

不連続面を有する材料の変形挙動に関する 実験的および数値解析的研究

Experimental and numerical studies on mechanical behavior of discontinuous material

巽隆有*・吉田秀典**

Takakuni TATSUMI and Hidenori YOSHIDA

*香川大学大学院生 大学院工学研究科安全システム建設工学専攻 (〒761-0396 香川県高松市林町 2217-20)
**正会員 博士(工学) 香川大学教授 工学部安全システム建設工学科 (〒761-0396 香川県高松市林町 2217-20)

The mechanical behaviors of a discontinuous rock mass are strongly affected by discontinuities included in the rock mass. The surrounding rock mass around an underground cavern is subjected to compressive stress even after the cavern excavation. In this case, the shear properties of the discontinuity play an important role in the macroscopic behavior of the rock mass. Thus, the studies on the shear properties are well carried out from not only experimental but also numerical points of view so as to clarify the behaviors of the rock mass. However, there is few studies in which the mechanism of the alteration of the shear properties under various conditions is discussed. In this article, the experimental and numerical studies in terms of the material having a single discontinuity is conducted in order to seize the mechanism of the alteration of the shear properties. In the numerical study, the alteration 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 : *discontinuous material, discontinuity, shear properties, reduction of friction*

1. はじめに

わが国では放射性廃棄物を適切に処分するため、含有放射性廃棄物の濃度などの特性に応じて、地層処分、余裕深度処分、トレンチ処分、ピット処分を検討し、トレンチ処分やピット処分の一部については操業に至っている^{1),2)}。地層処分、余裕深度処分については、対象となる廃棄物の放射能レベルが高くその処分の期間が長期に亘るため、処分坑道周辺岩盤に関する長期健全性の確保が課題となる。

地層処分の場合、その処分深度は 300 m 以深であることを考慮すると、処分坑道の周辺は主として岩盤ということになる。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する可能性が高い。さらに、大きな地山応力の下で処分空洞などの地下空洞を掘削した場合、空洞周辺において EDZ (掘削損傷領域, Excavation Damaged Zone) が出現することが懸念される^{1),2)}。既存あるいは新規に発生した不連続面が変形すると、力学的性能だけでなく透水性能についても、調査段階のものと大きく異なる可能性がある。

不連続性岩盤において、その変形や透水性を支配しているのは不連続面と考えられる。トンネルなどの地下空間の掘削によって、トンネルの放射方向の応力が解放されるものの、掘削後もトンネル周辺の岩盤には、

依然として大きな圧縮応力が作用している。こうした圧縮応力の下では、不連続面の変形はせん断すべりが支配的になるものと思われる。したがって、岩盤の不連続面に関する既往研究についても 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、Patton³⁾、Barton⁴⁾、Bandis⁵⁾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。しかしながら、不連続面に不規則な凹凸が存在する場合、せん断試験における載荷の方向によってみかけのせん断強度は変化する⁶⁾が、上述した強度推定式などにおいては、そこまでの評価はされていない。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^{7),8),9)}、垂直剛性一定下でのせん断特性のモデル化¹⁰⁾、ダイレイタンシーを一定に拘束した条件下でのせん断特性のモデル化¹¹⁾なども行われているが、設定した個々の条件下におけるせん断強度が評価されているに過ぎず、なぜ強度が変化するのかについては議論が少ないのが現状である。そこで本研究では、不連続面の強度特性や変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. 力学モデルの構築

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う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^{(12),(13),(14),(15)}。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」でもおおよ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、また、それ以外の材料基質部（連続体）には、通常のソリッド要素を使用することとした。

不連続面の変形はクーロン摩擦則に基づいていることから、図-1に示す2つの物体の相対すべりは以下のような条件にて判定する。

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

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

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。

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、解析の精度（単精度／倍精度）や解の収束性も勘案し、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場合は、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。節点間の力が負である場合は接触状態と判断し、逆に、節点間の力が正である場合は、当該節点は接触可能な要素から解離することとなる。なお、多くの要素と節点が

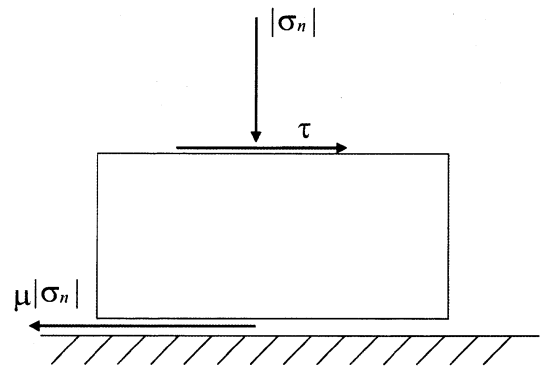


図-1 不連続面の概念図

ある場合には、この判定では収束が遅くなるなど可能性があるため、今後検討する必要があると思われる。

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、材料基質部が塑性し、ピークに至るまでのひずみ硬化領域については考慮することとした。ただし、本研究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、以下に示す 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。

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

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

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

垂直応力や粗さによって変化していると言われている。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^{7),8)}。特に、大西ら¹⁷⁾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。

Patton³⁾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。Barton⁴⁾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、また、細かい不連続面の小段などは見逃していないかなどの課題がある。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によって、なぜせん断強度が変化するかという点について論じているものは決して多くない。

著者の一人は、大西ら¹⁷⁾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とともにと仮定し、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^{12),13),15)}。

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

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。

3. 平面ひずみ圧縮試験（不連続面無し）

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、供試体に不連続面が存在してなくてはならない。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。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（グリオキサール処理水溶性セルロースエーテル）を用い、水と石膏の分離に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。なお、平面ひずみ圧縮試験とは別に実施した円柱供試体に対する三軸圧密排水試験より、供試体の弾性係数は 500 MPa 程度、ポアソン比は 0.25、内部摩擦角は 16.7 度、そして粘着力は 1.9 MPa であった。なお、三軸圧密排水試験では圧密量-時間曲線を確認した結果、飽和はほぼ完了していると判断した。一方、平面ひずみ圧縮試験では、供試体を 12 時間以上水中養生していることから、こちらもほぼ飽和していると判断した。

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、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。

3.2 試験結果（不連続面無し）

まず、不連続面が無い供試体に対して、4 つの異なる拘束圧（0.5 MPa、1.0 MPa、1.5 MPa、2.0 MPa）の下で平面ひずみ圧縮試験を実施した際に得られた軸応力-軸ひずみ関係を図-2 に示す。

図中の凡例は、例えば conf.=0.5 MPa とは拘束圧 0.5 MPa を表す。図におけるピーク応力から拘束圧を差し引いた軸応力レベルで 4 つの試験結果を比較すると、少なからず拘束圧依存性が存在することがわかる。また、載荷初期よりピークまでは、ひずみと応力に線形的な関係がみられ、ほとんどひずみ硬化領域を持たずにピークを迎えていることがわかる。ピーク前のひずみ-応力曲線の勾配については、拘束圧が大きくなると、若干「硬く見える」という挙動を示すものの、それほど顕著ではない。

