

# 長期間のひずみおよび温度計測に基づく厳寒地域の覆工への外部拘束ひび割れ対策の検証

白岩 誠史<sup>1</sup>・杉浦 規之<sup>2</sup>・中村 康祐<sup>3</sup>・飯田 信一<sup>4</sup>  
佐々木照夫<sup>5</sup>・河上伸一<sup>6</sup>

<sup>1</sup>正会員 株式会社安藤・間 土木事業本部 土木設計部 (〒107-8658 東京都港区赤坂6-1-20)  
E-mail:shiraiwa.seishi@ad-hzm.co.jp

<sup>2</sup>株式会社安藤・間 東北支店 土木部 (〒980-8640 宮城県仙台市青葉区片平1-2-32)  
E-mail:sugiura.noriyuki@ad-hzm.co.jp

<sup>3</sup>正会員 株式会社安藤・間 東北支店 土木部 (〒980-8640 宮城県仙台市青葉区片平1-2-32)  
E-mail:nakamura.kousukea@ad-hzm.co.jp

<sup>4</sup>株式会社安藤・間 東北支店 土木部 (〒980-8640 宮城県仙台市青葉区片平1-2-32)  
E-mail:iida.shinichi@ad-hzm.co.jp

<sup>5</sup>株式会社安藤・間 東北支店 土木部 (〒980-8640 宮城県仙台市青葉区片平1-2-32)  
E-mail:sasaki.teruo@ad-hzm.co.jp

<sup>6</sup>国土交通省 東北地方整備局 三陸国道事務所 工務第一課 (〒027-0029 岩手県宮古市藤の川4番1号)  
E-mail:kawakami-s87nh@mlit.go.jp

岩手県山間部の厳寒地域に位置する国道106号箱石地区道路工事において、インバートコンクリートの拘束により覆工コンクリート側壁に発生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工法 (Localized Pipe Cooling)” を適用し、ひび割れの発生を防止した。本報告では、部分パイプクーリングの実施状況について報告するとともに、覆工およびインバートの温度およびひずみを1年間計測した結果から、(1).ひび割れの発生が懸念される部分のみを短期間クーリングする部分パイプクーリングのひび割れ抑制メカニズム、(2).冬期外気温低下時の覆工のひび割れ発生危険性、(3).インバートと覆工の年間収縮特性の違いによるインバートの拘束効果等を明らかにした。

**Key Words :** tunnel concrete lining, pipe cooling, thermal cracks, invert concrete, strain measurement

## 1. はじめに

坑口部のインバートコンクリート (以下、インバート) 施工区間の覆工コンクリート側壁 (以下、覆工) に発生する覆工輪切り方向のひび割れは、コンクリート硬化時の温度上昇や坑外の気温低下による温度収縮、坑口付近の湿度低下による乾燥収縮、コンクリート硬化時の自己収縮等による体積変化を、図-1 に示すように、インバートが拘束することによって生じる。東北地方整備局が実施した 52 本のトンネル調査においても、これらの外部拘束による温度ひび割れが多いとの報告がある。また、これらのひび割れは、多くの場合、貫通ひび割れとなり、鉄筋を配したスパンにおいては、鉄筋の腐食を促進させ、剥落を誘発するため、その有効な対策の確立が求められている。

本報告では、国道 106 号箱石地区道路工事において、

外部拘束ひび割れ対策として、“部分パイプクーリング工法” を適用した事例を報告するとともに、覆工およびインバート内部の温度およびひずみを 1 年間計測した結果に基づいて、部分パイプクーリングのひび割れ抑制メカニズム、冬期の外気温低下時の覆工のひび割れ危険性の程度、覆工とインバートの年間収縮量の違いによるインバートの拘束効果について明らかにした。

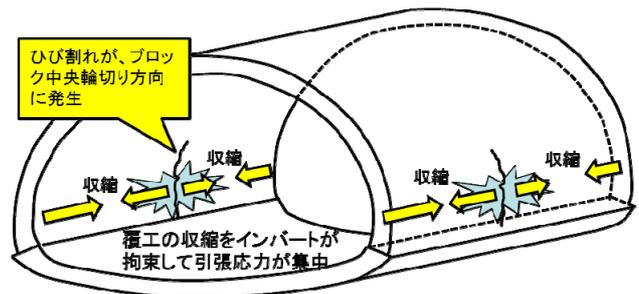


図-1 インバート拘束による外部拘束ひび割れ

## 2. 事前解析によるひび割れ対策の検討

### (1) 三次元 FEM 温度応力解析による事前検討

#### a) 解析モデルおよび入力条件

三次元 FEM 温度応力解析による事前解析を実施した。解析モデルを図-2 および図-3 に示す。解析モデルは、図-2 において x 方向、y 方向とも 1/2 でモデル化しており、全体として 1/4 モデルとなっている。

入力条件は、表-1 (2012年制定コンクリート標準示方書設計編に準拠)に示すとおりである。また、打設時期は、打設開始が予定されている 2016年 11月 9日 (想定外気温 8°C, コンクリート温度 13°C) とした。解析期間は、2018年 3月 31日までとした。

