

不連続性岩盤のクリープ挙動に関する数値解析的研究

Numerical study on creep behavior for discontinuous rock mass

巽隆有*・吉田秀典**・藤原真澄***・森本亮司****

Takakuni TATSUMI, Hidenori YOSHIDA, Masumi FUJIWARA and Ryoji MORIMOTO

*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)

*** (株) エネルギア・コミュニケーションズ(〒730-0051 広島市中区大手町 2-11-10)

**** 修士(工学) 西日本高速道路エンジニアリング中国(株)(〒731-0102 広島市安佐南区川内 5-25-12)

The existence of the discontinuity cannot be disregarded when the long-term deformation of a rock mass around a cavern is discussed in Japan. There are a number of trials to predict the long-term deformation of the rock mass by the creep model in which a discontinuous rock mass is dealt as an equivalent continuous material. However, the numerical model for the rock mass that enables us to grasp the alteration of permeability in a high-level radioactive waste disposal is needed. Thus, in this study, the numerical creep model with considering the deformation of discontinuities in the rock mass is proposed on the basis of experimental results. Furthermore, the validity of the models is discussed through a comparison between numerical results and measured data. As a result, the proposed model is adequate for the reproduction of creep behavior for a discontinuous material. Accordingly, the proposed model is efficient to grasp a long-term behavior of a discontinuous rock mass.

Key Words : creep, discontinuous rock mass, discontinuity, reduction of friction

1. はじめに

2002年に原子力発電環境整備機構が高レベル放射性廃棄物の処分場建設に向け、処分場選定に向けた公募を開始し、2009年3月福島県楢葉町が、高レベル放射性廃棄物最終処分場の受け入れを検討していることがわかった。また、2005年には、九州電力が玄海原発で実施を目指すプルサーマル発電計画が国から許可され、地元自治体からも了解が得られるに至っており、2009年10月中旬から下旬に試験運転し、11月中旬に発電を開始する予定である。四国電力でも、伊方原発3号機(愛媛県伊方町)のプルサーマルで使うプルトニウム・ウラン混合酸化物(MOX)燃料の製造を、2010年3月末をめどに始めると発表した。わが国だけでなく米国においても、国際的な核不拡散と米国内の放射性廃棄物削減のため、直接処分方式から再処理をした後の処分方式へ方針転換し、2020年に高速増殖炉の運転を開始する計画がある。こうしたエネルギー施設の稼動ともなっており、わが国においても、低レベルから高レベルに至るまで様々な放射性廃棄物が排出されることとなる。

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

は長期に亘るため、処分坑道とその周辺に関しては重要さが増す。

地層処分の場合、その処分深度は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。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坑道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。

岩盤の長期挙動に関しては、不連続面を含めた巨視的な材料に対する時間依存挙動(クリープ変形)をモデル化して、数値解析的に変形量を予測しようとする試みが多数存在する。例えば、Carterら³⁾は岩塩の一軸クリープについて検討したクリープモデルを提案している。このモデルでは、クリープの温度依存性などを考慮することができ、定温下においては、Norton-Bailyのクリープモデル⁴⁾と合致する。また、大久保ら^{5),6)}は非線形粘弾性モデルを提案している。このモデルは非線形Maxwellモデルにカテゴリされ、応力を受ける岩盤の各要素のコンプライアンス(応力-ひずみ)が時間の経過とともに次第に増加していくと仮定したモデルである。このモデルを用いた有限要素解析は、各コンプライアンスを順次増加させた繰り返し計算を行うことによって、比較的容易に時間依存性挙動を解析

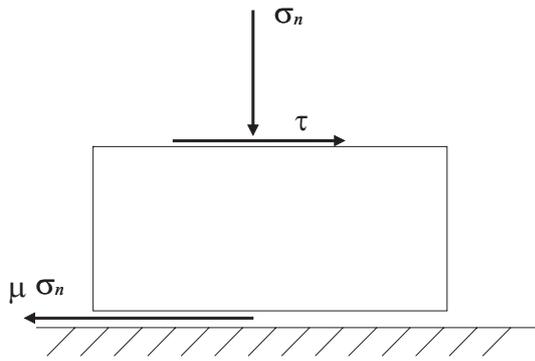


図-1 不連続面の概念図

することができる。しかしながら、上述したモデルを含め既往の研究における大多数のモデルは、巨視的な変形を予測することは可能かもしれないが、不連続面の変形を考慮していないため透水性能の変化までは類推することができない。

処分坑道などの掘削によって既存の不連続面が変形する、あるいは新規不連続面が形成されることにより、透水係数は100倍になるとも報告されている⁷⁾。特に、処分坑道掘削後の周辺岩盤の応力状態は複雑で、一般には、坑道の放射方向の応力が解放され、逆に、周方向の応力が卓越するという偏差的な状態となるため、不連続面の変形は増大する。こうした現象は、短期的な観点からは周知の事実であるが、長期的な観点からはほとんど議論されていない。こうした不連続面が、短期および長期に亘って変形した場合、上述した通り、周辺岩盤の透水性が増大し、漏えいした放射性核種の移行に影響する可能性がある。

このように、放射性廃棄物の処分においては、透水性能の変化を把握するという視界に入れたモデルが必要となるが、それには不連続面の変形も考慮に入れたモデルが必要となる。そこで、本研究では、室内試験より得られた知見を基に、不連続面を含む材料のクリープ変形を考慮に入れたモデルの提案を行うことを目的とする。

2. 力学モデル

2.1 岩盤基質部のクリープモデル

不連続面を含まない岩盤基質部のクリープ挙動の表現には、Carterら³⁾が岩塩の一軸クリープについて検討したクリープ則、

$$\dot{\bar{\epsilon}}^c = k\sigma^n T^p t^q \quad (1)$$

を参考にした。ここで、 $\bar{\epsilon}^c$ は相当クリープひずみ、 σ は軸応力、 T は温度、 t は時間で、 k, n, p および q はクリープに関する係数である。すべての係数について感度分析をすると膨大な計算パターンになることと、参考クリープ試験を含め今回の一連の試験が定温度下、あ

