

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

Proposal of creep model for discontinuous rock mass
with focusing on deformation of discontinuity

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§
Hidenori YOSHIDA, Takuya YAMASAKI, Junya INOUE, Kensei KANAYA, Takao KAMACHI,
Yoshiaki HIRAKAWA and Satoshi MORI

*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)

**学生会員 香川大学 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) 東京大学助教授 大学院工学系研究科マテリアル工学専攻 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

****正会員 修士 (工学) 関西電力株式会社 土木建築室 (〒 530-8270 大阪市北区中之島 3-6-16)

†非会員 修士 (工学) 関西電力株式会社 土木建築室 (〒 530-8270 大阪市北区中之島 3-6-16)

‡正会員 博士 (工学) (株) ニュージェック 地圏グループ (〒 135-0007 東京都江東区新大橋 1-12-13)

§正会員 修士 (工学) (株) ニュージェック 地圏グループ (〒 531-0074 大阪市北区本庄東 2-3-20)

In Japan, it is planned to dispose high-level radioactive waste and TRU waste in stable geological formations. Taking the long-term behaviors of the formations into account, a mathematical model is of prime importance. In this study, the creep model for discontinuous rock mass is proposed with focusing attention on the behavior of discontinuity. The creep phenomena are supposed to be caused by the sliding wear of discontinuity. The proposed model is implemented into a finite element analysis code, and two types of analyses are carried out. One is the analysis for the specimen through which the discontinuity cuts, and the other is the analysis for the specimen in which the discontinuity is included. From the comparison of both results, it turned out that they are quite different. Moreover, the effects of the geometrical and mechanical properties of discontinuity on the creep behavior of rock mass are discussed.

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

キーワード：不連続性岩盤，クリープ，不連続面，摩擦係数，幾何学的特性

1. はじめに

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における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¹⁾²⁾。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。

放射性廃棄物の処分事業では，核種が地下水により生物圏に運搬される時間と量によって，その安全性が評価されるため，地盤内を流れる地下水の経路長と流速を評価する必要がある。処分場の深度が，余裕深度処分では50～100m，地層処分では300m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。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，対象となる岩盤が不連続性岩盤となる可能性も否定できない。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。特に，不連続面の変形は透水係数の増大に繋がることから注意が必要である。

ここで，岩盤のクリープ現象のモデル化に焦点をあたると，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。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できないことは言うまでも無い。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³⁾。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例は少ない。検討が行われていても，極めて小さな供試体／不連続面を対象としている⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾，あるいはメカニズムに

立脚したモデル⁹⁾にはなっておらず、実岩盤のクリープを考えるにあたって、これらが必ずしも十分な知見を与えているとは言えない。そこで本研究では、岩盤に内在する不連続面の時間依存的挙動を考察するため、比較的大きな不連続面に対してメカニズムに立脚したクリープモデルを構築することを目的とした。

2. 解析モデル

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。不連続面の接触挙動を解析する方法としては、有限要素解析などで用いられる接触モデルと、剛体ばねモデルのような離散モデルを用いる方法に大別される。前者については、モデル化や計算が繁雑になることから、設計において用いられることは稀である。一方、後者について考えると、その手法の1つである剛体ばねモデルは、2つの物体間にバネを挿入し、それを介する力を表面力として扱うことから不連続面の摩擦すべりなどを上手く再現できるが、弾性変形の精度は有限要素法と比較して劣るという欠点がある。そこで近年では、剛体ばねモデルに弾性変形の自由度を持たせたハイブリット型ペナルティ法 (HPM)¹⁰⁾ のような混合型モデルも提案されている。HPMにおいては、弾性変形の精度をある程度確保しつつ不連続面の摩擦すべりなどの解析ができるが、本研究のような構造解析問題では、不連続面以外は連続体としてモデル化したいため、その場合、前者の有限要素解析などで用いられる接触モデルを採用する方が都合が良い。そこで本研究では、不連続面に相当する箇所、その摩擦すべりを表現できる要素を導入し、それ以外の岩盤基質部には、Drucker-Prager 型の弾塑性モデルを適用することとした。

まず、不連続面に相当する箇所については、導入の簡易性を考慮して、クーロン摩擦則を採用した。なお、採用するクーロン摩擦則のみで不連続面の滑動現象の全てを再現することは困難であるが、後述するような問題設定の範疇に限っては、クーロン摩擦則でもおおよその検討が可能であると考え、本研究ではこれを採用している。

また、一旦物体はすべりを生じると、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3角形あるいは4角形要素、3次元では4面体あるいは6面体要素）で定義する。計算ステップごとに各接触可能な節点が接触相手の

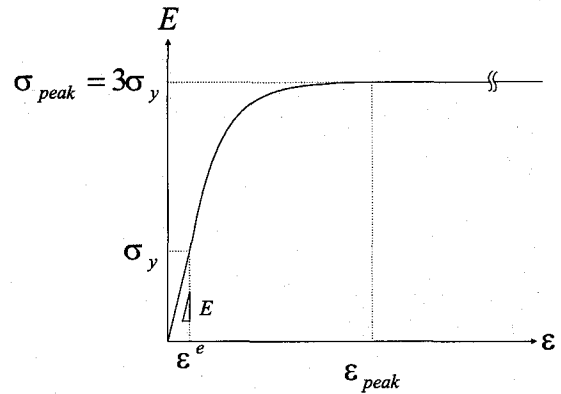


図-1 岩盤基質部の構成モデル

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、もっと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。この際、接触中に節点間で作用していた反力は内部要素との釣り合いを失い、残差力として作用させ、物体内部では応力再配分が起こる¹¹⁾。

