

報告 インバートコンクリートの拘束により発生する覆工コンクリートの外部拘束ひび割れに対する対策とその効果確認

杉浦 規之*1・中村 康祐*2・白岩 誠史*3・河上 伸一*4

要旨：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”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を報告するとともに、覆工内部の温度およびひずみを 1 年間計測し、冷却部と未冷却部の温度およびひずみの計測により、部分パイプクーリングのひび割れ抑制メカニズムを把握し、また、冬期打設したスパンにおいても、秋から冬期への外気温の急激な変化により、ひび割れの発生確率が高くなることが実測できた。

キーワード：外部拘束、インバートコンクリート、覆工コンクリート、パイプクーリング、ひずみ計測

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）の外部拘束ひび割れは、コンクリート硬化時の温度上昇や坑外の気温の低下による温度収縮、坑口付近の湿度の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は、多く発見されている。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およびその効果を実測により定量的に評価した結果を報告する。

2. 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^{2,3)}、石川県⁴⁾、大分県の3現場で覆工への適用実績がある。また、橋梁下部工へ

の適用事例⁵⁾もある。

部分パイプクーリングの概要図を図-2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 の水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。

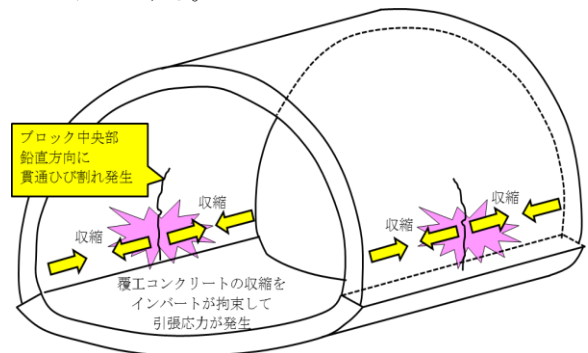


図-1 インバート拘束による外部拘束ひび割れ

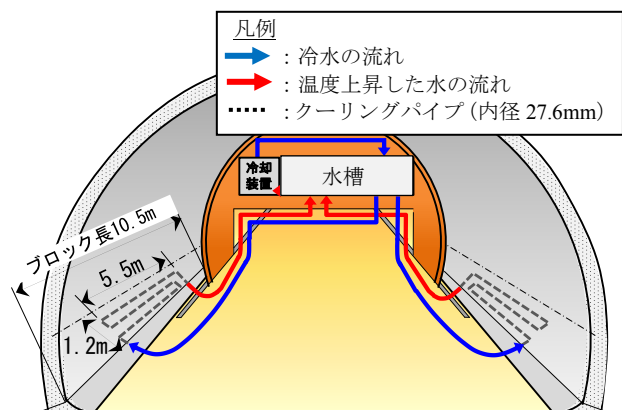


図-2 部分パイプクーリング概要図

*1 株式会社 安藤・間 東北支店 土木部 (正会員)

*2 株式会社 安藤・間 東北支店 土木部

*3 株式会社 安藤・間 土木事業本部土木設計部 工博 (正会員)

*4 国土交通省 東北地方整備局 三陸国道事務所 工務第一課 建設監督官

本現場では、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覆工に採用した。表-1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”⁹⁾に記載のある対策に加え、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、費用対効果が高いことから選定した。

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 88m²
覆工厚さ 450 mm
橋梁下部工 橋脚 4 基, 橋台 1 基

