

不連続面の特性が材料の巨視的挙動に及ぼす影響に関する研究

STUDY ON EFFECT OF DISCONTINUOUS PROPERTIES
ON MACROSCOPIC BEHAVIOR OF MATERIAL吉田 秀典¹⁾, 巽 隆有²⁾, 森本 亮司³⁾

Hidenori YOSHIDA, Takakuni TATSUMI and Ryoji MORIMOTO

- 1) 香川大学工学部 (〒 761-0396 高松市林町 2217-20, E-mail: yoshida@eng.kagawa-u.ac.jp)
 2) 香川大学大学院工学研究科 (〒 761-0396 高松市林町 2217-20, E-mail: s08g407@stmail.eng.kagawa-u.ac.jp)
 3) 香川大学大学院工学研究科 (〒 761-0396 高松市林町 2217-20, E-mail: s07g417@stmail.eng.kagawa-u.ac.jp)

The properties of the discontinuity play an important roll in the macroscopic behavior of a rock mass. In this article, the experimental and numerical studies in terms of the material having a single discontinuity are conducted in order to seize the mechanism of the alteration of discontinuos properties. In the numerical study, the alteration of a frictional angle is modeled by the concept that the surface of the discontinuity can be worn away with increasing the load which is applied to the material. Through the comparison between the experimental and numerical studies, it is turned out that the macroscopic behaviors of the rock mass are influenced by the friction of discontinuity.

Key Words: discontinuos rock mass, discontinuity, discontinuous properties, reduction of friction, softening behavior

1. はじめに

わが国では、核燃料のリサイクルによって生ずる高レベル放射性廃棄物を地層処分することが検討されている。わが国の岩盤の成因を考えると、岩盤中には少なからず不連続面が存在し、また、処分坑道の掘削によって坑道周辺に新たな損傷領域が出現することが懸念される⁽¹⁾。こうした不連続面の变形や損傷領域の出現によって、变形特性ならびに透水特性は調査段階のものとは大きく異なる可能性がある。

岩盤の不連続面に関する既往研究については Mohr-Coulomb (モール・クーロン) の破壊基準をはじめ、不連続面の強度特性を推定するという類が多い。それらの研究の中でも、Patton⁽²⁾, Barton⁽³⁾, Bandis⁽⁴⁾ らは不連続面自体の凹凸という幾何学的特性の影響に着目し、岩盤不連続面の強度推定式を提案している。その他、不連続面の表面に着目した、摩擦やラフネスの影響によるせん断特性のモデル化⁽⁵⁾に関する研究などがある。しかしながら、強度、变形といったせん断特性も、不連続面の变形などによって変化するものであると考えられるが、そのような理論やモデル化は依然として少ない。さらに、そうした理論やモデルを用いて不連続面の变形を解析した事例も少ない。そこで本研究では、不連続面の強度特性や变形特性について照査するために、単一不連続面を有する材料の試験を実施し、試験結果を整理すると同時に

数値解析との比較を通して、これらの特性について考察を加えることを目的とする。

2. 力学モデルの構成

2.1. 不連続面のモデル化

本研究では、岩盤がその中に不連続面を含み、その不連続面が摩擦すべりを生じるといった問題を扱うことから、こうした摩擦すべり現象を表現できるモデルが必要となる。著者の一人は、不連続面の摩擦すべりに関する問題に対して、クーロン摩擦則に基づくモデル(以降「摩擦すべり要素」と呼ぶ)を採用し、その妥当性などについて検討を行っている⁽⁶⁾。その結果、本論文で扱う程度の単純な不連続面の摩擦すべり問題を扱うのであれば、この「摩擦すべり要素」でもおよそその検討が可能であるという結論に至っている。そこで本研究においても、不連続面に相当する箇所には、この「摩擦すべり要素」を導入することとした。

不連続面の变形はクーロン摩擦則に基づいていることから、Fig.1 に示す物体間に働く相対すべりは以下のような条件にて判定する。

$$-\mu\sigma_n + c < \tau \rightarrow \text{すべり} \quad (\sigma_n < 0) \quad (1)$$

$$-\mu\sigma_n + c \geq \tau \rightarrow \text{固着} \quad (\sigma_n < 0) \quad (2)$$

