

保湿・保温養生マットの適用による 覆工コンクリートの養生効果

Effectiveness of Wet and Warm Insulation Mats for Curing Tunnel Lining Concrete

石井敏之* 東 邦和* 真嶋敏之** 森 良弘**

要 旨

山岳トンネルの覆工コンクリートは、表層部の緻密化やひび割れ発生の抑制を行なうことによって、耐久性の向上および長寿命化が図られている。その方策として、いろいろな養生方法が提案、実施されているが、養生効果については十分な検証がなされていない。そこで、覆工コンクリートの養生に、保湿・保温養生マットを適用したトンネル新設工事において、その養生効果を検証するために、養生の有り無しの区間を設けて計測を実施した。養生マットの適用により、覆工コンクリートは保湿・保温された養生環境に保たれ、その結果、強度や透気性能の向上および内部ひずみの低減などが確認でき、覆工コンクリート表層部の耐久性が向上していることを検証した。

キーワード：覆工コンクリート、保湿・保温養生、耐久性、緻密化、ひび割れ抑制

1. まえがき

山岳トンネルの覆工コンクリートは、表層部の緻密化やひび割れ発生の抑制などを行なうことによって、耐久性の向上および長寿命化を図られることが多い。その方策として、施工規模や環境条件などを考慮したいろいろな覆工コンクリートの養生方法が提案され、散水養生¹⁾、アクティブ加温・湿潤養生²⁾、移動式シート養生³⁾などを実施してきた。しかし、その養生効果については、室内試験を基に評価されたものが多く、現場計測から養生効果を定量的に検証したものは、まだ少ない。

観音坂トンネル新設工事では、覆工コンクリートの養生に、保湿・保温養生マット（以下、養生マットと称す）を適用した。その養生効果を検証するために、覆工コンクリートの施工時に、養生無しのブロック（以下、BL と称す）と養生有りの BL を設け、湿度、温度、ひずみ、強度、透気係数などの各種計測を実施した。

本報では、適用した養生方法の概要と養生効果の検証を目的に実施した各種計測の結果について述べる。

2. トンネルの概要

計測を実施したトンネルは、滋賀県の県道間田長浜線補助道路整備工事における「観音坂トンネル」である。このトンネルは、旧トンネルの幅員が狭く老朽化が著しいため、利便性・安全性向上のために新たに整備される

ものである。

同トンネルは、NATM で施工される全長 531m、幅員 10.75m（車道 2 車線、自転車歩行者道）の道路トンネルである。トンネルの標準断面を図-1 に示す。トンネルの内空断面積は約 65m² で、覆工コンクリートの厚さは 300mm（坑口付近は 350mm）である。覆工コンクリートの種類は 24-15-40BB で、配合を表-1 に示す。

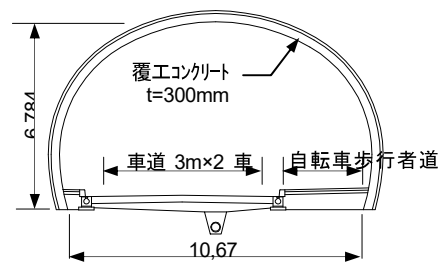


図-1 トンネル標準断面

表-1 覆工コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)							
		W	C	S1	S2	G1	G2	G3	Ad
54.9	44.5	157	286	570	246	312	312	416	2.97

C : 高炉セメント B 種、密度 3.15g/cm³
 細骨材混合比 S1 : S2=70 : 30
 S1 : 揖斐川産粗砂、密度 2.61g/cm³、吸水率 1.89%
 S2 : 揖斐川産中砂、密度 2.61g/cm³、吸水率 1.40%
 粗骨材混合比 G1 : G2 : G3=30 : 30 : 40
 G1 : 揖斐川産 2015、密度 2.67g/cm³、吸水率 1.44%
 G2 : 揖斐川産 1505、密度 2.66g/cm³、吸水率 1.31%
 G3 : 揖斐川産 4020、密度 2.66g/cm³、吸水率 1.22%
 Ad : AE 減水剤 標準型 (I 種)

*技術研究所 **西日本支社土木第2部

3. 養生方法

覆工コンクリートの養生は、**写真-1**に示すように、外周に養生マットを固定した養生枠フレーム（長さ=5.25m/台）6台を、覆工コンクリート表面に密着固定させて、7日間の保湿・保温を実施した。

