

小土被りトンネルの掘削に伴う 地山挙動の評価手法に関する研究

A Study for Mechanical Behavior of Ground around
Shallow Tunnel by Softening Model

中岡健一¹・畑浩二¹・芥川真一²

Kenichi Nakaoka, Koji Hata and Shinichi Akutagawa

¹正会員 株式会社大林組 技術研究所 (〒204-8558 東京都清瀬市下清戸四丁目640)

E-mail:nakaoka.kenichi@obayashi.co.jp

²正会員 工学博士 神戸大学大学院工学研究科 (〒657-8501神戸市灘区六甲台町一丁目1)

We applied strain softening model that suggested by Akutagawa et al. for shallow tunnel excavation. This model reduces the material shear stiffness, cohesion, and internal friction angle with increase of shear strain. To apply this model for cutting face analysis, we extend the model for three dimensional. After, to check validity or applicability to tunnel excavation, unconfined compression test analysis and excavation analysis were carried out. The results were appropriate, so we determined this model available to excavation analysis.

Key Words : shallow tunnel, strain softening analysis, shear band, face bolt, surface settlement

1. はじめに

近年、都市部の小土被りトンネルを掘削する工法として、シールド工法に比べて安価であることや開削工法に比べて地上の交通などへの影響が少ないといった理由から、NATMが採用されるケースが増えている。未固結の地盤にNATMを適用すると、ひずみが集中する帯状の領域(以下、せん断帯と呼ぶ)がトンネル肩部から地表に向かって進展する状況が報告されている¹⁾。せん断帯が地表に達すると、その部分で地表面沈下の勾配が大きくなり、トンネルより上方の地盤が全体的に下降する共下がりが生じることになる。切羽についても同じように、地山条件によっては、切羽前方から地表に向かってせん断帯が進展すると考えられる。都市部の地盤は軟弱な堆積層で構成されていることが多いことに加え、地表面沈下が厳しく規制されるため、対策工を適切に設計することが必要である。そのためにはこのような挙動を評価できる手法で地表面沈下量を予測することが不可欠である。それに対し、通常の支保工の設計には弾性または弾塑性解析が用いられており、これらの手法ではせん断帯を再現できない。

2. 目的

前述の問題に対し、芥川らはせん断帯が発生する挙動を評価するために、モデルの粘着力、内部摩擦角、そして、せん断弾性係数がすべり線に沿ったせん断ひずみに応じて低下するひずみ軟化モデルを提案している。このモデルは、実験結果や現場計測値と比較・検証されており^{2),3)}、比較の入力パラメータが少ないため実用性が高いと考えられる。ただし、このモデルは平面ひずみで構築されているため、トンネル軸方向の変位が支配的な切羽の挙動は扱えなかった。本研究の目的は、このひずみ軟化モデルを三次元に拡張し、掘削解析を行うことによってせん断帯を含む地山挙動を再現できることを確認することである。

3. ひずみ軟化モデルの概要

(1) せん断剛性の低減

櫻井らは「地山におけるすべり挙動はせん断ひずみ量に応じたせん断剛性の低下で表される」として

いる⁴⁾。そして、せん断すべり線と一致する局所座標系における応力 σ' とひずみ ε' の関係を、せん断剛性の低減を考慮した応力ひずみ関係行列 D' で表せるとして、式 (1) を仮定した。

$$\{\sigma'\} = [D']\{\varepsilon'\} \quad (1)$$

$$[D'] =$$

$$\frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & m(1+\nu)(1-2\nu) \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここで、 E は弾性係数、 ν はポアソン比である。 m は弾性係数とせん断弾性係数の比 (G/E) であり、この値を小さくすることによって、すべり線に沿ったせん断剛性が低下することを表現している。そして、 m は式 (3) で表されるところとしている。ここで、すべり線とは、モール・クーロンの破壊包絡線にモール円が最も接近する線のことで、主応力軸と図-1の左に示すような関係である。

$$m = m_e - (m_e - m_r)[1 - \exp\{-100\alpha(\gamma - \gamma_e)\}] \quad (3)$$

ここで、 γ はすべり線に沿ったせん断ひずみ、 γ_e は破壊が始まるせん断ひずみ、 m_e は m の初期値 ($=1/2(1+\nu)$)、 m_r は m の残留値である。また、 α は m の変化の度合いを表す係数である。

