

# 論文 高炉セメントを用いた膨張コンクリートのマス養生温度履歴下における応力評価

三谷 裕二<sup>\*1</sup>・谷村 充<sup>\*2</sup>・松本 健一<sup>\*3</sup>・佐竹 紳也<sup>\*4</sup>

**要旨：**高炉セメント B 種を用いた膨張コンクリートを対象に，種々の温度下において PC 鋼材およびインバー鋼材を用いた一軸拘束試験を行い，実験結果に基づく鋼材ひずみと拘束鋼材比の関係より応力解析に用いるための見かけの膨張ひずみ・ヤング係数を算出し，各々の温度依存性を考慮した材料特性モデルを構築した。また，このモデルを考慮した応力評価法により，マス養生温度履歴を受ける膨張コンクリートの応力発生挙動を概ね推定できる可能性を確認した。

**キーワード：**高炉セメント B 種，マスコンクリート，膨張コンクリート，拘束応力，評価法

## 1. はじめに

近年，既存の解析技術を利用し，膨張材の温度ひび割れ低減効果を定量的に評価する研究が増えている。しかし現状では，様々な手法が提案されている段階であり，評価手法の一般化を図る上では，解析精度の向上や適用範囲の拡張が課題であると考えられる。

このような中，筆者らは，膨張コンクリートの材料特性が温度に依存することに着目し，これをモデル化することにより解析精度の向上を試みてきた<sup>1)</sup>。同検討では，拘束膨張・収縮ひずみと拘束鋼材比の関係より，見かけの膨張ひずみ・ヤング係数（クリープの影響を含む）を定め，各々の温度依存性を考慮できる材料特性モデルを構築し，それらを用いた応力評価法により，マス養生温度履歴下における膨張コンクリートの応力挙動を概ね良く推定できることを示した。しかしながら，提示した材料特性モデルの対象は普通セメントを用いた膨張コンクリートに限られており，同手法の適用範囲を拡張する上では，セメント種類が異なる場合の適用性を検証することが必要である。

そこで本研究では，高炉セメントを用いた膨張コンクリートについて，種々の温度下における PC 鋼材およびインバー鋼材を用いた一軸

拘束試験を行い，拘束膨張・収縮特性の温度依存性を実験的に把握し，過去に提示した手法を用いて応力解析用の材料特性モデルを構築した。また，そのモデルを用いた応力評価法の適用性について検討を加えた。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料および配（調）合

表-1 に使用材料，表-2 にコンクリートの配（調）合を示す。単位水量は  $175\text{kg/m}^3$ ，水/(セメント+高炉スラグ+膨張材)比は 55% とした。高炉スラグ微粉末の置換率は，高炉セメント B 種に相当する 42% とし，低添加型膨張材を収縮補償用程度の  $20\text{kg/m}^3$  混和した。また，目標スランプおよび空気量は  $15 \pm 2.5\text{cm}$ ， $4.5 \pm 1.5\%$  とした。

### 2.2 作製供試体および測定方法

図-1 に PC 鋼材を用いた拘束供試体の形状，寸法を示す。拘束鋼材比は 0.2, 0.5, 1.0, 1.5 および 4.0% の 5 水準とし，鋼材の中央区間（40mm）が所定の拘束鋼材比になるように円断面に切削加工した。

図-2 にインバー鋼材を用いた拘束供試体の形状，寸法を示す。インバー鋼材は線膨張係数が一般の鋼材のおよそ  $1/20$  ( $0.5 \times 10^{-6}/\text{C}$ ) で

\*1 日本ヒューム(株) 技術研究所 工修 (正会員)  
 \*2 太平洋セメント(株) 中央研究所 博士 (工学) (正会員)  
 \*3 太平洋セメント(株) 中央研究所 工修 (正会員)  
 \*4 太平洋マテリアル(株) 開発研究所 工修 (正会員)

あるため、膨張材による膨張ひずみと温度ひずみの双方の影響を受ける状態での拘束膨張・収縮ひずみを測定することができる。拘束鋼材比は 0.7, 1.7, 5.7% の 3 水準とし、比較用として膨張材無混和のコンクリート (W/P=55%, P=C+BF=318kg/m<sup>3</sup>, BF=P×42%) を用いた供試体も作製した。