次に、連続体、つまり岩盤基質部についてであるが、本研究ではクリープ現象の検討が主目的であることから、岩盤基質部がピークに達し、さらに軟化現象に移行するようなことは考え難い。したがって、岩盤基質部を弾性体と仮定することでも対処が可能であると思われるが、不連続面の形状によっては岩盤基質部に応力が集中する場合もあるため、ピーク前における弾塑性挙動は考慮に入れ、次式に示すような Drucker-Prager 型の弾塑性モデルを適用することとした。

$$\alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k_c = 0 \quad (1)$$

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

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

$$k_c = \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} = \frac{6c \cos \phi}{\sqrt{3}(3 + \sin \phi)} \quad (3)$$

ここで、 c は粘着力、 ϕ は内部摩擦角、 $\bar{\sigma}$ は相当応力

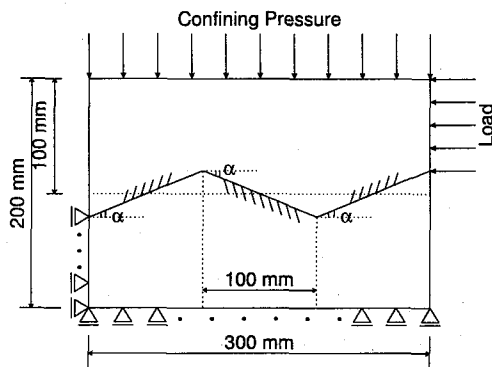


図-2 供試体を貫く不連続面

を表す。

応力-ひずみ関係（構成モデル）については、文献¹²⁾を参考に、図-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（ σ_{peak} ）の1/3の応力を初期降伏応力（ σ_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、本研究で実施する数値解析は不連続面に対する一面せん断クリープ試験であり、この場合、大きな引張応力が生じることは考え難いことから、圧縮側も引張側も同じ挙動を呈するものと仮定した。

著者らの一部は、こうした解析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¹³⁾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¹⁴⁾。文献¹⁴⁾には、クーロンモデルの概要、解析パラメータの決定方法などについて言及しているので参照されたい。

3. 供試体を貫く不連続面の解析

本章では、前章で示した解析モデルを用いて、まずは不連続面が供試体を貫くようなケースに関する不連続面クリープについて解析的な検討を加える。

一般的に岩盤内に包含されている不連続面は完全なる直線ではなく、多かれ少なかれ雁行しているため、図-2に示すように不連続面がフラットではなく、起伏を有する形状を考えた。こうした起伏の傾き＝起伏角度（図-2の α ）については、0、5、10、15°という4つのケースを考えた。なお、当然ではあるが0°と設定した場合はフラットな不連続面を意味する。起伏の形状については、供試体の幅300 mmに波長200 mmの三角波が1.5波長分存在するものとした。したがって、0、5、10、15°の起伏を有する三角波の振幅はそれぞれ、0.0 mm、4.4 mm、8.8 mm、13.4 mmとなる。

表-1 解析で用いた材料特性¹³⁾

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 (°)	0, 5, 10, 15

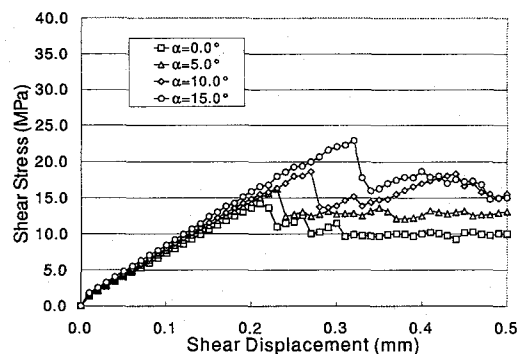


図-3 静的試験におけるせん断変位-せん断応力関係（貫通型）

この不連続面を挟んで上部および下部に摩擦すべり要素を配置する。

供試体サイズは、図-2に示すように幅300 mm、高さ200 mmとし、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¹³⁾を参考にして、表-1のように設定した。なお、総要素数1,116個、総節点数1,202個（うち、摩擦すべり要素は計384個）で、解析は2次元平面応力の条件下で実施した。

3.1 ピーク応力の決定

クリープ解析に先立ち、ピーク応力を決定するために静的解析を行った。図-2に示すように、上載圧10 MPaの下、不連続面を挟んで上部の供試体の右側方より変位による载荷（せん断試験）を行った。解析より得られたせん断変位（载荷変位）とせん断応力（下部の供試体の左側方部における反力を面積で除した値）の関係を図-3に示す。载荷変位0.2 mm程度までは不連続面において局所的なすべりは認められるものの、不連続面全体が変形（滑動と開口）するような状態にはなっていないことから、各ケースにそれほど大きな違いは認められない。しかしながら、载荷変位0.2 mm以降では、起伏角度が小さいものから順にピークに達し、軟化現象を呈している。ピーク前では変形が局所的であった不連続面も、ピーク付近ではほぼ全体が変形