3. 部分パイプクーリングの実施状況

3.1 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

3.2 部分パイプクーリングの実施範囲および期間

部分パイプクーリングの実施範囲を図-3 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。

表-1 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]					若材齢強度が必要な覆工コンクリートへは、適用が困難。	
		① 低発熱型のセメントの使用	○高	×影響あり	×高	△		
		[混和材料の使用]						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。
		② 高性能 A E 減水剤の使用	△中	○影響なし	△中	△		
		[単位セメント量の低減]						スランブ 15 cm 程度が必要なため、適用は困難。
		③ スランブ低減	△中	×影響あり	○低	△		
		[単位セメント量の低減]						若材齢強度が必要なため、適用は困難。
	④ 管理材齢延長	△中	×影響あり	○低	△			
	[材料温度の低減]						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。	
	⑤ プレクーリング	△中	○影響なし	×高	△			
	[養生方法]						効果はあるが、脱枠後の冷却となり冷却効果が小さい。	
⑥ ポストクーリング	○高	×影響大	△中	△				
[養生方法]						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。		
b. 収縮ひずみを低減させる方法	⑦ 部分パイプクーリング	○高	○影響なし	△中	○			
	[熱膨張係数の小さい材料の選択]						地産地消が原則	
	⑧ 熱膨張係数の小さい骨材選定	△中	○影響なし	△中	△			
外部拘束度を低減させる方法	[収縮ひずみを低減させる混和材料の使用]						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。	
	⑨ 膨張材の使用	○高	○影響なし	×高	○			
	[ブロックの高さと長さの比を低減]						工程への影響が大きい。誘発目地の設置は困難。	
温度ひび割れ幅を制御する方法	⑩ スパン長の低減	○高	×影響あり	×高	×			
	[鉄筋比の増加]						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。	
		⑪ ひび割れ補強鉄筋の配置	×低	○影響なし	○低	○		

* 日本コンクリート工学会発行“マスコンクリートのひび割れ制御指針 2016”を参考に作成

▽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 (°C) *	-	-	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 (°C) *	-	-	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-3 部分パイプクーリング実施スパン

部分パイプクーリング実施箇所のコンクリートの配合は表-2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。

3.3 部分パイプクーリング実施状況

(1) 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。

(2) 送水設備

送水設備は、写真-2に示すように、2000L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。

表-2 コンクリートの配合

No.	適用箇所	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					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	-



写真-1 クーリングパイプ設置状況

(3) 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。

流量については、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、2Lのビ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るようになった。また、温度も同様であるが、記録がデジタルデータに残ることで、事後検証に活用できる。

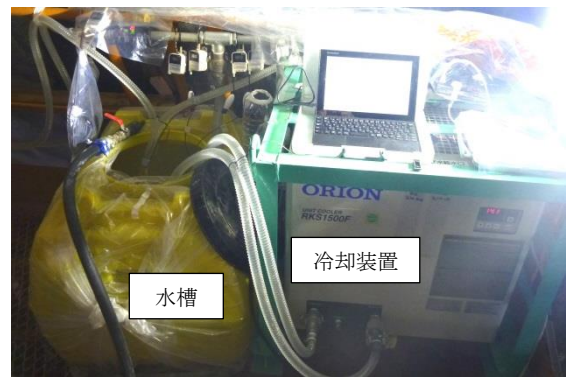


写真-2 送水設備設置状況 1

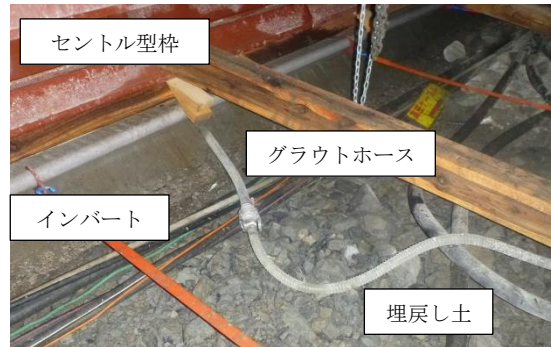


写真-3 注水口



写真-4 送水設備設置状況 2

4. 計測

4.1 計測項目および目的

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-3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-3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。

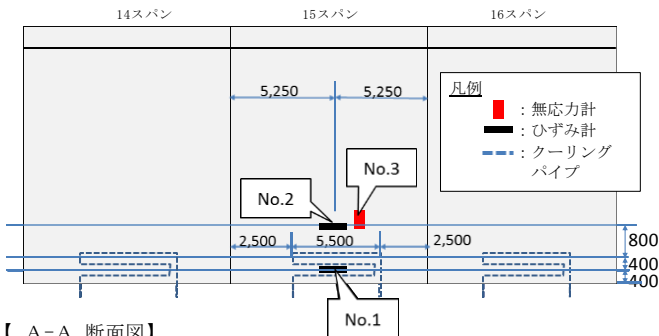
$$\begin{aligned} \text{拘束ひずみ} &= (\text{全ひずみ}) - (\text{温度ひずみ}) \\ \text{全ひずみ} &: \text{ひずみ計で計測されたひずみ} \\ \text{温度ひずみ} &: \text{無応力計で測定した熱膨張係数と} \\ &\quad \text{温度変化の積(自己収縮, 乾燥収縮ひずみを} \\ &\quad \text{含み, 自由ひずみと等価と仮定。)} \end{aligned}$$