養生枠フレームの移動と設置方法は、**写真-2**に示すように、最後尾の養生枠フレームを取り外し、移動台車に車載して前方のセントル後方位置まで移動させる。次に、セントルの脱型前進後に、運搬してきた養生枠フレームを、移動台車から覆工コンクリート表面に押し付け、周方向の下端からジャッキベースで押し上げ、養生マットを覆工コンクリート表面に密着固定させる。なお、養生枠フレーム1台の長さは5.25mであり、1回の養生作業で養生枠フレームを2台移動させる。また、養生枠フレーム移動時に、養生マットの湿潤層へ散水することによって、養生マットへの給水を行なった。

用いた養生マットの外観と断面を**図-2**に示す。養生マットは、保温層（ $t=1.3\text{mm}$ ）と保温層（ $t=10\text{mm}$ ）からなる2層構造で、初期保水量が $1,300\text{g/m}^2$ 、湿潤状態での総重量が $1,900\text{g/m}^2$ である。

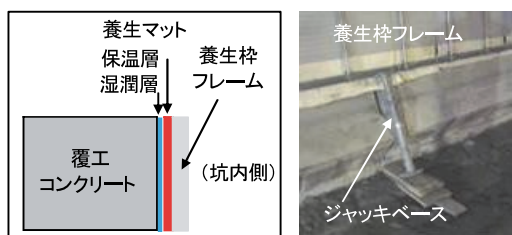


写真-1 覆工コンクリートの養生状況

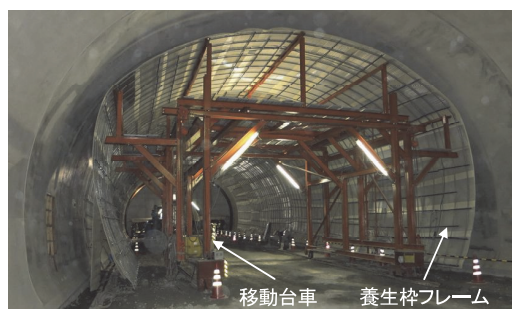


写真-2 移動台車による養生枠フレームの移動

4. 計測方法

4.1 計測位置

計測した覆工コンクリートのBLは、**図-3**に示すように、養生を行なうNo.32の養生有りBLと養生を行わないNo.35の養生無しBLの2箇所である。BLでの計測位置は、**図-4**に示すように、BL長 $L=10.5\text{m}$ の中央位置断面のスプリングラインである。また、コア採取を目的に、養生有り無しの別置き試験体（幅 $500\times$ 高さ $500\times$ 厚さ 300mm ）を、BL近傍で1体ずつ作製した。

