

地山の時間依存性挙動を考慮した 坑道掘削時の安定性解析

小川 豊和^{1*}・青木 智幸¹・城 まゆみ¹・松井 裕哉²・堀井 秀之³

¹大成建設株式会社 技術センター (〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町344-1)

²日本原子力研究開発機構 幌延深地層研究センター (〒098-3224 北海道天塩郡幌延町北進432番2)

³東京大学大学院工学系研究科 社会基盤工学 (〒113-0033 東京都文京区本郷7-3-1)

*E-mail: toyokazu.ogawa@sakura.taisei.co.jp

地下深部堆積軟岩中における坑道掘削では、掘削時においても弾性変形に加え時間依存性変形が生じるため、設計・施工、操業時の安全性の観点から時間依存挙動が坑道の安定性に及ぼす影響を評価する必要がある。ここでは、坑道掘削時の時間依存挙動が安定性に及ぼす影響を調べるため、実験・数値解析を組み合わせた一手法を提案した。室内クリープ試験からモデルパラメータを決定し応力変形解析を実施して、時間依存挙動が坑道周辺岩盤と支保の安定性に及ぼす影響を検討した。また弾性変形に対する時間依存性変形の大きさと変形速度を表す指標を定義し、支保設置後からの地山変形量や支保軸力に及ぼす時間依存性特性の影響を整理した。

Key Words : *sedimentary rocks, time-dependent deformation, stability analysis, tunnel support, rheological model*

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分に関して地下深部の堆積軟岩中に空洞を掘削する場合、地山が時間依存挙動を示す可能性がある。この場合、坑道掘削時においても掘削による弾性的な変形に加え時間依存性変形が生じるので、地下施設の合理的な設計・施工、操業時の安全性確保の観点から時間依存挙動が坑道の安定性に及ぼす影響を評価しておく必要があると考えられる。

堆積軟岩の時間依存挙動は、1980年代前半から岩石試験を用いた室内試験による基礎的研究が開始され、90年代に入ると実験結果を説明するための評価モデルの開発が盛んになっている^{1,2,3}。さらに、90年代後半からは、評価モデルを適用した数値解析的な研究も見られるようになった^{4,5,6}。しかし、実験的なデータの蓄積が依然として必要とされている現状から、堆積軟岩の時間依存挙動は未解明な部分が多いものと考えられる。

本研究では、日本原子力機構が北海道幌延町で実施した深層ボーリングで取得した珪質泥岩を用い、排水三軸クリープ試験を行って、Burgersモデルのパラメータを決定した。使用した珪質泥岩は、新第三紀の堆積岩であり、平均的な一軸圧縮強度が20MPa程度の堆積軟岩である。次に、それを用いた二次元平面ひずみ応力変形解析を行い、時間依存挙動が坑道周辺岩盤と支保の安定性に与

る影響を検討した。また、弾性的な短期の変形に対する時間依存性変形の程度を表わす指標を定義し、支保立て込み終了後からの変形量に及ぼす影響を調べた。

2. Burgersモデルとパラメータの決定

(1) レオロジカルモデル

解析に用いたBurgersモデルは、Kelvin要素とMaxwell要素を直列につないだモデルで、二次クリープまでの挙動を表現できる(図-1)。基本的な一次元モデルでは、時間 $t > 0$ において応力 σ_0 を与えた際のひずみ ε の経時変化は、次の式で表わされる。

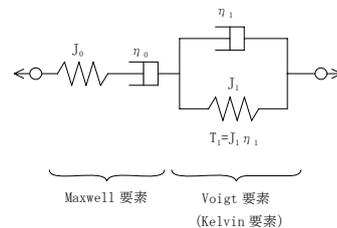


図-1 Burgersモデル

$$\varepsilon(t) = J(t) \sigma_0 \quad (1)$$

$$J(t) = J_0 + J_1 (1 - e^{-t/T_1}) + \frac{t}{\eta_0} \quad (2)$$

ここで、 J_0 は弾性コンプライアンス、 T_1 は遅延時間、 η_0 は粘性係数である。

解析コードに組み込むために、このモデルを三次元応力場で定義し、一次元モデルと同様一軸状態で載荷した場合を考えると（体積ひずみは時間に依存しないものと仮定する）、三次元モデルの一軸方向のひずみは以下のように表わすことが出来る。

$$\varepsilon_{11} = \sigma_0 \left\{ \left(\frac{1}{9K} + \frac{1}{3G^M} \right) + \frac{t}{3\eta^M} + \frac{1}{3G^K} (1 - e^{-t/T^K}) \right\} \quad (3)$$

