

報告 函渠構造物に対する温度ひび割れ対策としての部分パイプクーリングの適用

赤池考起*1・松本勝*2・河村杏那*2・佐々木博行*3

要旨：検討対象とした構造物は、道路用に供用される1ブロック長15mの函渠である。外壁の厚さは900mmとなりマスコンクリートとして取り扱うべき構造物である。そこで三次元FEM温度応力解析を実施した。その結果、温度ひび割れ対策として、ひび割れ誘発目地と縦型にパイプを連続させた「部分パイプクーリング工法」を実施した。「部分パイプクーリング工法」の効果確認のため、コンクリート内部温度計測とひずみ計測を行った。また、実際に計測した外気温等の温度条件を基にして事後解析を行い、本構造物で実施した温度ひび割れ対策が適切であったか検討を行った。

キーワード：マスコンクリート、函渠、温度応力解析、温度ひび割れ、部分パイプクーリング工法

1. はじめに

神奈川県横浜市に新設された1ブロック長15mの道路用函渠において、外壁の厚さが900mmとマスコンクリートとして取り扱うべき構造物であることから、温度ひび割れの発生が懸念された。そこで、温度ひび割れ対策として、ひび割れ誘発目地とトンネルの覆工コンクリートで実績が多い、部分パイプクーリング工法(Localized pipe cooling,以下LPクーリングとする)を実施した。LPクーリングは引張応力が集中する部分のみを冷却する方法であり、本函渠においては、縦型パイプを連続させ、逆凹型となるように配置した(図-1)。本報告では、道路用函渠の外壁におけるひび割れ発生の検討とひび割れ対策効果について報告する。

図-2に示す。函渠は、1ブロックの延長が15m、全幅が19.1mとなっており、中壁を挟んで上下線で通行できる道路用函渠となっている。温度応力解析は、厚さ900mmの外壁を対象に実施した。今回解析で使用したモデルを図-3に示す。解析モデルは、延長方向に2分割し、全幅方向に2分割した1/4モデルとした。解析で使用したコンクリート配合と物性値を表-1、表-2