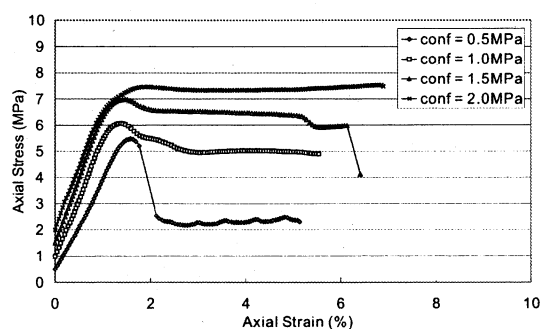


図-2 軸応力-軸ひずみ関係 (不連続面無し)

圧密排水試験より、供試体のポアソン比は 0.25 であったことから、これを用いて本供試体の弾性係数を逆算すると、拘束圧 0.5 MPa の場合で 340 MPa、拘束圧 1.0 MPa の場合で 460 MPa、拘束圧 1.5 MPa の場合で 540 MPa、拘束圧 2.0 MPa の場合で 480 MPa となった。拘束圧 0.5 MPa の場合にやや小さい値を、また、拘束圧 1.5 MPa の場合にやや大きめの値を示しているが、材料の品質を完全に同一にはできないことから、この差は品質によるバラツキに起因するものと考えている。こうしたバラツキを考慮すると、本試験に用いた供試体の弾性係数は、平面ひずみ圧縮試験での算定ではあるが、おおよそ 450 MPa 前後となる。この値は、圧密排水試験よりもやや小さいが、供試体の品質によるバラツキが存在することを考えると、本供試体の弾性係数は、400~500 MPa と考えてよいと思われる。前述の通り、本供試体の強度は低く、かつ、弾性係数が小さいものの、ほとんどひずみ硬化現象を呈しないという特徴を有する。一般に、軟質な岩盤の場合はひずみ硬化域がそれなりに存在するが、本供試体では硬化挙動はそれほど顕著ではなかった。

一方、ピーク後においては、拘束圧の低いものについては軟化挙動を呈するが、拘束圧の増大にともなう軟化挙動を呈しなくなる。この現象は、通常の土質材料や岩質材料のそれと類似している。拘束圧が低い場合、軟化挙動を呈するが、やや脆性的な挙動となっている。間隙などの影響で弾性係数は小さいが、固結性が著しく低いものではないため、変形の局所化によってすべり面が発生すると、即、滑動をしているものと思われる。なお、これら一連の試験より得られた拘束圧およびピーク応力の関係をモールの応力円を用いて整理した結果、当該供試体の粘着力は 1.9 MPa、内部摩擦角は 10 度程度となり、これらは、前述の円柱供試体に対する静的試験の結果より求めたものと近い値であった。

3.3 解析概要

本研究では、不連続面を含む材料の挙動に焦点を当て、材料基質部 (連続体部分) に関する挙動の検討を

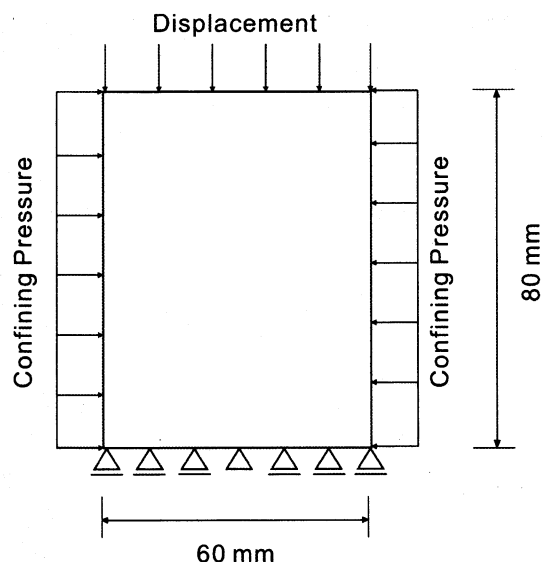


図-3 供試体概要 (不連続面無し)

目的としていないが、2 章 2 節にて述べたモデルと変形特性および強度特性の設定の妥当性については検討しておく必要があると考え、不連続面を有しない供試体についても簡便的に解析を行うこととした。

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。変形特性や強度特性 (初期降伏に関する強度) については、上述した試験結果 (ポアソン比: 0.25、粘着力: 1.9 MPa、内部摩擦角: 10 度) を用いたが、弾性係数については、作製した供試体ごとに状態が異なるため、試験ごとに評価して値を定め、解析を行っている。無論、同じことは他のパラメータに関しても言えるが、ポアソン比の変動はそれほど大きくないこと、強度定数については、三軸圧密排水試験の結果と平面ひずみ圧縮試験の結果が同等であったことから、それほど大きなバラツキは生じないものと判断し、上述した値を固定して用いた。境界条件についても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载荷を行った (図-3 参照)。

3.4 解析結果

各拘束圧の下における軸応力-ひずみ関係を図-4 から図-7 に試験結果と併せて示す。2 章 2 節にて述べて通り、本研究では、不連続面を含む材料の挙動を研究の対象としており、その場合、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と考えている。こうした考えを受け、材料基質部については、それが塑性してピークに至るまでのひずみ硬化領域のみを考慮している。したがって、本

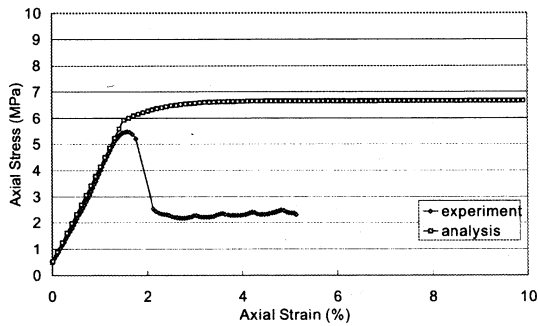


図-4 軸応力-軸ひずみ関係 (拘束圧 0.5MPa)

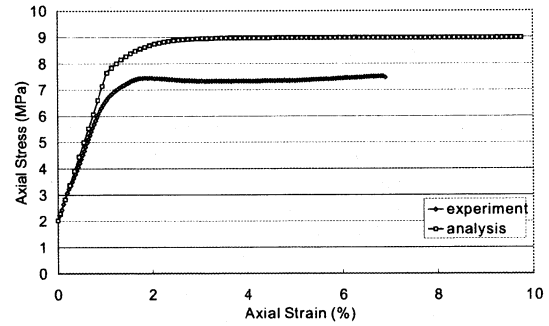


図-7 軸応力-軸ひずみ関係 (拘束圧 2.0MPa)

