

## 軟岩におけるクリープモデルの提案と地下空洞のクリープ解析

PROPOSAL OF CREEP MODEL FOR SOFT ROCK  
AND CREEP ANALYSIS OF CAVERN吉田 秀典<sup>1)</sup>, 野崎 郁郎<sup>2)</sup>, 加藤 和之<sup>3)</sup>, 関根 裕治<sup>4)</sup>, 小山 俊博<sup>5)</sup>, 鈴木 康正<sup>6)</sup>, 金子 岳夫<sup>7)</sup>Hidenori YOSHIDA, Ikuro NOZAKI, Kazuyuki KATO, Yuji SEKINE,  
Toshihiro KOYAMA, Yasumasa SUZUKI and Takeo KANEKO

- |                     |             |                 |  |
|---------------------|-------------|-----------------|--|
| 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: s05g410@stmail.eng.kagawa-u.ac.jp) |
| 3) 東京電力(株) 原子力・立地本部 | (〒 100-8560 | 千代田区内幸町 1-1-3,  | E-mail: Kato.Kazuyuki@tepcoco.jp)          |
| 4) 東京電力(株) 技術開発研究所  | (〒 230-8510 | 横浜市鶴見区江ヶ崎町 4-1, | E-mail: sekine.yuji@tepcoco.jp)            |
| 5) 東電設計(株) 第一土木本部   | (〒 110-0015 | 台東区東上野 3-3-3,   | E-mail: TKOYAMA@tepscoco.jp)               |
| 6) 東電設計(株) 第一土木本部   | (〒 110-0015 | 台東区東上野 3-3-3,   | E-mail: asuzuya@tepscoco.jp)               |
| 7) 東電設計(株) 第一土木本部   | (〒 110-0015 | 台東区東上野 3-3-3,   | E-mail: caneko@tepscoco.jp)                |

In Japan, it is planned to dispose low-level radioactive 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 equivalent creep law which is modified from Norton-Baily creep model is proposed so as to remove the demerit of Norton-Baily creep model in an analysis of long-term behaviors of soft rock. First, the sensitive analyses are carried out to seize the performances of the proposed model. Secondary, the proposed model is implemented into a finite element analysis code by which a creep test is reproduced. From the comparison of numerical results and experimental data, it turned out to reproduce a real phenomenon with setting the proper parameters of the proposed model. Finally, a creep problem of underground cavern is analyzed, and the availability of the proposed model is discussed.

**Key Words:** Creep, Soft Rock, Low-level Radioactive Waste, Norton-Baily model

## 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、TRU 廃棄物、低レベル放射性廃棄物の 3 種類に大別されるが、低レベル放射性廃棄物については、既に処分事業が進行しつつある。

低レベル放射性廃棄物の多くは素堀り処分、あるいはコンクリートピット処分など、地表面近くに処分する事業が進められてきた。しかしながら、低レベル放射性廃棄物の中でも放射能レベルが比較的高い部類に属する廃棄物については、十分に余裕を持った深度(約 50~100 m)への地層処分が検討されており、この場合、各種放射性廃棄物の特性(半減期など)を考慮すると、処分には百年程度の時間が必要であると言われている。処分の性格上、長期に亘って処分施設全体

の安定性を確保する必要があり、特に、処分坑道(地下空間)についても例外ではない。

処分場の深度が 50~100 m ということを考慮すると、周辺の地質は軟岩ベースのものが主体となるものと考えられる。軟岩のような材料の長期安定性を議論するには、数値解析による検討が不可欠となる。岩盤の分野では、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り、地点毎に採取されたコアを用いた実験より力学特性が決定されることが多い。それら大半が実験結果をフィ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。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、一般的に、結晶質材料に対しては必ずしもよくあてはまらない<sup>(1)</sup>。軟岩の大半は結晶質ではないが、ひずみ履歴

的な挙動を呈する場合も多々あり、上述したことを加味すれば、その挙動を微分方程式で記述できる、いわゆるクリープモデルの適用も視野に入れるべきと考える。

Carter & Hansen<sup>(2)</sup> は岩塩の一軸クリープ試験を基にクリープモデルを提案している。このモデルは、定温下において Norton Baily のクリープモデル<sup>(3)</sup> と合致するが、時間に関するべき乗関数となるため、クリープ量が延々と増え続ける結果となる。しかしながら、トンネルに代表されるような既往の岩盤構造物ではそのような傾向は見受けられず、室内実験程度の時間スケールにおいてその挙動再現が可能であっても、超長期にわたる実構造物のクリープ挙動を再現できるとは限らず、より現実に近いモデルが不可欠であると考える。