2. 三次元FEM温度応力解析

2.1 解析モデル, 条件

三次元FEM温度応力解析を行う函渠の断面図を図

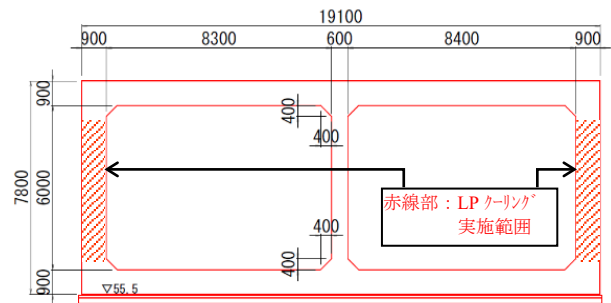


図-2 対象構造物断面

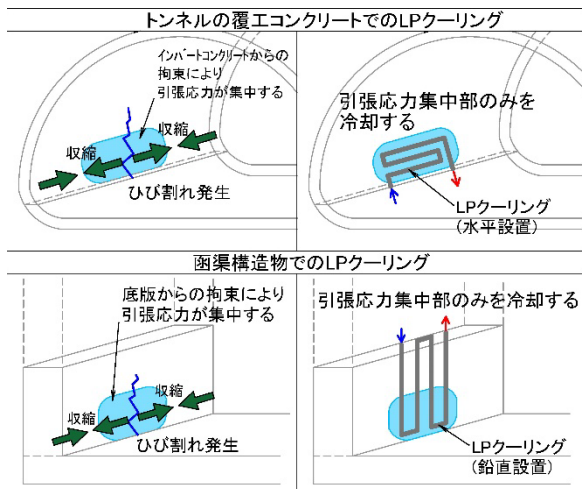


図-1 LPクーリング概略図

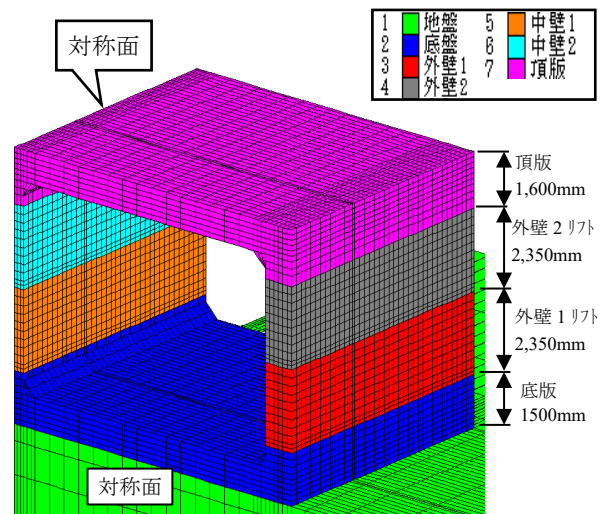


図-3 解析モデル(1/4モデル)

*1 (株)安藤・間 建設本部 土木技術統括部 土木設計部 (正会員)

*2 (株)安藤・間 建設本部 土木技術統括部 技術第二部

*3 (株)安藤・間 東京支店 土木部

表-1 配合表

呼び方	水セメント比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 Adl
27-12-20BB	53.4	4.5	42.6	153	287	805	1088	2.87

表-2 解析物性値

物性値	コンクリート	地盤
熱伝導率 (W/m°C)	2.7	1.7
比熱 (kJ/kg°C)	1.15	1.4
断熱温度上昇量 (°C)	$Q(t)=Q_{\infty}(1-e^{-\tau(t-t_0)^{SAT}})$	-
熱膨張係数 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	12	10
ポアソン比	0.2	0.25
有効ヤング係数 (N/mm ²)	$E_c(t_c)=6300 \times f'_c(t_c)^{0.45}$ $\Phi_c(t')$: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 ※上記 0.42 と 0.65 の間は線形補完する。	89.6
圧縮強度 (N/mm ²)	$f'_c(t_c)=\frac{t_c-S_f}{a+b(t_c-S_f)} f'_c(t_n)$	20
引張強度 (N/mm ²)	$f_t(t_c)=0.13 \times f'_c(t_c)^{0.85}$	2
自己収縮	$\epsilon_{as}(t_c)=\eta_c \times \epsilon_{as,\infty} \times r_{as}(t_c)$	-

■ 露出面
■ 上面
■ 側面

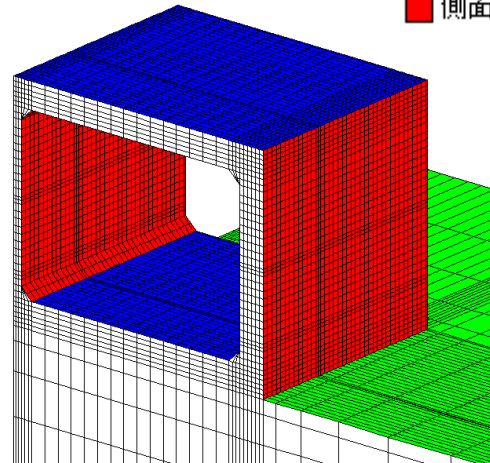


図-4 熱伝達境界条件

表-3 解析で使用了熱伝達率

項目	養生期間 (日)	養生中熱伝達率 (W/m ² °C)	養生後熱伝達率 (W/m ² °C)
露出面	-	14	14
上面	6	5 (養生マット)	14
側面	6	8 (木製型枠)	14

に示す。物性値については、土木学会発行の「2017年制定コンクリート標準示方書【設計編】」²⁾と日本コンクリート工学会発行の「マスコンクリートのひび割れ制御指針 2016」³⁾を基に設定した。

熱伝達境界条件を図-4と表-3に示す。上面は6日間の養生マットによる給水時養生とし、側面は木製型枠残置による水分逸散抑制養生とした。外気温は横浜の観測所における5年間の日平均気温の平均値を計算して使用し、コンクリート温度は外気温に5°Cを加えた値を設定した(外壁1リフト31.9°C, 外壁2リフト30.6°C)。

温度ひび割れの対策として実施したひび割れ誘発目地とLPクーリングの設置状況を図-5に示す。クーリングパイプの設定値を表-4に示す。ひび割れ誘発目地(断面欠損率55.6%)は、延長15mに対して、3分割するように5m間隔で2箇所設置した。モデル上でのひび割れ誘発目地は、厚さを10mm、物性値をヤング係数のみ0.1N/mm²、その他はコンクリート相当として表現した。この設定により、熱や圧縮応力は伝達する

