

# 論文 膨張材によるマスコンクリートの収縮低減効果の解析手法と構造物適用

東 邦和<sup>\*1</sup>・中村 敏晴<sup>\*2</sup>・増井 仁<sup>\*3</sup>・梅原 秀哲<sup>\*4</sup>

**要旨:** 膨張コンクリートの解析手法として, 3次元 FEM 解析モデルに膨張ひずみを与えて要素応力に応じて低減する手法の適用性を検討した。基準となる無拘束膨張ひずみの大きさと膨張速度を養生温度を変えた実験により検討した。次に拘束膨張試験の温度履歴高低の拘束鋼管ひずみとコンクリートひずみ計による膨張ひずみを測定し, 拘束試験体モデルの低減式と膨張ひずみの値を設定した解析結果の比較から, 解析に与える膨張ひずみの大きさを提案した。またスラブ構造物のひずみと応力の計測結果と解析値を比較して解析精度を検討し, 膨張材の収縮低減効果を解析できることを示した。

**キーワード:** マスコンクリート, 温度応力, 膨張材, 膨張ひずみ, ひび割れ

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物のひび割れ低減対策として, 膨張コンクリートをマッシュな構造物に適用する場合には, 効果の大きさを適切に評価することが必要である。膨張材の効果の評価方法が研究されているが<sup>1,2)</sup>, 定量的な評価方法で大型の構造物に適用できる手法は確立されていない。本研究は膨張コンクリートの応力履歴を解析して収縮低減効果を検討することを目的としている。温度履歴を与えた拘束膨張試験を行い, FEM 解析に初期の有効ヤング係数補正係数と膨張ひずみを与え, 要素応力により低減する方法を提案している<sup>2)</sup>。

本論文では解析モデルに上記の方法を適用する場合に基本となる無拘束膨張ひずみを, 打設温度および養生温度を変えて測定し, その大きさを検討した。また, 拘束膨張試験の温度履歴高および低の結果から, 拘束度に応じた膨張量を比較し, 拘束度により膨張ひずみを低減する手法に適合する無拘束膨張ひずみと低減率パラメータの大きさを検討した。またマッシュなスラブ構造物に適用して, 計測結果と比較してその精度を検討したものである。

## 2. 膨張ひずみの測定

### 2.1 試験方法

膨張ひずみの大きさと膨張の速さを検証するために, 3種類の膨張ひずみ測定試験を行った。JIS 拘束膨張試験と無拘束膨張試験と拘束膨張試験である。無拘束膨張試験は温度条件を 20℃, 40℃, 60℃に設定した養生室における試験を行い, コンクリート打設および養生温度の影響を調べた。無拘束試験装置の形状を図-1に示す。また温度履歴条件を高(ピーク温度 55℃), 低(ピーク温度 35℃)とした拘束膨張試験を行った。拘束試験体を図-2に示す。拘束鋼管には温度変化に起因するひずみは発生せず, コンクリートの長さ変化の拘束から生じるひずみを測定できるものである。試験体中にひずみ計を埋設し, 拘束方向および 45° 方向, 直角方向のコンクリートひずみを測定した<sup>2)</sup>。

コンクリートの使用材料を表-1に示す。コンクリートの配合を表-2に示す。セメントは普通ポルトランド

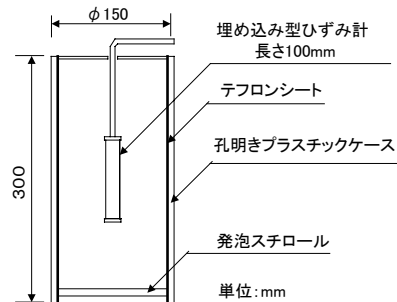


表-1 使用材料

図-1 無拘束膨張試験装置

使用材料	
セメント	普通ポルトランドセメント, 密度:3.16g/cm <sup>3</sup>
細骨材	富津産山砂, 表乾密度:2.62 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率:1.04%
粗骨材	岩瀬産碎石, Gmax20mm, 表乾密度 2.66 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率:0.59%
AE 減水剤	リグニンスルホン酸化合物標準形
膨張材	主成分 カルシウムサルフォアルミネート 低添加型

\*1 (株)奥村組 技術研究所 材料・LCE グループ 博 (工) (正会員)

