

# トンネル覆工における中流動コンクリートの採用と効果検証 Medium fluidity concrete in tunnel linings adoption and effectiveness

目崎 浩二\*                      宮田 和実\*\*  
Koji Mesaki                      Kazumi Miyata  
河内 正道\*                      小宮 隆之\*\*\*  
Masamichi Kouchi              Takayuki Komiya

## 要 約

近年、トンネル覆工コンクリートの高品質、長寿命化が求められており、より良い品質の覆工コンクリートを構築するために中流動コンクリートを採用した。中流動コンクリートの優位性を確認するため、実コンクリート内に各種計測機器を設置してデータを集積し、解析結果との比較検証を行った。また、覆工コンクリート施工目地近傍に発生しやすい不具合を抑制するため、コンタクトゲージによる目地間計測を行い不具合発生メカニズムを推定し、その対策工を施した。さらに、養生方法の違いにより表面緻密性の良否を表面吸水試験 (SWAT) により検証した。

### 目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 中流動コンクリート配合
- § 3. 現場計測結果と解析結果との比較検証
- § 4. 覆工コンクリートの挙動計測
- § 5. ビニールシートによる養生効果の検証
- § 6. まとめ

### § 1. はじめに

国道 45 号小鍬地区トンネル工事は、三陸沿岸道路（釜石山田道路 L = 23.0 km）新設工事のうち、釜石北 IC から大槌 IC 間において鶴住居第 2 トンネル (L = 1445 m) と小鍬第 1 トンネル (L = 309 m) の 2 本のトンネルと小鍬高架橋下部工（橋台 1 基、橋脚 3 基）および道路改良工新設工事である。三陸沿岸道路は、宮城、岩手、青森の各県の太平洋沿岸を結ぶ全長 359 km の自動車専用道路であり、東日本大震災からの早期復興に向けたリーディングプロジェクトとなる復興道路となっている。しかし、復興道路は一時期に工事を行うことから、供用後の維持補修も一時期に集中する可能性があり、コンクリートの長期耐久化が必要不可欠となっている<sup>1)</sup>。

そこで、東北の山岳地帯の短いトンネルの課題である外気の通り抜けによる凍結防止剤散布による凍害、塩害への対策として、小鍬第 1 トンネルにおいて高炉セメン

ト B 種を用いた中流動コンクリートを採用し、コンクリート表面の密実化、耐塩害性および耐凍害性の向上を図る提案を行ない、試行工事として採用して頂いた。

中流動コンクリート配合は、標準配合に比べ単位セメント量が増加するため、温度ひび割れの発生が懸念されたことから、現場計測を行い挙動観測を行うとともに解析結果との比較を行なった。

また、覆工コンクリート施工目地近傍に発生しやすい不具合を抑制するため、コンタクトゲージによる目地間の挙動計測を行い、その対策工を施した。さらに、養生方法の違いによる表面緻密性の良否を表面吸水試験 (SWAT) により検証した。

### § 2. 中流動コンクリート配合

中流動コンクリートの配合は、鶴住居第 2 トンネルの覆工コンクリートで技術提案した収縮低減型高性能 AE 減水剤を用いた高炉セメント B 種配合（表-1）をベースに流動化剤を添加し、よりワーカビリティが高く充填性の高いものとした（表-2）。

表-1 標準配合（鶴住居第 2 トンネル）

呼び強度 $\sigma_{28}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	粗骨材の 最大寸法 [mm]	スランプ [cm]	空気量 [%]	水セメント比 W/C [%]	細骨材率 S/a [%]	単位量 [kg/m <sup>3</sup> ]				水和剤 【収縮低減型高性能 AE 減水剤】
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	
24	20	15	4.5	51.0	54.0	155	304	1,013	871	4.26 (0×1.4%)

\* 北日本(支)小鍬トンネル(出)

\*\* 北日本(支)小鍬トンネル(出)(現:土木設計部設計三課)

\*\*\* 土木設計部設計一課

表－2 中流動配合（小鏈第1トンネル）

呼び強度 $\sigma_{28}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	粗骨材の 最大寸法 [mm]	スラブ フロー [mm]	空気量 [%]	水セメント比 W/C [%]	細骨材率 S/a [%]	単位量 [kg/m <sup>3</sup> ]					
										水和剤	
						水	セメント	細骨材	粗骨材	高性能	流動化剤
W	C	S	G								
24	20	42.5	5.5	45.6	55.0	155	340	994	825	4.76 (C×1.4%)	1.53 (C×0.45%)

