

三次元ひずみ軟化解析による大規模地下空洞の掘削時挙動評価 3D Strain Softening Analysis of Rockmass Deformation Behavior of Large-scale Underground Excavations

大森剛志*・豊田耕一*・宇野晴彦*・南部茂義**

Takeshi OOMORI, Koichi TOYODA, Haruhiko UNO, Shigeki NANBU

Effects of three-dimensional in-situ stress and cavern shapes on the deformation behavior of large-scale underground excavations are studied using a 3D strain softening analysis tool. It is found that the out-of-plane initial stress affects the size of the damage area surrounding the excavations under the plane strain condition. Cavern shapes, characterized by the three-dimensional constraints due to rock thrust and end walls, are found to affect the rock mass deformation at different locations in the cavern. It is also found that excavation behavior in one section could affect the rockmass deformation and damage at other sections, which has been confirmed by field monitoring results.

1. はじめに

大規模地下空洞掘削時の岩盤挙動は、地山応力、空洞形状ならびに空洞周辺の地質状況の三次元的な影響を受けるが、空洞長さ方向の連続性により、一般的には二次元平面ひずみ状態を仮定して挙動予測解析が実施されている。しかし、地山応力が偏差している場合や空洞形状が三次元的に複雑な場合には、三次元の影響を考慮する必要があるものと考えられる。そこで、本研究では、三次元のひずみ軟化解析プログラムを用いて地山応力と空洞形状の三次元性が大規模地下空洞掘削時の岩盤挙動に及ぼす影響について検討した。

2. 解析手法

岩盤は、等方性均質材料とし、図-1に示すように破壊強度に達した後、残留強度まで応力が低下するひずみ軟化特性を有するものとした。岩盤の強度特性は、図-2に示すモール・クーロンの破壊基準を用い、せん断破壊した場合は、平均主応力 $\sigma_m = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$ 一定条件で残留強度に抵触するように次式により残留応力状態を設定した¹⁾。

$$\begin{cases} \sigma_1' - \sigma_m = \alpha(\sigma_1 - \sigma_m) \\ \sigma_2' - \sigma_m = \alpha(\sigma_2 - \sigma_m) \\ \sigma_3' - \sigma_m = \alpha(\sigma_3 - \sigma_m) \end{cases}, \quad \alpha = \frac{2c_r \cos \phi_r + 2\sigma_m \sin \phi_r}{(\sigma_1 - \sigma_3) + (\sigma_1 + \sigma_3 - 2\sigma_m) \sin \phi_r} \quad (1)$$

ここで、 $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ は破壊時の主応力、 $(\sigma_1', \sigma_2', \sigma_3')$ は破壊後の主応力、 c_r, ϕ_r は残留強度に対するモール・クーロンの強度定数である。

* 正会員 東電設計株式会社 技術開発本部 土木技術部

** 正会員 東京電力株式会社 建設部 土木・建築技術センター

岩盤が引張破壊した場合は、引張応力に抵抗できないno-tension材料を仮定した。せん断破壊および引張破壊に伴う余剰応力は等価節点外力として周辺要素に再配分した。再配分計算²⁾は修正Newton-Raphson法を用いた。

3. 地山応力の影響検討

空洞掘削時の岩盤挙動に及ぼす地山応力の三次元性の影響を検討するため、空洞軸方向の空洞形状の影響を無視した平面ひずみ条件における面外応力の影響を検討した。平面ひずみ条件の応力-ひずみ関係は次式で表わされる。

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2a)$$

$$\sigma_z = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} (\varepsilon_x + \varepsilon_y) \quad (2b), \quad \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0 \quad (2c)$$

通常実施される平面ひずみ条件 (x,y座標系) の解析は、式(2a)が用いられ、式(2b)の面外応力 σ_z を考慮しない。しかし、破壊を考慮した場合には、面外応力により破壊判定が異なることある。ここでは、全断面掘削の円形空洞および盤下げ掘削を伴う大規模空洞を対象に、面外応力をパラメータにした二次元ひずみ軟化解析を実施した。

(1) 解析条件

円形空洞は直径34m、大規模空洞は幅34m高さ52mである。盤下げを考慮した大規模空洞は、掘削を計16段階 (図-6参照) とした。表-1に解析に用いた物性値を、表-2に解析ケースならびに設定した初期応力を示す。初期応力のうち面内応力は一定とした。

