

## 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

## Examination about influences of geometrical property of discontinuity on creep behavior

吉田 秀典<sup>1)</sup>, 山崎 卓哉<sup>2)</sup>, 井上 純哉<sup>3)</sup>

Hidenori YOSHIDA, Takuya YAMASAKI and Junya INOUE

- 1) 香川大学 工学部 (〒761-0396 高松市林町 2217-10, 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 2217-10, E-mail: s05g413@stmail.eng.kagawa-u.ac.jp)  
 3) 東京大学 大学院工学系研究科 (〒113-8656 文京区本郷 7-3-1, E-mail: inoue@material.t.u-tokyo.ac.jp)

In Japan, it is planned to dispose high-level radioactive waste and TRU (Transuranium) waste in stable geological formations. Taking the long-term behaviors of the formations into account, a mathematical model is of prime importance. In general, the shear sliding of discontinuity of a discontinuous rock mass is caused by its wear which may govern the macroscopic behaviors of the rock. However, there is few creep model in which the influences of the discontinuity behavior is considered. In this study, a creep model for a discontinuous rock mass is proposed with focusing attention on the behavior of discontinuity. Furthermore, the macroscopic behaviors of the rock are affected by the material and geometrical properties of discontinuity, but there is little research on them. Therefore, in this study, the influences of the geometrical properties of discontinuity on the creep behavior of a rock mass are discussed through the analyses by the proposed creep model.

**Key Words:** discontinuous rock mass, discontinuity creep, coefficient of friction, geometrical properties

## 1. 緒言

近年、燃料貯蔵施設あるいは廃棄物処分施設など原子力発電に関係する施設の長期安全性の観点から、クリープ現象に関する関心が高まりつつある。放射性廃棄物は、一般に、高レベル放射性廃棄物と低レベル放射性廃棄物に大別されるが、わが国では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ている<sup>(1)(2)</sup>。濃度の高い放射性廃棄物では、長期にわたって地下の処分施設全体の安定性を確保する必要があり、処分坑道(地下空洞)についても例外ではない。

処分場の深度は、余裕深度処分では50~100m、地層処分では300m以上とされており、こうした地下深部では岩盤が卓越するものと考えられる。特に、高レベル放射性廃棄物の処分においては処分深度が深くなることから、対象となる岩盤は固結性に優れているものの、同時に、不連続面を含んでいる可能性がある。処分地点の周辺が不連続性岩盤というようなケースも視野に入れば、岩盤の長期挙動を考えるにあたっては、母岩部のみならず、不連続面の変形も十分に考慮する必要があることは言うまでもない。

ここで、岩盤のクリープ現象のモデル化に焦点をあてる

と、岩盤が採取された地点によって鉱物成分や力学特性が異なることから、採取されたコアを用いた実験より地点毎に力学特性が決定されることが多く、その大半が実験結果をフィッティングするような形の回帰式となっている。一般的に、こうした回帰式では複合応力状態や温度の影響などを考慮することが容易ではない。また、土木工学の分野においては、材料の長期的な挙動を議論する際、粘弾塑性的なモデルが適用されることが多いが、こうしたモデルは結晶質材料に対しては必ずしもよくあてはまらない<sup>(3)</sup>。これについては、結晶質材料中に存在する大小様々な不連続面の存在が影響を及ぼしているものと思われる。

しかしながら、岩盤に内包される不連続面の影響を評価したクリープモデルは少なく、また、岩盤に内在する不連続面が巨視的なクリープ現象に与える影響などを考察した研究事例も少ない。検討が行われていても、特殊な条件(例えば高温下)に対する検討<sup>(4)(5)(6)</sup>が主眼であったり、単一亀裂を対象<sup>(7)</sup>としていたり、必ずしも不連続性岩盤に関するクリープのメカニズムが明確になってるわけではない。さらに、実験などから得られた不連続面の挙動を反映したクリープモデルは少なく、モデル化が試みられていても必ずし

