

FEM 温度応力解析における膨張材効果の導入手法に関する一考察

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

温度応力解析などの初期応力解析において、膨張材効果に関する検討が、近年多く行われている。膨張材効果を導入する手法として、総エネルギー一定則に基づく FEM 応力解析手法¹⁾があり、この手法は拘束度の影響は自動的に考慮される。一方、その他の導入手法としてひび割れ制御指針²⁾や東ら³⁾による手法などがある。ところが、各導入手法による膨張材効果についての比較は十分行われていないことが現状である。本研究では、東ら³⁾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¹⁾、ひび割れ制御指針²⁾による手法および東ら³⁾による手法により比較検討を行うことを目的とした。

2. 膨張材効果を考慮する各手法の概要

2.1 総エネルギー一定則に基づく手法¹⁾

石川ら¹⁾は、膨張材料の総エネルギーが、拘束条件に依らず一定であるという考え方(総エネルギー一定則)を三次元の主応力方向に次式のように適用することで膨張材効果を表現している。

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

ここで、 σ は主応力、 ε_{che} は主応力方向の自由膨張ひずみ、 $\Delta U'_{che}$ は、一軸状態における総エネルギー増分である。

式(1)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、膨張材の効果を応力解析に導入することができる。

2.2 JCI ひび割れ制御指針に基づく手法²⁾

JCI ひび割れ制御指針では、拘束鋼材の膨張ひずみを初期ひずみとして与えることにより膨張材効果を考慮している。

$$\varepsilon_{ex}(t_e) = \varepsilon_{ex,\infty} \left[1 - \exp \left\{ -a_{ex} (t_e - t_{ex,0})^{b_{ex}} \right\} \right] \quad (2)$$

ここで、 $\varepsilon_{ex}(t_e)$ は有効材齢 t_e (日)における膨張ひずみ($\times 10^{-6}$)、 $\varepsilon_{ex,\infty}$ は膨張ひずみの終局値($\times 10^{-6}$)、 a_{ex}, b_{ex} はセメントの種類が膨張ひずみの進行特性に及ぼす影響を表わす係数、 $t_{ex,0}$ は膨張開始時点の有効材齢(日)である。

2.3 東らによる手法³⁾

東らは、拘束圧依存パラメータで変化させた膨張ひずみを初期ひずみとして与えることにより膨張材効果を考慮している。

$$\varepsilon_{ci} = (\varepsilon_0 - \varepsilon_f) / (1 + a\sigma_i) + \varepsilon_f \quad (3)$$

ここで、 ε_{ci} は i 方向の膨張ひずみ、 ε_0 は無拘束膨張試験の膨張ひずみ、 ε_f は拘束無限大の膨張ひずみ、 a は拘束圧依存パラメータ、 σ_i は i 方向の拘束圧(N/mm²)である。

キーワード 膨張材 総エネルギー一定則 ひび割れ制御指針

連絡先 住所：愛知県名古屋市天白区塩釜口 1-105 電話：052-838-2324

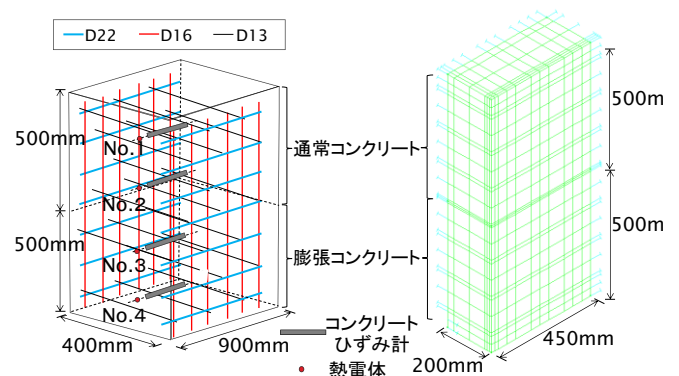


図-1 試験体

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 ² °C
比熱	1.15 kJ/kg°C
密度	2300 kg/m ³
断熱温度上昇量 $Q(t)$ (t : 材齢)	$Q(t) = 44.02(1 - e^{(-1.03(t-1))})^{\circ}\text{C}$
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	$10 \times 10^{-6} (1/^{\circ}\text{C})$

