

CS 43

有限変形非共軸弾塑性モデルを用いた土被りの浅いトンネルの解析

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

筆者らは、有限変形非共軸弾塑性モデル^{1),2)}を用いれば、従来の解析モデルでは表すことが困難であった土被りの浅いトンネルの特徴的な変形挙動を求め得ることを示した³⁾。本報告では、その特徴的な挙動のメカニズムについて数値解析結果に基づき若干の考察を行う。

2. 有限変形非共軸弾塑性モデルの構成式の概要¹⁾

本研究で用いる有限変形非共軸 *Cam-clay* モデルの構成式を次に示す。

$$\dot{T}'_{ij} = \left\{ \left(\bar{K}^* - \frac{2}{3} \bar{G}^* \right) \delta_{ij} \delta_{kl} + \bar{G}^* (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) - \frac{\left(\frac{\bar{G}^*}{\bar{\tau}} S_{ij} - \bar{K}^* \bar{\beta}^* \delta_{ij} \right) \left(\frac{\bar{G}^*}{\bar{\tau}} S_{kl} - \bar{K}^* \bar{\beta}^* \delta_{kl} \right)}{\bar{G}^* + \bar{K}^* \bar{\beta}^{*2} + h^*} \right\} D_{kl} \quad (1)$$

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、

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

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. 土被りの浅いトンネルの掘削問題の数値シミュレーション

図1に示す解析モデルに対して、式(1)の構成式を用いて解析する。トンネル掘削は、トンネル壁面変位を底盤中央方向に向かい円形形状を保ちながら収縮させることによってシミュレートする。解析に用いた材料パラメータを表2に示す。なお、本研究の解析には有限要素解析プログラム *SHEBLA*²⁾を用いた。

図2は、トンネル直上の地表面沈下 u と天端沈下 δ の比 u/δ を、掘削進行率 (各計算段階の天端沈下を本解析の最終段階の天端沈下で除した値) に対して求めたものである。掘削の進行と共に u/δ が大きくなることが分かる。地表面沈下と天端沈下が同程度の値となる現象は「とも下がり」と呼ばれており、土被りの浅いトンネルの特徴的な挙動である。「とも下がり」は従来の解析では求めることが困難であった現象の一つであるが (図2微小変形弾性解析結果参照)、本解析ではうまく求められている。図3に本解析の最終段階における変形状態と最大せん断ひずみ分布を示す。この図から、地表面沈下の分布がトンネル掘削領域周辺に集中していること、および、最大せん断ひずみがトンネルスプリングライン付近から上方に向かい集中している様子が分かる。このような変形挙動の特徴は実際の現場計測結果を良く再現している³⁾。

次に、最大せん断ひずみが集中している領域とそれ以外の領域において、任意の要素を注目して (E1, E2, E3; 図1参照)、そのせん断応力 q (表1参照) と最大せん断ひずみ γ の関係、および応力経路を求め、それぞれ図4および5に示す。要素E1では、掘削の進行と共に応力・ひずみは単調に増加し、やがて完全塑性状態になるが、要素E2およびE3では除荷挙動を示している。すなわち、最大せん断ひずみが小さい要素E2およびE3では除荷現象が生じる (あるいは除荷荷重を繰り返す) が、最大せん断ひずみが大きい要素E1では、ますますひずみが集中し、せん断帯を形成するものと考えられる。そのような挙動は有限変形非共軸弾塑性モデルの特徴であり⁴⁾、その結果、上述の「とも下がり」、地表面沈下の集中分布、最大せん断ひずみの集中するなどの土被りの浅いトンネルの特徴的な挙動が生じるものと考えられる。

4. むすび

有限変形非共軸弾塑性モデルを用いた解析を行い、土被りの浅いトンネルの特徴的な変形挙動のメカニズムについて若干の考察を行った。その結果、地山内部の応力・ひずみの不均一な分布が、その挙動を特性づけることが示された。

参考文献: 1) C. Yatomi et al, *Soils and Foundations*, 29(3), p.41, 1989. 2) C. Yatomi et al, ditto, 29(4), p.1, 1989. 3) 矢富他, 第25回岩カシンボ, p.101, 1993. 4) 矢富他, 土木学会中四支部発表, 1993.