するモードに移行する。不連続面がほぼ全体にわたって変形すると、材料の巨視的挙動は軟化現象を呈するに至る。

また、図より、不連続面の起伏角度が大きいほど、載荷変位に対するせん断応力が大きいことが分かる。これは、見かけ上、起伏面を乗り越えるためにより大きな力が必要であることを示しているが、これは不連続面に対するせん断方向の応力（すべりを引き起こそうという力）と法線方向の応力（すべりを拘束しようという力）の大小関係の議論であって、起伏角度の増加とともに、載荷変位量に対する不連続面上のせん断方向応力が小さくなっているだけに過ぎない。本研究において不連続面の起伏を考慮している理由は、巨視的な現象である供試体のせん断変位－せん断応力関係は不連続面の材料特性だけで決定されるのではなく、上述した通り、不連続面の幾何学的形状（ここでは起伏角度）にも強く依存するからである。したがって、以降に示すクリープ解析においても起伏角度に着目した検討を実施することとする。クリープ解析では、図-3より得られる各ケースのピーク応力の80%をクリープ応力として解析を行う。

3.2 クリープ解析

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¹⁵⁾¹⁶⁾。特に、大西ら¹⁷⁾は、不連続面のラフネス（本研究で言う起伏）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し、図-2に示す上下の不連続面が接触面において減耗し、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。参考文献¹⁸⁾によれば、岩石などの摩擦係数は垂直応力の増大によって減少する。また、クリープ速度 $\frac{d\varepsilon}{dt}$ と作用応力 σ の関係が $\frac{d\varepsilon}{dt} = A \exp(B\sigma)$ (A, B は定数)³⁾ で表されるようなモデルもあることから、摩擦係数 μ

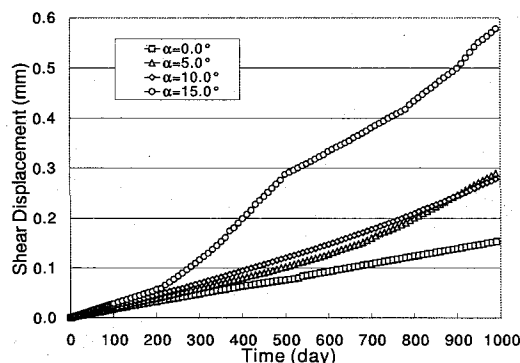


図-4 経過時間とせん断変位関係（貫通型）

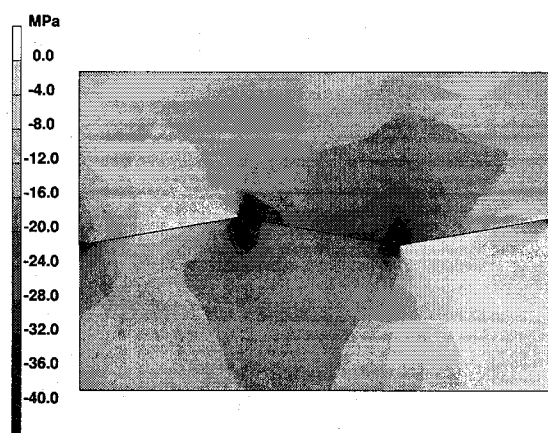


図-5 最大圧縮応力分布（貫通型）

を次式のように仮定した。

$$\mu = \begin{cases} 1.0, & (\sigma_n^J < \sigma_y^J) \\ 0.7 \times \exp \left\{ -(\sigma_n^J - \sigma_y^J) / 20 \right\} + 0.3, & (\sigma_n^J \geq \sigma_y^J) \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 σ_n^J および σ_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。このモデルでは、不連続面上の法線方向応力が降伏応力を超えると面が徐々に破壊し、その結果、面上の摩擦係数が低下する。摩擦係数が低下すると摩擦すべりが生じ、不連続面は徐々に変形する。このような変形は、巨視的には、クリープ挙動として表現される。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 σ_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 σ_y^J にはやや差があり、 σ_y^J の方が小さいものと考えている。以降の解析では、 σ_y^J を20 MPaと仮定して用いた。式(4)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 σ_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 σ_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¹⁵⁾¹⁶⁾¹⁷⁾を参考にして定めた。

一定応力（前節で示した各ケースにおけるピーク応力の 80%）を载荷し、1000 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。解析パラメータなどは、全て前節と同じものを用いている。図-4 に経過時間とせん断変位の関係を示す。なお、本解析では応力一定の下で解析を行なうため、上載圧が作用する上部境界の全ての節点で変位を抽出し、それらの平均値をせん断変位としている。このような整理方法は、以下に示す解析結果についても同様である。

図-4 より、いずれのケースも時間とともに変位が増大していることが分かる。本解析では、左側面部中央において応力が集中することから、この付近における不連続面において、 σ_n^J が σ_y^J を上回り、式(4)の則って不連続面の摩擦係数が低下している。その結果、当該箇所でも局所的な摩擦すべりを呈し、応力の再配分が起こる。応力再配分の結果、別の箇所で同様のことが起こり、こうした現象が繰り返されることで変位が増大する。

起伏が存在する場合、主として図-2 に記した中央に位置する不連続面がせん断すべりを生じ、両脇の不連続面は一部が開口する（後掲する図-18 を参照）。その結果、中央に位置する不連続面に応力が集中し、摩擦係数の低下が起こる。また、起伏が存在する場合は、不連続面の変曲部でも同様の現象が起こるため、同じ経過時刻で比較すれば、起伏角度 0° のケースに比べて変位が大きくなる。一例として、起伏角度 10° のケースにおける最大圧縮応力分布を図-5 に示す。なお、図は最終段階における分布で、圧縮を負としてプロットしている。特に、起伏角度が 15° の場合は変曲部における応力の集中が顕著となり、早い段階から変位が増大するが、不連続面が変形するにしたがって、開口面の一部が上載圧によって再閉塞するため（これについても後掲する図-18 を参照）、クリープ変形の増加割合が低下する箇所が存在する。

