

異方性岩盤における地下空洞の挙動予測と評価

山下太久¹・森 孝之²・藤原浩一^{2*}
松川久俊²・藤井広志²・中畠誠門²

¹四国電力株式会社（〒760-8573 香川県高松市丸の内2番5号）

²鹿島建設株式会社（〒107-8388 東京都港区元赤坂1-3-1）*E-mail:fujiwako@kajima.com

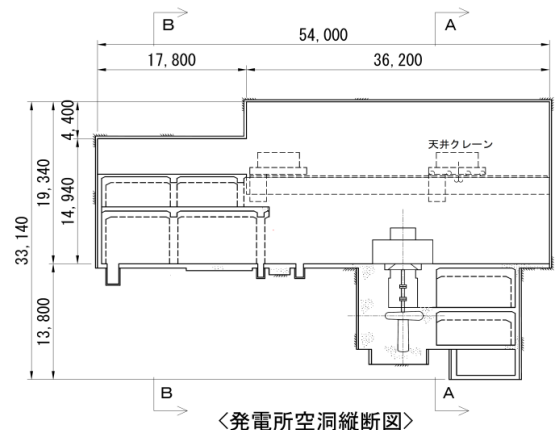
黒色片岩のように片理が発達し異方性を有する地山における地下空洞工事では、空洞掘削時の挙動は剥離性・異方性に支配され、その挙動を精度良く予測評価するための調査・試験手法や挙動予測解析手法の適用が望ましい。検討対象とした分水発電所は異方性の発達する黒色片岩の地山に計画され、空洞掘削時の挙動予測に岩盤の変形・強度異方性を考慮できる複合降伏モデル(MYM)を適用した。そして、空洞掘削に伴う各種計測や地質状況の把握により、挙動実績の再現と予測を実施した。本論文では異方性を有する黒色片岩での地下発電所空洞掘削において複合降伏モデルの適用と異方性挙動の特徴について考察する。

Key Words : Schist, anisotropy, underground rock cavern, numerical analysis, Multiple Yield Model

1. はじめに

分水第一発電所は偏圧の生じる斜面下に建設が計画された。掘削対象の地質は片理が発達し、異方性を強く示す黒色片岩（泥質片岩）である。異方性の発達する地山に地下空洞を建設する際、空洞掘削時の挙動は異方性・剥離性に支配されると考えられるが、従来の等方性モデルでは岩盤挙動を精度良く表現するには限界がある。そのため、片理を潜在的な不連続面と見なし、等価連続体解析法に属す複合降伏モデル(Multiple Yield Model)^{1),2),3)}を空洞掘削解析に適用した。本論文では、事前の挙動予測と空洞掘削時の挙動再現や逐次予測に複合降伏モデルを適用し、空洞挙動の傾向と特徴について考察を加える。

結晶片岩類によって構成され、空洞掘削位置には主として黒色片岩（泥質片岩）が存在する。結晶片岩は結晶が同一方向に配列し、この片理面から岩石が割れ易くなる剥離性を有するため、空洞掘削時の挙動はその異方性・剥離性の影響を強く受けると想定された。



2. 地下発電所空洞および地形・地質概要

(1) 地下発電所空洞

地下発電所空洞は、空洞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。

図-1に地下発電所計画図を示す。掘削寸法は、水車・発電機1基と変圧器、送電開閉設備等の電気設備を設置できる幅18m×高さ30m×延長54mである。

(2) 地形・地質概要

地質は三波川帯に属し、広域変成作用の結果生成された

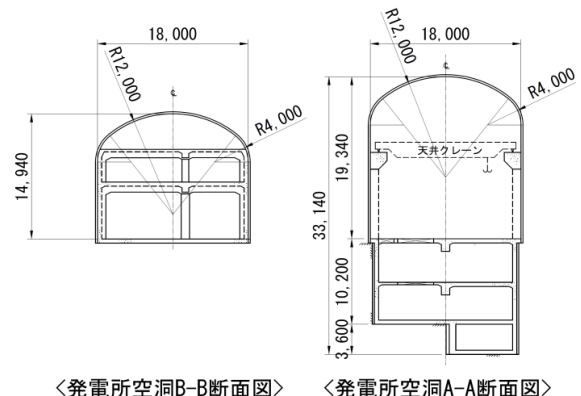


図-1 地下発電所計画

地下発電所は土被り約115mの位置に計画しており、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ることとした。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するとともに、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明らかとなっている。図-2に地質横断面図を示す。

