

報告 低熱セメントと膨張材を併用した側壁部の温度応力計測

潮田 和司^{*1}・木内 武彦^{*2}・岡本 康^{*2}・保利 彰宏^{*3}

要旨：配水池の外壁部は底版に拘束されるため、セメントの水和熱に起因する温度ひび割れが発生しやすい。温度ひび割れ対策として、低熱ポルトランドセメントと膨張材を併用したコンクリートを使用した。対策の効果を確認するために計測および解析的検討を行った。計測の結果、熱膨張係数は、温度上昇時で2段階、温度降下時で1段階、計3段階に分けられることが分かった。拘束ひずみは、壁長の中央部や底版に近い位置ほど大きい。熱膨張係数の実測値を用いた解析値と有効応力計から計測した有効応力を比較するとあまりよく一致せず、クリープ等の不確定要因との関係を明らかにする必要があることを示唆していた。

キーワード：マスコンクリート，温度ひび割れ対策，低熱セメント，膨張材，温度応力計測

1. はじめに

マスコンクリートの温度ひび割れ対策は、ひび割れ誘発目地の設置、低発熱型セメントの使用、膨張材の使用、プレクーリング・パイプクーリングの実施、ひび割れ制御鉄筋の設置、等が従来から実施されてきた。近年、低発熱型セメントとして高ピーライト系の低熱ポルトランドセメントが開発され、マスコンクリートの温度ひび割れ対策としての実績が増えている。しかしながら、低熱ポルトランドセメントのみの対策では、ひび割れ本数やひび割れ幅を抑制できるものの、ひび割れを完全に防止することは困難である。一方で、浄水場施設や配水池などのように外部からの有害な水の侵入が許されない構造物においては、完全にひび割れを防止することが重要になる。ひび割れを完全に防止するためにはいくつかのひび割れ対策を併用する必要がある。そこで、藤田等¹⁾、中村等²⁾は、高度浄水処理施設において、外壁部の温度ひび割れ対策として低熱ポルトランドセメントと膨張材を併用したコンクリートを採用している。

藤田等¹⁾、中村等²⁾と同様に、浄水場配水池の外壁部の温度ひび割れ対策として低熱ポルトランドセメントと膨張材を併用したコンクリー

トを採用した。この対策の効果を確認するために実構造物にセンサーを設置し、温度、ひずみ、応力および熱膨張係数を計測し、さらに解析的検討を行った。本論文は、これらの結果を報告する。

2. 温度ひび割れ制御対策

温度ひび割れ制御対策を実施した配水池の平面図および計測ブロックの断面図を図-1に示す。浄水場の配水池は、高度浄水処理した水を貯め配水するための施設であるため、ひび割れ等より外部からの有害な水の侵入を防止しなければならない。しかしながら、配水池の底版、側壁、上床版は図-1に示すように厚さが1.0mとマスコンクリートとなり、温度ひび割れが発生しやすい部材である。そのため、設計段階から温度ひび割れ対策として、底版、上床版には低熱ポルトランドセメントの使用、側壁はこれに加え膨張材の併用が採用されていた。コンクリートの施工順番は、底版を施工した後、側壁と上床版を同時に施工する。今回計測を実施した部位は側壁であり、側壁に使用したコンクリート配合を表-1に示す。事前解析を行い、温度ひび割れ制御対策の効果を確認した。その結

*1 西松建設(株) 技術研究所 土木技術研究課 (正会員)

*2 西松建設(株) 関西支店

*3 電気化学工業(株) セメント・特殊混和材研究所 (正会員)

表 - 1 コンクリート配合

粗骨材 の最大 寸法 (mm)	スラブ (cm)	水セメ ント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)					
				W	C	混和材	S	G	混和剤
20	15	55.0	44.5	179	295	30	763	991	0.861

セメント種類：低熱ポルトランドセメント、混和材：水和熱抑制型膨張材
呼び強度：24N/mm²、管理材齢：91日

果，側壁部は温度ひび割れ対策を実施しても，春期から夏期施工ブロックにおいては，温度ひび割れの発生確率が高いことが分かった。そこで，さらにひび割れ誘発目地を1ブロック当たり1~2本設置することとした。計測を実施したブロックのコンクリート打込み時期は5月で，このブロックにおいてもひび割れ誘発目地を1本設置している。

