報告　部分パイプクーリングおよびシート吸引方式給水養生による坑口付近覆工コンクリートの劣化抑制

白岩　誠史[*1]・栗原　浩彦[*2]・三沢　良太[*2]・谷口　翔[*2]

要旨：坑口付近の覆工コンクリートの劣化を抑制し，耐久性を向上させるために，インバートの拘束に起因する温度ひび割れ対策として“部分パイプクーリング”，外気の影響による乾燥収縮ひび割れや凍害，塩害対策として“シート吸引方式給水養生工法”を現場に適用した。現場では，実構造物および供試体において，温度およびひずみの計測，透気係数の測定，現場状況を反映した温度応力解析等の実施により適用効果を定量的に評価した。その結果，これらの対策により，温度ひび割れ発生確率は40%程度低減，表面の乾燥収縮ひずみは40×10^{-6}低減，透気係数は1/4に改善する効果が得られた。

キーワード：覆工コンクリート，パイプクーリング，給水養生，温度計測，ひずみ計測，透気係数

1. はじめに

トンネル坑口付近の覆工コンクリートは，鉄道トンネルの調査結果[1)]および道路トンネルの調査結果[2)]から，ひび割れや剥離等の劣化が発生しやすい傾向にあることが報告されている。そのため，トンネル構造物の耐久性を評価する場合，特に坑口付近の覆工コンクリートの劣化状況に着目する必要があり，その要因としては，以下の事項が挙げられる。

（ｉ）コンクリートの温度収縮による体積変化が，インバートに拘束されて発生する外部拘束ひび割れ
（ⅱ）外気の湿度低下の影響による乾燥収縮ひび割れ
（ⅲ）雨掛り部分の冬期の凍結融解作用による剥離，剥落
（ⅳ）融雪剤に起因する塩害による鉄筋腐食ひび割れ

以上の要因による劣化を抑制して，坑口付近の覆工コンクリートの耐久性を向上させるために，上記（ｉ）に起因する外部拘束ひび割れ対策として“部分パイプクーリング”[3),4)]，上記（ⅱ）～（ⅳ）に起因する乾燥収縮や塩害対策として“シート吸引方式給水養生工法”[5),6)]を，“H26-28金沢東環神谷内トンネル（Ⅱ期線）工事”の施工に適用した。

本報告では，“部分パイプクーリング”および“シート吸引方式給水養生工法”の現場適用時に，覆工コンクリートおよび供試体を使用して行った温度およびひずみ，透気係数の測定結果，現場環境を反映した温度応力解析等を実施し，適用効果を定量的に評価し分析した。

2. ひび割れ抑制対策の選定

2.1　部分パイプクーリングの概要および選定

部分パイプクーリングは，ひび割れの発生が懸念される範囲を限定して冷却することで，効率的にひび割れの発生を抑制する工法である。概要図を**図-1**に示す。覆工コンクリート左右の側壁内部に，内径27.6 mm，延長5.5 mの鋼製の亜鉛メッキパイプを400 mmピッチで1列3段設置し，セントルに設置した水槽から冷水をパイプに送水し，材齢1.5日程度までクーリングする。

この部分パイプクーリングを，外部拘束による温度ひび割れ対策として採用した。主な対策工法との比較表を**表-1**に示す。部分パイプクーリングは，（ｉ）ひび割れ抑制効果が高いこと，（ⅱ）次工程への影響がないこと，（ⅲ）費用対効果が高いことから選定した。

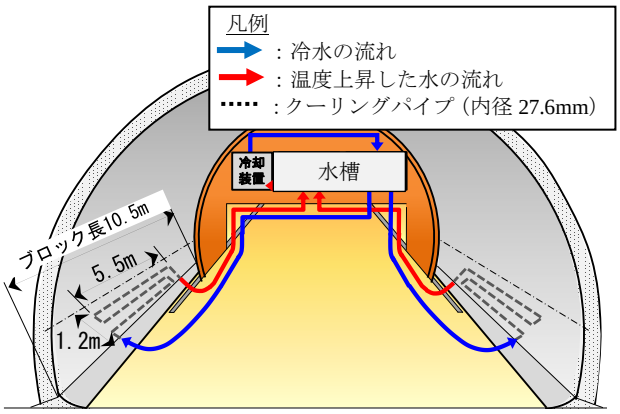

図-1　部分パイプクーリングの概要図

表-1　外部拘束ひび割れ対策

対策	ひび割れ抑制効果*1	工程への影響*2	備考
ブロック長の低減	◎	×	目地の増加
低温期に打設	○	×	―
膨張材の添加	○	○	―
補強鉄筋の設置	△	○	ひび割れ幅の制限のみ
プレクーリング	△	○	大規模な設備が必要
パイプクーリング	○	○	対策費用が経済的

