

## (92) 不連続体解析による原位置岩盤の安定性評価の検討

大成建設(株)エネルギー部 ○羽出山吉裕

大成建設(株)土木設計計画部 大津 宏康

日本地下石油備蓄(株) 岡本 明夫

(株)篠塚研究所 大矢 敏雄

### A Study on Estimation of discontinuous rock during large underground cavern excavation by discontinuous analysis

Yoshihiro Hatsuyama, TAISEI CORP

Hiroyasu Ohtsu, TAISEI CORP

Akio Okamoto, Japan Underground Oil Storage Co., Ltd

Toshio Ohya, Shinozuka Research Institute

### Abstract

The mechanical behaviors of discontinuous rock are strongly affected by the property and discontinuities. Discontinuous rock mass modeling can be classified into two approaches. One is discrete modelling of intact rock and discontinuities, Another is an equivalent continuum modelling. In this study we select D.E.M.(Distinct Element Method) and F.E.M.-CT (FEM Stress-strain relation in terms of Crack Tensor Theory).

We applied these method to analyze the behavior of a large underground cavern of the Kikuma Under Ground Oil Storage Tank(H=30.0m W=20.5m). In this paper, the results obtained in these analysis are shown and discussed

### 1.はじめに

花崗岩・片麻岩といった結晶質の岩盤の力学特性は、岩盤内に存在する不連続面(断層、層理、節理)の影響によって、岩石コアのそれとは異っている。不連続面を考慮した岩盤の力学解析モデルは、岩盤を不連続体として取り扱う方法と等価な連続体として取り扱う方法の2つに大別される。不連続体解析としては有限要素法におけるジョイント要素、個別要素法<sup>1)</sup>が、等価連続体解析としては、クラックテンソル理論<sup>2)</sup>、損傷理論<sup>3)</sup>、Homogenization理論<sup>4)</sup>等が挙げられる。

著者らは<sup>5)</sup>、菊間地下備蓄基地岩盤タンク建設時の岩盤空洞の変形挙動・湧水挙動と不連続面の幾何学特性を整理し、岩盤挙動と不連続面の幾何学特性について考察している。

本研究では、菊間地下備蓄基地の水封式岩盤タンク空洞を対象として、タンク建設時に得た坑内観察図から不連続面の幾何学特性を整理し、不連続面を考慮した岩盤モデルを作成する。この岩盤モデルを用いて、岩盤空洞建設時の安定性評価を不連続体解析(DEM)、等価連続体解析(有限要素法:クラックテンソル理論)を実施し、解析手法の相違および、計測値との比較検討を行う。

### 2. 菊間地下備蓄基地の概要<sup>6)</sup>

菊間地下備蓄基地(愛媛県越智郡菊間町)は、7本の岩盤タンク(長さ230~448m)と水封トンネルおよび作業トンネルから構成されている。岩盤タンクの形状は、幅20.5m、高さ30mの砲弾型断面で、その土被りは80~100m程度である。菊間地下備蓄基地の基盤は、新期領家花崗岩と呼ばれる白亜紀後期の花崗岩ないし花崗閃緑岩で、岩盤等級は日本地下石油備蓄(株)の岩盤総合評価基準によればH<sub>1</sub>~H<sub>4</sub>(電中研式の岩盤分類でB~C<sub>H</sub>級)である。(図-1)

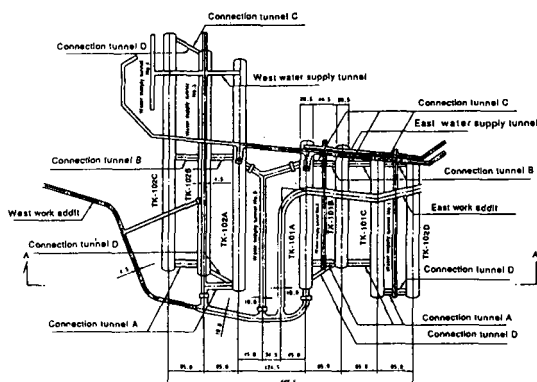


図-1 菊間地下備蓄基地岩盤タンク配置図

### 3. 岩盤タンク建設時の変形挙動

岩盤タンク建設時には、安全管理のためにA計測：内空変位、天端沈下（88断面：1断面当り7測線） B計測：地中変位、ロックボルト軸力（7断面：1断面当り11測線）が実施された。その結果、殆どの計測点で内空変位量は3～5mm程度であった。しかしながら、TK-101Bの計測点

