

小土被りトンネル掘削による地表面沈下予測方法の開発

中 岡 健 一 畑 浩 二
鳥 井 原 誠

The Prediction of Surface Settlement by Tunnel Excavation using Strain-Softening Analysis

Kenichi Nakaoka Koji Hata
Makoto Toriihara

Abstract

We applied a strain-softening model suggested by Akutagawa et al. for the prediction of the deformational behavior around a shallow tunnel excavation. This model reduces the material shear stiffness, cohesion, and internal friction angle with increasing of shear strain. To apply this model for analyzing a cutting face, we extended the model over three dimensions. Subsequently, in order to verify the validity or applicability to tunnel excavation, an unconfined compression analysis and an excavation analysis were conducted. The results were appropriate, so we concluded that this model can be applied to excavation analyses. Finally, we applied the model to a nonsupported cutting face and a cutting face that was supported by long-length face bolts. Through these analyses, the effect of the long-length face bolts was clarified.

概 要

土被りの小さな未固結地山にトンネルを掘削すると、トンネル肩部から地表に向かってせん断帯と呼ばれる降伏領域が伸展することがあり、陥没や崩壊に到った例が報告されている。従来の山岳トンネル設計解析では、この挙動を評価できないことが指摘されていた。本研究ではせん断帯を評価するために、芥川らによるひずみ軟化モデルに着目した。このモデルはせん断ひずみに応じた強度定数とせん断剛性の低下を考慮している。本モデルを切羽の力学挙動問題に適用するために三次元に拡張し、検証問題として岩石の一軸圧縮試験とトンネルの掘削解析を行なった。一軸圧縮試験ではモデルを斜めに横切るせん断帯、掘削解析ではトンネル肩部から地表へ伸びるせん断帯を再現でき、本モデルはせん断帯が問題となるトンネルに適用できることを確認した。そして、切羽に対して鏡ボルト無しのケース、鏡ボルトを施したケースについて解析を行ない、鏡ボルトの効果を明確にした。

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への影響が少ないことから、NATMが採用されるケースが増えている。この工法を未固結かつ浅い地盤に適用すると、条件によってはせん断ひずみが大きな帯状の領域（以下、せん断帯と呼ぶ）がトンネル両肩部から地表に向かって伸展する現象が報告されている¹⁾。両肩部からそれぞれのせん断帯が伸展すると、トンネル天端の沈下量が大きくなり、さらに、それらが地表に達すると、せん断帯に挟まれた地盤が全体的に、下方へ移動するように変位する挙動が生じる。これを「共下がり」と呼んでいる。この現象が生じると、地表面の沈下量はトンネル天端の沈下量に近い大きなものとなり、場合によっては地表面陥没や崩壊を生じさせる。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伸展すると考えられる。

都市部の地盤は脆弱な堆積層で構成されていることが多く、また、地表面の沈下量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。そのためにはせん断帯を評価できる解析方法によって地表面沈下量を適切に予測することが不可欠である。それにも関わらず、通常の支保工の設計には、せん断帯を再現できない弾性または弾塑性解析が用いられているのが現状である。

前述の問題に対し、芥川らはせん断帯が生じる挙動を評価するためのひずみ軟化モデルを提案している。このモデルは実験や現場計測値と比較・検証されており^{2), 3)}、比較的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おり、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。

2. ひずみ軟化モデルの定式化

2.1 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、せん断ひずみの増大に対し、指数関係で小さくなる関係式(3)により近似できるとしている。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Fig. 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Fig. 1の右に示すように最大主応力が発生する軸を中心とした円錐面となる。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 i に沿った $[D'_i]$ 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では平均し、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。

2.2 強度の低減

芥川らの研究に従い、Fig. 2に示すように、粘着力 c と内部摩擦角 ϕ とともに、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 $\Delta\gamma$ が小さくなると、Fig. 2の関係によれば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。