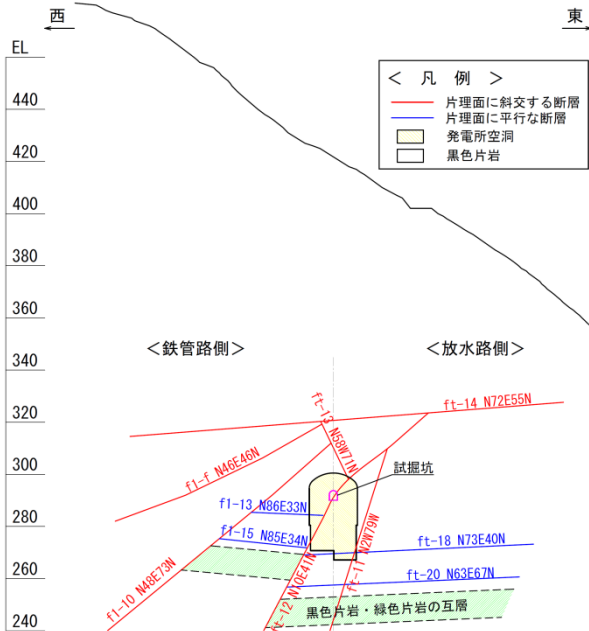


図-2 事前地質調査における地質横断面図

3. 事前地質調査に基づく空洞挙動の予測

(1) 複合降伏モデルによる黒色片岩のモデル化

複合降伏モデル(MYM)は、不連続面を含む岩盤を等価連続体として表現する等価連続体モデルであり、岩盤中の不連続面は、長さが無限で等間隔に平行に存在する平面として、走向・傾斜や変形・強度特性等が同等の不連続面タイプ毎のモデル化が可能である。ここでは黒色片岩の強度・変形異方性を表現するため、片理面を複合降伏モデルの不連続面として取り扱う。

岩盤の変形は図-3に示すように岩盤基質部の変形と各不連続面の変形の和と仮定し、岩盤基質部と各不連続面の応力は等しいとする。

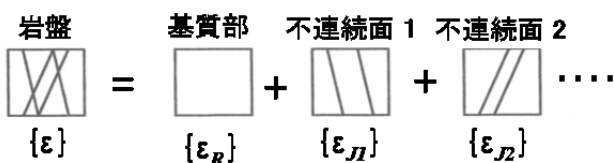


図-3 複合降伏モデル(MYM)のモデル

当モデルでは不連続面を含む岩盤の応力 $\{\sigma\}$ とひずみ $\{\varepsilon\}$ の関係は式(1)のように扱う。

$$\{\varepsilon\} = \sum_m \{\varepsilon_J^m\} + \{\varepsilon_R\} = \left[\sum_m [F_J^m] + [C_R] \right] \cdot \{\sigma\} = [C] \cdot \{\sigma\} \quad (1)$$

ただし、 $[F_J^m]$ ：m番目の不連続面群のコンプライアンスマトリックス、 $[C_R]$ ：岩盤基質部のコンプライアンスマトリックス、 $[C]$ ：不連続面を含む岩盤のコンプライアンスマトリックスである。

不連続面の法線方向バネ定数 k_n とせん断方向バネ k_s は式(2)から求め変形異方性 E_1/E_2 を定義する。

$$k_n = 1 / \left(\frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_1} \right) \quad k_s = 1 / \left(\frac{1}{G_2} - \frac{1}{G_1} \right) \quad (2)$$

また、岩盤の破壊については、基質部と不連続面の両方にMohr-Coulombの降伏関数を適用し、不連続面については引張応力に抵抗しないNo-Tension条件とする。