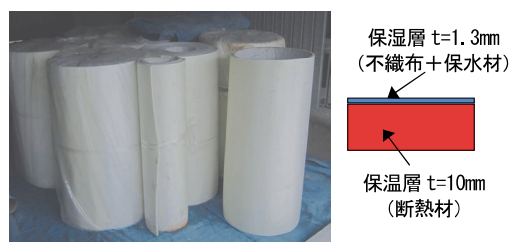


図-2 養生マットの外観と断面

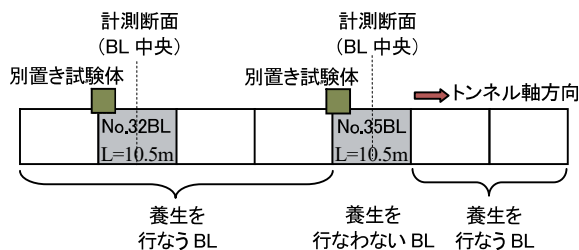


図-3 計測BL位置

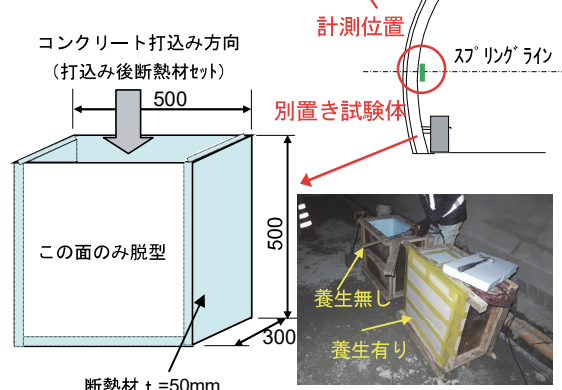


図-4 計測器の配置

4.2 計測項目

計測項目を表-2に示す。計測項目は、養生有り BL と養生無し BL において、覆工コンクリート内部のひずみ、温度、含水率、および覆工コンクリート表面の温度・湿度、含水率、反発度、透気係数である。更に、別置き試験体では、コア採取による圧縮強度と細孔径分布を計測した。計測間隔は、ひずみ、温度・湿度については打設開始から8週まで(10分毎に自動計測)、含水率、反発度については打設後1週、2週、4週、8週(手動計測)とした。また、透気係数の測定間隔は、打設後4週、8週に、別置き試験体のコア採取による圧縮強度と細孔径分布は、打設後1週、4週とした。

表-2 計測項目

計測箇所	計測項目	計測機器	
トンネル坑内	温度・湿度	温湿度計1台	
養生を行なう 区間 (No. 32BL)	覆工 内部	ひずみ	ひずみ計(軸&周方向) 深さ 30, 75, 150mm
		温度	熱電対 深さ 30, 75, 150mm
		含水率	電気抵抗式水分計 深さ 30, 50, 75, 100, 125, 150mm
養生を行わない 区間 (No. 35BL)	覆工 表面	温度・湿度	温湿度計1台 (覆工コンクリート面)
		温度・湿度	温湿度計1台 (養生シート面)
		含水率	高周波容量式水分計
		反発度	テストハンマー
		透気係数	トレント法
別置き 試験体	圧縮強度	φ100 コア圧縮試験	
	細孔径分布	水銀圧入法 深さ 30mm	

5. 計測結果

5.1 湿度・温度

養生有り BL での覆工コンクリート表面の湿度と温度を図-5に示す。

養生有り BL での覆工コンクリート表面と養生マット間の湿度(コンマツ間湿度)は、養生開始直後(打設開始から26時間後)約90%RHであったが、養生開始からの約2時間後には100%RHになり、養生期間中(打設開始から28~218時間)は100%RHを保持した。一方、坑内側の養生マット面(マット内空面湿度)の養生期間中の湿度は、坑内湿度履歴と同様な傾向を呈し、55~100%RHで変動した。

養生有り BL での覆工コンクリート表面と養生マット間の温度は、後述する覆工コンクリート内部の温度履歴と同様な傾向を呈し、また、坑内側の養生マット面の温度は坑内温度履歴と同様な傾向を呈した。

養生有り BL と養生無し BL での覆工コンクリート内部の温度を図-6に示す。

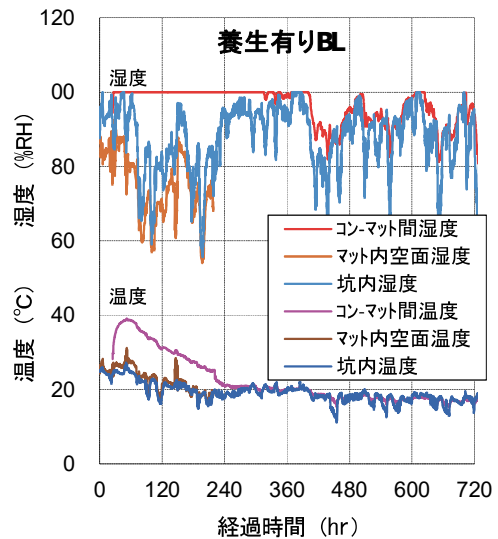


図-5 覆工コンクリート表面の湿度・温度

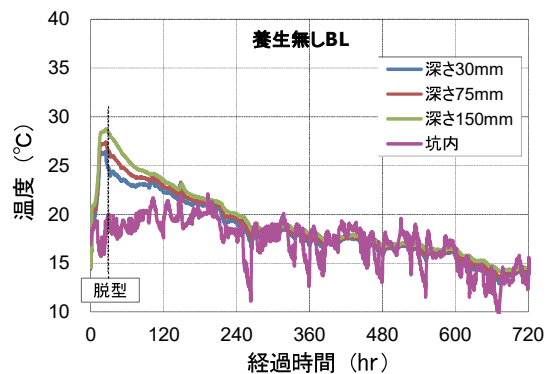
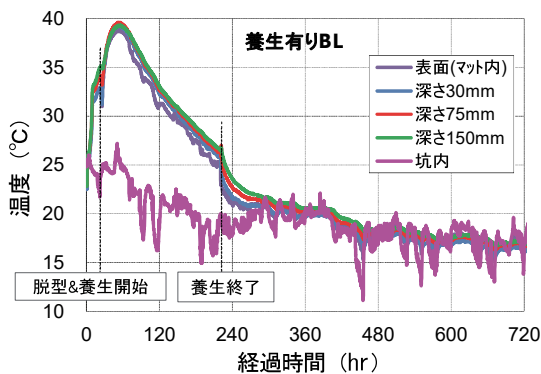


