文 =

複数の FEM プログラムによる解析結果の比較と考察

—地下発電所空洞掘削工事の場合—

Comparative Study by Several FEM Programs —Excavation of Underground Power Station Cavern—

澤田昌孝(さわだ まさたか) 樹電力中央研究所 主任研究員 田部井 和 人 (たべい かずと) 鹿島建設㈱土木設計本部

1. はじめに

本例題では,岩盤構造物のFEM を用いた解析として 以下に示す既存地下発電所空洞を対象とし,複数の解析 法により掘削時挙動解析を行い,その結果について比較 検討を行った。

結果比較の主な目的は,計算された地中変位などから, それぞれの解析モデル(構成則)の特徴について検討す ること,および事前調査で得られた情報のみに基づく解 析と工事終了までに得られた情報をすべて用いて実施し た解析の比較から,解析による予測の精度に与える情報 量の影響を検討することである。

2. 解析対象の概要¹⁾

2.1 工事概要

対象工事は,地表面下約250 m の位置に,幅25 m, 高さ47 m,延長130 m,総掘削容量94 000 m³の岩盤空 洞を掘削し,空洞内に2台の水車発電機を設置する地 下発電所建設工事である。

地下発電所周辺の地質は、中心噴火型の火山噴出岩で あると考えられ、中生代白亜紀中葉(110百万年〜90百 万年)の流紋岩および同質火砕岩類を主としている。流 紋岩中には流理構造が明瞭に見られる部分が多く、同質 火砕岩である凝灰岩中には明瞭なラミナ、すなわち葉理 構造が見られる。また、ひん岩が南北方向の貫入岩とし て流紋岩および同質火砕岩中に確認されている。

2.2 調査・試験・計測データ

工事前の情報として下記の①~③の調査・試験データ が,工事終了時までの情報として下記の④,⑤の調査・ 計測データが提供された。

岩盤性状

発電所周辺の岩盤は電中研式の岩盤分類によると、地 下発電所周辺では主に $C_H \sim B$ 級の良好な岩盤から形成 されており、ひん岩岩脈の貫入面近傍、破砕帯、変質を 受けた狭い範囲に C_M 級以下の劣化した岩盤が分布して いる。これらの地質・岩級の分布図が作成されている。

② 割れ目分布

岩種別および全体の節理調査結果(節理の走向傾斜) をステレオ投影した節理密度図が作成されている。

③ 岩盤物性・初期地圧データ

事前空洞安定解析に必要となる岩盤の強度定数,変形 係数および地山の初期応力を推定するために横坑を利用 して各種試験が実施されている。

④ 工事中に観測された地質情報・割れ目分布

当地点では,主としてキーブロック解析の入力データ を取得するために切羽,側壁等で不連続面の観察を実施 したが,事前の地質調査結果とは傾向の異なる走向傾斜 の卓越ジョイントが観測されている。また,その他の地 質情報も更新されている。

⑤ 岩盤挙動計測データ

掘削時の岩盤挙動計測に関しては、従来の地下発電所 事例と同様に主計測断面と補助計測断面を設け、その断 面に各種の計器を設置して岩盤の挙動が把握された。計 測断面の位置を図-1に示す。A, B, C 断面は主計測断 面であり, D, E, F, G 断面は主計測断面間の補助計測断 面である。主計測断面では、地中変位、ロックボルト軸 力と PS アンカー軸力を、補助計測断面 PS アンカー軸 力を測定した。さらに PS アンカー軸力に関しては、空 洞内の面的な挙動を把握できるように主・補助計測断面 以外にも面的に多数配置されている。

3. 解析事例

3.1 解析モデルの作成・設定

前章で提供されたデータに基づき,一斉解析への参加 者がそれぞれ自由にモデルを設定・作成することとした。 参加グループは2グループであったが,用いた解析手 法が異なっていた。その主な特徴をまとめると次のよう になる。





図-2 起伏を有するジョイント

表—1 解析用物性值(解析者 A)

解析ケース				A-1	A-2	A-3	根拠
基質	弹性係数	E ₀ (GPa)		24.0	16.0	16.0	平板載 荷試験
	ポアソン 比	ν_0		0.25	0.25	0.25	事例 調査
割 れ 目	傾斜	deg.	1	左 80	左 80	左 80	割れ目 調査
			2	右 80	右 80	右 80	
			3	-	-	右 50	
	寸法	m	1	1.0	1.0	1.0	→ 事例 調査
			2	1.0	1.0	1.0	
			3	-		10.0	
	間隔	m	1	1.0	1.0	1.0	・ 割れ目 調査
			2	1.0	1.0	1.0	
			3	-	-	2.0	
	起伏角	deg.		5.0	5.0	5.0	事例
							調査
	摩擦角	deg.	1	32.4	32.4	32.4	一面
			2	32.4	32.4	32.4	せん断
			3	-	-	25.0	試験

表---2 解析用物性值 (解析者 B)

解析ケース			B- 1	B-2	根拠
弾性係数		E ₀ (GPa)	24.0	16.0	平板載荷試 験
ポアソン比		V ₀	0.25	0.25	事例調査
破	せん断強 度	τ _R (MPa)	2.2	1.3	せん断試験 +事例
~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	引張 強度	σ (MPa)	0.3	0.2	事例調査
約	a		2	2	事例調査
nork	k		3	3	事例調査