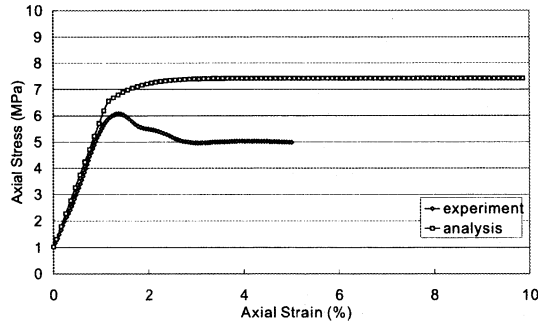


図-5 軸応力-軸ひずみ関係 (拘束圧 1.0MPa)

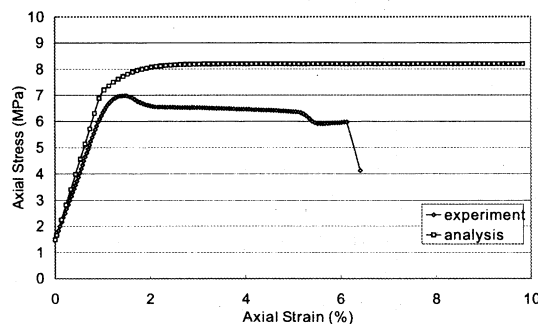


図-6 軸応力-軸ひずみ関係 (拘束圧 1.5MPa)

章で対象としている不連続面を有しない供試体、つまり材料基質部のみで構成されていると仮定した解析では、ピーク後の軟化現象などは再現ができない。また、弾性係数に関しては、各試験ごとに試験結果と合致するように設定されているので、当然ではあるが、解析結果と試験結果は、初期降伏に達するまでは合致が見られる。

本解析にて確認することは、前節でも述べた通り、試験における挙動をピークに至るまでの弾塑性挙動を Drucker-Prager 型の構成モデルと設定した強度特性 (粘着力と内部摩擦角) にて、どの程度まで表現できるかということである。いずれの解析も初期降伏を迎える応力レベルが試験よりもやや大きく出ており、その結果、ピーク応力も試験の値よりも大きくなっている。初期降伏応力を低減させることで、ひずみ硬化時の挙動

も、おおよそであるが合致が見られるものと思われる。したがって、本研究にて作製した試験供試体に関しては、そのピーク前までの挙動は、概ね、Drucker-Prager 型の構成モデルで表現が可能であると考え、供試体については、作製時の気温、湿度、そして養生時間によって若干のバラツキが生じるため、各試験ごとに弾性係数だけでなく、ポアソン比、粘着力、そして内部摩擦角は異なるものと思われるが、各試験ごとに全てのパラメータを変動させることは煩雑な作業をとまうため、本研究では、三軸圧密排水試験より得られたポアソン比、そして平面ひずみ圧縮試験より得られた粘着力と内部摩擦角を後述する解析でも使用することとする。

4. 平面ひずみ圧縮試験 (不連続面有り)

4.1 試験概要

本章では、本研究の主眼である不連続面の挙動について検討すべく、不連続面を有する供試体に関する試験および解析結果を示し、両結果の比較を通して、不連続面の挙動について詳しく考察を行う。

不連続面を有する場合は、何らかの方法で人工的に不連続面を設ける必要がある。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。なお、2つを合わせたサイズは、不連続面を有しない供試体と同様、80 mm × 80 mm × 60 mm である。

単一不連続面は、図-8 に示すような 80.00 mm (奥行) × 100.7 mm (幅) の平面として、供試体の水平面から 52 度ほど傾いた位置に入る (図-9 参照)。天然の岩盤に包含される不連続面群は、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、天然の岩盤に包含される不連続面に近くなるようランダムに凹凸や起伏を配した場合、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から、本研究では、正弦波の形状を有する単一不連続面のみを考慮

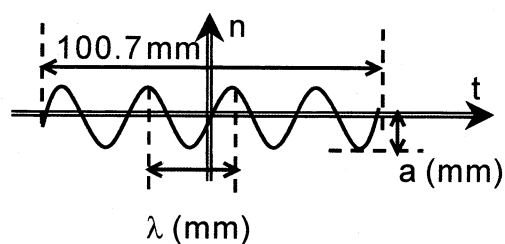


図-8 不連続面の形状（正弦波）

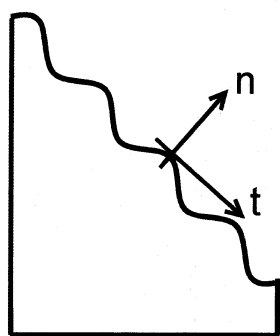


図-9 不連続面を有する供試体（半分）の断面図

表-1 不連続面の波長と振幅

試験ケース	波長（波数）	振幅
case1	17.00 mm（6 個）	1.00 mm
case2	17.00 mm（6 個）	2.00 mm
case3	12.75 mm（8 個）	1.00 mm
case4	12.75 mm（8 個）	2.00 mm

した。この場合、不連続面の形状パラメータは振幅と波長の2つであるので、本研究では、これらを変化させて、波長を17.00 mm（波の山が6個）および12.75 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、表-1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。不連続面を有する供試体に作製概要は以下の通りである。

まず、不連続面の表面形状を決定し、それを基に不連続面を有する供試体の片面の3Dデジタルデータを作成する。その3Dデジタルデータを用いてウレタンを3Dプロッターで切削する。そのウレタンをシリコン樹脂で型取りすることで不連続面有りの供試体における片面の型枠ができる。その型枠に前述した配合の材料を流し込み、供試体を作製する。このようにして作製された片面の不連続面を有する供試体を2つ合わせて、単一不連続面を有する供試体ができあがる。

試験の方法そのものについては、前章の不連続面を有しない供試体と全く同じであることから、ここでは

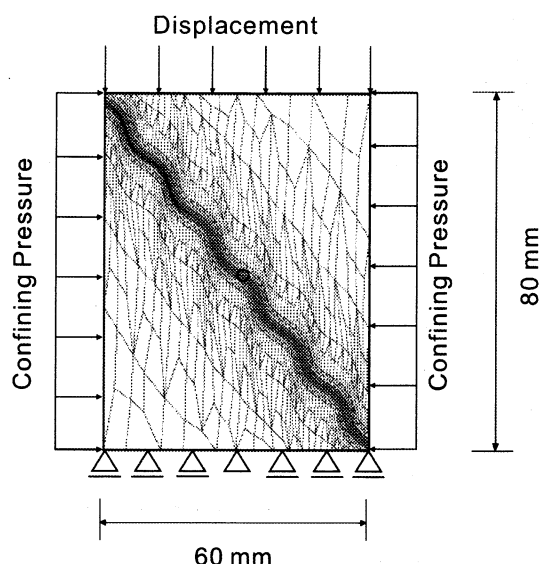


図-10 解析供試体概要図（case1）

割愛する。また、試験結果は、後述する解析結果と併せて示すこととする。なお、不連続面を有する供試体に関しては、0.5 MPa と 1.0 MPa という2種類の拘束圧の下にて試験を行った。