(2) 黒色片岩の強度・変形異方性

黒色片岩の強度異方性および変形異方性を評価するため、载荷方向と片理面方向とのなす角度が異なる複数の载荷試験を実施した。

強度異方性は、原位置にて採取したボーリングコアの一軸・三軸圧縮試験および試掘坑内で実施した岩盤せん断試験により評価した。片理面角度に対する载荷方向に応じた一軸・三軸圧縮試験結果を図-4に示す。黒色片岩の圧縮強度は、最大せん断応力方向が片理面方向に近づくにつれて低下する傾向が確認された。そのため、J.C. Jaeger⁴⁾が提唱する理論解に基づき、岩盤基質部と不連続面の岩石強度を算出した。設定した岩石強度を図-4に実線にて示しているが、試験値を概ね表現できていることが確認できる。なお、予測解析に用いる強度定数は、岩盤せん断試験と岩石試験（一軸・三軸圧縮試験）の結果を比較し、そのせん断強度比を補正係数として、岩盤基質部および不連続面の岩石強度にそれぞれ乗じることで補正を行った。

変形異方性は、試掘坑内で実施した岩盤変形試験により評価した。試験結果を図-5に示す。黒色片岩の弾性係数は、载荷方向と片理面角度の関係によって異なり、最大で約2.5倍の変形異方性が確認された。予測解析では、空洞周辺の初期応力に相当する応力レベル3～6MPaにおける载荷時および除荷時の接線弾性係数の平均値として、片理直交方向の弾性係数 $E_1=12,000\text{MPa}$ 、片理平行方向の弾性係数 $E_2=5,000\text{MPa}$ を採用した。予測解析に用いる岩盤物性値の一覧を表-1に示す。

(3) その他の現地特性と予測解析結果

前述した黒色片岩の強度・変形異方性に加え、空洞の挙動に影響を与えると考えられる現地特性に“偏圧地形（初期地圧）”と“小断層の存在”がある。試掘坑内で行われた初期地圧測定では、地表の傾斜に沿った方向に主応力が卓越する結果が報告されている。そのため、初期地圧については、実測値を解析に反映した。また、小断層については、ジョイント要素としてモデル化することで予測解析に反映した。

予測解析の結果得られた岩盤の破壊要素分布図および変位ベクトル図を図-6に示す。また、挙動の特徴を以下にまとめる。

- 1) 初期地圧の作用方向（偏圧地形）と片理面の傾斜角に起因して、片理面沿いのせん断破壊が放水路側アーチ肩部の広い範囲で生じる傾向が得られた。
- 2) 片理面の傾斜角に起因して、掘削解放力が片理面と直交する方向に作用する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。

実施工では、予測解析にて確認された挙動を鑑み、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、弾頭形を採用している他の発電所と同様に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、キーブロックを形成する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げることで、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。