そこで本研究では、Norton Baily のモデル<sup>(3)</sup> を修正し、既往の研究で得られたクリープ現象に合致するようなモデルの提案を行う。さらに、提案モデルを有限要素解析コードに組み込み、地下空洞に対するクリープ解析を実施すると同時に、そのパフォーマンスについて考察を加える。

## 2. 軟岩のクリープモデル

前出の Carter & Hansen<sup>(2)</sup> が岩塩の一軸クリープについて検討したクリープモデルにおいては、相当クリープひずみ  $\bar{\epsilon}^c$  が次式で与えられている。

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

ここで、 $\sigma$  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。式(1)は、定温下では、次式に示す Norton Baily のクリープモデルと等価になる。

$$\bar{\epsilon}^c = A\sigma^n t^q \quad (2)$$

ここで、 $A=kT^p$ —一定である。式(2)より、このモデルではクリープひずみは収束することなく、延々と増加し続けることが分かる<sup>(4)</sup>。前述の通り、これは実際の地下空洞において観測される事実と異なっており、このモデルを用いて超長期にわたる地下空洞周辺のクリープ挙動を議論することは難しいものと思われる。

ここで、このモデルにおける時間に関するべき乗定数  $q$  を時間の関数  $q(t)$  と仮定すると、式(2)は、

$$\bar{\epsilon}^c = A\sigma^n t^{q(t)} \quad (3)$$

となる。したがって、ひずみ速度  $\frac{d\bar{\epsilon}^c}{dt}$  は、

$$\frac{d\bar{\epsilon}^c}{dt} = A\sigma^n t^{q(t)} \left( \frac{dq}{dt} \ln t + q(t) \frac{1}{t} \right) \quad (4)$$

となる。Norton Baily のモデルの場合、相当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相当クリープひずみ速度は時間とともに比例的に減少するが(後掲する Fig. 1 および Fig. 2 を参照)、文献<sup>(5)</sup>によれば、実際の岩盤ではある一定の時間が経過するとクリープひずみ速度は急速に減少する。こうした事実と合致させることを目的として、本研

究では、 $\left( \frac{dq}{dt} \ln t + q(t) \frac{1}{t} \right) \propto \frac{\alpha}{e^{\beta t}}$  (ただし、 $\alpha$  と  $\beta$  は定数) と仮定し、この条件の下で微分方程式を解くと

$$q(t) = \frac{1}{\ln t} \left( -\frac{\alpha}{\beta} e^{-\beta t} + \gamma \right) \quad (5)$$

となる。ここで  $\gamma$  は定数である。さらに、 $\frac{dq}{dt}$  は

$$\frac{dq}{dt} = -\frac{1}{t(\ln t)^2} \left( -\frac{\alpha}{\beta} e^{-\beta t} + \gamma \right) + \frac{1}{\ln t} (\alpha e^{-\beta t}) \quad (6)$$

となり、両辺に  $\ln t$  を掛けて整理すると、

$$\frac{dq}{dt} \ln t + q(t) \frac{1}{t} = \alpha e^{-\beta t} \quad (7)$$

となる。したがって、相当クリープひずみ速度  $\frac{d\bar{\epsilon}^c}{dt}$  は、

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{\epsilon}^c}{dt} = \dot{\bar{\epsilon}}^c &= A\sigma^n t^{\frac{1}{\ln t} \left( -\frac{\alpha}{\beta} e^{-\beta t} + \gamma \right)} \alpha e^{-\beta t} \\ &= A\sigma^n e^{\left( -\frac{\alpha}{\beta} e^{-\beta t} + \gamma \right)} \alpha e^{-\beta t} \\ &= A e^{\gamma} \alpha \sigma^n e^{\left( -\frac{\alpha}{\beta} e^{-\beta t} - \beta t \right)} \end{aligned} \quad (8)$$

となる。ここで、 $A e^{\gamma}$  をある任意定数に置き換えても良いが、微分する前の式(3)と対比する目的で、敢えて本稿では、これらを置き換えないこととする。