全ての解析に共通することは、不連続面が供試体を貫いている場合、変位が収束しないということである。これは実際の岩盤で観測されるクリープ現象とは乖離があることから、次章では、不連続面が供試体に包含される場合について考える。

4. 供試体に包含される不連続面の解析

前章では、不連続面が供試体を貫くケースにおける不連続面のクリープ現象について検討を加えたが、実際の岩盤においては、トンネルなど地下空間の壁面に露出した一部の不連続面を除けば、それらのほとんどが岩盤に完全に包含されており、トンネルなどに露出

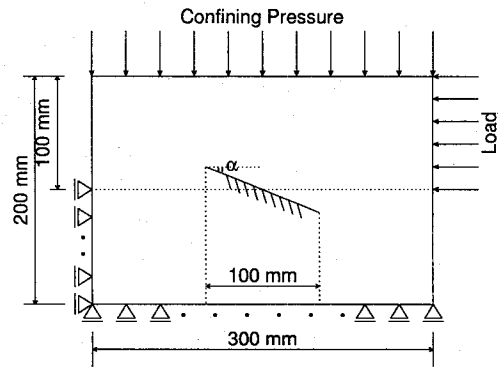


図-6 供試体に包含される不連続面 (Case 1)

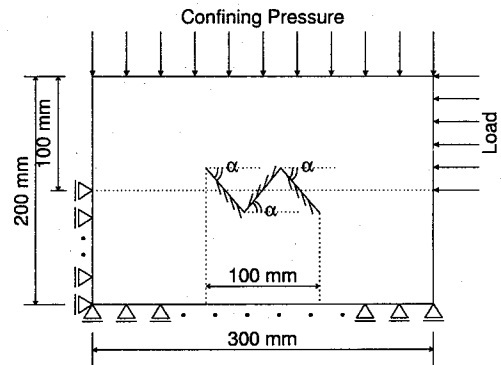


図-7 供試体に包含される不連続面 (Case 2)

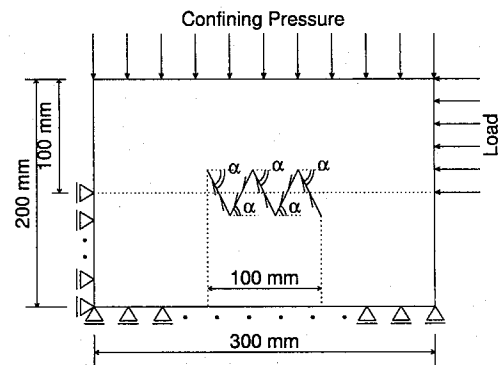


図-8 供試体に包含される不連続面 (Case 3)

した不連続面も、その全体が露出しているものは極めて少ない。室内試験と実岩盤においては不連続面の幾何学的条件が異なっていることから、本章では、図-6 のように、不連続面が岩盤に包含されたケースについて考える。

本章でも、前章と同様、不連続面がフラットではなく、起伏を有する形状を想定し、起伏角度 α についても、 $0, 5, 10, 15^\circ$ という 4 つのケースを考えた。起伏の形状については、本章では、Case 1: 波長 200 mm の三角波が 0.5 波数存在するもの（図-6）、Case 2: 波長 67 mm の三角波が 1.5 波数分存在するもの（後

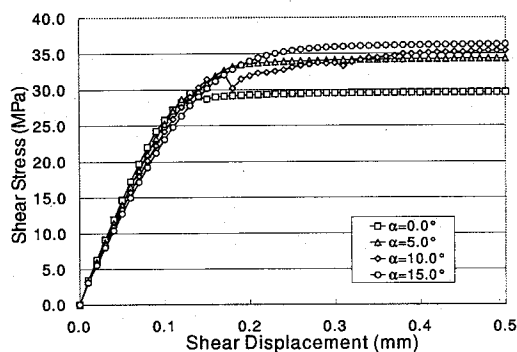


図-9 セン断変位-せん断応力関係 (静的解析, Case 1)

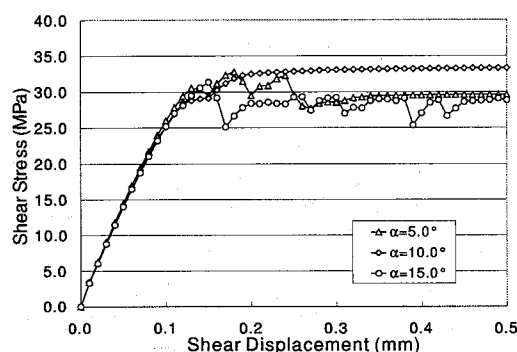


図-10 セン断変位-せん断応力関係 (静的解析, Case 2)

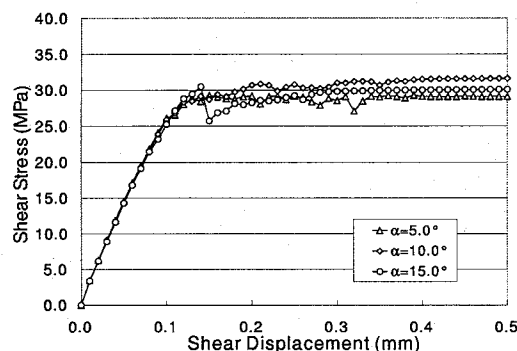


図-11 セン断変位-せん断応力関係 (静的解析, Case 3)

掲する図-7), Case 3: 波長 40 mm の三角波が 2.5 波数分存在するもの (後掲する図-8), という 3 ケースを考えることとした。なお, いずれのケースにおいても, 不連続面は幅 300 mm の供試体の中央に配置することとした。

