

個別要素法による岩盤不連続面のせん断機構に関する シミュレーション解析

Simulation analysis for shear behavior mechanism of rock joint using distinct element method

辰巳新太郎*・楠見晴重**・芦田譲***・松岡俊文****

Shintaro TATSUMI, Harushige KUSUMI, Yuzuru Ashida and Toshihumi Matsuoka

In this paper, simulation analysis for shearing behavior of rock discontinuity by distinct element method is proposed. The purpose is behavior of surface of discontinuity in the shear process and destruction situation of the roughness are clarified by numerical simulation. By using this analysis method, it became possible that the behavior of the test-piece model, the shear strength and the die ration behavior are analyzed. And, distribution situation of the internal stress in the shear process was clarified by visualizing the stress which affects each particle.

Key Words: rock discontinuity, shear behavior, DEM, simulation analysis

1. はじめに

岩盤における不連続面は、力学的特性に支配的な影響を及ぼす。したがって、岩盤不連続面の力学的特性に対する研究は非常に多く行われてきたが、従来の研究においては、実験によるせん断挙動の研究が多く、これらは主に強度を推定することを目的としている。そのため、破壊状況の推定や不連続面のせん断挙動を正確に捉えることは困難であった。

以上のような背景から、本研究では、標準的な不連続面形状である JRC 標準断面を有する不連続性岩盤を、実験的手法ではセメント供試体を用い、解析では個別要素法を用いてモデル化することで、岩盤不連続面のせん断機構を解明することを試みた。個別要素法は、不連続体解析に対して有用性が高いとされ、特に破壊を伴う大変形問題に対しての解決策として注目を浴びている。しかし、岩質部は連続体であるため、従来の個別要素法では表現不可能であった。そこで、本研究では不連続体解析手法である個別要素法に引張力の概念を導入し、連続体に対して適用可能な解析手法とした。本解析手法を用いてシミュレーションを行うことにより、岩盤不連続面のせん断挙動特性を解明することを試みた。

2. 解析手法

2.1 個別要素法

* 学生会員 関西大学大学院工学研究科土木工学専攻

** フェロー 関西大学工学部都市環境工学科

*** 正会員 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻

**** 正会員 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻

個別要素法¹⁾とは、P.Cundall によって考案された解析手法であり、主に岩盤や地盤と言った不連続体を対象としている。数値シミュレーション対象を微小な粒子を集合体として巨視的に捉えることにより、岩盤などの動力学的挙動を解析する方法である。個々の粒子間に仮想のばねを配し、その作用力から加速度、速度、変位を算出し粒子の挙動を追跡する解析手法である。図-1 に、粒子モデルの初期状態を示す。今回の解析では、ばねの自然長を初期モデルの接触距離 (gap) とし、作用力を算出している。

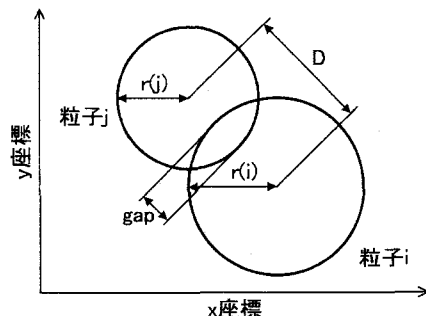


図-1 初期モデル

2.2 ボンディング力

岩盤のような固体に対して粒状体のモデルを適用する場合、粒子間に作用する力は反発力のみではない。コンクリートや岩盤などを考えたとき、隣接する粒子は何らかの方法で接着されており、粒子間には引張力が作用すると考えられる。そこで、本研究ではボンディング力を導入することにより、引張力を表現した。

図-2 に示すように、 r_{b1} と r_{b2} の 2 種類のボンディング半径を定義する。 r_{b1} は引張力が降伏に至る距離、 r_{b2} はボンディングが破断する距離を示している。つまり、接触点である r から r_{b1} まで引張力は一次的に増加し、 r_{b1} を境に r_{b2} まで一次的に減少する。さらに、 r_{b2} に至るとボンディングは破断し、引張力は 0 となる。以上のように定義されたボンディング力は、以下のように定式化できる。

$$F_{ij} = \begin{cases} K \cdot \Delta n & (D < r_{b1}(i) + r(j)) \\ K \cdot (r_{b2} + r(j) - D) & (r_{b1}(i) + r(j) < D < r_{b2}(i) + r(j)) \\ 0 & (r_{b2}(i) + r(j) < D) \end{cases} \quad (2.1)$$