2.3 解析方法

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、Fig. 3に示すように、すべり線上のせん断応力 τ' が同じ垂直応力 σ を維持したまま破壊包絡線上に移動す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、修正Newton-Raphson法により、不釣り合い力の収束を図った。この方法は各ステップで同じ全体剛性行列を用いることが特徴である。ただし、掘削などによりモデルが変化する際は、剛性行列を再構築する必要がある。Fig. 4に解析の流れを示す。

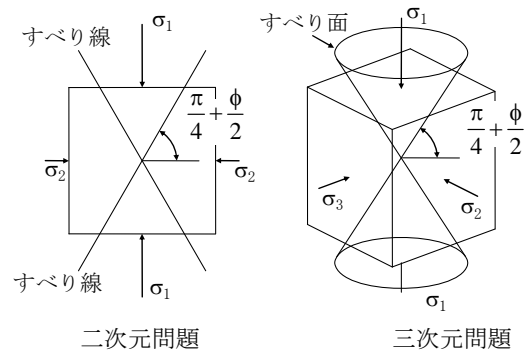


Fig. 1 すべり線 Mobilized Line

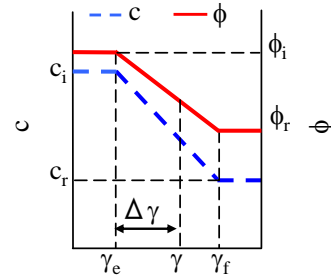


Fig. 2 c および ϕ と γ の関係 Relation Between c and ϕ with γ

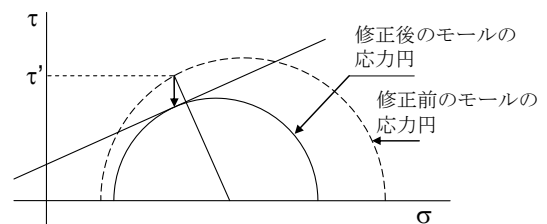


Fig. 3 モールの応力円の修正 Modify of Mohr's Stress Circle

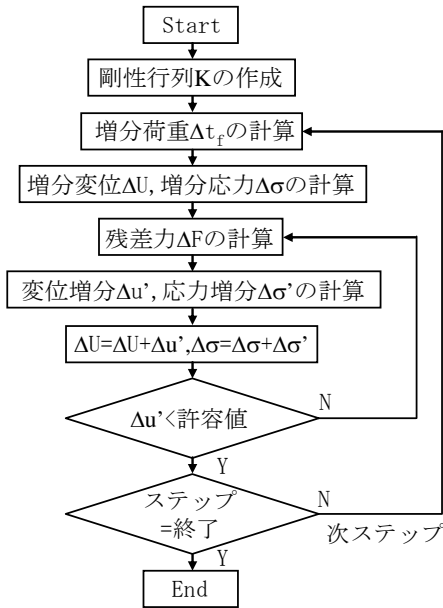


Fig. 4 解析の流れ
Nonlinear Analysis Flow

3. ひずみ軟化モデルによる検証解析

3.1 一軸圧縮試験の解析

三次元に拡張したひずみ軟化モデルを当社が開発した有限要素「GRASP」に組み込んだ。そして、拡張したモデルの妥当性を検討するため、一軸圧縮試験の解析を行った。

3.1.1 解析条件 道路トンネルの地山等級におけるD級地山よりやや強度が低い材料を仮定した。Table 1に材料物性を示す。供試体は直径:高さ=1:2の円柱とし、荷重は上端面を強制変位として与えた。

3.1.2 解析結果 Fig. 5に軸応力-軸ひずみ関係を示す。軸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ことが分かる。

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。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。荷重ステップ内では、モデル上下面の、モデル軸方向の変位は生じない。

- モデル中央付近に生じたせん断帯の強度が低下して軸力が小さくなる。そのため、その上下の弾性領域（青色の領域）の応力が低下し、伸張する。
- 弾性領域（青色の領域）の伸張により、せん断帯が圧縮され、さらにせん断帯のひずみが進む。
- せん断帯のひずみ増加に伴う強度低下により、さらに軸力が低下し、弾性領域が伸張する。

