

## 大規模地下空洞掘削に対するMBC解析適用時の各パラメータの影響

Effect of each parameter in MBC analysis for large underground cavern excavation

金子 岳夫\* · 堀井 秀之\*\* · 吉田 秀典\*\*\* · 小山 俊博\*\*\*\*

Takeo KANEKO, Hideyuki HORII, Hidenori YOSHIDA and Toshihiro KOYAMA

Mechanical behavior of jointed rock mass is governed by the existences and behaviors of joints in the rock mass. "Micromechanics – based Continuum (MBC) Modeling" provides constitutive equations in the equivalent continuum problem by taking average of strain and stress over a representative volume element (R.V.E.), which enables us to analyze the excavation problem of cavern. In MBC analysis, some information (number of joint sets, joint density, effective length of joint, friction angle of joint and undulation angle of joint surface) is necessary as input parameters of joints. But it is difficult to define all parameters at the beginning. In this article, effect of each parameter is shown with results of parameter study of MBC analysis for large underground cavern excavation.

### 1. はじめに

大規模地下空洞の掘削においては、掘削に伴う地山応力解放や岩盤の異方性などにより、複雑な岩盤挙動が見受けられる。その支配的なメカニズムは応力解放によるジョイントの変形であることが知られているが、岩盤中に存在するジョイントの数は膨大なものであり、それら個々のジョイントを取り扱うことは実質不可能である。そのような不連続性岩盤に対する解析手法として吉田、堀井<sup>1) 2)</sup>によって開発されたMBCモデル(マイクロメカニクスに基づく連続体モデル)は空洞掘削時の応力解放により生じる節理のせん断すべり・開口を岩盤挙動の支配的なメカニズムとして捉えた、不連続性岩盤に対する連続体解析手法である。

MBC解析を実施する場合、解析パラメータとしてジョイントのセット数、密度、有効寸法、起伏角度を決定する必要がある。しかし、実際の解析を行う時点では、全てのパラメータを確定することは困難であり、事前調査、先行掘削トンネルのデータなどからパラメータを推定し、解析を行うこととなる。そこで、本研究では大規模地下空洞掘削解析のパラメータを推定する際の指針を作成することを目指し、MBCモデルを使用して地下発電所掘削解析のパラメータスタディを行い、各パラメータの掘削解析結果に対する影響についてとりまとめるものである。

\* 正会員 工(修) 東京電力株式会社 建設部付 東京大学派遣

\*\* 正会員 Ph.D. 東京大学教授 大学院工学系研究科 社会基盤工学専攻

\*\*\* 正会員 工(博) 香川大学助教授 工学部 安全システム建設工学科

\*\*\*\* 正会員 東京電力株式会社 建設部 土木・建築技術センター

## 2. MBCモデル概要 1) 2) 3)

MBC解析は、材料の巨視的挙動の支配的メカニズムはマイクロクラックや不均一介在物といった微視構造要素の存在、あるいはその発生・成長であるという見地に立って、微視構造要素を含む材料の力学的挙動を捉えようとする連続体理論である。定式化にあたっては個々の微視構造要素をモデル化し、その挙動に基づき代表要素 (Representative Volume Element, R.V.E) 内において平均化操作を行うことにより、巨視的な平均応力と平均ひずみの関係が求まる。一般に岩盤の力学挙動は非線形であるため、その関係を増分方程式で表すと、

$$\bar{\Delta \epsilon}_{ij} = \bar{D}_{ijkl}^R \bar{\Delta \sigma}_{kl} + \frac{1}{V} \sum_m \int_{\Omega^m} \frac{1}{2} (\Delta[u_i^{(m)}] n_j^{(m)} + \Delta[u_j^{(m)}] n_i^{(m)}) dS,$$