（TD.155m）では、内空変位量が最大20mmと他の計測点と比較して大きく、地中変位計測でも空洞左右で変形挙動が異なっており、特に、測線E7では変位量（約15mm）と大きく、かつ変位分布も空洞壁面から4mの位置で不連続となっている。（図-2 参照）

本研究では、TK-101BのB計測断面を検討対象とした。

### 4. 解析

#### 4.1 岩盤モデルの作成

岩盤浸透流解析では岩盤モデルの作成方法として不連続面の幾何学特性（密度、方向、大きさ）を統計的に処理して得た確率分布に基づいて計算機上で不連続面を発生させるフラクチャーネットワーク手法が良く使用される。しかしながら、菊間地下備蓄基地では、坑道壁面観察から不連続面の幾何学特性の統計的評価が困難であることが報告<sup>7</sup>されている。そこで、本研究では、不連続面を大規模不連続面（トレース長さ100m程度）、中規模不連続面（トレース長さ20m程度）の2つに分類し、大規模不連続面を決定論的に、中規模不連続面をクラックテンソル量を用いて岩盤モデルに評価する手法を用いた。（図-3 参照）

#### （1）大規模不連続面のモデル化

坑内観察図（図-4）から得た不連続面の位置と方向に基づいて、大規模不連続面を検討対象断面に投影した。

#### （2）中規模不連続面のモデル化

①方向：不連続面はN40～50E, N30～50Wの走向を持つものの2つに分類でき、その傾斜は60～80°である。この主方向を法線に持つ平面を検討断面に投影した。

②密度・大きさ：既往の研究<sup>8</sup>から、検討対象断面付近での二次元クラック密度 $F=6.0$ を得た。

中規模不連続面をモデル化では、検討断面上で①の方向を持つ不連続面を二次元クラック密度 $F=6.0$ を満足するように発生させた。 図-5にシュミットネット投影図と算定したクラックテンソルを示す。

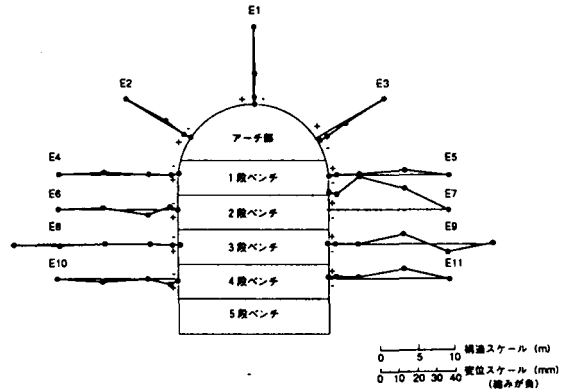


図-2 地中変位計測結果（TK-101B：TD.155m）

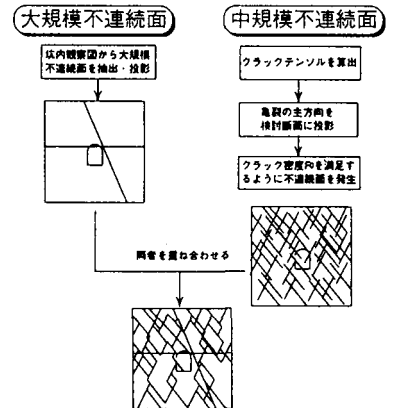


図-3 岩盤モデル作成フロー

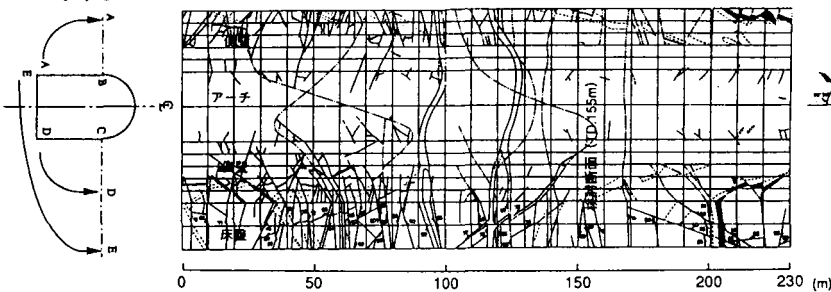


図-4 坑内観察図（TK-101B）

### (3) 岩盤モデル

以上の手順で作成した岩盤モデルを図-6に示す。

## 4.2 解析条件

### (1) 解析物性値<sup>a)</sup>

①岩盤基質部 原位置試験および室内試験の結果から、岩盤基質部の物性として、初期変形係数 $D=6500\text{MPa}$ 、ポアソン比 $\nu=0.25$ を用いた。

