

論文 アルカリ骨材反応によるひび割れ挙動に関する解析的研究

山城 建樹^{*1}・富山 潤^{*2}・伊良波 繁雄^{*3}・神田 康行^{*1}

要旨：コンクリート構造物の耐久性と関連する劣化現象の一つとして、セメントペーストと骨材の相互作用によって生じるアルカリ骨材反応がある。アルカリ骨材反応によるひび割れは、コンクリートが無筋に近い場合はコンクリート表面に亀甲状のひび割れが生じ、鉄筋使用量の多い構造物や PC 構造物は主鉄筋方向へのひび割れが卓越すると報告されている。本研究は、コンクリートを複合材料と仮定し、アルカリ骨材反応によるコンクリートのひび割れを三次元ボクセル有限要素法によってシミュレートし、アルカリ骨材反応に対する鉄筋拘束の効果を数値解析的に検討する。

キーワード：アルカリ骨材反応，骨材，ボクセル有限要素法

1. はじめに

近年、土木構造物は多種多様な環境に建設され、その建設材料の中でも主材料となるコンクリートは様々な構造物に使用されている。そのコンクリート構造物の耐久性と関連する劣化現象の一つとして、セメントなどに含まれるアルカリ分とある種の反応性骨材が長期にわたって化学反応を起こし、コンクリートやモルタルに有害な膨張を生ずるアルカリ骨材反応がある。コンクリート構造物の耐久性に関しては古くから研究が進められており、様々な研究報告が成されている。アルカリ骨材反応に対しても、無筋コンクリート構造物や鉄筋使用量の少ない構造物では亀甲状のひび割れを生じ、鉄筋使用量の多い構造物や PC 構造物では、主鉄筋や PC ケーブル方向にひび割れが生じることが知られている。また、アルカリ骨材反応が進行すると、ひび割れの発生によって鉄筋の腐食が生じやすくなるばかりでなく、コンクリートの強度も低下し、とくにヤング率の低下は著しく、正常なコンクリートの 1/3 程度に低下することがあると報告¹⁾されている。このようにコンクリート構造物に生じるひび割れは、構造物の耐久性低下

を加速させる原因の一つであり、コンクリートのひび割れ挙動を把握することは、構造物の耐久性を考慮する上で重要な要素の一つであると考えられる。

本研究は、アルカリ骨材反応によるコンクリートのひび割れを三次元ボクセル有限要素法によってシミュレートし、アルカリ骨材反応に対する鉄筋拘束の効果を数値解析的に検討する。

2. ボクセル有限要素法

従来の有限要素法は、複雑形状を有する三次元ソリッドに対して、四面体要素を用いた場合でも要素生成が困難となる状況が少なくないため、形状の簡略化や不均一さの削除などを行った簡略化モデルを使用している。本研究で解析対象としているコンクリートも、その微視構造は三次元的で複雑な形状を有しているため、内部構造を解析的に考慮する際には、粗骨材形状や粗骨材量の増加などに伴い、要素生成が困難となる。

そこで本研究では、非常に複雑な形状の三次元ソリッド・モデルに対しても容易に、かつ確実に要素生成を行え、デジタル画像の基本単位

*1 琉球大学大学院 理工学研究科 工修 (正会員)

*2 琉球大学 工学部環境建設工学科助手 工博 (正会員)

*3 琉球大学 工学部環境建設工学科教授 工博 (正会員)

であるボクセルを利用したイメージベースモデリングと有限要素法を融合した解析手法であるボクセル有限要素法²⁾を求解法として採用した。また、ボクセル有限要素法では解析モデルの作成も容易であり、その作成方法としては、三次元CADにより生成されたソリッド・モデルに対しボクセル分割を行う方法や、CT スキャンなどによる断面写真を重ね合わせることでボクセルモデルを作成する方法³⁾などがあり、三次元形状のボクセル分割は非常に複雑なCADモデルに対しても容易にかつ、確実に行うことができる。さらに、ボクセル要素の形状は全て同一であることから、要素係数マトリックスの作成が材料数分で良く、要素係数マトリックスの作成に関して従来の有限要素法よりも有利であり、大規模解析の際にはその差が顕著に表れる。ここで、図-1 にボクセル有限要素法の解析領域の概念図を示す。