となる。ここで  $V$  は代表要素の体積、 $\bar{D}_{ijkl}^R$  は基質岩盤のコンプライアンステンソル、 $\Omega^m$  は代表要素  $V$  中の  $m$  番目のジョイント面、 $n_i^{(m)}$  はジョイント面での単位法線ベクトル、そして  $\Delta[u_i^{(m)}]$  はジョイント面での変位の相対変位量である。ここで、ジョイント面における相対変位増分  $\Delta[u_j]$  が平均応力増分  $\bar{\Delta \sigma}_{ij}$  の関数として与えられるならば、岩盤の構成式は、

$$\bar{\Delta \epsilon}_{ij} = \bar{D}_{ijkl} \bar{\Delta \sigma}_{kl}$$

と得られる。ここで、 $\bar{D}_{ijkl}$  はジョイントを含む岩盤の巨視的接線コンプライアンスである。

この構成式が等価な連続体の一点における材料の挙動を与えるものとして連続体の解析を行う。代表要素における平均応力と平均ひずみの関係は、内在する不連続面の寸法、平均間隔、及び方向分布に依存し、材料は異方的な挙動を強く呈する。不連続面同士の相互干渉を考慮に入れて不連続面の挙動を算定し、その結果を基に代表要素内で平均操作を行うことにより、巨視的な平均応力と平均ひずみの関係 (構成式) が求まる。この理論は、例えば、個々のジョイントの挙動に支配される不連続性岩盤の解析に適しているものと思われる。導かれた不連続性岩盤の構成式を有限要素解析コードなどに組み込むことにより、任意の岩盤構造物・荷重条件における岩盤挙動の解析が可能となる。

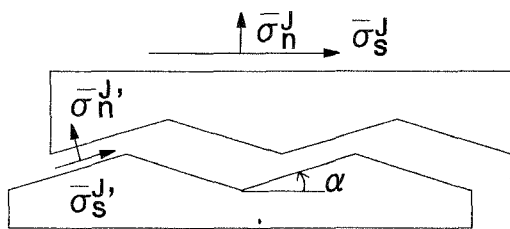


図-1 起伏を有するジョイント

前述の通り、ジョイントを多数含む岩盤において空洞掘削が行われる場合、地山応力解放により生ずるジョイントのせん断すべり・開口が岩盤挙動の支配的メカニズムである。空洞掘削時の空洞周辺の応力場は、掘削に伴って応力が解放されるとは言え、依然として圧縮場にある。圧縮下においてジョイントが開口変形を生ずるメカニズムとして、図-1に示すような起伏を有するジョイントを考える。起伏の方面でクーロンの摩擦条件が満足された時、その面でせん断すべりが開始し、別の面では開口を生ずる。こうしたモデル化を行うこ

とにより、ジョイントの挙動が定式化され、さらにジョイントを包含する岩盤の構成式を導くことができる。

この解析手法の特徴としては、地質調査で得られた不連続面の方向や間隔が直接解析の入力データとなることから、不連続面のせん断・開口量の空間分布が解析結果として得られること、などが挙げられる。岩盤の挙動は不連続面の方向や岩盤に作用している初期地圧の大きさ・方向の組み合わせに依存するが、この解析手法はそのような影響を表すことができる。

## 3. 解析条件

本研究においては、タマゴ型断面の大規模地下空洞の掘削を実施した。空洞は高さ 52.1m、幅 33.0m であ

り、掘削方法としては頂設導坑を掘削後、天井部の切掘げを行い、その後ベンチ掘削を行うものとした。通常の実施工方法に基づく形で、17ステップ逐次掘削解析を行い、解析上の支保としてはP S工（長さ10m、 $10\text{tf/m}^2$ ）を考慮した。初期地圧は鉛直方向12.3MPa、水平方向4.7MPaとし、左側に26度傾斜させた。

解析手順としては、初期応力解析によって求められた節点力を掘削線より解放し、応力解放後にP S工相当の外力を当該箇所を導入、トラス要素を追加する方法を採り、以下順次これを繰り返した。解析に使用したメッシュは図-2に示す通りであり、 $300\times 300\text{m}$ の領域を解析対象とし、節点数2509、要素数2568（2706：P S工導入後掘削終了時）、境界条件は固定した。解析条件は表1にまとめる通りである。

表1 解析条件

	E (GPa)	ジョイント セット *1	ジョイント 有効寸法(m)	平均間隔 (m)	摩擦角度 $\phi$
CASE0	40	---	---	---	---
CASE1	40	L80, R45	5.0	2	30
CASE2	40	L80, R45	10.0	2	30
CASE3	40	L80, R45	2.5 - 10.0	2	30
CASE4	40	L80, R45, R70	5.0	2	30
CASE5	40	L80, R45, R70	10.0	2	30
CASE6	40	L80, R45, R70	2.5 - 10.0	2	30
CASE7	40	L80, R45	5.0	2	40
CASE8	40	L80	10.0	2	30

