

論文 FMMによる粗骨材分布を考慮した三次元ひび割れ解析

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

要旨：一般に有限要素法でコンクリートのひび割れ解析を行う場合、粗骨材分布を考慮すると要素分割が非常に複雑になるので、その内部を均質材料と仮定して解析が行われる。しかし、実際のコンクリートは粗骨材とモルタルからなる二相系複合材料である。そこで筆者らは、三次元領域で有限要素法やフリーメッシュ法で利用可能な粗骨材を考慮した二相コンクリートモデルを提案した。本研究では、本モデルを利用する際の粗骨材を直接要素分割する方法と平均的に考慮する解析方法を提案し、数値解析例としてアルカリ骨材反応のような骨材の膨張に伴うコンクリートのひび割れ進展解析例を示した。

キーワード：粗骨材分布、コンクリートモデル、三次元ひび割れ解析、フリーメッシュ法

1. はじめに

有限要素法でコンクリートの三次元ひび割れ解析を行う場合、要素分割が複雑になるため一般的にコンクリートの内部を均質化し、単一材料と仮定している。しかし、実際のコンクリートは粗骨材とモルタルからなる二相系材料であり、それぞれ固有の力学的挙動を有している。このため、コンクリート内部の詳細な力学的挙動を明らかにするためには、解析を行う上でも粗骨材とモルタルとを別々に考えるのは必要不可欠であると考えられる。そこで筆者らは、点ベースで平均化して粗骨材分布を考慮することのできる二相コンクリートモデルを提案し、コンクリートの弾性解析で良好な結果を得た¹⁾。本研究では、新たに粗骨材を要素分割する方法、即ちメッシュベースで粗骨材分布を考慮する方法と、点ベースとメッシュベースを混合した解析手法を提案した。数値解析例としてはフリーメッシュ法²⁾(FMM)を用いて、アルカリ骨材反応のような骨材の膨張に伴うひび割れ進展解析を行った。

2. フリーメッシュ法

FMM²⁾は、図-1に示すように解析領域内に配置

された各節点(中心節点)ごとに、その付近の節点(衛星節点)を集めてローカルな領域で一時的に四面体要素群を作成する。これらの一時的な四面体要素の要素剛性マトリックスから中心節点に寄与する行成分のみを全体剛性マトリックスに足し合わせる。これを全ての節点で行い、全体剛性マトリックスを作成し、連立一次方程式を解く。

このようにFMMはローカルな要素生成、全体剛性マトリックスの作成及び求解までをシームレスに行うことが可能である。なお、FMMでの応力・ひずみは、中心節点周りの局所要素の平均値として節点ごとに評価される。

このようなFMMの特徴を生かすと、フレッシュコンクリートの流動解析のような解析領域が大きく変動するような解析も可能である³⁾。

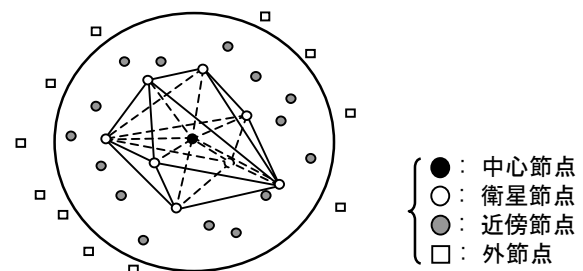


図-1 局所要素生成の概念図

*1 琉球大学大学院 理工学研究科 修士(工学) (正会員)

*2 琉球大学 工学部環境建設工学科教授 博士(工学) (正会員)

*3 琉球大学 工学部環境建設工学科助手 博士(工学) (正会員)

3. 二相コンクリートモデル

本コンクリートモデルの作成法については、文献 1) に詳しいので、ここでは簡単に述べる。

3.1 粗骨材形状データ作成法

本研究では、コンクリートをモルタルと粗骨材からなる完全な二相系材料と仮定し、粗骨材形状データ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求めた。具体的には、以下の手順で作成される。

- (1) 粗骨材の代表的な試料を四分法により選定する⁴⁾。
- (2) 粗骨材の正面、右側面、左側面、背面の各側面の粗骨材の全体像をデジタルカメラで撮影する（図-2 参照）。
- (3) (2) の作業により、得られたデジタル画像データから、粗骨材の形状を決定する節点座標、三角形表面パッチデータを作成する。