(凡例) ■ : 誘発目地 ■ : クーリングパイプ

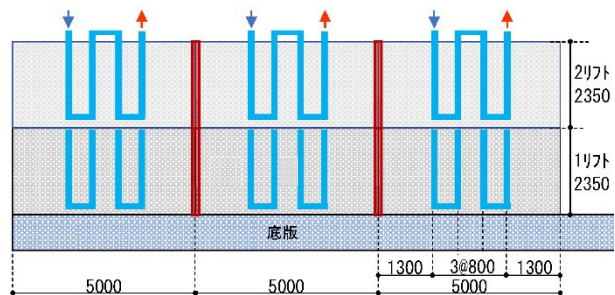


図-5 LPクーリング概略図

表-4 クーリング条件

部位	打込み日	クーリング条件 (パイプ内径 38mm)			
		水温*1 (°C)	期間*2 (hour)	流量 (L/min)	熱伝達率*3 (W/m ² °C)
外壁1リフト	7/12	26.9	48	15	125
外壁2リフト	9/1	25.6	48	15	125

*1: 水温は外気温と同値を採用

*2: 打設完了後、通水開始からの期間

*3: 熱伝達率は、参考資料4)の式(1)より算出

が引張応力を伝達しないようにした。
 クーリングパイプは、逆凹型となるように設置し、通水期間は48時間、水温は外気温相当とした。

2.2 解析結果

図-6に対策を行わなかった場合（以下、無対策）の解析結果を示し、図-7にひび割れ誘発目地とLPクーリングの対策を実施した解析結果を示す。この時のひび割れ指数の目標値を1.0以上（ひび割れ発生確率50%以下）とした。誘発目地箇所は、解析結果の対象外とした。

無対策の場合、最大温度が、外壁1リフトで62.4℃、外壁2リフトで60.8℃となった。最小ひび割れ指数は、外壁1リフトで0.76（ひび割れ発生確率90%）、外壁2リフトで0.67（ひび割れ発生確率98%）となった。この結果より、無対策の場合、温度ひび割れが発生する確率が高いことが確認できた。

ひび割れ誘発目地とLPクーリングの対策を行った場合、最大温度は、外壁1リフト、外壁2リフトともに、ひび割れ誘発目地付近で最大となり、無対策時と変わらなかった。しかし、部材の中心部においては、外壁1リフトの温度が57.2℃となり、無対策時より5.2℃減少し、外壁2リフトにおいては、55.7℃となり、無対策時より5.1℃減少した。最小ひび割れ指数については、外壁1リフトで1.01（ひび割れ発生確率49%）となり、無対策時と比べ、0.25ひび割れ指数が改善し、外壁2リフトにおいては、1.08となり、無対策時と比べ、0.41ひび割れ指数が改善した。ひび割れ誘発目地とLPクーリングを実施することで、最小ひび割れ指数が1.0以上となることを確認できた。