各拘束供試体の鋼材ひずみは、拘束鋼材中央部の対称面 (ねじ切削部) に貼付した自己温度補償型ひずみゲージを用いて測定した。

### 2.3 養生方法

PC 鋼材を用いた拘束供試体の養生温度は一定温度 20, 40, 60℃ の 3 水準とした。

一方、インバー鋼材を用いた拘束供試体は、マスコンクリート部材内部を想定した温度履歴下で養生した。設定した温度履歴は JCI マスコンクリート委員会報告書<sup>2)</sup> に示されている壁状構造体 (高さ 2000mm, 壁厚 1800mm) の 2 次元 FEM 温度解析より求めた断面中央の中層 (高さ 1000mm) 位置における温度履歴とした。なお、解析に用いる断熱温度上昇特性は、JCI マスコンクリートのひび割れ制御に関する研究委員会報告書<sup>3)</sup> の推奨式とした。

コンクリートの練混ぜは全て 20℃, R.H.80% の試験室内で行い、打込みからブリーディングがある程度終了するまで約 20℃ の室内に静置した後、仕上げ面にポリエステルフィルムを被せ、その上から湿布した状態で所定の一定温度・温度履歴で制御した恒温槽内に投入した。

材齢 1 日で脱型し、供試体全面をアルミ箔粘着テープでシールした後は同条件で封緘養生を行った。

## 3. 実験結果

### 3.1 膨張特性

図-3 に PC 鋼材の拘束試験による膨張ひ

ずみと拘束鋼材比の関係の経時変化を示す。材齢の起点は注水時点とし、最終値は各温度下で膨張ひずみが最大に達した材齢である。図中には、同一温度下で測定した自由膨張ひずみ (寸

表-1 使用材料

材料	記号	物理的性質など
セメント	C	普通ポルトランドセメント/密度: 3.16g/cm <sup>3</sup> , 比表面積: 3310cm <sup>2</sup> /g
高炉スラグ	BF	高炉スラグ微粉末/密度: 2.90g/cm <sup>3</sup> , 比表面積: 4180cm <sup>2</sup> /g
膨張材	EX	低添加型石灰系膨張材/密度: 3.16g/cm <sup>3</sup> , 比表面積: 3450cm <sup>2</sup> /g
細骨材	S	静岡県河東産陸砂/表乾密度: 2.59g/cm <sup>3</sup> , 吸水率: 1.63%, F.M.: 2.84
粗骨材	G	茨城県岩瀬産砕石/最大寸法: 20mm, 表乾密度: 2.64g/cm <sup>3</sup> , 吸水率: 0.84%, F.M.: 6.61
高性能 AE 減水剤	SP	ポリカルボン酸系/密度: 1.09g/cm <sup>3</sup>

表-2 コンクリートの配(調)合

W/P* (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						
		W	C	BF	EX	S	G	SP
55	47	175	173	125	20	824	945	0.636