本研究では、櫻井が式 (2) のように提案した $[D']$ を三次元問題に拡張し、式 (4) のように仮定した。せん断ひずみ γ と m の関係は式 (3) と同じである。

$$D' = \begin{bmatrix} \lambda+2G & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda+2G & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & \lambda+2G & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & mE & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (5)$$

$$G = \frac{E}{2(1-\nu)} \quad (6)$$

二次元問題におけるすべり線は、三次元問題では図-1の右に示すように最大主応力が発生する軸を中心にした円錐面となる。ここでは、円錐面上に等間隔で4本のすべり線を仮定し、それぞれのすべり線に沿った $[D']$ を式 (4) から求め、さらに全体座標系の $[D_i]$ に変換する。それを逆行列の状態に平均し、さらにその逆行列を計算することにより全体座標系のひずみ応力関係行列 $[D]$ とした。

(2) 強度の低減

芥川らの研究に従い、図-2に示すように、粘着力 C と内部摩擦角 ϕ はともに、破壊が生じる時点の、すべり線に沿ったせん断ひずみ γ_e からの増分 $\Delta\gamma$ に線形の関係で低減するものとした。ただし、解析の過程で $\Delta\gamma$ が小さくなる場合、図-2の関係を適用すると強度が増加することになるが、ここでは、このような強度の回復は無いものとした。

(3) 解析手法

荷重増分法による有限要素法を用いた。各ステップ内でモールの応力円が破壊包絡線を超える場合は、応力円が破壊包絡線に収まるように応力を修正する。応力が修正されると、その要素に含まれる節点に不釣り合い力が発生する。各荷重ステップ内では、下記に示す計算を繰り返し行うことにより、不釣り合い力の収束を図った。

- ・ 応力の修正
- ・ 不釣り合い力の計算
- ・ 不釣り合い力を荷重として作用させる
- ・ 応力の計算、応力の修正

不釣り合い力の最大値または不釣り合い力による変位の最大値が許容値以下に達すれば次の荷重ステップに移ることとした。

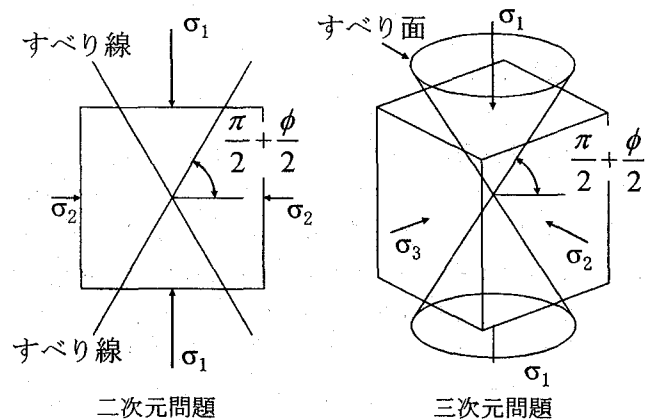


図-1 すべり線

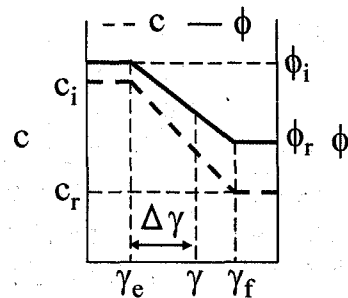


図-2 c および ϕ と γ の関係

4. ひずみ軟化モデルによる解析

(1) 一軸圧縮試験

三次元化したひずみ軟化モデルの妥当性を検討するため、一軸圧縮試験のシミュレーションを行った。

a) 解析条件

D級岩盤よりやや強度が低い材料を仮定した。表-1に材料物性を示す。供試体は直径:高さ=1:2の円筒形とし、荷重は上端面を強制変位として250ステップに分割して与えた。

b) 解析結果

図-3に応力-ひずみ関係を示す。図から応力は最大値に達した後、低下しており、ひずみ軟化が現れている。応力の最大値はモール・クーロンの破壊基準による一軸圧縮強度0.42MPaと一致している。ここで、応力はモデル端面の反力をモデルの断面積で除した値とした。図に見られる軟化過程の急激な応力低下は、以下の挙動が同じ荷重ステップで繰り返されたためである。

- ・モデル中央付近に生じたせん断帯の強度が低下し、その上下の弾性領域のひずみが解放される。
- ・弾性領域のひずみの解放により、せん断帯が圧縮され、さらにせん断帯のひずみが進む。
- ・ひずみの増加に伴いせん断帯の強度が低下し、再び弾性領域のひずみが解放される。

