

超深地層研究所計画における施設設計・施工の現状

- 研究坑道掘削に伴う計測のための事前解析 -

核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター 正会員 佐藤 稔紀 FRI-会員 今津 雅紀
(株)シーテック 技術コンサルタント部 正会員 ○鈴木 隆 正会員 横井 幹仁

1. はじめに

核燃料サイクル開発機構が進めている深地層の研究施設計画のひとつである花崗岩（結晶質岩）を主な研究対象とする瑞浪超深地層研究所では、深度 1,000m まで達する 2 本の立坑と立坑掘削後に施工する 500m および 1,000m の深度における水平坑道群からなる大深度の地下研究施設の建設に着手した段階である（図 1 参照）。研究坑道掘削工事の当初設計においては、近傍のボーリング孔（DH-2 号孔：深度 500m）のデータ等を用いて地質モデルを設定し、有限要素解析により支保工の妥当性を評価し、支保パターン設計等に反映している。今回の解析においては、深度 1,000m のうち GL-300m までの区間に対して、設計時点以後に取得された新たな地質データ¹⁾を加味して、軸対称モデルと平面ひずみモデルの有限要素解析を用いて、設計断面検証および断面における計測値の予測を行ったので、その結果を報告する。

2. 解析条件（解析モデル・岩盤物性・初期地圧・破壊基準）

解析対象は、図 1 に示す主立坑および換気立坑における 300m までの区間で、2 本の立坑とこれを連絡する深さ 100m 毎に設置される水平坑道（予備ステージ）である。ここでは、その内の立坑を対象とした解析について述べる。立坑の諸元を表 1 に示す。

立坑のモデル化手法としては、立坑や地質構造を立体的にモデル化が可能である三次元モデル、立坑中心を回転軸としてモデル化する軸対称モデル、立坑の水平断面を平面ひずみ状態と仮定する平面ひずみモデルが考えられる。これらのモデルの適用は、周辺岩盤等の情報の精度や構造等によって選定される。ここでは、周辺岩盤がほぼ水平な層を成す堆積岩（瑞浪層群で表層 170m 付近まで）とその下部の花崗岩で構成されているので、軸対称あるいは平面ひずみ問題としてモデル化可能と考え、切羽の進行過程を模擬できる軸対称モデルと、水平方向の初期地圧の偏圧を考慮できる平面ひずみモデルを適用した。

地質モデルの設定には、浅層試錐調査や深層試錐調査により瑞浪層群を中心に新たな地質データが取得されており¹⁾、これを加味して岩盤等級毎に表 2 に示す物性値を設定した。また、掘削岩盤面から 0.8m 範囲を発破による損傷領域とみなし、変形係数を健全部の 1/4 とした。解析手法としては、岩盤の破壊判定を桜井らによる限界せん断ひずみ²⁾により判定し、破壊後の岩盤の変形係数を破壊前の 1/1,000、ポアソン比を 0.49 に設定する弾塑性解析を採用した。

解析ケースは、軸対称モデルでは主立坑と換気立坑について、それぞれ水平初期地圧を鉛直地圧（ $p \cdot g \cdot h$ ）に対して 1.2 倍および 1.5 倍とした計 4 ケースを実施した。平面ひずみモデルでは主立坑・換気立坑を含む解析領域とし、側圧比を鉛直地圧に対して比率 1.5：1.5（等方等圧の場合）、比率 1：1.2 および 1：1.5（偏圧を受ける場合）の 3 種類とした。また、図 1 に示すように深度別に 6 断面を選択し、これらの組み合わせから計 14 ケースについて実施した。

