

## 体積力法を用いた地下空洞周辺岩盤の応力解析に関する基礎的研究

九州東海大学工学部 学生員 岡田 将  
 九州東海大学工学部 学生員 上野 但士  
 九州東海大学工学部 正会員 鹿田 光一  
 九州大学工学部 正会員 江崎 哲郎

## 1. 緒言

地下に空間を開削する場合、周辺の地盤や地表には応力変化や変位を生じる。これらを正確に予測する事は、厳しい環境規制のある今日の状況において不可欠である。著者らは、地下空間形成によって生じる地盤の応答を対象とし、従来の経験的方法である影響係数法、影響関数法を再吟味した上で、新しい影響円解析法の開発を行った<sup>1)</sup>。この開発した方法は、実際の地下の掘削地点に近接した既存の構造物に生じる変位の予測及び監視に適用され、実測値と良く符合する事を確認するとともに被害の防止に貢献した。しかしながら、今後、開発の進展が求められる地下空間は、その断面形状、水平方向への広がり、立体的な配置において、多種多様なものが考えられる。そのため、地下空洞の開発にともなう空洞と地盤の挙動を精度良く、かつ、実用的に予測し得るような解析法の検討が必要となる。

本研究においては、体積力法の基本的考え方が著者らが研究を継続している影響関数法と同一である事、およびそれに付随して無限領域を扱い易い点に着目し、広域の地盤変動解析への適用性を検討するものである。このために、その理論に基づいて基礎的な応力解析プログラムの構築を行い、モデルケースへの適用結果を報告する。

2. 体積力法<sup>2)</sup>

体積力法は、材料工学の分野において、切欠きを有する媒体中の応力拡大係数、応力集中係数の検討に利用されている間接境界要素法 (Indirect Method) の一手法である。また、土木分野においても半無限空間中に開削される地下空洞周りの応力集中度および安定性の評価に適用されている<sup>3)</sup>。体積力法の基本原理は、実際に媒体中に存在するき裂や、孔に関する境界条件を、切欠きのない媒体を解析の対象とし、仮想境界上に生じる応力がもとの境界条件に一致する様にその体積力密度分布を求める

事により、実問題を再現できるというものである。ただし、体積力密度とは、集中力対の分布密度を意味し、一般的な重力に相当するような体積力とは概念が異なる (重力に相当する力を物体力と呼称し区別している)。

具体的には、体積力法では、解析しようとする弾性体の境界面と同じ形の曲面を無限体中に仮想して、その曲面上に密度  $\phi_\eta(Q)$  なる体積力、または密度  $\phi_\eta(Q)$  なる食違いを分布させ、領域における実際の弾性場を表現しようとするものである。この「食違い」は影響関数法、特に Face Element 法における「変位不連続量」に相当するものである。このため、その基礎式は変位に関して、

$$u_i = \int_\Gamma u_i(P, Q_\eta) \phi_\eta(Q) d\Gamma(Q) + \int_\Gamma u_i^*(P, Q_\eta^n) \phi_\eta(Q) d\Gamma(Q) + \int_\Omega u_i(P, Q_\eta) f_\eta(Q) d\Omega(Q) \quad (1)$$

と表わされる (下付き添え字は総和規約表示)。

ただし、食違いだけを分布させる場合 (物体力が作用しない時) の基礎式は

$$u_i = \int_\Gamma u_i^*(P, Q_\eta^n) \phi_\eta(Q) d\Gamma(Q) \quad (2)$$

と書け、影響関数法 (Face Element 法) の基本式に概念上全く一致する。

## 3. 解析プログラム

解析プログラムは、「2 楕円孔を有する無限板引張りにおける応力集中の干渉効果」プログラム<sup>2)</sup>を参考し、無限領域中に単一の円形空洞が開削された場合の空洞周りの応力解析を目的とした。このため、応力集中係数  $K_t$ 、空間相互の干渉効果の計算機能は備えていない。また、重力に相当する物体力も考慮出来ない。

具体的な構成内容は、基本解の理解のし易さから、体積力だけを分布させて境界条件に対応する事とした。また、空洞境界面の応力を境界条件とするため

$$\sigma_i = \int_\Gamma \sigma_{ij}(P, Q_\eta) \phi_\eta(Q) d\Gamma(Q) \quad (3)$$

