

# 地下空洞の長期変動予測解析手法の適用性

内山慶一郎<sup>1)</sup>・松田 宏<sup>2)</sup>・原田芳金<sup>3)</sup>・大久保誠介<sup>4)</sup>

## 1. はじめに

地下空洞を建設する場合, 空洞とその近傍の地質構造の力学的変動を長期にわたって予測することが必要となる。我々は, 時間依存性を考慮した非線形粘弾性構成則を組み込んだ有限要素プログラムにより試計算を行い, その有効性の確認を試みたので紹介する。使用した構成方程式は6個の物理定数で表現されるが, いずれも一般的な岩盤試験により得られ, 利用上の制約が少ないものである。

実際の地下空洞より近い配置モデルとして, 円筒サイロ型空洞モデル(軸対称モデル, 三次元モデル)を考え, いくつかのケーススタディを行った結果, 内空変位の時間的増加や空洞の円周方向および半径方向の応力の経時変化, 岩盤のゆるみ領域の進展が確認された。

検討の結果, 本解析手法を使用することにより, 長短2種の時間挙動, 延性・脆性などの表現が可能であることがわかった。

## 2. 解析手法

構成方程式は, 大久保らにより提案された式を採用した(大久保, 1993)。それによると, 応力を受ける岩石のコンプライアンス $\lambda$ (ひずみと応力の比)は, 時間の経過とともに次第に増加していくと仮定する。入力するパラメータは, 一軸圧縮強度 $\sigma_c$ , 一軸引張強度 $\sigma_t$ , コンプライアンス $\lambda$ , ポアソン比 $\nu$ , 応力-ひずみ曲線の形状を決める定数 $m$ , 強度の載加速度依存性を決める定数 $n$ の6個である。これら6個の

パラメータはいずれも一般的な岩盤試験より得られ, 利用上の制約が少ないものである。

コンプライアンス $\lambda$ の増加速度は, そのときの差応力 $\sigma$ ( $=\sigma_1-\sigma_3$ )の $n$ 乗に比例する。また, コンプライアンスの増加速度は $\lambda$ が増加するとともに,  $\lambda$ の $m$ 乗に比例して加速的に大きくなると考え, 構成方程式を次のように仮定した。

$$d\lambda/dt=f(\lambda)g(\sigma)=a\lambda^m\sigma^n \quad (1)$$

$$a=(1/t_0)\times(m/(n_0+1))^{m/(n_0-m+1)} \quad (2)$$

$n_0$ は一軸応力下での $n$ である。 $t_0$ は定ひずみ試験における破壊ひずみ到達時間を表し, 本論文では,  $t_0=120s$ を標準値とする。なお, 以上は簡単のため一軸応力下に限って説明した。

実際の解析は, 大久保らにより示された非線形粘弾性アルゴリズムをベースにした, 三次元モデルの解析に対応できる有限要素法プログラムを使用した。

## 3. 軸対称モデル

### 3.1 モデルの説明

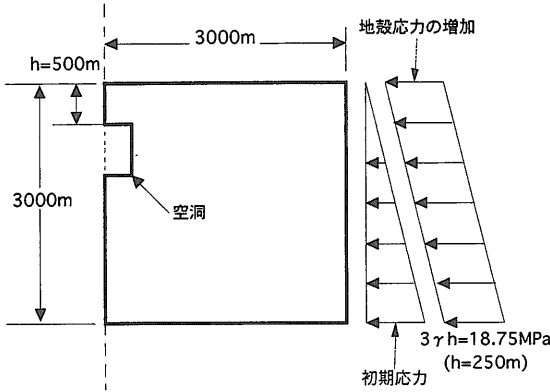
地下空洞のモデルとして, 円筒サイロ型空洞モデルを高さ70m, 直径30mの円筒形状で与える。この空洞モデルを, 地上より500mの深さに建設すると想定した解析領域を第1図に示す。解析を行うにあたり, この解析領域を749個の要素に分割した。

### 3.2 検討項目と解析条件

本論文における主な検討項目は次の2点である。

1) (株)大林組 情報システムセンター  
〒131 墨田区堤通1-19-9  
2) 日本電子計算(株)科学技術事業部  
3) (財)原子力環境整備センター  
4) 東京大学工学系研究科

キーワード: 地下構造物, 数値シミュレーション, 長期安定性, レオロジーモデル



第1図 円筒サイロ型空洞解析モデル図(軸対称モデル)