§3. 事前解析と室内試験および現場計測の検証

3-1 中流動コンクリートの事前温度応力解析<sup>2)</sup>

隣接する鶉住居第2トンネルの覆工コンクリートでは、温度ひび割れが確認されなかった。解析手法の妥当性を検証するために事後解析を行い、ひび割れ指数を確認した。その結果、ひび割れ指数は1.0程度であり、ひび割れ発生確率は50%程度であった。

単位セメント量が36 kg/m<sup>3</sup>増加する小鏈第1トンネルの中流動コンクリートは、事前解析の結果、ひび割れ発生確率はDI(CII)断面で65%、DIII断面で68%となった(表-3)。そこで、ひび割れ幅を0.2 mm以下に抑制するため、予防措置として補強鉄筋を追加した。

表－3 中流動コンクリートの事前解析

	セメントの種類	最小ひび割れ指数	ひび割れ発生確率 (%)	鉄筋量		ひび割れ幅 (mm) ※1	
				現況	補強鉄筋		
DI	標準案	BB	1.02	47	—	—	—
	中流動 Con	BB	0.91	65	—	—	—
	中流動 Con + 補強鉄筋	BB	0.91	65	—	D19@150	0.17 O.K.
DIII	標準案	BB	0.98	53	D19@300	—	0.36 N.G.
	中流動 Con	BB	0.89	68	D19@300	—	0.39 N.G.
	中流動 Con + 補強鉄筋	BB	0.89	68	D19@300	D19@300	0.19 O.K.

※1 許容ひび割れ幅  $W_{ca}=0.2\text{mm}$   
 なお、補強鉄筋の設置範囲は、SLから下側の1550mmの範囲とする。

3-2 室内試験および現場計測

中流動配合では、単位セメント量が標準配合に比べ多いため、温度応力ひび割れの発生が懸念されるが、解析時に必要な各種パラメータ値に不明な点が多かった。そのため、中流動配合に対して、表-4に示す室内試験、表-5に示す現場計測を実施した。

3-3 現場計測の実施断面と計測機器の設置

小鏈第1トンネルにて実施した現場計測断面と計測機器の設置位置を図-1に示す。

3-4 室内試験結果

(1) 圧縮強度

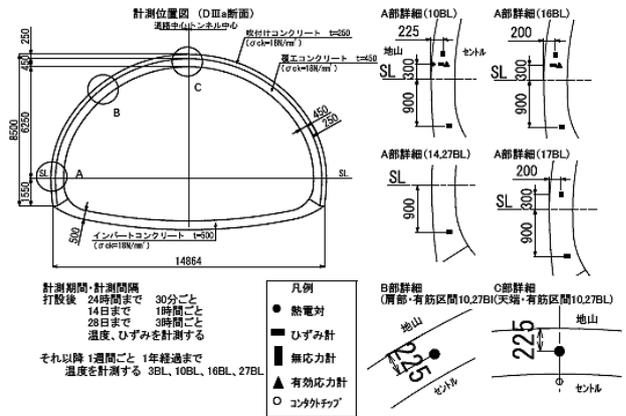
コンクリート材齢28日の圧縮強度は、標準配合で38.6 N/mm<sup>2</sup>、中流動配合で42.7 N/mm<sup>2</sup>であった(図-2)。

