

RC橋台堅壁における温度応力解析及び温度ひび割れ対策効果の検証

勇秀忠* (正会員) 尾場瀬宏美* 田口慎吾** 池端宏太*

1. はじめに

鉄筋コンクリート橋梁の橋台や橋脚等の大型化などにより、セメント水和熱による温度ひび割れの発生が問題となっている。この種の温度ひび割れは、内部拘束と外部拘束によるものがある。また、実際の構造物においてはこれら両者が同時に作用する場合が多く、温度ひび割れの発生または発生位置等を予測するため、事前温度応力解析が求められる。

本文は、鉄筋コンクリート橋梁の橋台堅壁部を対象に3次元温度応力解析を行い、その結果と温度計測値を比較し、ひび割れ誘発目地・鉛直 π イ π ケリング等温度ひび割れ制御対策の効果について考察を加えたものである。

温度応力を求める際の解析方法としては、温度についてはFEMを用いた非定常熱伝導解析法、応力解析についてはFEM、CP法などの数値解析法が広く用いられている。本解析は、近年使用実績の多い「ASTEAMACS Ver.6 (株計算力学研究センター)」を用いた。

2. 解析概要

2.1 解析モデル・解析条件

解析対象はRC橋台フーチング(L14.1m×B8.0m)及び躯体(L13.6m×B2.35m)である。リフト高は実際の施工条件を考慮し、図-1に示す通りとする。

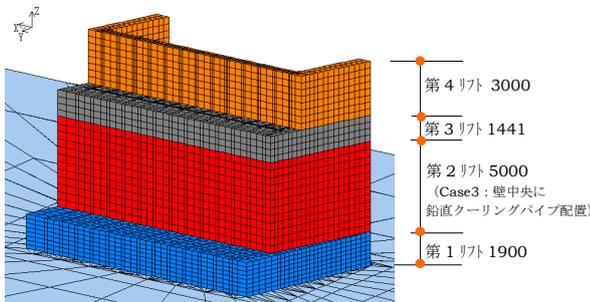


図-1 解析モデル図

側壁コンクリートの型枠は材齢7日間存置し、リフト上表面は次のリフトが打設されるまで澆水養生とする。解析条件を表-1に示す。

解析ケースは、ひび割れ誘発目地・鉛直 π イ π ケリング等温度ひび割れ制御対策を検証する目的で表-2に示す3ケースとした。ひび割れ誘発目地(黄色矢印)・鉛直 π イ π ケリング(躯体壁中央)の位置は図-2に示す。

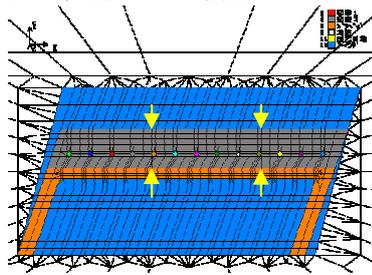


図-2 対策工配置図

なお、本検討のひび割れ制御水準は安全係数1.0、ひび割れ幅の制御目標値は0.25mmを目安とする。

* (株)大進コンサルタント
** 三洲建設(株)

表-1 解析条件

温度解析条件_JCI[マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008]の規定に準じる					
断熱温度上昇式	式(4.3.1), 解説表-4.3.4	使用コンクリート規格: 24N/m ³ 8-20-BB 単位セメント量: 286kg/m ³			
打込み温度	日平均気温 +5℃	リフト	打設日	日平均気温	打込み温度
		1リフト	2011/4/12	17.2	22.2
		2リフト	2011/5/3	20.8	25.8
		3リフト	2011/5/27	20.0	25.0
4リフト	2011/6/14	24.0	29.0		
比熱・熱伝導率	1.155 (J/G℃)	—			
表面熱伝達率	2.7 (W/m ² ℃)	木製型枠			
外気温	気象庁観測データ 2008~2010日平均(熊本県)	固定温度は年平均気温: 16.5℃			
既設の初期温度	3ヶ月間の定常解析による	地盤10m以深: 固定温度			

