

# 論文 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

山城 建樹<sup>\*1</sup>・松原 仁<sup>\*2</sup>・伊良波 繁雄<sup>\*3</sup>・富山 潤<sup>\*4</sup>

**要旨：**一般にコンクリートの数値解析を行う場合、その内部は均質化され、単一材料と仮定される。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 2 相系材料であり、正確な力学的挙動を解明するためには、これらを考慮に入れることは必要不可欠である。そこで本研究では、粗骨材形状を実際の粗骨材のデジタル画像を用いて、節点・パッチデータに変換し、3 次元座標データとして扱う手法を示した。数値解析例として、本手法で作成した粗骨材形状データを利用した 2 相コンクリートモデルを用いてフリーメッシュ法 (FMM) によるコンクリートの弾性解析を行い、妥当性を検討する。

**キーワード：**粗骨材, モルタル, コンクリート, 2 相系モデル解析, フリーメッシュ法

## 1. はじめに

近年、計算機性能の飛躍的な進歩に伴い、各種の数値解析手法が構造解析、熱伝導解析などの様々な工学分野の諸問題に用いられるようになった。しかし、コンクリートの数値解析を行う場合、一般的にコンクリート内部が均質材料であると仮定し、解析を行っている。一方、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、それぞれに固有の力学的挙動を有している。本論文では、コンクリート構造物の力学的挙動をより詳細に表すために、実際の粗骨材をデジタルカメラで撮影し、Visual Basic で作成した粗骨材形状決定プログラムを用いて、その粗骨材画像データから粗骨材形状の座標データを作成した。この粗骨材形状データは、粗骨材の画像データから粗骨材の各頂点を決定することで、その座標データ及び表面パッチデータとして表されている。この粗骨材形状データを粗骨材の粒度分布を考慮に入れ、コンクリートモデルを作成し数値解析に用いる方法を示す。この手法によって、実際のコンクリ

ートにより近似したモデルとして取り扱うことが出来る。本論文では、2 相コンクリートモデルの作成方法、およびこのモデルを利用したフリーメッシュ法 (FMM<sup>1)</sup>) による解析法について述べ、その妥当性を検討する。

## 2. フリーメッシュ法

FMM の基本アルゴリズムは、領域内の各節点毎 (中心節点) に、その付近の他の節点 (衛星節点) と中心節点から、一時的に仮要素 (局所要素) を自動的に生成し、これらの要素剛性マトリックスから中心節点に寄与する成分を求め、全体剛性マトリックスを生成する。具体的には、図-1 のように、中心節点 1 付近にある衛星節点(m, n, o, p, q, ...)を集め (中心節点 1 の節点密度関数で定義される半径 R の球領域), 中心節点 1 まわりで一時的な四面体要素 (lmno, lmoq, lopq, ...)を作る。各四面体要素 (例 lmno) について有限要素法と同様に要素剛性マトリックス $[K_e]_{lmno}$ を作成し、 $[K_e]_{lmno}$  の中心節点 1 に寄与する行成分のみを全体剛性マト

\*1 琉球大学大学院 理工学研究科環境建設工学専攻 (正会員)

\*2 琉球大学大学院 理工学研究科環境建設工学専攻 (正会員)

\*3 琉球大学助教授 工学部環境建設工学科 工博 (正会員)

\*4 琉球大学助手 工学部環境建設工学科 工博 (正会員)

リックス[K]に足し込んでいく。得られた剛性マトリックスを元に連立一次方程式を解く方法は、従来用いられている直接法や反復法の一つであるCG法(Conjugate Gradient Method)を用いた。

