

III-B 174

体積力法を用いた地下空洞周り応力集中と安定性の評価

長崎大学工学部 正会員 棚橋由彦
長崎大学工学部 才本明秀

長崎大学工学部 学生員○熊川貴伯
九州大学工学部 正会員 江崎哲郎

1. はじめに

地下における浅所空洞と大深度空洞では、初期応力が大きく異なり、その崩壊メカニズムと安定性の評価も自ずと異なったものとなる。ここでは浅所空洞に注目し、応力解析の分野で有力な数値解析法とされている体積力法を用いて、浅所地下空洞周りの応力集中度の評価と安定性の評価を行う。

2. 解析方法

今回解くべき問題である重力影響下での円孔縁及びその周辺の応力分布(図-1(a))は、体積力法の考えを用いれば、図-1(b), (c), (d)の3つの和として解くことができる。図-1(b)では、円孔が存在しない半無限体において、円孔縁上の各点に生じる自重を考慮した応力成分 σ_r^0 , σ_θ^0 , $\tau_{r\theta}^0$ (理論式は(1))を求める。次に図-1(c)では、無限体内の仮想円孔上に適切な大きさの体積力(ρ_x^0 , ρ_y^0)を作用させることによって、図-

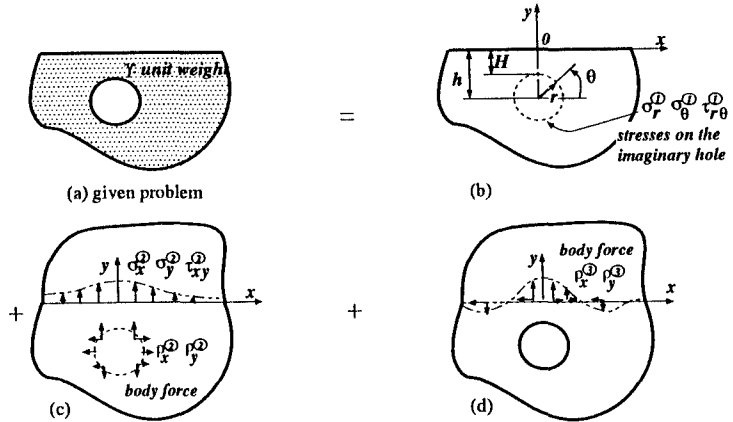


図-1 解くべき問題(重力影響下での円孔縁及びその周辺の応力分布)

図-1(b)と図-1(c)の和における仮想円孔縁が応力自由となるように体積力の大きさを決定すればよい。この時、x軸上(地表面)には、新たに応力成分 σ_x^0 , σ_y^0 , τ_{xy}^0 が生じる。x軸上の応力分布を円孔縁の境界条件が変化しないように除去することにより(図-1(d))、最終的な解が得られる。すなわち、図-1(c)では無限体内の一点に作用する集中力による応力分布を図-1(d)では応力自由な円孔を有する無限体内の一点に作用する集中力による応力分布をそれぞれの基本解とした体積力法を用いた。

(式(1)中の記号は図-1(b)参照、静止土圧係数: $K_0 = \nu / (1 - \nu)$)

地下空間断面は円形とし、地盤は等方弾性体と仮定し、重力のみを考慮する。円形空洞であるので、軸対称問題として解くことができる。なお、破壊規準はモール・クーロン則(図-2参照)に従うものとする。解析条件は次の通りである。

空洞半径: $r = 2.5, 4, 5\text{m}$ 空洞深さ: $H = 3, 5, 8, 10\text{m}$ 粘着力: $c = 0, 0.5, 1\text{kgf/cm}^2$
内部摩擦角: $\phi = 10 \sim 40^\circ$ (10, 20, 30, 40°) 弾性係数: $E = 1.0 \times 10^4\text{kgf/cm}^2$ ポアソン比: $\nu = 0.3$
単位体積重量: $\gamma = 2.5 \times 10^{-3}\text{kgf/cm}^3$

4. 解析結果に対する評価方法

4.1 応力集中度

応力集中度とは、地盤内に削孔する前と後での円孔縁での接線応力 σ_θ の比である。応力集中度 R (式(2))を以下の様に定義し、円孔縁での応力集中度の評価を行う。

$$R = \frac{\sigma_\theta^*}{\sigma_\theta^0} \quad (2) \quad \begin{array}{l} R > 1: \text{応力集中} \\ 0 < R < 1: \text{応力解放} \\ R < 0: \text{引張応力発生} \end{array} \quad \begin{array}{l} \sigma_\theta^*: \text{円孔有りの円孔縁応力} \\ \sigma_\theta^0: \text{円孔無しの仮想円孔縁応力} \end{array}$$

4. 2 節点安全率

円孔縁及びその周辺の応力分布についてモール・クーロンの破壊規準を用いて評価を行う。評価には、図-2より導かれた式(3)を用いる。 $F(F>1$:非破壊, $F\leq 1$:破壊)は節点安全率と定義する。

$$F = \frac{CD}{CT} = \left(c \cos \phi + \frac{\sigma_r + \sigma_\theta}{2} \sin \phi \right) / \sqrt{\left(\frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{2} \right)^2 + \tau_{r\theta}^2} \quad (3)$$