図-4に最終ステップ(軸ひずみ $\varepsilon=0.065\%$)における最大せん断ひずみの分布を示す。モデルを斜めに横切るようにせん断帯が生じていることが分かる。

(2) トンネル掘削解析

本モデルの掘削解析への適用性を確認するため、仮想のトンネルモデルに対して掘削解析を行った。

a) 解析条件

トンネルの形状は高さ9m、幅11mの幌型とし、地盤物性は前述の一軸圧縮試験解析に用いた物性と同じとした。解析モデルの概要を図-5に示す。全ての節点を紙面外方向に固定したのは、地盤は厚さを持った三次元モデルとしており、平面ひずみ状態の解析を行うためである。

表-1 材料物性

項目	数値
ヤング率	1 000 MPa
ポアソン比	0.4
粘着力 c	0.12 MPa
残留値 c_r	0.03 MPa
内部摩擦角 ϕ	30°
残留値 ϕ_r	15°
α, m_r	1.0, 0.0357

b) 解析ステップ

先ず初期応力状態を自重解析で計算し、その後、掘削解析を行った。掘削荷重は100ステップに分割して与えた。

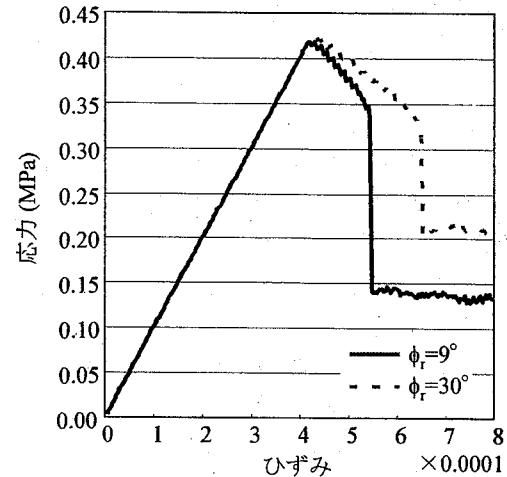


図-3 一軸圧縮試験の解析による応力ひずみ関係

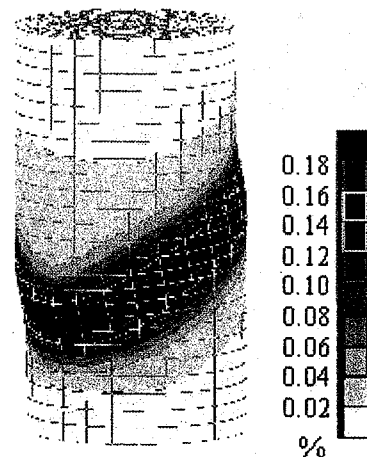


図-4 最大せん断ひずみの分布

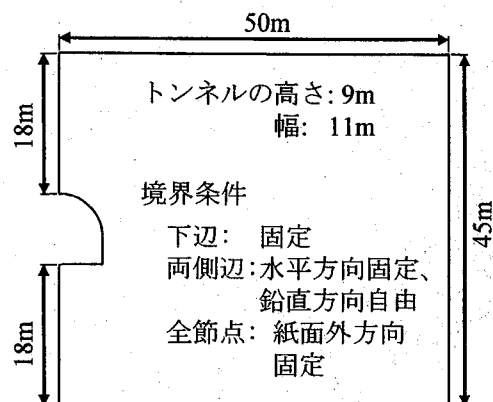


図-5 トンネル掘削解析モデルの概要

c) 解析結果

図-6に地盤の最大せん断ひずみの分布を示す。空洞の肩部から地表へとせん断ひずみが大きい領域が伸びており、せん断帯を表現していることが分かる。また、天端直上の地表面沈下量は8.3cmで天端沈下量11.2cmの75%程度となり、別途実施した弾塑性解析の結果の55%に比べて大きく、共下がりの傾向が現れていると考えられる。

(3) 切羽の安定解析

本ひずみ軟化モデルの三次元挙動への適用性を確認するため、切羽の安定解析に適用した。

a) 解析条件

解析モデルとしては切羽に対して無対策のケース、長尺鏡ボルトを施したケースの二通りとした。吹き付けコンクリートは切羽の手前2mまで構築されるものとした。また、地盤物性は未固結の砂質地盤相当を仮定した。各材料の物性を表-2、解析モデルを図-7および図-8に示す。