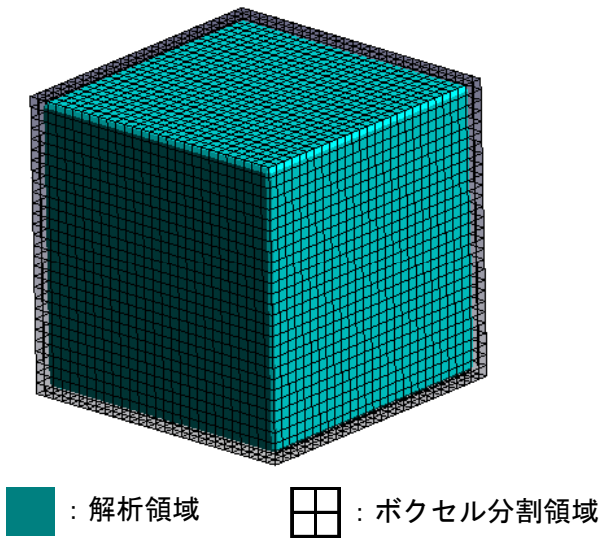


図-1 ボクセル有限要素法の解析領域概念図

3. コンクリートモデル作成方法

本来、コンクリートはセメント、水、細骨材、粗骨材および必要に応じて加えられる混和材などにより構成される多相系材料であるが、一般的に数値解析分野においては均質材料として取り扱われている。

