

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

森 孝之^{1*}・田部井和人¹・北村義宜¹

齋藤 和²・佐々木勝教³

¹鹿島建設株式会社 (〒107-8388 東京都港区元赤坂1-3-1)

²株式会社四電技術コンサルタント (〒761-0121 香川県高松市牟礼町牟礼1007番地3号)

³四国電力株式会社 高知支店電力部 (〒781-2611 高知県吾川郡いの町脇ノ山367-1)

*E-mail: moritakayuki@kajia.com

異方性の発達する地山での地下空洞の建設において、空洞掘削時の挙動は異方性・剥離性に支配されるものと考えられ、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。そこで、本論文では変形・強度異方性を考慮できる複合降伏モデル(MYM)を適用し、要素モデル解析による解析手法の検証、そして地下大空洞モデルでの掘削解析を実施し、異方性地山における挙動の傾向と特徴を報告する。

Key Words : schist, anisotropy, underground rock cavern, numerical analysis, multiple yield model

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地下大空洞を掘削する場合には、調査・試験により不連続面を含む岩盤の変形や力学的異方性の程度や特徴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予測において変形や強度の異方性を精度よく表現できる解析手法を適用することが重要である。

不連続性岩盤を対象とした解析モデルとしては等価弾性コンプライアンス法などの構成則の中に不連続性を表現できるモデルを組み込んだ等価連続体解析法と、不連続面の幾何学的分布を直接解析モデルに取り込む個別剛体要素法(DEM)や不連続変形法(DDA)などの不連続体モデル解析法がある。

本論文では片理構造による異方性をモデル化するため、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)}を適用し、地下大空洞モデルでの掘削解析を実施し、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。

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。複合降伏モデルにおいて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タイプ毎にモデル化する。また、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 $\{\varepsilon\}$ の関係は式(1)のようになる。

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

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。なお、 $[F_J^m]$ は式(2)と式(3)から求められる。

$$[F_J^m] = [T_{J\varepsilon}^m]^T \cdot [C_J^m] \cdot [T_{J\sigma}^m] \quad (2)$$

$$[C_J^m] = \frac{[K_J^m]^{-1}}{S_J^m} \quad (3)$$

ここで、 $[T_{J\varepsilon}^m]$: m番目の不連続面群の全体座標系から

2. 複合降伏モデル^{1),2)}

(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(MYM)は、不連続面を含む岩盤を等

局所座標系へのひずみ変換マトリックス, $[T_{J\sigma}^m]$: 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, $[K_J^m]$ は式(4)で表される.

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

ここで, 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, $[C_R]$ は式(5)で表される.

$$[C_R] = \begin{bmatrix} 1/E & -\nu/E & 0 \\ -\nu/E & 1/E & 0 \\ 0 & 0 & 1/G \end{bmatrix} \quad (5)$$

ここで, 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, ν : 岩盤基質部のポアソン比

(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-1 に示すような弾完全塑性型の応力-ひずみ関係とし, 繰り返し载荷による塑性変形の蓄積を考慮できるようにする. また, 降伏関数は式(6)に示すMohr-Coulomb の式とする. なお, 図-1 に示すように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.

$$\tau = C_R + \sigma \cdot \tan \phi_R \quad (6)$$

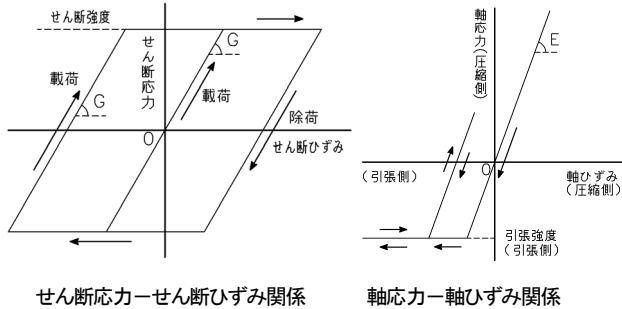


図-1 岩盤基質部の非線形特性

(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-2 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できるようにする. 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式(7)に示すMohr-Coulomb の式を用いる.