応力解析条件_JCI[マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008]の規定に準じる		
ヤング係数	$E_c(t_e) = 6300 \times f'_c(t_e)^{0.45}$ (N/mm ²)	式(4.3.4)
引張強度	$f_t(t_e) = 0.13 \times f'_c(t_e)^{0.85}$ (N/mm ²)	式(4.3.3)
圧縮強度	$f'_c(t_e) = \frac{t_e - s_f}{a + b(t_e - s_f)} f'_{c28}$ (N/mm ²)	式(4.3.2) 解説表-4.3.6, 解説表-4.3.7 高炉セメントB種 a=7.278, b=0.735, s_f=0.42
クリープ	$E_c(t_e) = \phi \times 6300 \times f'_c(t_e)^{0.45}$	温度上昇時 $\phi = 0.42$ 最高温度から1日以降 $\phi = 0.65$
自己収縮	$\epsilon_{sh}(t_e) = \eta_c \times \epsilon_{sh,\infty} \times \beta_{sh}(t_e)$	式(4.3.5) 解説表-4.3.8, 解説表-4.3.9
ポアソン比	0.2	—
地盤物性値	ヤング係数: 500 (N/mm ²) ポアソン比: 0.3 熱膨張係数: $10 \times 10^{-6}/\text{℃}$	杭基礎

表-2 解析ケース

ケース名	解析条件
Case 1	ひび割れ対策を考慮せず
Case 2	誘発目地(第2~3リフト, 2カ所)のみ考慮
Case 3	誘発目地(第2~3リフト, 2カ所) + 鉛直 π イ π ケリング5日間実施(第2リフト, 水温15℃, パイプ径 ϕ 60, パイプ間隔1m)

2.2 解析結果

比較検討のため、現場計測位置を考慮して解析モデルを作成し、鉛直 π イ π ケリングを実施した堅壁(第2リフト)を着目して事前温度応力解析を行った。

(1)温度解析結果

π イ π ケリングを実施した第2リフトにおいて、各解析ケースの内部最高温度は図-3及び表-3にまとめた。

表-3 温度解析結果一覧(第2リフト)

部位	打込温度	検討ケース 検討項目	Case 1	Case 2	Case 3
			内部	25.8 (℃)	最高温度(℃)
		発現材齢(日)	3.0	3.0	2.0
		温度上昇量(℃)	44.13	44.13	38.82
表面	25.8 (℃)	表面温度(℃)	39.56	39.56	41.28
		温度上昇量(℃)	13.76	13.76	15.48
内外温度差(℃)			30.37	30.37	23.34

注: 「表面」は「内部」に対応する解析モデル表面の位置を指す。

事前の温度解析結果から誘発目地のみ設置したCase2では、内部最高温度に変化が認められなかった。

しかし、鉛直パイプクーリングを実施した Case3 は、発現材齢は 2.0 日で内部最高温度は 64.62℃、表面最高温度は 41.28℃で内外温度差は 23.34℃の結果を得た。一方、鉛直パイプクーリングを実施しなかった Case1 と Case2 では、発現材齢は 3.0 日で最高温度は 69.93℃に達し、表面温度は 39.56℃であった。堅壁内部最高温度は図-3 に示すように 5.3℃低減され抑制効果があることがわかった。

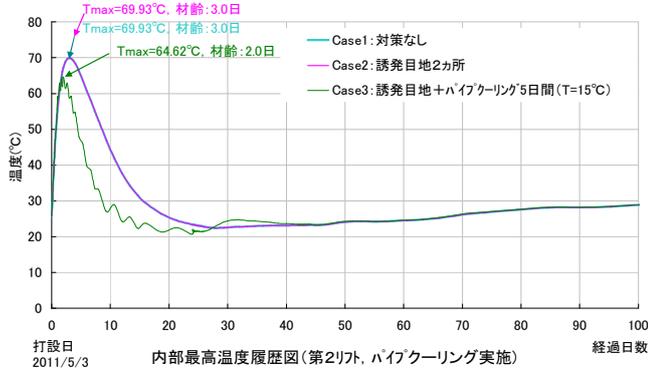


図-3 内部最高温度の比較結果

(2) 温度ひび割れ解析結果

パイプクーリングが実施した第 2 リフト(堅壁下部)のひび割れ指数分布を図-4 に示す。

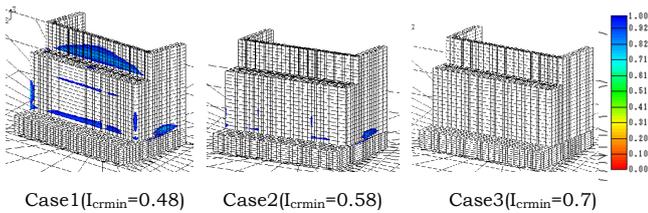


図-4 ひび割れ指数分布図 (Icr=0.0~1.0)

