

# 論文 超低発熱セメントの使用による温度ひび割れ制御対策

秋山哲治\*1・中原健司\*2・高橋 攻\*3・壹岐直之\*4

**要旨:** 超低発熱セメントを用いた橋脚下部工において、温度ひび割れ抑制効果を確認するため温度応力計測を行った。計測結果より推定した熱膨張係数は $10.3\mu/\text{C}$ 、有効弾性係数推定式の補正係数は1.0となり、標準的な値とほぼ一致した。解析と計測結果とは、解析に必要な諸定数についてコンクリート標準示方書に記載される参考値を用いた結果、概ね一致し、解析の妥当性を確認した。また、超低発熱セメントの使用により、材齢初期の内部拘束による最小ひび割れ指数について0.30改善され、抑制効果があったことを確認した。

**キーワード:** マスコンクリート、温度ひび割れ、超低発熱セメント、現場計測

## 1. はじめに

本橋脚工事では、温度ひび割れの制御対策として超低発熱セメントを使用し、その有効性を確認するために、温度応力計測を行った。計測は全6橋脚のうち、A・B両橋脚について行った。図-1に示すA橋脚（幅7.0m、奥行き3.4m、高さ

18.1m）の計測結果については、昨年度に報告した<sup>1)</sup>。その後、A橋脚と同じセメントを用いた

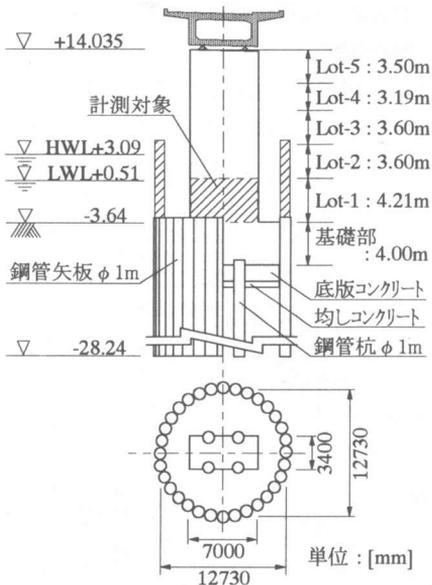


図-1 A橋脚の概略図(Lot.1打設'99.6.5~夏季)

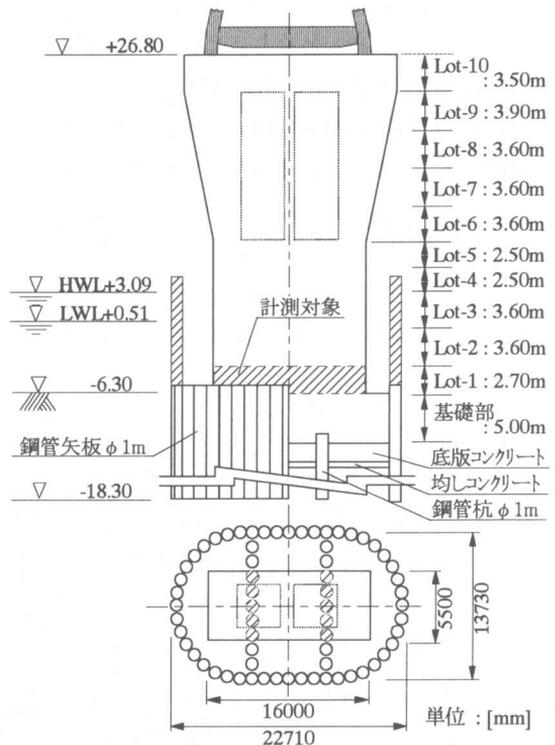


図-2 B橋脚の概略図(Lot.1打設'00.3.30~春季)

- \*1 若築建設(株)技術本部 技術研究所 (正会員)
- \*2 山口県 豊田土木事務所 (正会員)
- \*3 若築建設(株)中国支店 山口中部工事事務所
- \*4 若築建設(株)技術本部 技術研究所 博士(工学) (正会員)

B橋脚（幅16.0m，奥行き5.5m，高さ33.1m）を2000年3月末に打設し，A橋脚と同様に温度・ひずみ・応力の計測を行った．本論文では，これら2橋脚の計測結果と，施工条件を反映した解析結果とを比較することにより，温度応力解析の妥当性を検証した．さらに，当初使用する予定であった高炉セメントB種についても温度応力解析を行い，温度ひび割れ制御対策の評価を行った．なお，温度応力解析は【平成11年度版】コンクリート標準示方書〔施工編〕<sup>2)</sup>（以下，標準示方書と称す）に準拠した．

