

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

Analytical study on the affectors of long-term behaviors of tunnel

吉田秀典*, 奥村幸弘**, 加藤和之***

Hiddenori YOSHIDA, Yukihiro OKUMURA and Kazuyuki KATO

In Japan, it is planned to dispose high-level nuclear waste (HLW) in deep stable geological formations, starting by the mid 2030's. 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 provision of data and mathematical models are of prime importance in the assessment process. In this study, the equivalent creep law and the conservative plastic theory model is employed to model the long and short time behaviors of rock masses. The long-term behaviors of rock mass in deep ground are discussed through case studies with the various numerical parameters of the rock mass and the analytical conditions. From results, the long-term behaviors of the rock mass are strongly affected by the numerical parameters and the analytical conditions.

Key Words: high-level nuclear waste, long-term behavior, affector, sensitivity analysis

1 はじめに

我が国の原子力発電は、1963年に最初の発電に成功して以来、エネルギーの供給源として重要な役割を果たし、着実にその規模を広げ、現在、総発電量の約3分の1を原子力発電に依存するに至っている。このような状況の中、原子力発電によるエネルギーの生産に伴って発生する高レベル放射性廃棄物の対策は、現代社会が避けることのできない課題として、積極的な取り組みが進められている。

高レベル放射性廃棄物の放射能は、その半減期が長いことから、数千年～数万年といった期間にわたって減衰しつつも存在し続ける。したがって、高レベル放射性廃棄物の処分に関しては、こうした長い半減期を考慮に入れ、長期にわたる安全性を評価できる見通しがあること、また、人間の継続的な関与なしに長期的な安全が確保でき、監視やモニタリングを必要としないというような条件が課せられる。こうした条件を満たす処分方法として、全世界的に、深部地層への地層処分が最も一般的となっている。

地層処分の場合、数千年のオーダーで処分坑道の健全性を議論しておく必要がある。一般に、事前調査としてボーリング調査などを行い、処分場の建設前に岩盤特性などの把握が試みられるが、処分坑掘削時には、掘削に伴う応力解放によって周辺岩盤に、非線形領域が発生／拡大するため、事前調査時に得られた岩盤物性や応力状態は掘削とともに変化する可能性が高い。そこで、掘削過程における周辺岩盤の挙動が、その後の岩盤の長期的挙動にどのような影響を及ぼすかを議論する必要がある。また、処分坑道には人工バリアの充填あるいは埋め戻しが行われることになるが、それらの設置時期などが周辺岩盤の長期的挙動に影響を及ぼす可能性についても検討する必要がある。

こうした長期的な挙動の検討には数値解析的なアプローチが有効であると考え、言うまでもなく、数値解析においては、設定する材料モデルだけでなく、その入力パラメータや境界条件次第で得られる結果が異なってくる。そこで、高レベル放射性廃棄物の処分問題のように超長期に及ぶ問題設定においても、どの条件

*正会員 博士(工学) 香川大学助教授 工学部 安全システム建設工学科

** (株) オービック

***工学博士 東京電力・主任研究員 技術開発本部 技術開発研究所 原子力サイクルグループ

がどの程度、解析結果に影響を与えるかを議論しておく必要があるが、現在の所、そうした議論はまだ多くない。したがって本研究では、トンネル掘削と長期挙動に関する簡単な解析（トンネルは安定を保つことが前提）を通して、境界条件や入力パラメータと言った因子が解析に及ぼす影響について検討を行うこととした。

2 解析モデルの概要

前章で述べた目的を達するためには、トンネルの掘削および長期的挙動を予測する解析ツールを整備する必要がある。本来、数値解析をするに当たっては、トンネル建設現場の地山を調査し、その挙動をモデル化するなどの措置が必要となる。要素レベルあるいは室内試験におけるデータより、当該地点の地山の力学的特性を求め、さらに、原位置における観測や計測より、地山の挙動を支配しているメカニズムを把握することにより地山のモデル化が可能となる。本研究では、特定地点の地山挙動の解析を実施ことが目的でないことから、地山のモデル化は行わず（トンネルの安定性／自立性は問わない）、解析対象地山としては、短期的には弾塑性的な挙動に支配され、また、中長期的にはべき乗則的なクリープ挙動を示す地山であると仮定する。こうした地山は、硬岩よりむしろ軟岩の挙動に近いものと思われるが、本研究ではこうした工学的分類を意図するものではなく、あくまでも地山を仮想的なものとして位置付ける。そこで、本研究では等方的な挙動を呈する地山のみを解析の対象とし、短期的な挙動にはドラッカー・プラッカー型の弾塑性モデルを採用し、また、長期的な挙動を表現には、Carter ら¹⁾が岩塩の一軸クリープについて検討したクリープ則、