\*2 (株)奥村組 技術研究所 材料・LCE グループ

\*3 (株)奥村組 技術研究所 企画管理グループ

\*4 名古屋工業大学教授 大学院工学研究科都市循環システム工学専攻 Ph.D. (正会員)

表-2 コンクリートの配合

配合名	水結合材比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					AE 減水剤 (kg/m <sup>3</sup> )
			水 W	セメント C	膨張材 E	細骨材 S	粗骨材 G	
膨張 (NE)	55	43.8	166	282	20	796	1036	0.981

セメントを、膨張材はカルシウムサルフォアルミネートを主成分とするものを使用した。

2.2 ひずみ測定結果

(1) JIS 拘束膨張試験

打設温度 20℃、養生温度 20℃一定の JIS 拘束膨張試験 (JIS A 6202) のひずみ計測結果を図-3 に示す。JIS 拘束膨張試験の内の共通試験は参考文献<sup>3)</sup>による。JIS 拘束膨張試験の膨張ひずみピークの大きさは  $200 \times 10^{-6}$  程度であり、ピークの発現時期は材齢 2 日から 7 日以降にかけてである。

(2) 温度一定無拘束試験

打設温度 20℃、養生温度 20℃一定の無拘束膨張試験のひずみ測定結果を図-4 に示す。無拘束膨張ひずみは材齢 1.07 日で  $380 \times 10^{-6}$  および  $401 \times 10^{-6}$  が得られた。無拘束の場合には膨張ひずみの発現が拘束試験体より早期に発生する<sup>4)</sup>。

打設温度 40℃、養生温度 40℃一定での無拘束膨張試験のひずみ測定結果を図-5 に示す。ひずみのピークは材齢 0.71 日で  $526 \times 10^{-6}$  および  $543 \times 10^{-6}$  が得られた。

打設温度を 40℃とし、ただちに 60℃の養生槽に搬入して養生温度 60℃一定で測定した温度測定結果を図-6 に示す。60℃養生試験体は温度変化による温度ひずみを含んでいるので、温度補正を行った。線膨張係数を  $10.1 \times 10^{-6}/\text{℃}$  として温度ひずみを除いた膨張ひずみを図-7 に示す<sup>5)</sup>。ひずみのピークは材齢 0.70 日で  $725 \times 10^{-6}$  および  $730 \times 10^{-6}$  が得られた。

膨張材による膨張ひずみの大きさは養生温度により異なり、温度が高くなれば大きくなり、20℃で  $400 \times 10^{-6}$ 、40℃で  $500 \times 10^{-6}$ 、60℃で  $730 \times 10^{-6}$  程度である。ひずみの発現勾配であるひずみ速度の計算結果を図-8 に示す。膨張ひずみの発現速度は温度が高くなれば早くなるが、

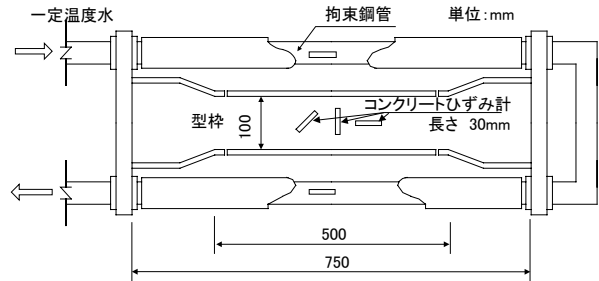


図-2 拘束試験装置

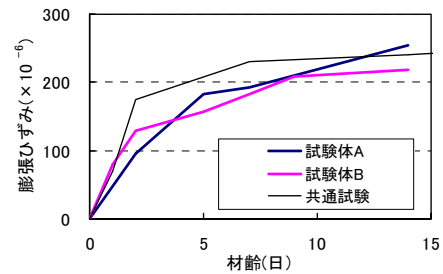


図-3 JIS 拘束膨張試験結果 (養生温度 20℃一定)

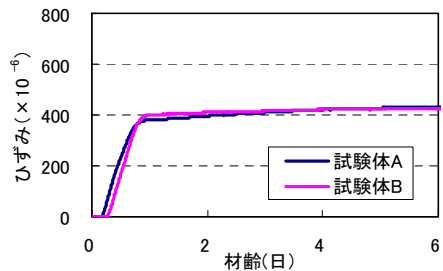


図-4 ひずみ測定結果 (養生温度 20℃一定)