*1：◎大きい，○やや大きい，×小さい
*2：○影響しない，×遅くなる

*1 株式会社　安藤・間　土木事業本部土木設計部　(正会員)
*2 株式会社　安藤・間　北陸支店土木部

2.2　シート吸引方式給水養生工法の概要および選定

シート吸引方式給水養生工法は，**図-2** に示すように，コンクリート表面と養生シートの間の空気を吸引ファンにて排出することで，両者間の気圧を負圧にし，養生シートを貼り付ける工法である。吸引時の空気の流路を確保するため，養生シートは表面が凹凸形状である気泡緩衝シートを採用する。また，気泡緩衝シート内側の不織布に給水することで，コンクリート表面へ養生水の給水が可能となる。

図-3 に本工法を覆工コンクリートに適用した場合の配置例を示す。下記に工法の概要を示す。

（ｉ）　両側に配置した吸引管から左右 4 箇所ずつ下半付近に設置した吸引口から吸引する。

（ⅱ）　養生水は，天端に配置した給水チューブから，4 時間に 1 回程度流下させる。給水開始時期は材齢 1～2 日程度である。

（ⅲ）　マルチフレームは，停電等の原因で，吸引が継続して実施できないときにシートを支えることを目的として設置する。

乾燥収縮ひび割れ，凍結融解作用による剥落および剥離，塩害による鉄筋腐食ひび割れを抑制するための養生対策を**表-2** に示す。これらの対策の中から，確実に給水養生を実施し，コンクリート表面を緻密化できるシート吸引方式給水養生工法を選定した [3]。

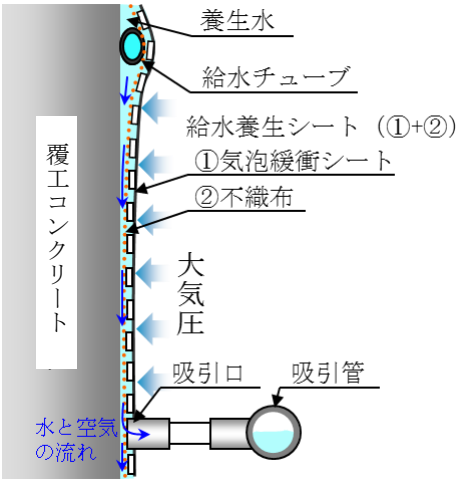

図-2　シート吸引方式給水養生工法概要図

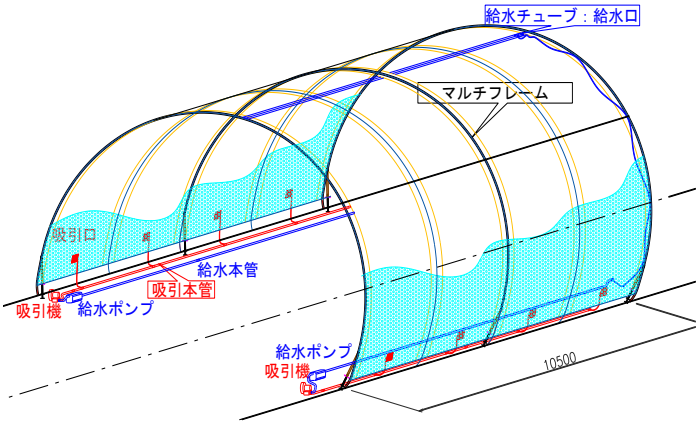

図-3　シート吸引方式給水養生工法の適用状況

3. 部分パイプクーリングによるひび割れ抑制対策

3.1　３次元 FEM 温度応力解析による事前検討

(1)　解析モデル

解析モデルは**図-4** に示すように 1/4 モデルとした。また，解析に用いる物性値等は，2012 年制定コンクリート標準示方書設計編に準じた。ブロック長は 10.5m である。また，これまでの覆工コンクリートの解析実績に従い [4]，圧縮応力のみ伝達し，引張り応力を伝達しない地盤 Bond 要素を設けた。

クーリングパイプの配置は，これまでの実績 [4]から，内径 27.6mmの鋼管を 400mm ピッチで 3 段配置して，延長方向 5.5m×高さ 1.2m の範囲を冷却した（**図-5** 参照）。

表-2　乾燥収縮ひび割れ，凍結融解，塩害対策

対策	表面緻密化効果*1	工程への影響*2	湿潤状態に保つ対策
型枠存置	○	×	水分逸散抑制養生
粘着系養生ｼｰﾄ	○	○	同上
養生剤散布	△	○	同上
吸引方式給水養生	◎	○	給水養生