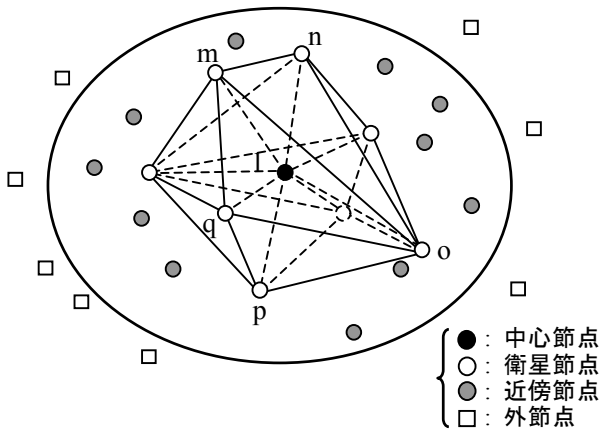


図-1 ローカル要素概念図

### 3. 2相コンクリートモデル

#### 3.1 2相コンクリートモデル作成法

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2相系材料と仮定する。そこで、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次的に粗骨材の各頂点を拾い、座標データとして取り扱った。以下に詳しい粗骨材形状データ作成手順を示す<sup>2)</sup>。

- (1) JIS Z 8801 に規定されている標準網ふるいを用いて、粗骨材を採取し、四分法により選定<sup>3)</sup>
- (2) 選定された粗骨材の形状を求めるために、デジタルカメラを固定し、粗骨材の正面、右側面、左側面、背面の四方向からの全体画像を撮影
- (3) 粗骨材の各頂点をマウスでクリックし座標値を入力する（図-2 参照）
- (4) (3)より得られたデータを元に粗骨材形状を示す節点座標、三角形表面パッチデータを作成(粗骨材形状決定プログラムを使用)
- (4)で作成する節点データは、デジタル画像が2次元であるため、1枚の画像では粗骨材の3次元座標成分を決定することはできない。そこで、

本研究では3次元座標の決定には、2枚のデジタル画像を用いる。即ち、実際に粗骨材がある3次元空間の座標系を唯一決定し、各側面の座標系もこれに一致させることで決定できる。具体的には、正面・背面の画像からX-Z成分を拾い、右側面・左側面からY-Z成分を拾う（Z成分についてはどちらの画像を使用してもよい）。なお、この作業はすべてマウスクリックのみで簡単に行うことができる。また、作成した粗骨材節点を結ぶことにより、図-1に示すローカル要素のように粗骨材の表面形状を表す三角形パッチ（例：mno, moq）を作成した。以上の作業により、実際の粗骨材に非常に近い形状の粗骨材形状データを計算機内に記憶させることが出来る。

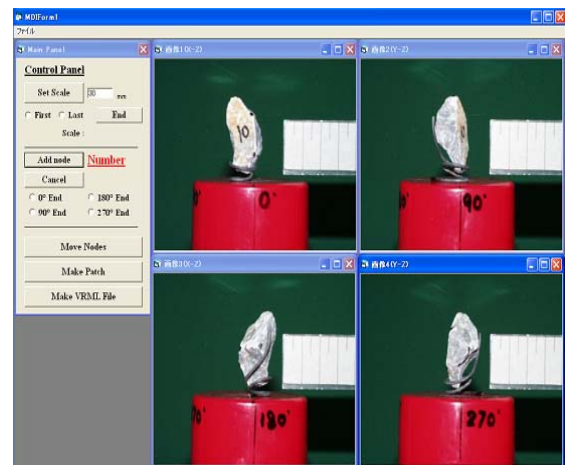


図-2 骨材形状決定法

次に、2相モデル化したコンクリートモデルの作成手順を示す。

- (1) 粗骨材を混入する解析対象となるコンクリートモデル形状を、CADを用いて作成し、粒度分布を考慮に入れ、各粒度の粗骨材量を決定
- (2) コンクリートモデル内に粗骨材データを挿入
- (3) 粗骨材量が、(1)で決定した粗骨材量になるまで(2)を繰り返す
- (2)の粗骨材形状データの挿入方法として、まずは粗骨材データの中から骨材粒径の大きい物から順にランダムに選択していく。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。この処理により、領域内部の粗骨材の不均一性を表現することが出来る。挿入する際、先に挿入されている粗骨材との交差判定を行い、粗骨材同士が重なり合わないようにした。なお、粗骨材選定、回転および移動量は乱数を用いてランダムに決定した。以上の手順で決定された2相コンクリートモデルを図-3に示す。

