

論文 ボクセル解析による粗骨材を考慮したコンクリートの破壊解析

伊良波 繁雄^{*1}・富山 潤^{*2}・松原 仁^{*3}・山城 建樹^{*3}

要旨：コンクリートは、モルタル、粗骨材などから構成される複合材料である。その力学的特性を粗骨材の影響を直接的に考慮して解析的に取り入れることは極めて重要なことである。そこで本研究では、コンクリートの破壊挙動を解析的に求めることを目的とし、筆者らが提案したコンクリート内部の粗骨材の形状、寸法、分布を考慮した二相コンクリートモデルとボクセル有限要素法を組合すことでコンクリート内部の複雑な破壊挙動の解析が容易に行えることを示す。基礎的検討として、円柱供試体の割裂試験の解析を行った。

キーワード：ボクセル有限要素法，粗骨材，二相コンクリートモデル，引張軟化

1. はじめに

近年、コンクリートの破壊挙動を解析的に求める研究が盛んに行われている。しかし、その大半が複合材料であるコンクリートを均質材料として扱ったものである。一方で、粗骨材の影響を考慮した解析も見られるが、その多くが簡易的な骨材形状でモデル化したものであり、しかも二次元解析が主である。実際のコンクリート内部では複雑な粗骨材形状、寸法、分布が考えられ、その破壊挙動も極めて複雑で3次元的なものであると予想される。このような複雑な破壊挙動を示すコンクリートの力学的特性を粗骨材の影響を考慮に入れて解析的に求めるということは極めて重要なことである。

そこで本研究では、コンクリートの破壊挙動を解析的に求めることを目的とし、筆者らが開発したコンクリート内部の粗骨材の形状、寸法、分布を考慮した二相コンクリートモデル¹⁾とボクセル有限要素法²⁾を組合すことでコンクリート内部の複雑な破壊挙動の解析が容易に行えることを示す。また、解析方法として、引張軟化を考慮し、軟化以降のスナップバックのような不安定現象が生じて安定した解析が可能な動的釣合式を用いた増分法を用いた³⁾。また、ひ

び割れモデルは、ひび割れ帯モデルを採用した。

2. ボクセル有限要素法および二相コンクリートモデル作成法

2.1 ボクセル有限要素法²⁾

(1) ボクセル有限要素法

ここでは、ボクセル有限要素法について簡単に説明する。ボクセル有限要素法では、解析領域を図-1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。実際の解析形状は材料定数による表現、有限被覆法⁴⁾やX-FEM的な処理⁵⁾による表現が可能である。前者については、領域外で弾性係数をゼロに近い値とするなどの処理を行う。また、後者については要素内の不連続性を考慮する手法であるが、本論文では自由境界面のみに限定することにし、その具体的な説明は次項で行う。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剛性マトリックスの作成は材料の種類の数だけで良い。このため、要素剛性マトリックス作成に要する時間を大幅に短縮でき、全体剛性マトリックス作成に関して従来の有限要素法よりも有利である。特に大規模解析の場合にその差は顕著に表れる。

*1 琉球大学 工学部環境建設工学科教授 博士(工学) (正会員)

*2 琉球大学 工学部環境建設工学科助手 博士(工学) (正会員)

*3 琉球大学 大学院理工学研究科 修士(工学) (正会員)

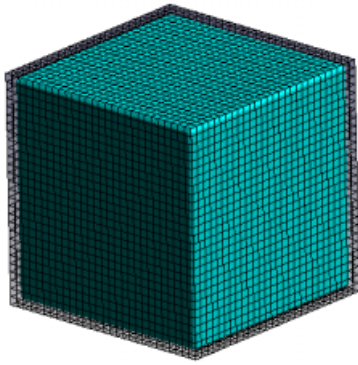


図-1 ボクセル有限要素法の解析領域概念図

(2) 自由境界面の処理

ボクセル解析では、ボクセル要素の解像度が低い場合に領域形状を厳密に表現できない。このため、有限被覆法⁴⁾やX-FEM⁵⁾との組み合わせなどの対処法が研究されている。本研究では後者のX-FEMとの組み合わせで自由境界面を表現している。具体的には次に示す通りである。