$$\tau_s = C_J + \sigma_n \cdot \tan \phi_J \quad (7)$$

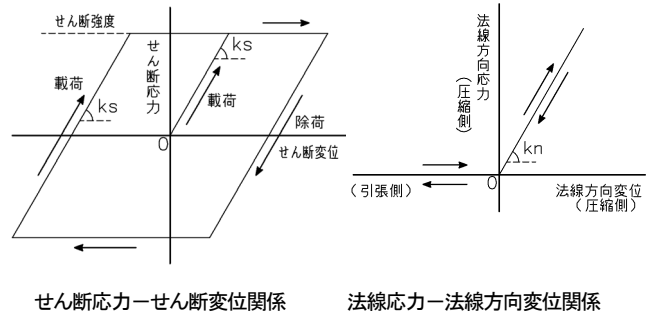


図-2 不連続面の非線形特性

(4) 複合降伏モデルによる変形・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(MYM)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の弾性係数と同じ E_1 , 片理構造に直交する方向の弾性係数を E_2 とし, 不連続面の法線方向バネ定数を式(8)から求める.

$$k_n = 1 / \left(\frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_1} \right) \quad (8)$$

また, 不連続面のせん断方向バネ定数は式(9)から求める.

$$k_s = 1 / \left(\frac{1}{G_2} - \frac{1}{G_1} \right) \quad (9)$$

ここで, 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. ν はポアソン比である.

3. 要素モデル解析による複合降伏モデル(MYM)の特徴と考察

(1) 強度異方性のシミュレーション

J.C.Jaeger³⁾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-3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 ϕ_J 、不連続面と最大主応力のなす角度を β とした際に、式(10)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(11)により岩盤基質部(C, ϕ)が破壊すると仮定したものである。

$$\sigma_1 \geq \sigma_3 + \frac{2 \cdot (C_J + \sigma_3 \cdot \tan \phi_J)}{(1 - \tan \phi_J \cdot \tan \beta) \sin 2\beta} \quad (10)$$

$$\sigma_1 = \frac{2 \cdot C \cdot \cos \phi}{1 - \sin \phi} + \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \cdot \sigma_3 \quad (11)$$

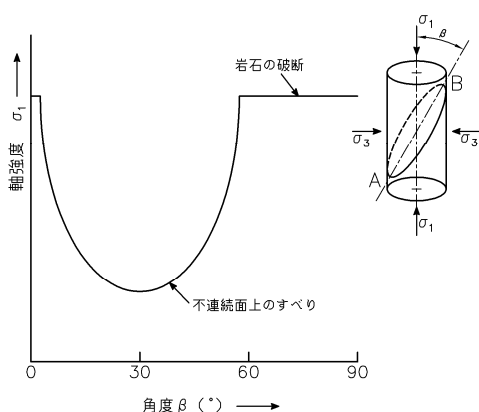


図-3 不連続面角度と軸強度の関係(J.C.Jaeger³⁾)

複合降伏モデル(MYM)を用い、軸力方向に対する片理の角度 β を変えた場合の岩石三軸試験のシミュレーションを実施した。対象とした岩盤は片理構造を有する結晶片岩であり、物性値を以下のように設定した。片理構造に平行方向の弾性係数を12,000MPa、片理構造に直交する方向の弾性係数を5,000MPa、ポアソン比を0.2、岩石三軸試験結果から片理構造に直交する方向のせん断強度を粘着力4.34MPa、内部摩擦角43.0°として片理構造に平行方向のせん断強度を粘着力1.52MPa、内部摩擦角24.6°とし、バネについては2.4に示したモデル化に基づき設定した。解析に用いた物性値を表-1に示す。

解析は拘束圧に相当する初期応力をインプットデータとして入力した後、1step当り0.1MPaずつ軸方向荷重を増加させる。解析結果の比較としてJaegerの提案する不連続面を含む岩石の異方性強度の式と比較を行った。

解析結果として、拘束圧を0, 2, 4, 6MPaについて片理角度 β を変えた解析結果とJaegerが提案する不連続面角度 β と軸強度の関係を計算した結果を図-4に示す。

この結果、複合降伏モデル(MYM)を用いた片理角度 β と最大主応力の関係はJaegerの提案する不連続面角度 β と軸強度の関係と完全に一致することが分かる。

また、拘束圧が0MPaのケースについて、最大主応力と供試体の鉛直変位の関係を図-5に示す。片理角度 β が小さいほど片理構造に直交する方向の剛性（異方性の弾性係数のうち小さい弾性係数）の影響を受けにくいため、破壊に至るまでの勾配が大きく、逆に片理角度 β が大きほど、片理構造に直交する方向の剛性の影響を受け、勾配が小さくなるという変形の異方性を表していることが分かる。

