

個別要素法による3次元岩盤不連続面のせん断挙動に関するシミュレーション解析

高藤早織^{1*}・楠見晴重²

¹関西大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (〒564-8680 吹田市山手町3-3-35)

²関西大学 工学部都市環境工学科 (〒564-8680 吹田市山手町3-3-35)

*E-mail: gj5m522@edu.kansai-u.ac.jp

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挙動の解明が重要とされている。また、岩盤構造物を建設する際には、多くの費用と時間を要す事前調査が必要となる。そこで本研究は、岩盤不連続面のせん断挙動の解明を目的とし、直接一面せん断試験についての3次元シミュレーション解析を行った。解析では、個別要素法に、引張力を表すことのできるボンディング理論を導入したものをを用いている。また、自然な不連続面を有する供試体を解析モデルとし、ボンディングの破断状況やせん断応力分布の可視化によって、せん断挙動のシミュレーションを行っている。さらに、実験との比較を行うことで、本解析手法の有用性の検討を行っている。

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

1. はじめに

岩盤中における層理や節理といった不連続面は、力学的特性に支配的な影響を及ぼしており、これまで、岩盤不連続面の力学的特性に関する研究は数多く行われてきた。しかし、従来の研究^{1)~4)}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、せん断中の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、本研究では自然な不連続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(一軸圧縮強さ 26.36 MPa)⁵⁾を用い、解析では個別要素法を用いてモデル化を行い、岩盤不連続面のせん断挙動の解明を試みた。P.Cundall⁶⁾によって考案された個別要素法は、不連続体解析に有用性が高いとされ、とく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、従来の個別要素法は、要素間には反発力のみしか働かず、実際の岩質部は連続体であるため、コンクリートや岩盤などの連続体の表現が困難であった。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で、岩盤不連続面のせん断挙動の特性を考察することが可能となった。

2. 解析手法

(1) 個別要素法

個別要素法とは、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。本解析では、ばね定数(K)に接触距離(gap)を乗ずることによって、粒子間の作用力を求めている。なお、図中のDは粒子の中心間距離である。

