

長期岩盤挙動評価技術への適応性検討（その1）

浸透-応力連成解析を用いた

断層部に位置する立坑の力学挙動評価

納多 勝^{1*}・佐藤 伸¹・丹生屋純夫¹・畑 浩二²・松井 裕哉³・見掛信一郎³

¹大林組 本社原子力本部原子力環境技術部（〒108-8502 東京都港区港南2-15-2 品川インターシティB）

²大林組 技術本部 技術研究所（〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4丁目640）

³独立行政法人日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門 結晶質岩工学技術開発グループ
（〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内1番地64）

*E-mail: noda.masaru@obayashi.co.jp

瑞浪超深地層研究所における主立坑は断層部に位置しており、その影響によって地下水流動場の異方性が確認されている。今後、裏面排水材の劣化や地下水場の変化によっては水圧による覆工応力が増加し覆工に変状が生じる可能性もある。そのため、水圧変化による影響を予測する手法について検討する必要がある。そこで、本検討では浸透-応力連成掘削解析を実施し、透水性の異方性の影響について主立坑で計測されているB計測との比較を行い解析方法の妥当性の検討を行った。検討の結果、顕著な水圧依存の傾向は見られなかったものの、透水性の異方性を考慮することによって本立坑の挙動を模擬することができ、劣化手法の予測としての浸透-応力連成解析の適応性を確認した。

Key Words : shaft excavation, hydro-mechanical coupled analysis, hydrological anisotropy, underground research laboratory

1. 背景と目的

放射性廃棄物処分施設における建設・操業期間は、通常の土木構造物に求められる耐用年数と同等の期間（60年～100年程度）を要し、建設・操業期間中に構造物の性能劣化を極力抑えた長期の性能維持が求められる。日本原子力研究開発機構が岐阜県瑞浪市に建設中の瑞浪超深地層研究所¹⁾では、立坑が建設開始から8年余を経過し今後も坑道内において様々な調査研究を実施することから、安全確保のため支保工機能に関して一定の性能維持が求められており相応の維持管理を実施している。

トンネル構造物の外力による劣化要因の一つとして、空洞掘削時に周辺岩盤中に生じる地下水の移動と応力再配分の複合現象（浸透-応力連成現象）が考えられる。具体的には、空洞掘削時の応力再配分によって空洞近傍の岩盤中に一時的に過剰な間隙水圧が発生し、岩盤中の不連続面等の開口現象が誘発され不安定領域が発生することで、支保工の力学的安定性に影響を及ぼすことが懸念される。この現象は、対象岩盤の透水性に依存し、長期間に及ぶ可能性がある。特に瑞浪超深地層研究所の主立坑は、透水性が低い断層および付随する変質領域が、深度200m程度から出現する土岐花崗岩部の深度500mまで壁面に出現する脆弱な領域を掘削しており、上記のような現象が発生する可能性があることから、本研究では、水と応力の連成を考慮した掘削解析を実施し、有効応力

の変化が岩盤の変形や覆工、支保工に及ぼす影響に関して検討を行った。具体的には、平成18年に瑞浪超深地層研究所主立坑において実施したパイロットボーリング²⁾の岩石コアから各岩盤等級におけるモデルパラメータを設定し³⁾、B計測が実施されている瑞浪超深地層研究所主立坑の深度GL-250mを対象とした3次元の浸透-応力連成掘削解析を実施して、実測値との対比から浸透-応力連成現象が支保工の力学的安定性に与える影響を検討した。また、本立坑は断層部に位置することから、地質構造に起因する透水異方性を考慮した解析も合わせて実施した。

2. 解析の考え方

(1) 解析領域と条件設定の基本方針

解析対象は瑞浪超深地層研究所主立坑とし、B計測（地中変位計測、覆工コンクリート応力計測、鋼製支保工応力計測）を行っている単純な三次元構造である主立坑一般部のGL-250.0m地点を対象深度とする。掘削解析は、対象深度から4D（D=坑道径）程度上部から、対象深度に掘削に伴う応力変化が生じなくなる領域まで実施し、その間に発生した対象深度の地中変位、覆工コンクリート応力、鋼製支保工応力と計測結果を比較した。

解析における最終掘削深度（着目深度から切羽までの

距離)は、対象深度から39m深い地点とした。これは図-1に示す計測実績より、地中変位、覆工コンクリート応力及び鋼製支保工応力の変化が、着目深度から切羽までの距離が40.0m程度まで掘削されると十分収束すること、ショートステップ工法における1発破当たりの掘削深度は1.3mであることによる。

