

# 膨張材の効果を考慮した各種温度応力解析手法並びに実測値との比較検討

名城大学大学院 学生会員 ○山口 将太 名城大学 正会員 石川 靖晃

## 1. はじめに

初期応力解析において、膨張材の効果に関する検討が、近年多く行われている。ひび割れ制御指針<sup>1)</sup>や東ら<sup>2)</sup>は、膨張材の効果を、拘束度を考慮した自由膨張ひずみとして与え膨張効果を表現する手法を提案している。一方、石川ら<sup>3)</sup>は、総エネルギー一定則に基づき膨張材の効果を表現する手法を構築している。ところが、各手法による実測を交えての比較は行われていない。そこで本研究では、東ら<sup>2)</sup>によって行われた膨張収縮挙動実験結果について、総エネルギー一定則に基づく手法、東ら<sup>3)</sup>による手法およびひび割れ制御指針<sup>1)</sup>による手法により比較検討を行うことを目的とした。

## 2. 総エネルギー一定則に基づく手法の概要

まず、膨張コンクリートと拘束鋼材、拘束体等で構成される構造系を考える。このとき総エネルギー一定則は次式で与えられる<sup>3)</sup>。

$$U_{che} = -\int_V \sigma d\varepsilon_{che} dv \quad (1)$$

ここで $\sigma$ は応力、 $\varepsilon_{che}$ は自由膨張ひずみである。

総エネルギー一定則は、膨張コンクリートが有する膨張エネルギーの総量 $\Delta U_{che}$  (以下総エネルギーと称する)は、拘束条件に依らず一定であることを意味しているが、この考え方を三次元の主応力方向に独立に適用すると次式が得られる。

$$\sigma_1 \Delta \varepsilon_{che,1} = -\Delta U'_{che}, \quad \sigma_2 \Delta \varepsilon_{che,2} = -\Delta U'_{che}, \quad \sigma_3 \Delta \varepsilon_{che,3} = -\Delta U'_{che} \quad (2)$$

ここで、 $\Delta U'_{che}$ は、一軸状態における膨張エネルギー増分である。

変換行列 $Q_{ij} : Q_{ki} \sigma_{kl} Q_{lj} = diag(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ を用いることにより、自由膨張ひずみ成分は次式で表される<sup>3)</sup>。

$$\Delta \varepsilon_{ij}^{che} = Q_{ik} \Delta \varepsilon_{kl}^* Q_{jl} \quad (3) \quad \Delta \varepsilon_{kl}^* = diag\left(-\frac{\Delta U'_{che}}{\sigma_1}, -\frac{\Delta U'_{che}}{\sigma_2}, -\frac{\Delta U'_{che}}{\sigma_3}\right) \quad (4)$$

式(3)で表される自由膨張ひずみ成分を有限要素解析 code に初期ひずみとして与えることで、総エネルギー一定則に基づき、膨張材の効果を実験値に導入することが可能となる。

## 3. 実測試験体概要

東ら<sup>2)</sup>によって行われた実験試験体を図-1に示す。試験体は、全高100cm、水平長さ90cm、厚さ20cmであり、周囲すべてに10cm厚の発砲スチロールを設置している。下部の50cm高さに膨張コンクリートを打設し、引き続き60分後に上部50cm高さに通常コンクリートを打設したものである。コンクリートの配合の詳細については省略するが、水結合比55%、単位セメント量282kg/m<sup>3</sup>、単位膨張材量20kg/m<sup>3</sup>となっている。セメントは普通ポルトランドセメントを使用している。水平方向の測定のためにコンクリートひずみ計を高さ方向に4点設置している。この試験体を基に解析モデルを作成した。

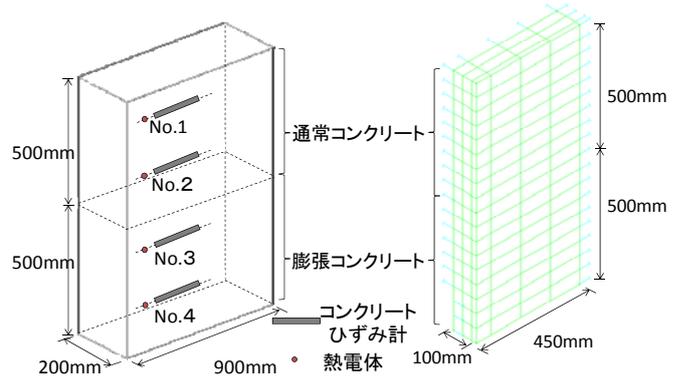


図-1 試験体

図-2 解析モデル

表-1 解析に用いた材料特性

材料特性	値もしくは式
熱伝導率	2.7 W/m°C
比熱	1.15 kJ/kg°C
密度	2300 kg/m <sup>3</sup>
断熱温度上昇量 $Q(t)$ ( $t$ : 材齢)	$Q(t) = 44.02(1 - e^{(-1.036(t-1))})^\circ\text{C}$
圧縮強度 $f'_c(t)$	$f'_c(t) = 34 \text{ N/mm}^2$
ヤング係数 $E(t)$	$E(t) = 4700 f'_c{}^{0.5} \text{ N/mm}^2$
ポアソン比	0.2
線膨張係数	$10 \times 10^{-6} (1/^\circ\text{C})$