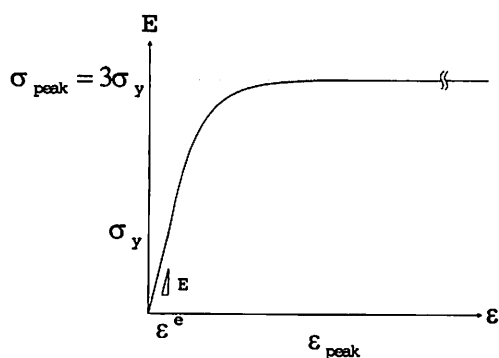


Fig. 1 Constitutive equation of intact rock

もメカニズムに立脚したものとはなっていないのが現状である(8)。こうした中で、著者らの一部は、岩盤中に包含する不連続面の規模、密度、配置などと言った幾何学的特性とすべり摩擦角、粘着力と言った強度特性をパラメータとして持つメカニズムに立脚型のクリープモデルを提案している(9)。しかしながら、このモデルは、拘束圧が小さい条件での割裂破壊型・クラック進展モデルで、圧縮が卓越する岩盤には適用できない。

そこで本研究では、圧縮が卓越する岩盤における不連続面の時間依存的挙動を考察することを目的とし、不連続面クリープの関する考え方の一例を示すと同時に、岩盤に内包される不連続面の幾何学的特性が巨視的な岩盤の挙動に及ぼす影響について考察を加える。

## 2. 解析モデル

### 2.1. 弾塑性挙動のモデル化

前述の通り、一軸圧縮下あるいは拘束圧が小さい三軸圧縮下においては岩盤に内包される不連続面は割裂型の破壊を生じて進展/成長するが、拘束力が大きい三軸圧縮下においては摩擦すべり型の挙動が卓越するものと思われる。本研究では、文献(10)を参考に、不連続面に相当する箇所に Coulomb 摩擦則に基づく摩擦すべり要素を導入することで、拘束力が大きい三軸圧縮下における不連続面の摩擦すべり現象を表現することとした。このモデルは粘着力と摩擦係数というパラメータを必要とし、すべりを生じさせようとする力が粘着力と摩擦力の和より大きくなると不連続面がすべりを生ずるという平易なモデルである。

一方、連続体、つまり岩盤基質部については、Drucker-Prager 型の弾塑性モデルを適用することとした。岩盤基質部の応力-ひずみ関係(構成モデル)については、文献(11)を参考に、Fig.1 に示すような構成モデルを考えた。図に示す通り、この構成モデルにおいては、ピーク圧縮強度( $\sigma_{peak}$ )の1/3の応力を初期降伏応力( $\sigma_y$ )とし、この応力に至るまでは弾性的に挙動し、初期降伏後からピークに至るまでは硬化挙動(等方硬化)を呈し、さらにピーク後は、応力を一定に保ちながらひずみだけが增大するものとした。なお、本研究ではクリープ挙動を対象としていることから、ピーク後の軟化挙動を考慮していないことに注意されたい。また、引張

側については引張破壊などを視野に入れ、圧縮側とは異なった構成モデルを採用すべきであるが、圧縮側も引張側も同じ挙動を呈するものとしている。載荷あるいは境界条件によっては引張応力下になりうることも十分に考えられるが、本論文は不連続面クリープという現象に焦点をあてていることから、岩盤基質部の挙動については簡素なモデルを採用している。

文献(10)では、上述した摩擦すべりモデルの概要、解析パラメータの決定方法などについて言及している他、こうしたモデルを用いて不連続面を有する岩盤に対する一面せん断試験(12)の解析を実施し、解析モデルの妥当性の検討を行っているので参照されたい。

### 2.2. 不連続面のクリープ挙動のモデル化

本研究では、岩盤基質部がクリープ挙動を呈するのではなく、不連続面が徐々に滑動することで、見かけ上、供試体がクリープするような現象を考える。それには、どのようなメカニズムで不連続面が徐々に滑動するのかを解明する必要がある。

