

円孔周辺に発生する塑性領域に注目した地下浅所トンネルの安定性評価

鳥取大学 学生会員 ○小川 金時
 鳥取大学 フェロー 西村 強
 鳥取大学 正会員 河野 勝宣
 鳥取大学 学生会員 渡上 正洋

1. 緒言

地下鉄や道路のためのトンネル掘削は、地表面に近いすなわちトンネル天端から地表面までの距離がトンネル径の数倍程度の深さで行われるので、掘削に伴う変形が大きくなる時には周辺の構造物に悪影響が発生する。このような浅所のトンネル掘削に対して NATM 工法を適用する際には、地山の支保能力の評価は極めて慎重に進めざるを得ないと考えられる。地表面の存在を仮定したトンネル支保圧の評価に関する考え方として Terzaghi の緩み土圧があるが、この考え方は地表面まで達している破壊線上で生じているせん断抵抗力を地盤の発揮する支保能力としている。トンネル空洞部の応力解放に連動する周辺地盤内の応力再配分はモデル化されておらず、シールド工法あるいは開削工法に適した考え方と言える。この報告では、均質な地盤、等方応力状態を仮定した円形空洞周辺の弾塑性解に基づいて、空洞保持のための最小内空圧を求める式を示す。計算例を例示するとともに Terzaghi 式との比較も示す。

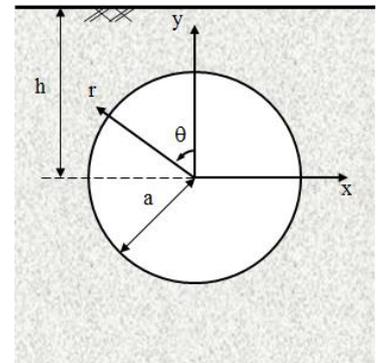


図-1 弾完全塑性体としての地盤のモデル化と円形空洞

2. 弾塑性解の誘導と最小内空圧の算出

図-1 に示す円孔壁面 (半径 a) に作用する内空圧 σ_{ra} の大小が空洞周辺の安定性に及ぼす影響を考える。均質な地盤、等方応力状態を仮定して、図-2 のような仮定を導入する。つまり、掘削前を $\sigma_{ra}=p_0(\gamma h)$ として、空洞掘削そして切羽の進行を σ_{ra} の減少で表現する。この減少に伴い、空洞周辺に塑性域 (円) が発生した状態を図-2 は表している。この図に示すように塑性円の半径 R が地表面とトンネル中心位置の距離 h と等しくなると、図-1 の地盤は極限状態にあると仮定する。この時の σ_{ra} を空洞保持のための最小内空圧として求める定式化である、 $\bar{\sigma}_{ra}/\gamma h > 0$ なる値が得られるならば、その値が最小内空圧、 $\bar{\sigma}_{ra}/\gamma h < 0$ なる値が得られるならば、無支保でも地盤は安定を保持するとの判定となる。以下に基礎式と誘導結果を示す。基礎式は、図-2 中の微小領域に関する応力のつり合い式となる。

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{(1-\zeta)\sigma_r - S_c}{r} = -\gamma \cos \theta \quad (1)$$

ここに、地盤はモール・クーロン降伏規準に従うとして c を粘着力成分、 ϕ をせん断抵抗角と表記して、 $\zeta=(1+\sin\phi)/(1-\sin\phi)$ 、 $S_c=2c\cos\phi/(1-\sin\phi)$ である。 $r=a$ で $\sigma_r=\sigma_{ra}$ 、 $a < r < R$ では降伏規準を満足する状態にあると仮定してとけば、 $\zeta > 1 (\phi > 0)$ に対して

$$\sigma_r = \left(\sigma_{ra} + \frac{S_c}{\zeta - 1} \right) \left(\frac{r}{a} \right)^{\zeta - 1} - \frac{S_c}{\zeta - 1} + \frac{\gamma a \cos \theta}{\zeta - 2} \left(\frac{r}{a} \right) \left\{ 1 - \left(\frac{r}{a} \right)^{\zeta - 2} \right\} \quad (2)$$

$r=R$ で $\sigma_r=\sigma_{rR}$ とすれば、次式のように書き換えることが可能となり、

$$\sigma_{ra} = \left(\sigma_{rR} + \frac{S_c}{\zeta - 1} \right) \left(\frac{h}{a} \right)^{1-\zeta} - \frac{S_c}{\zeta - 1} + \frac{\gamma a \cos \theta}{\zeta - 2} \left\{ 1 - \left(\frac{h}{a} \right)^{2-\zeta} \right\} \quad (3)$$