図-4 に示したように、堅壁表面部では、温度ひび割れ対策を講じることによりひび割れ指数が徐々に 1.0 以上に上昇したのが分かる。高さ 5m の第 2 リフト(堅壁下部)では、最小ひび割れ指数が目標値の 1.0 に届かないものの、0.48 から 0.7 (約 46%増) に改善されることがわかった。

(3) 計測結果との比較

パイプクーリングを実施した第 2 リフト(堅壁下部)において施工時の温度経時変化を確認するため、温度測定器(温度センサー)を下記 6 箇所に設置した。取付位置を図-5 に示すとおりである。温度センサーはハンディロガー(MR2041)を用いて、単三電池 4 個を電源として使用した。

計測期間はコンクリート打設完了 6 時間経過後から 5 日間 1 時間毎とした。

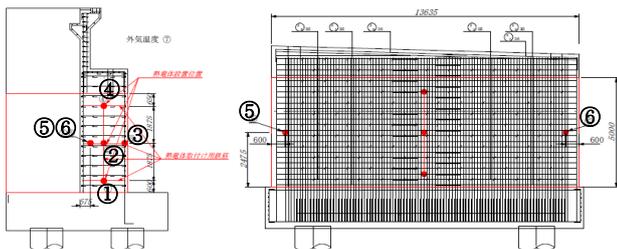


図-5 温度センサー取付位置図

温度センサーを設置した位置における事前温度応力

解析で得られた予測最高温度と温度センサー実測最高温度を表-4 にまとめた。両者の比較曲線(抜粋)は図-6 に示す。

表-4 予測温度と実測値の比較

項目 測定点	予測最高温度 (℃ 材齢:日)		センサー最高温度 (℃ 材齢:日)		温度差(℃) = 予測-実測
1 内部	45.88	2.17	47.7	1.50	-1.82
2 内部	48.91	2.5	51.1	1.75	-2.19
3	44.49	2.13	42.1	2.04	2.39
4 内部	45.75	2.08	47.9	1.71	-2.15
5	50.29	2.17	50.6	1.71	-0.31
6	49.96	2.17	50.0	1.71	-0.04

注: 測定点 1, 2, 4 は内部で, 3, 5, 6 は表面に近いセンサー位置にある。

表-4 に示すように、測定点位置 No. 2 において実測最高温度の発現材齢は 1.75 日で内部最高温度は 51.1℃、表面に近いセンサー No. 5 の実測温度は 50.6℃に達した。一方、同じ位置の事前温度解析結果では、No. 2 の予測温度は 2.5 日で 48.91℃、No. 5 の予測温度は 50.29℃となり、両者は実測値にほぼ近い値を得たことが判明した。

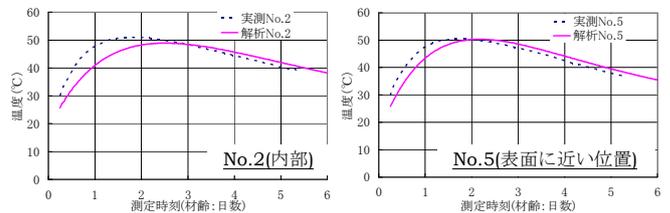


図-6 コンクリート温度履歴経時変化比較 (—解析, —実測)

3. おわりに

コンクリート温度を計測した橋台堅壁下部(第 2 リフト)について、同じ施工条件を仮定して 3D 温度応力解析を行い、計測結果との比較を試みた。以下に本検討で得られた結論を要約する。

(1) 比較可能な項目として、打設後のコンクリート内部及び表面近辺温度比較は数箇所程度限られるが、実測値と解析結果の差は 2℃前後であることから、温度ひび割れ制御対策は有効であることが明らかである。施工現場の検証結果も、温度ひび割れは見られなかったことが制御対策の効果を裏付けるものと考えられる。

(2) 誘発目地または鉛直パイプクーリング等温度ひび割れ制御対策の効果は、パラメータを適切に設定して 3D 温度応力解析を行えば、精度よく予測することは十分可能であると考えられる。

しかし、課題としては、パイプクーリングの通水期間、解析対象の規模によって合理かつ効果的な誘発目地の設定等を検討する余地があると思われる。

また、今後の維持管理を考えた場合には、不具合のないしっかりとした構造物を作ること根幹であることを忘れてはならない。また、万全を期して様々なひび割れ制御対策を講じることも重要である。

参考資料:

- 【2007 年制定 コンクリート標準示方書[設計編]】、社団法人 土木学会コンクリート委員会、2007 年 3 月
- 【マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008】、社団法人 日本コンクリート工学協会、2008 年 11 月