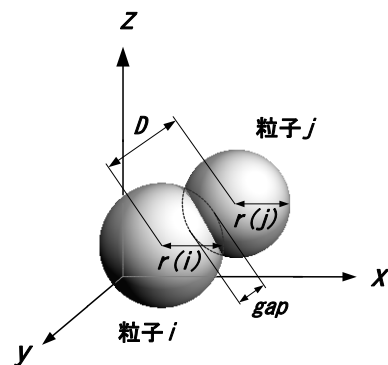


図-1 初期モデル

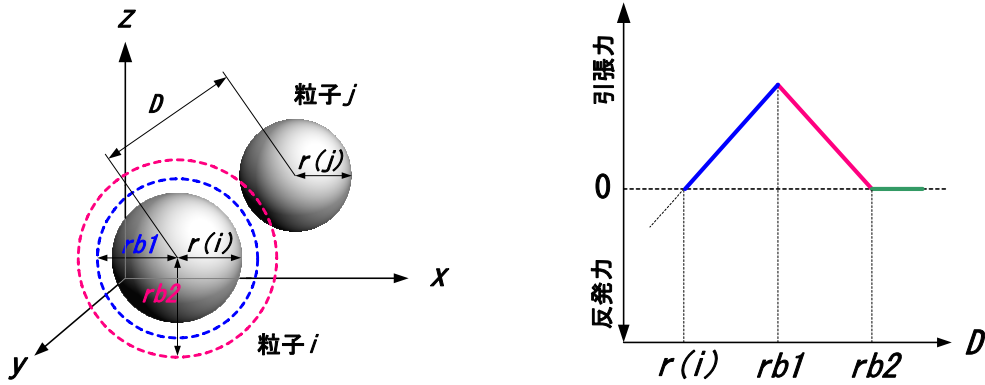


図-2 ボンディング力

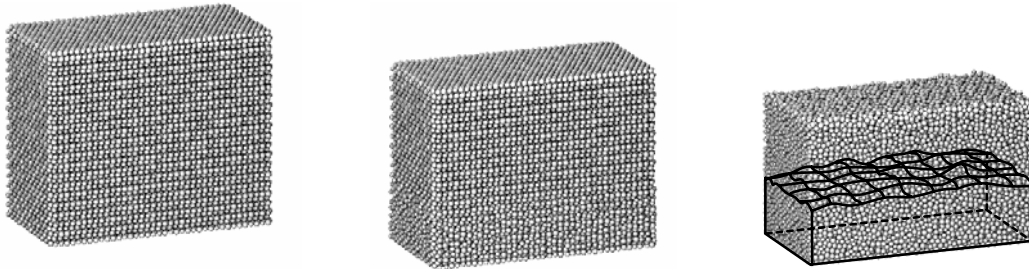


図-3 パッキング

(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結合しており、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、 $rb1$ と $rb2$ の2種類のボンディング半径を定義する。 $rb1$ は引張力が降伏に至る距離、 $rb2$ 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 $rb1$ まで引張力は一次的に増加し、 $rb1$ を境に $rb2$ まで一次的に減少する。さらに、 $rb2$ 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。なお、

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

(3) 解析モデル

解析対象とした不連続面は、自然な不連続面を有するセメント供試体である。なお、本研究ではラフネスの評価手法としてBarton and ChoubeyによるJRC値¹⁾を用いており、解析モデルの値は $JRC \approx 8$ である。解析モデルの作成には、表面形状計測装置（レーザープロファ

イラー）を使用した。自然な不連続面を有するセメント供試体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。なお本研究では、解析の都合上、実験で用いたセメント供試体の一部よりラフネスの座標を取得し、解析モデルの作製を行った。そのため、解析結果と実験結果の詳細な比較を行うことはできないが、 $JRC \approx 8$ の不連続面を有する一般的なせん断試験結果としての比較を行ったものである。

本研究では、最大粒径2.8mm、最小粒径2.0mmのランダム径粒子を用いて解析モデルを作成する。このランダム径粒子を、六角形格子状に配列し、重力落下によりパッキングを行う。図-3は、解析モデル作成図を示している。粒子間に挿入した減衰関数の作用により、粒子の振動が収束した後、せん断方向に100mm、短辺方向に50mm、高さ方向にラフネスの座標データを用いて切り取りを行った。その結果、粒子数は約36000個となった。また、解析モデルにおける不連続面の開口状況の評価は、楠見ら⁴⁾が提案する手法により、開口係数 k は0.52 ($0 < k \leq 1.0$)、平均開口幅は2.87mmと算出された。また、せん断方向に20mm、短辺方向に20mm付近で上下の供試体が接触し、せん断方向に10mm、短辺方向に10mm付近で最も開口している(5.48mm)。

(4) 解析条件

本研究では、垂直応力一定、せん断変位制御の直接

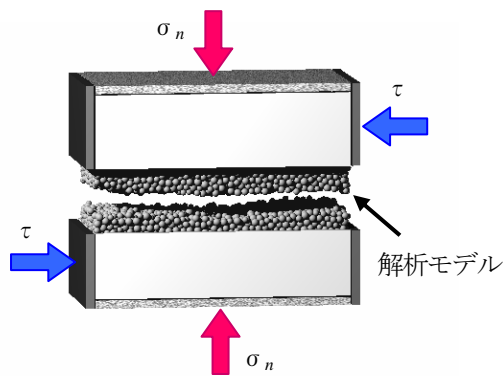


図-4 せん断試験装置

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、解析では実験で用いたせん断試験機と同様にせん断箱を作成し、そこに解析モデルを設置した。解析モデルの上下は垂直拘束壁、左右はせん断壁である。垂直拘束壁は、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、実験で用いたせん断試験機とほぼ同様な機構であり、垂直応力を一定に制御することができる。解析は、せん断変位制御により、せん断壁が5mmに達するまで行った。試験条件は、先述した自然な不連続面を有する供試体モデルについて垂直応力1.0, 2.0MPaの2ケースで行った。また、本解析で用いた垂直方向及びせん断方向のばね定数は、それぞれ $5.0 \times$

