

処分概念オプションの実証

(2-1)

操業・回収技術等の技術オプションの実証、 閉鎖技術の実証

－閉鎖技術の実証－

令和5年8月28日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

核燃料・バックエンド研究開発部門

幌延深地層研究センター 深地層研究部

木村 駿

説明概要

課題

- 地層処分場の閉鎖後長期の安全性の確保において、埋め戻した坑道や坑道周辺の掘削損傷領域(EDZ)が、放射性物質の生活圏に至る移行経路となり得る有意な水みちとならないことが重要
- 地下施設の閉鎖技術として、設計概念の詳細化や施工技術の成立性の確認が課題

目的・内容

- ベントナイト系材料を用いて、止水プラグによりEDZにおける地下水の移行をどの程度抑制可能かを把握するEDZシーリング試験を実施
- 坑道の側壁部や天端部における止水プラグの切り欠き部において、岩盤との境界部へベントナイト系材料を充填する方法として吹付け工法の適用性を確認する原位置吹付け施工試験を実施

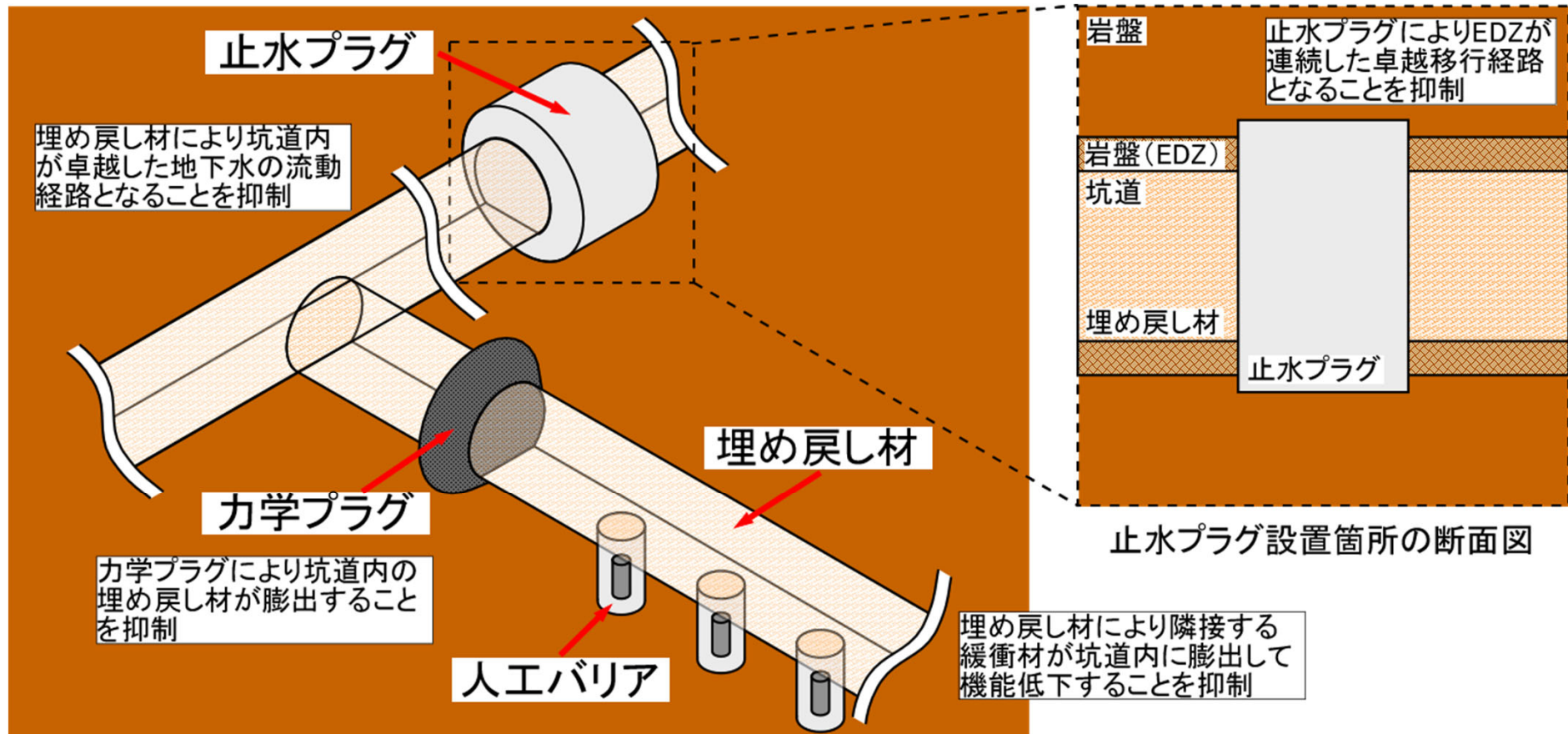
成果

- EDZシーリング試験について、坑道の底盤下のEDZの透水係数は 10^{-6} m/s程度であったが、EDZの深さを超えるように切り欠き部を設けて粘土止水壁を構築することにより、EDZの透水係数が3オーダー程度低下すること、および、構築から3年程度が経過した時点においても、EDZの透水係数を低い値に保つことができることを確認
- 原位置吹付け施工試験について、材料作製時の含水比調整や吹付け実施時の材料投入量の調整などの施工時の工夫により、乾燥密度の施工目標値である 1.43 Mg/m^3 を上回る乾燥密度を施工できることを確認

背景・目的

地層処分場の閉鎖後長期の安全性の確保において、埋め戻した坑道や坑道周辺の掘削損傷領域(EDZ)(Tsang *et al.*, 2005)が、放射性物質の生活圏に至る移行経路となり得る有意な水みちとならないことが重要

- プラグや埋め戻しなどの地下施設の閉鎖技術に関して、設計概念の詳細化や施工技術の成立性を確認することが課題



背景・目的

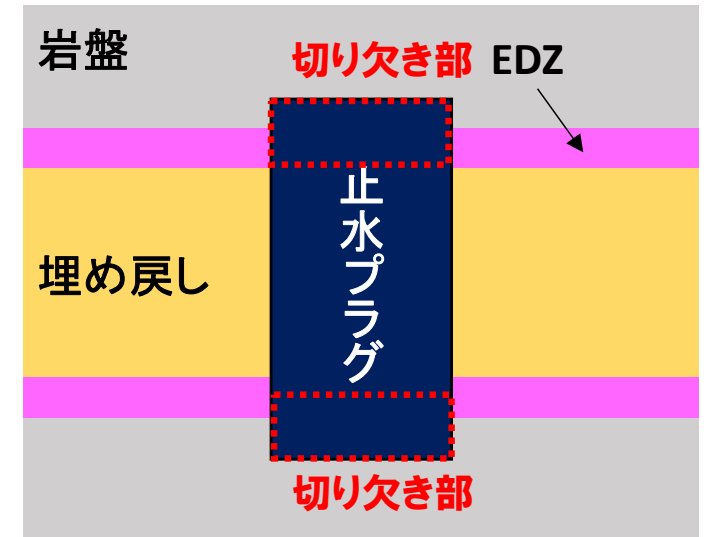
平成30年度から令和4年度に、高レベル放射性廃棄物の地層処分に関する技術開発事業(地層処分施設閉鎖技術確証試験)において、処分場の閉鎖後に坑道やEDZが水みちとならないためのプラグや埋め戻しといった坑道の閉鎖に係わる技術(坑道シーリング技術)の整備を実施