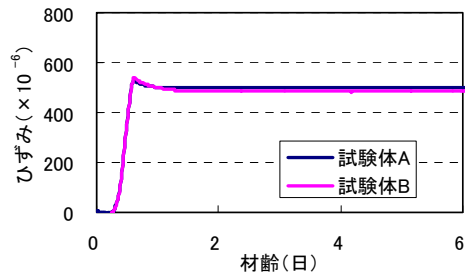


図-5 ひずみ測定結果 (養生温度 40℃一定)

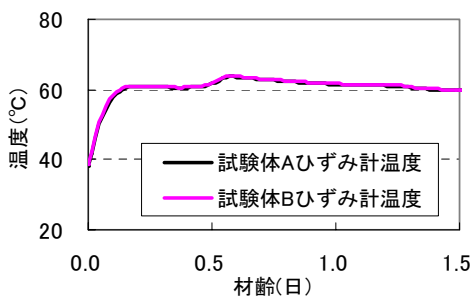


図-6 温度測定結果 (養生温度 60℃)

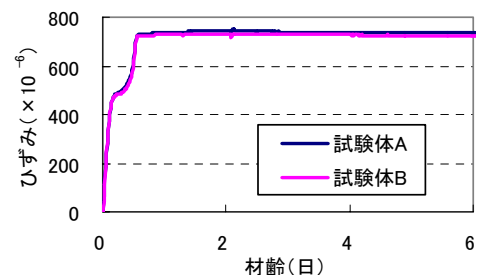


図-7 膨張ひずみ測定結果 (打設温度 40℃、養生温度 60℃一定、温度補正後)

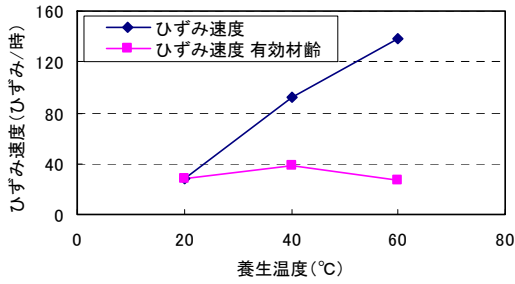


図-8 ひずみの発現速度（養生温度 20,40,60°C）

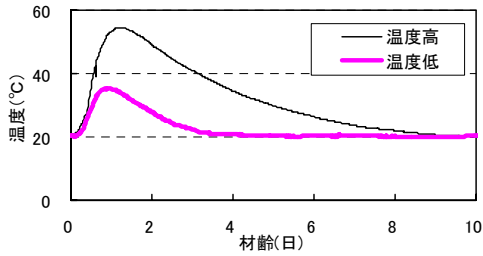


図-9 コンクリート温度履歴（温度ピーク 55°C高、35°C低）

有効材齢<sup>7)</sup>で比較すれば 20°C養生、40°C養生および 60°C養生は大きくは変わらない結果が得られた。有効材齢は式(1)で補正した値を用いた。

$$t = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp \left[ 13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i) / T_0} \right] \quad (1)$$

ここに、 $t$ ：有効材齢（日）、 $\Delta t_i$ ：温度が  $T$ （°C）である期間の日数、 $T_0$ ：1°C

### (3) 温度履歴拘束試験

拘束試験装置諸元を表-3に示す。試験体に与えた温度履歴を図-9に示す。温度履歴は打設温度 20°Cでピーク温度 55°Cと 35°Cを与えている。温度履歴の経時変化は、マスコンクリート中の発熱を模擬している。

拘束試験体の温度一定に保った拘束鋼管から測定した拘束方向コンクリートひずみの温度高低の結果を拘束大を図-10、拘束中を図-11、拘束小を図-12に示す。拘束大温度高はひずみピーク材齢 1.13 日、 $19.2 \times 10^{-6}$ 、温度低はピーク材齢 0.79 日、 $10.5 \times 10^{-6}$ 、拘束中温度高はピーク材齢 1.21 日、 $22.8 \times 10^{-6}$ 、温度低はピーク材齢 0.97 日、 $11.7 \times 10^{-6}$ 、拘束小温度高はピーク材齢 1.19 日、 $44.4 \times 10^{-6}$ 、温度低はピーク材齢 0.99 日、 $24.8 \times 10^{-6}$ である。拘束大と拘束中ではひずみの値は大きくは変わっていないが、全体として拘束が大きくなれば膨張ひずみの大きさは小さくなる。温度の高低によるピークひずみの違いをピークひずみの高低の比で見ると拘束大から拘束小で 1.8~2.0 倍であり拘束による大きな違いはない。温度ピークを過ぎるとひずみはなだらかに低下しており、い