要素内部の変位場 U を次のように仮定する。

$$U = \sum_{i=1}^{Nnode} N_i \Phi U_i \quad (1)$$

ここで、 N_i は要素頂点 i の形状関数⁵⁾、 Φ は領域内部で 1、外部で 0 となるようなステップ関数である。また、 U_i は要素頂点 i の変位、 $Nnode$ は要素を構成する節点数 ($Nnode=8$) である。このように表記することで要素内変位の不連続性を表現することが可能となる。しかしながら、自由境界面付近では、剛性マトリックスに全く関与しない節点も存在するため、文献 5) と同様に節点属性を以下のように定義し、全く剛性マトリックスに関与しない節点をデッドノード(Dead Node)と称し解析から取り除いた(図-2 参照)。

- 1 つ以上の境界ボクセルに属する節点を Enriched Node⁵⁾ とする (要素内の不連続性を考慮)。
- どの積分評価からも参照されない節点を Dead Node とする (削除)。
- それ以外の節点は、通常節点 (Normal Node) である。

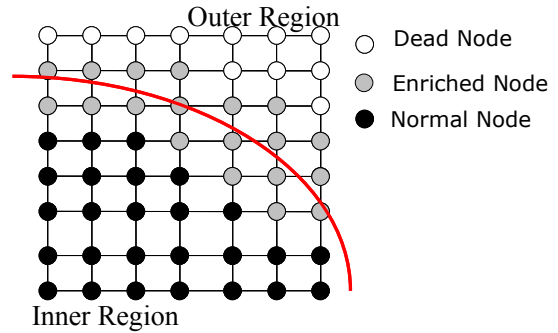


図-2 節点の属性

2.2 二相コンクリートモデル作成法¹⁾

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複雑な粗骨材形状およびその分布のモデル化が困難なためである。しかし、コンクリートの力学的挙動を厳密に解析するためには、少なくとも粗骨材とモルタルおよび界面をモデル化する必要がある。

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粗骨材、モルタルの各モデルを抽出する方法が永井ら⁶⁾、安和ら⁷⁾によって示された。しかし、この方法では実際のコンクリートをモデル化できるが、研磨や画像処理に労力を要する。そこで本研究では、文献 1) に示す簡単な操作による二相コンクリートモデル (コンクリートモデル) 作成方法を採用する。以下にその方法について簡単に示す。

(1) 粗骨材モデル作成法

ここでは、二相コンクリートモデルで使用する粗骨材モデルの作成方法を説明する。

コンクリート中に含まれる粗骨材に関しては、実際の粗骨材のデジタル画像から 3 次的に粗骨材の節点座標を拾うことにより、ポリゴンデータとして取り扱った。

粗骨材モデル作成について簡単に示す。

まず、実際の粗骨材を標準的な網ふるい (JIS Z

8801) を用いて、粗骨材を採取し、四分法により選定する。選定した粗骨材側面の直交する4方向をデジタル画像に変換し(図-3参照)、図-4に示すように実際の粗骨材形状に近い粗骨材モデル(ポリゴンデータ)を作成する。これらの処理を大きさの異なる粗骨材について適当な数行うことでコンピュータ内部に仮想的に粗骨材置き場が再現できる。