\* P=C+BF+EX

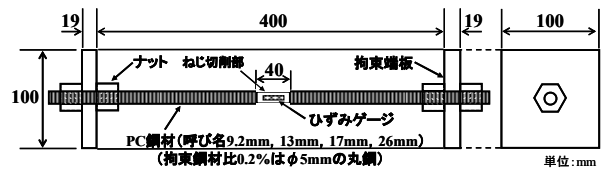


図-1 PC 鋼材を用いた拘束供試体

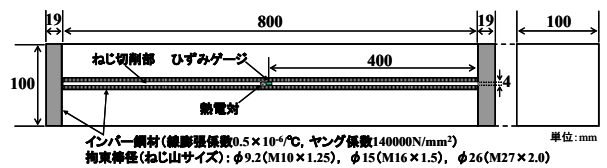


図-2 インバー鋼材を用いた拘束供試体

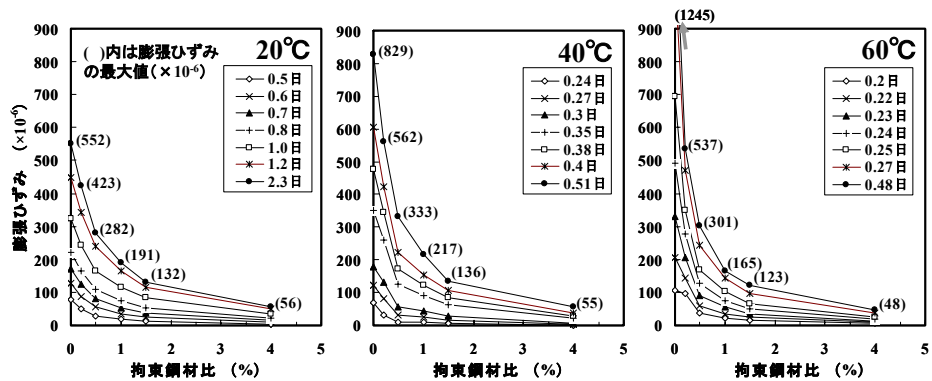


図-3 膨張ひずみと拘束鋼材比の関係

法 100×100×400mm の供試体中心部に設置した低弾性型の埋め込み型ひずみ計を用いて測定し、コンクリートの線膨張係数を  $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  として温度ひずみを差し引いたもの)の結果を併記する。

膨張ひずみと拘束鋼材比は下に緩やかな凸の曲線関係となり、養生温度が高いほど、膨張の発現速度が大きく、早い段階で膨張ひずみが最大値に達している。膨張ひずみの最大値を見ると、拘束膨張ひずみの養生温度による差は、拘束鋼材比 0.2%で約 30%、0.5~4.0%では 10~20%の範囲内であり、拘束鋼材比が大きくなるに従って小さくなった。一方、自由膨張ひずみは、拘束膨張ひずみより相対的に温度の影響が大きく、20℃の場合と比較して 40℃で約 1.5倍、60℃で約 2.3倍となり、温度の上昇に伴って急激に大きくなる傾向を示した。なお、膨張材無混和コンクリートの自由ひずみ（自己収縮ひずみ）の測定は行っていないが、養生温度が高いほど材齢初期の自己収縮が大きくなる傾向にあると考えられ、この点を考慮すると膨張材の水和反応に及ぼす温度の影響が卓越しているものと考えられる。

コンクリート標準示方書<sup>4)</sup>における収縮補償用コンクリートの目安は、JIS A 6202 参考-1 A法の膨張ひずみが  $150 \sim 250 \times 10^{-6}$  の範囲とされている。この試験とほぼ等しい拘束条件である拘束鋼材比 1.0%の結果を比較すると、養生温度が高い場合においても、示方書の基準値を確保できている。

### 3.2 温度履歴下における拘束膨張・収縮特性

図-4に、インバー鋼材を用いた拘束試験による供試体中心部の温度および拘束膨張・収縮ひずみの経時変化を示す。

供試体の温度は、材齢 2.5日付近で最高温度 59.5℃に達した後、約 20℃まで徐々に降温する履歴を示した。

膨張コンクリート (BEx) の膨張ひずみは、膨張材無混和のコンクリート (BB) と比較し

て、拘束鋼材比 0.7, 1.7, 5.7%でそれぞれ約 1.6, 1.6, 1.4倍であった。一方、最高温度到達後の温度降下過程における収縮ひずみは、膨張材の有無に拘わらず、概ね同等の挙動であった。

図-5は BEx と BB の拘束応力の差の経時変化を示している。拘束応力は鋼材とコンクリートの力の釣合いより算出しており、この差は膨張材によってもたらされた温度応力低減効果（以下、膨張応力）とみなすことができる。

膨張応力の最大値は拘束鋼材比 0.7, 1.7, 5.7%に対して、それぞれ約 0.19, 0.33,  $0.52\text{N}/\text{mm}^2$  であり、温度上昇過程で生じた膨張応力は温度降下後においてもほぼ一定に維持されていた。