表-3 拘束試験装置の諸元

拘束	拘束鋼管（各 4 本）	コンクリート断面積
大*1	外径 42.7mm 内径 26.7mm 合計断面積 3488mm <sup>2</sup>	10,000mm <sup>2</sup>
中*2	外径 42.7mm 内径 32.9mm 合計断面積 2328mm <sup>2</sup>	
小*3	外径 42.7mm 内径 39.4mm 合計断面積 851mm <sup>2</sup>	

\*1 拘束度 0.78 (各々ヤング係数比 10 の場合)

\*2 拘束度 0.70

\*3 拘束度 0.46 JIS 原案準拠

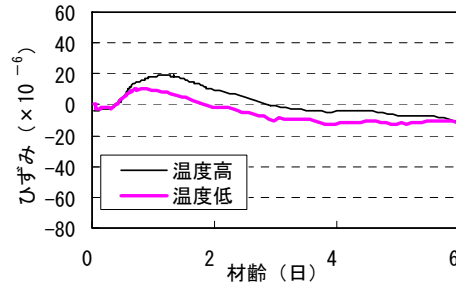


図-10 拘束鋼管ひずみ測定結果（拘束大、温度高および低）

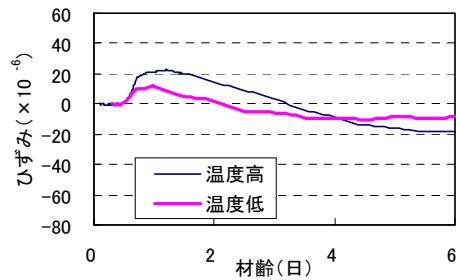


図-11 拘束鋼管ひずみ測定結果（拘束中、温度高および低）

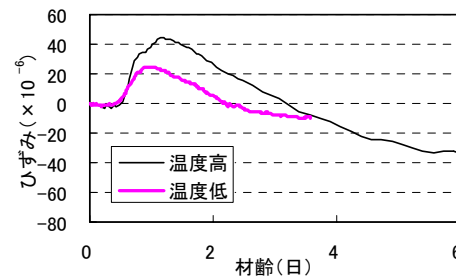


図-12 拘束鋼管ひずみ測定結果（拘束小、温度高および低）

れの場合も膨張材の温度降下時の収縮ひずみを緩やかにする効果が現れている<sup>5)</sup>。

拘束試験体に埋め込んだコンクリートひずみ計による温度膨張を含んだコンクリートひずみを図-13に示す。拘束直角方向のひずみは無拘束膨張試験で得られた値と近い約  $900 \times 10^{-6}$  の値が得られた。拘束方向のコンクリ

トひずみ計の値は温度高では  $83 \times 10^{-6}$  と拘束鋼管の  $44 \times 10^{-6}$  より大きい値である。温度低では  $26 \times 10^{-6}$  と拘束鋼管の  $25 \times 10^{-6}$  とほぼ等しい値である。無拘束方向のみが急激に膨張することが無いことから、膨張ひずみは温度上昇に従って緩やかに発現しているといえる。

ピーク温度の違いによる発現ひずみに対する影響は、温度ひずみの占める割合が大きく、膨張ひずみの大きさには拘束の影響が大きいといえる。本検討ではマスコンクリートの温度解析では、温度ひずみを除いて  $700 \times 10^{-6}$  程度の無拘束膨張ひずみを考慮することがよいと考えられた<sup>2)</sup>。また、膨張ひずみ発現の温度ピークの大きさによる違いは、ピーク温度の大きさと有効材齢に応じた膨張ひずみ発現曲線を与えることが考えられる。

### 2.3 膨張ひずみの大きさと発生応力の検討

実験により得られた膨張ひずみを用いて解析モデルによる検討を行う。解析モデルを図-14に、膨張ひずみの拘束圧による低減を図-15に示す。また、解析に用いた自社プログラムは、JCI マスコン委員会の検定解析への適合を確認している。

