

施工時における気温状況や外部拘束を想定した 温度ひび割れ対策

べっしょかずき だいしまたか お しい ぼひでとし
別所和希¹・代島隆夫¹・椎葉英敏¹

¹三井共同建設コンサルタント株式会社（〒141-0032 東京都品川区大崎一丁目11-1ゲートシティ大崎ウエストタワー15階）

平成29年11月改定書の道路橋示方書¹⁾において、コンクリート打設中の温度昇降などに起因する拘束応力に対して安全性を確保することが明記され、設計段階からコンクリート構造物の初期欠陥（温度ひび割れ）に対する配慮が重要となっている。このような背景から、建設中の橋梁に対して、3次元FEMによるコンクリート温度応力解析を実施して温度ひび割れ対策を検証した。温度応力解析結果を踏まえた対策工法の検証結果より、膨張材、シート養生、新技術・新工法のヒートパイプによるパイプクーリングなどをコンクリート打設時期に応じて効果的に適用した。

Key Words : マスコンクリート, 温度ひび割れ, 温度応力解析, 温度ひび割れ対策,
3次元FEM解析

1. はじめに

コンクリート構造物の劣化には様々な要因があるが、そのなかでも、橋梁などの部材寸法が大きい構造物（マスコンクリート）では、コンクリート打設時の有害な温度ひび割れ（本稿では、マスコンクリートのひび割れ制御指針2016²⁾より、ひび割れ幅0.20mm以上を有害なものとする）が耐久性を低下させる要因となっている。

平成29年11月改定の道路橋示方書においても、コンクリート打設中の温度昇降などに起因する拘束応力に対しては、安全性を確保する必要があることが明記された。

ひび割れ制御指針より、マスコンクリートとして取り扱うべき部材寸法の目安は、下端が拘束される壁状構造物の場合は厚さ50cm以上、広がりのあるスラブ状構造物の場合は厚さ80cm以上と、橋梁のような大規模コンクリート構造物ではほとんどの部材がマスコンクリートの対象となり、温度ひび割れに注意する必要がある。

本稿では、橋梁下部構造の施工におけるコンクリート構造物の初期欠陥（温度ひび割れ）を未然に防止するために、コンクリート温度応力解析を実施して温度ひび割れ対策を検証した事例を紹介する。

2. 概要および課題

対象橋梁は高規格幹線道路（自動車専用道）において、急峻な斜面上に位置し、一級河川を渡河する

橋長110m、3径間の連続高架橋である。最大幅員20m、最大橋脚高24m、柱部材の厚さは4mと規模が大きく、下部構造のコンクリート打設時には有害な温度ひび割れの発生が懸念された。対象橋梁の側面図を図-1に示す。

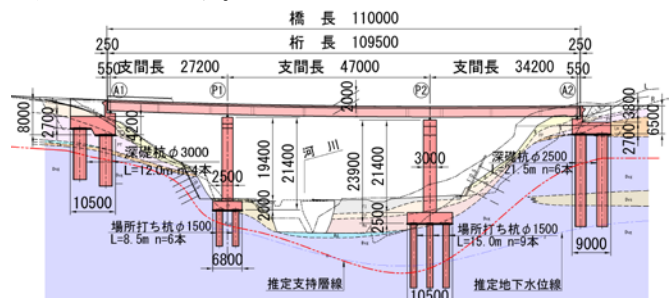


図-1 橋梁側面図

また、対象橋梁の橋脚基部は夏季、橋脚梁部は冬季に打設を行う必要があり、外気温の変化がコンクリート内部の温度に影響を及ぼすことが懸念された。さらに、対象橋梁は既に施工準備の段階であったので、低熱セメントなどの調達が困難であった。

