

支保がトンネルの長期安定性に与える効果 に関する解析的検討

STUDY ON THE EFFECT OF SUPPORT FOR LONG-TERM STABILITY OF TUNNEL

宮野前俊一*・野本康介*・松井幹雄*・梨本裕*・大久保誠介**

Shunichi MIYANOMAE, Kousuke NOMOTO, Mikio MATSUI,

Yutaka NASHIMOTO, and Seisuke OKUBO

Recently the planning of deep underground tunnels has been increasing such as underground disposal of radioactive waste and CAES-GT power generation plant. The tunnel support has important role to maintain the stability of tunnel for long-term, especially in case it has a difficulty in repairing during use. In this study, FEM analysis has been carried out to evaluate the effect of tunnel support, assuming various setting timings and stiffnesses, for long-term stability of tunnel. Time dependent behavior of rock is assumed to be the main factor affecting the stability of tunnel, and numerically simulated using compliance variable model proposed by Okubo et al.

Key Words: tunnel support, time dependent behavior, creep, FEM

1. はじめに

近年、放射性廃棄物の地層処分や CAES-GT 発電、大深度地下の多角利用等、大深度トンネルを構築する計画が増えてきている。LCC（ライフサイクルコスト）評価や LCA（ライフサイクルアセスメント）に代表されるように、一般のトンネルにおいても長期維持が問題となっている中で、特に供用中に補修が困難であり、損失が社会に与える影響が大きいこれらトンネルについて考える上で、掘削時にどのような対処を行い、長期安定を図るのかについて検討することには意義があると考えられる。

このような長期安定性に関する検討を行うにあたり、数値解析¹⁾によるシミュレーションが有効な手段の一つであると考えられる。本研究では、掘削時に設置される支保を例にとり、その設置時期、剛性をパラメータとした FEM 解析を行い、掘削時における対処がトンネルの長期安定性に与える効果を解析的に評価することを試みた。岩盤は新第三紀の堆積岩相当を対象とした。岩盤の力学挙動を考える上で、不連続面の挙動が支配的となる場合もあるが、本研究においては、岩盤は近似的に連続体と見なすことができ、トンネルの安定性を低下させる支配的な要因を時間依存性挙動（クリープ挙動）と仮定し、その挙動が比較的顕著な場合を想定した。岩盤の構成方程式には、大久保ら²⁾により提案されたコンプライアンス可変型構成方程式を用いた。

2. 解析モデル

(1) コンプライアンス可変型構成方程式

本構成方程式は、大久保らにより提案された粘弾性構成方程式である。一般型は複雑であるが、基礎方程式は(1)式のようにあらわすことができる。

* 正会員 前田建設工業株式会社 土木本部 土木設計部

** 正会員 東京大学 工学系研究科 地球システム工学専攻

$$\frac{d\lambda^*}{dt} = a \cdot (\sigma^*)^n \cdot (\lambda^*)^m \quad (1)$$

ここで、 $\lambda^* (= \lambda / \lambda_0)$ はひずみ ε と応力 σ の比であるコンプライアンス $\lambda (= \varepsilon / \sigma)$ を初期値 λ_0 (初期ヤング率 E_0 の逆数) で基準化した値、 t は時間、 σ^* は破壊接近度、 a は強度を決める定数、 n は応力依存性をあらわす定数、 m は破壊の進行性をあらわす定数である。本研究では、岩盤に拘束圧 σ_3 が作用するに伴い、 σ^* は(2)式に、 n は(3)式に従い変化するものとした。

$$\sigma^* = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\sigma_0} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\Delta\sigma_0} \quad (2)$$

$$n = \frac{\Delta\sigma_0}{\sigma_c} n_0 \quad (3)$$

ここで、 $\Delta\sigma$ は主応力差、 $\Delta\sigma_0$ 、 σ_c はそれぞれMohr-Coulomb基準により求まる破壊強度 ((4)式)、一軸圧縮強度 ((5)式) であり、 n_0 は一軸応力下における n である。なお、引張応力下における岩盤の挙動も重要な検討事項であるが、本研究においては圧縮応力下のみを対象とした。

$$\Delta\sigma_0 = \sigma_c + \frac{2 \cdot \sigma_3 \cdot \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (4)$$

$$\sigma_c = \frac{2 \cdot C \cdot \cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad (5)$$

