物理シミュレーション技術を利用した二相コンクリートモデル作成手法の提案

琉球大学　正会員　○富山　潤　　日本原子力研究所　松原　仁
琉球大学　学生会員　山城建樹　　琉球大学　学生会員　入部綱清
琉球大学　正会員　伊良波繁雄

１．はじめに

コンクリートの諸問題を数値解析的に解く場合，一部の研究を除いて，コンクリートを均質な連続体と扱う場合が多い．その大きな原因の一つとしてコンクリート内部の粗骨材の複雑な形状や分布をモデル化（メッシュ分割）することが困難であることが考えられる．筆者らの既往の研究では，有限要素法などの解析データとして実コンクリートに非常に近似した二相コンクリートモデルを提案している．今回は二相コンクリートモデル作成手法として物理シミュレーション技術を利用することで既存の作成手法よりも高速でユニークな手法を提案する．また，数値解析例として，その二相コンクリートモデルを解析データとしたボクセル有限要素法により，コンクリート内部で生じる複雑な応力分布をシミュレートした．

２．ボクセル有限要素法と二相コンクリートモデル

２．１　ボクセル有限要素法 [1)]

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．本研究では，ボクセル要素としてアイソパラメトリック六面体一次要素を使用した．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係数マトリックス作成が材料数分でよく，大規模解析に有利である．

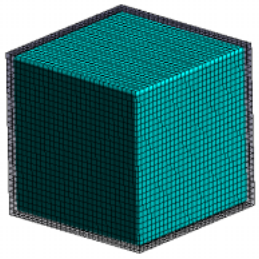
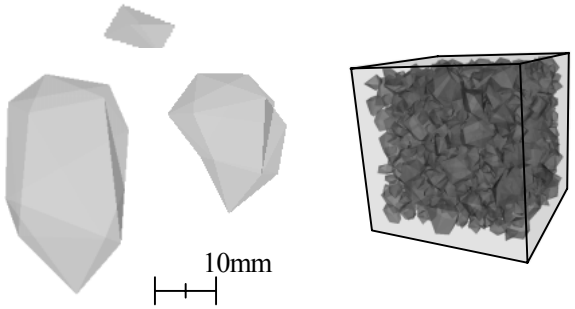


図-1 ボクセル有限要素法の解析領域概念図

２．２　二相コンクリートモデル [2)]作成方法

筆者らはコンクリートをモルタルと粗骨材の二相複合材料と仮定し，解析モデルとして二相コンクリートモデル [2)]を解析に用いた（**図-2** 参照）．しかし，その粗骨材混入法は，解析領域内に大小，形状の異なる粗骨材を位置，回転量などを乱数制御することで実際のコンクリートに近いモデルの作成を可能にしていた．しかし，この手法は粗骨材の混入時間に問題がある．そこで今回新たにこの粗骨材モデルの混入方法（二相コンクリートモデル作成方法）として物理シミュレーション技術を利用する手法を提案する．

本手法の特徴は，粗骨材を剛体と仮定し，物理法則に従った剛体的振る舞いを考慮することで，型枠内部への粗骨材の混入を高速かつ容易に行える点である．



(a) 粗骨材モデル　　(b) 二相コンクリートモデル

図-2　粗骨材モデルおよび二相コンクリートモデル

ここで剛体運動のシミュレーションについて簡単に説明しておく．剛体の運動は，並進運動と回転による姿勢変化，また，剛体同士の衝突，停止などを考慮する必要がある．

剛体の運動は，並進運動については式(1)に示すニュートンの第2法則，回転運動については，式(2)によって表すことが出来る．

$$F = ma \tag{1}$$

$$M = I\alpha \tag{2}$$

ここで，Fは力ベクトル，mは質量，aは加速度ベクトル，Mはトルク（ベクトル），I は慣性モーメントテンソル，αは角速度ベクトルである．また，剛体の姿勢制御には四元数（クォータニオン）を用いている．

多数の剛体が存在する剛体運動のシミュレーションで最も時間を要するのは，衝突の検出である．本研究では，境界球法に加え，頂点と面，辺と面に関する衝突判定を行った．しかし，このような方法では，アルゴリズムも複雑であり，物体

キーワード　二相コンクリートモデル，粗骨材モデル，物理シミュレーション手法，剛体運動，ボクセル有限要素法
連絡先　〒903-0129　沖縄県西原町字千原 1 番地　琉球大学工学部環境建設工学科　TEL098-895-8649

同士の貫入が生じる場合もある．また，時間的問題もある．これらの問題を解消する手法として鈴木らによるボクセルベースの衝突シミュレーション手法[3]が開発されており，今後検討する予定である．

