

不連続性岩盤中の地下空洞における周辺岩盤のクリープ解析

CREEP ANALYSIS DISCONTINUOUS ROCK MASS AROUND UNDERGROUND CAVERN

巽 隆有¹⁾, 吉田 秀典²⁾, 藤原 真澄³⁾

Takakuni TATSUMI, Hidenori YOSHIDA and Masumi FUJIWARA

- 1) 香川大学大学院工学研究科 (〒 761-0396 高松市林町 2217-20, E-mail: s08g407@stmail.eng.kagawa-u.ac.jp)
2) 香川大学工学部 (〒 761-0396 高松市林町 2217-20, E-mail: yoshida@eng.kagawa-u.ac.jp)
3) 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, E-mail: m-fujihara@enecom.co.jp)

The existence of a discontinuity in a rock mass cannot be disregarded when a long-term metamorphosis of the rock mass around an underground cavern is discussed. The discontinuity can be opened, which increases the permeability of the rock mass. Furthermore, the opening displacement of the discontinuity is increased by deviatoric stress condition. Thus, in this study, the analyses of long-term deformation in the discontinuous rock mass around the cavern are conducted by the model which can consider the deformation of the discontinuity. In the result, it is found that the discontinuity is opened, but the deformation is converged. The proposed model is useful tool to analyse the long-term deformation of the discontinuous rock mass.

Key Words: creep, cavern, discontinuity, discontinuous rock mass

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、大久保ら^(3, 4) 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、材料の巨視的な変形を予測することは可能かもしれないが、不連続面の変化、ひいては透水性能の変化までは類推することができない。

筆者らの一部は文献^(5, 6)において、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変形に関して、不連続面の変形も考慮に入れたモデルを提案した。透水性能の変化を類推するためには、巨視的な変形に加え、不連続面の変形を把握することが必要となり、提案モデルはそのような不連続面の変形を考慮に入れたモデルである。提案モデルでは、適当なパラメータの設定を行うことで、短期および長期的な室内試験の再現が可能であることを確認している。文献⁽⁶⁾において、室内クリープ試験のレベルでは、不連続面の変形はほとんど確認されてはいないが、実際の地下空洞周辺岩盤の応力状態の下で不連続面がどのような挙動を呈するか考える必要がある。そこで、本研究では実際の地下空洞壁面の応力状態を模擬し、提案モデルによる長期のクリープ解析を実施し、長期における岩盤の健全性について議論することを目的とする。

2. 力学モデルの構成

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⁽⁷⁾ が岩塩の一軸クリープについて検討したクリープ則、

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

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ため、本研究では定温下を仮定し、Norton-Bailey の式⁽⁸⁾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-Bailey 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⁽⁸⁾。

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。ただし、これまでの室内試験においては、不連続面を有する巨視的な材料が第3期クリープに移行した際には、材料基質部が大きな変形を生じたのではなく、不連続面が滑動していた⁽⁶⁾。つまり、巨視的に観察される第3期クリープは材料基質部の変形に起因しておらず、こうしたことから、本研究では材料基質部における第3期クリープを考慮していない。

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^(5, 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、「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。詳しくは文献^(5, 9, 10)を参照されたい。

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直応力や粗さによって変化すると言われている。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^(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^(5, 9, 10)。

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

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、 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. 地下空洞解析

3.1. 解析概要

わが国では、地下 300m 以深の岩盤中に高レベル放射性廃棄物を地層処分することで検討が進められている。そこで、本研究では、地下空洞（処分坑道）の深度は 300m 程度に位置すると考え、応力状態を鉛直方向からは 10MPa（300m 以深の地圧に相当）、解析領域の左右どちらかに地下空洞が位置すると仮定し、水平方向から 0.5MPa、岩盤側を 2.0MPa の偏圧を加えてクリープ解析を行った。単位体積質量を 2.0g/cm³ と仮定すると、300m 付近では応力が 6MPa 程度となる。坑道などトンネルを掘削した場合、弾性論では、トンネルの周方向に 2 倍程度の応力となることから、上記のような値を上載圧として採用した。また、掘削後は放射方向の応力が解放され、よりトンネルに近い側でそれが顕著となるため、側方圧として、上記のように設定した。対象となる地山が特定しておらず、地圧だけでなく岩盤の各種特性も定まっていないことから敢えて掘削解析などは行っていない。