$\sigma_{\theta} + \sigma_{rR} = 2p_0$ 、 $\sigma_{\theta} = \zeta \sigma_{rR} + S_c$ の関係を利用し、さらに $R=h$ 、 $\theta=0^\circ$ として天端位置で最小内空圧として次式を得る。

$$\frac{\bar{\sigma}_{ra}}{\gamma h} = \frac{2}{\zeta + 1} \left(\frac{h}{a} \right)^{1-\zeta} + \frac{1}{\zeta - 2} \left(\frac{h}{a} \right)^{-1} \left\{ 1 - \left(\frac{h}{a} \right)^{2-\zeta} \right\} + \frac{2 \cos \phi}{1 - \sin \phi} \cdot \frac{1}{\zeta - 1} \left(\frac{h}{a} \right)^{-1} \left\{ \frac{2}{\zeta + 1} \left(\frac{h}{a} \right)^{1-\zeta} - 1 \right\} \frac{c}{\gamma a} \quad (4)$$

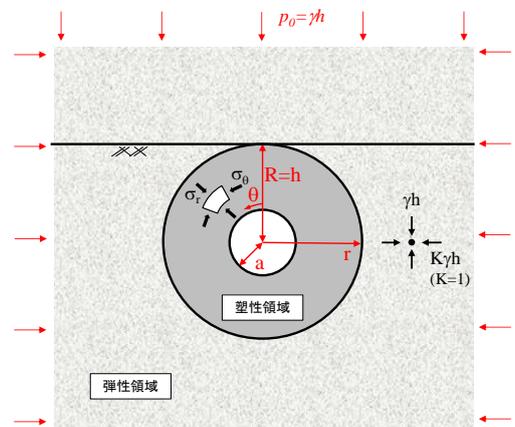


図-2 最小内空圧を求めるための塑性円と地表面の関係

キーワード 地下浅所トンネル, 極限平衡, Terzaghi の解

連絡先 〒680-8552 鳥取市湖山町南 4 丁目 101 鳥取大学

TEL0857-31-5297

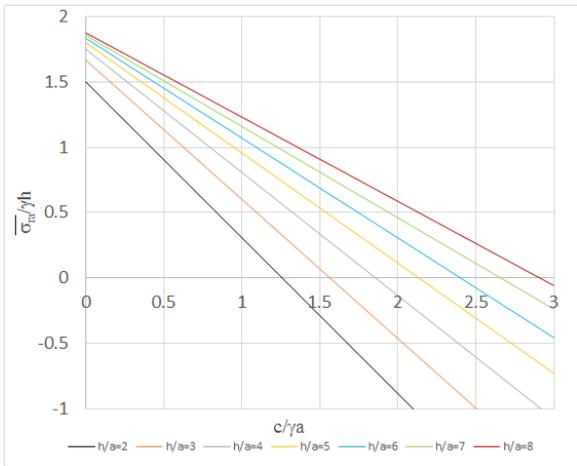


図-3 φ=0° 地盤における最小内空圧

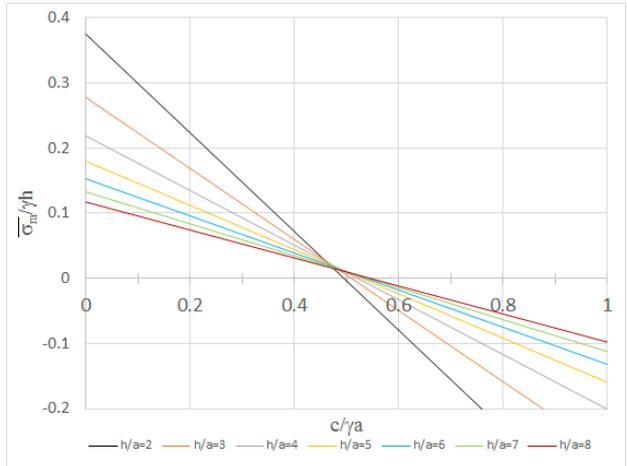


図-4 φ=30° 地盤における最小内空圧

同様にすれば、 $\zeta=1(\phi=0^\circ)$ に対しては下記のように表すことができる。

$$\frac{\bar{\sigma}_{ra}}{\gamma h} = \left(2 - \left(\frac{h}{a} \right)^{-1} \right) - \frac{c}{\gamma a} \left[\left(\frac{h}{a} \right)^{-1} + 2 \left(\frac{h}{a} \right)^{-1} \ln \left(\frac{h}{a} \right) \right] \quad (5)$$