10^6N/mm , $2.0 \times 10^6 \text{N/mm}$ である。この値は実験結果⁵⁾を基に、一軸圧縮強さを表すことができる解析パラメータとして用いたものである。

3. せん断特性

(1) 解析モデルのせん断挙動

図-5は、せん断変位が2.0mm, 5.0mmにおける、解析モデルのせん断挙動を示したものであり、a)は解析モデルの全体図、b)は下部のみを抽出したものである。シミュレーションの結果より、不連続面のせん断挙動は、比較的大きなアスペリティに沿って乗り上がりが生じていることを確認できた。また、せん断の進行に伴う破壊状況を評価するために、ボンディングが破断した粒子の色を赤色に変化させている。このことにより、定性的にせん断の進行に伴うアスペリティの破壊や削れが発生した箇所を捉えることができる。その破壊状況に関しては、a)の図より、せん断変位が2.0mmのときは、特に不連続面付近でのボンディングの破断が確認できる。せん断変位が5.0mmに達すると、不連続面から解析モデル全体にボンディングの破断が広がっている様子が確認できる。このことから、せん断の進行に伴い、まず不連続面上での破壊が発生し、モデル全体への亀裂が生じると考えられる。また、b)図より、解析モデルの両端でボンディングの破断が発生していることが確認できる。この箇所は、後述する図-9に示すコ

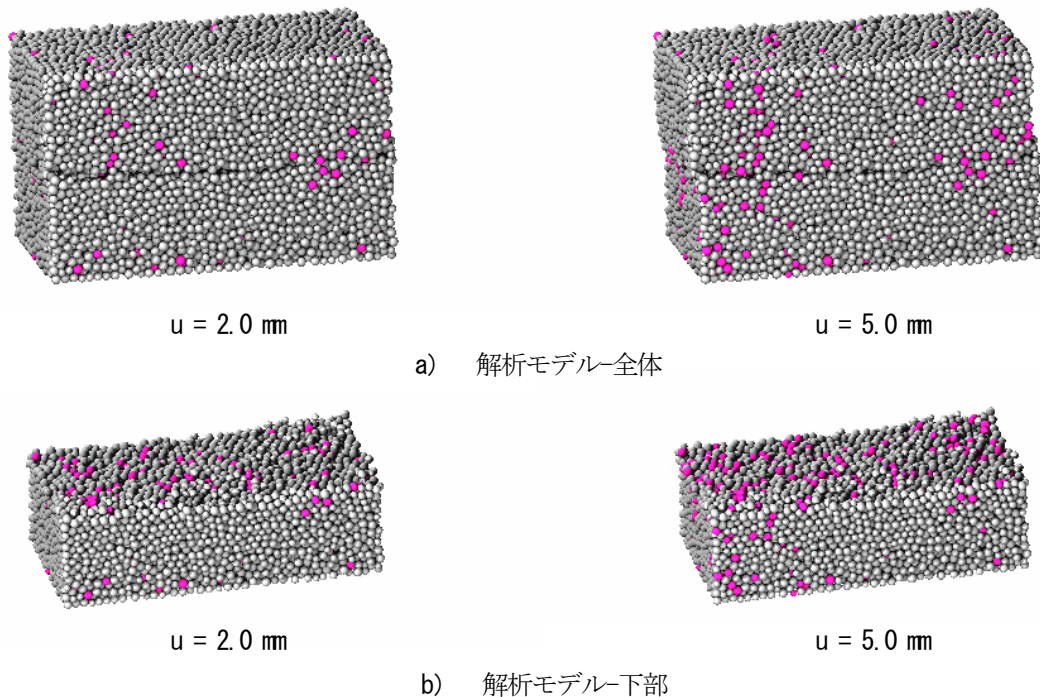
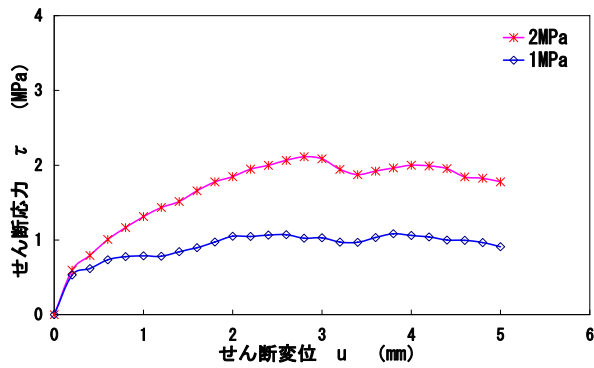
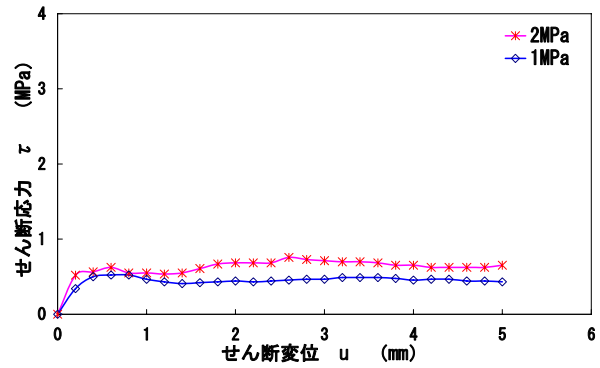


