

ボクセル有限要素法による粗骨材を考慮したコンクリートの破壊特性に関する解析的研究

琉球大学 学生会員 ○山城 建樹 琉球大学 正会員 富山 潤
 琉球大学 正会員 伊良波 繁雄 琉球大学 学生会員 松原 仁
 琉球大学 学生会員 入部 綱清

1. はじめに

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、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⁾を組み合わせることでコンクリート内部の複雑な破壊挙動の解析を行い、本解析手法の妥当性を検討した。

2. ボクセル有限要素法

2.1 ボクセル有限要素法

ボクセル有限要素法では、図-1に示すように解析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。また、要素形状が全て同一であるため、要素剛性マトリックスの作成が材料数分で良く、従来の有限要素法に比べ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、大規模解析に有利である。

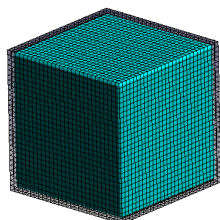


図-1 ボクセル有限要素法の解析領域概念図

2.2 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。よって本研究では、以下に示す処理を用いて X-FEM³⁾との組合せにより自由境界面を表現している。

- ・ 1つ以上の境界ボクセルに属する節点を Enriched Node とし、式(1)に示す変位場を適用する(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 とし、削除する。
- ・ それ以外の節点は、通常節点 (Normal Node) である。

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

ここで、 N_i は要素頂点 i の形状関数、 ϕ は領域内部で1、外部で0となる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。

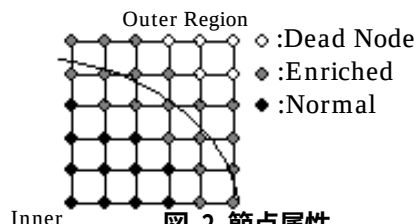


図-2 節点属性

3. 二相コンクリートモデルと材料定数

3.1 二相コンクリートモデル

本研究では、粗骨材の形状をデジタル画像から抽出し、

粗骨材形状データとして PC 内に蓄積した。この粗骨材形状データを、コンクリートの粒度分布を考慮し解析領域内に挿入することにより、二相コンクリートモデルを作成した(図-3 参照)。

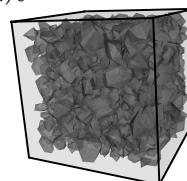


図-3 二相コンクリートモデル

3.2 ボクセル要素の異種材料判定法

本研究では、ボクセル要素で分割された解析領域に、二相コンクリートモデルを対応させることで、粗骨材領域に含まれる節点、モルタル領域に含まれる節点を判定し、各要素の材料定数を決定している。具体的には図-4に示すように、モルタル領域に含まれる節点でのみ構成される要素はモルタル、粗骨材領域に含まれる節点でのみ構成される要素は粗骨材とした。また、異種領域の節点で構成される要素は境界要素(界面)と簡易的に仮定した。

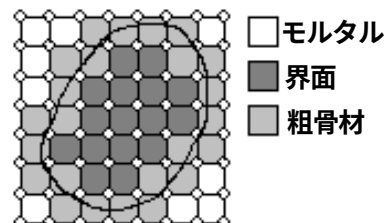


図-4 ボクセル要素の材料定数判定図

4. 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式を用いた増分法を採用した。この手法は、スナック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。また、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は、図-5に示すひび割れ方向を任意に求めることのできるひび割れ帯モデルを用いた。図-6に本解析で引張軟化モデルとして用いた 1/4 モデルを示す。

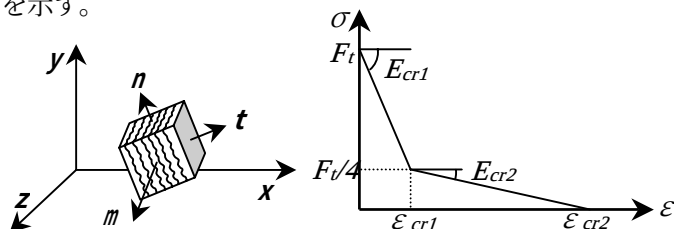


図-5 ひび割れ帯モデル

図-6 引張軟化モデル

5. 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。

5.1 簡易粗骨材モデルを用いたひび割れ解析

ここで、粗骨材の有無によるひび割れ挙動の変化を確認するため、図-7に示すモルタルのみの供試体(CASE1)、

中央にモルタルより低強度な簡易粗骨材を含む供試体(CASE2), 中央にモルタルより高強度な簡易粗骨材を含む供試体(CASE3)の3種類の円柱供試体モデルを用いた数値解析を行う。なお, 本解析は変位制御で行い, 変位増分 Δu は 3×10^{-4} mmとした。また, 時間増分 Δt は0.001秒とした。表-1に本解析に用いた材料定数を示す。

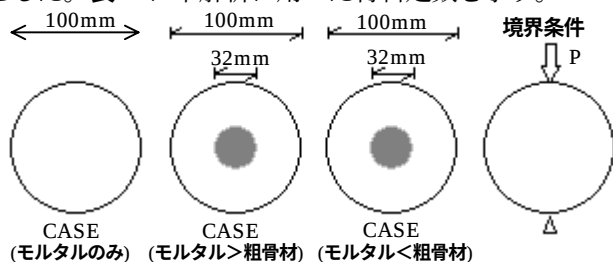


図-7 円柱供試体モデル

表-1 材料定数

		E_c (N/mm ²)	ν	f_t (N/mm ²)	G_t (N/mm)
CASE1	モルタル	20000.0	0.21	2.214	0.1
	粗骨材	11300.0	0.15	1.000	0.1
CASE2	界面	11300.0	0.21	1.000	0.1
	モルタル	20000.0	0.21	2.214	0.1
CASE3	粗骨材	56122.5	0.15	5.524	0.1
	界面	15000.0	0.21	1.107	0.1
	モルタル	20000.0	0.21	2.214	0.1