こうしてスカラー量として定義された相当クリープひずみを多軸応力状態に拡張するには、塑性力学における normality rule を相当クリープひずみ速度に適用し、相当クリープひずみ速度テンソル  $\dot{\bar{\epsilon}}_{ij}^c$  を以下のようにを定義する。

$$\dot{\bar{\epsilon}}_{ij}^c = \dot{\bar{\epsilon}}^c \left\{ \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_{ij}} \right\} \quad (9)$$

さらに、式(8)の単軸応力  $\sigma$  を相当応力  $\bar{\sigma}$

$$\begin{aligned} \bar{\sigma} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \{ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 \\ &\quad + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \} \end{aligned} \quad (10)$$

と置き換えることで、多軸状態におけるクリープモデルが完成する<sup>(3)</sup>。

## 3. 各パラメータが結果に及ぼす影響

本章では、前章で提案したモデルについて、そのパラメータの感度について考察を加える。式(8)より提案モデルのパラメータは  $A$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  の4つである。 $A e^{\gamma}$  は、本来であれば1つのパラメータとして扱えるが、ここでは  $e^{\gamma}$  を固定値とし  $A$  のみを変動させる。つまり、 $A$  を10倍、あるいは10分の1にするということは、式全体に乗じられる  $A e^{\gamma}$  という定数を10倍、あるいは10分の1にすることと等価である。また、式全体に乗じられる定数でもあり、かつ、べき乗定数でもある  $\alpha$  は、式全体に乗じられる場合は、上述した  $e^{\gamma}$  と同様、 $A e^{\gamma} \alpha$  のようにまとめてしまうことができる。その場合、どれか1つのパラメータだけを変化させれば、本モデルの感度を把握することができる。また、べき乗定数としての  $\alpha$  は、 $\beta$  より大きいと  $e^{-\frac{\alpha}{\beta}}$  の値が極めて小さくなる傾向にあり、 $\beta$  と同等あるいは小さい値である必要がある。この場合も、 $\alpha$  を固定して  $\beta$  を変化させれば本モデルの感度

Table 1 Analysis cases (sensitive analysis)

	1	2	3	4	5	6
$A(\times 10^{-3})$	1.00	1.00	1.00	1.00	10.0	0.10
$\alpha(\times 10^{-3})$	5.00	1.00	5.00	5.00	5.00	5.00
$\beta(\times 10^{-3})$	5.00	1.00	50.0	500	5.00	5.00
$\gamma$	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0

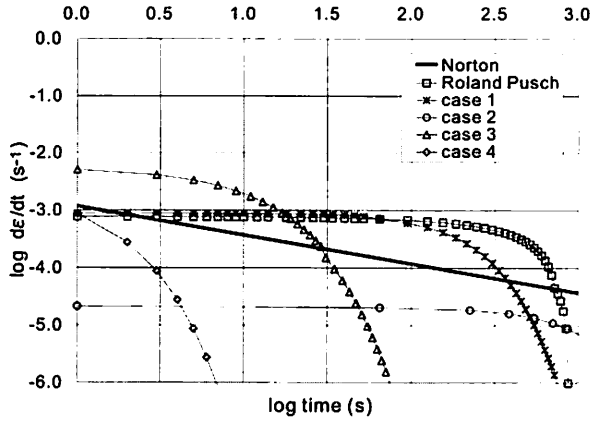


Fig. 1 Strain velocity v.s. time (with various  $\alpha$ )

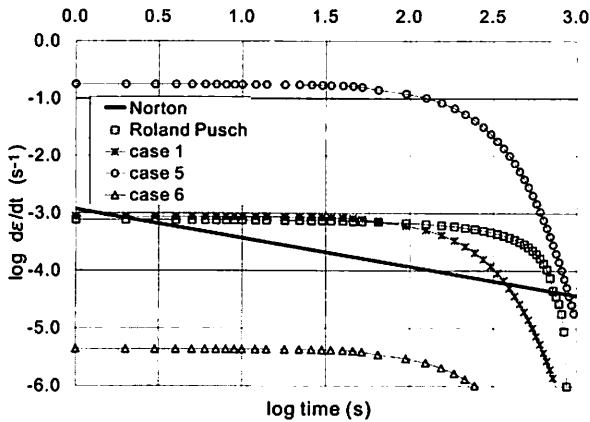


Fig. 2 Strain velocity v.s. time (with various  $A$ )

を把握することができるので、 $\alpha$ についても固定値とする。つまり、以降に示す感度解析では、 $\beta$ と $A$ のみを変化させて解析を行い、これらが相当クリープひずみに与える影響について議論する。解析ケースの一覧をTable 1に示す。なお、本章の解析では、载荷応力を2.2 MPa(次章の解析で用いる载荷応力)、応力に対するべき乗定数 $n$ を文献(4)より0.2と仮定して用いた。