ここで、添え字 K と M は、それぞれKelvin要素とMaxwell要素に対応するパラメータを表す。 η は粘性係数、 K は体積弾性係数、 G はせん断弾性係数である。

表-1に示すように、式(1)、(2)を式(3)と対応することにより、一次元モデルのパラメータと一般三次元応力下でのパラメータの対応付けを行うことが出来る。

(2) パラメータの決定

幌延の深層ボーリング調査で得られた珪質泥岩を用いた三軸排水クリープ試験を実施した。その結果を図-2に示す。この試験結果から、Burgersモデルのパラメータを決定した。その結果を表-2、表-3に示す。

また、このように決定した三次元モデルのパラメータを用いた有限差分法⁷⁾による三軸クリープ試験のシミュレーション結果と、三軸クリープ試験結果、一次元モデルによる計算結果との比較を図-3に示す。

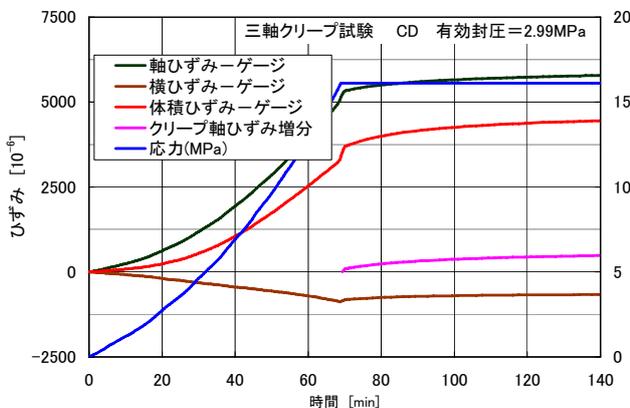


図-2 三軸排水試験結果

図-3から、一次元・三次元モデルとも三軸クリープ試験結果を良く表現しており、両者の整合性も良好である。よって、岩盤の時間依存挙動をあらわすモデルおよびパラメータの設定は妥当と判断した。

表-1 一次元・三次元Burgersモデルパラメータの対応関係

一次元モデル (式1, 2)	三次元モデル (式3)
J_0	$1/(9K) + 1/(3G^M)$
J_1	$1/(3G^K)$
T_1	$T^K (= \eta^K/G^K)$
η_0	$3\eta^M$
$K = \frac{1}{3J_0(1-2\nu)}, G^M = \frac{1}{3\left(J_0 - \frac{1}{9K}\right)}$	

表-2 一次元Burgersモデルのパラメータ

J_0	J_1	η_0	T_1	η_1	ν
MPa ⁻¹	MPa ⁻¹	min·MPa	min	min·MPa	
320	63.7	673	230	3.60	0.20

表-3 三次元Burgersモデルのパラメータ

G^M	G^K	η^M	T^K	η^K	K
MPa	MPa	min·MPa	min	min·MPa	MPa
1,300	5,200	224	230	1.20	1,700

