

報告 覆工コンクリートおよび明かり構造物への部分パイプクーリングの適用方法に関する報告

白岩 誠史*1・川中 政美*2・赤池 考起*2・庄野 昭*2

要旨： 下端を拘束された壁上構造物の外部拘束ひび割れの発生を効率的に抑制するために、壁下方の拘束の大きい部分のみを短期間冷却し、上方を未冷却とすることで、全体を長期間冷却した場合と同程度のひび割れ抑制効果が得られる“部分パイプクーリング工法”を開発した。冷却停止後の冷却部の温度再上昇による“遅れ膨張効果”および未冷却部の収縮量大による“締付け効果”を利用することが特徴で、最適な冷却範囲や冷却期間を設定する必要がある。施工開始前の事前に実施する3次元FEM温度応力解析による検討の他に、覆工コンクリートや橋脚等の明かり構造物への適用実績および温度計測結果からも検討した。

キーワード： 外部拘束、ひび割れ、パイプクーリング、ひずみ計測、温度計測

1. はじめに

図-1に示すようなインバートコンクリート（以下、インバート）の拘束により、覆工コンクリート（以下、覆工）に発生する外部拘束ひび割れを抑制するために開発したのが部分パイプクーリングである¹⁾。覆工の通常の施工サイクルである2日に1回の打込みを妨げないように、冷却期間の短縮および冷却範囲を限定することを目標として開発した。その後、覆工ばかりでなく、橋台等の壁上構造物にも適用実績を重ねた^{2),3),4),5)}。

本論文では、これまでの適用実績から得られた部分パイプクーリングのひび割れ抑制メカニズムの概念を総括し、通常のクーリングでは行わない同時に打込む1つの部材において、冷却部と未冷却部を意図的に作り出す部分パイプクーリングの適用方法について、覆工コンクリートと明かり構造物に分けて知見をまとめた。

2. 部分パイプクーリングのメカニズム

通常、マスコンクリートのひび割れ対策として適用するパイプクーリング^{6),7)}は、コンクリート打込み後の水和熱が高まる部分を冷却するため、ほぼ部材全体を冷却し、部材全体の温度を低下させて温度ひび割れを抑制する。

一方、部分パイプクーリングは、図-2に示すように、

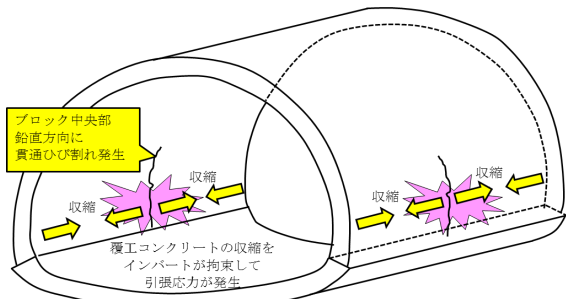


図-1 インバート拘束による外部拘束ひび割れ

温度応力により引張応力が卓越する下部のみを冷却し、上部を未冷却とする⁸⁾。また、部分パイプクーリングを実施した時に発生する応力の概念図を図-3、温度および応力の履歴図を図-4に示す。コンクリート打ち込み時

