

1. はじめに

土被りの浅いトンネル周辺に発生する最大せん断ひずみの分布を正確に解析で得ることを目標として、異方性パラメーター m を用いた FEM 解析の改良を行った。その上でその改良の影響による変化を簡単なメッシュモデルで示す。また、アルミ棒積層体を用いた実験結果のシュミレーションを行い、その手法の妥当性を検証したのでその概略を報告する。

2. FEM 解析の改良

本文で改良を行ったのは、異方性パラメーター m を用いた非線形有限要素解析であり、これは D マトリックスにおけるせん断剛性を、ひずみレベルに依存して低下させることで、材料の異方性をモデル化しようとするものである。この m は材料が等方弾性を示すとき一定であるが、材料が破壊に至るとひずみ γ の増加に伴い図 1 のグラフのように低下させることをモデル化の基本としている。この曲線は下のように近似できることが提案されており、本解析でも m の値を求めるのにこの式を用いた。

$$m = m_c - (m_c - m_r) [1 - \exp\{-100 \alpha (\gamma - \gamma_r)\}]^{1/2}$$

次に今回加えた改良について述べる。

- これまでは損傷が始まるときの最大せん断ひずみ γ_1 を定数としていたが、モールの応力円が破壊規準線を超えたときの γ を γ_1 とすることとした。(図 2)
- 材料が破壊に至った場合、まず材料の軟化²⁾を考慮し、粘着力 c と内部摩擦角 ϕ を図 3 の要領で低下させるようにした。また、垂直応力、せん断応力が破壊規準線内に収まるように修正し(図 4)、修正分は繰り返し計算によって 0 になるように収束計算を行った。

3. 解析

まず、改良の効果を確認するために、三本柱の解析を行った。この解析では図 5 のようなメッシュを用い、真中の柱だけに破壊がおこるように物性値を調節した。解析結果としては変形図と主応力図を応力修正無・有のものそれぞれを図 6³⁾にのせた。図からも明らかなように、応力修正無のものは破壊したはずの柱に過度の応力が残ってしまっている。しかし、応力修正有のものは破壊した柱から応力が抜け、その力を他の柱が支えている。また、変形図も応力修正無と比べて 2 倍ほどの変形量が出ている。

次に、アルミ棒積層体実験⁴⁾に即した値を用い、重力場で、直径 ($D=15\text{cm}$) と土被りが同じ長さのトンネルを素掘りで掘削した場合の解析を行った。境界条件は図 7 のメッシュの左辺と右辺を上下動のみ可能なローラー支点、下の辺を左右動可能なローラー支点とした。この解析において、破壊に至る直前の Step の最大せん断ひずみ図が図 8⁴⁾である。この分布はアルミ棒実験や実測結果⁵⁾に非常に近い分布を示しており、浅いトンネル特有の変形メカニズムが現われていると考えられる。

4. まとめ

今回の解析で、より正確なせん断ひずみの分布が得られることが分かった。これは、材料の“異方性パラメーター m の低下 (剛性低下)”とモールの破壊規準による“応力の修正”，さらには“軟化”の 3 つを同時に考慮した解析に改良したことによる成果であると思われる。しかし、今回行った解析はどれも基礎的な解析ばかりであり、トンネルにおいても様々な掘削過程を考慮したものではなかったので、今後は現実の掘削過程を考慮して解析を行い、さらに提案する方法を検証する予定である。

参考文献

- 1) Sakurai S., A.Hiraoka and K.Hori : Strain-Induced Damage of Rock, *International Conference on Mechanics of Jointed and Faulted Rock*, Vienna, pp. 22-27, 1998.
- 2) Sterpi,D : An Analysis of Geotechnical Problems Involving Strain Softening Effects , *Int.J.Number.Anal.Meth.Geomech.*, 23, pp.1427-1454, 1999.
- 3) 長井寛之：土被りの浅いトンネルの変形解析に関する基礎的研究，神戸大学工学部建設学科，卒業論文，2000. 2.
- 4) 松本憲典：トンネルに作用する設計土圧に関する基礎的研究，神戸大学大学院自然科学研究科博士前期課程，修士論文，2000. 2.
- 5) Hansmire,W.H., Cording,E.J. : SOIL TUNNEL TEST SECTION : CASE HISTORY SUMMARY, *J.Geometory ASCE Vol.III No.11* pp1301-1320, 1985.

