

スクィーピング地山におけるトンネル壁面変位の簡易予測法について
A METHOD FOR THE ESTIMATION OF TUNNEL WALL DISPLACEMENT IN SQUEEZING
ROCK

アイダン・オメル*, 赤木知之**, 川本眺万***
Ömer AYDAN, Tomoyuki AKAGI, Toshikazu KAWAMOTO

In this paper, an extensive survey of tunnels in squeezing rocks in Japan is firstly presented and the results of this survey is summarised. Then, 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 an concrete example, an application of the method to predict the squeezing potential and deformations of the rock along a 300 m long section of an actual tunnel was made. It is found that the predictions by the proposed method well agree with observations and it is a very promising tool for tunnelling engineers.

Keywords: squeezing rock, expansive ground, tunnel, competency factor, uniaxial compressive strength, squeezing level, tunnel wall displacement, prediction

1. まえがき

ある種の軟質岩からなる地山にトンネルを掘削すると、トンネル断面を大幅に減少させるような壁面変位が盤ぶくれ現象を伴って生じることがある。日本ではこのような現象を直接捕えてこの種のトンネルを膨張性トンネルと呼び、その対応に苦慮した事例が数多く報告されている^{1)~6)}。この現象のメカニズムについては若干の研究例も見られる^{7)~8)}が、未だ十分に明らかにされているとは言えない。本研究では、トンネル周辺地山が降伏して塑性流動する結果が膨張現象となって現われる、いわゆるスクィーピングであると考え、このような現象が発現する可能性とそのレベル、および、そのときのトンネル壁面変位量を予測する簡便法について提案する。

日本における膨張性トンネルの事例報告資料を収集整理し、スクィーピング現象のレベルを五つに区分するパラメータを見出し、それぞれのレベルに相当するトンネル壁面の円周ひずみを弾性限界ひずみに対する比として理論的に求め、それを区分パラメータと比較することによってトンネル周辺地山のスクィーピングのレベルを予測できることを示す。具体的手法として、予測のためのチャートが作成された。一つは、トンネルの土被りと一軸圧縮強度の関係図であり、一つは、壁面ひずみと一軸圧縮強度の関係図である。これらの図上にスクィーピングレベルを区分する曲線が描かれており、まず、トンネル周辺地山の一軸圧縮強度と土被りを図上にプロットしてスクィーピングレベルが定まり、もう一つの図からトンネル壁面変位が決められる。実際の事例への適用例も示し、実用的な範囲内で実測値と予測値が一致することも確かめられている。

* 正会員 東海大学講師 海洋学部海洋土木工学科
** 正会員 豊田工業高等専門学校 教授 土木工学科
*** 正会員 名古屋大学教授 工学部地盤工学科

2. 日本におけるスキューズイングロックとトンネル挙動の実態

既往の事例報告からスキューズイングによる変状と思われるトンネル地山の物理特性を抽出し、そのうち本研究において特に重要な因子となる単位体積重量(γ_t)、ポアソン比(ν)、弾性係数(E)、弾性波速度(V_p)、および内部摩擦角(ϕ)を一軸圧縮強度(σ_c)との関係として整理した。そのうちの一例を図-1に示す。これらの図からそれぞれの曲線近似式が最小二乗法によって求められ、その結果を式(1)~(5)に示す。

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

$$\nu = 0.25 \left(1 + e^{-0.2 \sigma_c} \right) \quad (2)$$

$$E = 80 \sigma_c^{1.4} \quad (3)$$

$$V_p = 1.4 + 0.2 \sigma_c^{0.7} \quad (4)$$

$$\phi = 20 \sigma_c^{0.25} \quad (5)$$

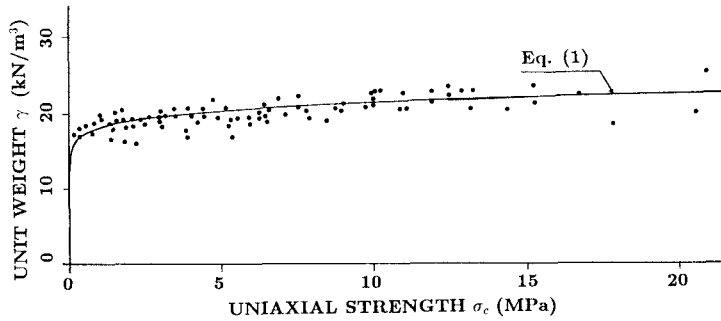


図-1: $\gamma_t - \sigma_c$ の関係

近似にあたっては、 $\sigma_c = 0$ が流体の状態と考えるとそれぞれの初期値が決められている。このような岩の物理特性間の相関については、今まで硬岩に関するものほとんどで⁹⁾、軟岩に関するものは見られなかった。これらの関係式はスキューズイングレベルを予測するのに利用される。