図-6 覆工コンクリート内部の温度(左:養生有りBL 右:養生無しBL)

養生有り BL の覆工コンクリート打設時の坑内温度は約 24℃で、セントル脱型直後（打設開始から 24 時間後）の覆工コンクリート表面温度は約 31~33℃で、打設開始から約 9℃上昇した。養生開始から覆工コンクリートの温度は再び上昇し、打設開始から 51.5 時間後にピーク温度 39℃となった。その後、覆工コンクリートの温度は、養生終了時（打設開始から 216 時間後）まで低下し約 26℃となった。養生終了後の温度は、養生期間中よりも温度低下が早くなり、打設開始から約 300 時間後には坑内温度とほぼ等しくなった。

一方、養生無し BL の覆工コンクリート打設時の坑内温度は約 18℃で、セントル脱型直後の覆工コンクリート内部の温度は約 26.5~29℃であった。打設開始から脱型時までの温度上昇は約 9℃で、養生有り BL と同程度の温度上昇であった。しかし、脱型後養生を行なわなかったため、覆工コンクリートの温度は脱型直後から低下し、約 200 時間後に坑内温度の 20℃とほぼ等しくなった。

養生中の覆工コンクリート深さ方向の温度差は、養生有り BL で表面と内部とで最大 1℃で、深さ 30~150mm ではほとんど温度差が見られなかった。養生無し BL での内部温度差は、最大で、深さ 30~75mm で約 2.5℃、75~150mm で約 2.0℃であった。

これより、保湿・保温養生によって、覆工コンクリート表面は、湿度が 100%RH で、表面から内部深さ方向への温度勾配が小さくなり、コンクリートの養生に適した環境が確保されていることが確認できた。

5.2 含水率

養生有り BL と養生無し BL での覆工コンクリートの含水率測定結果を図-7に示す。含水率の測定には、覆工コンクリートの表面を高周波容量式、内部を電気抵抗式の水分計を用いた。

養生有り BL での含水率は、打設開始後 4 週経過（約 670 時間経過で養生終了後 3 週）しても、覆工コンクリートの表面から深さ 150mm まで湿潤な状態と考えられる 6%以上に保持されている。8 週経過後に表面の含

水率は低下し 6%未満となるが、30mm 以深では 6%以上であった。養生無し BL の含水率は、打設開始後 1 週経過で表面から低下する傾向が見られ、8 週経過で表面が 4.8%で、深さ 75mm 以浅では 6.0%以下となった。

これらより、保湿・保温養生によって、覆工コンクリートの表層部は長期にわたって湿潤状態に保持され、その結果、水和反応が促進され、覆工コンクリートの表層部が緻密になる環境が保持されていると考えられる。

