

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[†]

楠 見 晴 重^{*} 辰 巳 新太郎^{**}
高 藤 早 織^{***} 松 岡 俊 文^{****}

Simulation Analysis for Shear Behavior Mechanism of Rock Joint Using Distinct Element Method

by

Harushige KUSUMI^{*}, Shintaro TATSUMI^{**}, Saori TAKAFUJI^{***} and Toshifumi MATSUOKA^{****}

In this paper, simulation analysis for shearing mechanism of rock joint by Distinct Element Method is performed. The purpose of this study is to analyze the sliding and shearing behavior of discontinuity surface in the shear process and destruction locations of the roughness is tried to be clarified by numerical simulation. The characterization of this simulation model can be applied on bonding force between particles. As the results of this study, it is recognized that the shearing and sliding behavior of discontinuous plane using this simulation model correspond with the experimental results and that this simulation model are useful. The distribution of internal stress during shear on discontinuity plane can be visualized.

Key words : Rock discontinuity, Shear behavior, Distinct element method, Simulation analysis, Internal stress

1 緒 言

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^{1)~6)}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（一軸圧縮強度 26.36 MPa）⁷⁾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、岩盤などの連続体の表現がかなり困難であった。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⁸⁾

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。Fig. 1 に、粒子モデルの初期状態を示す。本解析では、ばね定数を接触距離 (gap) に乗ずることによって、粒子間の作用力を求めている。

2・2 ボンディング力⁹⁾

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。引張

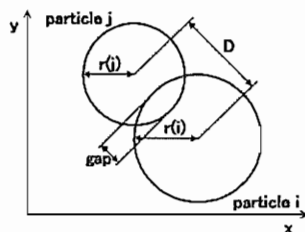


Fig. 1 Initial state of the particle mode.

[†] 原稿受理 平成 17 年 8 月 10 日 Received Aug. 10, 2005

^{*} 正 会 員 関西大学工学部都市環境工学科 〒564-8680 吹田市山手町、Dept. of Civil. Eng., Kansai Univ., Yamate-cho, Suita, 564-8680

^{**} ㈱ JR 西日本 〒530-0012 大阪市北区芝田、West Japan Railway Company, Kita-ku, Osaka, 530-0012

^{***} 関西大学大学院工学研究科 〒564-8680 吹田市山手町、Dept. of Civil. Eng., Kansai Univ., Yamate-cho, Suita, 564-8680

^{****} 正 会 員 京都大学大学院工学研究科 〒606-8501 京都市左京区吉田本町、Dept. of Civil. Eng., Kyoto Univ., Sakyo-ku, Kyoto, 606-8501

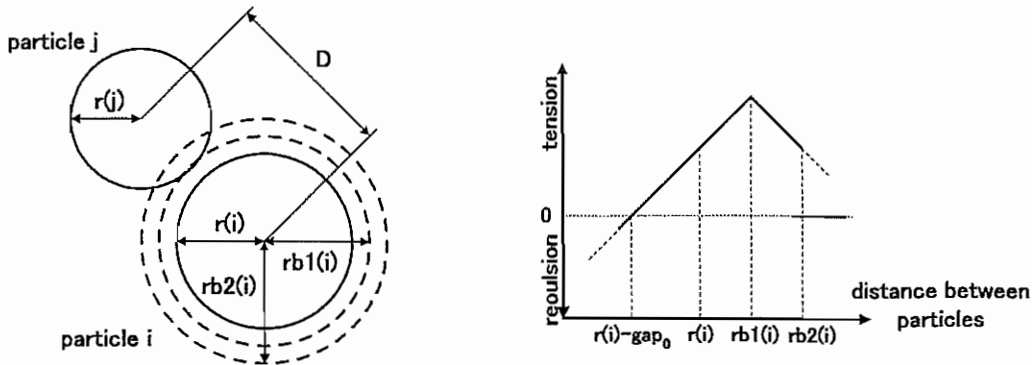


Fig. 2 Concept of bonding force.

