

## 不連続面の変形を考慮に入れた不連続性材料のクリープモデル

A CREEP MODEL FOR A DISCONTINUOUS MATERIAL  
CONSIDERING THE DEFORMATION OF DISCONTINUITY吉田 秀典<sup>1)</sup>, 井上 純哉<sup>2)</sup>, 森本 亮司<sup>3)</sup>

Hidenori YOSHIDA, Junya INOUE and Ryoji MORIMOTO

- 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) 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)  
 3) 香川大学 大学院工学研究科 (〒761-0396 高松市林町 2217-10, E-mail: s07g417@stmail.eng.kagawa-u.ac.jp)

In Japan, it is planned to dispose HLW (high-level radioactive waste) and TRU (Trans Uranium) waste in a stable rock mass. As for the HLW problems, it is necessary to ensure that residual radioactive substances are kept from reaching the biosphere after many thousands of years. Thus the evaluation of a long-term behavior from mechanical and hydraulic viewpoints is of prime importance. The mechanical and hydraulic properties of discontinuous rock mass have strong correlations respectively. In this study, creep tests are conducted with the use of an artificial specimen so as to seize the mechanism of creep phenomena for a discontinuous material. Moreover, the creep model which takes into account the deformation of discontinuity is proposed. The numerical results have modestly good accordance with the measured data. Finally, the mechanism of creep phenomena for the discontinuous material is discussed.

**Key Words:** Discontinuous Material, Discontinuity, Creep

## 1. 緒言

2002年に原子力発電環境整備機構が原子力発電所の使用済み核燃料から分離される「高レベル放射性廃棄物」の処分場建設に向け、候補地選定のための「概要調査地区」の公募を開始した。また、2006年には、九州電力の玄海原子力発電所ではプルサーマルの導入に関して地元同意が得られた他、青森県六ヶ所村の核燃料再処理工場ではアクティブ試験が開始された。こうしたエネルギー施設の稼働にともなう、いよいよわが国においても、低レベル放射性廃棄物から高レベル放射性廃棄物に至るまで、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<sup>(1),(2)</sup>。濃度の高い放射性廃棄物については、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るが、とりわけ、処分坑道(地下空洞)とその周辺に関しては重要さが増す。

処分地点の深度については、余裕深度処分では50~100 m、地層処分では300 m以深であることから、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、対象となる岩盤は固結性はあるものの、不連続面を含有している可能性がある。高レベル放射性廃棄物の地層処分では、放射性核種が地下水により生物圏に運搬される時間とその量によって安全性が評価されるため、岩盤の変形以上に透水性能の変化が問題となる。

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などを予測しようという試みが多数存在する。例えば、Carterら<sup>(3)</sup>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、このモデルはNorton-Bailyのクリープモデル<sup>(4)</sup>と合致する。また、大久保ら<sup>(5),(6)</sup>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(ひずみ-応力)が時間の経過とともに次第に増加してゆ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、各要素の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

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ほとんどのモデルについては、変形を予測することは可能かもしれないが、透水性能の変化まで類推することはできない。

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倍になるとも言われている(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になるため、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、短期および長期にわたって変形した場合、上述した通り、周辺岩盤の透水性が増大し、放射性廃棄物の処分シナリオに影響を及ぼす可能性も否定できない。

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おい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、不連続性岩盤における時間依存的挙動を考察することを目的とし、室内実験より得られた知見を基に、不連続面のクリープ変形を考慮に入れた新たな不連続性材料に対するクリープモデルの提案を行う。

## 2. クリープ試験

### 2.1. 実験概要

本研究と並行して実施した平面ひずみクリープ試験では、不連続性岩盤におけるクリープ変形を把握するということが目的であるため、通常とは異なり、供試体に不連続面が存在してはならない。本来、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、その表面における起伏や摩擦の状態も一様ではない。こうした要因は、実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。