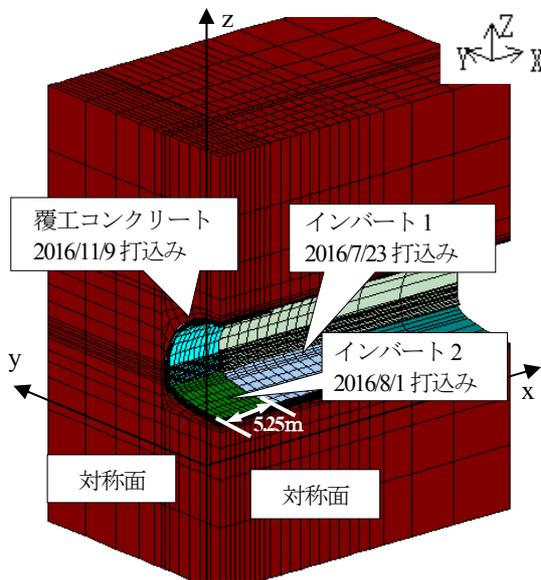


図-2 三次元 FEM 温度応力解析 1/4 モデル図

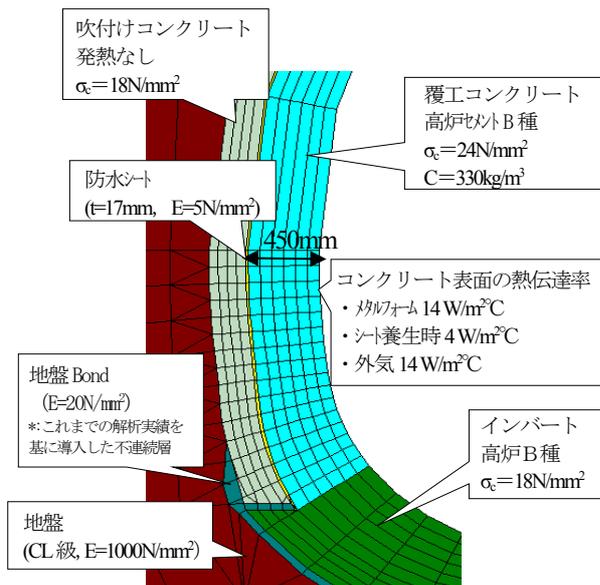


図-3 解析モデル詳細図

表-1 解析入力値

物性値	発熱体		非発熱体	
	覆工コン高炉 B 種	インバートコン高炉 B 種	防水シート	地盤
熱伝導率 (W/m°C)	2.7	2.7	0.5	3.5
比熱 (kJ/kg°C)	1.15	1.15	2.60	0.80
断熱温度上昇量 Q(t)	断熱温度上昇式 $Q(t) = Q_{\infty} (1 - e^{-r(t-t_0)^s})$ $Q_{\infty} = a + b \times T_a$ $r = g + h \times T_a$		—	—
	単位セメント量 325kg/m³ [a=54.79 b=-0.04436 g=0.2571 h=0.0471]	単位セメント量 290kg/m³ [a=51.25 b=-0.05794 g=0.1274 h=0.03291]		
熱膨張係数 (×10⁻⁶/°C)	12	12	12	12
ポアソン比	0.2	0.2	0.2	0.25
有効ヤング係数 E <sub>t</sub> (t) (N/mm²)	$E_c(t') = \Phi_c(t') \times 6.3 \times 10^3 \cdot f_c'(t')^{0.45}$ Φ <sub>c</sub> (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
圧縮強度 f <sub>c</sub> (t) (N/mm²)	$f_c'(t') = \frac{t'}{a + b(t' - S_f)} \cdot f_c'(i)$		18	24
引張強度 f <sub>tk</sub> (t) (N/mm²)	$f_{tk}(t') = 0.13 \cdot f_c'(t')^{0.85}$		0.10	20
自己収縮 ε <sub>sh,ag</sub> (μ)	$\epsilon_{sh,ag} = -\beta \epsilon'_{sh,ag} [1 - \exp\{-a(t' - t_s)^b\}]$		—	—

Q<sub>∞</sub>: 終局断熱温度上昇量, r: 温度上昇速度にかかわる定数

t: 材齢 (日), t<sub>0</sub>: 温度上昇の原点

s: 温度上昇に関するパラメータ

Φ<sub>c</sub>(t): クラブの影響を考慮するためのヤング係数の低減係数

f<sub>c</sub>'(t): 有効材齢 t' 日におけるコンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

t': 有効材齢 (日)

c<sub>1</sub>, c<sub>2</sub>: 養生方法等で定まる係数 (c<sub>1</sub>=0.13, c<sub>2</sub>=0.85 が標準)

β: セメントおよび混和材の種類の影響を表す係数

ε'<sub>sh,ag</sub>: 自己収縮ひずみの最終値 (μ),

a, b: 自己収縮の進行特性を表す係数, t<sub>s</sub>: 凝結の始発 (日)

\* 外気温は川井気象台の 20 年間の平均値をサカサブで近似。

本解析は湿気移動を考慮していない。

**b) ひび割れ抑制対策未実施時の解析結果**

ひび割れ抑制対策を実施しない場合の部材中心の最高温度およびひび割れ指数（以下、指数）分布図の解析結果を図-4に示す。部材中心の最高温度が25.7℃、指数は0.97、ひび割れ発生確率は55%となり、ひび割れの発生する可能性が高い結果となった。また、図-4に示すように、指数1.0以下となり引張応力がコンクリートの引張強度を上回る範囲は、延長方向6.0m×高さ1.0mの範囲（延長方向は部材延長の60%程度、高さ方向は部材厚の2倍程度）であり、これまでの実績と同程度の範囲であった。

**c) 部分パイプクーリング実施時の解析結果**

部分パイプクーリングを実施した場合の部材中心の最高温度および指数分布図の事前解析結果を図-8に示す。解析および過去の実績を考慮して検討した結果、クーリングパイプは図-6に示すように設置し、通水量は12L/分、通水期間は36時間とし、クーリングパイプ表面の熱伝達率は田辺らの式<sup>2)</sup>により234W/m<sup>2</sup>℃とした。冷却部の最高温度が21.4℃、指数は1.25、ひび割れ発生確率は24%となり、ひび割れの発生する確率が無対策と比較して31%程度低減できることが確認できた。また、応力およびひび割れ指数の履歴図を図-7~9に示す。

外気温の低下により、部材温度が低下する2017年2月および2018年2月の2回、部材に発生する応力が増加する。また、ひび割れ指数は、最高温度到達後に外気温まですり付く材齢2週間程度の期間および2018年2月の外気温低下時の2回、ひび割れ指数が低下する結果となった。

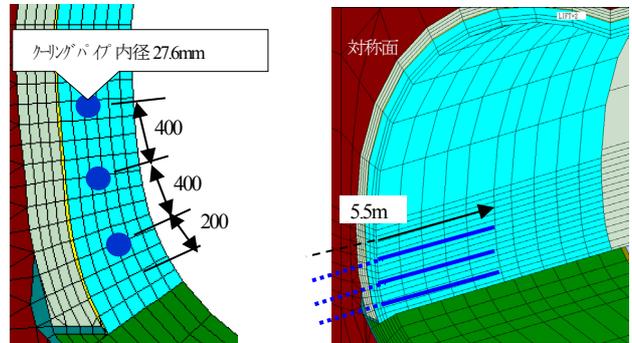


図-6 クーリングパイプ配置図

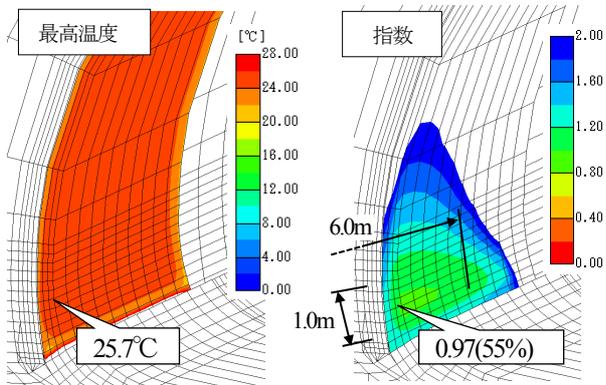


図-4 事前解析時の部材中心の温度・指数分布図  
(ひび割れ抑制対策未実施の場合)

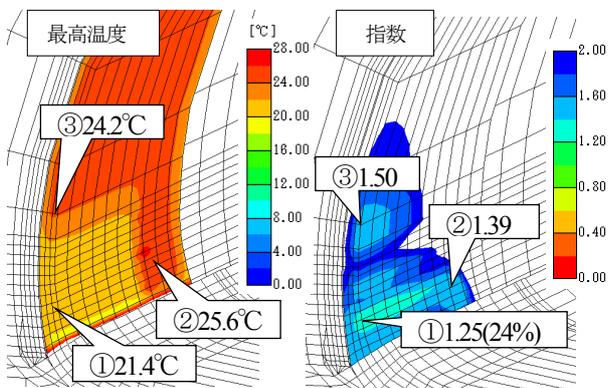


図-5 事前解析時の部材中心の温度・指数分布図  
(クーリング実施：通水36時間の場合)