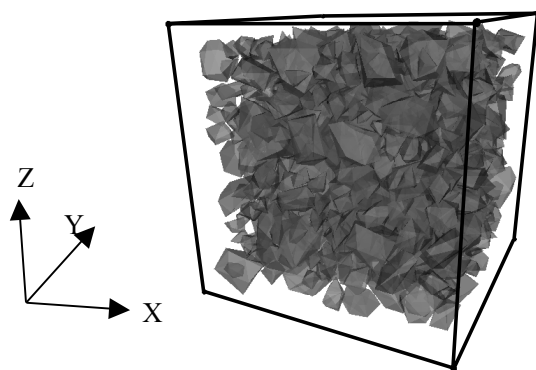


図-3 2相コンクリートモデル

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砕石を粗骨材置き場から採取し、四分法により選定した。その中から、ふるいの呼び寸法が2.5mm～5mm, 5mm～10mm, 10mm～15mm, 15mm～20mmの四区分で、各10個をランダムに採取し、計40個の粗骨材形状データを作成した。図-4に使用粗骨材の粒度曲線図を、図-5に3.1節の方法により作成した粗骨材形状データの代表例を示す。

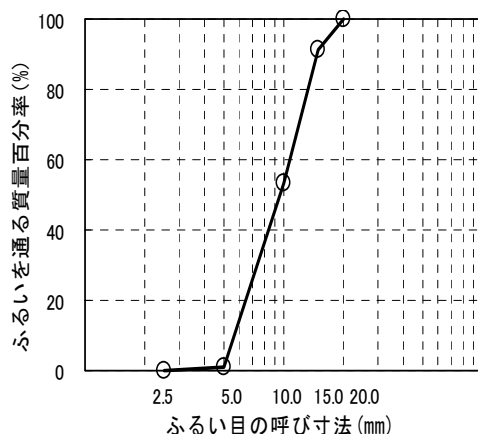


図-4 粗骨材粒度曲線

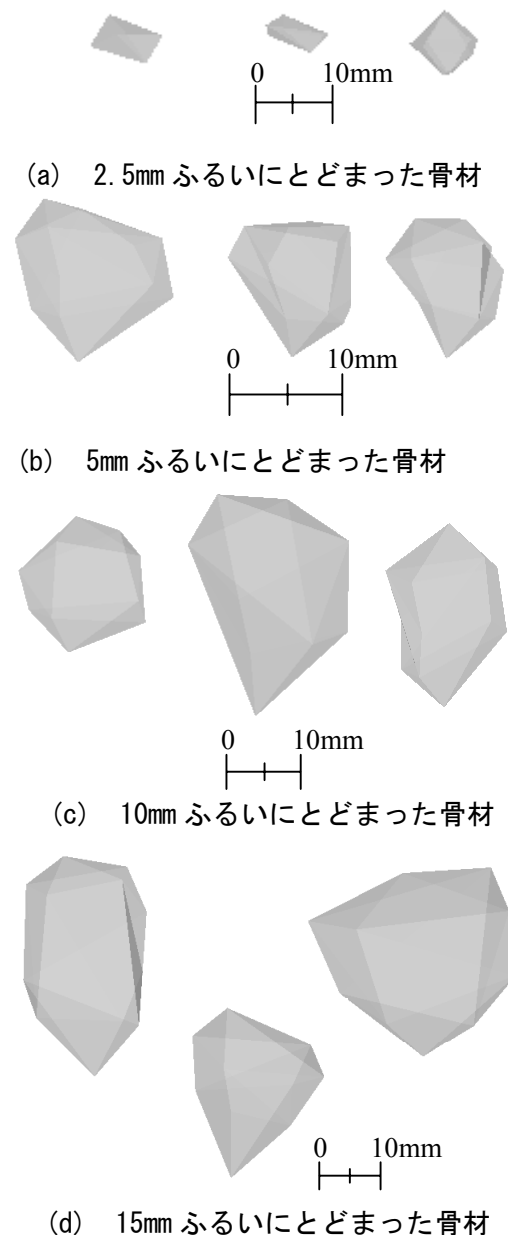


図-5 粗骨材データ

### 3.2 2相コンクリートモデル解析法

本研究では、3.1節で提案した2相コンクリートモデルをFMMに適用する。FMMは解析領域内に節点をランダムに発生させ、各節点ごとに局所要素を作成するため、基本的にグローバルな要素データを持たないので、要素に異種材料のデータを持たすことはできない。そこで、本研究では、節点に材料データを持たせることによって、粗骨材とモルタルを区別した。具体的には、局所要素作成時に要素を構成する4節点の材料データの平均値をとることで要素材料を決定した。節点の材料は、解析が始まると同時

に、本コンクリートモデル内部で、この節点が粗骨材かモルタルかを判定する。この処理により、解析モデル中に発生させた節点（材料データを有する）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と考えられる。なお、粗骨材とモルタルとの界面の材料係数は粗骨材とモルタルの平均値となる<sup>4)</sup>。