### ②不連続面

・せん断剛性 事前調査、試験等から不連続面の物性値が得られていないことから、Barton<sup>9)</sup>が提案しているせん断剛性の算定式を用いる。

$$k_s = \frac{100}{L} \sigma_n \tan \left( JRC_n \log \left( \frac{JCS_n}{\sigma_n} \right) + \phi_0 \right)$$

(1)

ここで、 $L$ : 20.0m (岩盤モデルのトレース長さ平均)

$\sigma_n$ : 3.1MPa (不連続面に作用している垂直応力、岩盤の平均主応力を仮定)

$JRC_0$ : 8.9 (花崗岩の平均値から流用)  $\phi_0$ : 30° (花崗岩の平均値から流用)  $L_0$ : 0.1m ( $JRC_0$ を得た供試体長さ)

$JCS_0$ : 80MPa (岩石の一軸圧縮強度)

$$JRC_n = JRC_0 \left( \frac{L_n}{L_0} \right)^{0.02 JRC_0}$$

$$JCS_n = JCS_0 \left( \frac{L_n}{L_0} \right)^{0.03 JRC_0}$$

以上から、不連続面のせん断剛性 $k_s \approx 10\text{MPa}$ とした。

(FEM-CTでは大規模不連続面をジョイント要素で中規模不連続面を等価な変形係数で評価)

・垂直剛性 不連続面の垂直方向変位はせん断方向変位と比較してほとんど生じないものと仮定し、垂直剛性 $k_v \approx 10000\text{MPa}$ とした。

### (2) 境界条件

菊間地下備蓄基地では、初期応力測定が実施され、地圧比 $K_0=1.2$ が得られている。解析では垂直応力を土被り相当応力( $\sigma_v = \gamma H$ )とし、水平応力( $\sigma_H = K_0 \sigma_v$ )とした。図-7に初期応力条件・境界条件を示す。

### (3) 解析ステップ

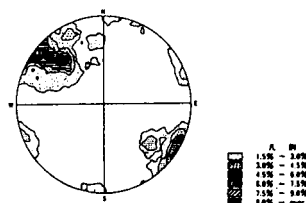
解析ステップは、実際の掘削段階を考慮した。

## 5. 解析結果および考察

### (1) 空洞壁面変位

解析で得た、空洞周辺の変位ベクトルを図-8に示す。これより、空洞壁面変位量として、

DEMで最大50mm, FEMで70mm程度と、FEMの方が変形を大きく評価した結果となった。変形モードでは、DEMが不連続面の影響を受けてブロック間で不連続となっており、空洞壁面の変形量も不連続に分布している。一方、FEMでは変形異方性の影響を受けて、変形モードが空洞の左右で異なっているが、空洞壁面変形量はDEM解析と比較して連続的に変化していることが分かる。



$$F_{ij} = \begin{pmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{21} & F_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4.0 & -0.18 \\ -0.18 & 2.0 \end{pmatrix}$$