一般に、不連続面を有する岩盤に対してせん断試験を行うと、せん断が進むにつれ不連続面の表面の凹凸が削れ、表面が滑らかになることが報告されている(13)(14)。特に、大西ら(15)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。

本研究では、このような考え方を不連続面のクリープ変形に適用することとし、不連続面が接触しせん断される場合、接触面は減耗し、摩擦係数が変化するものと仮定した。ただし、クリープ解析を実施するにあたっては、時間経過とともにどのように減耗するかを定義しなくてはならない。現在、著者らは減耗率を定義するために不連続面を有する岩盤のクリープ試験を実施しているが、現段階では減耗率の定義には至っていないので、摩擦係数  $\mu$  を次式のように仮定した。

$$\mu = \begin{cases} 1.0, & (\sigma_n^j < \sigma_y^j) \\ 0.7 \times \exp \{ -(\sigma_n^j - \sigma_y^j) / 20 \} + 0.3, & (\sigma_n^j \geq \sigma_y^j) \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 $\sigma_n^j$  および  $\sigma_y^j$  はそれぞれ、不連続面における法線応力および不連続面に露出した部分の岩盤の初期降伏応力である。本研究では、不連続面が形成された経緯を考慮した場合、岩盤固有の初期降伏応力  $\sigma_y$  (本解析では 37.0 MPa) と不連続面に露出した部分の岩盤の初期降伏応力  $\sigma_y^j$  にはやや差があり、 $\sigma_y^j$  の方が小さいものと考えている。以降の解析では、 $\sigma_y^j$  を 20 MPa と仮定して用いた。式(1)から分かるように、不連続面における法線応力が不連続面に露出した部分の岩盤の初期降伏応力  $\sigma_y^j$  に達すると不連続面では減耗が開始され、不連続面の摩擦係数は不連続面における法線応力  $\sigma_n^j$  の増加にともなって減少し、0.3 まで低下した後は一定値になるものと仮定した。この残留値については、不連続面のクリープ現象に関する研究事例が少ないため、通常の静的なせん断試験(13)(14)(15)を参考にして定めた。

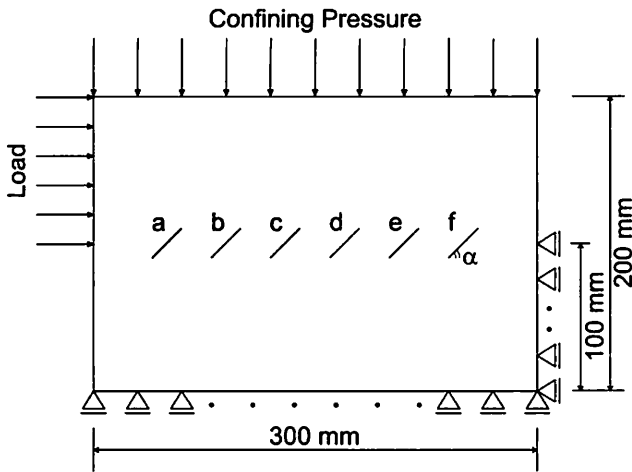


Fig. 2 Rock with discontinuities

Table 1 Material properties <sup>(12)</sup>

岩盤	弾性係数 (MPa)	50,000
	ポアソン比	0.2
	内部摩擦角 (°)	45.0
	粘着力 (MPa)	32.0
不連続面	摩擦係数	1.0
	粘着力 (MPa)	0.0
	起伏角度 (°)	15

### 3. クリープ解析

#### 3.1. 解析概要

本研究では、前章で説明したモデルを有限要素解析コードに組み込むことで、不連続面を有する岩盤に対するクリープ解析手法を開発した。本論文にて解析の対象とする不連続性岩盤は、Fig2 に示すように幅 300 mm、高さ 200 mm とした。不連続面については、その密度の影響を考察するために、1 個 (Fig2 中、c のみ、あるいは d のみ)、2 個 (Fig2 中、b と e)、3 個 (Fig2 中、a と c と e、あるいは b と d と f)、および 6 個 (Fig2 中、a ~ f) の 4 ケースを考えた。結果を整理する上で、不連続面が 1 個のケースを case1、2 個のケースを case2、3 個のケースを case3、そして 6 個のケースを case4 とする。供試体の横幅が 300 mm であることを勘案して、それぞれの不連続面の長さを 20 mm と設定した。