これを利用して、本研究で提案している粗骨材とモルタルにより構成される2相コンクリートモデルを、FMMに適用可能にするための解析手法を示す。

- (1) 3.1節で示した2相コンクリートモデルと同形状の節点データを作成
- (2) (1)の節点の材料（粗骨材 or モルタル）を3.1節のコンクリートモデル内部を参照しながら決定（図-6 参照）
- (3) FMMによる解析

以上の処理により、FMMの節点データを本コンクリートモデルに即した材料分布に変換する。図-7に、2相コンクリートの内部状況を示す。

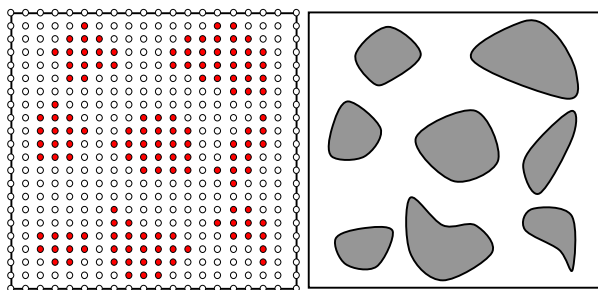
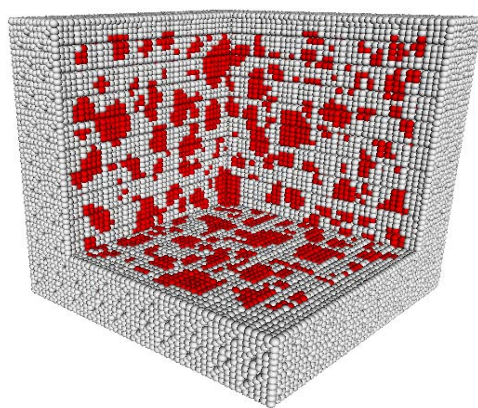


図-6 節点材料決定状態



○：モルタル節点      ●：粗骨材節点  
図-7 解析コンクリートモデル

#### 4. 数値解析例

ここでは、本研究で提案する2相コンクリートモデルの妥当性を検討するため、基礎的なコンクリート実験として、圧縮試験および割裂試験の数値解析を行った。このような単純な数値解析例は、FMMにおいて局所要素の自動生成が良好に行われたかを判定するのに有効である。表-1に、本解析で設定した2相コンクリートモデル内の粗骨材およびモルタルの材料特性を示す。解析モデルとして、図-8に示すような、一辺が100mmの立方体のコンクリートモデルに粗骨材を1200個混入した2相コンクリートモデルを用いた。圧縮試験の境界条件として、底面を完全固定状態および上面に等分布加重を加えた。割裂試験の境界条件は、底面のX軸方向中央部分を完全固定状態、上面のX軸方向中央部分に等分布荷重を加えて解析を行った。