以上の施工条件を踏まえ、コンクリート打設に際し、下記の3点の課題に対応する必要があった。

- ①外気温の変化を考慮した温度ひび割れの予測
- ②施工条件を考慮した温度ひび割れ対策の提案
- ③対策後の温度ひび割れの予測と施工者への提案

3. 技術的解決策

上記の3点の課題に対し、以下の対策を提案した。

(1) 温度応力解析

a) 解析方針

コンクリートの打設時期を考慮し、外気温の変化に応じたひび割れ指数 I_{cr} を3次元FEMによるコンクリート温度応力解析を用いて定量的に解析した。温度応力解析ソフトはASTEAMACS ver9を用いた。

b) 解析条件

P1・P2橋脚ともに橋脚規模からリフト分割数が多く、躯体構築期間が2ヶ月程度と長期に及ぶので、外気温は近傍の気象観測所データを基に年周期変動を考慮して設定した。

また、コンクリートの配合および打設工程は施工業者において設定済みであり、初期解析は施工業者の施工計画書に基づくものとした。

なお、コンクリートの物性値、地盤物性値および熱伝達境界条件はひび割れ制御指針を参考に設定した。

c) 初期解析結果（温度ひび割れ指数 I_{cr} ）

初期解析の結果、全ての下部構造において、無対策の場合は温度ひび割れ指数 I_{cr} が1.0を下回り、有害なひび割れの発生が予想される結果となった。発生した温度応力の分布および方向より、 I_{cr} の低下の原因としては、①外気温と躯体内の温度差および②打設済みの施工ロットからの外部（下部）拘束が考えられる。初期解析の結果（温度ひび割れ指数 I_{cr} の経験値最小コンター図）を図-2に示す。

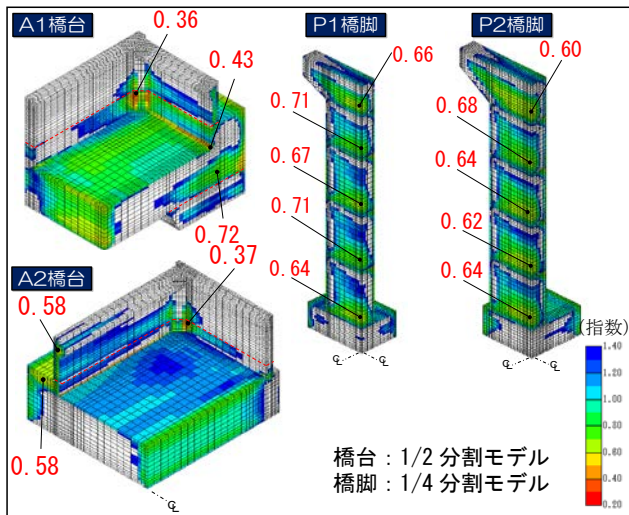


図-2 I_{cr} 初期解析結果（経験値最小コンター図）

4. 温度ひび割れ対策

(1) 外気温とコンクリート内部の温度差対策

a) 対策の概要

コンクリートの水和熱によって高温となる躯体内部と外気温との温度差は、コンクリートの膨張および収縮に差異を発生させ、応力（ひび割れ）の原因となる。

そこで、外気温と躯体内の温度差を抑制するために、①ヒートパイプによるパイプクーリングを用いた躯体内の冷却および②打設時期に応じた養生の2点を対策として提案した。

また、3次元FEM解析を用いて、各下部構造に対して最も有効な養生期間や対策の組合せを確認した。

b) ヒートパイプによるパイプクーリング

この橋梁は河川と交差し、急峻な斜面に囲まれており、マスコンクリートの水和熱対策として利用される水循環式パイプクーリングは、設備規模が大きく、施工ヤードの制約から適用が困難である。

そこで、水循環式に比べて設備規模が小さく、施工ヤードが不要で、現場内で繰り返し使用することでコスト削減が図れる新技術・新工法の「ヒートパイプによるパイプクーリング（NETIS：KT-150052-A）」を提案した。

