

吹付けによる地層処分場坑道埋め戻し技術の開発

森 拓 雄 木 村 志 照
板 場 建 太

Bentonite Mixed Soil Shotcrete for High Level Radioactive Waste Depository Backfilling

Takuo Mori Yukinobu Kimura
Kenta Itaba

Abstract

The tunnels used for high-level radioactive waste disposal sites will be backfilled by Bentonite mixed soil (BMS), to prevent drainage paths. Backfilling requires a lower hydraulic conductivity than that of the surrounding rocks. There are several options for backfilling method, such as shotcrete, compaction, and block filling. The shotcrete is easy to operate and can be used in deep and narrow tunnels. The disadvantage of shotcrete is its slow operation speed. Dispersants were mixed with BMS to prevent material agglomeration and blockage of the shotcrete machine. Mixing tests were conducted to design the ratio, and the dispersant effect was examined using in-suit tests. Dispersants reduce the potential for material agglomeration and machine blockage.

概 要

高レベル放射性廃棄物の最終処分場では、廃棄体定置後、建設や作業時に使用される坑道が卓越した地下水の流動経路にならないようベントナイト混合土で埋め戻す計画で、埋め戻し材には周辺岩盤相当以下の透水係数が求められる。埋め戻す施工法の候補には、吹付けや原位置撒き出し・締固め、スクリーフィーダー充填などがある。吹付け工法は、施工がシンプルで大深度の狭隘な坑道での作業に適するが、混合土製造時に材料が団粒化し、吹付け作業時に圧送管を閉塞するため施工速度が低下するという課題があった。混合土に分散剤を加えることで材料の団粒化を抑制し、施工速度を改善する方法を検討した。ベントナイト混合土に適した混和材を選定し、室内試験で配合設計を行い、実規模の吹付け実験で効果を検証した。その結果、分散剤を添加した混合土は圧送管を閉塞することなく施工速度が改善された。得られた知見を今後の実務展開に活用する。

1. はじめに

近年、高レベル放射性廃棄物処分場建設の機運が高まっている。候補地選定において、処分場建設技術を具体的に示すことは、国民の理解を得る上で重要である。国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（JAEA）は、幌延深地層研究センターのGL-350mの試験坑道において、圧縮成形したベントナイト混合土のブロックを廃棄体の周りに定置する縦置き実物大モックアップ試験を実施した¹⁾。また、公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター（RWMC：通称「原環センター」）は廃棄体と緩衝材（人工バリア）を一体化させたPEM方式による横置き廃棄体の定置・回収実物大モックアップ試験を実施している^{2)~4)}。さらに、最近では、高レベル放射性廃棄物処分の事業主体である原子力発電環境整備機構（NUMO）は操業期間中のシナリオや閉鎖の検討も始めている⁵⁾。

これまで廃棄体の周りに構築される人工バリアの施工方法に関する多くの検討がなされているが、作業坑道を埋め戻す技術の研究は少ない。埋め戻し材には、埋め戻し後の作業坑道が水みちとなり、天然バリアの弱点にならないように、周辺岩盤相当の透水係数が要求される⁶⁾。


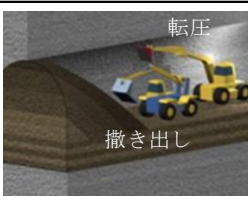
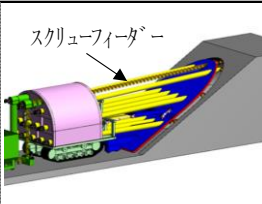

経済的かつ所定の要求を満足するベントナイト混合土による埋め戻しの施工方法として、人工バリア構築技術と同様に、①吹付け方式、②原位置撒き出し・締固め方式、③スクリーフィーダー充填方式、④ブロック定置方式などが候補になっている。吹付け方式は、低コストで連続施工が行える反面、課題として、団粒化したベントナイト混合土が吹付け作業時に閉塞することが既往の研究で報告されている³⁾。一定の大きさ以上のベントナイト混合土が団粒化したものは製造時に除去するため、材料ロスという課題もある。

これらの課題を克服する方策として、ベントナイト混合土に分散剤を添加する方法を検討した。まず分散剤の選定を行い、室内配合試験で添加量を決定した。続いて実規模実験を実施し、混合土製造時の団粒化量や、吹付けの施工速度、吹付け後の埋め戻し材の品質などから分散剤の効果を検証した。