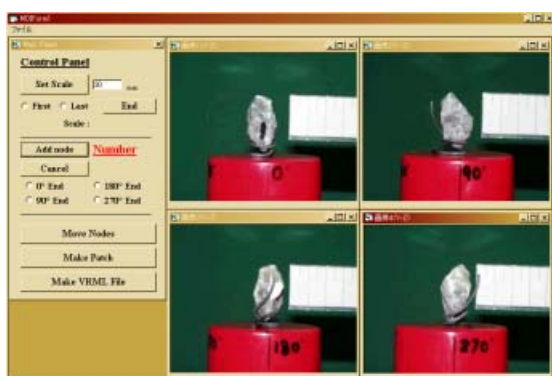


図-3 粗骨材形状決定プログラム

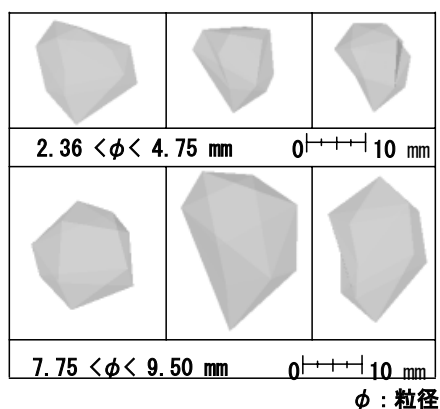


図-4 粗骨材形状モデル

(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-粗骨材二相コンクリートモデルの作成法を簡単に示す。

(1)で作成した大きさの異なる粗骨材モデルを配合設計に用いる粗骨材の粒度分布を考慮に入れ、大きさ、回転量、挿入位置などをランダムに制御し、解析領域(モルタル部分)に挿入することで容易に粗骨材を考慮した解析モデルを作成することができる(図-5参照)¹⁾。

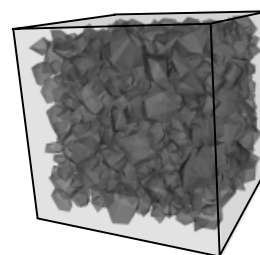


図-5 二相コンクリートモデル

(3) ボクセル解析における材料定数の考え方

本研究ではボクセル要素を構成する節点位置と二相コンクリートモデルの粗骨材-モルタルデータを比較し、ボクセル要素を構成するすべての節点がモルタルなら、その要素の材料定数をモルタルとし、また、すべての節点が粗骨材なら、その要素の材料定数を粗骨材とした。また、一つの節点でも異なる材料の領域にあれば、その要素は境界要素(界面)と簡易的に仮定した(図-6参照)。従って、本解析手法は界面破壊も考慮可能である。

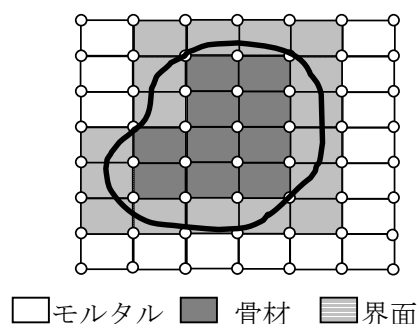


図-6 解析モデルへの材料データ貼り付け

3. 解析方法

本研究では、解析方法として引張軟化を考慮した動的釣合い式を用いた増分法を採用した³⁾。この方法は、スナップバックが生じるような不安定現象が生じた場合でも解析可能である。

3.1 コンクリートのひび割れモデル

破壊力学を考慮したコンクリートのひび割れモデルとして、仮想ひび割れモデルとひび割れ帯モデルが代表的である⁸⁾。本手法は、ひび割れ方向を任意に求めることのできる図-7に示すひび割れ帯モデルを用いた。

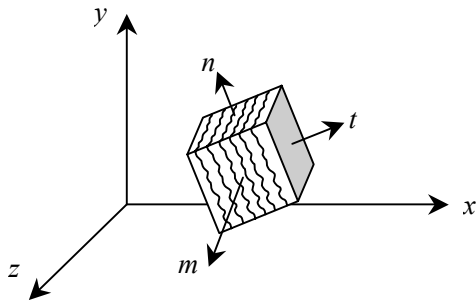


図-7 ひび割れ帯モデル

ひび割れは、最大引張主応力がコンクリートの引張強度(F_t)に達すると最大引張主応力と直行する方向に生じるとした。引張軟化モデルとして、図-8 に示す 1/4 モデルを用い、ひび割れ発生後の応力-ひずみ関係は図-7 に示す局座標系 t-n-m に対して次式を用いた。

$$\begin{Bmatrix} d\sigma_t \\ d\sigma_n \\ d\sigma_m \\ d\tau_{tm} \\ d\tau_{nm} \\ \tau_{mt} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{cr} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & E_c & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & E_c & 0 & 0 & 0 \\ & & & \beta'G & 0 & 0 \\ & sym & & & \beta'G & 0 \\ & & & & & \beta'G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\varepsilon_t \\ d\varepsilon_n \\ d\varepsilon_m \\ d\gamma_{tm} \\ d\gamma_{nm} \\ d\gamma_{mt} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

ここで、 E_c はヤング係数、 E_{cr} はひび割れ発生後の引張軟化特性を示し、応力状態に応じ引張軟化モデルの第一勾配、第二勾配時のそれぞれで、

$$\begin{cases} E_{cr} = E_c \cdot E_{cr1} / (E_{cr1} + E_c) \\ E_{cr} = E_c \cdot E_{cr2} / (E_{cr2} + E_c) \end{cases} \quad (3)$$