図-5 せん断挙動

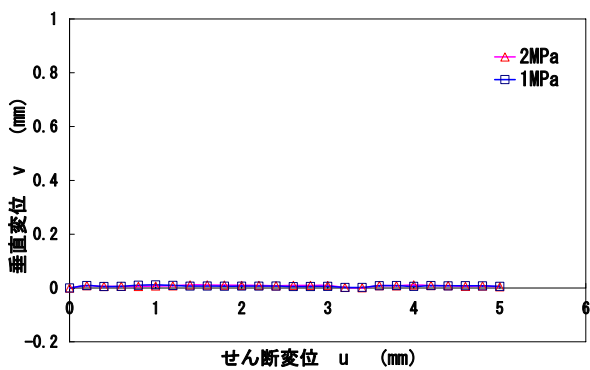


a) 解析結果

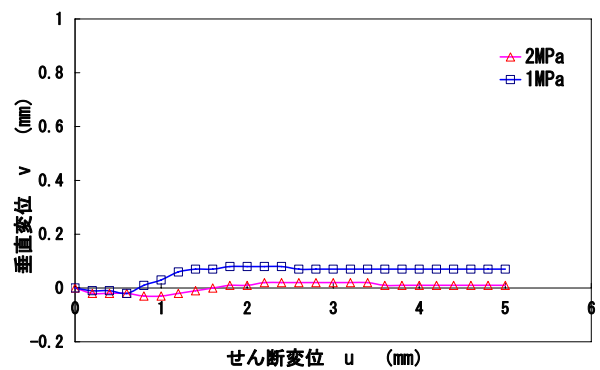


b) 実験結果

図-6 せん断応力-せん断変位曲線



a) 解析結果



b) 実験結果

図-7 垂直変位-せん断変位曲線

ンター図からもわかるように、比較的大きなアスペリティが存在している．このことから、不連続面のせん断解析では、アスペリティに依存性があると考えられる．

(2) せん断応力-せん断変位曲線

図-6は、実験結果と解析結果から得られたせん断応力-せん断変位曲線を示している．解析結果において、せん断応力は、せん断の進行と共に増加し、その後、ほぼ一定の値を示している．このことから、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、せん断応力は、垂直応力が高い条件下では高く、低い条件下では低く、実験と同様の結果を得ることができたことから、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) ダイレーション挙動

図-7は、実験結果と解析結果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．先述したように、本研究で用いた解析モデルとセメン

ト供試体モデルにおけるラフネスの形状が異なっていることから、一般的なダイレーション挙動の表現についての検証を行った．実験結果において垂直応力が1.0MPaのときは、せん断の進行に伴い体積が膨張する現象が見られ、一般的に認められるダイランシーが生じていることが確認できる．解析結果では、両垂直応力下において、多少の体積膨張が確認できる．しかし、その大きさは実験結果とは必ずしも一致していない．この原因に関しては、粒子径の大きさに起因したものと考えられるが、この点に関しては今後さらに検討を要する．