解析におけるコンクリートの圧縮強度と材齢の関係および有効ヤング係数  $E_c$  は、標準示方書<sup>7)</sup>に準拠した。有効ヤング係数補正係数  $\phi$  は表-4に示す値を用いた。双曲線式を用いて、時間軸における膨張ひずみの増分をそれぞれの方向の要素圧縮応力 ( $\sigma_i$ ) に従って低減して計算する<sup>2)</sup>。本解析の材齢は有効材齢を用いていない。

双曲線式を式(2)に示す。

$$\varepsilon_{ci} = (\varepsilon_0 - \varepsilon_f) / (1 + a\sigma_i) + \varepsilon_f \quad (2)$$

- ここに、 $\varepsilon_{ci}$  :  $i$  方向の膨張ひずみ
- $\varepsilon_0$  : 無拘束膨張試験の膨張ひずみ
- $\varepsilon_f$  : 拘束無限大の膨張ひずみ
- $a$  : 拘束圧依存パラメータ
- $\sigma_i$  :  $i$  方向の拘束圧 ( $\text{N/mm}^2$ )

ここでは双曲線パラメータ  $\varepsilon_f / \varepsilon_0 = 0.05$  で一定とし、 $a = 5$  のケースを解析した。膨張ひずみを拘束しないと考えられる引張応力側に移行した時のひずみ増分は低減していない。

膨張試験から得られた無拘束膨張ひずみのピークひずみの大きさを  $\varepsilon_0 = 700 \times 10^{-6}$  としたものをを用いて解析した。最小ひずみ  $\varepsilon_f$  の大きさは  $3.5 \times 10^{-6}$  である。本解析では有効材齢を用いる代わりに、材齢による膨張ひずみ発現の速さを温度ピーク  $55^\circ\text{C}$  を考慮して  $20^\circ\text{C}$  の JIS 拘束膨張試験の値より早期にして、材齢 2.1 日で  $633 \times 10^{-6}$ 、8.4 日で  $700 \times 10^{-6}$  に設定した。

解析に用いた膨張ひずみを図-16に示す。解析ケースを表-4に示す。ひずみの解析結果を図-17に示す。

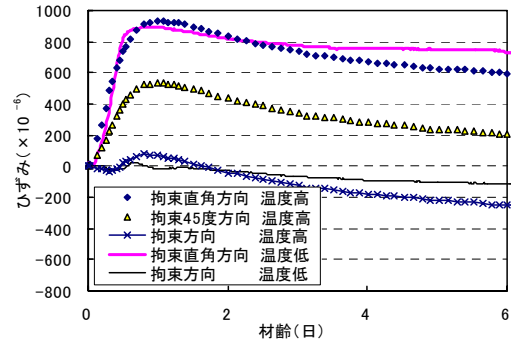


図-13 コンクリートひずみ計測定結果 (拘束小, 温度高および低)

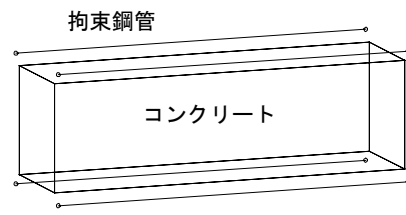


図-14 解析モデル (3次元)

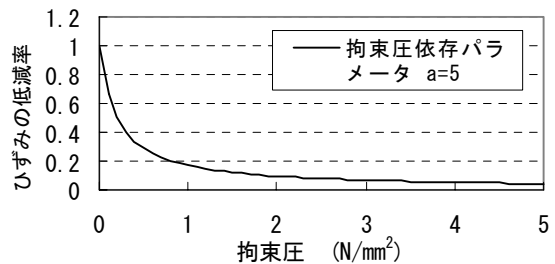


図-15 膨張ひずみの拘束圧による低減率

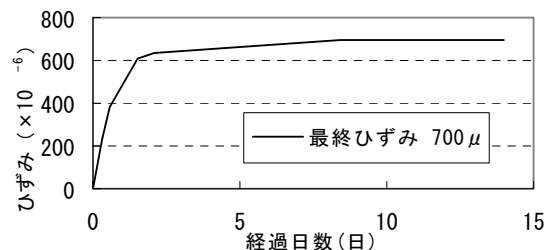


図-16 解析に用いた膨張ひずみ

表-4 解析ケース

ケース	モデル	解析条件
1	拘束小 温度高	温度履歴と膨張ひずみを与える $\phi = 0.34$ (材齢 1.2 日まで) *
2	拘束小 温度低	温度履歴と膨張ひずみを与える $\phi = 0.34$ (材齢 1.0 日まで) *