表-1 粗骨材、モルタルの材料特性

|                           | 粗骨材      | モルタル    |
|---------------------------|----------|---------|
| 弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> ) | 56122.45 | 20000.0 |
| ポアソン比                     | 0.15     | 0.21    |

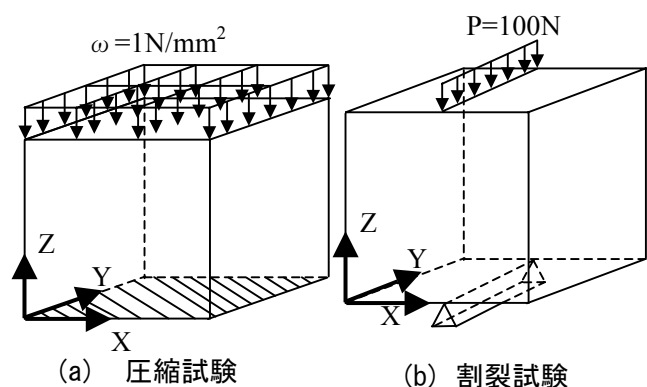


図-8 解析モデル

図-9に圧縮試験の解析結果を示す。この図は、図-8の解析モデル(a)において、底面よりZ=50mmの位置でのX-Y断面図であり、解析結果より得られた荷重軸方向応力値 ( $\sigma_{zz}$ ) を立

体的に示した図である。入力データより求めた平均垂直応力値は、1.00 ( $\sigma_{zz} = P/A$  ,  $P$ : 荷重,  $A$ : 断面積) となっている。

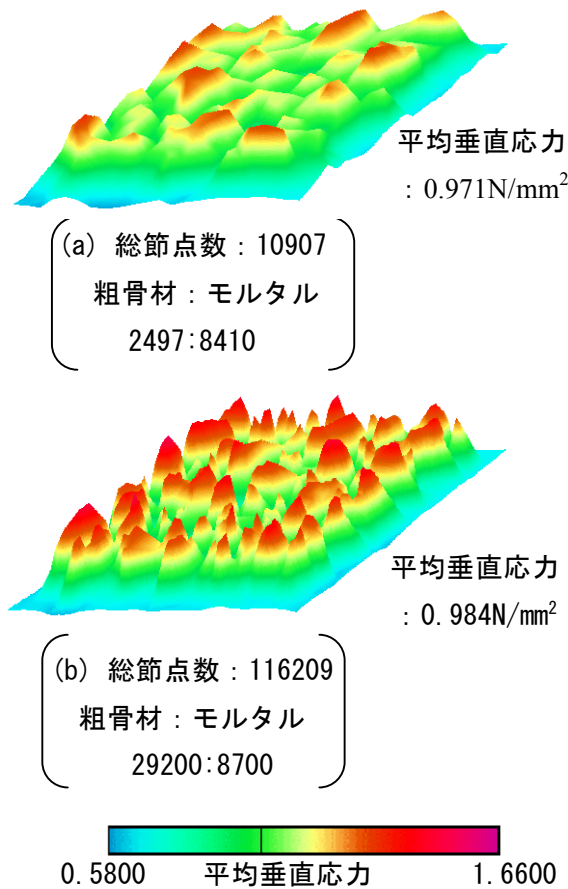


図-9 荷重軸方向応力 ( $\sigma_{zz}$ ) 分布

解析結果より得られた X-Y 断面の平均垂直応力値は、節点数の変化に係わらず、ほぼ 1.00 に一致している。しかし、図-9 より垂直応力値は粗骨材が存在する部分で大きな値を示し、モルタル部分では小さい値を示していることから、荷重のほとんどを粗骨材が負担していることがわかる。よって、本解析手法により、粗骨材とモルタルの力学的挙動の相違を良好に表現できていると考えられる。また、図-9 の(a),(b)を比較し、節点数の増加による応力分布の違いについて考察すると、節点数が増加するほど粗骨材、モルタル間の応力値の凹凸がはっきり現れている。これは、節点数の増加に伴い、本コンクリートモデル内部の粗骨材状態を良好に再現することができると考えられる。