Shinichi AKUTAGAWA, Kensuke MATUMOTO and Hiroyuki NAGAI

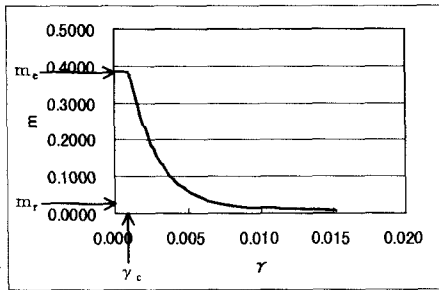


図1 m-γ 関係

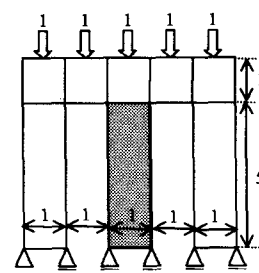


図5 三本柱のメッシュ

表1 中央の柱の物性値

ヤング率 E	980 kPa
ポアソン比 ν	0.3
mの残留値 m _r	0.01
α	5
粘着力 c の初期値～ 残留値	30 kPa～ 5 kPa
内部摩擦角 φ の初期値～ 残留値	0.3° ～ 0.03°
c, φ が低減する せん断ひずみ増分 Δγ	0.0025
単位体積重量	9.8kN/m ³

※他の部分は c の初期値を 10000kPa とした

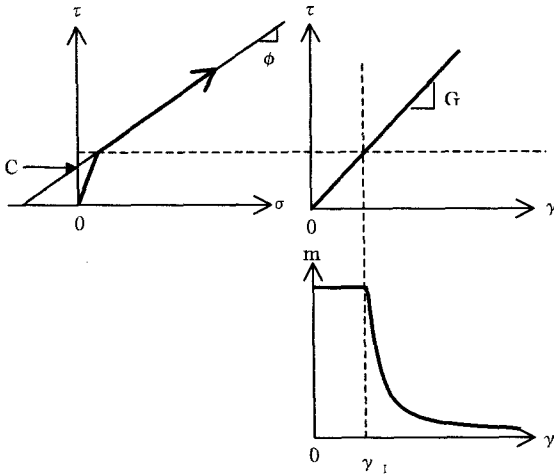
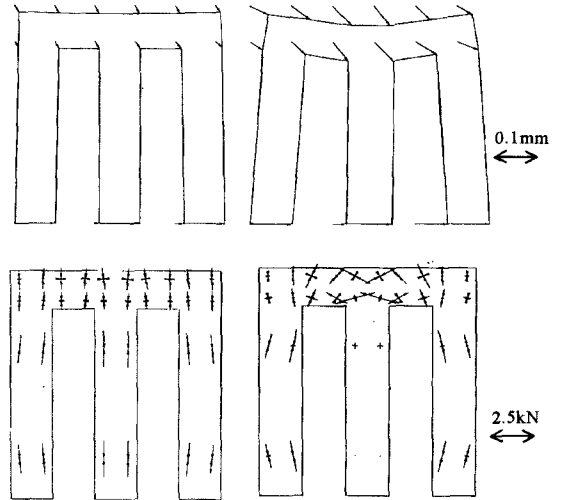


図2 応力経路による γ_I の決定



(a)修正無 (b)修正有
図6 変形の状態と応力分布の比較

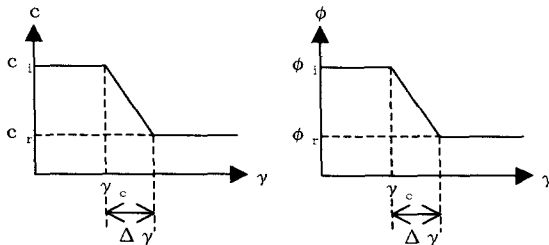


図3 c と φ の低下

表2 トンネル解析の物性値

ヤング率 E	529.7kPa
ポアソン比 ν	0.333
mの残留値 m _r	0.0001
α	1
粘着力 c の初期値～ 残留値	0.2548 kPa ～0 kPa
内部摩擦角 φ の初期値～ 残留値	30.7° ～ 23.2°
c, φ が低減する せん断ひずみ増分 Δγ	0.0025
地山の単位体積重量	21.36kN/m ³

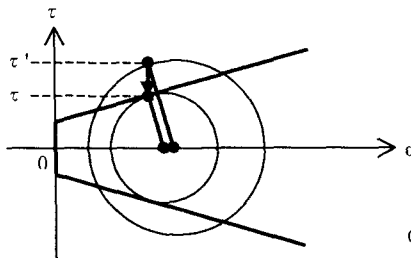


図4 応力修正の方法

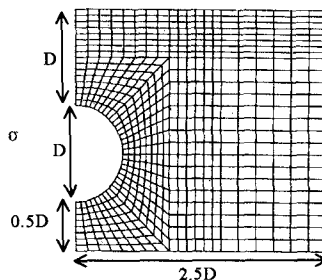


図7 トンネルのメッシュ(D=15cm)

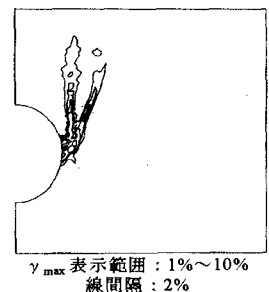


図8 最大せん断ひずみ分布