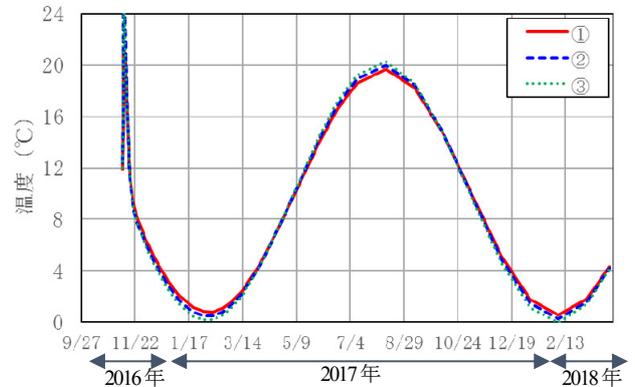


図-7 部分パイプクーリング実施時の部材中心の温度履歴図

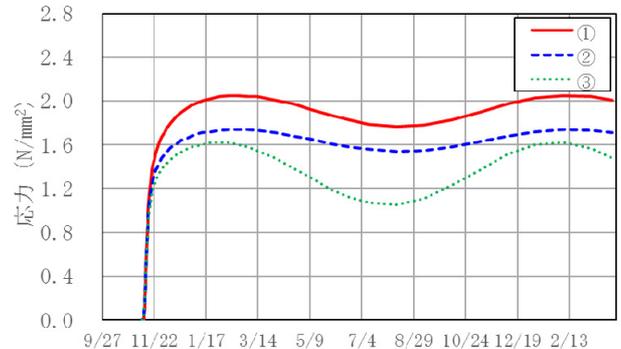


図-8 部分パイプクーリング実施時の部材中心の応力履歴図

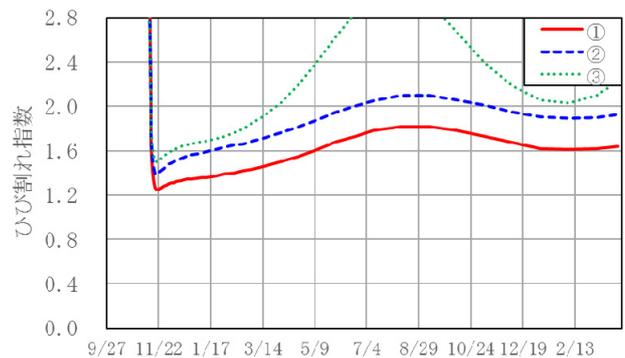


図-9 部分パイプクーリング実施時の部材中心のひび割れ指数履歴図

## (2) ひび割れ対策の選定

本現場では、解析による検討結果から、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。表-2 は、日本コンクリート工学会発行の“マスコンクリートひび割れ制御指針 2016”<sup>3)</sup>に記載のある対策に、本報告で取り上げる部分パイプクーリングを追記し、覆工に適用する場合の評価をまとめたものである。部分パイプクーリングは、ひび割れ抑制効果が高いこと、次工程に影響しないこと、費用対効果が高い対策であることが確認できる。

## 3. 部分パイプクーリング実施状況

### (1) 部分パイプクーリングの概要

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短期間冷却することで、効率的にひび割れの発生を抑制する工法である。従来のクーリングと異なり、短期間の冷却でひび割れ抑制効果があるため、2日に1回打設を実施する覆工へも適用できるクーリング工法である。これまで福島県<sup>4)</sup>、石川県<sup>5)</sup>、大分県<sup>6)</sup>の3現場で覆工への適用実績がある。また、橋梁下部工および上部工への適用事例<sup>9)</sup><sup>10)</sup><sup>11)</sup>もある。

覆工へ適用する場合の部分パイプクーリングのシステム概要図を図-10に示す。覆工コンクリート左右の側壁内部に、内径27.6mm、延長5.5mの水道配管用亜鉛メッキ鋼管（JIS G 3442）を部材中心に400mm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1.5～2.0日程度までクーリングする。

### (2) 現場概要

現場は、岩手県宮古市西部の厳寒地域である北上高地

に位置し、2016年12月～2017年3月までの各月の日最低気温の平均が氷点下を下回っていることから、冬期の温度低下による覆工コンクリートの外部拘束ひび割れの発生が懸念される地域である。以下に、本現場の工事概要を示す。

- ・現場名：国道106号箱石地区道路工事
- ・発注者：国土交通省東北地方整備局  
三陸国道工事事務所
- ・施工場所：岩手県宮古市川井～箱石地内
- ・工事概要：掘削延長1,493m、内空断面積88m<sup>2</sup>  
覆工厚さ450mm  
橋梁下部工橋脚3基、橋台1基

### (3) 部分パイプクーリングの実施スパンおよび期間

部分パイプクーリングの実施スパンを図-11に示す。冬期の温度低下による覆工コンクリートの外部拘束ひび割れの発生が懸念されたことから、腐食する鉄筋が配置されていない無筋コンクリート区間についても、部分パ