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

を参考にした。ここで、 $\dot{\epsilon}^c$ 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。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、本稿では、定温下を仮定し、Norton Bailey の式²⁾を採用した。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。

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

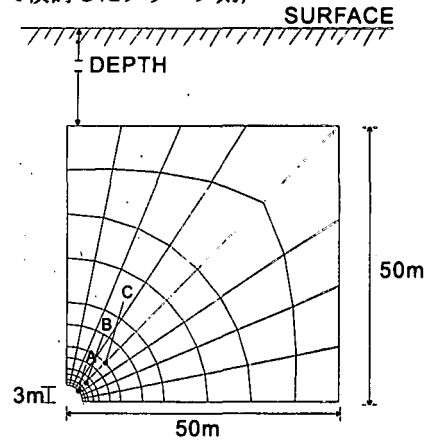


図-1 解析範囲とメッシュ

ここで、 $A = kT^p = \text{一定}$ である。これは Menzel ら³⁾が提案している岩塩のクリープ式と等価なものである。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 $\dot{\epsilon}_{ij}^c$ 、

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

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

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

なお、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、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。トンネルの安定／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、前述の通り、トンネルの長期変形に関する解析に及ぼす影響因子について吟味することを本研究の目的としているため、ここでは簡素化された式(2)を採用した。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、トンネルの掘削および長期的な挙動の数値解析が可能となる。

3 トンネルの有限要素解析

(1) 解析概要

a) トンネルの規模と解析領域

本解析では、解析結果の解釈を容易にするために、適当な深度地点に半径3mの円形トンネルを有するものとした(図-1参照)。図中のA、B、Cは結果の出力を行った箇所、Aはトンネル壁面上の点、Bは壁面から2m、Cは壁面から7mである。なお、岩盤は等方材料と仮定しているので、トンネルを包含する全体領域について解析を行うのではなく、その四分の一領域(50m×50mの矩形領域)を設けた。

表-1 解析の入力パラメータ

弾性定数	弾性係数	1.5GPa
	ポアソン比	0.3
強度定数	粘着力	0.6MPa
	内部摩擦角	30°

b) 岩盤物性

弾塑性解析に用いる入力パラメータに関しては、文献⁴⁾を参考にして、表-1のように設定した。また、岩盤の長期的挙動については、式(2)によって規定されるものとしているので、係数 A 、 n 、 $1-q$ を設定する必要がある。本解析では、文献⁵⁾に掲載されている実験結果(定応力下における岩塩の単軸クリープ試験)を基にこれらの係数について吟味した。まず、 $1-q$ は時間に関する係数であるため、取りうる範囲は $0 \leq 1-q \leq 1$ となり、これより $1-q$ を0.8、0.67および0.5の3ケースと設定した。なお、 $1-q$ が0.5より小さいと時間に対して鈍感となるため、本解析では0.5以上とした。この段階で大まかなクリープ曲線が描画できるので、実験結果のひずみ(200日で数%)のオーダーになるように A および n を調節した。その結果、 $n=0$ の時(応力への依存度が無い場合)で A は $A=10^{-4}$ 程度、 $n=1$ の時 $A=10^{-6}$ 程度とすることで実験と類似した曲線が描けることから、 A については 10^{-4} と 10^{-6} の2ケースを、 n については0.5と $n=0.1$ の2ケースを設定した。なお、本解析では応力レベルが高いため、 n が1を超えるケースは想定しなかった。

c) 初期地圧

我が国では、高レベル放射性廃棄物の処分深度としては、軟岩系で500mの処分深度を想定⁶⁾しているが、文献⁷⁾によれば、深度が500m程度の地点では、垂直地山応力(初期応力)が10MPa~25MPaとばらつきがあることが分かる。そこで本解析では、これらの範囲の中でも最も初期応力のレベルの高い値として、24.5MPaをトンネル周辺の初期応力とした。解析においては、これを境界におけるトラクションに換算し、境界条件として入力し、トンネル掘削時には、この初期応力をトンネル境界より節点外力として逐次解放することにより模擬した。なお、深度による初期地圧変化は、解析を簡単にするため考慮していない。また、初期地圧の影響を評価する目的で、側圧比を0.8、1.4としたケースも追加した。

d) トンネル壁面の境界条件

高レベル放射性廃棄物の処分坑道などにおいては、人工バリアの充填あるいは埋め戻しが行われることになるが、それらの設置が周辺岩盤の長期的挙動に影響を及ぼす可能性についても検討する必要があると考える。本解析では、そうした設置を忠実に表現するのではなく、極めて単純化して、掘削後のトンネル壁面の変位を固定するケース(掘削後、即、トンネルを充填するケース)とトンネル壁面の変位を自由とするケース(トンネルを充填しないケース)という2つのケースを想定した。

