

共同研究成果報告書

廃棄物埋設の坑道閉鎖措置確認に係る共同 研究

原子力規制委員会 原子力規制庁

国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構

令和5年9月

1. 研究目的

廃棄物埋設地及び坑道が安全上支障を生じることのないように確実に閉鎖されていること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

坑道の周囲の岩盤には、掘削に伴う応力の解放といった力学的な影響によって損傷を受けた領域（Excavation Damaged Zone, 以下「EDZ」という。）が形成される。EDZは、力学的な影響を受けていない健全な岩盤に比べて水理学的特性が変化している可能性があり、その場合、EDZが水みちとして機能することが懸念されている。この水みちが形成された場合、地下水流動及び核種移行の評価に対して影響を与える。このため、EDZによる地下水流動への影響の評価手法の開発が必要である。また、いったん形成されたEDZを修復することは困難であることから、坑道の閉鎖においては、EDZの存在を考慮した上で、天然バリアの性能に影響を及ぼすような水みちが形成されないよう、適切に埋戻しが行われていることの確認が必要である。

以上を踏まえると、閉鎖措置の際に、水みちが生じることのないよう確実に閉鎖されていることを確認するためには、以下の科学的・技術的知見が必要である。

- ① 掘削時に形成されたEDZの力学特性が岩盤の水理学的特性に及ぼす影響について
- ② 埋戻し材で埋め戻した坑道や閉鎖部における止水材の長期的変質とそれに伴う透水性の変化について

このうち①については、既存の地下研究施設を利用して原位置試験を実施し、EDZの水理学的影響範囲を把握した。また、坑道の埋戻しや閉塞に用いられる埋戻し材や止水材としては、ベントナイト系材料が用いられることが想定される。②の評価を行うため、地下水に溶出したセメント成分の接触によって生じるベントナイトの化学的特性の変化及びベントナイトの透水性の変化を把握し、並びにベントナイトに砂を混合したものについて、締固め時の含水比の違いによる透水性への影響を把握した。

本研究では、上記①及び②に関する科学的・技術的知見を得るため、室内実験に加えて既存の地下研究施設における坑道を利用した検討を行うとともに、得られた科学的・技術的知見を踏まえて、実際の坑道の閉鎖時において確認すべき事項や確認に当たっての視点と課題を抽出・整理した。

3. 実施方法

3.1 EDZの影響範囲についての確認手法の整備

2.①に関するデータを取得するため、日本原子力研究開発機構瑞浪超深地層研究所及び幌延深地層研究センターの坑道壁面近傍のボーリング孔観察、単孔式水理試験、物理探査を実施し、これらのデータの関係に基づいて、坑道周辺岩盤の水理・物理移動特性に関わる科学的・技術的知見を得た。

3.2 閉塞部における止水材の長期的な止水性能の評価

2.②に関するデータを取得するため、ベントナイトに対するセメント接触水を模擬した溶液を用いた変質試験を実施し、ベントナイト中の鉱物の溶解、二次鉱物の生成・沈殿を実験的に観察した。また、ベントナイトの間隙構造に着目した透水係数の推定方法について検討した。

4. 研究実施分担

| 項目 | 原子力規制庁 | 日本原子力研究開発機構 |
|----------------------------|--------|-------------|
| 3.1 EDZ の影響範囲についての確認手法の整備 | ◎ | ○ |
| 3.2 閉塞部における止水材の長期的な止水性能の評価 | ○ | ◎ |

◎：主担当、○：副担当

5. 共同研究参加者

| 区分 | 氏名 | 所属部局・職名 | 本研究における役割 |
|-------------|--------|--|------------------------|
| 原子力規制庁 | 入江正明 | 原子力規制庁技術基盤グループ核燃料廃棄物研究部門 技術研究調査官 | 研究の統括 |
| | 市来高彦 | 同部門 技術研究調査官 | 水理学的特性についての分析 |
| | 廣田明成 | 同部門 技術研究調査官 | 岩盤損傷についての分析 |
| | 木嶋達也*1 | 同部門 技術研究調査官 | 透水試験、バッチ式変質試験及び二次鉱物の分析 |
| | 東原知広*2 | 同部門 技術研究調査官 | 透水試験、バッチ式変質試験及び二次鉱物の分析 |
| 日本原子力研究開発機構 | 武田聖司*1 | 日本原子力研究開発機構安全研究センター廃棄物・環境安全研究グループ グループリーダー | 研究の統括 |
| | 飯田芳久 | 同グループ マネージャー | ベントナイトの長期安定性の考察 |
| | 澤口拓磨*1 | 同グループ 研究副主幹 | 透水試験及びベントナイトの長期安定性の考察 |
| | 笹川剛 | 同グループ 研究員 | 透水試験、バッチ式変質試験及び二次鉱物の分析 |
| | 岩月輝希*3 | 同グループ 主任研究員 | 岩盤損傷領域の統合解析 |
| | 竹内竜史*4 | 同グループ 技術副主幹 | 透水試験データの解析 |

| | | | |
|---------|-------|-----|--|
| 阿部健康*4 | 同グループ | 研究員 | 二次鉱物やベントナイト／セメント境界部の細孔構造や結晶構造の分析 透水試験、バッチ式変質試験及び二次鉱物の分析 割れ目分布の観察・鉱物分析、物理探査データの解析 割れ目分布の観察・鉱物分析、物理探査データの解析 |
| 木嶋達也*5 | 同グループ | 研究員 | |
| 村上裕晃*4 | 同グループ | 研究員 | |
| 佐久間圭佑*6 | 同グループ | 研究員 | |

