

(41) スクィーピング地山におけるトンネル挙動の予測方法とその適用

東海大学海洋学部	正会員	アイダン・オメル
豊田工業高等専門学校	正会員	○ 赤木知之
名古屋大学工学部	正会員	川本眺万

A METHOD OF PREDICTION FOR THE BEHAVIOUR OF TUNNELS IN SQUEEZING
ROCKS AND ITS APPLICATIONS

Ömer AYDAN Tokai University
T. Akagi Toyota National College of Technology
T. Kawamoto Nagoya University

Abstract

In this paper, a new method is proposed to predict the squeezing potential and deformations of tunnels in squeezing rock. The method has been applied to actual tunnelling projects, where squeezing problems encountered, to check its validity and applicability. As concrete examples of application of the proposed method, several actual tunnels have been analysed to predict the squeezing potential and deformations of tunnels. It is found that the predictions by the proposed method well agree with observations and it is a very promising tool for tunnelling engineers.

1. まえがき

Terzaghi¹⁾によれば、「スクィーピングとは、トンネル周辺地山がその体積を増加させることなくトンネル内空へ押し出す現象であるが、スウェリング（膨潤）は、地山内に含有する粘土鉱物が吸水膨張して地山の体積が増加し、地山がトンネル内に押し出す現象である。」としている。日本では、このような現象をまとめて膨張性トンネルと呼んでいるが、メカニズムとしては明確に区別されるべきである。スクィーピングのメカニズムに関しては、1988年に開設された ISRM の Technical Commission において合意を得ており、「スクィーピングとは、トンネル掘削に伴う二次応力が周辺地山の強度を越えて地山を破壊し、さらに掘削が進むにつれて破壊領域がトンネル壁面から地山内部へと進行し、破壊した岩盤マスがトンネル内空へ押し出す現象である。」とされている。当然、モンモリロナイト等の膨潤性粘土鉱物を含む地山は、低強度のためわずかな応力増加でせん断破壊をもたらす。そこへ地下水が浸透し粘土鉱物が吸水膨張してさらに地山を膨張させるものと推察される。すなわち、日本における膨張性トンネルの実態は、スクィーピングして後スウェリングしているものと考えられる。しかし、実際の現象としての膨張量はスクィーピングによるものの方がはるかに大きく、また、現象の時間尺度もかなり異なるので、トンネルの設計・施工においてはとりあえずスクィーピングのみを考慮して十分であろう。

本研究では、地山材料の応力-ひずみ曲線をモデル化し、その状態変化のときのひずみ値の大きさがスクィーピングによるトンネル壁面変位に関係するものと考え、それらの弾塑性解を別に整理したスクィーピングロックの諸特性²⁾と関係づけて、スクィーピングトンネルの壁面変位を簡便に予測する手法を考えている。予測方法に関する概略は別に報告している³⁾が、本報告ではさらに研究を進め、支保工を施した場合の変位予測図を付加するとともに、二つの事例に適用した例を紹介し、手法の予測精度に関する検討を加えている。

2. トンネルのスキューズィングポテンシャルと状態ひずみ比

地山材料の応力-ひずみ曲線は、一般的に図-1のように表せる。スキューズィングは材料の降伏後のひずみ挙動に関係すると考えらるから、ひずみ挙動の状態変化を示すひずみ値を図-1に示すように定義し、それらの弾性限界ひずみに対する比を状態ひずみ比と呼ぶこととする。地山材料の状態ひずみ比が大きい程、スキューズィングのポテンシャルは高く、トンネルの壁面変位は大きくなる。図-1に示すように、ピーク強度でのひずみを ε_p 、軟化開始ひずみを ε_s 、流動開始時のひずみを ε_f とすれば、状態ひずみ比は次のように3種類定義できる。

$$\eta_p = \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_e}, \quad \eta_s = \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_e}, \quad \eta_f = \frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_e} \quad (1)$$

状態ひずみ比は一軸圧縮強度(σ_c)に関係するものと考えられるので、日本におけるスキューズィングロックの力学特性を調べた既往の報告を整理してまとめたところ、図-2のような結果が得られた。バラツキはあるものの3つの状態ひずみ比が一軸圧縮強度に依存して特定の傾向を示していることがわかる。これらの近似曲線を図中に示すが、べき関係で次式のように近似できる。

$$\eta_p = 2\sigma_c^{-0.17}, \quad \eta_s = 3\sigma_c^{-0.25}, \quad \eta_f = 5\sigma_c^{-0.32} \quad (2)$$

