

### III-364 圧密を受ける等方性飽和弾性土と 円形巻き立てトンネルの相互作用問題

山梨大学工学部 正員 平島健一  
甲府市役所 正員 小田切 寛

#### 1. 緒言

従来、土の圧密による巻き立てトンネルの時間的変動については、巻き立ての内外周面の作用応力を区別しない、いわゆる断面力を用いたシェル理論によって考えられてきた。本論文においては、シェル理論による解と厳密な境界条件を満足する問題としての弾性厳密解との差異を比較検討する。数値例として、巻き立てトンネルと弾性土の接触面における変位および応力について求め、さらに弾性厳密理論に基づき、巻き立てトンネル内部の変位と応力も明らかにする。

#### 2. 問題設定

トンネルは、十分深い場所に掘削され、トンネル軸は水平で、問題は平面ひずみ状態であると仮定する。

ここで、図-1に示すように座標系を定義すると、円形境界上に働く各応力は次のように与えられる。

$$\begin{aligned} \sigma_H &= N\sigma_v, \quad \sigma_v = \sigma_v' + p_0, \quad \sigma_H = \sigma_H' + p_0, \\ \sigma_H' &= K_0\sigma_v', \quad N = K_0 - r_w/\rho_f (K_0 - 1), \\ \sigma_{rr} &= \sigma_m + \sigma_d \cos 2\theta, \quad \sigma_{\theta\theta} = -\sigma_d \sin 2\theta, \\ \sigma_{\theta\theta} &= \sigma_m - \sigma_d \cos 2\theta, \\ \sigma_m &= \frac{1}{2}(\sigma_v + \sigma_H), \quad \sigma_d = \frac{1}{2}(\sigma_v - \sigma_H). \end{aligned} \quad (1)$$

ここに、  
 $p_0$  : 原位置(初期)間隙水圧,  
 $\sigma_v'$ ,  $\sigma_H'$  : 有効応力成分,  
 $\rho_w$  : 間隙水の単位体積重量,  
 $\rho$  : 土の単位体積重量。

解析を容易にするために、式(1)で与えられる原位置(初期)応力状態を2つの項成分の和として考えさらに、巻き立てトンネルを不透水性と仮定すると、対象とする問題に対する境界条件は以下の通りとなる。

**Case 1** : 平均応力の部分  $\sigma_{rr} = \sigma_m$ ,  $\sigma_{\theta\theta} = 0$ ,  $\partial\sigma_{rr}/\partial r = 0$  at  $r = a$ ,

**Case 2** : 軸差応力の部分  $\sigma_{rr} = \sigma_d \cos 2\theta$ ,  $\sigma_{\theta\theta} = -\sigma_d \sin 2\theta$ ,  $\partial\sigma_{rr}/\partial r = 0$  at  $r = a$ .

原位置(初期)応力状態の形は解析が場の量のフーリエ成分によってなされることを示している。 $r = a$ において、それぞれの場合に関する場の量を以下のように仮定することができる。

$$\begin{aligned} u_s &= X \cos n\theta, \quad v_s = Y \sin n\theta, \quad \sigma_{rr} = R \cos n\theta, \quad \sigma_{\theta\theta} = T \sin n\theta, \\ u_r &= U_x \cos n\theta, \quad u_\theta = V_x \sin n\theta, \quad \tau_{rr} = P_x \cos n\theta, \quad \tau_{\theta\theta} = Q_x \sin n\theta. \end{aligned}$$

上式において、Case 1の場合、 $n = 0$ 、Case 2の場合、 $n = 2$ であることは明らかである。

#### 3. 解析のための境界条件

解は弾性土と巻き立ての接触面で仮定される境界条件で与えられる。変位および応力の境界条件に関して以下のように2つの両極端な場合を想定する。実際的な状態は、これらの両者の中間的な状態になるのが普

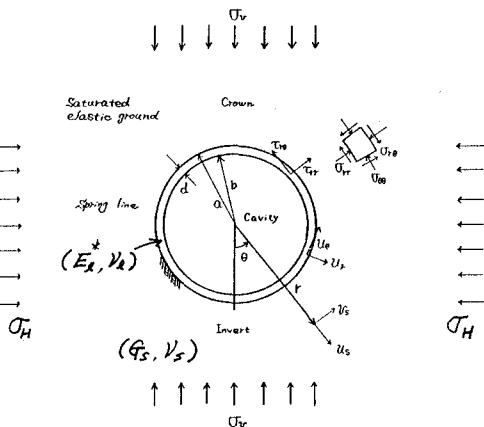


図-1 座標記号

通である。

- (a) 境界条件 I(Perfectly rough interface): 変位および応力とともに連続。i.e.  $X = U_e$ ,  $Y = V_e$ ,  $R = -P_e$ ,  $T = -Q_e$ .  
 (b) 境界条件II(Perfectly smooth interface): 半径方向変位、応力のみ連続。i.e.  $X = U_e$ ,  $R = -P_e$ .