つぎに、調査資料からスキューズイングトンネルとノン・スキューズイングトンネルを区分し、壁面の円周ひずみ(ϵ_θ^a)、地山の一軸圧縮強度(σ_c)、土被り(H)および地山強度比(α)の四つのパラメータを抽出して図-2のようにまとめた。すなわち、第一象限は一軸圧縮強度と壁面の円周ひずみ、第二象限は、一軸圧縮強度と土被り、第三、第四象限はそれぞれ土被りと壁面ひずみに対する地山強度比の分布を示している。これらの結果によれば、これら四つのパラメータでスキューズイングトンネルとノン・スキューズイングトンネルが明確に区別されていることが分かる。したがって、従来からスキューズイングトンネルの判定には、壁面ひずみの大きさ¹⁰⁾や地山強度比¹¹⁾が使われていた。事例も多く、相当数のデータも蓄積されているので、実際問題としてこれらのパラメータに地質構造など他のバックデータを

を総合的に加味すれば、スキューズイングを起こすトンネルかどうかの事前の判定は可能である。しかし、そのレベルまでの予測はまだ困難であり、若干の研究例^{12)~14)}も見られるが今後解決されなければならない重要な課題とされている。

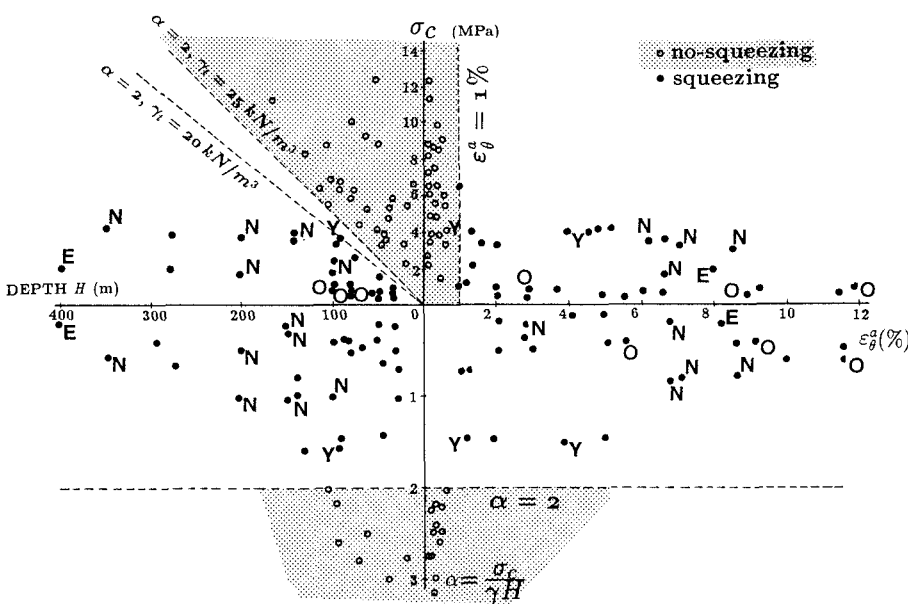


図-2: スキューズイングトンネルの挙動特性

3. スクィーズングレベルの定義

軟岩の一般的な応力-ひずみ曲線を図-3のように描き、それをひずみ値 $\varepsilon_e, \varepsilon_p, \varepsilon_s, \varepsilon_f$ によって5つの領域①～⑤に分割する。ここに、図から明らかなように ε_e は桜井¹⁵⁾が提案した弾性限界ひずみ、 ε_s はピーク強度でのひずみ、 ε_p は軟化開始ひずみ、そして ε_f は流動開始時のひずみである。

このようなひずみレベルに対応した岩石試料内部のマイクロクラックの分布状態を微視的に観察した研究例がある¹⁶⁾。それを参考にして描いたスケッチ図も図-3に示す。本研究では、トンネル壁面の円周ひずみ(ε_θ^a)が図-3におけるどのひずみ状態であるかにより、また、地山材料の応力-ひずみ曲線が如何なる形をとるかにより、スクィーズングレベルを区分することを考える。