## 2. 制御対策 および 温度応力計測

### 2.1 ひび割れ制御対策

当初使用する予定であった高炉セメントB種を用いた事前解析の結果，最高温度は72.1℃，最小ひび割れ指数は0.62（標準示方書〔平成8年度版〕<sup>3)</sup>では0.49）となり，比較的大きな幅のひび割れが発生すると予測された<sup>1)</sup>．

本工事での温度ひび割れ制御対策は，温度応力解析に基づく制御対策の有効性・経済性・施

表-1 対策後のコンクリート配合（24-8-20 SLC）

水セメント比[%]	細骨材率[%]	単位量 [kg/m <sup>3</sup> ]				
		セメント	水	細骨材	粗骨材	混和剤
55	43.0	291	160	779	1076	3.14

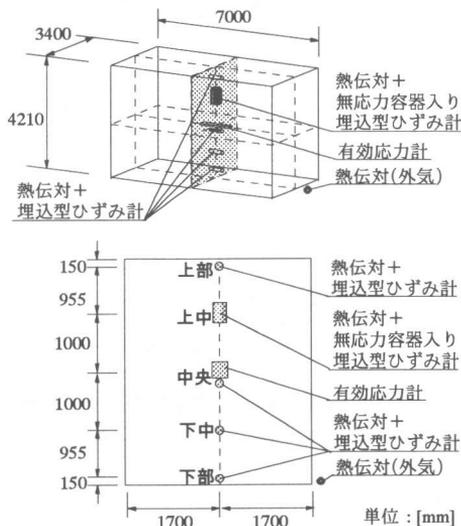


図-3 A橋脚の計測項目および配置

工性を考慮して決定し，3成分系の超低発熱セメントを用いることとなった．成分比率は普通ポルトランド23%，高炉スラグ50%，フライアッシュ27%である．コンクリートの配合を表-1に示す．

### 2.2 温度応力計測

計測機器は図-3および図-4に示すように，鋼管矢板井筒基礎の直上となる第1ロットの，中心鉛直線上に5点，その他に，B橋脚では躯体側面付近の上下方向中央に2点配置した．温度および実ひずみは，測温機能付き埋込型ひずみ計を用いて測定した．コンクリートの自由ひずみは，無応力容器に入れた埋込型ひずみ計により計測した．有効応力は，中央部のひずみ計の直上に有効応力計を設置して計測した．自由ひずみの計測は鉛直方向とし，これ以外の計測器は橋脚の長手方向とした．

計測期間は，施工上の制限から，A橋脚が54日間，B橋脚が103日間とした．

## 3. 計測結果と解析結果の比較

### 3.1 解析条件

温度応力解析は，表-2に示す諸定数を用い，3次元有限要素法（躯体内の位置によらず温度上昇特性均一，有効弾性係数法）により行った．

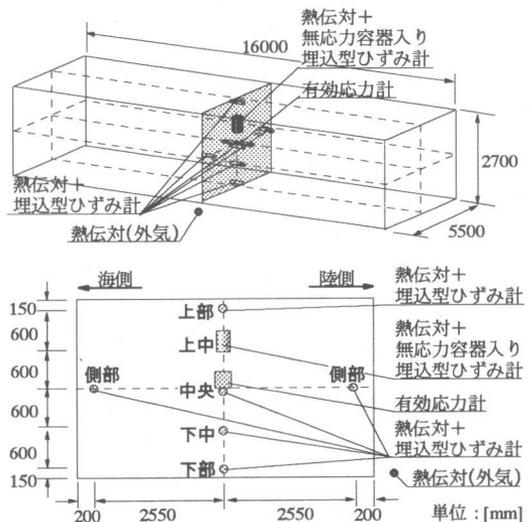


図-4 B橋脚の計測項目および配置

表-2 解析に用いた諸定数

	A橋脚	B橋脚
打設日	'99.6.5	'00.3.30
打設時のコンクリート温度 [°C]	26.0	16.0
断熱温度上昇式の定数	$Q_{\infty}$ [°C]	22.6
	$\gamma$	1.05
密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	2.30 × 10 <sup>3</sup>	
比熱 [kJ/(kg°C)]	1.26	
熱伝導率 [W/(m°C)]	2.8	
熱伝達係数 [W/(m <sup>2</sup> °C)]	天端	14
	型枠	8
	脱型後	14
熱膨張係数 [1/°C]	10.3 × 10 <sup>-6</sup>	
圧縮強度推定式 (1)	$f_c'(91)$	31.8
	$a$	6.5
	$b$	0.97
引張強度推定式 (2)	$c$	0.44
有効弾性係数推定式(3) $\Phi(t)$	1.0	