本研究では、コンクリートを粗骨材、モルタル、およびこれらの界面より構成される複合材

料として取り扱い、コンクリートを三相複合材料としてモデル化した。ここで、本研究で数値解析に用いた三相コンクリートモデルの作成方法について述べる。

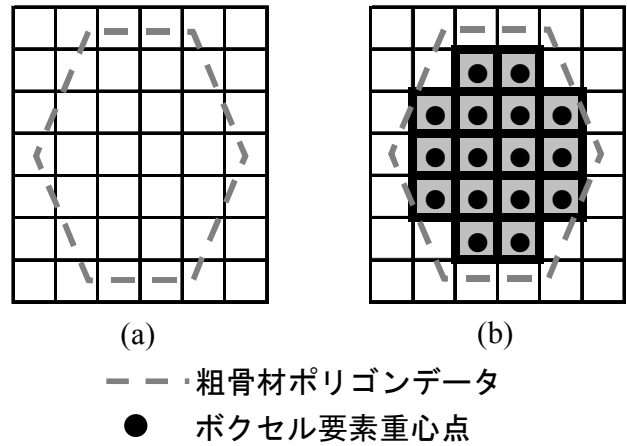


図-2 粗骨材ボクセル要素の作成方法

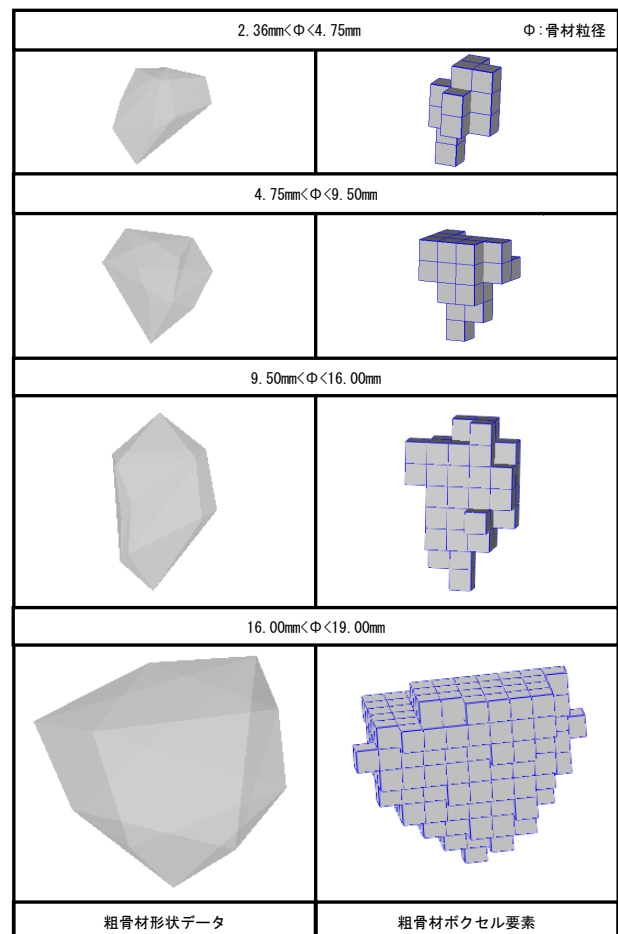


図-3 粗骨材ポリゴンデータと粗骨材ボクセル要素

まず、筆者らが作成した粗骨材形状データ取得プログラム⁴⁾を使用し、粗骨材のデジタル画像から粗骨材のポリゴンデータを作成する。その粗骨材ポリゴンデータを用い、**図-2(a)**に示すように、ボクセル要素（ここでは簡便のため、ピクセル要素で表示）に分割されたある領域内に粗骨材ポリゴンデータを対応させる。次に、**図-2(b)**に示すようにボクセル要素の重心点が粗骨材ポリゴンデータの内部に位置する要素のみを取り出すことにより、粗骨材をボクセル要素の集合体で表現した粗骨材ボクセル要素を作成した。ここで、**図-3**に本研究で作成した粗骨材ポリゴンデータと粗骨材ボクセル要素を示す。

また、粗骨材以外の異種材料であるモルタル、および粗骨材-モルタル界面は、**図-4**に示すように、粗骨材要素に隣接し、面を共有する要素を界面要素、それら以外の要素をモルタル要素とした。

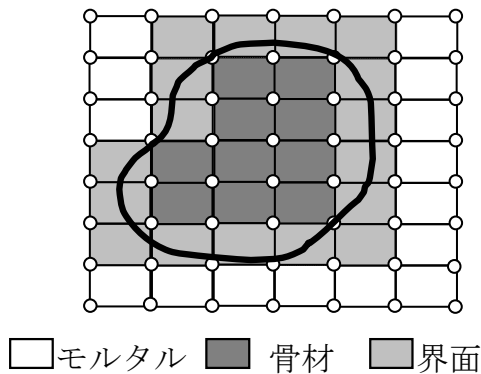


図-4 異種材料の決定方法

4. アルカリ骨材反応によるひび割れ進展解析法

4.1 アルカリ骨材反応による粗骨材の膨張

実際のアルカリ骨材反応では、コンクリート中の反応性骨材と毛管孔隙中に存在するアルカリ溶液が反応することにより生じた反応生成物であるゲルが吸水することにより膨張圧が発生する。しかし、ゲルの発生領域は非常に微小であり、吸水によって生じる膨張圧も非常に複雑であるため、本研究ではアルカリシリカ反応により生じた反応生成物であるゲルの吸水による体積膨張を、粗骨材自体の膨張として表現した。

具体的には、粗骨材ボクセル要素にのみ、式(1)に示される熱応力解析⁵⁾に用いられる熱ひずみベクトル $\{\epsilon^t\}$ を与える。この熱ひずみベクトル $\{\epsilon^t\}$ を用い、式(2)に示される熱ひずみによる見かけの節点力ベクトル $\{f_i\}$ を、粗骨材ボクセル要素にのみ与えることで、粗骨材の膨張を表現している。ここで、式(1)中の α は線膨張係数、 T は温度変化量である。本研究では、熱ひずみとして表される αT に膨張ひずみを与えることにより、アルカリ骨材反応による粗骨材の膨張を表現している。

$$\{\epsilon^t\} = \{\epsilon_x^t \quad \epsilon_y^t \quad \epsilon_z^t \quad \gamma_{xy}^t \quad \gamma_{yz}^t \quad \gamma_{zx}^t\}^T \quad (1)$$

$$= \{\alpha T \quad \alpha T \quad \alpha T \quad 0 \quad 0 \quad 0\}^T$$

$$\{f_i\} = \int_V [B]^T [D] \{\epsilon^t\} dV \quad (2)$$

V : 要素体積,

$[B]$: ひずみ-変位マトリックス

$[D]$: 応力-ひずみマトリックス

4.2 ひび割れ進展解析方法

本研究では、アルカリ骨材反応による複雑なひび割れシミュレーションを円滑に行うため、筆者らが提案している簡易ひび割れ進展解析法⁶⁾を用いた。ここで、本手法の具体的な手順を以下に示す。

