鹿島建設㈱	制 正会員	○藤原 浩一	森 孝之	田部井和人	北村 義宜
㈱四電技術コンサルタント	、 正会員	齋藤 和			
四国電力㈱	) 正会員	佐々木勝教	加地 貴	今西 貢二	

#### 1. はじめに

分水第一発電所(水力発電所)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、近年局所的な集中豪雨が頻発するなど、降雨特性の変化に伴う設備損壊リスクが高まっていることも考 慮し、本工事は現在地上にある発電所を地下へ移設し、既存発電所の機能更新を図るものである。

地下発電所は偏圧の生じる斜面下にて建設が計画され、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、本論文では片理を潜在的な不連続面と見なし、等価連続解析法に属す複合降伏モデル(Multiple Yield Model)<sup>1)2</sup>を空洞掘削解析に適用し、異方性地山における挙動の傾向と特徴について考察する。

#### 2. 地下発電所空洞および地形・地質概要

#### (1) 地下発電所空洞の概要

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可能な弾頭形 を採用した。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で計画している。図-1に地下発電所計画図を示す。





#### (2) 地形·地質概要

分水第一発電所は高知市の北西約 25km 地点にあり、仁淀川支流の上流部に位置する。この付近には、四国 の脊梁山脈が西南西から東北東に伸びており、これが吉野川流域と仁淀川流域を分かつ分水嶺となっている。

キーワード 地下大空洞、異方性岩盤、複合降伏モデル(MYM)、空洞支保設計、黒色片岩 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 地下空間設計部 TEL 03-6229-6647 地下発電所建設地点周辺は、地質構造に支配されたケスタ地形を呈しており、南向き斜面が 30~50°の急斜 面(受け盤)、北向き斜面が 15~30°の緩斜面(流れ盤)となっている。

地質は三波川帯に属し、広域変成作用の結果生成された結晶片岩類によって構成される。空洞掘削位置には 主として黒色片岩(泥質片岩)が存在し、その近傍には層状あるいはレンズ状に石灰質片岩・緑色片岩が確認 されている。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る。

地下発電所は土被り約 115m の位置に計画しており、その周辺の詳細地質調査を目的として発電所の建設に 先立ち、調査坑の掘削を実施した。その調査結果に基づき、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。なお、地形的に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 となっており、これらを空洞掘削解析に考慮した。図-2 に地質縦断面図を示す。



## 3. 複合降伏モデル

# (1) 不連続面を含む岩盤のコンプライアンスマトリックス

複合降伏モデルは、複数の不連続面を含む岩盤を等価な連続体として表現する等価連続体モデルの一種である。また、複合降伏モデルでは、岩盤中の不連続面は長さが無限、平行で等間隔に存在する平面としてモデル 化する。岩盤の変形は、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。この場合、不連続面を含む岩盤の応力 $\{\sigma\}$ とひずみ $\{\varepsilon\}$ の関係は(1)式のようになる。

$$\{\varepsilon\} = \sum_{m} \{\varepsilon_{J}^{m}\} + \{\varepsilon_{R}\} = \left[\sum_{m} \left[F_{J}^{m}\right] + \left[C_{R}\right]\right] \cdot \{\sigma\} = \left[C\right] \cdot \{\sigma\}$$
(1)

ただし、 $\begin{bmatrix} F_J^m \end{bmatrix}$ :m番目の不連続面群のコンプライアンスマトリックス、 $\begin{bmatrix} C_R \end{bmatrix}$ :岩盤基質部のコンプライア ンスマトリックス、 $\begin{bmatrix} C \end{bmatrix}$ :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。 なお  $\begin{bmatrix} F_J^m \end{bmatrix}$ は(2)式と(3)式から求められる。

$$\begin{bmatrix} F_J^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{J_{\mathcal{E}}}^m \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} C_J^m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_{J_{\mathcal{F}}}^m \end{bmatrix}$$
(2)  
$$\begin{bmatrix} C_J^m \end{bmatrix} = \frac{\begin{bmatrix} K_J^m \end{bmatrix}^{-1}}{S_J^m}$$
(3)

