

飛島建設(株) 正員 福島 啓一
飛島建設(株) 正員 安藤 晴己
飛島建設(株) 安部 義文

1. はじめに

トンネルの支保工や巻立に働く荷重については従来、①ゆるみ荷重を主とするものと、②外圧を受けている弾性体又は弾塑性体中にトンネル空洞をあけた時の、支保工の撓みとの相関で与えられる荷重、との二つの考え方があり、別々に用いられて来た。従来はゆるみ荷重説が主に用いられて来たが、近年、地山に密着した支保工を施工するNATM(新オーストリアトンネル工法)の普及や、有限要素法などの数値解析法の発達に伴って後者も広く用いられ始めた。しがいかに上手に施工してもトンネル掘削に伴う地山のゆるみは避けられないものであり、盛んに行なわれている現場計測もこれを裏づけているので、上記の二つの考え方を統合した地山内応力や支保工荷重の計算法を提案するものである。(今回は軸対称の場合についてのみ考える)

2. トンネル掘削に伴う応力状態

[段階Ⅰ：掘削前] 一様な圧力 $P = \gamma H$ が働いている静水圧状態と仮定。

[段階Ⅱ：掘削直後] トンネルを掘削すると内空面は一次的には全く反力を失う。しかしトンネルの長さ方向のアーチ作用が働いているので、実質的には内空面反力はゼロとならず、多少の圧力 P_{II} が働いていると考えてよい。この P_{II} の値は一回掘削の長さ、切羽の面積、切羽や天端の防護方法や補助工法、インバートアーチまでの離れ、地山と支保工の密着の程度などにより変る。

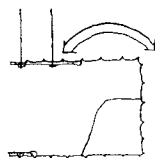


図 - 1

[段階Ⅲ：支保工設置後] 支保工を設置した後は、地山と支保工は E , ν などが異なる2重～数重の厚肉円筒として挙動し、安定状態に達する。

3. 計算式の誘導

支保工は薄肉円筒と考えて十分である。厚さ t , ヤング率 E , ポアソン比 ν , 半径 a , 内空変位量 u とすれば支保工反力 P_2 は次式で求められる。

$$P_2 = u \cdot t \cdot E / [a^2(1-\nu)] \quad (1)$$

半径が a 及び b で、内圧 P_a 及び外圧 P_b を受ける厚肉円筒の弾性状態時の応力

及びひずみは次の様になる(但し、平面ひずみ状態。応力、圧力及びひずみは引張り及び伸びを正とする)。

$$\sigma_r = -\frac{a^2 b^2 (P_b - P_a)}{b^2 - a^2} \cdot \frac{1}{r^2} - \frac{P_a a^2 - P_b b^2}{b^2 - a^2} \quad (2)$$

$$\sigma_\theta = +\frac{a^2 b^2 (P_b - P_a)}{b^2 - a^2} \cdot \frac{1}{r^2} - \frac{P_a a^2 - P_b b^2}{b^2 - a^2} \quad (3)$$

$$\tau_{r\theta} = 0 \quad (4) \quad \epsilon_\theta = u/r \quad (5) \quad \epsilon_\theta = (\sigma_\theta - \nu \sigma_r) / E' = \frac{1-\nu^2}{E} \left(\sigma_\theta - \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_r \right) \quad (6)$$

$$\therefore u = r \epsilon_\theta = \frac{1+\nu}{E} \left[\frac{a^2 b^2 (P_b - P_a)}{b^2 - a^2} \cdot \frac{1}{r} - \frac{P_a a^2 - P_b b^2}{b^2 - a^2} (1-2\nu) \cdot r \right] \quad (7)$$