前述の通り、実際の岩盤では、クリープひずみ速度はある一定の時間が経過すると急速に減少する傾向にある(5)。一方、Norton Bailyのモデルの場合、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する。つまり、両者には大きな乖離が存在する。既往の知見(5)、Norton Bailyモデル、そして本研究で提案したモデルより求まる時間(秒)と相当クリープひずみ速度の関係を、Case1からCase4についてはFig. 1に、Case1, Case5およびCase6についてはFig. 2に示す。

なお、両グラフとも、時間(秒)と相当クリープひずみ速度の関係を両対数グラフにてプロットしている。

Case1 ~ Case4では $A$ を固定し、 $\beta$ を変動させている。ただし、Case2は、Case1よりも $\beta$ が小さいので、上述した観点から $\alpha$ も同様に小さくしているが、Case3とCase4については、Case1よりも $\beta$ が大きいため、 $\alpha$ はCase1と同じ値としている。

Case1とCase2では $\frac{\alpha}{\beta}$ は同じ値となるので、Case1とCase2を比較すると、式(8)より、指数部分のべき乗部分の $\beta t$ が相当クリープひずみ速度に影響を及ぼすこととなる他、 $\alpha$ が式(8)全体の係数であることから、同じく相当クリープひずみ速度に影響を及ぼす。Case2では $\alpha$ が小さくなることで、Case1より切片の値が小さくなり、また、指数部分のべき乗部分の $\beta t$ が小さくなることで速度の低下が鈍化し、Case1に比べ、曲線全体が右側にシフトする。

Case1に対してCase3およびCase4ではそれぞれ、 $\beta$ のみを10倍、100倍にしている。 $\beta$ が $5.0 \times 10^{-3}$ の場合(Case1)は、200秒を超える頃から式(8)における $-\frac{\alpha}{\beta}e^{-\beta t} - \beta t$ の指数部分の影響が増して、相当クリープひずみ速度が加速して低下する。 $\beta$ を増大させることでそのタイミングが早まるため、Case1に比べ、曲線全体が左側にシフトする。つまり、 $\beta$ は相当クリープひずみ速度が加速して低下するタイミングを支配している。一方、 $\alpha$ は $-\frac{\alpha}{\beta}e^{-\beta t}$ の定数としてしか機能していないので、速度の低下に対しては、 $\beta$ ほど感度はないが、式全体にかかっているため、この値を変化させることで曲線が上下することとなる。

逆に、Case5とCase6では $\beta$ を固定し、 $A$ を変動させている。 $A$ も式(8)の全体にかかっている定数であるため、 $A$ (あるいは $\gamma$ )を変化させることで曲線が上下することとなる。なお、比較のために、両図には、文献(5)において示された実験曲線に対する回帰式( $\dot{\epsilon}^c = 7.7 \times 10^{-4}(1-t/770)$  ( $t < 770s$ ), 凡例はRoland Pusch)と、Norton Bailyモデル( $A = 1.0 \times 10^{-3}$ , 凡例はNorton)を併せてプロットしたが、Norton Bailyモデルと実験式には大きな乖離があるのに対し、提案モデルにおいては、パラメータを適切に設定することで(例えば、Case1)、実験に近い曲線が得られる。なお、文献(5)において示された実験回帰式は岩塩を用いたクリープ試験において得られた実験結果のみに合致するように設定されたものであること、また、時間以外の要因、例えば応力や温度などは全く考慮していないことから、他の供試体について適用できるものではない。

#### 4. 実験との比較

本研究において提案するクリープの構成モデルを有限要素解析コードに組み込み、任意の境界条件下におけるクリープ解析手法を開発した。そこで本章では、実験結果との比較を通して提案手法のパフォーマンスについて考察を加える。比較の対象とした実験は、著者らの一部が実施した静的試験(圧密排水試験=CD試験)およびクリープ試験である(6)。

実験供試体は青森県下北半島付近の糜架層にて取得した

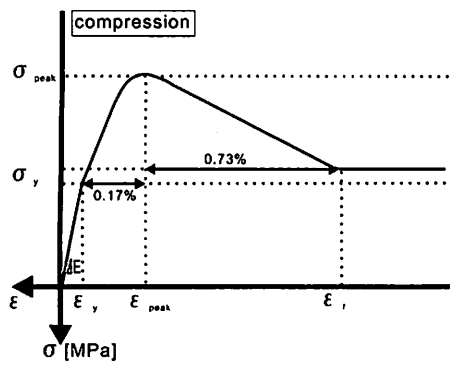


Fig. 3 Stress - strain relationship

Table 2 Analysis cases (creep test)