本解析では、上記に示した岩盤の物性パラメータ、初期地圧、そして境界条件の設定に関して様々な組み合わせを考え、感度解析を実施した。その組み合わせ一覧を表-2に示す。なお、支保工は考慮していない。

(2) 解析結果

各ケースにおけるクリープひずみの経時変化を図-2から図-17にそれぞれプロットした。また、一部のケースについては、その分布(1000年後、22m×22mの領域)を図-18から図-22に図示した。なお、本解析では、掘削後からのクリープ量をプロットしており、それ以前のクリープ量は含んでいないことに注意

表-2 解析ケース

	境界	側圧比	弾/弾塑性	A	n	1-q
case1	固定	1	弾塑性	10^{-4}	0.5	0.80
case2	固定	1	弾塑性	10^{-4}	0.5	0.67
case3	固定	1	弾塑性	10^{-4}	0.5	0.50
case4	固定	1	弾塑性	10^{-4}	0.1	0.80
case5	固定	1	弾塑性	10^{-4}	0.1	0.67
case6	固定	1	弾塑性	10^{-4}	0.1	0.50
case7	固定	1	弾塑性	10^{-6}	0.5	0.80
case8	固定	1	弾塑性	10^{-6}	0.5	0.67

	境界	側圧比	弾/弾塑性	A	n	1-q
case9	固定	1	弾塑性	10^{-6}	0.5	0.50
case10	固定	1	弾塑性	10^{-6}	0.1	0.80
case11	固定	1	弾塑性	10^{-6}	0.1	0.67
case12	固定	1	弾塑性	10^{-6}	0.1	0.50
case13	固定	0.8	弾塑性	10^{-6}	0.5	0.67
case14	固定	1.4	弾塑性	10^{-6}	0.5	0.67
case15	固定	1.4	弾性	10^{-6}	0.5	0.67
case16	自由	1.4	弾塑性	10^{-6}	0.5	0.67

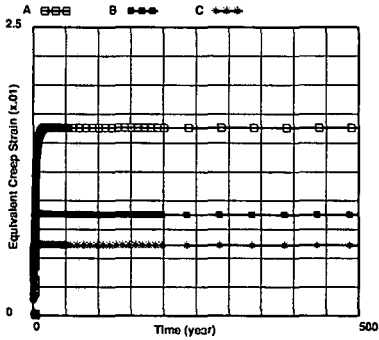


図-2 クリープひずみ (CASE1)

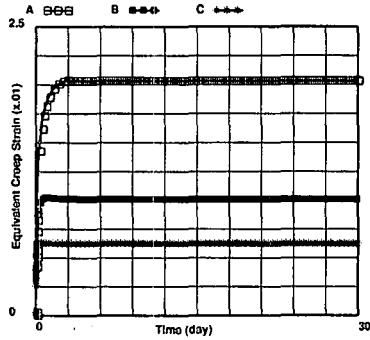


図-3 クリープひずみ (CASE2)

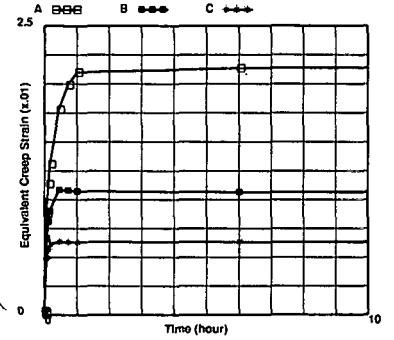


図-4 クリープひずみ (CASE3)

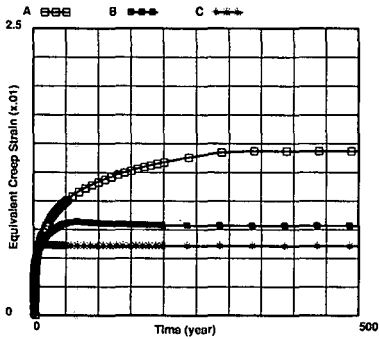


図-5 クリープひずみ (CASE4)