*1：◎大きい，○やや大きい，×小さい
*2：○影響しない，×遅くなる

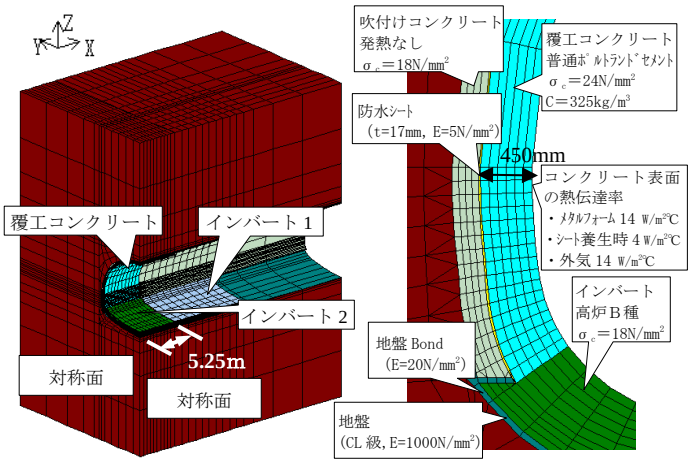

図-4　覆工コンクリート解析モデル（1/4 モデル）

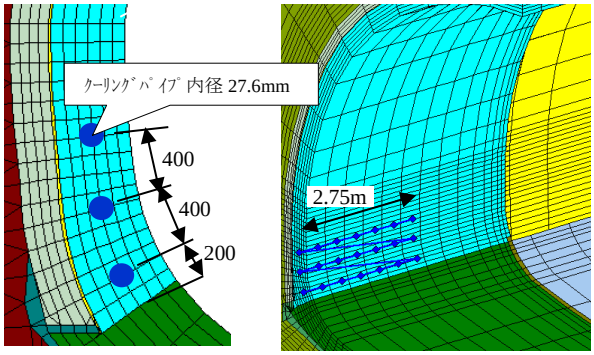

図-5　クーリングパイプ配置図

(2)　事前解析による検討結果

ⅰ）　無対策の場合

外気温が最も高くなることが予想される 8 月 1 日（想定外気温 28℃）の打設ブロックを対象として，無対策の場合の 3 次元 FEM 温度応力解析を実施した。主な入力値を**表-3** に示す。また，解析結果を**図-6** に示す。内部の最高温度が 55.0℃，最小ひび割れ指数（以下，指数）は 0.90，ひび割れ発生確率は 67%となり，ひび割れの発生が懸念される結果となった。

ⅱ）　部分パイプクーリング実施の場合

8 月 1 日（予想外気温 28℃）の打設ブロックを対象として，部分パイプクーリング実施時の 3 次元 FEM 温度応力解析による事前解析を実施した。検討の結果，通水量は 12L/分とし，通水期間は 34 時間とすることとした。クーリングパイプ表面の熱伝達率は，田辺らの式 [5]により 234W/m^2℃とした。解析結果を**図-7** に示す。冷却部の最高温度が 46.3℃，指数は 1.18，ひび割れ発生確率は 29%となり，ひび割れが発生する確率が大幅に低減できることが確認できた。

3.2 適用効果の確認

(1) 温度およびひずみ測定結果による効果確認

本現場では，**表-4** に示すように，2016 年 8 月 4 日～8 月 30 日の期間に打設した 6～8BL において部分パイプクーリングを実施した。8BL は通水量 12L/分，6BL および 7BL は 16L/分とした。部分パイプクーリングの効果を確認するために，6BL および 7BL において，**図-8** に示す位置の温度および全ひずみを測定した。測点 1 および 2 は冷却範囲の内部温度であり，測点 1 は更に拘束ひずみが最も卓越する箇所である。測点 3 はクーリングによる冷却効果の影響がない箇所の内部温度である。

表-3　解析入力値

物性値	発熱体		非発熱体	
	覆工コン	ｲﾝﾊﾞｰﾄｺﾝ	防水ｼｰﾄ	地盤
熱伝導率 (W/m℃)	2.7	2.7	0.5	3.5
比熱 (kJ/kg℃)	1.15	1.15	2.60	0.80
単位ｾﾒﾝﾄ量 (kg/m^3)	断熱温度上昇式 $Q(t)=Q_\infty\left(1-e^{-r(t-t_0)^s}\right)$		—	—
	330(N)	290(BB)		
熱膨張係数 (×10^{-6}/℃)	10	12	12	12
ﾎﾟｱｿﾝ比	0.2	0.2	0.2	0.25
有効ﾔﾝｸﾞ係数 (N/mm^2)	$E_e(t')=\Phi_e(t')\times 6.3\times 10^3 f_c'(t')^{0.45}$ $\Phi_e(t')$:最高温度に達する有効材齢まで 0.42 最高温度に達する有効材齢＋1 有効材齢以降:0.65		5	1000
引張強度 (N/mm^2)	$f_{tk}(t')=0.13\cdot f_c'(t')^{0.85}$		0.10	20
自己収縮 (×10^{-6})	$\varepsilon_{sh}(t_e)=\eta_c\varepsilon_{sh,\infty}\beta_{sh}(t_e)$		—	—