供試体サイズおよび岩盤および不連続面に関する特性は, 全て前章と同様とし, 解析も 2 次元平面応力の条件下で実施した。Case 1 の場合は, 前章における解析にて両端に位置する不連続面を除いただけなので総要素数および総節点数は前章と同じであるが, Case 2 では, 総要素数 1,860 個, 総節点数 2,078 個 (うち, 摩擦すべり要素は計 384 個), Case 3 では, 総要素数 2,604 個, 総節点数 2,954 個 (うち, 摩擦すべり要素は計 640

個) である。

4.1 ピーク応力の決定

ここでも, 前章と同様, クリープ解析に先立ち, ピーク応力を決定するために静的解析を行った。図-6, 図-7 および図-8 に示すように, 上載圧 10 MPa の下, 不連続面を挟んで上部の供試体の右側方より変位による載荷 (せん断試験) を行った。全てのケースに対して, 解析より得られたせん断変位とせん断応力の関係を図-9~図-11 に示す。いずれのケースについても, 局所的なすべりを生じるまで (本解析では 14mm 程度まで) は弾性的な挙動を呈し, ひずみ硬化的な挙動に移行する。さらにその後, 図-10 については明瞭でないが, それ以外では起伏角度の小さいものから順にピークを迎える。ただし, 起伏角度の違いによるピーク応力の差はそれほど大きくない。

ピークまでの不連続面の変形 (Case 1 では, ほとんどが滑動で開口は見られない) は, 不連続面が供試体を貫いたケースに比べると小さい。ピーク後も, 不連続面が包含されたケースでは, 不連続面の変形は小さく, 供試体の巨視的な変形は岩盤基質部の弾塑性的な挙動による変形成分がほとんどである。つまり, 不連続面が包含されていることで不連続面を拘束する力が大きく不連続面は変形しないが, 不連続面の端部近傍の岩盤基質部では応力が集中している。ピーク後は, ほぼ一定の応力を保ちながら変形のみが進む。本研究では不連続面のクリープ挙動を考えていることから, 図-9 より得られるピーク応力を用いてクリープ応力を評価することには疑問も残るが, 他にクリープ応力を決定する客観的な指標がないため, 本解析では, 図-9~図-11 より得られるピーク応力の 80% をクリープ応力として解析を行う。

4.2 クリープ解析

(1) 起伏角度の影響

ここでも, 不連続面が供試体を貫くケースと同様, ピーク応力の 80% をクリープ応力として載荷し, 1000 日にわたってクリープ解析を実施した。クリープ応力以外の条件や解析パラメータなどについては, 不連続面が供試体を貫くケースと同じものを用いている。図-12 に経過時間とせん断変位の関係を示す。ここでも, 載荷点における変位の平均値をせん断変位としている。時間の経過とともにせん断変位は増加するが, いずれのケースについても, 最終的には変位は収束する方向にある。この点は, 不連続面が供試体を貫くケースとは全く異なる。また, 不連続面が供試体を貫くケースを比較すると, 変位量は 10 分の 1 以下で, 極めて小さな値となっている。これは, 不連続面の近傍における応力状態と強い相関がある。

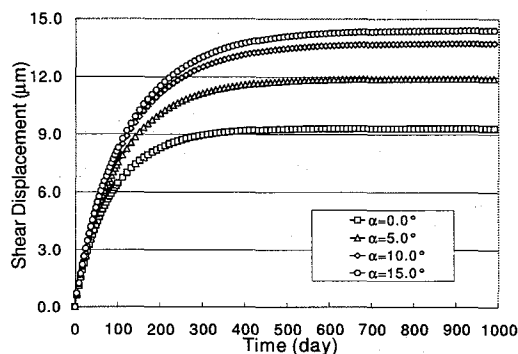


図-12 経過時間とせん断変位量関係 (Case 1)

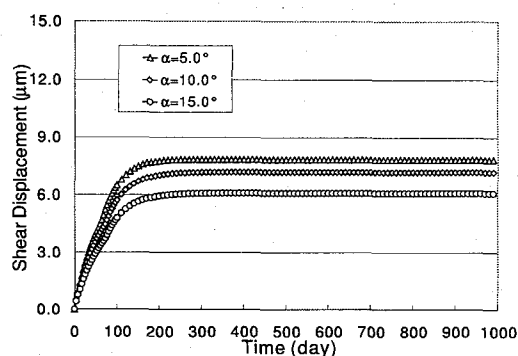


図-14 経過時間とせん断変位の関係 (Case 2)

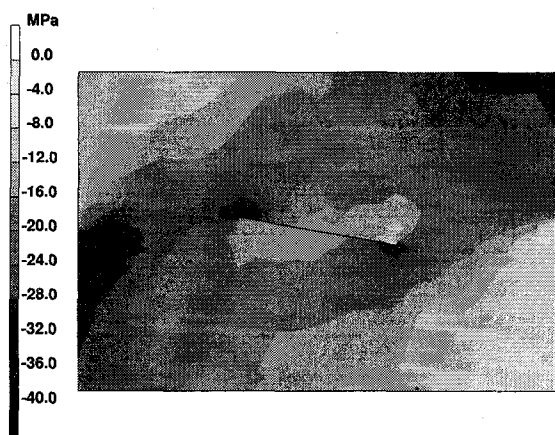


図-13 最大圧縮応力分布 (Case 1)

