

## PDS-FEM を用いた不均質弾塑性体の破壊現象の数値解析

日建設シビル(株) 正会員 ○門前 敏典  
 東京大学地震研究所 正会員 小国 健二  
 東京大学地震研究所 正会員 堀 宗朗

### 1. 背景と目的

本研究の目的は、不均質弾塑性体の破壊現象を再現・予測するため、弾塑性解析に破壊現象の表現を取り込んだ数値解析プログラムを作成し、そのプログラムを用いた数値解析を行うことである。

破壊現象は、材料の剛性や強度などの不均質性によって破壊面の発生箇所、進展経路およびその形状が大きく異なる。そのため、均質的なモデルを用いて破壊面の進展経路を詳細に追跡することの意味は薄く、材料の不均質性を表現した解析モデルを用いて複数回の数値解析を行い、破壊の発生パターンとそのばらつきを求めることが重要である。しかし、破壊現象を対象として複数回の数値解析を行うためにはその計算コストが問題となる。本研究では破壊現象を簡便に表現することの出来る数値解析手法である Particle Discretization Scheme Finite Element Method(PDS-FEM)を大規模並列計算システム ADVENTURE の弾塑性 FEM ソルバ、ADVENTURE\_Solid に実装し、材料の不均質性を考慮した複数回の数値解析を行った。

### 2. PDS-FEM

PDS-FEM はいたるところ不連続な形状関数を用いて変位場の離散化を行うため、破壊に伴う要素内の不連続性を要素剛性マトリクスの変化として表すことが可能であり、FEM ソルバへ容易に適用することが可能となる。また、リメッシュ法などのように破壊の表現に際し行列の次元を変更する必要がないため、計算コストが低い。そして、非破壊時の剛性マトリクスが一樣ひずみの要素を用いた通常 FEM と等しく、また、破壊時における剛性マトリクスの変化方法が確立されている。図-1 に、PDS-FEM で用いる四面体要素を示す。

### 3. ADVENTURE

PDS-FEM を実装するために用いた ADVENTURE\_Solid は、大規模並列計算システム ADVENTURE における固体静解析のための FEM ソルバである。弾塑性応答のモデル化には von Mises の降伏条件におけるバイリニア型の硬化関数を使用、非線形解析についてはコンシステント接線剛性を用いた Newton-Raphson 法による収束計算を行っており、並列計算の環境下において高速に弾塑性解析を行うことが可能である。

### 4. 解析アルゴリズム

上述した ADVENTURE\_Solid に、PDS-FEM を実装することで数値解析プログラムを作成した。破壊基準としては、直ひずみの閾値を設定し、要素内の最大主ひずみが閾値を超えたときに最大主ひずみ方向にもっとも近い方向の法線ベクトルを持つ面が破断するといった単純な引張破壊基準を使用。解析アルゴリズムは、载荷ステップごとに破壊基準を満たした要素の中で最大主ひずみが最も大きい要素の一つを選び出し、その剛性マトリクスを変化させるというように、各ステップにおいて

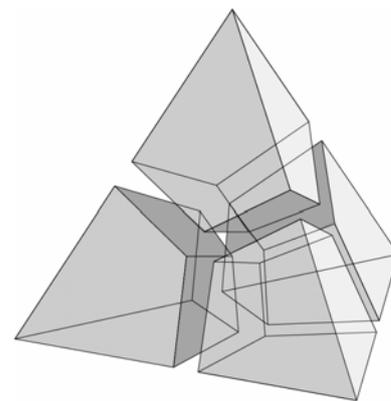


図-1 PDS-FEM における四面体要素

1つの要素のみが破壊するものとした。破壊した要素の剛性マトリクスを変化させた後、破壊が生じた要素に

キーワード PDS-FEM, ADVENTURE, 破壊現象の数値解析, 不均質弾塑性体

連絡先 〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1 東京大学地震研究所 1 号館 615 号室 TEL 03-5841-1774

ついて応力テンソルの破壊面方向に対するトラクションを0とする操作を行い、境界条件を一定に保ったまま(次の荷重ステップへと移行せずに)応力・ひずみ分布を再計算する。なお、一度破壊した要素はそれ以上破壊しない。この過程を繰り返し、全ての要素において破壊基準を満たさなくなった時点で次の荷重ステップへと移行する、というアルゴリズムにより破壊進展の数値解析を行った。

表-1 解析に用いた物性値

物性値の名称	単位	モルタル	骨材
弾性係数	(kN/cm <sup>2</sup> )	2450	5096
ポアソン比		0.19	0.2
加工硬化係数	(kN/cm <sup>2</sup> )	612.5	-
初期降伏応力	(N/cm <sup>2</sup> )	261.3	-
引張強度	(N/cm <sup>2</sup> )	294	539

