

共同研究成果報告書

廃棄物埋設の坑道掘削影響領域における 力学水理連成特性に関する研究

原子力規制委員会 原子力規制庁

国立大学法人 埼玉大学

国立研究開発法人 産業技術総合研究所

令和7年7月

1. 研究目的

放射性廃棄物を埋設する岩盤は、造構運動等の自然事象及び処分場の坑道掘削等の人為事象により様々な作用を受けている。これらの作用により岩盤が損傷又は破壊し（以下「岩盤損傷等」という。）、その結果、場合によっては地下水流動や放射性核種移行（以下「地下水流動等」という。）の卓越経路となることが指摘されている。特に、放射性廃棄物を処分するための坑道等の掘削によって掘削表層面の応力が解放された場合、地下水流動等の経路となり得る掘削影響領域が形成されることが考えられる。こうした岩盤中における地下水流動等を評価するためには、岩盤損傷等の力学に関する特性と水理学に関する特性を総合的に評価することが重要である。

そこで、本共同研究では、岩盤損傷等を応力状態により分類し、原位置から採取した岩盤供試体や人工的に製作した人工供試体で特定の力学状態の下で水理特性に関する室内試験を行い、放射性核種の移行挙動が適切に評価されていることの妥当性を確認するために必要な科学的・技術的知見を取得する。

2. 研究内容

放射性廃棄物を処分するための坑道等の掘削においては、岩盤の応力解放や衝撃等によって坑道壁面の岩盤に亀裂を含む損傷が生じ、損傷の状態に応じて水理特性に影響を及ぼす。これらは、いわゆる掘削影響領域の形成として既往の研究では整理されているが、損傷等の程度や損傷の形態による水理特性への影響度については必ずしも明らかとはなっていない。この点については、土木分野の坑道設計施工において応力解放等への対策として支保の工法や間隔等が検討されているが、一旦損傷した岩盤は、たとえ止水剤の注入を行っても、水理特性が損傷前の状態に回復することにはならないことから、岩盤損傷等が生じた場合の水理特性をどのように考えるべきかなど、地下水流動等の挙動に関する評価が求められているところである。

本共同研究においては、応力解放による応力変化とそれに伴う岩盤損傷等による水理特性の関係性を明らかにすることを目的に、令和2年度から令和4年度に実施した共同研究「岩盤の力学状態と水理学特性に関する研究」（以下「前フェーズ」という。）で製作した力学水理連成試験機を用いた実験を行った。原位置で採取した供試体等に対して応力解放を模擬した応力履歴を作用させ、損傷の状況と水理特性の変化に関する実験データを取得し、それらに基づいて岩盤の力学状態と水理特性の関係性についての検討を行った。

3. 実施方法

3.1 廃棄物埋設における岩盤の掘削影響領域の評価に関する知見の収集

岩盤掘削に伴う影響を模擬するための力学試験法及び水理試験法に関する知見並びに掘削影響領域の評価に関する知見の収集を行い、力学水理連成試験機の改良に関する検討及び当該試験機を用いた試験で得られた成果の妥当性の検討等のための基礎データとした。

3.2 力学水理連成試験の実施

前フェーズで製作した力学水理連成試験機を用いて、岩盤の力学状態とそれに伴う岩盤損傷等による水理特性の関係性を見出す試験を行った。具体的には、坑道掘削により岩盤損傷等が生じる応力場を想定した応力履歴を作用させて、損傷過程と水理特性の変化について試験を通じて把握した。この結果を、従来型の試験機で得た結果と比較することによって岩石の力学特性や水理特性のスケール効果等について検討した。

3.3 連成試験機の改良等

前フェーズで製作した力学水理連成試験機は、岩盤への力学状態を変化させた上で、岩盤の水理特性を測定することができる試験機である¹。本試験においては、供試体の損傷や水理特性の変化を把握することが重要である。現在の水理試験機部分は一軸方向からの透水のみが可能であるが、岩盤の異方性を踏まえた損傷と水理特性を把握するためには他の軸方向からの水理試験が可能であることが望ましい。また、応力履歴を与えた供試体の外部又は内部を観察し、破壊等の状況と水理特性を関連付けるための供試体内部を可視化することが重要である。これらを達成するため、力学水理連成試験機の機能改良等を行った。

3.4 力学状態を考慮した地下水流動評価のための数値解析モジュールの構築

前フェーズでの試験で得られた結果に加えて、試験機を改良して得られた結果等を用いて、岩盤の力学水理モデルを構築した。

4. 研究実施分担

項目	原子力 規制庁	埼玉大学	産業技術 総合研究所
3.1 廃棄物埋設における岩盤の掘削影響領域の評価に関する知見の収集	◎	○	○
3.2 力学水理連成試験の実施			
・実規模供試体による連成試験	◎	○	—
・要素供試体による基本特性試験	○	○	◎
3.3 連成試験機の改良等			
・供試体の損傷等の状態計測装置の検討	◎	○	◎
・水理水圧装置等の改良	◎	○	—
・供試体の製作等	◎	○	—
3.4 力学状態を考慮した地下水流動評価のための数値解析モジュールの構築	◎	○	—