4. せん断応力分布

(1) せん断応力の可視化

個別要素法におけるせん断応力の算出手法として、Cundallによって提案された手法⁹⁾がある．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は言えず、また、せん断応

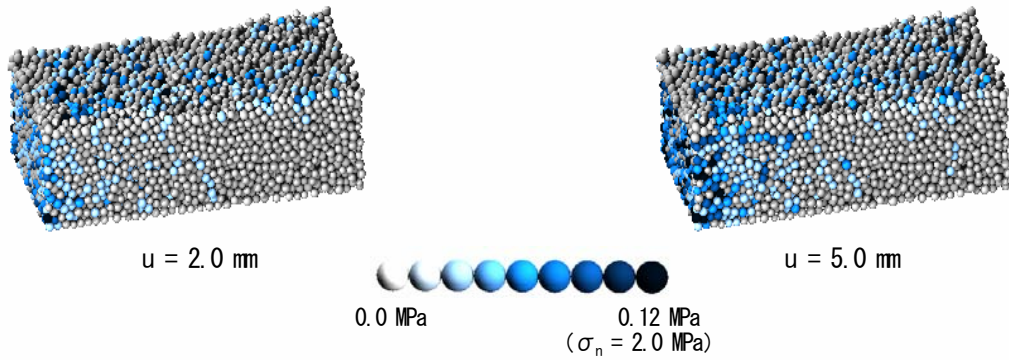


図-8 せん断応力分布

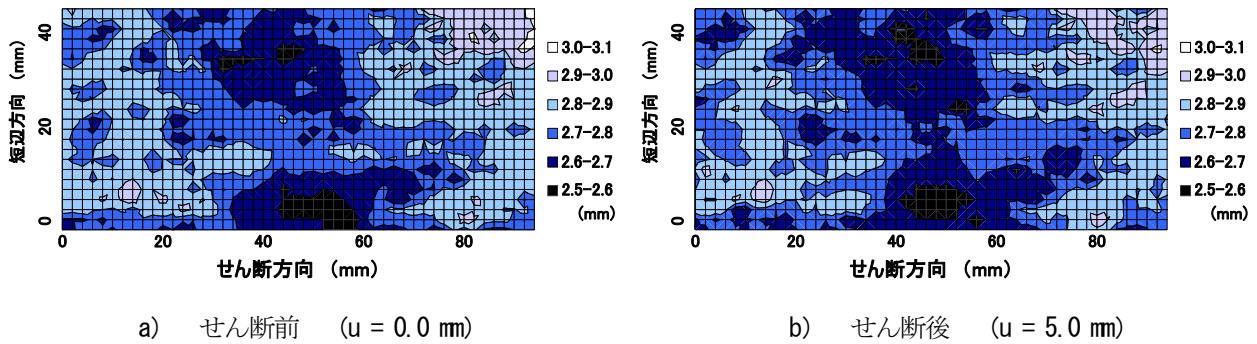


図-9 不連続面形状 (コンター図)

力を算出することができない。このことより、本研究ではボンディング力を考慮した算出手法⁷⁾を用いて、せん断応力の算出を行った。

(2) せん断応力分布

図-8は、解析モデルの下部における、せん断変位2.0mm、5.0mmのときのせん断応力分布を示したものである。高いせん断応力が生じている粒子の色を変化させることによって、せん断応力分布の可視化を行った。解析結果よりせん断応力は、せん断の進行に伴って高くなることが確認できる。後述する図-9の不連続面形状からもわかるように、大きなアスペリティが存在する箇所が高いせん断応力を発揮している。一方、小さなアスペリティや不連続面がなだらかな箇所ではあまりせん断応力の発揮は見られなかった。これは、せん断の進行に伴って、解析モデルの滑りによるものと考えられる。また、高いせん断応力が生じた箇所は、ボンディングの破断が見られた箇所と一致していることがわかる。このことから、ボンディングの破断は、せん断破壊による影響が大きいと考えられる。