Fig. 6に最終ステップ（軸ひずみ $\epsilon=0.08\%$ ）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。

Table 1 材料物性
Material Properties

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

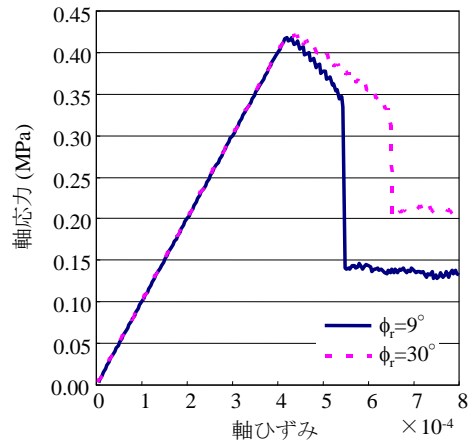


Fig. 5 一軸圧縮試験の解析結果
Result of Uniaxial Compression Simulation

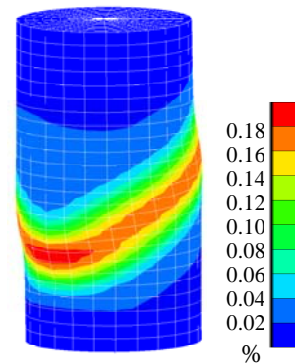


Fig. 6 最大せん断ひずみの分布
Maximum Shear Strain Distribution

3.2 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。

3.2.1 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Fig. 7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。

3.2.2 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。

3.2.3 解析結果 Fig. 8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%に比べて共下がりに近い現象を示している。これは、同種の現象を解析できる可能性を示唆している。

4. 鏡ボルト効果の評価解析

本ひずみ軟化モデルの三次元挙動への適用性を確認し、鏡ボルトの効果을明らかにするために、鏡ボルト無し、および鏡ボルトを施した切羽の安定解析に適用した。本解析では土被り厚さ2Dに着目した。

4.1 解析条件

解析モデルとしては鏡ボルト無しのケース、短尺鏡ボルトおよび長尺鏡ボルトを施したケースの三通りとした。吹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Table 2, 解析モデルをFig. 9およびFig. 10に示す。地盤および吹付けコンクリートは6面体

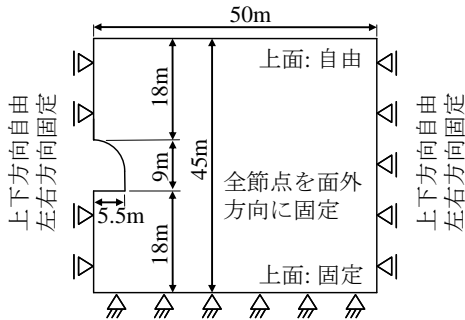


Fig. 7 トンネル掘削解析モデルの概要
Schematic of Tunnel Excavation Analysis Model

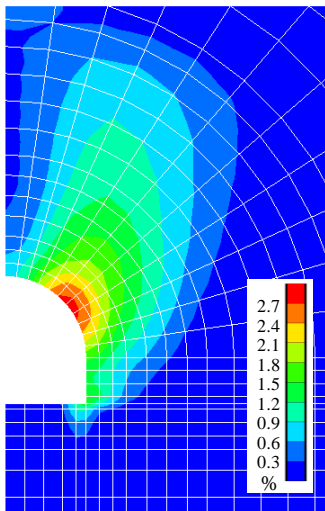


Fig. 8 最大せん断ひずみの分布
Distribution of Maximum Shear Strain

Table 2 解析用物性
Material Properties

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°
吹付けコンクリート (厚さ20cm)	ヤング率	4 000 MPa
	ポアソン比	0.2
鏡ボルト (長さ4m,16m)	直径	22mm
	ヤング率	200 000MPa

