

1. はしがき 粘土のような塑性的な地山の中に円形トンネルを掘削した場合、シールド・セグメントもしくは支保工に、いかなる土圧が作用するかという問題について、理論的に解を求めたのが、本文の内容である。

2. 総論 1) 仮定、以下に示す計算の前提となるおもな仮定はつぎの通りである。

a. トンネルの土かぶりはその半径に比してかなり大である。したがってシールドトンネルまたは一般の山岳トンネルで土かぶり大なるものを対象とする。

b. 地山のポアソン数として、飽和粘土におけるごとく2を採用する。

2) 地山がすべて弾性状態にある場合、このときの地山内の任意点における応力は次式で与えられる(図-1)。ただし圧縮応力を正とする。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= k r^{-2} + q, & \sigma_\theta &= -k r^{-2} + q, & \sigma_z &= (\sigma_r + \sigma_\theta) / 2 = q = w z \\ \text{ここに } k &= (p_a - q) a^2, & p_a &= \text{トンネル内面のシールドなどに作用する圧力,} \\ a &= \text{トンネルの半径,} & w &= \text{地山の単位体積重量,} & z &= \text{トンネルの中心の深さ} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

また地山内の任意点における半径方向の変位 u は、問題が平面ひずみ状態であるから、

$$u = -3k / 2Er = -3(p_a - q) a^2 / 2Er, \quad \text{ここに } E = \text{地山のヤング係数} \quad (2)$$

3) トンネルの周囲に塑性領域を発生する場合、弾性領域の内面の半径が b に拡大され、したがって弾塑性境界の半径が b になったとして、そのときの弾塑性境界における応力および変位を求めると、式(1)と(2)にそれぞれ $a = r = b$ を代入することによって、次式が得られる。

$$\sigma_r = p_b, \quad \sigma_\theta = 2q - p_b, \quad \sigma_z = q, \quad \text{ここに } p_b = \text{弾塑性境界上の圧力} \quad (3)$$

$$\delta_b = -3(p_b - q)b / 2E, \quad \text{ここに } \delta_b = \text{弾塑性境界における半径方向の変位} \quad (4)$$

4) 降伏条件式。 σ_r , σ_θ , σ_z は主応力であると考えられるので、次式を採用する。

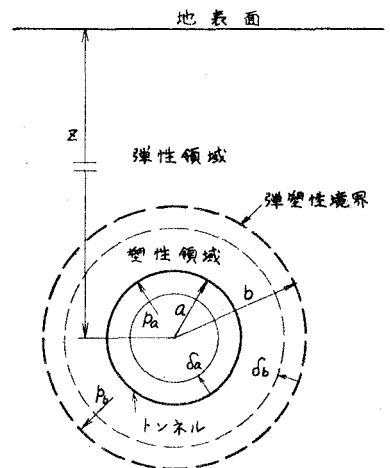
$$(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2 = \{a_0(\sigma_r + \sigma_\theta + \sigma_z) + b_0\}^2 \quad (5)$$

ここに a_0 と b_0 は土の性質によって定まる正の常数で、3軸圧縮試験を行ない、式 $\sigma_r = m\sigma_\theta + k(\sigma_r + \sigma_\theta)$ (上下圧, σ_z = 側圧) から m と k を求めれば、次式により算出されるものである。

$$a_0 = \sqrt{2}m / (m+3), \quad b_0 = 3\sqrt{2}k / (m+3) \quad (6)$$

5) トンネル内面の変位と弾塑性境界の変位との関係、これらの変位をそれぞれ δ_a , δ_b (図-1) とおけば、塑性領域内の地山には体積変化を生じないと考え、かつ式(4)を用いることによって、これらの δ_a と δ_b の関係が簡単につぎのように計算される。

図-1



$$\delta_b = b - \sqrt{b^2 - 2a\delta_a + \delta_a^2} = -3(p_b - q)b/2E \quad (7)$$

なお上記の δ_a はトンネル内面に生ずるゆるみ量であって、シールドなどの変形・沈下などによって生ずるというよりは、むしろ押し出して来る地山を排除するために発生するものである。

3. 第1計算法 前記の p_a と p_b を等置、すなわちトンネル内面のシールドなどに作用する圧力と弾塑性境界における圧力とを等しいとおくのが、この方法の主眼であって、塑性領域内の地山が液体に近い状態となる場合を対象とする。このときには、式(3)と(5)に代入しかつ $p_a = p_b$ とおけば、求める圧力 p_a が次式により算出される。

$$p_a = p_b = (1 - \sqrt{6} a_0/2) q - b_0/\sqrt{6} \quad (8)$$

すなわち上式により、 p_a がトンネルの内面の変位 δ_a とは無関係に求められ、 p_a は δ_a にかかわらず一定値をとる。したがって式(7)から得られる b および δ_b の値が、実用上は単なる参考程度の数値にとどまるわけである。