$$F_{1111} = 3.0 \quad F_{1112} = 0.22 \quad F_{1122} = 1.00$$

$$F_{1222} = -0.04 \quad F_{2222} = 1.00 \quad F_0 = 6.00$$

図-5 シュミットネット投影及びクラックテンソル算定結果

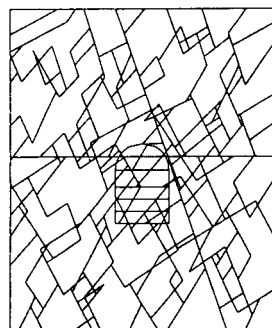


図-6 岩盤モデル

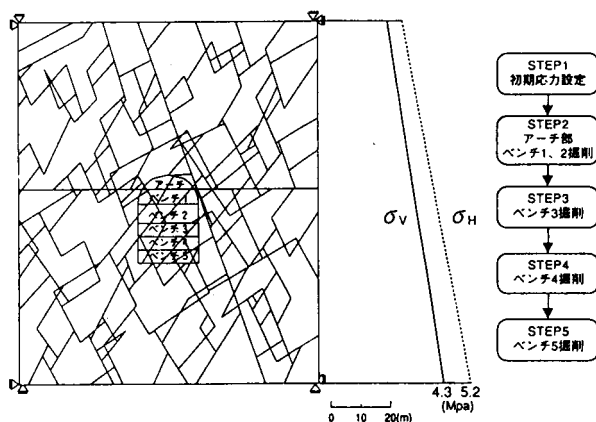


図-7 境界条件および解析ステップ

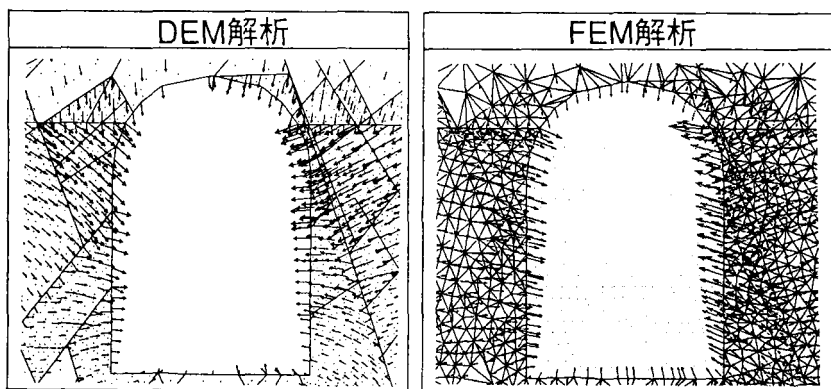


図-8 変位ベクトル図

0 5 10(m) 構造スケール  
0 100 200(mm) 変位スケール

## (2) 天端沈下および内空変位量

解析で得た天端沈下、内空変位量を図-9に示す。空洞壁面変位と同様に、FEMの方がDEMよりも変形を大きく評価した結果となった。変形量としては、DEMの結果が計測値と良く対応しているが、STEP4から5の内空変位の増分が最終変位量の殆どを占めているといった岩盤の不連続的な挙動をFEM、DEMでは評価できていない。

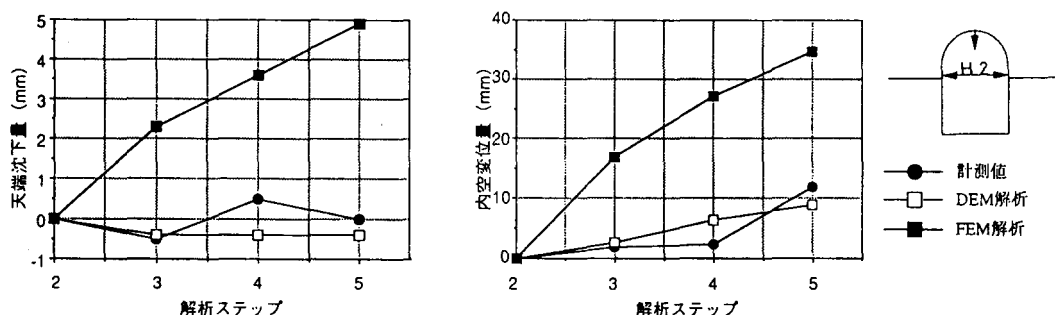


図-9 天端沈下・内空変位

## (3) 地中変位量

原位置における地中変位計測（測線E7）では、不連続的な変位量の分布が確認されている。解析結果を整理し、測線E6、E7の地中変位分布を図-10に示す。

計測値では、空洞壁面の左右で地中変位分布が著しく異なっていることが分かる。

解析では、DEM、FEM両者ともに、計測値で得られたような地中変位分布の相違を表現することはできなかった。

表-1に、測線E7で得た掘削に伴う空洞壁面（空洞壁面距離0m）の変位増分を示す。これから、計測値では掘削STEP4（27.8%）掘削STEP5（21.19%）で同程度の変位が生じている。一方、DEMでは、掘削STEP4（23.5%）、掘削STEP5（12.06%）、FEMでは、掘削STEP4（36.9%）、掘削STEP5（10.17%）と掘削STEP5によって生じる変位が最終変位量に占める割合が計測値