解析コードは汎用非線形有限要素法プログラムABAQUS⁴⁾を用いた。掘削解放応力は、等価節点外力として掘削面へ荷重し、初期地圧 σ_v は土の単位体積重量 γ_t を用いて下記のように設定した。

$$\sigma_v = \gamma_t \times \text{深度} \quad (\text{ここに, } \gamma_t = 26 \text{ kN/m}^3)$$

初期応力条件は、深度200m地点で実施した初期地圧の測定値⁵⁾から鉛直方向応力 σ_z と直交する水平2方向応力 σ_x と σ_y の比率を $\sigma_z : \sigma_x : \sigma_y = 1 : 1.8 : 1.4$ と設定した。

また、本研究では、比較のため、側圧係数(水平面内の応力比)を等方としたケースも実施している。

掘削直後の解放応力は、実施設計時の値を踏襲し80%とし、支保工へ20%後荷を負荷した。降伏基準は

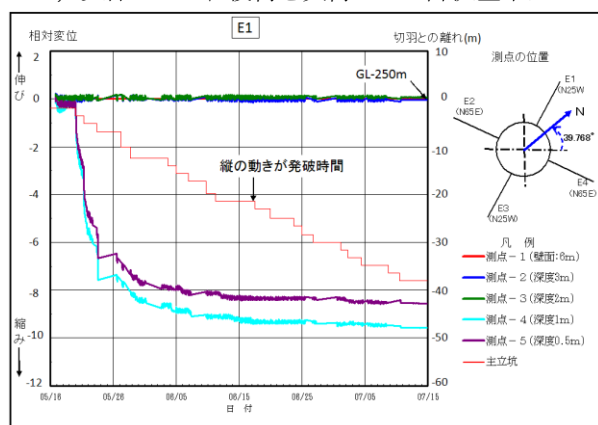


図-1 GL-250.0mにおける地中変位の実測値

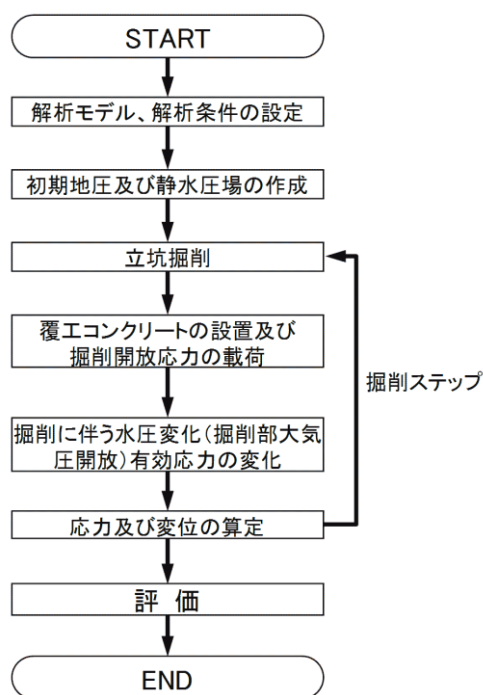


図-2 有効応力解析の解析フロー

Mohr - Coulomb則⁶⁾を適用した。浸透-応力連成挙動においては、岩盤を土骨格の固相と間隙水の液相からなる2相の多孔質体とし、有効応力に基づいた岩盤の力学特性を評価する。有効応力解析の解析フローを図-2に示す。

(2) 解析モデル

立坑の掘削解析では、岩盤の変形等が等方である場合は軸対称モデルを用いてモデル化されるが、初期応力場や地質構造の影響により異方性の変形が生じる場合は3次元でモデル化しなければならない。地中変位計測等の結果から、瑞浪超深地層研究所の主立坑におけるGL-250mでの地中変位は風化花崗岩の変質度合い及び多数の割れ目の影響を受け、円形断面がつぶれる変形となっている。そこで、本解析では3次元モデルを適用するが、変形の対称性を考慮し全体をモデル化するのではなく図-3に示す1/4 (0~ $\pi/2$) モデルとした。

解析モデルは岩盤及び覆工コンクリートを3次元ソリッド要素、鋼製支保工はビーム要素とした。解析対象領域は、掘削解析で変化する応力あるいは変形が境界条件の影響を受けない範囲までモデル化した。具体的には、モデル化領域は、側方へは100m程度、下方は解析における最終掘削深度から50.0mまでモデル化した。最終的なモデル化領域は、側方へは100m、着目深度から39.0m掘削解析を行いつつ掘削下端から50.0mまでモデル化することから115.0mとなった。