ここで、 μ , c , σ_n , τ はそれぞれ、不連続面の静止摩擦係数、粘着力、法線方向および接線方向のトラクションである。

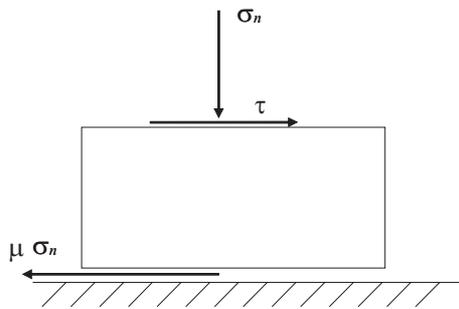


Fig. 1 Basic concept of discontinuity movement

$$k = \frac{6c \cos \phi}{\sqrt{3}(3 + \sin \phi)} \quad (5)$$

ここで、 c は粘着力、 ϕ は内部摩擦角を表す。

なお、本研究では、数値解析の対象が不連続面を有する材料に対する平面ひずみ圧縮試験であり、この場合、大きな引張応力が生じる前に不連続面の変形が卓越すると考えられることから、圧縮側も引張側も同じ挙動をするものと仮定し、引張破壊に対して特別な措置は講じていない。

2.3. 不連続面の摩擦係数

不連続面は引張強度をほとんど有さないため、強度特性として重要なのはせん断特性である。既往の研究では、不連続面のせん断強度は不連続面に作用する垂直応力や粗さによって変化すると言われている。垂直応力が大きくなるとせん断強度は増加し、脆性的な挙動が顕著となる。せん断が繰り返されるなどして不連続面の凹凸が削られて滑らかになるとせん断強度は減少し、やがて残留強度に近づく傾向を示す⁽⁵⁾。特に、大西ら⁽⁷⁾は、不連続面のラフネスの異方性を考慮した上で、不連続面の離散化ラフネスデータを用いて幾何学的な削れ方を評価し、減耗率という新たなパラメータを導入してせん断挙動を推定する方法を開発している。

Patton⁽²⁾は規則的な歯型形状モデルの試験結果から破壊基準を提案しているが、表面の凹凸が不規則な実際の不連続面ではこのモデルの適用は困難とされている。Barton⁽³⁾は数多くの不連続面レプリカのせん断試験から強度算定式を提案しており、現状で最もよく利用されている式であるが、式中における不連続面の粗さに関するパラメータの決定については、計測する不連続面の任意区間における粗さがその不連続面の代表値となっているのか不明であり、また、細かい不連続面の小段などは見逃している可能性があるなどの課題がある。これら以外にも多数の強度算定式は存在するが、垂直応力の大小やせん断の繰り返しをとともなうせん断強度の変化をモデル化しているものは決して多くない。

著者の一人は、大西ら⁽⁵⁾の考え方にに基づき、不連続面が接触面において減耗するとともに摩擦係数が変化するものと仮定し、以下に示すような不連続面の摩擦係数低減モデルを提案している⁽⁶⁾。

$$\mu = \begin{cases} \mu_i & \dots \dots \dots (\sigma_n^J < \sigma_y^J) \\ (\mu_i - \mu_r) \times \exp\{-D(\sigma_n^J - \sigma_y^J)\} + \mu_r & \dots \dots \dots (\sigma_n^J \geq \sigma_y^J) \end{cases} \quad (6)$$

ここで、 μ は任意時刻の摩擦係数、 μ_i および μ_r は初期摩擦係数および残留摩擦係数、 D は低減率、 σ_n^J は不連続面における法線方向の応力、そして σ_y^J は不連続面における材料の初期降伏応力である。本モデルはクリープ挙動を再現する目的で提案されているが、本研究では、静的試験にも適用し、その妥当性や有用性を検討することとした。

3. 平面ひずみ圧縮試験

3.1. 試験概要

本研究では、不連続面を有する岩盤における不連続面のせん断挙動の把握を目的としているため、通常とは異なり、

また、物体は一旦すべりを生じると、物体同士は接触し続ける場合もあるが、非接触（解離）という状態にもなりうる。そこで本研究では、有限要素法で言う「要素」に対して、ある任意要素の節点を接触可能な節点と定義し、その節点が接触しうる他の要素の節点あるいは辺を定義しておく。物体を構成する要素は通常の固体要素（2次元問題では三角形あるいは四角形要素、3次元では四面体あるいは六面体要素）で定義する。計算ステップ（数値解析における解析インクリメント）ごとに接触可能な各節点が接触相手の節点あるいは辺にどれほど近接しているかを調べ、接触の判定を行う。本解析では、最も大きさが小さい要素の辺に対し、その長さの5%以内であれば接触、それを超えると非接触になるものとした。辺と辺が完全に合致する状態のみを不連続面の接触とすることは、解析上、非常に厳しい条件となるため、解の収束性などを勘案し、本解析（単精度）では上述した値（5%以内）を用いた。