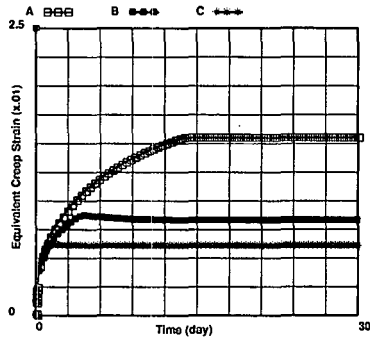


図-6 クリープひずみ (CASE5)

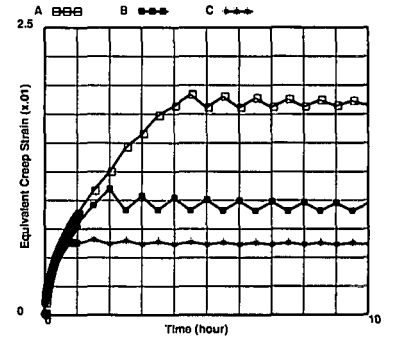


図-7 クリープひずみ (CASE6)

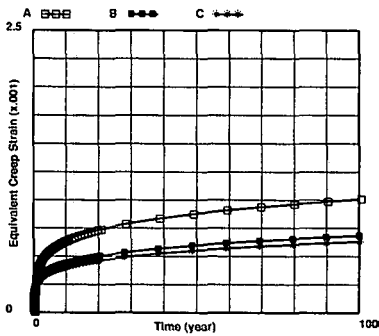


図-8 クリープひずみ (CASE7)

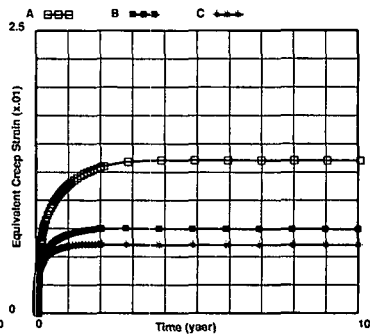


図-9 クリープひずみ (CASE8)

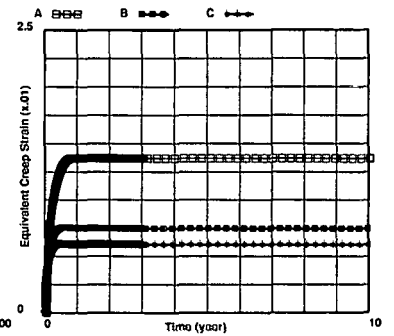


図-10 クリープひずみ (CASE9)

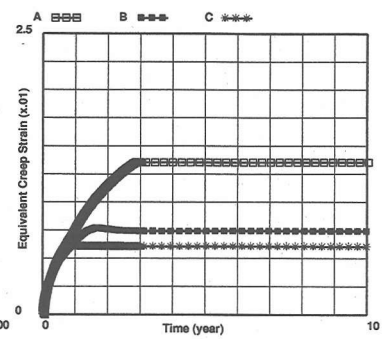
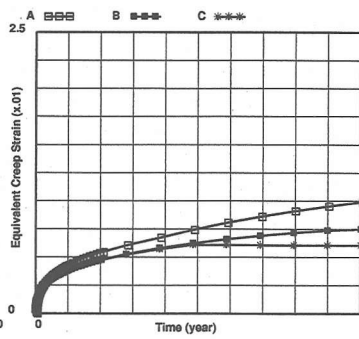
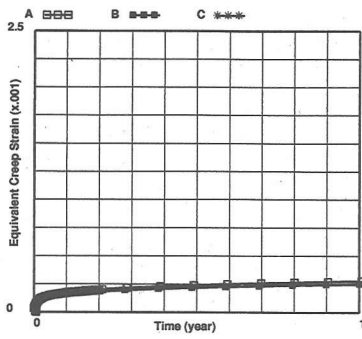


図-11 クリープひずみ (CASE10) 図-12 クリープひずみ (CASE11) 図-13 クリープひずみ (CASE12)