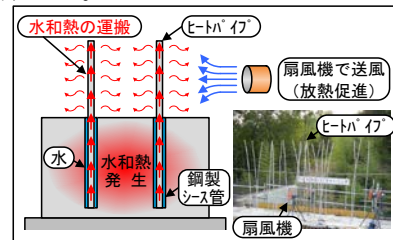


図-3 ヒートパイプによるパイプクーリング

c) 打設時期に応じた養生対策

鋼製型枠は熱伝導率（ $14W/m^2C$ ）が高く、外気温の影響を躯体に与えやすいので、夏季施工の箇所に対してはシート養生（ $6W/m^2C$ ）を適用し、躯体内部のピーク後における温度低下速度の抑制を図った。

また、冬季施工の箇所に対してはエアバッグ養生（ $4W/m^2C$ ）および加温養生（外気温を $10C$ 以上に維持）を提案し、外気温と躯体との温度差の抑制を図った（図-4 参照）。

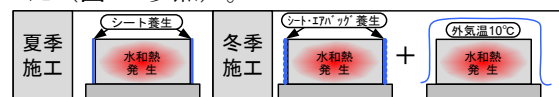


図-4 打設時期に応じた養生対策

(2) 打設済みの施工ロットからの外部拘束対策

コンクリートはコンクリート内の水分蒸発および放熱によって収縮するが、その際に打設済み（強度発現済みで変形がない）の部材から拘束を受けて応力が発生する（図-5 参照）。

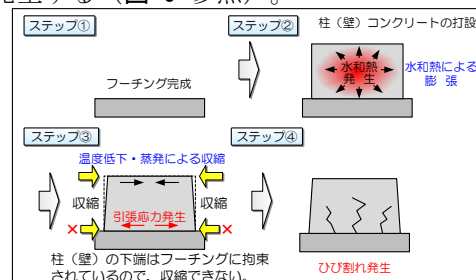


図-5 外部拘束による温度ひび割れ

外部拘束による温度ひび割れに対しては①外部拘束を抑制可能な打設日程・打設量の提案および②膨張材の添加による応力の抑制を図った。

5. 温度ひび割れ対策の選定

温度ひび割れ対策は紙面の都合上、橋脚の解析結果のみ紹介する。

(1) P1橋脚の温度ひび割れ対策（夏季～秋季施工）

a) P1橋脚の温度ひび割れ対策の選定
解析を用いて最適な対策を検討した結果、対策が必要となる柱・梁内部には、①外気温とコンクリート内部の温度差対策（ヒートパイプによるパイプクーリング）、②打設時期に応じた養生対策（シート養生、養生延長）および③膨張材の添加が有効であることが確認された。

