

有限変形非共軸弾塑性モデルによる平面ひずみ一軸圧縮試験の数値シミュレーション
—微小変形モデルおよび共軸モデルとの比較—

金沢大学 正 矢富盟祥 山口大学 正 清水則一
山口大学 学 ○ 八木田茂生 岸田晋 正 中川浩二

1. はじめに

地盤における変形の局所化現象を表す理論と数値解析手法について、数々の研究が進められている¹⁾。筆者らは有限変形非共軸弾塑性モデルを、土被りの浅い未固結地山のトンネル掘削問題に適用し、その結果、従来の解析手法からは得ることが困難であった実際の土被りの浅いトンネルの特徴的な変形挙動を表し得ることを明らかにした²⁾。本報告では、有限変形非共軸弾塑性モデルを用いた解析結果の特徴をより詳しく知るために行った、平面ひずみ一軸圧縮試験の数値シミュレーションの結果について述べる。

2. 有限変形非共軸弾塑性モデルの構成式³⁾

本研究で用いる有限変形非共軸 Cam-clay モデルの構成式は次式で表される。

$$\dot{T}_{ij}^* = \left\{ \left(\bar{K}^* - \frac{2}{3} \bar{G}^* \right) \delta_{ij} \delta_{kl} + \bar{G}^* (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) - \frac{\left(\frac{\bar{G}^*}{\bar{\tau}} S_{ij} - \bar{K}^* \bar{\beta}^* \delta_{ij} \right) \left(\frac{\bar{G}^*}{\bar{\tau}} S_{kl} - \bar{K}^* \bar{\beta}^* \delta_{kl} \right)}{\bar{G}^* + \bar{K}^* \bar{\beta}^{*2} + h^*} \right\} D_{kl} \quad (1)$$

ただし、 $\dot{T}_{ij}^*$ は有効 Cauchy 応力 T_{ij}^* の Jaumann 速度、 D_{kl} は変形速度テンソル (ストレッチングテンソル)、 S_{ij} は T_{ij}^* の偏差応力、 δ_{ij} は Kronecher のデルタである。また、

$$\bar{G}^* = \frac{h_1 \bar{G}}{(h_1 + \bar{G})}, \quad \bar{K}^* = \frac{(h_1 - h) \bar{K}}{h_1 - h - \bar{\beta}^2 \bar{K}}, \quad h^* = \frac{h_1 h}{(h_1 - h)}, \quad \bar{\beta}^* = \frac{h_1 \bar{\beta}}{(h_1 - h)}, \quad h_1 = \frac{p' \bar{\beta}}{\sqrt{3} A} (> 0) \quad (2)$$

である。なお、 $\bar{G}, \bar{K}$ はせん断弾性係数と体積弾性係数、 h, h_1 は硬化係数である。特に、 h_1 は第 2 硬化係数と呼び、定数 $A (> 0)$ は非共軸性の強さを表すパラメータである。その他の記号を表 1 にまとめて示す。

3. 平面ひずみ一軸圧縮試験の数値シミュレーション

ここでは、有限要素法による数値シミュレーションを、(a) 微小変形共軸弾塑性モデル (通常の Cam-clay モデル)、(b) 微小変形非共軸弾塑性モデル、(c) 有限変形共軸弾塑性モデル、(d) 有限変形非共軸弾塑性モデルを用いて行う。図 1 に解析の境界条件と有限要素分割を、表 2 に解析に用いた材料パラメータを示す。また、圧縮試験は供試体端面に等変位 (増分) を鉛直軸方向に与え、さらに供試体端面の水平変位は拘束してシミュレートする。なお、解析にはプログラム SHEBLA⁴⁾を用いた。

図 2 に軸ひずみが約 2.4% に達したときの最大せん断ひずみ分布について、上記の 4 種のモデルを用いた解析結果をそれぞれ示す。図 3 に供試体の軸方向の応力とひずみの関係を示す。有限変形非共軸モデルは軟化の傾向を示し始めているが、他の (a), (b), (c) のモデルは硬化傾向を維持している。ここで用いたモデルはいずれも硬化材料であるが、有限変形非共軸モデルだけなぜ軟化を示すのであろうか?

供試体内部の要素をせん断ひずみが集中した領域とそれ以外の領域から取り出して E1 および E2 と名付け、それぞれにおいて応力 q (表 1 参照) と最大せん断ひずみ γ の関係を求め図 4 に示す。同図から、有限変形非共軸モデルでは、供試体軸ひずみが約 2.2% のとき (図中記号 1 で示す軟化の始まる付近) から、要素 E1 の $q \sim \gamma$ 関係はさらに硬化を示し、要素 E2 では除荷が始まる。すなわち、せん断ひずみが小さい要素 E2 では除荷が進み、一方、せん断ひずみが大きい要素 E1 ではひずみがさらに集中しせん断帯を形成するため、供試体全体としては軟化を示すものと考えられる。それに対して、他のモデルでは、要素内では単調に硬化を示すのみで、供試体全体としても硬化を示すものと思われる。

4. むすび

有限変形非共軸弾塑性モデルによって変形の局所化を適切に表現できるものと考えられる。また、数値シミュレーションの結果、一軸圧縮試験において供試体の応力-ひずみ関係が軟化を示す現象は、供試体内部にひずみが集中する部分および解放される部分が生じるため起こるものと思われる。

参考文献: 1) J. P. Bardet, Computers and Geomechanics, 10, p.163, 1990. 2) 矢富他, 第 25 回岩力シンポジウム, p.101, 1993. 3) C. Yatomi et al, Soils and Foundations, 29(3), p.41, 1989. 4) C. Yatomi et al, ditto, 29(4), p.1, 1989.

