

節理の破壊を考慮したひずみ軟化解析を用いた大深度地下空洞設計手法の検討

東電設計(株) 正会員 宇野晴彦、田坂嘉章
東京電力(株) 南部茂義

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物処分については、現在、300m～1000m 程度の地下深部岩盤内地層処分が考えられている。日本では、地下 1000m の大深度における地下構造物としての坑道掘削の実績は少なく、現行の設計手法の適用については不明な点が多い。円形トンネル断面については、多くの理論解が提案されており、トンネル支保設計に適用されているが、基本的には、等方地山、等方初期応力が対象であり、不連続性岩盤や偏差応力が作用する岩盤には適用できない。また、高レベル放射性廃棄物処分では、核種移行の観点から周辺岩盤の掘削影響領域¹⁾の評価が重要な問題となる。

著者らは、地下 500m 程度の大規模地下空洞およびアプローチ坑道の掘削時挙動について、節理の破壊を考慮したひずみ軟化 FEM 解析手法(NAPIS：Non-linear Analysis Program Including Softening)を用い、岩盤挙動を評価した実績^{2),3)}がある。そこで、当解析手法を用いて、支保設計への適用を踏まえ、不連続性岩盤および偏差応力下での空洞掘削時岩盤挙動について検討を実施した。さらに、金子ら⁴⁾が不連続性岩盤を対象として行った支保設計手法検討と同様に当解析手法によるトンネルの支保設計手法の概念について基本的な検討を実施した。

2. 不連続面間隔および偏差応力

本検討では、直径 5m の無支保円形空洞を想定して、深度 500m の土被り厚さ相当 ($\gamma_t=27\text{kN/m}^3$, $\sigma_v=13.5\text{MPa}$)の地圧を考慮し、不連続面間隔および初期地圧の偏差応力をパラメータとして解析を実施した。

当解析手法は、図-1 に示すような一方向に卓越する不連続面とこれを包含する基質岩盤の破壊を考慮した等価連続体解析手法であり、岩盤の強度・変形異方性に加え、ひずみ軟化挙動を考慮できることが特徴である。基質岩盤および不連続面の物性値は、表-1 に示す葛野川地下発電所空洞解析²⁾で用いた物性値を適用した。

図-2 に等方応力下での各不連続面間隔における破壊領域図を示す。破壊領域は、不連続面のせん断応力が大きくなる方向(不連続面の直交方向)に広がっており、不連続面間隔が小さいほど大きくなる傾向を示している。次に、偏差応力の影響検討として、鉛直応力 σ_v ($=13.5\text{MPa}$) に対して、水平応力を $\sigma_h/\sigma_v=0.5$ および $\sigma_h/\sigma_v=1.5$ とした解析結果の破壊領域図を図-3 に示す。偏差応力下での破壊領域は、 $\sigma_h/\sigma_v=1.0$ の等方応力の結果に比べて、 $\sigma_h/\sigma_v=0.5$ で 120cm、 $\sigma_h/\sigma_v=1.5$ で 60cm といずれの場合も大きな値を示している。以上のことから、当解析手法によれば、空洞周辺の破壊領域は、不連続面間隔と偏差応力の影響を大きく受けることが分かった。

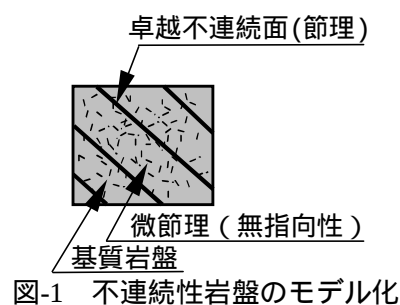


表-1 解析用物性値

基質岩盤	破壊強度	$c_p^R = 1.5(\text{MPa}), \phi_p^R = 58(^{\circ})$
	残留強度	$c_r^R = 0.5(\text{MPa}), \phi_r^R = 50(^{\circ})$
	初期接線弾性係数	$E_0^R = 40(\text{GPa})$
	ポアソン比	$\nu^R = 0.25$
不連続面	破壊強度	$c^J = 0(\text{MPa}), \phi^J = 50(^{\circ})$
	初期接線せん断剛性	$k_{s0} = 10 \cdot \sigma_n (\text{MPa/cm})$
	角度, 間隔	$\theta = -60^{\circ}(\text{右落ち}), S^J = 50(\text{cm})$