ただし、 $\begin{bmatrix} T_{J_{\varepsilon}}^{m} \end{bmatrix}$ : m番目の不連続面群の全体座標系から局所座標系へのひずみ変換マトリックス、 $\begin{bmatrix} T_{J_{\sigma}}^{m} \end{bmatrix}$ : m番目の不連続面群の全体座標系から局所座標系への応力変換マトリックス、 $S_{J}^{m}$ : m番目の不連続面群の不連続面間隔である。さらに $\begin{bmatrix} K_{J}^{m} \end{bmatrix}$ は(4)式で表される。

$$\begin{bmatrix} K_J^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_n^m & 0\\ 0 & k_s^m \end{bmatrix}$$
(4)

 $k_n^m$ :m番目の不連続面群の法線方向バネ定数、 $k_s^m$ :m番目の不連続面群のせん断方向バネ定数である。さら に $[C_R]$ は(5)式で表される。

$$\begin{bmatrix} C_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E & -\nu/E & 0 \\ -\nu/E & 1/E & 0 \\ 0 & 0 & 1/G \end{bmatrix}$$

E:岩盤基質部の弾性係数、G:岩盤基質部のせん断弾性係数、v:岩盤基質部のポアソン比である。

#### (2) 岩盤基質部の非線形特性

岩盤基質部の非線形特性は図-3に示すような弾完全 塑性型の応力-ひずみ関係とし、繰り返し載荷による塑 性変形の蓄積を考慮できるようにする。また降伏関数は Mohr-Coulomb の式とする。なお、引張側応力に対して は、引張強度以上は抵抗しないTension cut-off 条件と する。

# (3) 不連続面の非線形特性

不連続面を表すせん断バネの非線形特性としては、 岩盤基質部と同じように図-4に示すような弾完全塑 性型の応力-せん断変位関係とし、繰り返しのせん断 荷重による塑性変形の蓄積を考慮する。不連続面の法 線方向バネの非線形特性は圧縮側については線形バ ネとして履歴特性を特に考慮せず、引張側については 引張応力には一切抵抗しない条件とする。不連続面の 降伏関数はMohr-Coulomb の式を用いる。



(5)

(4) 複合降伏モデルにおける変形・強度異方性のモデル化

片岩の変形・強度異方性を複合降伏モデルで表現するために片理面を不連続面として扱う。具体的には、片 理構造に平行な方向のせん断強度を不連続面のせん断強度とし、片理構造に直交する方向のせん断強度を岩盤 基質部のせん断強度とする。また、片岩の変形異方性を表現するために、片理構造に平行な方向の弾性係数を 岩盤基質部と同じ *E*<sub>1</sub>、片理構造に直交する方向の弾性係数を *E*<sub>2</sub> とし、不連続面の法線方向バネ定数を式(6) から、不連続面のせん断方向バネ定数は式(7)から求める。

$$k_{n} = 1 / \left(\frac{1}{E_{2}} - \frac{1}{E_{1}}\right)$$
(6)  
$$k_{s} = 1 / \left(\frac{1}{G_{2}} - \frac{1}{G_{1}}\right)$$
(7)

なお、 $G_1$ は片理構造に直交する方向のせん断剛性であり、 $G_1 = 2(1+\nu)E_1$ から設定する。 $G_2$ は片理構造に平行な方向のせん断剛性であり $G_2 = 2(1+\nu)E_2$ から設定する。 $\nu$ はポアソン比である。

## (5) 要素モデル解析による複合降伏モデルの特徴

J. C. Jaeger<sup>3</sup>は不連続面を含む岩石の三軸圧縮試験において、最 大主応力の方向と不連続面の方向のなす角度により不連続面上で すべり破壊が生じる場合と、岩盤基質部で破壊が生じる場合があ ると考え、図-5に示す不連続面角度と軸強度の関係を提案してい る。これは不連続面の粘着力を $C_J$ 、不連続面の摩擦角を $\phi_J$ 、不連 続面と最大主応力のなす角度を $\beta$ とした際に式(8)が成立する時 に不連続面がすべり破壊し、それ以外の場合では式(9)により岩盤 基質部(C、 $\phi$ )が破断すると仮定したものである。

$$\sigma_1 \ge \sigma_3 + \frac{2 \cdot (C_J + \sigma_3 \cdot \tan \phi_J)}{(1 - \tan \phi_J \cdot \tan \beta) \sin 2\beta}$$

$$\sigma_1 = \frac{2 \cdot C \cdot \cos \phi}{1 - \sin \phi} + \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \cdot \sigma_2$$



(9)