- **坑道シーリング設計・評価技術の整備**
多様な地質環境条件を想定した地下水流動解析等を踏まえた止水プラグや埋め戻し材に期待する役割の明確化と実際の処分事業を想定したシーリングシステムの設計評価技術の整備
- **シーリング技術の性能確認**
坑道シーリングの長期性能に影響を与えることが想定される事象や地質環境条件などを考慮した止水プラグや埋め戻し材、さらにはそれらを組み合わせたシーリングシステムの性能の検証
- **坑道シーリングに関わる施工技術の整備**
多様な地質環境、設計オプションへの柔軟な対応を可能とするための複数の埋め戻し材施工技術とその品質管理手法の整備

止水プラグの地下水移行抑制機能の評価および施工方法の適用性の確認のために幌延深地層研究センターの地下施設で実施した原位置試験の成果を報告

止水プラグに関する実施内容

- 止水プラグでは、坑道周辺のEDZの深さを上回るように岩盤に切り欠き部を設けてベントナイト系材料を充填することで、EDZの連続性を遮断し、坑道周辺が卓越した移行経路となることを抑制
- 止水プラグのEDZにおける地下水移行経路の遮断機能をより明確化し、止水プラグの性能および仕様の具体化が必要
- また、止水プラグが要求される性能を発揮するためには、設定した仕様を満たすように施工できる方法が必要であり、施工特性や品質管理に関する情報の整理が必要