いま、先に収集したスクィーズングロックの力学特性の中から得られている応力-ひずみ曲線に着目し、図-3で定義した $\varepsilon_e, \varepsilon_p, \varepsilon_s$ および ε_f を読み取って、それらを ε_e で除した値を η_p, η_s, η_f と表わし、その試料の一軸圧縮強度(σ_c)に対して整理した結果が図-4である。 η_p, η_s, η_f を状態ひずみ比と呼び、応力-ひずみ曲線の形を決めるパラメータとなり、一軸圧縮強度に依存する。それぞれの近似曲線を図中に示すが、それらは次式のように表せる。

$$\eta_p = 2\sigma_c^{-0.17}, \quad \eta_s = 3\sigma_c^{-0.25}, \quad \eta_f = 5\sigma_c^{-0.32} \quad (6)$$

そこで、本研究ではこれら状態ひずみ比と一軸圧縮強度により区分される五つの領域(①～⑤)によりスクィーズングレベルを区分する。すなわち、トンネル地山が弾性限界状態にあるときの壁面ひずみ(ε_θ^a)とそれぞれの状態での壁面ひずみ(ε_θ^a)の比が、図-4で定義された①～⑤のどの領域にあるかによってスクィーズングレベルが定義される。表-1にそれらをまとめて示す。

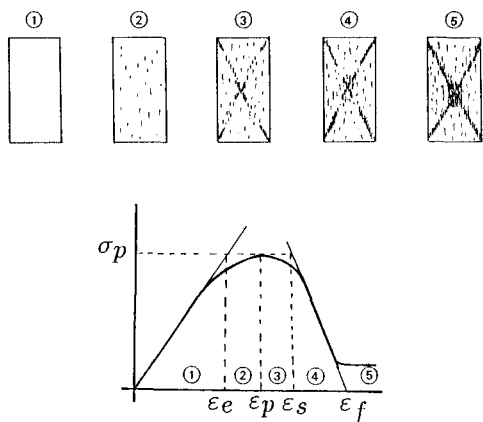


図-3 応力-ひずみ曲線におけるレベルの区分(①～⑤)

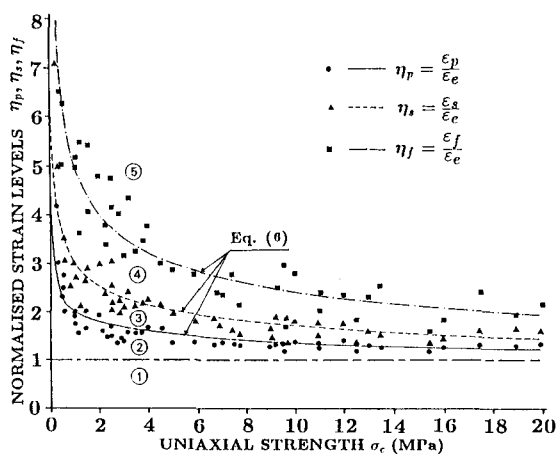


図-4 状態ひずみ比(η_p, η_s, η_f)の一軸圧縮強度依存性

表-1 スクィーズングレベルの定義

分類番号	スクィーズングレベル	記号	定義式	推定されるトンネル挙動
1	無し	NS	$\varepsilon_\theta^a / \varepsilon_e^a \leq 1$	壁面変位は切羽距離2Dでほぼ収束し、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	$1 < \varepsilon_\theta^a / \varepsilon_e^a \leq \eta_p$	壁面変位は切羽距離2Dでほぼ収束するが、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	$\eta_p < \varepsilon_\theta^a / \varepsilon_e^a \leq \eta_s$	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	HIS	$\eta_s < \varepsilon_\theta^a / \varepsilon_e^a \leq \eta_f$	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	VHIS	$\eta_f < \varepsilon_\theta^a / \varepsilon_e^a$	切羽は自立せず、壁面は絶え間なく押し出し、縫い返して強固な支保で補強しない限り変位は止まらない

4. 円形トンネルに対する壁面ひずみ比 ($\xi = \varepsilon_{\theta}^a / \varepsilon_{\theta}^e$) 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-3 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-5 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 に定義したスクィーズングレベル 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 qq' 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 $\eta_{sf} = \varepsilon_{sf} / \varepsilon_e = (\eta_s + \eta_f) / 2$ 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い次式のように表されるものとする。

$$\sigma_1 = q\sigma_3 + \sigma_c \quad (\text{完全塑性域}) \quad (7)$$

$$\sigma_1 = q^*\sigma_3 + \sigma_c^* \quad (\text{流動域}) \quad (8)$$

ここに、

$$q = \frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi}, \quad q^* = \frac{1 + \sin\phi^*}{1 - \sin\phi^*} \quad (9)$$