表-1に示す岩盤物性値(黒色片岩を想定)を用いて不連続面角度 $\beta$ をパラメータとした複合降伏モデルによる三軸圧縮試験の数値シミュレーションを行い、拘束圧 $\sigma_3$ (最小主応力)作用時における破壊時の応力 $\sigma_1$ (最大主応力)を求めた結果を図-6にプロットした。また、同図にはJaegerの提案する式(8)、(9)により求めた破壊時の最大主応力 $\sigma_1$ を実線で記入した。図-6の通り、数値シミュレーション結果とJaeger提案の理論式とが完全に一致する結果となり、複合降伏モデルシミュレーションにより強度の異方性を要素試験レベルで確認できた。

対象部位	物性值項目	数值	単位
	弾性係数 E	12,000	$MN/m^2$
山船其座动	ポアソン比 ν	0.2	
石盛奉貝即	粘着力 C	4.34	$MN/m^2$
	内部摩擦角 $\phi$	43	0
不連続面	法線方向ばね剛性 kn	8,500	$\rm MN/m^2/m$
	せん断方向ばね剛性 ks	3,500	$\rm MN/m^2/m$
	粘着力 C'	1.52	$MN/m^2$
	内部摩擦角 $\phi'$	24.6	0

表-1 シミュレーションに用いた岩盤物性値



# (1) 検討概要

複合降伏モデルは岩盤の変形と強度の異方性を考慮し た掘削解析が可能であり、空洞の変形や空洞周辺岩盤の 破壊分布は等方性モデルとは異なる結果が得られるもの と考えられる。ここでは種々の岩盤構成則をパラメータ とした掘削解析を実施することで、複合降伏モデルにお ける異方性挙動の特徴を考察する。

解析モデルは図-7に示すように土被り100mで片理面が 水平傾斜を成す地山での円形空洞(φ10m)の掘削問題とした。

β 55 実線:Jaeger式 50  $\sigma_3 = 6 MPa$ 45  $\sigma$ [MPa] 40  $\sigma_3 = 4MPa$ 35-10130-25-20- $\sigma_3 = 2MPa$  $\sigma_3 = OMPa$ 15-10-30 40 50 60 片理面と最大主応力のなす角β(度) 20 70 80 図-6 三軸圧縮試験数値シミュレーション結果



当解析は円形空洞の素掘り解析とし、初期地圧を与えた後に応力解放率100%で掘削を行い、岩盤の破壊 や変位を調べた。複合降伏モデルと比較するため、表-2に示すように4種類の構成則で解析を実施した。

# (2) 解析結果と構成則による比較

天端部と側壁部の変位の計算結果を図-8 に示す。同図 より、片理面における強度や変形を考慮する岩盤構成則を 用いるほど、空洞変位が大きくなる傾向が確認できる。

また、線形弾性モデルでの変位量を基準とした各ケース の変位比率を表-3 に示す。変形異方性モデルや複合降伏 モデルでは、天端の鉛直変位が水平変位より大きいが、こ れは片理面の角度が水平であり、片理面と直交する方向が 変形し易いことが表現されている。

次に、複合降伏モデル(ケースD)について、岩盤の破壊 要素分布や空洞変形を図化したものを図-9に示す。同図よ り片理面と直交する方向の領域、すなわち天端と底盤部に 引張破壊が生じ、その両側の要素にせん断破壊が生じてい る。また片理面に直交方向の鉛直方向の変位が卓越してお





#### 表-2 岩盤の構成則と解析ケース





図-8 構成則モデル別の変位比率

表-3 壁面変位の比較

解析ケース	ケースA	ケースB	ケースC	ケースD
構成則	線形弾性	弾塑性	変形異方性	複合降伏
天端鉛直変位比率	1	1.04	1.3	1.4
壁面水平変位比率	1	1.04	1.1	1.12

図−9 複合降伏モデルによる岩盤の破壊要素分布・変形図

## 5. 分水第一発電所を対象とした空洞掘削解析

複合降伏モデルを用いて分水第一発電所を対象とする地下大空洞の掘削解析を実施し、掘削に伴う周辺岩盤の破壊領域と空洞の変形を予測した。なお、解析は最大断面となる主機室断面(図-1参照)を対象とした。