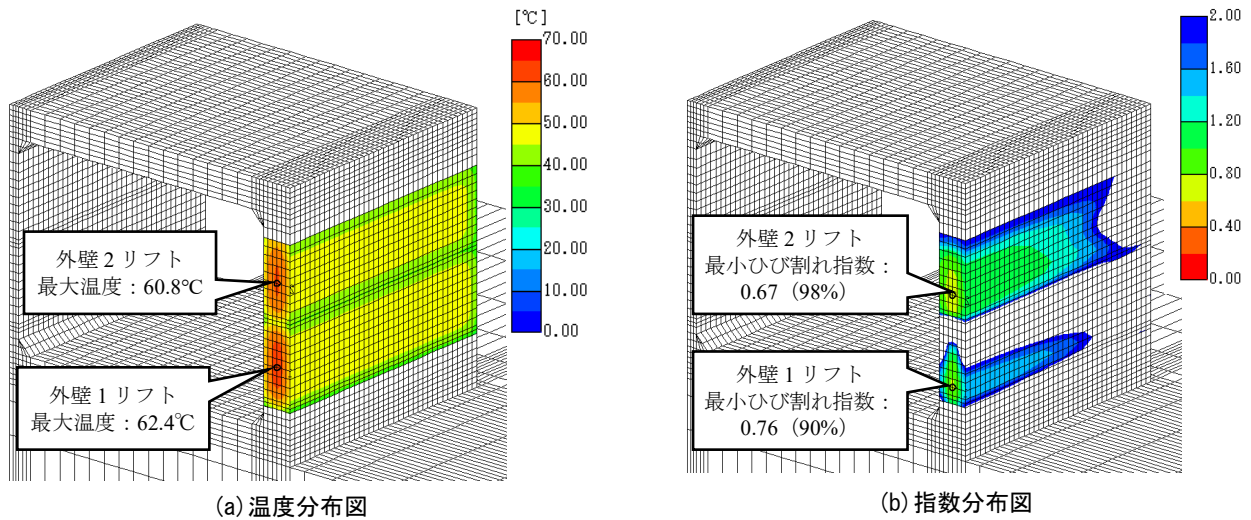


図-6 三次元 FEM 温度応力解析結果（無対策）

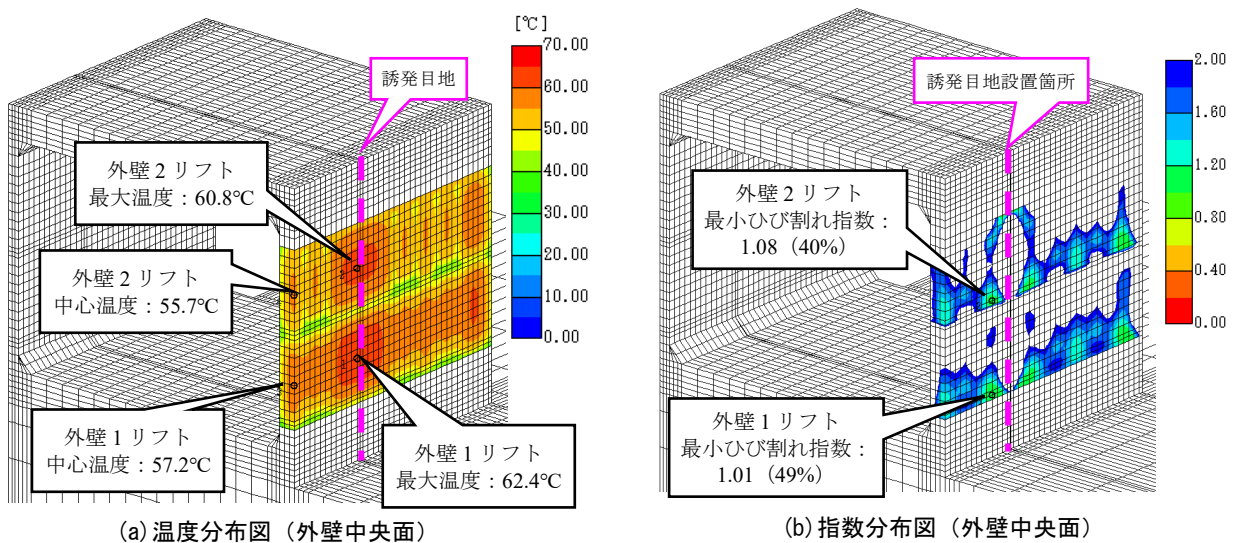


図-7 三次元 FEM 温度応力解析結果（ひび割れ誘発目地+LPクーリング）

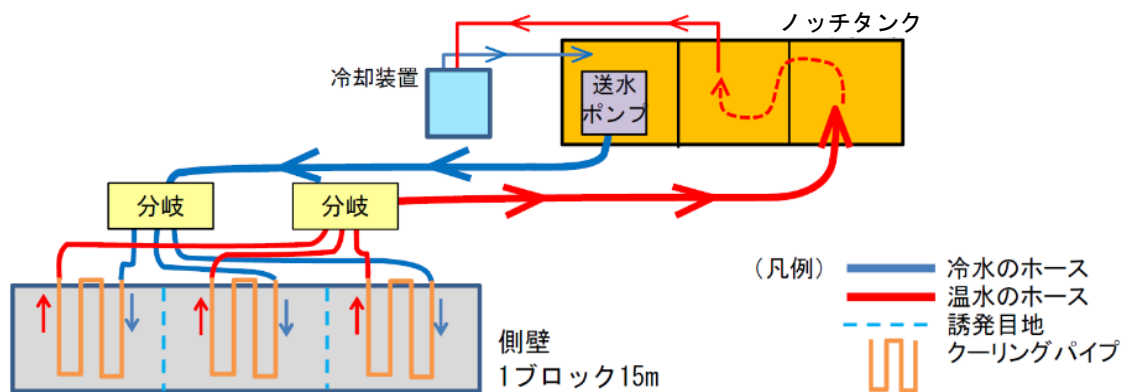


図-8 クーリング設備の概要図

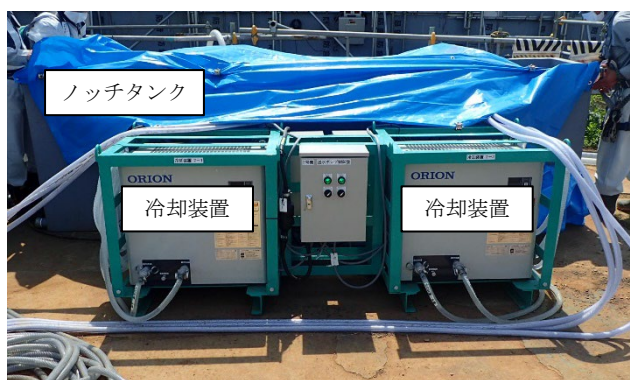


写真-1 クーリング設備

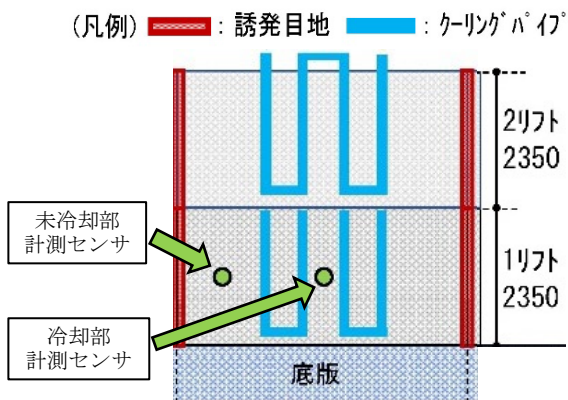


図-9 計測センサ設置箇所

3. 実施工への適用と効果確認

3.1. LPクーリング設備と計測概要

LPクーリングの概要図を図-8に、クーリング設備を写真-1に示す。現場付近に河川がなかったため、図に示すように、クーリング水は循環するような設備とした。また、循環させているだけでは、コンクリートの水和熱により、クーリング水が加熱されてしまう。そのため、冷却装置も配置することにより、外気温相当の水温を確保した。また、クーリングパイプには亜鉛メッキ鋼管を採用した。写真-1に示すように、ノッチタンクの容量が大きいので、冷却装置は2個設置した。ノッチタンクには、日光による水温の温度上昇を防ぐために、ブルーシートを掛け対策を行った。

LPクーリングの効果確認のため、ひずみ計と熱電対が一体となっている計測センサを設置した。図-9に計測センサの設置箇所を、写真-2に計測センサの設置状況を示す。計測センサはブロックの中央部に設置したクーリングパイプ近傍に設置した。LPクーリングの影響の有無を調べるため、LPクーリングの影響が大きいクーリングパイプの間に1個(冷却部)とLPクーリングの影響が小さいクーリングパイプとひび割れ誘発目地の間に1個(未冷却部)の計2個の計測センサを設置した。