表－4 室内試験一覧

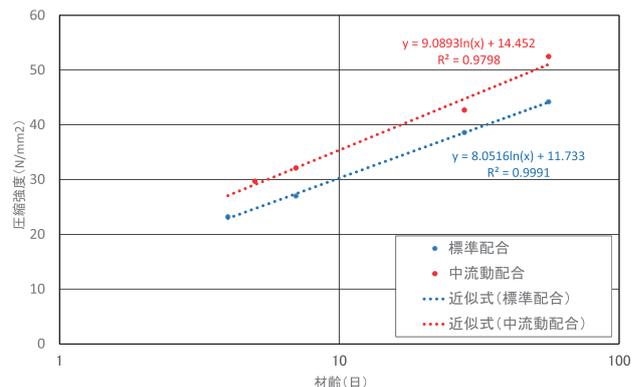
確認・試験項目	求めるパラメータ	目的
圧縮強度試験及び弾性係数試験 JIS A 1149:2010	圧縮強度 ヤング係数の確認	温度応力を計算する時に必要なコンクリートの有効ヤング係数を求める
割裂引張強度試験 JIS A 1113:2006	引張強度の確認	ひび割れ指数の算定に用いるコンクリートの引張強度を求める
長さ変化試験 JIS A 1129-3	乾燥収縮特性の確認	乾燥収縮ひずみの影響を考慮するために、長さ変化試験を行い、長さ変化率を求める。求めた乾燥収縮ひずみは、コンクリートの応力を求める際に全ひずみから差し引いて有効ひずみを求める
コンクリートの凝結試験 JIS A 1147	自己収縮ひずみ起点の確認 コンクリートの凝結始発時間	自己収縮ひずみを求める推定式に用いる凝結の始発時間を求める
熱膨張率測定試験	純粋な熱膨張率の確認	コンクリート温度と内部ひずみの関係から熱膨張係数を求める
断熱温度上昇試験	断熱温度上昇特性の確認	コンクリートの断熱温度上昇特性は、セメントの種類、配合、骨材の岩種等で変化するため、実際に使用する材料を用いて測定する

表－5 現場計測一覧

計測断面	支保工ライン	配合	打設日	補強筋	養生期間	計測機器				
						有効応力計	ひずみ計	無応力容器	ひずみ計	熱電対
17BL	C II	中流動	7月22日	有	20時間	—	○	○	○	—
16BL	C II	標準	7月24日	無	20時間	○	○	○	○	—
14BL	C II	中流動	7月29日	無	20時間	—	—	○	○	—
10BL	D III	中流動	8月10日	有	20時間	○	○	○	○	○
27BL	D III	中流動	11月18日	有	20時間	—	—	○	○	○



図－1 現場計測断面と計測機器の設置位置



図－2 圧縮強度の比較

(2) 静弾性係数

コンクリート材齢28日の静弾性係数は、標準配合で31.5 N/mm<sup>2</sup>、中流動配合で32.2 N/mm<sup>2</sup>であった(図-3)。

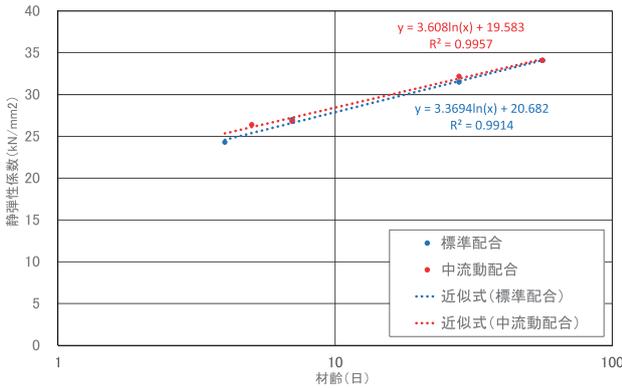


図-3 静弾性係数の比較

(3) 割裂引張強度

コンクリート材齢28日の割裂引張強度は、標準配合で2.66 N/mm<sup>2</sup>、中流動配合で2.99 N/mm<sup>2</sup>であった(図-4)。