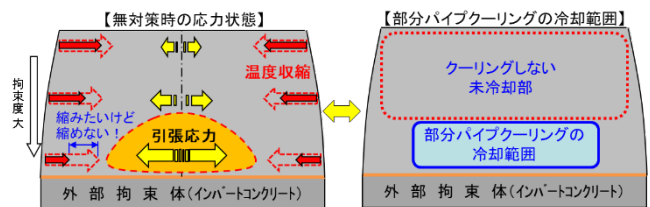


図-2 引張応力の卓越する箇所と冷却範囲

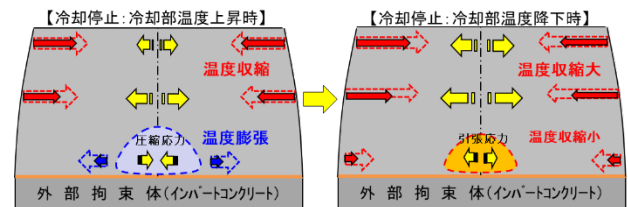


図-3 部分パイプクーリング実施時の応力状態

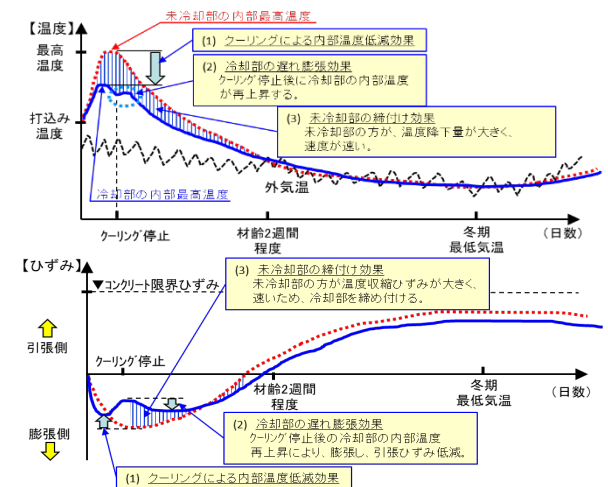


図-4 部分パイプクーリング実施時の温度およびひずみ履歴の概念図

*1 株式会社 安藤・間 建設本部 土木技術統括部 土木設計部 工博 (正会員)

*2 株式会社 安藤・間 建設本部 土木技術統括部 土木設計部 (正会員)

よりクーリングを実施することで、図-4中(1)のように“クーリングによる内部温度低減効果”が期待できる。その後、クーリングを停止すると周辺の未冷却部の温度は低下するが、冷却部においては図-3中の左図および図-4中(2)に示すように冷却部の温度が再上昇し、膨張することで、“冷却部の遅れ膨張効果”が期待できる。また、図-3中の右図および図-4中(3)に示すように、温度降下時、上部の未冷却部の温度収縮ひずみ量が冷却部より大きいため、“未冷却部の締付け効果”も期待できる。これら3つの効果により、限定された部分のみを短期間クーリングすることで、引張応力の集中する冷却部の引張応力を低減し、ひび割れの発生を効率よく抑制できることが確認されている。

一方、これら3つの効果により成り立つ部分パイプクーリングは、過冷却による冷却部と未冷却部の温度差拡大による温度ひび割れ、冷却期間の延長による遅れ膨張効果および締付け効果の低下が懸念される。そのため、クーリングパイプへの通水温度や通水量、通水停止の時期の判断が重要となる。

3. 覆工コンクリートへの適用時のクーリング方法

3.1 ひび割れ対策の選定

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1)~10)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から、他の対策に比較して優れていると判断し、適用した。

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] 1) 低発熱型のセメントの使用	○高	△影響あり	×高	△	サイロの関係で、常時使用できる生コン工場が少ない。
		[混和材料の使用] 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) スランプ低減	△中	○影響なし	○低	×	耐震性向上のため、過密配筋となる構造物が多く、施工が困難。
		[単位セメント量の低減] 4) 管理材齢延長	△中	△影響あり	○低	△	温度上昇抑制効果は限定的。
		[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	△影響あり	△中	△	鉛直パイプクーリングの場合、クーリング開始が打設完了後、通水期間が5日程度となる。
	b. 収縮ひずみを低減させる方法	[熱膨張係数の小さい材料の選択] 7) 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
		[収縮ひずみを低減させる混和材料の使用] 8) 膨張材の使用	△中	○影響なし	×高	△	部材の厚い構造物では、効果が限定的。
		外部拘束度を低減させる方法 9) 誘発目地の設置	○高	○影響なし	△中	○	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 [鉄筋比の増加] 10) 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。
本工法	[養生方法] 部分パイプクーリング	○高	○影響なし	△中	○	限定された短期間のクーリングとすることで、手間低減、工程への影響低減となる。	

3.2 解析モデル

解析モデルは図-5に示すように1/4モデルとしている。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て設定した。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、圧縮応力のみ伝達し、引張り応力を伝達しないBond要素を設けた。

