

ボクセル有限要素法によるコンクリートの温度応力解析

琉球大学 正会員 ○富山 潤 琉球大学 正会員 伊良波 繁雄

琉球大学 学生会員 山城 建樹 琉球大学 正会員 山田 義智

1. はじめに

本研究では、マスコンクリートや粉体量の多い高強度コンクリート、ハイパフォーマンスコンクリートなどで問題となるセメントの水和反応に起因するひび割れの発生を解析的に検討するための基礎的研究として、コンクリートをモルタル・粗骨材の二相複合材料とした場合の水和発熱による温度応力への粗骨材の影響を検討した。

本解析では、非定常熱伝導解析および応力解析の求解析法としてボクセル有限要素法¹⁾を用い、また、水和発熱モデルとして文献2)を参考に複合水和発熱モデルを採用した。

2. ボクセル有限要素法と二相コンクリートモデル

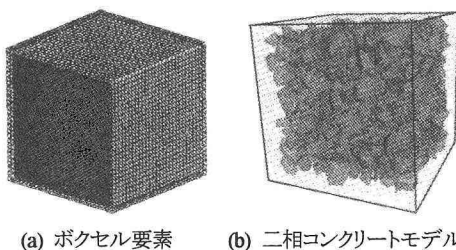
2.1 ボクセル有限要素法

ボクセル有限要素法では、解析領域を図-1(a)に示すように領域全体を包含する直方柱を考え、これを直方体要素(ボクセル要素)で分割する。本研究では、ボクセル要素としてアイソパラメトリック六面体一次要素を使用した。また、ボクセル解析では要素形状がすべて同じであるため要素係数マトリックス作成が材料数分でよく、大規模解析に有利である。

2.2 二相コンクリートモデル

本研究では、コンクリートをモルタルと粗骨材の二相複合材料と仮定し、解析モデルとして筆者らが開発した二相コンクリートモデルを解析に用いた³⁾(図-1(b)参照)。

本解析では、ボクセルデータと二相コンクリートモデル(モルタル+粗骨材)データを比較し、それぞれのボクセル要素の材料定数を決定した。



(a) ボクセル要素 (b) 二相コンクリートモデル

図-1 ボクセル有限要素法の解析領域概念図および二相コンクリートモデル

3. 温度解析と温度応力解析

3.1 複合水和発熱モデルを用いた非定常熱伝導解析

本解析で用いた温度解析手法は非線形解析の計算を直接反復法で求めている点を除けば文献4)に示す方法とほぼ同じである。ここでは簡単に説明する。

3次元非定常熱伝導方程式は、次式で表すことができる。

$$c\rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = k_x \frac{\partial T}{\partial x} + k_y \frac{\partial T}{\partial y} + k_z \frac{\partial T}{\partial z} + H \quad (1)$$

ここで、 c は比熱(kcal/kg°C)、 ρ は密度(kg/m³)、 k_x, k_y, k_z はそれぞれデカルト座標系(x-y-z)の x, y, z 軸方向の熱伝導率(kcal/mh°C)、 T は温度(°C)、 t は時間(h)、 H は単位時間・単位体積当たりのセメントの水和発熱速度(kcal/kg h)である。式(1)を空間に関しては有限要素法で、時間に関してはクランクニコルソンの θ 法($\theta=1$)により離散化を行った。

また、本解析では、水和発熱モデルとして文献2)の複合水和発熱モデルを採用しているため、式(1)の水和発熱速度 H は次式を用いた。

$$H = C \sum p_i H_i \quad (2)$$

$$H_i = \xi \cdot H_{i,T_0} \exp \left[-\frac{E_i}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (3)$$

ここで、 C は単位セメント量、 p_i は各鉱物の組成重量率、 H_i は各鉱物の発熱速度、 E_i は鉱物 i の活性化エネルギー、 R は気体定数、 H_{i,T_0} は基準速度 T_0 における鉱物 i の基準発熱速度である。また、 ξ は諸要因による水和発熱速度の低減を考慮した係数である。詳細は文献2)を参照されたい。

3.2 温度応力解析

温度上昇量による膨張力 $\{\epsilon^T\}$ は次式で表現した。

$$\{\epsilon^T\} = \int [B]^T [D] \{\epsilon^T\} dV \quad (4)$$

ここで、 t は転置記号、 $[B]$ はボクセル要素の変位-ひずみマトリックス、 $[D]$ は応力-ひずみマトリックス、 $\{\epsilon^T\}$ は温度上昇量による膨張ひずみであり、次式で表す。

$$\{\epsilon^T\} = [\alpha T \quad \alpha T \quad \alpha T \quad 0 \quad 0 \quad 0] \quad (5)$$