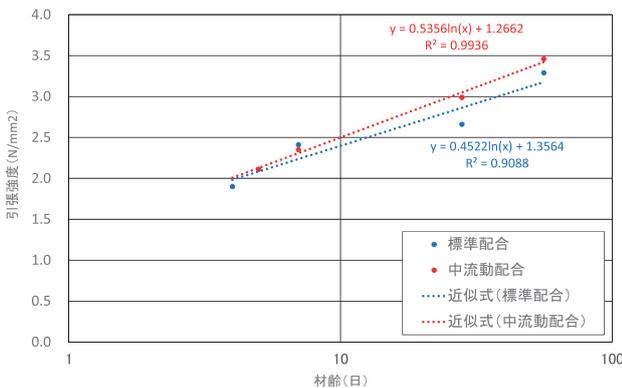


図-4 割裂引張強度の比較

(4) 断熱温度上昇特性

中流動配合の最大温度上昇量は47.2℃であり、標準配合と比べて3.6℃高い結果となった(図-5)。

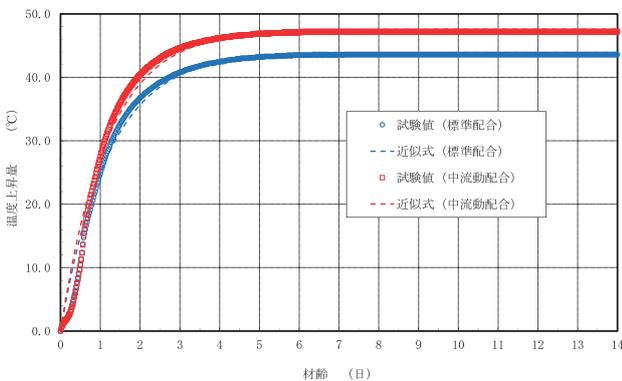


図-5 温度上昇量の比較

3-5 現場計測結果

(1) コンクリート温度

SL + 300位置での中流動配合のコンクリート最高温度は、46.6℃であり、標準配合と比べて5~8℃程度高

い結果となった(図-6)。

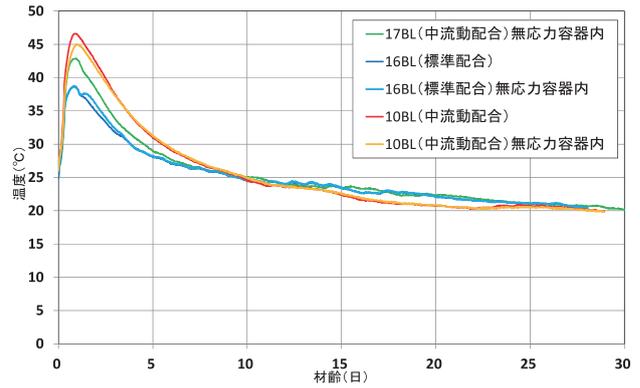


図-6 コンクリート温度履歴の比較

(2) コンクリートの実ひずみ

中流動配合10BLおよび27BLのSL-900での値以外は、同様の傾向を示し、標準配合と中流動配合の違いは少ない結果となった(図-7)。

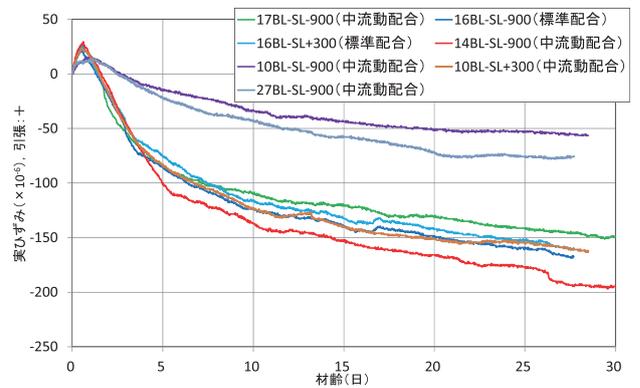


図-7 コンクリート実ひずみ履歴の比較

(3) コンクリートの有効ひずみ

コンクリートの有効ひずみは、実ひずみから無応力容器内のひずみを差し引いたものである(図-8)。10BLの中流動配合の有効ひずみは、材齢28日で約110 × 10<sup>-6</sup>であり、16BLの標準配合と比べて約100 × 10<sup>-6</sup>程度、引張側で大きい結果となった。

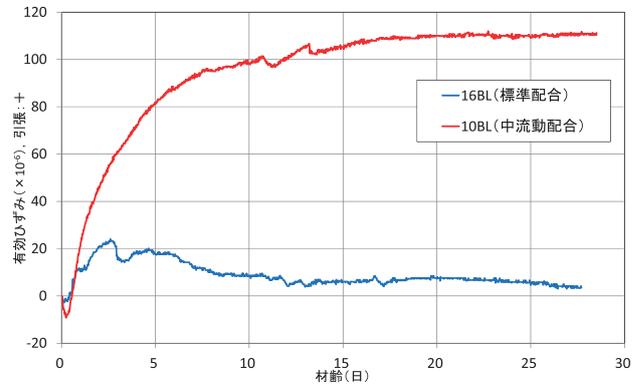


図-8 コンクリート有効ひずみ履歴の比較

(4) コンクリートの有効応力

コンクリートの有効応力は、以下に示す2種類の計測値から求めることができる。

- ・計測値 (1) : 有効ひずみ×静弾性係数
- ・計測値 (2) : 有効応力計

計測値 (1)