# (1) 岩盤物性値の設定

複合降伏モデルは、岩盤の変形異方性および強度異方性 をそれぞれ表現できる構成則であり、岩盤物性値の設定が 予測精度に大きく影響する。そのため、調査坑において、 各種岩石・岩盤試験を実施し、岩盤物性値を設定した。

### ①岩盤の弾性係数

岩盤の弾性係数は、岩盤変形試験結果の内、載荷時および 除荷時の接線弾性係数 Et (空洞周辺の初期応力相当 3~6MPa) の平均値から設定した。基質部の弾性係数は片理平行方向 E<sub>1</sub> の値を与え、片理に平行・直交方向の弾性係数 E<sub>1</sub>・E<sub>2</sub>を用い て不連続面のバネ kn、ks を決定することで、基質部と片理を 含めた岩盤としての片理直交方向の弾性係数が定まり、変形 異方性 E<sub>1</sub>/E<sub>2</sub>を表現した。



図-10 岩盤変形試験結果

## ②岩盤のせん断強度

岩盤のせん断強度は、図-11 に示すフローに基づき設定した。まず、 J.C. Jaeger<sup>3)</sup>による1つの不連続面を含む理論に基づき、原位置にお いて採取されたボーリングコアの一軸・三軸試験結果より、岩盤基質 部および不連続面の岩石強度を設定する。図-12 に設定した岩石強度 と一軸・三軸試験結果との比較を示す。同図より、今回設定した強度 定数は、概ね試験値を適切に表していることが確認できる。

次に、岩盤せん断試験と岩石試験(一軸・三軸試験)の結果を比較 し、各試験のせん断強度比を算出する。最後に、このせん断強度比を 補正係数として、①で設定した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、解析に用いる岩盤強度を算出した。

表-4 に複合降伏モデルによる空洞掘削解析に用いる岩盤 物性値の一覧をまとめる。



表-4 解析用岩盤物性值一覧





#### (2) 断層のモデル化と強度・変形特性

前述のとおり、発電所空洞建設位置には複数の小断層が確認されており、空洞掘削時の挙動を予測する上で 無視できないと考えられる。そのため、断層をジョイント要素としてモデル化し、強度・変形特性を与えるこ とで断層沿いのズレや破壊を表現することとした。

断層の強度特性は、岩盤不連続面の一面せん断試験結果における残留強度を用いた。この試験値は、黒色片 岩の分離した片理面を対象としており、ラフネスがあまり大きくない平滑な面での試験結果である。一方、解 析で対象とする主要な断層は片理面を切るものであり、走向傾斜が一様でなく、断層の厚さやラフネスは場所 により変化すると考えられることから、安全側の強度設定としている。

また、変形特性も同様に岩盤不連続面における垂直剛性試験、一面せん断試験よりバネ剛性を設定した。その際、地質観察により得られた各断層の厚さを考慮してバネ剛性を算出した。図-13、表-5 に解析に考慮する 断層とその物性値の一覧を示す。



表−5 角	牟 析 用 跗	「層物」	生他一	筧

		せん断強度特性		断層幅最大値	鉛直剛性	せん断剛性
断層名 定问傾斜	粘着力 C(MN/m <sup>2</sup> )	内部摩擦角 $\phi(^\circ)$	t(cm)	Kn(MN/m²/m)	Ks(MN/m²/m)	
f1-f	N46° E46° N			3	4,800	1,300
ft-10	N48° E73° N			26	500	100
ft-13	N58° W71° N	0.11	21	3	4,800	1,300
ft-12	N10° E41° N			20	700	200
ft-11	N2° W79° W			10	1,400	400

### (3) 初期地圧の設定

本サイトでは、調査坑内にて埋設ひずみ法1箇所、円錐孔底 ひずみ法3箇所の初期地圧測定を実施している。初期地圧の測 定結果と自重解析による応力を比較した結果を表-6に示す。測 定の結果、どちらの試験結果においても、最大主応力は斜面の 傾斜に沿う方向に作用しているが、傾斜角が異なっている。ま た、両測定結果の応力成分を合成した地圧は自重解析結果と同 程度となっている。本解析では、側壁においてより厳しい条件 になると想定される円錐孔底ひずみ法の値を用いることとした。