なお、主立坑及びその周辺部の地質は、強い変質を伴う花崗岩が主体であるが、主立坑から南側へ約120.0m離れたDH-2孔では瑞浪超深地層研究所の実実施設計時に想定した健全な花崗岩が分布することが確認されている。

そのため、実際に近い岩盤モデルを作成するため、変質を受けた岩盤領域の範囲を設定した。具体的には、

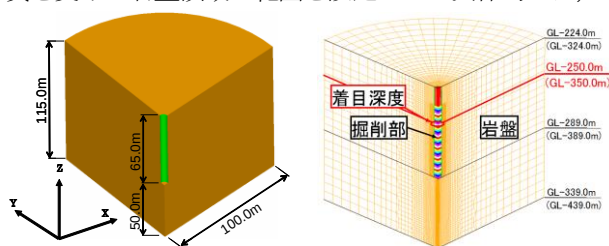
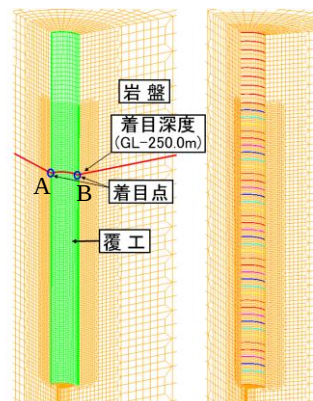


図-3 解析モデル概要と全体メッシュ



a) 覆工コンクリート及び着目点 b) 支保工

図-4 解析モデル (掘削後坑道内拡大図)

300m予備ステージの壁面観察結果から、主立坑壁面から15.0m程度の範囲で、断層に付随した変質部が分布していることが明らかになっていたため、解析モデル中心から15.0mまでの領域は、主立坑深度GL-180m時点に切羽底面からGL-520mまで先行掘削したパイロットボーリング¹⁾を基に設定した岩盤等級分布とし、その他の領域は実施設計と同一の岩盤等級分布とした。なお、断層を表現するためYZ面の要素列一列も変質部とした。解析に用いた解析モデルを図-3、図-4に示す。ここで、要素数が97,216、節点数が94,149となった。

(3) 境界条件

力学的境界条件を図-5に示す。座標系でXZ平面はZ軸方向・X軸方向自由、Y軸方向固定とした。YZ平面はZ軸方向・Y軸方向自由、X軸方向固定とした。円弧部境界はZ軸のみ自由としX軸方向、Y軸方向は固定とした。

水理的境界条件は、上部境界は当該深度における圧力で固定し、図-5に示す赤線部を不浸透境界とし、青線部は深度324mにおける静水圧による固定とした。

(4) 材料特性

本検討では、弾塑性解析を実施しており、降伏基準はMohr - Coulomb則とし、降伏後の硬化係数はヤング係数の1/100とした。また、岩石試験で得られた応力-ひずみ曲線²⁾を参考にしつつ既往の文献⁷⁾等をもとに解析に必要な材料物性値を設定した。具体的には、弾性係数(割線弾性係数)は、パイロットボーリング岩石試験から得られた応力-ひずみ曲線から算出し、弾塑性解析を行うために必要な材料定数はポアソン比、粘着力及び内部摩擦角は既往の文献⁶⁾等を参照し表-1のように設定した。

現実に近い地質構造モデルを作成するため、変質を受けた岩盤の範囲を設定する必要がある。設定した地質モデルを図-6に示す。坑道の壁面観察結果などより、主立坑から15.0m付近は断層に付随した変質部が分布していることから、解析モデル中心から15.0mまでは変質領域として図-6左側の岩盤等級区分とし、その他は実施設計と同一の岩盤等級構成(図-6右側)とした。さらに、断層を表現するためYZ面の要素一列も変質部とした。変質部の物性値は表1に示す値を用いた。

(5) その他の設定

a) 透水係数の設定

浸透-応力連成解析に用いる透水係数はパイロットボーリング調査²⁾を参考に表-2に示す値を用いた。

b) 覆工コンクリート及び鋼製支保工の材料定数の設定

覆工コンクリートは弾性体として扱っており、支保工材料の力学物性は表-3に示す。これらは実施工で使用されている材料の物性とした。

c) 1ステップあたりのサイクルタイム

浸透-応力連成解析では、掘削による水圧の時間変化が計算されるため、掘削1ステップあたりにかかる時間

を設定する必要がある。そこで、GL-230.0mからGL-400.0mまでの施工サイクルタイムから1ステップあたりに要する平均時間を算出しそれを用いることとした。