表 1: 構成式に含まれるパラメータ

T_{ij} : 全 Cauchy 応力	T'_{ij} : 有効 Cauchy 応力	S_{ij} : 偏差応力	u : 間隙水圧
p' : 有効平均応力	(引張を正。ただし、 u, p' に関しては圧縮を正)		
$T'_{ij} = T_{ij} + u\delta_{ij}$	$p' = -T'_{kk}/3$	$q = \sqrt{(3/2)S_{ij}S_{ij}}$	$\bar{\tau} = \sqrt{(1/3)q}$
λ : 圧縮指数	κ : 膨潤指数	M : 限界状態パラメータ	e : 間隙比
ν : ポアソン比	D : ダイレイタンス係数 $(= (\lambda - \kappa)/M(1 + e))$		
$\bar{K} = \frac{1+\nu}{\kappa} p'$	$\bar{G} = \frac{3(1-2\nu)}{2(1+\nu)} \bar{K}$	$\bar{\beta} = (M - q/p')/\sqrt{3}$	$h = p'\bar{\beta}/\sqrt{3}D$

表 2: 材料パラメータ

λ	$= 0.231$
κ	$= 0.042$
M	$= 1.430$
ν	$= 0.333$
e	$= 1.500$
A	$= 0.01$
$(p'_0 = 1.0 \text{ kg/cm}^2)$	

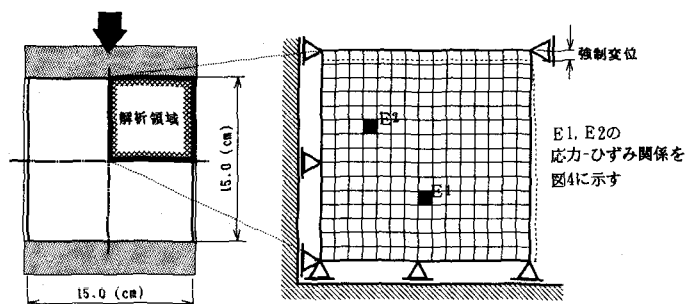
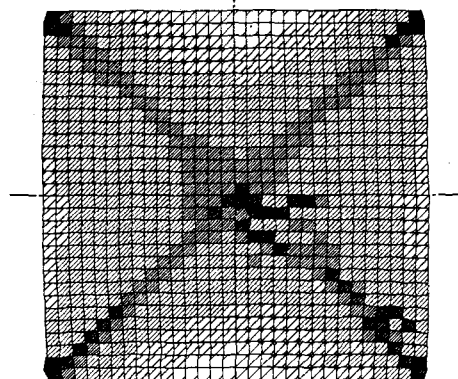


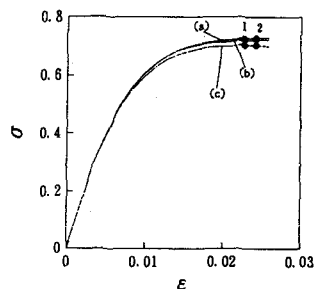
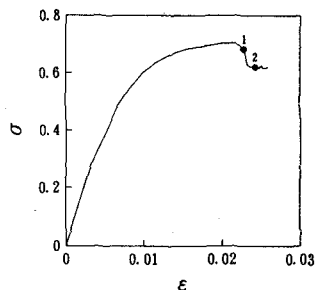
図1 解析領域

(a)微小変形共軸弾塑性モデル (c)有限変形共軸弾塑性モデル



(b)微小変形非共軸弾塑性モデル (d)有限変形非共軸弾塑性モデル

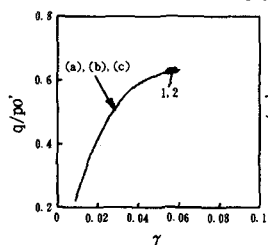
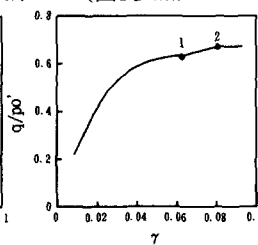
図2 最大せん断ひずみ分布

(a)微小変形共軸弾塑性モデル
(b)微小変形非共軸弾塑性モデル
(c)有限変形共軸弾塑性モデル

(d)有限変形非共軸弾塑性モデル

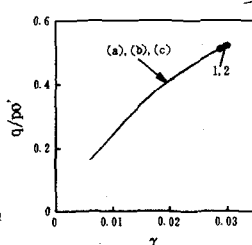
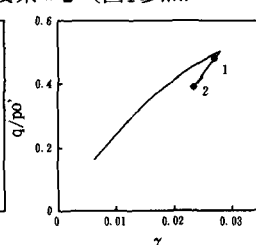
図3 供試体の軸方向の巨視的な応力-ひずみ関係

要素E1 (図1参照)

(a)微小変形共軸弾塑性モデル
(b)微小変形非共軸弾塑性モデル
(c)有限変形共軸弾塑性モデル

(d)有限変形非共軸弾塑性モデル

要素E2 (図1参照)

(a)微小変形共軸弾塑性モデル
(b)微小変形非共軸弾塑性モデル
(c)有限変形共軸弾塑性モデル

(d)有限変形非共軸弾塑性モデル

図4 供試体内部要素の応力-ひずみ関係