(7)式はトンネル掘削前の変形を含んでいるので、これを消去し、 $b = \infty$ とおくと

$$u = \frac{1+\nu}{E} \cdot \frac{a^2}{r} (P_b - P_a) \quad (8)$$

今上記の厚肉円筒が塑性状態になり、そこではモール・クーロンの降伏条件 $\sigma_\theta = \sigma_r \frac{1+\sin\phi}{1-\sin\phi} - \frac{2C \cos\phi}{1-\sin\phi}$ (9)と軸対称応力状態 $\sigma_r + r \frac{d\sigma_r}{dr} = \sigma_\theta$ (10)が成立していると仮定すると、応力 σ_r は次式で求められる。

$$\sigma_r = c \cot\phi + (P_b - c \cot\phi) \left(\frac{r}{b} \right)^{\frac{2 \sin\phi}{1-\sin\phi}} \quad (11)$$

$r = a$ とすれば、この厚肉円筒が破壊してしまわないための内空反力 $P_a = \sigma_a$ を求めることが出来る。

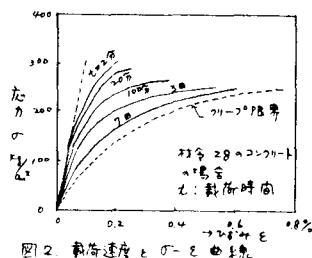


図2 載荷速度と $\sigma - \epsilon$ 曲線

今 $C = \infty$ で $P_c = -\gamma H$ の圧力が働き、 $b = R$ が弾性域と塑性域の境界である二重円筒では、(2)、(3) と (9) より $P_0 = P_c(1 - \sin \phi) + C \cos \phi \dots (12)$ となり、その内側の塑性領域内の応力は(11)及(9)と組合わせて求められる。塑性域内ではフックの法則は一般には成立しないが、体積については弾性的挙動を考えると考えられる。故に $\epsilon = \epsilon_r + \epsilon_\theta + \epsilon_z \dots (13)$ と $\theta = \sigma_r + \sigma_\theta + \sigma_z \dots (14)$ との間には次の弾性の法則が成立つ。

$\epsilon = (1 - 2\nu) \cdot \theta / E \dots (15)$ 又 $\epsilon_z = (\sigma_z - \nu \sigma_r - \nu \sigma_\theta) / E = 0 \dots (16)$ 故に $\sigma_z = \nu(\sigma_r + \sigma_\theta) \dots (17)$
 $\therefore \epsilon = (1 - 2\nu)(1 + \nu)(\sigma_r + \sigma_\theta) / E \dots (18)$ 但し掘削前後の変位を求める時は $\sigma_r + \sigma_\theta$ から $2P_0$ を差引く。
 今 $\epsilon_r = du/dr \dots (19)$ $\epsilon_\theta = u/r \dots (20)$ $\epsilon_z = 0 \dots (21)$ であるから $\epsilon = \epsilon_r + \epsilon_\theta + \epsilon_z = du/dr + u/r \dots (22)$
 故に(18)と(22)から $u/r + du/dr = (1 - 2\nu)(1 + \nu)(\sigma_r + \sigma_\theta - 2P_0) / E \dots (23)$

両辺に r を乗じて $u + r \cdot du/dr = d(ur) / dr = (1 - 2\nu)(1 + \nu)(\sigma_r + \sigma_\theta - 2P_0) / E \dots (24)$
 積分して(10)及(12)を代入すると $ur = \frac{(1 - 2\nu)(1 + \nu)}{E} \left\{ (P_c - C \cot \phi) \left(\frac{r}{R} \right)^{\frac{2 \sin \phi}{1 - \sin \phi}} + C \cot \phi - P_0 \right\} r^2 + A \dots (25)$
 $r = R$ の時の変位量 u_R が境界条件として与えられるので $A = u_R \cdot R - \frac{(1 - 2\nu)(1 + \nu)}{E} [P_c - P_0] R^2 \dots (26)$
 $\therefore u = u_R \cdot \frac{R}{r} + \frac{(1 - 2\nu)(1 + \nu)}{E} \cdot r \left\{ (P_c - C \cot \phi) \left(\frac{r}{R} \right)^{\frac{2 \sin \phi}{1 - \sin \phi}} + C \cot \phi - P_0 \frac{R^2}{r^2} - P_0 \left(1 - \frac{R^2}{r^2} \right) \right\} \dots (27)$

