

異方性岩盤における大規模地下空洞の解析および設計

四電技術コンサルタント 法人会員 ○青木聡 四電技術コンサルタント 正会員 齋藤和
四電技術コンサルタント 法人会員 前田斎 四国電力 正会員 長井和樹

1. はじめに

黒色片岩のような層状岩盤で異方性が発達する地山において大規模地下空洞を掘削する場合には、調査・試験により岩盤の力学的特性を適切に評価するとともに、設計段階では掘削時の岩盤挙動を精度良く表現できる解析手法を適用することが重要である。従来の等方性モデルを用いた解析では、不連続面を含む岩盤の変形・強度特性の異方性を精度良くかつ合理的に表現するには限界があった。

本論文では、三波川帯の黒色片岩に計画された地下式水力発電所の大規模地下空洞掘削を行うにあたり、新しい試みとして無数に存在する岩盤の片理構造を“潜在的な不連続面”と見なすことにより変形特性と強度特性の異方性を表現し、複合降伏モデル(Multiple Yield Model)¹⁾を用いて空洞掘削解析を実施するとともに、その解析結果をもとに合理的な支保設計を行った事例について紹介する。

2. 複合降伏モデルの概要

複合降伏モデルは、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。岩盤の変形挙動は、図1のようにインタクトな基質部の変形(等方性)と、特定の方向性を有する不連続面の変形(開口・閉合およびすべり)の和として表される。不連続面は、変形特性を非線形の垂直・せん断バネ剛性で表し、せん断強度特性は Mohr-Coulomb の式等でモデル化される。

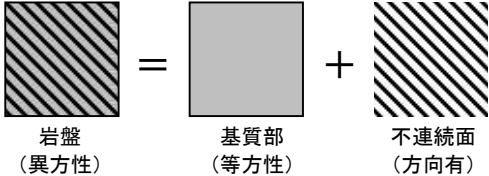


図1 複合降伏モデルによる岩盤の変形特性

3. 空洞掘削解析

3-1 岩盤物性値の設定

(1) 基質部

基質部の変形特性は、片理に平行方向の平板載荷試験から、初期応力相当の垂直応力における接線弾性係数として設定した。変形異方性は、図2のように非常に強い(2.4倍)ことから、空洞掘削時の挙動は異方性・剥離性の影響を強く受けるものと想定された。

基質部の強度特性については、岩石供試体による一軸・三軸試験結果のうち、図3、4に示すように J.C.Jaeger²⁾による不連続面角度と最大主応力の関係で基質の破断に相当する不連続面角度(90°)の試験結果を用いて、強度定数 τ_{r1} 、 ϕ_1 を設定した。さらに、原位置での岩盤せん断試験と岩石供試体試験の強度比(0.787)を、上記強度定数に乗ずることで、岩盤と岩石との強度の寸法効果を考慮した。

(2) 不連続面(片理)

不連続面の変形特性は、図1の考え方にに基づき平板載荷試験結果と整合するように、不連続面の間隔と垂直方向・せん断方向バネ剛性 k_n 、 k_s を設定した。

表1 複合降伏モデルの解析に用いた物性値

対象部位	物性値項目	数値	単位	設定方法
基質部	単位体積重量	γ	26.7	kN/m ³ 岩石試験
	ポアソン比	ν_0	0.20	岩石試験
	弾性係数(片理平行)	E_1	12,000	MN/m ² 平板載荷試験
	せん断弾性係数(片理平行)	G_1	5,000	MN/m ² $G_1=E_1/(2\nu_0+2)$
	粘着力(せん断強度)	τ_{r1}	3.42	MN/m ² 岩石の破断強度(寸法効果補正)
	内部摩擦角	ϕ_1	43	° 岩石の破断強度
	引張強度	σ_{t1}	0.34	MN/m ² τ_{r1} の1/10として設定
不連続面(片理)	法線方向ばね剛性	k_n	8,500	MN/m ² $1/E_2=1/E_1+1/d+k_n$ より算定($d=1$ 本/m)
	せん断方向ばね剛性	k_s	3,500	MN/m ² $1/G_2=1/G_1+1/d+k_s$ より算定($d=1$ 本/m)
	粘着力(せん断強度)	τ_{r2}	1.20	MN/m ² 不連続面のすべり強度(寸法効果補正)
	内部摩擦角	ϕ_2	25	° 不連続面のすべり強度
	引張強度	σ_{t2}	0.00	MN/m ² 考慮しない
	不連続面角度(片理角度)	θ	0	° 水平
岩盤(基質+片理)	弾性係数(片理直交)	E_2	5,000	MN/m ² 平板載荷試験
	せん断弾性係数(片理直交)	G_2	2,000	MN/m ² $G_2=E_2/(2\nu_0+2)$
断層	鉛直剛性	k_n	個別	MN/m ² /m 垂直剛性試験(tにより各断層ごと)
	せん断剛性	k_s	個別	MN/m ² /m 一面せん断試験(tにより各断層ごと)
	粘着力(せん断強度)	τ_0	0.11	MN/m ² 一面せん断試験(残留強度)
	内部摩擦角	ϕ	21	° 一面せん断試験(残留強度)
	引張強度	σ_t	0.00	MN/m ² 考慮しない
	断層幅	t	個別	m 地質調査結果