\*1 L80：左落80度，R45：右落45度，R70：右落70度ジョイントを示す

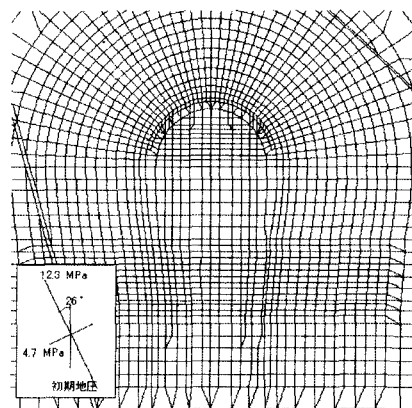


図-2 解析メッシュ

#### 4. 解析結果

以下に解析結果として、掘削完了時最大せん断ひずみ（掘削完了時）と空洞壁面の岩盤変位グラフをそれぞれ図-3、図-4に示す。岩盤変位は、岩盤深部（壁面より20m）に不動点を設定し、その区間の変位量を掘削

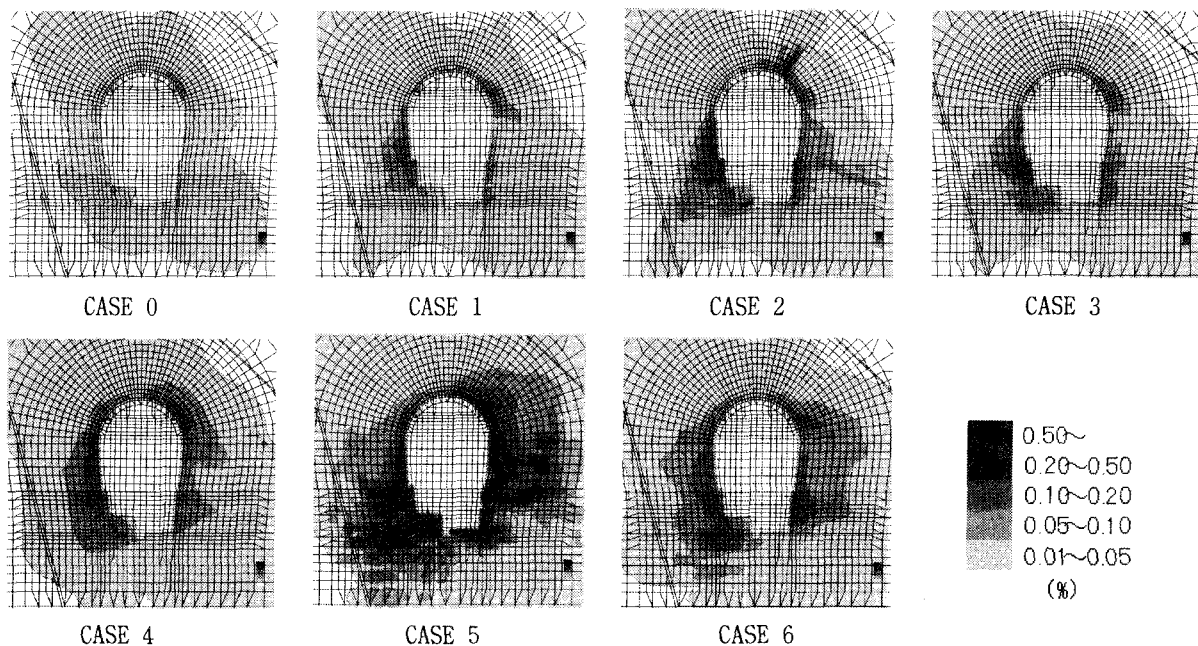
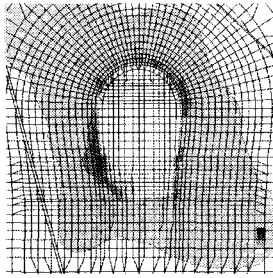
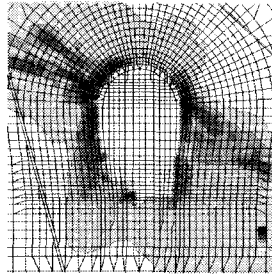


図-3 最大せん断ひずみ



CASE 7



CASE 8

図3 最大せん断ひずみ

ステップ毎グラフに示している。岩盤変位を抽出した位置については、凡例に示す通り、天端、天井部、側壁中部、側壁下部である。ジョイント変位量の分布は省略したが、結果の記述を以下の検討には含めた。