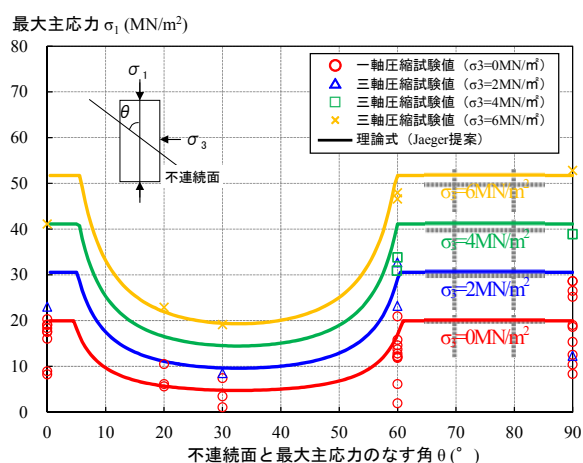


図-4 一軸・三軸圧縮強度試験結果

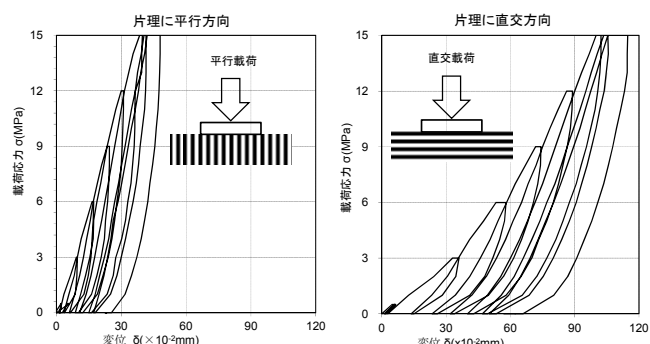


図-5 岩盤変形試験結果

表-1 予測解析に用いた岩盤物性値一覧

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/m³ 岩石試験
	弾性係数	E₁	12000	MN/m² 岩盤変形試験
	せん断弾性係数	G₁	5000	MN/m² G₁=E₁/(2ν₀+2)
	ポアソン比	ν₀	0.20	— 岩石試験
	粘着力(せん断強度)	τ₁	3.42	MN/m² 岩盤せん断試験、岩石試験
	内部摩擦角	φ₁	43	° 岩盤せん断試験
	引張強度	σ₁₁	0.34	MN/m² 岩盤せん断試験
不連続面 (片理)	法線方向ばね剛性	kₙ	8500	MN/m²/m 1/E₂=1/E₁+1/dₖₙ
	せん断方向ばね剛性	kₛ	3500	MN/m²/m 1/G₂=1/G₁+1/dₖₛ
	不連続面間隔	d	1	m —
	粘着力(せん断強度)	τ₂	1.2	MN/m² 岩盤せん断試験、岩石試験
	内部摩擦角	φ₂	25	° 岩盤せん断試験
	引張強度	σ₁₂	0	MN/m² 推定値
	亀裂角度	θ	0	° 調査坑壁面観察
岩盤 (基質+片理)	弾性係数	E₂	5000	MN/m² 岩盤変形試験
	せん断弾性係数	G₂	2000	MN/m² G₂=E₂/(2ν₀+2)