3. 解析領域および手順

軸対称モデルにおける解析領域は、深度 300m までを解析対象とするため深度方向 400m とし、半径方向は立坑中心から 10D（D：掘削径 = 7.3m）以上を確保することとし 73m とした。立坑掘削工法は、ステップ長 1.3m のショートステップで掘削し、2.6m ごとに覆工を行うように計画したので、解析対象深度の前 5 ステップ、後 5 ステップは、2.6m のステップ（前ステップで掘削した部分に覆工要素を付加し、次のステップを掘削）を模擬する逐次掘削解析を適用した。このとき、覆工コンクリート（設計基準強度 24MPa）の弾性係数は、一軸圧縮強度と同様に、打設後の経過時間に依存することを考慮して、切羽が進行するに従って徐々に硬化するよう設定した。

一方、平面ひずみモデルでは、解析領域は両立坑を含む領域とし立坑から 5D 以上の解析領域を確保する両立坑の中心軸を通る方向 140m、その直交方向 100m の範囲とした。この解析では、軸対称解析結果を参考に応力解放率を定め覆工打設前の解析を行い、次に覆工要素を付加して残りの応力を解放するというような施工手順を忠実に再現した解析を実施した。このときの覆工コンクリートの弾性係数は初期材齢（1 日材齢）のものとした。図 2 に軸対称モデルの解析メッシュを、図 3 に平面ひずみモデルの解析メッシュを示す。

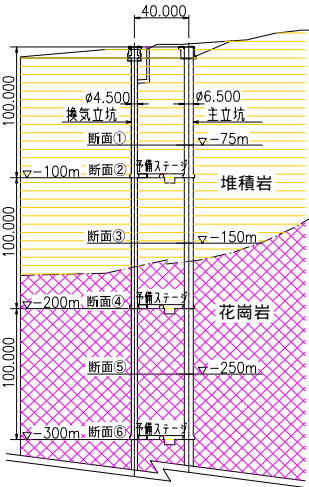


図 1 研究坑道概要図

表 1 立坑の諸元

	深度 (m)	一般部 断面径 (m)	接続部 断面径 (m)	覆工厚 (m)
主立坑	1,000	6.5	8.7	0.4
換気立坑	1,000	4.5	6.7	0.4

表 2 周辺岩盤の物性値

岩種	岩級	変形係数 (MPa)	ポアソン比	一軸圧縮強度 (MPa)	単位体積重量 ρ (kN/m ³)	限界せん断 ひずみ(%)
堆積岩	D	860	0.3	4.4	19.5	0.66
	C _L	1,900	0.3	6.7	19.5	0.46
花崗岩	C _M	24,530	0.35	63.1	26.0	0.40
	C _H	30,080	0.35	89.7	26.0	0.40
	B	35,640	0.35	116.3	26.0	0.40

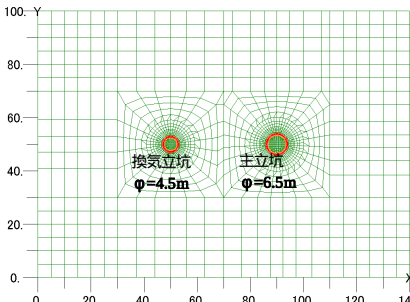


図 3 平面ひずみ解析モデル

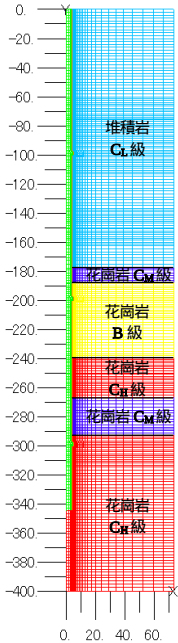


図 2 軸対称解析モデル

キーワード：立坑，深地層の研究施設，弾塑性有限要素法，応力解放率，軸対称解析
〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内 1-64 核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター 瑞浪超深地層研究所 施設建設グループ
TEL：0572-66-2244，FAX：0572-66-2245