4.2 解析概要

不連続面を有する供試体についても、実際の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。材料基質部（連続体部分）に関する変形特性および強度特性は、前章にて示したものと同一とした。なお、弾性係数については、前章と同様、供試体ごとに状態が異なるため、試験ごとに評価して値を定め、解析を行っている。境界条件についても、前章と同様に設定した。

不連続面を有する供試体については、不連続面に摩擦すべり要素を導入し、2章1節にて示した摩擦要素を導入し解析を行った。一例として、case1に関する解析供試体の概要／メッシュを図-10に示す。不連続面は、図中、左上から右下にかけてメッシュが正弦波状になっている箇所に該当する。摩擦要素は、その不連続面に沿う形で導入され、本節では、粘着力を0 MPa（一定）、摩擦係数を0.5（一定）として解析を行った。また、図中で丸印が付けられた箇所は、後述する解析結果（摩擦係数および軸応力）を抽出した箇所である。他のcase2、case3 および case4 については、不連続面の振幅あるいは波長が異なるのみで、基本的にはcase1のメッシュと同じであることから、これらのケースについては解析供試体の概要／メッシュの掲載を省略する。なお、いずれのケースでも、総要素数は3754個（うち摩擦要素は976個）、総節点数は4304個である。

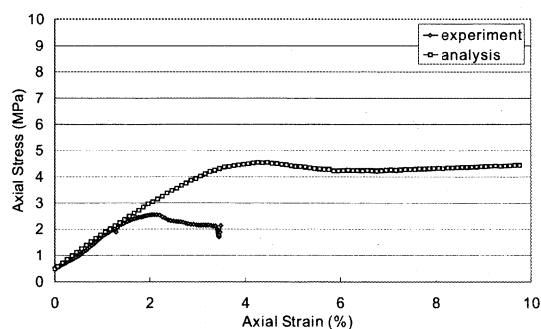


図-11 軸応力-軸ひずみ関係 (case1, 0.5 MPa, μ 一定)

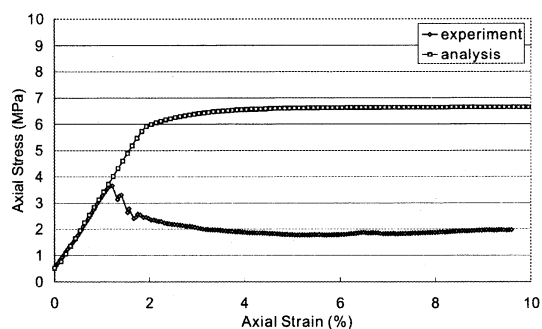


図-13 軸応力-軸ひずみ関係 (case2, 0.5 MPa, μ 一定)

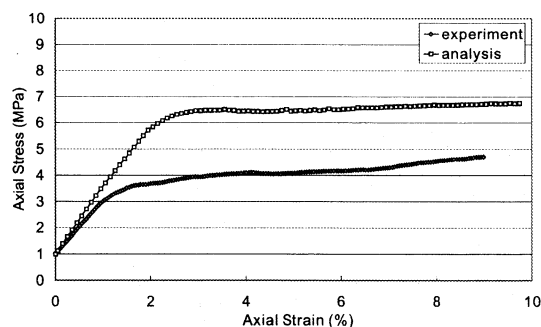


図-12 軸応力-軸ひずみ関係 (case1, 1.0 MPa, μ 一定)

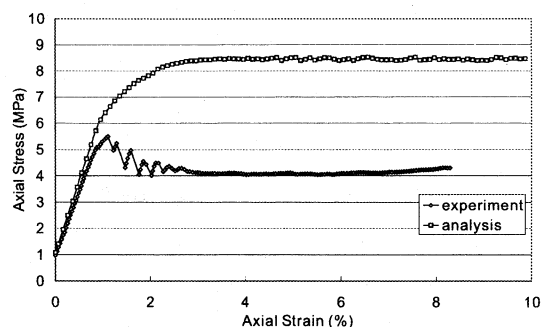


図-14 軸応力-軸ひずみ関係 (case2, 1.0 MPa, μ 一定)

4.3 解析結果 (摩擦係数一定)

解析結果として、各解析ケースにおける軸応力-軸ひずみ関係をそれぞれ図-11～図-18に、実験結果と併せて示す。

まず、試験結果について考察を加える。いずれの試験においても、拘束圧が増大することでピーク応力が大きくなるが、ピーク後の軟化の程度は、拘束圧が小さい方が大きく、拘束圧が増すことによって軟化し難くなっていることがわかる。前章の不連続面を有しない供試体については(図-2参照)、拘束圧を0.5 MPaから1.0 MPaに増大させた場合、若干のピーク応力の増大が認められるが、不連続面を有する供試体では、軒並み1.0 MPa以上の強度増加が見られる。また、不連続面を有しない供試体については、拘束圧が0.5 MPaおよび1.0 MPaというように比較的拘束圧が低いレベルでは、ピーク後に軟化挙動が見られるが、不連続面を有する供試体では、わずか0.5 MPaの拘束圧の増大で軟化の程度が著しく低減する供試体が多い。

不連続面を有しない供試体の場合、载荷にともなって徐々に微小亀裂(マイクロクラック)が発生し、多数発生した微小亀裂の限られた部分に変形が卓越する挙動、いわゆる変形の局所化が起こる。局所化した変形領域が供試体を二分するように進展しすべり面を形成すると、供試体は弾塑性的な挙動から2つに分かれた供試体がすべり面に沿って滑動するというような剛体的な挙動へと移行する。この分岐点において、ピーク応力を示すことになる。この際に生じるすべり面の

形状は、本章で検討している正弦波よりもフラットな形状をしており、拘束圧が小さい場合、一旦すべりが生じると、すべりを抑止するような凹凸が不連続面に乏しいことから、すべりが進展を続けるものと思われる。一方、本章にて検討している正弦波の形状の単一不連続面を有する供試体では、上述した通り、新規発生不連続面よりも凹凸が明瞭で、若干の拘束圧の増大でも、こうした凹凸の存在によって潜在不連続面のすべりは抑止され、軟化挙動を示さない、あるいは示しても若干という現象を呈しているものとする。

不連続面の形状に目を移すと、振幅が小さい(1 mmのケース) case1 と case3 では、拘束圧が小さい場合はやや軟化現象を呈し、拘束圧が大きくなるとほとんど軟化現象は呈さない。これは、拘束圧が小さい場合、正弦波の山の部分が削れてしまうことに起因しているものとする。実験前後の供試体の写真を写真-1および写真-2に示す。この実験前後の写真より、正弦波の山の部分が削り取られ、開口部へ(写真では右斜め下方向)ずり落ちていることが確認できる。波の山部分が削り取られる場合、その削り取られ方によって変形特性が異なってくる。