ここで、 C は粘着力、 ϕ は内部摩擦角である。

またポアソン比 ν は、 λ^* の増加に伴い、(6)式に従い増加するものとした。

$$\nu = 0.5 - \frac{0.5 - \nu_0}{\lambda^*} \quad (6)$$

ここで、 ν_0 は初期ポアソン比である。

本研究では、本構成方程式を用いた増分型の応力-ひずみ関係式を組み込んだFEM解析コード³⁾により解析を行った。

(2) FEMモデル

FEM解析に用いたモデルを図-1に示す。本研究では簡単のため、等方等圧の初期応力状態にある岩盤中に、直径5.0mの円形トンネルが1掘進長1.0mで全断面掘削されるものと仮定した。初期応力は、深度500m程度を想定し10MPaと設定した。岩盤、支保部材の物体力は考慮しなかった。解析は2次元平面ひずみ状態とし、Mohr-Coulomb基準に従う完全弾塑性解析によりトンネル掘削直後の各要素の応力状態を求め、その応力状態を基に、以降岩盤が時間依存性挙動を呈することとした。掘削時の支保の設置時期がトンネルの長期安定性に与える効果について検討する目的で、応力解放率の大きさを変えることにより支保設置の早遅を便宜的に表現することとし、30%、および80% (30%に比較し、支保の設置が遅く、岩盤が負担する応力割合が大きい) と設定した。また、支保の剛性がトンネルの長期安定性に与える効果について検討する目的で、3種の支保

パターンを設定した。劣化、降伏に伴う支保の機能低下は重要な検討事項⁷⁾であるが、未だ不明な点が多いため、本研究では解析対象とする期間において機能が低下しないものとし、線要素（線形弾性体）でモデル化した。また、ロックボルト、補助工法による支保効果は考慮しなかった。解析対象とする期間については、例えば放射性廃棄物の地層処分⁵⁾においては、坑道が掘削され、内部に埋め戻しが施工されるまでの期間は数十年である。以降、埋め戻し材の剛性によっては岩盤の粘弾性挙動は遅延されるとも考え得るが、本研究においてはこのような効果を考慮せず、掘削後100年間を解析対象期間とした。解析における時間分割は、解が収束するよう十分細かくすることを心がけた。

(3) 入力物性値

岩盤の入力物性値を表-1に、支保の入力物性値を支保パターンとともに表-2に示す。トンネルの安定性の目安を得る上で重要な指標の一つである地山強度比を1.0と想定し、一軸圧縮強度を10MPaと設定した。初期ヤング率は、一軸圧縮強度の100倍と仮定し、1GPaと設定した。また、内部摩擦角を35°と設定した。コンプライアンス可変型構成方程式の n_0 は30とし、 m は n_0 に対し1/2となるよう設定した。表-1の入力物性値を基に、(1)式を用いてひずみ速度条件（圧縮応力下）における応力-ひずみ曲線を描くと図-2のようになる。図-2より、拘束圧 σ_3 が大きくなるに伴い、ピーク強度、および残留強度が大きくなることが分かる。

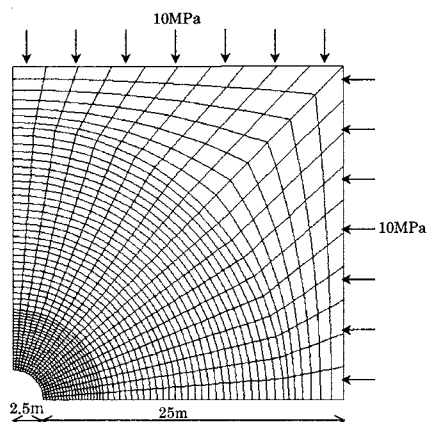


図-1 FEM解析モデル

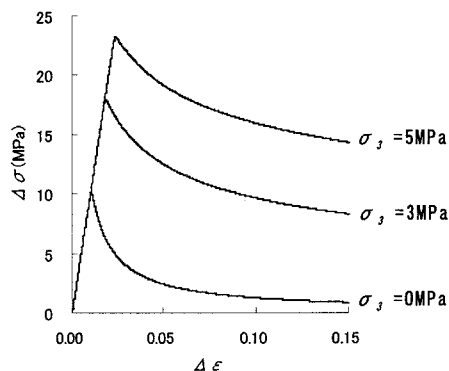


図-2 応力-ひずみ曲線

表-1 岩盤の入力物性値

一軸圧縮強度 σ_c (MPa)	10
初期ヤング率 E_0 (GPa)	1
初期ポアソン比 ν_0	0.3
内部摩擦角 ϕ (°)	35
粘着力* C (MPa)	2.6
n_0	30
m	15