3.2 二相コンクリートモデル作成法

本モデルでは、解析領域内に配置する粗骨材量はコンクリートの配合から求め、粗骨材分布はランダム配置である。以下にモデル生成手順を示す。

- (1) コンクリート解析領域を作成する。
- (2) 解析領域内に配置する粗骨材量をコンクリート配合表より求める。
- (3) 配置する粗骨材の粒径と個数を粒度分布から求める。
- (4) 解析領域内に粗骨材をランダム配置する。

(4) 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、その挿入方法は、まず、粗骨材データの中から粒径の大きい物から順にランダムに選択していく（先に粒径の大きな粗骨材の場所を確保するため）。次に、この選択した粗骨材にランダムな回転量および移動量を与える。この処理を行うことで、領域内部に粗骨材をランダムに配置することができる。なお、配置する際、先に配置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。粗骨材粒径の選定、回転および移動量のランダム性は乱数を用いて表現した。

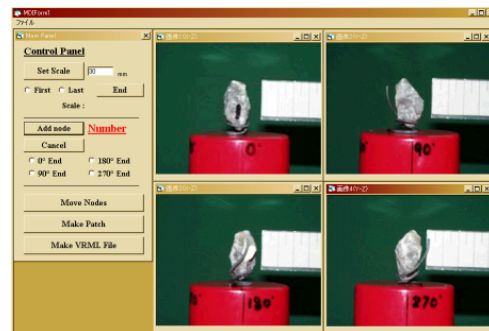


図-2 粗骨材データ決定状況

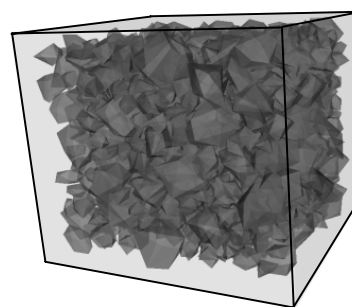


図-3 二相コンクリートモデル

本研究では、粗骨材形状データを作成する際に、沖縄県で一般的に使用されている本部産石灰岩碎石を用いている。本手法により作成した二相コンクリートモデルを図-3 に示した。

4. 解析モデル作成法

本研究では、二相コンクリートモデルを用いて FMM によるひび割れ進展解析を行う。そこで、FMM の特徴を活かした三種類の二相コンクリートの解析手法（図-4）を述べる。

4.1 メッシュベース解析法

メッシュベース解析法では、最初に図-3 に示すような粗骨材形状データを用いた二相コンクリートモデルを作成する。二相コンクリートモデルでは、粗骨材とモルタルは粗骨材表面上のパッチで区別される。そこで、最初に粗骨材表面パッチを利用して中心節点毎にモルタル領域のローカルメッシュ生成を行い、その後各粗骨材領域のメッシュ生成を行えば簡単に粗骨材を考慮した要素データを得ることができる。また、粗骨材領域のメッシュ生成に関しては、はじめに粗骨材の重心点を求め、これを中心節点とす

