# 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　学生員○熊川貴伯　　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　　九州大学工学部　正会員　江崎哲郎

## 1．はじめに

本研究は、応力解析の分野で有力な数値解析とされている体積力法を用いて、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。また本研究は九州大学との共同研究であり、異なった数値解析手法(体積力法, FLAC, FEM)を用いて、比較・検討を行うのも主目的の一つである。

## 2．解析方法

### 2．1　体積力法[1]

数値解析の方法としては、これまで、差分法、有限要素法などが多く利用されてきた。その中で、差分法と有限要素法は、極めて有効な解析手法であるが、両者ともに領域型解析手法であるため、必要な入力データが膨大になる。それと比較して、境界型解析手法である境界要素法では、必要な入力データはかなり少なくて済む。一方、西谷[2,3]は1967年、集中力の解の重ね合わせによって弾性問題を解析する独自な方法を開発した。それは体積力法と呼ばれ、切欠きの応力集中とき裂の応力拡大係数の解析に多く応用され、高精度な解析手法として発展してきた。体積力法の基本的な考え方は、閉じた形で得られた特別な解を用い、重ね合わせの原理に基づいて、解析しようとする問題の解を表現するものである。

### 2．2　解析方法

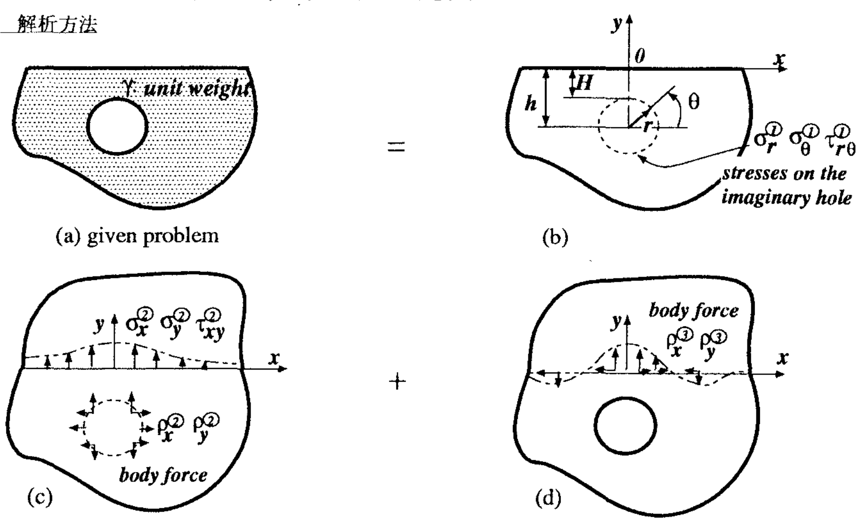


図-1　解くべき問題(重力影響下での円孔縁及びその周辺の応力分布)

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$\sigma_r^{①}$, $\sigma_\theta^{①}$, $\tau_{r\theta}^{①}$(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当な大きさの体積力($\rho_x^{②}$, $\rho_y^{②}$)を作用させることによって、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$\sigma_x^{②}$, $\sigma_y^{②}$, $\tau_{xy}^{②}$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。

$$
\begin{cases}
\sigma_r^{①}=\gamma(-h+r\sin\theta)\cdot(\sin^2\theta+K_0\cos^2\theta) \\
\sigma_\theta^{①}=\gamma(-h+r\sin\theta)\cdot(\cos^2\theta+K_0\sin^2\theta) \qquad (1) \\
\tau_{r\theta}^{①}=\gamma(-h+r\sin\theta)\cdot(1-K_0)\sin\theta\cos\theta
\end{cases}
$$

（静止土圧係数：$K_0=\nu/1-\nu$）

## 3．解析条件

地下空間断面は円形とする。解析は重力のみを考慮した場合について行う。解析条件は次のとおりである。

空洞半径　r=2.5，4，5m　　空洞深さ　H=3，5，8，10m　　粘着力　c=0，0.5，1kgf/cm$^2$

内部摩擦角　$\phi$=10～40°（10, 20, 30, 40）　　弾性係数　E=1.0×10$^4$kgf/cm$^2$　　ポアソン比　$\nu$=0.3

単位体積重量　$\gamma$=2.5×10$^{-3}$kgf/cm$^3$

## 4．解析結果に対する評価

### 4．1　応力集中度

応力集中度Rは以下の様に定義し、円孔縁での応力集中度の評価を行う。（$\sigma_\theta^{②}$は図-1(d)の円孔縁での応力）

$$R=\frac{\sigma_\theta^{②}}{\sigma_\theta^{①}} \qquad この時 \quad \begin{cases} R>1：応力集中 \\ R<1：応力開放 \end{cases}$$

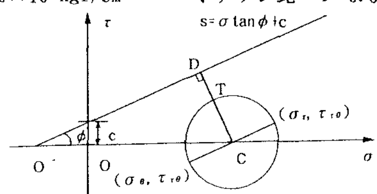

図-2　モール・クーロンの破壊規準

### 4．2　節点安全率

地盤内の応力分布は、円孔の同心円を考えてやり同心円上で応力を求める。この時、円孔縁及び同心円上の応力についてモール・クーロンの破壊規準を用いて評価を行う。

図-2より節点安全率Fは、以下の様に定義する

$$F=\frac{\overline{CD}}{\overline{CT}} \qquad この時 \quad \begin{cases} F>1：非破壊 \\ F\leq：破壊する \end{cases}$$

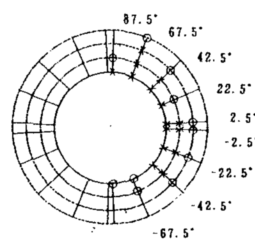

図-3　解析結果

## 5．解析結果及び考察

解析結果の一例として、(r, H)=(5, 3), (c, $\phi$)=(0.5kgf/cm$^2$, 30°)の時の節点安全率を図-3に示す。図中の同心円は、空洞半径rを1.0mずつ増分させたものであり、地表面(x軸上)に到達するまで同心円を考えてやる。図-3に示す角度の位置で節点安全率を求めている。図-3中の○，×は、それぞれ非破壊と破壊を意味する。(c, $\phi$)=(0.5kgf/cm$^2$, 30°)と固定した時、r, Hの組合わせ12通りについて節点安全率を求めた。以下に示す(i), (ii), (iii)の条件で、破壊の挙動について調べた。

(i)無次元化したr/Hの値が同じもの，(ii)Hを固定しrを変化させた時，(iii)rを固定しHを変化させた時

(i), (ii)については、特に共通する破壊挙動はなく、(iii)は各rについて破壊挙動が同傾向にある。これより、浅所地下では空洞深さより空洞半径に影響されやすいと考えられる。

## 6．まとめ

土木工学の分野で数値解析と言えば有限要素法が一般的であるが、機械工学の分野で用いられる体積力法により本研究の解析は行い、土木工学の分野でこの体積力法を用いたのは初の試みである。そこに本研究の最大の特徴がある。本報告では、紙数の都合上応力集中度の解析結果は割愛させて頂いた。今後の課題として解析条件全てに対して節点安全率を求め、安定性の評価とともに、他の数値解析手法(FLAC, FEM)との比較・検討が残されている。

## 参考文献


1. 西谷・陳，体積力法，(1987)，培風館，95. ／2. 西谷弘信，日本機械学会誌，70巻580号，1967, p.627.

3. Nisitani, H., Mechanics of Fracture, Vol.5(edited by Sih, G. C.), 1978, Noordhoff International Publishing, Chapter 1.