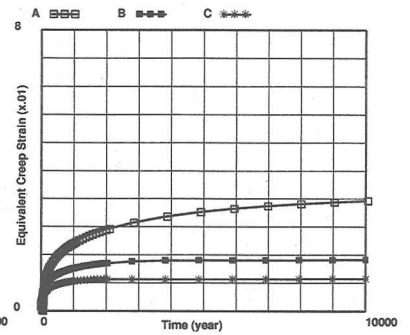
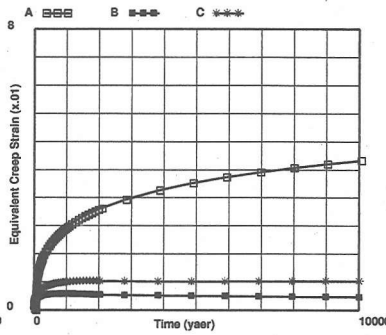
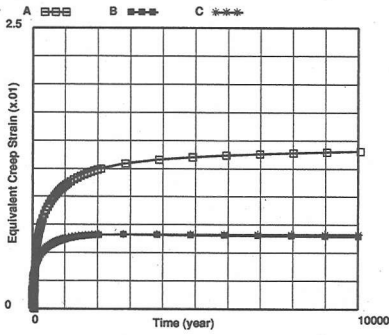


図-14 クリープひずみ (CASE13) 図-15 クリープひずみ (CASE14) 図-16 クリープひずみ (CASE15)

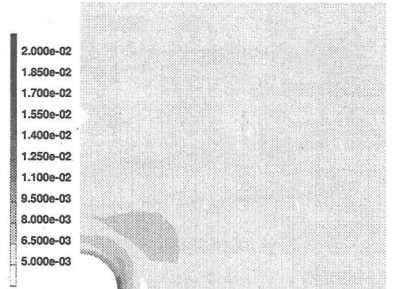
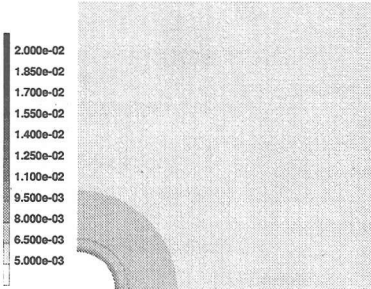
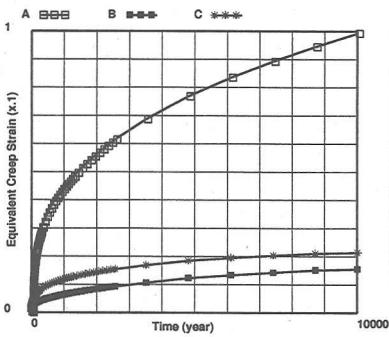


図-17 クリープひずみ (CASE16) 図-18 ひずみ分布 (CASE8) 図-19 ひずみ分布 (CASE13)

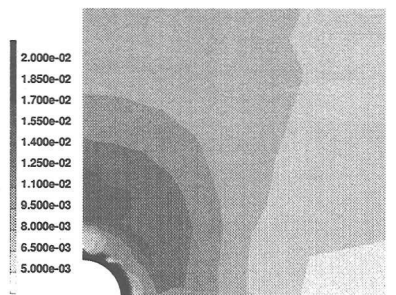
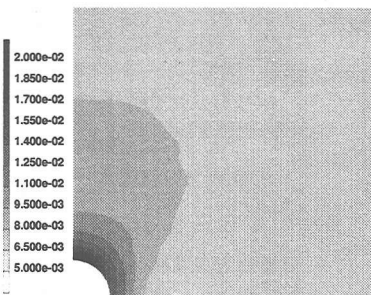
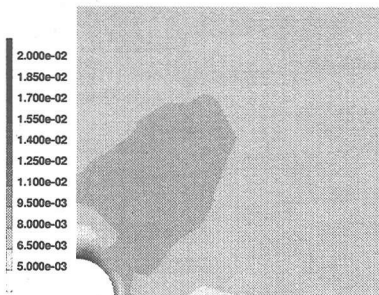


図-20 ひずみ分布 (CASE14) 図-21 ひずみ分布 (CASE15) 図-22 ひずみ分布 (CASE16)

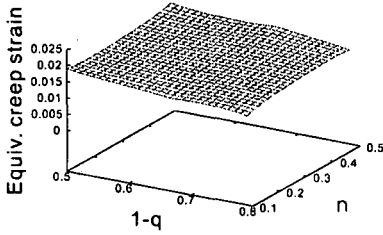


図-23 鳥瞰図 ($A = 10^{-4}$ 固定)