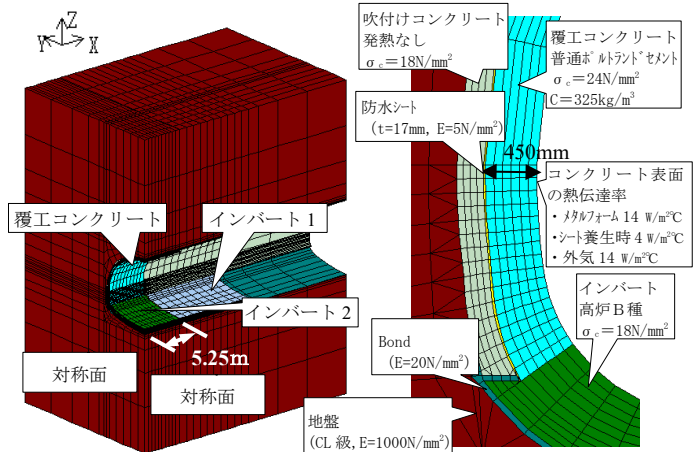


図-5 覆工コンクリート解析モデル (1/4モデル)

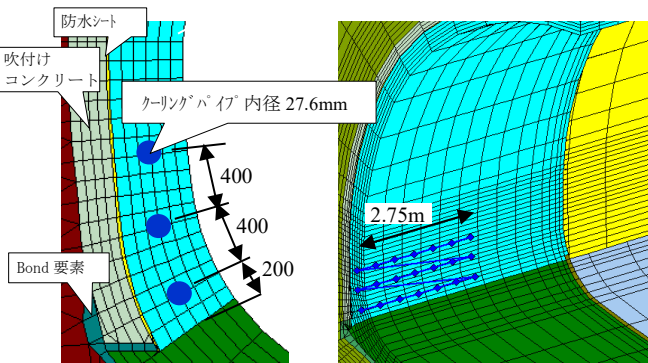


図-6 クーリングパイプ配置図

クーリングパイプの配置は、これまでの実績から、内径 27.6mm の鋼管を 400mm ピッチで 3 段配置し、延長方向 5.5m × 高さ 1.2m の範囲を冷却した (図-6 参照)。

3.3 事前解析による検討結果

外気温が最も高くなることが予想される 8 月 1 日 (想
 提外気温 28℃, 打込み温度 31℃) の打設ブロックを対象
 として検討した。

主な解析への入力値を表-2 に示す。また、解析結果を
 図-7, 8 に示す。無対策の場合、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。部分パイプク
 ーリングを実施する場合は、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。
 クーリングパイプの解析条件は、直径 25mm、通水量 12L/
 分、通水期間 34 時間である。直径 25mm のパイプ表面
 の熱伝達率は田辺らの式¹⁰⁾により 234W/m²℃とした。

3.4 クーリングシステム

解析による検討結果に従って、実際の覆工コンクリ
 ートにクーリングパイプを埋め込み、クーリングを実施し
 た。システムのイメージ図を図-9 に示す。覆工コンク
 リート左右の側壁内部に、内空直径 25mm、延長 5.5m の
 鋼製の亜鉛メッキパイプを 400mm ピッチで 3 段設置す
 る。打設開始直後から、セントルに設置した水槽から、
 冷却水を解析で想定した温度および流速で送水する。軀
 体内部のコンクリートの熱を吸収させ、温度上昇した水
 を、タンクに戻し、冷却装置にて想定温度まで冷却し、
 再度、冷却水としてクーリングパイプに送水する。

表-2 解析入力値 (覆工)

物性値	発熱体		非発熱体	
	覆工コン	インパ-トコン	防水シート	地盤
熱伝導率 (W/m ² ℃)	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 $Q(t) = Q_{\infty} (1 - e^{-r(t-t_0)^s})$		—	—
	330(N)	290(BB)		
熱膨張 係数 (×10 ⁻⁶ /℃)	10	12	12	12
ポ-ソン比	0.2	0.2	0.2	0.25
有効ヤング 係数 (N/mm ²)	$E_c(t') = \Phi_c(t') \times 6.3 \times 10^3 f'_c(t')^{0.45}$ $\Phi_c(t')$: 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)	$\epsilon_{sh}(t_e) = \eta_c \epsilon_{sh,\infty} \beta_{sh}(t_e)$		—	—