境界条件はモデル底面を固定、モデル周面につい

表-2 解析用物性

材料	項目	数値
地盤	ヤング率	200 MPa
	ポアソン比	0.35
	粘着力 c	0.03 MPa
	残留値 c_r	0.009 MPa
	内部摩擦角 ϕ	30°
	残留値 ϕ_r	21°
	α, m_r	1.0, 0.0357
吹き付けコンクリート	ヤング率	4 000 MPa
	ポアソン比	0.2
長尺鏡ボルト	直径	22mm
	ヤング率	200 000MPa

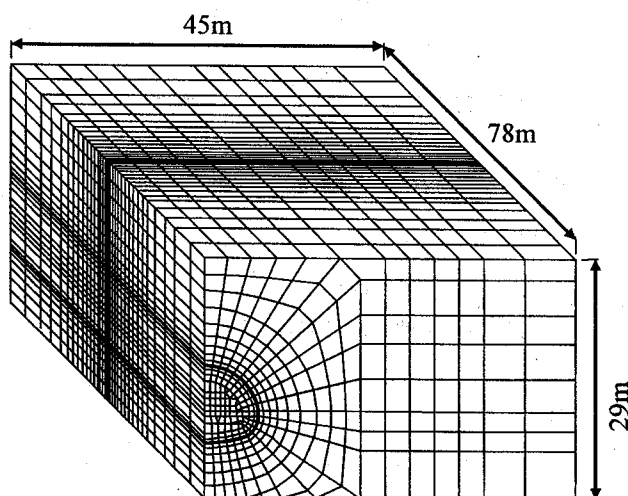


図-7 解析モデル全体

ては周面の法線方向に固定、法線に垂直方向に自由とした。

b) 解析ステップ

解析ステップは、まず初期応力状態を自重解析で計算し、その後、掘削および吹き付けコンクリート、長尺鏡ボルトの構築を同じステップで行った。実際には、切羽が及ぼす地盤への影響は、過去の掘進に伴ってトンネル全長にわたって残っており、新しい切羽による影響はその上に重なることとなる。ここ

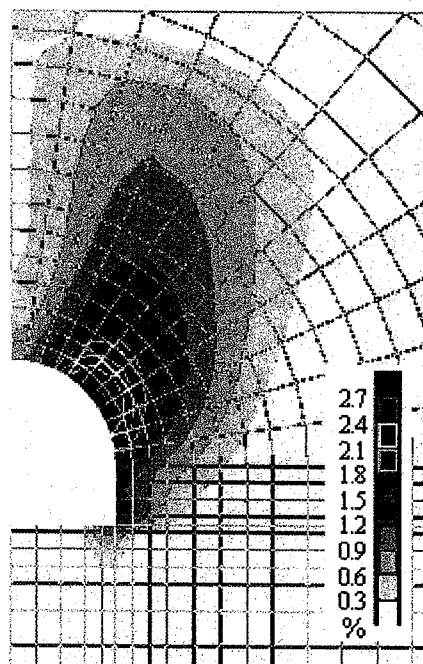


図-6 せん断ひずみの分布 (地表を含む空洞周辺部)

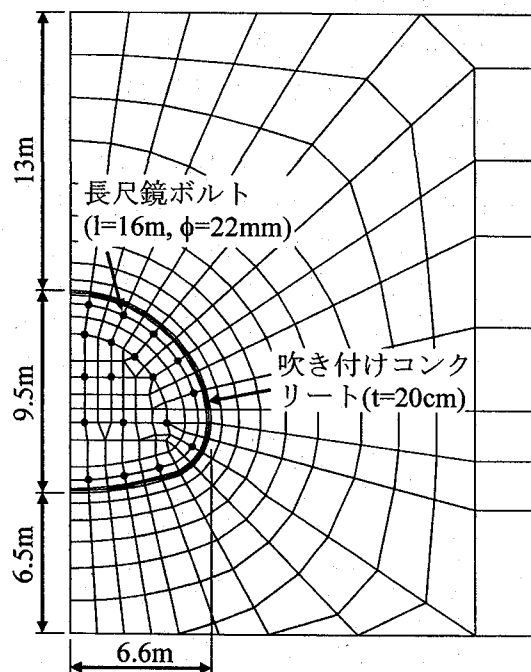


図-8 解析モデル空洞周辺部

では、一つの切羽の影響を明確にするため、空洞を一段階で掘削することとした。掘削荷重は20ステップに分割して与えた。

c) 解析結果

図-9および図-10に長尺鏡ボルトありモデルおよび鏡ボルトなしモデルの最大せん断ひずみの分布を示す。長尺鏡ボルトなしモデルの結果は二次元モデルとは異なり、せん断ひずみの大きい領域が切羽前面から斜めに地表に向かって伸びていることが分かる。鏡ボルトを施したケースでは、せん断ひずみの大きな領域は切羽周辺に限られている。長尺鏡ボルトなしのケースの地表面沈下量は1.6cm、切羽の押し出しは量4.0cmであることにに対し、鏡ボルトありのケースはそれぞれ0.9cm、1.9cmと半分程度となった。