さらに、一般に接触問題においては、計算ステップが粗いとその節点が接触可能な相手の辺を越えて要素内に入るような貫通状態となるため、貫通状態にならない程度の計算ステップが必要となる。

2.2. 連続体のモデル化

本研究では、不連続面を含む材料の挙動について考えるため、材料基質部（連続体部分）がピーク応力を迎えて軟化挙動に移行することは起こり難いものと思われる。通常、不連続面が存在する場合、材料基質部がピーク応力に達する前に不連続面が変形（せん断すべりなど）を開始するからである。したがって、材料基質部については軟化挙動を考慮しないが、不連続面の形状によっては応力集中も想定されるため、材料基質部の塑性変形については考慮することとした。なお、本研究においては、材料基質部における材料特性を詳細に検討することが目的ではないことから、簡易的ではあるが、Drucker-Prager型の等方弾塑性モデルを適用することとした。

$$f(I_1, J_2) = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k = 0 \quad (3)$$

ここで、 I_1, J_2 は不変量であり、また α および k は次式で定義される。

$$\alpha = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 + \sin \phi)} \quad (4)$$

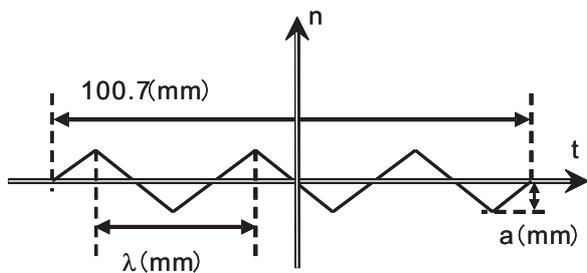


Fig. 2 Form of discontinuity (triangular wave)

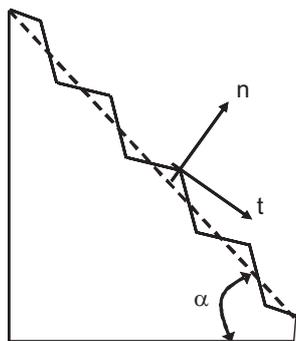


Fig. 3 Cross-section view of discontinuous material (half)

Table 1 Wave number and amplitude of discontinuity

試験ケース	波数 (波長)	振幅
case1	6 個 (16.78 mm)	1.00 mm
case2	6 個 (16.78 mm)	2.00 mm
case3	8 個 (12.59 mm)	1.00 mm
case4	8 個 (12.59 mm)	2.00 mm

供試体に不連続面が存在していなくてはならない。したがって、供試体に不連続面が存在する供試体を用意する必要がある。本研究では、こうした人工的な不連続面を表現するために、全く同一形状のものを2つ用意し、それら2つを合わせることで単一不連続面を有する供試体を作製した。また、全ての試験を通じて天然の不連続面を有する岩盤/岩石を実験供試体として用いるのが好ましいのかもしれないが、通常、天然の不連続面は複雑な形状をしており、その表面における凹凸や摩擦の状態も一様ではない。こうした要因は、試験結果の解釈を困難とする可能性があることから、本研究では、天然の岩盤/岩石ではなく人工材料を用いた。なお、平面ひずみ圧縮試験に用いる供試体の寸法は、高さ 80 mm、幅 60 mm、奥行 80 mm である。

人工材料の材質であるが、人工的に導入する不連続面が、型枠からの脱着、あるいは実験装置への装着などの過程において崩壊しないという要求項目より、豊浦標準砂・石膏・水をベースに、やや硬質な供試体を作製している。また、試験機器に制約(試験機の容量が約 100 kN)があることから、石膏:砂:水:混和剤の比が、1:1:0.7:0.002 となるように配合することとした。なお、混和剤には分離低減剤(グリオキサル処理水溶性セルロースエーテル)を用い、水と石膏の