一方、振幅が大きい(2 mmのケース) case2 ではいずれの拘束圧の場合も、そして case4 で拘束圧が0.5 MPaの場合に軟化挙動を呈している。振幅が大きい場合、すべり現象を生ずるにあたって、振幅が小さい場合よりも大きな力を必要とする。そのため、振幅が小さい場合よりもピーク応力が大きくなる。不連続面に大

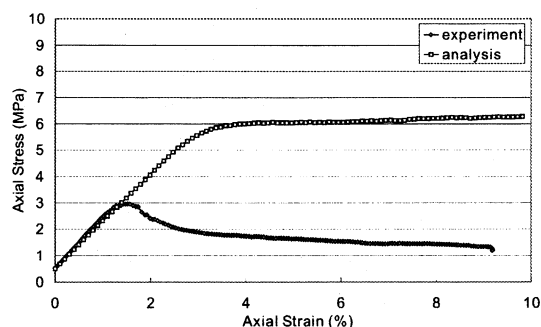


図-15 軸応力-軸ひずみ関係 (case3, 0.5 MPa, μ 一定)

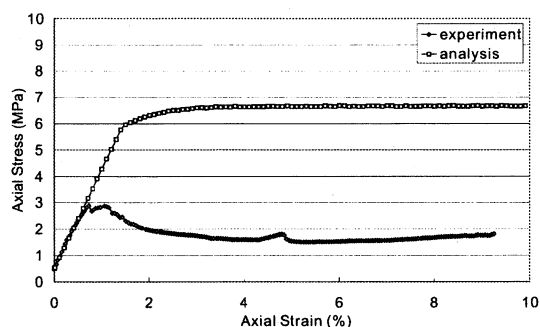


図-17 軸応力-軸ひずみ関係 (case4, 0.5 MPa, μ 一定)

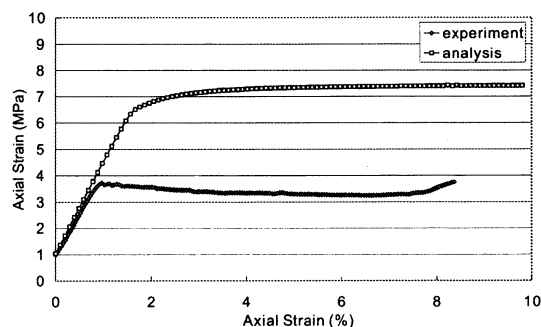


図-16 軸応力-軸ひずみ関係 (case3, 1.0 MPa, μ 一定)

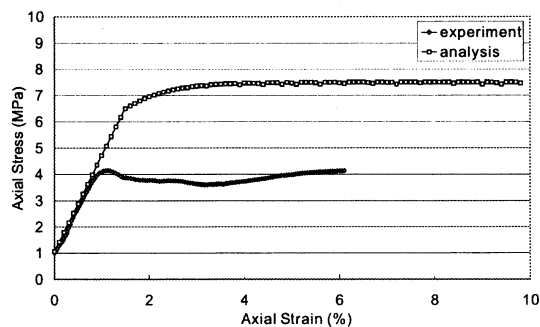


図-18 軸応力-軸ひずみ関係 (case4, 1.0 MPa, μ 一定)

きな力が作用すると、不連続面において剛体的なすべり現象へと移行する前に不連続面における山が削れてしまう。したがって、不連続面を有しない供試体にて確認されたように明確な軟化現象を呈する。また、振幅が大きいと不連続面の噛み合わせがよくなるため、試験では巨視的な弾性係数の増大が確認できる。

ここで、実験と解析の比較を行うと、ピークの値およびピーク後の挙動について、両者が大きく異なることがわかる。これは、前述したような変形にともなう波の山の削り取られに起因するものと思われる。つまり、山が削れられて摩擦係数など不連続面の物性が変化することによって、ピーク前後の挙動が影響を受けていると考える。そこで本研究では、2章3節で示した摩擦係数低減モデルを導入し、その際に、不連続面および巨視的な材料がどのような挙動を示すかについて、次節にて検討を行う。

4.4 解析結果 (摩擦係数変動)

前章で示した摩擦係数を 0.5 に固定した解析の結果および考察を踏まえ、本節では、2章3節で示した摩擦係数低減モデルを摩擦要素に適用することとした。

摩擦係数低減モデルには、2章3節で示した通り、低減率 D 、初期摩擦係数 μ_i 、残留摩擦係数 μ_r 、不連続面における材料の初期降伏応力 σ_y という4つのパラメータがある。このうち、低減率の導入によって摩擦係数の低減が表現されることとなる。初期摩擦係数 μ_i は試験前の不連続面の摩擦係数で、一方、残留摩擦係

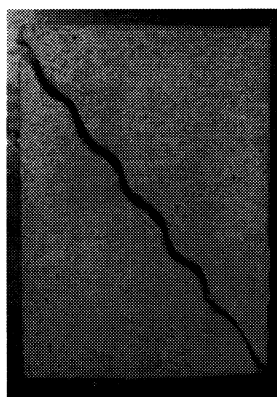


写真-1 供試体 (実験前)

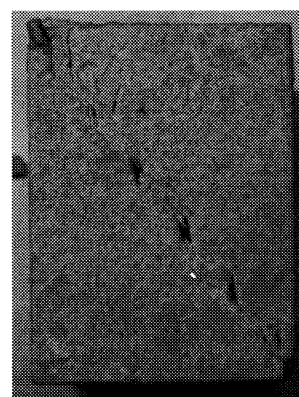


写真-2 供試体 (実験後)

数 μ_r は、载荷とともに不連続面の表面が削れ、その削れによって摩擦係数が低減し、最終的に一定値 (残留値) に至った際の摩擦係数である。また、摩擦係数の低下は、不連続面に作用している法線方向のトラクションが不連続面近傍の材料の初期降伏応力 σ_y を上回った際に開始される。つまり、法線方向のトラクションが σ_y を超えない限り摩擦係数の低減は生じない。解析では、このようなモデルを有限要素解析コードに組み込んだ。

次に、これらのパラメータの決定方法についてであるが、拘束圧が 0.5 MPa あるいは 1.0 MPa であるため、材料の初期降伏応力 σ_y が 1.0 MPa を下回るとするとすぐに不連続面の滑動が生じてしまうので、本研究では、とりあえず、 σ_y として下限値である 1.0 MPa を採用した。 μ_i 、 μ_r および D については、感度解析

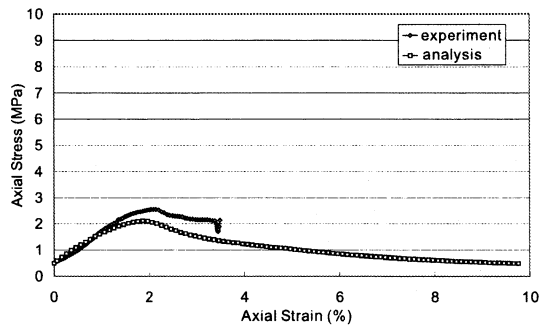


図-19 軸応力-軸ひずみ関係 (case1, 0.5MPa, μ 変動)