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-5 の e 点にあるときの壁面ひずみ (ε_{θ}^e) を求めると、 $\sigma_{\theta}^e = \sigma_c$ となるから、内圧 $p_i = 0$ の場合

$$\varepsilon_{\theta}^e = \frac{1 + \nu}{E} \frac{\sigma_c}{2} \quad (10)$$

と求められる。つぎに、式 (10) 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を計算すると次式が得られる。

$$\xi = \frac{\varepsilon_{\theta}^a}{\varepsilon_{\theta}^e} = \left[\frac{2}{q+1} \left\{ \frac{(q-1) + \alpha}{(q-1)\beta + \alpha} \right\} \right]^{\frac{f+1}{q-1}} \quad (11)$$

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。

$$\xi = \frac{\varepsilon_{\theta}^a}{\varepsilon_{\theta}^e} = \eta_{sf} \left[\frac{\frac{2}{q+1} \left\{ \frac{(q-1) + \alpha}{(q-1)} \right\} \eta_{sf}^{\frac{f+1}{q-1}} - \frac{\alpha}{q-1} + \frac{\alpha^*}{q^*-1}}{\beta + \frac{\alpha^*}{q^*-1}} \right]^{\frac{f^*+1}{q^*-1}} \quad (12)$$

ここに、 $\alpha^* = \sigma_c^*/p_0$ であり、 $\eta_{sf} = (\eta_s + \eta_f) / 2$ である。これらの解析結果の内容を検討するためにパラメトリックスタディを行った。その結果を図-6 に示す。これらの計算では $\eta_{sf} = 3.0$ と仮定されているの

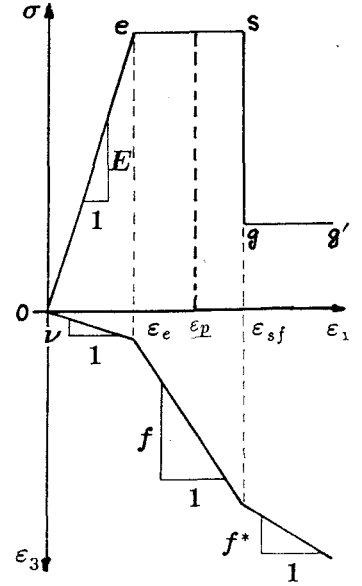


図-5 応力-ひずみ曲線のモデル化

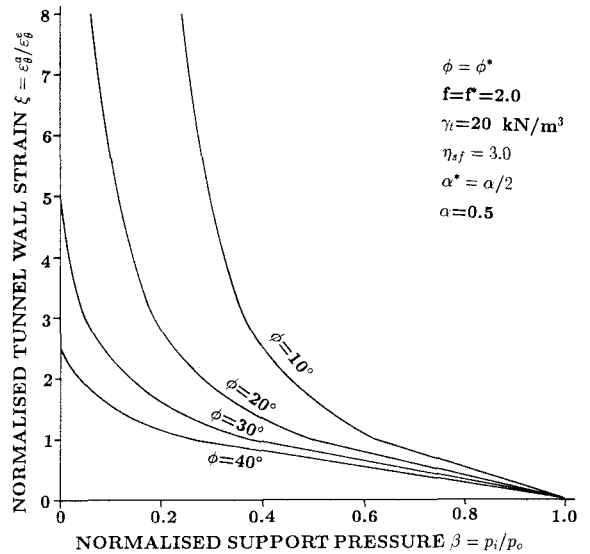


図-6 壁面ひずみ比 (ξ) のパラメトリックスタディ

で、式(11)は $\xi \leq 3.0$ の範囲、式(12)は $\xi \geq 3.0$ の範囲に適用されている。図-6は内部摩擦角(ϕ)をパラメータとし、支保圧比(p_i/p_0)に対する壁面ひずみ比(ξ)を計算したものであるが、支保圧(p_i)が増加すれば ξ は減少し、同じ p_i に対して ϕ が減少すれば ξ は増加する。この図より、スクリーディングレベルを低下させるのに必要な支保圧を推定できることが判る。