No.15スパンにおける計測機器の配置箇所を図-4に示し、その一覧を表-4に示す。計測の目的は、“部分パイプクーリング実施時の効果把握”、“冬期の温度低下時期のひずみの挙動の把握”の2つである。

表-3 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	通水温度の平均	10°C

【正面図】



【A-A断面図】

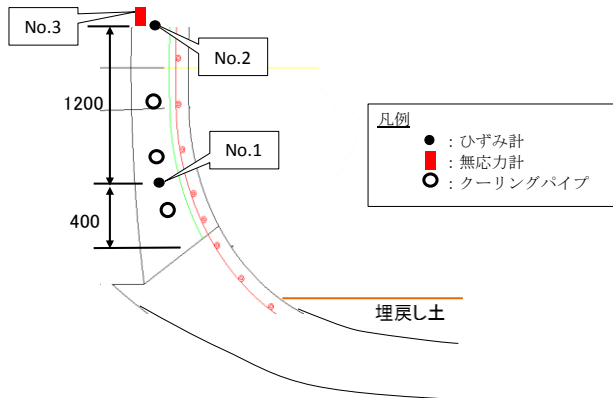


図-4 計測機器配置位置

4.2 熱膨張係数の計測結果

無応力計での計測結果は、図-5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。それぞれの熱膨張係数は、打設開始時(2017年1月17日10:00)から温度上昇初期(2017年1月18日0:00)までは $20.3 \mu / ^\circ\text{C}$ 、温度上昇後期(2017年1月18日16:00)までは $10.4 \mu / ^\circ\text{C}$ 、その後の温度降下期は $9.9 \mu / ^\circ\text{C}$ であった。これらの計測結果から、温度およびひずみ計測の初期値は、打設開始時とした。

4.3 部分パイプクーリングのひび割れ抑制効果

本報告では、具体的な拘束ひずみの算出式は、高瀬らの式(1)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。

$$\epsilon_{i1} = C \times \epsilon_{mi} + \gamma \times (T_i - T_0) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \epsilon_{i2} = \alpha_a \times (T_i - T_0) + \alpha_b \times (T_2 - T_1) \\ + \alpha_c \times (T_i - T_2) \quad (2) \end{aligned}$$

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

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

ϵ_{mi} : ひずみ計の指示値($\times 10^{-6}$)

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

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

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

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

α_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($^\circ\text{C}$)

ϵ_{i3} : 拘束ひずみ($\times 10^{-6}$)

表-4 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

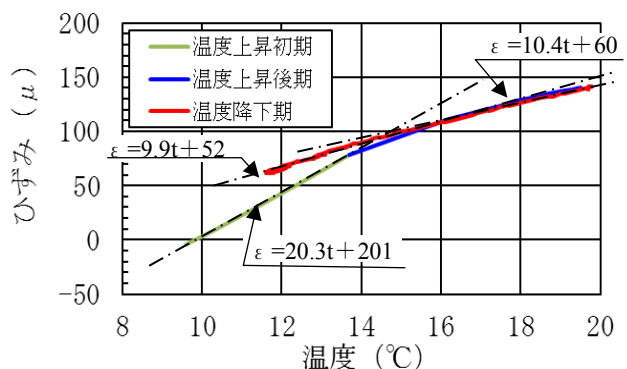


図-5 熱膨張係数測定結果

図-4に示した計測点No.1の冷却部(インバート+400)とNo.2の未冷却部(インバート+1600)の計測全期間の温度およびひずみの計測結果を図-6、図-7に示す。また、材齢2週間までの計測結果に注目して図-8および図-9、秋から冬期への外気温の急激な変化時期に着目して図-10および図-11にそれぞれ計測結果を示す。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。

全期間での温度およびひずみの推移は、図-6および図-7により確認できる。ここでは、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-8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℃低下し、未冷却部の最高温度到達時には、温度差は4℃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℃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-9より、通水により、冷却部の拘束ひずみは、未冷却部より、40μ低減した。また、その後、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10μ低減するとともに、未冷却部に比較して、拘束ひずみの増加速度が低減された。

次に、10月後半の秋から冬期への季節の変わり目に着目すると、図-10より、10月26日から、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-11に示すように、冷却部の拘束ひずみが-150μから、