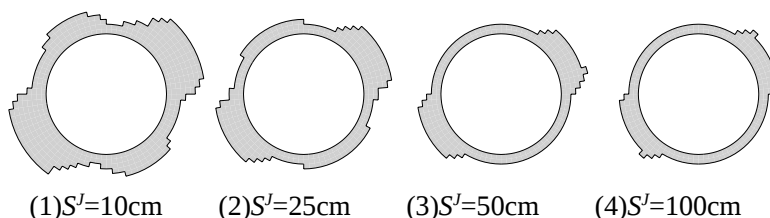


図-2 各不連続面間隔の破壊領域図

キーワード：大深度、トンネル、不連続性岩盤、偏差応力、支保

3. 支保設計手法の検討

前述の不連続面間隔 $S'=50\text{cm}$ の基本ケースを用いて、直径 5m の円形空洞に支保を考慮した解析を実施した。支保は、円形空洞内側の吹付けコンクリート支保をトラス要素でモデル化したものであり、支保の施工期間を考慮して⁵⁾、弾性係数 5GPa を設定し、等方応力条件下での空洞深度 (250m : 6.75MPa、500m : 13.5MPa、750m : 20.25MPa、1000m : 27MPa) とコンクリート厚 ($t=5, 10, 20, 30, 40\text{cm}$) をパラメータとした。解析では、掘削解放力を 50% 作用させて切羽前方の応力解放を考慮した後、支保工を付加して残りの 50% を作用させた。

図-4 に解析結果として、コンクリート厚さと破壊領域深度(最大深度)の関係を示す。各空洞深度において、吹付けコンクリートが厚くなるのに伴って、破壊領域が小さくなるのが分かる。また、空洞深度が深くなるのに伴って、同じコンクリート厚さの場合には、破壊領域が大きくなる傾向を示すことが分かる。図-5 には、同解析結果によるコンクリート厚とコンクリート応力(最大応力)の関係を示す。コンクリート応力は、空洞深度毎には、コンクリート厚が小さいほど大きく、コンクリート厚毎には、空洞深度が深いほど大きくなるのが分かる。

これらの関係から、例えば、深度 500m の空洞において、空洞周辺の破壊領域を 60cm 程度に維持したい場合には、吹付けコンクリート厚は 10cm 程度で良いこととなるが、コンクリート応力については、12MPa 程度発生しており、安全を考えて 10MPa 以下にしたい場合には、20cm のコンクリート厚が必要になることが分かる。同様に、破壊領域 60cm 程度、かつコンクリート応力 10MPa 以下とした場合の各深度におけるコンクリート厚を求めると、深度 250m では、 $t=5\text{cm}$ 、深度 500m では、 $t=20\text{cm}$ 、深度 750m では、30cm、深度 1000m では、40cm 以上の結果が得られ、支保量の算定が可能と考えられる。

4. おわりに

本検討では、不連続性岩盤における大深度トンネルの成立性評価を踏まえ、円形空洞における吹付けコンクリートを考慮した簡易なモデルで支保設計手法に関する検討を実施したが、実施工に当たっては、覆工コンクリートやコンクリートセグメントが用いられものと考えられ、今後は、これらのモデル化も考慮して検討を実施する予定である。

参考文献

- 1) 地層処分研究開発第2次取りまとめ<総論レポート>、核燃料サイクル機構、p. -91、1999.4.
- 2) 田坂ら：節理の破壊を考慮したひずみ軟化解析による地下発電所空洞掘削の解析、第10回岩の国内シンポジウム講演論文集、pp.605～610、1998.1.
- 3) 鈴木ら：節理・へき開の発達した堆積岩中に掘削された大深度地下空洞の変形特性、土木学会第55回年次学術講演会、投稿中
- 4) 金子ら：MBC 解析に基づく大深度におけるトンネル支保設計手法、土木学会第55回年次学術講演会、投稿中
- 5) 土屋 敬：トンネル設計のための支保と地山物性値に関する研究、土木学会論文集、第364号/ -4、pp.31 - 40、1985.12.