3. 温度応力計測

3.1 計測項目および計測器配置

計測項目は，埋込み型ひずみ計によるコンクリート躯体内の実ひずみおよび温度の測定，有効応力計による応力測定，無応力計による自由伸縮ひずみの測定，熱電対による外気温の測定である。計測器配置図を図-2に示す。なお，計測器は全て壁厚方向の中央部に設置した。

3.2 コンクリートの強度試験結果

コンクリートの荷卸し時に採取したコンクリートによる圧縮強度，引張強度および静弾性係数の強度試験結果を表-2に示す。

3.3 ひび割れ発生状況

コンクリートは平成13年5月17日に施工した。約2週間後，誘発目地にひび割れが発生した。その後，半年経過した時点では，誘発目地を除いてひび割れは発生していない。

3.4 熱膨張係数の計測結果

熱膨張係数は，無応力計に設置した埋込み型ひずみ計から計測される。無応力計は，拘束の影響を遮断するため無応力容器に埋込み型ひずみ計を設置したもので，自由伸縮ひずみが計測される。自由伸縮ひずみは，コンクリート温度

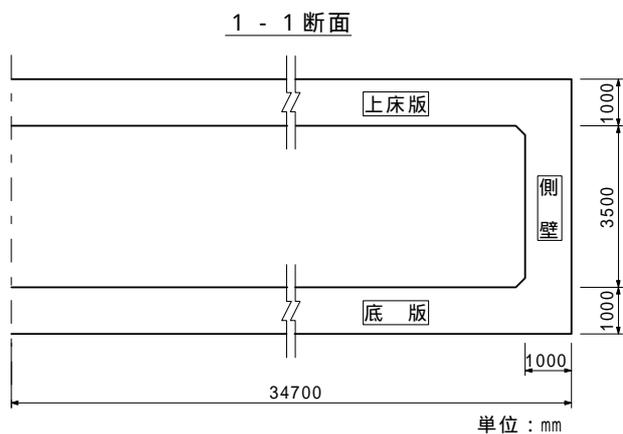
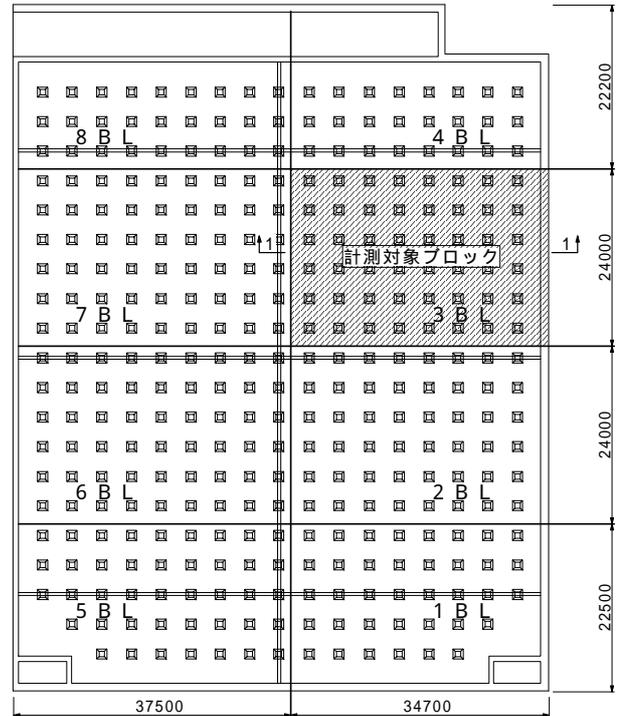


図 - 1 対象構造物

が変化することにより発生するひずみで，自由伸縮ひずみの温度勾配が熱膨張係数である。図-3にKM1とKM2の温度と自由伸縮ひずみの関係図を示す。図-3から，温度と自由伸縮ひずみの関係は，無応力計の設置深さに関係なく