\*材齢 5 日  $\phi = 1.0$  とし直線補間

温度高のひずみピーク値は拘束方向で  $74 \times 10^{-6}$  (材齢 1.5 日)、拘束直角方向で  $1056 \times 10^{-6}$  (材齢 1.5 日) の結果となった。温度低のひずみピーク値は拘束方向で  $39 \times 10^{-6}$

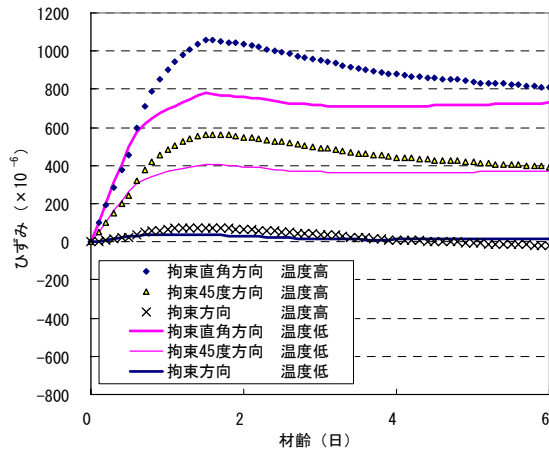


図-17 コンクリートひずみ解析結果（拘束小，温度高および低）

（材齢 1.0 日），拘束直角方向で  $779 \times 10^{-6}$ （材齢 1.5 日）の結果となった。

本解析では各軸方向の要素圧縮力によって解析ステップにおける膨張ひずみを低減していることから，解析結果では，拘束方向のひずみの値が良好に低減されている。拘束直角方向のひずみは，無拘束ひずみの値を  $700 \times 10^{-6}$  としていることからひずみの値は膨張ひずみと温度ひずみを加えた値になる。

### 3. スラブコンクリートへの適用と解析精度の検討

#### 3.1 概要

構造物のスラブ（厚さ 1.2m）に膨張コンクリートを適用した。使用材料を表-5 に示す。配合は水結合材比 54%，単位水量  $161 \text{ kg/m}^3$ ，単位セメント量  $279 \text{ kg/m}^3$  である。

計測器の設置位置を図-18（図-19 参照）に示す。構造物は両サイドに深礎土留めを持つ逆巻き施工であり，上床スラブは底面に型枠パネルを敷いているので，厚さ方向の拘束はほとんどない。中心部ピーク温度は  $68.4^\circ\text{C}$  である<sup>6)</sup>。

#### 3.2 解析モデル

解析モデルを図-19 に示す。1/4 モデルである。道路軸直角方向には深礎杭があり，これを地盤のバネで現している。解析における補正係数（ $\phi$ ）は材齢 3 日まで 0.34，材齢 5 日以降 1.0 とし，その間を線形補間した。解析条件を表-6 に示す。圧縮強度，ヤング係数と材齢の関係は示方書に準拠した<sup>7)</sup>。膨張ひずみ低減に用いた双曲線パラメータは  $\epsilon_f / \epsilon_0 = 0.05$ ， $a = 5$  である。解析モデルでは誘発目地は考慮していない。

#### 3.3 計測結果と解析結果の比較

##### (1) 計測結果

コンクリートひずみの計測値と解析値を図-20 に，応力の計測値と解析値を図-21 に示す。図-20 に示すひ

表-5 使用材料

使用材料	
セメント	高炉セメント B 種 密度 $3.04 \text{ g/cm}^3$
細骨材	千葉県君津市久留里大谷産山砂 表乾密度 $2.62 \text{ g/cm}^3$
粗骨材	大分県津久見，砕石 表乾密度 $2.70 \text{ g/cm}^3$ Gmax20mm
混和剤	AE 減水剤標準形，流動化剤
混和材	CSA 系膨張材（低添加遅延型） $20 \text{ kg/m}^3$