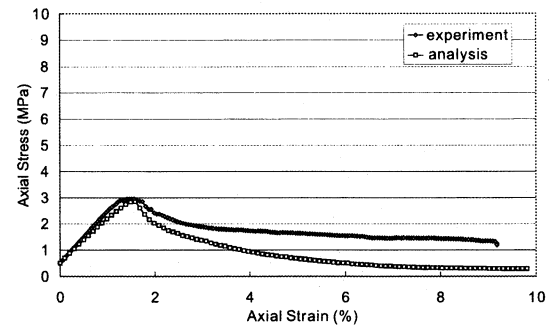


図-23 軸応力-軸ひずみ関係 (case3, 0.5MPa, μ 変動)

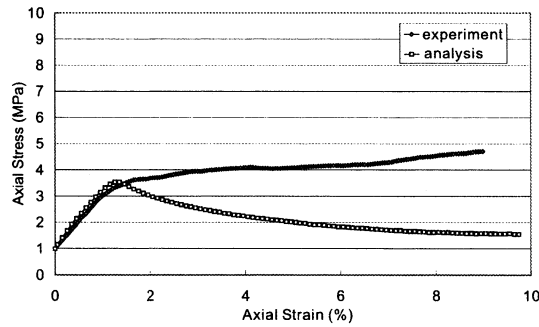


図-20 軸応力-軸ひずみ関係 (case1, 1.0MPa, μ 変動)

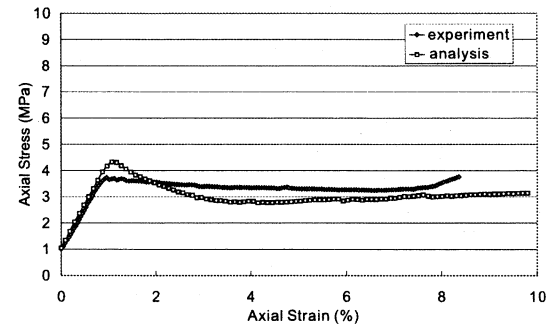


図-24 軸応力-軸ひずみ関係 (case3, 1.0MPa, μ 変動)

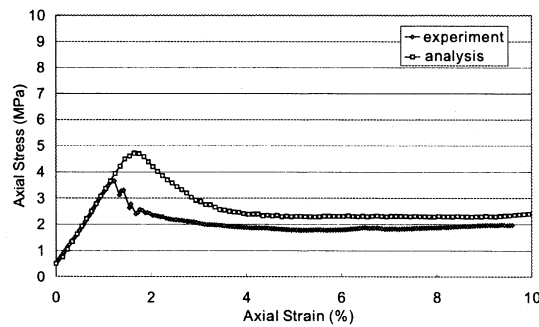


図-21 軸応力-軸ひずみ関係 (case2, 0.5MPa, μ 変動)

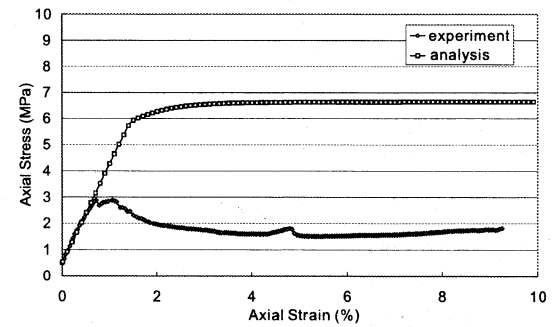


図-25 軸応力-軸ひずみ関係 (case4, 0.5MPa, μ 変動)

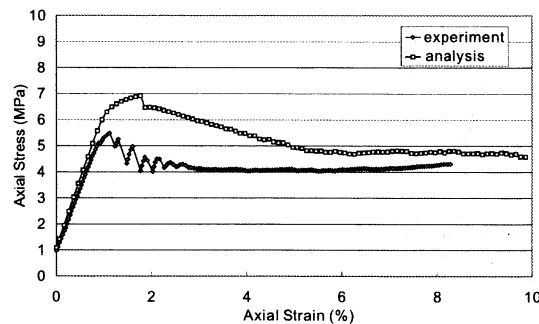


図-22 軸応力-軸ひずみ関係 (case2, 1.0MPa, μ 変動)

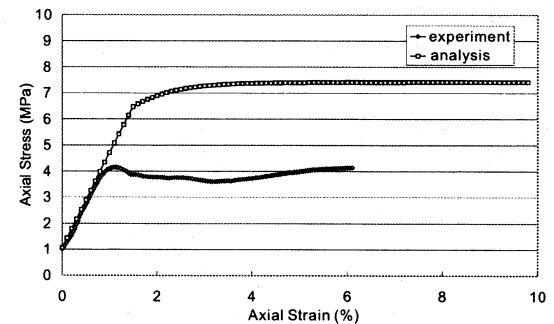


図-26 軸応力-軸ひずみ関係 (case4, 1.0MPa, μ 変動)

を実施して、試験の再現性の良い組み合わせを決めることとした。その結果、 $\mu_i = 0.3$, $\mu_r = 0.1$, $D = 1.0$ という組み合わせにおいて試験の再現性が良好であることが判明したことから、本論文では、この組み合わせの場合における解析結果を軸に考察を加える。各解

析ケースにおける軸応力-軸ひずみの結果をそれぞれ、図-19 から図-26 に示す。

不連続面の振幅の小さな case1 と case3 については、ピーク値やその後の挙動において類似傾向を示しているが、不連続面の振幅が大きな case2 と case4 につい

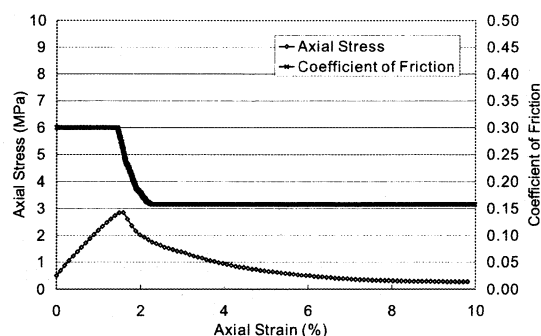


図-27 軸応力・摩擦係数－軸ひずみ関係 (case3, 0.5MPa)

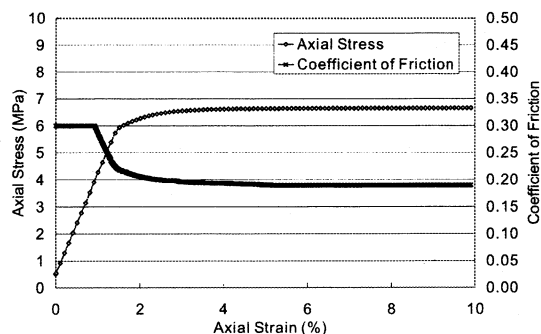


図-28 軸応力・摩擦係数－軸ひずみ関係 (case4, 0.5MPa)