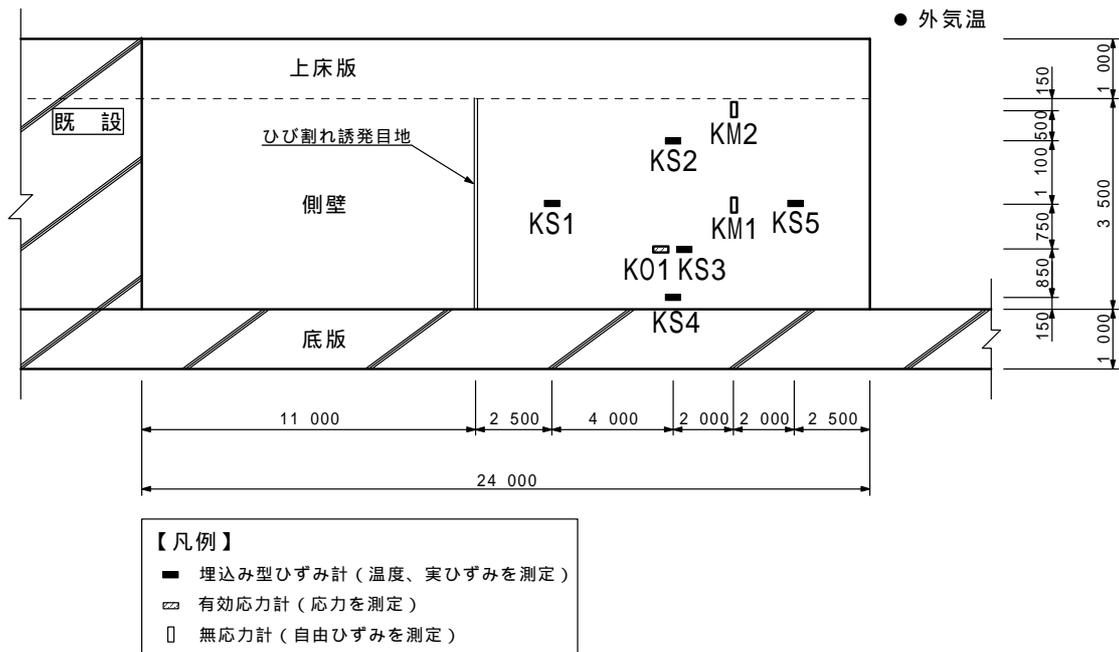


図 - 2 計測器配置図

表 - 2 コンクリートの強度試験結果

圧縮強度 (N/mm ²)			引張強度 (N/mm ²)			静弾性係数 (×10 ⁴ N/mm ²)		
4日	7日	28日	4日	7日	28日	4日	7日	28日
8.47	11.3	27.8	0.970	1.23	3.10	1.95	2.13	2.83

ほぼ同様の形状を示している。熱膨張係数は、温度上昇時で2段階、温度降下時で1段階、計3段階に分けられる。コンクリート打込み直後から材齢0.375日程度の熱膨張係数は、一般のコンクリートよりも3倍以上大きい $32 \sim 33 \times 10^{-6}/$ であった。その後最高温度に達するまでの温度上昇時の熱膨張係数は、 $15 \sim 17 \times 10^{-6}/$ とコンクリート打込み直後より半減するが膨張材による膨張効果が現れている。温度降下時の熱膨張係数は、約 $9 \times 10^{-6}/$ と一般のコンクリートより10%程度小さい。

3.5 温度の計測結果

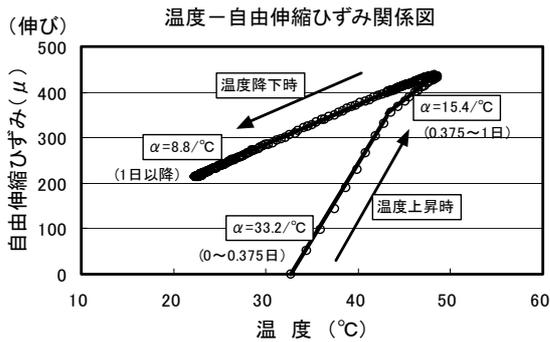
温度計測点KS1～KS5の温度計測結果を図4に示す。計測器KS1～KS5は全て壁厚方向の中央部に設置したため、各位置の温度はほぼ同様な温度履歴を示し平面的な位置の違いはほとんどない。最高温度は約48で、その時の材齢はコンクリート打込み後約1日であった。

3.6 拘束ひずみの計測結果

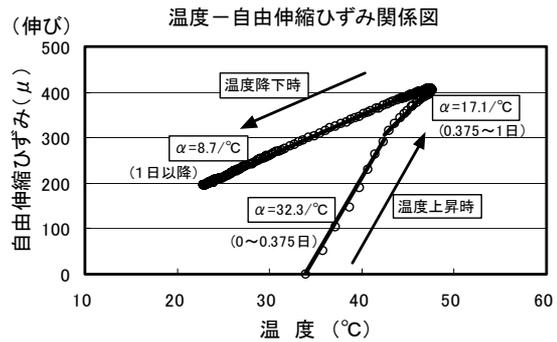
埋込み型ひずみ計で計測されるひずみは、通常以下の成分が含まれると考えられる。

$$\begin{aligned} \text{実ひずみ} = & \text{拘束ひずみ} + \text{自由伸縮ひずみ} \\ & + \text{乾燥収縮ひずみ} + \text{クリープひずみ} \quad (1) \end{aligned}$$