人工材料の材質であるが、人工的に作成する不連続面が、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成している。また、実験機器の制約(試験機の容量が約100kN)より、一軸強度で5MPa程度であることが課せられる。そこで本研究では、石膏/砂比を1に固定し、水の割合だけを増加させて一軸圧縮強度がおおよそ5MPaとなるような配合試験を実施した。その結果、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材(グリオキサール処理水溶性セルローズエーテル)を用い、水と石膏の分離に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日間の範囲で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ことで、養生期間が3時間以上であれば強度の変化がないことを確認した。本実験では十分なマージンを考慮し、室温で1日

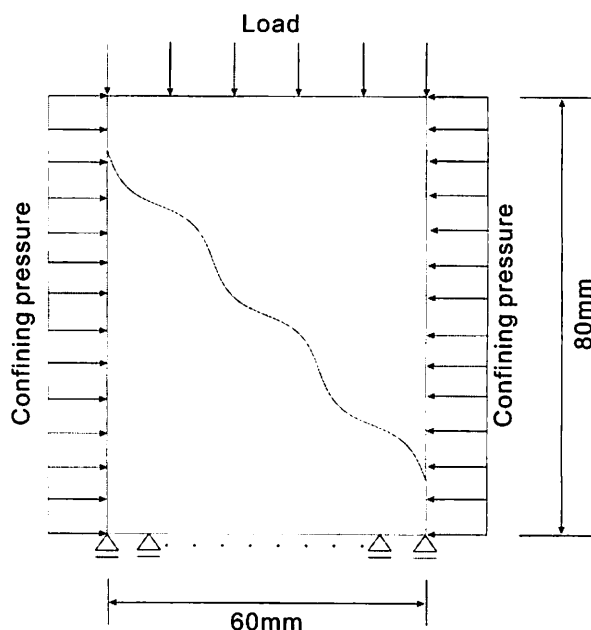


Fig.1 Outline figure of specimen

水封養生することとした。

本試験装置(特許出願番号:特願2006-224400, 発明の名称:透水試験機および透水試験方法)は、通常の平面ひずみ圧縮試験装置とはほぼ同様であるが、供試体の寸法は、高さ80mm、幅60mm、奥行80mmと、通常よりも小さな供試体となっている(Fig.1参照)。別途実施した同配合の供試体に対する静的試験(三軸圧縮試験)より、材料固有の内部摩擦角および粘着力はそれぞれ $16.7^\circ$ 、3.8MPaであった。

本研究では、不連続性材料のクリープ変形、特に、不連続面のクリープ変形の評価を行うため、供試体には予め単一の不連続面を導入することとした。不連続面の形状については、(1)フラットな不連続面の場合、変形しても透水性の増大が見込めない、(2)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、(3)ランダムな起伏を有した不連続面や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、ということ considering、奥行方向一定の正弦波形状としている。数パターンの波長と振幅を組み合わせることで試験を実施しているが、本解析では、不連続面の形状である正弦波の波長を16.8mm(波の山が6個)、振幅を1.0mmとした供試体に対する試験を解析の対象とした。

不連続面を有する供試体は上下面2つのパートからなり、2つを合わせることで、単一不連続面を有する供試体となる。まず、不連続面表面のデータを作成し、そのデータを基に不連続面を有する供試体の片面の三次元データを作り、さらにその三次元データをもとにウレタンを三次元プロッターで切断する。そして、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の片面の型枠が完成する。最終的にそのコンクリート用型枠に材料を流し込み、半分の供試体を作製する(Fig.2参照)。このようにして作製された半分の供試体を2つ合わせて、単一不連続面を有する供試体が出来上がる。不連続面は80.0mm(奥行)×100.7mmの