注）2012 年制定コンクリート標準示方書設計編に準拠
外気温は気象庁金沢気象台過去 30 年間の平年値

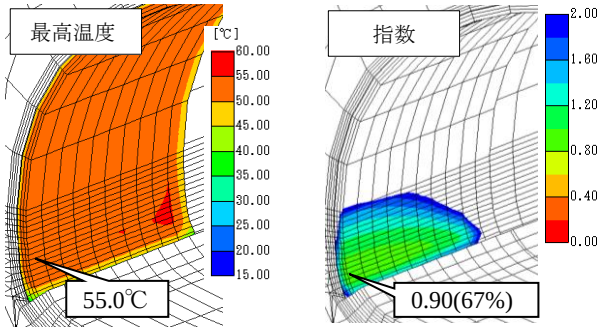

図-6　事前解析時の部材中心の温度・指数分布図
クーリング未実施の場合

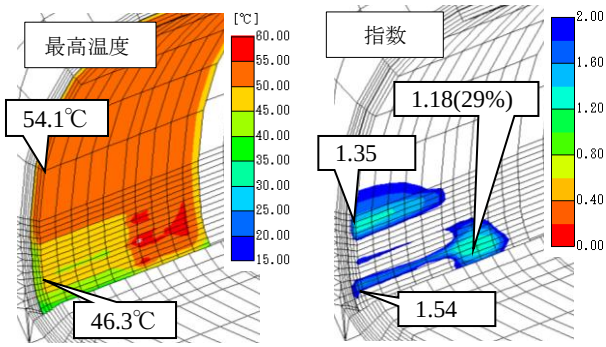

図-7　事前解析時の部材中心の温度・指数分布図
クーリング実施（12L/分，34 時間）の場合

表-4　部分パイプクーリング適用状況

項目	6BL	7BL	8BL
打設日	8 月 30 日	8 月 25 日	8 月 4 日
外気温	20℃	27℃	27℃
打込温度	26℃	29℃	29℃
通水期間 (通水停止)	30 時間 (8/31 14:00)	34 時間 (8/25 18:00)	34 時間 (8/5 18:00)
通水量	16L/分	16L/分	12L/分
計測	実施	実施	未実施

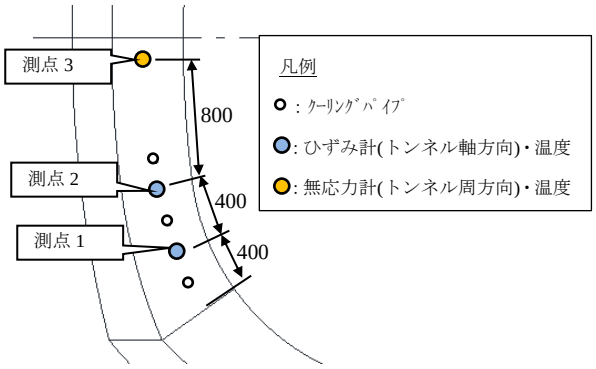

図-8　温度およびひずみ計測位置

材齢 2 週間までの 7BL の計測結果を**図-9** および**図-10** に示す。**図-9** より，測点 1 と測点 3 の温度を比較することでクーリングにより内部最高温度が 10℃低減でき，8 月 26 日の 18 時に通水停止後，1.4℃の温度上昇が確認された。また，**図-10** より，通水停止後の未冷却部周囲から冷却部への温度移動による拘束ひずみ低減効果 [6]により，拘束ひずみが 33×10^{-6} 低減した。

次に，材齢 2 週間までの 6BL の計測結果を**図-11** および**図-12** に示す。7BL と同様にクーリングにより，測点 1 の内部最高温度が 11℃低減でき，通水停止後 2.0℃の温度上昇および 31×10^{-6} の拘束ひずみの低減が確認された。