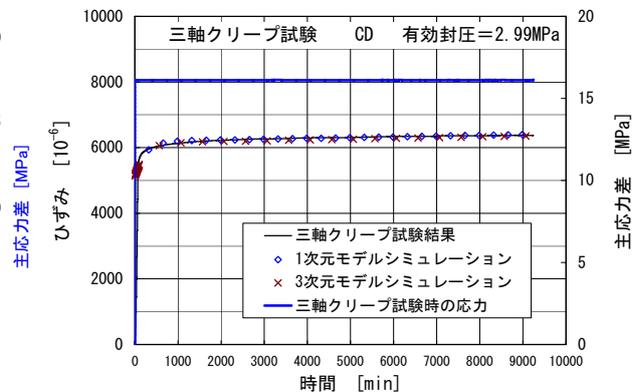


図-3 三軸排水試験結果の数値シミュレーション結果

3. 数値解析

(1) 解析条件

岩石コアで求めた時間依存性挙動を有する岩盤を想定し、坑道を掘削した場合の挙動を数値解析により検討する。表-3および表-4に示すパラメータ値を用いて、有限差分法解析コードFLAC⁷⁾による二次元平面ひずみ粘弾性解析を実施した。解析で考慮した空洞は、掘削外径が5.4mの円形で、支保は厚さ20cmの吹付けコンクリート（設計基準強度18 MPa）を用いた。またそのヤング率は硬化前と十分硬化した後の場合を考え、3および10GPaの2ケースを設定した。初期鉛直応力は5.5 MPaを、側圧係数は1.0と1.5を設定した。解析では、吹付けコンクリートをビーム要素で表現し、図-4に示すメッシュを用いた。

岩盤の変形に及ぼす切羽進行の影響を考慮するため、応力解放率の概念を用いるが、ここではこの解放率を数値解析的に設定した。すなわち、軸対称モデルを用いて無支保の条件で弾性解析を実施し、切羽からの距離ごとに、坑壁の半径方向変位の、切羽から十分後方の収束変位に対する割合を応力解放率とした（表-5参照）。

(2) 掘削と支保立て込みの条件

解析では、掘削は1サイクル1mとし、切羽進行を1日あたり4mに設定した。切羽の進行と支保設置は、図-5に示す流れでシミュレーションを実施した。すなわち、表-5を参考に、まず最初の掘削サイクルに見合う切羽からの距離が1mで、応力を65.5%解放する（瞬時掘削）。そして、ビーム要素で表わす吹付けコンクリートを立て込み、6時間クリープ変形を許す。次の掘削サイクルでは、掘削による応力解放率を切羽からの距離が2m相当まで引き上げ（78.2%）、吹き付けコンクリートに相当するビーム要素を立て込んでから、6時間クリープ変形を許す。これを切羽からの距離が1mになるまで繰り返した。次の掘削段階では応力の解放率を100%とし、

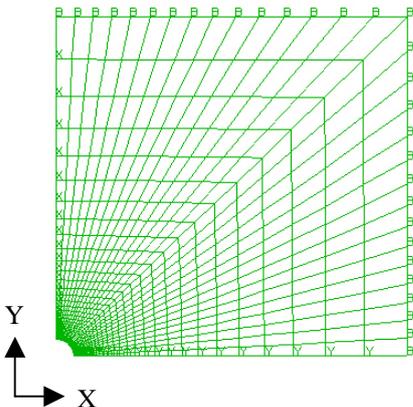


図-4 解析に用いた二次元平面ひずみモデル

掘削を開始した時間から総計で15,000分（10.4日）までクリープ変形を計算した。

表-4 解析条件

解析	2-D平面ひずみ
掘削径 (m)	5.4
吹付コンクリート厚 (cm)	0 (無支保), 20
コンクリートヤング率 (GPa)	3, 10
鋼製支保工	考慮せず
鉛直応力 (MPa)	5.5
側圧係数	1.0, 1.5

表-5 解析的に決定した応力解放率

切羽からの距離 (L)		応力解放率
(D)	(m)	(%)
0.19	1	65.5
0.37	2	78.2
0.56	3	85.2
...
2.04	11	98.9
> 3.15	> 17	100