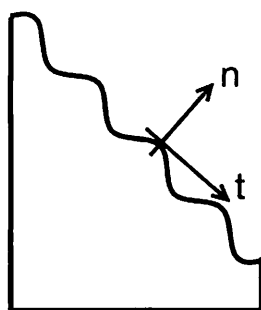


Fig. 2 Cross-section of specimen

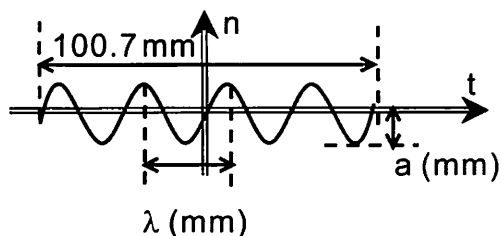


Fig. 3 Discontinuity with sinusoidal shape

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。Fig3 に不連続面の形状を示す。

平面ひずみクリープ試験は拘束圧 1.0 MPa、ひずみ速度 0.002 %/s の変位制御で単調载荷し、クリープ応力（静的試験にて得られたピーク応力 3.98 MPa の 80% = 3.19 MPa）に達した後は、応力を一定に保つ。前面から後面にかけてメンブレンで供試体を覆うことで供試体と外部を分離し、さらに、メンブレン上下面と試験機ヘッドおよび底面の間にグリースを塗布することで試験機ヘッドおよび底面と供試体上面および下面の間の摩擦の低減を図っている。同様にして、前後方向（面外方向）もメンブレンとグリースにて、供試体の前後に配置するアクリル板および金属板と供試体の摩擦の低減を図っている。

なお、材料基質部のクリープ特性を把握するために、不連続面を有しない供試体（同寸法、同配合）についても平面ひずみクリープ試験を行っている。この試験についても、拘束圧 1.0 MPa、ひずみ速度 0.002 %/s の変位制御で単調载荷し、クリープ応力（静的試験にて得られたピーク応力 6.40 MPa の 80% = 5.12 MPa）に達した後は、応力を一定に保つ。

## 2.2. 実験結果

実験より得られた軸方向のクリープひずみなどについては、紙面の都合上、次章（3. 数値解析）にて図示するが、不連続面を有しない供試体については、1 日（24 時間）で約 7.0% のひずみが生じており、かなり大きな値となっている。供試体外観に不連続面などの発生は確認されず、破壊などによって大きなひずみが生じたわけではない。恐らく、間隙が多く、それが徐々に潰れる、あるいは供試体は水没した状態であるので、供試体内に存在した水分が徐々に排出された可能性もある。今回の実験では、実験前に間隙率などを計測し

なかったことから、上述したことは類推の域を出ないが、間隙の存在が大きなクリープ変形を生じさせたのではないかと考えている。

不連続面を有する供試体についても、1 日（24 時間）で 5.0% 程度のクリープひずみが生じており、こちらもかなり大きな値となっている。不連続面を有しない供試体におけるクリープ応力（5.12 MPa）に対して、不連続面を有する供試体のクリープ応力（3.19 MPa）が 60% 弱であることを考えると、不連続面を有しない供試体以上にクリープ変形しているものと思われる。これは不連続面の変形が加わったためと思われるが、不連続面の変形とそれ以外の基質部の変形を分離することができないことから、それぞれがどの程度であるかは不明である。不連続面を有する供試体についても、実験中に目視にて確認できるほどの大きな不連続面の変形は認められてはいないが、実験後に供試体を観察すると、不連続面の表面ではかなり凹凸が潰れるような現象が確認できた。なお、不連続面を有する供試体については、およそ 35 時間後にクリープ破壊を生じている。

## 3. 数値解析

### 3.1. 解析モデル

#### ・材料基質部のクリープ

本来、数値解析をするにあたっては、供試体の組成などを詳細に調査し、その上で力学的挙動をモデル化する必要がある。しかしながら、本研究の主眼は、変形にともなって変化する透水性能の評価にあること、また、不連続面を有しない供試体における試験では透水性の増大が確認できなかったことから、材料基質部のクリープ現象については詳細なモデル化を行わず、本研究では、Carter ら<sup>(3)</sup> が岩塩の一軸クリープについて検討したクリープ則、

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

を採用することとした。ここで、 $\dot{\epsilon}^c$  は相当クリープひずみ、 $\sigma$  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。どの係数がどの程度の感度があるのかを検討する上で、全ての係数について感度分析を実施すると膨大な計算パターンになるため、本論文では、定温下を仮定し、Norton Bailey の式<sup>(4)</sup>を採用した。さらに、対象材料が非線形的なクリープ挙動を呈することから、Norton Bailey の式を時間微分した次式（増分式）を採用した。

