

鹿谷中央高架橋の施工 柱頭部のFEM温度解析における一考察

株式会社安部日鋼工業 正会員 ○居本 章洋
 福井河川国道事務所 堀 義隆
 株式会社安部日鋼工業 正会員 和木 康哲
 株式会社安部日鋼工業 正会員 東原 実

1. はじめに

鹿谷中央高架橋は、中部縦貫自動車道（永平寺大野道路）福井北IC～大野IC間の勝山IC付近に位置し、鹿谷川を跨ぐ橋長166mのPC3径間連続ラーメン箱桁橋である。

本橋は内外ケーブル併用の橋梁であり、柱頭部において外ケーブルの定着を行っているため、2枚壁構造ではなく無垢断面となっている。形状、打込み量からマスコンクリートに該当し、コンクリートの設計基準強度40N/mm²と高強度コンクリートが適用されている。したがって、セメントの水和熱に起因する温度ひび割れの発生が予想された。そこで、実施工前にFEM温度解析を行い、実際の構造物に温度測定用の熱伝対とコンクリート内部ひずみ測定用のモールドゲージを埋設し測定を行った。ひび割れ制御対策として下記の項目を実施した。

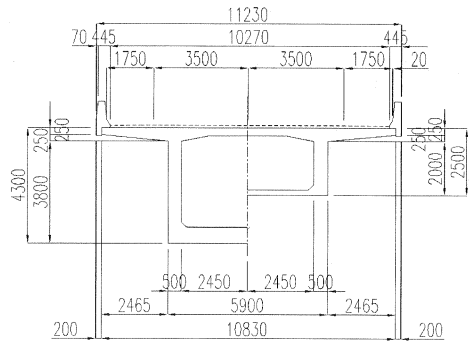
- ① コンクリートの断熱温度上昇を低減するため、セメントの種類を早強ポルトランドセメントから普通ポルトランドセメントに変更する。
- ② 0.1mm以上のひび割れが発生しそうな箇所にも補強鉄筋を追加する。
- ③ 膨張材を添加する事で温度ひび割れの低減を図る。

本橋の工事概要、FEM温度解析値と計測結果の比較、ひび割れ抑制対策についての施工報告を行う。

2. 工事概要

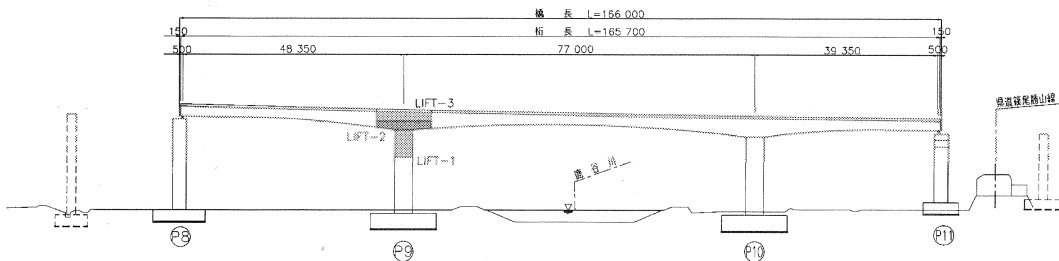
鹿谷中央高架橋の概要を以下に示す。

- 道路規格 : 第1種第3級 (設計速度 V=80km/h)
- 活荷重 : B活荷重
- 構造形式 : PC3径間連続ラーメン箱桁橋
- 橋長 : 166.000m
- 支間 : 48.350m+77.000m+39.350m
- 有効幅員 : 10.270m
- 斜角 : $\theta=90^{\circ}00'00''$
- 平面線形 : R=1000
- 施工方法 : 張出し架設工法



図—1 主桁断面図

主桁断面図を図—1に、側面図を図—2に示す。



図—2 側面図

3. FEM温度解析

3.1 解析モデル

解析モデルは、図-3に示すように、柱頭部の対称性を考慮し橋軸方向および橋軸直角方向中心位置で切り出した1/4モデルとする。脚頭部および柱頭部を2リフトに分割して施工を行うため、リフト割りを考慮してFEM温度解析を行った。

3.2 解析条件

当初のセメントの種類は早強ポルトランドセメントであったが、コンクリート内部温度を少しでも低く抑えるという観点から普通ポルトランドセメントに変更した。外気温は柱頭部の施工が8月頃を予定していたので、8月の平均気温25°C一定とした。コンクリートの初期温度を外気温より5°C高い30°Cと仮定し、コンクリートの熱伝達率、比熱、ポアソン比、線膨張係数は表-1の値とした¹⁾。コンクリートの圧縮・引張、弾性係数、収縮、断熱温度上昇の推定式は土木学会実験式にしたがった¹⁾。