本解析で対象する岩盤は、文献⁽⁶⁾で解析対象とした軽石凝灰岩が卓越すると想定し、解析パラメータについては、文献⁽⁶⁾で用いた値を採用した。なお、室内試験においても明確な塑性変形を確認することがなかったことから、塑性変形は考慮しないこととした。

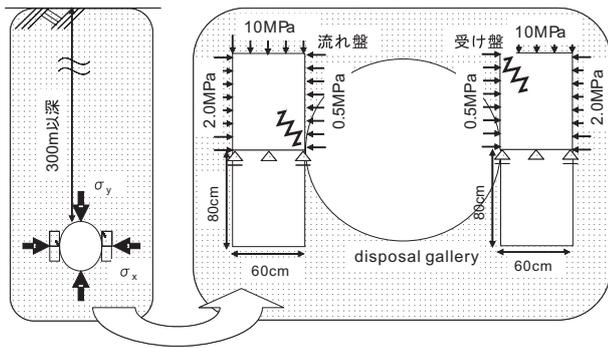


Fig. 1 Concept of a cavern

前述の通り、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。高レベル放射性廃棄物の地層処分において、放射性核種は地下水によって輸送されるため、透水挙動の把握が重要となる。通常、地下 300m 以深の岩盤中は高い地圧によって地下水の流れは緩慢であるが、不連続面が存在し、その不連続面が変形することによって、透水係数が変化するとされている。したがって、本解析では、1600mm×600mm の解析領域に水平方向から約 128 度の方向（反時計周り）に長さ 503.5mm の不連続面が存在するものとした。また、不連続面がフラットであると変形しても透水性の増大幅は小さいことが予想されるため、本解析では、三角波形状を有する不連続面形状を考えた。不連続面は、地下空洞壁面から解析領域の中央付近に単一不連続面が存在するものと考え、当該箇所に摩擦すべり要素と摩擦係数低減モデルを適用して解析を行うこととした。摩擦係数低減モデルについても詳細なパラメータが存在しないことから、文献⁽⁵⁾で用いたパラメータを採用した。つまり、式(5)における岩盤の初期降伏応力 $\sigma_y = 2.0\text{MPa}$ 、初期摩擦係数 $\mu_i = 0.5$ 、残留摩擦係数 $\mu_r = 0.3$ 、低減率 $D = 0.5$ とした。不連続面の傾斜に関しては、流れ盤と受け盤を想定した。地下空洞建設の際、空洞壁面に不連続面が露出している場合、通常、グラウティング等が施されるため、壁面から確認できる不連続面はさほど問題ないものと考えられる。しかしながら、不連続面がトンネル近傍の岩盤内に完全に包含されている場合、不連続面の有無を壁面観察では確認できないため、その場合についても検討することとし、計 4 パターンの解析を行うこととした (Table 1 参照)。処分坑道周辺における解析のイメージ図を Fig. 1 に示す。なお、長期クリープ挙動を検討するにあたって解析期間は 30 年として、2 次元平面ひずみの条件下で解析を行った。また、解析は Fig. 1 に示すように半分の領域にて解析を行った。

3.2. 解析結果

各パターンの 30 年後の変形状況図を Fig. 2 から Fig. 5 に示す。pattern1 (Fig. 2 参照) と pattern3 (Fig. 4 参照) は変形の倍率は 1 倍とし、pattern2 (Fig. 3 参照) と pattern4 (Fig. 5 参照) は変形量がごく微小なため、変形の倍率を 5 倍として示している。したがって、実際の pattern2 と pattern4 の変形量は、pattern1 と pattern3 よりも小さいことを念頭

Table 1 Analysis pattern of discontinuity

pattern	地層の傾斜	不連続面形状
pattern1	流れ盤	壁から中心までの単一不連続面
pattern2		内部に単一不連続面
pattern3	受け盤	壁から中心までの単一不連続面
pattern4		内部に単一不連続面

Table 2 Width of open space of all analysis pattern

pattern	開口幅	不連続面内透水係数
pattern1	0.74 cm	4454.3 cm/s
pattern2	0.16 cm	208.2 cm/s
pattern3	0.58 cm	2736.3 cm/s
pattern4	0.09 cm	65.9 cm/s