以上の計算式により内空反力 P_0 を仮定すれば地山内の応力及び変位と計算することが出来(計算は応力を内空側から順次求めて行き、終ったら変位と外側から求めて来る)、(1)式で求めた支保工の変位へ反力曲線との交点で P_0 を求める。掘削の途中で、 E 、 ν などが変わる時は上記の式を多少修正して用いることが出来る。若し地山中にアンカーボルトがは入っているなら、ボルト打設前後の変位差を u'_r とすればボルトの軸力 $T = A_b E_s du'_r / dr \dots (28)$ で求められる。但しボルトにより地山が強化されるならば、その効果を地山の E 、 ν の値にとり入れる。

又、ボルト軸力を(1)式の支保工反力に加算する。

4. 計算例

[I] $E = 10,000 \text{ t/m}^2$ (加圧時) 又は $5,000 \text{ t/m}^2$ (減圧時)、 $\nu = 0.25$ 、 $\gamma = 2.0 \text{ t/m}^3$
 $\gamma u = 51.96 \text{ t/m}^2$ 、 $\phi = 30^\circ$ 、 $C = 15 \text{ t/m}^2$ の軟岩中のがぶり $H = 100 \text{ m}$ の所に半径 $a = 3.0 \text{ m}$ の円形トンネルを掘る場合、 $P_0 - aQ$ の関係は図3の実線の様になる。

[II] 上記と同じ地山内のトンネルであるが、掘削後短時間は内面が開放されて、有効内圧 $P_0 = -24.24 \text{ t/m}^2$ になるとする。但し、短時間のため $E = 20,000 \text{ t/m}^2$ 及 $10,000 \text{ t/m}^2$ とする。 $R = 4.5 \text{ m}$ 以内が塑性状態になる。

短時間開放した後、支保工を施工する。この場合の $P_0 - aQ$ 関係を図3に、ゆるみを考えなかった場合と比較して示す。又図4に地中の応力分布等を示す。

5. まとめ

トンネル掘削に当り地山をゆるませないことは非常に大切であるが、従来の計算法はこの要素をとり入れていなかった。

参考文献 福島「Fenner-Pacher 曲線についての考察」 第14回岩盤力学シンポジウム(1982)

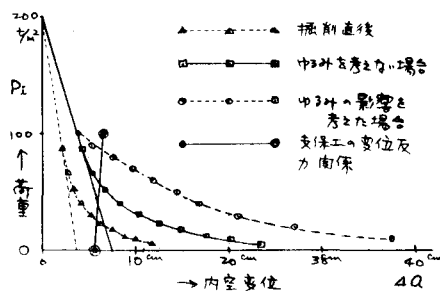


図3 $P_0 - aQ$ 関係図

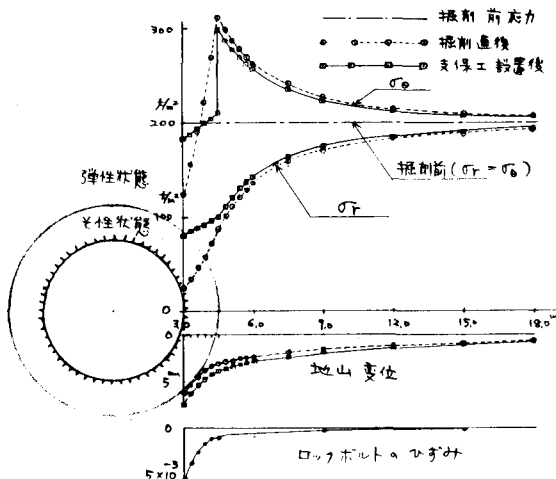


図4 地中の応力分布等図