止水プラグの概念図

➤ EDZシーリング試験

ベントナイト系材料を用いた止水プラグがEDZにおける地下水の移行をどの程度抑制できるかを評価

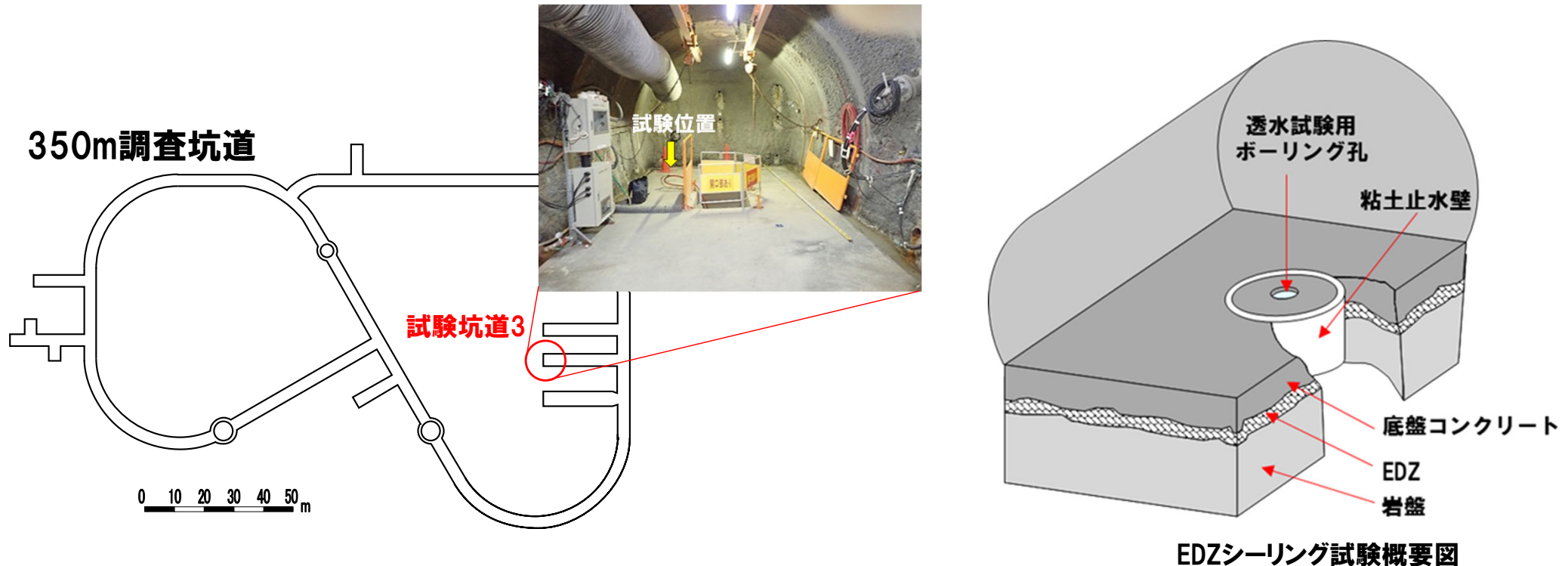
➤ 原位置吹付け施工試験

坑道の側壁部や天端部における止水プラグの切り欠き部において、岩盤との境界部へベントナイト系材料を充填する方法としての吹付け工法の適用性を確認

EDZシーリング試験の概要

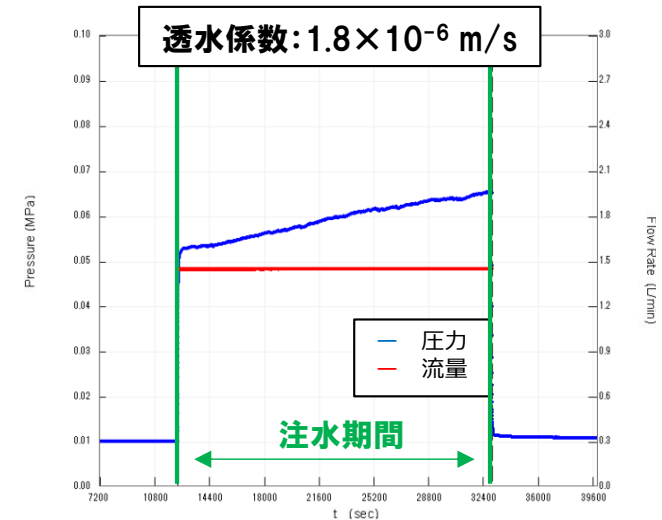
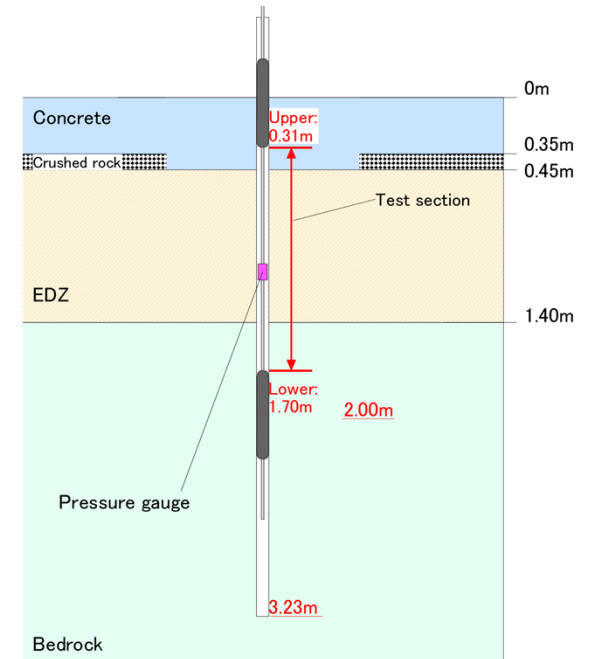
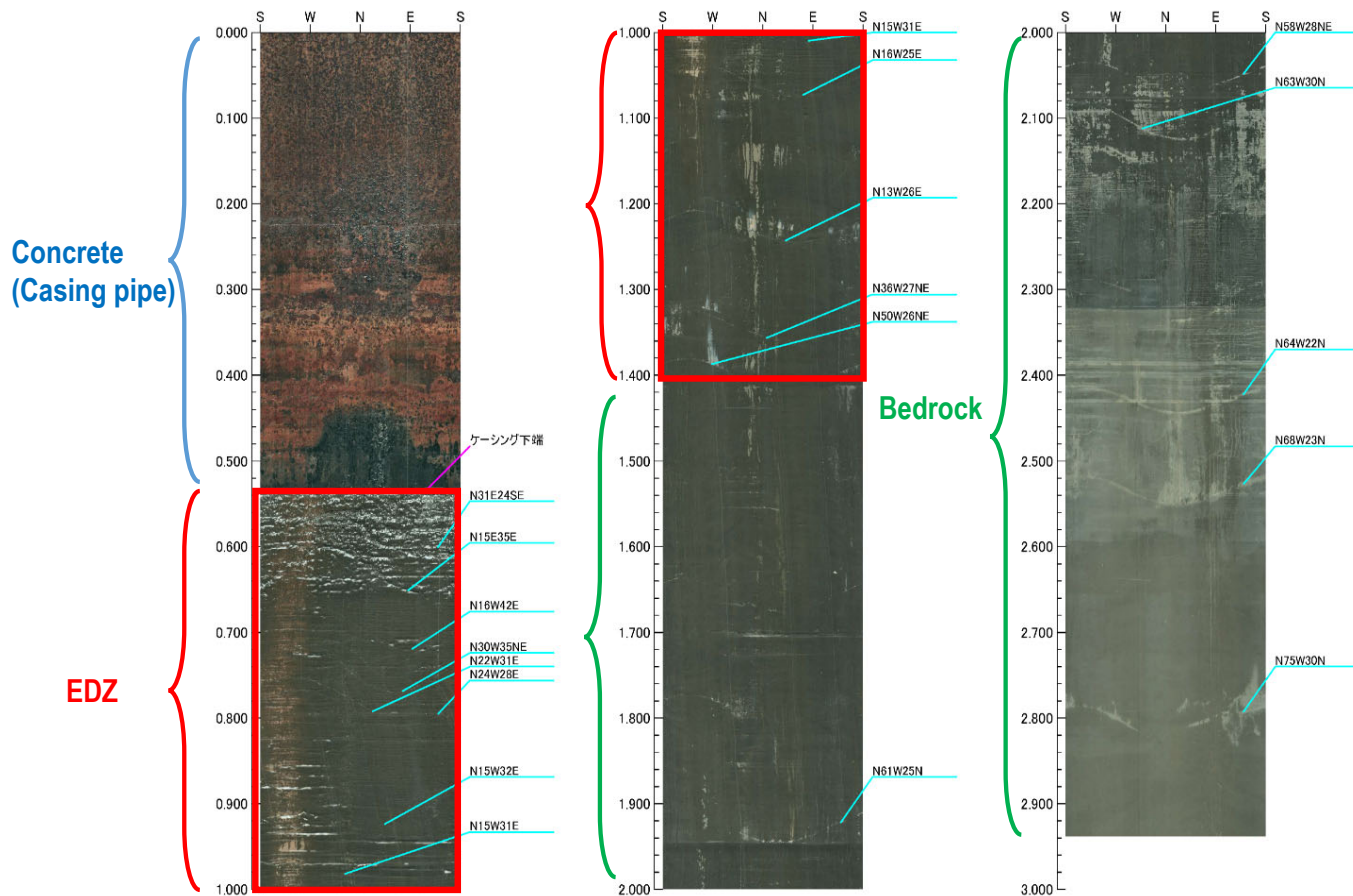
- 止水プラグの遮断性能を明らかにする上では、要求性能を満足する材料仕様や施工方法を検討した上で、その性能を定量的な指標で評価することが重要
- 坑道の底盤下のEDZの割れ目を対象として、止水プラグの切り欠き部を模擬した粘土止水壁（粘土系材料を使用）を構築し、透水試験により粘土止水壁の透水性を評価

粘土止水壁の透水係数から、止水プラグの切り欠き部におけるEDZ中の地下水移行抑制機能を**透水係数を指標**として評価



事前調査(EDZの分布の把握)

坑道の底盤下のEDZ割れ目の分布及び透水性を確認するための事前調査(BTV観察、透水試験)を実施



- 試験坑道3の掘削により生じたと考えられる亀裂が**深度1.4m程度**まで分布
- EDZ区間の透水係数は **10^{-6} m/sオーダー**
⇒既存のEDZの透水係数(10^{-6} m/s \sim 10^{-7} m/s)と整合