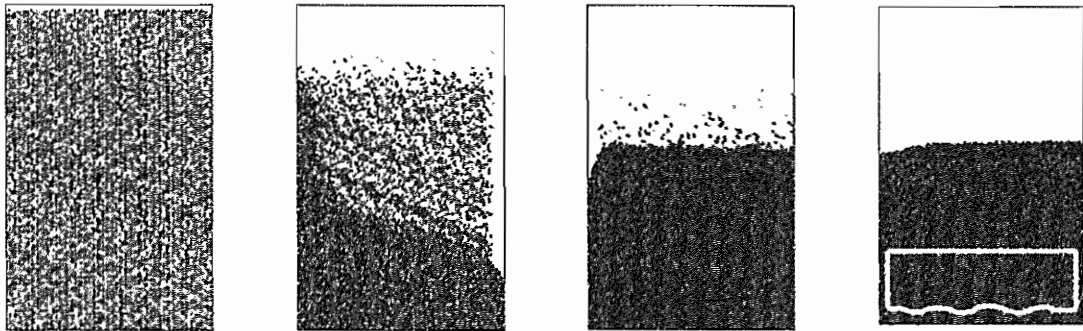


Fig. 3 Concept of model making.

力を考慮する必要のある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触しており、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。Fig. 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。

$$F_{ij} = \begin{cases} K \cdot gap & (D < r_{b1}(i) + r(j)) \\ K \cdot (r_{b2}(i) + r(j) - D) & (r_{b1}(i) + r(j) < D < r_{b2}(i) + r(j)) \\ 0 & (r_{b2}(i) + r(j) < D) \end{cases} \quad (1)$$

2・3 パッキング

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。Fig. 3は、

そのモデル作成図を示している。粒子間に挿入された粘性ダッシュポットの作用により、粒子の振動が収束した後、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。Fig. 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、先述した5種類のJRC 標準断面形状を有す

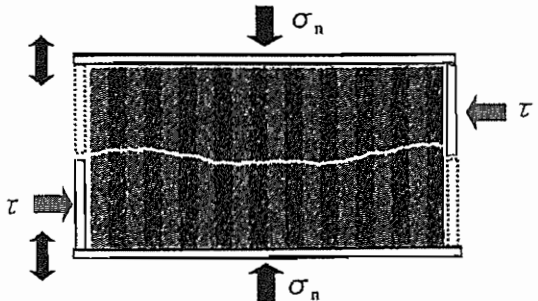


Fig. 4 Model of DEM.

る供試体モデルについて垂直応力 0.5, 1.0, 2.0MPa の 3 条件で行った。ただし、本論文では紙面の都合上 JRC = 2-4, 10-12, 18-20 のモデルに関して記載する。また、本解析で用いた垂直方向およびせん断方向のばね定数は、それぞれ $2.0 \times 10^8 \text{N/mm}$ である。この値は実験結果を基に、ばね定数と一軸圧縮強度およびポアソン比の相互関係を検討して得られたものである。

3 せん断特性

3・1 供試体モデルのせん断挙動

Fig. 5 は、JRC = 2-4, 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、せん断の進行に伴う破壊状況を評価するために、ボンディングの破断した粒子の色を変化させる作業を行っている。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を捉えることができる。その破壊形状については、JRC 値の高い供試体における、アスペリティ角の高いラフネスに対してせん断の進行とともに破壊が生じていくことが確認できた。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現象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

Fig. 6 は、JRC = 2-4, JRC = 18-20 の供試体モデルにおける、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、せん断応力は、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、

若干上下に変化しているが、平均的には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、JRC 値が小さく、かつ垂直応力の低い供試体に関して、解析結果の方が大きな値となった。これは、JRC 値が低いおよび垂直応力が低いという条件下におけるせん断挙動はすべりの卓越したせん断挙動をとっていると考えられる。したがって、本解析は粒状体を用いているため、不連続面に多少なりとも凹凸ができてることより、解析結果では、不連続面の摩擦が実際の供試体に比べて大きくなったためと考えられる。しかし、逆に JRC 値が高いおよび垂直応力が高い条件下におけるシミュレーション解析結果は実験結果とよく一致した応力値が得られている。これは、JRC 値が高いおよび垂直応力が高い条件下におけるせん断挙動は、アスペリティのせん断破壊が卓越しているためと考えられる。また、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、 $\sigma_n = 2.0 \text{MPa}$ を除いて実験結果とほぼ同様の挙動を示している。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 ダイレクション挙動

