

円孔周辺の弾塑性応力解に基づく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 川畑 伸二

1. 緒言

都市部などで NATM 工法を用いて土被りの小さいトンネル掘削を行う際には、掘削に伴う地盤の変形が周辺の構造物に悪影響を及ぼさないように、地盤の耐力を評価するとともに支保の設置をしなければならない。そこで、空洞保持に必要な最小内空圧を算出し地盤の安定性評価法の提案をしている。図-1 をもとに、等方応力状態での最小内空圧式誘導については既に示している。本報告では、図-2 に示すように地表面の存在を考慮した式誘導を行い、さらに有限要素解析との比較を試みている。

2. 弾塑性解を利用した最小内空圧の算出式

図-1 は均質・等方応力状態を仮定した地盤に円形トンネル(半径 a)を設置した状態を表している。この図より、内空圧 σ_{ra} が初期値 σ_{ra}^0 から低減することによってトンネル掘削を2次元解析として表現する。この低減に伴い、円形の塑性域(半径 R)が進展して、その半径 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、地盤が極限状態に達したと仮定するものである。この時の空洞保持に必要な内空圧 $\bar{\sigma}_{ra}$ を算出する。図-1 の微小領域の応力のつり合いより、式(1)が求まる。

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

ここに、地盤は、モール・クーロンの破壊規準に従うものとして、 c を粘着力成分、 ϕ をせん断抵抗角と表記すれば、 $\zeta = (1 + \sin\phi)/(1 - \sin\phi)$ 、 $S_c = 2c \cos\phi/(1 - \sin\phi)$ である。塑性円内では、 σ_θ : 最大主応力、 σ_r : 最小主応力であり、降伏規準は $\sigma_\theta = \zeta\sigma_r + S_c$ となる。 $\phi \neq 0$ 、 $\sigma_\theta + \sigma_r = 2p_0$ に加えて、 $r = R$ で $\sigma_r = \sigma_{rR}$ 、 $r = a$ で $\sigma_r = \sigma_{ra}$ の境界条件下で式(1)を解いたのちに、 $\theta = 0$ とすれば式(2)が得られる。以上が、既報¹⁾における概略である。

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

図-2 は地表面下 h に中心を有する円形空洞(半径 a)の周囲に塑性域が図-1 と同じく円形に生じると仮定したものである。これは、式(1)を基本として内空圧式を誘導するという考えに基づいている。地表面荷重を p_s とすれば、塑性円外では $\sigma_y = -\gamma(y-h) + p_s$ 、 $\sigma_x = K\sigma_y$ (ここに K は側圧係数、ここでは $K=1$) である。なお、この図では地表面荷重 $p_s=0$ として記載している。式(1)で $\theta=0$ とすれば、

$$\frac{d\sigma_r}{dr} - \frac{(1-\zeta)\sigma_r - S_c}{r} = -\gamma \quad (3)$$

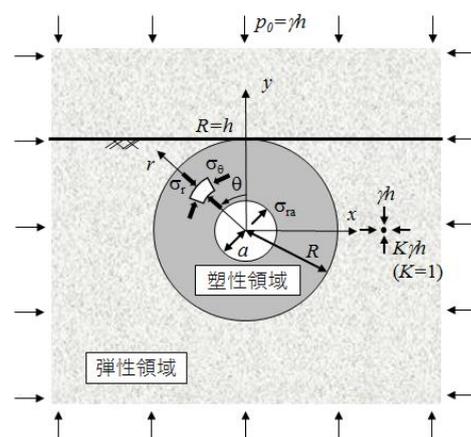


図-1 円形空洞周辺に発生した塑性領域(等方応力状態)

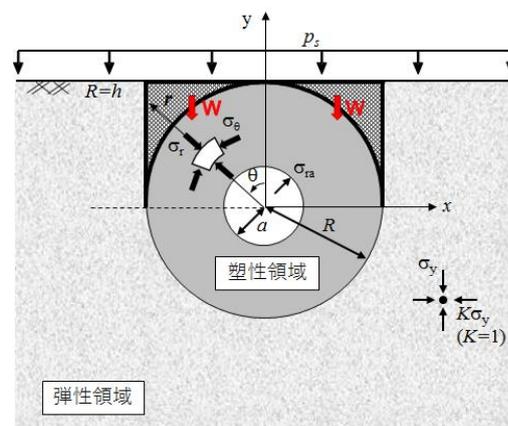


図-2 地表面の存在を考慮したモデル

これに、 $y=h$ で $\sigma_r = \sigma_y = p_0$, $y=a$ で $\sigma_r = \sigma_{ra}$ として式(4)が求まる。

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

さらに、図-2の太線部で示す塑性円上部の領域の自重Wも内空圧式に考慮すれば次式となる。

$$\frac{\sigma_{ra}}{\gamma h} = \frac{2c \cos \phi}{1 - \sin \phi} \cdot \frac{1}{\zeta - 1} \left(\frac{h}{a}\right)^{-1} \cdot \frac{c}{\gamma a} \left\{ \left(\frac{h}{a}\right)^{1-\zeta} - 1 \right\} + \frac{1}{\zeta - 2} \left(\frac{h}{a}\right)^{-1} \left\{ 1 - \left(\frac{h}{a}\right)^{2-\zeta} \right\} + \frac{p_s}{\gamma h} \cdot \left(\frac{h}{a}\right)^{1-\zeta} + \frac{W}{2a\pi/4 \cdot \gamma h} \quad (5)$$