定流量注水試験結果

粘土止水壁の材料仕様の設定

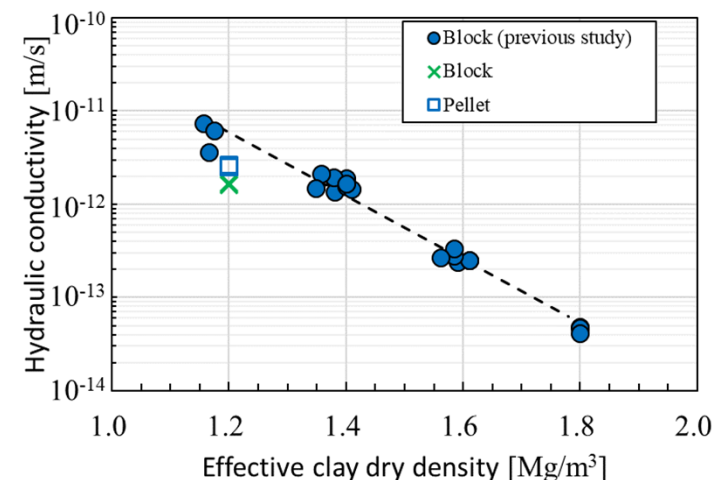
止水プラグに設定する透水係数の考え方

止水プラグにより連絡坑道とアクセス坑道間に透水性が掘削前の母岩と同程度以下となる低透水の領域を設けることで、EDZを含む坑道を通じた地上への移行経路を分断する。(NUMO-TR-20-03)

- 粘土止水壁の透水係数は350m試験坑道3周辺の岩盤の透水係数である 10^{-10} m/s オーダー以下を目標値とし、施工時の品質のばらつきを考慮して目標透水係数を 10^{-11} m/sのオーダーに設定
- 塩水環境である幌延の地下水条件においても、 10^{-11} m/sの透水係数を確保できるベントナイト系材料の有効粘土密度として 1.20 Mg/m^3 を設定
- 100%クニゲルV1のペレットおよびブロックを用いた室内透水試験により、有効粘土密度 1.20 Mg/m^3 で、透水係数が 10^{-12} m/sとなることを確認



ベントナイトペレット(左:破碎前、右:破碎後)



有効粘土密度と透水係数の関係

粘土止水壁の施工

- 床面下のEDZの深さを上回るように、調査孔(EDZ-1孔)を中心とした半径0.5mの円周上に深さ2m、幅0.1mの溝を掘削
- 飽和後の乾燥密度が 1.20 Mg/m^3 となるように破碎したベントナイトペレットを充填