計測値 (1) は、コンクリートの引張応力を各時刻のコンクリート有効ひずみに室内試験から求めた静弾性係数の試験値に掛け合わせて、引張応力  $\sigma_t$  の時刻歴を求めた (図-9)。

また、室内試験から求めた引張強度  $f_t$  と計算値 (1) から、ひび割れ指数  $I_{cr} = f_t/\sigma_t$  を求めた。標準配合のひび割れ指数は3.5程度、中流動配合のひび割れ指数の最小値は0.9程度となった (図-10)。

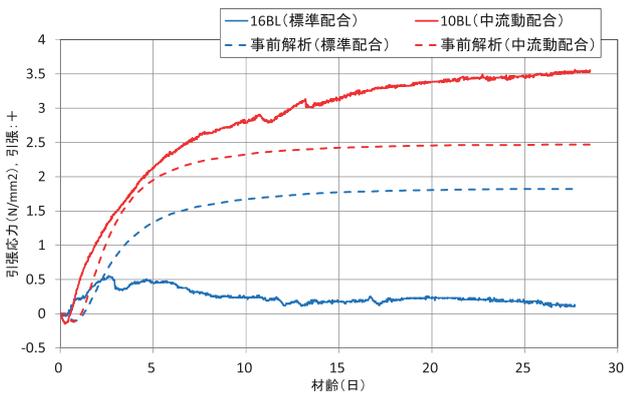


図-9 コンクリート引張応力 (計測値 (1))

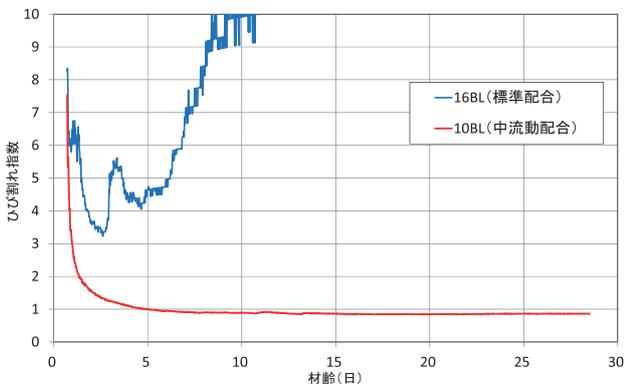


図-10 ひび割れ指数 (計測値 (1))

計測値 (2)

計測値 (2) は、コンクリートの有効応力計から求めた引張応力  $\sigma_t$  である (図-11)。中流動配合の有効応力は約  $0.9 \text{ N/mm}^2$  であり、標準配合の約  $0.5 \text{ N/mm}^2$  と比べて大きい結果となった。

また、室内試験から求めた引張強度  $f_t$  と計測値 (2) から求めたひび割れ指数 ( $I_{cr} = f_t/\sigma_t$ ) は、標準配合で4.8程度、中流動配合で3.0程度となった (図-12)。

表-6に最小ひび割れ指数の比較を示す。最小ひび割れ指数は事前解析の値と比べ、計測値 (1) の中流動配合以外は、3倍～5倍程度大きい値となった。なお、事前解析で使用している引張強度は、室内試験から求めた引張強度とは異なっていることに留意が必要である。

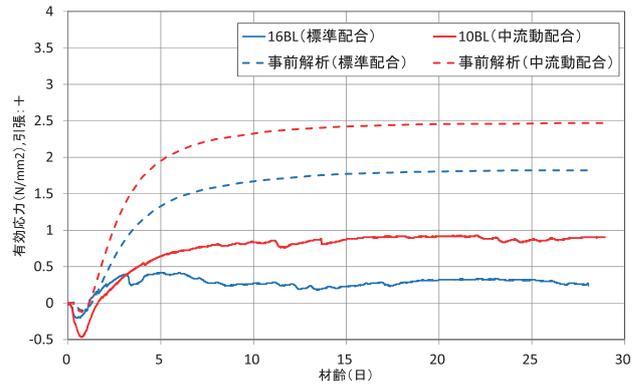


図-11 コンクリート引張応力 (計測値 (2))