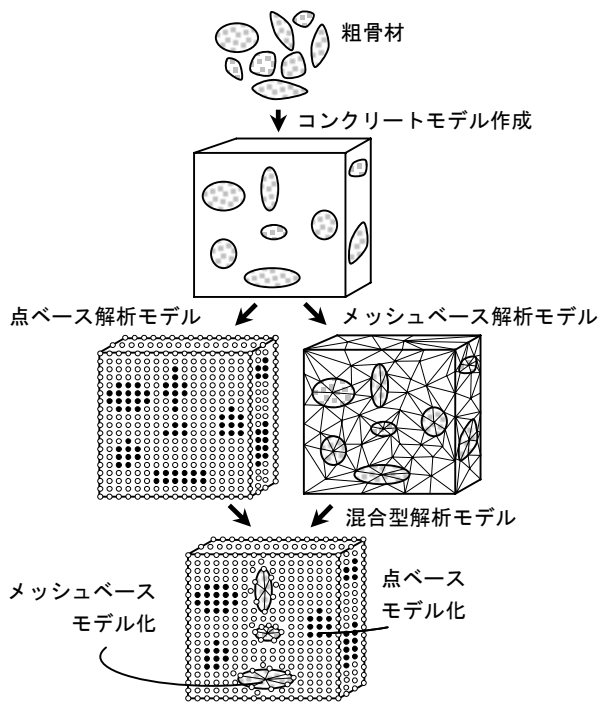


図-4 解析手法の提案

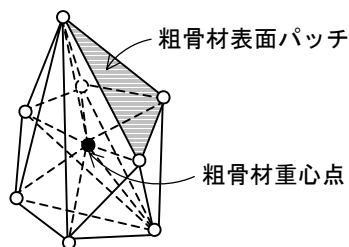


図-5 粗骨材要素

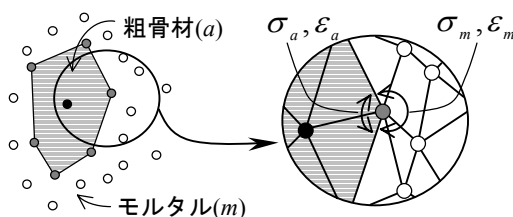


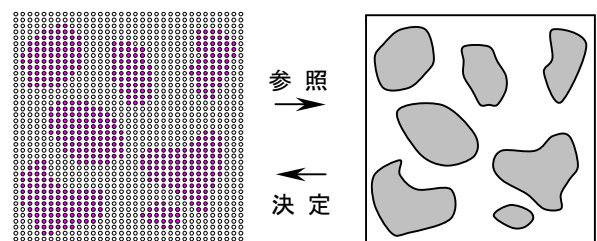
図-6 境界節点の応力とひずみ

る。次に粗骨材を構成する内部表面パッチが三角形であることを利用して、この中心節点と内部表面パッチの頂点を結べば容易に粗骨材重心点である中心節点周りの四面体要素群を作成することができる。粗骨材要素の概念図を図-5に示した。なお、FMMでは第2章で説明しているように、要素データは剛性マトリックスを作成するときに一時的に作成するのみで、要素データが必要なときにはその都度自動的に作成する。

以上のような方法により、粗骨材を考慮に入れた解析を行うことができるが、FMMでは一時的にしか要素データを持たないので、図-6のように節点が粗骨材とモルタルとの境界（界面）にあるときの応力やひずみの評価方法で問題が生じる。そこで本研究では、節点変位及び節点力以外の応力やひずみなどの物理量は、モルタル側と粗骨材側の両方に分けて境界節点単位で評価した。

4.2 点ベース型解析法¹⁾

点ベース型解析法でも、はじめに図-3に示すような二相コンクリートモデルを作成する。次に図-7(a)に示すように節点を配置し、節点の材料特性を図-7(b)を参照しながら節点ごとに粗骨材かモルタルかを決定する。この処理により、一様に発生された解析モデル内の節点は、本コンクリートモデルとほぼ同等な粗骨材分布を実現することができる（図-8）。なお、粗骨材とモルタルとの界面の材料特性は粗骨材とモルタルの平均値となる⁵⁾。