衝突後の運動量の変化は，衝突した物体の相互作用力から求めている．また，運動の時間積分は４次のルンゲ･クッタ法により離散化を行った．

２．３　材料の貼り付け方法

ここでは，二相コンクリートモデルの表面パッチデータを利用したボクセル有限要素法の解析データ作成法を簡単に説明する．材料データの作成は，ボクセルデータと二相コンクリートモデル（モルタル＋粗骨材）の粗骨材配置データを比較し，それぞれのボクセル要素の材料定数を決定した(**図-3** 参照)．

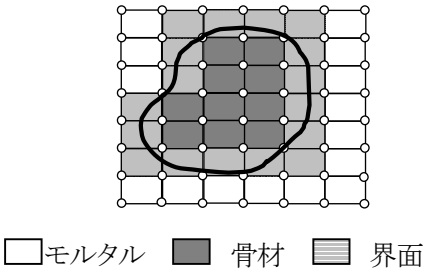


図-3 解析モデルへの材料データの貼り付け法

３．数値解析例

ここでは，上記で説明した物理シミュレーションを利用した二相コンクリートモデル作成法により作成したモデルを用いた弾性応力解析を示す．

解析対象としたコンクリートの寸法は100×100×100mmの立方体とし，粗骨材を**図-4** に示すように立方体の上方から次々に自由落下させ，二相コンクリートモデルを作成した．

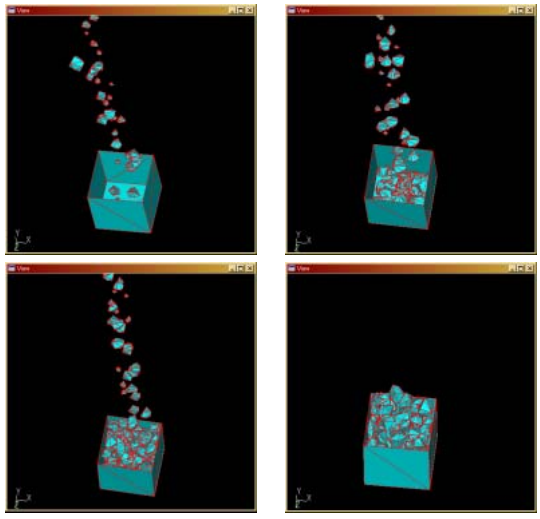


図-4　粗骨材の混入状況

今回作成したモデルは，衝突応答アルゴリズムがあまいため，いくつかの粗骨材で貫入するといった不都合が生じたが，本手法による二相コンクリートモデル作成法は，従来の方法と比較すると計算時間の問題が大幅に改善されると予想され．今後詳細な検討を行う．

次に弾性応力解析(圧縮，引張)を示す．両解析とも底面完全固定とし，上面に 10kN の力を加えた．解析に用いた材料定数を**表-1** に示す．また，**図-5** に x=50mm 断面の粗骨材分布と**図-6** にその断面での解析結果（最大主応力分布）を示す．これより，コンクリート内部での複雑な応力分布がシミュレートできていることが確認できる．

表－1 材料定数

	$Ec(N/mm^2)$	ν
モルタル	20000.0	0.21
粗骨材	55122.5	0.15
界面	15000.0	0.21

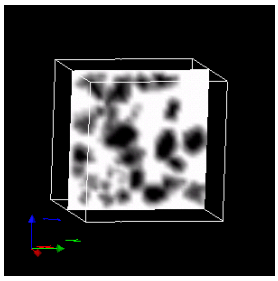
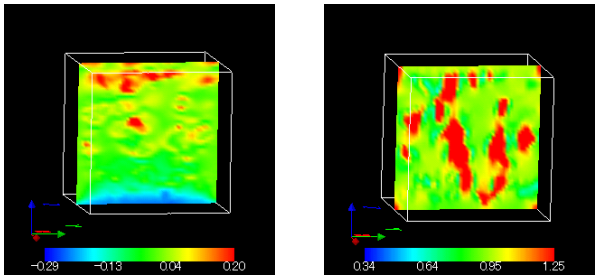


図-5 粗骨材分布（x=50mm 断面：125000 要素）



(a) 圧縮荷重　　(b) 引張荷重

図-6 解析結果（x=50mm 断面；最大主応力分布 (N/mm^2)）

４．まとめ

本論文は，物理シミュレーション手法を利用した二相コンクリートモデルの作成法を提案し，そのモデルを用いた応力解析を行い，良好な結果を得た．

参考文献:

1) 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.

2) 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.

3) 鈴木克幸，ほか：ボクセルベース衝突判定アルゴリズムを用いた剛体運動シミュレーション，土木学会，応用力学論文集，Vol.6，pp.131-139，2003.8