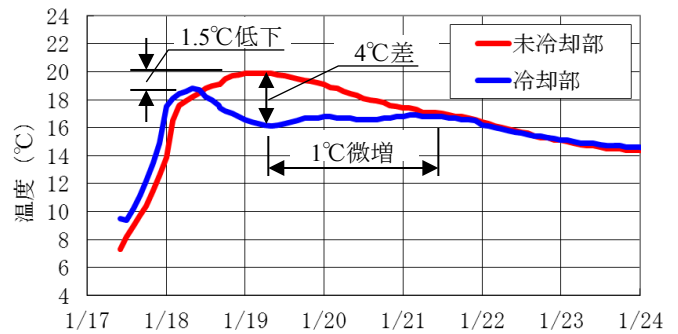


図-8 温度計測結果(材齢2週間)

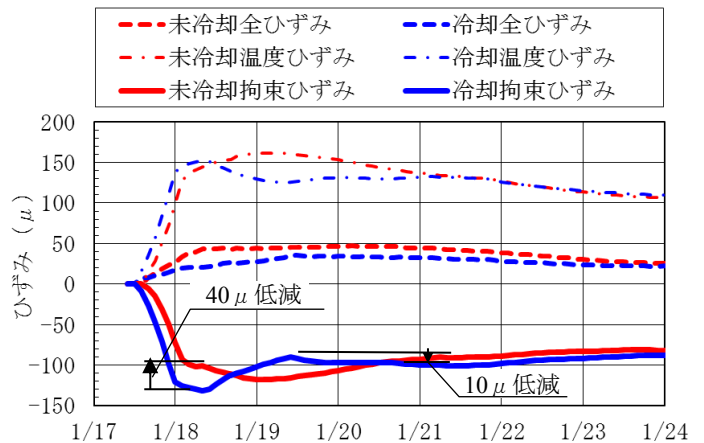


図-9 ひずみ計測結果(材齢2週間)

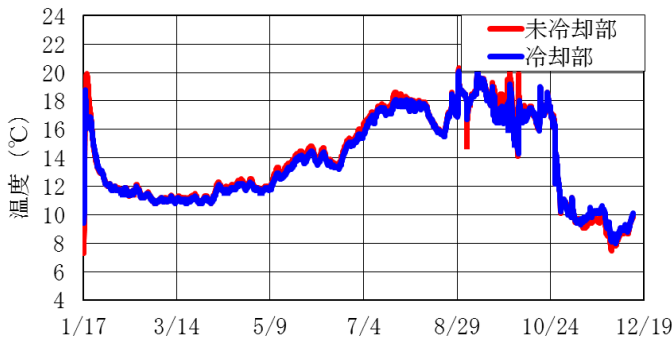


図-6 温度計測結果(全期間)

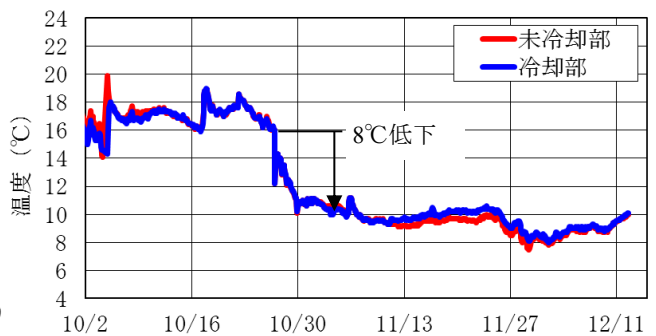


図-10 温度計測結果(秋から冬期)

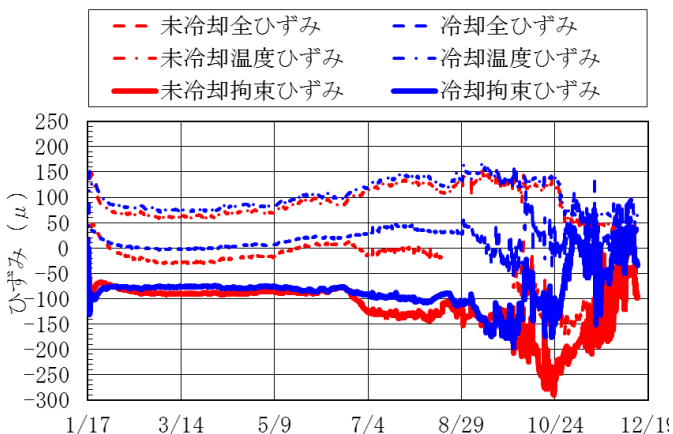


図-7 ひずみ計測結果(全期間)

