

# 琉球大学学術リポジトリ

## 回転自由度を有するボクセル要素を用いたコンクリート内部の応力解析

メタデータ	言語: 出版者: 琉球大学工学部 公開日: 2010-08-02 キーワード (Ja): キーワード (En): Concrete, Composite Material, Voxel Analysis, Drilling Degrees of Freedom 作成者: 富山, 潤, 伊良波, 繁雄, 松原, 仁, 山城, 建樹, 入部, 綱清 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/20.500.12000/17647">http://hdl.handle.net/20.500.12000/17647</a>

# 回転自由度を有するボクセル要素を用いたコンクリート内部の応力解析

富山 潤\*, 伊良波繁雄\*, 松原仁\*, 山城建樹\*, 入部綱清\*

Stress Analysis of Concrete using Voxel Element included the Drilling Degrees of Freedom

Jun TOMIYAMA, Shigeo IRAHA, Hitoshi MATSUBARA, Tateki YAMASHIRO, Tunakiyo IRIBE

## Abstract

Recently, the computer technology has been used in many engineering fields. And numerical simulation has been applied to the analysis on mechanical behavior of concrete. However, it is assumed that the concrete is a homogeneous material, though it is a composite material, with coarse aggregates and mortar as the main components. Then we proposed the generation method of concrete model in consideration of the coarse aggregate. This method is a quite new model, so it is created from the shape of any actual aggregates.

Also, in this paper, Voxel element with the drilling degrees of freedom is proposed, and the stress condition within the concrete that is made by proposed method is calculated by the Voxel analysis which used this element. The analytical result became excellent.

Key Words: Concrete, Composite Material, Voxel Analysis, Drilling Degrees of Freedom

### 1. はじめに

コンクリート構造物の応力解析や破壊解析, また, フレッシュコンクリートの流動解析においても粗骨材とモルタルおよびそれらの界面からなる複合材料であるコンクリートを均質連続体と取り扱う研究が多い。これはコンクリート内部の解析モデル作成の困難さが大きな原因である。しかし, 厳密にコンクリートの力学的挙動を解析するためには, 粗骨材とモルタルなどをモデル化する必要がある。粗骨材とモルタルをモデル化する一つの方法として, 実際のコンクリートを研磨と撮影を繰り返すことによって得られたデジタル画像から各モデルを抽出する方法が永井らによって示された[1]。しかし, この方法では実際のコンクリートはモデル化できるが, 研磨や画像処理に労力を要する。そこで本論文では, 簡単な操作による粗骨材形状と分布を考慮したコンクリートモデルの一作成法を示し[2], このモデルを用いたコンクリート内部の応力解析を行う方法を示す。なお, その求解法として, 解析モデル作成の容易なボクセル有限要素法を用いた。ボクセル有限要素法とは, 解析対象を包含する長方柱を小さな立方体メッシュ(ボクセル)で分割し, 実際の形状は材料定数の設定によって与える(物質の部分は要素の材料定数を0に近い値とする)[3]。

また, ボクセル解析に用いられる要素としては, 六面体一次要素や精度向上を目的に関口・菊池ら[4]が提案している応力仮定法に基づく六面体要素がある[3]。

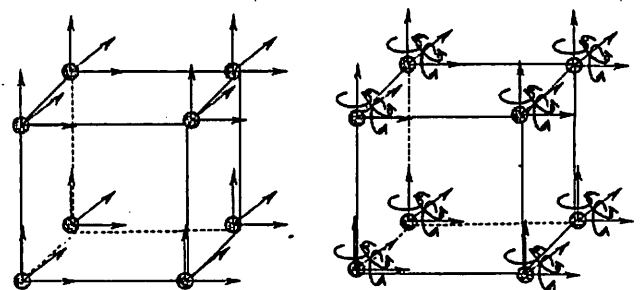
本研究では, ボクセル解析に用いる六面体要素として, 回転自由度を有する六面体要素を用いた。

本論文では, はじめに回転自由度を有する六面体要素の定式化を示し, その精度を検証する。次にコンクリートモデル作成方法を示し, コンクリート内部の応力解析を行い,

本手法の妥当性を検討する。

### 2. 回転自由度を有する六面体要素

ここでは, 関口・菊池らの開発した回転自由度を有する四辺形要素[5]を導く際に用いられた回転自由度を有する変位場を3次元に拡張し回転自由度を有する六面体要素を導く(図-1参照)。この要素は, 回転自由度を有する四面体要素[6]を導いた時の変位場を参考にすれば, 六面体一次要素内の変位を求める式(式(1))に, 式(2)に示すように頂点の回転角に関する項を追加するだけで極めて単純に定式化できる。