図-11および図-12にモールの応力円の破壊包絡線接近度の分布を示す。ここで、破壊包絡線接近度はモールの応力円の半径で、応力円の中心と破壊包絡線との最短距離を除した値とし、これが1以下の領域

が破壊した領域である。長尺鏡ボルトなしモデルでは破壊領域が切羽前方、そして空洞上方部から地表に到るまで広がっている。一方、長尺鏡ボルトありモデルでは破壊領域が切羽前方に限られており、鏡ボルトが、破壊領域が地表の方向に伸展することを抑制していることが分かる。

5. まとめ

芥川らによって提案されたひずみ軟化モデルを三次元に拡張し、一軸圧縮試験および空洞掘削解析を行った。一軸圧縮試験の圧縮強度、応力-ひずみ関係、そして、空洞掘削解析も含めたせん断帯の発生形状などから、本解析はひずみ軟化に伴う地盤の変形挙動、地表面沈下の予測に適用可能と考える。また、仮想の地盤ではあるが切羽の安定解析により鏡ボルトの効果を評価することが出来た。今後、実現場への適用により、解析手法の検証を行う予定である。

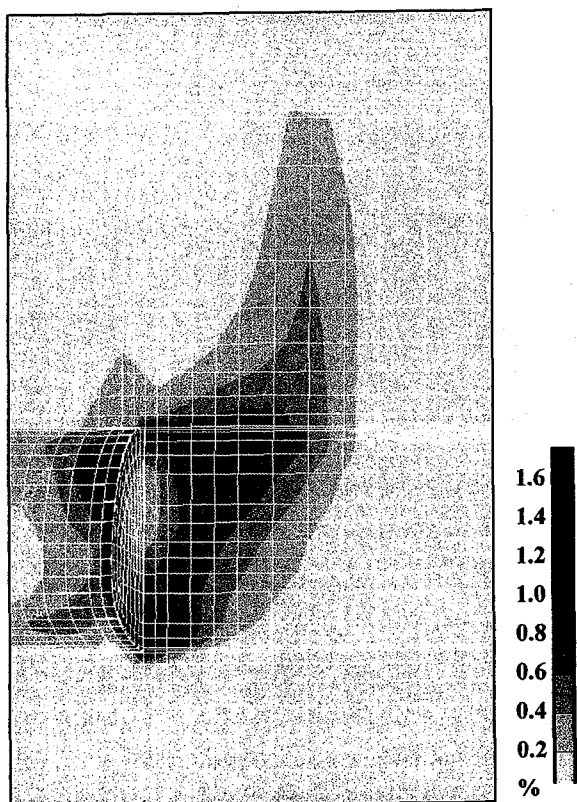


図-9 最大せん断ひずみ (長尺鏡ボルトなし)

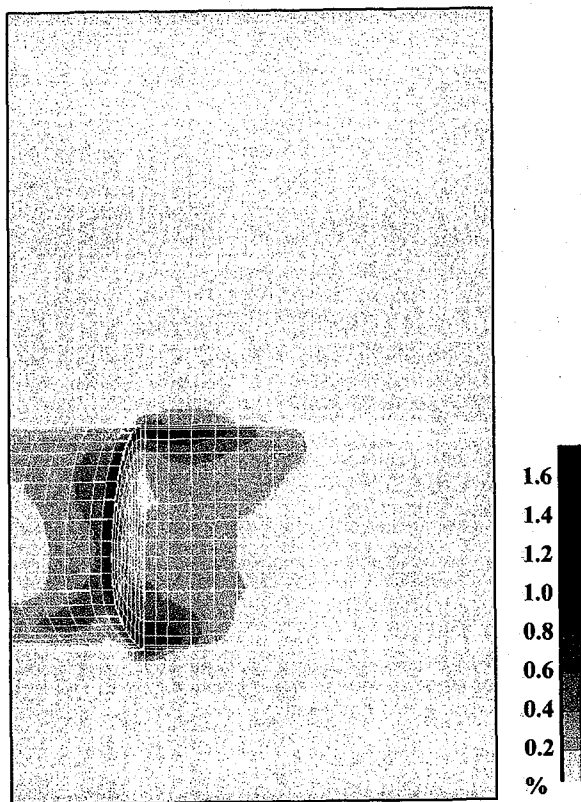


図-10 最大せん断ひずみ (長尺鏡ボルトあり)