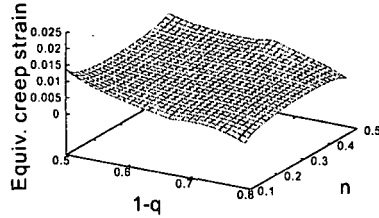


図-24 鳥瞰図 ($A = 10^{-6}$ 固定)

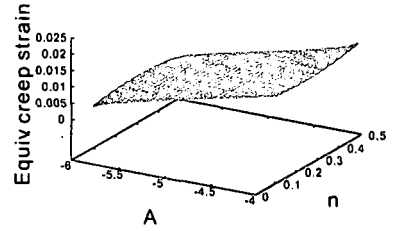


図-25 鳥瞰図 ($q = 0.8$ 固定)

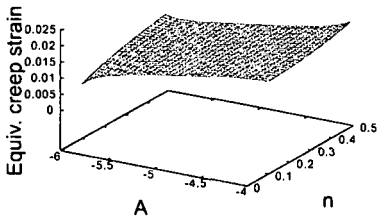


図-26 鳥瞰図 ($q = 0.67$ 固定)

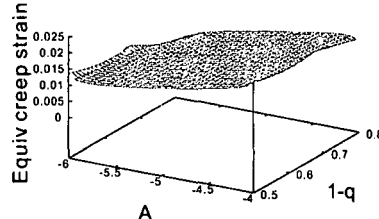


図-27 鳥瞰図 ($n = 0.5$ 固定)

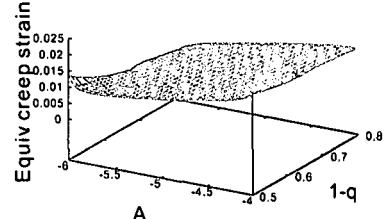


図-28 鳥瞰図 ($n = 0.1$ 固定)

されたい。図-2～図-17の x 軸は掘削開始からの時間を示しており、図中の3本の曲線は、処分トンネルの壁面(A)、壁面から2m(B)、壁面から7m(C)の各点における相当クリープひずみを表している。図においては、相当クリープひずみがほぼ収束した時点(x 軸)およびその時の値(y 軸)がグラフ内に収まるように整理しており、各ケースによって両軸の最大値は異なる。全ケースにおいて共通している特徴は、時間の進行とともに相当クリープの値は一定値にほぼ収束していることが分る。トンネル壁面、壁面から2mの地点、7mの地点でもその傾向は同じであるが、壁面から遠い地点から相当クリープひずみはほぼ収束し、壁面近傍ほど収束が遅く、かつ、その値も大きい。トンネル近傍においては、掘削による応力の解放に加え、岩盤自体が非線形的挙動を呈するため応力の再配分が起こる。一般に、トンネル掘削によってトンネルの放射方向では応力が減少し、逆に周方向では応力が増大する。また、非線形領域においてはさらに応力が減少する。こうしたことに起因して、トンネル壁面近傍では、この卓越する周方向の応力などの影響を受け、クリープ変形が大きくなり、また、変形に伴い応力が変化するため、収束するまでに時間が長くなっている。一方、壁面から遠ざかると、壁面近傍で見られるような複雑な挙動は見られず、収束が早く、クリープ量も小さい。

a) クリープ係数の影響

まず、クリープ係数の影響について考察を加える。(1)Case1からCase3、(2)Case4からCase6、(3)Case7からCase9、そして(4)Case10からCase12と分けると、それぞれのカテゴリの中では、時間に関する係数 $1-q$ だけが異なるので、 $1-q$ に関する感度を判定できる。式(2)より、 $1-q$ の値が大きいと相当クリープひずみ速度が遅いが、図-2～図-13からも、 $1-q = 0.8$ の場合は相当クリープひずみが収束するまでの時間が長く、 $1-q = 0.5$ の場合は収束が最も早いことが分る。また、トンネル壁面では $1-q$ の値が大きいほどその収束値が小さい。こうした現象に関しては、掘削および非線形領域の拡大に伴って応力状態(式(2)および式(3)における相当応力も変化)し、これとクリープ現象に相関があることが原因と思われる。

また、 $1-q$ および A を固定し、応力に関する係数 n のみを変化させた組み合わせ(Case1とCase4、Case2とCase5、Case3とCase6、Case7とCase10、Case8とCase11、Case9とCase12)の場合、 n が大きいほど相当クリープひずみ速度が速くなり、収束に至るまでの時間が短い、収束値にはそれほど差がない。