*1：令和2年9月から令和4年3月まで

*2：平成31年4月から令和元年5月まで

*3：平成31年4月から令和2年8月まで

*4：平成31年4月から令和3年10月まで

*5：平成31年4月から令和2年3月まで

*6：令和3年10月から令和4年3月まで

6. 研究実施工程

| 項目 | 年 度 | | | 平成 31 年度 | | | | 令和 2 年度 | | | | 令和 3 年度 | | | |
|----------------------------|-----|--|--|----------|--|--|--|---------|--|--|--|---------|--|--|--|
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3.1 EDZ の影響範囲についての確認手法の整備 | | | | | | | | | | | | | | | |
| ・坑道壁面近傍の物理探査等のデータの取得 | | | | | | | | | | | | | | | |
| ・坑道周辺岩盤の透水性に関する検討 | | | | | | | | | | | | | | | |
| ・岩盤損傷に関する検討 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3.2 閉塞部における止水材の長期的な止水性能の評価 | | | | | | | | | | | | | | | |
| ・試験ケースの決定 | | | | | | | | | | | | | | | |
| ・試験装置の準備 | | | | | | | | | | | | | | | |
| ・バッチ試験 | | | | | | | | | | | | | | | |
| ・透水試験 | | | | | | | | | | | | | | | |
| ・分析及び結果の解析 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 取りまとめ | | | | | | | | | | | | | | | |

7. 成果概要

7.1 EDZ の影響範囲についての確認手法の整備

EDZ に関するデータ取得のため、地下研究施設を使った原位置試験を行った。亀裂性媒体における EDZ 調査を行うため、花崗岩が分布する日本原子力研究開発機構瑞浪超深地層研究所の 300 m 研究アクセス坑道において、原位置試験を実施した。坑道の東側壁面の湧水ポイントと割れ目が少ない地点において、坑壁から長さ約 2 m のボーリング孔を 2 本（北側を No.1 孔、南側を No.2 孔）掘削した（図）。そして、ボーリング孔を使ってボアホールテレビ（BTV）による観察を行った。観察の結果、No.1 孔において坑壁付近に EDZ 割れ目と判断される引張割れ目が集中して分布しており、この割れ目帯を含む区間に注水したところ坑道壁面から漏水が認められたため、割れ目と坑道壁面の連続性が高いと考えられた。また、単孔式水理試験によって、これより岩盤側では、健岩部と同程度の透水係数が得られた。No.2 孔では、坑壁付近で健岩部と比べて高い透水係数が得られたが、試験区間には天然の割れ目と判断されるせん断割れ目が多く分布しており、透水性に寄与する割れ目は不明であった。この 2 本のボーリング孔を中心とした幅約 10 m の区間で、弾性波探査試験を行った（図）。この結果、坑壁付近に弾性波の伝搬速度が低い領域が広がっていることが確認できた。この結果は、弾性波速度は岩石の弾性係数に依存することから、低速度領域は岩盤の損傷を反映していると解釈できる。加えて、同じ領域で比抵抗二次元探査試験を行った結果、坑壁付近においては、比抵抗値の低い領域が広がっていることが確認できた。亀裂性媒体の EDZ では地下水が岩盤から排水されることにより坑道壁面周辺の亀裂内の水分量が低下し高比抵抗を示した研究例がある¹。しかし、瑞浪超深地層研究所の 300 m 研究アクセス坑道では、坑道への地下水の流入が多く、坑道壁面付近に発生した亀裂内をある程度満たすことができる地下水が周辺岩盤から供給されたため、坑道壁面付近で水分量が増加し比抵抗が低下したと解釈できる。これらの結果を組み合わせると、坑壁付近に割れ目密度が高い領域が広がっていると想定できる。以上の結果から、BTV 観察、単孔式水理試験、弾性波探査試験及び比抵抗二次元探査試験といった手法を組み合わせることによって、EDZ の水理学的影響範囲の予測の確度を高めることができることが示された。これらの知見を踏まえると、実際の坑道の閉鎖時においては、上記手法の結果を確認し、組み合わせて考察することで、EDZ の水理学的影響範囲の評価を行うことが有益と考えられる。