* (5)式により求めた

表-2 支保の入力物性値

支保パターン		I	II	III
吹付け コンクリート	ヤング率 (GPa)	4.0		
	厚さ (m)	0.15	0.20	0.25
鋼製支保*	ヤング率 (GPa)	200		
	断面積 (m ²)	$3.0 \times 10^{-3**}$	$4.0 \times 10^{-3***}$	$6.4 \times 10^{-3****}$

*設置間隔1.0m, **H-125, ***H-150, ****H-200

3. 解析結果

トンネルの安定性の判断材料として一般に計測が行われる「壁面変位」、解析において、掘削による影響領域が明確に現れる「岩盤の応力状態」、およびトンネルが安定性を保持する前提条件である「支保の作用力」

に着目し、得られた解析結果について述べる。

(1) 壁面変位の経時変化

ある時間における変位から掘削直後の変位（完全弾塑性解析により得られる変位）を差し引いて得られるクリープ変位と経過時間（掘削直後を0年とする）との関係を図-3（応力解放率30%）、および図-4（同80%）に、クリープ変位速度と経過時間との関係を図-5（同30%）、および図-6（同80%）に示す。応力解放率が30%で支保が設置されたとしたケースは80%のケース（30%に比較し、支保の設置が遅い）に比較し、クリープ変位、およびクリープ変位速度が小さくなる傾向を示す。また、支保が剛になるにつれクリープ変位、およびクリープ変位速度は減少傾向を示す。応力解放率が30%で支保パターンがⅢのケースでは、ほとんどクリープ変位が生じていない。クリープ変位速度は、いずれのケースにおいても初期の段階で大きく、その後ほぼ対数則に従い減少傾向を示す結果となり、トンネルが徐々に安定化へと向かうことが推察される。

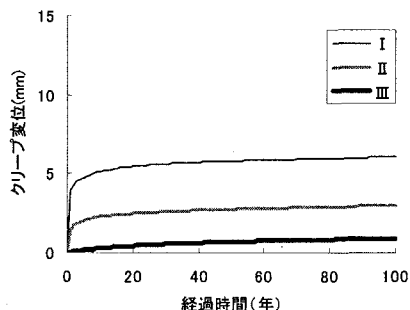


図-3 クリープ変位-時間曲線（応力解放率30%）

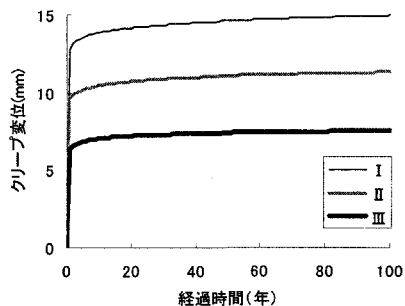


図-4 クリープ変位-時間曲線（応力解放率80%）

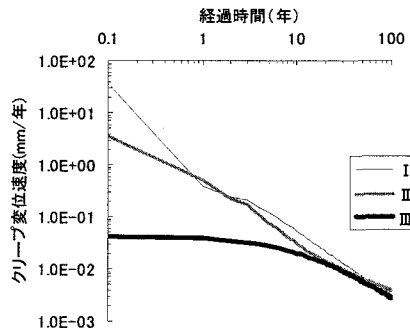


図-5 クリープ変位速度-時間曲線（応力解放率30%）

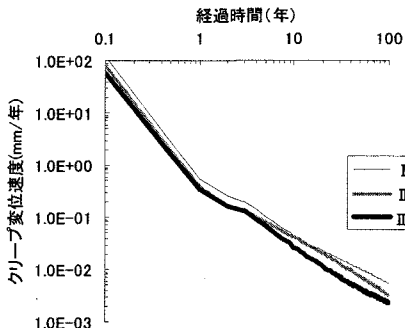


図-6 クリープ変位速度-時間曲線（応力解放率80%）

(2) 岩盤応力の経時変化

掘削直後から1年経過後の岩盤の応力状態を図-7（応力解放率30%）、および図-8（同80%）に、100年経過後の応力状態を図-9（同30%）、および図-10（同80%）に示す。それぞれの図において、縦軸はトンネル周方向（凡例中に θ と表記）応力、および半径方向（凡例中に r と表記）応力をそれぞれ初期応力（10MPa）で除した値であり、横軸はトンネル壁面からの距離を、掘削径（5.0m）で除した値である。また、図中にそれぞれの支保パターンにおいてトンネル周方向応力がピークを示す位置を矢印で示した。ここで、ピーク位置より内空側を掘削、および時間依存性挙動による影響領域と捉えれば、応力解放率が30%のケースは80%のケースに比較し、影響領域の拡がり方が小さいことが分かる。また、支保が剛である程、影響領域の拡がり方が小さくなる傾向を示す。トンネル壁面に作用する内圧（半径方向応力）に着目すれば、支保の設置が早く、支保が剛である程、その値が大きくなる傾向を示すことが分かる。