この区間の1ステップあたりの平均施工時間は60時間であったため、1ステップあたり60時間として解析を行った。

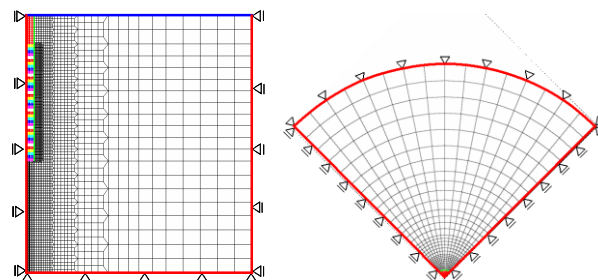


図-5 境界条件(赤線：不浸透境界、青線：静水圧固定)

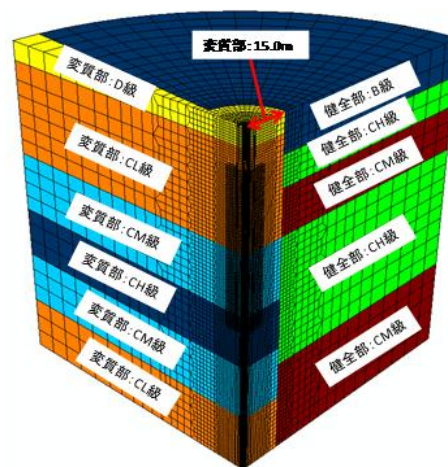


図-6 主立坑周辺地質モデル

表-1 解析に用いる材料定数

	弾性係数 E (MPa)	ポアソン比 ν	粘着力 c (MPa)	内部摩擦角 $\phi (^{\circ})$	単位体積重量 γ (kN/m ³)
D級	270	0.35 ^{※1}	1.00 ^{※2}	21.5 ^{※1}	26
C _L 級	300	0.35 ^{※1}	1.00 ^{※3}	23.5 ^{※1}	26
C _M 級	480	0.35 ^{※1}	2.00 ^{※3}	30.0 ^{※3}	26
C _H 級	690	0.35 ^{※1}	4.00 ^{※3}	40.0 ^{※3}	26

※1：設計検討時における既往の値

※2：式 $q_u = \frac{2ccos\phi}{1-\sin\phi}$ から算出した値

※3：吉中らの文献⁷⁾の最低値

表-2 浸透-応力連成解析に用いる透水係数

	透水係数 (m/sec)
変質部	1.0E-09
健全部	1.0E-07

表-3 鋼製支保工及び覆工コンクリートの物性値

鋼製支保工	名称	H125×125
	ヤング係数	200GPa
覆工 コンクリート	ポアソン比	0.3
	設計基準強度	40.0MPa (11.1MPa)
	ヤング係数	31.0GPa (11.4GPa)
	ポアソン比	0.2

() 内は若材令時

3. 浸透-応力連成掘削解析

(1) 解析の概要

本検討における浸透-応力連成解析はBiotの多孔質弾性論による。ここで、全応力のつり合い方程式を以下に示す。ここで、 σ_{ij} は全応力、 $\bar{\sigma}_{ij}$ は有効応力、 s は飽和度、 p は平均間隙圧及び δ_{ij} はKroneckerのデルタである。

$$\sigma_{ij} = \bar{\sigma}_{ij} + sp\delta_{ij}$$

有効応力は全応力から間隙水圧を引いたものと定義でき、間隙水圧は飽和度によって重みづけされている。

本解析では、ABAQUS[®]を適用しており、Biotの多孔質弾性論におけるSkempton B値[®]及びBiot - Willis係数 $\alpha^{9,12}$ は直接入力せず、それらを固相と液相の圧縮性を定義する体積弾性率から次式で計算した。

Skempton B値とBiot-Willis係数：

$$B = \frac{\left(\frac{1}{K} - \frac{1}{K_s} \right)}{\left(\frac{1}{K} - \frac{1}{K_s} \right) + \left(\frac{n}{K_f} - \frac{n}{K_s} \right)} \quad \alpha = 1 - \frac{K}{K_s}$$

K は全ての相を考慮した体積弾性率、 K_s は固相の体積弾性率、 K_f は液相の体積弾性率、 n は間隙率を示す。固相の体積弾性率 K_s は、Charcoal granite 41GPa、Westerly granite 42 GPaと報告されている^{13, 14}ことから、本検討では40GPaと仮定した。