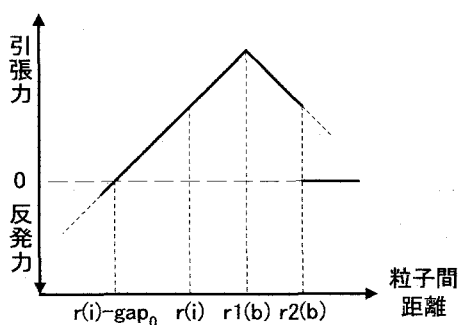
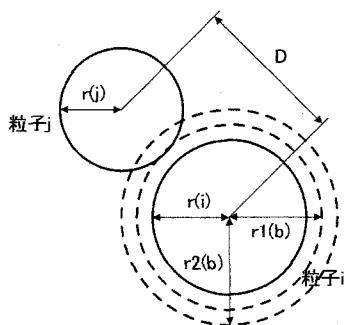


図-2 ボンディング概念図

2.3 モデルの作成

解析対象とした不連続面は、JRC 標準断面を有する供試体モデル 5 種類 (JRC=2-4, 6-8, 10-12, 14-16, 18-20) である。供試体モデルの作成には、表面形状計測装置²⁾ (レーザープロファイラー) を使用した。JRC 標準断面を有する金型を表面形状計測装置により測定し、ラフネスの座標データを取得する。本研究では、平均粒径 0.2mm のランダム粒子を用いてモデルを作成する。このランダム粒子を、六角形格子状に配列し、自然落下によりパッキングを行う。ただし、縦方向の重力加速度と同時に、横方向に正弦波を掛け合わせることで振動を与え、より均質で密

なモデルができるように考慮した。図-3は、そのモデル作成図を示している。減衰関数により振動が定常状態になった後、ラフネスの座標データを用いて、高さ50mm、幅100mmとなるように切り取りを行った。その結果、粒子数は約2万個での解析となった。

2.4 解析モデル

本研究では、垂直応力一定、せん断変位制御の直接一面せん断試験を対象として、シミュレーション解析を行った。図-4に示すように、供試体モデルの上下に拘束壁、左右にせん断壁をせん断試験機と同様に設定した。拘束壁は、設定された応力値よりも壁に作用する応力が大きくなると、その応力を開放する方向に移動する。逆に、設定した応力値よりも作用した応力が小さくなると圧縮する方向へ移動する。これは、実際のせん断試験機とほぼ同様な機構で垂直応力を一定に制御することができる。せん断壁は、変位制御により5mmまで行った。試験条件は、垂直応力0.5, 1.0, 2.0MPaの3条件で行った。

3. せん断特性

3.1 供試体モデルのせん断挙動

図-5は、JRC=2~4およびJRC=18~20の供試体モデルのせん断過程における挙動を示したものである。シミュレーション結果から、不連続面のせん断挙動は、せん断面に対して俯角を有するラフネスに沿って乗り上がりが生じている様子が確認できた。また、破壊形状については、JRC値の高い供試体における、アスペリティー角の高いラフネスに対して破壊が生じていることが確認できた。岩盤不連続面のせん断挙動として、乗り上がりと破壊の両方が同時に進行するという減少がよく表現できている。また、JRC値の小さなモデルでは接触箇所が複数存在するため、不連続面全体でせん断抵抗を発揮するものと考えられる。JRC値の大きなモデルでは、アスペリティー角の高い一部のラフネスのみが接触するため、アスペリティー角の高いラフネスがせん断抵抗を発揮するものと考えられる。

3.2 せん断応力-せん断変位曲線

図-6は、実験結果とシミュレーション解析から得られたせん断応力-せん断変位曲線を示している。シミュレーション解析結果において、実験結果と同様に変位の進行と共に一次的に増加し、ピークに達した後はほぼ一定の値となっている。このこ