3. 最小内空圧式結果と有限要素解析結果の比較

図-3に有限要素解析モデル ($a=5m$) を示す。地盤特性として、ヤング率 $E=500MPa$, ポアソン比 $\nu=0.49$, $\gamma=24kN/m^3$, $\phi=30^\circ$ を与えた。有限要素解析では、自重のみの荷重条件のもと初期応力状態を求めたのちに図に示す斜線部内の応力を段階的に解放する。解放開始前(初期応力状態にある地盤)の内空圧を σ_{ra}^0 と表記すると、 $\lambda = \sigma_{ra} / \sigma_{ra}^0$ が応力解放を表す指標となる。 λ を段階的に小さくするとき、空洞周辺地盤の静的釣り合い状態を与える λ の最小値を、2に記載した式による結果と比較する。図-4は $h/a=2$, 図-5は $h/a=3$ の結果を示す。これらの図では、下矢印(↓)を記載して応力解放率 $(1-\lambda) \times 100(\%)$ の値を示しているが、これは $\Delta\lambda = 0.01$ として探査した結果である。この結果より、式(2)に比べて式(4)(5)の方が有限要素解析結果に近い値を示していることがわかる。図-4では、 $c/\gamma a$ が 0.1以下・0.7以上の時、0.2~0.4の時に比べて有限要素解析結果との差が大きくなった。しかし、図-5では異なる傾向がみられた。このことより、内空圧式を取り扱う際には深さの変化に注意する必要があると考える。図-6は、有限要素解析で得られた主応力図ならびに破壊限接近度を表現している。破壊域接近度は式(6)より算出している。

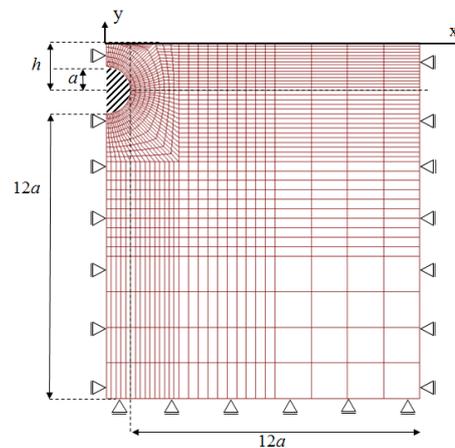


図-3 有限要素解析モデル

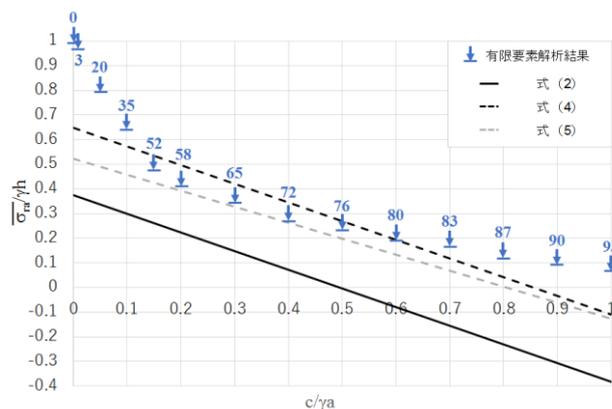


図-4 最小内空圧式と有限要素解析の比較 ($h/a=2, \phi=30^\circ$)

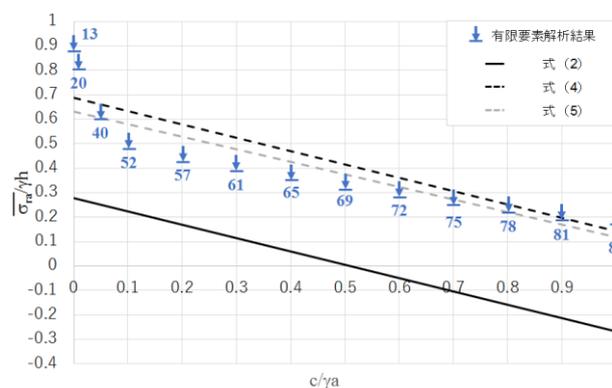


図-5 最小内空圧式と有限要素解析の比較 ($h/a=3, \phi=30^\circ$)

$$FS = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3) + (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \phi}{2c \cos \phi} \quad (6)$$

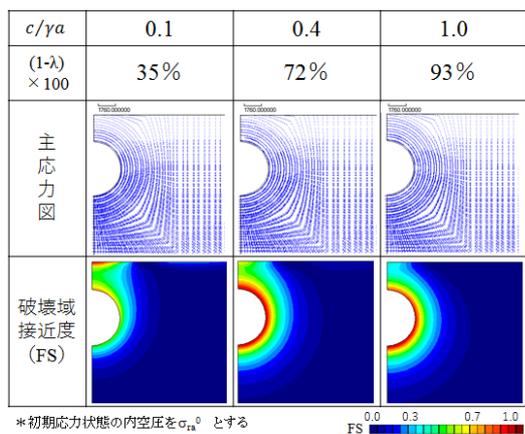


図-6 有限要素解析結果 ($h/a=2$)

参考文献

- 1) 西村強他：円孔周辺の弾塑性応力解に基づく浅所トンネルの安定性評価に関する研究，第47回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，pp.282~286，2020