

(60) マイクロメカニクスに基づく岩盤の連続体モデルと 地下発電所空洞掘削の解析

○東京大学 学生員 吉田秀典 東京大学 正 員 堀井秀之
東電設計 正 員 宇野晴彦 東京電力 正 員 前島俊雄

Micromechanics-Based Continuum Model of Rock Masses and Analysis of the Excavation of Power Station Cavern

University of Tokyo Hidenori YOSHIDA University of Tokyo Hideyuki HORII
Tokyo Electric Power Service Company Haruhiko UNO Tokyo Electric Power Company Toshio MAEJIMA

An analytical method that can grasp the behavior of rock masses properly is necessary in order to establish a rational method of design and construction control for large-scale underground excavation more safely and economically. In the case of underground excavation, sliding and opening of joints due to stress relaxation during excavation are considered to be the governing mechanism of behavior of jointed rock masses. In the present study, a micromechanics-based continuum model of rock masses is proposed and an analytical method of underground excavation is developed. To estimate the performance of the proposed method, a problem of excavation of a power station cavern is analyzed and results are compared with measurement data. Characteristic features of displacement distribution, changes in tensile forces in pre-stressed anchorage bars during excavation process are captured by the present method.

1 はじめに

大規模地下発電所空洞の掘削においては、掘削にともなう地山応力解放や岩盤の強い異方性などにより、複雑な岩盤挙動を示すことがしばしば見受けられる。節理の多く介在する不連続性岩盤においては、空洞掘削による応力解放に起因するジョイントのせん断すべり・開口が、このような岩盤挙動の支配的メカニズムであると考えられる。大規模地下発電所建設の空洞掘削解析に、より高い精度・確度が求められる場合、その解析手法はこうしたジョイントの挙動・現象を反映したものでなくてはならない。しかしながら、ジョイントの数は膨大であり、ジョイントを個別に扱うことは到底不可能であり、ジョイントの挙動を考慮に入れた岩盤の連続体理論が必要となる。

マイクロメカニクスに基づく連続体理論は、マイクロクラック、不均一介在物などの微視構造要素の存在、あるいはその発生・成長に支配された物体の力学的挙動に対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、その挙動に基づき平均化操作を行うことにより等価な連続体としての挙動、すなわち構成式が導かれる [1]。これは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。

Cai と Horii [2] はジョイントの変形に着目し、マイクロメカニクスに基づいてジョイントを多数有する岩盤の連続体モデルを提案している。このモデルは、ジョイントの力学的特性に加えて密度・方向・連結性を考慮出来る新しい構成モデルであり、主として平板載荷試験など、緩んだ岩盤に載荷をする問題の解析に適している。しかしながら、前述の通り、空洞掘削過程においてジョイントは応力解放によりせん断すべり・開口を生ずるため、新しいモデルが必要となる。そこで、本研究ではこれに変更を加え、ピーク前のジョイントの変形は考慮せず、ピーク後の状態にある破壊するジョイントを含む岩盤の構成式のモデル化を行った。ここでは、このようなマイクロメカニクスに基づく連続体モデルを MBC モデル (Micromechanics-Based Continuum Model) と呼ぶことにする。MBC モデルの適用性を検討するために、解析例として、東京電力塩原発電所の地下発電所空洞掘削解析を行い、実測結果と解析結果を比較する。

2 マイクロメカニクスに基づく連続体モデルの概要

ジョイントを有する岩盤の応力—ひずみ関係は、代表要素 (R.V.E) 内の応力とひずみに対して平均操作をすることにより得られる。一般に岩盤の力学的応答は非線形であるため、その関係を増分方程式で表すと、

$$\Delta \varepsilon_{ij} = D_{ijkl}^R \Delta \sigma_{kl} + \frac{1}{2V} \sum_m \int_{\Omega^m} (\Delta [u_i^{(m)}] n_j^{(m)} + \Delta [u_j^{(m)}] n_i^{(m)}) dS, \quad (1)$$

