

トンネル切羽近傍の3次元流動要素解析

大日本土木学会 〇嘉門 淳 鳥取大学工学部 木山 英郎
鳥取大学工学部 藤村 尚 鳥取大学工学部 西村 強

1.はじめに

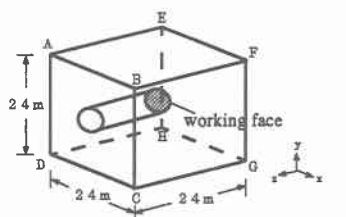
本来であれば、3次元として取り扱われるべきトンネルの力学的挙動は、やむをえず簡便化や解析手法の制約から工学的近似として、平面ひずみ状態として解析されることが一般的である。しかしながら、切羽の仮支保としての効果など、トンネル縦断方向への検討の必要性も示されている。また、3次元解析でなければ再現できない応力状態、変形挙動などもあり、3次元解析への要求は高まってきている。

そこで、本研究では、トンネル切羽近傍の応力・変形状態を3次元流動要素法(Flow Element Method: FLEM⁽¹⁾)により解析をした。特に、主応力方向の変化が切羽近傍の挙動にどのような影響を与えるのか、注目して検討した。

2.解析手順

地盤でみられるような複雑な3次元応力状態において、それらを1つ1つ解くことよりも、基本的な6つの荷重状態 $\{\sigma_x^*, \sigma_y^*, \sigma_z^*, \tau_{xy}^*, \tau_{yz}^*, \tau_{zx}^*\}$ の解を求めておいて、これらの重ね合わせにより解析を行なう方が有効である。

解析モデルとして図-1に示すような、等方均質な弾性体中の円形断面トンネルを仮定する。この際、対称性を考慮すると、上記の基本荷重状態では、 $\{\sigma_y^*, \sigma_z^*, \tau_{xy}^*, \tau_{yz}^*\}$ の4通りの解を求めておけばよいことになる。想定する応力状態は、3主応力 $\{\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3\}$ で表し、それらがトンネル軸と斜交している場合を考える。図-2は、 θ, ϕ, α で3主応力の作用方向を表現したもので、 θ はy軸に関する回転を表し、主応力軸を (x, y, z) 系から (x', y', z') 系へ変換する。継いで、 ϕ はx'軸に関する回転を、 α はz'軸に関する回転を表している。このような変換によって、基本荷重状態と3主応力 $\{\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3\}$ は座標変換マトリックス $[K]$ を用いて式【1】のように結び付けられる。



トンネル半径：3m
孔口から切羽までの距離：15m

図-1 解析モデル

$$[K] = \begin{bmatrix} \cos\phi \sin\theta & \sin\phi & \cos\phi \cos\theta \\ -\cos\alpha \sin\phi \sin\theta - \sin\alpha \cos\theta & \cos\alpha \cos\phi & -\cos\alpha \sin\phi \cos\theta + \sin\alpha \sin\theta \\ \sin\alpha \sin\phi \sin\theta - \cos\alpha \cos\theta & -\sin\alpha \cos\phi & \sin\alpha \sin\phi \cos\theta + \cos\alpha \sin\theta \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_x^* & \tau_{xy}^* & \tau_{xz}^* \\ \tau_{yx}^* & \sigma_y^* & \tau_{yz}^* \\ \tau_{zx}^* & \tau_{zy}^* & \sigma_z^* \end{bmatrix} = [K]^T \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix} \quad [K] \quad \dots\dots\dots \text{【1】}$$

本解析で使用する解析定数を表-1に示す。

表-1 解析定数

ヤング率	E = 10 (KPa)
ポアソン比	$\nu = 0.3$
密度	$\rho = 2.65 \text{ (g/cm}^3\text{)}$

x y z 座標は全体座標系
 σ_1 : 最大主応力
 σ_2 : 中間主応力
 σ_3 : 最小主応力

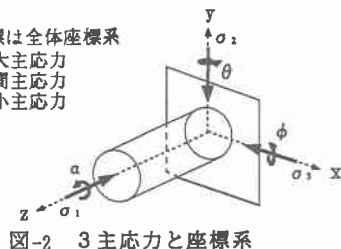


図-2 3主応力と座標系

3.解析結果と検討

本研究では、中間主応力(σ_2)の大きさと方向の変化がトンネル切羽近傍の挙動に、どのような影響を与えるのか、注目して結果の整理を行っている。ここでは、 $\sigma_1/E=1.0$ 、 $\sigma_2=0.58\sigma_1$ 、 $\sigma_3=0.3\sigma_1$ となるときの変形の様子を図-3～図-8に示す。図-3に、ここで取り上げる例の主応力方向の様子を示す。各断面内変形(xy平面,xz平面,yz平面)を示したものが図-4～図-6である。また、図-7、図-8は σ_2 の作用方向の変化に伴うスプリングライン間およびクラウン・インバート間の内空変位量を示したものである。縦軸を変位量、横軸をトンネル軸方向の距離とし、内空変位量マイナスは断面収縮を示している。

