

(118) 木曾川橋・揖斐川橋主塔の温度応力解析と施工について

木曾川橋(PC・鋼複合上部工) 西工事共同企業体 正会員○岩井 稔  
 日本道路公団 四日市工事事務所 久保幸治  
 木曾川橋(PC・鋼複合上部工)西工事共同企業体 正会員 鴻上浩明  
 鹿島技術研究所 土木技術研究部 溝淵利明

1. はじめに

第二名神高速道路 木曾川橋・揖斐川橋は、木曾三川を河口部付近で横断する PC・鋼複合連続エクストラードロード橋である。その主塔部は、鋼製の斜ケーブル定着部とコンクリート部で構成される。コンクリート部は、下端部長さ 10m、幅 1.75m、高さ 20m とマッシブな構造であること、設計基準強度 50N/mm<sup>2</sup> の高強度コンクリートが適用されることから、セメントの水和熱に起因する温度ひび割れの発生が懸念された。

本報文では、木曾川橋・揖斐川橋の主塔部を対象に、セメントの種類を要因とした温度応力解析を行い、各セメントを使用した場合の温度ひび割れ発生の可能性について検討した結果を報告する。また、検討結果より低熱ポルトランドセメントを実工事に適用したので、その温度ひび割れ低減効果についても報告する。

2. 温度応力解析

(1) 検討概要

温度応力解析は 3次元 FEM により行った。解析モデルは図-1 に示すとおりとし、主塔コンクリート部を 3 ロットに分割して施工する計画とした。検討要因をセメント種類とし、一般的に橋梁上部工に用いられている早強ポルトランドセメント、普通ポルトランドセメントに加え、温度上昇量の低減を目的とした低熱ポルトランドセメントの 3種類を対象とした。それぞれのセメントを用いたコンクリートの断熱温度上昇特性及び力学的特性値は、土木学会コンクリート標準示方書〔施工編〕及びセメントメーカーの技術資料を参考に表-1 及び表-2 の値を用いた。

型枠の存置期間は、早強セメント及び普通セメントの場合で 2日

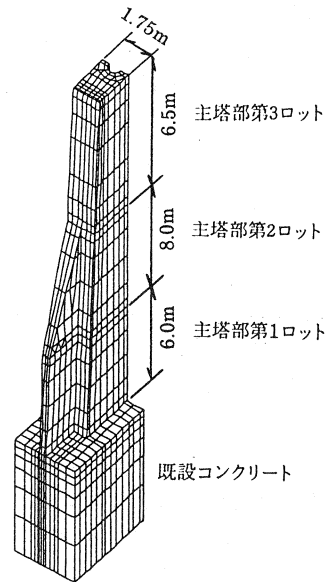


図-1 解析モデル

表-1 断熱温度上昇特性

セメント種類	水セメント比 (%)	単位セメント量 (kg/m <sup>3</sup> )	断熱温度上昇式 $Q(t) = Q_{\infty}(1 - e^{-\gamma t})$			
			対象ロット	打設温度 (°C)	$Q_{\infty}$ (°C)	$\gamma$ (1/日)
早強	38.7	377	1	14	62.8	1.290
			2	12	63.3	1.170
			3	10	63.8	1.060
普通	38.7	377	1	14	55.6	0.970
			2	12	55.8	0.860
			3	10	56.1	0.740
低熱	40.7	359	1	14	43.6	0.235
			2	12	43.7	0.218
			3	10	43.8	0.200

表-2 力学的特性値

圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	早強 : $f_c(t) = f_c(91) \times \frac{t}{2.9 + 0.97t}$
	普通 : $f_c(t) = f_c(91) \times \frac{t}{4.5 + 0.95t}$
	低熱 : $f_c = 0.0314 \times (\text{積算温度})^{0.6828}$
引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	$f_t(t) = 0.35 \times f_c(t)^{0.5}$
弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	$E(t) = \psi \times 4.7 \times 10^3 \times f_c(t)^{0.5}$ $\psi = 0.50$ (材齢3日まで) $0.65$ (材齢3日以降)
線膨張係数 (1/°C)	$10 \times 10^{-6}$
ポアソン比	0.20