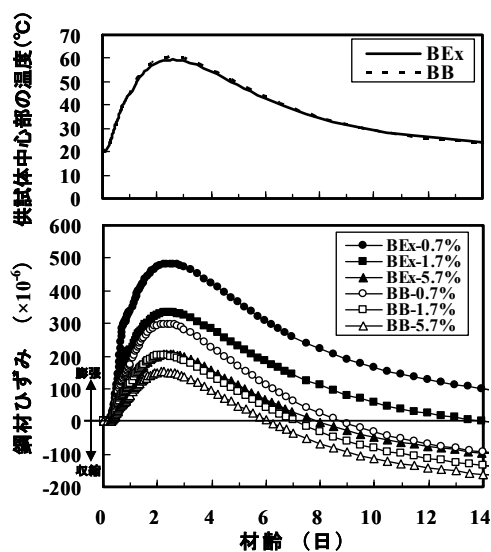


図-4 拘束膨張・収縮ひずみの経時変化

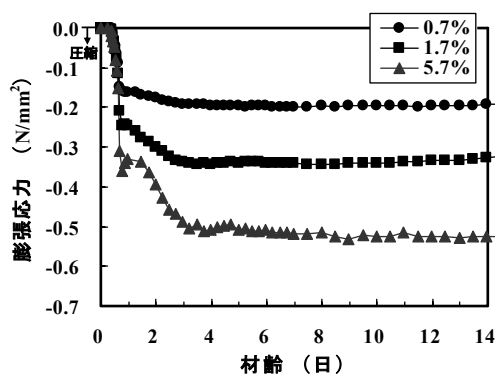


図-5 膨張応力の経時変化

#### 4. 材料特性モデルの検討

以下では、上記の拘束試験結果を基に、過去に筆者らが提示した手法<sup>1)</sup>を適用し、応力解析用の膨張ひずみおよびヤング係数に関する温度依存性を考慮した材料特性モデルを構築する。図-6に両物性値を算定する方法の概要図を示す。すなわち、拘束膨張ひずみと拘束鋼材比の関係（ここでは、拘束鋼材比 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 4.0%における拘束膨張ひずみの実験値）を、コンクリートと鋼材の力の釣合いとひずみの適合条件に基づく(1)式で回帰し、最小二乗法により式中の未知数である見かけの膨張ひずみと見かけヤング係数を定める。ここで、見かけの膨張ひずみは拘束膨張ひずみより推定した拘束鋼材比ゼロにおける膨張ひずみを示し、見かけのヤング係数は時々刻々と変化する応力による弾性ひずみとクリープひずみの影響を含んだヤング係数と見なすことができる。

$$\Delta \varepsilon_s(t_i) = \Delta \varepsilon_{cfa}(t_i) / \{1 + p \cdot E_s / E_{ca}(t_i)\} \quad (1)$$

ここに、 $\varepsilon_s(t_i)$ ：時間ステップ  $t_i$  における鋼材ひずみの変化量、 $\Delta \varepsilon_{cfa}(t_i)$ ：時間ステップ  $t_i$  における見かけの膨張ひずみの変化量、 $E_{ca}(t_i)$ ：時間ステップ  $t_i$  における見かけのヤング係数 ( $N/mm^2$ )、 $E_s$ ：鋼材のヤング係数 ( $N/mm^2$ )、 $p$ ：拘束鋼材比

#### 4.1 見かけの膨張ひずみ

図-7に 20, 40, 60°Cにおける見かけの膨張ひずみと有効材齢の関係を示す。有効材齢は(2)式で表す積算温度方式によるものとした。図中には、両者の関係を(3)式で回帰した結果を併記する。図-8に回帰係数と温度の関係、および両者の関係の回帰式を示す。ただし、回帰係数  $\beta$  については、温度との明確な関係が認められなかったため、温度に拘わらず一定値とした。

以上により、任意の一定温度下における見かけの

膨張ひずみ曲線を定めることができる。

$$t_e = \sum (T_i + 10) \cdot \Delta t_i / 30 \quad (2)$$

ここに、 $\Delta t_i$ ：温度が  $T_i$  である期間 (日)

$$\varepsilon_{cfa}(t_e) = \varepsilon_{cfa\infty} [1 - \exp\{-\alpha(t_e - t_{e0})^\beta\}] \quad (3)$$