一方、時間に関する係数 $1-q$ および応力に関する係数 n を固定し、係数 A のみを変化させた組み合わせ(Case1とCase7、Case2とCase8、Case3とCase9、Case4とCase10、Case5とCase11、Case6とCase12)

の場合、 A が大きいほど相当クリープひずみ速度が速くなり、収束に至るまでの時間が短く、かつ、相当クリープひずみの値が大きい。

ここで、 A , n , $1-q$ のいずれか 1 つを固定し、その他の 2 つを変動させた場合の相当クリープひずみの最大値を図-23 から図-28 に鳥瞰図として示し、それぞれの係数の感度について調べた。図-23 より、 A を 10^{-4} に固定した場合、相当クリープひずみの値は、 q および n を変化させても、それほど大きな変化がみられない。それに対して、 A を 10^{-6} に固定した場合（図-24）、 A を 10^{-4} に固定した場合よりも相当クリープひずみの変化の割合は大きくなっており、特に q の変化に対して敏感になっている。これは、 A が小さい場合、相当クリープひずみは A よりも他の係数の影響を受けやすいのに対し、 A が大きくなると、他の係数よりも A の影響を受けやすいことを意味している。これより、 A の大小によって、相当クリープひずみに与える他の係数の感度が変化することが分かる。この傾向は、図-25～図-28 から伺える。

q を固定した場合、 A を変化させると相当クリープひずみの値も変化するのに対し、 n のみを変化させてもそれほど大きな変化はみられない。この傾向は、 n を固定した場合についても同様で、 A を変化させると相当クリープひずみの値も変化するのに対し、 q のみを変化させてもそれほど大きな変化はみられない。つまり、 A の変化に対して相当クリープひずみは敏感に反応する。これは、 q と n がそれぞれ、時間と応力に対して指数的に影響するクリープ係数であり、また、その値も $1-q$ が 0.5 から 0.8、 n が 0.1 から 0.5 の範囲で解析をしているため、それほど結果に大きな変化を与えていない。一方、 A は式全体に乗じられるクリープ係数で、今回の場合、用いる値の範囲が大きい（ 10^{-4} と 10^{-6} では 100 倍も違う）ことも、今回の解析結果のようになった一因と思われる。 A は材料の種類によって異なるため、解析結果はばらつくことが予想され、設計の際には注意が必要となる。勿論、 q と n に関しても注意が必要であることには変わりはないが、材料の種類によって、それほど大きな変動が見られないならば、ある程度 A を変動させて解析を行い、その時の状況を把握することで、クリープに対する設計が可能になるものと思われる。

b) 初期応力の影響

次に、初期応力の影響について考察を行う。初期応力を変化させた解析は、図-9（側圧比 1.0）、図-14（側圧比 0.8）および図-15（側圧比 1.4）の 3 つであるが、図より、側圧比が 0.8 と 1.0 の結果はそれほど差がないが、側圧比が 1.4 の場合は、前者の 2 つに比べるとはるかに大きな相当クリープひずみを生じている。これを詳細に検討するために、掘削後 1000 年経過した時の相当クリープひずみ分布を、図-18 から図-20 にそれぞれ示した。側圧比を変化させると、非線形領域の領域および値が異なるため、非線形挙動に至った地点から応力が周辺部分に再配分され、さらに再配分された箇所新たに非線形挙動が生ずるなど、複雑な挙動が見受けられる。その結果、相当クリープひずみの値も応力変化の影響を受けて、それぞれ異なった分布を呈する。特に、非線形領域が広く、応力変化の量および相当応力の大きな側圧比 1.4 のケースは、他の 2 ケースと相当クリープひずみ分布が異なり、より広く、かつ値も大きい。これより、側圧比によっては、特定の地点に非線形挙動とクリープ挙動が相互に影響を受けながら発生および拡大する可能性があるものと思われる。

c) 掘削の影響

さらに、掘削による影響について考察するために、掘削過程において岩盤が非線形挙動を呈することなく弾性体を維持すると仮定した場合（図-16）と弾塑性体を仮定した場合（図-15）の比較を行う。図より、相当クリープひずみの収束値は、トンネルより離れた地点では、弾塑性体を仮定したケースの方が弾性を仮定したケースよりも小さいが、トンネル近傍ではこの傾向が逆になる。トンネル近傍では岩盤の塑性変形の影響を受け（つまり応力変化が大きい）相当クリープひずみが大きくなるが、逆に、遠方では応力変化が小さいため、弾性体を仮定したケースよりも相当クリープひずみが小さくなる。これは、弾性体を仮定したケースの方が、応力集中などの現象が生じないため、比較的遠方まで応力の再配分が均等に行われからである。こうした状況は、相当クリープひずみ分布図（図-20 および図-21）からも伺える。弾性体を仮定したケースでは、壁