(2) 解析ケース

側圧係数と透水性の異方性が及ぼす影響を確認するため、両者に異方性を与えた場合と等方性の場合の解析ケースを以下のように設定した。

- ・変質領域の透水性が異方性を持つ場合
- ・変質領域の透水性が等方の場合
- ・側圧係数が等方の場合

各解析ケースに用いた透水係数と側圧係数は文献⁹を参考に仮定し、その一覧を表-4に示す。

表-4 解析ケースにおける透水係数と側圧係数の設定

	透水係数	側圧係数
透水性の異方性を考慮したケース	健全部：1.0E-7 m/s 変質部：1.0E-7 m/s (断層方向)	$\sigma_z : \sigma_x : \sigma_y =$ 1.0 : 1.8 : 1.4
	1.0E-9 m/s (断層直角方向)	
等方の透水性を考慮したケース	健全部：1.0E-7 m/s 変質部：1.0E-9 m/s	$\sigma_z : \sigma_x : \sigma_y =$ 1.0 : 1.8 : 1.4
側圧係数等方解析ケース	健全部：1.0E-7 m/s 変質部：1.0E-9 m/s	$\sigma_z : \sigma_x : \sigma_y =$ 1.0 : 2.0 : 2.0

(3) 評価方法

浸透-応力連成解析における図-6に示す位置での地中変位、覆工コンクリート応力及び鋼製支保工応力（軸力、曲げモーメント、せん断力）が、着目深度から39mまで

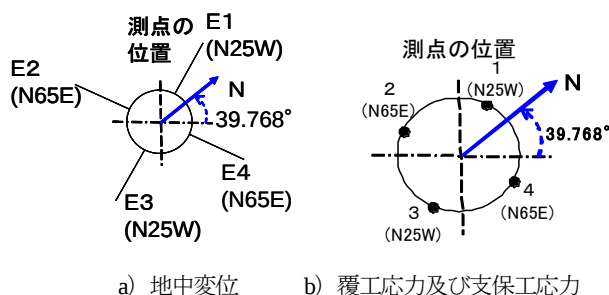
掘削することによる変化を実測値と比較する。実測値の計測位置の立坑断面における方向を図-7に示す。

(4) 最終掘削時の間隙水圧分布

最終掘削時の間隙水圧分布を図-8と図-9に示す。透水係数が小さいことから30ステップ程度（1800時間）経過し切羽の位置が対象深度（GL-250.0m）から39mまで到達した時点でも間隙水圧が0MPaの区間は立坑壁面から1m程度である。異方性を考慮した場合は断層方向に水圧が低下しているのが分かる。

(5) 解析結果と計測値の比較

着目深度において得られた解析および実測の地中変位の経時変化を図-10～図-12に、鋼製支保工応力（軸力）のそれを図-13～図-15に示す。ここで、横軸は着目深度（GL-250.0m）からの掘削の進行に伴う経過時間を、左縦軸は変位または軸力を、右縦軸は掘削深度を表す。