写真-2 計測センサ設置状況

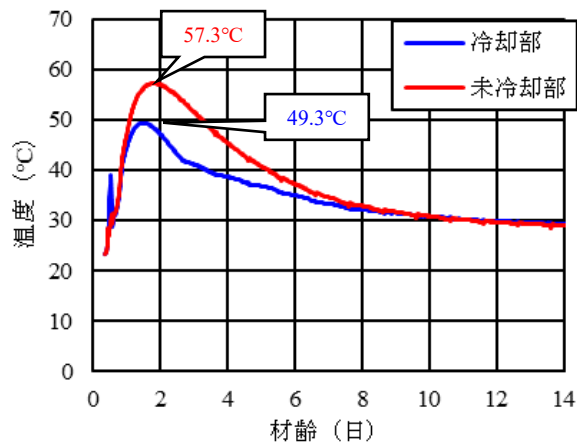


図-10 コンクリート内部温度の実測結果

3.2. 計測結果

実測したコンクリートの内部温度データを図-10に示す。冷却部のコンクリート温度は 49.3℃、未冷却部のコンクリート温度は 57.3℃であった。未冷却部より冷却部の方のコンクリート温度が低くなっているため LP クーリングによるコンクリートの冷却効果があることが確認できた。また、冷却部、未冷却部ともに、解析時のコンクリート温度より低くなっているため、想定通りの温度ひび割れ抑制効果があったと考えられる。

図-11 に計測したひずみから計算した材齢 28 日までの応力の結果を示す。応力は、測定されたひずみ(全ひずみ)から温度ひずみを引いて拘束ひずみを算出し、拘束ひずみと有効ヤング係数を掛けて算出した。材齢 28 日までの最大応力は、冷却部で 1.07N/mm²、未冷却部で 1.75N/mm²であった。応力の結果から、未冷却部の応力より、冷却部の応力が小さくなっていることから、LP クーリングの温度ひび割れの抑制効果があったことが確認できた。また、引張強度は一般的に圧縮強度の 1/10 程度であると考えられるため、材齢 28 日で

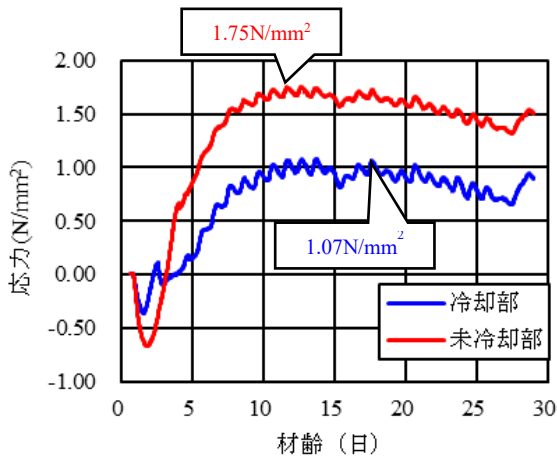


図-11 応力の計測結果

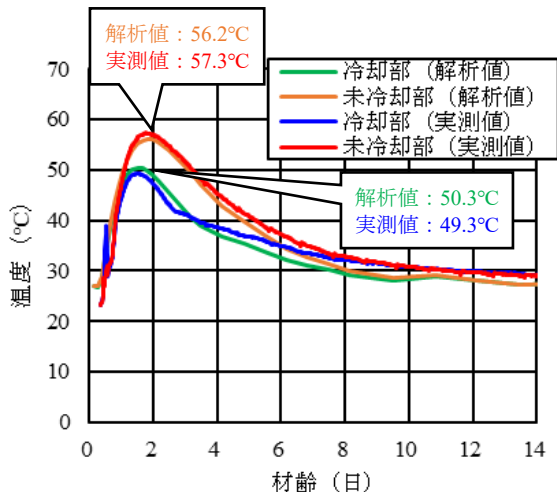


図-12 コンクリート内部温度の解析値と実測値の比較

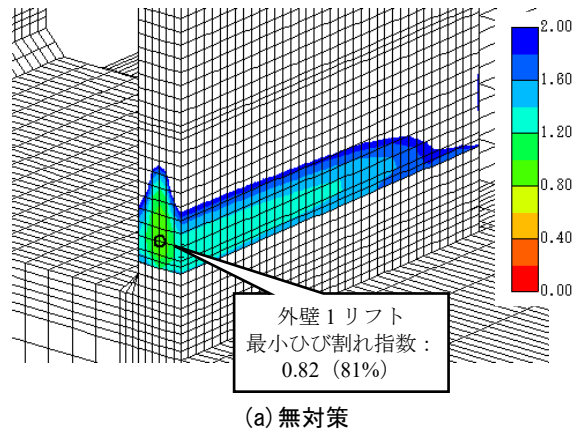
引張強度は 2.7N/mm² 程度だと考えられる。そのため、今回計測した応力は最大で 1.75N/mm² であり、応力より引張強度の方が大きいため、ひび割れ発生の可能性は小さいことが確認できた。