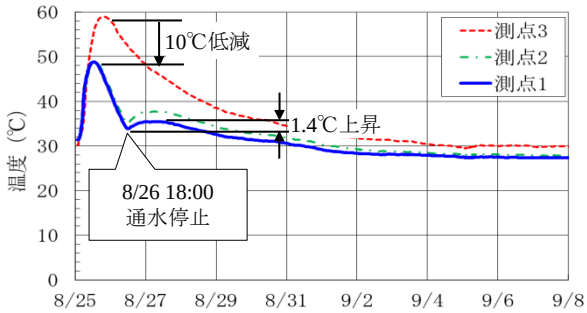

図-9　温度測定結果（7BL）

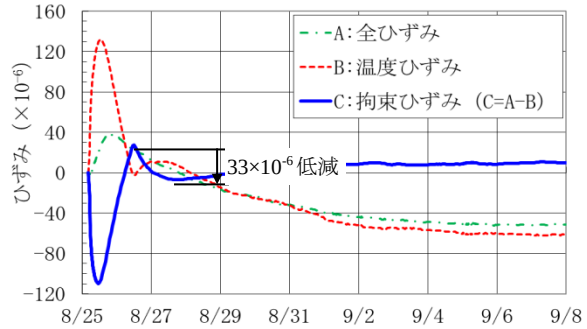

図-10　ひずみ測定結果（7BL：測点 1）

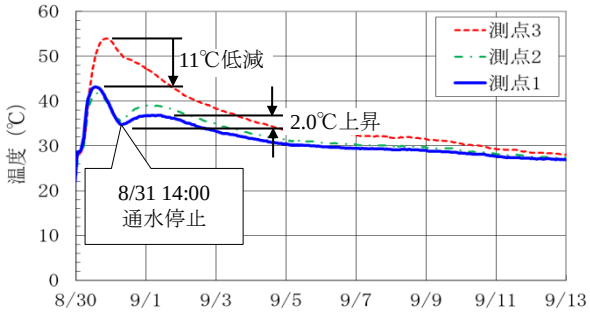

図-11　温度測定結果（6BL）

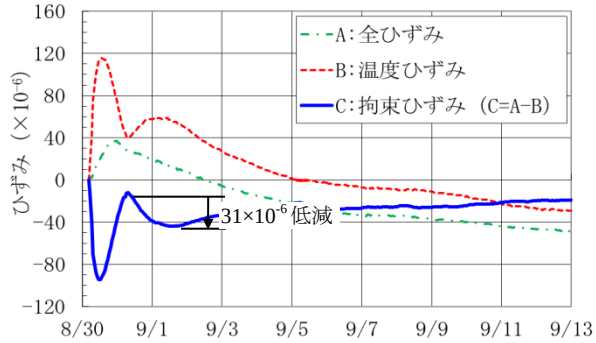

図-12　ひずみ測定結果（6BL：測点 1）

(2) 事後解析による効果確認

計測された外気温およびコンクリート打込み温度，熱膨張係数（6BL および 7BL の躯体内部において無応力計により測定した平均値 8.93×10^{-6}/℃），断面計測による余堀を考慮した側壁厚（530 mm）を解析に反映させ，6BL および 7BL の事後解析を実施した。7BL における事後解析の条件でクーリングを実施しなかった場合の結果を**図-13**，クーリングを実施した実際の施工状況に合わせた事後解析の結果を**図-14** に示す。この結果，指数が 0.86 から 1.15 に 0.29 上昇し，ひび割れ発生確率は 74%から 31%となり 43%低減できたことが確認できた。

また，事後解析値と実測値における温度および拘束ひずみの履歴の比較を**図-15** および**図-16** に示す。この結果から，温度および拘束ひずみとも事後解析値と実測値は概ね一致しており，事後解析は実際の覆工コンクリートの挙動を再現できていると考えられる。

7BL と比較して通水時間を 4 時間短縮した 6BL においても同様の検討を実施し，その結果を 7BL の結果と合わせて**表-5** に示す。6BL においても温度および拘束ひずみとも概ね一致した。また，指数が 0.97 から 1.29 に 0.32 上昇し，ひび割れ発生確率は 55%から 21%となり 34%低減できたことが確認できた。また，6BL は，7BL よりも通水時間が短いが，同程度のひび割れ抑制効果があることが確認できた。