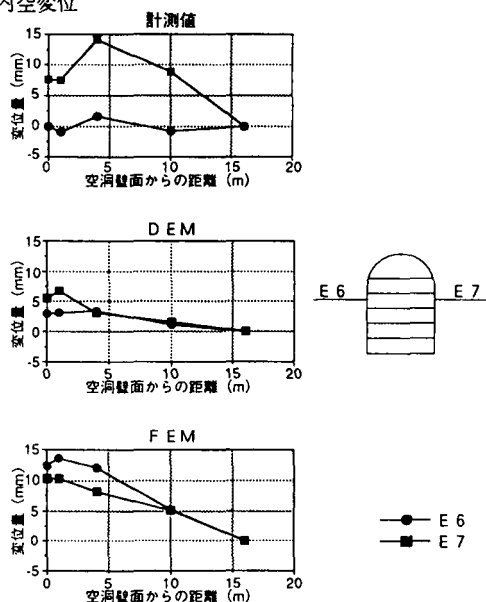


図-10 地中変位分布

表-1 壁面変位増分比較表

|       | 計測値<br>(mm) | 増分<br>(mm) | 増分/最終変位量<br>(%) | DEM<br>(mm) | 増分<br>(mm) | 増分/最終変位量<br>(%) | FEM<br>(mm) | 増分<br>(mm) | 増分/最終変位量<br>(%) |
|-------|-------------|------------|-----------------|-------------|------------|-----------------|-------------|------------|-----------------|
| STEP2 | 0.00        |            |                 | 0.00        |            |                 | 0.00        |            |                 |
|       |             | 2.85       | 51.01           |             | 6.68       | 64.40           |             | 4.06       | 52.93           |
| STEP3 | 2.85        |            |                 | 6.68        |            |                 | 4.06        |            |                 |
|       |             | 1.55       | 27.80           |             | 2.44       | 23.54           |             | 2.83       | 36.90           |
| STEP4 | 4.41        |            |                 | 9.13        |            |                 | 6.89        |            |                 |
|       |             | 1.18       | 21.19           |             | 1.25       | 12.06           |             | 0.78       | 10.17           |
| STEP5 | 5.59        |            |                 | 10.38       |            |                 | 7.67        |            |                 |
|       |             |            |                 |             |            |                 |             |            |                 |

と比較して小さく、原位置で計測された不連続的な岩盤挙動を評価できていない。

#### 5. おわりに

今回の研究では、菊間地下石油備蓄基地の岩盤タンクを対象として、DEM解析およびFEM-CT解析を用いてその安定性評価を試みた。その結果、DEMでは不連続面を考慮することによって空洞壁面の変形挙動（内空変位・天端沈下量）を表現することができた。しかしながら、原位置岩盤で計測された、地中変位の不連続的な分布や掘削に伴う変位増分をFEM,DEMでは表現することはできなかった。この原因として、今回の解析では、不連続面の破壊を考慮していないことやモデル化した不連続面の位置や方向が実岩盤中の不連続面とは異なっていたためと考えられる。

今後は、不連続面の破壊を考慮した解析（UDEC-BB）や、各施工段階で不連続面情報をフィードバックして最適な岩盤モデルを構築するシステムの開発を実施する予定である。

#### 参考文献

- 1) Barton, N. and Chrysanthakis, P. (1992) Predicting Performance of the 62m Span Ice Hockey Cavern in Gjøvik Norway. Fractured and Jointed Rock Masses .LAKE TAHOE, CALIFORNIA Vol.3/3, pp.624-631
- 2) Oda, M. (1982) Fabric tensor for discontinuous geological materials, Soils and Foundations, Vol.22, pp96-108
- 3) Kyoya, T., Ichikawa, Y. and Kawamoto, T. (1985) A damaged mechanics theory for discontinuous rock masses, Proc. 5th Int. Conf. Num. Meth. Geomech., Nagoya, A.A. Balkema, Vol.1, pp.469-480
- 4) M. Cai and H. Horii., (1992) A Constitutive Model of Highly Jointed Rock Masses , Mechanics of Materials, Vol.13, pp.217-246
- 5) 羽出山、大津、大矢、岡本（1993） 原位置岩盤の水理・力学特性評価に関する一考察 土木学会第48回年次学術講演会 第三部門 pp.1366-1367
- 6) 岡本、有元、山本、大津（1993） 菊間地下石油備蓄基地建設工事での空洞掘削に伴う地下水挙動に関する検討 土木学会論文報告集 No.480/6-21, pp.33-42
- 7) 羽出山、大津、大矢、岡本（1994） 岩盤不連続面の幾何学特性に関する一考察 土木学会第49回年次学術講演会 第三部門 pp.746-747
- 8) 宮永佳晴、福原明（1989） 地下石油備蓄基地の設計について 電力土木, No219, pp.63-74
- 9) Barton, N. and Choubey, V. (1977) The shear strength of rock joints in theory and practice. Rock Mechanics, 10, 1-54.