	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5
$A(\times 10^{-6})$	1.00	0.50	2.00	1.00	1.00
$\alpha(\times 10^{-6})$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
$\beta(\times 10^{-6})$	3.00	3.00	3.00	4.00	2.00
$\gamma$	8.00	8.00	1.00	8.00	8.00

ボーリングコアであり、軽石などが混じる凝灰岩質の岩盤である。CD試験は、土木学会「軟岩の調査・試験の指針(案)」に示されている軟岩の三軸圧縮試験に準拠し、荷重条件をひずみ制御、ひずみ速度を0.01%/min、有効拘束圧を、0.1MPa、0.5MPa、1.0MPa、1.5MPaの4種類について実施している。供試体のサイズは高さ100mm、直径50mmの円柱供試体である。実験の詳細については、文献(6)を参照されたい。なお、解析においては供試体を等方均質材料と仮定していることから、実験供試体に対する4分の1領域を解析対象とし、その境界条件が実験とほぼ一致するように、底面および供試体の内側に位置する側面の変位については、面に対する垂直方向成分を固定、せん断方向成分をフリーとした。

当該岩盤は弾塑性的な挙動を呈するため、まず、その応力-ひずみ関係を定義することとした。本解析では、初期降伏応力( $\sigma_y$ )に到達した後は、ひずみ硬化しながらピークに達し、そしてピーク後は初期降伏応力までひずみ軟化し、それ以降は残留状態に至ると仮定した。降伏関数としては、Drucker-Pragerの条件を採用した。実験結果との比較より、ピーク強度 $\sigma_{peak}$ とひずみ $\epsilon_{peak}$ を $\sigma_{peak}=1.67\sigma_y$ 、 $\epsilon_{peak}-\epsilon_y=0.17\%$ 、 $\epsilon_r-\epsilon_{peak}=0.73\%$ と定めた。構成モデルの概略をFig.3に示す。

また、解析において必要となる入力パラメータは弾性係数、ポアソン比、粘着力および内部摩擦角であるが、弾性係数については文献(6)を参考に750MPa(軽石凝灰岩)と定め、その他のパラメータについては、感度解析を実施した結果、ポアソン比を0.25、粘着力を1.00MPa、内部摩擦角を31.0度と決定した。これらの値は、文献(6)に示された実験値(軽石凝灰岩で、粘着力=0.98MPa、摩擦角=28.5度)に近い結果となった。なお、本稿はクリープのモデル化と解析に焦点をあてているため、弾塑性解析におけるパラメータ

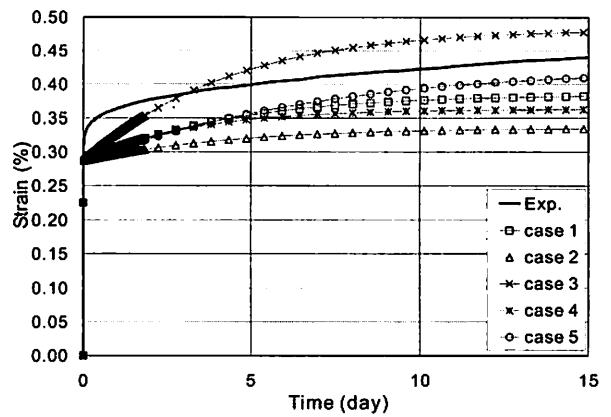


Fig. 4 Strain v.s time

の同定については、その詳細を割愛する。

さらに、金子らは(6)土木学会「軟岩の調査・試験の指針(案)」に示されている軟岩の三軸圧縮クリープ試験に準拠し、有効拘束圧を0.1MPa、0.5MPa、1.0MPa、1.5MPaの4種類についてクリープ試験を実施しているが、本研究では紙面の関係上、側圧=0.1MPaのケースについて検討した結果について示す。クリープ応力については、CD試験の軸差強度×70%、80%、90%の3種類について実施している。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るが、提案するモデルでは第3期の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期の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期の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%のクリープ応力のみを解析の対象とした。