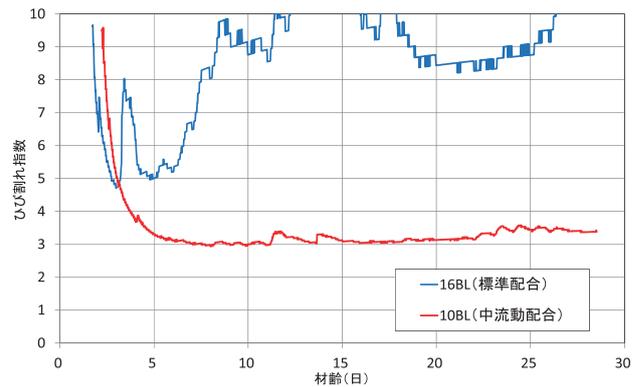


図-12 ひび割れ指数 (計測値 (2))

表-6 最小ひび割れ指数の比較

	事前解析	計測値(1)	計測値(2)
標準配合	1.02	3.2	4.8
中流動配合	0.89	0.9	3.0

\*計測値(1)は有効ひずみから、計測値(2)は有効応力から、ひび割れ指数を求めたもの。

§4. 覆工コンクリートの挙動実測<sup>3)</sup>

4-1 コンタクトゲージによる目地間計測

NATM工法における覆工コンクリートは、施工目地の近傍に不具合が生じる可能性が高いのが現状であり、不具合を抑制するための対策を考案し実践した。不具合発生メカニズムは、後打ちコンクリートの打込み後、コンクリートの温度や収縮による体積変化により、後打ちコンクリートと既設(先打ち)コンクリートが離れる方向に変形する。

このことから、コンクリート間に付着が存在する場合、コンクリート内部の弱点部に沿ってひび割れが発生し、浮きにつながると考えられる (図-13)。そこで、コンタクトゲージで隣り合う二つのブロック間の目地の開きを計測した。二つの目地ともに同様の挙動を示しており、材齢20日程度で2～3mm程度の開きが生じることが分かった (図-14)。

目地部不具合の対策工1として、目地部にビニールシートを設置し、既設のコンクリートとの縁を完全に切り、拘束を無くす対策を施した(図-15)。使用したビニールシートは厚さ0.2mmの薄手のフィルムシートであり、安価で入手も容易である。セントル脱型後、既設の覆工コンクリートの棲部に貼り付ける。この際、後打ちコンクリートが既設のコンクリートに直接触れないよう取り付ける必要がある。ビニールシートの端部は目地に沿わせてセントル外部へ出し、後打ちコンクリートに巻き込まないように注意が必要である(写真-1)。

対策工2として、棲板の一部を鋼板とした。通常セントルの棲型枠については木矢板を使用するのが一般的である。しかし、施工する作業員の技量等によって、木矢板の隙間がばらついたり段差が生じたりする。これにより、コンクリート棲部に凹凸が発生し後打ちのコンクリートとの間に付着力が生じやすくなると考えられる。そこで、棲部のダミージョイントに合わせてW=200mmの鋼板を設置し、棲部コンクリートの仕上がり面を平滑になるようし、拘束しにくくなるよう工夫した(写真-2)。



写真-1 ビニールシート対策状況 (対策1)



写真-2 鋼板設置対策状況 (対策2)