外気温およびコンクリート打込み温度は、A・B両橋脚の計測結果を用いた。

断熱温度上昇式中の定数は、セメントメーカー技術資料により設定した。また、熱伝導率、比熱および比重は、標準示方書に記載される参考値を用いた。

熱膨張係数は、第1ロット“上中”で、無応力容器に入れて計測した自由ひずみと温度との関係より設定した。図-5に示すように、温度とひずみの関係がほぼ直線とみなせる温度下降時で、A・B両橋脚の関係をを用いて近似した結果、熱膨張率は10.3 $\mu$ /°Cとなった。

コンクリートの圧縮強度、引張強度および有効弾性係数は標準示方書の推定式(1)、(2)および(3)を用いた。式中の定数 $a$ 、 $b$ 、 $c$ および補正係数 $\Phi(t)$ の値は表中に示した。

$$f_c'(t) = \frac{t}{a+b \cdot t} \cdot f_c'(91) \quad (1)$$

$$f_t(t) = c \cdot \sqrt{f_c'(t)} \quad (2)$$

$$E_e(t) = \Phi(t) \cdot 4700 \cdot \sqrt{f_c'(t)} \quad (3)$$

ここに、 $f_c'(t)$  : 材齢 $t$ 日の圧縮強度 [N/mm<sup>2</sup>]

$f_t(t)$  : 材齢 $t$ 日の引張強度 [N/mm<sup>2</sup>]

$E_e(t)$  : 有効弾性係数 [N/mm<sup>2</sup>]

$a, b, c$  : 定数

$\Phi(t)$  : 補正係数

定数 $a$ 、 $b$ は、全6橋脚に対して実施した7、28、

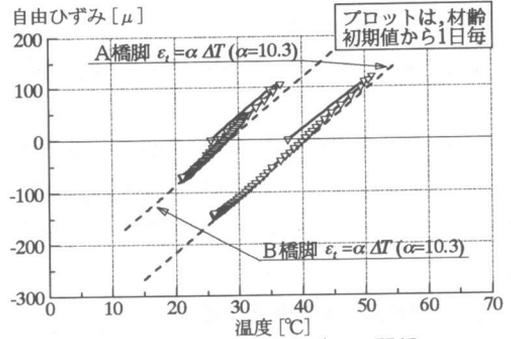


図-5 温度と自由ひずみの関係

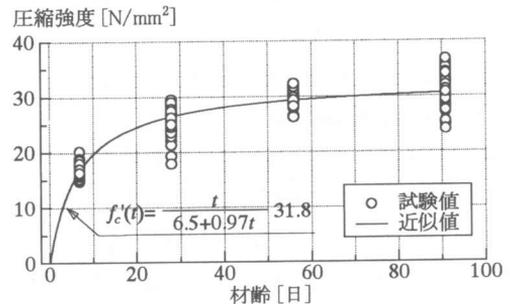


図-6 圧縮強度の試験結果

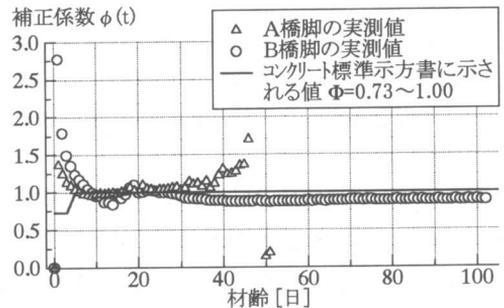


図-7 補正係数の経時変化

56および91日の圧縮強度試験の結果から近似した。図-6に強度試験結果と推定式(1)による近似値を示す。また、ポアソン比は $\nu=0.2$ とした。

有効弾性係数推定式(3)における補正係数 $\Phi(t)$ は、A・B両橋脚で計測した有効応力と、有効ひずみから有効弾性係数を求め、これと前述で近似した圧縮強度式から算出した。結果を図-7に示す。A橋脚は材齢5日までと40日以降、B橋脚は材齢10日まででバラツキが大きくなるが、補正係数は標準示方書に記載される材齢5日以降の値1.0と概ね一致した。同図に示すとおり、標準示方書では、材齢3日までの補正係数は0.73