多孔質媒体における EDZ 調査を行うため、新第三紀堆積岩（珪質泥岩）が分布する日本原子力研究開発機構の幌延深地層研究センターの 350 m 西連絡坑道において、原位置試験を行った。坑壁から長さ約 2 m のボーリング孔を 2 本掘削し、BTV による観察を行った。その結果、孔壁付近に多くの割れ目が観察できた。ボーリング孔を使った単孔式水理試験を実施したところ、2 本のボーリング孔の両方において、坑壁側の区間で、健岩部と比べて十分に高い透水係数が確認できた。岩盤内の地下水流動の可視化を目的として、岩盤に注水を行いながら比抵抗トモグラフィを実施した。比抵抗構造により強いコントラストを与えるために、原位置の地下水よりも塩濃度の高い塩水を注入し、また、注水量も変化させながら

測定を実施した。本成果は現時点で検討段階であり、今後取りまとめる予定である。今後は、上記の成果を物理探査の試験結果と合わせて検討し、EDZ の水理学的影響範囲に関する確認手法に関しての検討を行う。

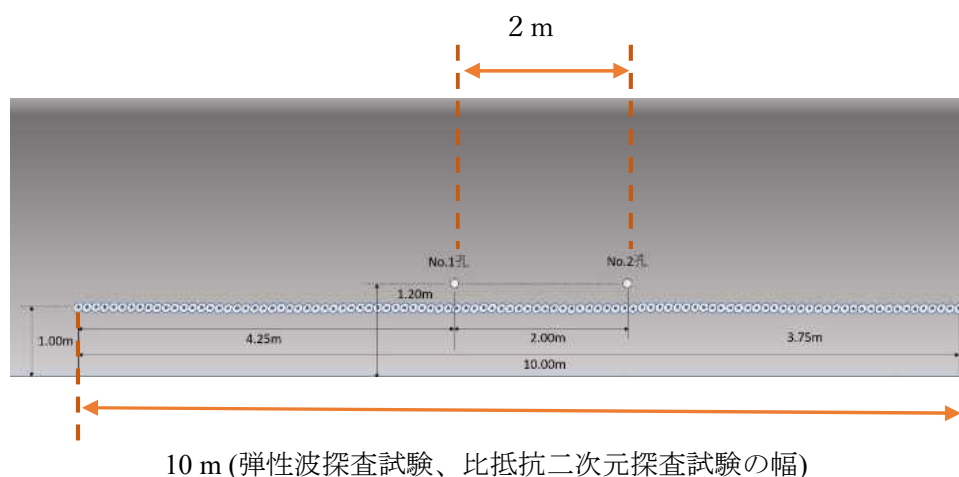


図 300 m 研究アクセス坑道における、ボーリング孔と弾性波探査試験、比抵抗二次元探査試験の位置関係

7.2 閉塞部における止水材の長期的な止水性能の評価

人工海水溶液とセメント溶脱成分の主要陽イオンを模擬した高 pH 溶液を混合したものにベントナイトを浸漬したバッチ試験を実施した。試験温度は 70 °C、浸漬期間は最大 2 年間で実施し、試験後は固液をフィルターによって分離した。回収した固相について、X 線回折分析を実施したところ、初期鉱物からの大きな変化は見られなかった。

ベントナイトの透水性の変化については、ベントナイトの主要構成粘土鉱物であるモンモリロナイトの間隔幅（層状に積層するモンモリロナイト粒子について、隣り合う粒子間の距離）と密度の関係を推定し、これを基に透水係数と密度の関係の理論式を作成した。作成した理論式は先行研究で得られているベントナイトの透水係数と密度の関係を再現するものであった。また、本理論式について、溶液のイオン強度依存性を評価するための透水試験を実施した。本成果は現時点で検討段階であり、今後取りまとめる予定である。

砂と混合したベントナイト混合土については、ベントナイトの含有量及び密度だけではなく、施工時の影響としてベントナイトの締固め時の含水比によって透水係数が変化することが知られている。そこで締固め時の含水比、密度、通水溶液のイオン強度を変えたベントナイト混合土に対する透水試験を実施し、透水係数に対する含水比の影響を確認した。イオン交換水を通水した場合は、先行研究²で報告されているように、締固め時の含水比が高

い場合、透水係数が小さくなる傾向が得られた。また、締固め時の含水比が同じ試料で比較すると、0.05 M の NaCl 溶液を通水した場合は、イオン交換水を通水した場合よりも透水係数が大きくなることを確認した。以上の結果から、締固め時の含水比、流入する地下水のイオン強度が埋戻し材の透水性に重要な影響を与えるものであることを抽出した。実際の坑道の閉鎖時においては、これらの事項を確認する必要があるが、透水性への影響メカニズムは明確になっていない部分も多いため、今後の検討が必要である。

8. 公表成果一覧

なし

9. 参考文献

- 1 Ozaki, Y., Ishibashi, M., Matsushita, T., Masumoto, K., Imasato, T., “Transition of near surface resistivity of tunnel wall during drift closure test”, Proceedings of the 13th SEGJ International symposium, 2018.
- 2 田中俊行, 戸井田克, 礫-砂-ベントナイト混合土の透水特性と透水係数の評価方法, 土木学会論文集 C, 64(1), 101-110, 2008.