

地山応力状態の異方性を考慮した地下空洞の安定性評価と適用

長崎大学工学部 正会員 蔣 宇静 フェロー 棚橋 由彦
清水建設(株)技術研究所 正会員 熊坂 博夫
長崎大学工学部 学生員○本末 大造

1、はじめに

地下空洞周囲の地山岩盤の弾塑性挙動を力学的に論じることにおいて、静水圧状態だけでなく、非静水圧状態も考慮する必要があるため^{1),2)}、本研究はその解析法を提案し、地山応力状態と地下空洞の安定性との関係を理論的に明らかにするとともに、実現場への適用を目指すことを目的とする。

2、解析モデルの定義

本研究では、岩の破壊後のひずみ軟化挙動とダイレタンシーを考慮した力学的モデルを用いて、円形トンネル(半径 $r=a$)周辺の弾塑性解析を行った。

初期地山応力は図-1のように、無限遠から x 軸方向に $(P_0 - S_0)$ 、 y 軸方向に $(P_0 + S_0)$ が作用しているとする(応力は圧縮を正とする)。岩盤の自重はここで無視する。 P_0 は静水圧に相当する部分、 S_0 は初期応力の偏差部分である。地山岩盤は、線形 Mohl-Coulomb の降伏規準式に従う均質等方性体と仮定する。応力状態が弾性限度を超えると、降伏した周囲岩盤はひずみ軟化領域($(R_e - R_f)$)、または、塑性流動領域が生じていない場合は $(R_e - a)$ 、塑性流動領域($R_f - a$)を生じる。塑性領域 $(R_e - a)$ は、壁面的一部分にしる(図-2a)、空洞の全周を取り巻くにしる(図-2b)、空洞内空壁面を内境界面にした閉合的領域 $\bar{S}$ とする。

なお、トンネル中心からトンネル周辺に生じた塑性領域と地山岩盤の弾性領域との境界までの長さ(すなわち、弾塑性境界までの長さ)を R_e と、またひずみ軟化領域と塑性流動領域との境界までの長さを R_f と表す。

3、初期地山応力経路による周辺岩盤の弾塑性挙動評価

二軸応力状態において、空洞周囲の力学的挙動は初期地山応力経路に支配される。初期地山応力経路とは、空洞周囲の塑性破壊モードを定義するのに規定される初期地山応力場の変化範囲を指す。ここで、 σ_c は地山岩盤の一軸圧縮強度を表す。図-3において、 oi 線は側圧係数 $k=0$ (一軸圧縮状態)、 ij 線は未掘削状態で地山が塑性化される限界線、 ok 線は空洞壁面に引張り応力が生じる境界線を表す。 nl 線は塑性領域の形が変わる境界線で、線より上にあると水平軸より $\pm 45^\circ$ に進展、または非閉合的領域を生じ、下にあると閉合的領域になる。本研究は、 nl 線以下の領域を対象とする。

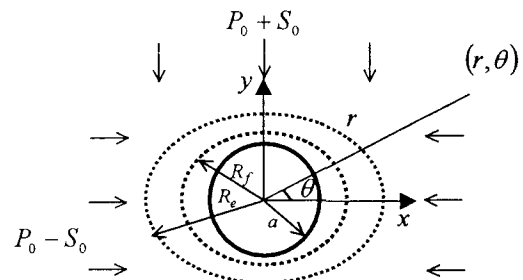


図-1 非静水圧モデル

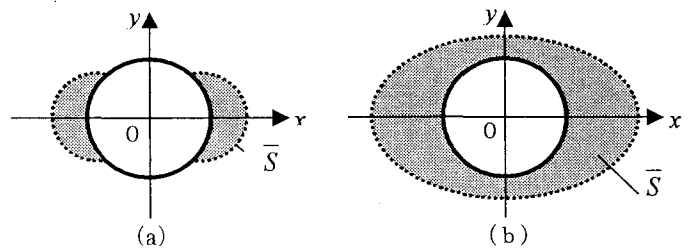


図-2 閉合的塑性領域

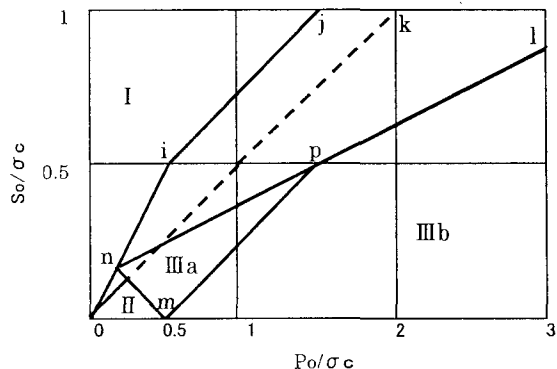


図-3 初期地山応力の載荷経路($\phi = 30^\circ$ の場合)