3. 最小内空圧の計算例

図-3 に $\phi=0^\circ$ の計算例を示す。この図より、 h/a が一定のとき、 c の増大とともに最小支保圧が減少することがわかる。前述したとおり、 $\bar{\sigma}_{ra}/\gamma h < 0$ では、無支保でも空洞は保持されていることを示す結果である。 c を一定として、 h/a を増加させるつまりトンネル中心位置深さを大きくするとき、 $\bar{\sigma}_{ra}/\gamma h$ が大きくなる、言い換えると空洞保持のために必要となる内空圧が大きくなり、地山の支保力が小さくなることになる。これは、 h の増大とともに地盤内応力は大きくなるのに対して、 $\phi=0^\circ$ の仮定により地盤の強度は粘着力 c (一定) であるためである。図-4 に、 $\phi=30^\circ$ の例を示す。図-3 とは異なり、 h/a を増加させるとき、 $\bar{\sigma}_{ra}/\gamma h$ は小さくなっている。図-6 に、 $h/a=2.0$ 、 $\phi=30^\circ$ として Terzaghi 式との比較を示す。

$$\sigma_v = \frac{B_1(\gamma - c/B_1)}{K_0 \tan \phi} \cdot (1 - e^{-K_0 \tan \phi \cdot H/B_1}) + p_0 \cdot e^{-K_0 \tan \phi \cdot H/B_1} \quad (6)$$

γ は単位体積重量、 c は粘着力、 $\phi (\neq 0)$ は内部摩擦角、 H は土被り厚、 K_0 は水平土圧と鉛直土圧の比(本例では 1.0)とする。また、 B_1 : 緩み幅は式(7)を用いて求める。

$$B_1 = R_0 \cdot \cot \left(\frac{\pi/4 + \phi/2}{2} \right) \quad (7)$$

この図より、2 に記載した算定式による最小内空圧は、Terzaghi 式が与えるそれより小さいことがわかる。このことは、地山の支保能力を活用した結果の言えるかもしれない。本文に記載した算定式は、均質地盤、等方応力状態の仮定に加えて、塑性領域の形状を円としている。このように塑性域が進展するためには、式(1)で示されるように σ_{ra} は周方向に一定ではないという仮定も含んでいる。今後、有限要素解析をはじめとする数値解析を実施して、図-3、4 の結果を吟味する必要がある。

参考文献：1) 土木学会，トンネル標準示方書 シールド工法編 pp52-54,2016

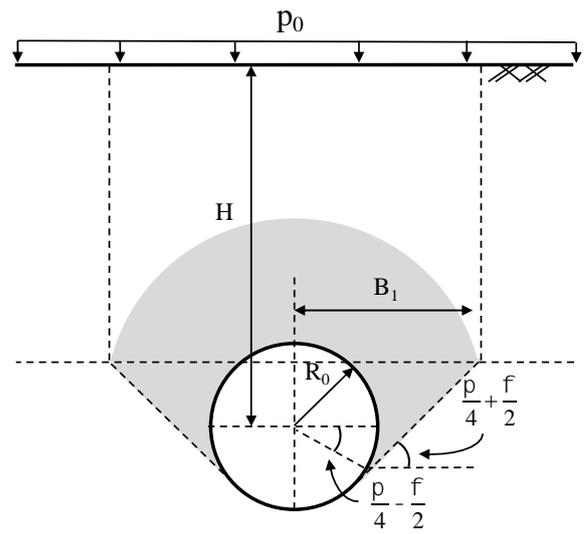


図-5 Terzaghi の緩み土圧¹⁾

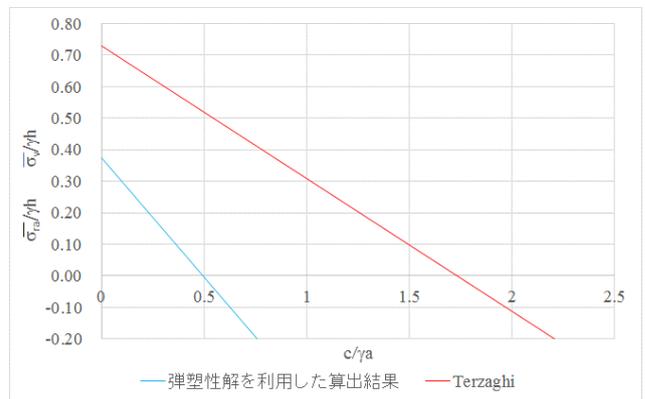


図-6 Terzaghi 式との比較