に低減しているが、計測結果から低減する必要はないと考え、本解析では補正係数を1.0と設定した。

熱伝達率は、標準示方書に記載される参考値を用い、養生条件は、実施工での型枠脱型時期を解析に反映させた。なお、各リフトの打設日については実工程を反映させた。

### 3.2 計測結果と解析結果の比較

本節では、A・B両橋脚の第1ロットの計測結果と解析結果を比較することにより、温度応力解析の妥当性を検証した。比較として、温度、引張応力、ひび割れ指数の3項目を示す。

#### (1) A橋脚の比較結果

表-3および図-8にA橋脚での比較結果を示す。

最高温度は、計測結果が52.3℃、解析結果が48.3℃となり、解析結果の方が5℃低くなった。解析では、温度上昇速度が遅く、最高温度が若干小さくなった。

引張応力の材齢初期の最大値は、計測結果が1.13N/mm<sup>2</sup>、解析結果では1.13N/mm<sup>2</sup>となり、発生材齢は異なるが、両者の値は一致した。しかし、長期的な応力変化の傾向については異なる結果となった。

最小ひび割れ指数は、計測結果が1.44、解析結果が1.48となり、引張応力と同様、両者の結果はほぼ一致した。長期的なひび割れ指数の傾向は、引張応力と同様に異なる結果となった。

#### (2) B橋脚の比較結果

表-4および図-9にB橋脚での比較結果を示す。なお、“側部”の値は、図-4に示す2測点のうち、“海側”（引張応力値の大きい方）を示した。

最高温度は、計測結果が40.5℃、解析結果が39.8℃となり、A橋脚と同様に解析結果が最高温度は若干低く、発生材齢は遅かった。

引張応力の材齢初期の最大値は、計測結果が1.05N/mm<sup>2</sup>、解析結果では1.70N/mm<sup>2</sup>となった。解析結果の“側部”は1.21N/mm<sup>2</sup>であり、同一位置で比較すると、計測結果と同程度であった。また、長期的な応力変化の傾向は、A橋脚と同様に異なる結果となった。

表-3 A橋脚の比較結果一覧

材齢/比較項目	計測結果	解析結果
初期		
最高温度 [°C]	52.3 (2.8)	48.3 (4.0)
引張応力 [N/mm <sup>2</sup> ]	1.13 (6.0)	1.13 (4.2)
最小ひび割れ指数	1.44 (3.5)	1.48 (3.3)
長期		
引張応力 [N/mm <sup>2</sup> ]	0.05 (54)	1.45 (54)
最小ひび割れ指数	5以上(54)	1.64 (54)

注) 表中のカッコ内数値は、発生材齢(日)。

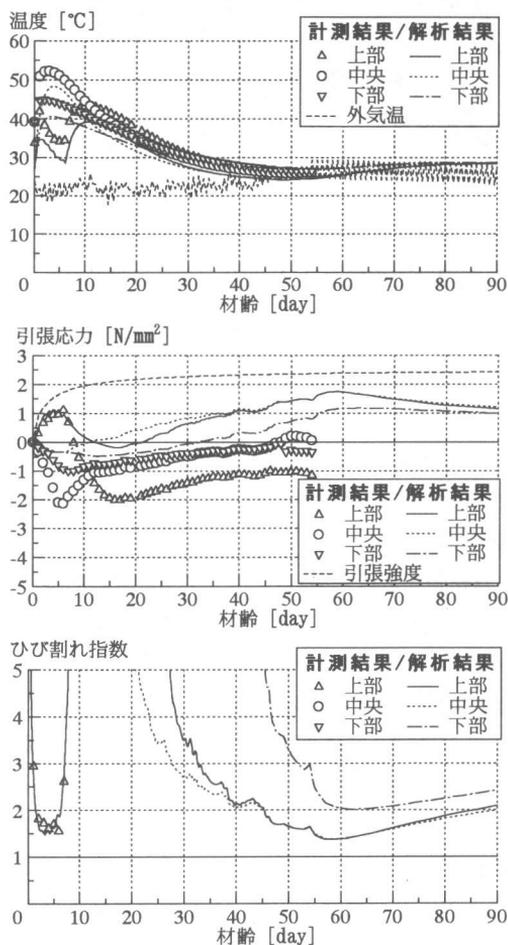


図-8 A橋脚・第1ロットの比較結果

最小ひび割れ指数は、計測結果が1.74、解析結果が1.03となった。ただし、同一位置で比較すると、解析結果の“側部”は1.62であり、計測結果とほぼ一致した。引張応力と同様に、長期的なひび割れ指数の傾向については、両者の値は一致しなかった。