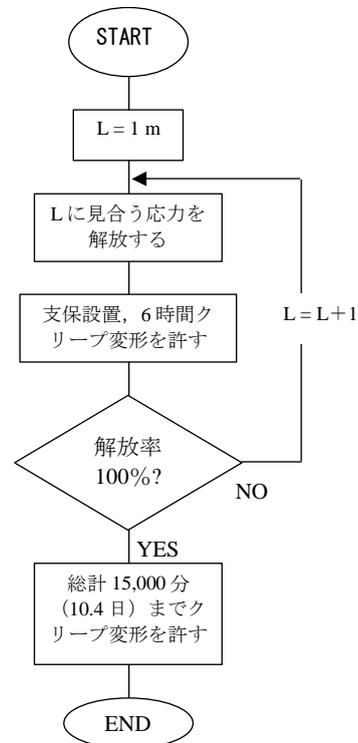


図-5 掘削と支保立て込みの流れ図

4. 解析結果

解析結果の一例を図-6、図-7に示す。

(1) 吹付けコンクリートの剛性の影響

図-6a に、側圧係数が 1.0 の場合のトンネル天端での半径方向変位を示す。支保剛性が大きいほど、変位量は少なくなることがわかる。また、図-6b に地山周方向応力の経時変化を示す。支保打設から次の掘削サイクルまで（クリープ変形段階）は、地山の応力は緩和しながら推移していく。次に、コンクリートの軸力の経時変化を図-6c に示した。支保の剛性が高いほど変位抑制効果が大きく、軸力も大きくなる。軸力は 15,000 分（約 10 日）時点で 1.5MN 程度（換算平均軸応力は 7.5MPa 程度）であり、設計基準強度(18 MPa)に対して安全な値である。

(2) 側圧係数の影響

図-7bには、側圧係数が1.5の場合のトンネル天端での周方向応力の経時変化を示した。水平 (x) 方向の初期応力が大きくなっているため、天端部の応力が図-7bと比較して大きくなっている。図-7cに、トンネル天端でのコンクリートの軸力の経時変化を示す。支保の剛性が大きいほど軸力は大きくなる。また、図-6cと比較して、支保の剛性に関わらず軸力は側圧係数が1.0の場合の1.5倍程度になった。

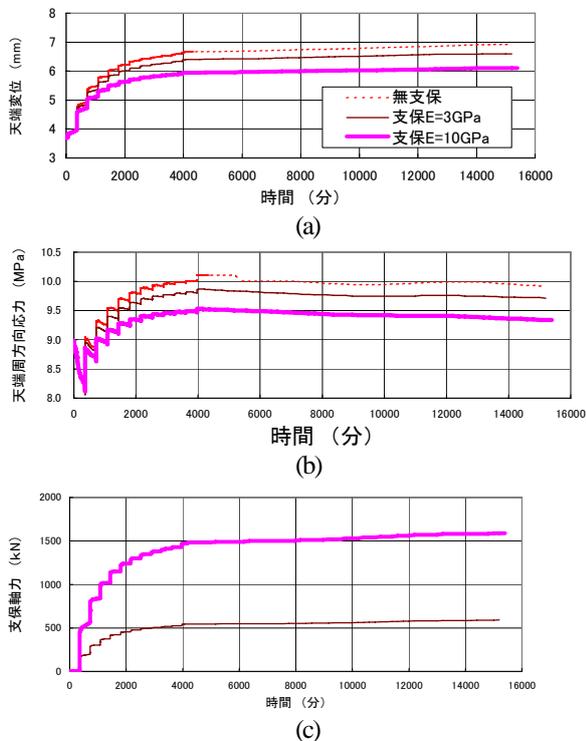


図-6 天端における変位・周方向応力・コンクリート支保軸力の経時変化 ($K_0 = 1.0$)

5. クリープ判断指標の検討

坑道掘削時には、地山の時間依存特性に起因する変形が、地山の安定性に大きく影響を及ぼす場合がある。大きく分けて、「後荷」がどれくらいになるかという応力変形の大きさに関するものと、それがどのタイミングで起きるかと言う「遅延時間」に関するものが考えられる。

ここでは、坑道掘削時における短期的な時間依存挙動の影響を探る手段として、以下のように考える。

一般に、平面ひずみ状態に達したと考えられる地点で発生する応力、変位や支保軸力、すなわち、切羽からの距離が $2D$ 以上で、切羽の三次元効果の影響がなくなったと考えられる地点で発生する応力、変位や支保軸力を基準として、それ以降に生じる変位・応力、軸力が坑道周辺岩盤や支保の安定性に与える影響を検討することとした。