ては、case2 では解析におけるピーク値が試験のそれよりやや大きく、case4 では解析におけるピーク値が試験よりも 2 倍程度大きな値を示し、また、解析では軟化挙動を呈していない。

このように case2 と case4 が試験と解析においてピーク値およびその後の挙動が異なる理由としては、解析においては、case1 と case3 は不連続面の波の振幅が小さく、滑動しやすい形状であるのに対して、case2 と case4 は不連続面の波の振幅が大きく、滑動を生じにくい、あるいは生じないからである。case4 については波長も短く、その結果、1つの山の傾斜角が大きいことも、巨視的なダイレイタンスの増加となって現れていることも原因と考えられる。このように、解析では山が削れないが、実際の試験では山が削れていることが、試験と解析においてピーク値およびその後の挙動が異なる原因と思われる。

拘束圧について考えてみると、試験および解析とも、拘束圧が大きくなると不連続面は滑動し難くなっている。解析では、特に case4 で見られるように、载荷変位を大きく、つまり载荷重を増大させても不連続面は滑動しないが、試験においては不連続面の山の部分が削り取られ、それにエネルギーを要するため、解析よりもピーク応力が小さくなる傾向がある。case4 ではそれが顕著で、拘束圧が低くてもそのような現象を呈しているものと思われる。

ここで、滑動を生じた case3 の拘束圧 0.5 MPa の解析に関して、図-10 において丸印が付けられた箇所

における軸応力／摩擦係数－軸ひずみ関係（図-27 参照）を示す。図より、载荷にともなって当該箇所の応力が増大し、やがて摩擦係数が低減していることがわかる。また、摩擦係数が低減にともなって不連続面の変形量が大きくなり、さらに、軸応力の低下、つまり軟化挙動を呈している。図-23 によれば、軸ひずみがおよそ 1.7 % を境に、供試体は軟化現象を呈している。不連続面の摩擦係数の低下などもこの付近から生じており、また、図-29 および図-30 においても、これを境に鉛直方向の応力の低減が確認できる。図-29 では、不連続面の密着部分の周辺に応力集中が確認できるが、図-30 ではそれが緩和し、かつ、不連続面の変形（開口現象）が顕著となっている。

次に、滑動を生じなかった case4 の拘束圧 0.5 MPa の解析に関しても、図-10 において丸印が付けられた箇所における軸応力／摩擦係数－軸ひずみ関係（図-28 参照）を示す。このケースでは、摩擦係数は低減しているものの滑動は生じていないという結果を得た。case4 の拘束圧 0.5 MPa の解析では、軸ひずみが 3.0 % の時点における相当塑性ひずみ分布（図-32 参照）からもわかる通り、不連続面はほとんど滑動を生じず、相当塑性ひずみの値の大きな領域が供試体全体に広がっていることがわかる。これに対し、滑動を生じた case3 の拘束圧 0.5 MPa の解析では、同じく軸ひずみが 3.0 % の時点における相当塑性ひずみ分布（図-31 参照）では、一部の不連続面の接触部にのみ相当塑性ひずみの値の大きな領域が確認できる。試験においても不連続面のみが破壊されており、解析は実現象に近い状況を説明していると考ええる。前述の通り、case4 の供試体は不連続面の振幅が大きく、かつ波長が短いため、上下の不連続面供試体の噛み合わせが良く、その分、不連続面に対して大きな垂直応力（トラクション）が確保される。したがって、応力の増大にともなって不連続面の摩擦係数が低減しても、不連続面は滑動を生じない。一方、実現象においては、前述の通り、不連続面の波の山が削れているため、ピーク応力も小さくなっているが、解析では、こうした山が削り取られるという現象までモデル化していないことから、今後は、こうした現象を加味できるか否かを検討する必要がある。

なお、供試体のばらつきに起因して、そもそも供試体ごとに材料特性が異なる、さらには、面が平坦ではない不連続面箇所では材料打設時におけるブリージングの影響も考えられるため、材料定数の決定や波形（振幅や波長）が変形に及ぼす影響を普遍的に評価することが現段階では難しい。今後、多くの試験を行うことでこれらの課題を解決したい。

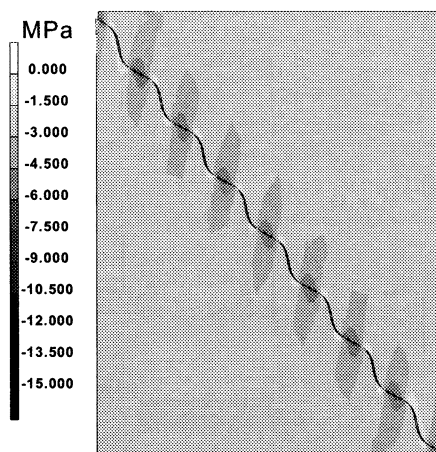


図-29 鉛直方向（軸方向）の応力分布（case3, 0.5MPa, 軸ひずみ 1.6%, 変形は 1 倍）

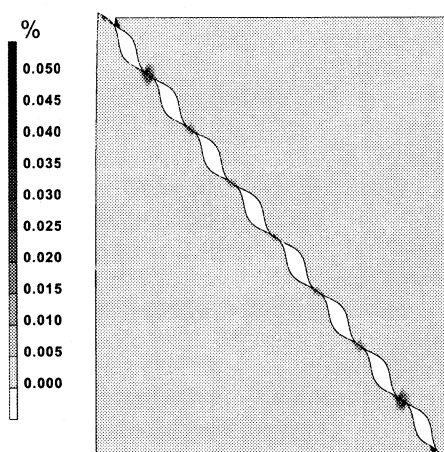


図-31 相当塑性ひずみ分布（case3, 0.5MPa, 軸ひずみ 3.0%, 変形は 1 倍）

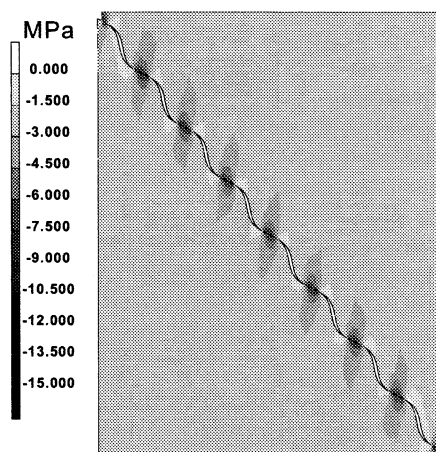


図-30 鉛直方向（軸方向）の応力分布（case3, 0.5MPa, 軸ひずみ 1.7%, 変形は 1 倍）

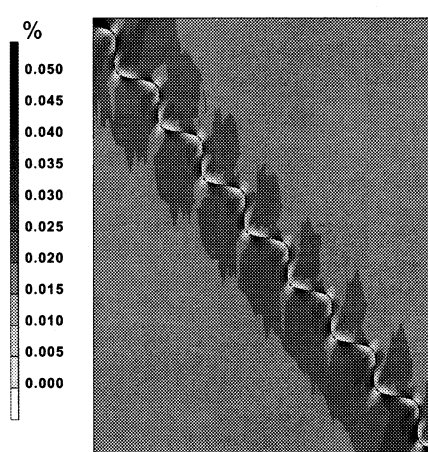


図-32 相当塑性ひずみ分布（case4, 0.5MPa, 軸ひずみ 3.0%, 変形は 1 倍）

5. まとめ

本研究では、不連続性岩盤に包含される不連続面の強度特性や変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た。