ここに、 $\varepsilon_{cfa}(t_e)$ ：見かけの膨張ひずみ ( $\times 10^{-6}$ )、 $\varepsilon_{cfa\infty}$ ：見かけの膨張ひずみの終局値 ( $\times 10^{-6}$ )、 $\alpha$ 、 $\beta$ ：見かけの膨張ひずみの進行速度を表す係数、 $t_e$ ：有効材齢 (日)、 $t_{e0}$ ：凝結始発時点の有効材齢 (実験結果より 0.2 日)

#### 4.2 見かけのヤング係数

図-9に、PC 鋼材の拘束試験による膨張ひ

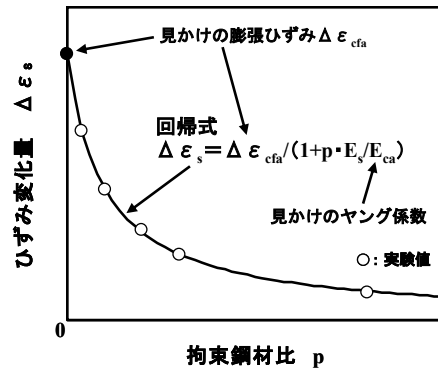


図-6 膨張ひずみと拘束鋼材比の関係

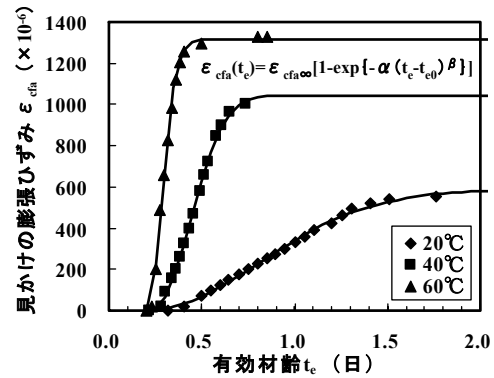


図-7 見かけの膨張ひずみと有効材齢の関係

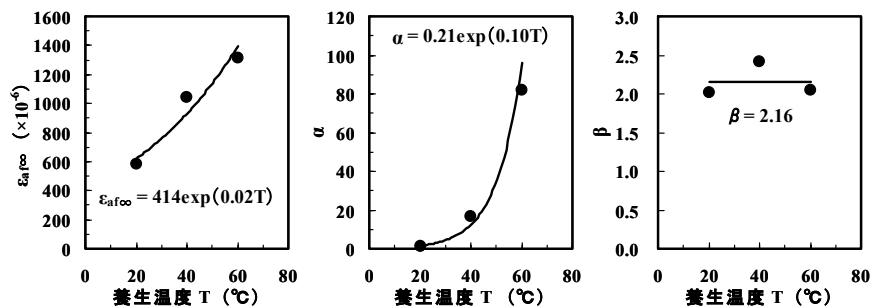


図-8 回帰係数と養生温度の関係

ずみがほぼ最大に達するまでの見かけのヤング係数と有効材齢の関係を温度別に示す。両者には温度に拘わらず一義的な関係が認められる。図中には養生温度 20℃における両者の関係の回帰式を併記しており、これにより、膨張材の反応が活発に生じる期間（以下、膨張過程）における見かけのヤング係数の温度依存性を表現した。

次に、膨張過程以降の見かけのヤング係数については、インバー鋼材を用いた拘束試験における鋼材ひずみと拘束鋼材比の関係に、(1)式の見かけの膨張ひずみに温度ひずみ成分を加味した回帰式を適用することにより算定した。図-10に見かけのヤング係数と有効材齢の関係を示す。図中には、PC鋼材の拘束試験より算出した見かけのヤング係数の回帰式、および別に測定した円柱供試体（φ100×200mm）のヤング係数と有効材齢の関係式を併記する。

インバー鋼材の拘束試験より算出した見かけのヤング係数は、有効材齢 1.5 日程度までの膨張過程では約 1000～2500 N/mm<sup>2</sup>であり、PC鋼材の拘束試験より算出したものとほぼ同等であった。一方、膨張材の反応がほぼ終了してから最高温度に達するまでの有効材齢 1.5～4.0 日程度の期間では約 6000～9000N/mm<sup>2</sup>となり、有効材齢 5.0 日付近において円柱供試体より測定したヤング係数とほぼ同等になっている。