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

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  $\dot{\epsilon}_{ij}^c$ 、

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

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

を定義し、さらに、式 (2) の単軸応力  $\sigma$  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 期の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 期の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。なお、試験では、クリープ応力をピーク強度の 80% として実施し、この範囲では明確な塑性変形を呈していなかったことから、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。

・不連続面の変形

本研究では、不連続面がクリープ変形を呈するという問題を取り扱うわけであるが、圧縮下において不連続面が変形する場合、摩擦すべりの現象が起こることが予想される。したがって、本研究では、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。著者らの一部は、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)。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判断し、不連続面に相当する箇所に、この「摩擦すべり要素」を導入することとした。また、それ以外の材料基質部 (連続体部分) には、通常のソリッド要素を使用することとした。詳細については参考文献 (8) を参照されたい。

・不連続面のクリープ

一般に、不連続性材料は、主として材料基質部 (連続体部分) と不連続面群で構成される。材料基質部のクリープについては、前述の通り、Norton-Baily モデルを適用する。不連続面のクリープについては、本研究では、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、著者らの一部が提案しているモデル (8) を適用することとした。提案モデルは、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、次式に示すような摩擦係数低減モデルとなっている。

$$\mu(t) = \begin{cases} \mu_i & \dots\dots\dots (\sigma_n^J(t) < \sigma_y^J) \\ (\mu_i - \mu_r) \times \exp \{-D (\sigma_n^J(t) - \sigma_y^J)\} + \mu_r & (5) \\ \dots\dots\dots (\sigma_n^J(t) \geq \sigma_y^J) \end{cases}$$

ここで、 $\mu(t)$  と  $\sigma_n^J(t)$  は任意時刻の摩擦係数と不連続面における法線応力で、 $\sigma_y^J$  は不連続面に露出した部分の材料の初期降伏応力、 $D$  は比例定数である。実験から得られた経過時間とクリープひずみより、解析における 1 ステップ当たりの時間を決定する。このモデルでは、不連続面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、不連続面の摩擦係数  $\mu(t)$  が、その初期値  $\mu_i$  (静止摩擦係数) より低下し、最終的には残留値である  $\mu_r$  (動摩擦係数) に至る。摩擦係数が低下すると不連続面は摩擦すべりを生じ、不連続面は徐々に変形する。これによって、上下の不連続面が接触している面積が変化するため、応力状態が変化し、さら