円周上への溝の掘削



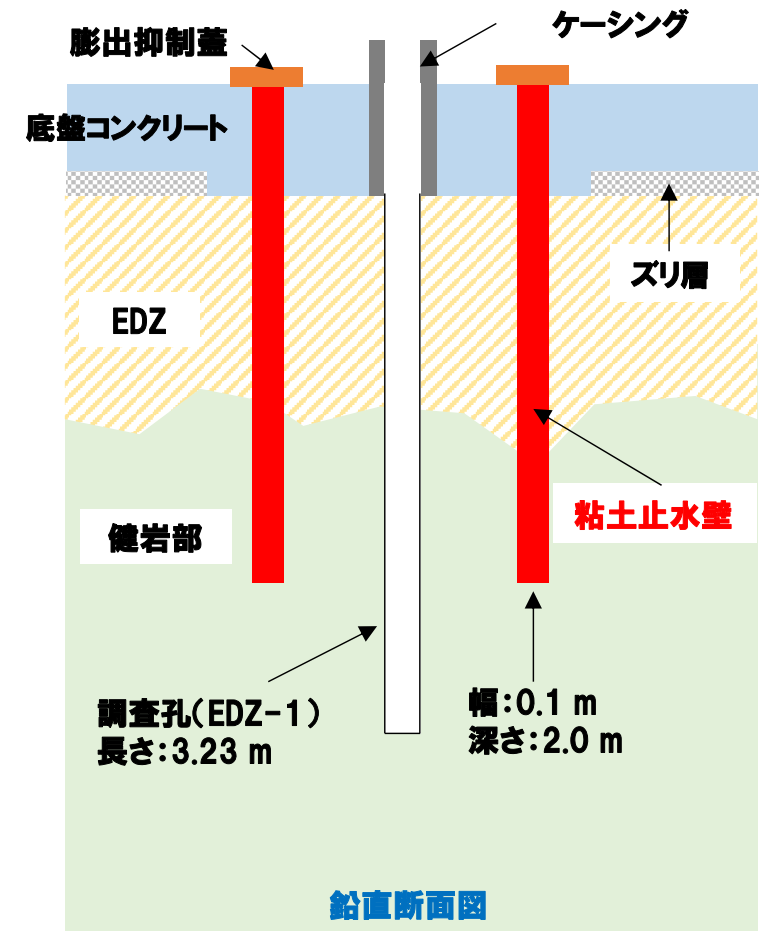
ベントナイトペレットの充填



粘土止水壁の施工完了の様子



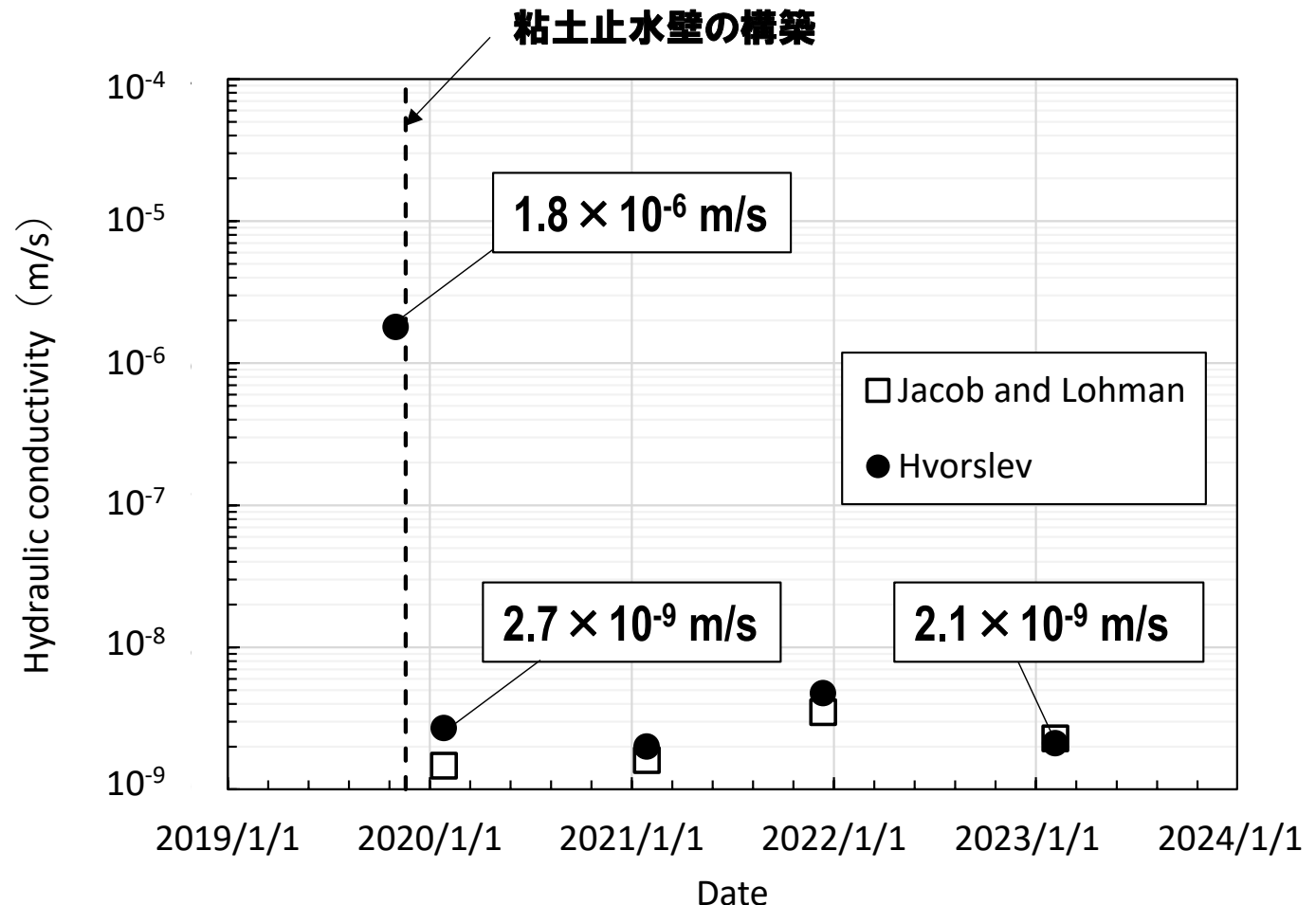
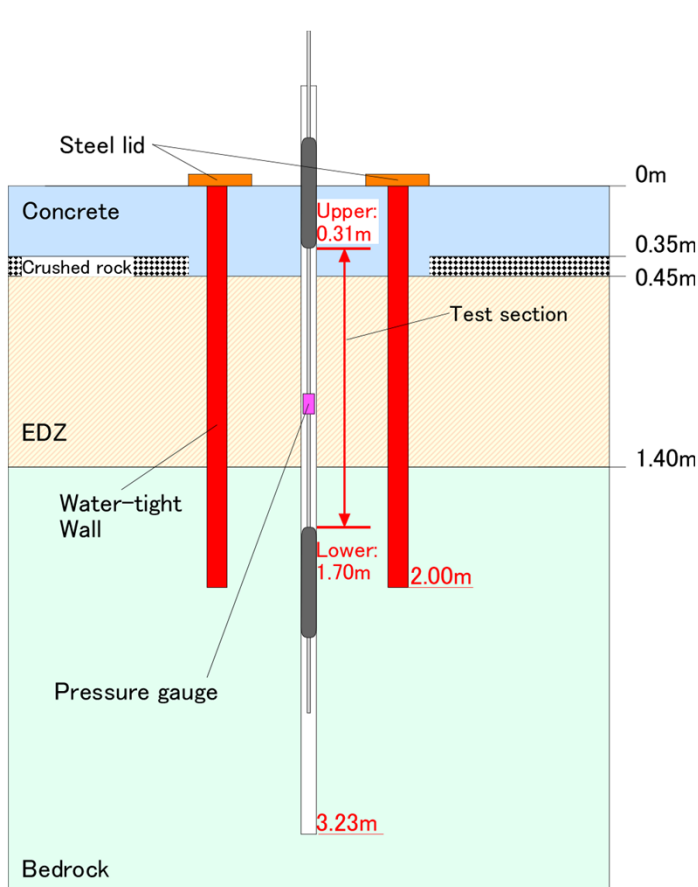
ペレット膨出抑制の蓋の設置