また、見かけのヤング係数と円柱供試体のヤング係数を比較すると、後者に対する前者の比は、膨張過程では 0.1～0.2 程度、それ以降については 0.6～1.0 程度であった。これをコンクリート標準示方書<sup>4)</sup>（材齢 3 日まで 0.73，材齢 5 日以降 1.0）やひびわれ制御指針<sup>5)</sup>（温度上昇時：0.36～0.5，温度降下時：0.63～0.67）に提示されているクリープの影響を考慮したヤング係数の補正係数と比較すると、膨張過程における補正係数をより小さくする必要があると考えられる。

以上の検討結果より、見かけのヤング係数

については、有効材齢 1.5 日までの膨張過程とそれ以降の 2 区間に分け、膨張過程では PC 鋼材の拘束試験より求めた回帰式、膨張過程以降ではインバー鋼材の拘束試験より求めた回帰式（図-10 中に併記）をそれぞれ用いることにより表現した。

## 5. 材料特性モデルを用いた応力評価法の検討

以下では、上記の材料特性モデルを用いてマス養生温度履歴下における拘束応力を推定し、その適用性について検討する。

### 5.1 評価法の概要

温度履歴下における膨張コンクリートの拘束応力は (4) 式より算出し、見かけの膨張ひずみについては、筆者らが既に提示している一

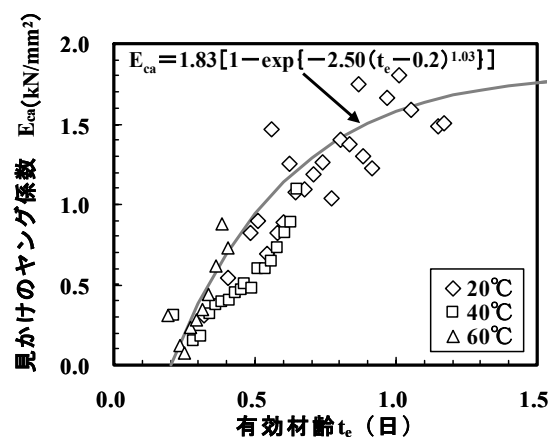


図-9 見かけのヤング係数と有効材齢の関係 (PC鋼材の拘束試験より)

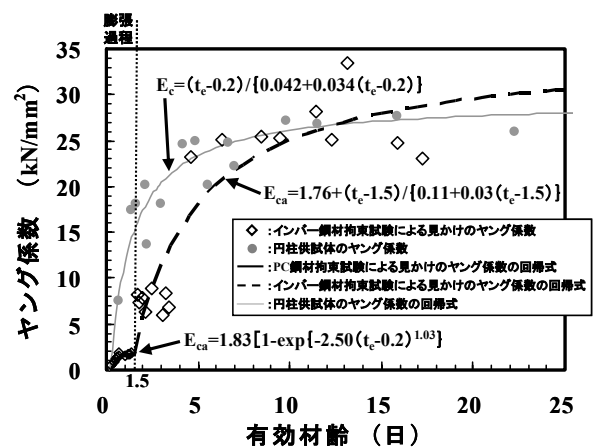


図-10 見かけのヤング係数と有効材齢の関係 (インバー鋼材の拘束試験より)

定温度下の膨張ひずみを重ね合わせる方法<sup>6)</sup>により、また、見かけのヤング係数は上記の有効材齢 1.5 日を境界とした 2 つの関係式を用いて推定する。ここで、見かけのヤング係数については、拘束試験より算出した見かけのヤング係数と円柱供試体のヤング係数を比較した結果より、ヤング係数の補正係数を、有効材齢 1.5 日までは 0.2、有効材齢 5.0 日以降では 1.0（有効材齢 1.5～5.0 日は直線補間）とした場合についても検討した。なお、補正係数を加味する前のヤング係数には円柱供試体による実測値と有効材齢の関係式を用いた。

$$\sigma_c = -p \cdot E_s \cdot \Sigma [\{ \Delta \varepsilon_{ca}(t_i) + \Delta \varepsilon_{cT}(t_i) + \Delta \varepsilon_{sT}(t_i) \} / \{ 1 + p \cdot E_s / E_{ca}(t_i) \}] \quad (4)$$