面から遠方に向かって徐々に相当クリープひずみのレベルが下がっているのに対し、弾塑性体を仮定したケースでは、壁面近傍に相当クリープひずみが集中していることが分かる。これより、本解析のように地山が安定して掘削できる範疇では、掘削における岩盤の変形がその後の長期変形に影響を及ぼすことが分かる。なお、こうした影響に関して詳細な検討が必要となる場合は、精緻な地山のモデル化が必要となる。

d) トンネル壁面の境界条件の影響

Case 1～Case15 は、トンネル内に何らかの材料（高レベル放射性廃棄物の処分坑道では、ガラス固化体、オーバーパックおよび緩衝材などの人工バリア）が充填され、トンネルの壁面が十分に固定されていると仮定している。解析においてはトンネル壁面を変位固定することでこれを表現している。この場合、トンネル近傍においては変形に抑制がかかる一方で応力集中などが生じる。そこでこうした影響を評価するために、トンネル壁面の境界を自由（固定しない）とする解析、CASE16を追加した。これは、高レベル放射性廃棄物の処分坑道に例えると、掘削後、何も充填せずにトンネルを放置したこととなる。この場合、変形に抑制がないため大きな変形がみられるが、反面、応力集中は生じない。こうしたことから、図-17に示す通り、大きな相当クリープひずみが生じる。特に、これは壁面近傍で顕著で、境界条件以外の解析条件が全て同じケースのCASE14（図-15）と比較すると約2.5倍である。このことは、相当クリープひずみ分布（図-22）からも判断できる。また、壁面の変位を固定しない場合、クリープの収束性が芳しくなく、さらにはクリープ挙動を呈する領域が広範囲であるという特徴も有する。これより、実際の高レベル放射性廃棄物の処分においては、掘削直後にトンネルに人工バリアが設置されるわけではないことに加え、充填後もその充填状況によってはクリープ変形の値および領域が予測と大きく異なる可能性があることが分かる。

4 まとめ

本研究では、式(2)に示されている各クリープ係数を変化させて、トンネルの長期挙動解析を実施し、解析結果に影響を及ぼす因子について考察を加えた。クリープ挙動の表現には岩塩などに用いられている「べき乗型」のクリープモデルを用いていることや、岩盤が弾性体あるいは弾塑性体であるという観点からしか掘削影響を考慮していないことより、トンネルの挙動に関して定量的なことは言及できないが、数値解析に影響を与える因子に関して定性的なことは言及できるものと考ええる。一連の解析より、クリープ変形はクリープ係数の影響を受けることは勿論であるが、それ以上に初期応力、掘削時の岩盤の変形、そして境界条件の設定方法（トンネル壁面の変位固定）などに強く影響を受けることが判明した。これより、トンネルの長期挙動の評価には、岩盤の構成モデルを精緻にするよりも、逆解析などを利用した応力測定とその結果の解析への反映、掘削損傷領域の把握、そしてより現実に近い境界条件の設定などが重要となる場合もありうると言える。

参考文献

- [1] Carter, N. L. and Hansen, F.D.: Creep of Rocksalt, *Tectonophysics*, Vol.92, pp.275-333, 1983
- [2] 矢川元基, 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, 1991
- [3] Menzel, W. and Schreiner, W.: Zum geomechanischen Verhalten von Steinsalz verschiedener Lagerstätten der DDR. Teil II. Das Verformungsverhalten. *Neue Bergbautechnik*, Vol.7, pp.565-571, 1977 (in German)
- [4] 核燃料サイクル開発機構ホームページ:
<http://www.jnc.go.jp/kaihatu/tisou/bunken/draft2/b01/pdf/03-05-03-s01.pdf>
- [5] Cristescu, N., D. and Hunsche, U.: Time Effects in Rock Mechanics, *John Wiley & Sons*, pp.49, 1998
- [6] 核燃料リサイクル開発機構: 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, 一層処分研究開発第2次取りまとめ 総論レポート, pp.IV-20, 1999
- [7] 山口梅太郎, 西松祐一: 岩石力学入門 (第3版), 東京大学出版会, pp.280, 1997