間、低熱ポルトランドセメントの場合は強度発現特性を考慮して7日間として表面熱伝達率を設定した(表面熱伝達率:脱型前  $8W/m^2 \cdot ^\circ C$ , 脱型後  $14W/m^2 \cdot ^\circ C$ )。外気温としては、11月初旬からの施工を想定して、当該地域における旬別平均気温(8~14 $^\circ C$ )を用いた。

(2)解析結果

コンクリート温度上昇量の一例を図-2に示す。温度上昇量が最も大きい第1ロットの中央部では、早強セメントの場合に最高温度64 $^\circ C$ (温度上昇量50 $^\circ C$ )、普通セメントの場合に最高温度55 $^\circ C$ (温度上昇量41 $^\circ C$ )となった。また、これらのセメントでは、温度上昇速度はほぼ同一であり、約2.0日で最高温度となった。これに対して、低熱ポルトランドセメントでは最高温度が約32 $^\circ C$ であり、温度上昇量は普通セメントの1/2程度まで低減できる結果となった。また、温度上昇速度は、早強セメント及び普通セメントよりも緩やかであり、最高温度に達するまでの時間は約4.0日であった。

第1ロット及び第2ロットの温度ひび割れ指数の比較を図-3及び図-4に示す。温度ひび割れ指数が比較的小さくなる部位は、各ロットの表面部及び第1ロットの下面部であった。温度ひび割れ指数は、早強セメントの場合、各ロットの表面部で0.94~1.14(材齢2.5日)、第1ロット下面部で1.01(材齢94日)となり、ひび割れ発生の可能性が比較的高いことを示す結果となった。また、普通セメントでは、各ロットの表面部で1.10~1.38(材齢2.5日)、第1ロット下面部で1.17(材齢94日)となり、早強セメントに比べてひび割れ発生確率を小さくできると考えられた。これらに対して、低熱ポルトランドセメントを用いた場合では、すべての検討位置において温度ひび割れ指数が1.50以上となっており、ひび割れ発生の可能性は小さいと判断された。

以上の結果より、温度上昇量を低減し、温度ひび割れの発生確率を小さくするためには、低熱ポルトランドセメントを用いることが有効であることが示された。

3. 主塔コンクリート部の施工

(1)施工概要

河口付近で施工される木曾川橋・揖斐川橋の主塔では、コンクリートの供給をコンクリートプラント船(CP

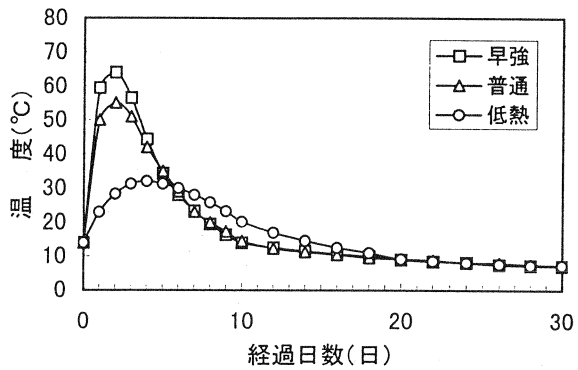


図-2 コンクリートの温度上昇量(第1ロット中心部)

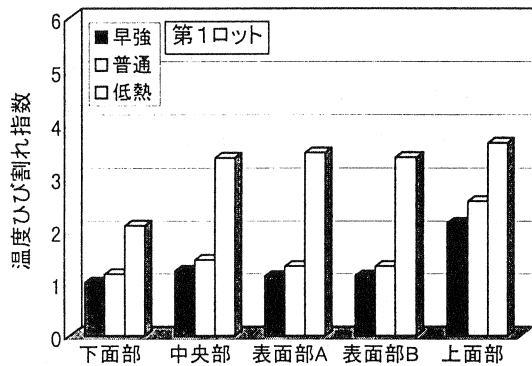


図-3 温度ひび割れ指数(第1ロット)

