

複合降伏モデルを用いた地下空洞の挙動予測と評価 — 分水第一発電所改良土木工事 —

鹿島建設(株) 正会員 森 孝之, 田部井和人, ○藤原浩一, 松川久俊, 藤井広志, 女賀崇司
四国電力(株) 分水第一発電所改良プロジェクトチーム 河野祐斗

1. はじめに

分水第一発電所は運用を開始して 70 年以上が経過し、主要設備の更新時期を迎えている。また、近年の降雨特性の変化に伴い、設備損壊リスクが高まっていることも考慮し、現在地上にある発電所を地下へ移設する工事を進めている。当該発電所は、片理が発達し、異方性を強く示す黒色片岩地山内にて建設が計画されたため、事前の挙動予測と空洞掘削時の挙動評価に複合降伏モデル^{1) 2)}を適用し、空洞安定性の評価を行った。本稿では、事前予測解析結果および空洞掘削時の計測実績とその評価の概要について報告する。

2. 地下発電所空洞および地形・地質概要²⁾

地下空洞は、周辺岩盤の応力の流れが円滑で力学的安定性が高く、かつ掘削体積を縮減した弾頭形を採用した。

地質は三波川帯に属し、空洞掘削位置には主として黒色片岩が存在する。地下発電所は土被り約 115m に位置し、片理に対し空洞安定性が高くなるよう、片理面傾斜の方向（北落ち約 30°）に空洞横断面方向を直交させた。それにより、空洞横断面において片理面は水平に分布する。また、地形は空洞横断面方向に単傾斜し、空洞周辺には片理面とは異なる方向に連続性の高い小断層が複数存在することも確認された（図-1）。

3. 空洞挙動の予測解析

複合降伏モデルでは、片理面を潜在的な不連続面と見なすことで、黒色片岩の変形と強度の異方性を表現する。事前に実施した各種試験では、載荷方向と片理面との角度の関係により、岩盤の強度・変形特性が大きく異なる傾向が確認されたため、試験結果を基に解析用の地盤物性値を設定した（表-1）。また、空洞挙動に影響を与えると予想される現地条件（“偏圧地形（初期地圧）”や“小断層の存在”）についても、原位置における調査結果を解析モデルに反映した。

予測解析より得られた挙動の特徴を以下に示す（図-2）。

- 1) 初期地圧の作用方向と片理面角度に起因して、片理面沿いのせん断破壊が放水路側アーチ肩部に卓越する。
- 2) 片理面角度に起因して、空洞アーチ天端部では片理面に沿って剥離する現象が想定された。
- 3) 事前調査で発見された片理面と異なる方向に連続する小断層の存在に起因して、ft-11 と ft-12 断層で囲まれた岩盤ブロックが断層沿いに滑動し、放水路側側壁部の変位が増加する現象が想定された。