5. 不連続面形状計測

(1) せん断試験によるアスペリティの変化

図-9は、解析モデルの下部における不連続面の形状変化を示したものであり、a)はせん断前、b)はせん断後である。せん断方向と垂直な方向を高さ方向とし、下部供試体の底面部分を基準としたとき、不連続面が高い部分から低い部分を白色から黒色へと変化させ、等高線によって、アスペリティの大きさを捕らえることが可能である。a)の図より、本研究で用いた解析モデルは、モデルの中央かつ短辺方向の両端部分に大きな窪みが存在し、中央部分から広がるように不連続面が高くなっていることがわかる。解析の結果、せん断後は解析モデルの中央部分から広がるように大きな削れを確認することができる。これは、上部の解析モデルが、下部の解析モデルの窪みから乗り上がったことによる削れが発生したためと考えられる。また、図の右上部分の不連続面の高い箇所でもせん断前からせん断後にかけて削れている様子を確認することができる。このことから、右上部分の大きなアスペリティが削られたことがわかる。せん断前とせん断後で大きく不連続面の高さに変化があった箇所は、ボンディングの破

断箇所とせん断応力が発揮した箇所とよく一致していることから、不連続面のせん断では、ラフネスの形状やアスペリティの大きさに依存していると考えられ、本解析では、それを表現することができた。

6. まとめ

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

- (1) ボンディング力を導入した個別要素法を用いることで、自然な岩盤不連続面のせん断挙動を表現することができた。
- (2) 本解析手法によって、せん断試験における一連の挙動を再現することができた。また、ボンディングの破断を可視化することによって、破壊や亀裂の再現ができた。
- (3) せん断応力-せん断変位関係、ダイレーション挙動から、一般的な不連続面のせん断挙動を表現できたと考えられるが、今後さらに粒子径の検討を要する。
- (4) せん断過程におけるせん断応力を可視化することによって、アスペリティの大きさがせん断応力に関係することがわかった。

- (5) 不連続面形状の計測によって、せん断前後におけるラフネスの変化を表現することができた。また、ボンディングの破断とせん断応力分布より、せん断試験では不連続面の形状に大きく左右されることがわかった。

謝辞：本研究は、関西大学大学院工学研究科高度化推進研究費の助成を受けた。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) Barton.N and Choubey.V.: The shear strength of rock joints in theory and practice,*Rock Mechanics*,Vol.10, pp.1-54,1977.
- 2) 楠見晴重, 寺岡克己, 谷口敬一郎: 不規則な岩盤不連続面におけるせん断郷土式の定式化に関する研究, 土木学会論文集, No.499/III-28, pp.13-21, 1994.
- 3) 楠見晴重, 寺岡克己, 谷口敬一郎: 規則的な不連続面のせん断時のダイレタンシー特性, 土木学会論文集, No.430, pp.125-133, 1991.
- 4) 楠見晴重, 酒井崇, 西田一彦, 中村均史: 岩盤不連続面の開口状況の定量的評価とせん断強度式への適用性, 土木学会論文集, No.631/III-48, pp.505-510, 1999.
- 5) 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.
- 6) Cundall.P.A. and Strack.O.D.L.:A Discrete numerical model for granular assemblies, *Geo technique*, 29(1), pp.47-65,1979.
- 7) 楠見晴重, 辰巳新太郎, 高藤早織, 松岡俊文: 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, 材料, Vol.55, No.5, pp.471-476, 2006.

SIMULATION ANALYSIS ABOUT SHEAR BEHAVIOR OF A THREE-DIMENSIONAL ROCK JOINT BY DISTINCT ELEMENT METHOD

Saori TAKAFUJI and Harushige KUSUMI

As is known, it is important to clarify the shear behavior of rock joint for the safty construction of rock structures. In this paper, the three dimentional simulation analysis of direct shear testing using distinct element method have been done. Especially, to repret the tensile stress in rock mass, we tried to be applied on the bonding theory. As the results of this study, it is recognized that the results of this simulation with that of experiment.