第1点は、今回使用した解析手法の有効性を確認することである。この確認は、短期・長期2種類の時間的挙動を表現することができ、1つの構成則で延性から脆性までの幅広い岩盤の物性が表現できるかどうかで判断する。なお、解析時間は1万年間とし、初期状態から1万年までの時間的挙動を比較、検討する。第2点は、パラメータスタディを通して、モデルの長期安定性におよぼす物性値の影響を把握することである。特に今回注目したパラメータは、地山強

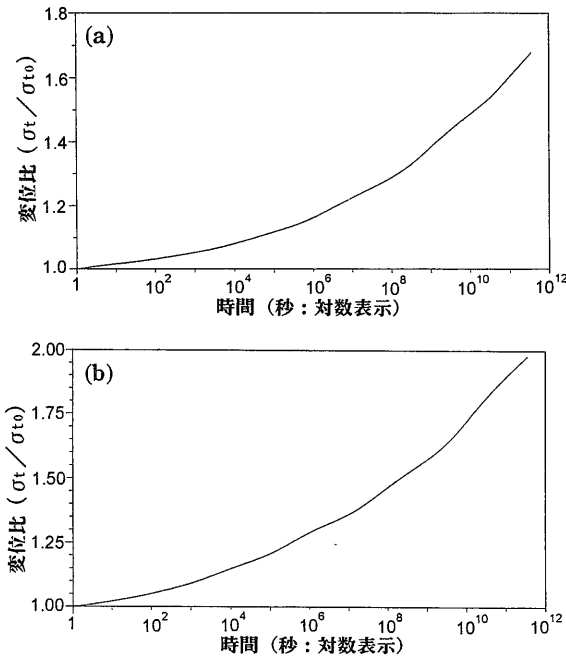
度比(一軸圧縮強度/地圧)と構成方程式の物理定数  $m$ 、 $n_0$  の比 ( $m/n_0$ ) である。地山強度比は、2.4、4.0、 $m/n_0$  は、1/4、1/2 と変化させてその影響を検討した。ここで、 $m/n_0$  が大きければ脆性的な岩盤、小さければ延性的な岩盤を表す。なお、以下にその他の主な物性値を示す。

- ・一軸圧縮強度  $\sigma_c$  (MPa) : 50, 30
- ・一軸引張応力  $\sigma_t$  (MPa) : 5, 3
- ・地圧  $\sigma_\infty$  (MPa) : 12.5 (深さ500mでの鉛直地圧)
- ・  $m$  : 10, 5
- ・  $n_0$  : 20
- ・単位体積重量  $\gamma$  ( $\text{kN/m}^3$ ) : 25
- ・コンプライアンス  $\lambda$  ( $\text{GPa}^{-1}$ ) : 1.0
- ・ポアソン比  $\nu$  : 0.3

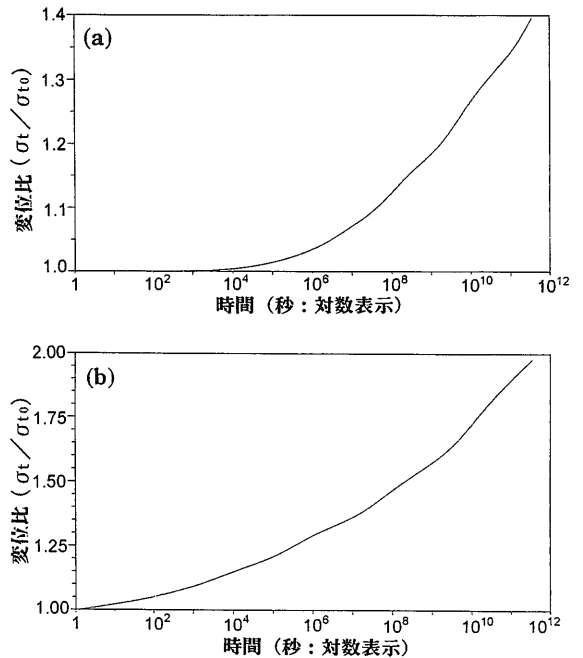
また、荷重条件として、第1図のように地殻応力の変動量18.75MPa(深度250mにおける鉛直応力の3倍に相当)の水平分布荷重を側方境界面に作用させた。