(a) 節点分布 (b) 二相コンクリートモデル

図-7 節点材料決定概念図

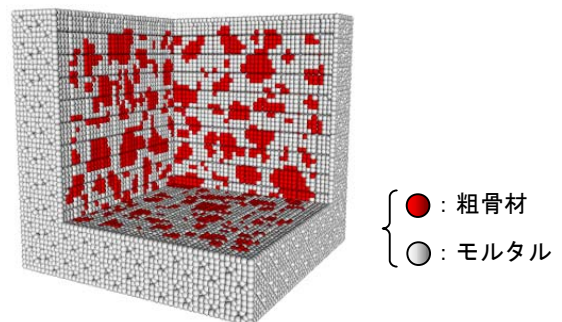


図-8 点ベース解析モデル

4.3 混合型解析法

二相コンクリートモデルでは、粗骨材配置を乱数により表現しているため、隣接する粗骨材

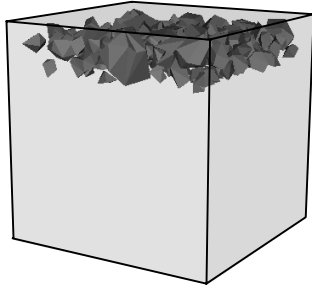


図-9 混合型解析モデル

同士が非常に近い場合がある。粗骨材量が比較的少ない場合は、ローカルメッシュ生成に問題は生じないが、粗骨材が多くなってくると、ローカルな領域でさえ、粗骨材パッチを考慮したメッシュ生成が困難になるという問題が生じる。またローカルメッシュ生成に成功した場合においても扁平な要素になる可能性が高い。一方、点ベース型を用いると粗骨材とモルタルが平均化されるので、詳細な内部応力を評価するためには大規模な計算を必要とする。そこで解析領域内部で、より詳細な内部応力状態を必要とする部分では厳密な粗骨材モデル形状を考慮することのできるメッシュベース型を用い、それ以外の場所では点ベース型を用いればより合理的に計算することができると考えられる。例えば、図-3に示すような二相コンクリート解析領域で、上面の内部応力状態を詳しく知りたい場合、上面付近の粗骨材のみを粗骨材形状を考慮して要素分割し（図-9）、その他の部分は点ベース型により解析を進めるのである。

混合型解析手法の目的は、粗骨材形状を完全に考慮して解析する時、粗骨材同士が近すぎて要素形状が扁平になる確率を下げることであるが、もし、粗骨材形状を考慮した領域の要素形状が扁平な場合は、モルタル領域の節点分布を再配置した。

5. 簡易ひび割れ解析法

筆者らはRmin法を用いて安定したひび割れ進展解析が行える簡易的なひび割れ解析手法を提案している⁵⁾。そこで、本手法を簡単に述べる。

節点の最大主応力がコンクリートの引張強度

に最も近い節点主応力($\sigma_{i,\max}$)を探索し、この節点をひび割れ節点とする。次に、 $\sigma_{i,\max}$ がコンクリートの引張強度(f_t)に達する倍率(R)を求め、この倍率をすべての節点をもつ物理量(p)に乗じて解とする(式(1)参照)。

$$\begin{cases} R = (\sigma_{i,\max} - f_t) / f_t \\ P_i = p_i / (1 + R) \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 i は節点番号、 P_i は、変換後の i 節点の持つ物理量である。

6. 数値解析例

ここでは、二相コンクリートモデルの妥当性を検討するために、アルカリ骨材反応⁶⁾のような骨材の膨張に伴うひび割れ解析を行う。アルカリ骨材反応は、コンクリート中に有害骨材があるとき骨材周辺に生じたゲルが膨張するものである⁶⁾。そこで本研究ではゲルの膨張を骨材自体の膨張で表現し、膨張量を求める手法として熱応力解析に用いられる方法⁷⁾を応用した。即ち、熱ひずみ ($\{\epsilon'\}$) を考慮した全ひずみ ($\{\epsilon\}$) は次式で表せる。

$$\{\epsilon\} = \{\epsilon^e\} + \{\epsilon'\} \quad (2)$$

ここで、 $\{\epsilon^e\}$ は弾性ひずみである。よって、熱ひずみを考慮した応力 ($\{\sigma\}$) とひずみの関係式は、

$$\{\sigma\} = [D^e](\{\epsilon\} + \{\epsilon'\}) \quad (3)$$

と表せる。ここで、 $[D^e]$ は弾性問題における応力 - ひずみマトリックスである。よって、仮想仕事法より熱ひずみによる見かけの節点荷重ベクトル ($\{f_i\}$) は次式で表せる。

$$\{f_i\} = \int_{V^e} [B]^T [D^e] \{\epsilon'\} dV \quad (4)$$

ここで、 $[B]$ はひずみ - 変位マトリックスで、 V^e は要素体積である。また、 $\{\epsilon'\}$ は温度変化 (T) による膨張ひずみであるから三次元問題では、

$$\{\epsilon'\} = \begin{Bmatrix} \epsilon'_x \\ \epsilon'_y \\ \epsilon'_z \\ \gamma'_{xy} \\ \gamma'_{yz} \\ \gamma'_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \alpha T \\ \alpha T \\ \alpha T \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (5)$$

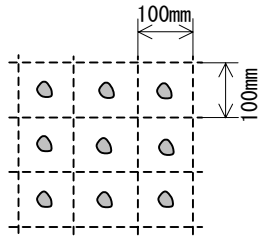


図-10 等間隔粗骨材モデル (Case1)

