

関西大学工学部 正会員 楠見 晴重

関西大学大学院 学生員 ○杉野 友通

京都大学大学院 正会員 芦田 譲

1. はじめに

個別要素法とは、P.Cundall¹⁾によって提案された地質や岩盤構造の解析に対する数値シミュレーションの手法である。この手法が従来の連続体の数値解析法、すなわち有限要素法などと異なるのは、破壊に伴う大変形挙動を解析できることが大きな特徴である。

しかし、従来の個別要素法では、要素間の力の伝達は、要素が互いに接触している時のみ行われる。つまり、砂のような粒状体に対しては適応性が高いが、粒子間の間隙が満たされた岩盤のような連続体に対して適用させるには多くの困難を伴う。本研究では従来の個別要素法に引張力(ボンディング力)の概念を加え、インタクトな岩石のせん断挙動に関するシミュレーション解析を行った。

2. 解析手法

図-1に粒子の概略図を示す。個々の粒子は剛体であり変形しないものとする。しかし、粒子同士は重なり合うことが可能であり、粒子同士のオーバーラップの距離に比例し反発力が働くものとする。図-1より、粒子のオーバーラップの距離 Δn が定義できる。つぎに、粒子に働く力は Δn に比例するものとする。また、作用反作用の法則から粒子jに対する粒子iの力 F_{ij} と、粒子iに対する粒子jの力 F_{ji} は以下のように算出される。

$$F_{ij} = -F_{ji} = k \cdot \Delta n \quad (1)$$

ここで、 k はばね定数である。

求められた合力 F に対して、質量が m の円形要素について以下の運動方程式が成り立つ。

$$m \cdot \ddot{\mathbf{u}} + C \cdot \dot{\mathbf{u}} + F = 0 \quad (2)$$

ここで、 F ：粒子に作用する合力、 C ：減衰定数

$\mathbf{u}$ ：粒子の変位ベクトル

この式から粒子の加速度が求まり、それを時間積分することで変位となり、粒子を移動させることが出来る。

3. ボンディング力

図-2において、粒子iのボンディング半径を $r_1(b)$ 、 $r_2(b)$ と定義する。式(3)はボンディングにより接着された場合の作用力について示す。ボンディング力は、粒子iに対して粒子jが $r(i)$ と $r_1(b)$ の間にある場合は粒子間の距離が大きくなるに従って一次的に増加し、 $r_1(b)$ と $r_2(b)$ の間にある場合は一次的に減少する。また、式(4)のように、ボンディングの切れた粒子や接着されていない粒子は反発力のみが作用するものと定義した。

接着されている場合次式のように定義できる。

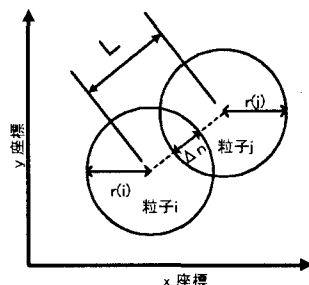


図-1 粒子の概略図

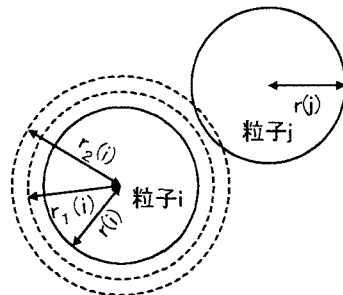


図-2 ボンディング概略図

$$\mathbf{F}_{ij} = \begin{cases} k \cdot \Delta n & L < r_1(b) + r(j) \\ k(r_2(b) + r(j) - L) & r_1(b) + r(j) < L < r_2(b) + r(j) \\ 0 & r_2(b) + r(j) < L \end{cases} \quad (3)$$

接着されていない、あるいはボンディングが切断した後の粒子間の作用力 $\mathbf{F}_{ij}$ は以下ようになる。

$$\mathbf{F}_{ij} = \begin{cases} k \cdot \Delta n & L < r(i) + r(j) \\ 0 & r(i) + r(j) < L \end{cases} \quad (4)$$

4. 解析結果

本研究で行ったインタクト供試体せん断試験解析について示す。

インタクト供試体のせん断試験の解析をするにあたって以下の供試体モデルを作成した。供試体を構成する粒子は、等径で6角形配置とし横方向に80個、縦方向に41個の粒子を配置した。ここで、同モデルを用いて行った一軸圧縮試験での降伏応力を σ_c とする。せん断試験は、上下より拘束壁を垂直応力がそれぞれ $\sigma_n/\sigma_c = 0.02, 0.05, 0.20$ の一定を保つように制御し、せん断方向の壁に一定速度で変位を与え解析を行った。

図-3 は、 $\sigma_n/\sigma_c = 0.02$ の破壊後の供試体モデルを示したものである。亀裂はせん断応力の作用する両サイドの中央部から供試体内部に進行し、せん断破壊した。また、破壊後の亀裂は凹凸状の不連続面となった。これは、実際のインタクト供試体のせん断挙動に近い状態を示すことができたと考えられる。

図-4 は、インタクト供試体のせん断挙動における応力・ひずみ曲線を示す。横軸にせん断ひずみ、縦軸に τ/σ_c をとり正規化した。この図から、せん断応力 τ/σ_c が最大値に達するまで一次的に増加していることがわかる。また拘束圧 σ_n/σ_c を大きくすると、せん断応力 τ/σ_c も大きくなる傾向がみられた。これは実際の応力・ひずみ曲線の挙動を定性的に評価することができたと考えられる。

図-5 は、図-4 と同条件下における垂直ひずみ・せん断ひずみ曲線を示している。垂直応力がより大きくなるにしたがい、ダイレーション挙動は小さくなる傾向がみられる。これは、亀裂によっ

て発生したアスペリティー間の乗り上げが、垂直応力の低い方が多くなるためである。したがって、本解析手法において、ダイレーション挙動は定性的には、再現されていると考えられるが、実際のダイレーション挙動とはかけ離れた箇所が存在することから、今後さらに多くの検討を要する。

5. まとめ

個別要素法にボンディングの概念を導入することにより、インタクト供試体のせん断挙動に対して、応力・ひずみ特性、ダイレーション特性を定性的に表すことができたと思われる。また、ボンディングの破断により岩盤不連続面の形成が確認された。今後は、実際の岩盤挙動と比較し力学的条件を決定していく。そして、種々の岩盤不連続面に対してせん断挙動に関するシミュレーション解析を行う予定である。

参考文献 1) Cundall, P.A. and Strack, O.D.L., A discrete numerical model for granular assemblies, *Geotechnique*, 29, 47-65, 1979.

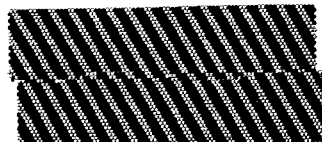


図-3 せん断後のモデル

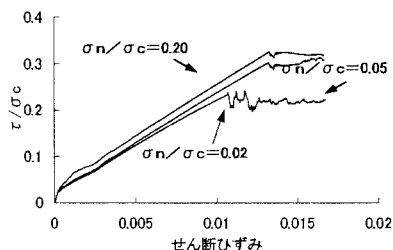


図-4 せん断ひずみ-応力曲線

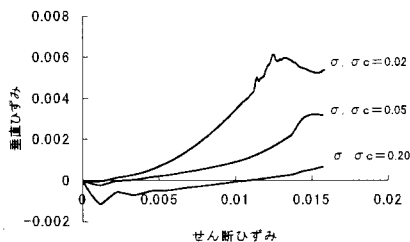


図-5 ダイレーション挙動