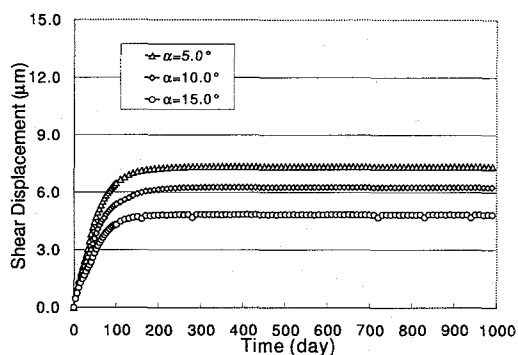


図-15 経過時間とせん断変位の関係 (Case 3)

図-13 には、一例として、起伏角度 10° のケースにおける最大圧縮応力分布（最終段階）を示すが、不連続面が包含されたケースでは、不連続面の両端と供試体の左側面中央部において応力の集中が認められる。特に、供試体の左側面中央部において応力集中が顕著になるが、これは、左側面の上部側には変位固定の条件が無いのに対し、下部側には x 方向の変位を拘束していることに起因している。また、図-5 と図-13 を比較すると、不連続面が供試体を貫くケースでは、中央に位置する不連続面近傍で応力のレベルが高く、ほとんどの箇所摩擦係数が低下を開始する 20 MPa を超えているのに対し、不連続面が包含されたケースではそうした傾向が認められず、ほとんどの箇所摩擦係数が低下を開始する 20 MPa を下回っている。つまり、不連続面が包含されたケースでは、不連続面の両端のみで摩擦係数の低下が認められるが、それ以外の箇所では摩擦係数がほとんど変化していない。こうした点が不連続面が供試体を貫くケースと大きく異なっており、こうしたことに起因して、不連続面が供試体を貫くケースでみられるような大きなせん断変位は生じず、また、変位が収束する傾向になっている。

本解析では水平方向に載荷しているの、不連続面の起伏角度が大きいほど、不連続面の法線方向成分の

応力が大きくなる。そのため、不連続面の起伏角度が大きくなるにしたがって、摩擦係数が低下を開始する 20 MPa を超える領域が増える。しかしながら、拘束力が大きいと摩擦すべりが生じ難くなるので、これだけで「起伏角度が大きいほど変位量が大きくなる。」ということは説明できない。実は、クリープ解析においても、岩盤基質部の弾塑性的な挙動が供試体の巨視的挙動に影響を及ぼしている。前述の通り、不連続面が包含されたケースでは、不連続面の両端と供試体の左側面中央部において応力の集中が認められる。上述した通り、不連続面の起伏角度が大きいほど、集中した応力のレベルは大きくなるが、過度の応力集中は岩盤基質部の塑性化を招く。図-13 においても、不連続面の両端近傍や供試体の左側面中央部で 40 MPa を超えていることが認められる。つまり、不連続面が包含されたケースでは、不連続面の変形が生じるのではなく、応力集中に伴う岩盤の塑性化によってクリープ現象がもたらされているものと考えられる。この点は、不連続面が供試体を貫くケースと大きく異なる点である。

(2) 起伏の波数の影響

次に、起伏の波数が不連続面クリープにどのような影響を与えるかを考察する目的で、Case 2 (図-7) および Case 3 (図-8) の解析を追加実施した。 100 mm の範囲に波数が最も少ないのが Case 1 (0.5 個) で、最も多いのが Case 3 (2.5 個) である。

Case 2 および Case 3 についても、Case 1 と同様、まず、静的解析（せん断試験）を実施してピーク応力を把握した後、クリープ応力（ピーク応力の 80 %）を決定した。クリープ応力以外の条件や解析パラメータなどについては、全て Case 1 と同じものを用いている。Case 2 および Case 3 に関する経過時間とせん断変位の関係をそれぞれ、図-14 および図-15 に示す。

図より、同じ波数の条件では、起伏角度が大きくなるにつれ変位が小さくなる傾向があり、波数が 2.5 個の場合に顕著となる。この点は、起伏角度が大きいほど変位量が大きくなるという結果を得た Case 1 と全く異なる。一般に、幅 100 mm の範囲に同じ波数という条件の下、起伏角度のみを変化させると、起伏角度が大きいほど振幅（起伏の山の高さ）が大きくなるので、せん断されにくくなる。Case 2 と Case 3 はこれに該当する。一方、Case 1 は、いわば線状の不連続面が 1 本だけあるケースであり、不連続面が起伏を有しているわけではない。したがって、起伏角度の違いによって起伏の振幅が変化するのではなく、前述の通り、不連続面上の応力分布が異なっているに他ならない。これによって、Case 1 の傾向と、Case 2 および Case 3 の傾向には差異がある。

同じ起伏角度の条件の下での波数の違いによる比較は、ここでは一概にはできない。例えば、起伏角度が 15° の場合、波数が 1.5 個（Case 2、波長は 67 mm）で振幅は $9.0 \mu\text{m}$ 、波数が 2.5 個（Case 3、波長は 40 mm）で振幅は $5.4 \mu\text{m}$ となる。また、波数が異なるとクリープ応力も異なるので横並びにはできない。静的試験に準じて、波数が多い方がクリープによる変位量も若干小さいことが予想されるが、静的試験においても差が小さいことを考慮すると、波数が 1.5 個、2.5 個というように変化が小さい場合は、それほど差はないと考える。しかしながら、波数が 10 倍、100 倍と変化した場合についても同様の傾向があるとはいえず、今後の検討を必要とする。

