

3次元個別要素法による岩石力学試験のシミュレーション解析

関西大学大学院 学生会員 高藤 早織
 JR 西日本(株) 正会員 辰巳新太郎
 関西大学工学部 フェロー 楠見 晴重

1.はじめに

岩盤構造物の安全な設計・施工には、岩盤不連続面のせん断メカニズムの解明が求められている。また岩盤構造物を建設する際、多くの費用と時間を要す事前調査が必要とされています。本研究はせん断メカニズムの解明を試み、事前調査における改善を目的とし、岩石の力学的特性を把握するための最も基礎的な試験である、一軸圧縮試験及びせん断試験を行う。解析には個別要素法を用い、コンピュータ上での3次元化を試みた。また、解析結果をアニメーション化し、岩石供試体の破壊過程の可視化を行い、岩石破壊の一連の挙動を把握することを試みた。

2.解析概要

2.1 個別要素法

個別要素法とは、P.A.Cundall¹⁾によって考案された、不連続体を対象とした解析手法の1つである。数値シミュレーション対象を微小な粒子の集合体とし、各粒子に運動方程式(式(1))を立てることで、岩盤などの動力学的挙動を解析する方法である。粒子間に仮想バネを設け、その作用力から加速度、速度、変位を算出することにより、粒子の挙動の追跡が可能となる。

$$m \cdot \ddot{\mathbf{r}} + C \cdot \dot{\mathbf{r}} + F = 0 \quad (1)$$

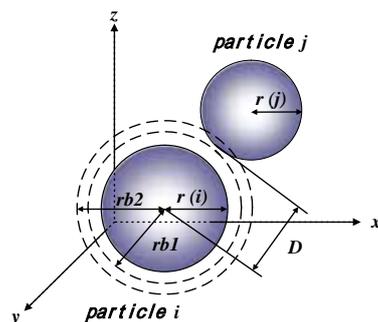


図-1 粒子概要

2.2 ボンディング力

岩盤などを考えたとき、接触する粒子は何らかの方法で密着しているため、個別要素法の反発力ではこれを十分表現することが出来ない。そこで、粒子の距離

が離れると粒子を引き戻すような力として、ボンディング理論²⁾を導入し、個別要素法による連続体解析を可能とすることを試みた。図-1は、粒子の概要図である。本研究では、粒子の初期状態は gap_0 で重なるものとし、粒子にボンディング半径 (r_{b1} , r_{b2}) を定義する。 r_{b1} で引張力が降伏に至り、 r_{b2} でボンディングが破断する。粒子が r_{b2} より大きくなると作用力は0となり、ボンディングが破断される。以上のように定義された粒子に働く作用力は、以下のように定式化できる。

$$F_{ij} = \begin{cases} k \cdot r(i) - D - gap_0 & (r(i) - gap_0 < D) \\ 0 & (r(i) - gap_0 = D) \\ K_{b1} \cdot D - r(i) + gap_0 & (r(i) - gap_0 < D < r_{b1}) \\ K_{b2} \cdot D - r(i) + gap_0 & (r_{b1} < D < r_{b2}) \\ 0 & (r_{b2} < D) \end{cases} \quad (2)$$

2.3 モデルの作成

粒径 0.125 ~ 0.165cm のランダム粒子を用いて供試体モデルを作成する。粒子を六方最密充填構造に配列し、乱数発生プログラムにより粒子番号、粒子配列をランダムにする。その後、重力落下により粒子が定常状態となるまでパッキングを行い、モデルを作成する。

3. 一軸圧縮試験のシミュレーション解析

3.1 解析モデル

図-2は、解析モデルを示す。パッキングされた粒子群から直径 5cm、高さ 10cm の円柱供試体を切り取り作成する。解析は、供試体の上・底面に壁を設け、等大逆向きの速度で動かすことを行っている。



図-2 一軸圧縮試験モデル

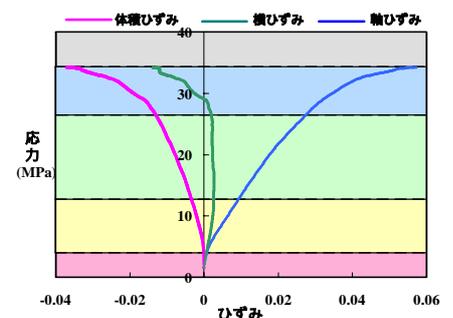


図-3 応力-ひずみ曲線

キーワード 個別要素法, 一軸圧縮試験, せん断試験, シミュレーション

連絡先 〒564-8680 大阪府吹田市山手町3丁目3番35号 関西大学工学部地盤システム工学研究室 TEL06-6368-0837

3.2 応力 ひずみの関係

図-3は、応力-ひずみの関係を示したものである。一軸圧縮強度は34.3MPaと算出された。一般の岩石圧縮試験において、ピーク強度を呈する前段階で、横ひずみ・体積ひずみが膨張側へ遷移することがわかっている。このことより、本研究は、一般的な岩石圧縮試験における応力 ひずみの関係を表現できたと考えられる。また、Bieniawskiの脆性破壊機構³⁾と比較しても、よく似た結果を示している。