以上の図より、中間主応力の作用方向がトンネル軸に近付くにつれ、内空変位が小さくなる様子が表れている。このような載荷状態では、 σ_2 の作用方向の変化がスプリングライン間の内空変位量に影響を与えていることが示されている。

参考文献 1)木山 英郎他：連続体の大変形のための流動要素法(FLEM)の提案，土木学会論文集No.439/1991.12.

xyz座標は全体座標系

σ_1 ：最大主応力

σ_2 ：中間主応力

σ_3 ：最小主応力

$\theta=90^\circ$ $\phi=60^\circ$

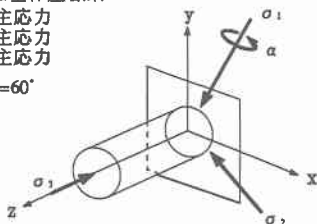


図-3 主応力の作用方向

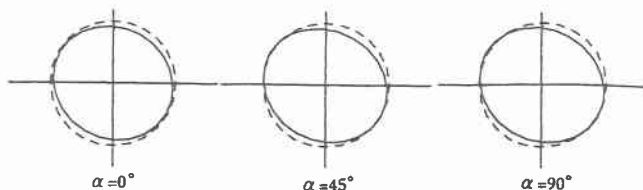


図-4 切羽変形図(xy平面) ($\phi=60^\circ$ $\theta=90^\circ$) (変位量×10)

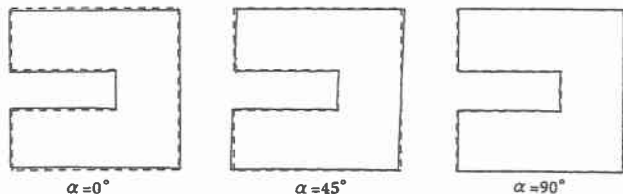


図-5 断面形状図(xz平面) ($\phi=60^\circ$ $\theta=90^\circ$) (変位量×10)

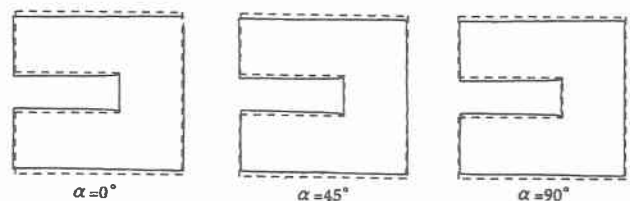


図-6 断面形状図(yz平面) ($\phi=60^\circ$ $\theta=90^\circ$) (変位量×10)

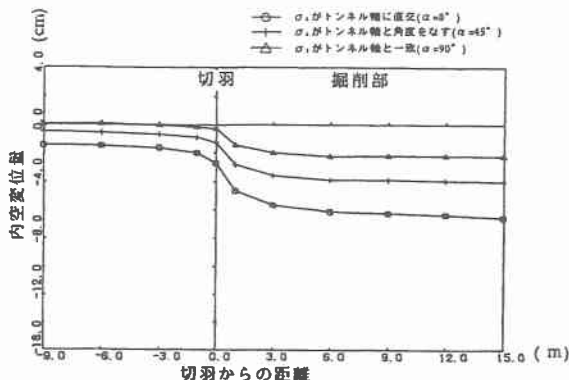


図-7 スプリングライン間の内空変位量 ($\phi=60^\circ$ $\theta=90^\circ$)

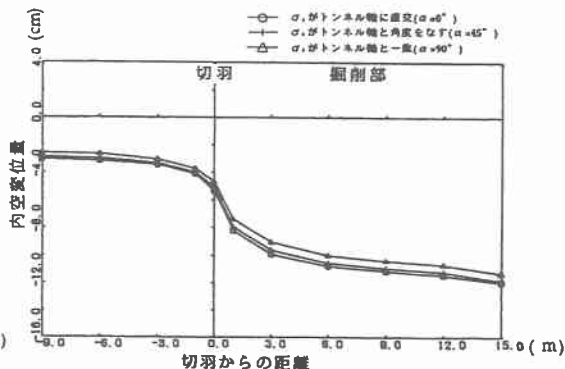


図-8 クラウン・インバート間の内空変位量 ($\phi=60^\circ$ $\theta=90^\circ$)