試験領域の断面図

EDZの透水性の評価

- 調査孔(EDZ-1孔)を用いた単孔式注水試験により、粘土止水壁を含むEDZの透水性を評価



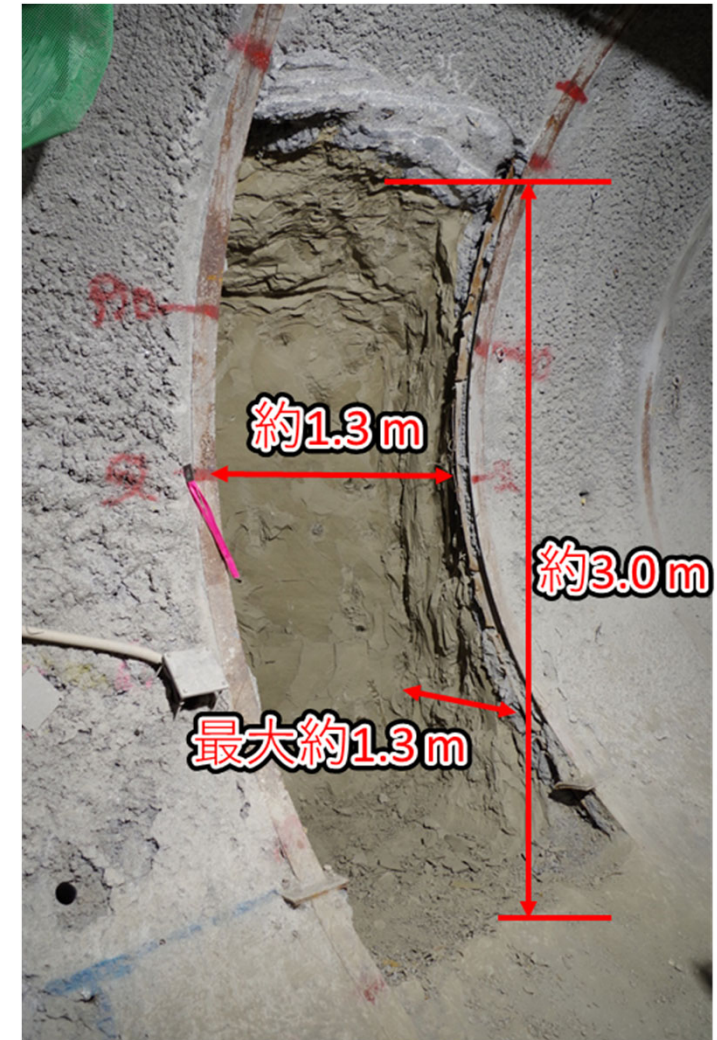
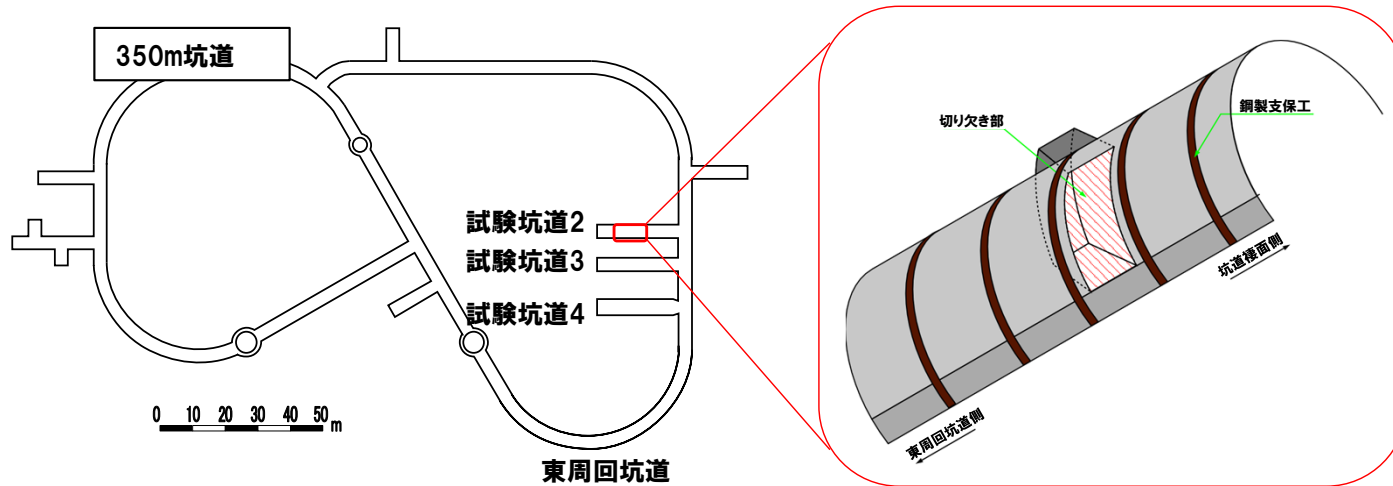
- 粘土止水壁構築前のEDZの透水係数は 1.8×10^{-6} m/sであったが、構築後の透水係数が 2.7×10^{-9} m/sと3オーダー低下することを確認
- 粘土止水壁を構築して3年が経過した時点においても、EDZの透水係数が構築直後と同等に低い値(10^{-9} m/sオーダー)を保っていることを確認

吹付け施工試験の目的

- 止水プラグでは、坑道周辺のEDZの深さを上回るように岩盤に切り欠きを設けるとともにその切り欠きにベントナイト系材料を充填することで坑道やEDZが卓越した移行経路となることを防止
- 坑道の天端部や側壁部の切り欠き部では、選択する施工方法によっては岩盤と止水プラグの境界部やその近傍において目標とする乾燥密度が達成できないことや空隙が生じることが懸念
- NUMOの包括的技術報告書においても、止水プラグは締固めたブロックを積上げるとともに、岩盤との隙間を吹付け工法により充填することを想定
- 坑道の側壁部や天端部に対するベントナイト系材料の施工方法として吹付け工法により止水プラグに必要な乾燥密度で施工ができるか適用性を検討

原位置吹付け施工試験の実施場所

- 350m試験坑道2の側壁部の岩盤を高さ約3.0m、幅約1.3m、最大深さ約1.3mで掘削して切り欠き部を設置



掘削前の試験坑道2の様子



掘削の様子

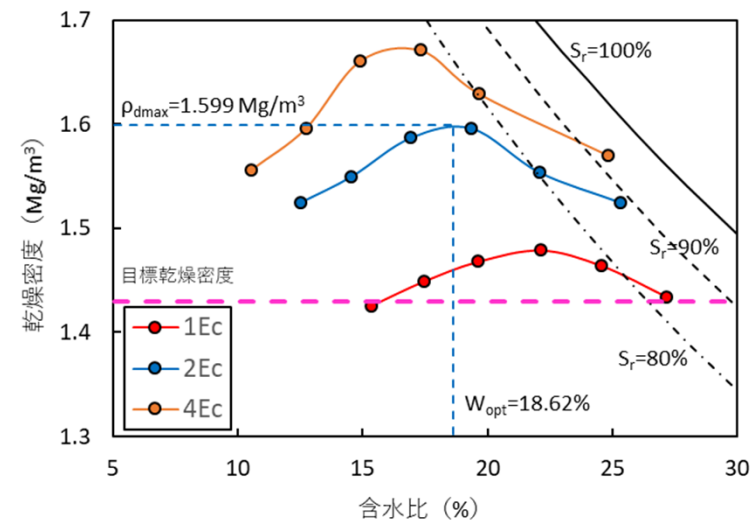
吹付け材料の材料仕様

- 吹付け材料には、70%クニゲルV1と30%ケイ砂の割合の混合土を用いた。
- EDZのシーリングに必要な性能を担保するために必要な透水係数として 10^{-11} m/sのオーダーの値を確保できる有効粘土密度として 1.20 Mg/m^3 を設定して、吹付け後の乾燥密度を 1.43 Mg/m^3 に設定
- 含水比の設定値は、締固め試験(JIS A 1210)の結果より締固めエネルギーが $2E_c$ の場合の最適含水比である18.62%とした。

混合率(%)			自然含水比(%)		目標乾燥密度 (Mg/m^3)	目標含水比 (%)
クニゲルV1	3号ケイ砂	5号ケイ砂	クニゲルV1	ケイ砂		
70	15	15	6.17~10.19	1	1.43	18.62