ここまでの評価に用いたBurgersモデルでは、時間 t におけるひずみは、以下の式で表わされる (式1, 2再掲)。

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 \left[J_0 + J_1 (1 - e^{-t/\tau_1}) + \frac{t}{\eta_0} \right] \quad (4)$$

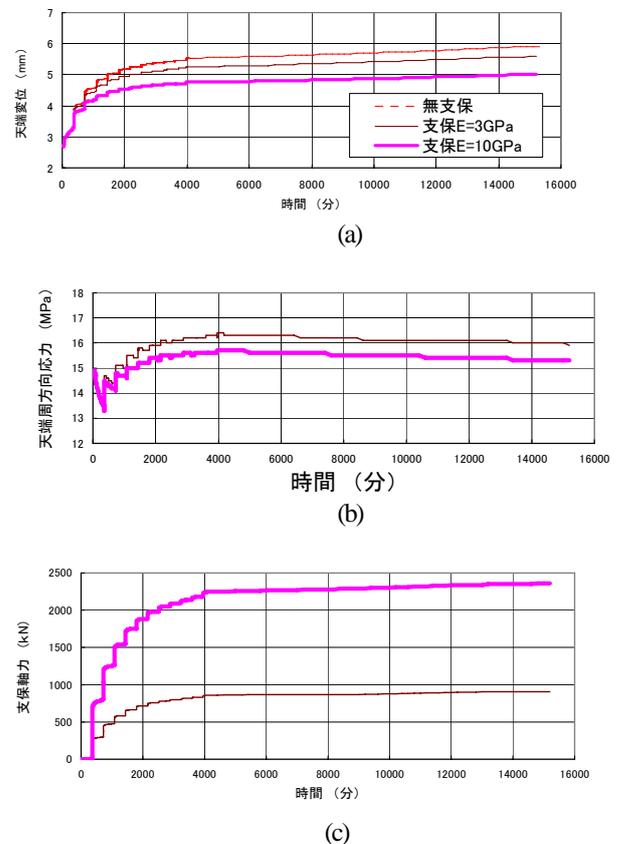


図-7 天端における変位・周方向応力・コンクリート支保軸力の経時変化 ($K_0 = 1.5$)

この式で右辺括弧内の第3項は、定常クリープを表わすが、今この部分を除いて考えると、弾性的な瞬時変形は $\alpha_0 \cdot J_0$ で、時間依存性変形は $\alpha_0 \cdot J_1$ で表わされる。ここでは、これらの比 (J_1 / J_0) を CDI (クリープ変形指標) と、また、時間依存性変形を表わす遅延時間 T_1 と基準時間 T_0 の比 (T_1 / T_0) を CTI (クリープ時間指標) と呼び、それぞれの指標により地山の変形や支保の軸力に及ぼす影響を調べた。 CDI は短期的クリープ変形量の指標で、その変化率は定常クリープを含めた長期的クリープ変形量との割合を表わし、 CTI は短期的クリープの収斂時間の指標で、長期的クリープとの割合を表わすと考えられる。

今、側圧係数が1.0で、コンクリート支保のヤング率が3GPaの場合について、切羽からの距離が約2Dと、15,000分(10.4日)後の場合を比較すると、クリープ試験から求めた物性値より $CDI = 0.2$, $CTI = 230$ ($T_0 = 1$ 分) となる。これらの値を基準として、以下の感度解析を $CDI = 0 \sim 0.8$, $CTI = 230 \sim 4,320$ の範囲で行った。

(1) CDIの影響 (CTIを固定)

表-2に示した6つのパラメータのうち、 J_0 , η_0 , T_1 , ν を固定し、 J_1 を変化させる。 η_1 は独立ではなく、 $\eta_1 = T_1 J_1$ である。