に入れて頂きたい。各 pattern において左右で異なる側方圧を作用させているため、共通して、側方圧が小さい方向 (0.5MPa)、つまり、地下空洞に面した方向に変形が卓越していることがわかる。すべての pattern において不連続面の滑動が確認され、大きく不連続面が開口する結果となった。ここで、各 pattern の開口幅を Table 2 に示す。開口幅を確認した場所は、不連続面の中で一番変形が顕著で、開口幅が大きくなる点 (Fig. 2 から Fig. 5 中の印) とした。これより、処分坑道内部に不連続面が露出している場合、不連続面の開口幅は大きくなっていることがわかる。これは、流れ盤、受け盤に関わらず、地下空洞方向へ変形の制約が小さく (側方圧が小さい)、一方で、地山側から地下空洞方向への側方圧が大きいことから偏差的な応力状態となり、こうした偏差的な応力状態が不連続面の滑動を容易としているためであると考えられる。それに対し、不連続面が地下空洞には露出していない場合は、不連続面は連続体である岩盤に包含されているため、滑動が制約を受けている。側方圧が左右から一定となる室内クリープ試験供試体およびそれを模擬した解析においては、いずれも不連続面の変形は認められなかったが⁽⁶⁾、地下空洞近傍という偏差的な応力状態においては、不連続面は変形し、また、その開口量も大きい。一般に、地下水流れは間隔の狭い 2 枚の平行平板間の流れ (Hele-Shaw 流れ) に従うとされている。Table 2 には最終段階での開口幅から、不連続面内浸透流の透水係数を平行平板流れを仮定し算出した結果も併せて示す。ここで、地下水の温度を 20 度として動粘性係数 $\nu = 1.0 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$ として計算している。不連続面の開口量は 3 次的に無限遠方まで連続しているわけではないので、実岩盤における巨視的な透水係数を議論する際、Table 2 に示した不連続面内の透水係数が支配的になることはなく、むしろ、岩盤基質部の透水係数に支配される。また、地下 300m 以深においては動水勾配が極めて小さいことから、水の流動も緩慢となる。しかしながら、不連続面に流れが集中した場合、廃棄体より漏洩して拡散する放射性核種を岩盤が吸着できないということも考えられ、この場合、

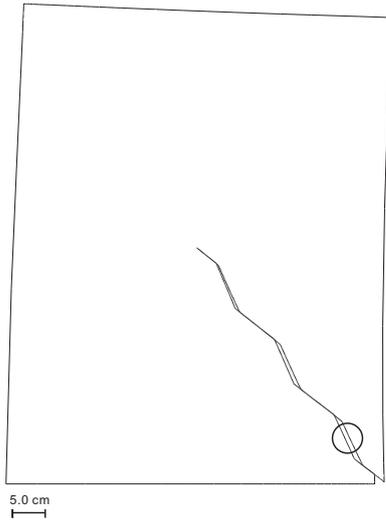


Fig. 2 Deformed Shape (pattern1, 30 years later, scale factor:1)

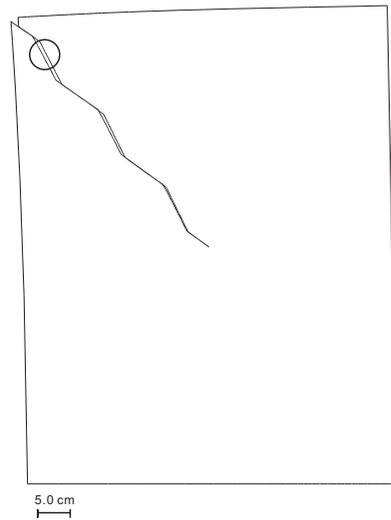


Fig. 4 Deformed Shape (pattern3, 30 years later, scale factor:1)

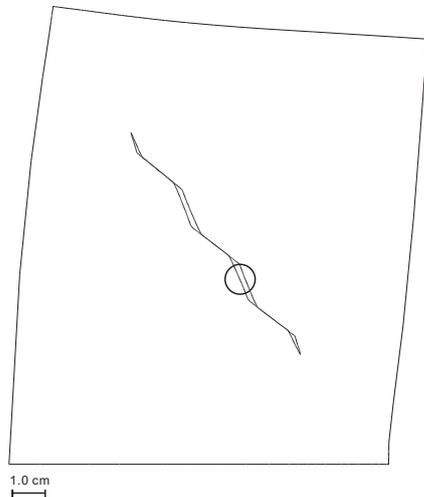


Fig. 3 Deformed Shape (pattern2, 30 years later, scale factor:5)