## 5. 各パラメータの影響

### 5.1 摩擦角

○CASE1 - CASE7

ジョイント2セットのケースについて、摩擦角度30度 (CASE1), 40度 (CASE7) を比較した。最大せん断ひずみ、節理のせん断変位量ともほぼ同じ分布形状となっているが、岩盤変位量を比較した場合はその差が大きい。

本解析では、最大圧縮応力が左上-右下であるため、空洞左下部および右肩部 (右天井部) において掘削中に応力集中を起こす。応力集中を生じている個所においては、摩擦角の小さいCASE1はジョイントの変形による影響を受け易い。そのため、左側壁部において30度のケースは40度のケースと比較して2倍程度の変位が認められる箇所も存在する。

### 5.2 ジョイントセット数

○CASE1 - CASE4

2セット (CASE1), 3セット (CASE4) について比較している。CASE4に追加した右落70度ジョイントの影響

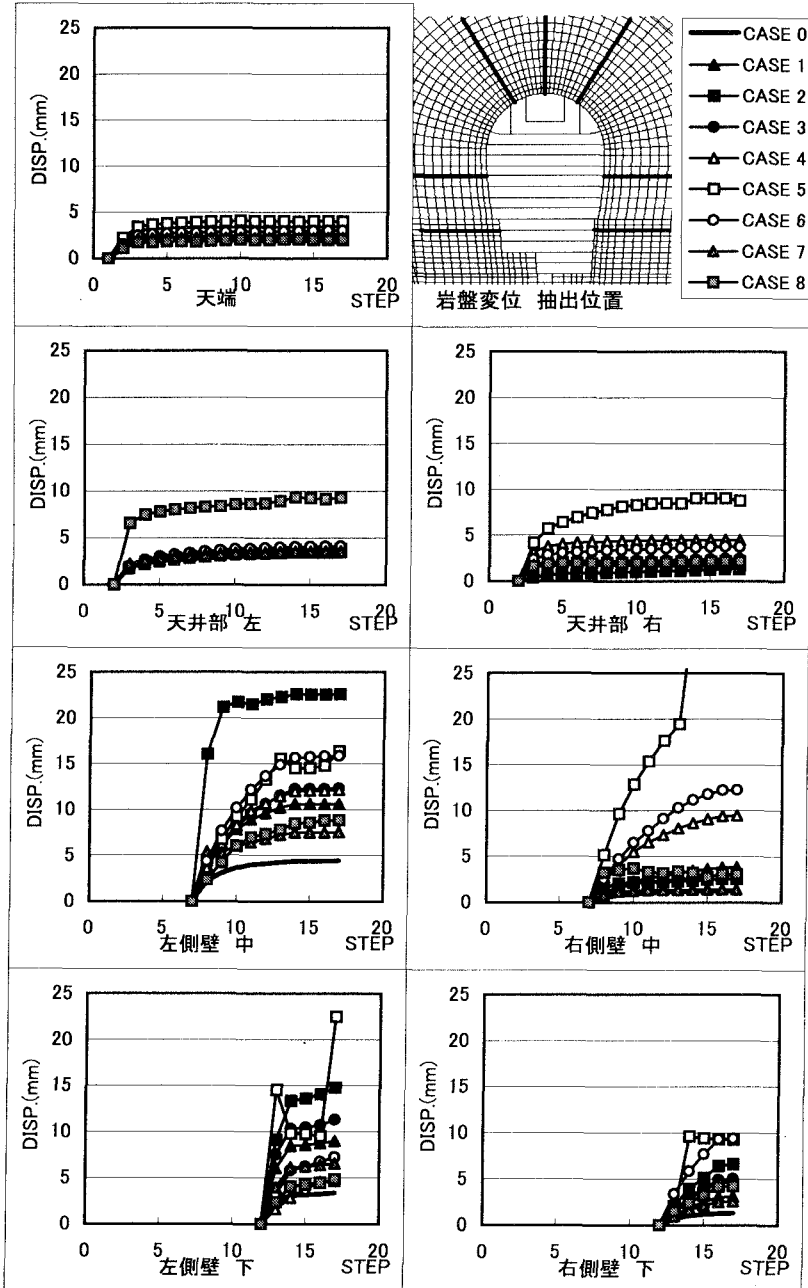


図-4 空洞壁面岩盤変位

響は空洞右側に大きく出ており、右側壁部に最大せん断ひずみ、岩盤変位が大きく広がっている。両者ともに、左に傾いた最大圧縮応力の影響で掘削中に応力集中を生じる空洞左下部、右肩部については、最大せん断ひずみ、岩盤変位ともに大きな値が出ている。CASE1では右側壁の変位は小さな値にとどまっているが、3セットのCASE4については、左側壁、右側壁ともに同程度の変位量を示している。また、天井部掘削時右側肩部ではジョイント3セットのCASE4は岩盤変位が大きい。