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

3.5 覆工コンクリート適用時のクーリング方法

表-3 に、これまでの覆工への適用実績およびクー
 リング条件を示す。2020 年 1 月現在、6 件の適用実績があ
 る。東北地方 3 件 (No.1,2,4)、北陸地方 1 件 (No.3)、
 近畿地方 1 件 (No.6)、九州地方 1 件 (No.5) であり、
 概ね日本の北から南まで実績がある。また、実施時期に
 ついては、夏期の高温時 (No.2,3,6) から冬期の低温時
 (No.4,5,6) まで、1 年を通しての施工実績がある。(カ
 ッコ内は、表-3 中の No.)

表-3 に示す全ての現場において、本報告の 2.2 節の
 ように、施工前に 3 次元 FEM 温度応力解析を実施しク
 ーリングパイプの位置、通水期間、通水量、通水温度を
 決定した。表-3 中 No.1 の部分パイプクーリング最初の
 適用現場についてはひび割れ幅 0.1mm 程度のひび割れ

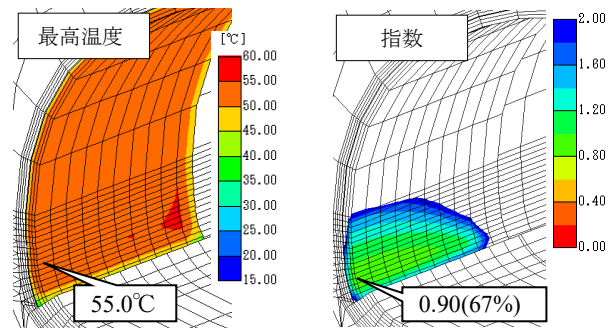


図-7 事前解析時の部材中心の温度・指数分布図
 クーリング未実施の場合

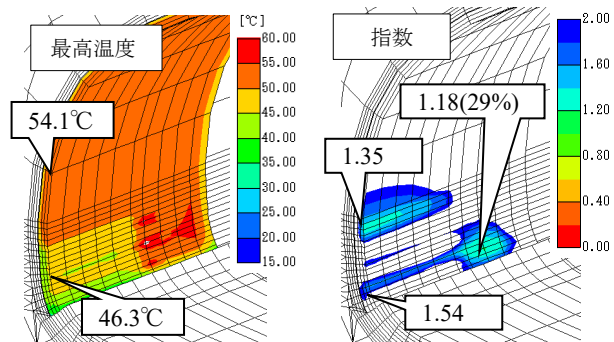


図-8 事前解析時の部材中心の温度・指数分布図
 クーリング実施 (12L/分, 34 時間) の場合

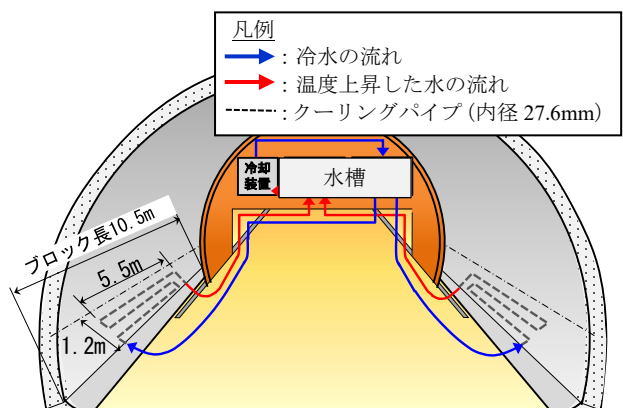


図-9 部分パイプクーリングの概要図

表-3 覆工コンクリートへの部分パイプクーリング適用実績

No.	工事名	企業社	構造物			LPクーリング 実施期間	パイプ配置				通水条件			
			構造物	壁厚 (mm)	延長 (m)		径	延長 (m)	ピッチ (mm)	本数	期間	温度* (°C)	流量 (L/分)	
1	国道115号馬館山トンネル工事	国土交通省 東北地方整備局 福島河川国道事務所	覆工コンクリート (境ノ目T)	14 スパン	450	10.5	2014/9/26 ~ 2014/11/3	25A	5.5	400	1列 3段	48時間	15 (10)	4
2	国道115号馬館山トンネル工事	国土交通省 東北地方整備局 福島河川国道事務所	覆工コンクリート (馬館山T)	18 スパン	450	10.5	2015/5/25 ~ 2015/9/14	25A	5.5	400	1列 3段	48時間	15 (15)	10
3	H26-28金沢東環 神谷内トンネル(2 期線)工事	国土交通省 北陸地方整備局 金沢河川国道事務所	覆工コンクリート	3 スパン	450~ 530	10.5	2016/8/4 ~ 2016/8/30	25A	5.5	400	1列 3段	30時間	16-24 (15)	16