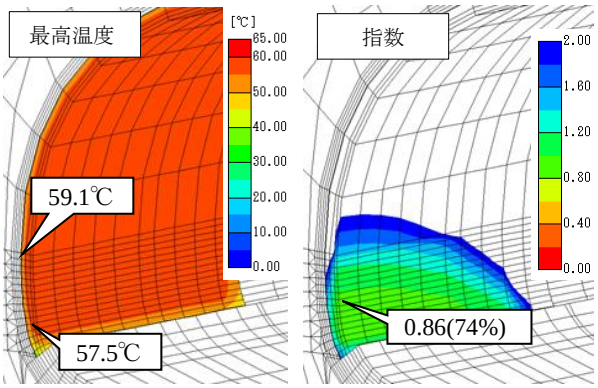

図-13　部材中心の温度・指数分布図：7BL
（事後解析の条件でｸｰﾘﾝｸﾞ未実施の場合の解析）

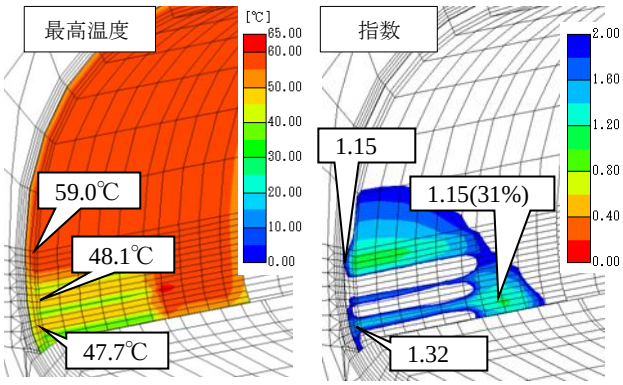

図-14　部材中心の温度・指数分布図：7BL
（部分ﾊﾟｲﾌﾟｸｰﾘﾝｸﾞ実施時の事後解析）

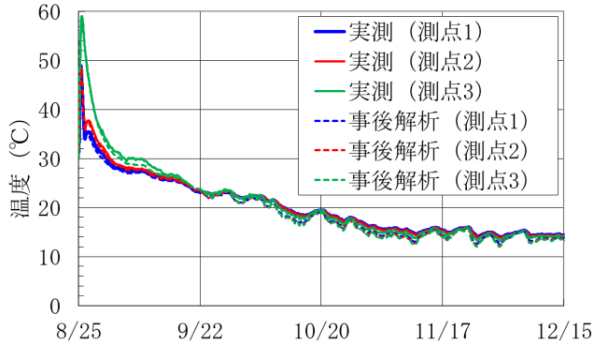

図-15　事後解析と実測値の温度履歴の比較（7BL）

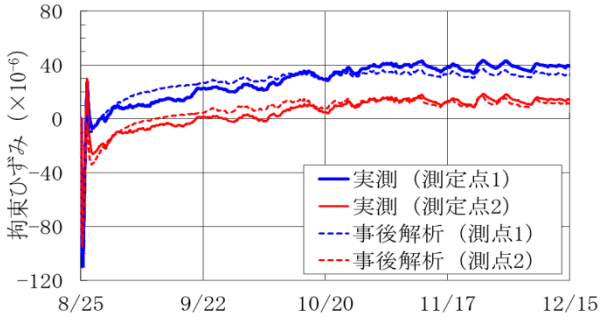

図-16　事後解析と実測値の拘束ひずみ履歴の比較（7BL）

表-5　実測値と事後解析の結果

項目		6BL 実測値	6BL 事後解析値	7BL 実測値	7BL 事後解析値
最高温度（℃）	測点 1	43.2	42.9	48.9	47.6
	測点 2	42.7	43.1	48.7	48.0
	測点 3	53.9	53.6	59.0	59.0
最大拘束ひずみ（$\times10^{-6}$）	測点 1	8.0	4.4	44.0	39.0
指数*	実施	—	1.29	—	1.15
	未実施	—	0.97	—	0.86

＊：上段は部分ﾊﾟｲﾌﾟｸｰﾘﾝｸﾞ実施時の実施工の事後解析結果
　　下段は事後解析の条件でｸｰﾘﾝｸﾞを未実施の場合の解析結果

4. シート吸引方式給水養生工法による表層コンクリートの緻密化

4.1 現場適用状況

現場適用状況を**写真-1** に示す。両側の下半部に設置した吸引口から，覆工コンクリートとシートの間の空気を吸引ファンで排気している。また，給水チューブは，給水ムラを防ぐために天端に 3 本配置し，4 時間程度に 1 回（タイマーで自動制御）、給水ポンプで送水する。1 回の給水時間は 2 分程度である。

4.2 適用効果の確認

(1) 供試体による効果確認

拘束乾燥収縮ひび割れ試験用供試体：JIS A 1151（以下，供試体 A）および表面乾燥収縮ひび割れ計測用の供試体：縦 40cm×横 40cm×深さ 45cm（以下，供試体 B）の試験ケースを**表-6**，試験状況を**写真-2** に示す。供試体は 6BL 打込み時に作成し，配合は**表-7** に示すとおりである。