- (1) 全評価点の中からコンクリートの引張強度に最も近い主応力値を検索し、その評価点をひび割れ点とする。
- (2) その主応力値がコンクリートの引張強度に達する比率(HM)を式(3)より求める。

$$HM = \frac{\sigma_{\max}}{f_t} \quad (3)$$

σ_{\max} : i 節点の主応力

f_t : コンクリートの引張強度

- (3) 全評価点の算出解をコンクリートの引張強度に達する比率 HM で除することにより、ひび割れ後の物理量を決定する。(式(4)参照)

$$P_i = \frac{p_i}{HM} \quad (4)$$

P_i : ひび割れ後の i 節点の算出解

p_i : i 節点の算出解

以上のステップをひび割れが十分に進展するまで繰り返し行う。このように簡易ひび割れ進展解析法を用いることで数値解析上不安定にならず、複雑なコンクリートのひび割れ解析を比較的スムーズに行うことが可能である。なお、本解析では、ひび割れの評価を各要素の積分点ごとに行っており、ひび割れと判定された評価点に対しては、ひび割れ帯モデルの一つである固定ひび割れモデルを用い、コンクリートが引張強度に達した後のひび割れ面と垂直方向の応力は伝達しないと仮定している。具体的には、コンクリートの引張強度に達した評価点をひび割れ要素として取り扱い、式(5)に示されるひび割れ要素の応力-ひずみマトリックス $[D_{cr}]$ の E_{cr} を 0 とすることにより表現した。

$$\begin{Bmatrix} \sigma_n \\ \sigma_s \\ \sigma_t \\ \tau_{ns} \\ \tau_{st} \\ \tau_{tn} \end{Bmatrix} = [D_{cr}] \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_n \\ \varepsilon_n \\ \gamma_{ns} \\ \gamma_{st} \\ \gamma_{tn} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

$$[D_{cr}] = \begin{bmatrix} E_{cr} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E_c & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & E_c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \beta G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \beta G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta G \end{bmatrix}$$

E_{cr} : ひび割れ面と垂直方向のコンクリートのヤング率

E_c : コンクリートのヤング率

G : せん断弾性係数

β : せん断弾性低減係数

5. 数値解析例

ここで、本研究で行ったアルカリ骨材反応によるコンクリートのひび割れシミュレーション

について示す。

アルカリ骨材反応によるコンクリートのひび割れについては、図-5 に示すような $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 385\text{mm}$ のコンクリートバーに鉄筋が埋め込まれた供試体において、鉄筋を無拘束とした場合には、亀甲状のひび割れが発生し、鉄筋を拘束した場合には、拘束鉄筋の方向に卓越したひび割れが発生すると報告⁷⁾されている。

本研究では、アルカリ骨材反応に対する鉄筋拘束の効果について数値解析的に検討するため、

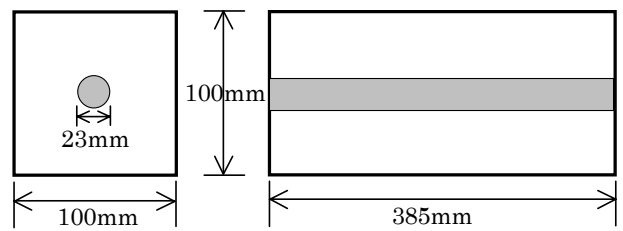


図-5 実験供試体 (左: 側面図, 右: 平面図)

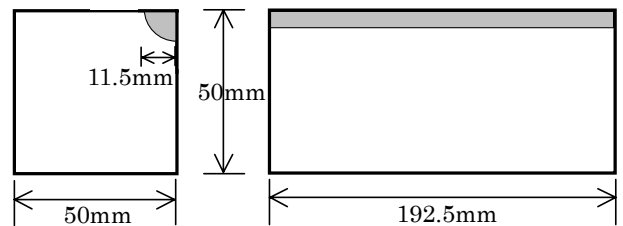


図-6 解析モデル (左: 側面図, 右: 平面図)

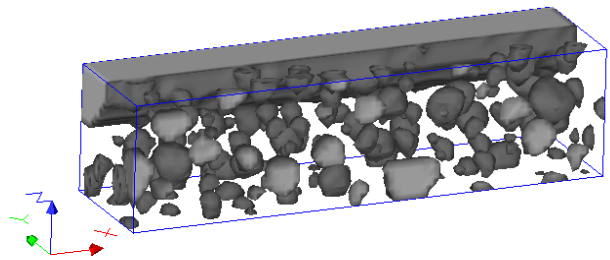
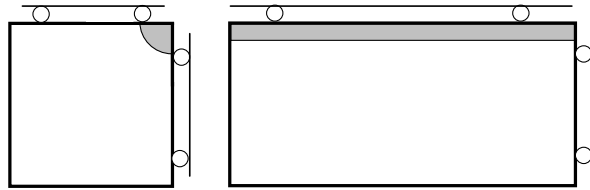