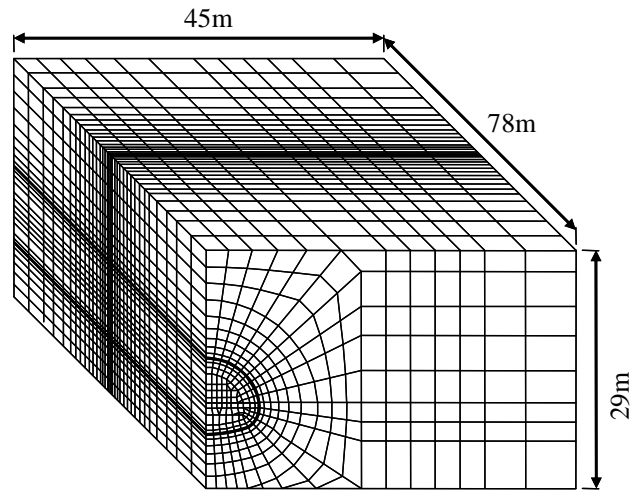


Fig. 9 解析モデル全体
Finite Element Mesh Used for Cutting Face Simulation

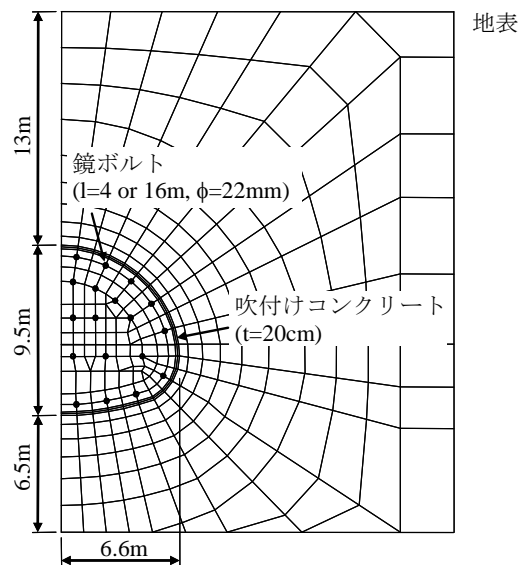


Fig. 10 解析モデル空洞周辺部
Finite Element Mesh Around the Tunnel

要素、鏡ボルトはトラス要素でモデル化した。境界条件はモデル底面を固定、モデル周面は法線方向に固定、周面の平行方向に自由とした。

4.2 解析ステップ

まず初期応力状態を自重解析で計算し、その後、掘削、吹付けコンクリート、および、鏡ボルトの構築を同じステップで行った。実際にはトンネル全線にわたって、過去の掘削の影響が残っており、新しい切羽による影響はその先端に追加されることとなる。ここでは、一つの切羽の影響を明確にするため、トンネル全線を一段階で掘削することとした。掘削荷重は20ステップに分割した。

4.3 解析結果

Fig. 11~16に各モデルの最大せん断ひずみおよび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いた値とし、これが1.0以下の領域が破壊した領域である。

無支保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。そして、破壊領域は切羽前方、そして空洞上方部から地表に到るまで広がっている。このケースの地表面沈下量は1.6cm、切羽の押し出し量は4.0cmであった。

短尺鏡ボルト (L=4m) を施したケースでは、せん断ひずみが大きい領域や破壊領域は切羽周辺に限られており、鏡ボルトが、破壊領域が地表の方向に進展することを抑制していることが分かる。地表面沈下量は0.9cm、切羽の

押し出し量は2.3cmで、いずれも無支保の場合の60%以下となった。

長尺鏡ボルト (L=16m) を施したケースは、短尺鏡ボルトのケースに比べてせん断ひずみの大きな領域や破壊領域はわずかに縮小しただけで、大きな違いは見られなかった。切羽の押し出し量は1.9cmと80%程度に抑制されたが、地表面沈下量は0.9cmと短尺鏡ボルトと同じであった。以上からこの条件の地山においては、短尺鏡ボルトで十分な効果を期待できると判断できる。

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。これにより、未固結地山における小土被りトンネルの支保工設計に適用できる見通しが立った。今後、実現場に適用することにより、実績を積み上げていく予定である。