となる。ここで、 V は代表要素の体積、 D_{ijkl}^R は基質岩盤のコンプライアンステンソル、 Ω^m は代表要素 V の m 番目のジョイント面、 n_i はジョイント面での単位法線ベクトル、そして $[u_i]$ はジョイント面での変位の不連続量 (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 $\Delta \sigma_{ij}$ の関数として与えられるならば、式 (1) より岩盤の構成式が、

$$\Delta \varepsilon_{ij} = \bar{D}_{ijkl} \Delta \sigma_{kl}, \quad (2)$$

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。

ジョイント面における相対変位増分 $\Delta [u_j]$ を平均応力増分 $\Delta \sigma_{ij}$ の関数として表すために、岩盤中におけるジョイントの挙動を以下のようにモデル化した。岩盤中でジョイントは局所的に見れば直線的であるが、巨視的には完全に平面ではなく、大きな周期の起伏を有しているものと考えられる。そこで図 1 のようにのこぎり歯型をしたジョイントを考える。ジョイントの変形は、一方の面におけるせん断すべりにより生じ、この場合、他方の面が開口し、ストレスフリーになるものとする。ジョイントのせん断すべりを生ずる条件としては、クーロンの破壊条件を採用した。ジョイントの相対変位量はジョイントを包含する岩盤によって定まるため、ジョイントを包含する岩盤の剛性を評価する必要がある。そこで岩盤と等価な均質材料にある 1 つのジョイントを考え、これに系の剛性 [2] という概念を導入し、岩盤の剛性を評価する。これより、ジョイントの相対変位増分が応力増分の関数として求めることができ、最終的に岩盤の巨視的接線コンプライアンスが得られる [1]。

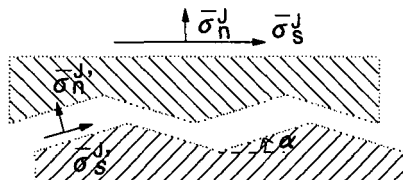


図 1: 起伏を有するジョイント

3 塩原発電所の概要と解析パラメータ

東京電力塩原発電所の地下発電所空洞は高さ 51m、幅 28m、長さ 163m、土被りが 200m の地下に位置し、その初期地圧はほぼ地山被り相当の 50kgf/cm² 程度である。発電所周辺の岩盤の地質は流紋岩類を主体としており、これに凝灰角礫岩が混在分布している。斑状流紋岩、及び流紋岩は岩質境界面 (WNW-ESE 走向・南急傾斜) と平行な板状節理とこれに直交する柱状節理が発達しており、板状節理の間隔は 50~200cm、柱状節理の間隔は 5~100cm であり、特に流紋岩は柱状節理の発達が顕著である [3]。図 2 は流紋岩類における節理密度分布を示しているが、掘削による空洞側壁のはらみ出しなどに関しては、走向が発電所坑軸 (ほぼ N40E) と直交する節理 (例えば、N60W65S) の影響は小さいものと考え、走向が発電所坑軸と平行である節理 (例えば、N25E60S、N30E30N や N40E60N) を解析で考慮する卓越ジョイントセットとした。解析は掘削断面に対する 2 次元解析であるので、解析で考慮する卓越ジョイントの傾斜を左落ち 30 度 (N40E60N)、左落ち 60 度 (N40E60N)、及び右落ち 60 度 (N40E60S) とし、その走向は発電所坑軸に平行とみなした。ジョイントの平均間隔としては、前述の柱状節理の節理間隔と節理密度図を参考に、右落ち (60SW) のジョイントを 30cm、左落ち急傾斜 (60NW)、及び左落ち緩傾斜 (30NW) をともに 100cm と定めた。その他のジョイントのパラメータに関しては、過去に行った解析結果と計測値の比較、及び掘削規模などより定め、表 1 にまとめて示した。

岩盤試験より得られた掘削現場周辺の岩盤の弾性係数と初期地圧の結果を 2 に示す [3]。これより、本解析では、卓越するジョイントを除いた、連続体として取り扱われる基質岩盤の弾性定数 E を 30000kgf/cm² とし、