3.2 破壊状況

図-4は、供試体の破壊状況を示したものである。ボンディングが破断した粒子を赤色で表現し、破壊状況の可視化を試みた。step=0は初期状態、step=1は完全弾性変形(赤色)領域の様子を示す。step=2は安定クラックが発達する(緑色)領域を示し、供試体全体にクラックが発生し始めていることが確認される。step=3は、不安定クラックが供試体を分断する(青色)領域を示し、粒子が破砕されていることが確認される。

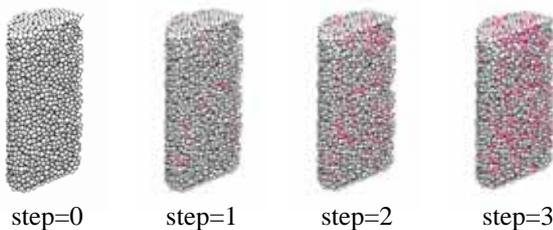


図-4 破壊状況

4. せん断試験のシミュレーション解析

4.1 解析モデル

図-5は、解析モデルを示す。パッキングされた粒子群から5cm*5cm*10cmのソーカット供試体を切り取り作成する。z軸方向に垂直拘束圧壁を設け、垂直拘束圧一定のもとx軸方向に設けたせん断壁を、一定の変位制御で動かす。なお、y軸方向に拘束壁は設けていない。

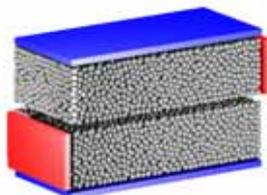


図-5 せん断試験モデル

4.2 せん断応力 せん断変位曲線・ダイラタンシー

図-6は、解析結果から得られたせん断応力 せん断変位曲線、図-7はダイラタンシーを示している。両結果において、一般的なソーカット供試体のせん断試験を定性的に良く表現できていると考察される。

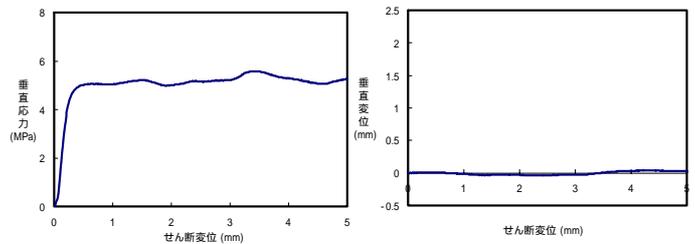


図-6 せん断応力-せん断変位曲線

図-7 ダイラタンシー

4.3 せん断挙動

図-8は、供試体の破壊状況を示したものである。垂直壁が作動した後、せん断壁によってせん断される様子が確認できる。一般的なせん断試験において、ソーカット供試体は、平滑な不連続面に沿って滑らかにせん断され、破壊が生じないとされている。このことより、本研究は一般的なソーカット供試体におけるせん断試験をよく表現できていると考察される。

5. まとめ

一軸圧縮シミュレーション解析において、応力 ひずみの関係で、Bieniawskiの脆性破壊機構とよく似た結果を得ることができた。また、本解析手法によって、供試体内部の破壊挙動の可視化が可能となった。さらに、ソーカット供試体のせん断試験において、一般的なせん断試験を定性的に表現することが可能となった。

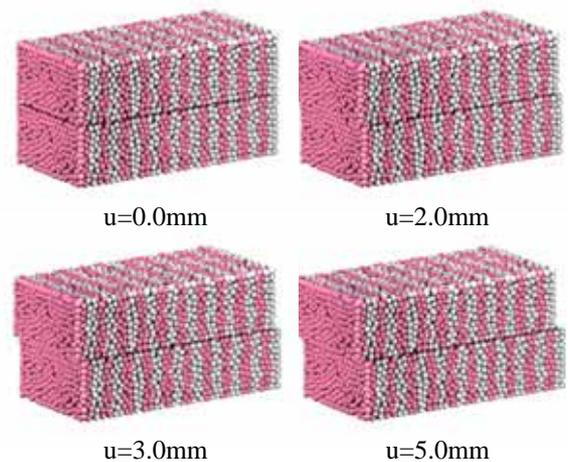


図-8 せん断挙動

参考文献

- 1) Cundall,P.: A computer model for simulation progressive, Large scale movement in blocky rocks system, Symp. ISRM Nancy France Proc, Vol. pp129-136, 1991.
- 2) F. Donze, P. Mora and S. Magnier: Numerical simulation of faults and shear zone, Geophys. J. Int. Vol. 116, pp. 46-52, 1979.
- 3) 岩の力学委員会: 岩の工学的性質と設計・施工への応用, 土質工学会, pp. 220-223, 1982.