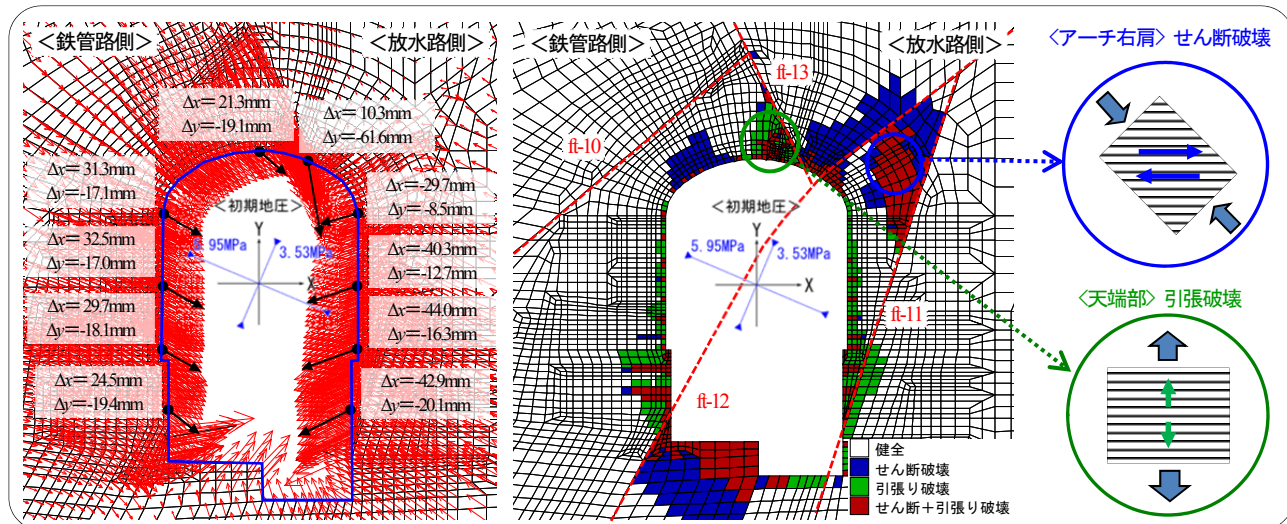


図-6 予測解析結果（岩盤の破壊要素分布図および変位ベクトル図）

4. アーチ掘削時の挙動と考察

(1) 地質観察結果

図-7に空洞天井部の加背割、地質、変位計測図を示す。頂設導坑掘削の初期段階から切羽面に、新たな断層（以下、fp-1断層と称す）が確認された。この断層は、ほぼ水平に分布する比較的規模の大きな断層であり、破碎幅は30～50cmである。このfp-1断層は、分岐断層（以下fp-1'断層と称す）を伴い、頂設導坑掘削中に高角度の節理面とfp-1'断層がキープロックを形成し、天端部の小崩落が発生した。前述のfp-1断層の大部分は空洞天端より上部に位置しており、その分布を直接確認することが出来ない。また、PSアンカー削孔時のノミ下がり測定では、深度8～10mの位置に、軟質部が縦断方向に連続的に確認され、発電所天端周辺には、事前調査では発見することが難しい低角度の断層が存在する可能性が示唆されたため、アーチ切上げ掘削に移行する前にコアボーリング（L=20m）およびBTV（ボアホールテレビ）観察からなる追加調査を実施した。その結果、空洞天端から2m付近にfp-1'断層が、9～13m付近には開口亀裂が発達するクラッキーなCM級岩盤層が分布することが確認された。

(2) 変位計測結果と挙動の特徴

アーチ掘削時における岩盤の変形挙動を天端沈下に着目して考察する。図-7に頂設導坑掘削完了時の計測結果および追加調査を含む地質観察から明らかとなった断層分布を示す。頂設導坑（A1）掘削時の坑内変位は、天端沈下が6.7mm、内空変位が22.4mm発生し、予測値を超過する結果となった。また、天端部に設置した地中変位計測では、壁面から1m-3m間の区間変位量が最大となっており、区間ひずみに換算すると約0.2%であった。これらの挙動は、新たに確認されたfp-1'断層の挙動に起因するものであると推定される。

一方で、アーチ切上げ掘削完了までの天端変位の経時変化図を図-8に示す。図-8にはトータルステーションによる天端沈下計測（A計測）と地中変位計測（B計測）を併記している。天端沈下量はアーチの切上げが進行するに従って増加する傾向を示しており、A計測とB計測の両方でその挙動が観測されている。しかし、地中変位計における壁面変位とA計測を比較すると、A計測において大きな変位量が観測されており、両者の差は、アーチ切上げ掘削の進行に伴い増加している。これは、地中変位計における壁面から10mに位置する測点が動いていることを意味しており、掘削断面積の増加に伴い、周辺岩盤への影響範囲が広がったことに起因する挙動である。なお、地中変位計は計測断面位置に切羽が到達した直後に設置しており、計測開始のタイミングはA計測と同時である。

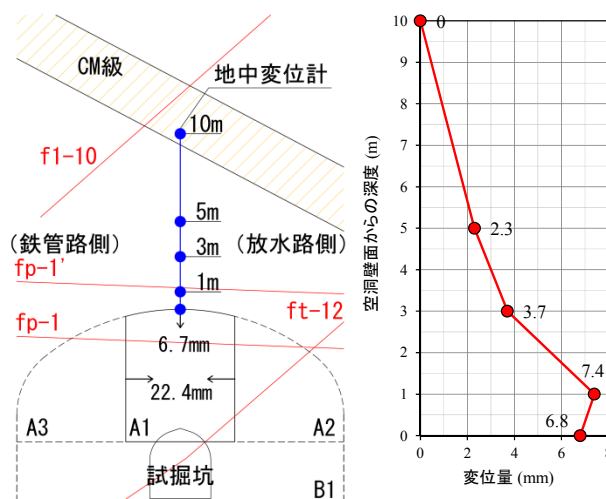


図-7 頂設導坑掘削時の断層分布と変位計測結果

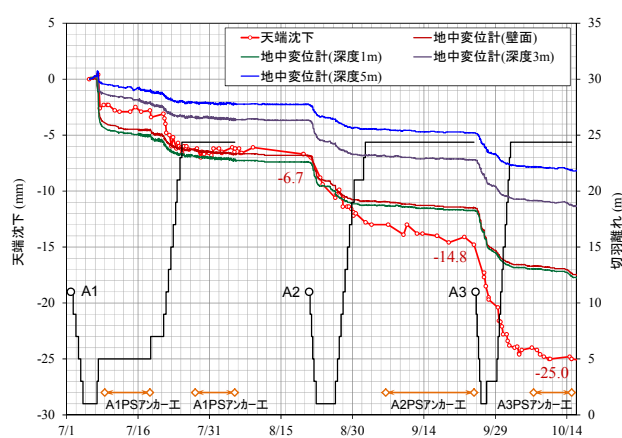


図-8 アーチ掘削時の天端沈下計測結果

5. ベンチ掘削時の挙動と考察

(1) 地質観察結果と空洞周辺の不連続挙動

放水路側アーチ肩部にてキープロックを形成することが懸念されたft-12、ft-11断層の内、ft-11断層は空洞壁面位置で直接観察することはできず、放水路トンネル位置で分布が途切れていることが確認された。空洞掘削完了までの壁面観察により更新された断層分布を図-9および図-10に示す。また、図-9には空洞掘削完了時の地中変位分布を、図-10には区間ひずみ分布を併せて示す。

