

膨張材の効果を検討した 3 次元 FEM 温度応力解析

名城大学 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¹⁾では、膨張材の効果、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が提案されている。一方、石川ら²⁾は、仕事量一定則に基づき膨張材の効果表現手法を構築している。しかし、各手法による膨張材の効果に対する比較はほとんど行われていない。そこで、本研究では、石川ら²⁾が提案した膨張材効果を表現する手法を FEM 温度応力解析に適用し、仕事量一定則に基づく手法と、ひび割れ制御指針¹⁾による手法との比較検討を行うことを目的とした。

2. 仕事量一定則に基づいた自由膨張ひずみモデル

図-1 に示すような、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。さらに、膨張コンクリートは化学的に膨張するものとする。このとき仕事量一定則は次式で与えられる²⁾。

$$\int \sigma d\epsilon_{che} d = const. \quad (1)$$

ここで σ は応力、 ϵ_{che} は自由膨張ひずみとする

仕事量一定則は各時間ステップにおいて、膨張コンクリートがなす仕事量は拘束条件に依らず一定であることを意味しているが、この考え方を図-2 に示されるモデルの様に、三次元の主応力方向に適用すると次式が得られる。

$$\sigma_1 \Delta \epsilon_{che,1} = \Delta U_{che}, \quad \sigma_2 \Delta \epsilon_{che,2} = \Delta U_{che}, \quad \sigma_3 \Delta \epsilon_{che,3} = \Delta U_{che} \quad (2)$$

ここで、 ΔU_{che} は、一軸状態における仕事量増分である。

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²⁾。

$$\Delta \epsilon_{ij}^{che} = Q_{ik} \Delta \epsilon_{kl}^* Q_{jl} \quad (3)$$

式(3)で表される自由膨張ひずみ成分を FEM3 次元有限要素法に初期ひずみとして導入することで、仕事量一定則に立脚した、膨張材の効果温度応力解析に導入することが可能となる。

3. 仕事量一定則と自由膨張ひずみ直接代入法の比較検討

解析モデルを図-3 に示す。モデルは、基礎コンクリートの上部にコンクリートの擁壁を打設したものを想定した。解析に用いた材料特性を表-1 に示す。解析ケースは、「鉄筋無し」、「鉄筋有り」の 2 ケースとした。「鉄筋無し」は、配筋を行わず、「鉄筋有り」は、鉄筋比を平行方向 0.94%、垂直方向 0.98%とした。さらに、膨張材の考慮に関するケースとして、「膨張材なし」、「仕事量一定則」、「ひび割れ制御指針」の 3 パターンを想定した。「仕事量一定

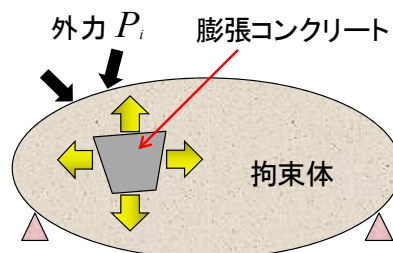


図-1 化学的な体積変化が生じる構造系

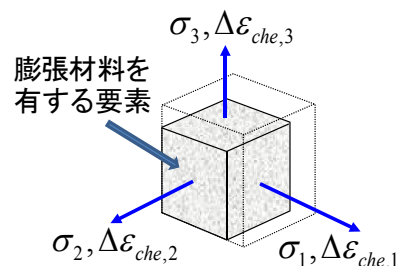


図-2 仕事量一定則の三次元場への適用

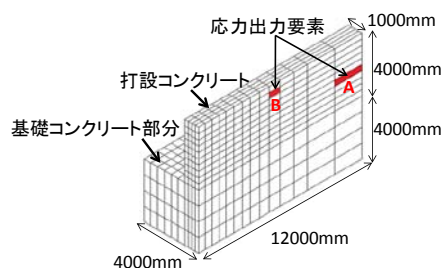


図-3 解析モデル

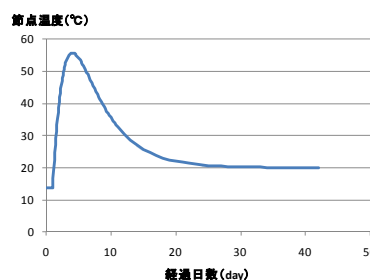


図-4 温度履歴

則」では、次式にて仕事量を入力値として与えた。

$$\Delta U_{che}(t_e) = \Delta U_{che} \left[1 - \exp \left\{ -a_{ex} (t_e - t_{ex,0})^{b_{ex}} \right\} \right] \quad (4)$$

ここで $\Delta U_{che}(t_e)$ は有効材齢 t_e における膨張ひずみ、 ΔU_{che} は膨張ひずみの終局値、 a_{ex} および 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す係数、 $t_{ex,0}$ は膨張開始時点の有効材齢(day)である。本研究では、林³⁾の研究を参考にして、これは、膨張材混入量 20kg/m^3 に対応しているため、 $\Delta U_{che} = 50 \times 10^{-5} \text{N/mm}^2$ 、 $a_{ex} = 0.69$ 、 $b_{ex} = 1.11$ 、 $t_{ex,0} = 0.3$ とした。