以上のように、不連続面を有する岩石供試体についての複合降伏モデル(MYM)シミュレーションにより強度の異方性、変形の異方性を要素試験レベルで確認できた。

表-1 岩石三軸試験シミュレーション用物性値

対象部位	物性値項目	数値	単位
岩盤基質部	弾性係数 E	12,000	MN/m ²
	ポアソン比 ν	0.2	
	粘着力 C	4.34	MN/m ²
	内部摩擦角 ϕ	43.0	°
不連続面	法線方向ばね剛性 kn	8,500	MN/m ² /m
	せん断方向ばね剛性 ks	3,500	MN/m ² /m
	粘着力 C'	1.52	MN/m ²
	内部摩擦角 ϕ'	24.6	°

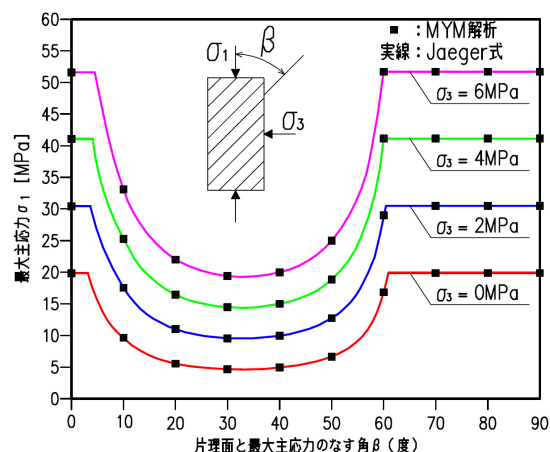


図-4 複合降伏モデル(MYM)解析結果とJaeger式の比較
(片理角度 β と最大主応力の関係)

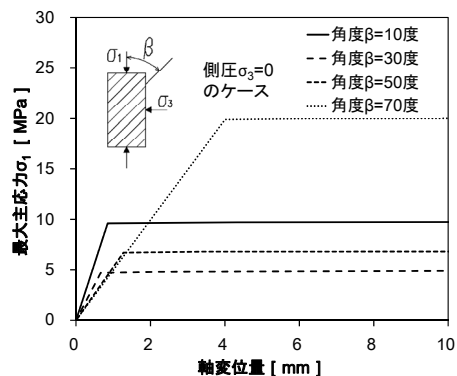


図-5 最大主応力と変位の関係(側圧 $\sigma_3=0$ のケース)

(2) 円形空洞モデルによる異方性挙動の特徴

a) 複合降伏モデル(MYM)における岩盤物性値の設定

複合降伏モデル(MYM)では岩盤基質部と不連続面の各々に物性値を設定するが、本論文では黒色片岩の片理を潜在的な不連続面と見做して異方性をモデル化した。

複合降伏モデル解析に用いた岩盤物性値を表-2に示す。基質部の弾性係数は片理平行方向 E_1 の値を与える。そして、片理面に平行、直交方向の弾性係数 E_1 、 E_2 を用いて不連続面のバネ剛性 kn 、 ks を決定することで、基質部と不連続面を含めた岩盤としての片理面直交方向の弾性係数が定まり、弾性係数異方性 E_1/E_2 を表現している。また、強度についても岩盤基質部では最大強度 τ_{max} を与え、不連続面方向には最小の強度 τ_{min} を設定することで強度異方性を表現する。

表-2 複合降伏モデル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
岩盤 基質部	単位体積重量	26.6	kN/m ³	岩石試験
	ポアソン比	0.25		岩石試験
	弾性係数(片理平行)	E_1	MN/m ²	岩石試験 片理平行方向
	せん断弾性係数(片理平行)	G_1	MN/m ²	$G_1=E_1/2(\nu+1)$
	粘着力	$C(\tau_0)$	MN/m ²	岩盤試験 τ_{R0max}
	内部摩擦角	ϕ	°	岩盤試験
不連続面 (片理)	引張強度	σ_t	MN/m ²	岩石・岩盤試験 $\sigma_t/\tau_{R0max}=0.1367$ より
	法線方向ばね剛性	kn	MN/m ² /m	$1/E_2=1/E_1+1/d \cdot kn$ より算定($d=1$ 本/m)
	せん断方向ばね剛性	ks	MN/m ² /m	$1/G_2=1/G_1+1/d \cdot ks$ より算定($d=1$ 本/m)
	粘着力	C'	MN/m ²	岩盤試験 τ_{R0min}
	内部摩擦角	ϕ'	°	岩盤試験 残留強度
	引張強度	$\sigma_{tn'}$	MN/m ²	見込まない
岩盤 (基質+片理)	不連続面角度(片理角度)	θ	°	解析断面における傾斜角度
	弾性係数(片理直交)	E_2	MN/m ²	岩盤試験 変形異方性 $E_1/E_2=1.5$ より
	せん断弾性係数(片理直交)	G_2	MN/m ²	$G_2=E_2/2(\nu+1)$

