

幌延を事例とした坑道周辺地質環境の長期挙動に関する解析
(その1：全体概要と力学的長期変化解析)

清水建設株式会社 正○郷家光男，正 沖原光信，正 戸栗智仁
国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 正 松井裕哉，正 尾崎裕介，非 望月陽人
株式会社ダイヤコンサルタント 正 前村庸之，正 伊藤 諒

1. はじめに 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構は、高レベル放射性廃棄物の地層処分における回収可能性の維持に伴う影響評価について、2020年度から3箇年計画で進めており、2021年度までに、幌延深地層研究センター地下施設の深度350m坑道周辺地質環境を事例として、1,000年間の坑道開放条件を仮定した数値解析により検討してきた^{1),2),3)}。本研究では、その結果を踏まえつつ、一定の開放期間後に坑道を埋め戻した後の坑道周辺地質環境の長期回復挙動に関する解析を試行した結果を述べる。なお、本報では、長期挙動解析の全体概要と力学的長期変化解析について示し、別報⁴⁾では、水理学的長期変化解析の結果を報告する。

2. 埋戻し後の地質環境長期挙動解析の全体概要 解析の全体概要を図-1に示す。始めに、既往の調査結果等から、坑道掘削時の周辺岩盤の状態等を概念モデルとして設定する。その状態を初期条件として、坑道開放状態の力学的長期変化解析を行い、坑道開放期間中の周辺岩盤の透水係数や弾性係数の経時変化を求める。そして、この経時変化を基に周辺岩盤の水理特性を設定し、坑道開放状態の多成分気液二相流の水理的長期変化解析を行う。最後に、所定の坑道開放期間に達した後、その状態を初期条件とした坑道埋戻し後の多成分気液二相流の水理学的長期変化解析を行った。なお、坑道埋戻し後の水理学的長期変化解析では、岩盤の物性値の経時変化はないものとして扱う。解析コードは、多量の溶存ガスが地下水中に賦存する幌延の地質環境を考慮し、坑道周辺地質環境の長期変化に影響を及ぼす可能性のある因子、例えば、圧力解放による溶存メタンの気化とその移動、坑道壁面からの酸素の浸入、掘削損傷領域（以下、EDZ）の範囲の変化等を考慮できるものを使用した。なお、本研究においても、解析対象期間は坑道開放期間を含めて1,000年間として、坑道の埋戻し時期を変えることで、地質環境の回復過程等の比較を行っている。

3. 坑道周辺地質環境の概念モデルの構築^{1),2)} 長期挙動解析を行うに当たって、坑道掘削時の周辺地質の状態を設定するために、概念モデルの構築を行った。そのために、幌延深地層研究計画の中で得られた掘削影響に