P1橋脚の温度ひび割れ対策として検討した対策を表-1に、各対策を反映させた解析結果を図-6に、選定案の解析結果のコンター図を表-2に示す。

表-1 温度ひび割れ対策方法の検討（P1橋脚）

対策方法	打設ロット	標準案（未対策時）	対策①		対策②		選定案：対策③	
			パイプクーリング		パイプクーリング+シート養生		パイプクーリング+シート養生+膨張材	
パイプクーリング	フーチング	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし
	柱①	なし	3日間	3日間	3日間	3日間	3日間	3日間
	柱②	なし	3日間	3日間	3日間	3日間	3日間	3日間
	柱③	なし	3日間	3日間	3日間	3日間	3日間	3日間
	柱④	なし	3日間	3日間	3日間	3日間	3日間	3日間
	梁	なし	3日間	3日間	3日間	3日間	3日間	3日間
型枠	フーチング	鋼製型枠 7日間	鋼製型枠 7日間	鋼製型枠 7日間	鋼製型枠 7日間	鋼製型枠 7日間	鋼製型枠 7日間	鋼製型枠 7日間
	柱①	鋼製型枠 7日間	鋼製型枠 7日間	シート 12日間	シート 12日間	シート 12日間	シート 12日間	シート 12日間
	柱②	鋼製型枠 7日間	鋼製型枠 7日間	シート 12日間	シート 12日間	シート 12日間	シート 12日間	シート 12日間
	柱③	鋼製型枠 7日間	鋼製型枠 7日間	シート 12日間	シート 12日間	シート 12日間	シート 12日間	シート 12日間
	柱④	鋼製型枠 7日間	鋼製型枠 7日間	シート 12日間	シート 12日間	シート 12日間	シート 12日間	シート 12日間
	梁	鋼製型枠 7日間	鋼製型枠 7日間	シート 12日間	シート 12日間	シート 12日間	シート 12日間	シート 12日間
リフト天端	フーチング	散水養生 7日間	散水養生 7日間	散水養生 7日間	散水養生 7日間	散水養生 7日間	散水養生 7日間	散水養生 7日間
	柱①	散水養生 7日間	散水養生 7日間	散水養生 7日間	散水養生 7日間	散水養生 7日間	散水養生 7日間	散水養生 7日間
	柱②	散水養生 7日間	散水養生 7日間	散水養生 7日間	散水養生 7日間	散水養生 7日間	散水養生 7日間	散水養生 7日間
	柱③	散水養生 7日間	散水養生 7日間	散水養生 7日間	散水養生 7日間	散水養生 7日間	散水養生 7日間	散水養生 7日間
	柱④	散水養生 7日間	散水養生 7日間	散水養生 7日間	散水養生 7日間	散水養生 7日間	散水養生 7日間	散水養生 7日間
	梁	散水養生 7日間	散水養生 7日間	養生マット 12日間	養生マット 12日間	養生マット 12日間	養生マット 12日間	養生マット 12日間
膨張材	フーチング	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし
	柱①	なし	なし	なし	なし	あり	あり	あり
	柱②	なし	なし	なし	なし	あり	あり	あり
	柱③	なし	なし	なし	なし	あり	あり	あり
	柱④	なし	なし	なし	なし	あり	あり	あり
	梁	なし	なし	なし	なし	あり	あり	あり

注) 着色部は標準案(未対策時)から変更した箇所。

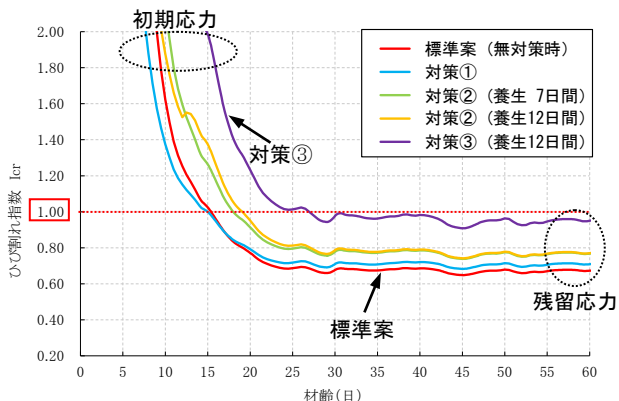


図-6 各対策案のひび割れ指数履歴（柱①内部）

施工条件を踏まえた解析より、P1橋脚の温度ひび割れ対策は、最もひび割れ指数を改善できる「対策③：パイプクーリング+シート養生（12日間）+膨張材」および補強鉄筋によるひび割れ幅の抑制を提