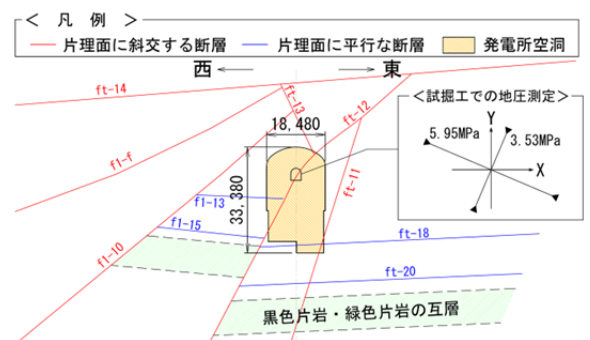


図-1 空洞断面形状および地質横断

表-1 地盤物性値一覧（予測解析時）

	物性値項目	数値	単位	設定根拠
岩盤 基質部	単位体積重量	γ 26.7	kN/m ³	岩石試験
	弾性係数	E_1 12000	MPa	岩盤変形試験
	せん断弾性係数	G_1 5000	MPa	$G_1=E_1/(\sqrt{2} \nu_0+2)$
	ポアソン比	ν_0 0.20	—	岩石試験
	粘着力(せん断強度)	τ_1 3.42	MPa	岩盤せん断試験、岩石試験
	内部摩擦角	ϕ_1 43	°	岩盤せん断試験
	引張強度	σ_{t1} 0.34	MPa	τ_1 の1/10と仮定
不連続面 (片理)	法線方向ばね剛性	kn 8500	MPa/m	$1/E_2=1/E_1+1/dkn$
	せん断方向ばね剛性	ks 3500	MPa/m	$1/G_2=1/G_1+1/dks$
	不連続面間隔	d 1	m	—
	粘着力(せん断強度)	τ_2 1.2	MPa	岩盤せん断試験、岩石試験
	内部摩擦角	ϕ_2 25	°	岩盤せん断試験
	引張強度	σ_{t2} 0	MPa	—
岩盤 (基質+片理)	亀裂角度	θ 0	°	調査坑壁面観察
	弾性係数	E_2 5000	MPa	岩盤変形試験
	せん断弾性係数	G_2 2000	MPa	$G_2=E_2/(\sqrt{2} \nu_0+2)$

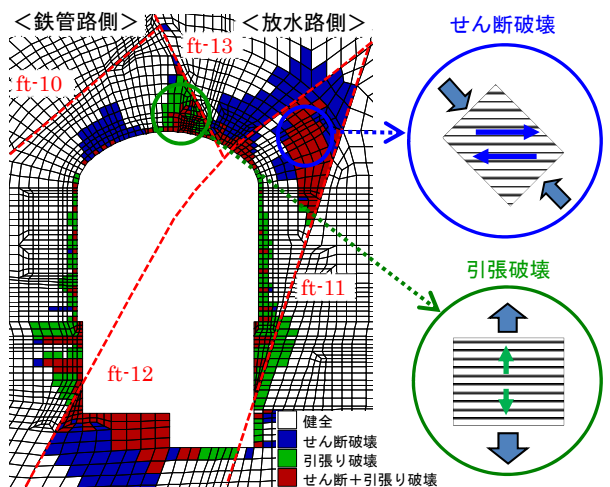


図-2 破壊要素分布図

キーワード 黒色片岩, 複合降伏モデル, 異方性, 地下空洞, 偏圧

連絡先 〒107-8502 東京都港区赤坂 6-5-30 鹿島建設(株)土木設計本部 Tel : 03-6229-6647 Fax : 03-5561-2155

そこで、予測解析で確認された挙動を鑑み、実施工では以下に示す施工上の配慮を行うこととした。

- 1) 空洞を支保する部材は、PS アンカー、ロックボルト、吹付けコンクリートとし、放水路側アーチ肩部に設置する PS アンカーは、キープロックを形成する ft-12, ft-11 断層より外側に定着領域を確保する。
- 2) アーチ部の掘削は頂設導坑を先進した後、放水路側を先行して切抜けることで、破壊の発生しやすい放水路側アーチ肩部を掘削断面形状が小さいうちに支保構造によって安定化させる。

4. 空洞掘削時の計測実績とその評価

空洞掘削手順と支保構造の実績を図-3 に示す。実施工では、A1 完了時、アーチ切抜け完了時、B3 完了時の各段階で、地質観察結果を基に解析モデルを逐一見直したうえで、計測データの再現解析を実施し、空洞の安定性を再評価した。

事前の挙動予測にて懸念されたアーチ掘削時には、片理面と平行方向に連続する新たな断層 (fp-1, fp-1') が出現し、天端沈下が予測を上回る挙動が確認されたが、支保構造を適宜再評価することで、追加補強等を要さず無事に掘削が完了した。一方、ベンチ掘削時に発生した内空変位は、天端沈下と比較して小さく、片理面方向により変形特性が大きく異なることが実空洞レベルで確認された。