また、不連続面の配向 (傾斜) の影響を考慮するために、Fig2 に示すように、供試体の左上側方より右向き载荷する場合 (pattern A) と、これとは逆に、右上側方より左向き载荷する場合 (pattern B) という 2 パターンを考えた。その際、载荷部から不連続面までの距離が大体等しくなるように、上述したような不連続面の配置を考えた。つまり、不連続面が 1 個の場合、pattern A では不連続面として c のみを考え、一方、pattern B では不連続面として d のみを考えている。この考え方は、不連続面が 2 個、3 個の場合も同様であるが、2 個の場合は b と e が対称的な配置となっているので、载荷する方向によって不連続面の組み合わせを変化させるのは、不連続面が 1 個および 3 個のケースとなる。载荷する方向

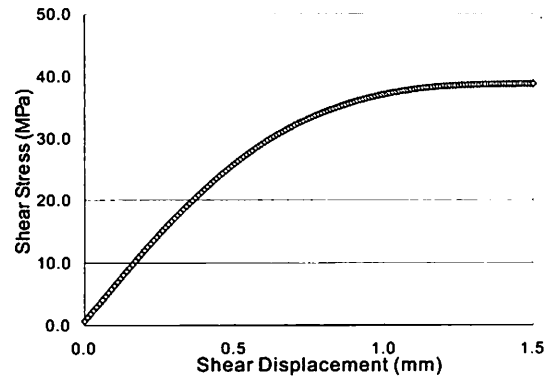


Fig. 3 Shear stress v.s. displacement

に対して、岩盤工学の用語を用いれば、pattern A は「流れ目」、また、pattern B は「さし目」ということになり、これら 2 つのパターンでは挙動が異なることが予想される。なお、不連続面の配向 (傾斜) の角度 (Fig2 中の  $\alpha$ ) も変化させた解析を実施すると、さらに不連続面の幾何学的特性がクリープに及ぼす影響を議論できるが、配向 (傾斜) の影響については文献 <sup>(10)</sup> より類推できることから、本論文では、 $\alpha=15$  度 (固定) とした結果のみを示す。その他の岩盤および不連続面に関する特性は不連続面を有する岩石供試体のせん断試験 <sup>(12)</sup> を参考にして設定した。解析で用いる材料パラメータを Table1 に示す。なお、最も要素数および節点数が多くなる case4 の場合で、その総要素数は 5,580 個、総節点数は 5,689 個 (うち、摩擦すべり要素は計 768 個) である。

クリープ解析を実施するには、その応力 (クリープ応力) を決定しなくてはならない。そこで、クリープ解析に先立って、Fig2 より不連続面を取り除いた供試体について、せん断試験の解析を実施した。せん断試験においては、上載圧を 10 MPa とし、変位一定にて側方より载荷を行った。その際の境界条件は Fig2 と同様である。なお、解析は 2 次元平面応力の条件下で実施した。Fig3 に、せん断応力とせん断変位の関係を示す。载荷およそ 1.5 mm にてピークに達し、その時のピークせん断応力 (下部の供試体の側方部における反力を供試体の幅で除した値) はおよそ 38.9 MPa であった。本解析では、このピーク応力に対する 80% 応力 (31.1 MPa) をクリープ応力と設定した。

#### 3.2. クリープ変形

本節では、クリープ解析を実施した結果について考察を加える。クリープ解析についても、Fig2 に示す供試体を用いた。上載圧を 10 MPa とし、供試体の左上側方あるいは右上側方部分にクリープ応力 (31.1 MPa) を一定载荷し、500 日にわたってクリープ解析を実施した。なお、本解析では、解析における 1 ステップを 0.1 日と仮定している。解析パラメータと境界条件は、全て上述した静的解析と同じものを用いた。