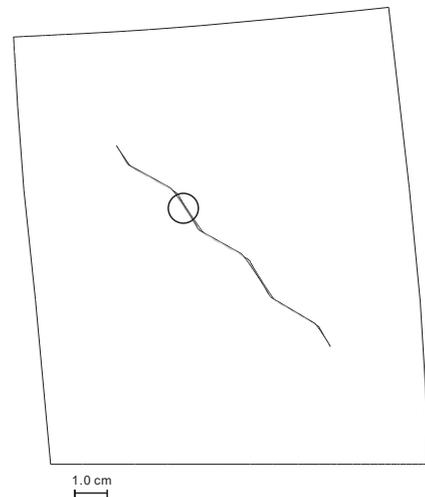


Fig. 5 Deformed Shape (pattern4, 30 years later, scale factor:5)

処分シナリオの修正が必要となる。

また、Table 2 から、流れ盤と受け盤では流れ盤の方が開口量は大きくなっていることがわかる。今回の応力設定では、流れ盤、受け盤における主応力方向はそれぞれ、Fig. 6 および Fig. 7 のようになっている。流れ盤 (pattern1) においては、Fig. 6 に示すように最大主応力が不連続面をせん断するような方向に作用しているため、不連続面の滑動を容易にしていると考えられる。一方、受け盤 (pattern3) においては、Fig. 7 に示すように最大主応力が不連続面を拘束するように作用しているため、不連続面の滑動を制約したものと考えられる。

Fig. 8 は接触している不連続面における接触面に沿った方向の時間 - 変位関係を表したものである。pattern1 と pattern3 に関しては地下空洞側に位置する不連続面の端部における変位量を、pattern2 と pattern4 に関しては不連続面の中央における変位量をそれぞれプロットしている。開口幅 (Table 2) と同様、地下空洞へ不連続面が露呈している場合 (pattern1,

pattern3) の変位は大きくなり、岩盤内に包含された不連続面の場合 (pattern2, pattern4) の変位は小さくなっていることがわかる。pattern1 では不連続面に沿って約 1.5 cm 進展しているが、その挙動は 5000 日 (約 14 年) を越えたあたりから収束する傾向にあり、他のパターンでも同様に、pattern2 では 1600 日 (0.4 cm)、pattern3 では 6000 日 (1.3 cm)、pattern4 では 2000 日 (0.4 cm) 程度で収束する傾向があることがわかる。また、受け盤よりも流れ盤の方が速く収束する傾向にあることがわかる。このことから、偏差的な応力状態では、不連続面は開口するものの、その挙動は収束に向かうことがわかる。

最後に、各 pattern における主応力図を Fig. 9 から Fig. 12 に示す。図より、不連続面先端部分に応力集中が発生していることがわかる。pattern1 では約 90MPa、pattern2、pattern3、pattern4 では不連続面先端に約 60MPa の応力集中が発生している。本来、このような応力集中が不連続面端部で発生すると、不連続面の進展が考えられるが、本モデル

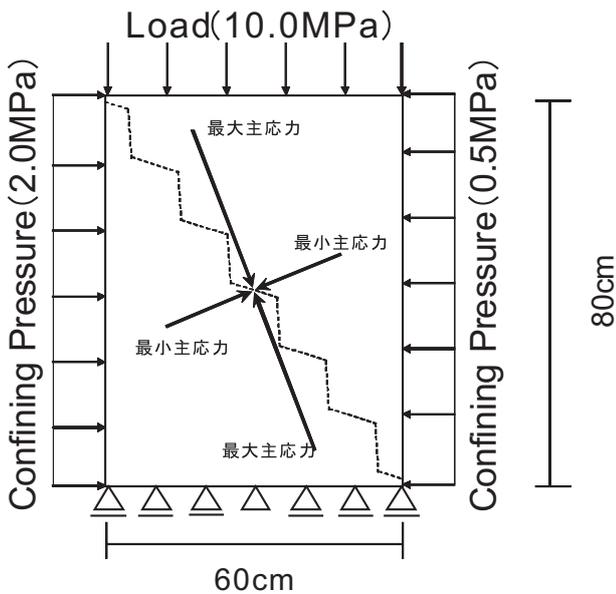


Fig. 6 Stress condition (pattern1)