Fig. 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（ダイレクション挙動）を示している。せん断変位が進むに従い、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シ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。ただし、実験結果から、初期には体積減少がみられるが、解析結果ではその現象がみられないことが認められる。

JRC = 2-4 のモデルについては、比較的平滑な不連続面を有したモデルであるため、小さなダイレクション挙動を示している。JRC = 18-20 のモデルについては、せん断初期にはアスペリティへの乗り上がりが卓越するせん断挙動を取るため、右上がりのダイレクション挙動を示すがせん断の進行とともにアスペリティの破壊が生じてくるため、ダイレクション角が減少してくるという一連のダイレクション挙動をよく表現している。いずれの結果を見ても、シミュレーション解析結果はよく実験結果と一致していることが分かる。ただし、ダイレクションの値については、多少の誤差がみられるが、これは粒子の平均粒径に相当するものである。

4 せん断応力分布

4・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³⁾として、Cundall により以下の式が提案されている。

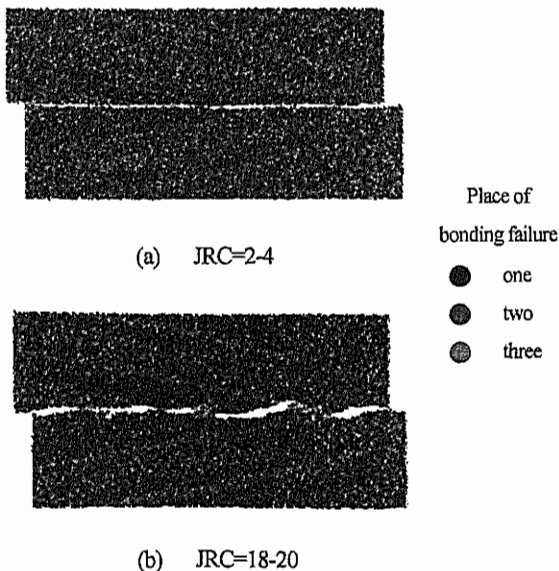


Fig. 5 Shear behavior of direct shear testing.