るいは、それに近い状態となることから、本研究では定温度下を仮定し、Norton-Bailyの式⁴⁾を採用することとした。さらに、対象岩盤が非線形的な挙動を呈することから、Norton-Bailyの式を時間微分した次式(増分式)を用いることとした。

$$\begin{aligned} \dot{\bar{\epsilon}}^c &= qA\sigma^n t^{q-1} && \text{時間硬化則} \\ &= qA^{\frac{1}{q}}\sigma^{\frac{n}{q}}\bar{\epsilon}^{c\frac{q-1}{q}} && \text{ひずみ硬化則} \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 $A = kT^p = \text{一定}$ である。これを多軸応力状態に拡張するには、まず、塑性力学における normality rule をクリープひずみ速度に適用し、以下のようにクリープひずみ速度テンソル $\dot{\bar{\epsilon}}_{ij}^c$ 、

$$\dot{\bar{\epsilon}}_{ij}^c = \dot{\bar{\epsilon}}^c \left\{ \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_{ij}} \right\} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \bar{\sigma} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \{ (\sigma_x \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 \\ &\quad + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \} \end{aligned} \quad (4)$$

を定義し、さらに、式(2)の単軸応力 σ を相当応力 $\bar{\sigma}$ と置き換える⁴⁾。

クリープ現象は第1期から第3期のクリープに分けられ、本来であれば可能な限り第3期クリープを考慮に入れるべきであるが、相当クリープ則では第3期クリープには対応できない。第3期クリープのモデル化については、今後の課題である。

2.2 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^{8),9),10)}。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。

$$-\mu\sigma_n + c < \tau \rightarrow \text{すべり} (\sigma_n < 0) \quad (5)$$

$$-\mu\sigma_n + c \geq \tau \rightarrow \text{固着} (\sigma_n < 0) \quad (6)$$

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。なお、 σ_n は引張を正とする。

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。

2.3 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されている。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^{11),12)}。特に、大西ら¹³⁾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。

著者の一人は、大西ら¹³⁾の考え方に基づき、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^{8),9),10)}。

$$\mu = \begin{cases} \mu_i & (\sigma_n^J < \sigma_y^J) \\ (\mu_i - \mu_r) \times \exp\{-D(\sigma_n^J - \sigma_y^J)\} + \mu_r & (\sigma_n^J \geq \sigma_y^J) \end{cases} \quad (7)$$

ここで、 μ は任意時刻の摩擦係数、 μ_i および μ_r はそれぞれ初期摩擦係数および残留摩擦係数、 D は低減率、

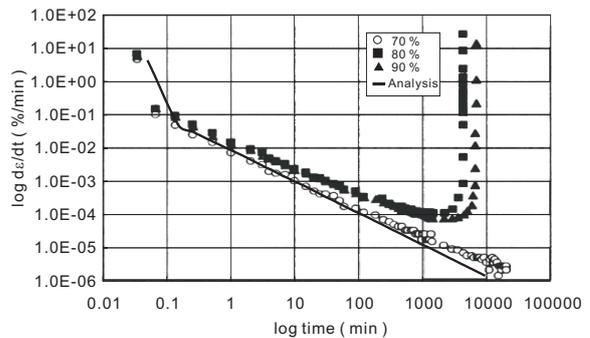


図-2 ひずみ速度 - 時間関係 (conf.=0.5MPa, 軽石凝灰岩)

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. 参考クリープ試験

3.1 試験概要

不連続面における挙動のモデルと基質部における挙動のモデルの両方を考慮した場合、それぞれのパフォーマンスを評価することが難しいことから、本研究では、まず、不連続面を含まない岩盤を対象とした解析を実施し、Norton-Baily のクリープモデルの適用に関する妥当性を議論する。参考とするのは金子ら¹⁶⁾が実施した天然の岩石に対するクリープ試験（実施期間：15日）で、本研究ではこの試験の再現ということを通して各種パラメータの感度やモデルの適用の妥当性について考察する。

使用した試験供試体の堆積軟岩コアは、青森県上北郡付近に分布する鷹架層において実施したボーリングよりコアを採取して用いている。当該箇所では、新第三紀中新世に堆積した軟岩が広く分布し、主に砂岩・凝灰岩からなる中層部と主に泥岩からなる下層部が分布していることが確認されている。

対象としたボーリングコアは、GL.-150~-139m 深度のボーリングコアより採取した軽石凝灰岩である。軽石凝灰岩は、 $\phi=0.2\sim 5.0\text{cm}$ 程度の白色軽石を含む軽石凝灰岩を主体とし、一部に灰色を呈する細粒、ガラス質な凝灰岩をともなう特徴を持ち、平均湿潤密度 1.52g/cm^3 である。

クリープ試験に先立って実施した圧密排水試験（CD試験）は、土木学会「軟岩の調査・試験の指針（案）」3.3.3 軟岩の三軸圧縮試験に準拠し、圧密排水（CD）条件の下でひずみ制御（ひずみ速度： $0.01\%/\text{min}$ ）にて載荷し、有効拘束圧は $0.1, 0.5, 1.0, 1.5\text{MPa}$ として試験を実施している。供試体は、直径 50mm 、高さ 100mm の円柱供試体である。なお、クリープ応力は CD 試験時のピーク応力に対して $70\%, 80\%$ 、および 90% という3種類を考えている。また、載荷日数は最大で15日として、15日経過してもクリープ破壊に至らない場合