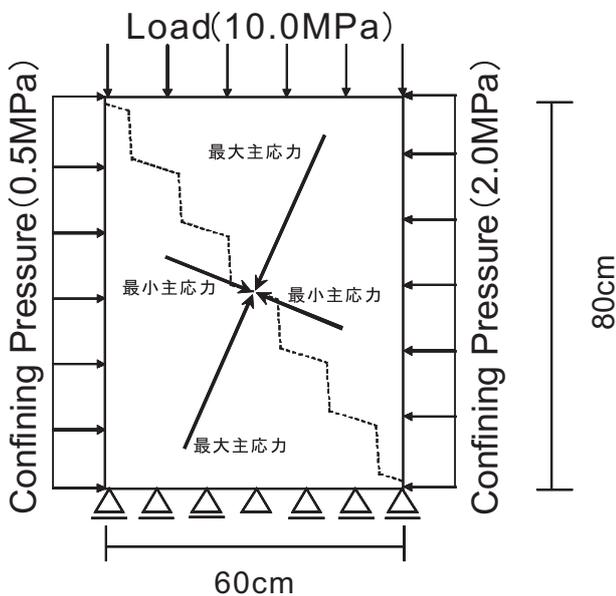


Fig. 7 Stress condition (pattern3)

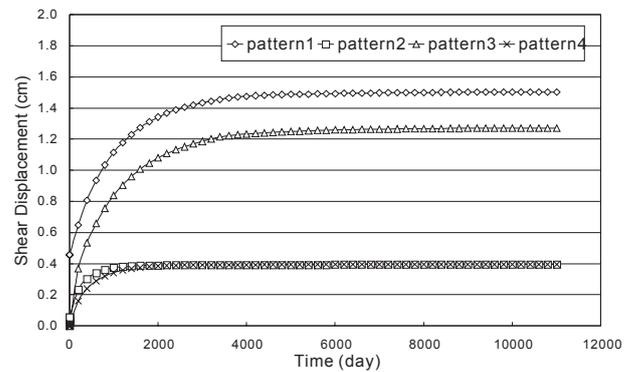


Fig. 8 Time V.S. shear displacement

- 地下空洞壁面に露出していない不連続面も変形のレベルは低いものの、開口する。
- 不連続面は滑動し、開口するものの、その挙動は収束に向う。
- 不連続面先端部において応力集中が発生することから、不連続面が進展する可能性がある。

本論文では滑動によって生じる開口幅から平行平板流れを仮定し、透水係数を求めている。しかしながら、力学的開口幅から求まる透水係数と実際の試験等によって求まる透水係数（水理学的開口幅）には相違があるというのが一般的で⁽¹⁴⁾、著者らの実施した試験でも同様であった。本論文で算出した透水係数は力学的開口幅に基づいた値であり、これは水理学的開口幅から求まるものとは異なる可能性がある。このような、力学的開口幅と水理学的開口幅の相違についても今後の課題としたい。

変形は小さくとも不連続面の変形により透水性が増し、場合によっては材料全体の透水係数が上昇する可能性があることから、不連続面のクリープ変形に着目した本研究のような解析は必要であると考える。

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，(1999)，核燃料サイクル開発機構。
- (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，(2000)，核燃料サイクル開発機構および電気事業連合会。
- (3) 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(1987)，pp. 293-296。
- (4) 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(1993)，pp. 209-214。

では、このような不連続面の進展は考慮に入れていない。このような不連続面の進展は、不連続性岩盤の長期挙動の予測においてでは重要なことであるため、これについても今後の課題としたい。

4. まとめ

本研究では、室内試験を再現することのできる不連続面の変形も考慮に入れたクリープモデルを用いて、地下空洞周辺岩盤のクリープ解析を行った。以下に本研究で得られた知見を挙げる。

- 室内試験では左右からの側方圧が同レベルであるため不連続面は滑動し難く、供試体の変形の大部分が材料基質部の変形であったが、地下空洞のような偏差的な応力状態では不連続面は滑動し、開口する。