4. 事後解析

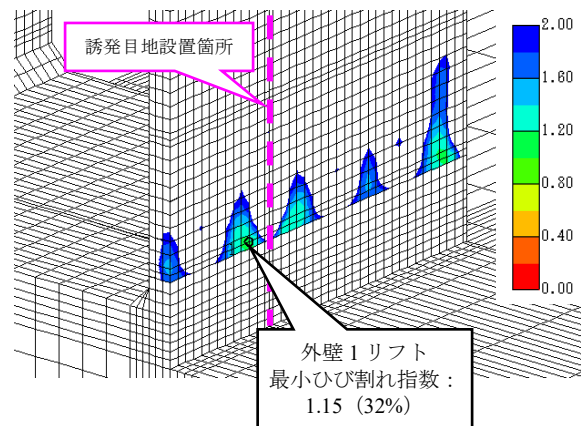
現場にて実測した外気温とクーリング水の温度、コンクリートの打込み温度 (26.9℃) を施工前に実施した三次元 FEM 温度応力解析に反映させ、事後解析による温度ひび割れ抑制効果の確認を行った。事後解析は、コンクリート内部温度を測定した外壁 1 リフトを対象とした。

コンクリート内部温度の実測値と事後解析による解析値の比較を図-12に示す。コンクリートの最高温度は、冷却部で、解析値が 50.3℃、実測値が 49.3℃となり、未冷却部で、解析値が 56.2℃、実測値が 57.3℃であった。冷却部、未冷却部ともに解析値と実測値の差が 1℃程度であり、温度履歴も概ね近似していることから、事後解析は実際の状況をよく表していると考えられる。

事後解析による外壁 1 リフトの指数分布図を図-13



(a) 無対策



(b) ひび割れ誘発目地と LP クーリング (外壁中央面)

図-13 外壁 1 リフト指数分布図 (事後解析)

に示す。温度ひび割れ対策の効果確認のため、事後解析の条件に合わせた、無対策の場合の結果も併せて示す。事後解析の結果、無対策の場合、最小ひび割れ指数が 0.82（ひび割れ発生確率 81%）となり、ひび割れ誘発目地と LP クーリングの対策を行った場合、最小ひび割れ指数が 1.15（ひび割れ発生確率 32%）となった。対策を行ったことで、0.33 ひび割れ指数が改善したことが確認できた。また、対策を行ったことで、目標値である最小ひび割れ指数 1.0 以上を満足した。目標値を満足したことで、今回実施した温度ひび割れ対策は適切であったと考えられる。

5. まとめ

- 1) 延長 15m の道路用函渠において、事前に三次元 FEM 解析を行った結果、最小ひび割れ指数が 0.67 であったが、ひび割れ誘発目地と逆凹型となるように配置した LP クーリングの温度ひび割れ対策を行った場合、最小ひび割れ指数が 1.01 に改善した。
- 2) 実測したコンクリートの内部温度の結果より、未冷却部より冷却部のコンクリート温度が低かったことから、LP クーリングの冷却効果が確認できた。
- 3) 実測したひずみから計算した応力の結果より、未

冷却部より冷却部の応力が小さかったことから、LP クーリングの温度ひび割れの抑制効果が確認できた。

- 4) 事後解析の結果より、ひび割れ誘発目地と LP クーリング実施したことにより、最小ひび割れ指数が目標値である 1.0 以上を満足することが確認できた。
- 5) 本構造物の外壁は、コンクリートの打込み日から 1 年以上経過しているが、有害なひび割れは発生していない。

参考文献

- 1) 白岩誠史, 川中政美, 赤池考起, 庄野昭: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.1, 2020
- 2) 土木学会: 2017 年制定コンクリート標準示方書 [設計編], pp.322~336, 2017
- 3) 日本コンクリート工学会: マスコンクリートのひび割れ制御指針 2016, pp.43~53, 2016
- 4) 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, p1505, 2014