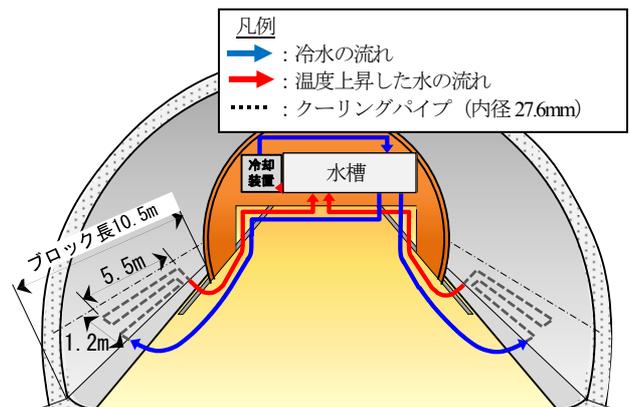


図-10 部分パイプクーリング概要図

表-2 覆工コンクリートの外部拘束ひび割れ対策の比較

大項目	外部拘束ひび割れ対策		ひび割れ抑制効果	工程への影響	費用	評価	備考
	中項目	小項目					
体積変化を抑制する工法	a. 温度上昇を抑制する方法	[水和発熱の小さいセメントの使用] ① 低発熱型のセメントの使用	○高	×影響あり	×高	△	若材齢強度が必要な覆工コンクリートへは、適用が困難。
		[混和材料の使用] ② 高性能AE減水剤の使用	△中	○影響なし	△中	△	単位セメント量を低減できるが、温度上昇抑制効果は限定的。
		[単位セメント量の低減] ③ スランブ低減	△中	×影響あり	○低	△	スランブ15cm程度が必要なため、適用は困難。
		[単位セメント量の低減] ④ 管理材齢延長	△中	×影響あり	○低	△	若材齢強度が必要なため、適用は困難。
		[材料温度の低減] ⑤ プレクーリング	△中	○影響なし	×高	△	液体窒素や練混ぜ水の冷却を実施する場合、設備費用が高い。
		[養生方法] ⑥ ポストクーリング	○高	×影響大	△中	△	効果はあるが、脱枠後の冷却となり冷却効果が小さい。
	b. 収縮ひび割れを低減させる方法	[養生方法] ⑦ 部分パイプクーリング	○高	○影響なし	△中	○	限定された部分に短期間のクーリングとすることで覆工コンクリートにも適用可能。
		[熱膨張係数の小さい材料の選択] ⑧ 熱膨張係数の小さい骨材選定	△中	○影響なし	△中	△	地産地消が原則
		[収縮ひび割れを低減させる混和材料の使用] ⑨ 膨張材の使用	○高	○影響なし	×高	○	添加量が決まっているので、部材や外気温に合わせて膨張効果を調整できない。
		外部拘束度を低減させる方法	[ブロックの高さと長さの比を低減] ⑩ スパン長の低減	○高	×影響あり	×高	×
温度ひび割れ幅を制御する方法	[鉄筋比の増加] ⑪ ひび割れ補強鉄筋の配置	×低	○影響なし	○低	○	ひび割れ幅を抑制できるものの、ひび割れの発生そのものは抑制できない。	

イプクーリングを実施した。すべてのスパンにおいて、  
 通水期間は46時間程度、通水温度は10℃で管理した。

部分パイプクーリング実施スパンのコンクリートの配合は、**表-3**に示すように、鉄筋区間については、充填性向上を目的に、後添加の中流動覆工コンクリートを適用した。また、クーリングの実施期間は、2016年11月30日～2017年1月30日であり、コンクリートの打込み温度は8～14℃であった。

**(4) 部分パイプクーリング実施状況**

**a) クーリングパイプ**

クーリングパイプの設置状況を**写真-1**に示す。クーリングパイプは、1インチの亜鉛メッキ鋼管とし、コンクリート中に埋め込み、最終的にはパイプ内部に無収縮モルタルを充填して完了となる。そのため、熱伝導に優れ、コンクリートと熱膨張係数の等しい鋼製とし、充填まで長期間放置しても腐食しないことを目的とし、亜鉛メッキされたパイプを選定した。また、パイプの接続は、ネジ式とし、止水テープを巻いた。

**b) 送水設備**

送水設備は、**写真-2**に示すように、200L水槽1基、1インチ送水ポンプ1台、4.3kW冷却装置1台からなる。水和熱により発熱した部材内のクーリングパイプに送水され、温度上昇して水槽に戻ってきたクーリング水は、冷却装置にて冷却され、システム内を循環する。

また、クーリング水の注水口を**写真-3**に示す。グラウトホースをクーリングパイプの先端に接続させ、インバートコンクリートに埋め込んでいる。

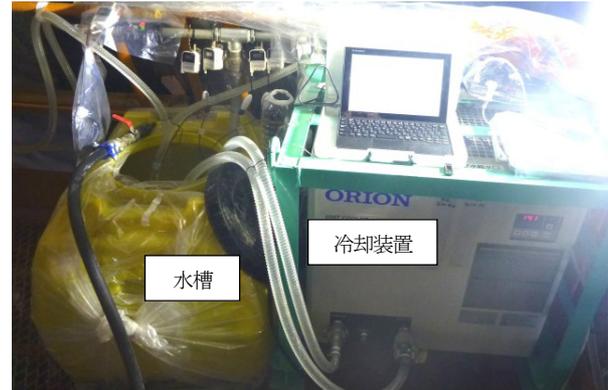


写真-2 送水設備設置状況



写真-3 注水口

表-3 コンクリートの配合

No.	適用箇所	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					後添加 Ad
				W	C	S	G	Ad	
1	鉄筋区間 24-15-20BB	53	53.5	172	325	963	923	3.09	1.95
2	無筋区間 21-18-20BB	57	54.5	175	307	984	908	3.07	-

▽盛岡側坑口																									
スパンNo.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	...		
支保パターン	DIII									DI						CII						...			
区間長(m)	85									103						105						...			
鉄筋コンクリート	←									→															...
無筋コンクリート											←												...		
インバート施工区間	←																		→				...		
部分パイプクーリング施工区間	←															→							...		
打設日	-	-	11/30	12/9	12/12	12/14	12/16	12/19	12/21	12/23	12/26	1/10	1/12	1/14	1/17	1/19	1/21	1/24	1/27	1/30	2/1	2/3	...		
外気温(℃)*	-	-	15/8	7/9	8/8	8/9	10/7	13/13	8/13	13/12	7/10	7/10	8/7	6/5	8/6	7/8	8/8	3/5	7/11	8/9	6/10	5/9	...		
コンクリート温度(℃)*	-	-	12/11	10/13	10/8	10/12	12/10	10/11	13/12	12/12	8/10	11/10	9/10	13/11	11/10	12/10	11/11	12/10	13/11	14/11	11/11	11/10	...		

\* 外気温およびコンクリート温度は、(午前の測定値/午後の測定値)

図-11 部分パイプクーリング実施スパン (計測はNo. 15 スパン)

c) 養生管理システム

本現場では、クーリングパイプに通水するクーリング水温および通水量を管理するために、当社で開発した養生管理システムを導入した。養生管理システムは、写真-4 に示すように、外付け流量計（無線型温度計を無線機として転用）2台、無線型温度計3台（水槽内温度、リターン水温度、養生温度）、ルーター1台、パソコン1台から構成される。計測した温度および流量が、ルーターを介して随時、パソコン上にグラフ化されるシステムである。

通水量については、従来は水槽に戻ってきたクーリング水の吐出口において、ピーカー等で実測していたが、このシステムの導入により、目視により容易にチェックでき、時系列で記録できる。



写真-4 養生管理システム実施状況

4. 計測結果に基づくひび割れ抑制効果の検証

(1) 計測項目

打設後約1年間にわたる長期の計測を実施した。計測を実施したスパンは、図-11 に示すとおり、覆工を2017年1月17日に打設した無筋コンクリート区間のNo.15スパンである。本スパン打設時のクーリング条件は表-4 に示すとおりである。また、本論文で扱うひずみの定義は、以下の式のとおりである。

$$(\text{拘束ひずみ}) = (\text{全ひずみ}) - (\text{温度ひずみ})$$

全ひずみ：ひずみ計で計測されたひずみ

温度ひずみ：無応力計で測定した熱膨張係数と温度変化の積（自己収縮、乾燥収縮ひずみを含み、自由ひずみと等価と仮定。）

No.15 スパンにおける計測機器の配置箇所を図-12 に示し、その一覧を表-5 に示す。

(2) 熱膨張係数の計測結果

無応力計での計測結果は、図-13 に示すように、温度上昇初期および後期、温度下降期において、温度とひずみの関係式の傾き（熱膨張係数）が変化する<sup>9)</sup>。それぞれの熱膨張係数は、温度上昇初期は  $20.3 \mu/\text{C}$ （2017年1月17日10:00～2017年1月18日0:00）、温度上昇後期は  $10.4 \mu/\text{C}$ （2017年1月18日0:00～2017年1月18日16:00）温度降下期は  $9.9 \mu/\text{C}$ （2017年1月18日16:00以降）であった。