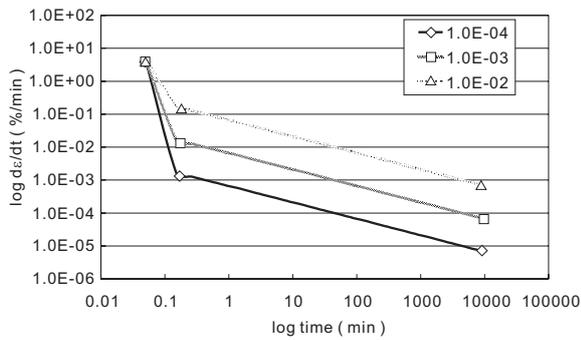


図-3 ひずみ速度 - 時間関係 (conf.=0.5MPa, A を変化)

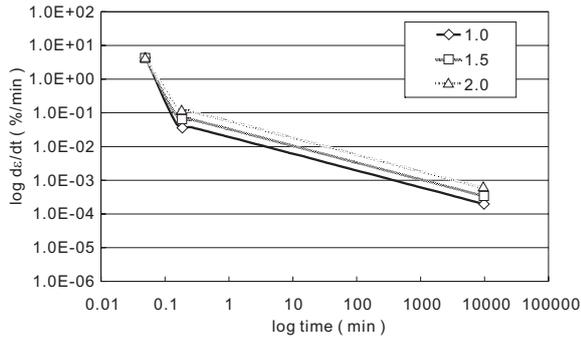


図-4 ひずみ速度 - 時間関係 (conf.=0.5MPa, n を変化)

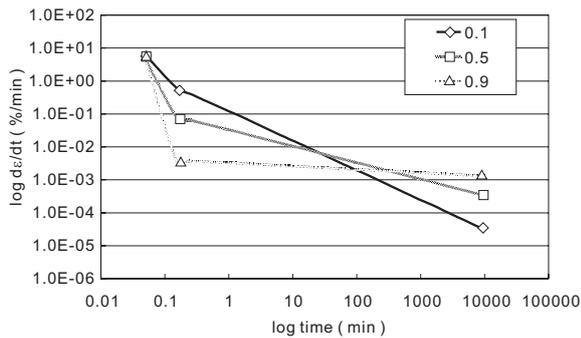


図-5 ひずみ速度 - 時間関係 (conf.=0.5MPa, q を変化)

については、1日あたり5%ずつ応力レベルを上昇させ破壊を確認している。試験の詳細については、文献¹⁶⁾を参照されたい。有効拘束圧0.5MPaの下における軽石凝灰岩の試験結果を図-2に示す。なお、図中には後述する解析結果も併せて示している。

3.2 解析概要

解析では、金子ら¹⁶⁾の試験が三軸圧縮クリープ試験であることから、3次元直方体(六面体)要素とし、3次元有限要素解析を行った。境界条件は、円柱供試体の側面と上面より静水圧状態になるように荷重(0.5MPa)は保持したまま上載圧のみを増加させる。そして、上載圧をピーク荷重(4.92MPa)の70%応力の荷重3.44MPaまで載荷し、その後、側圧と上載圧を保持してクリープ解析を行う。弾性係数に関しては、CD試験では606MPaから840MPaの値を得ていることから、代表値として750MPaとした。また、著者らの一

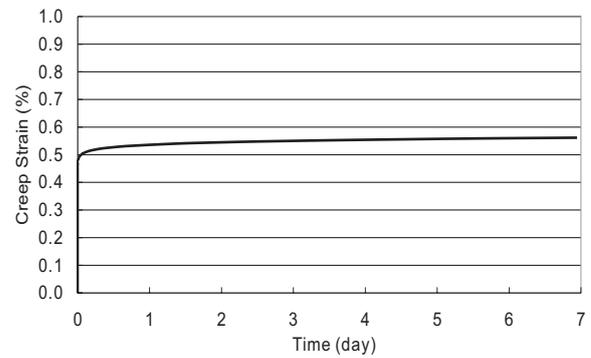


図-6 ひずみ速度 - 時間関係 (再現解析)

部が、Drucker-Prager型の等方弾塑性モデルである程度の再現性を得ている⁸⁾ことから、この解析においては、簡易的ではあるが弾塑性を考慮し、文献¹⁶⁾における軽石凝灰岩の試験値を参考に、粘着力を0.98MPa、内部摩擦角を28.5度と定めた。なお、ポアソン比に関しては特に記載がなかったため、0.25と仮定した。

また、先にも示したように、Norton-Bailyのクリープ則では第3期クリープには対応できない。地下空洞の安定/不安定を議論するには、可能な限り第3期クリープを考慮に入れるべきであるが、本研究では、破壊に至る前段階を研究の対象としていることから、第3期クリープについては検討の対象外とした。したがって、本解析では、クリープ破壊に至ることがなかった70%応力のみを解析の対象とした。

3.3 解析結果

Norton-Bailyのクリープ則の各種パラメータ(A, n, q)の感度解析結果を図-3から図-5に示す。パラメータの感度を確認するため、パラメータの基準値(A: 10^{-2} , n: 1.5, q: 0.5)を設定し、Aは 10^{-4} , 10^{-3} , 10^{-2} , nは1.0, 1.5, 2.0, qは時間項の $1-q$ 乗の形から、範囲は $0 < q \leq 1$ であるので0.1, 0.5, 0.9と変動させ解析を行った。なお、図中の印は計算ステップ数ではなく、代表的な変極点を示している。

まず、パラメータAについて考える。図-3より、クリープひずみ速度と時間を両対数グラフにプロットするとクリープひずみ速度は時間とともに比例的に減少していることがわかる。Aの値を変化させた場合、初期の段階においてひずみ速度が異なるが、それ以降はクリープひずみ速度が減少する割合は変わらず、曲線の傾きは変わらないが、Aの値が大きいほど初期のひずみ速度が速いため、その後のひずみ速度は、見かけ上、同じ時間ではAの値が大きいほど速くなる。つまり、初期の段階では時間項による影響が大きいですが、時間経過とともに影響が小さくなり、ひずみ速度は純粋にAの大きさだけに依存するようになり、例えば、Aを10倍にするとひずみ速度も10倍になる。AはNorton-Baily

| 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 |

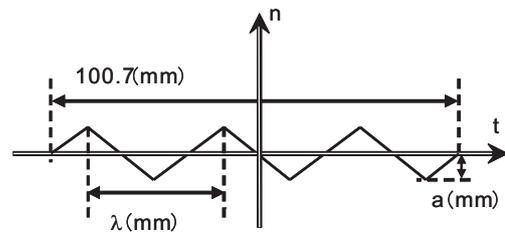


図-7 不連続面の形状(三角波)