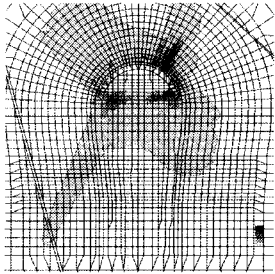


図-5 最大せん断ひずみ  
(CASE2 天井部掘削完了時)

#### ○CASE2 - CASE5 - CASE8

2セット (CASE2), 3セット (CASE5), 1セット (CASE8) について比較する。1セット, 2セットのケース (CASE8, CASE2) では、天井部掘削時に既にジョイント変状に伴う、変形、応力の集中が見られる (図-5)。3セットのケース (CASE5) については、天井部掘削時の応力図は比較的安定しているが、ベンチ掘削時 (12ステップ) で応力分布が乱れており、岩盤変位も大きく増加している。ジョイント長を長く設定した場合では、ジョイントセット数が少ないケースにおいて、ジョイントの変形領域が急速に拡大する傾向がある。

#### ○CASE3 - CASE6

左に傾いた最大圧縮応力の影響で掘削中に応力集中を生じる空洞左下部、右肩部については、最大せん断ひずみ、岩盤変位ともに大きな値が出ているほかに、CASE6には追加した右落70度ジョイントの影響が空洞右側に大きく出ている。2セットのケースでは、左側壁において岩盤変位が大きいことに比べ、3セットのケースでは右側でも大きな岩盤変位が見られる。

### 5.3 ジョイント長さ

#### ○ (CASE1 - CASE2 - CASE3), (CASE4 - CASE5 - CASE6)

掘削途中段階で、応力場が乱れたCASE2, CASE5は考慮から除いて、両者共に当該ベンチ掘削終了後も徐々に岩盤変位量が増加している。これは、当該ベンチ掘削終了後は急速に変位が収束していく弾性解析と異なる傾向であり、ジョイントの発達した岩盤に対して大規模空洞を掘削した場合に見られる現象である。掘削の進行に伴ってジョイント長を長くしているCASE3, CASE6において、その傾向はより顕著に認められる。

## 6. まとめ

摩擦角度の影響は、掘削中に応力集中を生じる領域で顕著に現れる。室内一面せん断試験から得られるデータは、解析に使用する摩擦角度としては大きな値となることわかっているため、トンネル掘削時の内空変位を用いた解析パラメータの同定<sup>3)</sup>を行うなどして、適正な値を使用することが望ましい。また、通常はジョイントセット数を増加させると変位量は増加する傾向にあるが、高地圧下などの厳しい条件下で解析を行う場合、ジョイントセット数が少ないケースにおいて、ジョイントの変形領域が急速に拡大する傾向がある。ジョイント長さ固定のケースと比較して、掘削進行状況に併せてジョイント長を長くしていくケースは、当該箇所掘削終了後の岩盤変位の収束状況が遅く、大規模地下空洞の掘削時岩盤挙動に近い。

### 参考文献

- 1) 吉田秀典, 堀井秀之: マイクロメカニクスに基づく岩盤の連続体モデルと大規模地下空洞掘削の解析, 土木学会論文集 No. 535/Ⅲ-34, 23-41, 1996
- 2) 吉田秀典, 堀井秀之, 打田靖夫: マイクロメカニクスに基づく岩盤の連続体モデルによる大河内発電所空洞掘削の解析と計測値との比較, 土木学会論文集 No. 547/Ⅲ-36, 39-56, 1996
- 3) 吉田秀典, 日比野繁信, 堀井秀之, 工藤奎吾: トンネル掘削時の内空変位を用いた解析パラメータの同定法, 土木学会論文集 No. 596/Ⅲ-43, 11-27, 1998