

Ⅲ-B211 大規模地下空洞掘削解析における基質岩盤物性の設定方法の提案

東電設計 正会員 大森剛志 田坂嘉章 宇野晴彦
東京電力 正会員 秋元賢吾 工藤奎吾

1. はじめに

地下発電所などの大規模地下空洞の掘削時岩盤挙動を予測するにあたっては、掘削時の岩盤挙動を再現できる解析手法を開発するとともに、その解析に必要な入力パラメータの設定方法を確立させることが重要となる。空洞掘削解析に必要な入力パラメータは、空洞掘削時の応力状態を考慮して設定する必要がある、空洞掘削時の応力径路を考慮した原位置三軸試験¹⁾や大規模地下空洞掘削に先行して実施される中規模の周辺坑の掘削を応力解放試験として捉え、その時の岩盤計測結果に基づいて入力パラメータを同定する方法²⁾が有効であると考えられる。本研究では、原位置三軸試験の実施が困難な場合や中規模の周辺坑掘削が行われていない初期設計段階において、節理の破壊を考慮したひずみ軟化FEM解析手法³⁾における基質岩盤の入力パラメータを通常実施される原位置試験の結果に基づいて設定する経験的な方法について提案する。

2. 基質岩盤のモデル化

提案した解析手法³⁾は、基質岩盤のひずみ軟化挙動と一方向に卓越する節理の破壊を考慮できることが特徴である。基質岩盤は、図-1に示す連続性の高い卓越節理を取り除いた無指向性のランダムな節理が介在する岩盤を対象とし、破壊に至るまでの変形挙動の非線形性は、図-2に示す非線形パラメータ a, b と破壊余裕度 R を用いて表現している。

3. 岩盤の変形特性と大規模地下空洞掘削時の変形挙動

地下発電所空洞の掘削解析に用いる変形特性は、通常、平板荷重試験で得られた土被り圧相当の応力レベルにおける除荷時接線弾性係数の平均値が用いられるが、この値を用いた解析変位と計測変位との対応は必ずしも良好とは言えない。図-3は、既設の約20の地下発電所地点における空洞最終掘削状態の側壁部の計測変位を説明し得るFEM解析に与えた等価弾性係数 E_{eq} と平板荷重試験から求めた除荷時接線弾性係数 E_t の比率を空洞寸法との関係⁴⁾でまとめたものである。大規模地下模空洞では、 $E_{eq}=0.6E_t$ に近い値となっている。図中の泥岩優勢地質の葛野川地点⁵⁾の等価弾性係数は、卓越節理を考慮しない等方性岩盤モデルを用いて破壊までの変形特性を線形弾性($a=1.0, b=0$)としたFEM解析により得られた空洞側壁部の岩盤変位を説明し得る E_{eq} を求めた結果であるが、解析においてひずみ軟化特性を考慮しているため、図中の回帰線よりも大きい E_{eq}/E_t の値が得られている。このときの岩盤変位分布は、図-4に示すように解析値がアーチ部の計測変位量を過大評価しているものの、空洞側壁部では解析値と計測値の対応は概ね良好である。

図-5は、通常の三軸試験で実施される最小主応力 σ_3 一定および空洞掘削時の応力径路に近いと考えられる平均主応力 $\sigma_m=(\sigma_1+\sigma_3)/2$ 一定条件下の節理の破壊進展に着目したDEMによる荷重シミュレーション結果⁶⁾である。解析モデルは、図中に示すようにvoronoi分割により無指向性のランダム節理を模擬している。同図から σ_m 一定の荷重条件には強い変形挙動の非線形性が認められる。図-6は、 σ_m 一定の荷重条件での花崗岩を対象とした原位置岩盤三軸試験で得られた変形特性であり、文献¹⁾における試験結果を本研

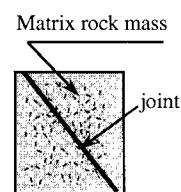
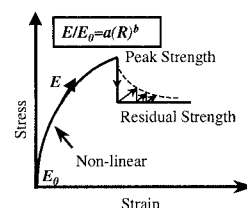
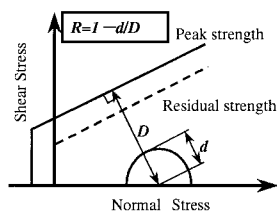


図-1 節理性岩盤

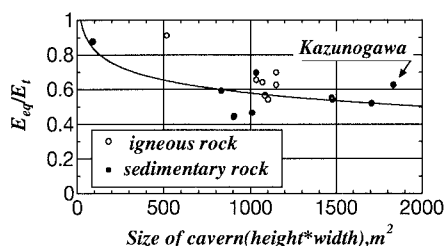


(1) 応力～ひずみ関係



(2) 破壊条件と破壊余裕度

図-2 基質岩盤のモデル化

図-3 E_{eq}/E_t と空洞寸法の関係⁴⁾

キーワード：大規模地下空洞、掘削解析、FEM、基質岩盤、入力パラメータ

連絡先：〒110-0015 東京都台東区東上野3-3-3 東電設計上野センター TEL03-5818-7796 FAX03-5818-7608

究で定義している破壊余裕度 R を用いて再整理した結果である。同図からも空洞掘削時の応力経路を考慮した試験結果に強い非線形性が現れていることがわかる。

このような非線形性を考慮して、 $a=b=1.0$ として解析した結果が図-7であり、アーチ部、側壁部ともに解析値は計測を概ね再現している。なお、ここでの解析では、当該地点の卓越節理群（右落ち70°傾斜）を考慮していない等方性岩盤モデルを用いているため卓越節理群が流れ目となる鉄管路側（図中左側）側壁部の変位は十分に表現できていない。