(a) 一次要素 (b) 回転自由度を有する要素

図-1 六面体要素

$$\begin{cases} u = \sum_{i=1}^8 u_i N_i \\ v = \sum_{i=1}^8 v_i N_i \\ w = \sum_{i=1}^8 w_i N_i \end{cases} \quad (1)$$

受理 2003年6月30日

\*環境建設工学科

(Dept. of Civil Engineering and Architecture, Faculty of Eng.)

$$\begin{cases} u = \sum_{i=1}^8 (u_i + (z-z_i)\theta_{iy} - (y-y_i)\theta_{ix})N_i, \\ v = \sum_{i=1}^8 (v_i - (z-z_i)\theta_{ix} + (x-x_i)\theta_{iz})N_i, \\ w = \sum_{i=1}^8 (w_i + (y-y_i)\theta_{ix} - (x-x_i)\theta_{iy})N_i, \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 $u, v, w$  はそれぞれ  $x, y, z$  方向の要素内変位、 $N_i$  は頂点  $i$  の一次の形状関数、 $x_i, y_i, z_i$  はそれぞれ頂点  $i$  の  $x, y, z$  方向の座標値、 $\theta_{ix}, \theta_{iy}, \theta_{iz}$  はそれぞれ頂点  $i$  の  $x, y, z$  軸まわりの回転角である。また、変位  $\{u, v, w, \theta_{ix}, \theta_{iy}, \theta_{iz}\}$  とひずみ  $\{\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}\}$  の関係より、変位—ひずみマトリックス  $[B]$  を次式のように得る。

$$[B] = \begin{bmatrix} B_1 & B_2 & B_3 & B_4 & B_5 & B_6 & B_7 & B_8 \end{bmatrix}$$

$$[B_i] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial y} & 0 & -(z-z_i)\frac{\partial N_i}{\partial y} & (y-y_i)\frac{\partial N_i}{\partial z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial z} & (y-y_i)\frac{\partial N_i}{\partial z} & -(z-z_i)\frac{\partial N_i}{\partial x} & (y-y_i)\frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 & 0 \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} & \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 & -(z-z_i)\frac{\partial N_i}{\partial x} & -(z-z_i)\frac{\partial N_i}{\partial y} + (y-y_i)\frac{\partial N_i}{\partial y} & (y-y_i)\frac{\partial N_i}{\partial y} & 0 & 0 \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial x} & (y-y_i)\frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ (z-z_i)\frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 & 0 & 0 & -(y-y_i)\frac{\partial N_i}{\partial x} & (x-x_i)\frac{\partial N_i}{\partial y} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (x-x_i)\frac{\partial N_i}{\partial y} & 0 & 0 & 0 \\ -(x-x_i)\frac{\partial N_i}{\partial z} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ (z-z_i)\frac{\partial N_i}{\partial y} & (x-x_i)\frac{\partial N_i}{\partial x} + (y-y_i)\frac{\partial N_i}{\partial y} & (x-x_i)\frac{\partial N_i}{\partial z} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -(x-x_i)\frac{\partial N_i}{\partial y} & (x-x_i)\frac{\partial N_i}{\partial z} & (x-x_i)\frac{\partial N_i}{\partial z} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -(x-x_i)\frac{\partial N_i}{\partial x} + (z-z_i)\frac{\partial N_i}{\partial z} & -(y-y_i)\frac{\partial N_i}{\partial z} & -(y-y_i)\frac{\partial N_i}{\partial z} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

最後に、要素剛性マトリックス  $[K]$  は、六面体一次要素同様に次式を得る。

$$[K] = \int_V [B]^T [D] [B] dV \quad (4)$$

ここで、 $T$  は転置記号、 $V$  は体積、 $[D]$  は、応力—ひずみマトリックスである。なお、体積積分はガウス積分を用い8点積分とした。

### 3. 複合コンクリートモデル作成法

#### 1) 粗骨材モデル作成法

ここでは、実際の粗骨材を元に粗骨材モデルを作成する方法を示す。

コンクリート中に含まれる粗骨材は、実際の粗骨材のデジタル画像から3次元的に粗骨材の節点座標を拾うことにより、座標データとして取り扱った。以下に詳しい粗骨材データ作成手順を示す。