また、「ひび割れ制御指針」では、マスコンクリートのひび割れ制御指針¹⁾で提案されている次式を初期ひずみとして直接与えた。

$$\varepsilon_{ex}(t_e) = \varepsilon_{ex,\infty} \left[1 - \exp \left\{ -a_{ex} (t_e - t_{ex,0})^{b_{ex}} \right\} \right] \quad (5)$$

ここで $\varepsilon_{ex}(t_e)$ は有効材齢 t_e における膨張ひずみ、 $\varepsilon_{ex,\infty}$ は膨張ひずみの終局値、 a_{ex} および 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す係数、 $t_{ex,0}$ は膨張開始時点の有効材齢(day)であり、本研究では各係数を $a_{ex} = 0.69$ 、 $b_{ex} = 1.11$ 、 $t_{ex,0} = 0.3$ とした。

最高温度履歴を、図-4に示す。最高温度は、材齢4日で 56°C となっている。

長手方向の応力の経時変化を図-5, 6に示す。2つの手法による応力の違いはほとんど見られなかった。鉄筋の有無について比較をした場合でも、応力に大きな差は生じなかったが、要素Bにおいては、鉄筋有りと鉄筋無しにおいて、若干、応力の発生傾向に違いが生じた。即ち、拘束の程度によっては膨張材の効果に差が生じる可能性が示された。

4. おわりに

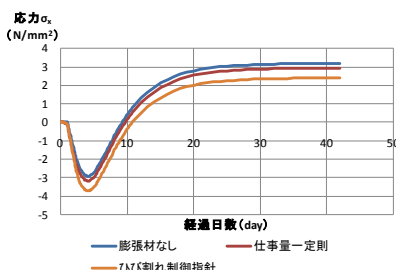
本研究では、仕事量一定則に基づく手法および、ひび割れ制御指針で提案されている手法により温度応力解析を行い、膨張材効果の比較検討を行った。その結果、両手法において、拘束の程度によって膨張材が及ぼす効果が異なることが確認された。今後、更に検討を続けていきたいと考えている。

参考文献

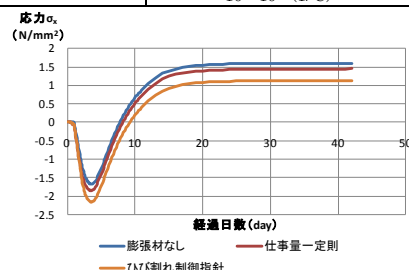
- 1) マスコンクリートのひび割れ制御指針, 社会法人 日本コンクリート工学協会 2008, pp.55
- 2) 石川靖晃, 柴田要: 仕事量一定則に基づく膨張コンクリートの変形挙動に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, vol.30, No.1, pp.351-356, 2008
- 3) 林陸太, 石川靖晃: 脱型材齢が膨張コンクリートのヤング係数および仕事量に及ぼす影響, 土木学会第64回年次学術講演会講演概要集, V-449, pp.895-896

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	$2.7 \text{ W/m}^\circ\text{C}$
比熱	$1.1 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$
密度	2300 kg/m^3
断熱温度上昇量 $Q(t)$ (t: 材齢)	$Q(t) = 52.37 \cdot (1 - e^{(-0.68(t-1))})^\circ\text{C}$
圧縮強度 $f_c'(t)$	$f_c'(t) = \frac{t-0.3}{4.5+0.95(t-0.3)} \cdot 40.5 \text{ N/mm}^2$
引張強度 $f_t(t)$	$f_t(t) = 0.13 f_c'(t)^{0.85} \text{ N/mm}^2$
ヤング係数 $E(t)$	(打設コンクリート) $E(t) = 6300 \sqrt{f_c'^{0.45}} \text{ N/mm}^2$ (基礎コンクリート) $E(t) = 25000 \text{ N/mm}^2$
ポアソン比	0.2
鉄筋のヤング係数	210000 N/mm^2
降伏強度	345 N/mm^2
線膨張係数	コンクリート鉄筋ともに $10 \times 10^{-6} (1/^\circ\text{C})$

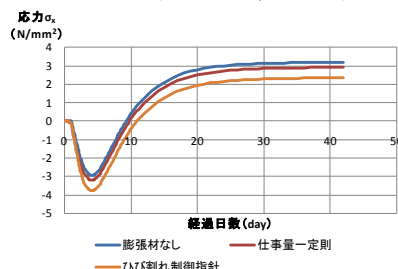


要素 A

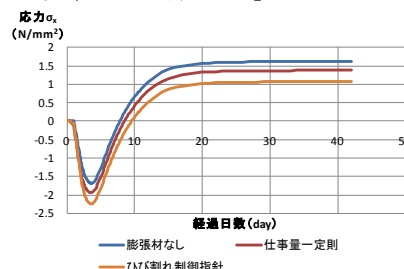


要素 B

図-5 長手方向の応力経時変化 「鉄筋無し」



要素 A



要素 B

図-6 長手方向の応力経時変化 「鉄筋有り」