膨張材は最終補償量を80 μ 見込むものとし、膨張曲線は収縮曲線と同一の2次曲線とした。

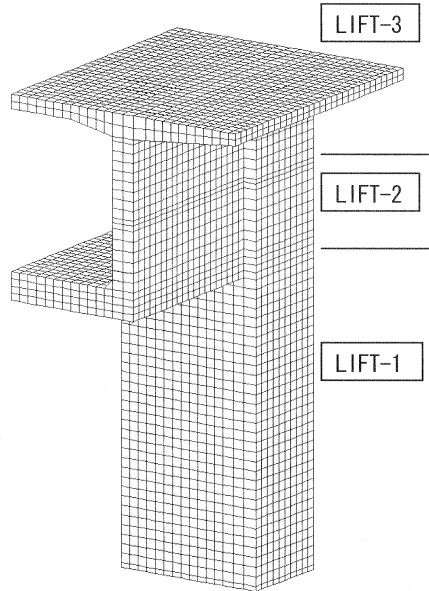


図-3 解析モデル

表-1 材料特性値および配合

	圧縮強度 推定式 N/mm ²	引張強度 推定式 N/mm ³	弾性係数 推定式 N/mm ²	クリープ 構成則	乾燥収縮 推定式	断熱温度 上昇	熱伝導率 W/m°C	比熱 kJ/kg°C	ポアソン 比
40-12-25N	JSCE	JSCE	JSCE	未考慮	JSCE	JSCE	2.7	1.15	0.17

	初期温度 °C	配合						密度 kg/m ³	線膨張 係数 μ /°C
		f'ck N/mm ²	C kg	W kg	G kg	S kg	W/C %		
40-12-25N	30	40	468	166	1019	641	35.5%	2294	10

3.3 解析結果

1) 最大温度

解析履歴中の最大温度は、図-4に示すように LIFT-1 は72h後74°Cに、LIFT-2は30h後84°Cに、LIFT-3は42h後開口部上部付近にて91°Cに達する結果となった(図-5参照)。

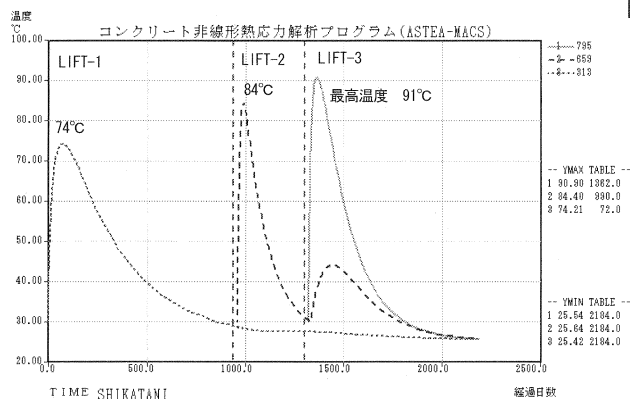


図-4 温度履歴図

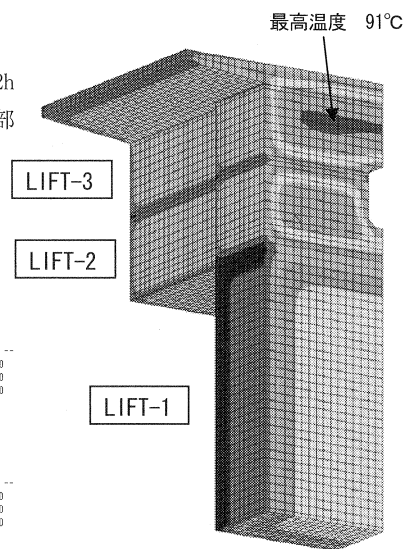
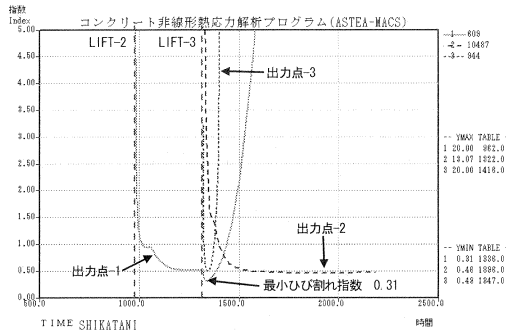