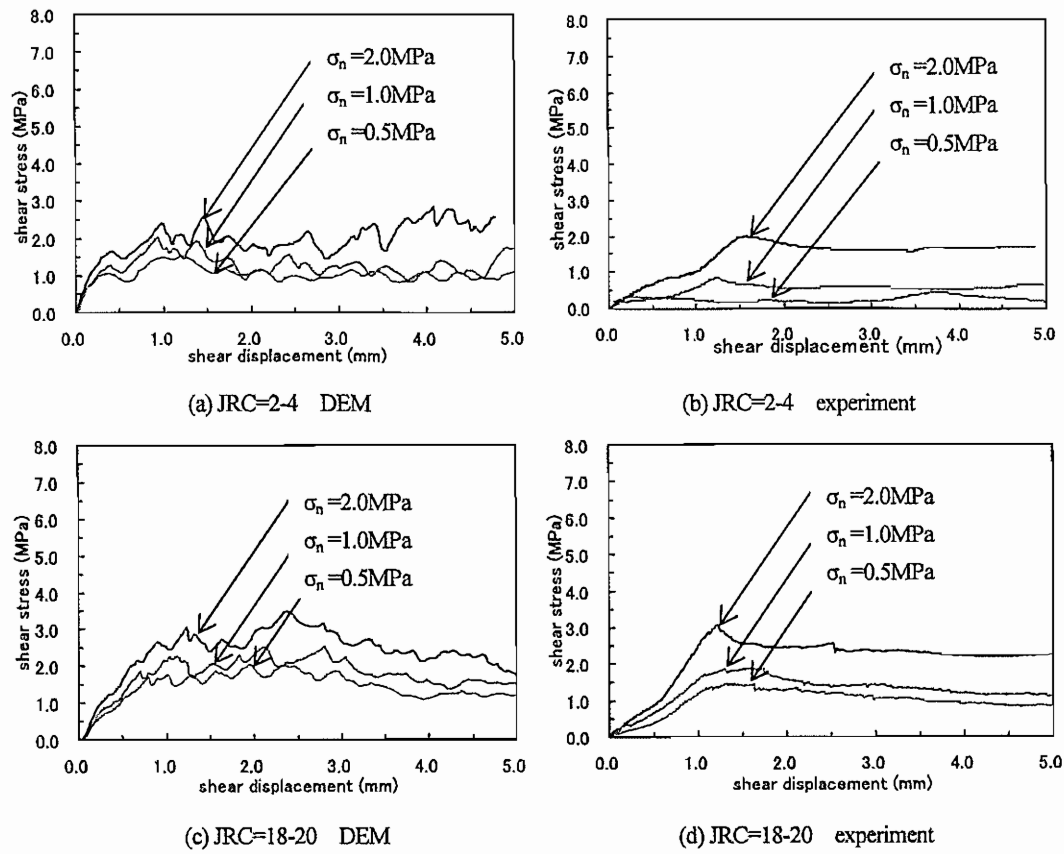


Fig. 6 Relation between shear stress and shear displacement.

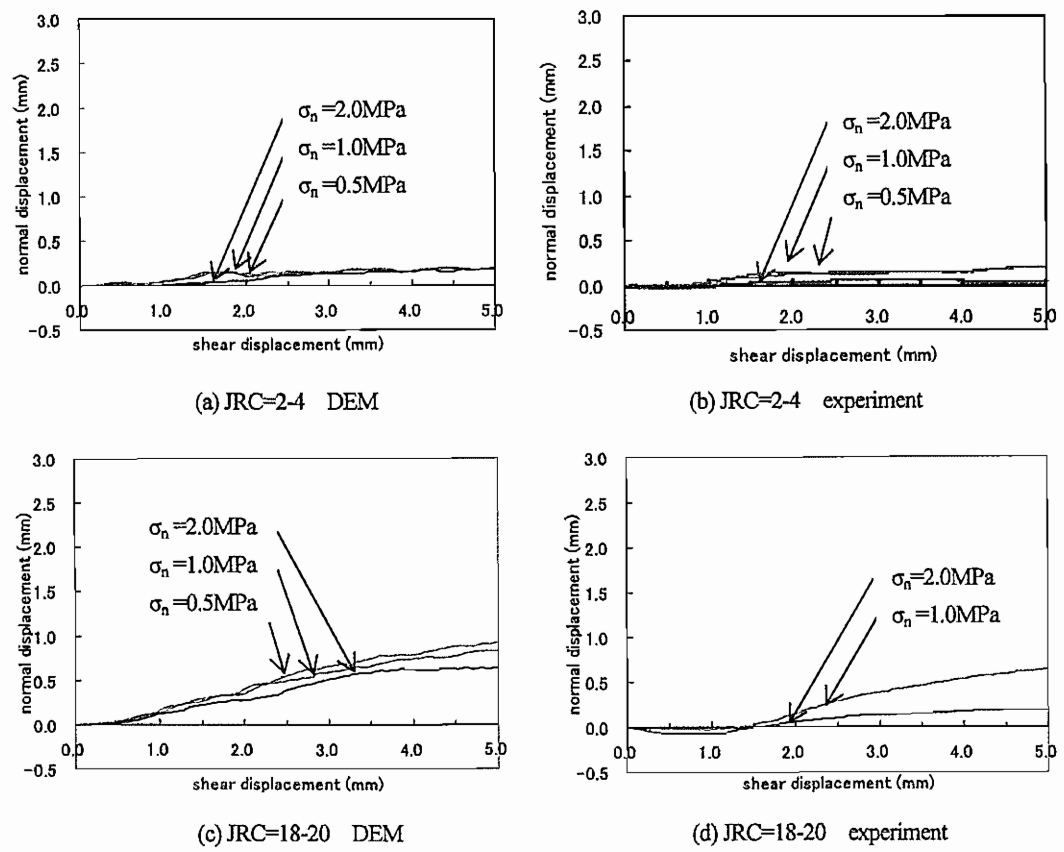


Fig. 7 Relation between normal displacement and shear displacement.