案した。対策③適用時の解析結果は表-3に示す。

表-2 温度ひび割れ対策の選定（P1橋脚）

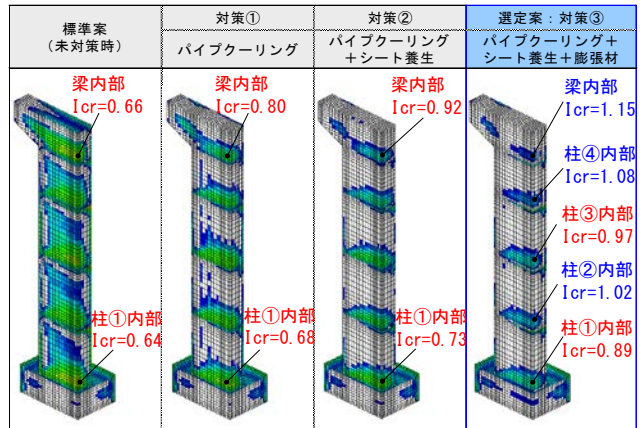


表-3 温度ひび割れ対策の結果（P1橋脚）

部位	目録値 (下限値)	ひび割れ指数 Icr						
		標準案 (未対策時)		パイプクーリング+シート養生+膨張材				
		最小値	ひび割れ発生確率 (%)	最小値	(平均値)			
打設ロット①	フーチング	1.00	1.22	26	→	1.24	—	24
打設ロット②	柱①	1.00	0.64	99	→	0.89	(1.05)	68
打設ロット③	柱②	1.00	0.71	95	→	1.02	—	47
打設ロット④	柱③	1.00	0.67	98	→	0.97	(1.09)	55
打設ロット⑤	柱④	1.00	0.71	95	→	1.08	—	40
打設ロット⑥	梁	1.00	0.66	98	→	1.15	—	32
部位	許容最大ひび割れ幅 (mm)	予想最大ひび割れ幅 (mm)						
		標準案	対策時	補強鉄筋有	補強鉄筋無 (未対策時)			
打設ロット①	フーチング	—	—	→	不要	—	—	
打設ロット②	柱①	0.20	0.40	→	0.32	必要	0.359%	0.441%
打設ロット③	柱②	0.20	0.38	→	0.28	必要	0.359%	0.537%
打設ロット④	柱③	0.20	0.39	→	0.30	必要	0.359%	0.537%
打設ロット⑤	柱④	0.20	0.38	→	0.27	必要	0.359%	0.537%
打設ロット⑥	梁	0.20	0.61	→	0.38	必要	0.250%	0.537%

注1) 柱②、柱④、柱⑤はひび割れ指数が1.00を上回るが、予想最大ひび割れ幅が許容値0.20mmを超過する。補強鉄筋による補強（ひび割れ幅の抑制）が必要。

注2) 青字は対策が不要箇所、赤字は対策が必要な箇所。

b) P1橋脚に対する解析から得られた知見

P1橋脚への解析結果より、以下の知見を得られた。

①膨張材は柱および梁などの部位や施工時期に問わず効果的な対策（ひび割れ指数を0.1程度改善させる）となることを確認した。

②パイプクーリングは解析などによって外気温などの影響を考慮して適切な冷却期間を設定しなければ、躯体内の温度再上昇および過冷却となり、ひび割れ指数を悪化させることを確認した。

③鋼製型枠と外気との接触を抑制するために使用する部材（熱伝導率の調整）および脱型時期を適切に設定することで、ひび割れ指数が0.1程度改善されることを確認した。

④夏季施工のコンクリート打設は早朝などの気温の低い時間帯に行うことが効果的である（コンクリート打設時の温度が5℃低い場合には、ひび割れ指数が0.1程度改善されることを確認した）。

(2) P2橋脚の温度ひび割れ対策（秋季～冬季施工）

a) P2橋脚の温度ひび割れ対策の選定

解析を用いて最適な対策を検討した結果、①外気温とコンクリート内部の温度差対策（ヒートパイプによるパイプクーリング）、②打設時期に応じた養

生対策（エアバッグ養生，養生延長），③膨張材の添加および④低温時における初期凍害および躯体内外との温度差緩和のための加温養生が有効である。

P2橋脚の温度ひび割れ対策として検討した対策を表-3に，各対策を反映させた解析結果を図-7に，選定案の解析結果コンター図を表-4に示す。

表-3 温度ひび割れ対策方法の検討 (P2橋脚)