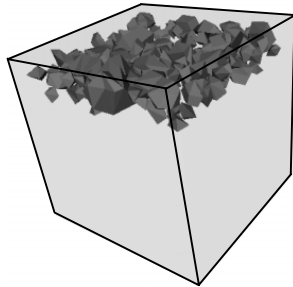


図-11 解析モデル内の膨張粗骨材分布 (Case2)

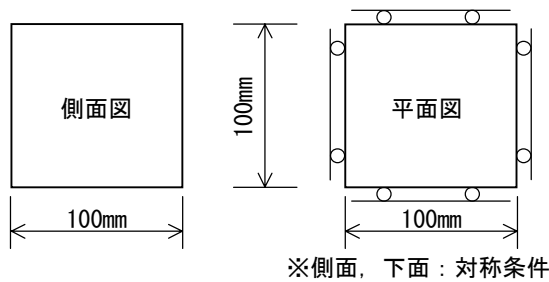


図-12 解析モデルと境界条件

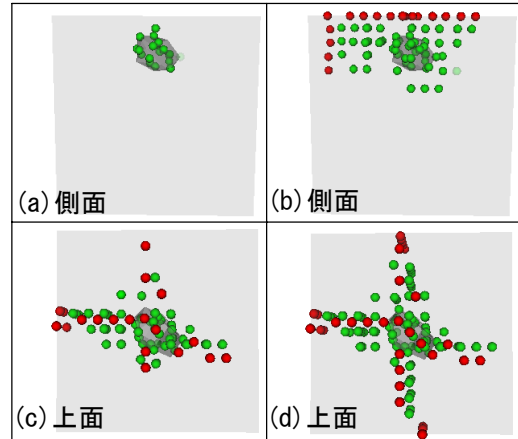
と表せる。 α は線膨張係数である。本研究では、粗骨材要素のみに式(4)を適用し、粗骨材を膨張させ、ひび割れ進展解析を行った。

解析モデルとして、図-10に示すような解析領域内部の表面に近い個所にモデル粗骨材(図-13に示す粗骨材で最大長さ19.6mm)が等間隔(100mm)にある場合(Case1)と、この粗骨材の最大寸法が20mmであるので上面から20mm以内にある粗骨材のみを膨張させた場合(Case2, 図-11参照)の2ケースの解析例を示す。Case1の場合は、粗骨材形状が対称でないで完全な対称性を有してはいないが、100mmの立方体だけを解析した。Case2では膨張を考慮する骨材以外の部分については、点ベースで粗骨材を考慮する混合型の解析モデルを用いている。境界条件を図-12、粗骨材・モルタルの材料特性を表-1に示す。

図-13にCase1のひび割れ進展状況を示した。

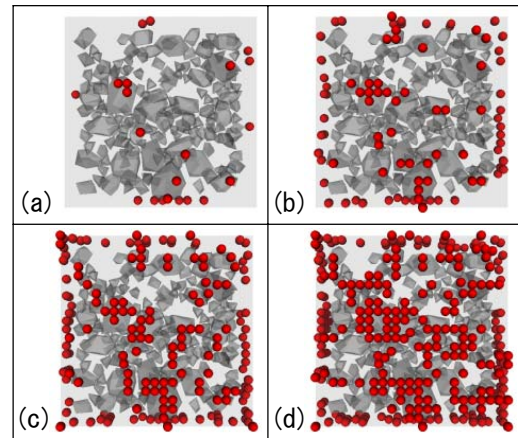
表-1 粗骨材、モルタルの材料特性

	ヤング率 (N/mm ²)	ポアソン比	引張強度 (N/mm ²)
粗骨材	56122.5	0.15	5.52
モルタル	20000.0	0.21	2.21



●: 内部ひび割れ節点 ●: 表面ひび割れ節点

図-13 内部・表面のひび割れ状況 (Case1)



●: 表面ひび割れ節点

図-14 表面(上面)のひび割れ状況 (Case2)