まず、pattern A および pattern B におけるクリープ変位量と時間の関係をそれぞれ Fig4 および Fig5 に示す。なお、本解析では、上載圧が作用する上部境界の全ての節点でせん

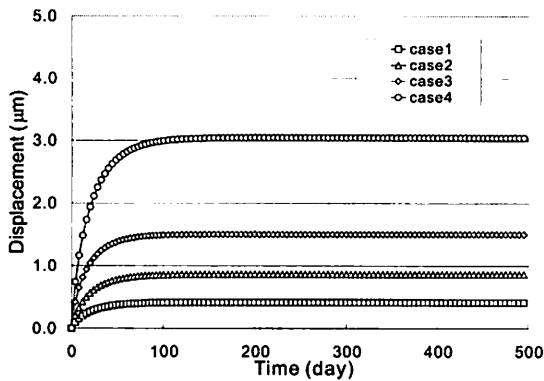


Fig. 4 Creep displacement (patten A)

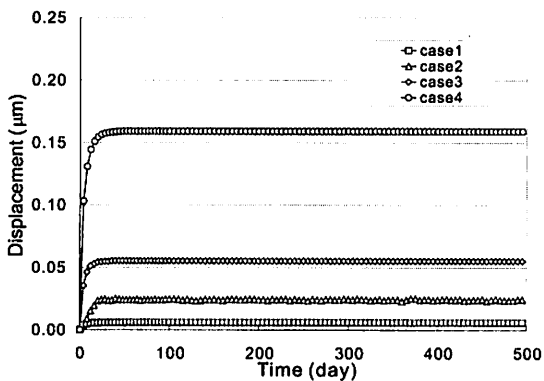


Fig. 5 Creep displacement (patten B)

断変位を抽出し、それらの平均値をクリープ変位としている。

図より、pattern A および pattern B におけるいずれの解析 (case1~case4) とともに、時間が経過するにしたがって変位が増大している。pattern A では100日ほど経過後、pattern B では30日ほど経過すると変位が収束している。本解析では、不連続面の両端において応力が集中し、その結果、式(1)に則って、摩擦係数が低下することで変位(クリープ変位)が生ずるが、摩擦係数が0.3まで低下した後は一定値になるので、変位は収束に向かう。

pattern A および pattern B のいずれのパターンにおいても、不連続面の個数が増えるとクリープ変位が大きくなっていることが分かる。case1, case2, case3, および case4 における不連続面の個数の比は1:2:3:6であるが、クリープ変位量についても、これとほぼ同じ比となっている。つまり、密度に応じてクリープ変位が増大していることが分かる。これは、線形破壊力学あるいはマイクロメカニクスにおける不連続面の密度と変位量に関する考え方と合致している。

pattern A と pattern B ではクリープ変位のスケールが20倍異なるが、このことより、pattern A (不連続面が荷重に対して流れ目)の方が pattern B (不連続面が荷重に対してさし目)よりも変形しやすいことが分かる。これは不連続面上でのせん断応力と垂直応力の関係を考えれば当然のことであるが、従来の岩盤クリープにおいては、こうした不連続面の幾何学的特性による影響は考慮されていない。そもそも不連

続面クリープという概念がなく、不連続面の変形が材料の巨視的なクリープに及ぼす影響も議論されてこなかった。しかしながら、放射性廃棄物の地層処分などを検討するにあたっては、不連続面の変形は透水性能の変化につながるため、不連続面がクリープ変形をするということについても照査しておくべきであると考えられる。