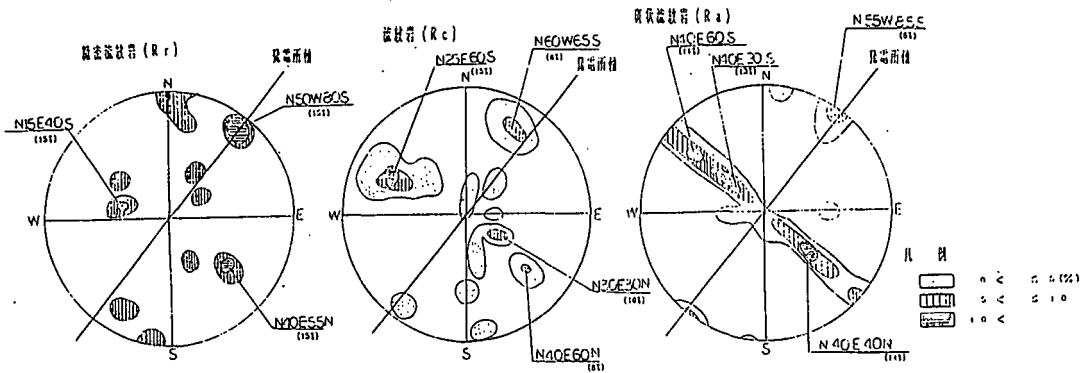


図 2: 流紋岩類節理密度図 (南半球投影)

表 1: ジョイントの物性パラメーター

表 2: 岩盤・岩石の特性 [3]

傾斜	左落ち 30 度	左落ち 60 度	右落ち 60 度
走行	空洞軸平行	空洞軸平行	空洞軸平行
有効長さ (L ²)	5.0m	10.0m	10.0m
平均間隔 (d)	1.0m	1.0m	0.3m
摩擦角度 (φ)	35 度	30 度	25 度
起伏角度 (α)	5 度	5 度	5 度

試験項目	物性値
弾性係数 (kgf/cm ²)	30,000~50,000
初期地圧 (kgf/cm ²)	
第 1 主応力 (σ ₁)	51(N167°W、下向き 61°)
第 2 主応力 (σ ₂)	40(N 3°W、下向き 28°)
第 3 主応力 (σ ₃)	29(N 91°E、下向き 7°)

ポアソン比は 0.25 と仮定して用いた。解析は掘削断面に対して 2 次元平面ひずみの条件下で行うため、表 2 の 3 次元応力から座標変換を行って空洞断面における 2 次元応力を計算し、地山の初期応力は最大主応力が 48kgf/cm²、最小主応力が 36kgf/cm²、最大主応力の方向は鉛直方向に対して左に 15 度という値を解析に用いた。

本解析では、支保工としてアーチコンクリートと PS 工を考慮に入れた。解析においては、PS アンカーの定着部に PS エlement を加える。そして、初期緊張力を集中荷重として定着部端点と壁面に作用させ、それからその 2 点間に PS エlement を追加する。解析におけるアーチコンクリートと PS 工の導入方法、及びその解析パラメータはすべて実際の施工にしたがった。

4 有限要素解析

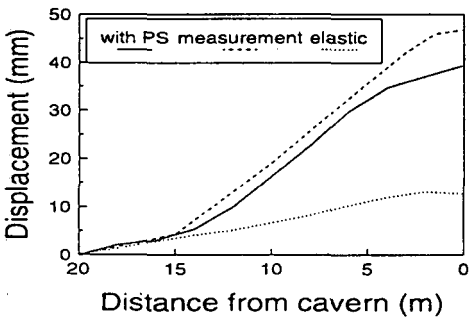


図 3: 地中変位量 (全断面掘削後、DI14)

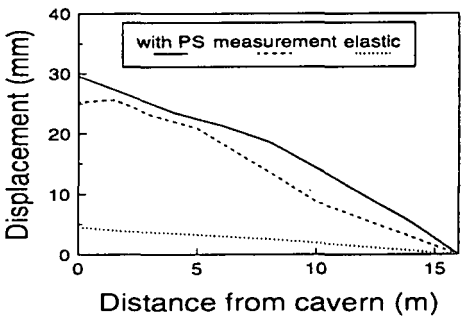


図 4: 地中変位量 (全断面掘削後、DI12)