対策方法	施工ロッド	標準案 (未対策時)	対策①		対策②		選定案：対策③	
			パイプクーリング+膨張材	パイプクーリング+膨張材+シート養生	パイプクーリング+膨張材+エアバッグ養生	パイプクーリング+膨張材+エアバッグ養生+加温養生	許容最大ひび割れ幅 (mm)	補強鉄筋なし
パイプクーリング	フーチング	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし
	柱①	なし	4日間	4日間	4日間	4日間	4日間	4日間
	柱②	なし	4日間	4日間	4日間	4日間	4日間	4日間
	柱③	なし	5日間	5日間	5日間	5日間	5日間	5日間
	柱④	なし	5日間	5日間	5日間	5日間	5日間	5日間
膨張材	フーチング	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし
	柱①	なし	あり	あり	あり	あり	あり	あり
	柱②	なし	あり	あり	あり	あり	あり	あり
	柱③	なし	あり	あり	あり	あり	あり	あり
	柱④	なし	あり	あり	あり	あり	あり	あり
型枠	フーチング	網敷型枠 9日間	網敷型枠 9日間	網敷型枠 9日間	網敷型枠 9日間	網敷型枠 9日間	網敷型枠 9日間	網敷型枠 9日間
	柱①	網敷型枠 9日間	網敷型枠 9日間	シート 12日間	エアバッグ 12日間	エアバッグ 12日間	エアバッグ 12日間	エアバッグ 12日間
	柱②	網敷型枠 12日間	網敷型枠 12日間	シート 12日間	エアバッグ 12日間	エアバッグ 12日間	エアバッグ 12日間	エアバッグ 12日間
	柱③	網敷型枠 12日間	網敷型枠 12日間	シート 12日間	エアバッグ 12日間	エアバッグ 12日間	エアバッグ 12日間	エアバッグ 12日間
	柱④	網敷型枠 12日間	網敷型枠 12日間	シート 12日間	エアバッグ 12日間	エアバッグ 12日間	エアバッグ 12日間	エアバッグ 12日間
リフト天端	フーチング	散水養生 7日間	散水養生 7日間	散水養生 7日間	散水養生 7日間	散水養生 7日間	散水養生 7日間	散水養生 7日間
	柱①	散水養生 7日間	散水養生 7日間	散水養生 7日間	散水養生 7日間	散水養生 7日間	散水養生 7日間	散水養生 7日間
	柱②	散水養生 7日間	散水養生 7日間	散水養生 7日間	散水養生 7日間	散水養生 7日間	散水養生 7日間	散水養生 7日間
	柱③	散水養生 7日間	散水養生 7日間	散水養生 7日間	散水養生 7日間	散水養生 7日間	散水養生 7日間	散水養生 7日間
	柱④	散水養生 7日間	散水養生 7日間	散水養生 7日間	散水養生 7日間	散水養生 7日間	散水養生 7日間	散水養生 7日間
加温養生 (外気温管理)	フーチング	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし
	柱①	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし
	柱②	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし
	柱③	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし
	柱④	なし	なし	なし	なし	なし	なし	なし

注) 青色部は標準案(未対策時)から変更した箇所。

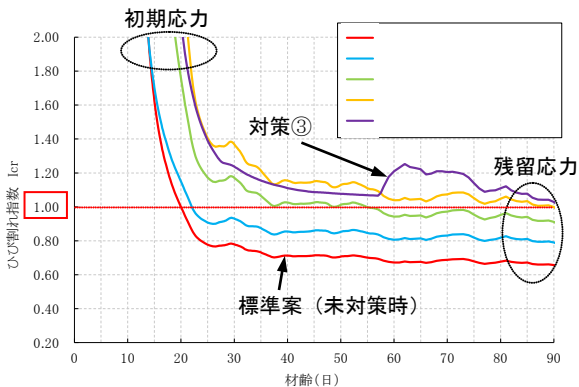


図-7 各対策案のひび割れ指数履歴 (柱②内部)

表-4 温度ひび割れ対策の選定 (P2橋脚)