4. 基質岩盤の入力パラメータの設定方法

基質岩盤の入力パラメータは強度特性と変形特性であり、強度特性に関しては既往解析事例³⁾から原位置の岩盤せん断試験およびフリクション試験から得られるピーク強度および残留強度の平均値を用いても良いものと判断される。

変形特性については、上記のように非線形性を考慮する必要があるが、空洞掘削時の応力経路を考慮した原位置三軸試験や応力解放試験が実施できない場合には、以下の手順で変形特性に関する入力パラメータの暫定値を経験的に設定することを提案する。

①まず、図-1の E_{eq}/E_t と空洞寸法の関係に基づいて等価弾性係数を求め、破壊までを線形弾性とした等方性岩盤モデルによるFEM解析を行い、空洞側壁部の岩盤変位を予測する。

②次に、破壊までの非線形性を考慮したひずみ軟化FEM解析を行い、①の空洞側壁部の予測変位に見合う初期弾性係数 E_0 および非線形特性 a, b を同定する。

なお、既往の解析事例によると、 E_0 については、平板載荷試験による除荷時接線弾性係数 E_t の上限値を用いればよいことが経験的にわかっており、この上限値は、試験坑掘削時の緩みの影響が少なく、かつ連続性の高い卓越節理群の影響が少ない卓越節理群に平行な載荷方向での平板載荷試験結果となっている。非線形性については、 $a=b=1.0$ が計測値をよく再現できることが経験的にわかっている。

5. おわりに

ここで、提案した基質岩盤の物性設定方法は、初期設計段階の空洞掘削予測解析における経験的なものであるが、詳細設計時の参考データになり得るものと考える。卓越節理を考慮する際の入力パラメータの設定方法は文献⁸⁾を参考にして頂きたい。

参考文献

- 1)土木学会編：地下構造物の設計と施工、pp.86-90、1976。
- 2)日比野ら：トンネル掘削時の計測結果を用いたMBC解析における解析パラメータの同定方法、第28回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.63-67、1997。
- 3)田坂ら：節理の破壊を考慮したひずみ軟化解析手法による地下発電所空洞掘削の解析、第10回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、pp.575-580、1998。
- 4)蔡、宇野：大規模地下空洞掘削時における変形挙動の寸法効果、第27回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.141-145、1996。
- 5)小山、南部、小松崎：地下500mの大規模空洞、東京電力葛野川地下発電所、トンネルと地下、第28巻1号、pp.37-45、1997。
- 6)田坂ら：岩盤の変形特性に及ぼす応力経路の影響に関する一考察、第33回地盤工学研究発表会、1998。
- 7)秋元ら：各種非線形FEM解析手法による大規模地下空洞の掘削解析、第33回地盤工学研究発表会、1998。
- 8)田坂ら：パラメトリックスタディによる大規模地下空洞掘削解析における節理物性の評価、第53回土木学会年次学術講演会、1998。

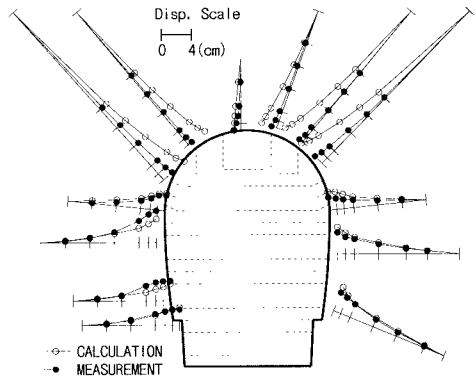


図-4 破壊までを線形弾性としたFEM解析による岩盤変位分布（葛野川地点C断面⁵⁾）

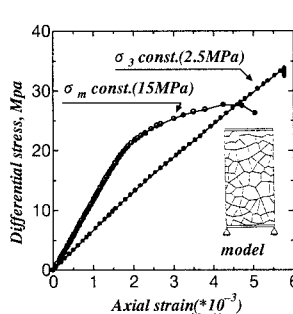


図-5 DEMによる載荷シミュレーション結果⁶⁾

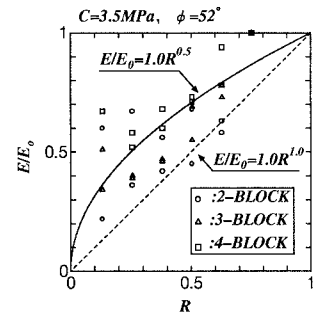


図-6 原位置岩盤三軸試験で得られた花崗岩の $E/E_0 \sim R$ 関係（文献¹⁾の試験結果を再整理）

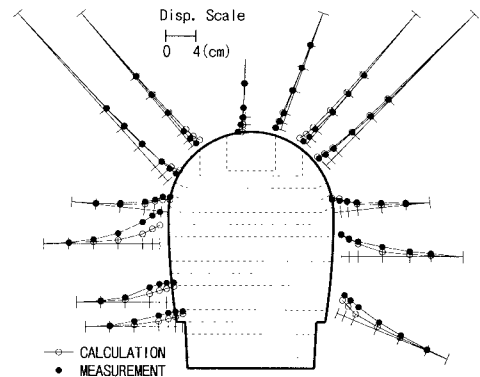


図-7 破壊までの非線形性を考慮したFEM解析による岩盤変位分布（葛野川地点C断面⁵⁾）