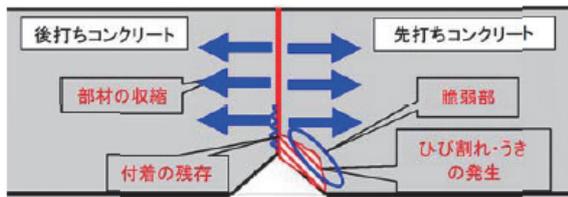


図-13 施工目地部の不具合発生メカニズムの推測

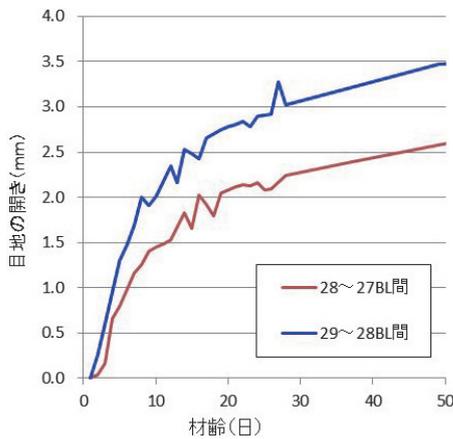


図-14 コンタクトゲージによる目地の開き計測

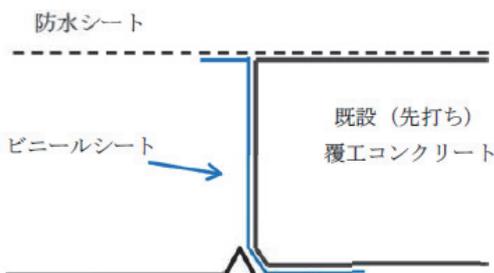


図-15 ビニールシートによる対策概念図

§ 5. ビニールシートによる養生効果の検証

トンネル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は、適正な養生を行う必要がある。養生方法には様々な方法があるが、鶺住居第2トンネルでは上半部は『うるおい』による7日間養生を行い、下半部はビニールシートによる長期養生を行った(写真-3)。表面吸水試験(SWAT)により養生効果の確認試験を行ったところ、ビニールシートによる長期養生箇所が吸水速度が小さく、優れた緻密性が得られた。このことから、小袋第1トンネルでは覆工コンクリート表面を全面ビニールシートで養生を行うこととし、表面吸水試験(SWAT)により養生効果の検証を行った(写真-4)。



写真-3 うるおい+ビニールシート養生 (鶺住居第2トンネル)

検証方法は、全面シート張を行った後に、窓状にくり抜き養生ありと養生なし箇所の比較を行った（図-16、表-7、表-8）。

表-7および表-8より、ビニールシートによる養生効果が非常に高く、また通常配合よりも中流動コンクリートの表面性能が高いことが分かった。



写真-4 全面ビニールシート養生  
(小鍬第1トンネル)

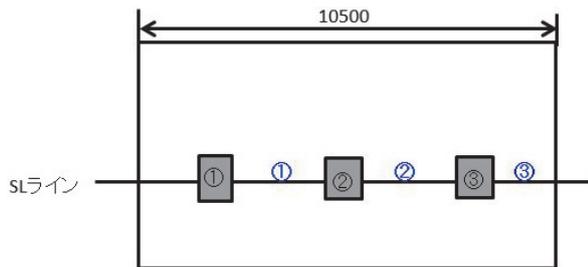


図-16 SWAT計測位置図

§6. まとめ

- (1) 実現場の覆工コンクリートを使用して各種データを計測することで、解析とは違う実際の挙動が確認できた。
- (2) 今回の現場計測により、計測値から求めたひび割れ指数は事前解析と比べて、大きく異なる傾向が見られ、解析条件の見直しが必要となった。
- (3) 中流動配合コンクリートを採用することで、標準配合コンクリートよりも表面の緻密性が高いコンクリートを構築することが可能となった。

表-7 SWAT計測結果(中流動配合)

覆工 12BL(中流動配合)							
計測No.	①		②		③		平均
養生シート	有り		有り		有り		
計測位置	左	右	左	右	左	右	
表面水率 (%)	4.6	4.6	4.5	4.4	4.5	4.4	4.5
吸水速度 (ml/m <sup>2</sup> /s)	0.166	0.061	0.113	0.067	0.120	0.156	0.114
計測No.	①		②		③		平均
養生シート	無し		無し		無し		
計測位置	左	右	左	右	左	右	
表面水率 (%)	4.5	4.4	4.2	4.1	4.2	4.3	4.3
吸水速度 (ml/m <sup>2</sup> /s)	0.218	0.355	0.294	0.591	0.350	0.407	0.369

養生シート：ビニールシート

表-8 SWAT計測結果(標準配合)

覆工 16BL(標準配合)							
計測No.	①		②		③		平均
養生シート	有り		有り		有り		
計測位置	左	右	左	右	左	右	
表面水率 (%)	5.1	5.0	4.9	5.1	4.8	4.8	5.0
吸水速度 (ml/m <sup>2</sup> /s)	0.118	0.132	0.012	0.025	0.226	0.218	0.122

養生シート：ビニールシート

- (4) 覆工コンクリートの挙動を実測することで、不具合発生メカニズムの解明に役立てられた。
- (5) 簡易的なビニールシートによる養生により、コンクリート表面の緻密性に改善効果が見られ、さらに中流動コンクリートの表面性能が高くなることが分かった。

参考文献

- 1) 国土交通省東北地方整備局：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
- 2) 西松建設(株)：覆工コンクリートの温度ひび割れに関する報告書，2015
- 3) 宮田和実・目崎浩二・河内正道・細田暁：NATMトンネル覆工コンクリートの施工目地近傍の変状の抑制対策，日本コンクリート工学会論文集，2016