

Ⅲ-B213

節理の破壊を考慮したひずみ軟化解析手法による塩原発電所地下空洞掘削解析

東電設計(株) 会員 宇野晴彦 田坂嘉章 大森剛志
東京電力(株) 会員 工藤奎吾 南部茂義

1. はじめに

大規模地下空洞掘削における空洞周辺の岩盤挙動には、岩盤内に介在する節理が大きく寄与するものと考えられる。国内の大規模地下空洞の掘削時挙動を対象とした日比野ら¹⁾の研究によると地下空洞掘削時の岩盤変形は、応力変化に伴う岩盤自体の変位「ひずみ変位」と節理が開くことによる変位「開口変位」からなり、岩盤の全変位量に対する開口変位の割合(以降、開口変位率と呼ぶ)は、岩盤の生成過程に起因して、火成岩系(開口変位率65%)の方が堆積岩系(開口変位率23%)に比べて大きいことが報告されている。

筆者らは、堆積岩系の地下発電所地点を対象として、節理の破壊を考慮したひずみ軟化解析手法を用いて、地下空洞掘削時の挙動予測解析を実施し、計測変位挙動を比較的良好に表現できることを報告²⁾しているが、この解析手法では、節理のせん断変位のみを考慮するようなモデル化を行っており、岩盤の応力変化や節理のすべりによる開口変位が火成岩系岩盤のように岩盤変位の支配的な要因となる場合には、空洞掘削時の岩盤変位挙動を十分に表現できないことも考えられる。そこで、本研究では、開口変位率が岩盤変位に大きく寄与すると考えられる火成岩系の岩盤を対象として、空洞掘削時の挙動解析を実施し、本解析手法の適用性の検討を行った。

2. 解析手法

本研究では、任意の一方向に卓越する節理群と等方的な基質岩盤から構成される節理性岩盤を考える。基質岩盤は、ひずみ軟化材料(軟化過程は無視)とし、節理は、弾-完全塑性と考えた等価連続体としてモデル化した。節理に作用する垂直応力 σ_n ならびにせん断応力 τ_s は、等方性の基質岩盤(要素)の平均応力を節理の方向 θ の極座標に変換した応力成分に等しいと仮定した。また、基質岩盤ならびに節理が引張破壊した場合は、引張破壊に抵抗しないものとし、破壊に伴う応力再配分は、修正 Newton-Raphson 法により収束するまで繰り返し計算を行った。なお、節理と基質岩盤の等価連続体の平面ひずみ条件における応力-ひずみ関係は、節理方向の θ の極座標系において次式で表される。ここで、 E^R, ν^R, G^R は基質岩盤の変形特性、 $S \cdot k_s$ は節理間隔とせん断バネ剛性である。

$$\sigma'_i = D'_{ij} \epsilon'_j \quad (1) \quad [D'] = \frac{\bar{E}}{(1+\bar{\nu})(1-2\bar{\nu})} \begin{bmatrix} 1-\bar{\nu} & \bar{\nu} & 0 \\ \bar{\nu} & 1-\bar{\nu} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{G}{E} \end{bmatrix} \quad (2) \quad \begin{aligned} &\text{ここに、} \quad \bar{E} = E^R, \quad \bar{\nu} = \nu^R \\ &\frac{1}{G} = \frac{1}{G^R} + \frac{1}{S \cdot k_s}, \quad G^R = \frac{E^R}{2(1+\nu^R)} \end{aligned}$$

3. 地質状況および解析条件

塩原発電所の地下発電所空洞は、高さ51m×幅29m×長さ165mの天端にアーチコンクリートを配したきのこ型空洞であり、土被圧が200mの地下に位置し、鉛直応力は土被圧相当の5MPa程度の値を示す。

地下発電所近傍の地質は、新第三紀における火山岩活動により生成された流紋岩類を主体としており、斑状流紋岩および流紋岩が層状分布し、岩種境界面は発電所軸方向に直交する走向で南急傾斜している。この岩盤中の節理は、岩種境界面に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、特に、斑状流紋岩での柱状節理の発達が著しいと報告³⁾されている。そこで、解析断面の変形挙動に寄与する節理のうち、斑状流紋岩および流紋岩で最も卓越する柱状節理⁴⁾(走向：空洞軸平行、傾斜：60S(右落ち))を解析モデルに考慮して解析を実施した。

表-1に解析用物性値を示す。基質岩盤の破壊強度および残留強度は、岩盤せん断試験の平均値を採用し、初期接線弾性係数は、平板載荷試験で得られた除荷時の接線弾性係数の上限値とした。弾性係数の非線形パラメータおよび節理特性パラメータの設定については、文献^{5), 6)}を参考にして頂きたい。