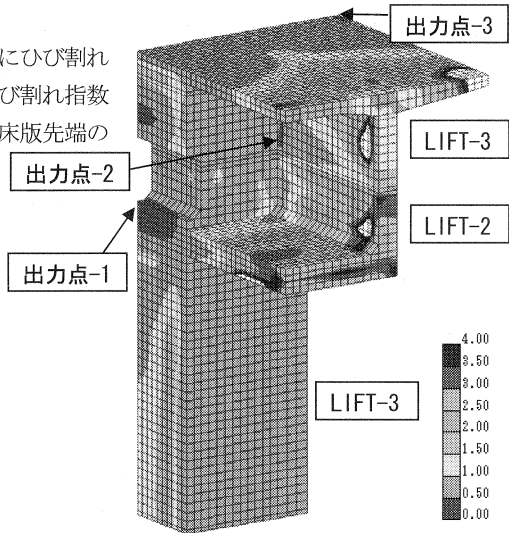
図-5 温度解析分布図

2) 主応力に対する最小ひび割れ指数

開口部下面は、**図—6**に示すように LIFT-2 打込み後にひび割れ指数が 0.5 程度になったのち、LIFT-3 打込みによりひび割れ指数が最小値 0.31 となる。LIFT-3 ウェブ内側および張出し床版先端の最小ひび割れ指数は 0.5 未満となった (**図—7** 参照)。



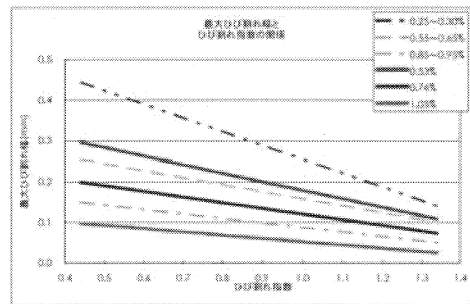
図—6 ひび割れ指数履歴図



図—7 ひび割れ指数解析分布図

3. 4 補強方針

一般の水密性に対する許容ひび割れ幅 0.10mm^2 に抑えるのに必要な鉄筋量は、解析箇所ごとに求めたひび割れ係数よりその解析箇所での鉄筋比を決定する (**図—8** 参照)。柱頭部において当初の配筋は、鉄筋比が概ね 0.2% から 0.8% の配筋であったが、解析結果に基づいて 0.5% から 1.2% 程度まで補強を行った。この結果、柱頭部 1 箇所当たりの補強鉄筋量は約 6.4t となった。



図—8 最大ひび割れ幅とひび割れ指数の関係

4. 計測結果と解析値との比較

温度測定用の熱伝対とコンクリート内部ひずみ測定用のモールドゲージを LIFT-2、LIFT-3 にそれぞれ 2 箇所ずつ埋設して測定を行った。

4. 1 温度測定結果

コンクリートの打込みは LIFT-1 を 6 月初旬、LIFT-2 を 7 月下旬、LIFT-3 を 8 月中旬に行った。LIFT-2 打込み開始時の外気温は 24℃、コンクリートの練上り温度は 28℃、LIFT-3 打込み開始時の外気温は 24℃、コンクリートの練上り温度は 30℃であった。**表—2** に解析温度 (施工後に外気温度とコンクリート初期温度の実測値にて再解析した温度) と計測温度を示す。LIFT-2、LIFT-3 とともに解析温度と計測温度はほぼ一致する結果が得られた。また、施工前解析 (施工前に仮定した外気温度とコンクリート初期温度で解析した温度) と計測後解析を比較しても概ね同様な結果が得られた。

表—2 各計測箇所における最高温度

計測箇所	解析値温度 (°C) (施工前解析値)	計測温度 (°C)	解析/計測
計測点①	87°C (84°C)	91°C	0.96 (0.92)
計測点②	69°C (67°C)	69°C	1.00 (0.97)
計測点③	94°C (91°C)	96°C	0.98 (0.95)
計測点④	81°C (78°C)	81°C	1.00 (0.96)

4. 2 基礎データ計測結果

モールドゲージおよび供試体にて基礎データの計測を材齢 $\sigma 1$ 、 $\sigma 3$ 、 $\sigma 7$ 、 $\sigma 14$ 、 $\sigma 28$ 、 $\sigma 56$ 、 $\sigma 91$ でそれぞれ 7 回行った。**表—3** に LIFT-2 を、**表—4** に LIFT-3 の計測結果を示す。圧縮強度は LIFT-2、LIFT-3 とともに材齢 7 日で設計基準強度に達する結果となった。その後も材齢 91 日に至るまで強度発現した。引張強度は材齢 14 日まで強度発現が続き、その後安定した値となった。圧縮強度に比例して引張強度は大きくなったが静弾性係数は大きくならず、土木学会の推定式で求めた曲線で推移する結果となった。