#### (3) 比較結果のまとめ

材齢初期の解析結果について、A橋脚は最高温度が計測結果より若干低かったものの、引張

表-4 B橋脚の比較結果一覧

材齢/比較項目	計測結果	解析結果
初期		
最高温度 [°C]	40.5 (2.5)	39.8 (4.8)
引張応力 [N/mm <sup>2</sup> ]	1.05 (10.8)	1.70 (7.2)
最小ひび割れ指数	1.74 (6.8)	1.03 (4.3)
長期		
引張応力 [N/mm <sup>2</sup> ]	-1.76 (90)	0.90 (90)
最小ひび割れ指数	—	2.69 (90)

注) 表中のカッコ内数値は、発生材齢(日).

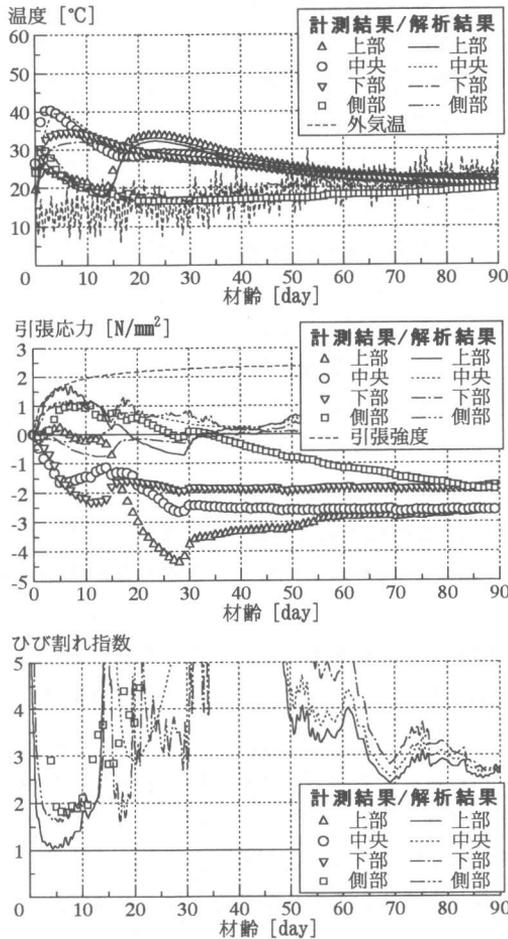


図-9 B橋脚・第1ロットの比較結果

応力および、ひび割れ指数はほぼ一致しており、精度の高い解析を行うことが出来た。B橋脚では、“上部”は、計測と解析が異なる結果となったが、“側部”は両者の結果が概ね一致した。内部拘束に起因するひび割れ指数については、解析結果は計測結果と概ね一致し、解析は妥当であったと考える。

一方、材齢長期については、温度の解析結果は計測結果と一致し、解析は妥当であったと考

えられるが、引張応力およびひび割れ指数は異なる結果となった。これは、解析にクリープによる経時的な応力減少の影響を考慮していないためであると考えられる。なお、クリープを考慮した解析は、諸元の設定方法が困難であったため、本論文では採用しなかった。計測結果からのクリープについての分析は、今後の課題としたい。しかしながら、解析によるひび割れ指数は、計測結果より小さな値となっており、安全側の検討が行えたと考える。

したがって、本論文で用いた温度応力解析は、妥当であったと考える。

#### 4. 制御対策の効果

本章では、当初使用する予定であった高炉セメントB種についても温度応力解析を行い、前章で示した超低発熱セメントについての解析結果と比較することにより、制御対策効果の評価を行った。解析の対象は、当該工事における全6橋脚の全48ロットとした。

図-10に最高温度、材齢初期および材齢長期のひび割れ指数の3項目について、解析結果の範囲を示す。

最高温度は、高炉セメントB種を用いた場合は34.0～88.7°Cとなり、超低発熱セメントは19.9～56.0°Cとなった。対策により、全ロットを通じての最高温度は32.7°C低減された。温度低減量の全ロットの平均値は24.3°Cであった。

材齢初期の最小ひび割れ指数は、高炉セメントB種を用いた場合は0.36～0.79となり、超低発熱セメントは0.66～1.54となった。対策により、材齢初期の内部拘束による表面ひび割れについて、全ロットを通じての最小ひび割れ指数は0.30改善された。最小ひび割れ指数改善量の全ロット平均値は0.47であった。

