

京都大学工学部 正員 足立紀尚、田村 武、矢野隆夫  
 京都大学大学院 学員 ○堀口知巳

1. はじめに 本研究は、大深度地下にトンネルを掘削する場合の力学挙動を、解明するために足立・田村<sup>1)</sup>の解を発展させて、注入による地山定数の変化と力学挙動との関係を考察したものである。ここでは、注入によりトンネル掘削の際に安定な地山を確保できる支保工反力について考察した。

2. 解析の方法 本研究における問題の理想化のための仮定を示す。

1) 軸対称厚肉円筒平面ひずみ問題とする。図-1のような境界値問題として解析を行う。ただし、 $\rho_{g1} \sim \rho_{g2}$ 間に注入域、 $\rho_d$ に水抜孔が配列され、トンネル壁面  $r = a$  には支保工反力を想定した内圧  $p'(a)$  と水圧  $u(a)$  が、外周面  $r = b$  に外圧  $p'(b)$  と水圧  $u(b)$  が作用しているとしている。ただし、 $r = \rho_d$  において水抜孔が一樣な円周線と換算できるものとしている。

2) 間隙水圧は、地山の变形と相互作用がなく、その運動は Darcy 則による定常浸透流問題とする。

3) 透水係数は地山、注入域、またそれらが塑性域となった場合に異なる値を取り得るものとする。

4) 塑性降伏条件は、Mohr-Coulomb 型の降伏条件によるものとする。また、構成式は Non associated flowrule によるが、そのために  $\Psi$  なる塑性ポテンシャルパラメーターを導入する。有効応力は Terzaghi の定義によるもので、全応力と間隙水圧の差として与えられる。

5) 注入域の地山定数（内部摩擦角、粘着力）、および力学定数（ヤング係数、ポアソン比、塑性ポテンシャルパラメーター）は、自然地山のものと異なる値を取り得るものとする。

3. 解析条件 図-2 に示すような地下 150m に半径 5m のトンネルを掘削する場合を解析する。地山の力学定数として、密な砂を想定して粘着力  $c' = 0$ 、内部摩擦角  $\phi' = 35^\circ$ 、ヤング係数  $E = 15000 \text{ tf/m}^2$ 、ポアソン比  $\nu = 0.25$  とおく<sup>2)</sup>。透水係数は、透水係数パラメーターを用い、 $n_{op} = k_0/k_{00} = 0.2$ 、 $n_g = k_0/k_g = 10$ 、 $n_{gp} = k_0/k_{g0} = 2$  とする。ただし、 $k_0$  は自然地山の透水係数、 $k_{00}$  は自然地山が塑性した場合の透水係数、 $k_g$  は注入域の透水係数、 $k_{g0}$  は注入域が塑性した場合の透水係数である。トンネルの仮想外周は半径 40m とし、仮想外周における境界条件は、 $p_b' = 127.5 \text{ tf/m}^2$ 、 $u_b = 150 \text{ tf/m}^2$  とする。注入域の内側半径  $\rho_{g1}$  は、トンネル半径  $a$  と一致するものとする。また、本解析では、水抜孔を設けない場合を取り扱う。