5.3 反発度・圧縮強度

テストハンマーによる反発度より求めた換算圧縮強度を図-8に、別置き試験体から採取したコアによる圧縮強度を図-9に示す。

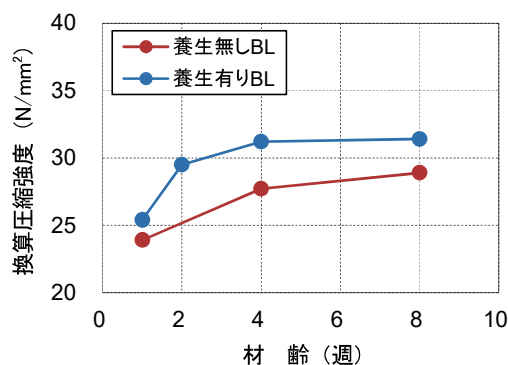


図-8 テストハンマーによる換算圧縮強度

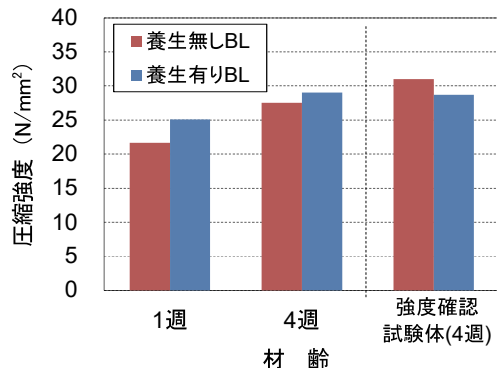


図-9 採取したコアの圧縮強度

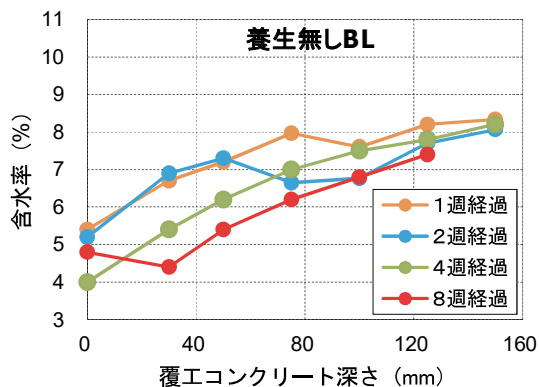
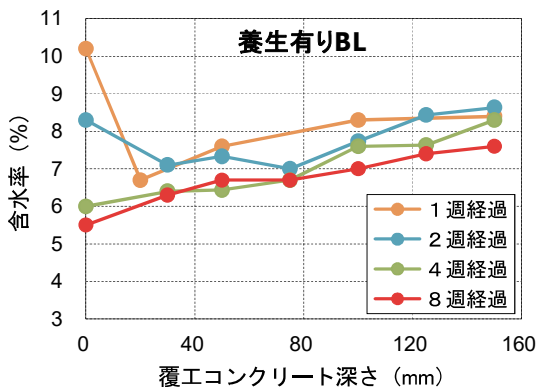


図-7 覆工コンクリートの含水率 (左：養生有り BL 右：養生無し BL)

養生有り BL の覆工コンクリートの強度は、養生無し BL に比して 5~15%程度大きくなり、材齢 4 週で、同じ BL での強度確認試験体（標準養生）と同程度になった。また、強度確認試験体に対する強度発現の比率は、養生を行なった方が養生を行なわない場合に比して、材齢 1 週で 1.24 倍、材齢 4 週で 1.13 倍となった。

養生有りの覆工コンクリートの強度は、養生無しに比較して、強度発現が大きかつ早くなり、材齢 4 週でほぼ強度確認試験体の強度と同程度になった。これは、保湿・保温養生を行なうことにより、覆工コンクリート表層部の水和反応が促進され、組織が緻密になったためと考えられる。

5.4 透気係数

透気試験とは、ダブルチャンバー構造を有する真空セルで覆工コンクリートの表面から空気を吸引することによって、深さ方向の透気係数を測定するものである。透気係数を基に、覆工コンクリート表層の透気性品質⁴⁾を表-3によって評価した。透気係数を図-10に示す。

透気係数は、養生有り BL で $0.4\sim 0.8 \times 10^{-16} m^2$ 、養生無し BL で $2\sim 3 \times 10^{-16} m^2$ となった。また、透気性品質の評価は、養生有り BL で透気グレード 3（一般）、養生無し BL では透気グレード 4（劣）となった。また、透気係数は中性化深さと高い相関があり、浸透塩分量とも良い相関があるといわれている。

これらより、保湿・保温養生を行なうことによって、覆工コンクリートの透気係数が小さくなり、透気性グレードも向上した。更に、透気性品質の向上により、有筋部覆工コンクリートの中性化および塩害の抵抗性も向上すると考えられる。

表-3 透気係数による透気性の評価

透気係数 ($\times 10^{-16} m^2$)	0.001 ~ 0.01	0.01 ~ 0.1	0.1 ~ 1	1 ~ 10	10 ~ 100
透気性グレード	1	2	3	4	5
透気性評価	優	良	一般	劣	極劣