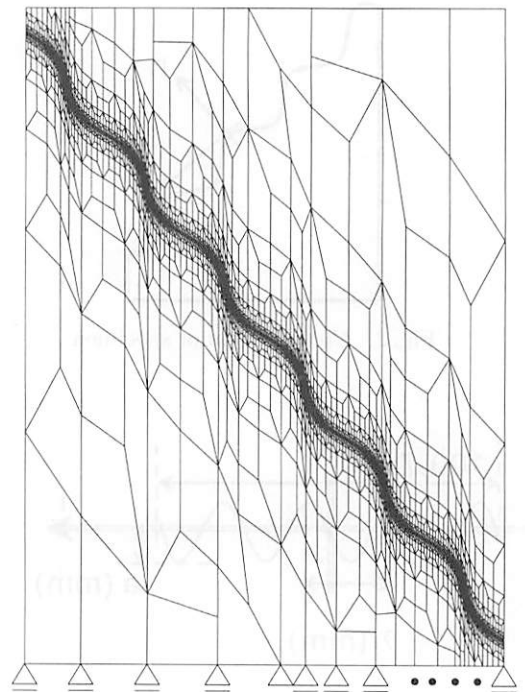


Fig. 4 Mesh creation for flow analysis

に変形が生じる。このような挙動は、巨視的には、クリープ挙動として表現される。

最終的に、上述した理論を組み合わせ、有限要素解析コードに組み込むことにより、不連続面を有する材料のクリープ挙動の数値解析が可能となる。

3.2. 解析概要

まず、不連続面を有しない供試体に関する試験と解析の比較を通して、式 (2) における係数  $A$ 、 $n$ 、および  $q$  を決定する。本来、これら 3 つの係数を決定するには、拘束圧なども変化させて複数の試験を行うべきであるが、並行して実施した試験では、不連続面を有する供試体と同時に供試体を作製する都合上、複数の供試体の作製ができなかったため、不連続面を有しない供試体については、1 例のみの試験となっている。しかしながら、これら係数の感度については、吉田ら (9) が議論しており、どの係数がどのような感度を有しているかを事前に把握していたことから、それぞれのケースについて 3 ケースずつ感度解析を行い、それらの比較検討より、試験をほぼ再現できるパラメータを決定した。本解析では材料基質部を弾性体としているが、事前の静的試験より、弾性係数はほぼ 520 MPa と得られており、解析でもこの値を用いた。ポアソン比を 0.25 と仮定し、その他の境界条件などは、全て実際の試験と同じになるように設定した。なお、解析メッシュを Fig. 4 に示すが、図は不連続面を有する解析メッシュをベースとしており、不連続面を有しない解析では、このメッシュより摩擦すべり要素を除去している。つまり、不連続面を有する解析では、Fig. 2 に示したような不連続面部分に摩擦すべり要素を導入するが、不連続面を有しない解析では、この要素を用いていない。

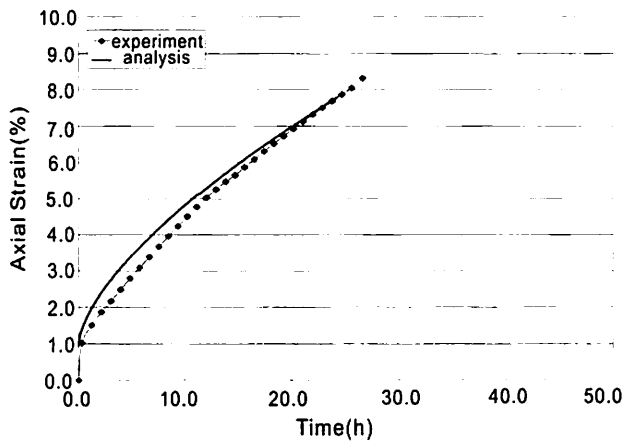


Fig. 5 Vertical strain (non-discontinuity)

不連続面を有しない供試体に対して、試験および解析における鉛直ひずみの結果を Fig5 に併せて示す。本論文は、不連続面を有しない供試体におけるクリープ挙動に関する検討が主たる目的ではないこと、また紙面の都合もあることから、ここでは、試験をほぼ再現できるパラメータ ( $A = 3.00 \times 10^{-5}$ ,  $n = 0.20$ , および  $q = 0.67$ ) を用いた解析結果と試験結果のみを示している。前述の通り、一日 (24 時間) で約 7.0 % のクリープが生じており、大きな値を示している。間隙や含水率が影響していると思われるため、これらの因子とクリープ変形の相関については、今後の課題である。なお、図より、試験結果と解析結果は良好な一致を示している。再現性などの課題は残るが、本研究は後述する不連続面の変形に焦点を当てているため、不連続面を有する供試体のクリープ解析においても、材料基質部に関しては、ここで示した解析パラメータを採用することとした。

次に、不連続面を有する供試体についても、試験と解析の比較を行う。不連続面を有する供試体に対する試験も、前々節にて説明した条件で実施している。解析では、上述した材料基質部に関するクリープモデルにおける係数のほかに、式 (5) に示す摩擦係数に関するパラメータ  $\mu_i$ ,  $\mu_r$ ,  $D$  および  $\sigma_y^j$  を定める必要がある。これらに関しても、基質部のクリープ解析と同様、それぞれに関して 3 つずつパラメータを上下に振り感度解析を実施したが ( $\mu_i$  は 0.10, 0.30, 0.50,  $\mu_r$  は 0.01, 0.10, 0.50,  $D$  は 1.00, 5.00, 10.0), 本論文では、紙面の都合により、試験をほぼ再現できるパラメータ (粘着力  $c=0.0$  MPa,  $\mu_i=0.30$ ,  $\mu_r = 0.10$ ,  $D = 5.00$  および  $\sigma_y^j = 1.00$  MPa) を用いた解析結果と試験結果を Fig6 に示す。図中の凡例は、experiment が実験結果、crack が本試験を模擬した解析結果、そして、noncrack が、本試験と同様の条件で不連続面を有しない条件にて実施した解析結果に、それぞれ対応する。 $\sigma_y^j$  については、試験結果において残留応力が 1.0 MPa ~ 2.0 MPa の範囲であったことと、不連続面は供試体作製時にブリージングの影響を受けやすいことから、その下限値である 1.0 MPa を採用している。その他のパラメータについては、あくまでも試験結果と合致するよう