(2) 解析結果

図-3に円形空洞周辺岩盤の破壊要素分布 (以降、破壊領域と呼ぶ) を示す。 $\sigma_z = \sigma_3$ の破壊領域は、面外応力を考慮しない場合と同じである。 $\sigma_z = \sigma_2$ および $\sigma_z = \sigma_1$ の破壊領域は、 $\sigma_z = \sigma_3$ よりも初期最大主応力方向 (図中矢印) の壁面周辺で大きく σ_z の影響が認められる。この影響は $\sigma_z = \sigma_2$ よりも $\sigma_z = \sigma_1$ の方が大きい。

図-4に破壊判定時の面外応力が最大あるいは最小主応力となる領域を示す。この領域は、 $\sigma_z = \sigma_3$ の場合には空洞から遠方に存在し、面外応力が破壊判定

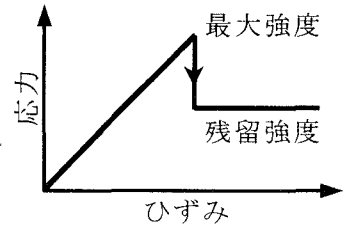


図-1 応力-ひずみ関係の理想化

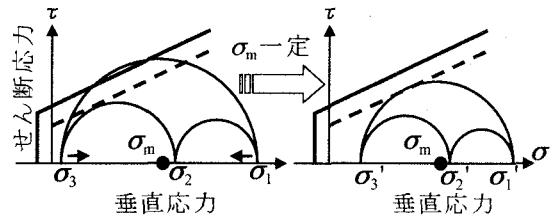


図-2 せん断破壊時の応力再配分

表-1 解析に用いた岩盤物性値

単位体積重量 γ (KN/m ³)	2.7	
弾性係数 E (GPa)	10	
ポアソン比 ν	0.25	
破壊強度	c_p (MPa)	1.5
	ϕ_p (°)	58
残留強度	c_r (MPa)	0.5
	ϕ_r (°)	50
引張強度 σ_t (MPa)	0	

表-2 解析に用いた初期応力

ケース	応力	面内応力			面外応力
		σ_1	σ_3	θ	σ_z
円形空洞	①	$\sigma_1 = 12.5$			-
	②	$\sigma_3 = 5.0$			σ_3
	③	$\theta = 27^\circ$			σ_2
	④	$\sigma_2 = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$			σ_1
大規模空洞	①	$\sigma_1 = 10.0$			-
	②	$\sigma_3 = 7.0$			σ_3
	③	$\theta = 27^\circ$			σ_2
	④	$\sigma_2 = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$			σ_1

単位: MPa

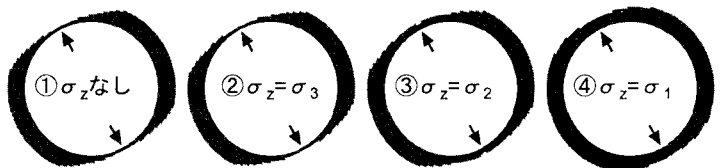


図-3 円形空洞周辺岩盤の破壊領域

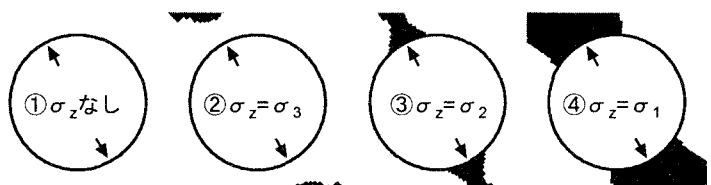


図-4 破壊判定時の面外応力が最大あるいは最小主応力となる領域

に影響しないが、 $\sigma_z = \sigma_2$ 、 $\sigma_z = \sigma_1$ の場合には空洞壁面近傍にも存在し、面外応力の影響により破壊の進展に寄与している。以上のことから、初期状態での面外応力が面内の最大・最小主応力の範囲内であっても、掘削後の破壊判定時に空洞近傍の面外応力が三次元応力場で最大・最小主応力となる場合

には、面外応力が破壊領域に影響を与えることが確認された。

図-5に大規模空洞周辺岩盤の破壊領域を示す。盤下げ掘削を伴う大規模地下空洞に及ぼす面外応力の影響が、全ケースにおいて認められる。通常の二次元解析の破壊領域と比較して、面外応力の影響は、 $\sigma_z = \sigma_3$ が最も小さく、 $\sigma_z = \sigma_2$ 、 $\sigma_z = \sigma_1$ の順に大きくなっており、円形空洞の結果と同様の傾向を示す。