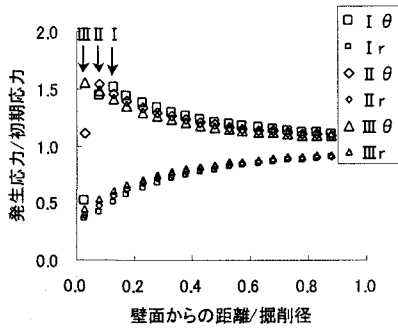


図-7 1年経過後岩盤応力状態（応力解放率30%）

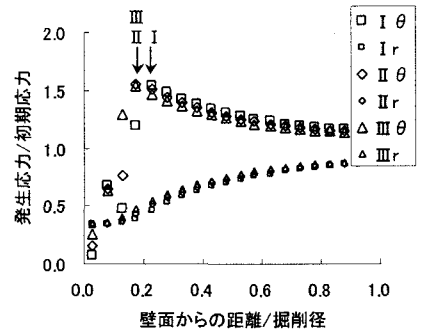


図-8 1年経過後岩盤応力状態（応力解放率80%）

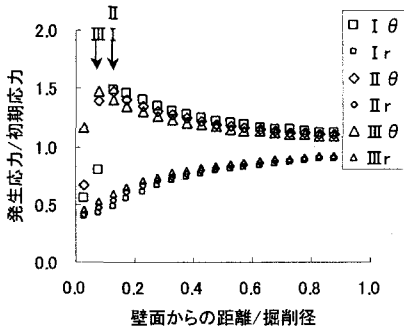


図-9 100年経過後岩盤応力状態（応力解放率30%）

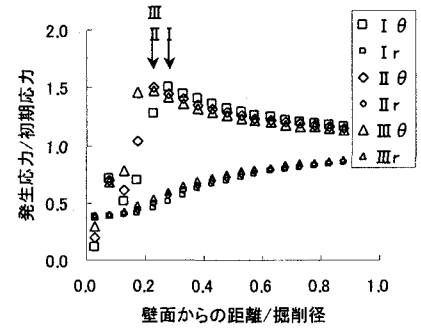


図-10 100年経過後岩盤応力状態（応力解放率80%）

(3) 支保作用力の経時変化

支保の破壊接近度の経時変化を図-11（応力解放率30%），および図-12（同80%）に示す。ここで破壊接近度 P^* は，(7)式で求めた支保耐力 P に対する支保（吹付けコンクリート+鋼製支保）に発生した軸力 N の比（ $P^*=N/P$ ）で表したものであり，この値が1.0を超えると支保の耐力を超えることになる。

$$P = \sigma_c \cdot A_c + \sigma_s \cdot A_s \quad (7)$$

ここで， σ は強度， A は断面積であり，添字の c ， s はそれぞれ吹付けコンクリート，鋼製支保を示す。本研究においては， σ_c を40N/mm²， σ_s を440N/mm²と仮定して結果を整理した。

図より，いずれのケースにおいても掘削直後（完全弾塑性解析より得られる P^* であり，図中矢印の先端位置で示す）は P^* が1.0以下であるが，支保パターンがI，およびIIのケースでは時間経過に伴い1.0を超えることが分かる。また，応力解放率が80%のケースでは，掘削直後（経過時間0年）の P^* は，当然のことながら30%のケースに比較し小さくなる結果となるが，時間経過に伴い30%のケースに比較し同程度，あるいは大きくなることが図-13より分かる。図-13において縦軸は応力解放率が80%のケースにおける破壊接近度（ P^*_{80} ）を30%のケースにおける破壊接近度（ P^*_{30} ）で除した値を，横軸は経過時間を示す。