b) 検討概要

複合降伏モデル(MYM)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(MYM)における異方性挙動の特徴を考察する。

解析モデルは図-6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(ϕ 10m)の掘削問題とした。

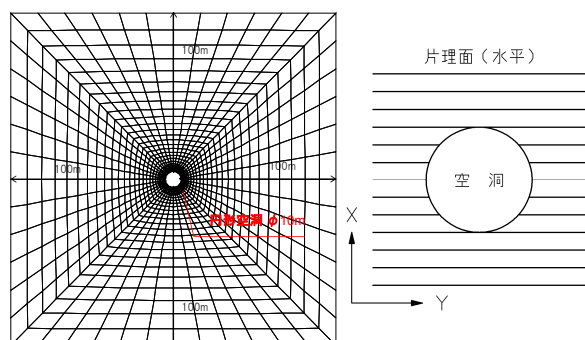


図-6 円形空洞の解析モデル

当解析は円形空洞の素掘り解析とし、初期地圧を与え

たあと、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(MYM)と比較するため、表-3に示すように4種類の構成則で解析を実施した。

表-3 岩盤の構成則と解析ケース

ケースA	ケースB
ケースC	ケースD

※ケースCはケースD(複合降伏モデル)における地盤構成則を利用し、基質部および片理面における応力-ひずみ関係を線形弾性としたケース

c) 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-7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。

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-4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、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やすいという変形異方性が表現されている。

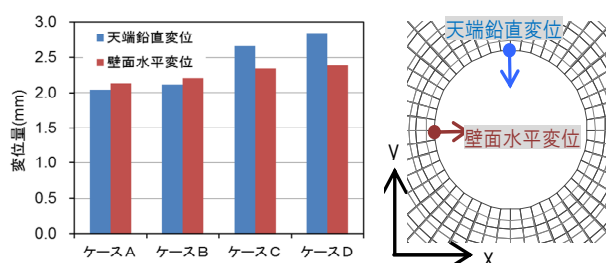


図-7 構成則モデル別の変位比率

表-4 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

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-8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

卓越しており、強度・変形異方性が表現されている。

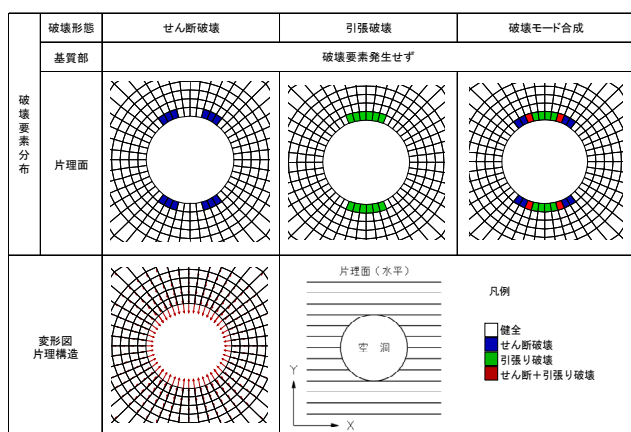


図-8 破壊要素分布と変形分布図(MYMモデル)

4. 地下大空洞の解析への適用

1) 解析モデルと解析条件

異方性を有する地山における地下大空洞への複合降伏モデル(MYM)の適用性と挙動の特徴を把握するため、図-9に示す高さ33m、幅 18.5mの弾頭型断面の地下大空洞を仮定し掘削解析を実施した。