本解析では、実験を参考に円柱供試体の側面と上面より静水圧状態になるよう荷重(0.1MPa)を作用させ、その後、側圧(0.1MPa)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(3.07MPa)の70%の荷重2.15MPa(=3.07MPa×0.7)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実施した。

本解析においても、前章と同様、 $\alpha$ と $\gamma$ は固定値とし、 $A$ と $\beta$ を変動させて実験値との比較を行った。解析ケースをTable2に示す。これら全ての解析ケースと実験において得られたひずみの経時変化量をFig.4プロットした。図より、 $A$ を増大させる、あるいは $\beta$ を減少させるとクリープひずみが増大することが分かる。

実験と解析を対比すると、初期の段階で両者のひずみ量に差がみられる。これは、実際の実験では当該供試体だけが他の供試体の弾性係数より小さな値(606MPa)を示していることから、解析で用いた750MPa(平均値)が大きすぎることに、また、クリープ試験開始初期においては、必ずしも全てにおいて解析と条件が同じになるとは限らないことなどによるものと考えられる。したがって、初期段階におけるひずみ、つまり、弾性的なひずみが若干大きいものと仮定し、5

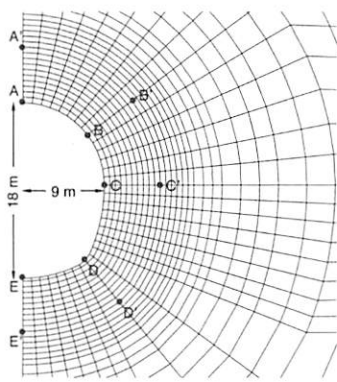


Fig. 5 Overview of cavern

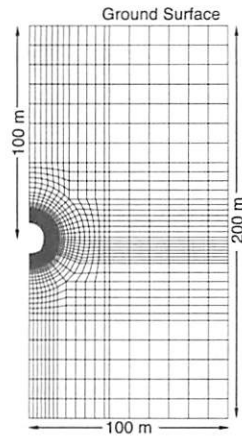


Fig. 6 Analysis area

日以降における実験値と解析値の傾向を比較すると、その曲線の形から、Case1 の解析が実験値に近いことが分かる。いずれにしても、本手法において適当なパラメータを設定することによって、実現象の再現は可能であるものと考えられる。

### 5. 地下空洞のクリープ解析

前章では、本研究において提案するクリープモデルを用いて三軸圧縮クリープの解析を行ない、適当なパラメータを設定することで解析によって実現象の再現が可能であることを示した。そこで本章では、Fig. 5 に示すような形状・規模を有する地下空洞に対してクリープ解析を実施した。空洞は深さ 100 m 程度に位置し、岩盤の密度は文献を参考<sup>(6)</sup>に  $1.52 \text{ g/cm}^3$  と仮定した。初期地圧については、鉛直方向は重力によって発生させ、水平方向については、深度に岩盤の単位体積重量を乗じた値を作用させた。

解析における地質としては、前章において検討した軽石凝灰岩を想定し、その解析パラメータについては、前章にて決定した値を採用した。なお、地下空洞の掘削においては壁面に吹き付けコンクリートなどが施工されるの一般的であることから、地下空洞の解析においては、空洞壁面部分に吹き付けコンクリート（弾性係数 5,000 MPa, ポアソン比 0.25, 厚さ 0.3 m）を施して解析を行なった。

解析では、地下空洞周辺の岩盤を均質等方材料と見なし、解析 Fig. 6 に示すような 1/2 領域のみを考えた。解析領域の底面では  $y$  軸方向の変位を、側面では  $x$  軸方向の変位を固定し、空洞壁面に作用させた初期地圧を徐々に解放することで掘削を表現している。掘削後は、解放後の応力状態（≠ 初期応力状態）の下で、3 年に亘ってクリープ解析を実施した。

まず、Fig. 7 から Fig. 11 に、Fig. 5 中の A, B, C, D, E, A', B', C', D', E' において抽出した時間と相当クリープひずみの関係を示す。地下空洞の壁面から A, B, C, D, E の各点までは 0.3 m（吹き付けコンクリートの厚さ分）、A', B', C', D', E' の各点までは 5.0 m である。なお、Norton Bailey モデルを用いた既往の研究事例<sup>(4)</sup>を参考にして 3 年間にわたるクリープ解析を実施したが、本解析では、かなり早い段階（約 20 日）でクリープひずみがほぼ一定値に収束した。ここでは、完全にクリープ変形が収束したかを確認す