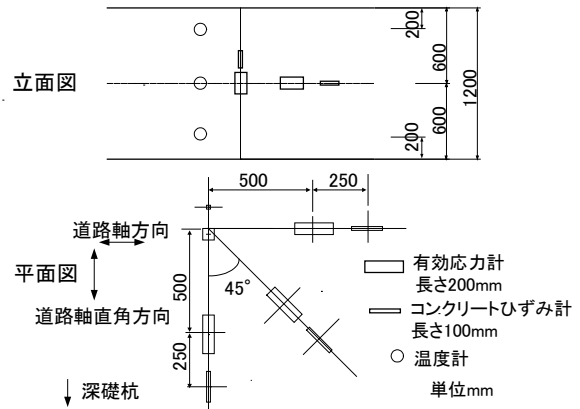


図-18 計測断面の計器設置位置

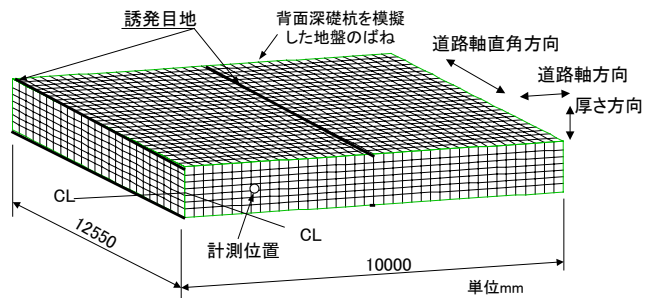


図-19 解析モデル（1/4 モデル）

表-6 解析条件

項目	設定定数	
スラブ部	セメント種類	高炉 B 種 断熱温度上昇特性 $Q_\infty 44.7$ ， $\gamma 1.372$ ，打設温度 $30^\circ\text{C}$
	熱物性値	熱伝導率 $2.7 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ ， 比熱 $1.15 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$ ， 単位体積質量 $2300 \text{ kg/m}^3$
	熱伝達率	上面 $14 \text{ W/m}^2\text{C}$ ，下面 $8 \text{ W/m}^2\text{C}$
深礎	圧縮強度 $f'$ (28)	$27 \text{ N/mm}^2$ ， 圧縮強度の定数 $a 6.2$ ， $b 0.93$ ， $c 1.15$
		深礎杭背面のばね定数： $280000 \text{ kN/m}^3$

ずみ計測値では道路軸直角方向のひずみが一番小さく，これは両側の深礎杭の拘束が大ききことによる。厚さ方向のひずみは  $1131 \times 10^{-6}$  と無拘束の膨張ひずみの大きさである。図-21 に示す応力の最大値は圧縮では道路軸直角方向で  $-0.95 \text{ N/mm}^2$ ，道路軸方向で  $-0.37 \text{ N/mm}^2$  であり，



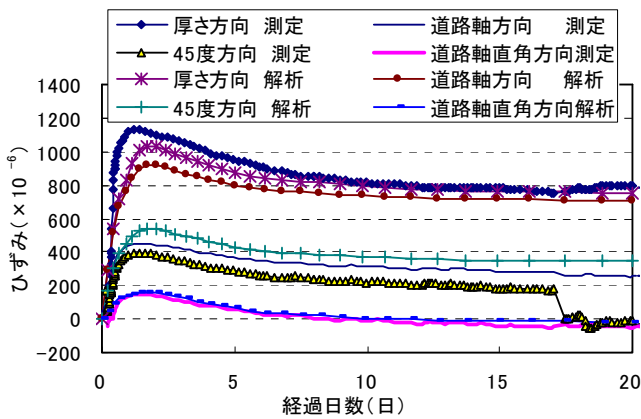


図-20 ひずみの計測値と解析値

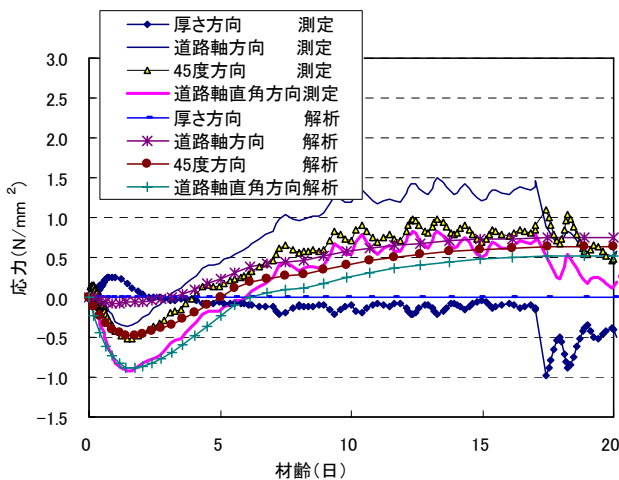


図-21 コンクリート応力の計測値と解析値

45° 方向は中間値を示した。引張では道路軸直角方向で  $0.83\text{N/mm}^2$ 、道路軸方向で  $1.50\text{N/mm}^2$  であり、45° 方向は中間値を示した。材齢 17 日で道路軸直角の 3 箇所の誘発目地が働いてひずみと応力が変化している。