4	国道106号箱石地 区道路工事	国土交通省 東北地方整備局 三陸国道事務所	覆工コンクリート	18 スパン	450	10.5	2016/11/30 ~ 2017/1/30	25A	5.5	400	1列 3段	46時間	10 (10)	20
5	大分212号三光第 1号トンネル新設 工事	国土交通省 九州地方整備局 大分河川国道事務所	覆工コンクリート	27 スパン	600	6.1	2017/11/11 ~ 2018/2/19	25A	4.0	500	1列 3段	48時間	10 (10)	24
6	日高豊岡南道路 上石トンネル工事	国土交通省 近畿地方整備局 豊岡河川国道事務所	覆工コンクリート	29 スパン	600 ~1100	4.0 ~6.0	2018/12/20 ~ 2019/8/1	25A	5.5	400	1列 4段	35~48 時間	10~20 (10~15)	24

* ()内は冷却装置の設定温度

が数本確認されたが、他の現場については、ひび割れの発生は確認されていない。これらの実績から、覆工コンクリートにおいては、クーリングを以下のように実施することで拘束ひび割れを抑制できる結論に至った。

- (1) 1インチの亜鉛メッキ鋼管を400mmピッチで3段配置する。配管延長は覆工延長の60%。
- (2) 通水期間は、夏期が35時間、冬期が48時間。
- (3) 通水温度は、夏期が15°C、冬期が10°C。

4. 明かり構造物への適用時のクーリング方法

4.1 明かり構造物への適用過程

明かり構造物においても、覆工と同様に、3次元FEM温度応力解析を事前に実施し、配管の位置および冷却期間を決定した^{2),3),4),5)}。しかし、明かり構造物は、前述したように様々な形状をしている。また、覆工の厚さが、通常の道路トンネルで350~500mm程度、大断面の道路トンネルでも1000mm程度の厚さであるのに対し、明かり構造物は3000mmや5000mmのように非常に厚い。このようなことから、覆工コンクリートよりも解析と実施工時の温度履歴や応力履歴が乖離する。そのため、部分パイプクーリング特有の効果である“冷却部の遅れ膨張効果”および“未冷却部の締付け効果”を確実に付与するために、これまでの適用現場では、すべてのリフトについて内部温度等を実測し、冷却停止の判断をしている。

4.2 解析による検討

新野積橋橋脚その1工事におけるP4橋脚の柱部の検討結果を示す。壁厚5m、柱部の延長11m、3リフトおよび4リフトは、中空の橋脚である。

(1) 解析モデル

解析モデルは図-10に示すように1/4モデルとしている。また、解析に用いる物性値等は、表-4に示すように、2012年制定コンクリート標準示方書設計編に準じて設定した。部分パイプクーリングについては、これまでの

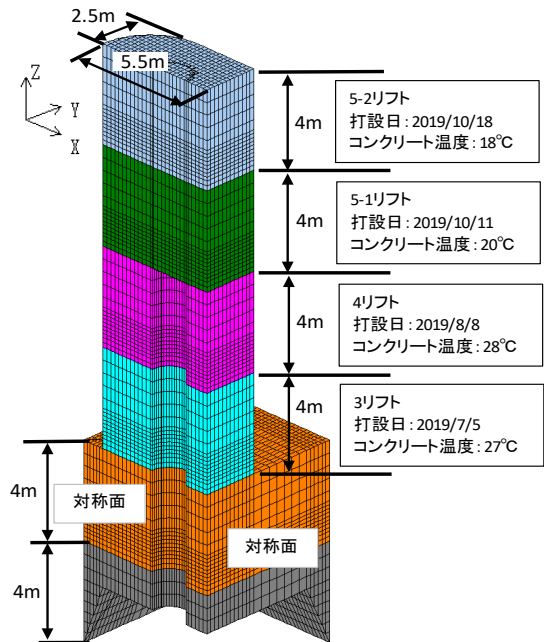


図-10 橋脚解析モデル (1/4モデル)