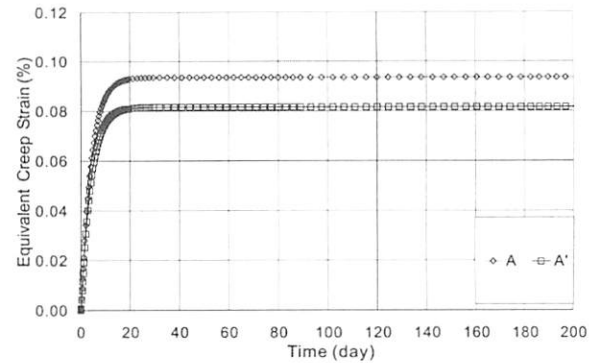


Fig. 7 Creep strain v.s. time (A, A')

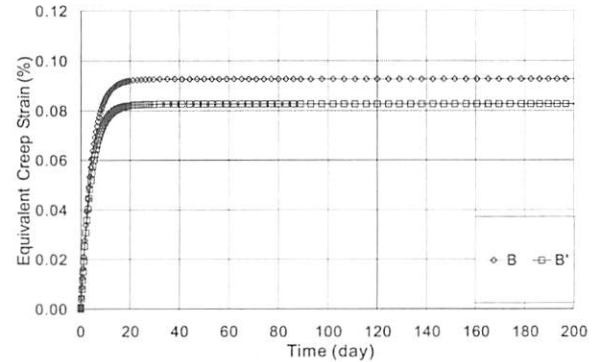


Fig. 8 Creep strain v.s. time (B, B')

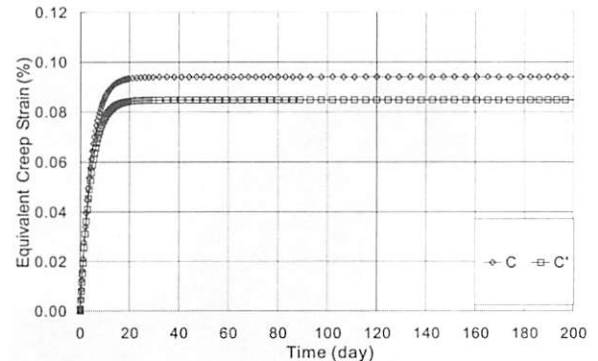


Fig. 9 Creep strain v.s. time (C, C')

るために、これよりも 10 倍ほど長い期間（200 日）について相当クリープひずみをプロットした。また、Fig. 12 に、200 日後における相当クリープひずみの分布を示す。

いずれの地点においても、20 日間を経過するとクリープひずみはほぼ一定値に収束していることが分かる。一方、Norton Bailey モデルを用いた場合は延々とひずみが増大するが<sup>(4)</sup>、こうしたことと比較すると、本解析結果は現実の地下空洞の周辺岩盤で観測される時間依存挙動に近い現象が得られているものと判断する。ただし、今回設定した解析条件では、岩盤強度に比して初期応力が小さいこと、ほぼ等方の状態を仮定した応力状態を設定したことから、掘削にともなう塑性領域の出現が極めて限られており（Fig. 5 中の D 付近のみ）、また、応力状態が極端に大きくなる、あるいは小さくなるというようなことは確認されなかった。一般に、応力状態に偏差性が見られる場合、相当応力が大きくなり、そ

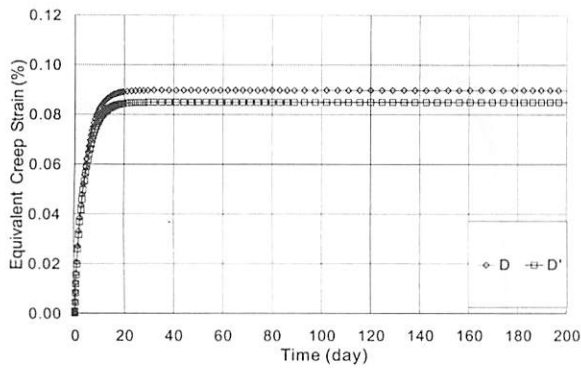


Fig. 10 Creep strain v.s. time (D, D')