表—3 LIFT-2 計測結果

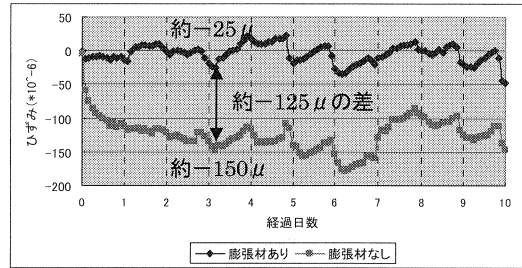
経緯	圧縮強度 N/mm ²	引張強度 N/mm ²	静弾性係数 N/mm ²	ポアソン比	備考
φ13(φ17.07.20)	18.6	1.8	1.80×10 ⁴	0.17	ポンプ・キャストのぞみ工機
φ20(φ17.07.20)	26.4	2.6	2.26×10 ⁴	0.21	研磨処理 灌漿工機
φ7(φ17.09.03)	42.4	3.1	2.59×10 ⁴	0.17	研磨処理 灌漿工機
φ13(φ17.09.09)	54.8	3.5	2.88×10 ⁴	0.19	研磨処理 灌漿工機
φ28(φ17.09.24)	53.0	3.6	2.85×10 ⁴	0.18	研磨処理 灌漿工機
φ56(φ17.09.21)	62.0	3.0	2.94×10 ⁴	0.20	研磨処理 灌漿工機
φ91(φ17.10.10)	56.3	3.2	2.79×10 ⁴	0.19	研磨処理 灌漿工機

表—4 LIFT-3 計測結果

経緯	圧縮強度 N/mm ²	引張強度 N/mm ²	静弾性係数 N/mm ²	ポアソン比	備考
φ13(φ17.09.19)	14.1	1.3	1.87×10 ⁴	0.15	ポンプ・キャストのぞみ工機
φ4(φ17.09.22)	42.9	3.2	2.54×10 ⁴	0.18	研磨処理 灌漿工機
φ7(φ17.09.25)	45.4	2.5	2.64×10 ⁴	0.20	研磨処理 灌漿工機
φ14(φ17.09.01)	49.9	3.2	2.80×10 ⁴	0.18	研磨処理 灌漿工機
φ28(φ17.09.15)	54.6	3.5	2.82×10 ⁴	0.19	研磨処理 灌漿工機
φ56(φ17.10.12)	56.1	3.9	2.90×10 ⁴	0.24	研磨処理 灌漿工機
φ91(φ17.11.10)	63.0	3.9	3.13×10 ⁴	0.20	研磨処理 灌漿工機

4. 3 膨張材の有効性

図—9に膨張材の有効性を示す。有効性の確認は「膨張材あり」と「膨張材なし」の供試体(断面100×100×400mm)を製作し、硬化後のひずみを比較した。その結果、膨張材の有無によって最大約125μの差が生じた。この差は、膨張材の使用により解析に用いた収縮補償量=80μ以上が確保できた結果となった。



図—9 膨張材の有効性

4. 4 計測後のFEM温度解析

本計測より得られた材料特性を用いて最小ひび割れ指数(主応力)の変化を検証した。表—5に解析結果を示す。計測された材料特性をFEM温度解析に反映させた結果、ウェブ内側および張出し床版先端の最小ひび割れ係数(主応力)が若干ではあるが改善された結果となった。コンクリートの設計基準強 40N/mm² に対し 60N/mm² 以上の圧縮強度が発現したが静弾性係数は大きくならなかった。しかし、引張強度の増大、補強鉄筋を追加したことによりひずみの減少、膨張材による収縮量の低減によりひび割れ係数が改善されたものと思われる。

表—5 計測後 FEM 温度解析結果

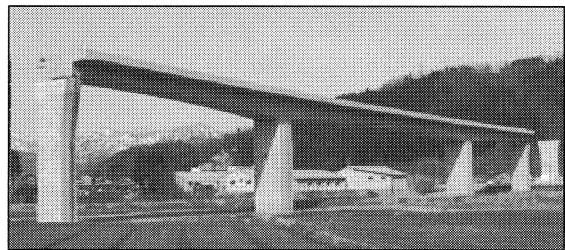
	最小ひび割れ指数	
	施工前解析	施工後解析
ウェブ内側	0.46	0.53
張り出し床版先端	0.49	0.55

5. まとめ

ひび割れ対策として①セメントの種類を早強ポルトランドセメントから普通ポルトランドセメントに変更②補強筋の追加③膨張材の添加を行ったが、現在もひび割れの発生が確認されていない事から、今回実施したひび割れ抑制対策は有効だったものと思われる。

6. おわりに

本橋は平成18年3月30日に無事竣工を迎えた。本橋の施工では、柱頭部で温度ひび割れの発生が懸念されたが、上述のFEM温度解析・ひび割れ対策の実施によりひび割れ発生を抑制する事ができた。最後に、本橋の施工にあたり、多大なご指導・ご協力を頂いた関係各位に深く感謝の意を表します。



写真—1 完成後全景

参考文献

- 1) コンクリート標準示方書「施工編」2002年制定
- 2) コンクリート標準示方書「構造性能照査編」2002年制定