実績から内径55mmの鋼管を使用し、配管ピッチは、最も指数が小さくなる鉛直方向600mm、水平方向800mmとした。図-11に、今回選定した配管の配置を示す。また、通水量は20L/分とし、通水期間は36~60時間である。パイプ表面の熱伝達率は、直径55mmのパイプを対象とした新居らの式¹⁰⁾により算出し、250W/m²°Cとした。

(2) 事前解析による検討結果

事前の解析結果におけるひび割れ指数(以下、指数)の分布図を図-12に示す。無対策の場合、最も小さい指数は0.55、ひび割れ発生確率100%となり、ひび割れが発生する確率が非常に大きい。一方、部分パイプクーリングによる対策では指数1.00、ひび割れ発生確率50%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。

表-4 解析入力値 (橋脚)

物性値	発熱体		非発熱体
	1-4 リフト	5-1, 5-2 リフト	地盤
熱伝導率 (W/m°C)	2.7	2.7	3.5
比熱 (kJ/kg°C)	1.15	1.15	0.80
単位セメント量 (kg/m³)	$Q(t) = Q_{\infty} (1 - e^{-r(t-t_0)^s})$		—
C/W	2.08	2.324	—
熱膨張係数 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	10	10	12
有効ヤング係数 (N/mm²)	$E_c(t') = \Phi_e(t') \times 6.3 \times 10^3 \cdot f'_c(t')^{0.45}$ $\Phi_e(t')$: 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		1000
引張強度 (N/mm²)	$f_{tk}(t') = 0.13 \cdot f'_c(t')^{0.85}$		20
自己収縮 ($\times 10^{-6}$)	$\varepsilon_{sh}(t_e) = \eta_c \varepsilon_{sh,\infty} \beta_{sh}(t_e)$		—

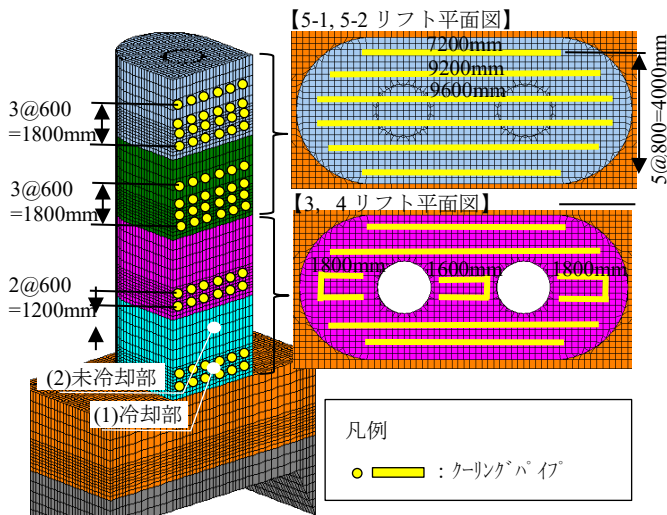


図-11 クーリングパイプ配置図

4.3 クーリングシステム

事前解析による検討結果に従って、クーリングを実施する。橋脚や橋台の場合は、覆工よりも壁厚が大きく、系列数も多いため、覆工の場合は50L/分 (25L/分/列×2系列=50L/分) 程度に対し、100L/分以上 (15~40L/分×4系列以上) の水を送水する必要がある。そのため、多くの場合、循環式ではなく、2~4インチのポンプを使用して河川水を送水し、分岐管から各配管に分岐し、沈殿池で外気温程度まで下げたのち、河川に放流する方式を採用している。No.6の新野積橋については、0.1mm以下のひび割れが数本発見されたが、他現場は確認されていない。