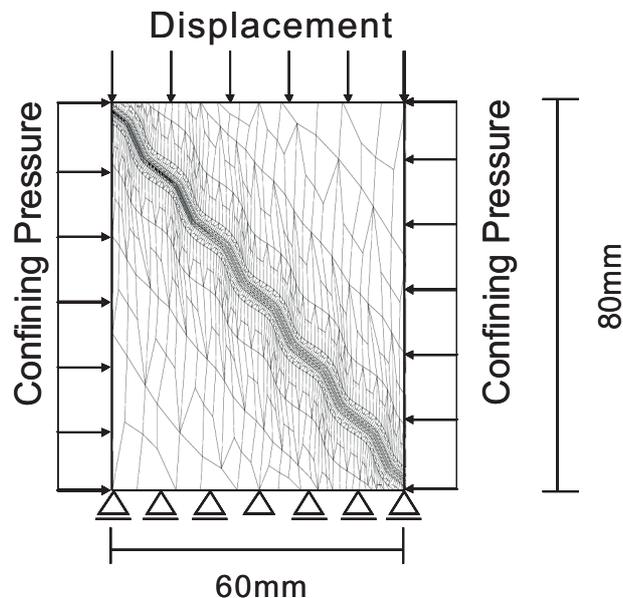


Fig. 4 Outline of specimen (case1)

分離ともなうブリージングを抑制した。打設した供試体の養生期間については、3時間から7日間の範囲において室温で水封養生した供試体に対し一軸圧縮試験を実施する事で、養生期間が3時間以上であれば長期的な強度の変化が無い事を確認した。本試験では、十分なマージンと試験体の数を考慮し、室温で3時間以上6時間未満の気中養生の後、6時間以上の水中養生を施したものについて試験に使用することとした。

単一不連続面は、Fig2に示すように幅が 100.7 mm で、これが供試体の水平面から $\alpha = 52$ 度ほど傾いた位置に入る (Fig3参照)。天然の岩盤に含まれる不連続面群は、少なからず凹凸や起伏を有していることから、本研究ではフラットな不連続面形状は採用していない。一方、天然の岩盤に含まれる不連続面のようにランダムに凹凸を有する場合、あるいは複数の不連続面を考慮した場合、試験結果の解釈が複雑になることが想定される。例えば、一定の周期(波長)と振幅を有する不連続面を導入した場合、応力やひずみの分布も規則性を呈するが、ランダムな凹凸の場合は規則性を呈しない。その場合、得られた結果が何に影響を受けたのかを判断しにくい。したがって、本研究では、三角波の形状を有する単一不連続面のみを考慮した。三角波を考慮した理由としては、せん断すべりなどが比較的生じ易い、応力集中などが起こり難いなどの利点が挙げられる。形状が三角波の場合、不連続面の形状パラメータはFig2に示すように振幅 a と波長 λ の2つであるので、本研究では、これらを変化させて、波長を 16.78 mm (波の山が6個)および 12.59 mm (波の山が8個)の2ケースを、また、振幅を 1.00 mm および 2.00 mm の2ケースを考え、Table1に示すように、合計4ケースの不連続面を有する供試体を用意した。

本研究では、上述した試験機および供試体を用いて、平面ひずみ圧縮試験を実施した。メンブレン上下面と載荷板の間

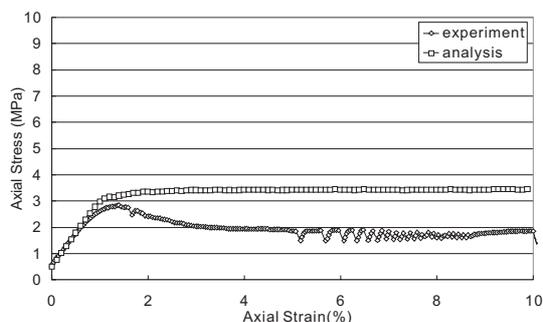


Fig. 5 Axial Stress v.s. Axial Strain relation (case2, $\text{conf.}=0.5\text{MPa}$, μ : constant)

にグリースを塗布することで載荷板と供試体に生じる摩擦の低減を図った。同様にして、前後方向（面外方向）もグリースでメンブレンとアクリル板および金属板の摩擦の低減を図っている。載荷は、変位制御による単調載荷（ひずみ速度は $0.002\%/s$ ）で行った。なお、拘束圧に関しては、 0.5MPa と 1.0MPa という2種類にて試験を行った。