の式において、全体にかかってくる係数であるため、 A の値が大きくなれば全体のひずみ量も大きくなる。

次に、パラメータ n について考える。図-4より、クリープひずみ速度と時間を両対数グラフにプロットするとクリープひずみ速度は時間とともに比例的に減少していることがわかる。 n の値を変化させても、 A ほどの大きな差は無いものの、若干ではあるが n が大きいとひずみ速度は速いことがわかる。初期を除けば、この場合も曲線の傾きは変わらない。初期におけるひずみ速度の差によってひずみの大きさに差が生じ、 n の値が大きいほどひずみが大きくなる。

最後に、パラメータ q について考える。図-5より、クリープひずみ速度と時間を両対数グラフにプロットすると、初期段階を除けばクリープひずみ速度は時間とともに比例的に減少していることがわかる。また、 q の値が大きいほど、初期においてひずみ速度は大きく低下し、その後、傾きは小さく、ひずみ速度の変化は小さい。時間項を時間で微分すると係数 q が式全体に乗じらるため、このようになる。 q は時間 t にかかってくる係数であるため、 q の値が大きくなれば全体のひずみ量も大きくなる。

以上のような結果より、まず、ひずみ速度の低減割合を試験の低減割合と同等になるように q を 5.0×10^{-3} と決定し、試験結果の再現性が良好となるよう、 A 、 n を 5.0×10^{-4} 、 1.5 と決定した。図-2に決定したパラメータによる解析結果を試験結果と併せて示す。なお、参考までに、クリープひずみ-時間関係については、その解析結果を図-6に示す。時間-ひずみの関係で見ると、載荷後、ひずみは極めて早い段階で第二期クリープに移行し、第二期クリープ時では、ひずみ速度が遅いことから、ひずみはほとんど増加していないことがわかる。

4. クリープ試験

4.1 試験概要

本研究では、不連続性岩盤におけるクリープ挙動を把握することを目的としていることから、通常とは異なり、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、不連続面が存在する供試体を用意する必要がある。全ての試験を通じて天然の不連続面を有する岩盤・岩石を試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

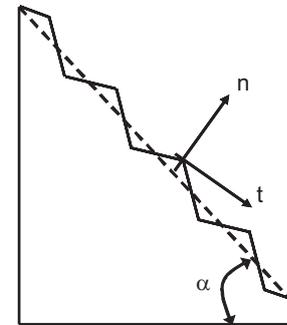


図-8 不連続面を有する供試体(半分)の断面図

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、試験結果の解釈を複雑に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。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、平面ひずみクリープ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、あるいは試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、24時間の水中養生を施したのについて試験に使用することとした。なお、平面ひずみクリープ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、粘着力は 1.9 MPa であった。

表-2 不連続面を有さない供試体のピーク応力およびクリープ応力

| 拘束圧 | ピーク応力 | クリープ応力 |
|--------|---------|---------|
| 0.5MPa | 5.62MPa | 3.37MPa |
| 1.0MPa | 5.94MPa | 4.72MPa |

表-3 不連続面を有する供試体のピーク応力およびクリープ応力

| 拘束圧 | case | ピーク応力 | クリープ応力 |
|---------|-------|---------|---------|
| 0.5 MPa | case1 | 2.34MPa | 1.87MPa |
| | case2 | 2.84MPa | 2.27MPa |
| | case3 | 2.04MPa | 1.63MPa |
| | case4 | 3.27MPa | 2.62MPa |
| 1.0 MPa | case1 | 3.93MPa | 3.14MPa |
| | case2 | 4.25MPa | 3.40MPa |
| | case3 | 3.68MPa | 2.94MPa |
| | case4 | 4.30MPa | 3.44MPa |

単一不連続面は、図-7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(図-8参照)。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図-7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、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の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を有する供試

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る。

本研究では、上述した供試体を用いて、平面ひずみクリープ試験を実施した。供試体を包むメンブレンと載荷板など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。変位制御による単調載荷(ひずみ速度:0.002%/s)し、クリープ応力(静的ピーク応力 $\times 80\%$)に達した後は、応力を一定に保つ。拘束圧に関しては0.5、1.0 MPaという2種類にて試験を行った。なお、材料基質部のクリープ特性を把握するために、不連続面を有さない供試体(同寸法、同配合)についても同様のクリープ試験を行っている。

なお、不連続面部分の変形と巨視的な材料の変形の相関を探るために、試験機流入側に相当するアクリルの窓部にマイクロ스코プ(CCD)カメラを接眼し、不連続面の局所変形の追跡を実施した。具体的には、不連続面を有する供試体については、格子をつけたメンブレンを供試体不連続面に設置し、格子の動く様子を試験機背面にある観測窓からマイクロ스코プを用いて観測することで、不連続面の移動距離の計測も行った。なお、本マイクロ스코プの総画素数は1800万画素であり、本試験では格子全体の挙動を観測できるよう倍率を75倍とし、撮影範囲は4.07mm \times 3.04mm(この部分で約211万画素)とした。

不連続面を有さない/有する供試体に関するピーク応力およびクリープ応力を表-2、表-3に示す。なお、不連続面を有さない供試体の拘束圧0.5MPaに関しては、80、70%応力下では早期にクリープ破壊に至ったため、60%応力下で試験を行っている。