### 3.3 解析結果

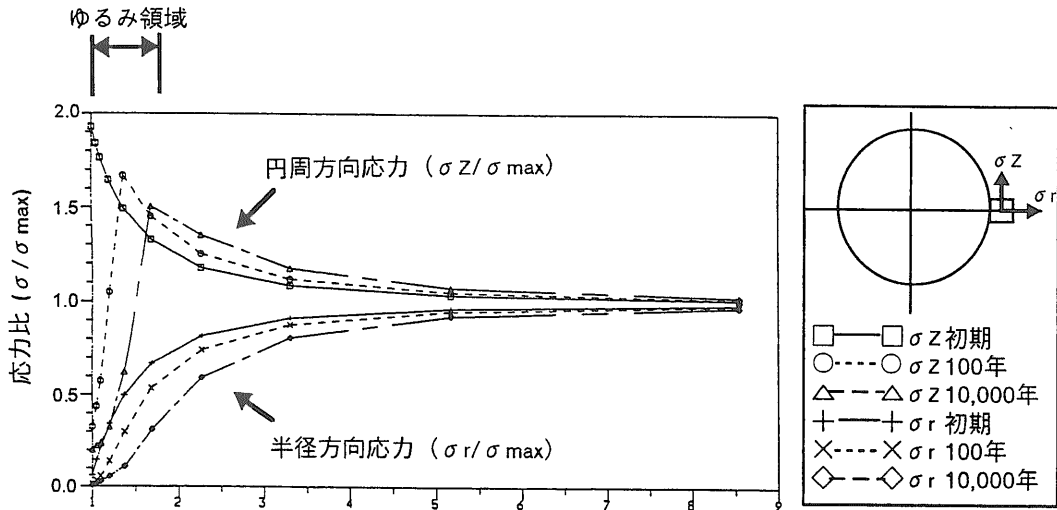
第2、3図は、空洞モデルの内空変位の経時変化



第2図  $m/n_0$  を1/2に固定したときの空洞内壁、中央部の内空変位比。時間 $10^{12}$ 秒は約1万年。(a)地山強度比が4.0の場合。(b)地山強度比が2.4の場合。



第3図 地山強度比を2.4に固定したときの空洞内壁中央部の内空変位比。(a)  $m/n_0$  が1/4の場合。(b)  $m/n_0$  が1/2の場合。



第4図 空洞内壁中央部の円周方向応力および半径方向応力の応力比の経時変化図。載荷初期、100年後、1万年後の応力比を表示。距離比が1の位置から円周方向応力のピーク点までの領域をゆりみ領域とする。

を表す。これは、空洞内壁中央部における載荷直後の弾性変形で各時間後の変形を割り、正規化したものを内空変位比と定義し、時間変化を見たものである。縦軸に変位比、横軸に対数表示の時間(秒)を表し、1万年は $10^{12}$ 秒付近である。第2図は、 $m/n_0$ を1/2に固定して地山強度比を4.0と2.4とした場合、第3図は、地山強度比を2.4に固定して $m/n_0$ を1/4と1/2とした場合である。図によると、地山強度比が小さいほど、また、 $m/n_0$ が大きくなるほど、同時刻における変位が大きくなる。最大時で弾性変形の2倍程度まで変位する。すなわち、地山強度比の変化は変位に対し、敏感に作用する。また、 $m/n_0$ は変位に対してそれほど敏感ではないが、脆性材の方が延性材に比べ変位は大きくなる。

第4図は、応力分布の経時変化図である。これは、載荷直後の空洞より遠方の要素の応力(半径方向応力 $\sigma_r$ 、円周方向応力 $\sigma_z$ )で各時間後(初期、100年、1万年)の空洞内壁中央部の応力を割り、正規化したものを応力比と定義し、空洞部からの距離の影響と時間変化を見たものである。縦軸に応力比、横軸に距離比を表し、距離比が1の位置は空洞内壁部であり、この内壁面から円周方向応力の各時刻のピーク点までの領域をここではゆりみ領域とする。