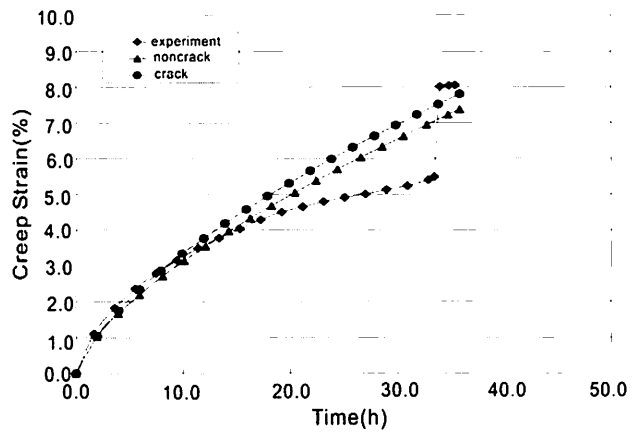


Fig. 6 Creep strain (discontinuity)

に定めたもので、客観的な決定方法については、今後の課題である。なお、その他のパラメータや境界条件などは、不連続面を有しない供試体の解析と同様である。

図より、経過時間で 15 時間あたりまでは、試験結果と不連続面を有する解析の結果は比較的良い一致を示しているが、その後は、解析結果の方が試験結果を上回っている。これは、蓄積されるひずみエネルギーはクリープ変形だけではなく、不連続面の摩擦や削り取りなどにも費やされるので、数値解析と試験では、どうしても乖離が生じる。せん断破壊が生じて、それが密着している場合は、軸方向の変形には影響を及ぼし難く、試験では、15 時間後位よりせん断破壊面の形成にエネルギーが消費されたのではないと思われる。本解析では供試体は連続体であって、終始、試験のように物理的に不連続面が摩擦したり削り取られることはない。一方、試験直後に供試体を観察すると、不連続面は摩擦などによってゼリー状になっている箇所も多数みられ、明らかに損傷している様子が確認できている。こうした損傷などに起因して、経過時間 15 時間より後では、試験結果と解析結果に乖離が見られるものと考えられる。なお、こうした乖離を踏まえ、材料基質部の破壊などを考慮することが今後の課題である。

試験と同様の条件で不連続面を有しない条件にて実施した解析 (noncrack) については、最終的に 0.5 % 強、不連続面を有する解析よりひずみの値が小さくなっている。つまり、この差が不連続面のクリープ変形量と位置付けられる。試験供試体は、その材料基質部がクリープ変形を生じやすい構成となっており、不連続面の変形によるクリープひずみは基質部のそれと比較すると小さな値となっている。しかしながら、不連続面を有しない供試体に対する試験では、透水性能の変化は認められず、一方、不連続面を有する供試体に対する試験では、透水性能の増加が見られた。Fig7 に、解析により得られた最終段階の変形の様子 (倍率 1 倍、最大開口量約 0.9 mm) を示すが、不連続面においては、水平方向に近い不連続面は密着したままであるが、鉛直方向に近い不連続面は開口している様子が伺える。その開口量も時間とともに徐々に増大している。試験においては、供試体をメンブレン