図-10 に、割裂試験の解析結果を示す。図-8

に示す解析モデル(b)の底面より  $Z=50\text{mm}$  の位置での X-Y 断面図であり、解析結果より得られた主応力分布を二次元的に示している。圧縮試験の解析結果と同様に、主応力は粗骨材が存在する部分で高いことを示し、モルタル部分では低い値を示している。(a)~(b)への節点数の増加に合わせて X-Y 断面形状は、粗骨材とモルタル間の応力差のため、より鮮明に表現されていることが確認出来る。

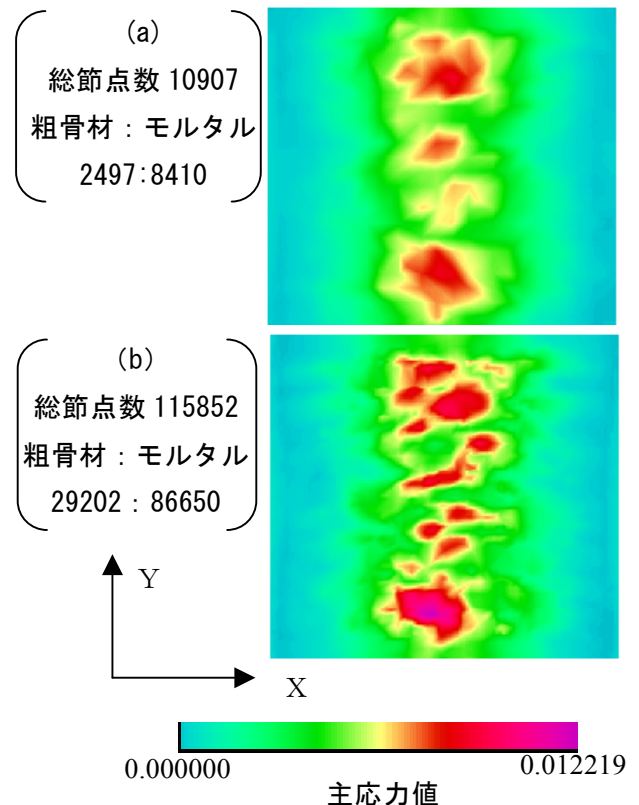


図-10 割裂試験の中央断面 ( $Z=50\text{mm}$ ) の主応力分布

図-11 は、先に述べた圧縮試験および割裂試験の解析に用いた 2 相コンクリートモデルの  $X=50\text{mm}$  の位置における Y-Z 断面の粗骨材分布状況である。この図より、コンクリートモデル内部に粗骨材が不均一に分布しているのが確認できる。また、図-12 に割裂試験において節点数 115852 の時の 2 相コンクリートモデルとモルタルのみのモデルとの  $X=50\text{mm}$  での垂直応力 ( $\sigma_{xx}$ ) の比較を示す。図-12 に示す破線は、立方体に内接する円柱に上下方向から集中荷重を与えた場合の弾性理論解<sup>5)</sup> (平面問題として

の解)であり,  $0.0637 (\sigma_{xx}=2P/\pi dl, P: \text{荷重}, d: \text{直径}, l: \text{供試体長さ})$  となっている。