供試体 A は，中心内部にひずみ計，供試体 B は表面中心にひずみゲージを設置し，ひずみを計測した。その結果を**図-17** および**図-18** に示す。**図-17** に示すひずみは，温度ひずみを差し引いた拘束乾燥収縮ひずみであり，シート吸引方式給水養生工法を模擬した 4 週間の給水養生をすることで，材齢 3 ヶ月以上においてもひずみ量が 200×10^{-6} 程度小さいことが確認できた。また，**図-18** に示すひずみは，全ひずみであり，壁厚 450mm の覆工コンクリートの表面ひずみを模擬している。その結果，ひずみ量が 40×10^{-6} 程度低減できていることが確認できた。

また，透気試験[9]を実施したところ，**表-8** のようになり，給水養生を実施することで透気係数が 0.687 から 0.173 と 1/4 改善し，既往の研究[10]を参考にすると，電気泳動試験による実効拡散係数が 0.5cm²/年改善できた可能性がある。

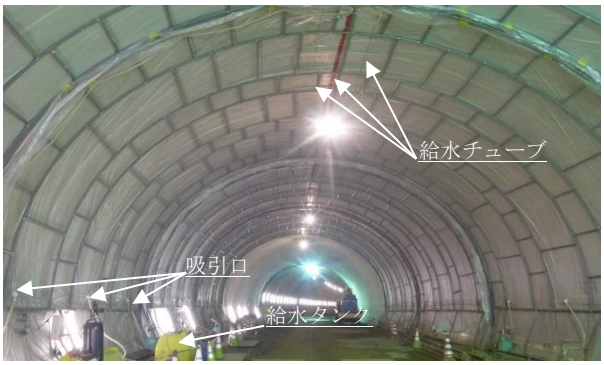

写真-1　吸引方式給水養生工法の設置状況

表-6　試験ケース

No.	脱型後の養生	供試体 A	供試体 B
1	なし	2 体	1 体
2	4 週間給水養生	2 体	1 体

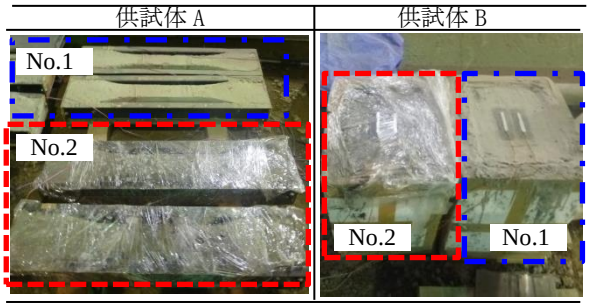

写真-2　供試体養生状況（坑内）

表-7　配合（18-21-25N）

W/C	s/a	単位量（kg/m³）					
(%)	(%)	C	W	S1	S2	G	Ad
52.2	49.0	330	172	574	283	903	3.3

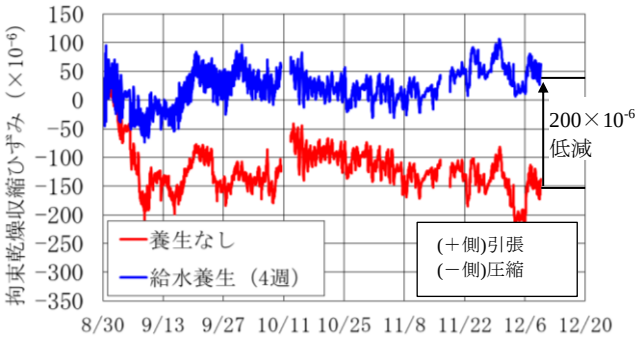

図-17　拘束乾燥収縮ひび割れ試験ひずみ測定結果

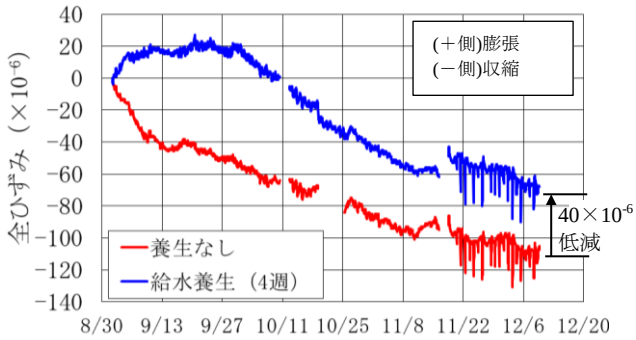

図-18　表面乾燥収縮ひび割れ試験ひずみ測定結果

(2) 現場透気試験よる効果確認

実際に施工した覆工コンクリートの表層の品質を確認するために，1，5，8 スパンにおいて，透気試験を実施した。その結果を**表-8** に示す。“ランク 2：良い”程度[9, 11]であり，表層の緻密性が高いことが確認できた。