3.2. 解析概要

解析では、上述した試験が平面ひずみ状態にて実施されていることから、2次元平面ひずみの条件下で有限要素解析を行った。境界条件については試験と同様になるように設定した。つまり、下部の鉛直方向の変位と下部中央に位置する1点で水平および鉛直の両方向の変位を固定、両側面より拘束圧を加圧、そして上部から変位による載荷を行った（Fig4 参照）。また、強度特性についてであるが、不連続面が存在しない場合、試験結果（ポアソン比： 0.25 、粘着力： 1.9MPa 、内部摩擦角： 10 度）を Drucker-Prager の型の等方弾塑性モデルに適用することでピーク値までの挙動については再現性を得ている。材料基質部の材料定数および挙動モデルとしては、上述したものでピーク時までの挙動については概ね表現は可能であるが、不連続面を含む供試体では、ブリーディングなどの材料分離により、強度が不連続面を含まないものよりも小さくなるものと思われる。本研究では材料分離にともなう強度低下に関する研究を対象としていないことから、簡易的ではあるが、不連続面を有する供試体ではブリーディング等によって不連続面の強度が低下しているものと考え、粘着力を 1.0MPa 、内部摩擦角を 7 度、また、不連続面の摩擦係数は 0.5 として解析を行った。その結果、不連続面を有する供試体についても Fig5 (case2, 拘束圧 0.5MPa) に示すようにピーク時までの挙動は概ね再現ができた。一方、依然ピーク後の挙動については解析と試験を比較すると乖離がある。そこで、本研究では、載荷にともない不連続面が削れることによって摩擦係数が低減すると考え、2章の3節で示した摩擦係数低減モデルを有限要素コードに組み込み解析を行うこととした。

3.3. 解析結果

はじめに、軟化挙動が顕著な case2 の拘束圧 0.5MPa において式(6)に示す μ_r , σ_y , D に関して感度解析を行い各種パラメータの特性の把握を試みた。case2 の感度解析結果を

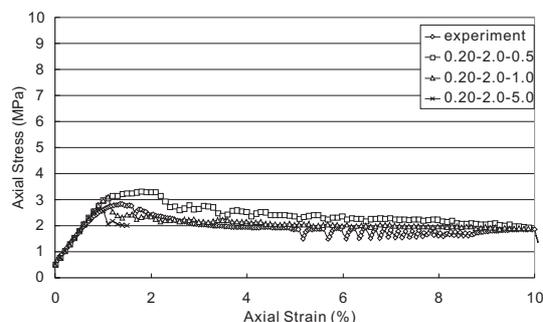


Fig. 6 Axial Stress v.s. Axial Strain relation (case2, $\text{conf.}=0.5\text{MPa}$, Variation of D)

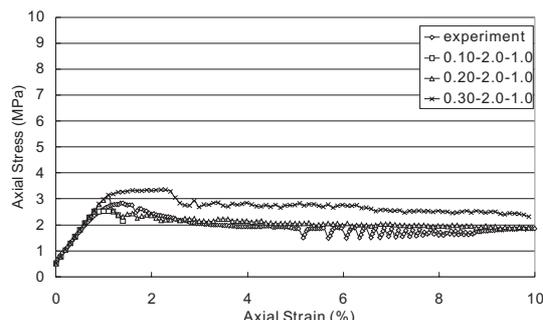


Fig. 7 Axial Stress v.s. Axial Strain relation (case2, $\text{conf.}=0.5\text{MPa}$, Variation of μ_r)

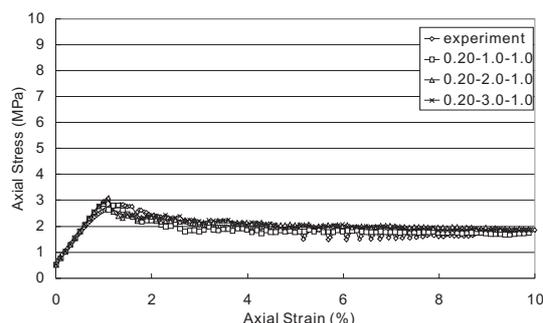


Fig. 8 Axial Stress v.s. Axial Strain relation (case2, $\text{conf.}=0.5\text{MPa}$, Variation of σ_y)