コンクリートの打設は2017年1月17日8:00から開始されているが、計測結果から、ひずみ計測の初期値は、打設開始後2時間経った2017年1月17日10:00とした。

表-4 No.15 スパン打設時の条件

No.	項目	日時
1	通水開始時刻	2017年1月17日 8:00
2	通水停止時刻	2017年1月19日 6:00
3	通水量	20L/min.
4	通水温度の平均	10°C

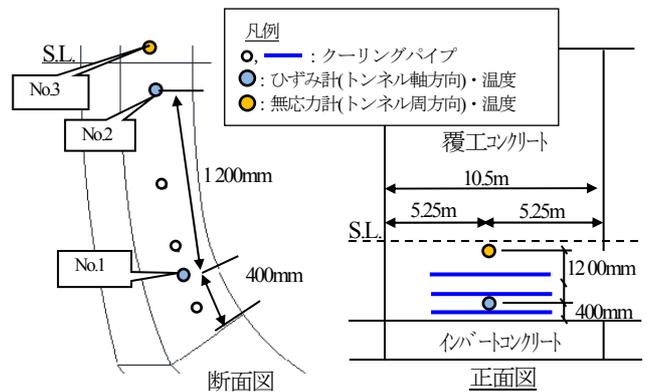


図-12 計測位置図（覆工）

表-5 計測機器一覧表

構造物	計測 No.	設置場所		計測機器	測定対象
覆工	1	中央	中心（インバート+400）	KM200AT	ひずみ 温度
	2	中央	中心（インバート+1600）	KM200AT	ひずみ 温度
No.15 スパン	3	中央	中心（インバート+1600） 無応力計	KM100AT	ひずみ 温度

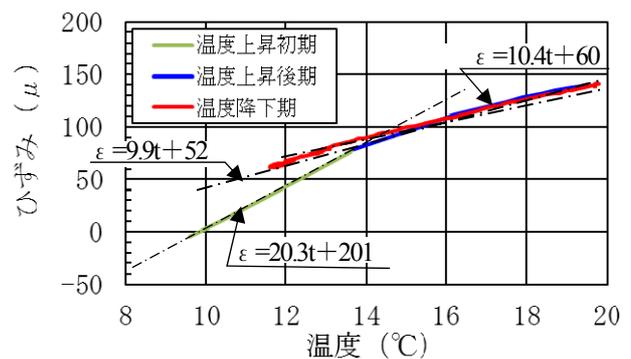


図-13 熱膨張係数測定結果

### (3) 計測結果

#### a) 拘束ひずみの算出方法

本報告では、具体的な拘束ひずみの算出式は、高瀬らの式(7)を参考に、下記の式(1)~(3)を適用した。温度ひずみの算出については、式(2)に示すように、熱膨張係数の変化を反映した。

$$\varepsilon_{i1} = C \times \varepsilon_{m1} + \gamma \times (T_1 - T_0) \quad (1)$$

$$\varepsilon_{i2} = \alpha_a \times (T_1 - T_0) + \alpha_b \times (T_2 - T_1) + \alpha_c \times (T_1 - T_2) \quad (2)$$

$$\varepsilon_{i3} = \varepsilon_{i2} - \varepsilon_{i1} \quad (3)$$

$\varepsilon_{i1}$  : 全ひずみ ( $\times 10^{-6}$ )、C : 校正係数

$\varepsilon_{m1}$  : ひずみ計の指示値 ( $\times 10^{-6}$ )

$\gamma$  : ひずみ計線膨張係数 ( $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )

$T_1$  : コンクリート温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )、 $T_0$  : コンクリート打込み温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )

$\varepsilon_{i2}$  : 温度ひずみ ( $\times 10^{-6}$ )、 $\alpha_a$  : 温度上昇初期熱膨張係数 ( $\mu/^{\circ}\text{C}$ )

$\alpha_b$  : 温度上昇後期線膨張係数 ( $\mu/^{\circ}\text{C}$ )

$\alpha_c$  : 温度降下期熱膨張係数 ( $\mu/^{\circ}\text{C}$ )

$T_1$  : 温度上昇後期のコンクリート温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )、 $T_2$  : コンクリートの最高温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )

$\varepsilon_{i3}$  : 拘束ひずみ ( $\times 10^{-6}$ )

#### b) 計測全般について

図-12 に示した計測点 No.1 の冷却部（インバート上端から 400mm 上方）と No.2 の未冷却部（インバート上端から 1600mm 上方）の計測全期間の温度およびひずみの計測結果を図-14、図-15 に示す。8月29日以降のひずみの計測データのばらつきが大きくなっているが、2回目の冬に向けての再収縮により、ひずみ計とコンクリートの付着強度が低下した影響と考えられる。また、2回目の冬期の方がコンクリートの発熱が収束しているため、部材内部の温度が外気温の低下の影響を大きく受け、低下している。

#### c) 部分パイプクーリングのメカニズム

図-16 および図-17 に、材齢 2 週間までの計測結果に注目した温度およびひずみの計測結果を示す。材齢 2 週間までの温度およびひずみの推移に着目すると、図-16 より、部分パイプクーリングで冷却部をクーリングしたことにより、冷却部が未冷却部より 1.5 $^{\circ}\text{C}$ 低下し、未冷却部の最高温度到達時には、温度差は 4 $^{\circ}\text{C}$ となった。その後、1月19日の6時に通水停止後は、未冷却部が温度降下を継続する一方、冷却部は、2日間程度をかけて温度が 1 $^{\circ}\text{C}$ 微増し、未冷却部が温度降下により収縮する一方で、冷却部が遅れて膨張することが計測された。

ひずみの挙動に着目すると、図-17 より、通水停止後は、未冷却部の拘束ひずみが徐々に増加する一方、冷却

部は温度上昇により膨張するため、冷却部の拘束ひずみが 10 $\mu$  低減するとともに、その後は、未冷却部に比較して、拘束ひずみの増加速度が低減していることが確認できる。

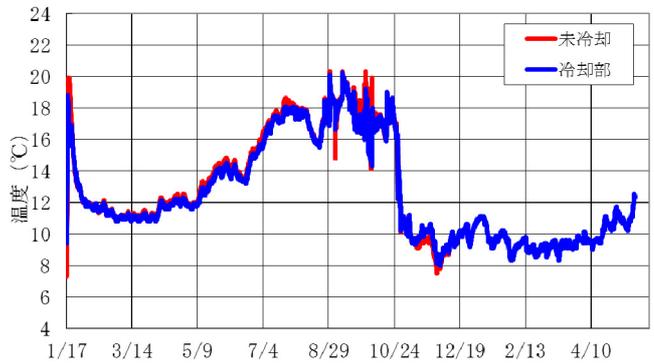


図-14 温度計測結果 (全期間)