4. 第2計算法 ここでは、前記の p_a と p_b が等しくないとし、塑性領域内の応力変化を考えに入れて計算を行なうものとする。まず式(5)に $\delta_r = (\sigma_r + \sigma_\theta)/2$ を代入して、未知量 σ_r と σ_θ に関する第1の条件式を導けばつぎのようになる。

$$\sigma_\theta = e \sigma_r + f \quad (9)$$

$$\text{ここに } e = (\sqrt{3}/2 + 3a_0/2) / (\sqrt{3}/2 - 3a_0/2), \quad f = b_0 / (\sqrt{3}/2 - 3a_0/2)$$

第2の条件式はつぎに示すつりあい方程式である。

$$r d\sigma_r / dr = \sigma_\theta - \sigma_r \quad (10)$$

したがって式(9)と(10)とを連立させて解き、積分定数を $r=a$ にて $\sigma_r = p_a$ なるトンネル内面の境界条件から求めて、塑性領域内の応力 σ_r と σ_θ を計算すれば、次式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= (p_a + f/g)(r/a)^g - f/g \\ \sigma_\theta &= e \sigma_r + f, \quad \text{ここに } g = e - 1 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

しかし上式の p_a は未定であるから、つぎに弾塑性境界 $r=b$ にて、弾性領域から求めた式(3)の σ_r と、上式にて $r=b$ とあいた σ_r とが等しいとして、 p_a を求めれば、

$$p_a = (p_b + f/g)(b/a)^{-g} - f/g \quad (12)$$

これで求める p_a が算出されたことになる。ただし上式右辺の p_b は式(8)、 b は δ_a をふれば式(7)から計算されるものである。

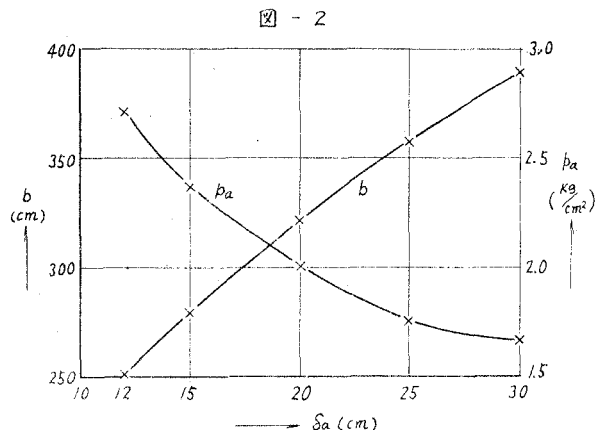
5. 数値計算例 ちゅう積粘土を例にとり、つぎの値を採用して数値計算を行なう。

$$a_0 = 0.268, \quad b_0 = 0.435 \text{ kg/cm}^2,$$

$$E = 50.1 \text{ kg/cm}^2, \quad a = 2.5 \text{ m},$$

$$w = 2.15 \text{ t/m}^3, \quad Z = 20 \text{ m}$$

まず第1計算法により p_a を求め、それと q とを対比すればつぎのようになる。



$$p_a = 2.7 \text{ kg/cm}^2, \quad q = 4.30 \text{ kg/cm}^2$$

すなわちシールド・支保工などにかかる圧力 p_a は、トンネル掘削以前における地山内の初応力 q よりかなり小であることがわかる。また参考のため、トンネル内面の変位 δa の増大にともない、塑性領域の半径 b が増加して行く状況を示せば、図-2 のようになる。

つぎに σ_2 計算法による結果を述べると、まず δa と b との関係は、当然なことではあるが、 σ_1 計算法の場合とまったく同一となる。ところが δa と p_a との関係を求めれば、図-2 に示すように、 p_a が δa の増加とともに著しく減少

するという、きわめて興味ある結果が得られる。しかしここでは、塑性領域内の地山が破断しないという前提に立っていることに注意されたい。また図-3 は地山内における応力分布の一例を示すもので、 $\delta a = 20 \text{ cm}$ 、したがって $b = 321 \text{ cm}$ 、 $p_a = 2.00 \text{ kg/cm}^2$ なる場合に対応するものである。この図に示す2本の曲線が $p_a = q = 4.30 \text{ kg/cm}^2$ なる直線に右方で漸近することはいうまでもない。

6. 結 び 以上の計算によって、地山のゆらみと土圧との関係という、これまで解決が困難とされていた問題について、一応の解を与え得たように思われるので、ご批判を仰ぎたい。

終りに、この研究に対し文部省科学研究費の補助を受けたこと、ならびに荒川浩（文成建設）・高本敏（阪大大学院）の両君に計算・製図の労をわすれなことを付記して、感謝の意を表したい。