初期地圧実測値を解析にて表現する際には、森<sup>4)</sup>が提唱して いる手法を採用した。この手法は、自重解析にて得られた初期 地圧( $\sigma_{Xi}, \sigma_{Yi}, \tau_{XYi}$ )を初期地圧の実測値( $\sigma_{X0}, \sigma_{Y0}, \tau_{XY0}$ )で除 した補正係数 $\alpha$  (= $\sigma_{X_0}/\sigma_{X_i}, \sigma_{Y0}/\sigma_{Yi}, \tau_{XY0}/\tau_{XYi}$ )を算出し、そ の補正係数を全ての要素に乗じることで、実測された初期地圧 を再現するものである。

# (4) 解析モデルと支保部材のモデル化

全体および空洞周辺の解析モデルを図-14 に示す。黒色 片岩の片理は、空洞横断面に対して水平方向(片理角度0°) となる。分水第一発電所においても、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により構成される。本 解析においてはこのうち、ロックボルトについてはモデル 化を行わず、PS アンカーと吹付けコンクリートのみ表-7 に示すモデル化を行った。

我 / 文体即时初任他					
支保部材	モデル化	レ化 物性値項目			
际仕中		厚さ t(m)	0.24		
吸付りコンクリート	棒要素	断面積 A(m <sup>2</sup> )	0.24		
		弾性係数 Ec(MN/m <sup>2</sup> )	4000		
PS アンカー	節点外力	導入荷重 P(kN/m)	150		

主\_7 士伊如杜物州体

# (5) 解析結果

### ①岩盤の破壊要素分布

空洞掘削完了時における岩盤の破壊要素分布を 図-15に示す。同図左は片理面のみの破壊要素を 示しており、空洞アーチ部右肩の深部および左底 盤部においてせん断破壊が広範囲に生じている。 これは初期地圧の作用方向と片理面の傾斜角に起 因した破壊形態であり、右傾斜に作用する最大主 応力の方向と水平構造の片理面のなす角度が低角 度となるため、破壊が進展したと考えられる。

また、天端部では片理面の引張破壊が卓越して いる。これは、掘削解放力が片理面に直交する方 向に作用するため、片理に沿って剥離する現象を 表現している。

表-6 初期地圧測定結果

			初期地圧測定			
		① 自重解析 結果	② 埋設 ひずみ法	③ 円錐孔底 ひずみ法	④ 埋設法と 円錐法の 合成値	
	σx (MPa)	4.64	2.49	5.57	4.03	
応力成分	$\sigma$ y (MPa)	3.94	3.87	3.91	3.89	
	τzx (MPa)	-1.39	-0.81	-0.88	-0.85	
側圧比	$K = \sigma x / \sigma z$	1.17	0.64	1.42	1.04	
	σ1 (MPa)	5.74	4.24	5.95	4.81	
主応力	$\sigma 2$ (MPa)	2.87	2.12	3.53	3.11	
	θ (°)	-38	25	-23	-43	
	$\sigma$ m (MPa)	4.31	3.18	4.74	3.96	





図-14 解析モデル図



# ②空洞壁面変位分布

図-16 は空洞周辺における岩盤変位をベクトル図で示したもので ある。同図より右側壁は左側壁と比較して変位量が大きくなってい ることが確認できるが、これは壁面背後の ft-11 断層が破壊したこ とにより、ft-11 と ft-12 に囲まれたブロックが断層沿いに滑動し たことに起因しており、空洞掘削に伴う断層の挙動を表現している ものである。

### 6. おわりに

本稿では変形・強度異方性を考慮できる複合降伏モデルを分水第 一発電所の空洞掘削解析に適用し、空洞掘削に伴う岩盤の破壊分布 および空洞壁面変位の予測解析結果を報告した。

解析の結果、サイトの地形・地質特性を表現した以下の特徴が得られた。



- 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空洞アーチ部 右肩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、右側壁の変位が増加する現象が想定された。

本解析は発電所空洞掘削前の予測段階であり、今後、大空洞掘削時における実際の岩盤挙動と本解析結果との比較を行い、当解析手法の適用性を検証し、解析精度の向上を図っていく予定である。

#### 参考文献

- 1) 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.
- 2) 森・田部井・北村ほか: 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
- 3) J.C. Jaeger, Shear failure of anisotropic rock, Geology Magazine, Vol. 97, pp. 65-72, 1960.
- 4) 森孝之:初期地圧測定結果の空洞解析への利用、 第42回地盤工学研究発表会、pp. 159-160、2007.