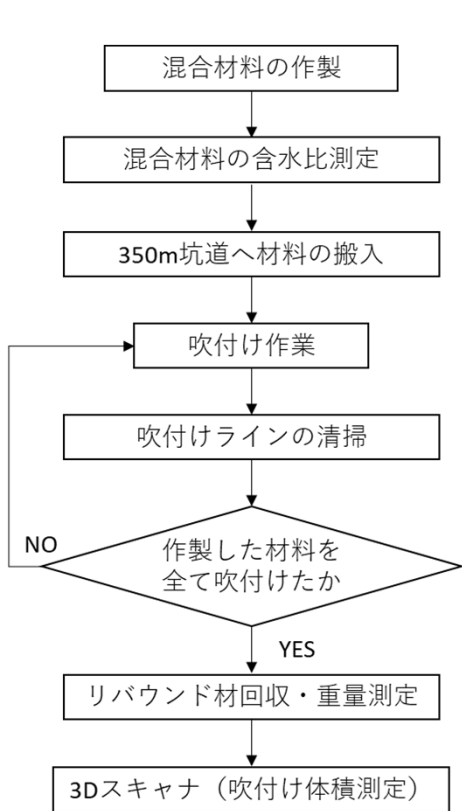


作製した吹付け材料

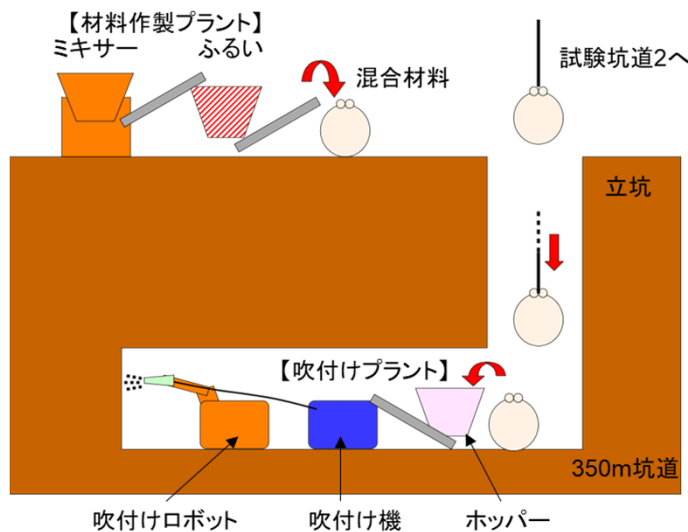


締固め試験の結果

吹付け施工試験の作業手順



吹付け試験の作業フロー



使用機械	仕様
吹付け機	ニードガン 2000 (AGCプライブリコ)
坑内圧縮空気ライン	12 m ³ /min
アーム付き汎用重機	Husqvarna DXR140
ノズル	吐出口30mm



吹付け施工の実績

- 切り欠き部への吹付け作業には、6日間を要した。
- 各作業日の終了時に3Dスキャナを用いて吹付け体積測定を実施した。吹付け材料重量と吹付け全体の体積を用いて乾燥密度を評価した。
- 吹付け全体の乾燥密度は1.57 Mg/m³となり、目標乾燥密度の1.43 Mg/m³を上回っていることを確認した。
- 一方で、吹付け機の閉塞を防止するために、材料の投入量を少なくした結果、吹付け速度は0.72m³/hrとなった。



3次元体積計測



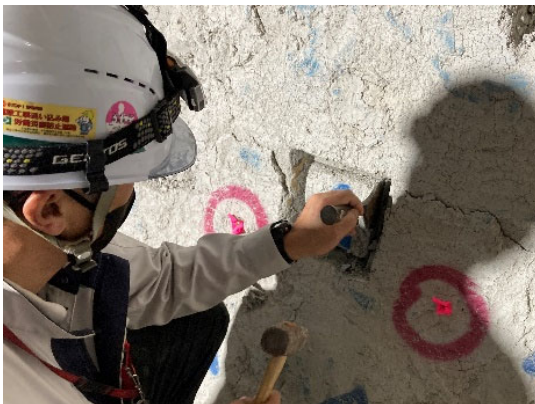
吹付け時点群データ

	吹付け体積 [m ³]	吹付け時間 [min]	吹付け速度 [m ³ /hr]	吹付け重量 [kg]	乾燥密度 [Mg/m ³]
1日目	0.622	未計測	-	1,057	1.41
2日目	0.879	79	0.67	1,802	1.70
3日目	1.409	103	0.82	2,560	1.51
4日目	1.044	80	0.78	1,934	1.54
5日目	0.591	54	0.66	1,108	1.56
6日目	0.569	59	0.58	1,047	1.53
全体	5.027	374.05	0.72	9,508	1.57