領域Ⅰは地山岩盤が塑性化される領域、領域Ⅱは無支保空洞が自立できる領域、周辺岩盤に塑性領域が発生して、領域Ⅲaは壁面に部分的せん断破壊、領域Ⅲbは壁面全周にせん断破壊が生じると予測される。空洞周りのせん断破壊は、壁面応力の単調減少によって起こる初期応力載荷経路が領域Ⅲaおよび領域Ⅲbに帰する。内部摩擦角 ϕ が小さいほど、nl線の直線の傾きが高くなるため、塑性破壊を生じさせる地山応力経路の範囲が相対的に広がっていくと考えられる。

4. 解析例

本研究では、 R_e と R_f を表す式を誘導した¹⁾。その式を用いて空洞周辺に生じた各塑性領域までの長さを $\theta = 0^\circ \sim 90^\circ$ について算出し、 R_e と空洞壁面に囲まれた面積(塑性領域面積)と、 R_f と空洞壁面に囲まれた面積(塑性流動領域面積)を求めた。解析例の対象とした岩盤の物性値は σ_c で無次元化しており、ヤング率の比 $E/\sigma_c = 500$ 、ポアソン比 $\mu = 0.3$ 、 $\phi = 30^\circ$ 、ひずみ軟化領域の塑性ポアソン比 $h = 2.5$ 、接線方向の塑性流動領域までのひずみとひずみ軟化領域までの比 $\alpha = 1.7$ 、残留強度とピーク強度との比 $D = 0.5$ の等方体とする。

図-4はトンネルの断面積で無次元化した塑性領域面積 $\bar{S}_e$ および塑性流動領域面積 $\bar{S}_f$ と載荷経路との関係を領域Ⅲbにおいて表したものである。図-4(a)から分かるように、 P_0/σ_c が一定の条件下では、 $\bar{S}_e$ と $\bar{S}_f$ には関係せず、静水圧状態($S_0 = 0$)の場合に発生する塑性面積とほぼ同一の値となる。このことより、領域Ⅲbにおいての塑性半径の平均値は、静水圧状態の場合の塑性半径に近似しているということが分かる。また図-4(b)より、 S_0/σ_c が一定の条件下では P_0/σ_c の増加に比例して両塑性面積は増加することが分かる。

図-5は、図-4(a)と同じ条件下で、誘導した内空変位 U の式を用いて算出した変位を空洞半径で無次元化した値と岩盤周辺に発生した塑性領域を無次元化した値との関係を表す。

図-5から、領域Ⅲbにおいて、 P_0/σ_c が一定の場合、空洞内部に生じる半径方向の変位 U と空洞周辺の地山岩盤に生じる塑性領域の半径方向長さ($R_e - a$)には比例の関係がある。このことは、空洞周辺の地山岩盤に生じる塑性流動領域の半径方向長さ($R_f - a$)においても当てはまる。

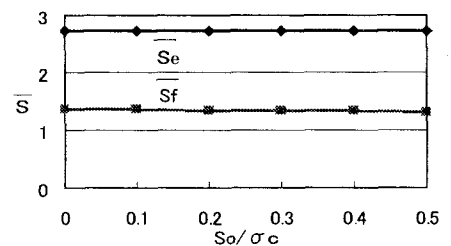
5. おわりに

本研究によって以下のことが明らかになった。

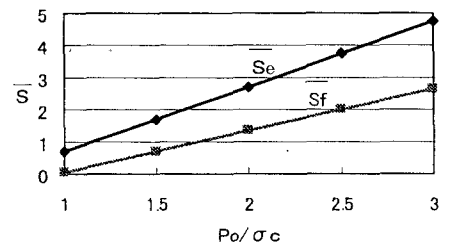
- (1) 空洞周辺に生じる塑性領域の面積は初期応力の偏差部分に依存せず、静水圧部分に比例する。
- (2) P_0/σ_c が一定で S_0/σ_c を変化させても、つまり側圧係数を変化させても、空洞壁面に生じる半径方向変位は、塑性領域と塑性流動領域の半径方向長さに比例し、その平均値は静水圧状態の場合とほぼ同じである。

参考文献

- (1) 江崎哲郎・蔭 宇静・相川 明 (1993): ひずみ軟化特性およびダイラテンシー特性を考慮した非静水圧状態における空洞周りの岩盤挙動の解析法、土木学会論文集、No.481/Ⅲ-25、pp.41-48。
- (2) Detournay, E., Fairhurst, C. (1987): Two-dimensional Elasto-Plastic Analysis of a Long, Cylindrical Cavity Under Non-hydrostatic Loading, Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech. Abstr. Vol.24, No.4, pp.197-211。



(a) $P_0/\sigma_c = 2.0$



(b) $S_0/\sigma_c = 0.25$

図-4 塑性領域の面積と載荷経路との関係

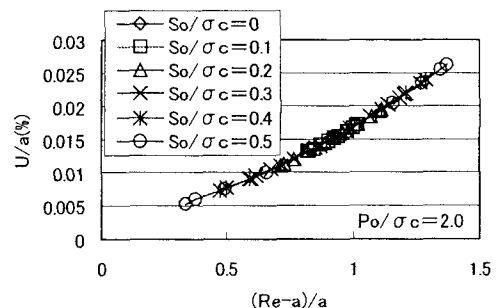


図-5 塑性領域と変位との関係