずみの最大値は、表面から20mm深さでは、打設後60日で -700×10^{-6} である。覆工コンクリート厚さ中心の150mm深さでは、 -340×10^{-6} である。養生ありの場合では、養生期間中の収縮ひずみが抑制される状況が示されている。

覆工コンクリートのひずみの解析結果（軸方向）を図-19に示す。覆工コンクリート厚さ中心部のひずみは経過30日で、養生なしで -108×10^{-6} であるが、養生ありでは -69×10^{-6} となる。軸方向ひずみの解析結果では、低減の効果は得られるが、定量的な評価は今後の課題である。

覆工コンクリート応力の解析結果（軸方向）を図-20、図-21に示す。覆工コンクリートの表面部では経過28日までの養生期間中は引張応力が抑制されており、表面から20mm位置では、養生なしで 7.6 N/mm^2 であるが、養生ありでは 5.1 N/mm^2 となり、収縮応力の低減が得られた。

湿気移動解析による、内部の相対湿度とコンクリートひずみの分布は計測結果と同様の傾向を示し、計測結果を表すことができた。また、解析により収縮ひずみと応力の低減が得られ、覆工コンクリートの養生効果を表すことができた。

5. まとめ

新たに開発した保湿保温養生台車を使った養生と湿気移動を考慮した温度応力解析から、次の結果が得られた。

- (1) 保湿効果により、コンクリート表面の相対湿度を85%以上に保つことができた。
- (2) 保温効果により、コンクリート表面温度を坑内温度より 3°C 高く保持できた。
- (3) 内部収縮ひずみを低減して、ひび割れ抑制の効果が得られた。
- (4) 湿潤養生効果から、コンクリートの表面品質を向上させることができた。
- (5) 計測結果と湿気移動を考慮した温度応力解析結果を比較することにより、養生効果を評価できた。

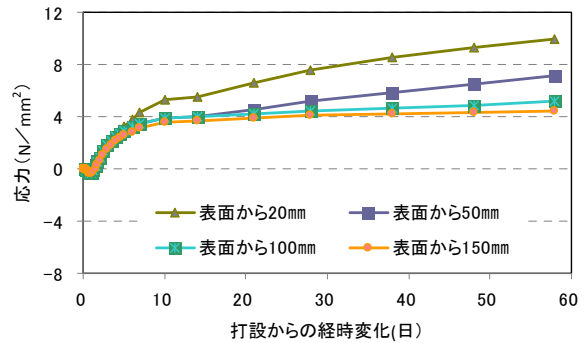


図-20 コンクリート応力（軸方向 養生なし）

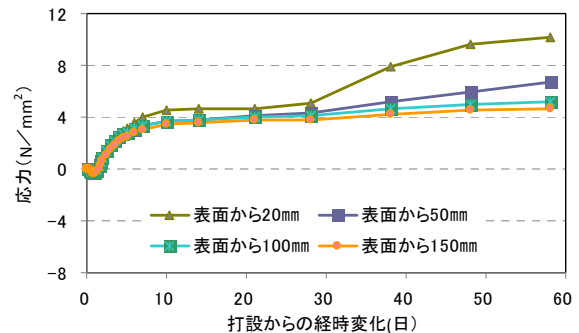


図-21 コンクリート応力（軸方向 養生あり）

覆工表面を湿潤に保ち、表面と内部の温度差をなくし、収縮ひずみの進行を遅らせることが、覆工コンクリートの品質向上に有効であることが示された。また、養生効果と乾燥収縮抑制効果を、覆工コンクリートの計測と解析の比較により検討できた。本検討を進めるに当たり、国土交通省東北地方整備局津軽ダム工事事務所のご指導を賜ったことに深く感謝する。

参考文献

- 1) 東 邦和, 三澤孝史, 白石祐彰: 覆工コンクリートの内部湿度と乾燥収縮ひずみの進行の研究, 土木学会第66回年次学術講演会, pp.899-900, 2011
- 2) 齊藤賢治, 東 邦和, 石井敏之, 三澤孝史: 覆工コンクリートの養生装置の適用と乾燥収縮挙動, 土木学会第68回年次学術講演会, pp.437-438, 2013
- 3) 「構造物表面のコンクリート品質と耐久性検証システム研究小委員会(335委員会)成果報告書およびシンポジウム講演概要集」, 土木学会, コンクリート技術シリーズNo.80, 2008.4
- 4) 堀部 謙, 森川友博, 中村恭香, 森本博昭: コンクリート中の水分移動解析手法について, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, 2004
- 5) マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008, (社)日本コンクリート工学会, 2008.11