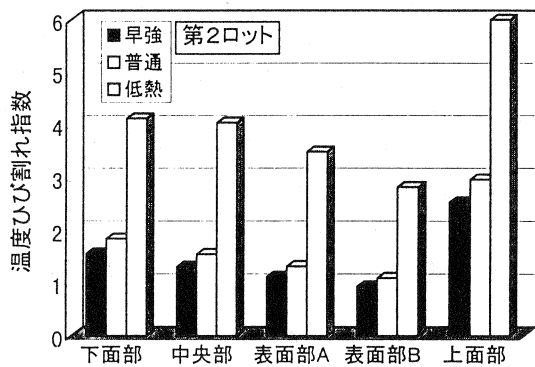


図-4 温度ひび割れ指数(第2ロット)

船) により行った。CP 船は、架橋地点の水深に適した吃水であること、設計基準強度  $50\text{N/mm}^2$  の高強度コンクリートを製造できる設備を有すること等を考慮して選定した。CP 船の概要を表-3に示す。コンクリート打設は CP 船のブームにより直接行ったが、橋脚周辺の水深が浅い場合には、図-5に示すように台船上のコンクリートポンプ車(ブーム長52m)を併用した。

表-3 コンクリートプラント船の概要

台 船	長さ54m×幅20m×深さ5m 満載吃水3.5m, 空載吃水1.9m
練混ぜ設備	強制練りパン型ミキサ ( $2.5\text{m}^3 \times 1$ 基)
圧送設備	高低圧切換ピストン式 ( $10 \sim 110\text{m}^3/\text{hr}$ ) ブーム長: 150A×30m

コンクリートの配合を表-4に示す。主桁(プレキャストセグメント工法による張出し架設)の架設開始が主塔構築後であり、主塔に軸力が作用するまでに3ヶ月以上の期間があることなどから、低熱ポルトランドセメントを採用し、強度の保証材齢を91日とした。また、比較的粘性が高くなる高強度コンクリートの施工性を改善することを目的に、高性能AE減水剤を使用してスランプを18cmとした。

(2)温度履歴と強度発現特性

主塔コンクリートの施工は12月~4月の冬期に行われたため、コンクリートの強度発現が遅れることが懸念された。そこで、打設から3日間は周囲の温度が $10^\circ\text{C}$ を下回ることがないようにシートで覆い保温養生を行った。また、以降の保温養生及び乾燥収縮によるひび割れ防止を目的に、型枠の存置期間を28日程度とした。

主塔内部に埋設した熱電対により測定した温度履歴の一例を図-6に示す。温度履歴の実測値は、中心部及び表面部とも解析値とほぼ一致しており、事前に行った温度応力解析が妥当であることを示すものと判断

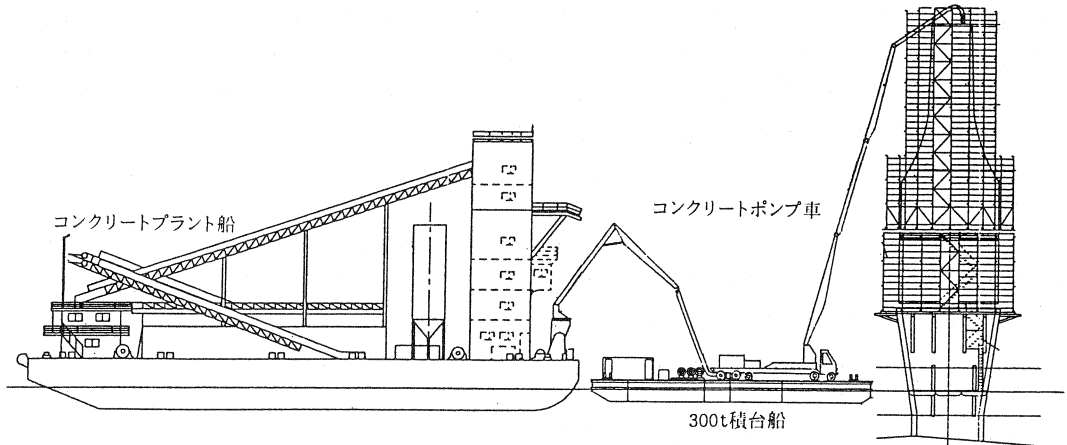


図-5 主塔コンクリートの打設要領

表-4 コンクリートの示方配合

粗骨材 最大寸法 (mm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	高性能 AE減水剤
20	42.0	45.0	18±2.5	4.5±1.5	160	381	784	990	2.286