Fig6 から Fig8 に示す。図中の凡例は μ_r - σ_y - D の順に示している。つまり、例えば 0.20 - 2.0 - 1.0 では、 $\mu_r = 0.20$, $\sigma_y = 2.0\text{MPa}$, $D = 1.0$ を意味する。

各種パラメータに関しては、前述の不連続面が存在しない場合の試験結果（粘着力： 1.9MPa 、内部摩擦角： 10 度）を参考に、 σ_y を $1.0\text{MPa} \sim 3.0\text{MPa}$ の範囲で、また、 $\tan 10$ 度= 0.18 ということも勘案し、残留摩擦係数 μ_r を $0.1 \sim 0.3$ の範囲で設定した。初期摩擦係数 μ_i については、 μ_r より大きくなるよう 0.5 （一定値）とした。低減率 D については、得られている材料特性だけでは同定が困難なので、現象を再現できる範囲で設定した。

まず、低減率 D について考える。低減率 D とは、摩擦係数の低減が早いのか、それとも遅いのかを表現するパラメータである。つまり、摩擦係数の低減が早いことは、急激に不連続面が削れることを、遅いことは、徐々に不連続面が削

れることを意味する。解析結果 (Fig6 参照) より、いずれのケースについても軸応力はピーク到達後、低下していることが確認できる。 D を大きくすることでピーク値が低下し、小さくするとピーク値が大きくなるのがわかる。また、 D が変化することでピーク後の軟化勾配も変化することがわかる。法線方向応力が材料の初期降伏応力に達したところで摩擦係数の低減が起こり、応力の上昇にともなってさらに摩擦係数が減少する。そして、摩擦係数が低減することで、滑動し軸応力が低下している。つまり、 D が大きいと摩擦係数の低減の割合が大きくなるため、急速に摩擦係数が低減するのでピーク値は低く出現し、軟化勾配の傾きが急になっている。

次に、残留摩擦係数 μ_r の特性について考える。摩擦が働く物体を変形させるために必要な力は、摩擦係数と垂直応力をかけ合わせたものであるから摩擦係数が大きいと滑動に要する力は大きくなり、摩擦係数が小さいと滑動に要する力は小さくなる。つまり、 μ_r によって最終的な軸応力の値が決まるものと考えられる。このことは、解析結果 (Fig.7) から明らかである。 μ_r が大きくなると残留応力は大きくなり、 μ_r が小さくなると残留応力が小さくなるのがわかる。また、供試体が滑動を生じる摩擦係数まで低減するのに要する時間が異なるため、巨視的な応力レベルは異なって見え、 μ_r の値によってピーク値が異なるような現象を呈する。

最後に、材料の初期降伏応力 σ_y の特性について考える。摩擦係数低減モデルでは、 σ_y を法線方向応力が超過すると摩擦係数が低減を開始する。したがって、各種パラメータの中で一番ピーク応力に関係の深いパラメータといえる。また、 σ_y も D と同様に値を小さくすると不連続面は滑動しやすくなり軸応力が低下する傾向があると考えられる。解析結果 (Fig8 参照) より、この程度の範囲では σ_y はピーク値および挙動に与える影響は D や μ_r に比べ小さいものと思われる。

感度解析の結果より、試験供試体は作製時の気温や湿度、人為的誤差によってバラツキが生じるため、これにともなってパラメータが変動すると考えられるものの、低減率 D を 0.1 から 5.0 程度、材料の初期降伏応力 σ_y を 1.0 MPa から 3.0 MPa 程度、残留摩擦係数 μ_r を 0.10 から 0.30 程度に設定することで試験の再現性は良好である。この範囲で各ケース毎に解析を行い、再現性の最も良好なパラメータを Table2 のように決定した。各ケースで解析を行った結果を Fig9 から Fig.16 に示す。図中の analysis は各ケース毎のパラメータを入力して解析したものである。試験では拘束圧が低い場合 (0.5 MPa)、軟化挙動を示しているのに対し、解析結果もピーク値および全体的な挙動で類似した挙動を示しているのがわかる。また、試験では拘束圧が高い場合 (1.0 MPa)、軟化挙動を示さずひずみ硬化を示しているのに対し、解析結果も類似した傾向を示している。これより、本研究にて提案している摩擦係数低減モデルにおけるパラメータに関しては、材料試験などで得られる変形あるいは強度特性より設定することが可能で、こうした設定されたパラメータを用いて解析をすることで、不連続面の幾何学的形状にほぼ左右されるこ