とした。 $\beta'(=1.0)$ はせん断弾性低減係数、 G はせん断弾性係数である。なお、本解析ではモルタル、界面に上記のひび割れモデルを適応した。

また、本解析では、応力評価点として積分点 (8 点積分) ごとに行い、ひび割れ評価も積分点ごとに行った。

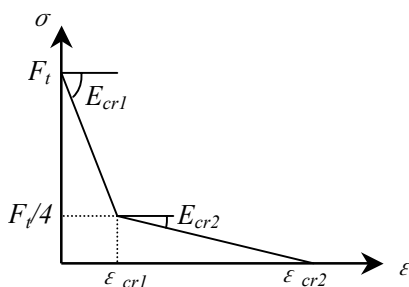


図-8 引張軟化モデル (1/4 モデル)

3.2 ニューマーク β 法による増分法³⁾

筆者らは、引張軟化解析においてスナップバックなどの不安定現象が生じた場合でも安定した解析が可能な動的釣合い式を用いた増分法を示した³⁾。ここでは解析に用いた基本式を示す。

減衰項を省略した増分型運動方程式を空間に関しては有限要素法で、時間に関しては時間積分法の一つであるニューマーク β 法⁹⁾ で離散化を行うと次式を得る。

$$\begin{aligned} & \left[\frac{1}{\beta \Delta t^2} [M] + [K] \right] \{ \Delta u \} \\ & = \{ \Delta P \} + [M] \left\{ \frac{1}{\beta \Delta t} \{ \dot{u} \} + \frac{1}{2\beta} \{ \ddot{u} \} \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 Δ は増分記号を表す。 $[M]$ 、 $[K]$ は、それぞれ、ボクセル要素 (アイソパラメトリック 8 節点六面体要素) の集中質量マトリックス、剛性マトリックスである。また、 u は節点変位ベクトル、 \dot{u} 、 \ddot{u} は節点の速度、加速度ベクトル、 P は荷重ベクトルである。また、 $\beta=0.5$ である。

4. 数値解析例

ここでは、本解析手法の妥当性を検討するために円柱供試体の割裂試験の解析を示す。

はじめに本手法において粗骨材の影響を考慮したコンクリート内部の複雑な応力分布を表現可能かどうか評価するために弾性解析を行う。次に割裂試験におけるひび割れ解析を示す。

解析に用いた材料特性を表-1 に示す¹⁰⁾。界面の物性値が破壊挙動へ大きく影響することが言われているが、今回の解析では引張強度 F_t および破壊エネルギー G_f はモルタルの 1/2 と仮定した。なお、今回の解析では粗骨材は破壊しないとした。また、図-9 に解析に用いた円柱供試体モデル (高さ $l=100\text{mm}$ 、直径 $d=100\text{mm}$) を示す。

(1) 弾性解析

図-10 に境界条件と $z=25, 50, 70\text{mm}$ 位置での断面の粗骨材分布を示す。また、その断面付近の荷重軸荷軸での σ_x 分布 (積分点での応力であるため断面付近と表現) を図-11 に示す。ただし、図-11 で $z=25, 50, 70$ と表示している。

表-1 コンクリートの材料特性

| | E_c (N/mm^2) | ν | F_t (N/mm^2) | G_f (N/mm) | 密度 (kg/m^3) |
|------|-----------------------|-------|-----------------------|---------------------|--------------------|
| モルタル | 20000.0 | 0.21 | 2.214 | 0.1 | 2300 |
| 粗骨材 | 55122.5 | 0.15 | — | — | 2300 |
| 界面 | 15000.0 | 0.21 | 1.107 | 0.05 | 2300 |

※重力加速度 $9.8m/s^2$

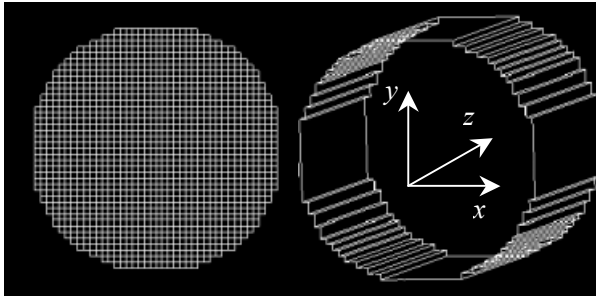


図-9 円柱供試体モデル
(52,280 要素, 161,799 自由度)