5. 解析例

解析例として、モルタルと粗骨材による複合材料(無筋コンクリートを想定)の一軸引張試験を模した数値解析を行う。表-1に解析に用いた物性値を、図-2に解析モデルおよび解析条件を示す。

6. 解析結果

材料の不均質性を考慮し、粗骨材の体積割合を一定に保ったまま配置を変化させた100個のモデルについて一軸引張破壊の数値解析を行った。破壊面は概ね荷重方向と直交する方向に進展し、粗骨材配置の微妙な違いによる破壊面形状の微妙な差異は見られる(図-3)が荷重変位曲線のばらつきは非常に少ない。図-4に、図-3左の解析結果に対応する荷重変位曲線を示す。他の解析結果においても図-4とほぼ重なる荷重変位曲線が得られている。一方で、破壊面の発生位置は大きく異なるという引張破壊試験の性質が捉えられている。

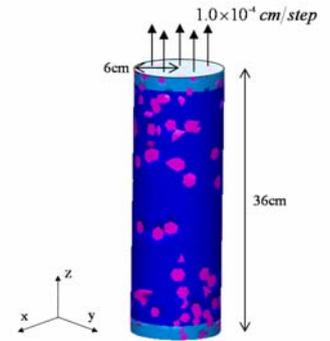


図-2 解析モデル・解析条件

図-3が荷重変位曲線のばらつきは非常に少ない。図-4に、図-3左の解析結果に対応する荷重変位曲線を示す。他の解析結果においても図-4とほぼ重なる荷重変位曲線が得られている。一方で、破壊面の発生位置は大きく異なるという引張破壊試験の性質が捉えられている。

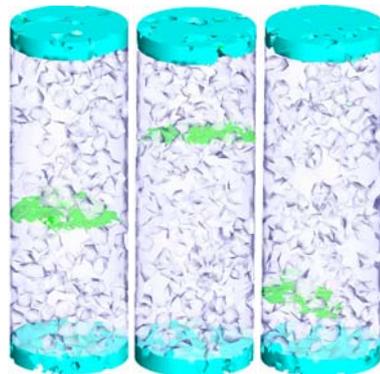


図-3 破壊面形状・発生位置

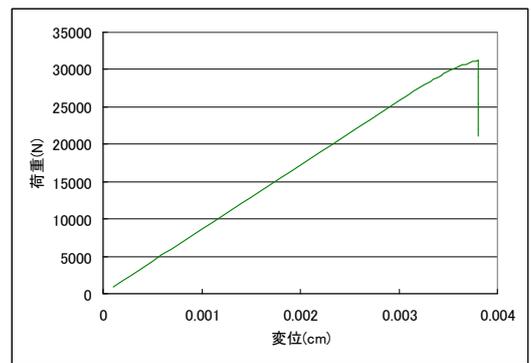


図-4 荷重変位曲線

図-5は破壊面の形状の確率分布を示すために、100回の破壊進展解析で得られた、さまざまな位置からさまざまな方向に発生する破壊面の進展開始位置と方向をそろえ、3次元空間内での破壊面の通過回数をプロットしたものである。破壊面は荷重軸と垂直な方向に安定して進展し、荷重軸に平行な断面図(とくにy=6の面)からは、直径12cmの供試体での破壊面の方向のばらつきは約3cm程度といった、破壊現象の中で生じるばらつきを定量的に評価することが可能である。

7. まとめ

本研究ではPDS-FEMの静的弾塑性FEMソルバへの実装を行い、3次元問題における弾塑性挙動と破壊現象の数値解析

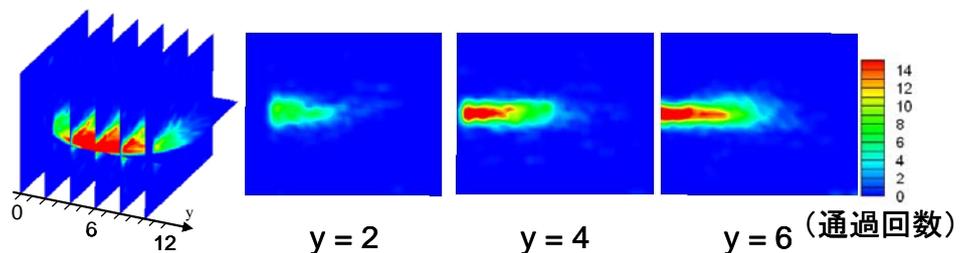


図-5 破壊面の通過回数の頻度分布(破壊開始点をそろえることで正規化後)

を実現した。100ケースの解析モデルによる計算結果より、発生箇所が様々に異なる破壊面と、そのばらつきに関する情報を得るといった、モンテカルロ・シミュレーション的な扱いの可能性を検討した。

参考文献

小国健二, 堀宗朗, 阪口秀:破壊現象の解析に適した有限要素法の提案 土木学会論文集, Vol. 766, I-68, pp. 203-217, 2004.