まず、地下発電所空洞の各掘削段階ごとの岩盤の地中変位量の計測結果と解析結果の比較を行った。図 3 に

鉄管路側(左側)アバット付近、そして図4に放水路側(右側)空洞中腹付近における、全断面掘削後の空洞側壁からの距離と岩盤の地中変位の関係を弾性解と併せてプロットした。PS工を打設した場合の解析結果は、ほぼ全ての掘削段階で計測値と一致をみており、実際の掘削に伴う変形挙動が表現されている。

次に、掘削に伴い変化するPSアンカーの軸力について、計測結果と解析結果の比較を試みた。鉄管路側のアバット付近と放水路側空洞中腹付近における、掘削段階ごとのPSアンカーの軸力をそれぞれ図5と図6に示した。PSアンカーのストランド一本当り(4ストランドで1組)の初期導入力は、実際の施工にしたがい24tとした。この場合も岩盤の地中変位量と同様、ほぼ全ての掘削段階で計測値と解析値は定性的、及び定量的に一致をみており、解析は実際の軸力変化を表現できていることがわかる。

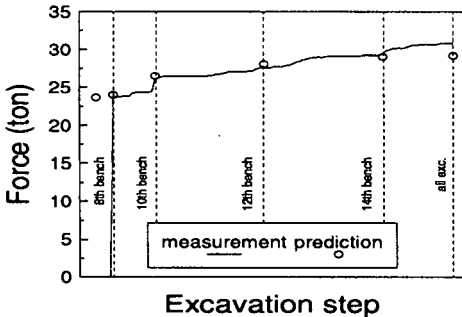


図 5: PS 工軸力の経時変化 (DP09)

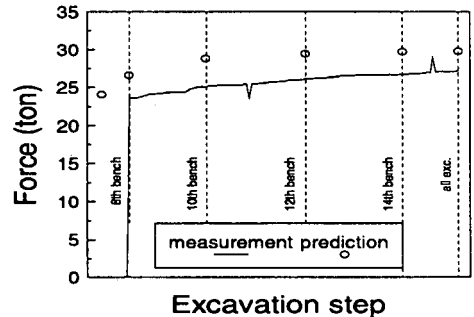


図 6: PS 工軸力の経時変化 (DD08)

本解析手法の特徴の一つは、ジョイントのせん断・開口変位量の分布を得ることができる点にある。解析では、空洞掘削にともなう応力解放によってジョイントの変形(せん断すべり・開口)が生じ、その変形量は掘削段階が進行するにしたがって増大する。全てのジョイントセットにおいて、空洞周辺で大きな変形がみられたが、変形を生ずる領域、及びジョイントの変形量はジョイントの方向と初期地圧の方向の組合せやジョイントの物性パラメータに依存する。一例として、全断面掘削後の右落ちジョイントの開口変位量を図7に示した。本解析では、鉄管路側の空洞側壁周辺、及び放水路側の天端部で大きな開口変位が計算より求まっている。

5 まとめ

本研究では、破壊するジョイントを含む岩盤の構成式をマイクロメカニクスに基づいて導き、それを有限要素解析プログラムに組み込むことにより、任意の岩盤構造物に対する空洞掘削解析を可能にした。解析プログラムの適用性を検討するために、東京電力塩原発電所の地下空洞掘削の解析を行い、計測結果と解析結果の比較を行った。本論文では、岩盤の地中変位量とPSアンカーの軸力変化の結果を比較例として取り上げたが、解析結果は定性的、ならびに定量的に計測結果を表現出来ており、開発した解析手法はこれら不連続性岩盤での挙動評価に適用出来るものと思われる。

また、本解析手法は個々のジョイントの挙動を捉えた連続体解析手法であり、卓越するジョイントセットの走向・傾斜やジョイントの有効寸法・平均間隔の情報を入力データとして直接、解析に反映することができ、また、解析結果として、空洞側壁のはらみ出しなどの岩盤変形量だけでなく、同時に、ジョイントのせん断・開口変位量の分布が得られる。