空洞周辺に存在する小断層の内、fp-1断層とfp-1'断層については、地中変位計測結果から明確な不連続挙動が観測され、fp-1'断層が交差する天端部では0.3%を超える区間ひずみが観測された。一方で、開口亀裂が卓越するCM級岩盤層については、周辺岩盤と比較して特異な挙動は確認されず、アーチ右肩部において観測されたCM級岩盤層の区間ひずみは微小であった。したがって、CM級岩盤層は安定状態にあり、CM級岩盤層付近に定着されている天端部PSアンカーの機能は維持できていると判断した（図-12）。

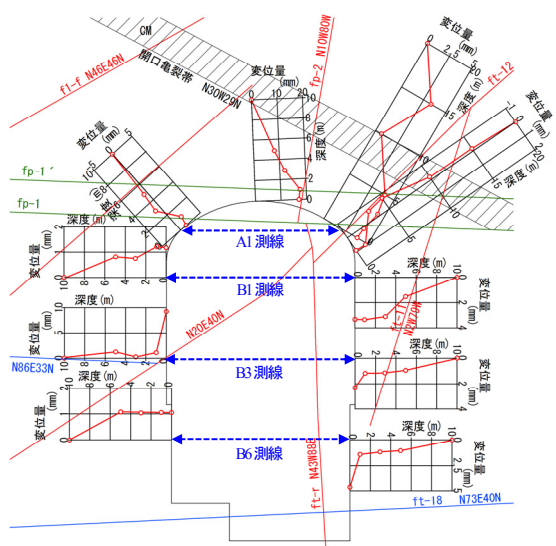


図-9 空洞掘削完了時の地中変位分布図

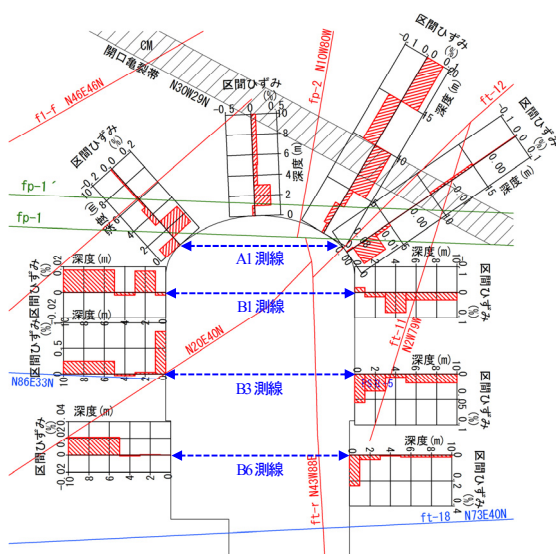


図-10 地中変位計測による区間ひずみ分布図

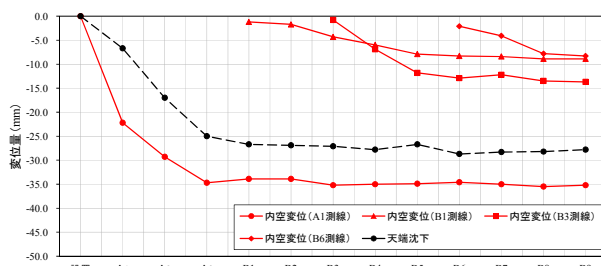


図-11 空洞掘削完了までのA計測結果

(2) 変位計測結果と挙動の特徴

図-11に空洞掘削完了までのA計測結果を示す。天端沈下量はアーチ掘削完了後には収束し、ベンチ掘削時の増分は微小である。また、地中変位計測結果でも明らかに、側壁部の変位量（水平変位）に比べ、天端部の変位量（鉛直変位）が大きい傾向を示している。これは、発電所空洞横断面における片理面の水平構造による異方性に起因した挙動であると考えられる。図-12には、空洞掘削完了時における支保構造の実績を示す。