図-7 コンクリートモデル

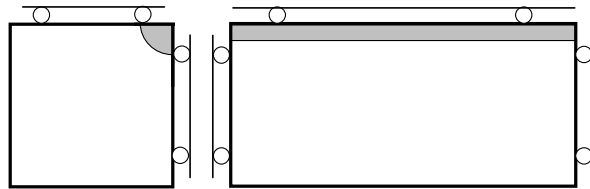
供試体端部を拘束した状態と、拘束無とした状態での 2 パターンのアルカリ骨材反応によるコンクリートのひび割れシミュレーションを行った。なお、本研究では供試体の対称性を考慮し、実験供試体の縦、横、奥行き方向のそれぞれ 1/2 領域をモデル化した 1/8 領域の解析モデルを作

表-1 材料特性値

材料名	ヤング率 (MPa)	ポアソン比	引張強度 (MPa)
鉄筋	210,000.0	0.3	-
粗骨材	56,122.5	0.15	-
モルタル	20,000.0	0.21	2.21
界面	2,000.0	0.021	0.221



(a) 端部拘束無 (左:側面図, 右:平面図)

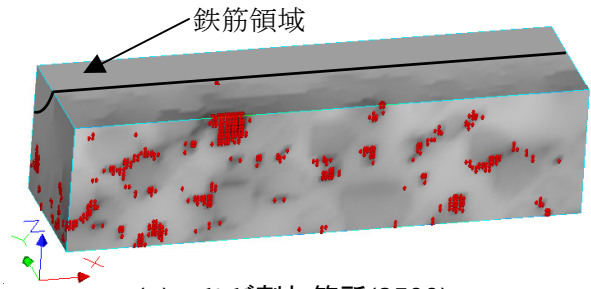


(b) 端部拘束 (左:側面図, 右:平面図)

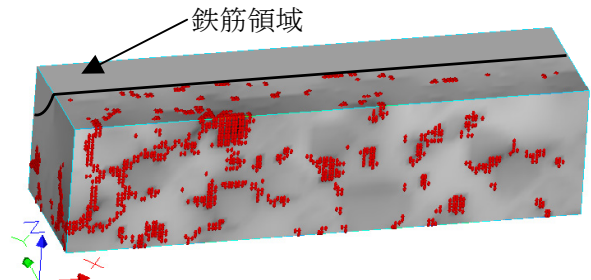
図-8 境界条件

成した (図-6 参照)。また, 実験供試体の単位粗骨材量(kg/m^3)より算出した粗骨材混入率は 35.6%, 粗骨材寸法 5.0mm~20.0mm であり, この配合を基準に作成したコンクリートモデルの粗骨材混入率は 33.82%, 粗骨材ボクセル要素の寸法は 2.36mm~19.0mm である。なお, 解析モデルの総要素数は 30,800, 総自由度は 103,194 となっている。ここで, 図-7 に本研究で作成したコンクリートモデルを示す。

また, 表-1 に本解析時に設定した各材料の材料定数を示す。なお, 本研究では, 鉄筋および粗骨材は破壊しないと仮定し, 界面要素のみに 1.0×10^{-6} の熱ひずみを与え膨張させた。また, 境界条件としては実験供試体の対称性を考慮し, 分割モデル化した領域の垂直方向変位を拘束し, 拘束端板による端部の変形を自由とした場合と, 拘束した場合の二種類の境界条件を設定した。ここで, 図-8 に供試体端部の拘束を無とした

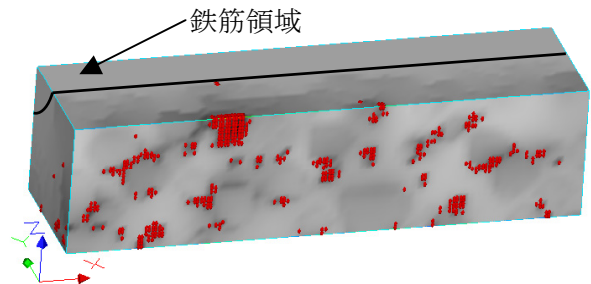


(a) ひび割れ箇所(2500)