第5図は、 $m/n_0$ を1/2に固定して地山強度比を4.0とした場合である。地山強度比が小さいほど、ゆり

み領域の範囲が大きくなる。また、 $m/n_0$ が小さくなるほど、円周方向応力の変化になだらかな現象がみられた。

#### 4. 三次元モデル

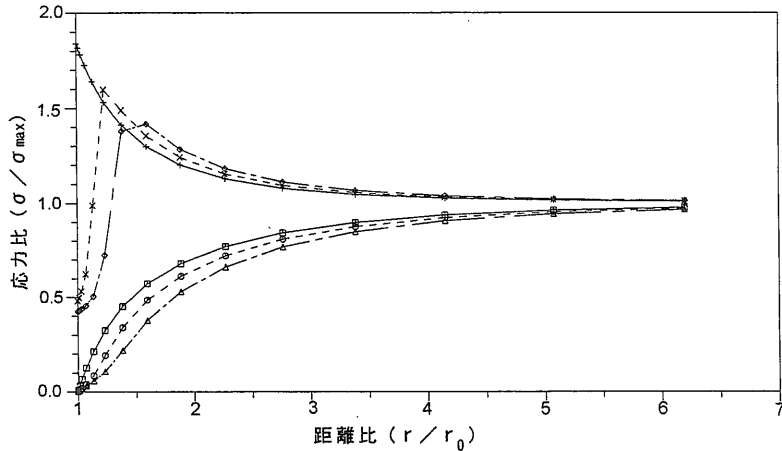
##### 4.1 モデルの説明

軸対称モデルと同様に円筒サイロ型空洞モデルを考え、高さ70m、直径30mの円筒形の部分と直径30mの半球のドーム部を合成した。この空洞モデルを、地上より500mの深さに建設すると想定した解析領域を第6図に示す。なお、今回の解析モデルが三次元モデルであることを考慮して、計算効率を上げるためにモデルの規模を小さく設定した。この解析領域を240個の要素に分割した。

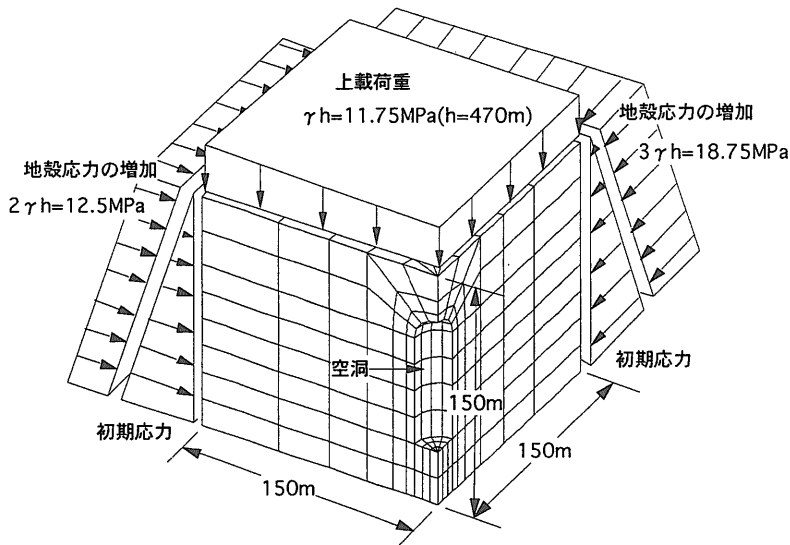
##### 4.2 検討項目と解析条件

軸対称モデルと同様の項目について検討した。パラメータスタディに関する岩盤の物性値も同じ値を使用した。

荷重条件として、第6図のように地殻応力の変動量18.75MPa(深度250mにおける鉛直応力の3倍に相当)と12.5MPa(深度250mにおける鉛直応力の2倍に相当)の水平分布荷重を側方境界面に作用させる。また、上載荷重として11.75MPa(深度500mに



第5図  $m/n_0$ を1/2に固定したときの空洞内壁中央部の応力比の経時変化図 (地山強度比が4.0の場合)



第6図 円筒サイロ型空洞解析モデル図(1/4モデル)