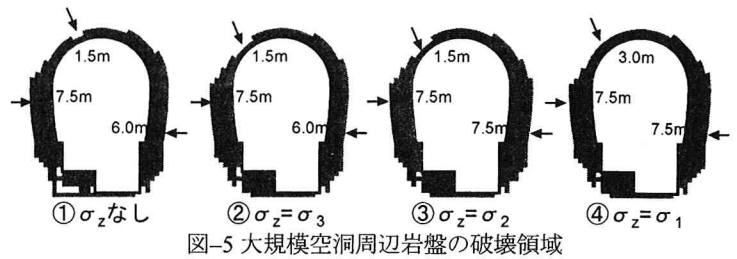


図-5 大規模空洞周辺岩盤の破壊領域

4. 空洞形状の影響

三次元的な空洞形状の影響を検討するため、実際の地下発電所空洞形状³⁾を模擬した三次元ひずみ軟化解析を実施した。

(1) 解析条件

地下空洞形状は、図-6に示すようなたまご型の断面形状とし、空洞中央部にロックストラットを設けた。掘削ステップは、一般的な掘削施工過程に合わせて、頂設導坑、アーチ部拡幅および盤下げ掘削を模擬し、計14段階とした。三次元FEMメッシュは、図-7に示すように、空洞形状の対称性により1/4の領域をモデル化した。岩盤物性は表-1に示す値を用い、初期応力は12.5MPaの等方応力状態とした。

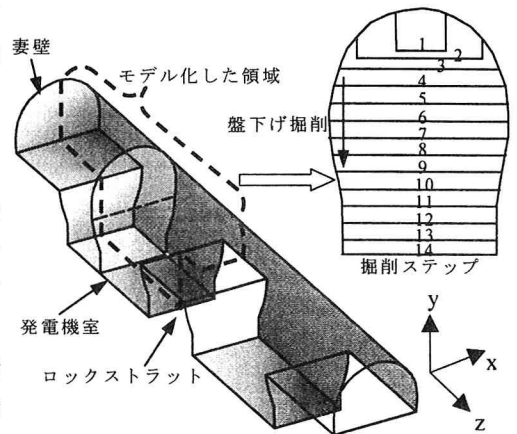


図-6 空洞形状と掘削ステップ

(2) 解析結果

ここでは、図-8に示す検討断面の破壊領域および変位分布に着目する。

三次元解析は、三次元的な空洞形状だけでなく、前述のように地山応力の影響を受ける。そこで、空洞形状の影響検討に先立ち、二次元解析と三次元解析の結果の比較により地山応力の影響を検討した。二次元解析は、発電機室中央のd断面を対象とし、面外応力を考慮しない場合と考慮する場合の2ケースを実施した。二次元解析と三次元解析のd断面の結果を図-9に示す。二次元解析では、面外応力を考慮した場合としない場合の破壊領域および変位分布に明瞭な差は認められない。二次元解析と三次元解析の破壊領域は同じであるが、変位量は三次元解析の方が小さくなっている。以上のことから、本解析条件下では、地山応力の三次元性が岩盤挙動に及ぼす影響は空洞形状の影響に比べ小さいことを確認した。以下に、空洞形状の影響について述べる。

三次元解析の各断面の破壊領域を図-10に示す。図-10(1)は第7ステップ終了時および第14ステップ終了時のa断面からg断面の破壊領域である。第7ステップ終了時の破壊領域は全断面同じであり、このステップの破壊領域には妻壁の影響は認められない。その後の第8ステップの発電機

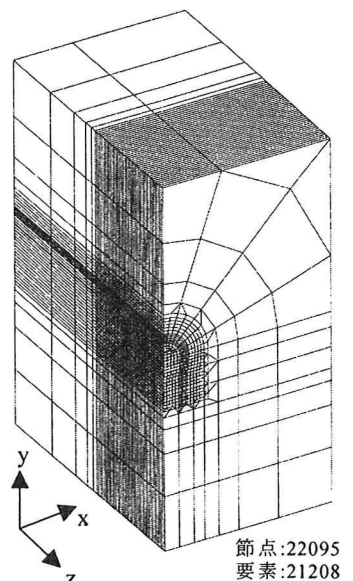


図-7 三次元FEMメッシュ

室掘削からロックストラットが形成され、空洞形状が複雑になるため、第14ステップ終了時の破壊領域は各断面ごとに異なっている。空洞側壁部の破壊領域は、発電機室中央のd断面で最大となり、ロックストラットに近いc,e断面でd断面に比べて小さくなっている。図-10(2)は第14ステップ終了時のA,B水平断面の破壊領域であり、空洞側壁部の破壊領域は発電機室中央部で最大となりロックストラットおよび妻壁に向かって縮小している。図-10(2)(3)によると、発電機室の左右の岩盤にはくさび状の破壊領域が形成されている。