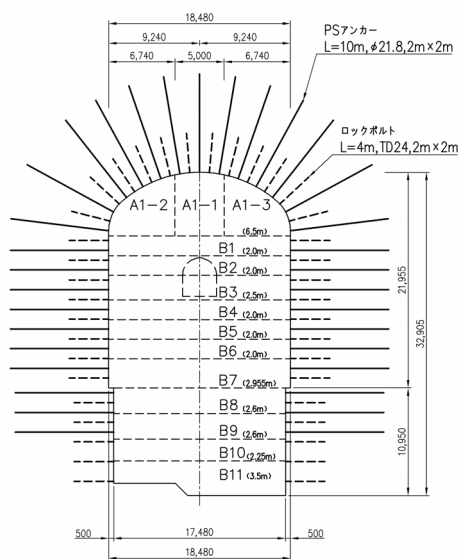


図-9 地下大空洞の断面図

解析モデルを図-9～10に示す。本検討では片理面が水平に配す構造とし、PS アンカー(300kN)による支保効果をアンカー端部に節点外力を作用させることにより考慮した。なお岩盤物性値は表-2に示した値を用い、表-5に示す解析ステップにより空洞の逐次掘削とした。

まず、図-11に示す地下大空洞を含む広域地形解析メッシュを用いて自重解析を行い初期地圧を求めた。なお、自重解析では地山の単位体積重量 $\gamma=26.6\text{kN/m}^3$ 、ポアソン比は側圧比 $K=1$ を目安に $\nu=0.43$ とした。

自重解析による空洞周辺における初期地圧の計算結果

を図-12に示すが、最大主応力が右側に傾いている。これは地下空洞の上部の地表面が図-11に示すように傾斜しているためである。

表-5 解析ステップ

解析ステップ	掘削手順 (加背割)	掘削解放率	PSアンカー 打設範囲
STEP1	A1-1	40%	—
STEP2	—	60%	A1-1
STEP3	A1-2,3	40%	—
STEP4	—	60%	A1-2,3
STEP5	B1	100%	—
STEP6	B2	100%	—
STEP7	B3	100%	—
⋮	⋮	⋮	⋮
STEP15	B11	100%	—

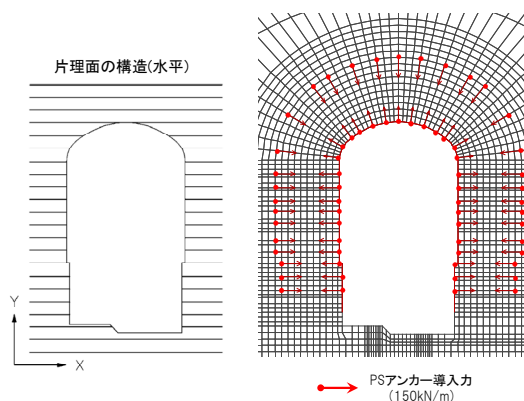


図-10 解析モデル(空洞周辺の拡大図)

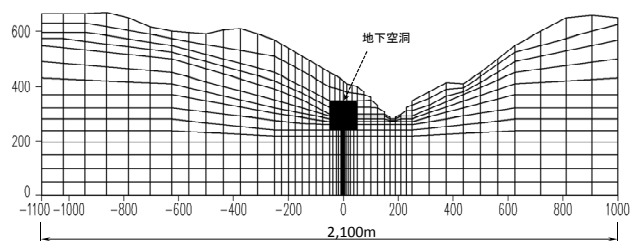


図-11 解析図メッシュ図(領域:水平 2100m×鉛直 700m)

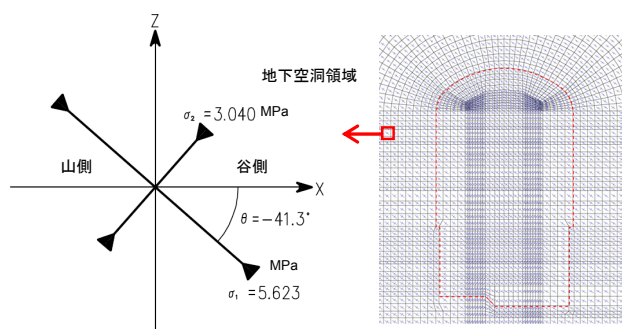


図-12 初期地圧の設定(自重解析)