- a) 粗骨材を選定する。
- b) デジタルカメラを固定し、粗骨材の正面、左右側面、背

面の全体像を撮影する。

- c) b)より得たデジタル画像から、粗骨材形状の節点座標、表面パッチを作成する。

c)で作成する節点座標データは、1枚の画像ではその成分を決定することができない。そこで、本研究では、4枚のデジタル画像の空間座標系を唯一決定し、2枚のデジタル画像から一つの節点座標を決定した。表面パッチに関しては、粗骨材の隣り合う側面の共有稜線間を頂部から底部にかけて順に交差させ、パッチ間に不整合が生じないように作成した。

以上の作業はすべてプログラム上で一連の流れとして行うことができ、すべての操作をマウスクリックのみで行えるように設定した。この操作状況を図-2に示し、本手法で得られた粗骨材形状モデルの一部を図-3に示す。

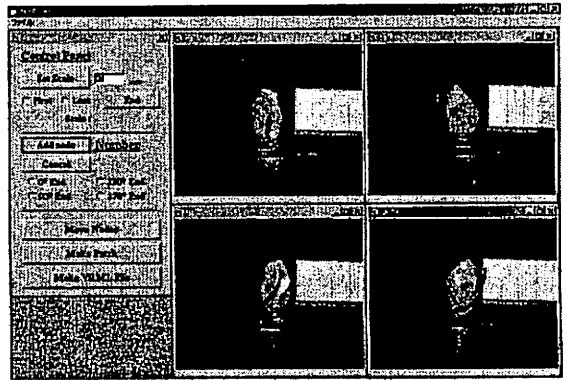
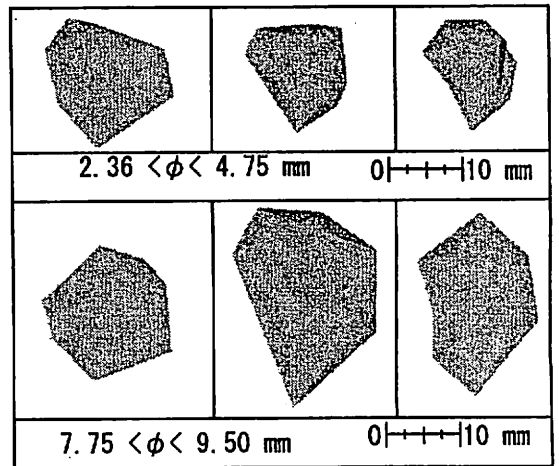


図-2 粗骨材形状決定プログラム



$\phi$  : 粒径

図-3 粗骨材形状モデル

#### 2) コンクリートモデル作成法

以下に前節で作成した粗骨材モデルを用いたモルタル—粗骨材二相複合コンクリートモデルの作成法を示す。

- a) 粗骨材の粒度試験を行う。
- b) CAD を用いて解析領域(コンクリート試験体領域)を作成する。
- c) 粒度分布から、挿入する粗骨材量を計算する。
- d) 解析領域内に粗骨材を挿入する。

e) c)の粗骨材量になるまでd)を繰り返す。

d)の作業で、ランダムな粗骨材分布のコンクリートモデルを作成するが、挿入方法は、まず粗骨材形状データの中から粒形の大きい物から順にランダムに選択する。つぎに、この選択した粗骨材にランダムな回転量及び移動量を与え、粗骨材位置を決定する。なお、挿入する際、先に挿入されている粗骨材と交差判定を行い、粗骨材同士が重なり合わないようにする。

本手法により作成したコンクリートモデルを図-4に示す。

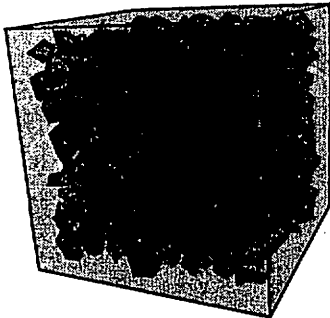
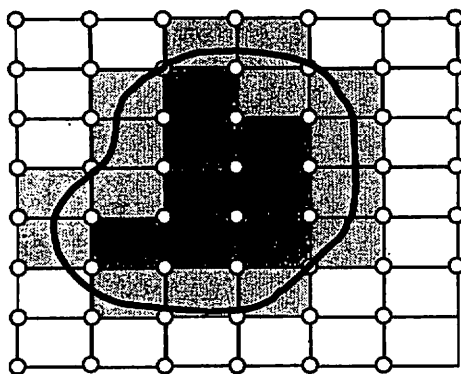