さらに、Case 2 および Case 3 における経過時間と不連続面の開口変位の関係をそれぞれ、図-16 および図-17 に示す。なお、不連続面の開口変位は、不連続面においてもっとも開口量の大きかった点の値をプロットしており、平均化操作などはしていない。図より、同じ波数の下では、幾何学的観点から当然のことではあるが、起伏角度が大きいほど不連続面の開口変位が大きい。前述した通り、同じ起伏角度の条件の下での波数の違いによる比較はできないが、最大値を比較する限り、波数が 1.5 個、2.5 個というように変化が小さい場合、両者の差はそれほど大きくない。なお、波数が 0.5 個（Case 1、波長は 200 mm）の場合は、不連続面がせん断する面しかないため、開口現象はほとんど確認されない。

Case 3 の起伏角度 5° および 10° については、あ

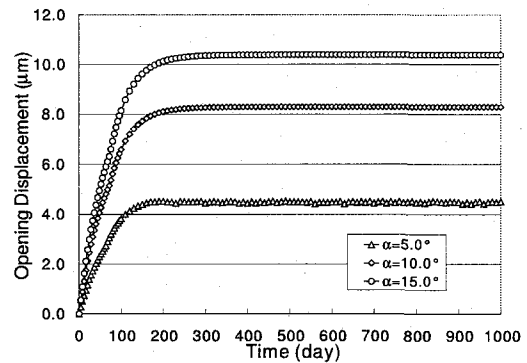


図-16 経過時間と開口変位の関係 (Case 2)

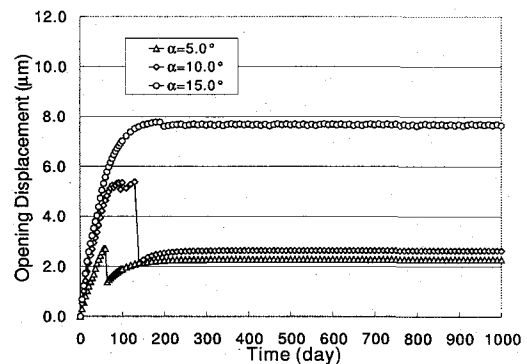


図-17 経過時間と開口変位の関係 (Case 3)

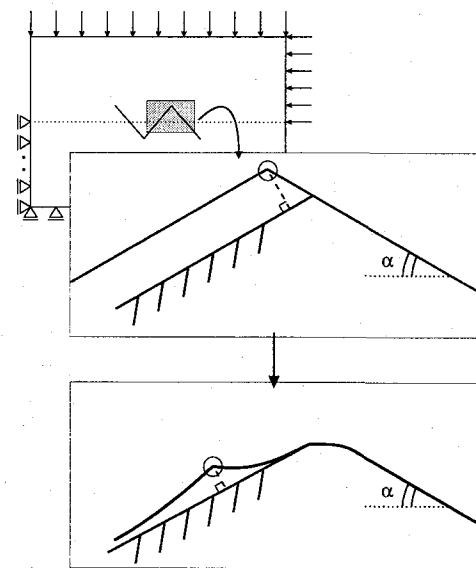


図-18 開口現象の概念図

る段階で開口変位が急速に小さくなっている。これは、供試体上部が下部に対して乗り上げる形になった際に、上載圧によって不連続面が閉塞するような現象を呈するからである。一例として、起伏角度が 10° の場合における開口現象の概念図を図-18 に示す。起伏角度が大きくなると、上載圧の影響がやや小さくなるので、こ

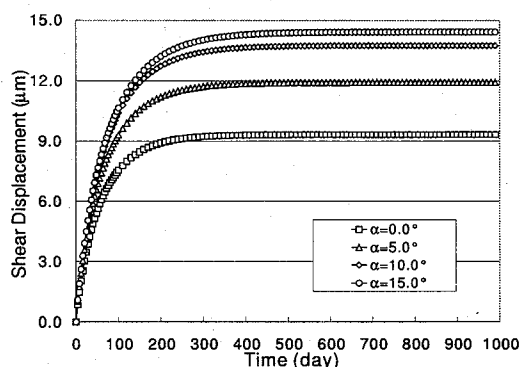


図-19 経過時間とせん断変位の関係 (Case 1, $\sigma_y^J=5\text{MPa}$)

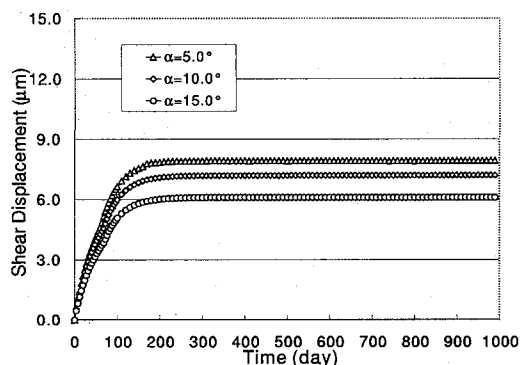


図-20 経過時間とせん断変位の関係 (Case 2, $\sigma_y^J=5\text{MPa}$)

うした現象が生じていない。また、波数が 1.5 個 (Case 2) の場合は、少々乗り上げる形になっても、不連続面の大部分が密着しており、上載圧の影響による再開塞は生じていない。

不連続面の開口変位について着目すると、供試体の巨視的な変位よりも大きな値を示している。放射性廃棄物の処分問題などでは、岩盤の変形以上に透水性能の変化が問題となるが、本研究で検討したような不連続面の開口現象が生ずる場合、透水性能が大幅に変化する可能性があるので注意が必要と言えよう。

(3) σ_y^J の影響

式 (4) によれば、摩擦係数の低減のタイミングを支配しているのは、不連続面に露出した部分の岩盤の初期降伏応力 σ_y^J であり、この材料値の設定いかんでは、巨視的な供試体のクリープ変形速度が異なって現れることが予想される。そこで本小節では、 σ_y^J が巨視的な供試体に及ぼす影響について考察する。