本解析結果より得られたひび割れ進展状況を図-8に示す。なお, ひび割れは積分点ごとに評価しており, ひび割れと判定された積分点の位置をプロットしてひび割れを表現している。

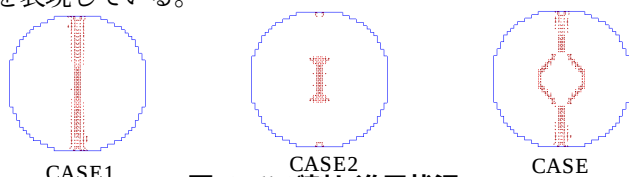


図-8 ひび割れ進展状況

CASE1: 上下端部から載荷軸上に沿ってひび割れが進展し, 最終的に供試体中央でつながった。

CASE2: 粗骨材界面からひび割れが発生後, 供試体中央へと進展しモルタルの強度を超えと一気に破壊した。

CASE3: 上下端部から供試体中央に向いひび割れが進展した後, 粗骨材を覆うように粗骨材界面にひび割れが進展した。最終的には粗骨材に沿ったひび割れが上下端部からのひび割れとつながった。

5.2 二相コンクリートモデルを用いたひび割れ解析

ここで, 粗骨材がコンクリートのひび割れ挙動に及ぼす影響を確認するため, モルタルのみのモデルと, 図-9に示す粒度分布の二相コンクリートモデルを用い, 割裂試験の3次元解析を行う。材料定数は, 前項のCASE3を用い, $\Delta t=0.001$ 秒, $\Delta u=5 \times 10^{-4}$ mmとした。

図-10に本解析結果より得られたモルタルのみのモデルと二相コンクリートモデルを用いた場合の荷重-変位曲線を示す。また, 図-11, 図-12に図-10の①~④に示す荷重レベルでのひび割れ進展図を示す。

図-10より, モルタルのみのモデルと二相コンクリートモデルの最大荷重が異なっている。これは二相コンクリートモデルの場合, 界面の強度がモルタルより低いいため, 界面から破壊が進行したと考えられる。しかし, 図-10のモルタルのみのモデル④の値は, モルタルの引張強度より求めた最大荷重($P = \sigma_{xt} \pi d l / 2$)にほぼ一致した。また, 図-10の二相コンクリートモデル④'の値は, モルタルと界面の引張強度より求めた最大荷重の平均値にほぼ一致した。この結果から, 各材料での物性値を求め

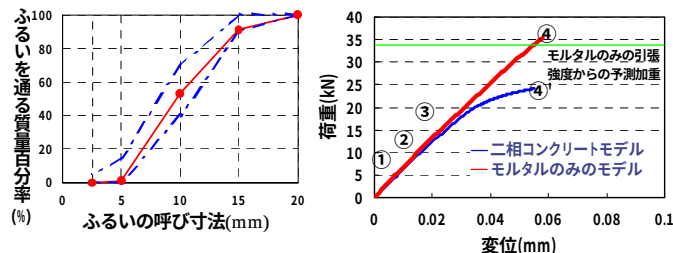


図-9 粗骨材の粒度曲線

図-10 荷重-変位曲線

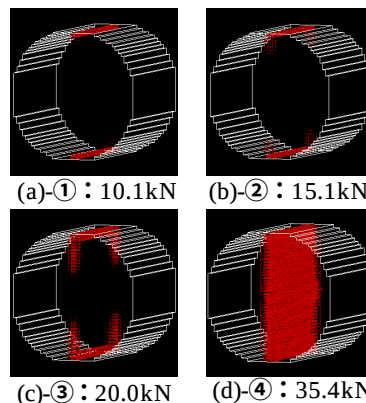


図-11 ひび割れ進展図(モルタルのみ)

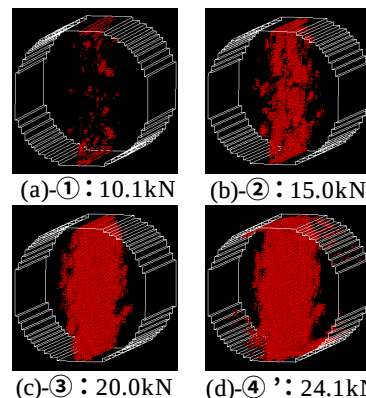


図-12 ひび割れ進展図(二相コンクリートモデル)

ることが出来れば, コンクリートの破壊挙動が解析的に予測可能になると考えられる。

図-11, 図-12において, モルタルのみのモデルでは, ひび割れが載荷軸上に沿って一様に進展しているのに対し, 二相コンクリートモデルは粗骨材を避け, 界面に沿って進展し, 複雑な破壊挙動を示した。これは, 実際の割裂試験においても粗骨材とモルタルの強度差に開きがある場合に確認されることから, 本解析でコンクリートへの粗骨材の影響を考慮出来ていると考えられる。

6. 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るコンクリートの割裂試験の破壊解析を行った。今後, 様々な実験結果との比較を行い, 粗骨材面に沿った破壊挙動も考慮した研究を行う予定である。

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, コンクリート工学論文報告集, Vol.125, No2, pp.169-174, 2003
- 2) 鈴木克幸, ほか: 多重ボクセル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) 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
- 4) 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, No1, pp.29-38, 2000