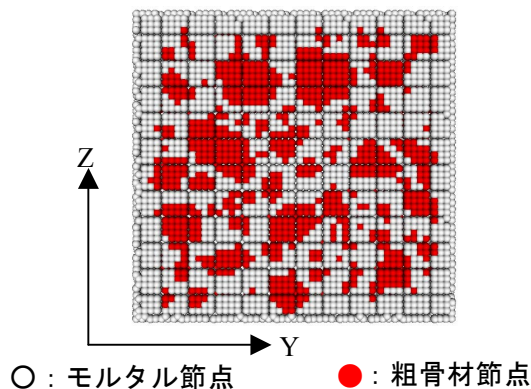


図-11 二相コンクリートモデル  
Y-Z 断面図 (X=50mm)

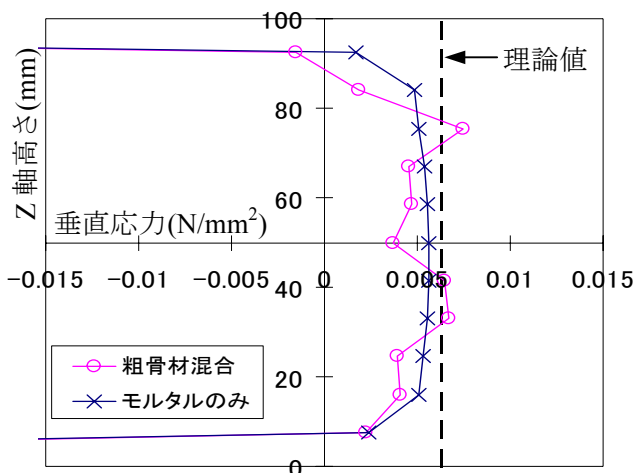


図-12 荷重軸の垂直応力 ( $\sigma_{xx}$ ) 分布

図-12 より, モルタルのみのモデルおよび 2 相コンクリートモデル共に荷重荷重地点付近で圧縮を示し, 理論値との差が見られる。この荷重点付近での圧縮応力の存在は, 実験によっても確認されており, 実際の引張強度と割裂強度との差の原因の一つとなっている。中心付近では, モルタルのみのモデルは理論値より少し低い値を示している。2 相コンクリートモデルは, 図-11 で示すように荷重軸上で粗骨材が不規則に存在するため, 理論値より少し低い所ではある。解析結果が理論値よりも低いのは, 本解析が 3 次元の弾性解析であるのに対して, 理論解は立方体に内接する円柱としての 2 次元弾性解析であるためと思われる。

## 5. まとめ

本研究では, 粗骨材形状データを利用してモルタルと粗骨材により構成される 2 相コンクリートモデル作成法を提案し, 以下の結果を得た。

- (1) 粗骨材をデジタルカメラで撮影したデジタル画像から, 粗骨材形状データを作成する方法を示した。
- (2) 粗骨材形状データを解析を行うコンクリートモデル内部にランダムに挿入することで実際のコンクリートに近似した 2 相コンクリートモデルを作成した。
- (3) 2 相コンクリートモデルを用い, 基礎的な数値解析例として割裂試験, 圧縮試験を行いコンクリート内部の粗骨材の応力状態を良好に評価することができた。また, 節点数を増加させることにより, より詳細な粗骨材の応力状態を表現出来た。
- (4) 今後の研究課題として, 2 相コンクリートモデルをより複雑な構造物や粗骨材自体の膨張を考慮するアルカリ骨材反応等に応用していく。

## 参考文献

- 1) 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 集), 64 巻, 1998
- 2) 松原仁・伊良波繁雄・富山潤・矢川元基：フリーメッシュ法による骨材とモルタル 2 相モデル化したコンクリートのひび割れ解析, 平成 14 年度土木学会西部支部研究発表会, CD-ROM, 2003
- 3) 土木学会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, 2000
- 4) 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, 日本コンクリート工学年次論文報告集, CD-ROM, 2002
- 5) S.P. シモチェンコ・J.N. グーディア：弾性論, コロナ社, 1973