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 :ダイレイタンシ係数 $(= (\lambda - \kappa)/M(1 + e))$		
$\bar{K} = \frac{1+\nu}{\kappa}p'$	$\bar{G} = \frac{3(1-2\nu)}{2(1+\nu)}\bar{K}$	$\bar{\beta} = (M - q/p')/\sqrt{3}$	$h = p'\bar{\beta}/\sqrt{3}D$

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)	=	$1.0kg/cm^2$

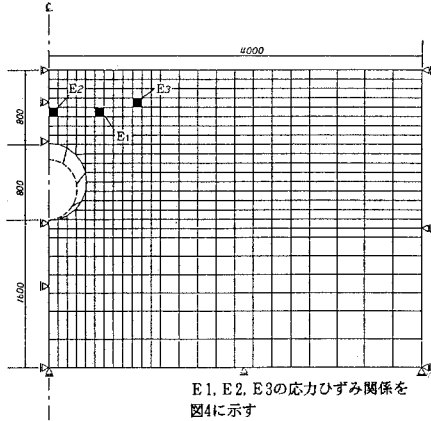


図1 解析モデル

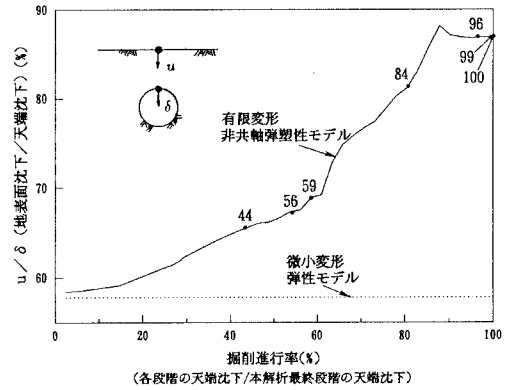


図2 地表面中央沈下と天端沈下の比

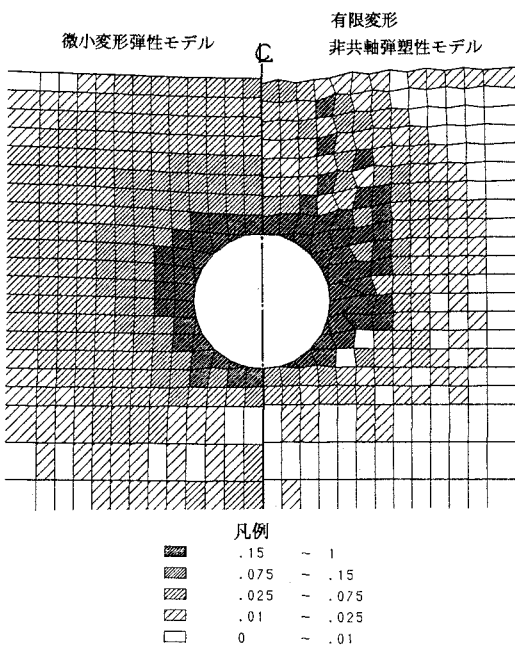


図3 最大せん断ひずみ分布

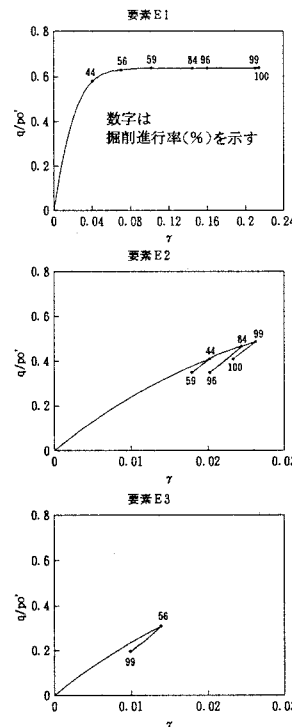


図4 地山内の要素の応力ひずみ関係

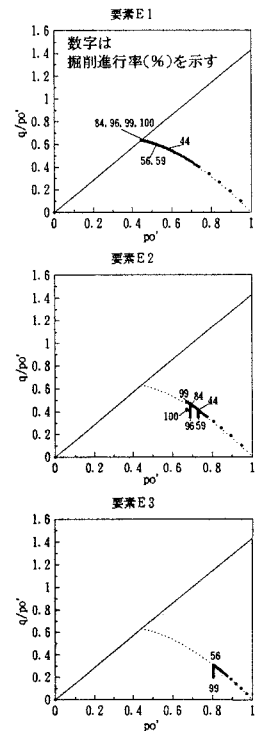


図5 地山内の要素の応力経路