(◎：主担当、○：副担当)

5. 共同研究参加者

氏名	所属部局・職名	本研究における役割
入江 正明	原子力規制庁長官官房・技術基盤グループ 放射線・廃棄物研究部門 技術研究調査官	・研究の統括 ・力学水理連成試験及び結果の検証
市来 高彦	同部門 主任技術研究調査官	・試験装置による力学水理連成試験の実施 ・力学水理連成モデルの構築 ・供試体の損傷等の状態計測装置の検討 ・岩盤供試体の製作
長田 昌彦	埼玉大学大学院 理工学研究科 環境科学・社会基盤部門 教授	・研究の統括
富樫 陽太	同部門 准教授	・力学水理連成試験及び結果の評価 ・力学水理連成モデルの評価 ・岩盤供試体の製作
大坪 誠	産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門 地質変動研究グループ長	・研究の統括
朝比奈 大輔	同部門 地質変動研究グループ主任研究員	・研究の統括補佐 ・岩盤供試体の製作 ・基本特性試験の実施 ・供試体の損傷等の状態計測装置の検討

6. 研究实施工程

項 目	年 度	令和5年度			令和6年度		
3.1 廃棄物埋設における岩盤の掘削影響領域の評価に関する知見の収集							
3.2 力学水理連成試験の実施							
3.3 連成試験機の改良等							
3.4 力学状態を考慮した地下水流動評価のための数値解析モデルの構築							

7. 成果概要

本共同研究では、力学水理連成試験を実施する対象として堆積軟岩の岩盤試料を採取した。採取した岩盤試料に対しては、試験に先立ちその基礎特性を得るための各種基本特性試験を行い、岩盤の物理的性質（密度、含水比、有効間隙率、空隙径分布、飽和度等）及び機械的性質（一軸圧縮強さ、弾性係数、ポアソン比、一軸引張り強さ等）を把握した。特に、岩盤の引張特性を明確にするため、偏心及び傾きのない状態で供試体に引張力を作用させる治具を製作し、直接引張試験を実施した。また、岩盤中の亀裂を三次元で模擬できる人工供試体の造形装置の選定を行い人工供試体の製作を試み、透水試験を実施した。これらの基礎データは既往の知見と合わせ、力学水理連成試験や数値解析の基礎情報として活用した。

力学水理連成試験機を用い、坑道掘削時における岩盤の力学状態の変化を模擬するように応力履歴を岩盤供試体に作用させた三軸力学試験を実施した上で、岩盤の水理特性を測定するための透水試験を実施した。ここでは、三軸方向の応力状態を変えることにより、岩盤供試体の損傷状態の違いや透水性の変化の違いについても確認を行った。

また、力学水理連成試験機に対しては試験結果を踏まえて改良点を明確化し、水理区画毎の注水量及び排水量を精度良く測定するための流量計の追加設置、試験における水圧制御の安定性向上、試験機の操作における人為的誤りの発生低減等のための改良を実施した。

さらに、試験により得られる結果に加えて解析的検討を行うため、複数の物理現象を取り扱い連成させることのできるマルチフィジックスモデリングソフト COMSOL®を導入した。本ソフトウェアにて用意されている数値解析モジュールを用いて岩盤の力学水理モデルを構築し、試験条件や試験結果より得られた物性値等を基に入力を決定して解析を実施することにより、試験結果の分析のための情報を得た。

これらより、掘削影響領域の力学状態と水理特性の関係性について実験的に検討が可能であることが確認できた。また、三軸の応力状態が坑道掘削時の岩盤の変形、掘削影響領域の形成及び水理特性に与える影響等に関する実験データを取得整理するとともに、当該試験を実施する上で重要となる事項や、応力状態の違いによる岩盤強度の変化及び透水性の変化に関する知見等を得ることができた。引き続き、掘削影響領域において想定される応力状態の変化を数値解析等により整理した上で、異なる応力状態における力学水理連成試験を実施してデータの蓄積を行うことにより、応力解放による応力変化とそれに伴う岩盤損傷等による水理特性の関係性を明らかとし、放射性核種の移行挙動が適切に評価されていることの妥当性を確認するために必要な科学的・技術的知見を取得することができると考える。

8. 公表成果一覧

- 1 朝比奈大輔、市来高彦、青地優、竹村貴人、入江正明、「直接引張り試験治具による岩石の引張り挙動に関する研究」、公益社団法人土木学会第 50 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集、pp.153-157、令和 6 年

- 2 市来高彦、朝比奈大輔、東原知広、入江正明、「掘削影響領域の評価における引張り特性に関する研究」、公益社団法人土木学会第50回岩盤力学に関するシンポジウム講演集、pp.158-162、令和6年

9. 参考文献

- 1 市来高彦、東原知広、入江正明、長田昌彦、「廃棄物埋設における岩盤の力学水理連成試験機の製作と動作確認試験」、公益社団法人土木学会第49回岩盤力学に関するシンポジウム講演集、pp.253-258、令和5年