4.2 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、上部からクリープ応力に達するまで載荷し、クリープ応力に達した後、一定応力とした(図-9参照)。なお、図-9の

印は、後述する不連続面の相対変位を調べた点である。不連続面に相当する箇所には2章で述べた摩擦すべり要素を導入する。再現性を検討した結果、試験を概ね再現可能なパラメータとして表-4に示すパラメータを設定した。また、ポアソン比は0.25とし、弾性係数に関しては試験供試体によって少々バラツキがあるため、試験毎に求め解析を行っている。なお、平面ひ

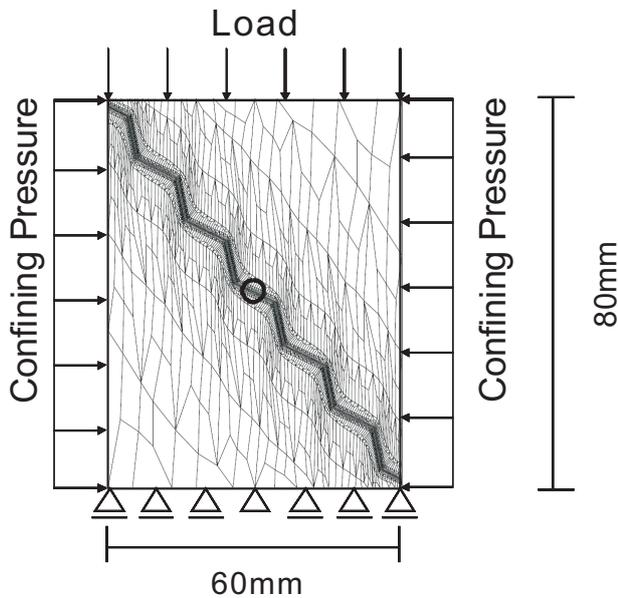


図-9 解析供試体 (case2)

表-4 摩擦係数低減モデルの各種パラメータ⁸⁾

| | 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 |

ずみクリープ試験では、クリープ応力を静的ピーク応力の 80%とし、この範囲では明確な塑性変形を呈しなかったことから、材料基質部については、クリープ変形は考慮するが、塑性変形は考慮しないこととした。

4.3 解析結果

まず、不連続面を有さない供試体において解析を行い、本研究で対象とする供試体の材料基質部のクリープ変形に関する Norton-Baily のパラメータを決定することとした。前章で確認したように、ひずみ速度の低減割合は q のみに依存する。本研究で対象とする材料では、 q を 0.9 程度に設定することで、低減割合に関しては良好な一致を示す。 q はゼロに近いほど低減割合が大きくなり、早期にクリープひずみが収束する傾向にあることが図-5 から明らかである。通常、地下深部に存在する岩盤 / 岩石は、土質力学でいうところの圧密が進んだ状態にあり、内部の間隙は小さく、変形し難いものと考えられる。そのため、金子ら¹⁶⁾の試験ではひずみ速度の低減割合を示すパラメータである q の値が 5.0×10^{-3} という極めてゼロに近い値となり、ひずみ速度の低減割合が大きくなり、早期に収束傾向を呈したと思われる。それに対し、本研究で用いた供試体は人工的に作製されたもので圧密を受けておらず、

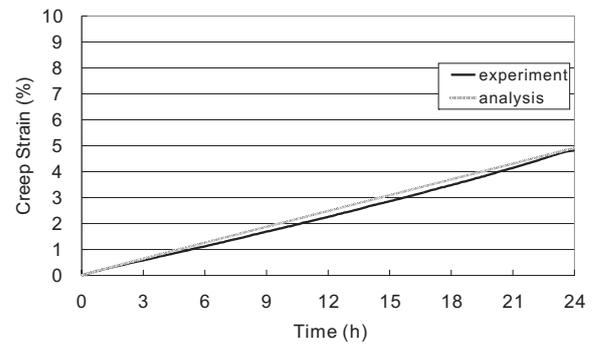


図-10 クリープひずみ - 時間関係 (不連続面無し, conf.=0.5MPa)

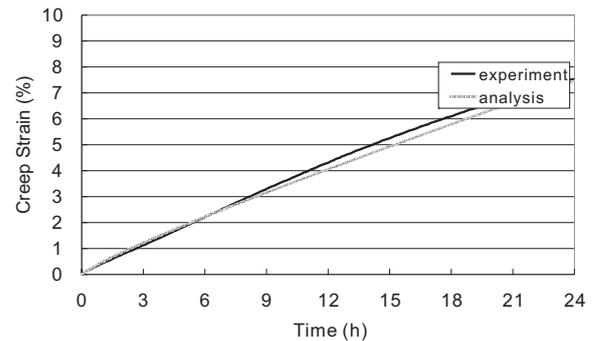


図-11 クリープひずみ - 時間関係 (不連続面無し, conf.=1.0MPa)

その結果、内部の間隙が多い状態であったものと予想される。そのため、短時間でひずみが増大し、一方でひずみ速度は収束に向かわず、クリープ曲線の第一期クリープ段階から第二期クリープ段階への移行が緩慢となり、 q の値を 0.9 というような大きな値でないと試験の再現ができなかったものと思われる。

供試体作製時の気温や湿度、人為的な原因によって供試体毎に若干のバラツキが生じるが、 $q = 0.9$ とした時にひずみ速度の低減割合の再現性は良好となり、 A と n に関しても、 A が 1.5×10^{-2} から 8.5×10^{-3} 、 n が 1.5 から 2.0 の範囲で試験を概ね再現できることがわかった。本試験で使用している供試体は少なからず拘束圧依存性が存在する¹⁷⁾。そこで、拘束圧が 0.5MPa のものは、 $A = 1.5 \times 10^{-2}$ 、 $n = 1.5$ とし、拘束圧が 1.0MPa のものは、 $A = 8.5 \times 10^{-3}$ 、 $n = 2.0$ として解析を行った。解析結果を試験結果と併せて図-10 と図-11 に示す。解析結果は試験の再現性が良好であることから、本研究で対象とする人工供試体においても、Norton-Baily のクリープ則は有効であると考えられる。