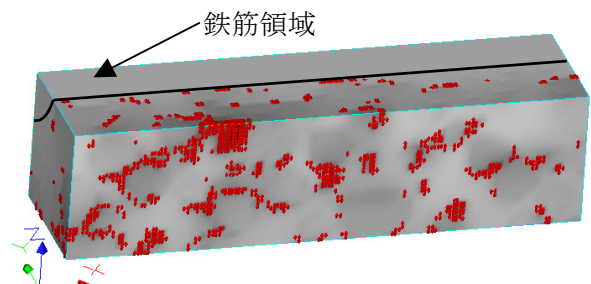


(b) ひび割れ箇所(10000)

図-9 ひび割れ進展状況 (端部拘束無)



(a) ひび割れ箇所(2500)



(b) ひび割れ箇所(10000)

図-10 ひび割れ進展状況 (端部拘束)

場合の境界条件(図-8 (a))と端部を拘束した場合の境界条件(図-8 (b))を示す。

ここで, アルカリ骨材反応によるコンクリートモデルのひび割れ進展シミュレーション結果

を示す。図-9は、コンクリートモデル左端部を拘束無とした場合のひび割れ進展状況を示しており、ひび割れの増加に伴いコンクリートモデルの左端では粗骨材を囲うような亀甲上のひび割れが確認出来る。

また、図-10に示すコンクリートモデル左端部を拘束した場合のひび割れ状況では、ひび割れ初期には無拘束とした場合と同様なひび割れ状況を示しているが、ひび割れが進展するに従い、左端より右斜め上方に向かって卓越したひび割れが進展している様子が確認出来る。

これは、本来自由な変形が許されている場合では、粗骨材周囲の強度の低い界面領域に一樣に発生していたひび割れが、拘束端板の変形拘束の影響により、粗骨材が密に隣接している領域を連結するように、ひび割れが進展していく為だと考えられる。

6. まとめ

本研究では、アルカリ骨材反応におけるコンクリートのひび割れ挙動に対して、ボクセル有限要素法による複合コンクリートモデルを用いたひび割れシミュレーションを行い、鉄筋拘束の効果について数値解析的に検討した。ここで、本研究での検討結果を以下にまとめる。

- (1) 鉄筋端部を無拘束とした場合でのシミュレーション結果より、ひび割れは粗骨材周辺の界面領域より発生し、粗骨材周囲を覆うように進展していくのが確認出来る。また、粗骨材が密接する箇所にはひび割れが集中しているのが確認できるが、全体的には一樣なひび割れの発生が起こっている。
- (2) 鉄筋端部を拘束した場合のシミュレーション結果より、初期のひび割れは鉄筋端部を拘束していない場合と同様に、粗骨材周囲の界面領域より発生し、粗骨材を覆うように進展している。しかし、ひび割れが進展するにしたがい、粗骨材の密接する領域を連結するよ

うなひび割れが卓越していくのが確認出来る。

- (3) 二種類のひび割れ進展シミュレーションの結果より、鉄筋端部の拘束により変形を制御された場合のひび割れは、粗骨材の隣接する界面領域を連結しながら鉄筋と平行する方向のひび割れが卓越し、鉄筋端部の拘束を解除し変形を自由とした場合のひび割れは、全体的な亀甲状のひび割れに発展する状況を数値解析により表現できた。

参考文献

- 1) 小林一輔：最新 コンクリート工学 第4版，森北出版，1997
- 2) 鈴木克幸，寺田賢二郎，大坪英臣，米里直樹：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，Vol.2, No.2, pp.395-398, 1997.5
- 3) 永井学志，山田貴博，和田章：画像データに基づくコンクリート材料の有限要素法解析，計算工学講演会論文集，Vol.2, pp.1103-1106, 1997.5
- 4) 山城建樹，松原仁，伊良波繁雄，富山潤：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, 2003.9
- 5) 矢川元基，宮崎則幸：有限要素法による熱応力・クリープ・熱伝導解析，サイエンス社，1985.
- 6) 安和守史，伊良波繁雄，富山潤，矢川元基：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.1, pp.55-60, 2002.9
- 7) 白石文雄ほか，アルカリ骨材反応に対する鉄筋拘束の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.8, No.2, pp.169-172, 1986.9