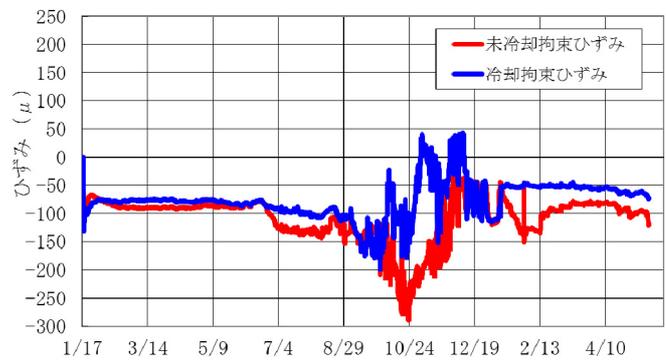


図-15 ひずみ計測結果 (全期間)

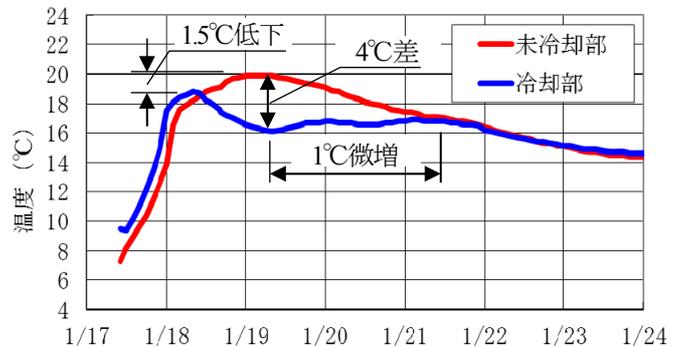


図-16 温度計測結果 (材齢2週間)

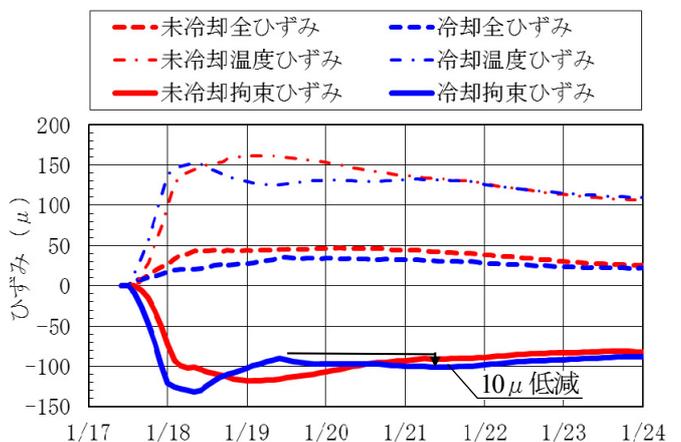


図-17 ひずみ計測結果 (材齢2週間)

d) 覆工の季節変動

図-18 および図-19 に、秋から冬期への外気温が急激に変化した時期に着目した温度およびひずみの計測結果を示す。図-18 より、10月12日ころから、急激な外気温の低下により、内部温度が18℃から10℃まで8℃低下し、図-19 に示すように、冷却部の拘束ひずみが-105μから、39μまで144μ急激に増加した。その後、内部温度が微増し、拘束ひずみは、0μ程度まで低下し、11月26日からの2℃程度の低下では、再び42μまで増加した。部材に発生する拘束ひずみが増加するのは、部材温度が急激に低下する場合および部材温度が最低温度となる場合であることが確認できた。

e) インバートの挙動

インバートにおいて、図-20 に示す位置の温度およびひずみを測定した。その結果を図-21 および図-22 に示す。図-21 より、夏期の温度上昇時は、インバートの温度は覆工コンクリートの冷却部すなわち側壁よりも、センターで4℃、肩部で2℃程度温度が低い。インバート上部の盛土の保温効果および地山温度の影響と考えられる。その後、冬期はインバートと覆工冷却部の温度は同程度となり、インバートよりも覆工の温度変化の方が大きいことが確認できた。また、図-22 より、覆工側壁の拘束体となるインバートの肩部は、覆工より拘束ひずみの変化量が小さく、年間を通して覆工の拘束体として作用していると考えられる。

(4) 引張応力およびひび割れ指数の推定

計測された拘束ひずみから、部材内に発生した引張応力を推定した。部材内部に発生した引張応力の推定は、2012年制定コンクリート標準示方書設計編に従い2時間ごとのコンクリートのヤング係数を計算し、計測された拘束ひずみの2時間ごとの増分を乗じて累計して算出した。温度上昇初期については、凝結始発前であるため、応力の算定に考慮していない。その結果を図-23 に示す。この結果、冷却部に発生していると推定される引張応力は最大 2.95N/mm<sup>2</sup>、その時点で想定される引張強度は 3.18N/mm<sup>2</sup> であり、実測値から推定したひび割れ指数は、図-24 に示すように、1.08 (ひび割れ発生確率 39.5%) であった。今回計測したスパンは、冬期低温期の打設にも関わらず、打設の翌年の冬期での外気温の低下で、引張応力が卓越し、ひび割れ発生確率が高くなった。計測スパンおよびその他のスパンにおいても、現在、ひび割れの発生は確認されていない。

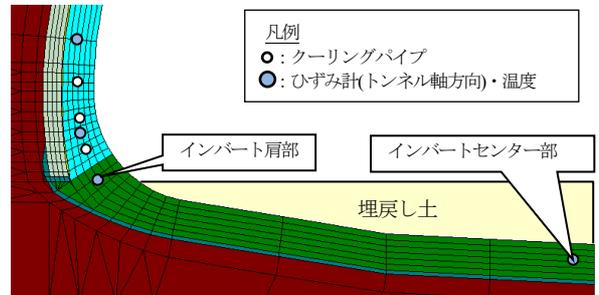


図-20 温度およびひずみ計測位置図 (インバート)

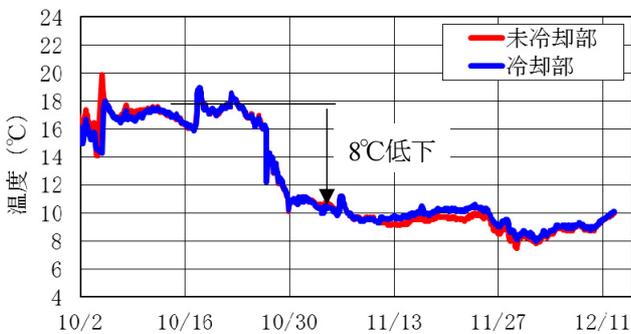


図-18 温度計測結果 (秋から冬期)