ここでは、B3 掘削完了時点に実施した再現解析の結果を基に、黒色片岩の異方性を評価した。掘削完了時点における地中変位計測値と再現解析値を比較すると (図-4)、アーチ左肩部において解析値と実測値とにずれがあり、詳細な地質モデル化の余地が残されているものの、空洞近傍における岩盤の変形挙動は概ね再現できている。再現解析により算出した岩盤の弾性係数は、片理直交方向 $E2=2,000\text{MPa}$ 、片理平行方向 $E1=25,000\text{MPa}$ となり、変形異方性 $E1/E2$ は 12.5 程度であると推定された。事前の岩盤変形試験により得られた片理直交方向と平行方向の弾性係数比 $E1/E2$ は 2.5 程度である。再現解析にて算定された弾性係数は、空洞掘削の影響範囲内に存在する岩盤の見掛けの弾性係数であり、岩盤変形試験により得られた弾性係数と直接的に比較することは難しいが、非常に異方性が顕著な挙動を示していることが確認された。

5. おわりに

空洞掘削時の挙動は、当初の想定どおり異方性が顕著であったが、複合降伏モデルを用いて、黒色片岩の特性を適切に評価したうえで施工管理を行うことで無事に掘削が完了した。空洞掘削完了後は早期に変位が収束しており、空洞の安定性は確保できていると判断している。

今後は空洞掘削完了時の計測データを用いて挙動の評価と考察を進め、当サイトのような異方性が顕著な岩盤内における地下空洞掘削に対する複合降伏モデルの適用性について評価を行っていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 森孝之, 田部井和人, 北村義宜, 斎藤和, 佐々木勝教: 複合降伏モデル(MYM)を用いた異方性岩盤における地下大空洞の解析, 第 42 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.159-164, 2013.
- 2) 山下太久, 森孝之, 藤原浩一, 松川久俊, 藤井広志, 中嶋誠門: 異方性岩盤における地下空洞の挙動予測と評価, 第 44 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.387-392, 2016.

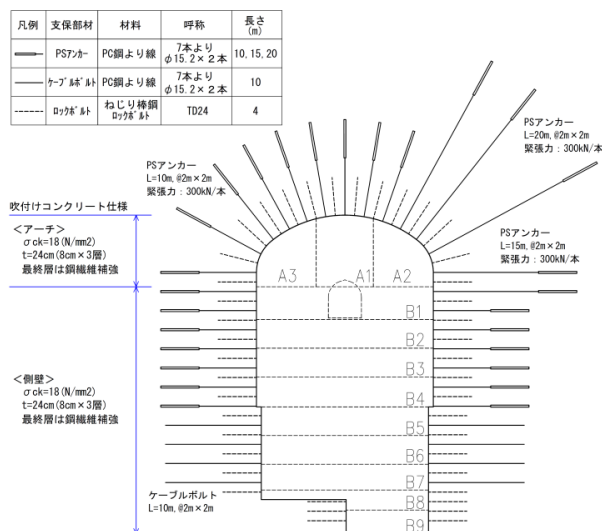


図-3 空洞掘削手順と支保構造図 (実績)

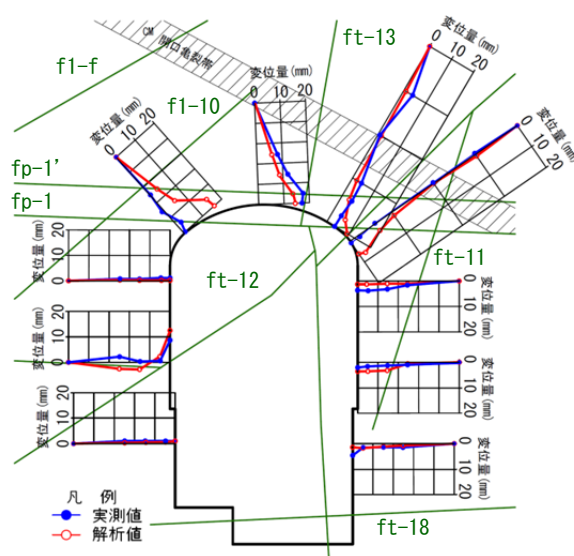


図-4 地中変位分布図