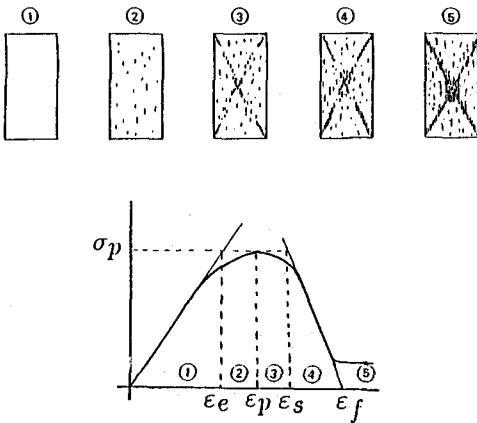


図-1 応力-ひずみ曲線におけるレベルの区分(①～⑤)

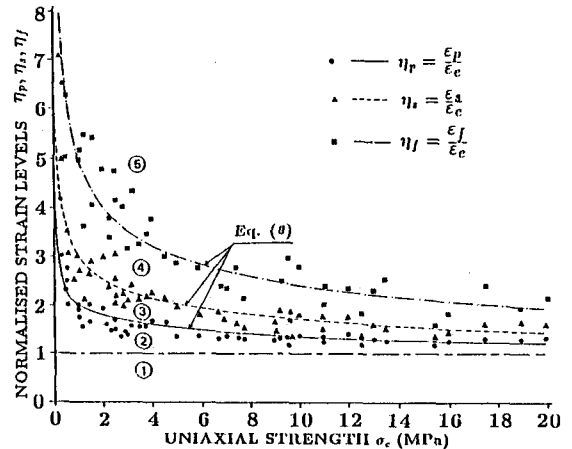


図-2 状態ひずみ比(η_p, η_s, η_f)の一軸圧縮強度依存性

表-1 スキューズィングレベルの定義

分類番号	スキューズィングレベル	記号	定義式	推定されるトンネル挙動
1	無し	NS	$\varepsilon_p^0/\varepsilon_e^0 \leq 1$	壁面変位は切羽距離2Dではほぼ収束し、その大きさは弾性計算によって求められる程度である。
2	軽い	LS	$1 < \varepsilon_p^0/\varepsilon_e^0 \leq \eta_p$	壁面変位は切羽距離2Dではほぼ収束するが、その変位量は弾性計算によるものより大きくなる。
3	中位	FS	$\eta_p < \varepsilon_p^0/\varepsilon_e^0 \leq \eta_s$	切羽距離2Dを超えても変位は継続し、かなり大きくなるが、やがて収束する。
4	激しい	HS	$\eta_s < \varepsilon_p^0/\varepsilon_e^0 \leq \eta_f$	切羽通過後大きな変位が急速に押し出すような現象を呈し、収束する様子は見せない。盤ぶくれ現象も起こる。
5	非常に激しい	VHS	$\eta_f < \varepsilon_p^0/\varepsilon_e^0$	切羽は自立せず、壁面は絶え間なく押し出し、繰り返しで強固な支保で補強しない限り変位は止まらない

3. 円形トンネルに対する壁面ひずみ比 ($\xi = \epsilon_{\theta}^a / \epsilon_{\theta}^s$) の計算

トンネル壁面がそれぞれのひずみレベルにあるときの円周ひずみ (ϵ_{θ}^a) を円形トンネルの場合について理論的に誘導し、壁面ひずみ比を計算する。図-1 に示した応力-ひずみ曲線に基づいてそれぞれの状態での円周ひずみを求めることは困難なので、図-3 のように若干簡略化したモデルを使うこととする。すなわち、軟化過程を半分づつ完全塑性域と流動域に含めてしまい、軟化開始ひずみ (ϵ_s) と流動開始ひずみ (ϵ_f) の平均を ϵ_{sf} とする。このような簡略化は、表-1 に定義したスキューズィングレベル HS と VHS を区別しないことになるが、実務上は特に問題とならないであろう。図中の f は完全塑性状態における縦ひずみと横ひずみの比であり、 f^* は流動状態におけるものである。したがって、理論展開では応力-ひずみ関係が oe 間にある弾性状態、 es 間にある完全塑性状態そして gg' 間にある流動状態に対するトンネル壁面の円周ひずみを求めれば良いことになる。なお、 ϵ_{sf} に対する状態ひずみ比 η_{sf} は $\eta_{sf} = \epsilon_{sf} / \epsilon_e = (\eta_s + \eta_f) / 2$ で与えられる。