試験においては、実際の岩盤に代わる材料として人工供試体を作製し、不連続面を有しないおよび不連続面を有する供試体に対する平面ひずみ圧縮試験を実施した。不連続面を有する供試体には単一不連続面を導入し、試験結果の整理を容易にする目的で、不連続面の形状はランダムなものではなく、正弦波とすることとした。実は、本試験は平面ひずみ圧縮試験を実施すると同時に透水試験も実施している。したがって、不連続面の形状がフラットな場合、不連続面がせん断変形しても透水性能の変化が見込めないため、敢えてこのような形状とした。透水性能の変化については、別

の機会において発表したいと考えている。不連続面を有する供試体については、正弦波の振幅および波長を2通りずつ設定し、合計、4ケースの供試体に対して平面ひずみ圧縮試験を実施した。

一連の試験より、以下のような知見を得た。

- 本供試体には拘束圧依存性があること、また、拘束圧が低い場合は脆性的な破壊形態を呈するということが判明した。一般的な岩盤、広義的には地盤にも同様の傾向があり、岩質材料に代わる材料として実験することに問題はないと判断する。
- 不連続面の振幅が変形に与える影響は大きい。振幅が大きいほど不連続面の変形が生じ難いことからピーク応力が増大し、結果として、脆性的な破壊挙動を呈する。
- 不連続面の波長が変形に与える影響は、本研究にて設定した波長の範囲では、決して大きくない。

さらに、本研究では、こうした試験結果を踏まえて数値解析を実施した。不連続面を有しない供試体に対

する解析において、試験より得られた変形特性および強度特性の適用の可否を検討した。適用性を確認できたことから、不連続面を含まない材料基質部（連続体部分）については、簡易的ではあるが Drucker-Prager の弾塑性構成モデルにて、ピーク前という制限はあるものの、その挙動の再現が可能であることを確認した。

不連続面を有する供試体に対する解析では、摩擦係数が一定値の場合、実現現象との乖離が確認された。そこで、不連続面に作用するトラクションの大きさによって摩擦係数が低減するモデルを考え、それを有限要素解析コードに組み込んだ結果、一部を除いて、概ね、現象を再現することができた。これより、不連続面を有する材料の挙動は不連続面の変形に支配され、また、その挙動は不連続面の幾何学的形状と、载荷にともなって変化する摩擦係数に支配されることが判明した。特に、摩擦係数の低減の影響は大きく、本研究で想定したような既存不連続面のみならず、新規に発生する不連続面についても同様のことが言えるものと考え、各ケースの試験を摩擦低減モデルの導入にて表現できたことから、提案したモデルの基本的コンセプトに根本的な誤りはないものと考えている。無論、提案モデルは簡易的なものであり、また、実際の不連続面の応力（トラクション）が評価できない中で類推の域をでないものであるが、今後、さらに多くの試験と解析を実施・比較することで、ある程度普遍的なものに近づくのではないと思われる。不連続面の形状については、正弦波だけでなく、例えば三角波などの形状についても試験を行い、本研究と同様な検討を実施する必要もある。

しかしながら、提案モデルを用いても表現が不可能なケース（case4）なども存在する。その理由として、不連続面の山の削り取られが考えられるが、現状の数値解析モデルでは、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、今回は静的な試験のみを実施しているが、今後は、クリープ試験も実施し、提案モデルの有用性や限界などについて検討したいと考えている。

付記：本研究の成果の一部は、財団法人鹿島学術振興財団研究助成金（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 一 地層処分研究開発第2次取りまとめ総論レポート、核燃料リサイクル開発機構、1999。
- 2) 例えば、核燃料リサイクル開発機構および電気事業連合会 編：TRU 廃棄物処分概念検討書、核燃料リサイクル

開発機構および電気事業連合会、2000。

- 3) PPatton, F. D.: Multiple modes of shear failure in rock, *Proc. 1st Cong. ISRM*, Lisbon, Vol.1, pp.509-513, 1966.
- 4) Barton, N. R.: Review of a new shear-strength criterion for rock joints, *Engineering Geology*, Vol.7, pp.287-332, 1977.
- 5) 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, pp.1-21, 1981.
- 6) 木村強, 江崎哲郎: 岩盤不連続面の表面粗さ (JRC) とせん断特性, 応用地質, 第33巻, 第5号, pp.11-18, 1992.
- 7) 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, pp.255-266, 2000.
- 8) 岸田潔, 津野究: 摩擦とラフネスを考慮した岩盤不連続面の一面せん断挙動のモデル化, 土木学会論文集, No.680/I II-55, pp.245-261, 2001.
- 9) 大西有三, 矢野隆夫, 岩本宏, 西川直人: 岩盤の一面せん断試験装置およびラフネス計測装置の開発・研究とその遷移, 土木学会論文集, No.645/III-50, pp.307-320, 2000.
- 10) 矢野隆夫, 青木一男, 大西有三, 大津宏康, 西山哲, 高木克己: 垂直剛性一定一面せん断時の岩盤不連続面のせん断挙動, 土木学会論文集, No.729/III-62, pp.115-130, 2003.
- 11) 谷本親伯, 鈴木淳也, 川崎了, 中原拓郎: ダイレクショナル拘束条件下の岩盤不連続面せん断特性, 土木学会論文集, No.736/III-63, pp.93-102, 2003.
- 12) 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: 不連続面の変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, pp.1-8, 2006.
- 13) 吉田秀典, 山崎卓哉, 井上純哉, 平川芳明, 森聡: 不連続面の特性が岩盤の巨視的挙動に及ぼす影響に関する研究, 構造工学論文集, Vol.51A, pp.51-58, 2005.
- 14) 吉田秀典, 宇田圭一, 平川芳明, 森聡: 不連続面の寸法とロックボルト導入効果に関する一考察, 応用力学論文集, Vol.8, pp.443-430, 2005.
- 15) 吉田秀典, 山崎卓哉, 井上純哉: 不連続面の幾何学的特性がクリープ挙動に及ぼす影響に関する検討, 計算数理工学論文集, Vol.5, No.2, pp.161-166, 2005.
- 16) 地盤工学会編: 不連続性岩盤と構造物に関する研究報告書, 地盤工学会, pp.79-80, 1995.
- 17) 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, pp.145-158, 2000.

(2008年4月14日 受付)