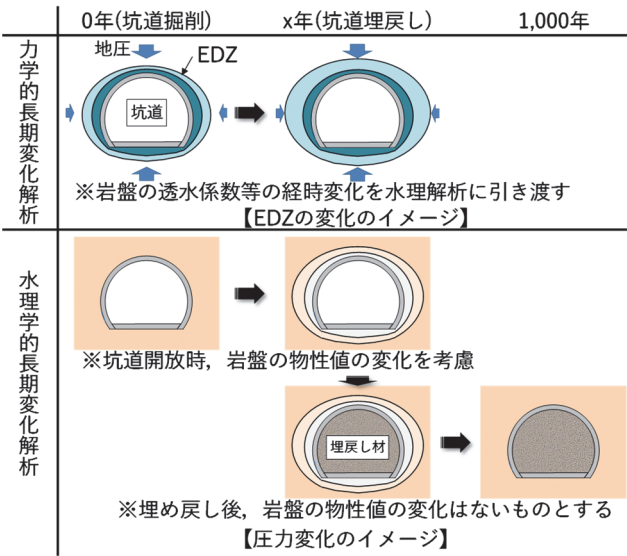


図-1 長期挙動解析の概要

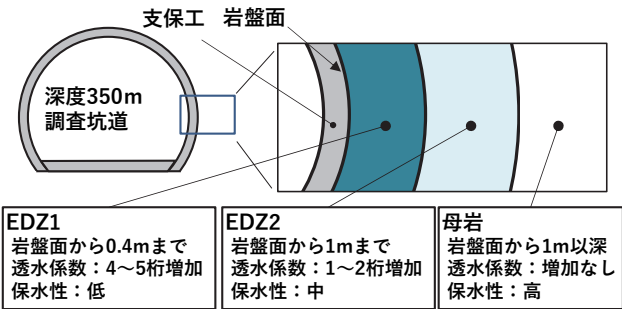


図-2 EDZの概念モデル

関する知見、および幌延以外の堆積岩を対象にした坑道周辺地質環境に関する文献の収集・分析を行った。この概念モデルの構築では、周辺岩盤の変形や透水係数等の力学的な変化と、水圧、飽和・不飽和、溶存ガスの影響等の水理学的な変化に着目した。一例として、2020年度の検討において構築したEDZ (Excavation Damaged Zone)の概念モデルを図-2に示す。文献の収集・分析の結果から、EDZは、岩盤面から約0.4mの範囲で、掘削に伴う新規の引張亀裂が発達して透水係数が4～5桁増加した領域（以下、EDZ1）と、岩盤面から約1mまでの範囲で透水係数が1～2桁増加した領域（以下、EDZ2）に分けられるものとした。また、亀裂の影響により負圧に対する保水性は母岩よりも小さくなると考えた。さらに、地下水にはCH₄やCO₂が溶存していて、坑道掘削に伴う地

キーワード：高レベル放射性廃棄物、回収可能性、地質環境、掘削損傷領域、クリープ、二相流解析

連絡先：〒104-8370 東京都中央区京橋二丁目16-1 清水建設（株） 土木技術本部 Tel.: 080-9504-6170

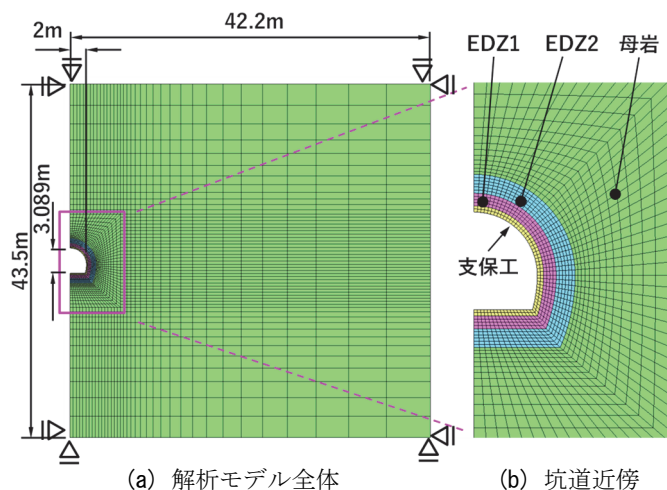


図-3 力学的長期変化解析に用いた解析モデル

下水圧低下により脱ガスし、不飽和領域を形成すると考えた。

4. 力学的長期変化解析の解析条件 本研究でも 2021 年度までの検討^{1),2),3)}と同様、幌延の深度 350m の試験坑道 3 周辺部を解析対象とした。坑道開放期間の違いによる地質環境の回復過程への影響についても検討するため、坑道開放期間 50 年、100 年、200 年、300 年の 4 つの解析ケースを設定した。

幌延のように、岩石の有効空隙率が 30%以上あるような堆積軟岩では、坑道周辺で生じている再配分応力による岩盤の変形の進行にともない、坑道周辺部に形成されている EDZ の範囲や周辺岩盤の力学特性や水理特性なども変わっていく可能性がある。このような長期変形の進行に影響を与える因子としては、周辺岩盤のクリープ変形、岩盤の強度低下などの劣化現象、支保工の耐力低下・劣化等が挙げられる。本報では、これらのうち、周辺岩盤のクリープ変形に着目し、コンプライアンス可変型構成則⁵⁾を適用した力学的長期変化解析を実施した。なお、支保工の劣化については考慮していない。また、図-2 の EDZ1 と EDZ2 では、弾性波速度が母岩よりも低下しているがその程度に差があったため、それを考慮して変形特性や強度特性を設定した。既往の研究成果から EDZ における透水性変化は、引張破壊によって生じた亀裂に起因すると考えられたため、引張亀裂を含む岩石の室内透水試験の結果³⁾からその変化をモデル化した。また、母岩の透水性変化は、せん断破壊が生じたときに起こると考えられるため、三軸圧縮試験中に行われた透水試験の結果⁶⁾からモデル化した。解析モデルを図-3 に示すが、力学的長期変化解析では、坑道埋戻しの状態は対象としていないため、坑道開放期間を 300 年までとして解析を実施した。