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{V} \sum_{p=1}^N r_p \left\{ \sum_{c=1}^{m_p} n_i^c F_j^c \right\} \quad (2)$$

ただし、 V ：粒子の面積、 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 ：注目している領域（体積 V を有する）の中に存在する要素数、 m_p ： p 粒子の接触数。

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せん断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、以下の式によりせん断応力を算出した。

$$\sigma_n = \frac{1}{V} \sum_{p=1}^N r_p \left\{ \sum_{c=1}^{m_p} [F_n]_j^c \right\} \quad (3)$$

$$\tau = \frac{1}{V} \sum_{p=1}^N r_p \left\{ \sum_{c=1}^{m_p} [F_x]_j^c \right\} \quad (4)$$

式 (3) は法線ばねに作用する応力、式 (4) 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せん断応力の算出を行った。

4・2 せん断応力分布

Fig. 8 は、せん断過程中のせん断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。

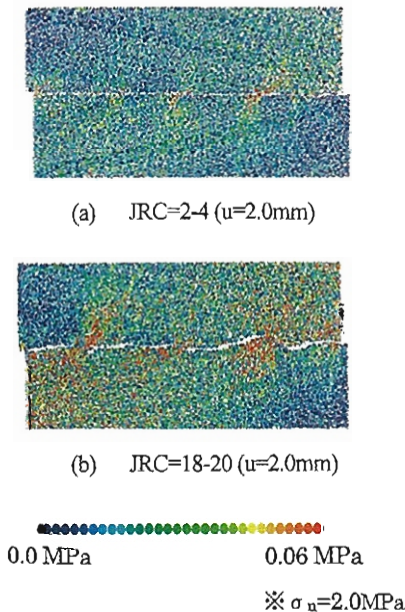


Fig. 8 Distribution of shear stress.

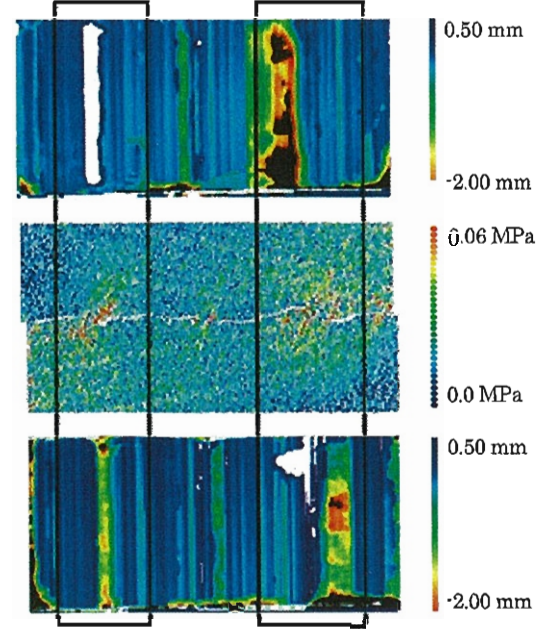


Fig. 9 Comparison simulation with experiment of fractured asperity location.

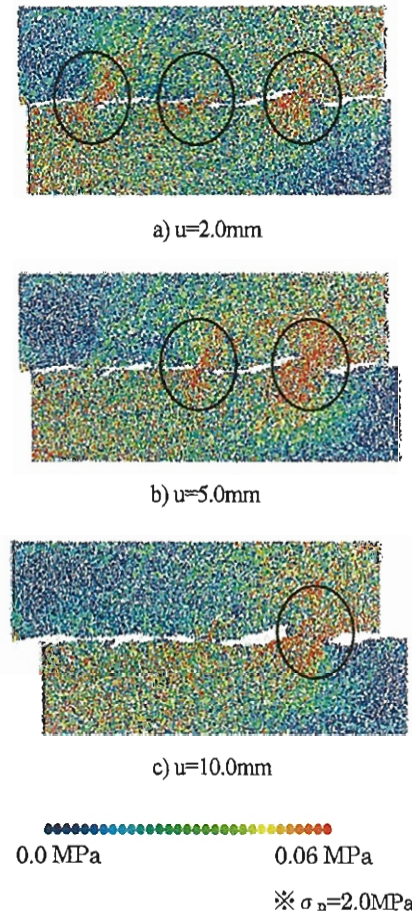


Fig. 10 Fracture process of asperities during shear.