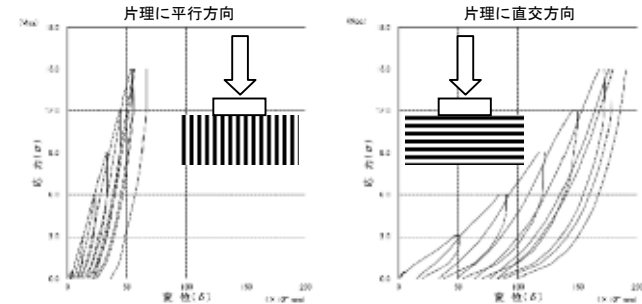


図2 平板載荷試験による応力-変位曲線

不連続面の強度特性については、図3、図4に示すように不連続面上のすべりで破壊する角度（ 20° ， 30° ）の一軸・三軸試験結果から、強度定数 τ_{r2} ， ϕ_2 を設定した。不連続面についても、基質部と同様に強度の寸法効果を考慮した。

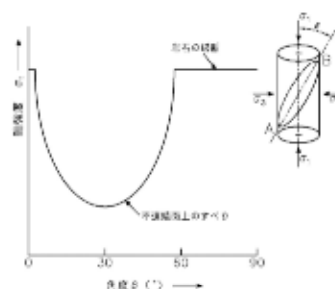


図3 不連続面角度と軸強度の関係 (J.C. Jaeger²⁾)

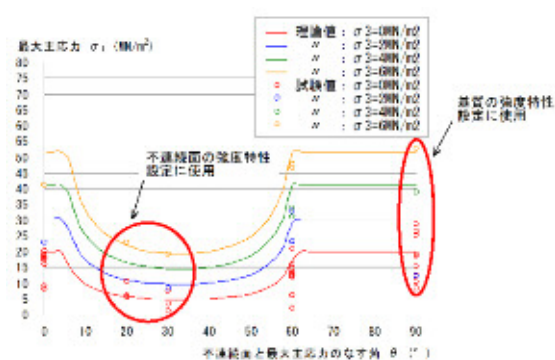


図4 岩石試験における θ と σ_1

(3) 断層

断層の変形・強度特性は、岩盤不連続面の垂直剛性試験および一面せん断試験から設定した。

3-2 解析条件

(1) 解析モデル

地下空洞の横断面が最大となる位置での二次元鉛直断面を解析モデルとした（図5）。なお、片理（不連続面）が安定上有利な水平配置となるよう地下空洞の主軸方向を設定した。

(2) 初期地圧

図5の二次元解析モデルでの自重解析により初期地圧を算定し、別途実施した原位置での初期地圧測定結果と整合するように応力を補正した。

(3) 掘削ステップ

アーチ部から空洞下部へ向かって高さ約2mのベンチ掘削を設定し、計16ステップの逐次掘削とした。

3-3 解析結果

図6より、両側壁下部やアーチ部右肩の断層近傍において破壊領域が広がっている様子が確認できる。側壁については主に基質の引張破壊によるもので、アーチ部右肩については不連続面のせん断+引張破壊によるものであった。

4. 支保設計

側壁部とアーチ部で破壊領域が確認されたことから、空洞安定性を確保する支保工としてPSアンカーを用いた。いくつかのキープブロックを想定し、所定のすべり安全率を確保するように配置およびプレストレス導入力の検討を行った（図7）。

5. おわりに

本論文では、複合降伏モデルを用いて片理構造による強い異方性を示す岩盤をモデル化し、地下発電所の空洞掘削解析および設計に適用した事例を紹介した。設計に引き続いて、施工においても複合降伏モデルによる情報化施工を実施し、無事故・無災害で工事の完遂に至った。複合降伏モデルは、Mohr-Coulombの式が適用できるなど、比較的シンプルなモデルであり拡張性が高いことから、今後は適用範囲を拡大していきたい。

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) J.C.Jaeger, Shear failure of anisotropic rock, Geology Magazine, Vol.97, pp.65-72, 1960.

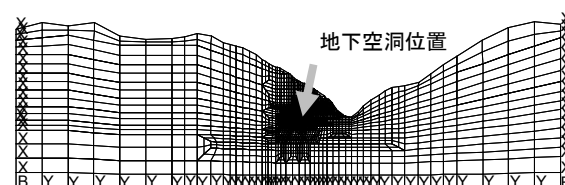


図5 解析モデル（幅2100m，高さ700m）

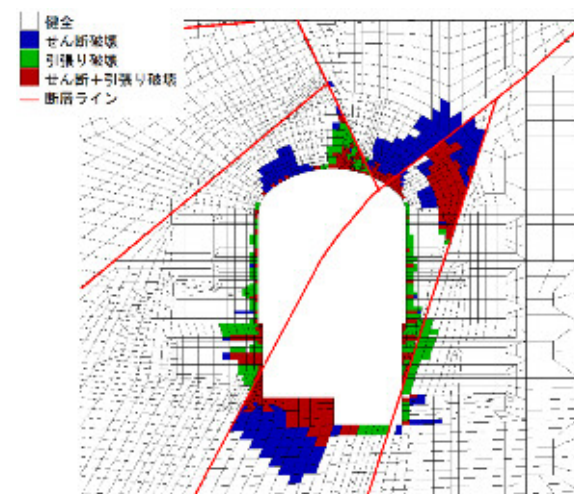


図6 破壊要素分布図
(空洞：幅約18m，高さ約33m)

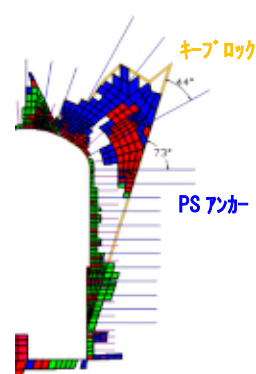


図7 想定した
キープブロック
およびPSアンカー