謝辞

本ひずみ軟化モデルの定式化、コーディングにあたり、大変貴重な助言を頂きました神戸大学芥川真一准教授に深謝申し上げます。

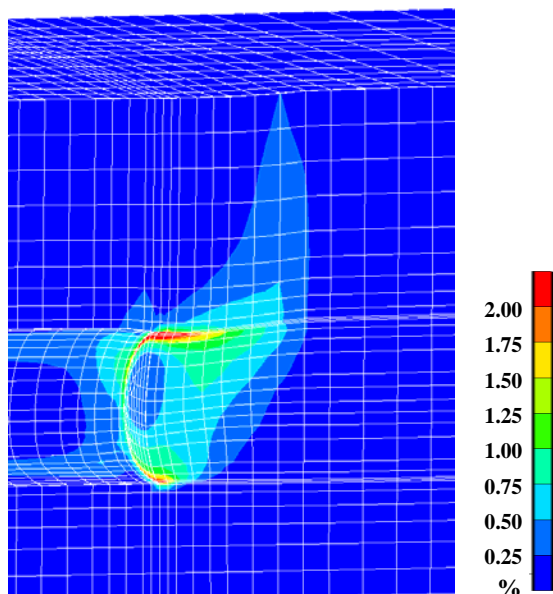


Fig. 11 最大せん断ひずみの分布 (鏡ボルト無し)
Maximum Shear Strain Distribution (without Face Bolts)

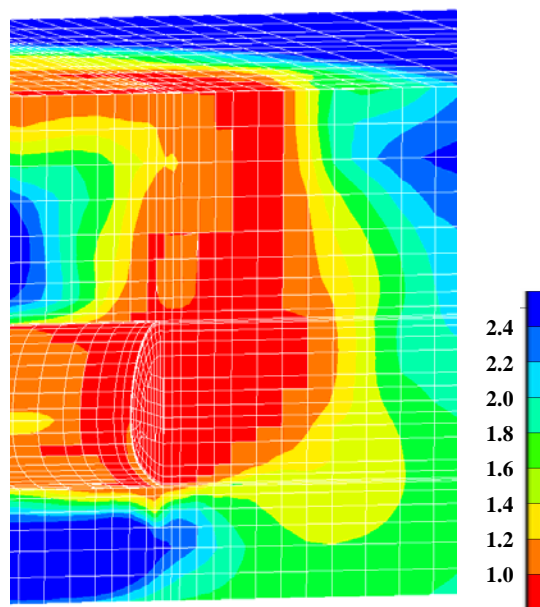


Fig. 12 応力円の破壊包絡線接近度の分布 (鏡ボルト無し)
Distribution of Proximity of Stress Circle to Failure Envelope (without Face Bolts)

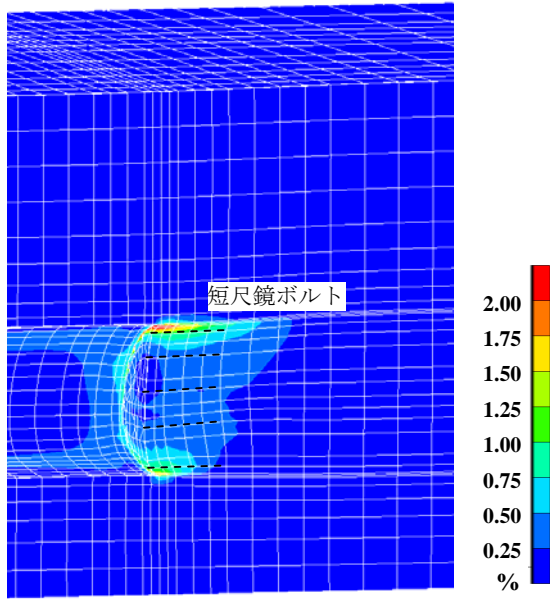


Fig. 13 最大せん断ひずみの分布 (短尺鏡ボルト)
Maximum Shear Strain Distribution
(Supported by Normal Face Bolts)