図-10(1)の各断面における第7ステップと第14ステップの破壊領域の変化に着目する。a,b断面およびf,g断面は、第7ステップで掘削が終了するが、発電機室掘削が終了した第14ステップ終了時には破壊領域が拡大している。また、b断面はa断面よりも発電機室に近く、b断面の第14ステップ終了時の破壊領域は同じ掘削規模のa断面よりも大きい。同様の傾向がf,g断面間にも認められる。これらの断面における第14ステップ終了時の破壊領域の拡大は発電機室掘削の影響によるものと考えられ、掘削当該断面内だけでなく面外方向にも及ぶことが分かる。

三次元解析で得られた第7ステップと第14ステップのa,d,g断面の変位分布コンターを図-11に示す。a断面およびg断面では空洞周辺の変位分布が第7ステップから第14ステップにかけて増加しており、変位分布にも破壊領域と同様に面外方向の発電機室掘削の影響が及ぶことが認められる。

本解析で認められた発電機室掘削の影響については、図-12に示す葛野川発電所空洞掘削時の岩盤挙動⁴⁾の計測結果にも認められる。図-12(1)には、当該発電所空洞で前述のa,d,g断面に相当する位置における壁面変位の時刻歴を示す。ここで、壁面変位は、図中の概略図に示した空洞壁面からその法線方向20m間の相対変位量である。葛野川発電所空洞では、a,g断面の掘削は途中の第9ステップで終了し、d断面の掘削は最終の第17ステップで終了している。図-12(1)によれば、a,g断面の壁面変位は、当該断面の掘削が終了しても継続的に増加していることが分かる。また、図-12(1)の各ステップの変位を各最大変位で正規化した同図(2)によれば、a,g断面の変位の増加傾向はd断面の傾向とほぼ一致しており、d断面を含む発電機室の掘削の影響がa,g断面に及んでいると推測できる。

5. おわりに

三次元ひずみ軟化解析による大規模地下空洞の掘削時の挙動評価を地山応力と空洞形状に着目して実施した。地山応力の影響検討では、主応力によっては面外応力により空洞掘削時の破壊領域に影響を及ぼすことが確認された。空洞形状の影響検討では、以下の2点が確認された。①破壊領域や変位分布に三次元的な空洞形状の影響が認められる。②発電機室掘削の影響は当該断面だけでなく面外方向

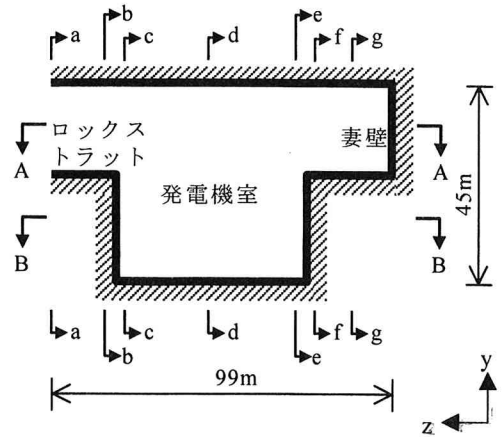


図-8 検討断面の位置

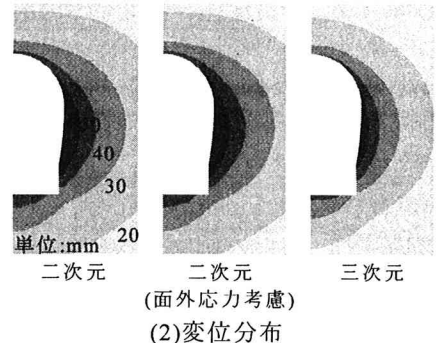
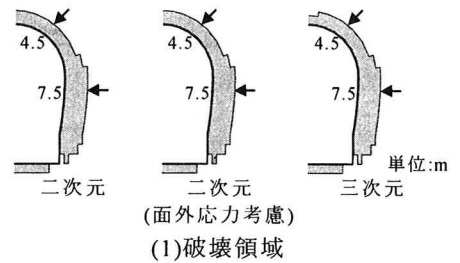