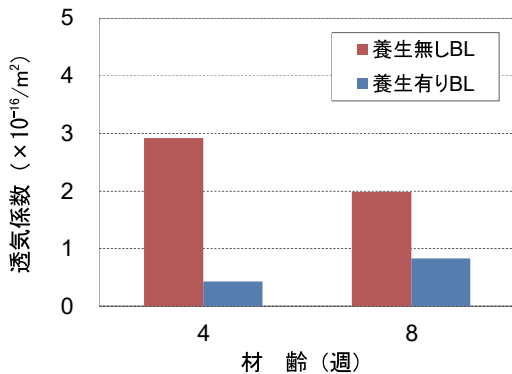


図-10 覆工コンクリートの透気係数

5.5 細孔径分布

細孔径分布試験の試料には、別置き試験体からコア採取した圧縮強度試験体の深さ 30mm 位置から切り出した試料片を粉砕したものをを用いた。粉砕した試料をアセトンにより水和反応を停止させ、真空乾燥を行なった後、測定範囲 3nm~180μm の水銀圧入式ポロシメータで細孔径の分布を測定した。累積細孔容量を図-11に、細孔径分布を図-12に示す。

養生有り BL の累積細孔容量は材齢 1 週で 0.129mL/g、4 週で 0.119mL/g で、養生無し BL では材齢 1 週で 0.139mL/g、4 週で 0.127mL/g となった。養生無し BL の方が材齢に係わらず累積細孔容量が 7%程度多くなっていた。また、細孔径分布において、細孔径 100nm~2μm の範囲で、養生無し BL の細孔容量は養生有り BL に比して多く存在している。

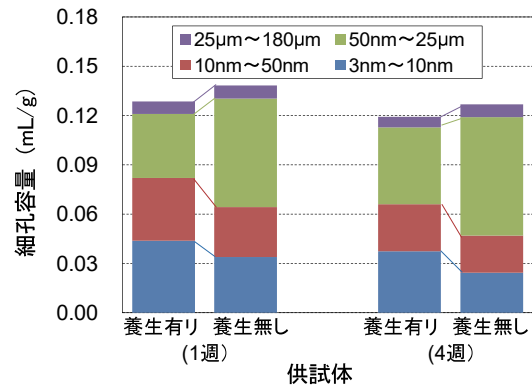


図-11 累積細孔容量

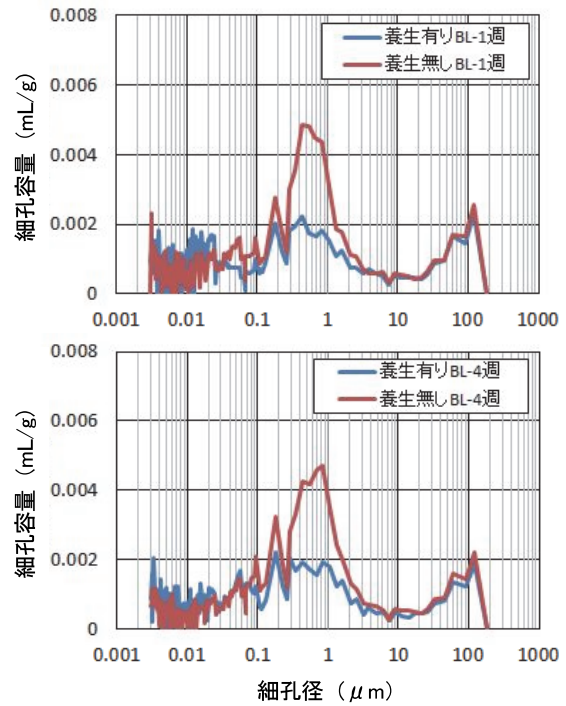


図-12 細孔径分布 (上: 材齢 1 週 下: 材齢 4 週)

これらのことから、覆工コンクリートは、保湿・保温養生によって、水和反応が促進され、コンクリート強度に影響を及ぼすといわれている毛細管空隙のうちの比較的大きな 50nm~25μm が少なくなり、この空隙が水和反応によって生成された水和生成物で充足され、10nm以下のゲル空隙にシフトし、より緻密なコンクリートになったと考えられる。

5.6 覆工コンクリートの内部ひずみ

養生有り BL と養生無し BL での覆工コンクリート内部の実ひずみの測定結果を図-13 に示す。

軸方向と周方向のひずみを見ると、養生の有無および深さに関係なく、周方向の収縮ひずみが大きくなった。また、深さ 75mm および 150mm の収縮ひずみは、養生の有無に関係なく、 $-200 \sim -300 \times 10^{-6}$ 程度であった。これは、図-7 で示したように、深さ 75mm 以深において覆工コンクリートの含水率の減少が小さいため、乾燥収縮による発生ひずみに大きな差が見られなかったと考えられる。