### 3.3. メカニズムの類推

本節では、どのようなメカニズムによって前節のような結果(供試体の巨視的なクリープ変形量)に至ったかについて考察を加える。上述した通り、本解析では、不連続面の両端において応力が集中し、その結果、式(1)に則って、摩擦係数が低下する。不連続面部分には Coulomb 摩擦則に基づく摩擦すべり要素を設定しているため、摩擦係数の低下にともなって摩擦すべりが発生する。不連続面は岩盤に包含されているので、不連続面の変形(摩擦すべり)がいつまでも継続することはなく、やがて収束する。これが本研究におけるクリープの主たるメカニズムになっている。こうしたことを考察するために、本節では、不連続面近傍の相当塑性ひずみ分布と最大圧縮応力分布を用いる。例えば、pattern A の case4 では、Fig2 において薄いグレーで囲った付近、つまり、荷重部に近い3つの不連続面に焦点をあてる。その他のケースについても、荷重部に近い不連続面 (case1 と case2 は1つ、case3 は2つ) に焦点をあてる。

まず、Fig6からFig9には、pattern A の case1 から case4 における不連続面近傍の相当塑性ひずみをプロットする。図より、不連続面の両端において応力が集中した結果、その近傍において岩盤が塑性していることが分かる。ただし、case1, case2, そして case3 と case4 の荷重部より遠くに位置する不連続面(図の右端)については、それほどひずみ分布に差がない。case3 と case4 において荷重部に近い側に位置する不連続面(図の左端)では、ややひずみ分布が大きくなり、その値も大きい。これは荷重部が近いため、荷重の影響を受けているものと思われる。しかしながら、不連続面の両端近傍において塑性に至った領域は、全体からすれば僅かな領域である。

参考として、pattern B の case4 における不連続面近傍の相当塑性ひずみを Fig10 に示す。pattern B におけるいずれのケースも pattern A とほぼ傾向を示したが、pattern B は pattern A よりもひずみのレベルが10倍ほど小さい。相当塑性ひずみについても、不連続面の幾何学的特性によって大きく異なる結果となった。

クリープ変形量および相当塑性ひずみの値より、不連続面の配向(傾斜)が岩盤の巨視的な挙動に影響を及ぼすことが明らかとなったが、さらに、最大圧縮応力分布を用いて、そのメカニズムについて検討を加える。pattern A の case1 と case4, および pattern B の case4 における最大圧縮応力分布をそれぞれ、Fig11, Fig12, および Fig13 に示す。図より、不連続面周辺の応力分布は類似しており、個数が増えれば、そうした分布が個数分並んでいる結果となっていることが分かる。また、pattern A と pattern B では、方向こそ異なる

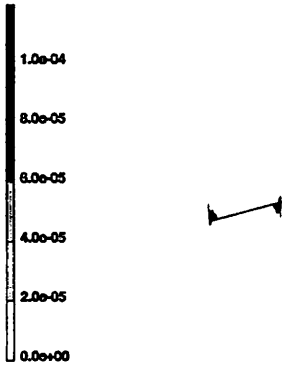


Fig. 6 Equivalent plastic strain (pattern A, case1)

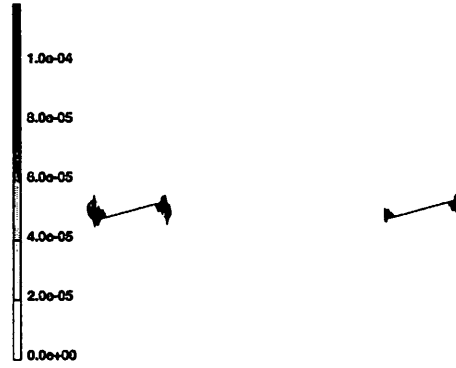


Fig. 8 Equivalent plastic strain (pattern A, case3)

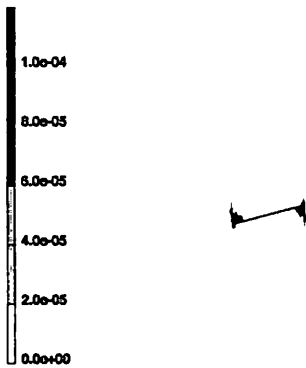


Fig. 7 Equivalent plastic strain (pattern A, case2)