式(3)を境界条件である表面力に適合させる境界積分方程式として用いる(物体力にあたる重力に関する項は領域積分となるため今回は考慮していない)。ただし、 $P$ を境界面に無限に近い注目領域内の点の全体からなる閉曲面上にあるものとする。また、モデルケースの対象性より着力点 $Q$ について、

$(\xi, \eta) = (\xi, \eta), (\xi, -\eta), (-\xi, \eta), (-\xi, -\eta)$  (4)  
 に対応する区間の設定を内部処理し、データ作成の簡便性を図った。境界積分方程式は Gauss-Jordan 法により解いて、体積力密度  $\phi_\eta$  求めた。空洞周りの各点における応力は式(3)より表わされる。

#### 4. 解析結果と考察

3のプログラムにより図1に示す円形空洞境界に沿った応力成分を求めた。図2に厳密解(破線)と  $\sigma_x$  (シンボル) の比較を示す。横軸は空洞境界面の各点の  $x$  座標を無次元化した半径に沿って示し、縦軸は被り圧  $p_z$  に対する比を示す。ただし、側圧係数  $k=0.5$ 。限られた粗い要素分割について結果は比較的よく符合している。しかしながら、良い精度ではないためプログラム構成の再検討を継続する。また、今回は厳密解との比較のみで、他の解析法との比較については行われておらず次なる課題となる。

従来、体積力法は、金属材料に対して用いられるのが一般的で、引っ張り応力下での二次元応力解析が主体であった(参考文献3)のような研究が進められてはいるが)。今後は、実際に想定される立体的な空間の開削を対象とし、一般に評価されにくい空間端部の挙動やその影響を含めた周辺岩盤の応答、空間が並列するまたは交差する場合の干渉効果、及び、複数の空間が接続部分を有する場合の挙動とその影響の解明を目的に、体積力法概念を基に、従来検討を重ねてきた解析法の長所を生かした解析手法の検討を継続する。

#### 参考文献

- 1) 江崎哲郎 他(1994): 地下開発に関連した地盤環境の予測及び評価のための解析手法, 土木学会地下空間利用シンポジウム, pp. 65-72.
- 2) 西谷弘信 陳玳行(1987)体積力法 培風館, pp1-66.
- 3) 熊川貴伯 棚橋由彦 他、体積力法を用いた地下空洞周りの応力集中と安定性の評価(1996) 土木学会西部支部研究発表会講演概要集, pp.720-721.

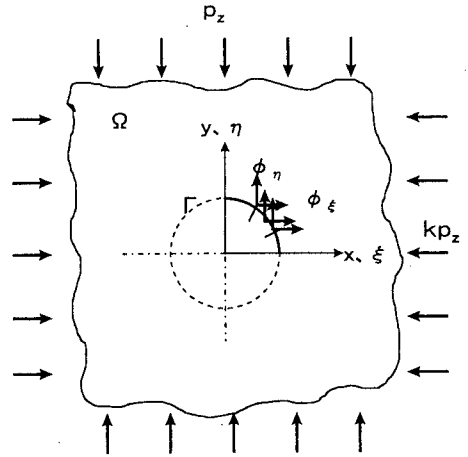


図1 解析モデル

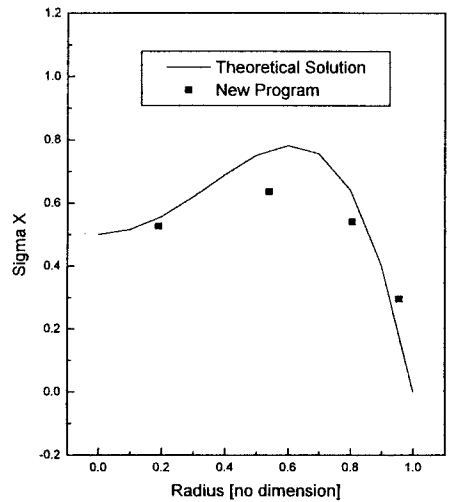


図2 解析結果と厳密解との比較