いま、トンネルが等方圧 p_0 を受け、断面が軸対称状態にあるものとする。弾性域から完全塑性域および完全塑性域から流動域への変化を判定する基準は、それぞれの状態での内部摩擦角を ϕ および ϕ^* とし、流動状態となった材料の一軸圧縮強度を σ_c^* とし、クーロンの基準にしたがうものとする。

以上の材料特性に基づき、まず、トンネル壁面が弾性限界状態、すなわち、図-3 の e 点にあるときの壁面ひずみ (ϵ_{θ}^a) を求めると、 $\sigma_{\theta}^a = \sigma_c$ となるから、内圧 $p_i = 0$ の場合

$$\epsilon_{\theta}^a = \frac{1 + \nu \sigma_c}{E} \frac{\sigma_c}{2} \quad (3)$$

と求められる。つぎに、式 (3) を用いトンネル壁面が完全塑性状態になるときの壁面ひずみ比を計算すると次式が得られる。

$$\xi = \frac{\epsilon_{\theta}^a}{\epsilon_{\theta}^s} = \left[\frac{2}{q+1} \left\{ \frac{(q-1) + \alpha}{(q-1)\beta + \alpha} \right\} \right]^{\frac{f+1}{f-1}} \quad (4)$$

ここに、 $\beta = p_i / p_0$ は支保圧と土被り圧の比であり、 $\alpha = \sigma_c / p_0$ は地山強度比である。つぎに、トンネル壁面が流動状態になるときの壁面ひずみ比は同様に次式のように求められる。

$$\xi = \frac{\epsilon_{\theta}^a}{\epsilon_{\theta}^s} = \eta_{sf} \left[\frac{\frac{2}{q+1} \left\{ \frac{(q-1) + \alpha}{(q-1)} \right\} \eta_{sf}^{\frac{f+1}{f-1}} - \frac{\alpha}{q-1} + \frac{\alpha^*}{q^*-1}}{\beta + \frac{\alpha^*}{q^*-1}} \right]^{\frac{f^*+1}{f^*-1}} \quad (5)$$

ここに、

$$q = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}, \quad q^* = \frac{1 + \sin \phi^*}{1 - \sin \phi^*}, \quad (6)$$

であり、 $\alpha^* = \sigma_c^* / p_0$ 、 $\eta_{sf} = (\eta_s + \eta_f) / 2$ である。式 (4)、(5) は、地山材料の力学特性および土被り圧と支保圧が決まれば、壁面ひずみ比が計算でき、それを表-1 および図-2 に適用すればスキューズィングレベルを求めることができる。しかし、ここではスキューズィングロックの力学特性に関する既往の研究成果²⁾を導入して、スキューズィングレベルのみならずトンネル壁面変位を簡単に予測する手法を提案する。

4. スキューズィングトンネルにおける壁面変位の簡易予測法

式 (4) において支保圧が零の場合 ($\beta = 0$) を考え、同式に $\alpha = \sigma_c / \gamma_t H$ を代入すると次式を得る。

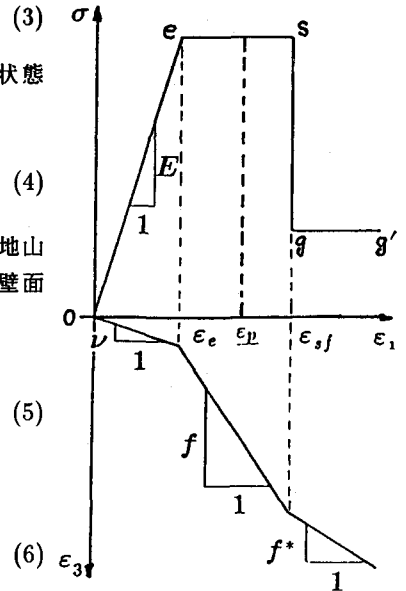


図-3 応力-ひずみ曲線のモデル化

$$\xi = \left[\frac{2}{q+1} \left\{ (q-1) \frac{\gamma_t H}{\sigma_c} + 1 \right\} \right]^{\frac{q+1}{q-1}} \quad (7)$$

式(13)を H について解くと、

$$H = \frac{\sigma_c}{2\gamma_t(q-1)} \left[(q+1)\xi^{\frac{q-1}{q+1}} - 2 \right] \quad (8)$$