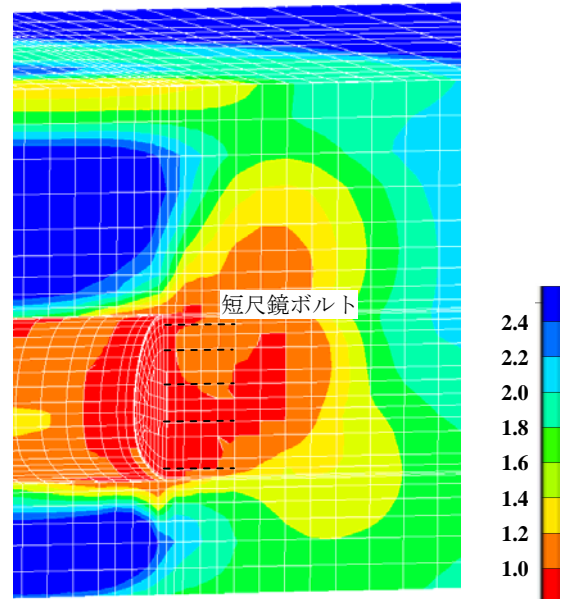


Fig. 14 応力円の破壊包絡線接近度の分布
(短尺鏡ボルト)
Distribution of Proximity of Stress Circle to Failure Envelope
(Supported by Normal Face Bolts)

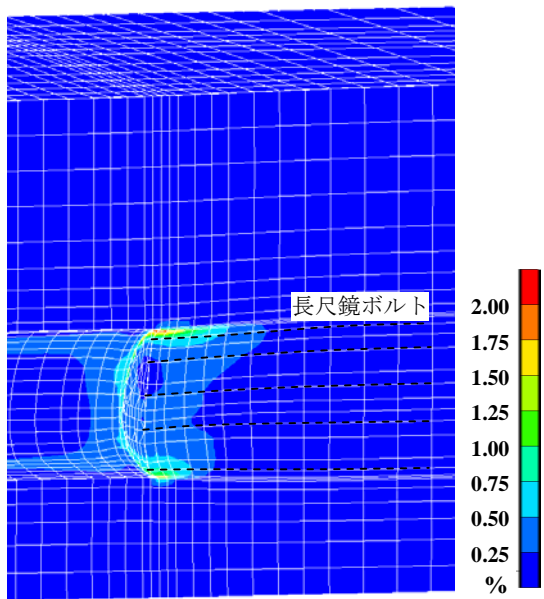


Fig. 15 最大せん断ひずみの分布 (長尺鏡ボルト)
Maximum Shear Strain Distribution
(Supported by Long Length Face Bolts)

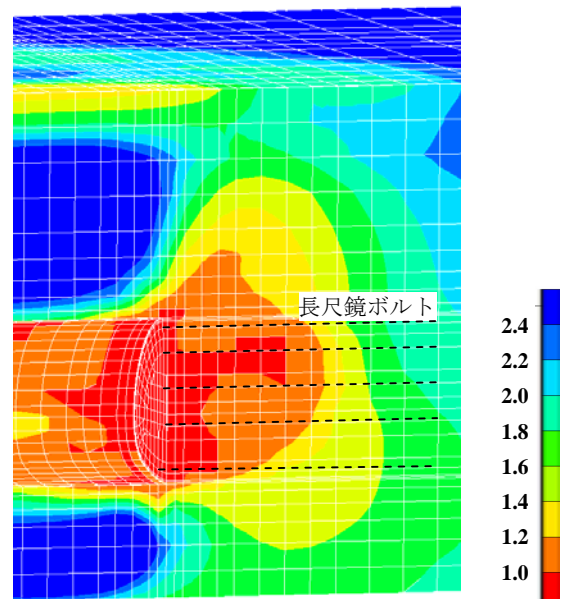


Fig. 16 応力円の破壊包絡線接近度の分布
(長尺鏡ボルト)
Distribution of Proximity of Stress Circle to Failure Envelope
(supported by long length face bolts)

参考文献

- 1) W. H. Hansmire and E. J. Cording: Soil tunnel test section, Case history summary, Journal of Geotechnical Eng. ASCE, pp. 1301-1325, (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)