前節までは、 σ_y^J を 20 MPa と仮定して用いていたが、本小節では、5 MPa のケースを追加し、解析を実施した。紙面の関係上、Case 1 と Case 2 における経過時間とせん断変位の関係をそれぞれ、図-19 および図-20 に示す。

図-12 と図-19 を比べると、 $\sigma_y^J = 5\text{MPa}$ の場合、 $\sigma_y^J = 20\text{MPa}$ に対して、初期の段階におけるせん断変

位の増加が顕著となっている。つまり、 σ_y^J を低下させることで早い段階より摩擦係数が低下してすべりが生ずるタイミングが早くなる。一方、図-14 と図-20 を比べると、ほとんど差異が認められない。これより、起伏の波数が多くなると、 σ_y^J の値を変化させても、巨視的なレベルでのクリープ変位量に大きな違いが生じないことが分かる。これは、Case 1 が 0.5 波長しかなく、せん断すべりを生ずる不連続面だけを包含しているのに対し、Case 2 では、こうした不連続面の両サイドに開口を生じる不連続面が存在している。一般に、不連続面の凹凸が存在するという点で、不連続性岩盤のクリープ挙動については、材料固有の摩擦係数だけでなく、幾何学的特性である不連続目の凹凸自体がせん断すべりに対して影響を与える¹⁴⁾。Case 1 の場合は σ_y^J の影響が顕著であるのに対し、Case 2 の場合は、せん断すべりに影響を与える両要因のうち不連続面の凹凸の影響が支配的となり、 σ_y^J の変化による影響が小さくなっている。

5. まとめ

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の時間依存的な変形に焦点を当て、不連続性岩盤に対するクリープモデルの提案を行った。モデル化を行う際、大西ら¹⁷⁾の研究事例を参考にして、不連続面同士が接触する面においては、接触力によって不連続面が減耗 (摩擦係数が減少) するという点でクリープ現象を再現することとした。提案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のクリープ解析を可能とした。

まず、提案手法を用いて、不連続面が供試体を貫くケースについて、クリープ解析を実施した。上記のようなモデルを組み込むことで、徐々に摩擦係数が低下し、その結果、供試体の巨視的な変形は時間とともに進行するというような結果を得た。また、本研究では、不連続面の凹凸 (本文では「起伏」と表現) を考慮し、その凹凸の山の高さを変化させて解析を行なった結果、こうした不連続面の凹凸が供試体の巨視的な変形に影響を及ぼすことが判明した。しかしながら、不連続面を境にした上部の供試体に定応力 (クリープ応力) を作用していることから、変形は収束せずに延々と増加した。

こうした現象は実際の岩盤で観測されるクリープ現象とは乖離があることから、本研究では、不連続面が供試体に包含される場合についてもクリープ解析を実施した。不連続面が供試体に包含されるケースについても、不連続面が供試体を貫くようなケースと同様、不連続面に凹凸を設けて、こうした凹凸が供試体の巨視的な挙動に与える影響を考察した他、その凹凸の頻度 (本

文では「波数」と表現)や不連続面の減耗(摩擦係数が減少)に影響を与えらると思われらる不連続面に露出した部分の岩盤の強度を変化させた解析を追加した。凹凸の山の頻度や不連続面の減耗の程度は、少なからず供試体の巨視的な変形に影響を与えらると思われらるが、本稿で示したように凹凸の数が少ない範囲(ただし、波数が0.5個=フラットな不連続面が傾斜を持つパターンは除く)では、それらの影響は顕著とはならなかつた。不連続面が供試体を貫くケースでは、こうしたパラメータを変化させるともう少し有意な差が生ずると予想されるが、不連続面が供試体に包含されるケースでは、岩盤基質部の弾塑性的な挙動による変形成分の方が全体の変形を支配するような現象となり、凹凸の山の頻度や不連続面の減耗の程度による影響が顕著となっていない。

本研究で設定した問題では、クリープ変形によって不連続面の一部が開口するため、開口部分において透水係数が大きくなる。透水係数が大きくなると水の流れが変化する可能性もあるので、この点に関しては、今後、岩盤浸透流解析も含めて十分に検討を尽くしたいと思っている。また、本研究で提案したクリープモデルは、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という独創的なモデルを導入しているが、現時点では、クリープ変形の状態および変形量について実現象と比較するには至っていない。今後は、実験より得られるデータとの比較を通してモデルを再検討する必要がある。

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.
- 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) Yoshida, H. and Horii, H.: A Micromechanics-based Model for Creep Behavior of Rock, *Applied Mechanics Review*, No.8, pp.294-303, 1992.
- 9) Amadei, B.: Creep behaviour of Rock Joints, M. A. Sc. thesis, University of Toronto, 1979.
- 10) 竹内則雄, 草深守人, 武田洋, 佐藤一雄, 川井忠彦: ペナルティを用いたハイブリット型モデルによる離散化極限解析, 構造工学論文集, Vol.46A, pp.261-270, 2000.
- 11) 宮村倫司, 牧野内昭武: 共役射影勾配法による大規模接触問題解析, 日本計算工学会論文集, Paper No.20020011 (電子ジャーナル), 2002.
- 12) 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.
- 13) 多田浩幸, 若林成樹: ロックボルトの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.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) 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.
- 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.
- 18) 日本材料学会 編: 岩の力学, 丸善, pp.114-115, 1993.

(2005年9月10日受付)