を得る。ここに、 γ_t および ϕ と σ_c の関係式²⁾

$$\gamma_t = 10(1 + 0.8\sigma_c^{0.15}) \quad (9)$$

$$\phi = 20\sigma_c^{0.25} \quad (10)$$

導入し、 ξ に各状態のひずみ比($1, \eta_p, \eta_{sf}$)、すなわち式(2)を代入すると、それぞれのスクィーズィングレベルを区分する式が $H - \sigma_c$ 関係として求められる。その結果を図-4(a)に示す。一方、壁面ひずみ比(ξ)がそれぞれの状態のひずみ比(η_p, η_{sf})に等しい場合の壁面ひずみ(ϵ_θ^a)は、式(3)を用いて次のように得られる。

$$(\epsilon_\theta^a)_p = \frac{1+\nu}{E} \frac{\sigma_c}{2} \eta_p, (\epsilon_\theta^a)_{sf} = \frac{1+\nu}{E} \frac{\sigma_c}{2} \eta_{sf} \quad (11)$$

ここで、 E および ν と σ_c の関係式²⁾

$$E = 80\sigma_c^{1.4} \quad (12)$$

$$\nu = 0.25(1 + e^{-0.2\sigma_c}) \quad (13)$$

を導入し、 η_p, η_{sf} に式(2)を適用すると、それぞれのスクィーズィングレベルを区分する式が $\epsilon_\theta^a - \sigma_c$ 関係として求められる。その関係曲線を図-4(b)に示す。

図-4(a)を使えば、地山の一軸圧縮強度(σ_c)のみを特定することによって土被り(H)からスクィーズィングレベルが決まり、同図(b)からそのときのおよその壁面変位を推定することができる。

例えば図に○印で示したが、いま、 $\sigma_c = 2.5 \text{ MPa}$ 、 $H = 140 \text{ m}$ であったとすると、図-4(a)よりそれらはFSのレベルになり、それを図-4(b)のFSレベルに移動し、その縦軸を読むと $\epsilon_\theta^a = 4.2\%$ となる。トンネル半径を 5 m とすれば、壁面変位は $500 \times 0.042 = 21 \text{ cm}$ と計算される。きわめて簡便な手法であるが、これには地山の力学特性および状態ひずみ比と σ_c の相関式の成立が前提となっている。本研究では日本における多くのデータを収集してこれらの相関式を求めたが、もし地山の特性がこれらの関係式から大幅にずれるものであれば、その現場に合った式を別に定めてこの手法を適用すればよい。

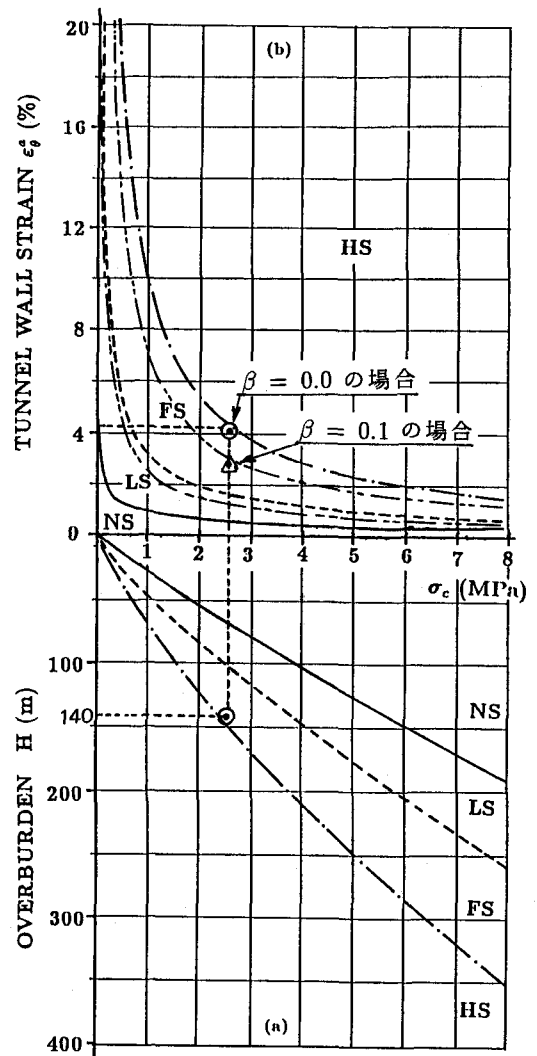


図-4 スクィーズィングレベルの区分図

(a) $H - \sigma_c$ 関係 (b) $\epsilon_\theta^a - \sigma_c$ 関係

なお、支保工による内圧 p_i を考慮する場合は $\beta \neq 0$ として、所定の土被り (H) に対する式 (4) を計算し、それに式 (3) を乗じることによって、壁面ひずみ ε_θ を求めればよい。図-4 (b) に $\beta = 0.1$ の場合の結果を示してあるが、支保を施すことによって壁面ひずみが減少の様子が分かる。