5. スクリーディングトンネルにおける壁面変位の簡易予測法

式(11)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。

$$\xi = \left[\frac{2}{q+1} \left\{ (q-1) \frac{\gamma_t H}{\sigma_c} + 1 \right\} \right]^{\frac{q+1}{q-1}} \quad (13)$$

式(13)を H について解くと、

$$H = \frac{\sigma_c}{2\gamma_t(q-1)} \left[(q+1)\xi^{\frac{q-1}{q+1}} - 2 \right] \quad (14)$$

を得る。さらに、 γ_t および q に式(1)、(9)、(5)を用い、 ξ に各状態のひずみ比($1, \eta_p, \eta_{sf}$)、すなわち式(6)を代入すると、それぞれのスクリーデ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-7(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($\varepsilon_\theta^\theta$)は、式(10)を用いて次のように得られる。

$$(\varepsilon_\theta^\theta)_p = \frac{1+\nu}{E} \frac{\sigma_c}{2} \eta_p, (\varepsilon_\theta^\theta)_{sf} = \frac{1+\nu}{E} \frac{\sigma_c}{2} \eta_{sf} \quad (15)$$

ν および E に式(2)、(3)を用い、 η_p, η_{sf} に式(6)を適用すると、それぞれのスクリーディングレベルを区分する式が $\varepsilon_\theta^\theta - \sigma_c$ 関係として求められる。その関係曲線を図-7(b)に示す。

図-7(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)からスクリーデ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-7(a)よりそれらは FS のレベルになり、それを図-7(b)の FS レベルに移動し、その縦軸を読むと $\varepsilon_\theta^\theta = 4.2\%$ 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、これには式(1)～(6)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。

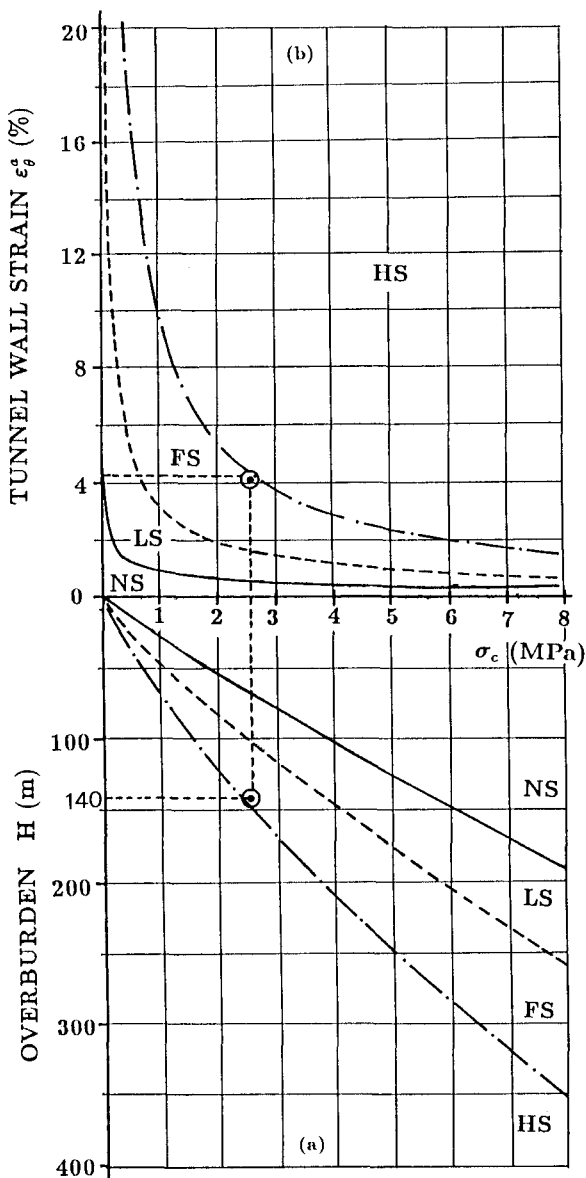


図-7 スクリーディングレベルの区分図

(a) $H - \sigma_c$ 関係

(b) $\varepsilon_\theta^\theta - \sigma_c$ 関係

6. 適用例

図-8は、本手法を折爪トンネル³⁾のある区間に適用し、観測値と比較した結果を示している。同図(a)にトンネル縦断の弾性波速度分布を示してあるが、この適用例では弾性波速度値から式(4)により σ_c を求めて、その値を予測に利用している。結果はスクイージングレベル区分名および壁面ひずみ値として示してあるが、実測値とよい一致をみているのが分かる。

