3次元個別要素法による三軸圧縮試験のシミュレーション解析

(株)竹中工務店 正会員 恒川裕史 内田明彦 正会員 畑中宗憲

1. まえがき

砂などの粒状体のせん断特性を知るための要素試験には、粒状体の粒径や配置、境界条件が影響を及ぼす。筆者らは、 これらの条件が及ぼす影響を評価するため、個別要素法を用いて三軸圧縮試験(CD 試験)のシミュレーション解析を行 なってきた¹⁾。本研究では、分布粒径モデルを用いた3次元個別要素法によって、これらの影響を検討した。

2. 解析条件

表-1 解析ケース ケース 半径 境界 要素数 解析ケース メンブレン境界を用いた均等粒径モデルと分布粒 均等径 1.67mm メンブレン 3DE 6,498径モデルとの解析を行なった。解析ケースを、表1に示す。要素 3DD 分布径 0.94-5.8mm | メンブレン 6,038 間バネ定数や減衰定数は2つのケースで同じものを使用した。

解析手順

1. 均等粒径では要素を規則的な六角形に、分布粒径では粒度分布を与えてランダムに配置する

2. 円筒形の固定境界を設定し、1Gの重力を下方に作用させて要素が安定するまで解析する

3. 分布粒径では所定のサイズになるように上部の余分な要素をカットする

4. 上下載荷板を固定して重力を解放し、メンブレン境界を設定して 49kPa まで側圧を上げ、安定するまで解析する

5. 上載荷板をひずみ制御で下降させ、軸ひずみ15%までの圧縮試験をシミュレーションする

メンブレン境界は従来の研究²⁾と基本的に同じものだが、分布粒径モデルにおける解析の不安定性を解消するために改 良を加えた。具体的には、境界を構成する要素を選択する際に、従来は外側から要素の中心が見えることが唯一の条件 であった。本研究では、当該要素よりも全体が外側に位置する要素3個以上がオーバーラップしている場合には、境界 として選択しないと言う条件を加えた。なお、上下の載荷板と要素との摩擦は、要素境界間摩擦角を45度とした。

解析結果 3.



図-1 15%変形時 (3DE) 図-2 15%変形時 (3DD) 図-3 室内試験結果 図-4 変位差 (3DE) 図-5 外向き要素 (3DE) 変形状態 図-1および図-2に、均等粒径モデルと分布粒径モデルの軸ひずみ 15%時の変形状態を示す。参考のために、同 じ拘束圧で豊浦砂を用いて行なった室内試験での変形状態(軸ひずみ17%時)を図-3に示す。室内試験では、供試体はちょ うちん型に変形し、せん断帯が観察され始めたのは軸ひずみが12%に達した頃であった。均等粒径モデルでは、左右に 均等の変形ではないものの、軸ひずみ6%程度からクロスするような形でせん断帯が生じた。これに対して、分布粒径モ デルでは、左右に膨らむような変形を起こしているものの、もともとの配置がランダムであるためか、供試体外側から 明確なせん断帯を観察することはできなかった。

せん断帯を更に詳しく調べるために、均等粒径モデルについて、破壊が起こった軸ひずみ 6.13%時の挙動を検討した。

破壊前から破壊後までの変位差(変位ベクトル)を図-4に示す。この図から、せん断帯がX型に生じていることがわかる。 また、せん断帯ではベクトルの方向が大きく変化しており、せん断帯を境にして、上下方向の動きをしている要素と、供 試体の外側向きに動いている要素に分かれていることが観察できる。これを裏付けるために、外側向きに動いている要 素のみを選択して表示したのが図-5である。これは、供試体の破壊によって、せん断帯を境にして供試体の外側に膨らん だ部分であり、このような表示によって、3次元的なせん断帯の分布を容易に観察することができる。

この手法を分布粒径モデルに対して適用したのが図-6である。分布粒径モデルでは、均等粒径モデルほど明確な破壊現 象は見られないが、後述するように軸ひずみ5.45%付近で急激な変化が見られる。そこで、軸ひずみで5.45%から5.5%ま での変位差に基づいて、外側向きに動いている要素を選択して表示した。下部に要素が残っているなど、均等粒径モデ ルほど明確ではないが、蝶ネクタイ型に要素が表示されており、X型にせん断帯が形成されていることがわかる。

<u>ひずみ分布</u> 図-7は、均等粒径モデルにおいて軸ひずみ15%時のひずみが大きな要素のみを選んで示したものである。要 素が X 型に並んでおり、図-1や図-4と対比することで、せん断帯付近ではひずみが大きくなっていることがわかる。選 び出される要素は、ひずみの閾値に左右されるため一意ではなく、厳密なせん断帯を抽出するには更なる検討が必要で ある。なお、各要素のひずみは Bardet ら³⁾の local deformation gradient に基づいて算出した。

<u>応力ひずみ関係</u>図-8に、各ケースの応力ひずみ関係を、図-9に体積ひずみと軸ひずみとの関係を示す。均等径モデルは、 室内試験と比べて最大主応力差が倍以上に大きくなっているが、反対に分布径モデルでは1/4 程度に小さくなっている。 均等径モデルでは、軸ひずみ 6.13%で大きな破壊が起こり、応力が急に低くなっている。これは、均等径モデルでは要 素が規則的に配置されているために、当初は非常に噛み合わせが良く、大きなせん断力に抵抗するものの、一度破壊す ると噛み合わせが一度に外れてしまうためと考えられる。分布径モデルではそれほど大きな変化はないものの、主応力 差、体積ひずみともに 5.5%付近に段差があり、この付近で比較的大きな破壊が生じたことがわかる。室内試験ではこう した段差は見られないものの、軸ひずみと体積ひずみとの関係は分布径モデルでの結果と良く一致している。

4. まとめ

3次元個別要素法を用いて砂の三軸圧縮試験のシミュレーション解析を行なった。均等径のモデルでは、破壊後には明確なせん断帯が現れたが、分布径では観察できなかった。しかし、破壊直前から直後までの変位ベクトルを検討することで、分布径でもせん断帯が生じていることが明らかになった。また、せん断帯内部ではひずみが大きくなっていることを確認した。均等径では最大軸応力が高くなり、分布径では小さくなる傾向は2次元個別要素法による解析と同じであった。特に後者は、回転が拘束されていないためと考えられ、回転の拘束を生じる仕組み⁴⁾を導入することで改良されることが期待できる。分布径のモデルでは、軸ひずみと体積ひずみとの関係が室内試験の結果と良く一致した。なお、解析には京都大学防災研究所の澤田助教授のプログラム DEMS を改良して使用しました。

- 1) 恒川裕史,畑中宗憲:個別要素法による三軸圧縮試験シミュレーション,土木学会全国大会第54回年次学術講演会,1999.
- 2) 恒川裕史: 3 次元個別要素法による三軸圧縮試験解析のためのメンブレン境界の導入, 第34 回地盤工学研究発表会, 1999.
- 3) Bardet and Proubet: A numerical investigation of the structure of persistent shear bands in granular media, Géotechnique 41, No.4, pp.599-613, 1991.
- 4) 岩下和義ほか: 粒子節点でのモーメンと伝達を考慮した個別要素法の研究, 土木学会論文集, No.529/III-33, pp.145-154, 1995.







図-6 外向き要素 (3DD) 図-7 ひずみ分布 (3DE)



図-9 体積ひずみ軸ひずみ関係