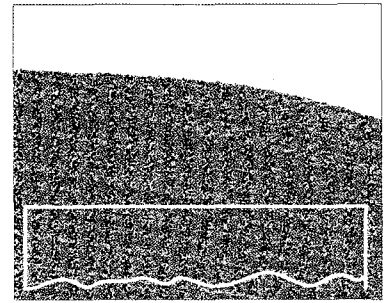


図-3 モデル作成概念図

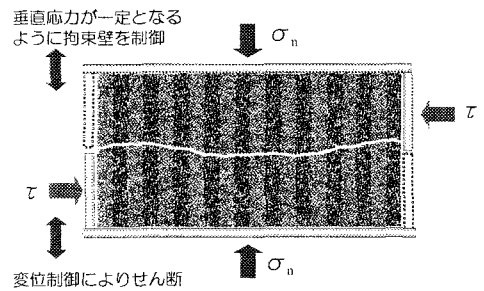
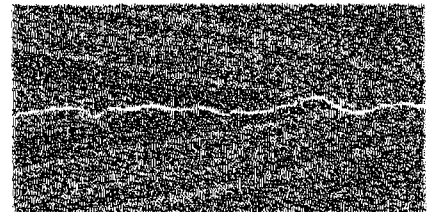
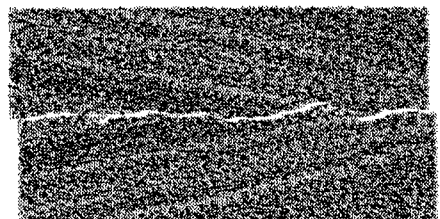


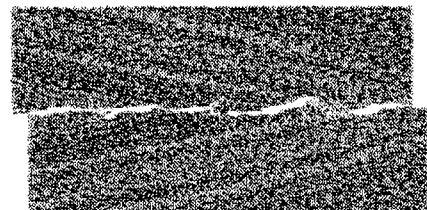
図-4 解析モデル



step=0



step=200000



step=300000

図-5 供試体のせん断挙動(JRC=18-20)

とから、定性的に岩盤不連続面のせん断挙動を表現できていると考えられる。また、ピーク応力の値も解析値のほうが大きく出るが、ほぼ同等の値を示していることから定量的側面からの評価も可能であると考えられる。しかし、ピーク後に若干の応力の振動が見られる。これは、供試体モデルが粒状体であることに起因すると考えられる。実験結果においては、せん断応力のピークが見られた後、若干の応力の減少が確認できる。これは、アスペリティーの破壊後に応力が減少したものと考えられる。シミュレーション解析においては、破壊が生じているにもかかわらずピーク応力の後の、応力の減少が見られない。これは、個別要素法のパラメータとして用いている、粘性係数の影響ではないかと考えられる。また、垂直応力の増加に伴いせん断応力も増加していることから、シミュレーション解析における垂直応力の依存性が表現できていると考えられる。

3.3 垂直変位-せん断変位曲線

図-7は、実験結果とシミュレーション解析から得られた垂直変位-せん断変位曲線（ダイレーション挙動）を示している。せん断変位が進みに従い、垂直変位が増加していく様子が認められる。不連続面の乗り上がりから、垂直方向のダイレタンスーが生じていることがシミュレーション解析により確認できた。また、垂直変位は拘束圧の影響により、垂直応力が高いものほど変位量が抑制されていることがわかる。実験結果と同様に、せん断の進行に伴いアスペリティーの破壊が生じるため、ダイレタンスー挙動が抑制されていく様子がよく表現されている。しかし、実験結果と比較するとシミュレーション結果のほうが大きな値となっている。これは、粒子サイズによる分解能の限界が主要要因であると考えられる。

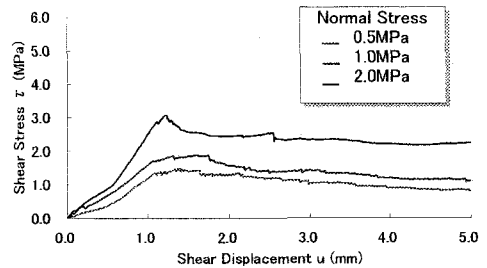
4 内部応力分布

4.1 内部応力の可視化

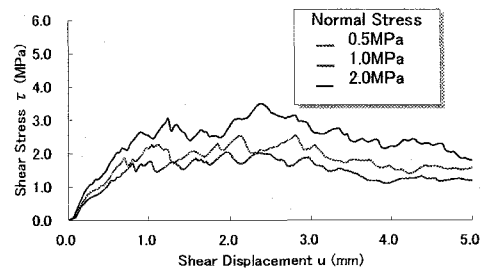
個別要素法における内部応力の算出手法³⁾として、Cundallにより以下の式が提案されている。

