

三次元ひずみ軟化 FEM 解析による坑道交差部の影響検討

東電設計(株) 正会員 田坂嘉章、豊田耕一、大森剛志、宇野晴彦

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物処分は、地下深部岩盤内地層処分が考えられており、その際には、延長 100km ~ 200km もの縦横に交差・分岐する主要坑道や処分坑道が建設されることとなる。道路トンネルのような線形構造物の場合には、トンネル断面内の初期地圧を考慮し、理論解や簡便的に平面ひずみ状態を仮定した FEM 解析により支保設計が実施されているが、複数の坑道が交差・分岐する場合には、3 次元的な坑道形状や初期地圧の影響を考慮する必要があるものと考えられる。著者らは、地下 500m の大規模地下空洞掘削を対象として 3 次元ひずみ軟化 FEM 解析コードにより複雑な空洞形状に対する三次元効果の検討^{1),2)}を実施しており、形状効果や主応力の影響を確認している。ここでは、主要坑道と処分坑道の交差部に着目し、坑道掘削時の周辺岩盤への影響について同解析手法を用いて検討した。

2. 解析手法

岩盤は、等方性均質材料とし、応力～ひずみ関係として図-1 に示すような最大強度に達した後、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、モール・クーロンの破壊基準を用い、せん断破壊した場合には、 $\sigma_m = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$ 一定条件で残留強度に抵触するような応力解放状態を表現した。また、岩盤が引張破壊した場合には、引張応力に抵抗できない no-tension 材料を仮定し、引張応力を 0 とした。せん断破壊および引張破壊の余剰応力は、等価節点外力として周辺要素に再配分した。再配分計算は、修正 Newton-Raphson 法を用いた。

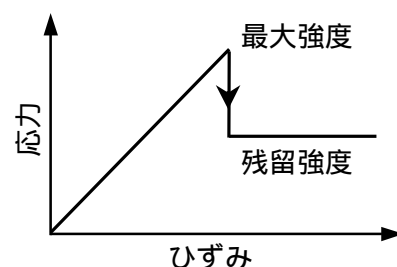


図-1 岩盤の応力 - ひずみ関係

3. 解析モデルおよび解析条件

モデル化する処分坑道については、現行では、搬送装置の効率性、走行性を考慮したパネル状のレイアウトが計画されており、主要坑道と処分坑道の分岐部については、搬送装置の回転性を考慮して 135° 程度の角度で分岐し、その後、所定の角度まで円軌道ですり付けられる。ここでは、概略的な坑道交差部の影響を検討するため、図-2 に示すような直径 5m の円形断面による処分坑道の交差部を想定した。解析に用いた解析メッシュは、均質岩盤、等方応力を仮定することから 1/2 モデルとし、要素数 62,352、節点数 65,200 とした。境界条件については、周辺境界を面内フリー条件とした。初期地圧は、地下深部 500m 程度を仮定して、 $\sigma_v = 13.5\text{MPa}$ の等方初期応力状態を設定した。坑道掘削は、主要坑道を 1step で掘削した後、処分坑道については、2m 毎の切羽進行過程を考慮した。解析用物性値については、表-1 に示す深度 500m 程度の堆積岩の物性値を設定した。

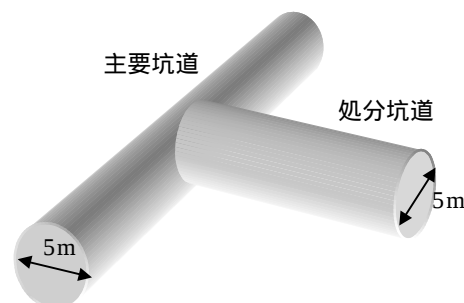


図-2 解析モデルの模式図

表-1 解析用物性値

破壊強度	$c_p = 1.5(\text{MPa}), \phi_p = 55(^{\circ})$
残留強度	$c_r = 0.5(\text{MPa}), \phi_r = 50(^{\circ})$
引張強度	$\sigma_t = 0(\text{MPa})$
弾性係数	$E = 30(\text{GPa})$
ポアソン比	$\nu = 0.25$

4. 解析結果

図-3 に最終掘削時の坑道交差部周辺の局所安全係数(f_s)のコンターを 3 次元線形弾性解析結果と比較して示す。線形解析の f_s は、表-1 に示した最大強度および引張強度を用いて求めた。 f_s 1.0 の領域 (破壊領域) に着目すると、ひずみ軟化解析では、交差部で最も破壊領域が大きく、

キーワード：岩盤、3 次元解析、ひずみ軟化、トンネル、交差部

〒110-0015 東京都台東区東上野 3-3-3 TEL：03-4464-5571 FAX：03-1164-5595

処分坑道側壁の破壊領域は交差部中心位置から 1D (D: 坑道径) で 75cm、2D で 50cm となっている。この破壊領域により処分坑道に及ぼす交差部の影響範囲を求めると、交差部中心位置から 1.5D 程度となっている。線形解析の f_s 1.0 の領域には、明瞭な部位ごとの差異は認められない。