Table 2 Various parameter for model of reduction friction coefficient

	材料の初期降伏応力	残留摩擦係数	低減率
case1	2.0MPa	0.30	0.1
case2	2.0MPa	0.20	1.0
case3	2.0MPa	0.15	0.5
case4	2.0MPa	0.10	5.0

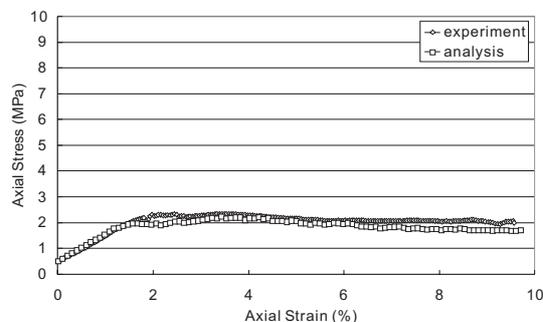


Fig. 9 Axial Stress v.s. Axial Strain relation (case1, conf.=0.5MPa)

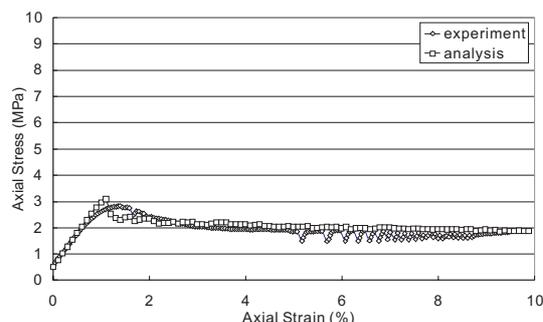


Fig. 10 Axial Stress v.s. Axial Strain relation (case2, conf.=0.5MPa)

となく試験の再現が可能である。

4. まとめ

不連続面を有する供試体では摩擦係数低減モデルを有限要素コードに組み込み解析を行うことで、材料物性や不連続面の幾何学的形状に左右されることなく試験結果のピーク値およびピーク後の挙動をある程度再現でき、提案するモデルは妥当なものであると考える。しかしながら、実際の試験においては不連続面の山の削り取られがあり、解析モデルでは、こうした山の削り取られ現象については表現が不可能である。このような現象をどのようにしてモデル化し、解析に反映させるかということについては、今後の課題としたい。また、本論文では静的な試験のみに本手法を適用しているが、今後は、既に実施済のクリーブ試験に関しても提案モデルの適用性、有用性および限界などについて検討したいと考えている。

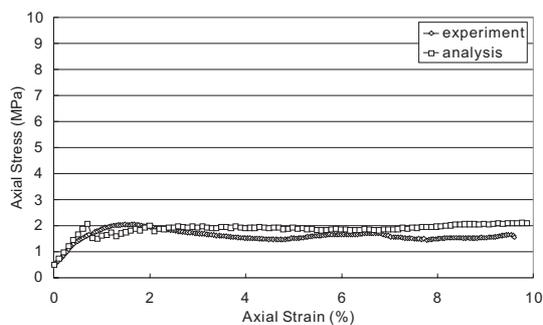


Fig. 11 Axial Stress v.s. Axial Strain relation (case3, conf.=0.5MPa)

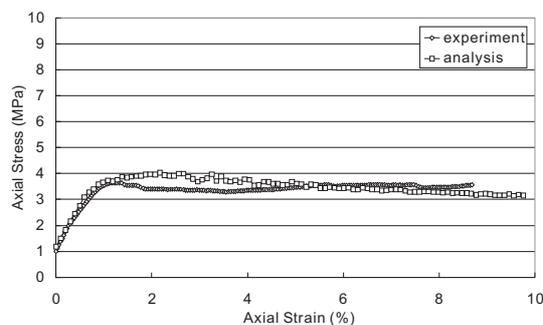


Fig. 14 Axial Stress v.s. Axial Strain relation (case2, conf.=1.0MPa)