おける鉛直応力に相当)を上方境界面に作用させ、空洞モデルが地上から500mの深さにある状態とした。

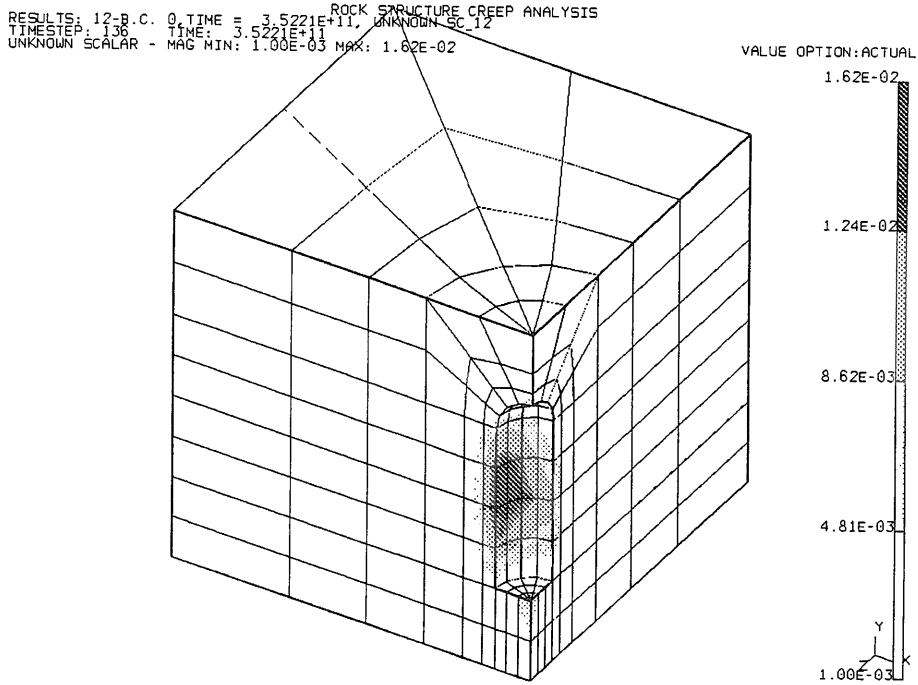
### 4.3 解析結果

第7図は、1万年後の空洞周辺部のコンプライアンス分布を示している。地山強度比は2.4、 $m/n_0$ は1/2とした。経時変化とともにコンプライアンスが増加する部分(この部分をゆるみ領域とみなす)を網目コンターで表示したものである。ゆるみ領域が時間経過とともに増大していくことがわかった。また、ある一定時間において、地山強度比を固定して $m/n_0$ を変化

させた場合と $m/n_0$ を固定して地山強度比を変化させた場合について検討した。その結果、地山強度比が小さいほど、また、 $m/n_0$ が大きいほどゆるみ領域は増大することがわかった。このゆるみ領域の範囲は、第7図にあるように、1万年後の最も地山強度比が小さく(=2.4)、 $m/n_0$ が大きい場合(=1/2)においても円筒部に空洞半径以下広がる程度で、ドーム部にはほとんど現れない傾向にあることがわかった。

### 5. まとめ

地下空洞の近傍モデルとして、円筒サイロ型空洞



第7図 円筒サイロ型空洞モデルのコンプライアンス分布経時変化図(1万年後)

モデルを想定し、解析領域の妥当性、各種物性が空洞安定におよぼす影響の基本的性状の把握のため、軸対称モデルによる検討を行った。さらに、実地盤での変圧状態を考慮し、三次元モデルによる検討を行い、そのゆるみ領域の分布(コンプライアンス増加領域で定義)に妥当な結果を得た。

すなわち、本論文で使用した解析手法により空洞周辺岩盤の1万年間の時間的挙動を表現することができ、延性的あるいは脆性的な岩盤について解析できることがわかった。解析手法の有効性が確認されたのである。また、パラメータスタディにより強度と地圧に関するパラメータ(地山強度比)と構成方程式の物理定数 $m$ 、 $n_0$ の比がモデルに与える影響はかなり大きいことがわかった。特に、空洞周辺のゆるみ領域の範囲は、地山強度比が小さく、 $m/n_0$ が大きいほど顕著に広がっていく傾向がみられる。しかし、この範囲は最大でも空洞の半径を越えてまで広がる

傾向にはなく、ドーム部を含めてこのモデルは比較的安定していることが伺える。

今後は、より実際のサイトに近い空洞とその近傍のモデルを作成し、断層のすべり挙動を取り込んだアルゴリズムにより物性値や形状に関するいろいろなパラメータスタディを試みたいと考えている。

引用文献

大久保誠介, 金 豊年(1993):非線形粘弾性モデルによる円形坑道周辺岩盤挙動のシミュレーション. 資源と素材, 109, p209-214.  
 大久保誠介(1993):コンプライアンス可変型構成方程式の解析的検討. 資源と素材, 108, p601-606.

UCHIYAMA Keiichirou, MATUDA Hiroshi, HARADA Yoshikane and OKUBO Seisuke (1996): Applicability of an analytical method for long-term behaviour around underground structure.

<受付: 1996年8月1日>