図-4 コンクリートモデル

#### 4. ボクセル解析における材料定数の考え方

本手法では、モルタルと骨材の界面を簡易的に図-5に示すようにボクセル要素を構成する節点が一つでも異なる材料を示す場合を界面要素とした。



□モルタル ■骨材 ▣界面

図-5 ボクセル要素への材料定数の貼り付け

図-5では、非常に粗めのボクセル要素(2次元表示)となっており、界面領域が広く取り扱われているが、要素を細かくすることで、より実際の粗骨材形状に近づけることができる。また、積分点ごとに材料特性を変えることも考えられるが、今後の課題である。

#### 5. 数値解析例(等方性材料と仮定)

##### 1) 回転自由度を有する六面体要素の精度評価

ここでは、回転自由度を有する六面体要素の精度を評価するために、a) 片持ちはり、b) 正方形板を対象に解析を行った。

##### a) 片持ちはり

図-6に示す正方形断面の片持ちはりの自由端に鉛直単

位荷重を載荷したときの自由端でのたわみについて精度評価を行った。

解析は、軸方向長さ $l$ と高さ $h$ の比(アスペクト比)が1:2, 1:4, 1:10の3ケースで行った。図-7に自由端でのたわみの正規化変位(計算値を理論値で除した値)と節点数の関係を示す。比較のために六面体一次要素を用いた解析結果も示す。

図-7より、回転自由度を有する要素は全てのケースで一次要素と比較し精度が良いのがわかる。特にアスペクト比が大きいほどその差は顕著に表れている。

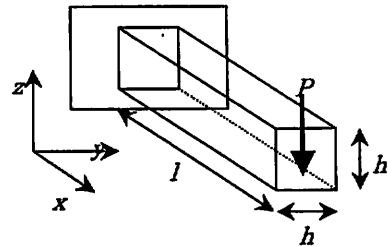
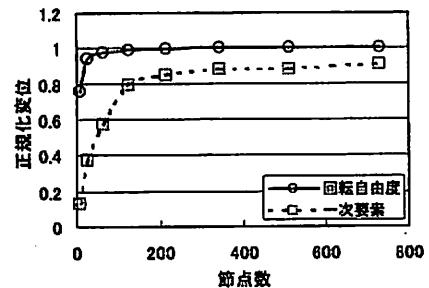
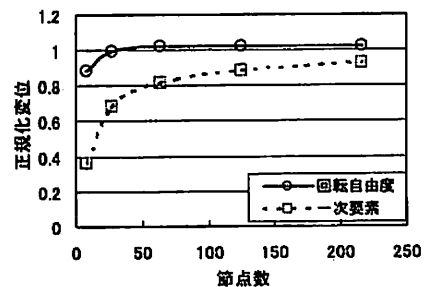


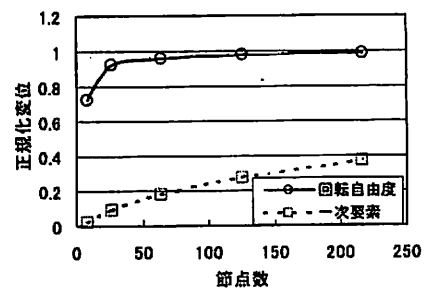
図-6 自由端単位荷重を受ける片持ちはり



(a) 1:2



(b) 1:4



(c) 1:10

図-7 精度比較

b) 正方形平板

図-8 に示す正方形平板(100×100×1)に鉛直方向に等分布荷重が作用した場合の解析例を示す。精度評価には板中央での最大たわみを対象に行った。なお、板厚方向は1分割としている。