次に、不連続面を有する供試体において、上述のパラメータで解析した結果を試験結果と併せて示す (図-12 から図-19 参照)。なお、前述の通り、不連続面には摩擦すべり要素を導入し、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っている。拘束圧 0.5MPa の場合、試験結果と解析結果の比較より、すべてのケースにおいて両結果は類似した挙動を示していることが

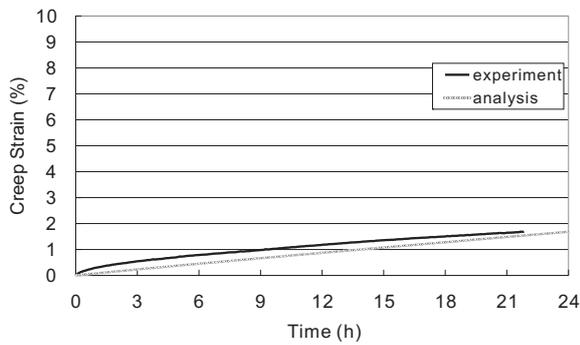


図-12 クリープひずみ - 時間関係 (case1 , conf.=0.5MPa)

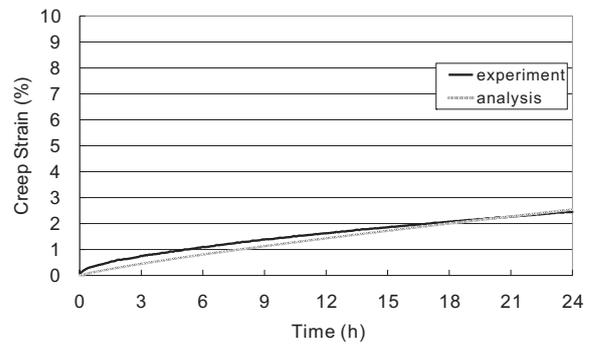


図-16 クリープひずみ - 時間関係 (case1 , conf.=1.0MPa)

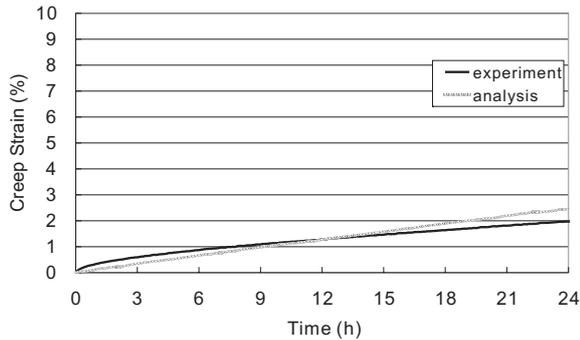


図-13 クリープひずみ - 時間関係 (case2 , conf.=0.5MPa)

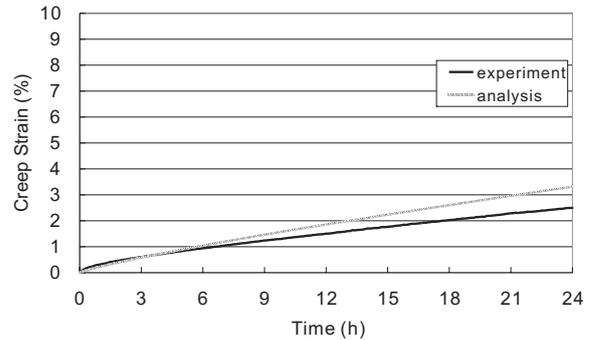


図-17 クリープひずみ - 時間関係 (case2 , conf.=1.0MPa)

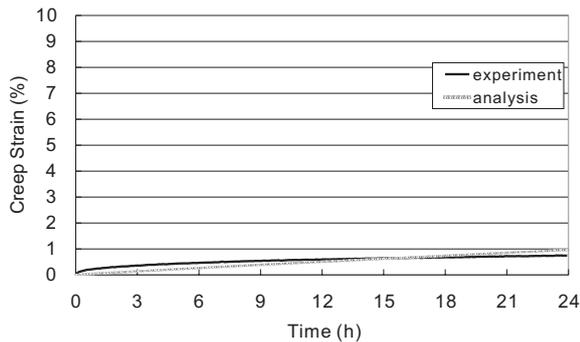


図-14 クリープひずみ - 時間関係 (case3 , conf.=0.5MPa)

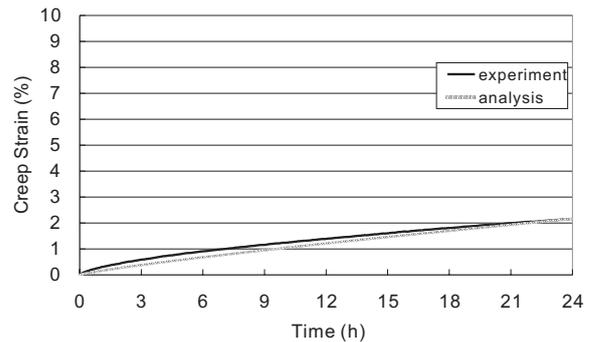


図-18 クリープひずみ - 時間関係 (case3 , conf.=1.0MPa)

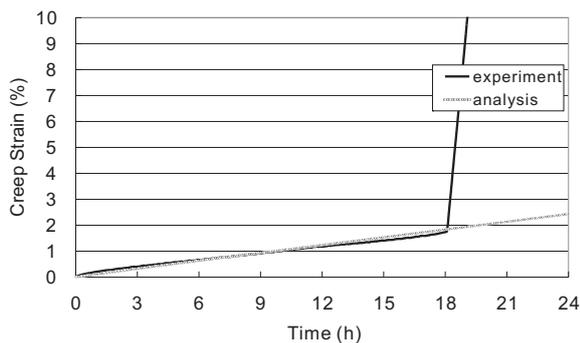


図-15 クリープひずみ - 時間関係 (case4 , conf.=0.5MPa)