5. 適用例

薬師トンネル⁴⁾および能生トンネル⁵⁾へ本手法を適用した結果を図-5、6に示す。いずれも、弾性波速度と σ_c 関係式²⁾を用いて σ_c を特定している。したがって、予測は弾性波速度の分帯ごとに行われているのに対し、計測はポイントワイズに得られているために、一概に比較できないが実用的な範囲内で良く合っていると云えよう。薬師トンネルの測点34-38が幾分か離れた結果となっているがその理由については、実際の現場を見て地山物性値などを詳細に検討してみないと断言できない。

今後、実務レベルで本手法を適用しリアルタイムに計測と比較しながら手法の精度を確認できればと考えている。

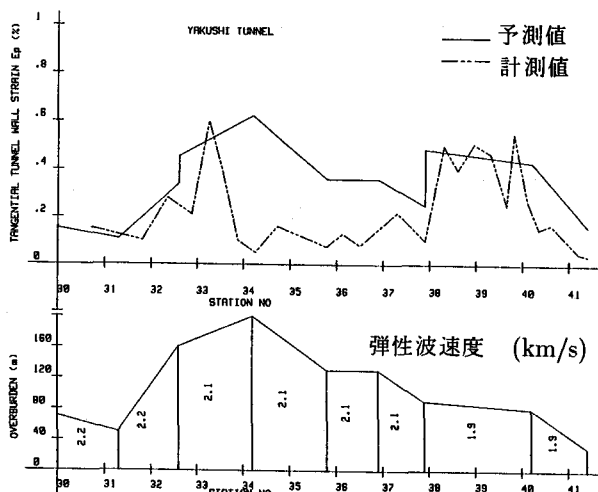


図-5 薬師トンネル⁴⁾への適用

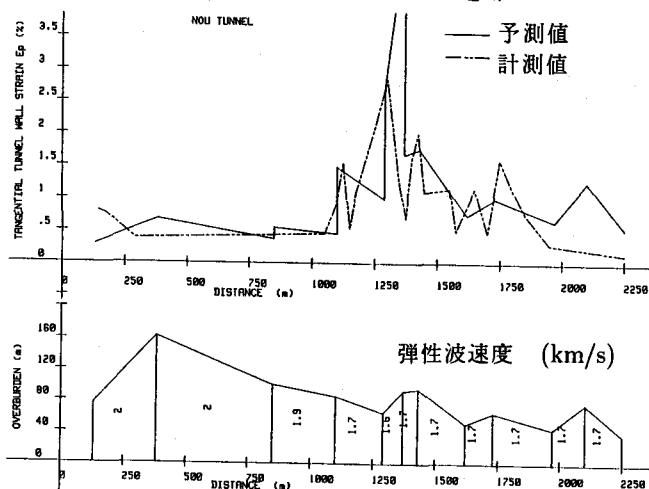


図-6 能生トンネル⁵⁾への適用

参考文献

- 1) Terzaghi, K.: Theoretical Soil Mechanics, Wiley, New York, 1943.
- 2) 川本暁万・Ömer AYDAN・赤木知之：日本におけるスキューズィングトンネルの実態、第24回岩盤力学シンポジウム、1992年2月。
- 3) アイダン・オメル・赤木知之・川本暁万：スキューズィング地山におけるトンネル壁面変位の簡便予測法について、第1回トンネル工学研究発表会（土木学会）、pp.165-170、1991年12月。
- 4) 中村正人：統計分析をもちいた掘削解析管理、北陸自動車道、薬師トンネル、トンネルと地下、Vol.17, No.3, pp.17-24, 1986。
- 5) 佐藤正彦・安川正春・矢野尚彦・桑田俊男：能生トンネルの変位特性と支保効果、トンネルと地下、Vol.13, No.9, pp.25-35, 1987。