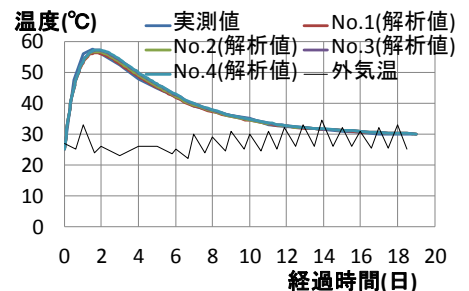


図-3 温度履歴

3. 実測試験体概要

東ら³⁾によって行われた実験試験体を図-1に示す。東らは、RC試験体・無筋試験体について検討を行っている。無筋試験体については文献⁴⁾で既に行っているため、本論文ではRC試験体について比較検討を行う。試験体は、全高100cm、水平長さ90cm、厚さ40cm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、引き続いて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としている。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/m³、単位膨張材量20kg/m³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。また、水平長手方向にD22鉄筋を150mmピッチ、鉛直方向にD16鉄筋を150mmピッチ、壁厚さ方向に中間帯鉄筋としてD13鉄筋をD22鉄筋の高さ格段に3本ずつ配置している。断面に対する鉄筋比はそれぞれ、D22が1.39%、D16が0.66%、D13が0.3%である。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。

4. 実測値と総エネルギー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³⁾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」、「東らによる解析値」の3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。また、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1.56日で57.5℃である。

解析モデルの最高温度は材齢1.65日で57.7℃であり、実測値と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。膨張材が含まれない領域においては各手法の差はあまり見られないが、膨張材を含んだ領域においては各手法により差が生じていることが確認できる。また、「JCI指針」ではひずみを実測値より小さく、東らの手法ではひずみを実測値より大きくなっていることが確認された。これらの原因としてはL/Hが小さいことが考えられる。今後はL/Hが異なる実測値を基に比較検討の実施および補強の違いによる膨張材効果の検討を行いたいと考えている。

5. おわりに

本研究の範囲内で、各膨張効果導入手法と実測値との比較検討を行った結果、L/Hが小さい場合、各膨張効果導入手法に大きな差が生じる可能性が示唆された。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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 2009, pp.55
- 3) 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
- 4) 山口将太, 石川靖晃: 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, 土木学会中部支部研究発表会 2012, pp. 433-434

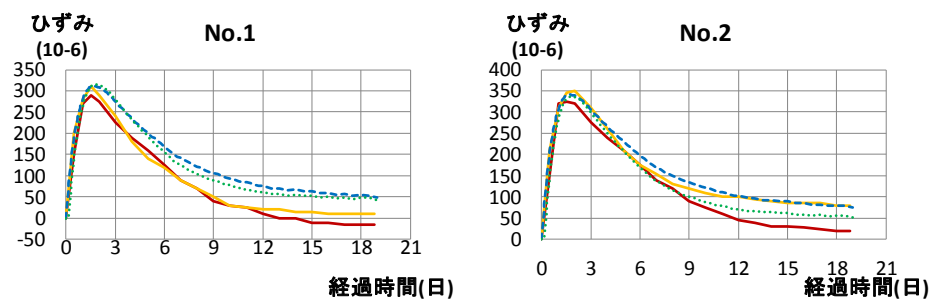


図-4 長手方向のひずみ経時変化(通常コンクリート)

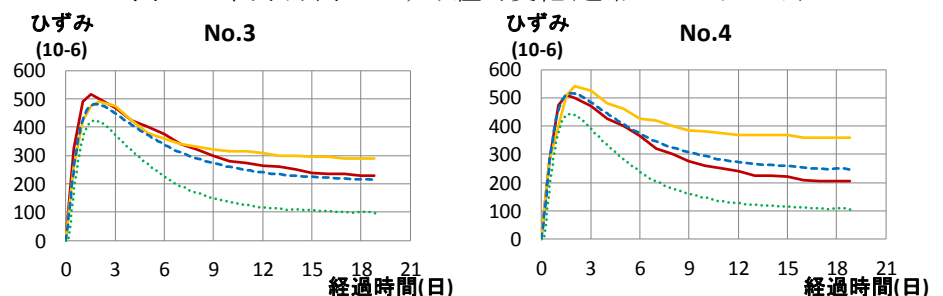


図-5 長手方向のひずみ経時変化(膨張コンクリート)

— 実測値 — 解析値(東ら) — 解析値(総エネルギー一定則) — 解析値(JCI指針)