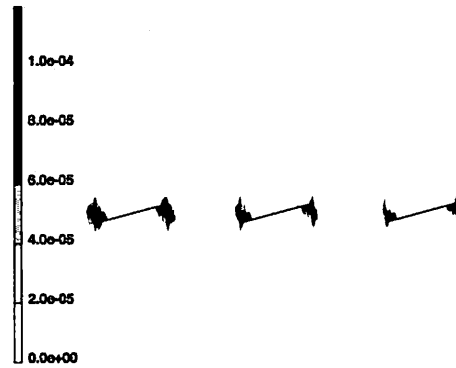


Fig. 9 Equivalent plastic strain (pattern A, case4)

が、巨視的にみれば分布そのものはほぼ同じである。問題は、pattern A では不連続面がせん断されるが、pattern B では開口するような変形モードになる。せん断されるモードでは面が削れて摩擦係数が低下するが、開口するモードでは面が削れないので摩擦係数は低下しない。こうした起因して、応力分布にそれほど差がなくても不連続面の配向（傾斜）の違いによって岩盤の巨視的な挙動が異なる。

#### 4. 結言

本研究では、不連続性岩盤におけるクリープ挙動を考えるにあたって、これまであまり考慮されることがなかった不連続面自体の時間依存的な変形に着目し、提案するクリープモデルを用いて解析を行なった。解析では、主として不連続面の幾何学的特性に焦点を当て、それが岩盤の巨視的クリープ挙動に及ぼす影響とメカニズムについて考察を加えた。岩盤中の不連続面の変形は透水性能の変化をもたらす可能性があるため、放射性廃棄物の処分などにおいては不連続面の変形について十分な検討が必要となる。したがって、今後、不連続面の幾何学的特性を考慮した検討が望まれる。なお、本研究で用いたクリープモデルは、実験などを通してその妥当性を検討していないことから、不連続面の幾何学的特性の検討も

含め、今後、実証試験を実施し、同時に、実験室レベルの挙動（不連続面が境界に近い場合の挙動）と実岩盤の挙動（不連続面が岩盤に包含されている場合の挙動）の違いなどについても考察を加えたいと考えている。また、岩盤基質部のクリープ変形が顕著になるようであれば、こうした現象をモデル化し、本解析モデルに組み込んで行きたいと考えている。

#### 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、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、燃料リサイクル開発機構および電気事業連合会、2000。
- (3) 日本材料学会 編：固体力学の基礎、日刊工業新聞社、pp.149-187, 1981。
- (4) Robert L.Krantz: Crack Growth and Development During Creep of Barre Granite, *J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.16, pp.23-35, 1979。

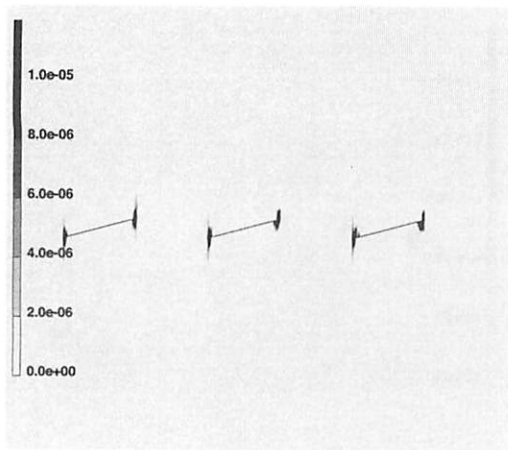


Fig. 10 Equivalent plastic strain (pattern B, case4)

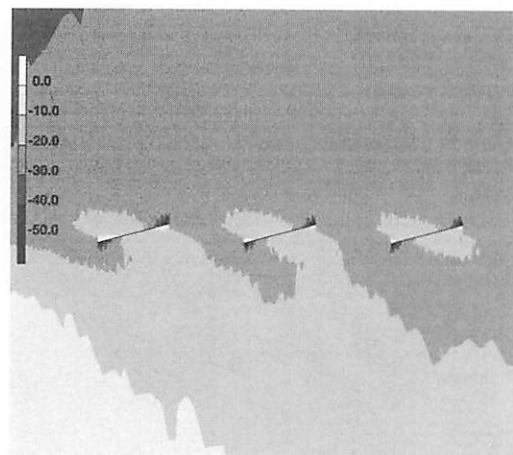


Fig. 12 Max. compressive stress (pattern A, case4)