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{V} \sum_{p=1}^N r_p \left\{ \sum_{c=1}^{m_p} n_i^c F_j^c \right\} \quad (4.1)$$

ただし、 V :粒子の体積、 r_p :粒子の半径、 n_i^c : p 粒子に接触している c 粒子の単位法線、 F_j^c : p 粒子に接触している c 粒子の作用力、 N : p 粒子に接触している粒子数、 m_p : p 粒子の接触数

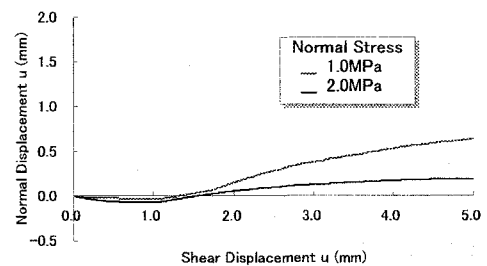


(a) 実験結果

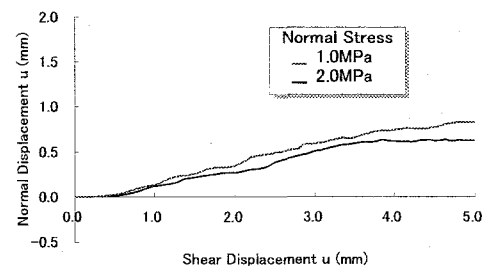


(b) シミュレーション解析結果

図-6 せん断応力-せん断変位曲線
(JRC=18-20)



(a) 実験結果



(b) シミュレーション解析結果

図-7 ダイレーション挙動(JRC=18-20)

これは、粒子に作用する力を成分分解し、その方向ごとに足し合わせて体積で除することで、応力テンソルを表現している。これにより、各粒子に作用する応力が算出でき巨視的に見た内部応力を示すことが可能となる。しかし、ボンディングについての考慮がなされていないため、引張力についての算出が十分といえない。また、主応力方向を定めることが困難で、せん断解析におけるせん断応力を算出することができない。そこで、本研究では力の伝達を行うばねに着目し、以下の式により内部応力を算出した。

$$\sigma_n = \frac{1}{V} \sum_{p=1}^N r_p \left\{ \sum_{c=1}^{m_p} [F_n]_j^c \right\} \quad (4.2)$$

$$\sigma_s = \frac{1}{V} \sum_{p=1}^N r_p \left\{ \sum_{c=1}^{m_p} [F_s]_j^c \right\} \quad (4.3)$$

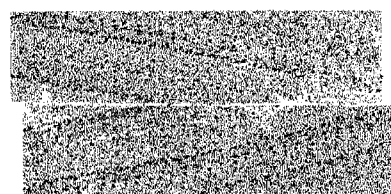
式(4.2)は法線ばねに作用する応力、式(4.3)は接線ばねに作用する応力を算出するものである。法線ばねに作用する力から垂直応力成分が計算でき、ボンディングに対しても一次的に計算が可能なことから圧縮と引張の区別が容易である。また、接線方向のばねに対する応力は、せん断成分の応力に置き換えることができ、単純に摩擦による応力であることが理解できる。このことから、本研究では以上の式を用いて内部応力の算出を行った。

4.2 内部応力分布

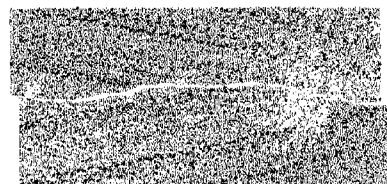
図-8は、せん断過程中の内部応力の分布状況をシミュレーション結果により可視化を行ったものである。高い応力がかかっている粒子の色を変化させることにより、応力の分布状況を可視化した。図-8(a)は、JRC 値が比較的小さな供試体モデルの応力分布状況を示したものである。アスペリティーの有する角度が比較的多いため、せん断過程において一部のアスペリティーへの応力集中が発生せず、複数のアスペリティーがせん断応力を発揮していることがわかる。不連続面全体にせん断応力が発生していることから、不連続面の摩擦がせん断強度の発現に及ぼす影響が大きいと考えられる。図-8(b)は、JRC 値が中程度である供試体モデルの応力分布状況を示したものである。JRC 値が大きくなるにつれ、アスペリティー角の大きなラフネスが存在するようになる。そのため、せん断応力はアスペリティー角の大きな一部のラフネスに集中することが確認できる。