5. 解析結果 設定した解析条件に基づき、坑道開放状態の力学的長期変化解析を行った。解析結果として、

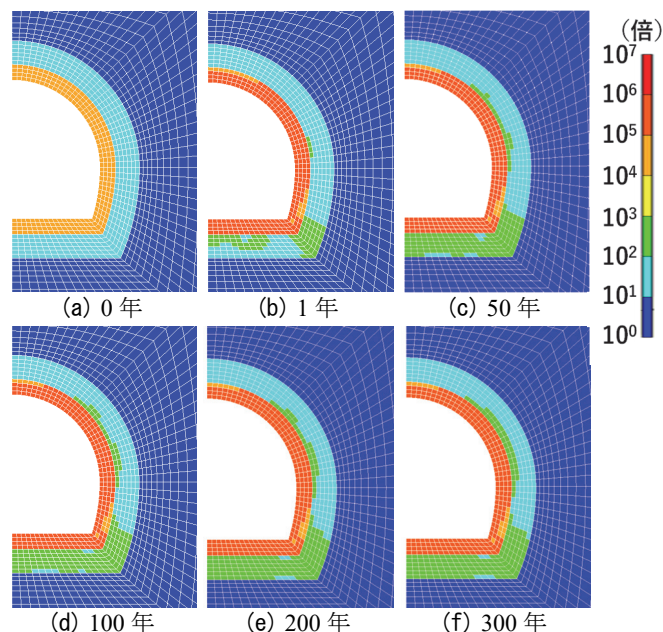


図-4 周辺岩盤の透水係数増加率の経時変化

坑道周辺岩盤の透水係数の増加率を図-4 に示す。EDZ1、EDZ2、母岩いずれの領域においても、母岩の透水係数の初期値 ($8.2 \times 10^{-12} \text{m/s}$) に対する倍率で示している。坑道構築後 1 年までの間に EDZ1 全体、隅角部と底盤部の EDZ2 において透水係数の増加が見られた。そして、50 年までに底盤部や側壁部の EDZ2 において、透水係数が増加した領域が拡大したが、その後の経時変化はあまり見られなかった。また、母岩では透水係数の経時変化は見られず、EDZ の範囲は拡大しなかった。これは、坑道開放期間中、母岩ではせん断破壊が発生しなかったためであるが、本報では支保工の経時的な耐力低下・劣化を考慮していないため、支保工が岩盤の変形を抑え込んで拘束圧が増えたことにより、見かけ上の強度が増し、それが継続したためと考えられる。そして、ここで得られた岩盤の透水係数、およびヤング率やポアソン比の経時変化の情報を、別報⁴⁾の水理学的長期変化解析の条件として引き渡した。

6. おわりに 力学的長期変化解析に関する今後の課題としては、解析値と計測値の比較による解析技術の信頼性向上が挙げられる。本研究は、経済産業省からの委託研究「令和 4 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業(JPJ007597) (回収可能性技術高度化開発)」の成果の一部である。

参考文献 1) 原環センター、原子力機構：令和 2 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 (回収可能性技術高度化開発) 報告書, pp.5-25-5-98, 2021. 2) 郷家ら：日本原子力学会 2021 年度秋の大会, 1C06, 2021. 3) 原環センター、原子力機構：令和 3 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 回収可能性技術高度化開発報告書, pp.5-60-5-198, 2022. 4) 伊藤ら：土木学会第 78 回年次学術講演会講演概要集, 2023 (投稿中). 5) 大久保、金：資源と素材, Vol.109, No.3, pp.209-214, 1993. 6) 郷家ら：第 40 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.282-287, 2011.