ここで、拘束ひずみは、セメントの水和熱や外気温によるコンクリート構造物の変形が底板などの拘束体に拘束されることによって発生するひずみである。この拘束ひずみがマスコンクリートでは主要な検討対象となる。乾燥収縮ひずみやクリープひずみも重要な要素である。ここで、当該構造物は地下での施工であり着目している計測期間がコンクリート打込み後1ヶ月程度であることから乾燥収縮ひずみの影響は小さい。クリープひずみは、現場計測結果のみでは評価が難しい。このような理由により、本報



(a) 計測位置 : KM1



(b) 計測位置 : KM2

図 - 3 熱膨張係数の計測結果

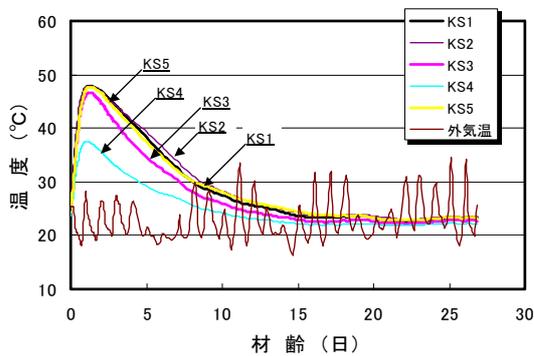


図 - 4 温度計測結果

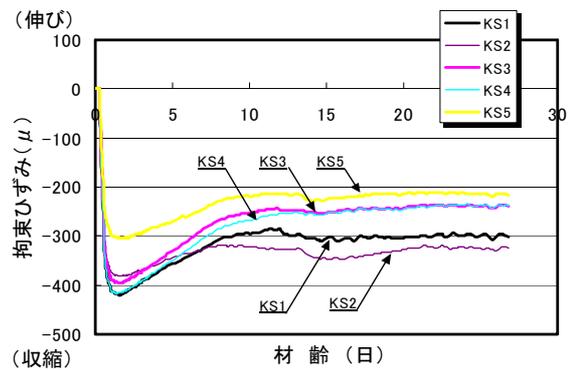


図 - 5 拘束ひずみ計測結果

告では拘束ひずみを式(2)のように評価している。なお、自由伸縮ひずみは位置によって違うため、熱膨張係数に温度変化量を乗じて自由伸縮ひずみを評価している。また、ひずみを計測処理する場合の初期値は凝結終結時点としている。

$$\text{拘束ひずみ(乾燥収縮ひずみ, クリーブひずみを含む)} = \text{実ひずみ} - \text{自由伸縮ひずみ} \quad (2)$$

式(2)から算定した計測点 KS1 ~ KS5 の拘束ひずみを図 - 5 に示す。図 - 5 から 拘束ひずみは、平面的な位置の違い、すなわち拘束度合いの違いにより変化しているのが確認できる。温度上昇時に着目すると、拘束度が小さい KS5 の収縮ひずみ量は小さいが、拘束度が大きい KS3 や KS4 の収縮ひずみ量は大きく、拘束度が大きい位置ほど膨張材によるケミカルプレストレスが多く導入されていることがわかる。また、温度

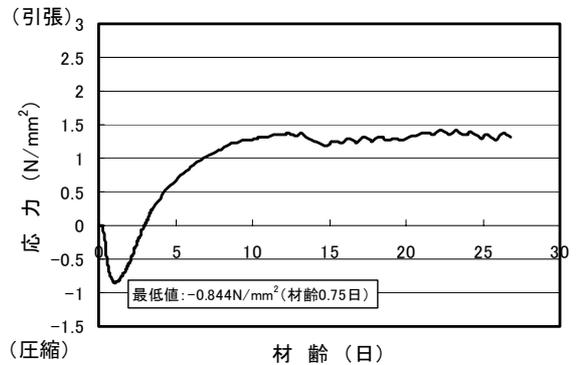


図 - 6 有効応力計測結果

降下時に着目すると、拘束度が小さい KS2 や KS5 の拘束ひずみの変化量は小さいが、拘束度が大きい KS3 や KS4 は拘束ひずみの変化量が大きく、底版による拘束が大きいことを示している。