4. 解析結果

(1) 掘削時の応力解放率

平面ひずみ解析では、掘削（素掘）時の応力解放率 α を定める必要がある。ここでは、 α をパラメータとした解析を行い、この結果と掘削ステップを模擬した軸対称解析モデルにより求める岩盤内部のひずみ分布と比較することにより、応力解放率を同定した。その結果、ひずみ分布がほぼ一致した応力解放率を表3に示す。これより、掘削時の応力解放率は、岩盤が硬い方が大きい傾向を示すが、概ね一定と考え、平面ひずみモデルの解放率を80%と設定した。

表3 掘削時の応力解放率の同定

掘削深度 (m)	岩級	掘削時の応力解放率 α (%)
-75	C _L	80
-150		80
-250	B	85
平均		82

(2) 切羽進行に伴う変位および覆工応力度

切羽進行を模擬している軸対称モデルの解析結果として得られる変位は、図4の模式図に示すように1ステップ(2.6m)の内で切羽に近い下端部は変位が小さく中央部付近では大きくなる。図5は切羽の離れと岩盤面の内側への変位量の関係を示したもので、平面ひずみモデルの結果も合わせて記した。ステップ中央部では下端部の2倍以上の変位となっている。図6には切羽進行に伴う覆工応力度の変化を1ステップについて2分割した要素ごとに示した。覆工応力度は切羽進行の影響が大きい下要素の方が大きな値を示していた。同図中に平面モデルの結果も合わせて示すが、GL-75m地点では掘削時の解放率を80%とすれば、軸対称モデルと概ね整合する結果が得られることが分かる。

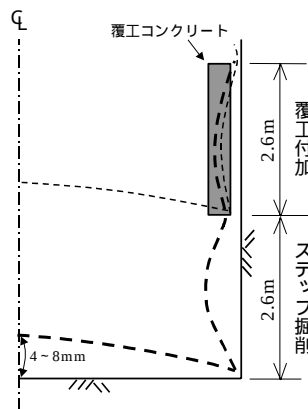


図4 軸対称解析の変位模式図
----- 1ステップ前掘削時の変位
----- 岩盤面の変位

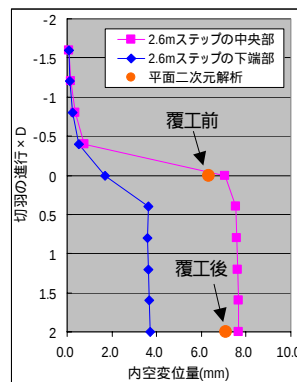


図5 岩盤変位の例 (GL-75m 地点)

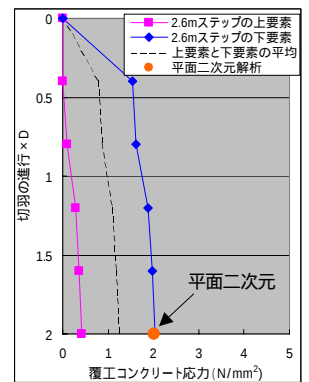


図6 覆工応力度の例 (GL-75m 地点)

(3) 岩盤内せん断ひずみ分布および覆工応力度

平面ひずみモデルで、初期地圧の側圧比を変化させた解析を行い、その結果得られた GL-150m 地点の立坑周辺岩盤のせん断ひずみ分布を側圧の強さごとに図7に示す。発破による損傷領域（掘削面から80cm 範囲）のひずみが大きく、偏圧を受けると斜め位置でせん断ひずみが大きくなり、この範囲に塑性領域が分布している。この塑性領域の分布が広い GL-150m 地点においても塑性領域は掘削面からほぼ1m 以内で、覆工で十分支持できている。

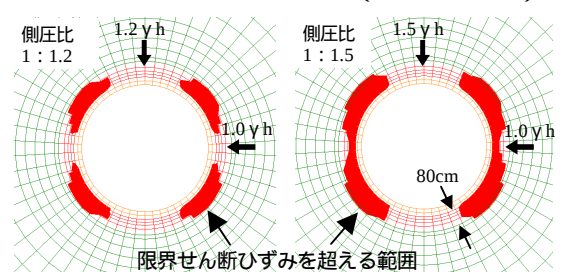


図7 周辺岩盤のせん断ひずみ分布の例 (GL-150m 地点)