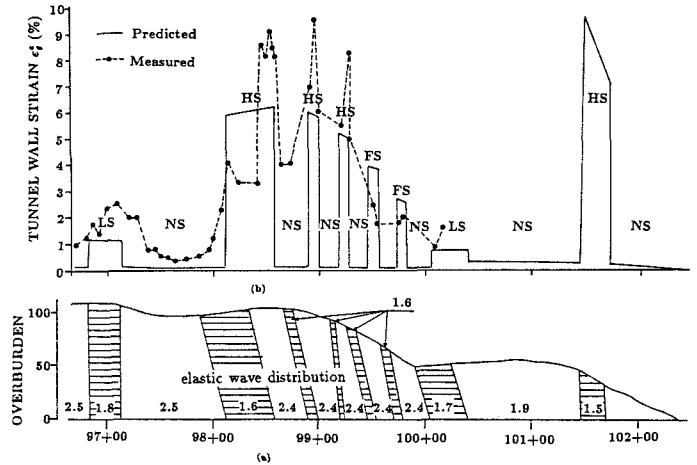


図-8 折爪トンネルにおける観測値と予測値の比較

7. 参考文献

- 1) 伊東好人・林 和夫: 膨張破砕帯における斜坑、立坑工事(中央自動車道恵那山トンネル)、トンネルと地下、Vol.13, No.7, pp.14-20, 1982.
- 2) 土居則夫・服部修一・鈴木恒男: 超膨張性地山における導坑計測とその評価、第8回岩の力学国内シンポジウム、pp.366-370, 1990.
- 3) 北林 哲・井出節雄: 脆弱な凝灰岩地山における NATM (東北自動車道八戸線折爪トンネル) トンネルと地下、Vol.13, No.8, pp.7-16, 1982.
- 4) 内田勝士・斉藤勝則・菅理嘉元: 膨張性地山における NATM (国道289号駒止トンネル)、トンネルと地下、Vol.12, No.9, pp.7-16, 1981.
- 5) 小島芳之・朝倉俊弘・吉川恵也: NATM のための膨張性泥質岩の地山分類、鉄道総研報告、Vol.3, No.5, pp.49-55, 1989.
- 6) 山口進・佐々木敏夫・安藤順造: 膨張性泥岩における地山挙動(中央東線塩嶺トンネル)、トンネルと地下、Vol.13, No.6, pp.7-16, 1982.
- 7) 仲野良紀: 膨張性地山の実態、トンネルと地下、Vol.6, No.10, pp.15-25, 1975.
- 8) 仲野良紀: 泥岩の力学特性と膨張性トンネルおよびフィルダム、土と基礎、Vol.28, No.7, pp.37-43, 1980.
- 9) 瀬崎満弘、Ömer AYDAN、市川康明、川本眺万: 岩盤データベースを用いた NATM の事前設計のための物性値、土木学会論文集、第421号/VI-13, pp.125-133, 1990.
- 10) Saari, K.: Analysis of plastic deformation (squeezing) of layers intersecting tunnels and shafts in rock, PhD Thesis, University of California, Berkeley, 1982.
- 11) Nakano, R.: Geotechnical properties of mudstone of neogene tertiary in Japan. Proc. Int. Symp. Soil Mechs., Oaxaca, Vol.1, pp.75-92, 1979.
- 12) Kawamoto, T., T. Akagi, Ö. Aydan, T. Ito: The mechanism and evaluation of deformation of tunnels in squeezing ground, Proc. 7th Int. Congress On Rock Mechanics, ISRM, Aachen, Sep. 1991.
- 13) 竹林 夫・石外 宏・大塚正幸: トンネル施工事例に見る膨張性地山の实態、第21回岩盤力学シンポジウム、pp.361-365, 1989.
- 14) Kitagawa, T., T. Kumeta, T. Ichizo, S. Soga, M. Sato, M. Yasukawa: Application of convergence confinement analysis to the study of preceding displacement of a squeezing rock tunnel, Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol.24, pp.31-51, 1991.
- 15) Sakurai, S.: Displacement measurements associated with the design of underground openings, Proc. Int. Symp. on Field Measurements in Geomechanics, Zurich, pp.1163-178, 1983.
- 16) Hallbauer, D.K., N. Wagner, N.G.W. Cook 1973. Some observations concerning the microscopic and mechanical behaviour of quartzite specimen in stiff, triaxial compression tests. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 10, 713-776.