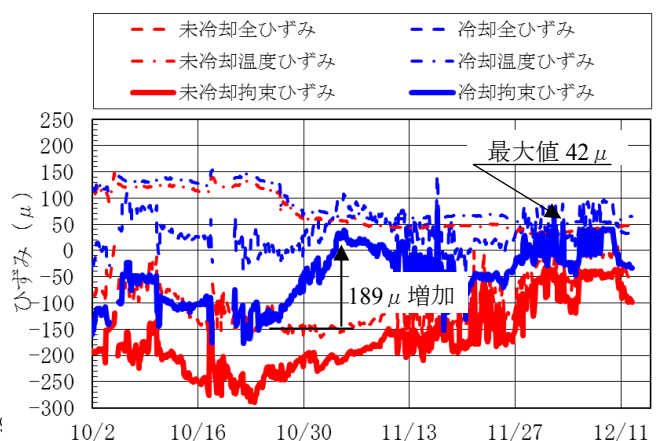


図-11 ひずみ計測結果(秋から冬期)

39 μ まで189 μ 急激に増加した。その後、内部温度が微増し、拘束ひずみは、0 μ 程度まで低下し、11月26日からの2 $^{\circ}$ C程度の低下では、再び42 μ 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。

次に、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-12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/mm²、その時点で想定される引張強度は3.18N/mm²であり、実測値から推定したひび割れ指数は、図-13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が、継続的なモニタリングが必要である。

5. まとめ

- (i) 部分パイプクーリングは、ひび割れ抑制効果が高

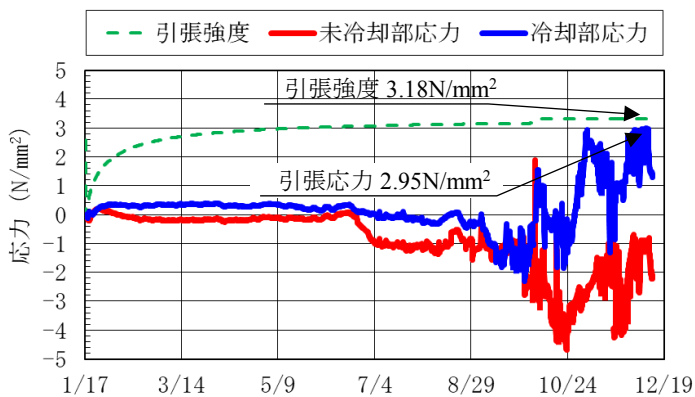


図-12 冷却部の推定引張応力と引張強度

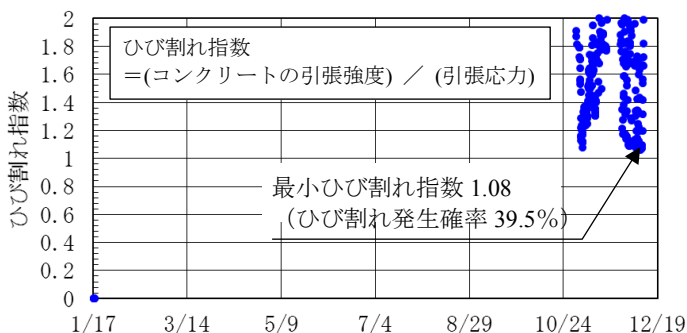


図-13 実測値から算出したひび割れ指数

く、46時間程度のクーリングのため、覆工打設工程に影響しない。

- (ii) 部分パイプクーリングは、1インチの亜鉛メッキ鋼管（JIS G 3442）を両側壁に400mmピッチで3段配置し、2000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できる。
- (iii) 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できた。
- (iv) 拘束ひずみが増加し、ひび割れ発生の可能性が高くなるのは、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実測できた。
- (v) 冬期低温期に打設したスパンにおいても、翌冬期の外気温の再低下で、引張応力が増加し、ひび割れ発生確率が高まる結果となった。

参考文献

- 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.
- 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
- 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.
- 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
- 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.1151-1152，2017.
- 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.
- 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