図-9 に最大たわみの正規化変位(計算値を理論値で除した値)と節点数の関係を示す。比較のために六面体一次要素を用いた解析結果も示す。

図-9より板厚の薄い問題では、回転自由度を有する要素は一次要素に比べ非常に有効であることがわかる。

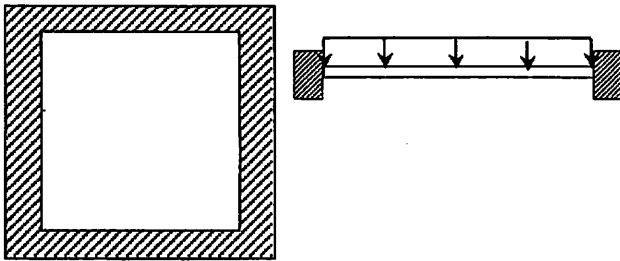


図-8 等分布荷重を受ける正方形平板

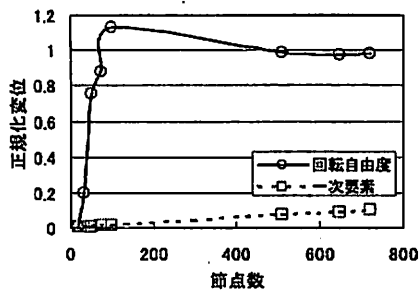


図-9 精度評価

2) 粗骨材を考慮したコンクリート内部の応力解析

ここでは、本手法の妥当性を検討するために図-10 に示す立方体(100×100×100mm)のコンクリートを考え、粗骨材をランダムに10個入れたモデル(model1)と1000個入れたモデル(model2)を考え、底面固定で上面に上向きに等分布荷重を載加した。なお、1000個入れたモデルは体積で粗骨材が31.2%を占めていることを意味する。

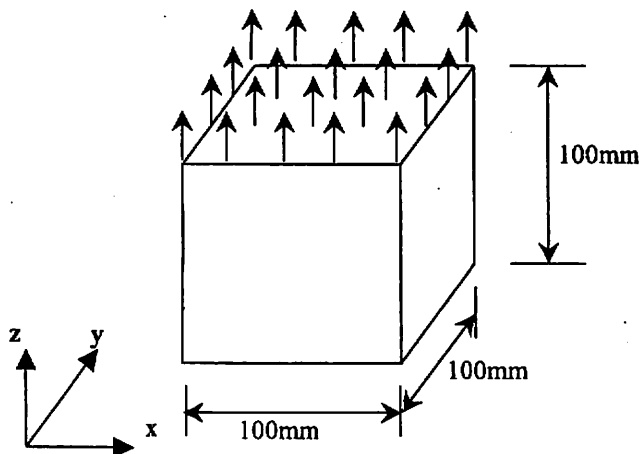
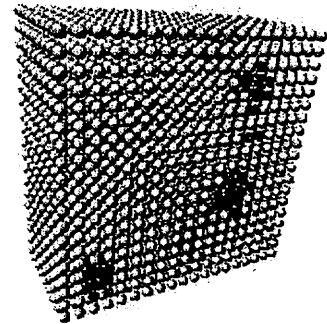
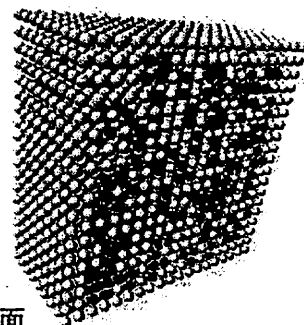


図-10 解析対象コンクリートの寸法

図-11 に  $x=50\text{mm}$  のコンクリート断面図を示す。



(a) model1(粗骨材数 10)



$x=50\text{cm}$  の断面  
黒:粗骨材 白:モルタル

(b) model2(粗骨材数 1000)

図-11 粗骨材を考慮したコンクリートモデル

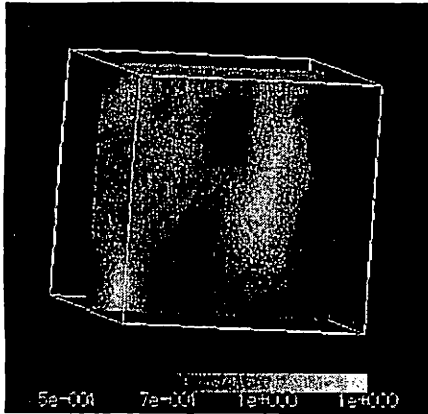
また、表-1 に解析に用いたモルタル、骨材および界面の材料特性を示す。

表-1 材料特性

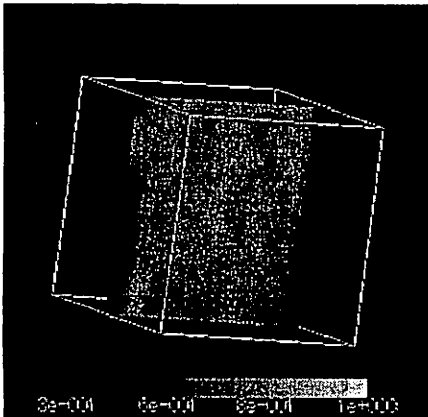
	ヤング率	ポアソン比
粗骨材	70GPa	0.2
モルタル	25GPa	0.2
界面	47GPa	0.2