a) 地中変位 b) 覆工応力及び支保工応力

図-7 実測位置の立坑断面における方向

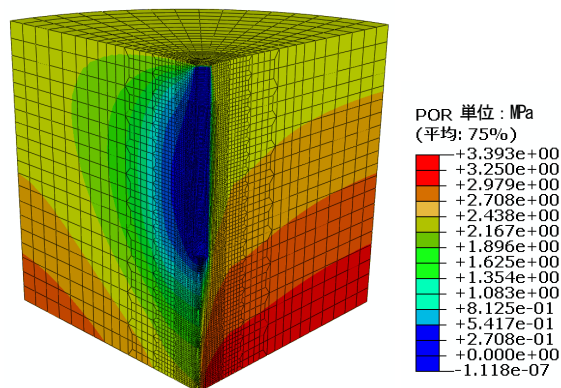


図-8 透水係数の異方性を考慮した間隙水圧分布

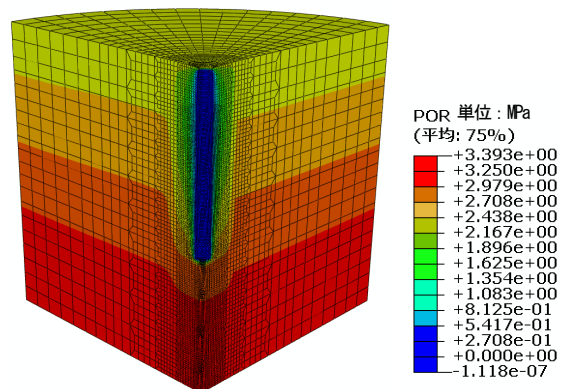


図-9 透水係数の異方性を考慮しない間隙水圧分布

なお、解析解の経時変化は着目深度の次ステップ以降の相対変化を表したものである。

a) 地中変位比較（坑壁から0.5m部）

比較のために実施した透水性と側圧係数ともに異方性を与えない条件による解析の結果と計測値の比較を図-10に示す。この結果では側圧係数と透水係数の異方性に加え、奥行き方向への地層分布、亀裂、脆弱部等を考慮していないことから、断層方向、断層直交方向ともに解析値に違いが表れず等方的な変形となった。これは、実測された岩盤の異方的な変形挙動を模擬できていない。

深度200m地点で実施した初期地圧の測定値をもとに側圧係数の異方性を考慮し、透水性には異方性を与えない条件による解析の結果と計測値の比較を図-11に示す。この解析結果では断層方向と断層直交方向の変位に2倍程度の差が表れ、扁平な変形を表現できている。

透水性と側圧係数とも異方性を与えた条件による解析結果と計測値を図-12に示す。断層直角方向（計測値でE2とE4、解析値で図-4のB点の傾向が一致しており、透水異方性を考慮すると実測値の再現性がよいことがわかる。なお、異方性を与えた解析結果では、わずかではあるが掘削後に一旦増大した変位がその後元に戻る傾向に向かっており、浸透-応力連成現象を考慮した変化が現れている。しかし、その変化量は小さい。

b) 支保工軸力比較

透水性と側圧係数ともに異方性を与えない条件による解析の結果と計測値の比較を図-13に示す。この解析では、変形が扁平ではなく、均一に変形することからアーチアクションによる軸力のみが鋼製支保工に負荷され、曲げモーメント及びせん断力は発生しない。軸力は地中変位及び覆工コンクリートと同様に実測値と数値解析結果は類似の傾向がうかがえ、絶対値は実測値の平均値程度となった。なお、グラフ中の管理レベルⅠ、Ⅱ、Ⅲはそれぞれ、事前解析による値、許容値の80%、100%を示している。

側圧に関しては同様に異方性を考慮し、透水性には異方性を与えない条件による解析の結果と計測値の比較を図-14に示す。また、透水性と側圧係数ともに異方性を与えた条件による解析結果と計測値の比較を図-15に示す。透水性に異方性を与えたほうが、扁平な変形モードと軸力のレベルともに、より再現性がよいことがわかる。変位と同様図-4B点において掘削後に一旦軸力が増加しその後低下する結果となっているが、絶対値そのものは支保工の力学的安定性に影響を与えるレベルではない。なお、本検討では、立坑切羽面が対象深度から40m程度の離れた時点までの解析にとどまっているので、それ以降に浸透-応力連成現象の影響評価は実施できていない。しかし、図-13～15の鋼製支保工の計測値と解析値は概ね管理レベルを下回っていることと覆工コンクリートの応力は管理レベルと比較し十分小さいことから、今回の解析結果から長期的に見てもこの現象が支保工の力