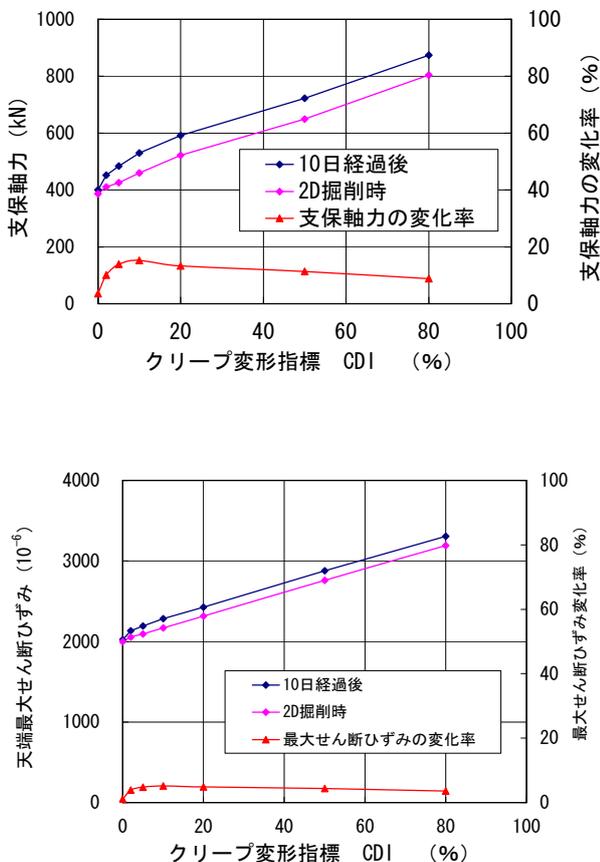


図-8 地山の変形、支保の軸力に及ぼす CDI の影響

図-8には、 CDI を0~0.8の範囲で変化させたときの支保の軸力と天端のせん断ひずみの経時変化を示す。支保の軸力や天端のせん断ひずみの変化率は CDI の増加とともに増加し、 $CDI = 0.1$ 付近でピーク値を取る。それより大きな値の CDI については単調に減少する傾向を示している。この結果は、短期的なクリープ変形量が長期的なクリープ変形量に対して相対的に大きくなっても、地山の変形や支保軸力の変化率は、大きくなることを示唆している。

(2) CTIの影響 (CDIを固定)

表-2に示した6つのパラメータのうち、 J_0 , J_1 , η_0 , ν を固定し、 T_1 を変化させる。

図-9には、 CTI を230~4,320の範囲で変化させたときの支保の軸力と天端のせん断ひずみの経時変化を示す。10日経過後の天端における支保軸力は漸増し、一定値に収斂するが、2D掘削時では $CTI = 1,440$ でピーク値を取り、それ以降は減少傾向にある。一方最大せん断ひずみは、 CTI の増加に伴い小さくなる。また、支保の軸力や天端のせん断ひずみの変化率は CTI の増加とともに単調に大きくなる傾向を示している。これは、時間依存性の変形が長期間継続すると、短期的クリープ変形量は長期的クリープ変形量に対して相対的に小さくなり、同時に短期的な後荷も長期的な後荷に対してその割合が減少し、支保に発生する軸力も相対的に小さくなるためであると考えられる。