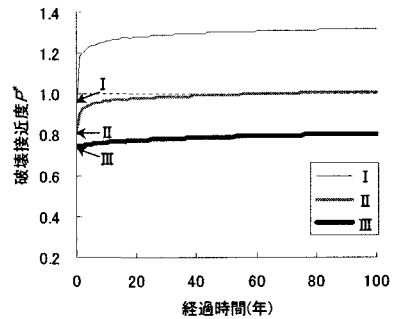


図-11 支保破壊接近度経時変化（30%）

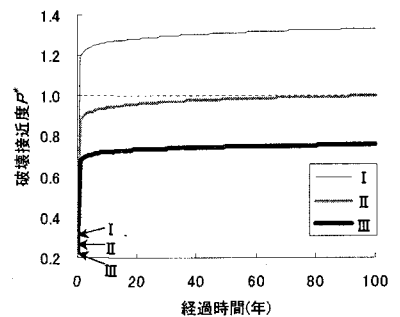


図-12 支保破壊接近度経時変化（80%）

(4) 結果のまとめ

解析結果より得られた傾向を以下に列挙する。

- ① 支保の設置時期が早い程（早期閉合である程），変位抑制効果がある。また，掘削および時間依存性挙動による影響領域（緩み）の抑制効果がある。
- ② 支保の剛性が高い程，①と同様の効果がある。
- ③ トンネルの長期安定性は，①と②の相乗効果により高まる。
- ④ 時間依存性挙動による変形，応力状態の変化は初期段階で顕著であり，その後徐々に収束（安定化）傾向を示す。

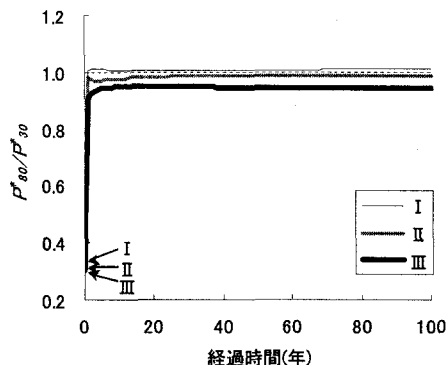


図-13 P_{80}/P_{30} 経時変化

これらは，従来の施工において比較的短期（主に掘削直後）の安定性を対象として得られてきた知見⁶⁾⁷⁾と同様の傾向である。①～③より，支保により適度の内圧が岩盤に保持，あるいは付加されれば，トンネルの長期安定性が保持されることが，④より，支保が長期にわたり健全な状態を保持していれば，岩盤が内空側へ変形することによる反作用力として徐々に内圧が岩盤に付加され，安定へと向かうことが推察される。本研究では簡略化を重んじたため，支保の劣化，降伏に伴う機能低下，ロックボルトや補助工法等が安定性に与える効果等を考慮に入れていないが，支保による内圧効果が岩盤の長期安定性を保持し，その結果トンネルの長期安定性を大きく向上させることが推察される。

4. おわりに

近年，長期にわたり供用されてきたトンネルの補修，補強工事が増加しつつあるが，本研究で検討対象としたような大深度トンネルにおいては，これら工事が種々の制約から困難となる場合があると考えられる。長期安定性という問題に対し未だ不明点が多いため，ある程度の裕度を持った支保設計が必要であると考えられるが，過大な設計はコスト増大や環境への負荷を招くこととなる。よって長期的な安定性を考慮に入れた支保の最適設計が極めて重要であると考えられる。本研究は机上の検討であるが，今後，実験的検討や実際のトンネルにおける挙動計測を通じ，トンネルの長期安定性を保持するために必要な条件が明らかとなれば，最適設計の大きな一助となり得ると考えられる。また，適切な支保が施されれば，影響領域の強度が回復する可能性が示唆されている。今後，長期安定という問題を抱えたトンネルの設計を考える上で，このような観点も踏まえた検討が重要であると考えられる。

参考文献

- 1) 大久保誠介，福井勝則：内圧を受ける円形坑道の長期安定性の検討，資源と素材，Vol.115，No.1，pp.9-15，1999。
- 2) 大久保誠介：コンプライアンス可変型構成方程式の解析的検討，資源素材学会誌，Vol.108，No.8，pp.601-606，1992。
- 3) 野本康介，宮野前俊一，松井幹雄，梨本裕，大久保誠介：コンプライアンス可変型構成方程式を用いた増分法FEM解析手法の開発，土木学会第58回年次学術講演概要集，Ⅲ-523，2003。
- 4) 大津宏康：建設分野におけるリスク工学の適用性とその展望，土木学会論文集，No.728，VI-58，pp.1-16，2003。
- 5) 核燃料サイクル開発機構：地層処分研究開発第2次取りまとめ，分冊2 地層処分の工学技術，1999。
- 6) 井上博之，足立宏美，三谷浩二：トンネル変位抑制工の効果の事前設計に関する一考察，第32回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.233-238，2003。
- 7) E.Boidy, A.Bouvard, F.Pellet: Back analysis of time-dependent behavior of a test gallery in claystone, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol.17, No.4, pp.415-424, 2002。