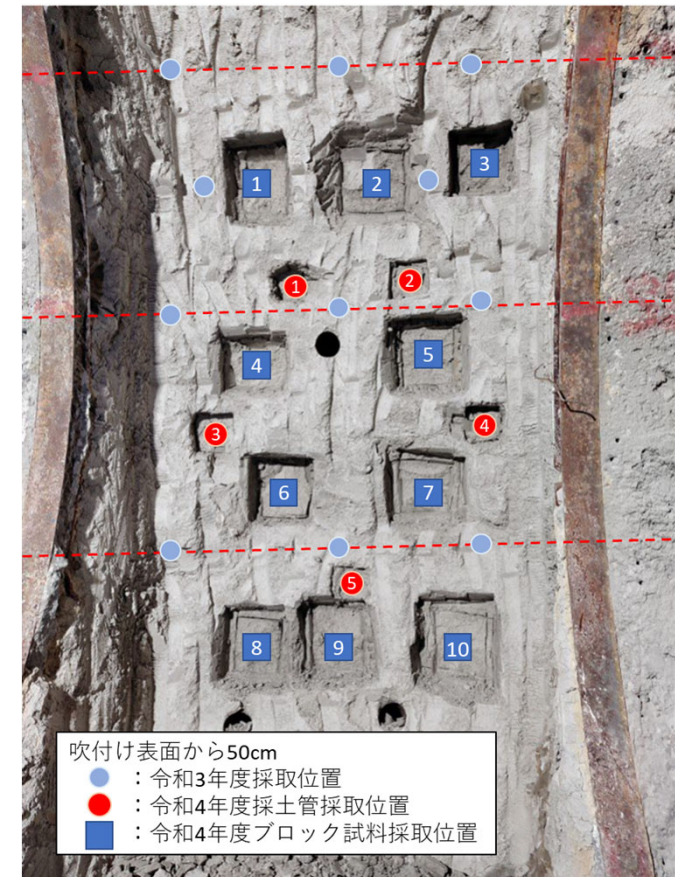
吹付け後のサンプリング



採土管による試料採取

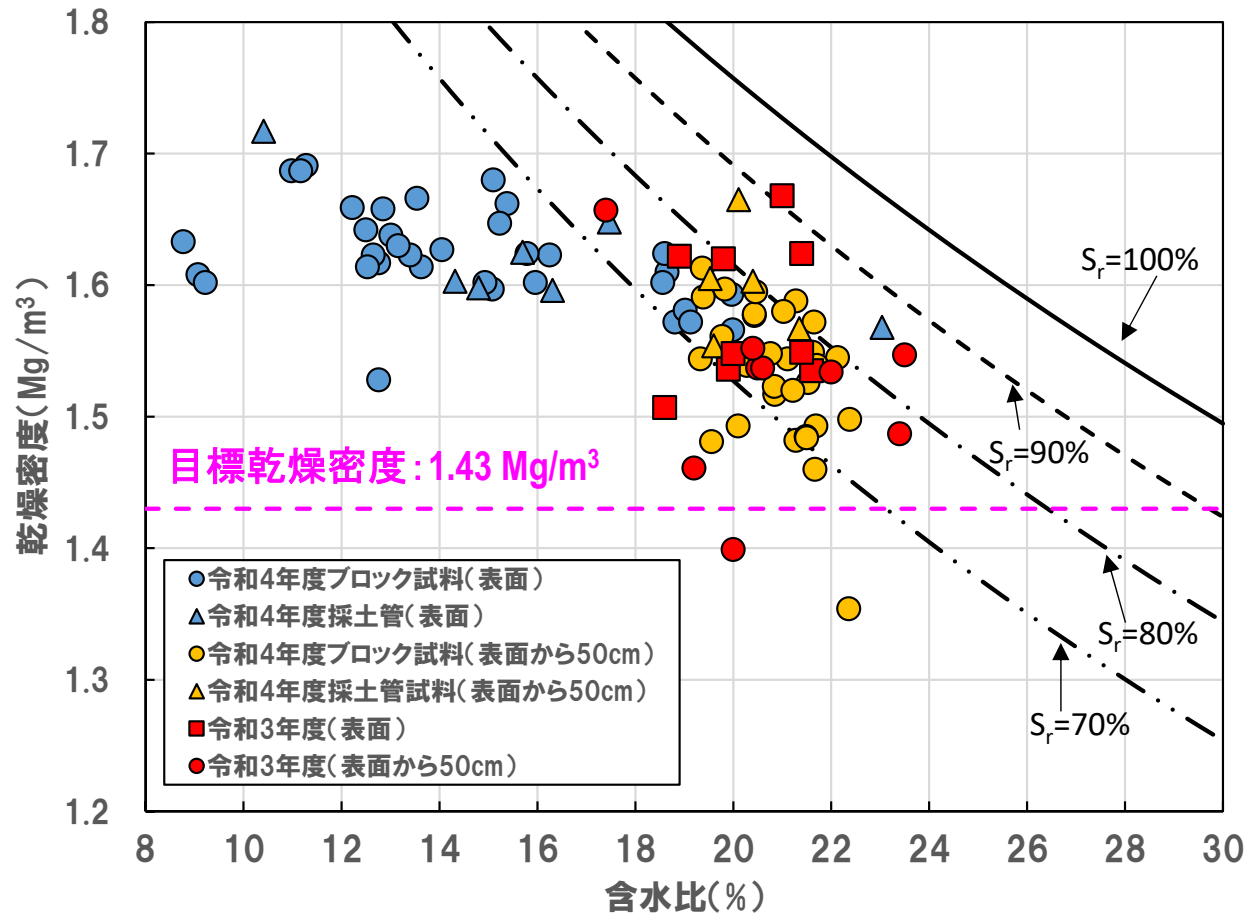


ブロック状に試料採取



- 吹付け施工時には、吹付け完了面から50cmの深さまで施工が終了した段階で9か所のサンプリングを実施し、吹付け完了後に吹付け表面から9か所のサンプリングを実施(令和3年度)
- 吹付け完了後1年程度経過した時点で、吹付け表面及び吹付け表面から50cmの深さからサンプリングを実施(令和4年度)
- サンプリングした試料を用いて含水比と乾燥密度を測定して施工品質を評価

試験結果の整理



- 吹付け施工時にサンプリングした試料の乾燥密度(赤プロット)の平均値は 1.55 Mg/m^3 であり、目標乾燥密度 1.43 Mg/m^3 を達成できることを確認
- 1年経過した時点でサンプリングした試料では、吹付け表面(青プロット)では坑道の換気の影響により含水比が低下している様子を確認
- 一方、吹付け表面から50cmの深さ(黄プロット)の試料では、吹付け直後の含水比と変化していないことを確認

まとめ

- EDZシーリング試験

- 坑道の底盤下のEDZの透水係数は 10^{-6} m/s程度であったが、EDZの深さを超えるように切り欠き部を設けて粘土止水壁を構築することにより、EDZの透水係数が3オーダー程度低下することを確認
- 粘土止水壁の構築から3年程度が経過した時点においても、EDZの透水係数を低く保つことができることを確認

- 吹付け施工試験

- 止水プラグの切り欠き部を模擬した坑道側壁部の切り欠き部に対して、材料作製時の含水比調整や吹付け実施時の材料投入量の調整などの施工時の工夫により、乾燥密度の施工目標値である 1.43 Mg/m^3 を上回る乾燥密度を吹付け工法により施工できることを確認

本資料には、平成30年度から令和4年度に経済産業省資源エネルギー庁から受託した「高レベル放射性廃棄物等の地層処分に係る技術開発事業(JPJ007597)(地層処分施設閉鎖技術確証試験)」の成果の一部を利用した。

幌延国際共同プロジェクトにおける実施内容

経済産業省資源エネルギー庁の委託事業である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(地層処分施設施工・操業技術確証試験)で、止水プラグと埋め戻し材について、これまでの研究成果を踏まえ、実際の地質環境条件や作業環境を考慮した地下研究施設やモックアップ施設を活用した実証的な研究をとおして、施工技術の成立性を確認するとともに、技術オプションとしての整備を進めている。

幌延の地下施設における実規模施工試験を通して、坑道の埋め戻しから止水プラグの設置までの一連の施工技術を確認・実証し、技術的課題点への対応策を提示するとともに堆積岩を対象とした止水プラグが実際に施工可能であることを確認する。

幌延国際共同プロジェクトにおける「処分技術の実証と体系化(Task B)」では、上記の実規模施工試験について、処分場の操業に貢献しうる技術オプションの開発の一部として取り組む。

本日の発表内容に係る文献リスト

- Chin-Fu Tsang, F. Bernier, C. Davies: Geohydromechanical processes in the Excavation Damaged Zone in crystalline rock, rock salt, and indurated and plastic clays—in the context of radioactive waste disposal, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 42, 109–125 (2005).
- 原子力発電環境整備機構, 包括的技術報告: わが国における安全な地層処分の実現—適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築—, NUMO-TR-20-03, 2021年3月.