弾塑性解を利用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

地表面に近い位置で地下鉄や道路のためのトンネル掘削を行う. 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うとき,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.特に NATM 工法を採用する 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. 既に,均質地盤,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, 空洞保持ための最小内空圧を求める式を示している¹⁾. この定式化は多くの仮定 を含んでいるため,有限要素解析との比較を実施するなどの吟味が必要である.



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. 弾塑性解を利用した最小内空圧の算出式

図-1 に示す円孔壁面(半径 *a*)に作用する内空圧 σ_{ra} の大小が空洞周辺安定性に及ぼす影響を考える.均質地盤, 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 $\sigma_{ra}=p_0(\gamma h)$ (γ は単位体積重量)として、 空洞掘削そして切羽の進行を σ_{ra} の低減で表現する.この低減に伴い、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*と等しくなるとき、 図-1 の地盤は極限状態にあると仮定する.この時の σ_{ra} を空洞保持ための最小内空圧として求める定式化である. $\overline{\sigma_{ra}}/h>0$ なる値が得られるならば、その値が最小内空圧、一方、 $\overline{\sigma_{ra}}/h<0$ 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.なお、「最小」という記述には、理想化した条件下で与えられる内空圧であり、 地盤の不均質性や逐次破壊を考慮すれば空洞保持に必要となる内空圧は算出を上回る、という意味を含めている. 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.

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

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、 $\zeta>1(\phi>0)$ に対して、



キーワード 地下浅所トンネル,極限平衡解析,円形空洞,支保圧 © Jap連絡苑etyp680%85522ne9条取市湖山町南4丁目101 鳥取犬学⁸⁹ TEL0857-31-5297

3. 最小内空圧の算出結果と FEM 解析の比較

図-3 に #= 30°の 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、 $\overline{\sigma_{rg}}/ph < 0$ 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, $\overline{\sigma_{ro}}/ph$ が小さくなることが示されている. 一方, $\phi=0$ とすれば、これとは逆に $\overline{\sigma_{ra}}/\mu$ は大きくなる. それ 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、 $\phi=0$ の仮定により地盤の強度は粘着力c: -定、によ る¹⁾. 図-4 に有限要素解析モデルを示す. この例は, h/a=2 とするものであり、地盤の特性として、ヤング率 *E*=500MPa, ポアソン比*v*=0.45, *y*=24kN/m³, *φ*=30° を与え る. 図-2 は土被り圧 h を無限遠方で作用する応力として 取り扱っているが、式(1)右辺に示すように塑性領域内では 自重項を物体力として考慮することになる.この仮定を有 限要素解析に導入することは困難であったので、Case 1: 自重項を考慮し、かつ、地表面 y=h で-y 方向(鉛直下向き) の荷重かを作用させる例, Case 2:自重項を考慮するが, 地表面荷重は0とする例, Case3: 自重項を考慮しないが, 地表面荷重かを作用させる例,の3例を設定した.解析で は,所定の荷重条件下で初期応力状態を求めた後,円孔部 の応力を解放する、すなわち円孔表面の σ_m を小さくするも のである. 解放前の $\sigma_{ra} \epsilon \sigma_{ra}^*$ と書けば、 $1 - \sigma_{ra} / \sigma_{ra}^*$ が応力解 放率となる. なお, 自重を考慮する場合, 円孔表面周方向 にσ_{ra}は一定とはならない.図-5 に c/ya=0.3, 0.8 の条件に 対する解析結果を示す.この図では、 σ_m の解放に対して、 静的つり合い状態が得られた時は(○),得られないとき は(¥)を記入している. Case 1,2,3 ともに, c/ya=0.3 に おいて $\overline{\sigma_{ra}}$ /h線上では、静的つり合い状態が得られないこ とになる.この結果から、ここに示した $\overline{\sigma_{ra}}$ /h-c/ γa 関係 は、最小内空圧の見積を与えており、逐次破壊さらに地盤 の不均質性を想定すれば,空洞安定保持にはこれより大き い内空圧 (支保圧) が必要である, と言える. 逆に, 1-org/nh が、地山の支保能力として期待できる領域を表していると 解釈できる. c/ya=0.8 において, σ_{ra}=0 で静的安定状態が 得られる計算例(Case 2)は、無支保状態でも空洞は保持さ れていることを示している.



図-3 φ≠0 地盤における最小内空圧 (φ=30°)



図-4 有限要素解析モデル



4. まとめ

本報告では、均質地盤、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、空洞保持ために必要な最 小内空圧を求める式を示した.これによる算出結果に対しては、有限要素解析結果等を参照した評価が必要である が、地山の支保能力の評価の一助になればと考えている.

参考文献:1) 小川金時他, 土木学会中国支部 2019 年度研究発表会(投稿中).