セメント : 低熱ポルトランドセメント (比重3.24, C<sub>2</sub>S=59%, C<sub>3</sub>S=22%)

細骨材 : 陸砂 (三重県北勢町, 比重2.57)

粗骨材 : 硬質砂岩砕石 (三重県北勢町, 比重2.66)

高性能AE減水剤 : ポリカルボン酸系

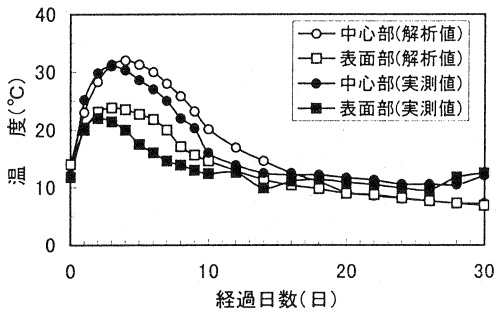


図-6 温度上昇量の比較

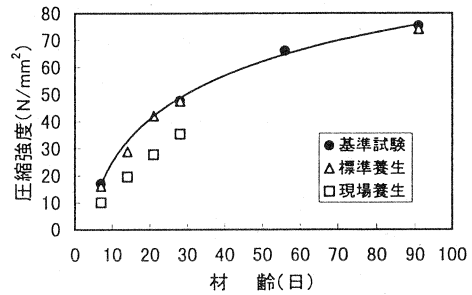


図-7 コンクリートの強度発現性状

された。なお、実測値の方が解析値よりも低い傾向があるのは、実際の外気温が解析に用いた値よりも低かったこと等の影響が考えられる。

温度が比較的低い主塔表面部のコンクリート強度を確認する目的で、同様の環境で養生した供試体の強度発現性状を調べた。結果を図-7に示す。標準養生を行った供試体では、示方配合を決定するために実施した基準試験とほぼ同様の強度発現性状であったが、主塔表面部で現場空中養生とした供試体では、材齢7~28日で標準養生の60~65%程度の強度であった。図-7より、長期材齢における強度は標準養生と同程度になると予測されるが、冬期施工に低熱ポルトランドセメントを用いる場合には、初期強度を確保するために十分な保温養生を行う必要のあることが示された。

低熱ポルトランドセメントを使用したことによる温度ひび割れ低減効果を確認するために、主塔表面のひび割れ調査を行った。打設から1ヶ月後の脱枠直後に調査した時点では、各ロットとも表面にはひび割れが観察されなかった。また、主塔第1ロット下面部のひび割れ指数が最小となった材齢3ヶ月の時点で再度調査を行ったが、ひび割れの発生は全く認められなかった。

#### 4. おわりに

本報文では、設計基準強度  $50\text{N/mm}^2$  の高強度コンクリートを使用する主塔コンクリート部の温度ひび割れ低減を目的に、セメントの種類を要因とした温度応力解析を行うとともに、その成果を実工事に適用した結果を報告したものである。本報文の結果を要約すると以下のようなものである。

- (1)主塔を対象にした温度応力解析の結果、低熱ポルトランドセメントを使用することにより、温度上昇量は普通セメントの1/2程度に低減できた。また、早強セメント及び普通セメントでは温度ひび割れ発生の可能性が比較的高いものに対して、低熱ポルトランドセメントでは温度ひび割れ指数が1.5以上となり、ひび割れ発生確率の小さいことが示された。
- (2)実工事において低熱ポルトランドセメントを適用した結果、温度上昇量は解析結果とほぼ一致することが確かめられた。また、脱型後長期にわたってひび割れの発生が認められないことから、低熱ポルトランドセメントを使用したことによる温度ひび割れ低減効果が確認された。
- (3)本工事では、低熱ポルトランドセメントを冬期施工に適用したために、コンクリート表面部の強度発現が遅くなる傾向が認められた。冬期に低熱ポルトランドセメントを使用する場合には、必要に応じて保温養生を行うとともに、型枠存置期間を長くすることが強度発現性状の改善に有効であると考えられた。

最後に、本報文が今後の同種工事への参考となれば幸いである。また、本報文の執筆にあたり多大なご協力を頂いた関係各位に深く感謝の意を表する次第である。