2) 解析結果と考察

空洞の掘削完了時における岩盤の破壊要素分布を図-13に示す。なお複合降伏モデル(MYM)では片理面と基質部のそれぞれに対して破壊包絡線が規定されるため、片理面と基質部の破壊要素分布を別々に抽出できる。

図-13左図は片理面のみの破壊要素を示しているが、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る。すなわち、掘削後における最大主応力に対するすべり面方向と片理面のなす角度が低角度であるため、せん断破壊が進展したものと考えられる。なお、図-13右図を見ると空洞側壁部において岩盤の破壊が生じているが、この領域は岩盤基質部が破壊したことによる。

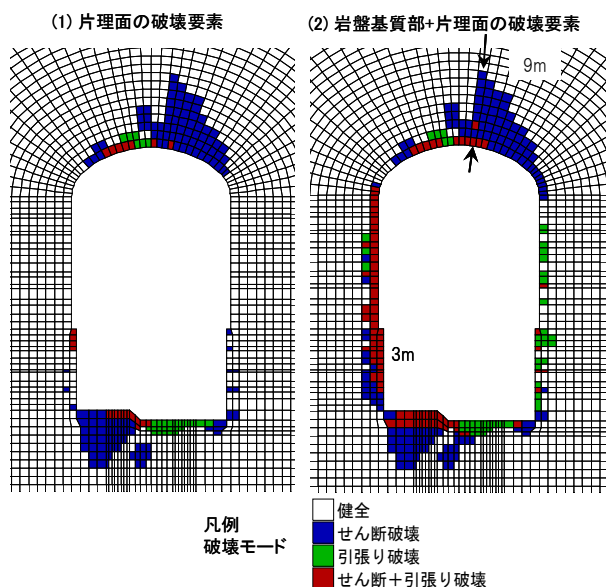


図-13 岩盤の破壊要素分布図（複合降伏モデル）

弾塑性モデルを用いた解析による岩盤の破壊要素分布を図-14に示す。この結果、弾塑性モデルでは空洞アーチ部右肩における破壊領域の深さは2m程度であり、しかも空洞全域にわたり破壊領域は比較的一様である。一方、複合降伏モデルでは図-13に示したようにアーチ部右肩部において破壊領域は9mの深さに進展している。

従って、複合降伏モデル(MYM)は片理面の角度や主応力の組み合わせにより、破壊の局所化を表現できることが確認できた。

5. おわりに

本論文では片理構造による異方性をモデル化するため、片理を潜在的な不連続面と見做し、変形・強度異方性を考慮できる複合降伏モデル(MYM)を地下大空洞モデルでの掘削解析に適用した。岩石三軸試験を対象とした要素モデルでのシミュレーション解析では強度異方性の妥当性を検証した。また、円形空洞モデルでは強度異方性・変形異方性の特徴を表現することができた。地下大空洞モデルでは異方性挙動の特徴を把握できたが、予測の段階であり、今後、実空洞の建設において挙動データを蓄積し当解析手法の適用性を検証する必要がある。

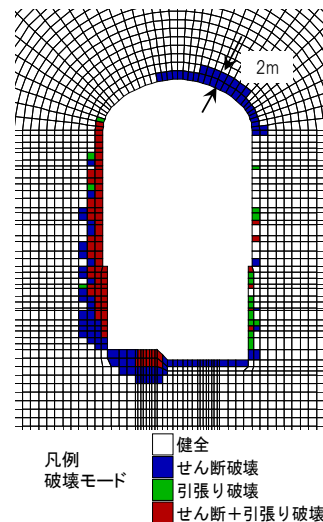


図-14 弾塑性モデル破壊要素

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

EXCAVATION ANALYSIS OF LARGE UNDERGROUND CAVERN USING MULTIPLE YIELD MODEL IN ANISOTROPIC ROCK

Takayuki MORI, Kazuto TABELI, Yoshinori KITAMURA,
Kazu SAITO and Katunori SASAKI

It was considered that the behavior of cavern during excavation be affected significantly by anisotropy and exfoliation in the well-developed anisotropic rock. It is difficult to represent the rock behavior accurately by the conventional homogeneous analysis model.

Therefore, authors applied the Multiple Yield Model (MYM) which can consider the anisotropy of strength and deformation of rock in this paper, and performed to validate the analytical method by element model analysis, and conducted excavation prediction analysis in large underground cavern model. This paper report on the trends and characteristics of cavern behavior in anisotropic rock by MYM.