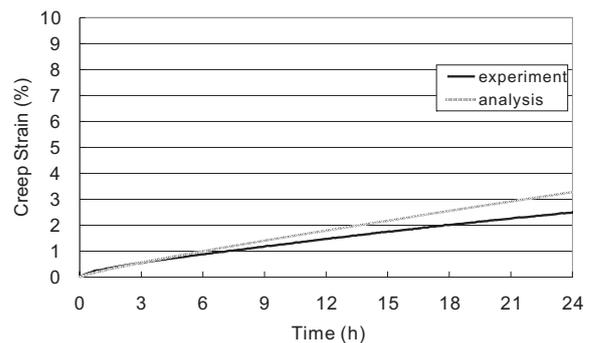


図-19 クリープひずみ - 時間関係 (case4 , conf.=1.0MPa)

わかる．同様に，拘束圧 1.0MPa の場合，case1，case3 はともに類似した挙動を示している．case2，case4 は解析結果のほうがやや高いクリープひずみを示しているが，その誤差は 1%未満であるため 24 時間レベルにおいては概ね良好な一致を得ているものと考えられる．これより，本研究にて使用しているクリープモデルにお

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，こうして設定されたパラメータを用いて解析をすることで，試験の再現が可能であると考える．

ここで，本研究の主眼である不連続面に焦点をあてることとする．図-20，図-21 は，それぞれ図-9 の

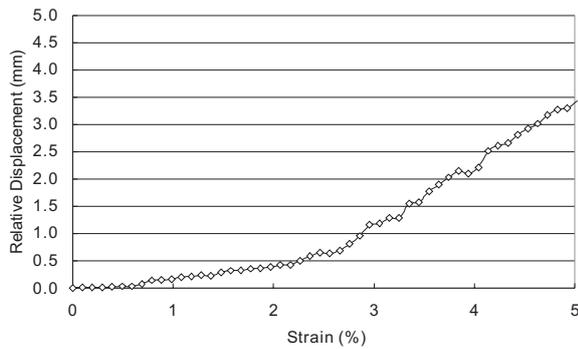


図-20 静的解析における不連続面のせん断方向の相対変位 (case2, conf.=1.0MPa)

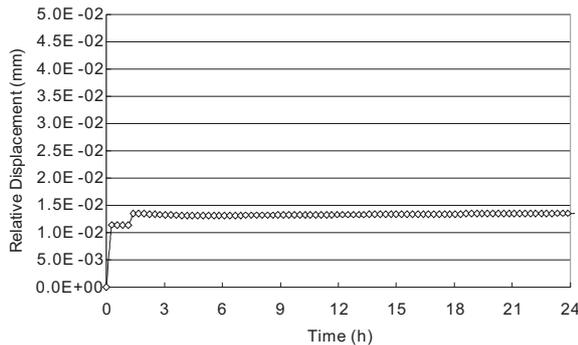


図-21 クリープ解析における不連続面のせん断方向の相対変位 (case2, conf.=1.0MPa)

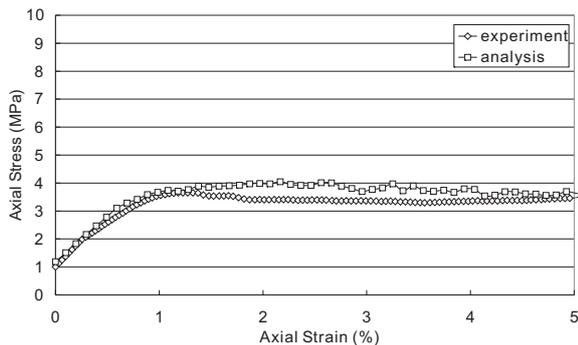


図-22 軸応力 - 軸ひずみ関係 (静的解析, case2, conf.=1.0MPa)

印の点での静的/クリープ解析における、不連続面のせん断変形の経時変化を示している。図-20より、静的解析では載荷重の増加にともなって、不連続面が滑動していることがわかる。一方、図-21より、最終段階(24時間、クリープひずみ：約2.6%)において、不連続面のせん断変形は 1.4×10^{-2} mm に留まっているが、このときの軸ひずみは約4% (うち静的ひずみ1.4%)であり、この値は静的解析(図-22)の最終段階のひずみの値(約5%)と比較してそれほど差はない。しかしながら、静的解析における不連続面のせん断変形量は約3.5mmで、クリープ解析との差は100倍以上となっている。このことより、クリープ解析において不連続面は滑動しているものの、その変形量はごく微量であることがわかる。先にも示したように、本研究では、

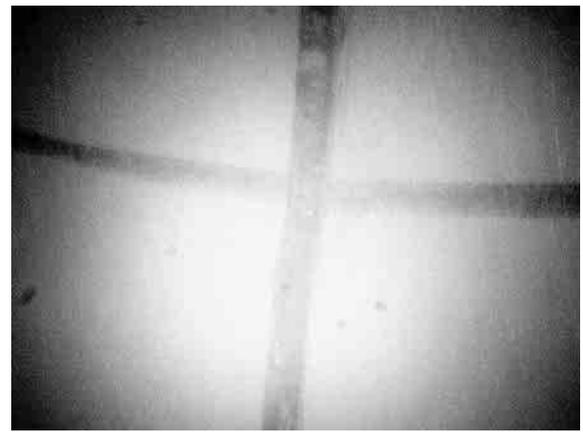


写真-1 マイクロスコップ画像(クリープ試験, case2, conf.=1.0MPa, 載荷前)



写真-2 マイクロスコップ画像(クリープ試験, case2, conf.=1.0MPa, クリープひずみ：2.6%(最終))