凡例	支保部材	材料	呼称	長さ (m)
—	PSアンカー	PC鋼より線	7本より φ15.2×2本	10, 15, 20
—	ケーブルボルト	PC鋼より線	7本より φ15.2×2本	10
---	ダイヤフラム	ねじり棒鋼 φ75×8	TD24	4

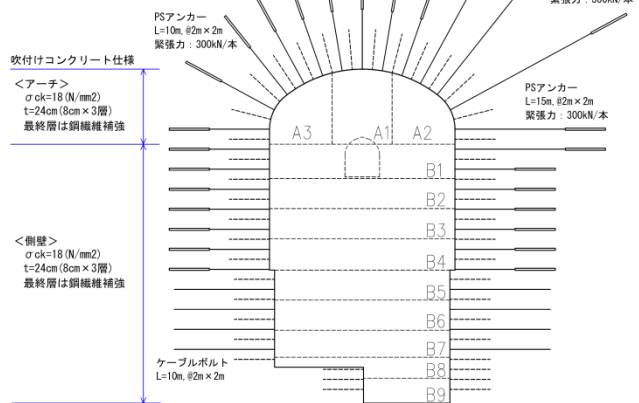


図-12 支保構造図（実績）

(3) 黒色片岩の異方性に関する考察

B3掘削完了時に実施した再現解析を基に、黒色片岩の異方性を考察する。A計測にて確認された壁面変位は、断層と周辺岩盤との変形の和であり、断層の変形を過大評価することは、周辺岩盤の変形を過小評価することに繋がる。そのため、再現解析では、地質観察結果から断層形状を修正するとともに、B3掘削時点で変位量が微小であったf1-10・f1-f断層のモデル化を省略した。

図-13に再現解析結果をまとめる。掘削完了時における岩盤の破壊要素分布図は、事前予測解析の結果と比較して、放水路側アーチ肩部の破壊領域が縮小している。これはf1-11断層の形状修正に伴い、f1-11断層の変形量が減少したことに起因しており、このことから、当初懸念した断層キープロックは安定状態にあると評価できる。

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、発生変位が小さな箇所では、解析値は実測値を表現できておらず、詳細な地質モデル化の余地が残されているものの、天端中央部や鉄管路側（左側）の側壁中段部などの変位の大きな箇所では、実測値と解析値は整合しており、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。

岩盤（黒色片岩）の弾性係数は、片理直交方向の弾性係数 $E_2=2,000\text{MPa}$ 、片理平行方向 $E_1=25,000\text{MPa}$ となり、変形異方性 E_1/E_2 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 E_1/E_2 は2.5程度であり、事前の調査結果と比較して、より異方性が顕著な挙動を示していることがわかる。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。しかし、前述したように地中変位計は掘削影響範囲を全て包含するものではないため、その外側の地質構造に影響を受けた可能性も示唆される。

〈再現解析により算定された解析用物性値〉

物性値項目				設定根拠			
岩盤 基質部	弾性係数	E_1	25000	MN/m ²	逆解析値		
	せん断弾性係数	G_1	10420	MN/m ²	$G_1=E_1/(2\nu_0+2)$		
	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	MN/m ²	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	MN/m ²	岩盤せん断試験		
岩盤 (基質+片理)	弾性係数	E_2	2000	MN/m ²	逆解析値		
	せん断弾性係数	G_2	830	MN/m ²	$G_2=E_2/(2\nu_0+2)$		

物性値項目				設定根拠			
不連続面 (片理)	法線方向ばね剛性	kn	2170	MN/m ² /m	$1/E_2=1/E_1+1/dkn$		
	せん断方向ばね剛性	ks	900	MN/m ² /m	$1/G_2=1/G_1+1/dks$		
	粘着力(せん断強度)	τ_2	1.2	MN/m ²	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	MN/m ²	見込まない		
	不連続面間隔	d	1	m	—		
	不連続面角度	θ	0	°	壁面観察結果		