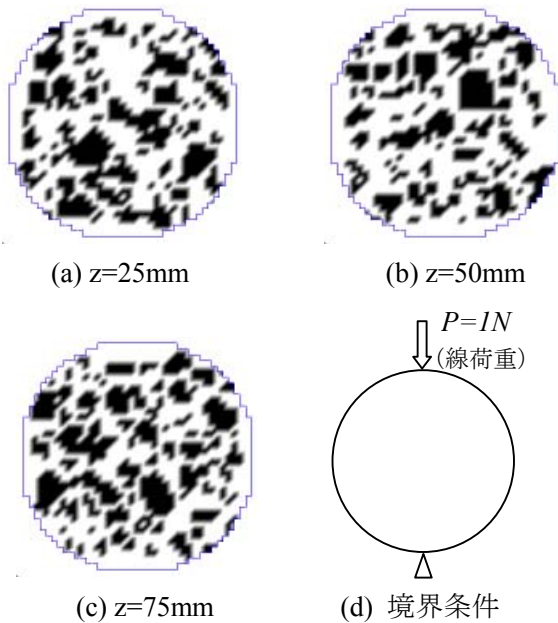


図-10 境界条件と粗骨材分布 (黒: 粗骨材)

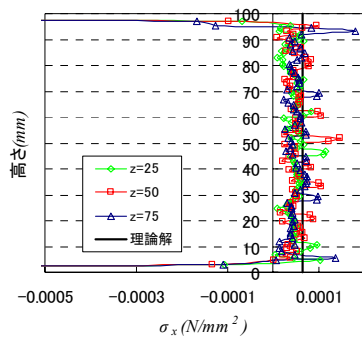


図-11 载荷軸の σ_x 分布

図-11の結果より, 本解析結果は3つの断面とも粗骨材の影響を受けて理論値($\sigma_x = 2P / \pi dl$)を境にばらついた複雑な応力分布となっていることが確認できる。

(2) ひび割れ解析

解析は変位制御で行い, 変位増分 $5 \times 10^{-4} mm$ を与えた。また, 時間増分 Δt は 0.01 秒とした。

解析結果としてモルタルのみと二相コンクリートモデルを使用した場合の荷重-変位曲線を図-12に, また, 図-13, 図-14に図-12に示す荷重レベルでのひび割れ進展図を示す。

ひび割れは積分ごとに評価しているため, ひび割れと判定された積分点の位置をプロットし, ひび割れを表現している。なお, 粗骨材は図の煩雑さを避けるため表示していない。

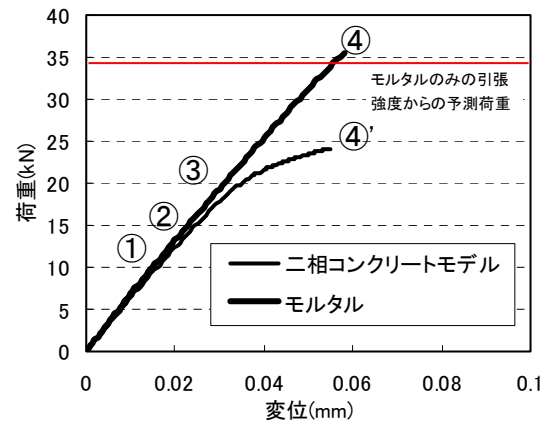


図-12 荷重—変位曲線

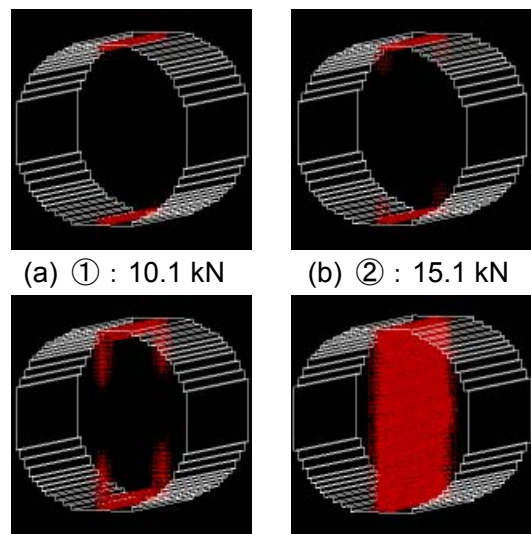


図-13 ひび割れ進展図 (モルタル)