内部拘束が主原因と考えられるひび割れが、B橋脚の第5ロット～第10ロット、その他の5橋脚は、第1ロットのみに発生した。しかし、その幅は0.03mm程度以下であり、経時に伴ってひび割れ幅が低減したことを確認した。したがって、

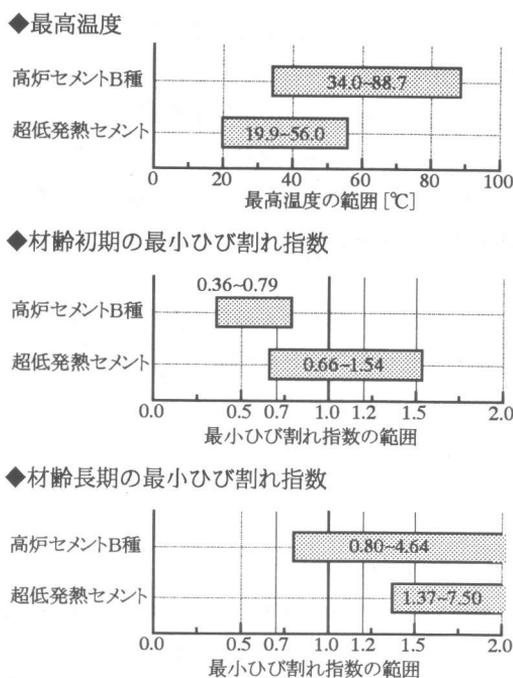


図-10 制御対策の効果

これらのひび割れは耐久性に悪影響となるものでないとする。

材齢長期の最小ひび割れ指数は、高炉セメントB種を用いた場合は0.80～4.64となり、超低発熱セメントは1.37～7.50となった。対策により、材齢長期の外部拘束による貫通ひび割れについて、全ロットを通じての最小値は0.57改善される解析結果となった。最小ひび割れ指数改善量の全ロット平均値は1.47であった。よって、外部拘束による貫通ひび割れが発生する可能性は、解析上ほとんどないと判断された。

したがって、超低発熱セメントの使用による温度ひび割れ対策は有効であったと考える。

## 5. まとめ

橋脚下部工における施工時の温度ひび割れ制御対策として、超低発熱セメントを使用し、温度応力計測を行った。そこで、計測結果と解析結果を比較することにより、温度応力解析の妥当性を検証し、制御対策の効果を評価した。以下に、結果を取りまとめる。

- ① 温度については、初期材齢から長期材齢に至るまで、計測結果と解析結果は概ね一致した。
  - ② 引張応力は、材齢初期では計測結果と解析結果がほぼ一致したが、長期材齢では両者が異なる結果となった。引張応力と同様に、ひび割れ指数も材齢初期では一致するが、材齢長期では異なる結果となった。
  - ③ 実測による熱膨張係数は $10.3\mu/\text{°C}$ と算定され、標準示方書に記載されている値 $10\mu/\text{°C}$ と同程度であった。
  - ④ 標準示方書の有効弾性係数推定式の補正係数を実測値から近似すると1.0となった。標準示方書に示される値は0.73～1.0であり、概ね一致した。
  - ⑤ 対策効果について、全ロットを通じての最高温度は $32.7\text{°C}$ 低減された。また、材齢初期の最小ひび割れ指数では0.30改善され、材齢長期では0.57改善された。
  - ⑥ 材齢初期に、幅 $0.03\text{mm}$ 以下のひび割れが発生した橋脚もあったが、その後、ひび割れは進展せず、経時に伴ってひび割れ幅が低減した。
- 以上より、夏季および春季の異なる外気温での温度応力計測を行ったことにより、コンクリートの物性等を高い精度で分析できたと考えている。また、本論文で用いた温度応力解析は妥当であり、超低発熱セメントは温度ひび割れ制御に有効であったことが確認された。今後は、材齢長期の応力の解析精度を上げる必要がある。

## 参考文献

- 1) 中原健司ほか：超低発熱セメントを用いた実構造物での温度応力計測，コンクリート工学年次論文報告集，日本コンクリート工学協会，Vol.22，No.2，pp.1087～1092，2000.6
- 2) 土木学会：【平成11年版】コンクリート標準示方書〔施工編〕－耐久性照査型－，pp.24～36，2000.1
- 3) 土木学会：〔平成8年制定〕コンクリート標準示方書 設計編，pp.25～26，1996.3