3.7 有効応力の計測結果

有効応力計は、コンクリート躯体内に発生している応力を直接計測することができる。よって、得られる値は、温度応力、乾燥収縮、クリ

ープ等の影響が全て含まれた物理量で、変換後の値が有効応力である。有効応力計から計測した有効応力を図 - 6 に示す。図 - 6 から、温度上昇とともに圧縮応力が導入され、材齢約 0.8 日で最大圧縮応力約 0.85N/mm^2 に達する。その後、温度降下とともに引張側に転じ、約 2 週間後に最大引張応力約 1.5N/mm^2 に達する。なお、約 2 週間後応力の低下が若干見られるが、この時期にひび割れ誘発目地にひび割れが発生していることから、ひび割れ発生に伴う応力解放によるものであると考えられる。

4. 温度ひび割れ制御効果の解析的検討

4.1 解析ケースおよび解析条件

当該構造物の側壁部に採用した「低熱ポルトランドセメント + 膨張材」による温度ひび割れ制御効果を確認するために、本章では FEM による解析的検討を行う。また、解析結果と有効応力計の計測結果の比較も行う。ここでは、「低熱ポルトランドセメント + 膨張材」(ケース 1)と「低熱ポルトランドセメント」(ケース 2)の場合の温度応力解析を行い両者の解析結果を比較することにより効果を検討する。両者の解析条件の違いは、熱膨張係数と終局断熱温度上昇量とする。「低熱ポルトランドセメント + 膨張材」(ケース 1)の熱膨張係数は計測で得られた実測値を採用する。「低熱ポルトランドセメント」(ケース 2)の熱膨張係数は一般的な値を採用する。応力解析に使用する温度データは FEM による温度解析結果を使用するが、温度データは計測温度に合わせた温度、すなわち図 - 4 に示した計測温度に近似させた温度を使用している。ただし、膨張材なしの終局断熱温度上昇量は、文献 2)から膨張材ありの場合より 10%減じている。圧縮強度、引張強度、ヤング係数の力学的特性は実測値に基づいた近似式を採用し、式中の材齢は有効材齢を用いる。ヤング係数の補正係数は、コンクリート標準示方書³⁾に従う。応力解析条件を表 - 3, 4 に示す。

表 - 3 応力解析条件 (熱膨張係数)

	温度上昇時	温度降下時
低熱ポルト + 膨張材 (ケース 1)	$15 \times 10^{-6}/$	$9 \times 10^{-6}/$
低熱ポルト (ケース 2)	$10 \times 10^{-6}/$	

表 - 4 応力解析条件 (力学的特性)

圧縮強度(N/mm ²)	$f'_c(t) = \frac{t}{0.443 + 0.0203t}$	
引張強度(N/mm ²)	$f_t(t) = 0.111 f'_c(t)$	
ヤング係数(N/mm ²)	$E_c(t) = 0.965 f'_c(t)^{0.328}$	
ヤング係数の補正係数	0 ~ 3 日	0.73
	3 ~ 5 日	直線補間
	5 日以降	1.0
ポアソン比	0.2	

4.2 解析モデル

温度解析は 2 次元 FEM による非定常熱伝導解析コードを、応力解析は 2 次元 FEM による平面応力解析コードを使用する。計測を実施した側壁部は一方の隣接ブロックが既設ブロックとなっているが、解析は既設ブロックを省略した壁単体としてモデル化する。FEM 解析モデルを図 - 7 に示す。

4.3 解析結果

温度応力解析結果および有効応力の計測結果を比較したものを図 - 8 に示す。「低熱ポルトランドセメント + 膨張材」(ケース 1)と「低熱ポルトランドセメント」(ケース 2)の発生応力を比較すると、「低熱ポルトランドセメント + 膨張材」のほうが温度上昇時の熱膨張係数が大きい分圧縮応力が大きく、温度降下時の熱膨張係数が小さい分発生する引張応力は小さくなり、引張応力は約 1N/mm^2 低減する。引張応力が約 1N/mm^2 低下すれば温度ひび割れ制御効果は大きいと言えるが、この結果は解析に使用した解析条件が全て正しい場合で、実構造物では種々の不確定要因が存在するため解析結果は実測値と合わない場合が多い。これは図 - 8 から明ら