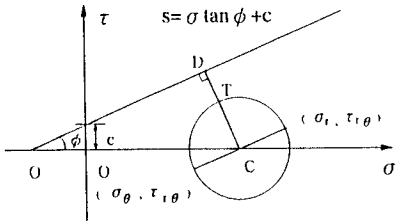


図-2 モール・クーロンの破壊規準

5. 解析結果及び考察

5. 1 応力集中度

空洞半径 r と空洞深さ H の組み合わせ12ケースについて解析を行った。解析結果の一例として、 $(r, H) = (5, 3)$ の応力集中度を図-3に示す。実線で描かれた円は、応力集中度 $R=1$ の値を表し、点線で描かれた円は、外側から $R=3, 2, 0, -1, -2$ の値を表す。 $R=0$ の円の外側が圧縮応力とし、内側が引張応力としている。解析結果より、空洞天端では、浅所空洞(r/H が大きい)程大きな引張応力($R \approx -0.5 \sim -3.0$)が発生し、深部空洞(r/H が小さい)程圧縮応力($R \approx 0.2 \sim 0.6$)へと変化する。空洞側方部(平均して $\theta = 67.5^\circ \sim 67.5^\circ$)では、圧縮応力による「応力集中」となる。全ケースを通じ応力集中度が最大($R \approx 2.5 \sim 3.4$)となるのは、 $\theta = 2.5^\circ \sim 42.5^\circ$ の範囲である。空洞底部では、全ケースで「応力解放」($R \approx 0.3 \sim 0.5$)となる。

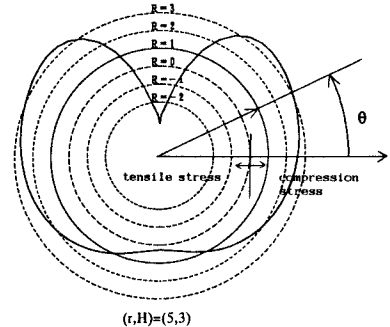


図-3 応力集中度解析結果

5. 2 節点安全率

解析結果の一例として、 $(r, H) = (5, 3)$ で $(c, \phi) = (5 \text{ tf/m}^2, 30^\circ)$ の節点安全率を図-4に示す。図-4の同心円は、空洞半径 r を1.0mずつ増分させたものであり、地表面に到達するまで同心円を考える。図-4に示す角度 θ と同心円群の交点における節点安全率を求めた。図中の○, ×は、それぞれ非破壊と破壊を意味する。図中の r は空洞半径であり、 ρ/r は壁面奥行の尺度であり $\rho/r=1$ で円孔縁を表す。空洞半径 r , 空洞深さ H , 粘着力 c と内部摩擦角 ϕ の組み合わせ144ケースについて解析を行った。

(1) c, ϕ を固定し r/H を変化させた場合 $(c, \phi) = (5, 30)$ を例にとると、 r/H が大きい(浅所空洞)とき破壊領域は $\theta = -42.5^\circ \sim 90^\circ$ で、天端応力は引張応力となり引張亀裂は地表面まで達する。 r/H が小さい(深部空洞)とき、破壊領域が収縮し、天端応力は圧縮応力($0 < R < 1$:応力解放)となるので、天端は安定する。なお破壊領域は側壁部 $\theta = \pm 42.5^\circ$ 水平面に対称な蝶々型の破壊領域を形成する。

(2) r/H を固定し c を変化させた場合 $(r, H) = (5, 3)$ を例にとると $\phi = 30^\circ$ においては、 $c=0$ のとき、破壊領域は円孔深部($\rho/r=8/5$)まで到達する。 $c=5 \text{ tf/m}^2$ の時破壊領域は、 $\theta = -42.5^\circ \sim 90^\circ$ 、 $\rho/r=1 \sim 7/5$ であるが、天端での引張亀裂は地表面に達する。 $c=10 \text{ tf/m}^2$ では、破壊は円孔側壁($\rho/r=1$)に限定される。

(3) r/H を固定し ϕ を変化させた場合 $(r, H) = (5, 3)$ を例にとると、 $\phi = 10^\circ, 20^\circ$ の破壊領域は、 $\theta = -67.5^\circ \sim 90^\circ$ の広範囲に亘っている。 $\phi = 10^\circ$ では、特に $\theta = -67.5^\circ \sim 2.5^\circ$ において $\rho/r=8/5$ まで破壊している。 $\phi = 20^\circ$ の $\theta = -42.5^\circ$ では $\rho/r=8/5$ まで破壊する。 $\phi = 30^\circ$ の破壊領域は $\theta = -42.5^\circ \sim 90^\circ$ 、 $\rho/r=1 \sim 7/5$ と縮小する。 $\phi = 10^\circ \sim 30^\circ$ のいずれもが天端での引張亀裂が地表面に達する。 $\phi = 40^\circ$ の破壊領域は、 $\theta = 67.5^\circ$ ($\rho/r=7/5$ まで)以外は円孔縁($\rho/r=1$)で破壊は収る。

6. まとめ

今回は、単一円孔の数値計算のみに終始したが、今後、断面形状(楕円, 矩形等)が異なる場合、双設空洞の応力干渉の影響や支保工の効果などを体積力法を用いて評価するとともに、他の数値解析手法(FLAC, FEM)との比較・検討が必要である。

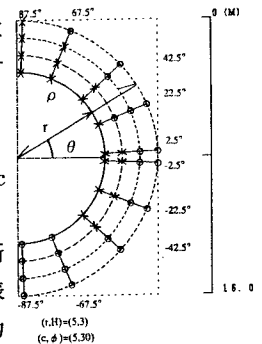


図-4 節点安全率解析結果