図-13で(a)は側面から見た初期のひび割れ状況、(c)は上面のひび割れが十文字に入る途中段階、(b)及び(d)はそれぞれ側面及び上面から見た終期のひび割れ状況を示している。ひび割れは、最初に図中の(a)のように粗骨材界面付近から発生し、コンクリート表面に到達する(b)。最終的には(d)のように粗骨材を中心とし十文字を描くようにひび割れが進展した。したがって対称性を考えると、膨張する骨材の配置が等間隔に分布している場合は、粗骨材同士を結ぶような格子状のひび割れが発生することになる。

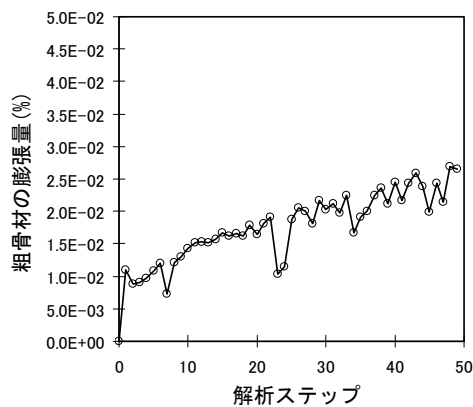


図-15 粗骨材の膨張量 (Case2)

Case2 のひび割れ進展は図-14 (a) ~ (d) の順に進展した。Case1 と同様に、ひび割れは粗骨材とモルタルとの界面付近から発生し、その後コンクリート表面に最も近い粗骨材界面のひび割れがコンクリート表面方向に進行し、図-14 (a), (b) のように小さなひび割れが表面全体に広がっていく。最終的には発生した広範囲のひび割れが結合し、コンクリート表面にはアルカリ骨材反応が生じるときによく見られる亀甲状のひび割れ⁶⁾が見られた。

次に、Case2の解析ステップと粗骨材の膨張量の関係を図-15に示す。図-15より、コンクリート内部の骨材の膨張量は、実験では直接には測定不可能と思われるが、本数値解析の結果は粗骨材の膨張量が約0.012%でひび割れが発生し、膨張量が約0.025程度するとき、図-14 (b) のようなコンクリートのひび割れが発生した。

7. おわりに

本研究では、筆者らが提案した3次元領域での新しい二相コンクリートモデルを用いた解析手法を示し、アルカリ骨材反応のような粗骨材の膨張に伴うコンクリートの膨張ひび割れ解析を行った。以下に本研究で得られた成果を列記する。

- (1) 粗骨材形状を考慮した二相コンクリートモデルの全体メッシュ生成の困難さを回避するために、点ベース解析法、メッシュベース解析法及びそれらの混合型解析法を提案し

た。そしてそれらの解析法をコンクリートの三次元ひび割れ解析へ応用する方法を示した。

- (2) 熱応力解析で用いられる膨張ひずみを粗骨材の膨張ひずみに置き換えることで、アルカリ骨材反応などの骨材の膨張ひび割れ解析を行うことができた。

今後、本手法は実コンクリート内部の詳細な解析を行う場合、極めて有効なツールの一つになると考えられる。本解析ではアルカリ骨材反応に伴うひび割れを単純に粗骨材を膨張させることで発生させている。しかし、アルカリ骨材反応はコンクリート中の水分量、骨材種類、モルタル中のアルカリ量等多くの複雑な化学反応の結果生じる⁶⁾ものであるから、個々の骨材の膨張も複雑な挙動を示す。今後の課題として、このような化学反応も考慮した解析が必要となる。

参考文献

- 1) 山城建樹, 松原仁, 伊良波繁雄, 富山潤: 骨材とモルタル 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, コンクリート年次論文報告集, Vol.25, CD-ROM, 2003.
- 2) 矢川元基, 細川孝之: フリーメッシュ法の三次元問題への適用, 日本機械学会論文集(A編), Vol.63, No.614, pp.2251-2256, 1997.
- 3) 富山潤, 伊良波繁雄, 山田義智, 松原仁, 矢川元基: フリーメッシュ法によるフレッシュコンクリートの流動解析法に関する研究, 土木学会論文集, No.746, V-61, pp.91-101, 2003.
- 4) 土木材料実験教育研究会: 新示方書による土木材料実験法, 鹿島出版会, 1999.
- 5) 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, pp.55-60, 2002.
- 6) 中部セメントコンクリート研究会: コンクリート構造物のアルカリ骨材反応, 理工学社, 1991.
- 7) 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.