5. まとめ

（ｉ） 実構造物での温度およびひずみ測定の結果，打設後 30～34 時間のクーリングによりひび割れ発生確率が 34～43%低減できた。インバートコンクリートの外部拘束による覆工コンクリートの温度ひび割れ対策に，部分パイプクーリングが有効であることが確認できた。2017 年 1 月 12 日現在，ひび割れは発生していない。

（ii） 現位置で作成し，養生した供試体での計測の結果，表面の乾燥収縮ひずみが 40×10^{-6} 低減でき，また透気係数が 1/4 改善できることで実効拡散係数が $0.5cm^2$/年改善できる可能性があることが確認できた。坑口付近の覆工コンクリートの乾燥収縮ひび割れ抑制および塩害対策として，吸引方式給水養生工法が有効であることが確認できた。

表-8　供試体による透気試験結果

養生期間	作成日	試験実施日	測定NO.	透気係数 ($\times10^{-16}m^2$)	測定深さ (mm)	含水率 (%)	ランク
材齢1日脱型	2016年8月25日	2017年1月12日	1	0.750	40	3.9	-
			2	0.630	39	4	-
			対数平均	**0.687**	40	4.0	2
給水養生4週	2016年8月25日	2017年1月15日	1	0.083	14	3.9	-
			2	0.360	35	3.8	-
			対数平均	**0.173**	25	3.9	2

表-9　実構造物における透気試験結果

ﾌﾞﾛｯｸ	打設日	試験実施日	測定箇所	透気係数 ($\times10^{-16}m^2$)	測定深さ (mm)	含水率 (%)	ランク
1	2016年10月5日	2016年12月6日	R側側壁	0.081	14	4.6	-
			L側側壁	0.103	14	4.6	-
			対数平均	**0.091**	14	4.6	2
5	2016年9月5日	2016年12月6日	R側側壁	0.103	18	4.9	-
			L側側壁	0.087	15	4.6	-
			対数平均	**0.095**	17	4.8	2
8	2016年8月4日	2016年12月6日	R側側壁	0.118	17	5	-
			L側側壁	0.099	16	5.4	-
			対数平均	**0.108**	17	5.2	3

参考文献

1) 菅藤太郎，伊藤信，鈴木尊，脇山勘治：鉄道トンネルで発生している変状の傾向に関する一考察，トンネル工学報告集，26 巻，Ｉ-20，pp.1-6，2016.11

2) 中島彰吾，海瀬忍，森本真吾，進士正人：TCI を用いた施工方法の違いによる覆工評価の比較，トンネル工学報告集，26 巻，Ｉ-31，pp.1-7，2016.11

3) 古川幸則，福留和人，庄野昭：コンクリートの浸水養生システム-型枠取りはずし後の給水養生工法の実用化と効果-，コンクリート工学，Vol.49，No.3，2011.3

4) 白岩誠史，高橋拓真，川中政美，佐藤正：覆工コンクリートへの部分パイプクーリングの適用とその効果確認，コンクリート工学年次論文集，Vol.38, No.1, 2016.

5) 田辺忠顕・山川秀次・渡辺朗：パイプクーリングにおける管壁面の熱伝達率の決定ならびに冷却効果の解析，土木学会論文集，第 343 号，pp.176，1984 年 3 月

6) 白岩誠史，川中政美，庄野昭，佐藤正，牧剛史：覆工コンクリートひび割れ対策への部分パイプクーリングの適用，トンネル工学報告集，26 巻，Ｉ-4，pp.1-11，2016.11

7) Seishi Shiraiwa, Kazuto Fukudome, Atsushi Saito, Toshinari Hayashi：Effects of Improving Endurance of Concrete Structures by Wet Curing System, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.13, pp.155-162, 2015.

8) 古川幸則・塩崎修男・白井孝昌：シート吸引方式による覆工コンクリート浸水養生システムの開発，土木学会第 65 回年次学術講演会，VI-017，pp.33-34，平成 22 年 9 月

9) スイス規格 262/1-E，2003

10) 毛塚貴洋，高橋佑弥，岸利治，魚本健人：表層透気係数と電気泳動試験結果の相関に関する一検討，土木学会第 65 回年次学術講演会，V-298，pp.595-596，平成 22 年 9 月

11) 新居秀一，白岩誠史，川中政美，庄野昭：現場透気試験によるコンクリートの表層品質調査，コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, 2016.