4.4 クーリング条件の検討

表-5 に、これまでの明かり構造物への適用実績およびクーリング条件を示す。2020年1月現在、6件の適用実績がある。東北地方3件 (No.1,2,3)、北陸地方3件 (No.4,5,6) である。また、実施時期は、夏期から冬期にかけての実績がある。

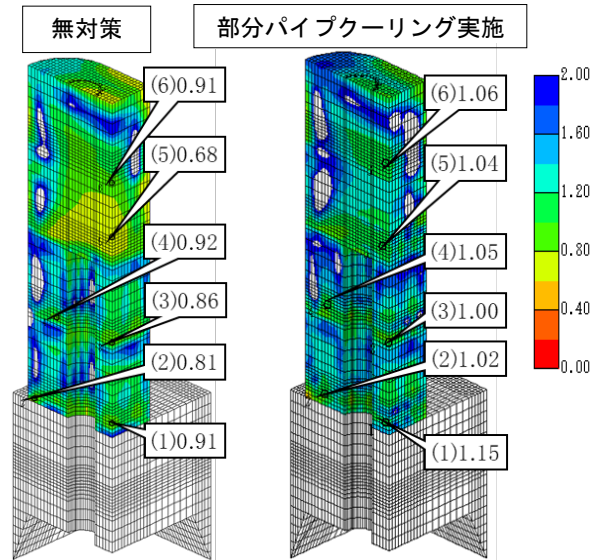


図-12 事前解析時の部材中心の指数分布図 (無対策、部分パイプクーリング実施の場合)

表-5 明かり構造物への部分パイプクーリング適用実績

No.	工事名	企業社	構造物			LPクーリング実施期間	パイプ配置				通水条件			
			構造物	壁厚 (mm)	延長 (m)		径	延長 (m)	ピッチ (mm)	本数	期間	温度* (°C)	流量 (L/分)	
1	国道106号箱石地区道路工事	国土交通省 東北地方整備局 三陸国道事務所	橋台 (上方巢橋)	1基	2,900	14.1	2017/8/26 ~ 2017/12/5	50A	11	800	3列 3段	3~4 日間	外気温 -3°C 程度	24
2	国道106号箱石地区道路工事	国土交通省 東北地方整備局 三陸国道事務所	橋脚 (上方巢橋)	2基	3,000	8.0	2016/6/17 ~ 2017/4/14	50A	5.5	600 ~ 750	4列 3~5 段	2~2.5 日間	外気温 -3°C 程度	15
3	国道106号箱石地区道路工事	国土交通省 東北地方整備局 三陸国道事務所	橋脚 (新箱石橋)	1基	3,000	20.0	2018/7/9 ~ 2018/11/22	50A	15	750 ~ 800	4列 3~4 段	2.5日間	外気温 -3°C 程度	40
4	国道289号2号橋梁上部工事	国土交通省 北陸地方整備局 長岡国道事務所	柱頭部	2箇所	1,500	5.0	2017/9/28 ~ 2017/10/24	50A	3.6	700	1列 2段	2.5日間	10-26 (10)	30
5	国道289号2号橋梁上部工事	国土交通省 北陸地方整備局 長岡国道事務所	橋台パラペット	2箇所	500	9.26	2018/10/27 ~ 2018/10/29	25A	8	400	1列 2段	2日間	10 (10)	24
6	新野積橋橋脚その1工事	国土交通省 北陸地方整備局 長岡国道事務所	橋脚(柱1, 2:中空) (新野積橋)	1基	5000	11.0	2019/7/25 ~ 2019/11/19	50A	8	400	6列 2~4 段	1.5~2.8 日間	外気温 -3°C 程度	20