図-4 は、交差部における主要坑道の内空変位 (図中の A 測線) を処分坑道の切羽進行との関係で表したものである。ひずみ軟化解析による A 測線の内空変位は、処分坑道の切羽進行が交差部中心位置から 12m 深度 (約 2.5D : D 坑道径) に到達するまで急増し、その後は収束に向かっていく。この傾向は、実際のトンネル交差部の計測挙動³⁾においても確認されている。一方、線形解析では、側壁がはらみ出すひずみ軟化解析とは内空変位の正負が逆の挙動となっており、処分坑道の切羽進行が 7m 深度 (約 1.5D) に到達するまで主要坑道の内空変位が大きくなり、その後は、僅かではあるが側壁がはらみ出す方向に変位が発生している。

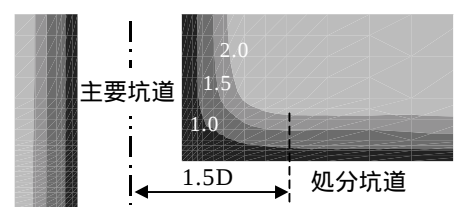
図-5 には、処分坑道の水平方向の内空変位 (処分坑道掘削時の変位増分) 分布を示す。ひずみ軟化解析の内空変位は、交差部で最も大きく、交差部から離れるにしたがって小さくなっている。そして、交差部中心位置から 12m (約 2.5D : D 坑道径) 以深では変位量が一定値となっており、処分坑道への坑道交差部の影響がこの深度まで及ぶことがわかる。この約 2.5D の深度は、図-4 で示した主要坑道の内空変位に及ぼす処分坑道の切羽進行 (切羽位置) に対応しており、この傾向も実際のトンネル交差部の計測挙動³⁾で確認されている。なお、線形解析の内空変位の分布傾向は、ひずみ軟化解析とは異なり、交差部近傍で小さくなる傾向を示している。

5. おわりに

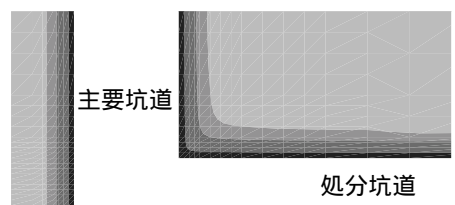
3次元および切羽進行を考慮した坑道交差部の岩盤挙動は、ひずみ軟化解析を用いた場合、処分坑道を 2.5D 掘削する段階まで双方の坑道に影響することが判明した。一方、3次元線形弾性解析では、異なった解析結果が得られているが、ひずみ軟化解析の変形挙動が実際のトンネル交差部の挙動を定性的に表現できていることから 3次元的な交差部の影響範囲を評価するには、岩盤の材料特性、掘削過程を考慮することの必要性が示唆される。

参考文献

- 1) 豊田ら：ひずみ軟化解析による大規模地下空洞の三次元効果の検討、土木学会第 54 回年次学術講演会、pp.306-307、1999.9.
- 2) 大森ら：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、第 30 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.93-97、2000.1
- 3) 毛利ら：トンネル交差部の地山挙動、第 17 回岩盤力学に関するシンポジウム、pp.266-270、1985.2



(1) ひずみ軟化解析



(2) 線形弾性解析

図-3 局所安全係数コンター(水平断面)

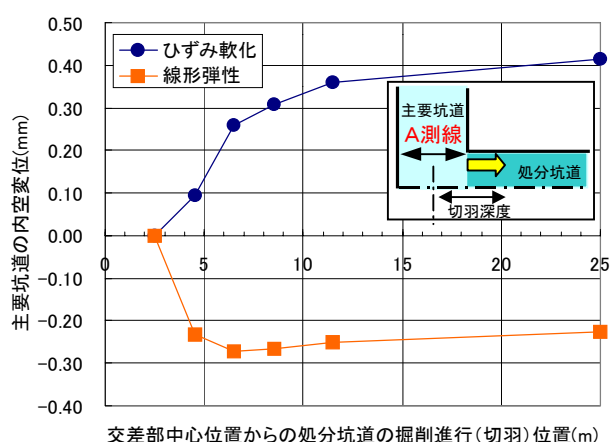


図-4 主要坑道の内空変位量と処分坑道の切羽進行の関係

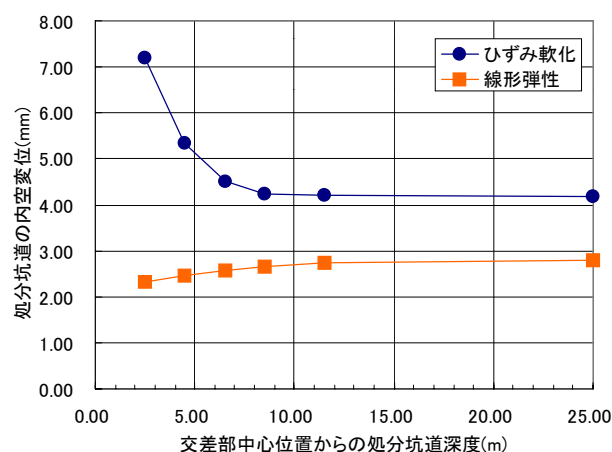


図-5 最終掘削時の処分坑道の内空変位分布