ここに、 $\sigma_c$ ：コンクリートに生じる拘束応力 (N/mm<sup>2</sup>)、 $\Delta \varepsilon_{cT}(t_i)$ ：時間ステップ  $t_i$  におけるコンクリートの温度ひずみの変化量、 $\Delta \varepsilon_{sT}(t_i)$ ：時間ステップ  $t_i$  における鋼材の温度ひずみの変化量

## 5.2 拘束応力の解析結果と考察

図-11 に、拘束応力（引張を正，圧縮を負）について実測値と上記の方法による計算値を比較して示す。

本評価法による計算値（計算値①）は、拘束鋼材比 5.7%の温度上昇過程で生じる圧縮応力を若干小さく評価しているものの、温度上昇～降下過程における圧縮～引張の応力挙動を概ね良く推定できている。また、ヤング係数に独自の補正係数を考慮した場合（計算値②）も、ほぼ同等の精度で実測値を評価できている。

今後は、実構造物の解析に本手法を適用し、材料特性モデルや応力評価法の妥当性を検証するとともに、セメント種類や強度レベルが異なる場合の知見を深め、本手法の拡充を図る予定である。

## 6. まとめ

以下、本研究から得られた、高炉セメントを用いた膨張コンクリートに関する知見を示す。

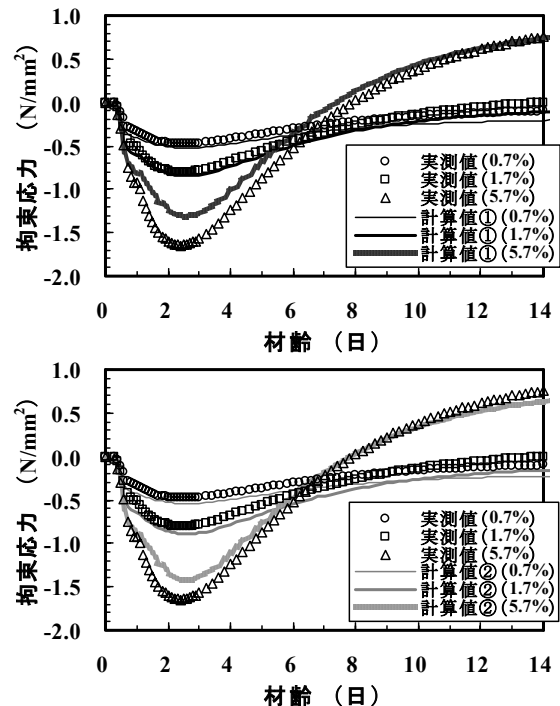


図-11 拘束応力の推定結果

- (1) 温度上昇過程において膨張材の作用によって生じた膨張応力は温度降下後も残存する。
- (2) 鋼材ひずみと拘束鋼材比の関係より、見かけの膨張ひずみおよび見かけのヤング係数を算出し、各々の温度依存性を考慮した材料特性モデルを提示した。
- (3) 提示した材料特性モデルを用いた応力評価法により、マス養生温度履歴を受けた膨張コンクリートの応力挙動を概ね評価できる可能性を示した。

## 参考文献

- 1) 三谷裕二，谷村充，松本健一，佐竹紳也：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) 日本コンクリート工学協会，マスコンクリートソフト作成委員会報告書，pp.124-126，2003.11
- 3) 日本コンクリート工学協会，マスコンクリートのひび割れ制御に関する研究委員会報告書，pp.292-295，2006.6
- 4) 土木学会，2002年制定コンクリート標準示方書〔施工編〕，pp.52-53，pp.289-290，2002.3
- 5) 日本コンクリート工学協会，マスコンクリートのひび割れ制御指針，pp.67-70，1986
- 6) 三谷裕二，谷村充，佐久間隆司，佐竹紳也：膨張コンクリートのマス養生温度履歴を考慮した膨張応力算定法，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.1141-1146，2005.6