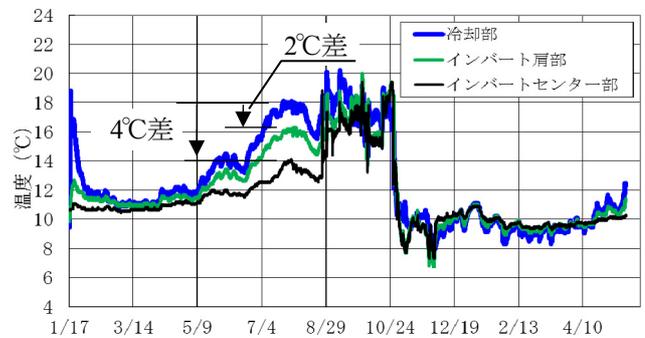


図-21 インバート温度計測結果 (全期間)

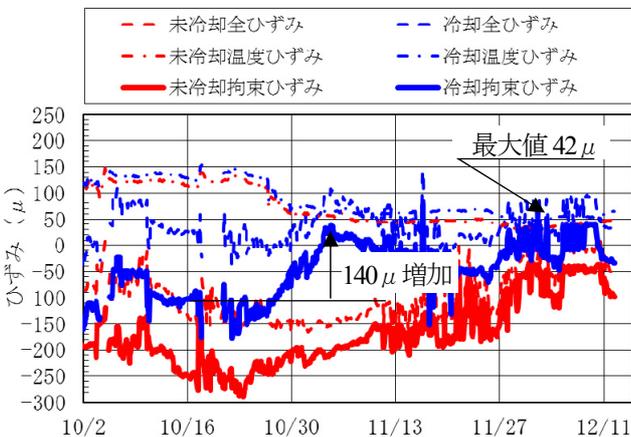


図-19 ひずみ計測結果 (秋から冬期)

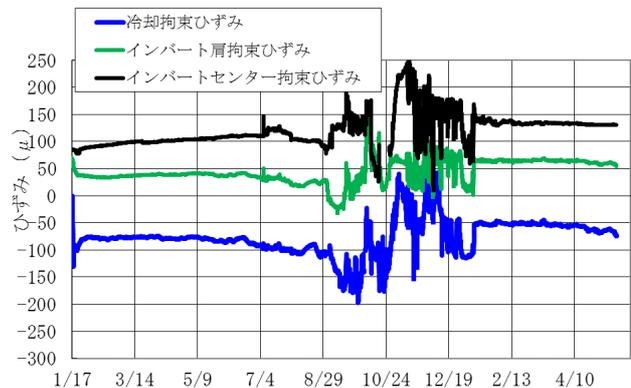


図-22 インバートひずみ計測結果 (全期間)

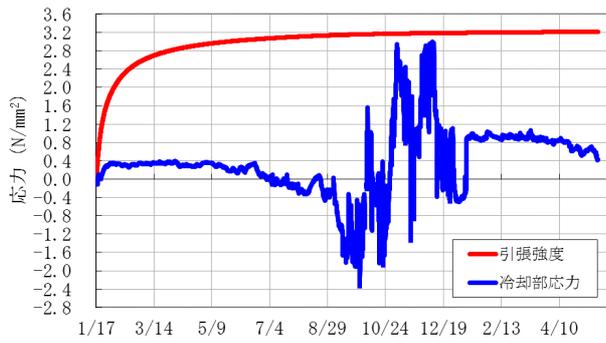


図-23 実測値から推定した引張応力と引張強度

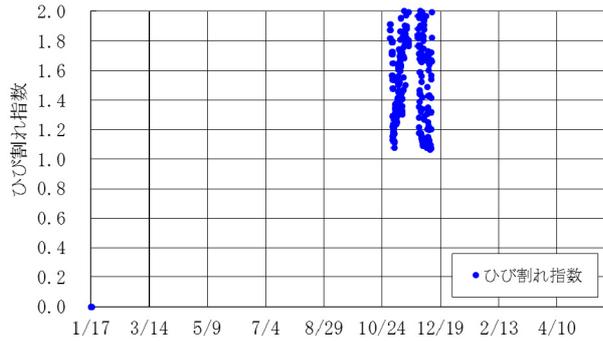


図-24 実測値から推定したひび割れ指数

表-6 事後解析時の入力パラメータ

No.	パラメータ	入力値
1	打設日	2017年1月17日
2	打込み温度	11℃
3	外気温	実測値 (図-25 参照)
4	通水開始時刻	2017年1月17日 8:00
5	通水停止時刻	2017年1月19日 6:00
6	通水量	20L/min.
7	通水温度	10℃

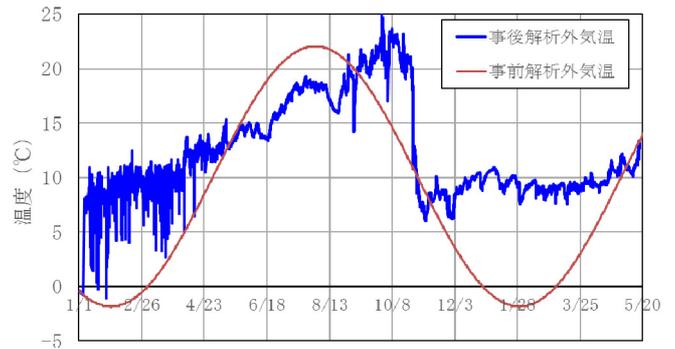


図-25 事前解析と事後解析の外気温の比較

## 5. 事後解析に基づくひび割れ抑制効果の検証

### (1) 事後解析の入力条件

三次元 FEM 温度応力解析による事後解析を実施した。事後解析は、実際に部分パイプクーリングを実施した状況を反映した解析と仮に部分パイプクーリングを実施しなかった場合の解析の2通りを実施した。事前解析時から変更したパラメータは、表-6 に示す通りである。

### (2) 事後解析の結果

部分パイプクーリング実施時と仮に無対策であった場合の事後解析におけるひび割れ指数分布図を図-26 に示す。無対策であった場合は、ひび割れ指数 1.07 (ひび割れ発生確率 41%)、部分パイプクーリングを実施した場合は、ひび割れ指数 1.35 (ひび割れ発生確率 18%) となり、部分パイプクーリングを実施したことで、ひび割れ指数を 0.28 改善し、ひび割れの発生確率を 23% 低減できた結果となった。

事後解析と実測値の温度履歴の比較を図-27 に示す。材齢初期に 2℃程度の乖離があるが、おおよそ一致していると考えられる。また、事後解析の応力履歴図を図-28 に示す。実測値 (図-15、図-19 参照) において確認された温度の急激な低下による拘束ひずみの増大による応力の増加が表現できている。また、打設後 1 年以上経過後においても、材齢 2 日まで実施した部分パイプクーリングの効果が残っている。しかし、温度履歴は実測値