覆工コンクリートに発生する円周方向軸応力度を表4に示す。この結果から、軸対称解析時に最も条件的に厳しくなる堆積岩の GL-150m においても設計基準強度 (24N/mm²) の 1/2 以下を示しており、覆工コンクリートの安全性は十分担保されていると判断される。なお、平面ひずみモデルで偏圧を考慮した場合は覆工に曲げを生じるが、縁応力度は表4の () 内に示すように塑性領域が大きくなると曲げによる影響から、より大きくなる傾向を示した。

表4 主立坑の覆工コンクリートの発生応力度 (圧縮: N/mm²)

岩種, 岩級		堆積岩 C _L 級			花崗岩		
		-75	-100	-150	B級 -200	C _H 級 -250	-300
軸対称モデル ¹		2.04	7.23	11.41	1.84	4.56	3.51
初期地圧 1.5:1.5 ²		2.05	3.43	—	—	—	—
平面ひずみモデル () 内 数値は 縁応力	初期地圧の側圧比 1.5:1.5 ²	2.05	3.43	—	—	—	—
	1.0:1.2 ²	1.62 (1.76)	2.20 (2.33)	4.38 (6.64)	0.48 (0.51)	0.76 (0.80)	0.85 (0.88)
	1.0:1.5 ²	2.01 (2.22)	2.91 (3.41)	5.41 (8.36)	0.65 (0.68)	0.96 (1.01)	1.03 (1.08)

1: 発生応力の大きい下要素の値を示す。

2: 鉛直方向初期地圧を1とした場合の南北および東西方向に設定した値

5. 解析結果の考察と今後の予定

軸対称モデルの解析結果から、切羽の直近で覆工コンクリートを打設する場合には、覆工打設前の掘削時点の内空変位は、1ステップ(2.6m)間で切羽との接近度合いにより解放される変位量(応力)が異なり、切羽に近い場所では覆工コンクリートの発生応力度は大となる。一方、平面ひずみモデルは切羽掘削面の拘束効果が模擬できないため、応力解放率を設定し、近似的に切羽進行に伴う覆工応力度を算出することとなるが、深度が大きく、硬質岩盤になるほど覆工コンクリートの応力負担は過小評価となり、危険側の評価となった。この結果、平面ひずみモデルを用いた検討では、評価対象を周辺岩盤とするか覆工とするかによって異なる応力解放率を設定するなどの方法が必要であると考えられる。

同ステップ内でも覆工発生応力が異なることや、偏圧を受ける場合では斜め方向に限界ひずみを超える領域が増加する等の結果が得られたため、今後の計測にあたっては、その検証に着目した計測を実施する。計測結果と今回の解析により得られた変位や応力度の予測値を比較することで研究坑道の設計の妥当性を確認していくとともに、掘削に伴い得られる詳細な地盤特性や計測結果をフィードバックすることによって、設計手法の高度化を図っていく予定である。

6. おわりに

瑞浪超深地層研究所では平成15年7月に立坑坑口工事に着手し、現在、掘削のための櫓等の仮設構造物を建設中である。研究坑道掘削中には各種調査、計測を予定しており、そこで得られた知見については今後も報告していく所存である。

【参考文献】 1) 早野 明, 佐藤稔紀, 今津雅紀: 超深地層研究所計画における施設設計・施工の現状・瑞浪層群の地盤特性と解析用物性値の設定について, 土木学会第59回年次学術講演会(投稿予定), 2) 桜井春輔, 川嶋幾夫, 大谷達彦, 松村真一郎: トンネルの安定性評価のための限界せん断ひずみ, 土木学会論文集, No.493/ -27, pp185~188, 1994.6