解析に用いる入力データは卓越するジョイントを除いた連続体として取り扱われる基質岩盤の弾性定数とポアソン比以外にジョイントの有効長さ、ジョイントの平均間隔、ジョイントの走向・傾斜、ジョイントの摩擦角、及びジョイントの起伏を表す角度である。例えば、ボアホールカメラを用いればジョイントの平均間隔や走向・傾斜を決定でき、また、コアに現れたジョイント面を用いて摩擦角を測ることが出来る。ジョイントの

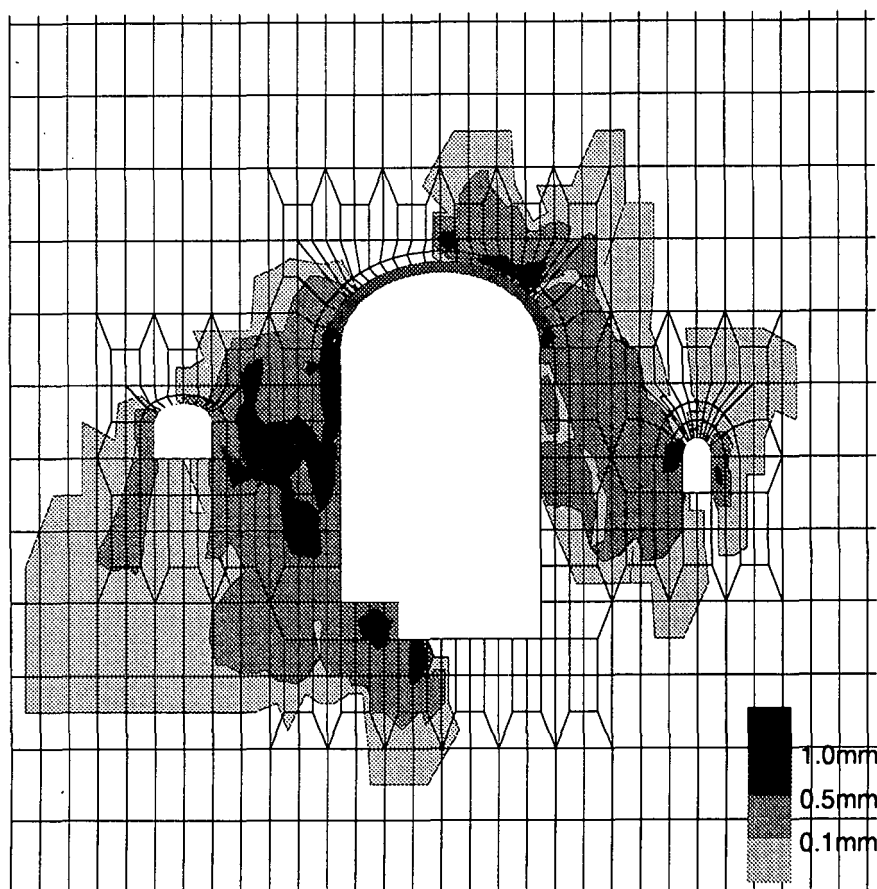


図 7: ジョイントの開口変位分布 (全断面掘削後、右落ち 60 度、PS 工有)

有効長さ、起伏角、及び卓越するジョイントを除いた基質岩盤については計測することは出来ないが、先行するトンネル掘削を応力解放原位置試験と捉え、文献 [4] で提案する解析パラメータの同定方法より決定できるものと思われる。

参考文献

- [1] 吉田, 堀井. 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, 土木学会論文集投稿中
- [2] Cai M. and Horii H. A constitutive Model of Highly Jointed Rock Masses, *Mechanics of Materials*, 13, pp.217-246 (1992)
- [3] 前島, 伊東. 1,500m²の大断面空洞を掘る<蛇尾川揚水式地下発電所>, トンネルと地下, pp7-15, 第 22 巻 8 号 (1991)
- [4] 吉田, 林, 堀井. トンネル掘削時の内空変位の計測結果による解析パラメータの同定, 第 26 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集掲載予定, (1995)