解析は飽和弾性土と巻き立てトンネルの支配方程式を上述の2種のもとで高速ラプラス変換法を用いて実行した。支配式の詳細<sup>1), 2)</sup> と解析過程については文献<sup>1), 2)</sup> および講演発表時に譲る。これらの過程を経て得られた結果として、Case 1 の場合はシェル理論による解と弾性厳密理論による解との差は無視してよい値であり、さらに時間に依存しないことから、ここでは Case 2 の場合について述べることにする。

#### 4. 数値計算例

数値計算にあたり、荷重載荷時からの経過時間  $t$  の無次元尺度として  $T_v = \frac{ct}{\alpha^2}$  を定義する。

##### (I) $d/a$ に対する各係数の変化

図2, 3 に条件I(rough の場合)の変位係数の変化を示す。これみると、シェル理論の誤差は巻き厚の増加および時間の経過とともに大きくなることがわかる。シェル理論による値の絶対値は厳密解よりも大きい値をとる。以上のことは条件II(smooth の場合)にも認められている。図4, 5 に条件I の応力係数の変化を示す。これをみると、 $d/a = 0, 0.1$ 付近で各係数は平衡あるいは極値をとることがわかる。

##### (II) 条件I(rough の場合)と条件II(smooth の場合)の比較

図6, 7 に2つの境界条件の場合の変位係数の時間的変化を示す。一般的に条件IIの変位の方が条件Iの場合よりも大きいことがわかる。別の観点から考察すると、いずれの場合も  $T_v = 10$  ぐらいで圧密がおちつき、 $T_v = 0, 1 \sim 10$  の間で主要な挙動の大部分が進行していることがわかる。

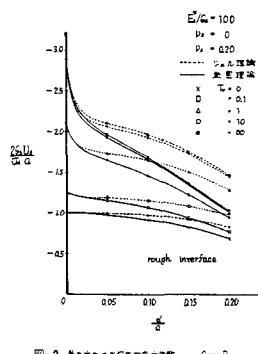


図-2 巷き立ての半径方向変位係数 Case 2

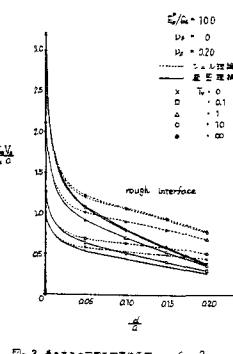


図-3 巷き立ての円周方向変位係数 Case 2

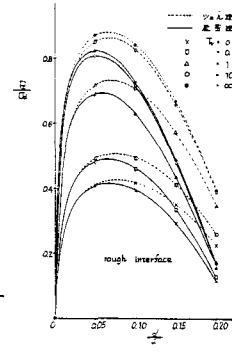


図-4 巷き立ての半径方向応力係数 Case 2

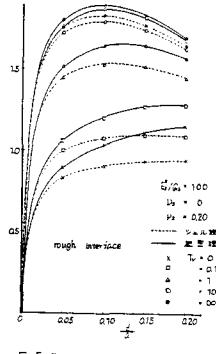


図-5 巷き立てのせん断応力係数 Case 2

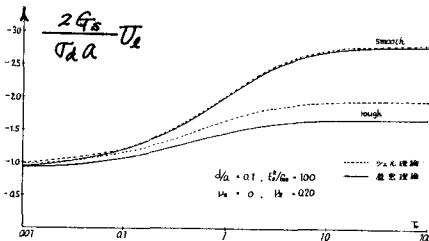


図-6 巷き立ての半径方向変位係数 Case 2

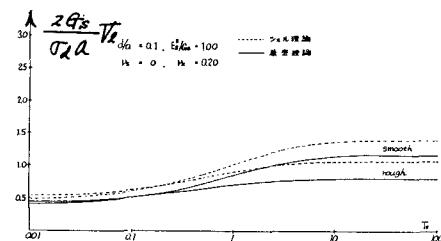


図-7 巷き立ての円周方向変位係数 Case 2

#### 参考文献

- 1) J.P.Carter and J.R.Booker, "Elastic consolidation around a deep circular tunnel", Int.J. Solids & Struct., Vol.18, pp1059-1074(1982)
- 2) J.P.Carter and J.R.Booker, "Elastic consolidation around a lined circular tunnel", Int.J. Solids & Struct., Vol.20, pp589-608(1984)