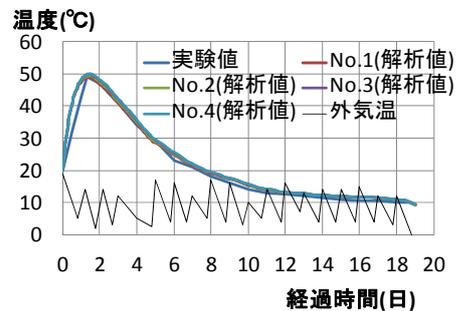


図-3 温度履歴

#### 4. 実測値と仕事量一定則及び自由膨張ひずみ直接代入法の比較検討

解析モデルを図-2に示す。モデルは、東ら<sup>2)</sup>によって解析されたモデルを基に作成し1/4対象モデルとした。解析に用いた材料特性を表-1に示す。拘束条件は、図-2に示されるモデル周囲にて青色矢印で示されている。膨張材の考慮について、「総エネルギー一定則」、「JCI 指針」の2ケースを想定した。なお、ひび割れ制御指針2008を「JCI 指針」と称している。膨張コンクリートの総エネルギーの最大値は普通コンクリートでは $30\sim 100\times 10^{-6}$  (N/mm<sup>2</sup>)の間で、しかも環境温度が高くなるほど大きくなることが笠原<sup>4)</sup>によって報告されている。このことに基づき、「総エネルギー一定則」では、次式で総エネルギーを与えた。

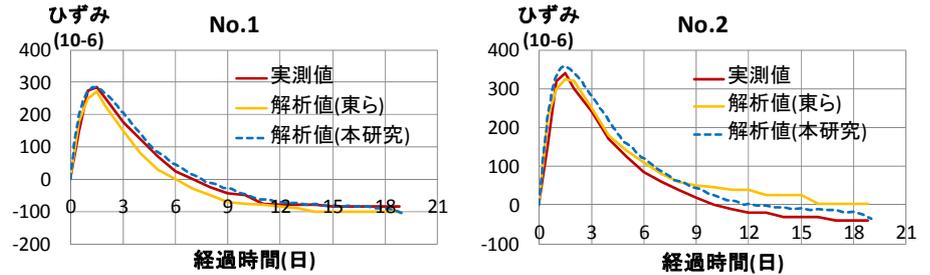


図-4 長手方向のひずみ経時変化(通常コンクリート)

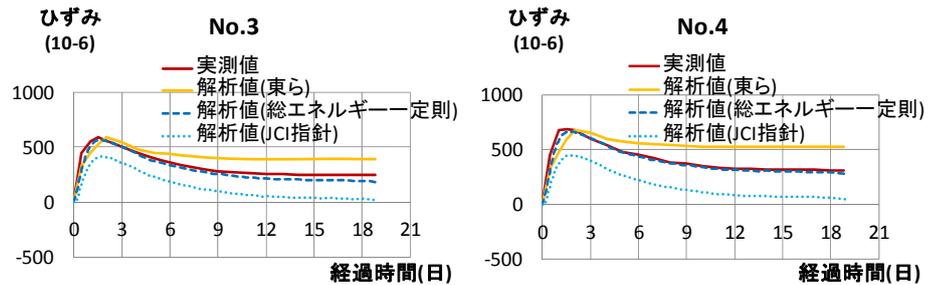


図-5 長手方向のひずみ経時変化(膨張コンクリート)

「総エネルギー一定則」では、次式で総エネルギーを与えた。

$$\Delta U_{che}(t_e) = 100 \times 10^{-6} \left[ 1 - \exp\{-0.69(t_e - 0.3)^{1.11}\} \right] \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (5)$$

また、「JCI 指針」ではマスコンクリートのひび割れ制御指針<sup>1)</sup>に従い次式にて初期ひずみとして直接与えた。

$$\varepsilon_{ex}(t_e) = 150 \times 10^{-6} \left[ 1 - \exp\{-0.69(t_e - 0.3)^{1.11}\} \right] \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (6)$$

上記のケースに加え膨張材非考慮の場合の解析についても行った。温度履歴を図-3に示す。実測値の最高温度は材齢1.3日で49.1℃である。解析モデルの最高温度は材齢1.4日で50℃であり、実測値より0.9℃高いがほぼ一致していることがわかる。各測定位置の長手方向におけるひずみの経時変化を図-4、5に示す。膨張材を混入していない場合の長手方向のひずみは、本研究における解析値と実測値が同じような傾向を示すことが確認できる。膨張材を混入した場合においても同様な傾向がみられる。また、「総エネルギー一定則」と「JCI 指針」を比較すると、ひずみの発生傾向に大きな違いが確認できる。「JCI 指針」では、自由膨張ひずみは拘束度に依らないことが原因の一つであると考えられる。今後は、本研究手法について、鉄筋の影響も考慮したモデルや様々な実測値との比較検討を行っていきたいと考えている。

#### 5. おわりに

本研究の範囲内で、以下の結論を得た。

- ・総エネルギー一定則による手法と東らの実験によって得られた実測値を比較した場合、長手方向のひずみは同様な傾向となることが確認された。
- ・本ケースにおいては、総エネルギー一定則とひび割れ制御指針による手法を比較した場合、ひずみの発生傾向に差が生じることが確認された。

#### 参考文献

- 1) マスコンクリートのひび割れ制御指針, 社会法人 日本コンクリート工学協会 2008, pp.55
- 2) 東邦和, 中村敏晴, 梅原秀哲: 膨張材を用いた打重ね実験による膨張収縮挙動と解析手法の適用, コンクリート年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1537-1542, 2008
- 3) 石川靖晃, 柴田要: 仕事量一定則に基づく膨張コンクリートの変形挙動に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.351-356, 2008
- 4) 笠原喬太: 膨張コンクリートの仕事量評価に関する基礎的研究, 平成22年度名城大学卒業論文