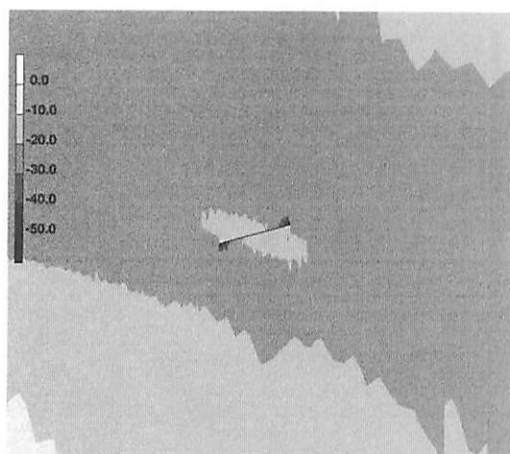


Fig. 11 Max. compressive stress (pattern A, case1)

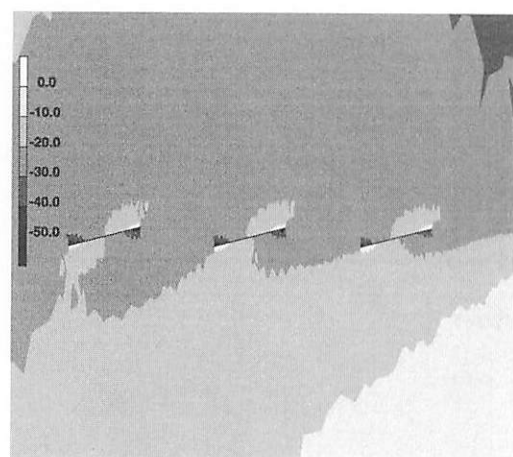


Fig. 13 Max. compressive stress (pattern B, case4)

- (5) Barry Kean Atkinson: Subcritical Crack Growth in Geological Materials, *Journal of Geophysical Research*, Vol.89, No.B6, pp.4077-4114, 1984.
- (6) Robert L.Krantz: The Effects of Confining Pressure and Stress Difference on Static Fatigue of Granite, *Journal of Geophysical Research*, Vol.85, No.B4, pp.1854-1866, 1980.
- (7) 鈴木健一郎, 桑原徹, 平間邦興: クラックテンソルを用いた不連続性岩盤の時間依存変形特性 – (その1) 不連続面のクリープ試験 –, 岩の力学 '90, 岩の力学連合会, pp.286-287, 1990.
- (8) Amadei, B.: Creep behaviour of Rock Joints, M. A. Sc. thesis, University of Tronto, 1979.
- (9) Yoshida, H. and Horii, H.: A Micromechanics-based Model for Creep Behavior of Rock, *Applied Mechanics Review*, No.8, pp.294-303, 1992.
- (10) 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.
- (11) 吉田秀典, 高森大資, 和田光真: 非均質性が岩盤構造物の挙動に及ぼす影響と設計に関する研究, 応用力学論文集, Vol.6, pp.387-396, 2003.
- (12) 多田浩幸, 若林成樹: ロックボルトによる岩盤不連続面のせん断補強効果に関する実験的検討, 第36回地盤工学研究発表会, pp.1221-1222, 2001.
- (13) 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.
- (14) 大西有三, 矢野隆夫, 岩本宏, 西川直人: 岩石一面せん断試験装置およびラフネス計測装置の開発・研究とその変遷, 土木学会論文集, No.645/III-50, pp.307-320, 2000.
- (15) 大西有三, 大津宏康, 矢野隆夫, 橋村義人: 割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.