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。Fig. 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。アスベリティの接する箇所が比較的多いため、せん断過程において一部のアスベリティへの応力集

中が発生せず、複数のアスペリティ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。

Fig. 8 (b) 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 値が大きな供試体モデルは、断面形状が起伏に富み、アスペリティ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

Fig. 9 に、JRC 供試体モデルの解析結果から得られたせん断応力分布と、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、Fig. 9 の上段、下段の図である。Fig. 9 の上段は上部供試体不連続面、下段は下部供試体不連続面を表しており、白色または黒色で表される部分が、せん断によってアスペリティが破壊もしくは削れが生じた場所である。

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。

4・4 せん断の過程における応力分布状況の変化

破壊を伴うせん断挙動を、本解析手法を用いて表現することができたので、せん断の進行によるアスペリティの破壊に伴う内部の応力状態について、もう少し詳細に考察することを試みた。

Fig. 10 は、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ものである。せん断初期状態では、三つのアスペリティに応力が集中して発生している様子がわかる。せん断の進行に伴い、鋭角なアスペリティが破壊するためそこで応力開放が起こり、他の2つのアスペリティに応力が集中する様子が確認できる。さらにせん断が進行すると、次に鋭角なアスペリティが破壊するため、同様に応力開放が起こり残りのアスペリティに応力が集中する様子が確認できる。このように、アスペリティの破壊により応力集中箇所が遷移する現象が明らかになった。

5 結 論

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) ボンディング力を導入した個別要素法を用いて、アスペリティの破壊をとまなう岩盤不連続面のせん断挙動を表現することができた。

(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。

(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。

(5) せん断過程中的内部の応力状態においてアスペリティの破壊に伴い応力の集中箇所が遷移する現象が見られた。

最後に本研究は、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。ここに謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) N. Barton and V. Choubey, "The shear strength of rock joints in theory and practice", *Rock Mechanics*, Vol.10, pp.1-54 (1977).
- 2) N. Barton and S. Bandis, "Review of predictive capabilities of JRC-JCS model in engineering practice", *Proc. Int. Conf. Rock Joints*. Leon, Norway., pp.603-610 (1977).
- 3) H. Kusumi, K. Teraoka and K. Taniguti, "Study on formulation of shear strength for irregular rock joint.", *Journals of Geotechnical Engineering*, JSCE, No.499, III-28, pp.13-21 (1994).
- 4) H. Kusumi, K. Teraoka and K. Taniguti, "Dilation properties of regular discontinuities during shear.", *Journals of the Japan Society of Civil Engineers*, No.430, pp.125-133 (1991).
- 5) H. Kusumi, T. Sakai, K. Nishida and H. Nakamura, "Estimation method of aperture condition for shear equation.", *Journals of the Japan Society of Civil Engineers*, No.631, III-48, pp.505-510 (1999).
- 6) T. Sugino, R. Yamada and H. Kusumi, "The shear strength formula including joint aperture and roughness for natural rock joint.", *Journal of the Society of Materials Science Japan*, Vol.52, No.5, pp.483-487 (2003).
- 7) T. Sugino and H. Kusumi, "The proposal of the shear strength formula for natural rock mass that surface of discontinuity shape and aperture condition was considered.", *Journals of the Japan Society of Civil Engineers*, No.464, III-58 (2002).
- 8) P. A. Cundall and O. D. L. Strack, "A Discrete numerical model for granular assemblies", *Geo technique*, Vol.29 (1), pp.47-65 (1979).
- 9) T. Sugino, H. Kusumi and Y. Ashida, "Shear analysis of rock specimen by DEM including bounding theory", *The Annual meeting of JSCE Kansai Branch at 2001*, III-40 (2001).