キーワード：有限要素法、節理性岩盤、掘削問題、変形挙動、非線形特性

連絡先：〒1100015 東京都台東区東上野 3-3-3 東電設計上野センター TEL 03-5818-7796 FAX 03-5818-7608

4. 解析結果

解析結果として、図-1 に空洞側壁部の相対変位の観測結果と計算結果の比較および解析結果の破壊領域図を示す。

図-1 によれば、鉄管路側アーチ側壁部直下部の変形挙動を除いては、鉄管路側(左側)、放水路側(右側)ともに変形挙動の経時変化および最終掘削終了時の岩盤内変位分布は、実岩盤挙動と比較的良く一致している。この非対称挙動は、解析で設定した節理方向が鉄管路側側壁に対して流れ目、放水路側側壁に対して差し目となることから流れ目方向のせん断変形特性が低下することにより鉄管路側が大きく変形し、これが実挙動に近い変形挙動となっている。なお、鉄管路側のアーチ側壁直下部の挙動については、計測結果の岩盤変位分布で壁面より深部 5m 付近で不連続挙動が見られることから局所的な不連続挙動があり、本解析手法では表現できなかった可能性が考えられる。また、最終掘削終了時の破壊領域分布では、基質岩盤の破壊領域が鉄管路側で著しく大きな領域となっているが、側壁に対して流れ目となる節理の破壊の影響により基質岩盤の破壊が岩盤深部まで進行したものと考えられる。

表-1 解析用物性値一覧表

基質岩盤	初期弾性係数	$E_0^R(\text{GPa})$	10
	非線形パラメータ	$E/E_0=a(R^R)^b$ R^R : 破壊余裕度	$a=1.0$ $b=1.0$
	ポアソン比	ν^R	0.25
	破壊強度	$C_p(\text{MPa}), \phi_p(^{\circ})$, $\sigma_t(\text{MPa})$	2,24,55.3, 1.55
	残留強度	$C_r(\text{MPa}), \phi_r(^{\circ})$	0.7,52.1
卓越節理	初期せん断剛性	$K_{s0}(\text{MPa/cm})$	$1.0 \times \sigma_{s0}$
	非線形パラメータ	$K_s/K_{s0}=a(R^I)^b$ R^I : 破壊余裕度	$a=1.0$ $b=1.0$
	節理間隔	$S(\text{cm})$	30
	節理方向	$\theta(^{\circ})$	-60
	破壊強度	$C(\text{MPa}), \phi(^{\circ})$	0.45

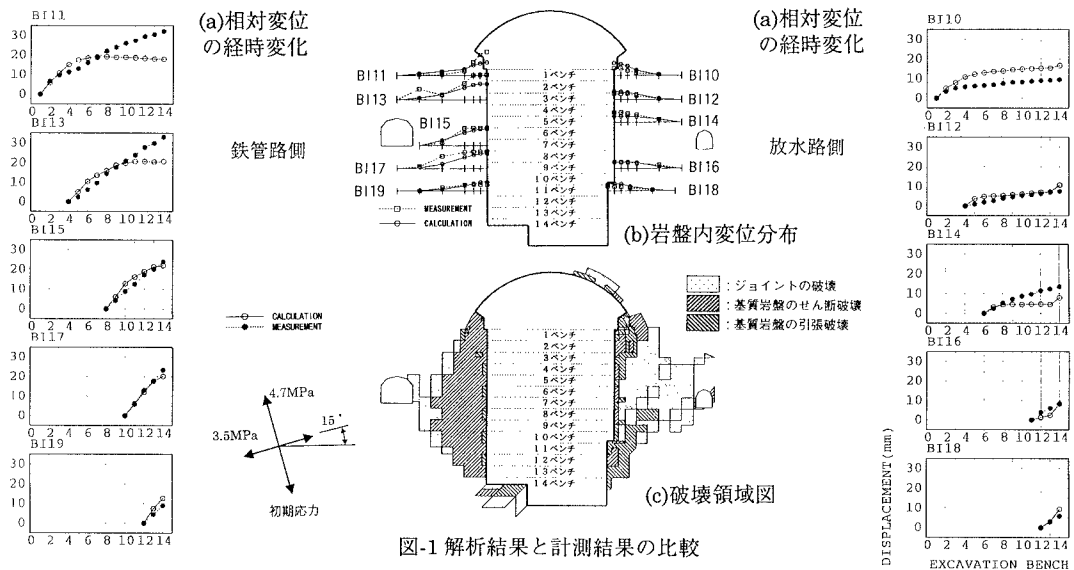


図-1 解析結果と計測結果の比較

5. おわりに

本研究では、火成岩系の岩盤を対象とした大規模地下空洞掘削時の挙動解析を実施し、一部の不連続挙動を除いて比較的良く表現できることが判った。当該地点の BTV 観測によると空洞掘削時の開口変位率は約 50%との報告があり、本解析手法は、開口変位率が大きいとされている火成岩系での岩盤においても適用可能と考えられる。

参考文献

- 1) 日比野、本島：空洞掘削時の岩盤挙動の特性，第 9 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，pp689～694，1994。
- 2) 田坂、宇野、大森、工藤：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，pp557～580，1998。
- 3) 前島俊雄、伊東正幸：蛇尾川揚水発電所—地下発電所の設計と施工実績について—，電力土木，No.232，pp25～35，1991。
- 4) 前島俊雄、伊東正幸：1500m²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，第 22 巻 8 号，pp7～15，1991。
- 5) 大森ら：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，第 53 回土木学会年次学術講演会，1998。
- 6) 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。