#### (2) 解析結果

温度の解析は中心部ピークで  $66.8^\circ\text{C}$  となり測定値より  $1.6^\circ\text{C}$  低い結果であった。図-20 に示すひずみの解析値のピークは拘束のほとんどないと考えられる厚さ方向では  $1029 \times 10^{-6}$  であり、計測値と整合した値を示した。拘束の大きい道路軸直角方向でも  $160 \times 10^{-6}$  であり、計測値  $153 \times 10^{-6}$  と整合している。拘束の小さい道路軸方向では  $918 \times 10^{-6}$  となり、計測値  $452 \times 10^{-6}$  と比べて大きいひずみとなった。この理由は解析モデルに深礎杭のモデル<sup>6)</sup>を設けずに道路軸直角方向地盤ばねで与えており、道路軸方向には地盤ばねを与えていないことによる。図-21 に示す応力解析値の圧縮最大値は、道路軸直角方向で  $-0.89\text{N/mm}^2$  となり計測値と整合している。道路軸方向で  $-0.08\text{N/mm}^2$  と小さくなっているのは前述の理由による。引張側の解析結果も、計測値と比べてわずかに圧縮側にシフトしているが、比較的よい精度を示している。全体

に良好な解析結果が得られた。3次元 FEM 解析モデルによって、各要素応力軸にそれぞれ双曲線パラメータによる膨張ひずみの低減を与えることによって、各要素軸方向のひずみと応力を解析できると考えられる。本構造物では拘束に応じて膨張材による圧縮応力が発生し、ひび割れ低減効果が得られた。

#### 4. まとめ

本研究の範囲内で次の結果が得られた。

- (1) 無拘束膨張試験の膨張のピーク値は、養生温度が高いほど大きく、かつ膨張速度は大きい。膨張速度は養生温度の有効材齢で評価できる可能性がある。また、膨張は拘束膨張試験より早期に生じる。
- (2) 温度履歴高低を与えた拘束膨張試験の結果から、拘束の大きさが変わっても高低による拘束方向ひずみの大きさの比は変わらない。
- (3) 拘束膨張試験におけるコンクリートひずみ計の拘束直角方向の値から、温度履歴高の解析に用いる無拘束膨張ひずみの値として、 $700 \times 10^{-6}$  の値が適していると考えられる。
- (4) 膨張ひずみを各軸方向の応力(圧縮力)により低減して、応力履歴を計算する手法をスラブ構造物に適用した結果、測定結果と解析結果の傾向は一致しており、膨張材の収縮低減効果を解析できることを示した。

#### 参考文献

- 1) 三谷裕二ほか：マス養生温度履歴下における膨張コンクリートの応力評価手法、コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1295-1300, 2006.7
- 2) 東 邦和, 中村敏晴, 増井 仁, 梅原秀哲：膨張材によるマスコンクリートの収縮低減効果の解析手法と構造物適用の検討、コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.2, pp.163-168, 2007.7
- 3) (社) 土木学会：コンクリートライブラリ 75, 膨張コンクリート設計施工指針, p.85, pp.135-137, 1993
- 4) 鶴田昌宏ほか：種々の温度下で養生した膨張コンクリートの膨張特性、土木学会第 58 回年次学術講演会講演概要集, V, pp.339-340, 2003
- 5) 東 邦和, 中村敏晴, 増井 仁, 梅原秀哲：膨張材を用いたマスコンクリートの収縮低減効果の研究、コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.1073-1042, 2003.7
- 6) 東 邦和, 中村敏晴, 増井 仁, 梅原秀哲：膨張材によるスラブ状マスコンクリートのひび割れ防止効果の検討、土木学会第 61 回年次学術講演会講演概要集, V, pp.475-476, 2006
- 7) コンクリート標準示方書 2002 年制定