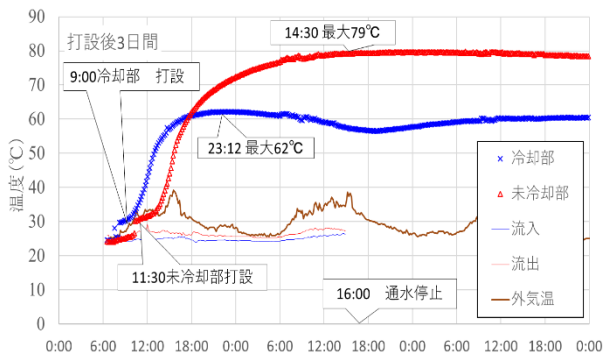


図-13 温度計測結果の事例（新野積橋橋脚その1）

覆工コンクリートに比べ、壁厚が厚く、形状も様々であるため、標準的な通水期間の選定が難しい。図-12に、新野積橋橋脚における3リフトにおける内部温度計測結果を示す。クーリングパイプを配置している冷却部（図-11中の(1)）と配置していない未冷却部（図-10中の(2)）の温度計測結果を示している。冷却部の最高温度が打設日の23:12に低下し始め、未冷却部の内部温度が低下し始めた打設翌日の14:30から、1時間30分後、温度降下が継続していることを確認し通水を停止した。通水停止後、冷却部は3°C温度が再上昇し、未冷却部は減少し続けており、適切な停止時期だったと判断できる。

表-5の実績および新野積橋での図-12に示す温度計測結果から、明かり構造物に関しては、以下のように実施することで拘束ひび割れを抑制できると考えられる。

- (1) 2インチの亜鉛メッキ鋼管を600~800mmピッチで配置する。
- (2) 通水期間は、夏期は2~3日、冬期は3~4日であるが、1つの構造物に対し、季節ごと程度に冷却部と未冷却部の内部温度を計測し、未冷却部が最高温度から低下し始めた時を通水停止とする。
- (3) 河川水を使用する場合、検討時の通水温度は、平年値-3°Cで検討してよい。

5. まとめ

覆工コンクリートにおける部分パイプクーリングの管理に対する知見は、以下の通りである。

- (1) 1インチの亜鉛メッキ鋼管を400mmピッチで3段配置する。配管延長は覆工延長の60%。
- (2) 通水期間は、夏期が35時間、冬期が48時間。
- (3) 通水温度は、夏期が15°C、冬期が10°C。

明かり構造物における部分パイプクーリングの管理に対する知見は、以下の通りである。

- (1) 2インチの亜鉛メッキ鋼管を600~800mmピッチで配置する。
- (2) 通水期間は、夏期2~3日、冬期3~4日程度であるが、1つの構造物に対し、季節ごと程度に内部

温度を計測し、未冷却部が最高温度から低下し始めた時を通水停止時期とする。

- (3) 河川水を使用する場合、検討時の通水温度は、平年値-3°Cで検討してよい。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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, pp.1183-1184, 2018.
- 3) 栗原浩彦, 土居航, 佐成屋淳, 白岩誠史, 室岡俊和: 橋梁上部工柱頭部における部分パイプクーリングのひび割れ抑制効果, 土木学会第73回年次学術講演会, VI-591, pp.1181-1182, 2018.
- 4) 小林哲也, 赤池考起, 飯田信一, 杉浦規之, 河上伸一: 幅20mの橋脚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74回年次学術講演会, VI-366, pp.366-367, 2019.
- 5) 栗原浩彦, 赤池考起, 土居航, 酒井智也, 白岩誠史: 橋台パラペットへの部分パイプクーリングの適用事例, 土木学会第74回年次学術講演会, VI-367, pp.368-369, 2019.
- 6) 北原正博, 村上祐治: 橋脚における温度ひび割れ制御のための鉛直パイプクーリング工法について, ハザマ研究年報, 2010.12
- 7) 西山秀哉, 村田耕市郎, 村上祐治: マスコンクリートのひび割れ制御のための鉛直パイプクーリングの効果, 土木建設技術シンポジウム論文集, 2006
- 8) 赤池考起・稲田匠吾・白岩誠史・田口敬二・古原正人: 超大断面部における覆工コンクリートの温度ひび割れ対策効果の検証, トンネル工学報告集, 第28巻, I-4, 2018.11
- 9) 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.
- 10) 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
- 11) 新居秀一・村上祐治・林俊斉・白岩誠史: 鉛直パイプクーリング工法におけるクーリングパイプ表面の熱伝達率の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, 20