解析結果を図-12 に図-11(a),(b)で示した  $x=50\text{cm}$  の断面の最大主応力分布を示す。比較のためにモルタルのみの解析結果も同時に示す。なお解析は 5832 要素, 41154 自由度と比較的粗めの要素分割で行った。

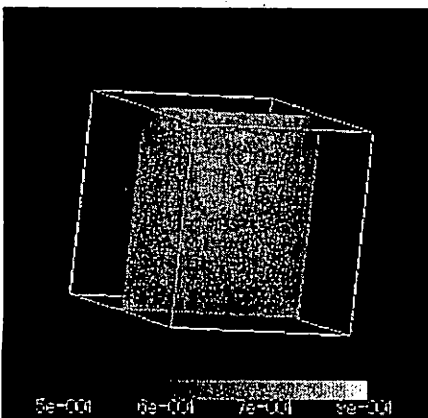
図-12(a)から粗骨材部分で最大主応力がモルタル部に比較し高くなっていることがはっきりと分かる。図-12(b)からは今回の解析に用いた要素分割が比較的粗めであるため、厳密なモルタルと粗骨材の違いは現れていないが、図-12(c)のモルタルのみの主応力分布に比べコンクリート内部が複雑な応力分布となっていることがわかり、粗骨材分布を考慮することの重要性が確認できる。



(a) modell



(b) model2



(c)モルタルのみ

図-12 最大主応力分布

- 2) 回転自由度を有するボクセル要素(六面体要素)の定式化を示し, 精度的検討を行った結果, 六面体一次要素に比較し極めて精度が高いことが確認できた.
- 3) 粗骨材, モルタル, それらの界面を考慮し, コンクリート内部の最大主応力状態をボクセル解析により解析した結果, 粗骨材の有無, また粗骨材量の違いにより極めて異なる応力状態を示すことが確認できた.

今後の課題として, 要素分割を密にし, 界面のモデル化を行う. また, 外国産骨材や再生骨材などの多種多様な粗骨材を使用したコンクリートの強度予測について検討する予定である. さらに粗骨材分布を考慮した場合のコンクリート中への塩分浸透予測に関する研究も行う予定である.

#### 謝辞

本研究を行うにあたり, 琉球大学工学部環境建設工学科の山田義智助教授, 仲座栄三助教授, 東京大学の鈴木克幸助教授, 矢川元基教授に有益なご意見, ご指導を賜りました. ここに記して感謝の意を示す.

#### 参考文献

- [1]永井, 山田, 和田: 三次元実画像データに基づくコンクリート材料の有限要素解, 日本建築学会構造系論文集, 第509号, pp.77-82, 1998.7
- [2]松原仁, 伊良波繁雄, 富山潤, 山城建樹, 入部綱清, 稲葉正和, 矢川元基: 骨材分布を考慮したコンクリートの3次元フリーメッシュ法解析, 計算工学講演論文集, Vol.8, No.1, pp.119-122, 2003.5
- [3]藤井大地, 鈴木克幸, 大坪英臣: ボクセル有限要素法を用いた構造物の位相最適化, Transaction of JSCES, Paper No.20000010
- [4]関口美奈子, 菊池昇: 混合的な有限要素剛性マトリックスの導き方に関する一考察—Clough 1960年の論文を中心として—, 計算工学講演会論文集, 4(1), pp.131-134, 1999
- [5]Minako Sekiguchi, Noboru Kikuchi: RE-Examination of Membrane Elements with Drilling Freedom, Fifth World Congress on Computational Mechanics, July 7-12, 2002
- [6]富山潤, 伊良波繁雄, 松原仁, 稲葉正和, 矢川元基: 回転自由度を有する四面体要素を用いたフリーメッシュ法の並列化, 計算工学講演論文集, Vol.8, No.1, pp.115-118, 2003.5

#### 5. まとめ

本論文では, 容易に粗骨材とモルタルを表現できるコンクリートモデル作成する方法を示した. また, そのモデルを用いた解析法として回転自由度を有する高精度ボクセル要素を用いたボクセル解析法を示し, コンクリート内部の応力解析を行った

上記の結果をまとめると下記の通りとなり本手法の妥当性が示された.

- 1) 粗骨材とモルタルを表現できるコンクリートモデルを容易に作成できることを示した.