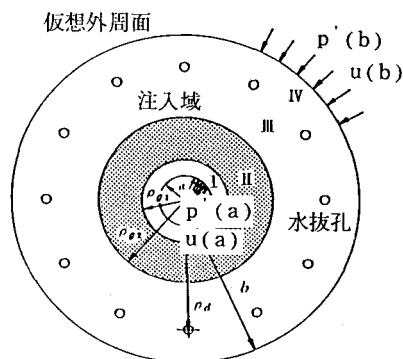


図-1 解析する境界値問題

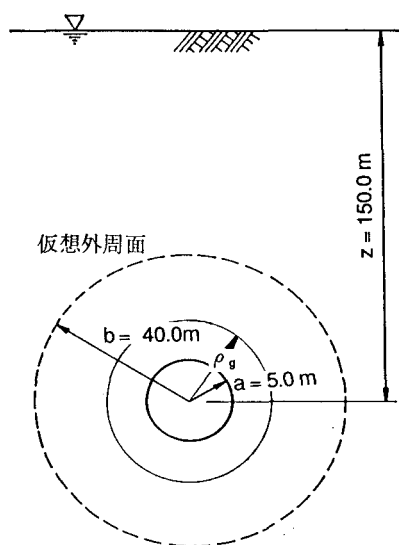


図-2 解析条件

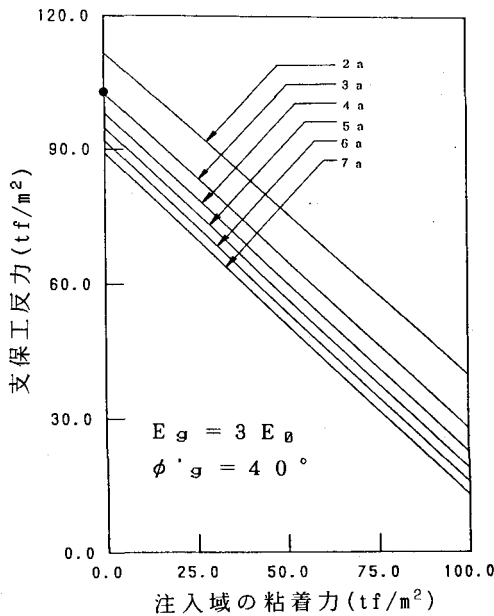


図-3 注入域の粘着力と支保工反力の関係

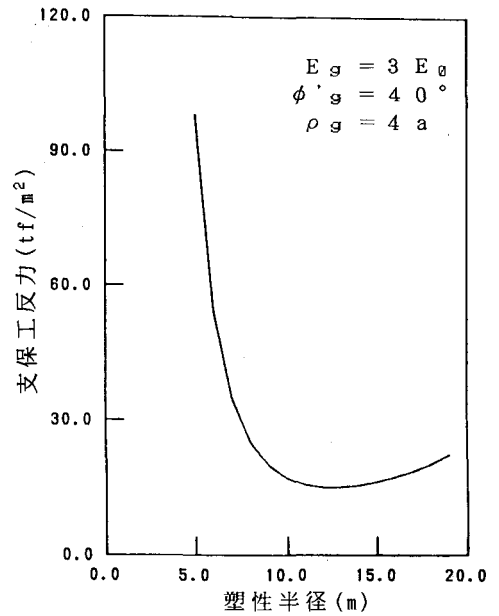


図-4 塑性半径と支保工反力の関係

#### 4. 解析結果と考察

図-3は、それぞれ表-1のもとで、塑性半径がトンネル半径と一致、すなわちトンネル壁面のみで降伏条件を満たすとして、注入による注入域の粘着力と支保工反力との関係を示した図である。これらの図から注入半径を大きくすれば、支保工反力は小さくなるが、注入半径が大きくなるにつれて、注入半径の増加による、支保工反力の減少の割合が小さくなっていくことがわかる。

また、注入による、注入域の粘着力の変化と支保工反力の関係であるが、注入半径が一定の時には、支保工反力は、粘着力に逆比例して減少していくことがわかる。

次に、図-4は塑性半径が注入域内に存在するという条件（表-2）のもとで支保工反力と塑性半径の関係を示している。この条件のもとでは、塑性半径がトンネル半径の2倍に等しいとするとときに支保工反力が最低になる。すなわち、最小の支保工反力でトンネルを掘削するためにはある程度の塑性半径を許すことが必要であることを示している。最後に、今後の課題は、実際のトンネル施工に適用できる応用範囲の広い問題を解析していくことである。

\*参考文献 1)足立紀尚・田村 武：土木学会論文報告集、第280号、1978、pp.87～98 2)赤井浩一：土質力学、朝倉書店、1966

表-1 解析条件

|                       |                      |             |                        |
|-----------------------|----------------------|-------------|------------------------|
| 注入域内側半径               | (m)                  | $\rho_{g1}$ | 5.0                    |
| 注入域外側半径               | (m)                  | $\rho_{g2}$ | 10, 15, 20, 25, 30, 35 |
| 注入域ヤング係数              | (tf/m <sup>2</sup> ) | $E_g$       | 45000                  |
| 注入域ポアソン比              |                      | $\nu_g$     | 0.25                   |
| 自然地山塑性ポテンシャルパラメーター(度) |                      | $\Psi$      | 0                      |
| 注入域粘着力                | (tf/m <sup>2</sup> ) | $c'_g$      | 0                      |
| 注入域内部摩擦角              | (度)                  | $\phi'_g$   | 40                     |
| 注入域塑性ポテンシャルパラメーター(度)  |                      | $\Psi_g$    | 0                      |
| 塑性半径                  | (m)                  | $\rho_0$    | 5.0                    |

表-2 解析条件

|                       |                      |             |       |
|-----------------------|----------------------|-------------|-------|
| 注入域内側半径               | (m)                  | $\rho_{g1}$ | 5.0   |
| 注入域外側半径               | (m)                  | $\rho_{g2}$ | 20.0  |
| 注入域ヤング係数              | (tf/m <sup>2</sup> ) | $E_g$       | 45000 |
| 注入域ポアソン比              |                      | $\nu_g$     | 0.25  |
| 自然地山塑性ポテンシャルパラメーター(度) |                      | $\Psi$      | 0     |
| 注入域粘着力                | (tf/m <sup>2</sup> ) | $c'_g$      | 0     |
| 注入域内部摩擦角              | (度)                  | $\phi'_g$   | 40    |
| 注入域塑性ポテンシャルパラメーター(度)  |                      | $\Psi_g$    | 0     |
| 塑性半径                  | (m)                  | $\rho_0$    | 10    |