図-8(c)は、JRC 値が大きな供試体モデルの応力分布状況を示したものである。JRC 値が大きい供試体モデルは、断面形状が起伏に富み、アスペリティー角の大きなラフネスが多数存在するため、せん断応力はアスペリティー角が大きな複数のラフネスにおいて発生することがわかった。アスペリティー角が大きなラフネスにおいて応力が集中し、破壊を伴ったせん断挙動をとることから、岩質部の強度自身がせん断強度の発現に及ぼす影響が大きいと考えられる。

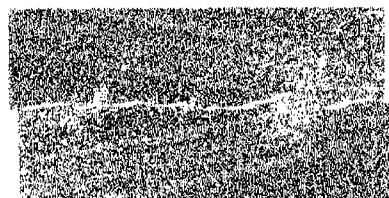
以上のように、本解析手法を用いてシミュレーション解析を行



(a) JRC=2~4



(b) JRC=10~12



(c) JRC=18~20

図-8 内部応力分布図

った結果、JRC 値の違いによりせん断強度の発現メカニズムに違いがあることが明らかになった。

4.3 破壊状況との比較

図-9 に、JRC 供試体モデルの解析結果から得られた内部応力分布と、実験から得られたセメント供試体の破壊形状を示す。実験では、解析モデルと同様な形状を持つセメント供試体を作成し、一面せん断試験を行った後、表面形状計測装置を用いて破壊状況の計測を行った。これを表したものが、図-9 の上段、下段の図である。白色、または黒色で表される部分が、せん断によってラフネスが破壊した場所である。

中段に示したのが、前述したシミュレーション解析による内部の応力分布図である。実験から得られたラフネスの破壊状況を比較すると、図中の四角で囲んだ応力の集中箇所と破壊箇所がよく一致していることが確認できる。この結果から、本解析手法の妥当性が考えられる。

5. まとめ

本研究においては、岩盤不連続面のせん断挙動特性を詳細に捉えるために、個別要素法を用いてシミュレーション解析を行った。以下に、本論文により得られた知見を示す。

- ① 破壊を伴う岩盤不連続面のせん断挙動が、個別要素法を用いて表現できた。
- ② 応力-変位関係、ダイレーション挙動から、定性的にせん断挙動を表現できていると考えられる。また、定量的な評価もほぼ可能であると考えられる。
- ③ 実験においては不可能であるせん断過程中的内部の応力分布において、個別要素法を用いて可視化を行った。その結果、JRC 値の違いによりせん断強度の発現メカニズムが異なることが視覚的に捉えられた。
- ④ 実験による破壊状況と、シミュレーション解析による内部の応力分布図を比較することで、本解析の妥当性が示された。

6. 参考文献

- 1) Cundall, P. A. and Strack, O. D. L.: A Discrete numerical model for Granular Assemblies, Geotechnique, 29(1), 47-65, 1979
- 2) 杉野友通、山田亮介、楠見晴重：自然な岩盤不連続面の空隙状況およびラフネスを考慮したせん断強度式、材料、Vol. 52 No. 5, pp483-487、2003. 5.
- 3) Cundall, P. A. and Strack, O. D. L.: Modeling of microscopic mechanisms in granular material. Mechanics of granular materials, new models and constitutive relations, pp.137-149, 1983.

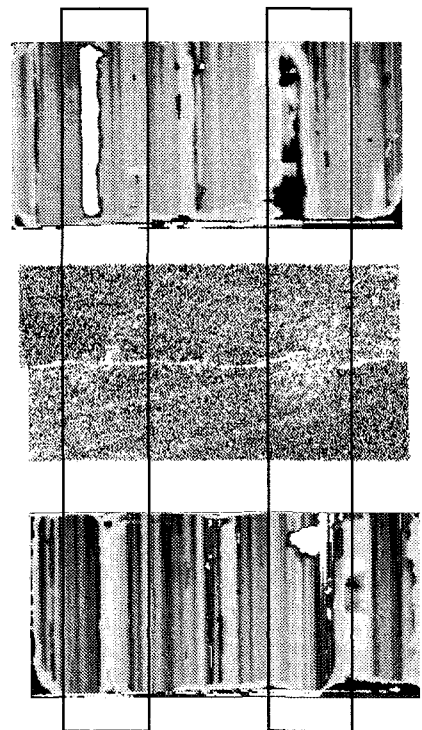


図-9 内部応力分布と破壊状況