(1) 解析者A:マイクロメカニクスに基づく等価連 続体モデル

起伏を有するジョイント(図-2)のせん断・開口を 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、すなわち構成式が求め られる²⁾。基質岩盤の変形特性に加えて、割れ目の傾 斜・寸法・間隔・摩擦角・起伏がパラメータとして必要





図-4 解析用メッシュと初期地圧

となる。

(2) 解析者 B:破壊接近度に基づく非線形弾性モデル モールの応力円が破壊放絡線に接近するに従い,変形 係数が低減するモデルである(図-3)³⁾。地下発電所 空洞の解析への適用例が豊富なモデルである。

解析者 A, B の設定した入力パラメータを表一1および表-2に示す。解析者 A, B とも岩盤の弾性係数,ポ アソン比について B 級および C_H 級の岩盤に場合分けし, 2ケース設定した。さらに解析者 A は工事中に得られ た割れ目データを考慮したケース(A-3)を設定した。

土と基礎, 53—8 (571)



図-5 地中変位計測結果(B断面)

解析者Bは工事中の追加情報を解析モデルに取り入れることはしなかった。

解析メッシュおよび初期地圧は解析者 A, B とも図— 4 に示す標準として提供したものを用いた。

#### 3.2 結果の比較と考察

変位計の実測値を図—5および表—3に示す。B断面 での変形の特徴は、アーチ部、右側壁上部の変形がほと んど見られず、左側壁中断の変形量が極端に大きいこと である。左側壁中断の変形量については、区間変位の分 布と弱層の位置が対応していることが分っている¹⁾。

発電所空洞掘削工事において最も重要視される地中変 位の分布を比較する。比較に用いる変位計は,B断面の 側壁部に設置された五つの変位計とする( $\square - 5$ におけ る B0E6, B0E7, B0E10, B0E11, B0E16)。最終的な変位 計の壁面近傍での値を表—3にまとめる。ともにB級 岩盤を想定したケース1は解析者AとBの間に大きな 差はなく,変位計BE07においてやや差が見られる程度 である。ともに  $C_H$ 級岩盤を想定したケース2において は,B0E7, B0E10, B0E16において解析者A,Bに差が 見られる。A-3においては,追加した割れ目群が広範囲 で開口し,A-1,A-2の結果と比較して2~7倍の変形量 となっている。

計測された値は事前情報のみに基づく解析である A-1, A-2, B-1, B-2 から得られた結果よりも全体的に(特に側壁中段において)大きい。このような乖離が見られた場合は施工中に解析用物性値の見直しを迫られると考えられる。それに対して,工事中に観測された割れ目情報を追加しモデル化した A-3 においては,側壁中段における大きな変形が得られた(空洞全体の変形形状は必ずしも一致していない)。解析者 B の用いたモデルにおいて観測された変形を表現するためには,弾性係数・強

表-3 最終ステップの地中変位解析結果(単位:mm)

解析者	生知		А	В		
ケース	美側	1	2	3	1	2
B0E6	8.2	5.1	7.8	10.0	5.5	8.1
B0E7	0.1	2.3	3.4	14.9	4.5	7.2
B0E10	27.2	6.1	9.1	17.9	6.6	2.2
B0E11	15.2	7.4	10.9	22.0	6.2	9.5
B0E16	19.1	5.3	8.0	14.5	6.8	16.4

度をさらに小さくするように物性値を見直すこととなる が、実務においては、逆解析により地圧・弾性係数を逆 算しながら、モデルを更新するということが実施される。 その作業は、今回の一斉解析の範囲を超えるものである。

また、今回提出された解析結果は、すべて解析領域全体に均一なモデル・物性値を適用している。一方、実際の空洞の変形は、局所的に分布する弱部の影響を少なからず受けていると考えられる。地質断面図等より領域分けし、モデル化することも可能であるが、新規ケースの設定に伴う時間・手間のために実施されなかったと考えられる。施工中のモデル更新を考えると、このような作業を円滑に行えるような支援機能が必要となるだろう。

## 4. 今後の大規模地下空洞掘削時挙動解析に向 けて

地下発電所掘削工事においては,事前解析において, 変形挙動を精度良く予測することは難しい。地下発電所 が建設されるような硬い岩盤では,割れ目の挙動による 変形が卓越するため,それに対応した解析モデルを用い る必要がある。また,事前の調査では,まだ地質・岩級 分布,割れ目分布の精度が十分高いわけではない。その ため,ほとんどの場合,解析モデルを施工中に更新する 必要が出てくる。領域による物性値の設定やメッシュの 更新作業を伴う場合もあり,それらを迅速に実行できる ような施工中の調査,支援システムが求められる。

#### 参考文献

- 1) 手塚昌信:大規模地下空洞の合理的な設計・施工に関す る研究,京都大学学位論文,1997.
- 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空洞掘削の解析,土木学会論文集,No. 535/Ⅲ-34, pp. 23~41, 1996.
- 林 正夫・日比野敏:地下の開削による周辺岩盤の緩みの進展に関する解析,電力中央研究所報告, No. 67095, 1968.

(原稿受理 2005.4.25)