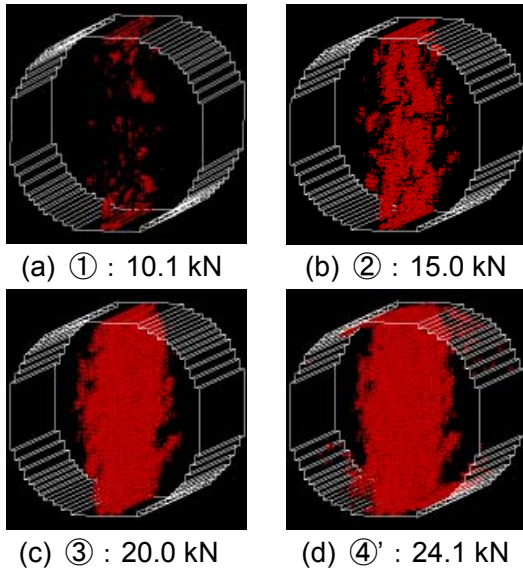


図-14 ひび割れ進展図（コンクリートモデル）

図-12より、モルタルとコンクリートモデルの結果では、最大荷重が異なっている。これは今回、界面の強度をモルタルの1/2としているため、コンクリートモデルを用いた解析では界面から破壊が進行していることが原因である。なお、解析より得られた最大荷重から求めた割裂（引張）強度は、モルタルはモルタルのそれと、コンクリートモデルはモルタル強度と界面強度の平均値にほぼ一致する。従って、構成材料の物性値がわかればコンクリートとしての破壊挙動を解析的に予測可能であると考えられる。

図-13, 14より、モルタルは、载荷軸上に集中してひび割れが発生・進展しているのに対し、コンクリートモデルだと粗骨材を避け、界面で発生・進展した複雑な破壊挙動を示した。このような破壊挙動はモルタルの強度に比べ粗骨材の強度が大幅に強い場合、実際に観察される。

5. まとめ

本研究では、粗骨材を考慮したボクセル有限要素法によりコンクリートの破壊解析を示した。結果と今後の課題をまとめると次の通りとなる。

- (1) 弾性計算より、粗骨材の影響を考慮した応力解析が可能であることが示された。
- (2) ひび割れ進展解析より、粗骨材の影響を考慮した破壊を表現可能であることが示さ

れ、モルタル、骨材、界面の物性値がわかればコンクリートとしての破壊挙動を解析的に予測可能であると考えられる。

- (3) 本手法では界面破壊も考慮可能であるが、粗骨材面に沿った破壊挙動ではないので、今後考慮すべき課題である。また、実験結果との比較も行う必要がある。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 富山潤, ほか: フリーメッシュ法によるコンクリートの引張破壊挙動の解析, コンクリート工学論文集, Vol.11, No.1, pp.29-38, 2000
- 4) 鈴木克幸, ほか: ボクセル被覆による3次元ソリッドのメッシュレス解析, 土木学会応用力学論文集, Vol.1, pp.215-222, 1998
- 5) 長嶋利夫: ボクセル型メッシュデータを用いた応力解析手法の開発, ものづくり情報技術統合研究(第2回), 理化学研究所, pp.144-152, 2002.9
- 6) 永井学志, ほか: 3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析, 日本建築学会構造系論文集, No.509, pp.77-82, 1998.7
- 7) 安和守史, ほか: 3次元フリーメッシュ法を用いたコンクリートの破壊解析手法に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.24, No.2, pp.55-56, 2002
- 8) JCI 破壊力学の応用研究会: 破壊力学の応用研究委員会報告集, 日本コンクリート工学協会, 1993.10
- 9) 戸川隼人: 有限要素法による振動解析, サイエンスライブラリー情報電算機=33, サイエンス社, 1974.10
- 10) 富山潤: コンクリートの引張破壊挙動に関する解析的研究, 琉球大学博士論文, 2000.