ここで、 α は熱膨張率(10⁻⁶/°C)である。

キーワード 水和熱、温度応力、ひび割れ、ボクセル有限要素法

連絡先 〒903-0129 沖縄県西原町字千原1番地 琉球大学工学部環境建設工学科 TEL098-895-8649

また、温度応力を計算するためにはコンクリートの有効ヤング係数を材齢に応じて求めなければならない。本研究では、コンクリート標準示方書⁵⁾に従い設定した。

4. 数値解析

数値解析例として、マスコンクリート内部の $100 \times 100 \times 100\text{mm}$ の普通ポルトランドセメントを使用したコンクリート領域を想定して解析を行った(図-1(b)参照)。従って境界条件は断熱状態である。解析に用いたセメントの鉱物組成を表-1に、配合条件を表-2に、その他の材料定数を表-3に示す。

表-1 鉱物組成

C3A	C4AF	C3S	C2S	CS2H
10.4	9.4	47.2	27.0	3.9

注意) CS₂H: 二水石膏

表-2 配合条件

W/C	W	C	S	G	AE 減水剤
49.3	148	300	765	1129	0.2

単位) W/C:%, W,C,S,G:kg/m³, AE 減水剤:C%

表-3 その他の材料定数

	$E(\text{N/mm}^2)$	ν	k_x, k_y, k_z	α	c
CA	30400.6	0.25	1.8	5.0	0.21
MO	20000.0	0.21	1.64	9.34	0.30
CO	—	—	2.5	7.29	0.26

注意) CA:骨材, MO:モルタル, CO:コンクリート, E:ヤング係数

4. 1 温度解析

ここでは、温度解析をコンクリート(CO)と二相コンクリートモデル(CA+MO)の断熱温度上昇量を比較した。図-2に解析モデルの断面($z=25, 50\text{mm}$)を示す。なお、解析における時間ステップは0.01日である。また、二相コンクリートモデルにおける発熱はモルタル部のみに生じるとしている。

図-3にコンクリートと二相コンクリートの断熱温度上昇曲線を示す。比較のために土木学会式⁹⁾も同時に示す。これより、コンクリートをモルタル-粗骨材の複合材料とした結果は、他と比べ温度上昇量が低く、複合水和発熱モデルの諸係数を変更する必要があると考えられる。なお、コンクリートの断熱温度上昇値は土木学会式と良い近似を示した。

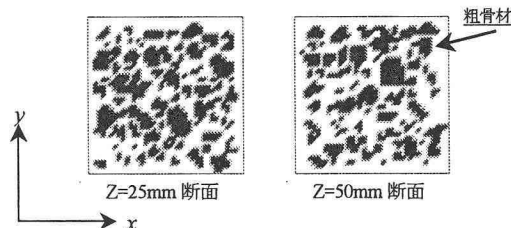


図-2 解析モデル断面(64000要素, 68921節点)

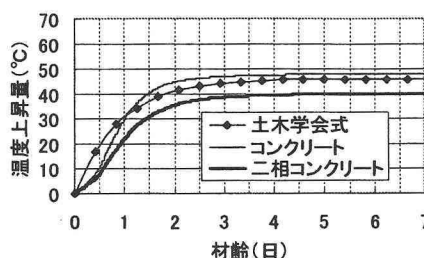


図-3 断熱温度上昇曲線

4. 2 温度応力解析

材齢1日における温度応力解析の結果を図-4に示す。これより、モルタルと粗骨材の温度上昇量や熱的性質が異なるため、複雑な応力分布を示しているのが確認でき、今後、温度ひび割れを検討する場合、粗骨材の影響を考慮する必要があると考えられる。なお、境界条件は面に直交する方向のみを固定とした。

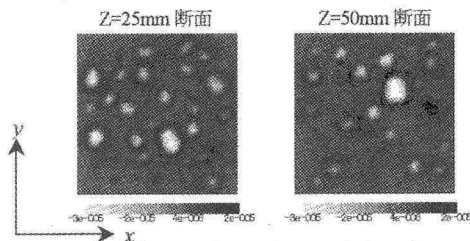


図-4 温度応力(最大主応力)分布(N/mm²)

5. まとめ

粗骨材を考慮した水和発熱による温度解析と温度応力解析を示し、粗骨材を考慮することの重要性を示した。

謝辞: 本論文の複合水和発熱モデルに関して、岸利治東京大学助教授、石田哲也東京大学助教授に有益なご意見を頂いた。ここに感謝の意を表す。

参考文献:

- 1) 鈴木克幸, ほか: 多重ボクセル情報を用いたソリッド構造の解析法, 日本計算工学会論文集, 2(2), pp.395-398, 1997.
- 2) 岸利治, 前川宏一: 高炉スラグおよびフライアッシュを用いた混合セメントの複合水和発熱モデル, 土木学会論文集, No.550, V-33, pp.131-143, 1996.11.
- 3) 山城建樹, ほか: 骨材とモルタルで2相モデル化したコンクリートの3次元フリーメッシュ法解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.25, No.2, pp.169-174, 2003.
- 4) 原田修輔, ほか: 温度依存性を有するセメントの水和発熱過程と熱伝導の練成を考慮した非線形温度解析, 土木学会論文集, No.426, V-14, pp.167-176, 1991.2.
- 5) 土木学会: コンクリート標準示方書[施工編], 2002.3.