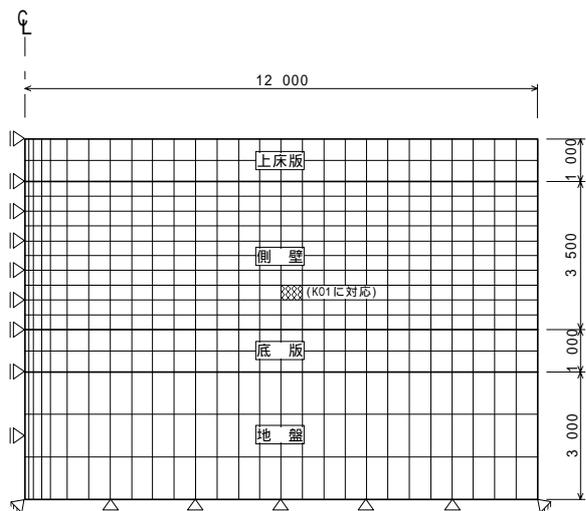


図 - 7 応力解析モデル

かなように、温度上昇時の圧縮応力変化量の解析値は実測値の倍以上もあり、また温度降下時の引張応力変化量の解析値は実測値よりも約 1N/mm^2 も大きく、解析結果は実測値をよく表現できていない。すなわち、膨張材の膨張効果を単に無応力計から計測された熱膨張係数のみで表現すれば膨張材による温度ひび割れ抑制効果は高いと言える。しかし、実際には不確定要因があるため、膨張効果による熱膨張率分だけの膨張効果は得られていないと言える。そのため、クリープ等の不確定要因の影響と熱膨張係数の関係を適切に設定する必要があることを示唆している。

5. まとめ

側壁部の温度ひび割れ対策として低熱ポルトランドセメントと膨張材を併用したコンクリートを使用した。この効果を確認するため実構造物での現場計測および解析的検討を行った。現場計測および解析的検討から得られた結果を以下に記す。

- 1) 低熱ポルトランドセメントと膨張材を併用したコンクリートの熱膨張係数は、温度上昇時で 2 段階、温度降下時で 1 段階、計 3 段階に分けられる。温度上昇時の熱膨張係数はコンクリート打込み直後が $32 \sim 33 \times 10^{-6}/$ 、その後最高温度に達するまでが

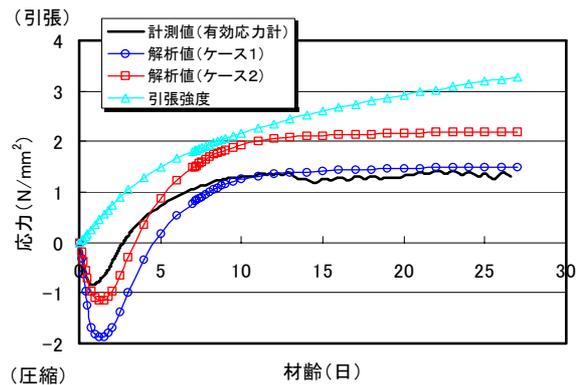


図 - 8 応力比較

$15 \sim 17 \times 10^{-6}/$ 、温度降下時は約 $9 \times 10^{-6}/$ であった。

- 2) 拘束ひずみの平面的な分布を本計測で確認することができた。
- 3) 1) の熱膨張係数の実測値を用いた応力解析結果と有効応力計で計測した有効応力を比較した結果、良い一致はみられない。膨張材を使用したコンクリートの熱膨張係数の設定に関しては、今後より深い研究、考察が必要である。また、有効ヤング係数に関しても不明な点が多いため、同様なことが言える。
- 4) 誘発目地以外にひび割れが発生していないことから、低熱ポルトランドセメントと膨張材を併用した温度ひび割れ対策は効果があることを示唆している。

参考文献

- 1) 藤田正樹ほか：大規模高度浄水施設における総量 20万 m^3 の低発熱型高流動コンクリートの適用, 土木学会論文集, No.592/-39, pp.147-154, 1998.5
- 2) 中村時雄, 斉藤文男, 湯室和夫, 佐野隆行: 高ビークライト系低発熱セメントと水和熱抑制型膨張材を併用した高度浄水処理施設の側壁部マスコンクリート対策, コンクリート工学, Vol.36, No.9, pp.28-34, 1998.9
- 3) コンクリート標準示方書 [平成 11 年版] 施工編, 土木学会, pp.24-36, 2000.1