標準案	対策①	対策②	選定案：対策③
	パイプクーリング+膨張材	+エアバッグ養生3枚(4層/10°C)	+外気温管理10°C以上

施工条件を踏まえた解析結果より，P2橋脚の温度ひび割れ対策は，最もひび割れ指数を改善できる「対策③：パイプクーリング+エアバッグ養生（12日間）+膨張材+加温養生10°C」および補強鉄筋による温度ひび割れ幅の抑制を提案した。対策③を適用した際の解析結果は表-5に示す。

表-5 温度ひび割れ対策の結果 (P2橋脚)

部 位	目標値 (下限値)	ひび割れ指数 Icr						
		標準案 (未対策時)		パイプクーリング+膨張材+エアバッグ養生+加温養生				
		最小値	ひび割れ発生確率 (%)	最小値	(平均値)	ひび割れ発生確率 (%)		
打設ロット①	フーチング	1.00	1.01	49	→	1.01	—	49
打設ロット②	柱①	1.00	0.64	99	→	0.94	(1.54)	60
打設ロット③	柱②	1.00	0.62	100	→	0.92	(1.90)	63
打設ロット④	柱③	1.00	0.64	99	→	1.05	—	43
打設ロット⑤	柱④	1.00	0.68	97	→	1.19	—	28
打設ロット⑥	梁	1.00	0.60	100	→	1.09	—	38
部 位	許容最大ひび割れ幅 (mm)	予想最大ひび割れ幅 (mm)			鉄筋比 (%)			
		標準案	対策時	補強鉄筋有	補強鉄筋なし	必要補強鉄筋量		
打設ロット①	フーチング	—	—	—	不要	—	—	
打設ロット②	柱①	0.20	0.50	→	0.39	必要	0.299%	0.454%
打設ロット③	柱②	0.20	0.51	→	0.40	必要	0.299%	0.435%
打設ロット④	柱③	0.20	0.50	→	0.35	必要	0.299%	0.475%
打設ロット⑤	柱④	0.20	0.49	→	0.29	必要	0.299%	0.553%
打設ロット⑥	梁	0.20	0.58	→	0.37	必要	0.272%	0.553%

注1) 柱②，柱③，柱④はひび割れ指数が1.00を上回るが，予想最大ひび割れ幅が許容0.20mmを超過するので，補強が必要。

注2) 青色は対策が必要な箇所，赤字は対策が必要な箇所。

注3) ひび割れ指数の平均値は最小値を含むのなかで40%以内の範囲における平均値。

b) P2橋脚に対する解析から得られた知見

P2橋脚への解析結果より，以下の知見を得られた。なお，P1橋脚と重複するものは省略する。

①冬季施工の際は加温養生を用いて外気温を10°C以上に保つことで，ひび割れ指数が0.1程度改善することを確認した。

②外気温管理を5°C以上とする場合はひび割れ指数の改善に大きな効果がみられなかったので，一定以上の加温が不可欠であるといえる。

6. 技術的な成果

3次元FEM解析によるマスコンクリートの解析を実施することで，構造物の規模，施工時期および施工条件などを反映した適切な対策工を発注者および施工者へ提案することができた。また，ヒートパイプによるパイプクーリングの適用で，従来の水循環式に比べて40%程度のコスト削減を実現した。さらに，実際の施工現場からは温度ひび割れの発生がなく，施工管理が容易となったと評価を得られた。

7. 今後の課題

コンクリートの配合は決定済みであったため，この業務ではセメント材料の違いによる検証などは実施していない。今後は，様々な構造物に対する使用材料を含めた温度応力解析による検証を重ね，設計段階から適切な対策方法を提案し，100年先まで長持ちする社会資本の整備に貢献していきたい。

8. 参考文献の引用とリスト

謝辞：この解析検討においては，監督員の石田主任から多大なご指導を賜った。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編，pp. 41～46，2017. 11
- 2) 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，p. 1，2016. 11