試験中にマイクロスコップを用いて、供試体中央部の不連続面近傍において、不連続面の微視的な変形挙動を確認している。例えば、case2の拘束圧1.0MPaのクリープ試験(写真-1, 写真-2参照)では、格子は水平方向に0.19mm(クリープひずみ：約2.6%時)のみしか移動していない。ただし、この格子のズレはクリープ成分以外の変形成分も含んでいる。すべてのケースにおいて、このような結果となっている。case2の拘束圧1.0MPaの静的試験(写真-3, 写真-4参照)では水平方向に1.0mm以上(軸ひずみ：約5.0%時)移動していることを考えると、クリープ試験においてはほとんど不連続面が変形していないものと思われる。試験では左右から同じ大きさの拘束圧を作用していることに起因して不連続面の滑動が顕著ではないが、実際の地下空洞では偏差的な応力状態となりうるので、そのような状態で解析を行うと不連続面は開口する可能性は大いにある。また、本研究が対象としている供試体は内部の間隙が大きいため、不連続面の变形よりも材料基質部の变形が卓越しているものと考えられる。マイクロスコップを用いた観察では、不連続面のごく微小な領域しか捉えていないものの、これを不連続面の

代表的な挙動と捉えると、解析では試験時の挙動を概ね表現できているものと考えられ、提案したクリープモデルに根本的な誤りはないものとする。

5. まとめ

本研究では、材料基質部には Norton-Baily のクリープ則を不連続面には摩擦係数低減モデルを適用し、不連続面を含む材料の不連続面の变形を考慮に入れたクリープモデルの提案を行った。提案したモデルは、従来モデルとは異なり、材料基質部あるいは材料の巨視的な挙動のみを表現するのではなく、透水性能の変化を把握するという視野に入れ、不連続面の变形も考慮に入れた。提案したモデルは試験の巨視的/微視的挙動をうまく再現することができ、提案モデルに根本的な誤りはないものとする。このような観点で、本研究で提案したモデルは、不連続面を含む材料の不連続面の变形も考慮に入れた長期予測に有用であると考える。今後は、本研究で提案したモデルを、例えば、地下空洞解析に適応して解析を行うことで、高レベル放射性廃棄物の地層処分安全性を検証できると思われる。

付記：本研究の成果の一部は、独立行政法人原子力安全基盤機構（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。

参考文献

- 1) 例えば、核燃料サイクル開発機構 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，核燃料サイクル開発機構，1999.
- 2) 例えば、核燃料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，核燃料サイクル開発機構および電気事業連合会，2000.
- 3) Carter, N.L. and Hansen, F.D.: Creep of rock salt, *Tectonophysics*, Vol.92, pp.275-333, 1983.
- 4) 矢野元基, 宮崎則幸: 有限要素法による熱応力・クリープ・熱伝導解析, サイエンス社, pp.59-65, 1985.
- 5) 大久保誠介, 西松則幸: 非線形粘弾性モデルによる坑道変形のシミュレーション, 日本鉱業会誌, Vol.103, pp.293-296, 1987.
- 6) 大久保誠介, 金豊年: 非線形粘弾性モデルによる円形坑道周辺岩盤挙動のシミュレーション, 資源と素材, Vol.109, pp.209-214, 1993.
- 7) 電気事業連合会および核燃料サイクル開発機構 編：TRU 廃棄物処分技術検討書 - 第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発とりまとめ - , 電気事業連合会および核燃料サイクル開発機構, pp.3-50 - 4-70, 2005.
- 8) 吉田秀典, 巽隆有: 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, 計算数理工学論文集, Vol.8, pp.31-36, 2008.
- 9) 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, pp.1-8, 2006.
- 10) 吉田秀典, 山崎卓哉, 井上純哉, 平川芳明, 森聡: 不

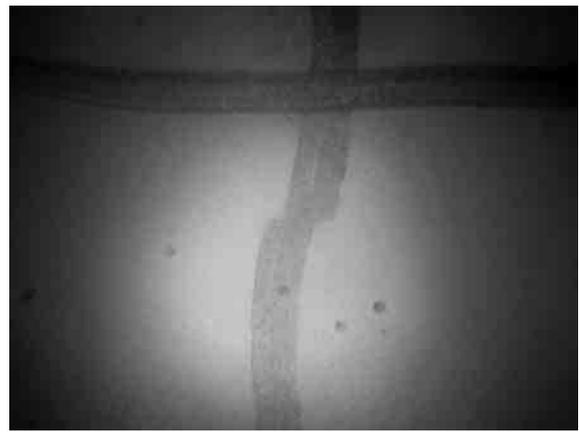


写真-3 マイクロスコープ画像（静的試験，case2，conf.=1.0MPa，載荷前）



写真-4 マイクロスコープ画像（静的試験，case2，conf.=1.0MPa，軸ひずみ：5.0%）

- 11) 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/II I-50, pp.255-266, 2000.
- 12) 岸田潔, 津野野: 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/III-55, pp.245-261, 2001.
- 13) 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.
- 14) Patton, F. D.: Multiple modes of shear failure in rock, *Proc. 1st Cong. ISRM*, Lisbon, Vol.1, pp.509-513, 1966.
- 15) Barton, N. R.: Review of a new shear-strength criterion for rock joints, *Engineering Geology*, Vol.7, pp.287-332, 1977.
- 16) 金子岳夫, 小山俊博, 鈴木康正, 加藤和之, 久米田正邦, 高橋一憲: 堆積軟岩のひずみレベルと透水特性に関する考察, 岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, Vol.34, pp.89-96, 2005.
- 17) 吉田秀典, 山崎卓哉, 井上純哉: 岩盤の透水-応力連成挙動の把握を目的とした試験装置の開発と連成挙動の解明に関する研究, 土木学会論文集 C, Vol.64, No.4, pp.843-855, 2008.

(2009年4月9日 受付)