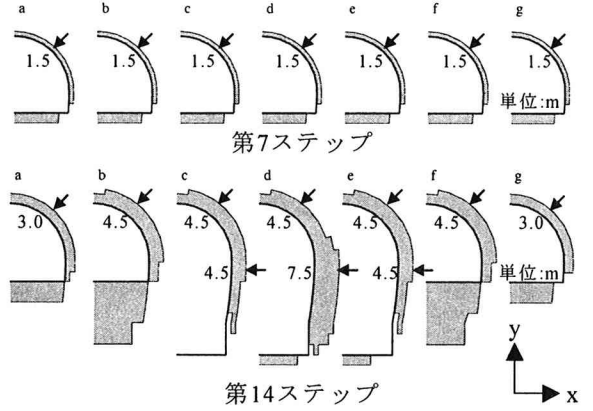
図-9 二次元と三次元の比較 (第14ステップ)

の断面にも及び、実岩盤の計測結果にも同様の挙動が認められる。今後は、空間的な地質構造の影響に着目した三次元解析を実施し、支保合理化について検討を行う予定である。

なお、本研究の実施に当たっては、小山俊博氏(東京電力)、田坂嘉章氏(東電設計)の指導、協力を頂いた。

参考文献

- 1) 田中、鶴飼、河邑、阪上、大津：地盤の三次元弾塑性有限要素解析、丸善株式会社、pp.84-90、1996。
- 2) 川本朧万、林 正夫：地盤工学における有限要素解析、培風館、1978。
- 3) 土木学会編：大規模地下空洞の情報化施工、pp.86-90、1976。
- 4) 小山・南部・小松崎：地下500mの大規模空洞、東京電力葛野川地下発電所、トンネルと地下、第28巻1号、pp.37~45、1997。



(1)a断面～g断面の破壊領域
 (2)A,B断面の破壊領域(第14ステップ)
 (3)空洞軸断面の破壊領域(第14ステップ)

図-10 三次元解析の破壊領域

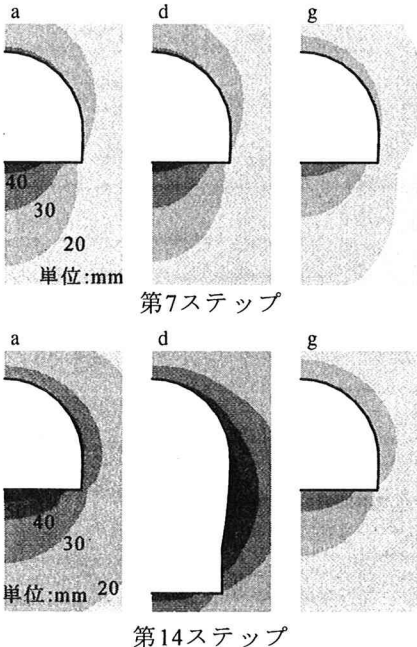
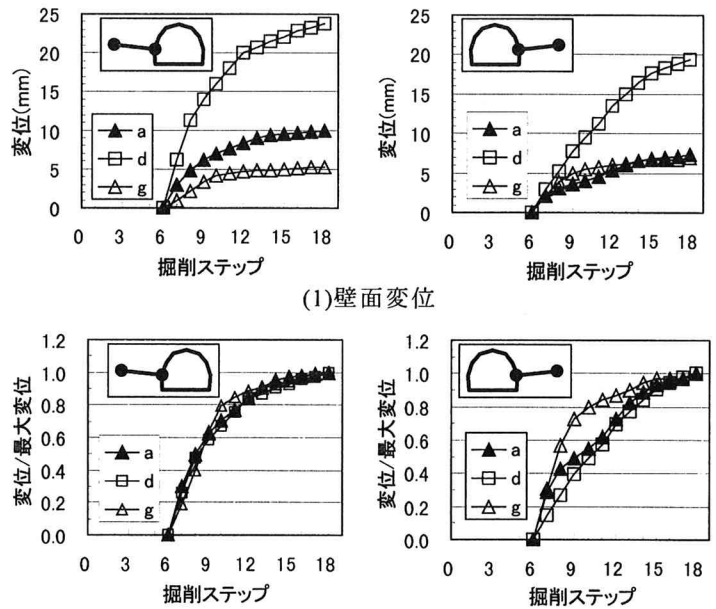


図-11 三次元解析の変位分布



(1)壁面変位
 (2)正規化した壁面変位
 図-12 地下空洞掘削時の岩盤変位の計測結果(葛野川発電所)