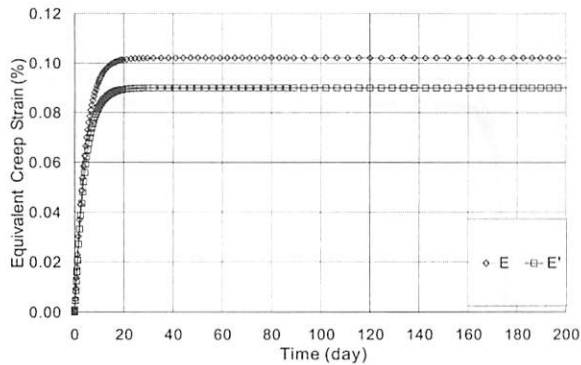


Fig. 11 Creep strain v.s. time (E, E')

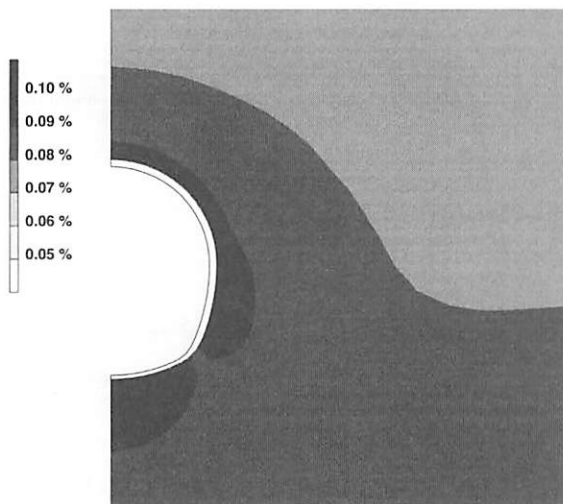


Fig. 12 Equivalent creep strain (after 200 days)

の分、クリープひずみも大きくなることから (式 (8) 参照)、今後、様々な岩種について、より深い地点や異方的な初期応力状態の下での検討が必要である。

本解析では、重力によって鉛直応力を発生させているため、一般には、深度が深いほど地山応力が大きくなり、その結果、クリープひずみも大きくなる。解析結果においても、EあるいはE'におけるひずみ量が大きいことから、こうした傾向が伺える。また、空洞周辺では、掘削によって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ことから、相当応力は空洞に近づくにつれ大きくなる。その結果、クリープひずみも大きくなる。D/D'を除けば、解析においてもそ

のような傾向が伺えるが、上述の通り本解析では、D/D'の付近のみに岩盤の塑性領域が発生しており、この周辺において、局部的に応力再配分などが生じていることに起因して、DとD'の相当クリープひずみについては、両者の差が小さくなっている (Fig. 12 参照)。ただし、ひずみの値自体は、他と比べてそれほど大きいわけではなく、むしろ、若干小さい。これもまた、岩盤の塑性化にともなって応力が再配分したことに起因しているものと思われる。

## 6. 結言

本研究では、Norton Baily のクリープモデルを修正し、既往の研究で得られたクリープ現象に合致するようなモデルの提案を行った。まず、文献<sup>(5)</sup>に示された実験式 (クリープひずみ速度) との比較を通して、提案したモデルのパラメータの感度について考察を加え、さらに、実験式に近いパラメータの設定が可能であることを示した。

次に、提案するクリープの構成モデルを有限要素解析コードに組み込み、任意の境界条件下におけるクリープ解析手法を開発した。そして、ボーリングコアを用いたCD試験および三軸圧縮クリープ試験を模擬した解析を行ない、開発手法の妥当性などについて検討を実施した。その結果、入力パラメータ (弾性係数、ポアソン比、粘着力、内部摩擦角、各種クリープ係数) を適切に設定することで、実現象の再現が十分に可能であることを示した。

さらに、開発手法を用いて地下空洞に対するクリープ解析を実施した。その結果、Norton Baily のモデルとは異なり、ある一定の時間経過後にはクリープひずみが収束するというような現実に近い数値解析結果を得ることができた。今後は、実測値との比較等によるクリープモデル/開発手法の妥当性の検討が必要である。

## 参考文献

- (1) 日本材料学会 編：固体力学の基礎，日刊工業新聞社，(1981)，pp. 149-187.
- (2) Carter, N. L. and Hansen, F.D.: Creep of Rocksalt, *Tectonophysics*, **92**(1983) pp.275-333.
- (3) 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.
- (4) 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.
- (5) Roland Pusch: Mechanism and Consequences of Creep in Crystalline Rock, *Comprehensive Rock Engineering*, **1**(1933) pp.227-241.
- (6) 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，第34回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，**34**(2005)，pp. 89-96.