一方、深さ 30mm の収縮ひずみは、養生無し BL の場合には、脱型後から大きくなり 240 時間経過で約 -300×10^{-6} で、深さ 75mm に比して 1.4 倍程度大きく、その後の増加も大きい。養生有り BL の場合には、養生終了後 1 週から深さ 75mm に比して大きくなり始め、1200 時間経過しても深さ 75mm に比して 1.2 倍程度であった。

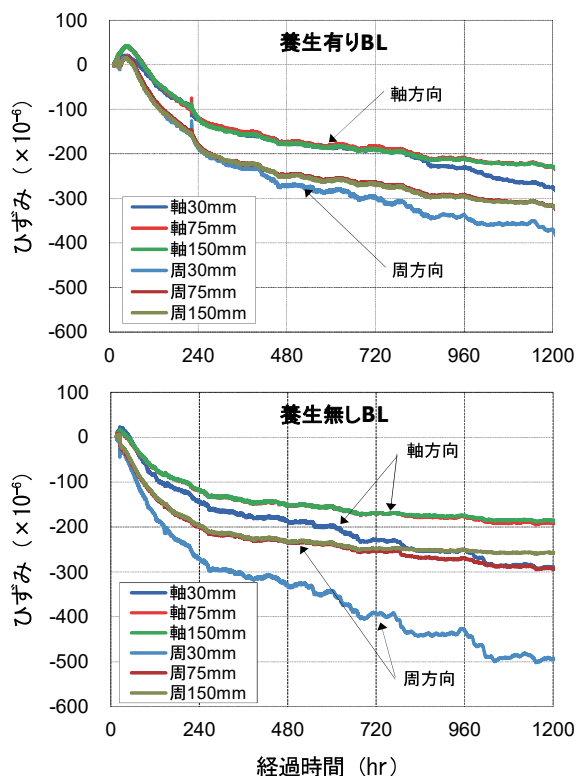


図-13 覆工コンクリートのひずみ
(上：養生有り BL 下：養生無し BL)

これは、養生無しの場合には、覆工コンクリートの含水率が 1 週経過で既に表層部から減少しているため、早期に乾燥収縮によるひずみが発生したと考えられる。養生有りの場合には、2 週経過しても表面での含水率の低下がほとんど見られなかったため、深さ 30mm の表層部の収縮ひずみの発生が養生無しに比較して小さくなったと考えられる。

6. まとめ

覆工コンクリートの保湿・保温養生マットによる養生効果として、以下のことがわかった。

- i. 覆工コンクリートの養生環境は、湿度が 100%RH で内部が湿潤状態に保湿され、表面から内部への温度勾配が小さい状態で保温されたものとなる
- ii. 圧縮強度は、5~15%程度大きくなり、強度発現も早くなり、4 週経過で強度確認試験体（標準養生）と同程度になる
- iii. 透気性品質の向上（透気性グレードが 4 から 3）および約 7%の細孔容量の減少が図られ、コンクリート表層部の緻密化される
- iv. コンクリート表層部の乾燥収縮を抑制することができる

7. あとがき

保湿・保温養生マットによる養生により、覆工コンクリートの表層部は、緻密化されることによって耐久性の向上が図られ、また、湿潤状態が長く保持されることによって乾燥収縮によるひび割れを抑制できることを検証した。本検討を進めるに当たり、滋賀県長浜土木事務所のご指導を賜ったことを深く感謝する。

【参考文献】

- 1) 齊藤隆弘、安井啓祐、石津智史、東 邦和、「山岳トンネル覆工コンクリートにおける 28 日連続山水養生の効果」、土木学会第 68 回年次学術講演会 VI、pp.845-846、2013.9
- 2) 柴田匡善、齊藤隆弘、星野直則他、「覆工コンクリートのアクティブ湿潤・加温養生システムの効果」、土木学会第 68 回年次学術講演会 VI、pp.843-845、2013.9
- 3) 東 邦和、石井敏之、齊藤賢治、「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」、奥村組技術年報、No.37、pp.85-90、2013.9
- 4) R.J.TORRENT、「カバークリートの透気係数の迅速な決定方法」、土木工学における非破壊試験国際会議シンポジウム(NDT-CE)、pp.26-28、1995