学的安定性に影響を及ぼす可能性は低いと考えられる。

4. まとめ

浸透-応力連成現象が支保工の力学的安定性に及ぼす影響を把握するため、瑞浪超深地層研究所の主立坑部を対象とした浸透-応力連成掘削解析を実施した。

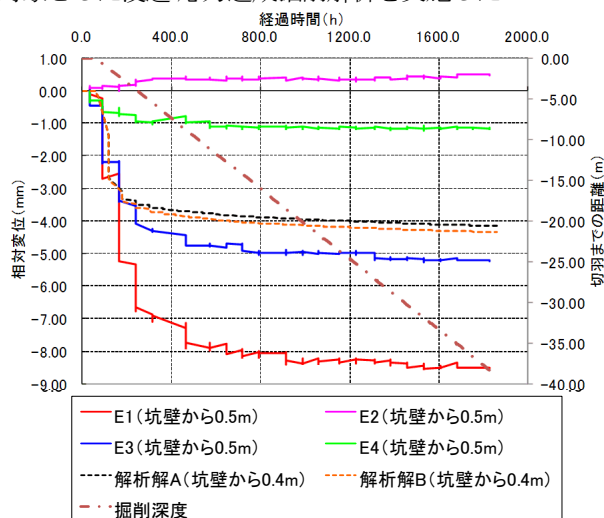


図-10 地中変位（透水性：等方性，側圧：等方性）

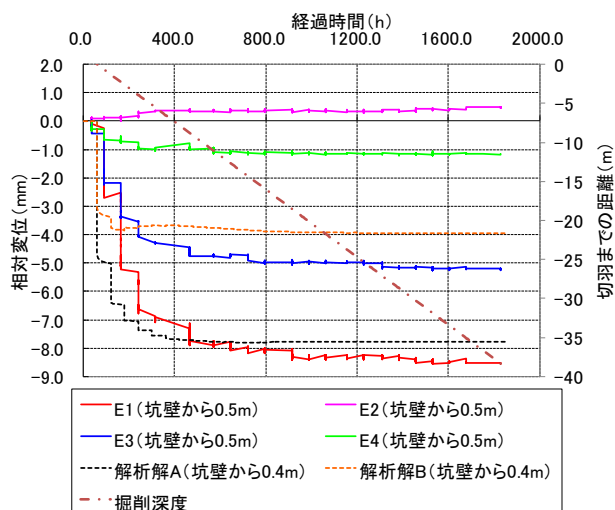


図-11 地中変位（透水性：等方性，側圧：異方性）

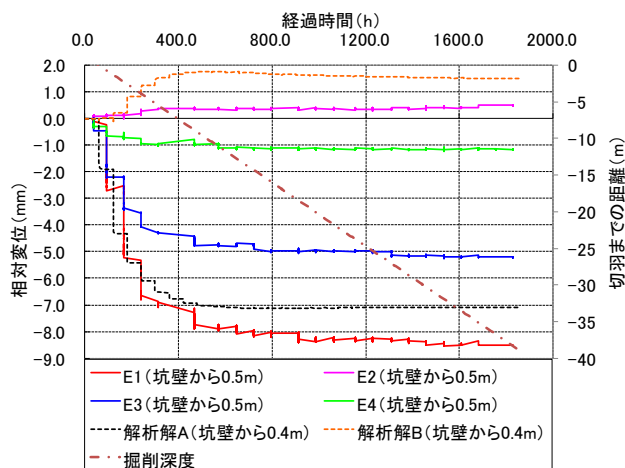


図-12 地中変位（透水性：異方性）

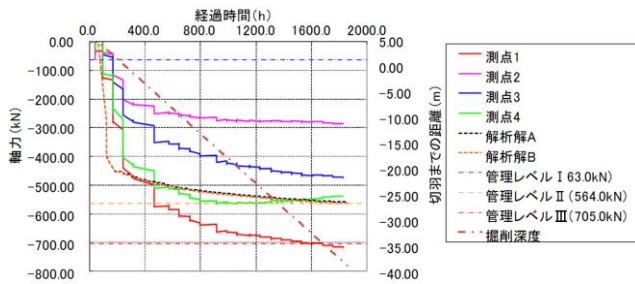


図-13 支保工軸力 (透水性：等方性，側圧：等方性)

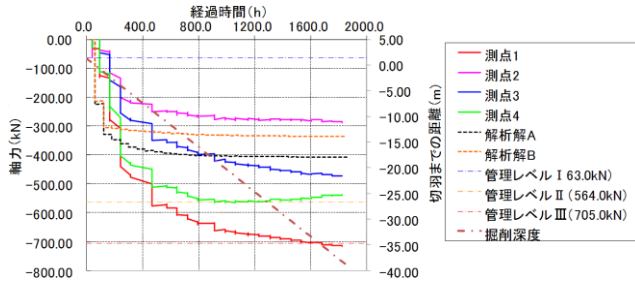


図-14 支保工軸力 (透水性：等方性，側圧：異方性)

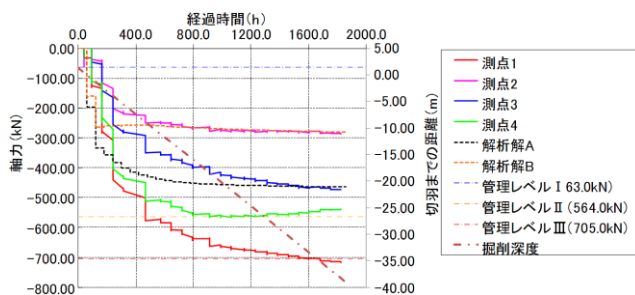


図-15 支保工軸力 (透水性：異方性，側圧：異方性)