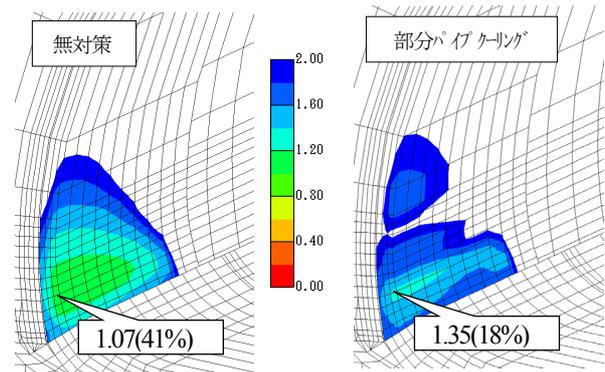


図-26 事後解析結果 (ひび割れ指数分布図)



図-27 事後解析結果 (温度履歴図)

と事後解析値は一致しているが、実測値から推定した応力 (図-23 参照) と事後解析の値は乖離している。これまでの他現場での計測結果<sup>4)</sup><sup>9)</sup>からも一致する場合と乖離する場合は報告されており、今後の課題である。

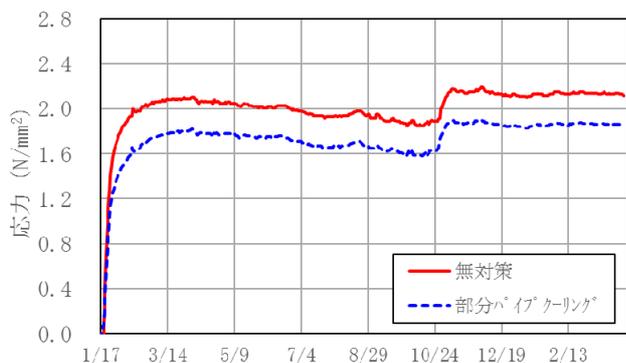


図-28 事後解析結果（応力履歴図）

## 5. まとめ

- (1) 三次元 FEM 温度応力解析による事前解析の結果、部分パイプクーリングによる 36 時間のクーリングにより、ひび割れ発生確率を 31%低減できることが確認できた。
- (2) 事前解析による解析期間は、打設後 1 年 5 ヶ月の長期とした。その結果、打設（2016 年 11 月）から、2 回目の冬期（2018 年 2 月）の外気温の低下により、ひび割れ指数が低下することが確認できた。
- (3) 部分パイプクーリングは、1 インチの垂鉛メッキ鋼管（JIS G 3442）を両側壁に 400mm ピッチで 3 段配置し、200L 水槽 1 基、1 インチ送水ポンプ 1 台、4.3kW 冷却装置 1 台からなる送水設備にて施工することが確認できた。
- (4) ひび割れの発生が懸念される部分のみを短期間冷却する部分パイプクーリングは、冷却部の温度低下およびクーリング停止後に、未冷却部が温度収縮する一方、冷却部は遅れて膨張することで、拘束ひずみが低減することが計測により確認できた。
- (5) 秋から冬期への外気温画急激に低下した時期に、内部温度が 8℃低下し、拘束ひずみが 144 $\mu$  急激に増加した。部材に発生する拘束ひずみが増加するのは、最高温度到達後に外気温まですり付く材齢 2 週間程度の期間と、季節変化による部材温度が急激に低下する場合であることが計測により確認できた。
- (6) インバートは、埋戻し土の保温効果および地山の影響により、年間を通して、覆工より温度変化量が 2~4℃低く、また拘束ひずみの変化量も小さい。そのため、年間を通して覆工の拘束体として作用していると考えられる。
- (7) 三次元 FEM 温度応力解析による事前解析の結果、部分パイプクーリングにより、ひび割れ指数が 0.28 改善し、ひび割れ発生確率を 23%低減できたことが確認できた。
- (8) 事後解析により、冬期の急激な温度低下による引張応力の増大が再現できることが、確認できた。

- (9) 事後解析による温度履歴は、実測値と近似したが、応力履歴は、実測値から推定した応力と乖離した。実測された拘束ひずみから応力を算定する方法に関しては、今後の課題である。

## 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，p.1，2016.
- 2) 高瀬和男・和田典生・福永靖雄・石川敏之：場所打ち PC 床版の材齢初期における膨張材効果の評価方法に関する一提案，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.225-230，2002
- 3) 日本コンクリート工学：マスコンクリートのひび割れ制御指針 2016，pp.25~36，2016
- 4) 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，土木学会論文集 F1(トンネル工学)，72 巻，No.3，I\_36-I\_46，2016
- 5) 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，pp.1629-1634，2016
- 6) 白岩誠史・栗原浩彦・三沢良太・土屋徹・川中政美：坑口付近覆工コンクリートの温度ひび割れ抑制および表層品質向上対策に関する検討，土木学会論文集 F1(トンネル工学)，73 巻，p.I\_32-I\_45，2017.12
- 7) 稲田匠吾・赤池考起・白岩誠史・田口敬二・松井匡宏：部分パイプクーリングのひび割れ抑制メカニズムと効果の検証，土木学会第 73 回年次学術講演会，VI-096，pp.193-194，平成 30 年 8 月
- 8) 西正己・赤池考起・稲田匠吾・古原正人・松井匡宏：部分パイプクーリングとひび割れ補強鉄筋のひび割れ抑制効果の比較，土木学会第 73 回年次学術講演会，VI-097，pp.191-192，平成 30 年 8 月
- 9) 政岡龍司，中村康祐，佐々木照夫，白岩誠史，庄司彰：橋梁下部工における部分パイプクーリングのひび割れ抑制効果の確認，土木学会第 72 回年次学術講演会，VI-576，pp.1151-1152，平成 29 年 9 月
- 10) 政岡龍司，杉浦規之，佐々木照夫，白岩誠史，河上伸一：橋台における部分パイプクーリングのひび割れ抑制効果の確認，土木学会第 73 回年次学術講演会，VI-592，平成 30 年 9 月
- 11) 栗原浩彦，土居航，佐成屋淳，白岩誠史，河上伸一：橋台における部分パイプクーリングのひび割れ抑制効果の確認，土木学会第 73 回年次学術講演会，VI-592，平成 30 年 9 月

(2018.8.10 受付)

STUDY ON MEASURES TO RESTRAIN THERMAL CRACKS OF THE CONCRETE  
LINING IN FREEZING AREA BASED ON LONG MEASUREMENT OF STRAIN AND  
TEMPERATURE

Seishi SHIRAIWA, Noriyuki SUGIURA, Kosuke NAKAMURA,  
Shinichi IIDA, Teruo SASAKI and Shinichi KAWAKAMI

“Localized Pipe Cooling” was applied to concrete lining of No 106 national highway located in a freezing area in Iwate-prefecture and prevented occurrence of thermal cracks as the outside restriction crack measure which occurs to a lining concrete side wall by a restriction of invert concrete. I report on the implementation situation of the localized pipe cooling and result of temperature and strain measurement for 1 year. And the following item was made clear. (1). Crack restraint mechanism of “the Localized Pipe Cooling” by which a short cooling does only the part where occurrence of a crack is worried about. (2). Crack initiation danger of the concrete lining which is at the time of a winter outside temperature decline. (3) The difference in the annual shrinkage behavior of invert and lining and the restriction effect of the invert concrete .