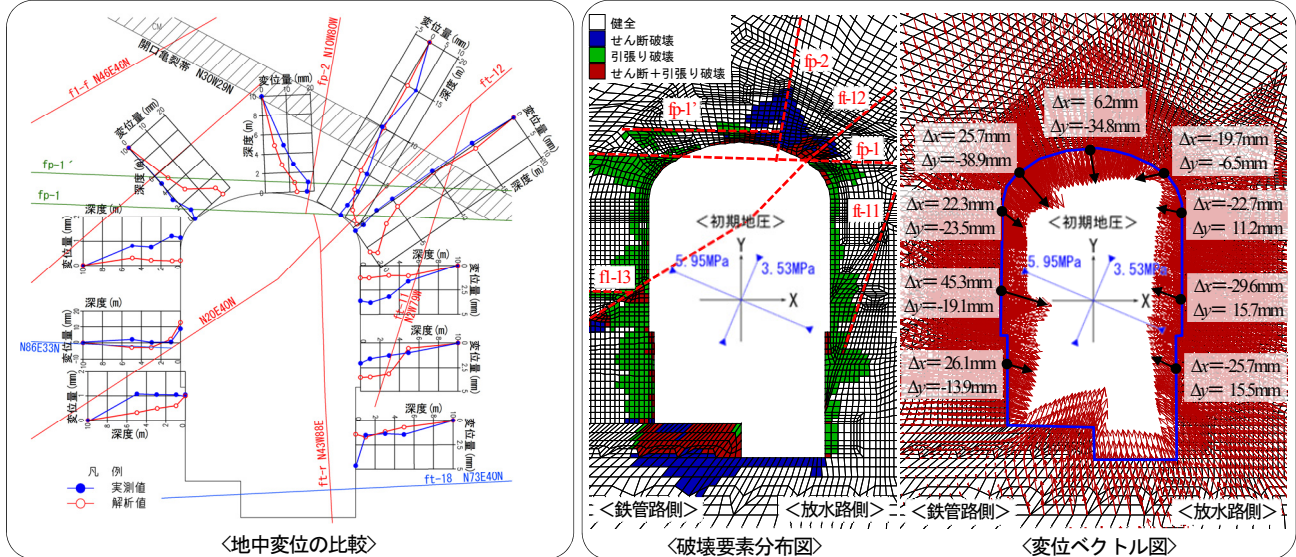


図-13 再現解析結果

6. おわりに

本稿では、分水第一発電所における地下空洞掘削時の挙動予測と計測実績、およびその評価の概要について報告した。空洞掘削時の挙動は、当初の想定通り異方性が顕著であり、片理方向に応じた黒色片岩の弾性係数比は12.5程度であると推察された。しかし、本稿で紹介した再現解析結果はB3掘削完了時点に実施したものであり、掘削完了時の内空変位において、解析値と実測値との間に多少の差異が生じている。

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) 佐々木猛, 吉中龍之進, 永井文男: 有限要素法による節理性岩盤の複合降伏モデルに関する研究, 土木学会論文集, No.505/III-29, pp.59-68, 1994. 12.
- 2) 森川誠司, 田部井和人, Sadr Amir Ahamad: 三次元複合降伏モデルによる岩盤せん断強度の異方性の検討, 土木学会, 第41回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.141-146, 2012.
- 3) 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.
- 4) J.C.Jaeger: Shear failure of anisotropic rock, Geology Magazine, Vol.97, pp.65-72, 1960.

BEHAVIOR PREDICTION AND EVALUATION OF UNDERGROUND CAVERN IN ANISOTROPY ROCK

Taku YAMASHITA, Takayuki MORI, Koichi FUJIWARA
Hisatoshi MATSUKAWA, Hiroshi FUJII, and Makoto NAMAJIMA

An underground power plant of Bunsui Daiichi is constructed in the ground consists of black schist exhibiting strong anisotropy. Due to designing rock supports with deformation estimates, authors introduced the Multiple Yield Model (MYM). It can simulate anisotropy of both strength and deformation of rock. Furthermore, deformation of the cavern and supports pressure are measured during excavation. Stability of the cavern and the effectiveness of the support system are verified through analysis based on the measurements. We finished excavating the whole cavern without any serious problems in May 2015. This paper describes the predictive analysis using MYM and measured results.