本解析結果からは，主立坑とその近傍に分布する脆弱な岩盤部が浸透-応力連成現象を示すと仮定した場合でも，支保工の力学的安定性に与える影響は小さいと考えられる．また，立坑掘削に伴う周辺岩盤の水理的变化は，岩盤の透水性が小さく，岩盤中の有効応力変化にさほど寄与しなかった．しかし，透水異方性を考慮した浸透-応力連成解析により，顕著ではなかったものの実際の岩盤挙動の再現性向上が図れることがわかった．このため，瑞浪超深地層研究所主立坑に出現している断層とその変

質領域では，浸透-応力連成現象が岩盤の変形メカニズムの一つである可能性が示唆された．

断層およびそれに付随する変質領域は，深度500m付近まで主立坑およびその周辺部に現れることが想定されており，深度方向の水圧の増大に伴い本現象による影響が顕在化する可能性はあるため，今後ともB計測等の原位置計測結果を注視し，必要に応じ本研究と同様の解析評価を行っていくことが重要と考える．

参考文献

- 例えば，日本原子力研究開発機構：超深地層研究所地層科学研究基本計画，JAEA-Review 2010-016,2010.
- 鶴田忠彦 他：瑞浪超深地層研究所における立坑内からのパイロットボーリング調査報告書，JAEA-Research 2008-098，日本原子力研究開発機構（2009）
- 丹生屋 純夫，松井 裕哉，見掛 信一郎，佐藤 伸，納多 勝，畑 浩二：パイロットボーリング調査から設定した力学モデルの有効性検討，第41回岩盤力学に関するシンポジウム，土木学会（2012（投稿中））
- Dassault Systems Simulia Corp.：ABAQUS Analysis User's Manual Version 6.5，（2004）
- 平野享，瀬野康宏，松井裕哉：超深地層研究所計画（岩盤力学に関する調査研究）深度 200m における岩盤力学ボーリング調査，JAEA Research 2010-013，2010年6月．
- 例えば，土木学会：トンネルの地質調査と岩盤計測，pp.153（1983）
- 吉中龍之進，桜井春輔，菊池宏吉：岩盤工学体系（1）岩盤分類とその適用，土木工学社，第2編 岩盤分類各論，pp.51
- Skempton, A. W.：The pore pressure coefficients A and B. *Geotechnique*, 4, 143-147（1954）
- Biot, M. A.：General theory of three-dimensional consolidation. *J. Appl. Phys.*, 12, 155-164，（1941）
- Biot, M. A.：Theory of elasticity and consolidation for a porous anisotropic solid, *Journal of Applied physics*, Vol.26, No.2, pp.182-185（1955）
- Biot, M. A.：Theory propagation of elastic waves in fluid-saturated porous solid, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol.28, No.2, pp.168-191（1956）
- Biot, M. A.：Mechanics of deformation and acoustic propagation in porous media, *Journal of Applied Physics*, Vol.33, No.4, pp.1482-1498，（1962）
- Detournay, E and Cheng, A.H.-D.：Fundamentals of poroelasticity. in *Comprehensive Rock Engineering：Principles, Practice and Projects*, 2 edited by Hudson, J.A., Pergamon Press, Oxford, pp.113-171（1993）
- Hart, D.J. and Wang, H.F.：Laboratory measurements of a complete set of poroelastic moduli for Brea sandstone and Indiana limestone. *J. Geophys. Res.*, 100, pp.17741-17751（1995）

APPLICATION FEASIBILITY STUDY OF EVALUATION TECHNOLOGY FOR LONG-TERM ROCK BEHAVIOR COUPLED HYDRAULIC AND MECHANICAL ANALYSIS TO EVALUATE ROCK BEHAVIOR OF SHAFT IN FAULT

Masaru NODA, Shin SATO, Sumio NIUNOYA, Koji HATA,
Hiroya MATSUI and Shinichiro MIKAKE

The main shaft of Mizunami URL is located in fault, and the hydrological anisotropy due to the geology is observed. Lining deformation may cause by increase of lining stress with degradation of drain material or aquifer of changes in the future. In this study, by implementing coupled hydraulic and mechanical analyses, validity of methods of analysis is considered as compared to measuring for hydrological anisotropy. According to the result of these analyses, water pressure dependency was not shown, but the main shaft behavior was simulated taking account of hydrological anisotropy. Also validity of methods of coupled hydraulic and mechanical analyses as deterioration prediction was confirmed.