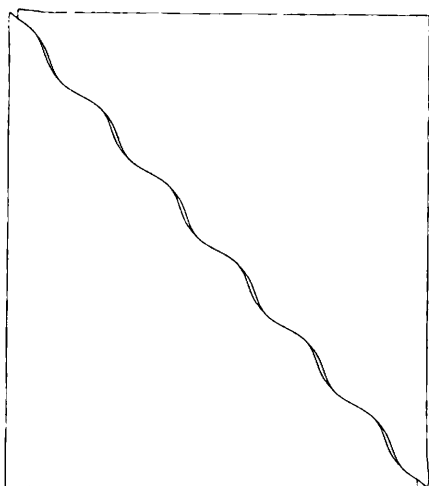


Fig. 7 Appearance of deformation (After 25 hours)

で覆ってしまうため、こうした不連続の変形を時々刻々追跡はできないが、試験後に取り出すと、ほぼ、Fig.7に近い形態を示していた。こうした不連続面の開口は、流量の増大、すなわち巨視的な透水係数の増大に及ぶものと思われる。これより、不連続性材料の場合、クリープ変形にもなって透水性能が変化する可能性があり、放射性廃棄物の地層処分などでは、こうした不連続面の時間依存的挙動にも注意を払う必要があるものと思われる。

#### 4. 結言

本研究では、不連続性岩盤が変形する際に変化する透水性能の評価も視野に入れ、不連続面を有する材料に対するクリープモデルの構築を行った。提案モデルでは、従来モデルと異なり、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、不連続面の変形を考慮に入れた。

また、並行して実施した試験の結果と解析結果の比較を通して、提案モデルの妥当性について検証した。試験では、不連続面を有しない供試体と有する供試体の2パターンを用意し、それぞれについて平面ひずみ型のクリープ試験を実施した。不連続面を有しない供試体において、試験結果と解析結果の比較より、試験結果を再現しうる解析パラメータを決定した。不連続面を有する供試体については、クリープ後半においてやや試験結果と解析結果に差が見られるものの、概ね、変形の傾向を再現することができた。用いた供試体は、材料基質部において大きなクリープ変形を呈するものの、解析によれば、少なからず不連続面が変形していると類推された。試験中、流量を測定した結果、不連続面を有しない供試体では、クリープ変形は大きいものの流量に変化はみられなかった。一方、不連続面を有する供試体では流量の変化も認められたことから、クリープ変形は小さいものの、透水性能の変化を支配しているのは不連続面の変形であるという結論を得た。解析では、不連続面が摩擦すべりを呈し、部分的に開口する状況を表現できており、本モデルを用いることで、

変形にもなって変化する透水性能を評価することが可能であると考える。

現在、本解析より得られた変位分布を用いて透水性能を評価し、それを基に不連続面内における流動解析を実施し、本研究と並行して実施した試験との比較などを行っているところである。また、材料の間隙率などを計測した上で材料基質部におけるクリープ挙動を把握すること、第3期クリープのモデル化を行うこと、そして各解析パラメータの客観的な決定方法について検討することなどが今後の課題である。

付記: 本研究の一部は、科学研究費補助金(課題番号17560427, 代表者:吉田秀典), かがわ産業支援財団(18か産技第42号, 吉田秀典)の助成を得て行った。

#### 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) Carter, N. L. and Hansen, F.D.: Creep of rock salt, *Tectonophysics*, **92** (1983), pp.275-333.
- (4) 矢川 元基, 宮崎 則幸: 有限要素法により熱応力・クリープ・熱伝導解析, サイエンス社, (1985), pp. 59-65.
- (5) 大久保 誠介, 西松 裕一, 緒方 義弘: 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*, **103** (1987), pp.293-296.
- (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*, **109** (1993), pp.209-214.
- (7) 電気事業連合会および核燃料リサイクル開発機構 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リサイクル開発機構, (2005), pp.3-50 - 4-70.
- (8) 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*, **52A** (2006), pp.1-8.
- (9) 吉田 秀典, 奥村 幸弘, 加藤 和之: トンネルの長期変形に影響を及ぼす因子に関する数値解析的研究, 第32回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, **32** (2003), pp.49-56.