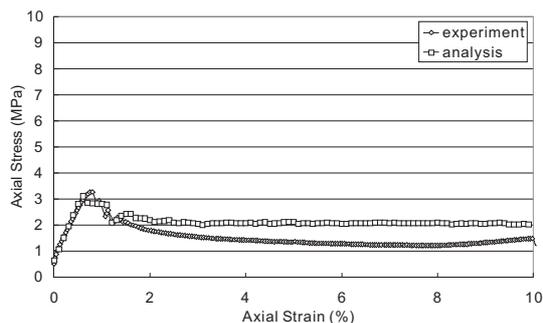


Fig. 12 Axial Stress v.s. Axial Strain relation (case4, conf.=0.5MPa)

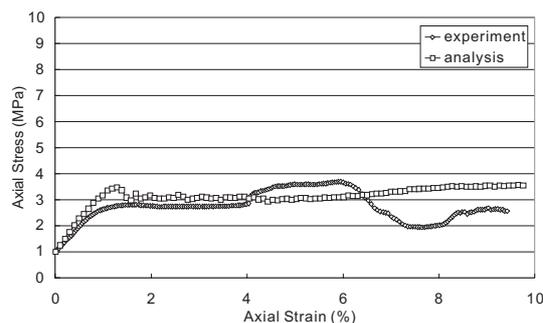


Fig. 15 Axial Stress v.s. Axial Strain relation (case3, conf.=1.0MPa)

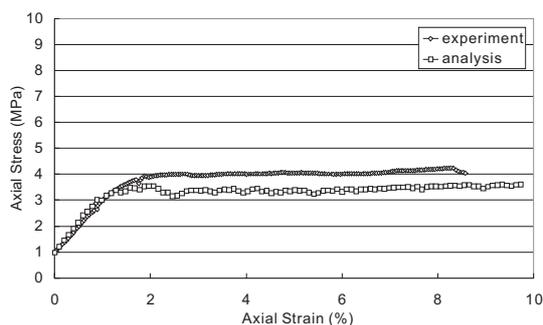


Fig. 13 Axial Stress v.s. Axial Strain relation (case1, conf.=1.0MPa)

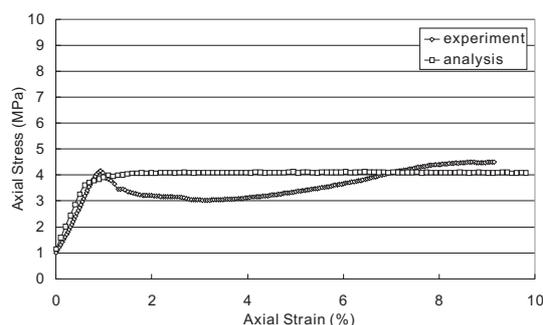


Fig. 16 Axial Stress v.s. Axial Strain relation (case4, conf.=1.0MPa)

付記：本研究の成果の一部は，平成 19 年度前田記念工学振興財団研究助成（研究代表者：吉田秀典）の助成を得て行った．ここに謝意を表する．

参考文献

- (1) 例えば，核燃料リサイクル開発機構 編：わが国における高レベル放射性廃棄物高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 - 地層処分研究開発第 2 次取りまとめ - 総論レポート，(1999)，核燃料リサイクル開発機構．
- (2) PPatton, F. D.: Multiple modes of shear failure in rock, *Proc. 1st Cong. ISRM*, Lisbon, Vol.1 (1966), pp.509-513.
- (3) Barton, N. R.: Review of a new shear-strength criterion for rock joints, *Engineering Geology*, Vol.7 (1977), pp.287-332.
- (4) Bandis, S. C., Lumsden A. C. and Barton, N. R.: Experimental studies of scale effects on the shear behaviour of rock joints, *Int. J. Rock Mech. Mic. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.18 (1981), pp.1-21.
- (5) 大西有三・大津宏康・矢野隆夫・加藤雅広・高田裕輔:離散化ラフネスデータを用いた岩盤不連続面のせん断挙動の推定法に関する研究，土木学会論文集 No.645/III-50 (2000)，pp.255-266．
- (6) 吉田秀典，山崎卓哉，井上純哉，金谷賢生，蒲池孝夫，平川芳明，森聡：不連続面の变形に着目した不連続性岩盤のクリープモデルの提案，構造工学論文集，Vol.52A (2006)，pp.1-8．
- (7) 大西有三，大津宏康，矢野隆夫，橋村義人：削れを考慮した岩盤不連続面のせん断挙動解析，土木学会論文集，No.666/III-53 (2000)，pp.145-158.