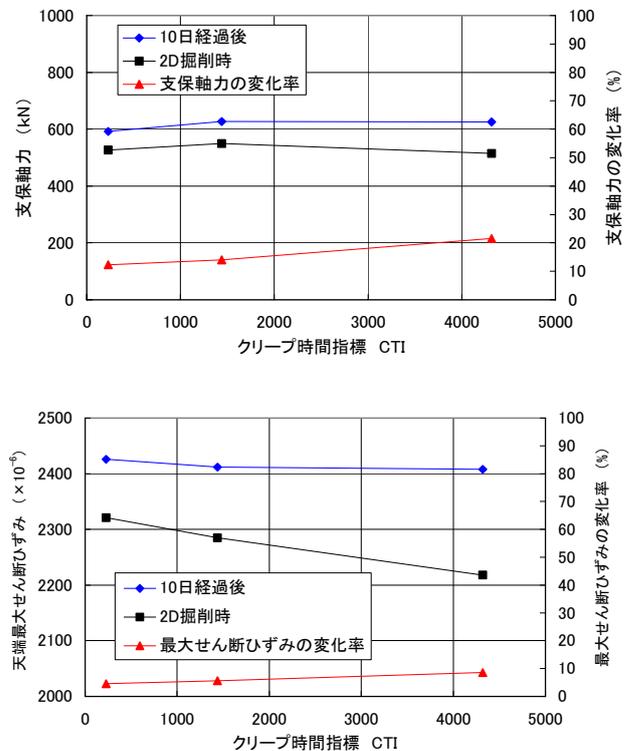


図-9 地山の変形、支保の軸力に及ぼす CTI の影響

6. まとめ

坑道掘削時に生じる時間依存性変形が坑道の安定性に及ぼす影響を調べるために、排水三軸クリープ試験結果に基づいてBurgersモデルのパラメータを決定し、それを用いた二次元平面ひずみ応力変形解析を行った。その結果、以下の知見が得られた。

1. Burgersモデルは時間依存性挙動を表現する簡単なレオロジカルモデルであるが、これを適用することにより室内試験、モデルの設定とパラメータの決定、数値解析、そしてその結果に基づく堆積軟岩の時間依存性挙動が掘削時の坑道周辺岩盤および支保の安定性に及ぼす影響評価を、系統立てて行うことができる。
2. 数値解析により、時間依存性変形に対する支保の剛性、側圧係数の影響を調べた結果、支保の剛性が大きいほどその抑制効果が増し、地山の変形は減少するが、支保の軸力は増加する。側圧係数が大きくなると、天端部の応力は大きくなり、支保の剛性が大きいほど軸力は大きくなる。
3. CDI 、 CTI という2つのクリープ判定指標を提案し、それらを用いて、支保立て込み後の時間依存性変形が、坑道周辺岩盤や支保の軸力に及ぼす影響を調べた。その結果、支保の軸力や地山のひずみの

変化率が最大となる CDI 値が存在することが分かった。与えられた材料に対してこの値を知れば、短時間の変位計測で最終変位の大きさが予想できる。 CTI についてはその増加とともに（遅延効果の増加）支保の軸力やひずみの変化率も大きくなる。

参考文献

- 1) 足立紀尚, 岡二三生, 小池真史, 尾崎仁美, 福井英大: 軟岩の時間依存性挙動とひずみ軟化型弾-粘塑性構成式, 地盤工学研究発表会講演集, Vol.32, No.2-1, pp.1187-1188, 1997.
- 2) 西好一: 軟岩のクリープ特性. 応用地質. Vol.38 (5), pp. 304-311, 1997.
- 3) 西垣好彦, 松村真一郎: 軟岩のクリープ定数に及ぼす載荷時間の影響, 岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, Vol.24, pp.231-235, 1992.
- 4) 足立紀尚, 岡二三生, 曾良岡宏, 小池真史: 軟岩の時間依存性挙動とその統一的な説明, 土木学会論文集, No.596, pp.1-10, 1998.
- 5) 国村省吾, P. Kabele, 堀井秀之: 軟岩地山掘削時におけるトンネル支保工の効果について, 地盤工学研究発表会発表講演集, Vol.34. 2分冊の2, pp.1753-1754, 1999.
- 6) 大久保誠介, 福井勝則: コンプライアンス可変型構成方程式の定数について, 資源と素材, Vol.113, No.7, pp.561-564, 1997
- 7) Itasca Consulting Group: *Fast Lagrangian Analysis of Continua, Version 5.00*, 2005.

STABILITY ANALYSIS OF UNDERGROUND OPENING DURING EXCAVATION, TAKING TIME-DEPENDENT BEHAVIOUR OF SURROUNDING ROCK MASS INTO CONSIDERATION

Toyokazu OGAWA, Tomoyuki AOKI, Mayumi JO,
Hiroya MATSUI and Hideyuki HORII

For a design and safe construction and operation of underground structures in sedimentary rocks at depths, it is important to consider long-term stability of rock mass around openings. It is important especially at the excavation stage to evaluate this since the rock deforms elastically as well as inelastically. This paper introduces a method to explain this, combining laboratory experiments and a rheological model with numerical analysis results. A couple of indices to describe the degree and timing of time-dependent deformation are introduced with reference to the instantaneous elastic deformation. Effects on the amount of deformation and support pressure subsequent to the support erection are investigated.