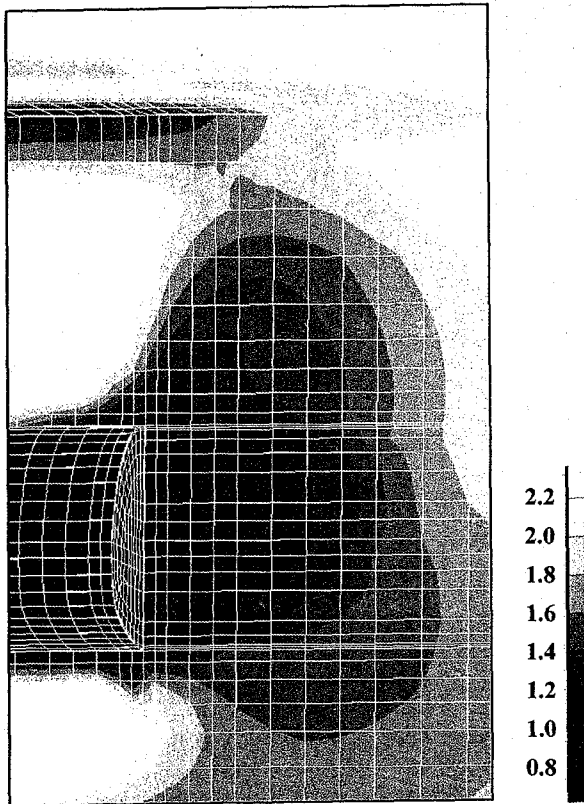


図-11 モールの応力円の破壊包絡線接近度
(長尺鏡ボルトなし)

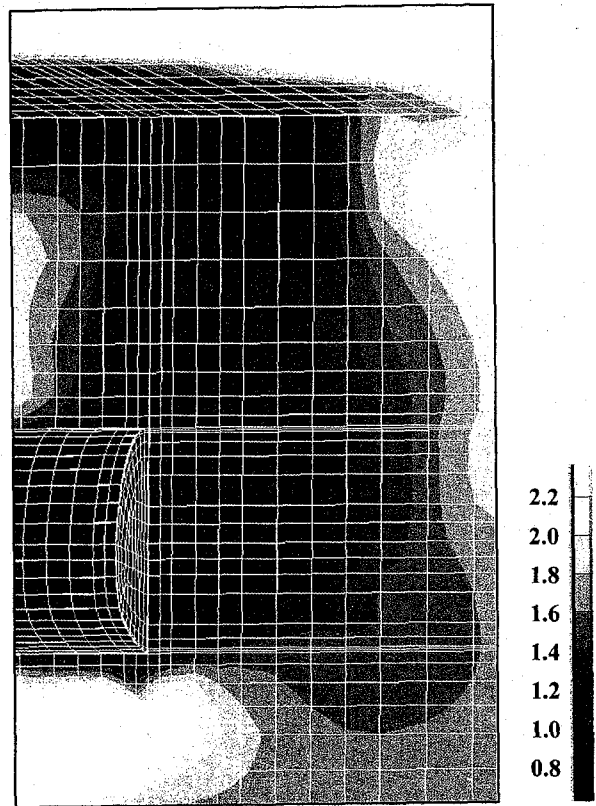


図-12 モールの応力円の破壊包絡線接近度
(長尺鏡ボルトあり)

参考文献

- 1) W.H.Hansmire and E.J.Cording: Soil tunnel test section, Case history summary, Journal of Geotechnical Engineering ASCE, 1985.
- 2) 芥川真一, 松本憲典, 長井寛之: 土被りが浅いトンネルの非線形挙動解析に関する一考察, トンネル工学論文・報告集, 第10巻, pp. 113-118, 2000
- 3) 北川隆, 中山範一, 松長剛, 芥川真一, 小西真治, 地表面沈下予測に向けたひずみ軟化モデルによる検討, トンネル工学論文集, 第14巻, pp.53-60 (2004)
- 4) 櫻井春輔, 川嶋幾雄, 皿海章雄, 芥川真一: 地盤の非線形挙動の解析, 土木学会論文集, No505/III-31, pp.139-140, 1994