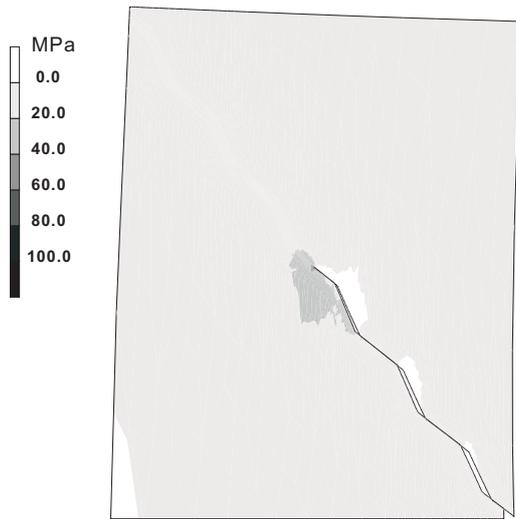


Fig. 9 Distribution of principal stress (pattern1, 30 years later, scale factor:1)

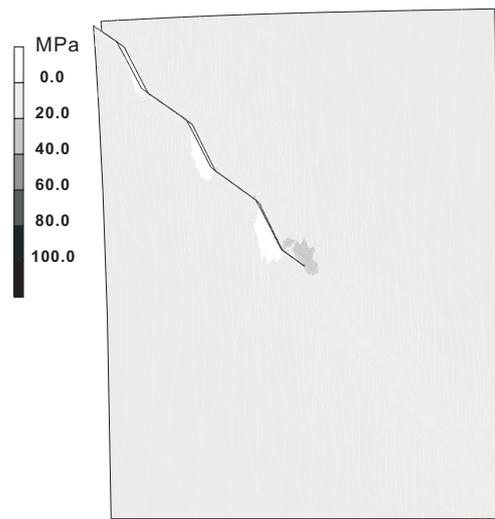


Fig. 11 Distribution of principal stress (pattern3, 30 years later, scale factor:1)

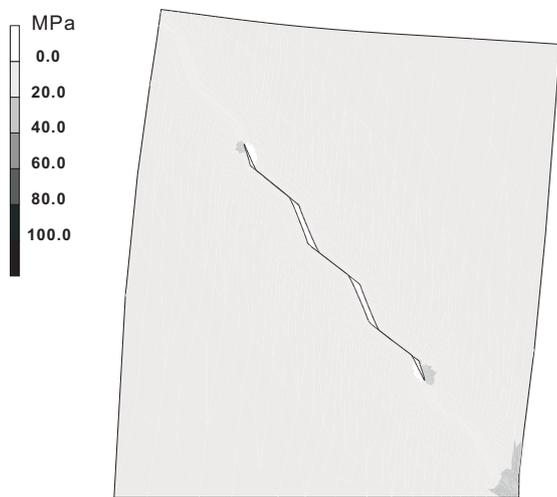


Fig. 10 Distribution of principal stress (pattern2, 30 years later, scale factor:5)

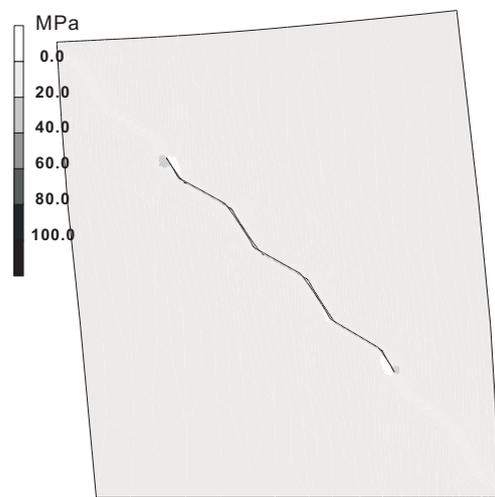


Fig. 12 Distribution of principal stress (pattern4, 30 years later, scale factor:5)

- (5) 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(2008) pp. 31-36.
- (6) 巽隆有, 吉田秀典: 不連続性岩盤のクリープ挙動に関する数値解析的研究, 応用力学論文集, Vol.12(2009). pp. 255-264.
- (7) Carter, N.L. and Hansen, F.D.: Creep of rock salt, Tectonophysics, Vol.92(1983), pp. 275-333.
- (8) 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, (1985), サイエンス社, pp. 59-65.
- (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(2006), pp. 1-8.
- (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(2005), pp. 51-58.
- (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-50(2000), pp. 255-266.
- (12) 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/III-55(2001), pp. 245-261.
- (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(2000), pp. 145-158.
- (14) 朴赫, 長田昌彦, 渡辺邦夫: 岩石のせん断-透水-可視化同時試験装置の開発とそのデータ解析法, 応用地質, 第49巻, 第5号(2008), pp. 266-276.