2. 埋め戻しの施工法

埋め戻しの施工法として以下の4つの方式が候補になっている。それぞれの長所・短所をTable 1に示す。埋

Table 1 坑道埋め戻し施工法の候補^{6)~9)}

Backfilling Method Options				
方式	吹付け	撒き出し・締固め	スクリーフ フィーダー	ブロック定置
				
ワーカビリティ	◎	△	◎	△
施工速度	○	△	◎	×
遮水性 (密度)	○	◎	△	◎

め戻し対象の空洞の大きさや形状によって方式が選定される。複数の方式の組合せも考えられる。

- 吹付け方式：地上のプラントでベントナイトと砂などに加水・混合し、地下に運搬後、圧縮空気で吹付ける方式⁷⁾。遠隔で連続施工が可能。施工がシンプルで大深度の狭隘な場所での施工に適する。圧送管が閉塞しないように施工速度調整が必要。
- 撒き出し・締固め方式：地上で製造したベントナイト混合土を坑道内で撒き出し、転圧する方式⁶⁾。大量施工が可能で、品質の確実性が高い。一方、狭い坑内で用途の異なる複数の機械を使用し、手順が煩雑なため、遠隔操作には不向き。
- スクリーフフィーダー方式：スクリーフフィーダーでベントナイト混合土を搬送・充填する方式。最も施工がシンプルで大量施工が可能である⁸⁾。ただし充填後の埋め戻し材の密度が他の方式で施工したものと比較して小さい。
- ブロック定置方式：地上でベントナイト混合土を圧縮成形したブロックを坑道内に敷きならべる方式⁹⁾。坑道の断面形状に合わせて、ブロックをひとつずつ敷きならべる作業が煩雑で速度が遅い。定置の自動化も検討されている。

3. 吹付け用埋め戻し材料の検討

分散剤を添加することで、混合性ならびに空気圧送性に優れた埋め戻し材の検討を行った。

3.1 分散剤の選定

建設工事用の混和剤は、セメントや粘土を対象としてそれぞれ開発されて製品化されており、ここでは粘土にも効果があるように、立体障害と荷電特性が調整された分散剤を選定した。

3.2 分散剤の効果と添加量

3.2.1 使用材料 ベントナイト混合土として原環センターがJAEA幌延深地層研究センター地下GL-350mの試験坑道で実施した、吹付け工法によるPEM隙間充填

Table 2 使用材料

Bentonite Mixed Soil Composition			
材料	仕様	土粒子密度 Mg/m ³	配合 % [*]
ベントナイト	Na型(クニゲルV1)	2.749	50
珪砂	3号 鹿島産(最大粒径1.65mm)	2.642	25
	5号 〃(最大粒径0.84mm)	2.723	25

※乾燥質量比

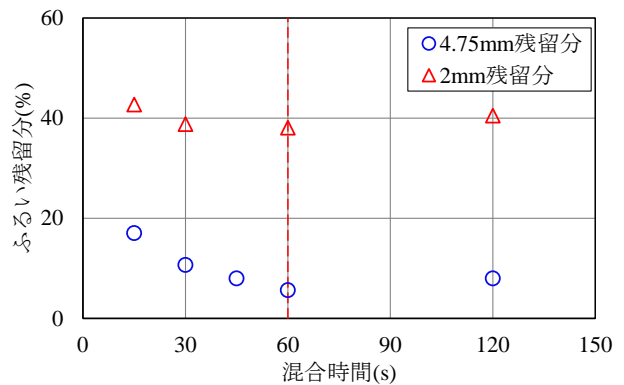


Fig. 1 混合時間と団粒化
Mixing Limps and Interval

の配合を参考に決定した¹⁰⁾。Table 2に使用した材料の土粒子密度と配合を示す。

3.2.2 混合時間 混合には容量7リットルのホバート型ミキサーを使用した。室内配合試験の混合時間を決定するため、混合時間と団粒化の関係を調査した。所定の時間混合したベントナイト混合土を2mmと4.75mmのふるいを通過させ、その残留分を団粒化したものとして評価した。Fig. 1に結果を示す。混合時間とともに団粒化物は減少し、混合時間60秒のとき、2mmふるい、4.75mmふるい、とも残留分の量が最も少なくなっている。その後はミキサーの造粒効果により、増加傾向に転じている。以上の結果、今回使用したミキサーと材料の組み合わせでは60秒が最適混合時間であると判断した。

3.2.3 分散剤の添加量 分散剤の添加量を変化させた室内配合試験を実施した。2mmふるい残留分を団粒化物として評価した結果をFig. 2に示す。図中赤い点線で示した分散剤なしの場合と比較すると、分散剤添加量が0.2%以下であれば団粒化の抑止効果が期待できる。また

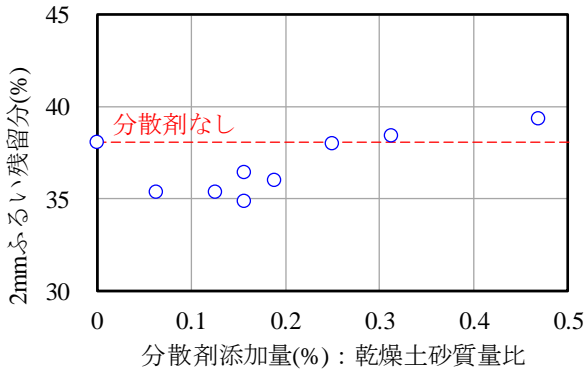


Fig. 2 分散剤の団粒化抑止

Dispersants Effect against Mixing Limps

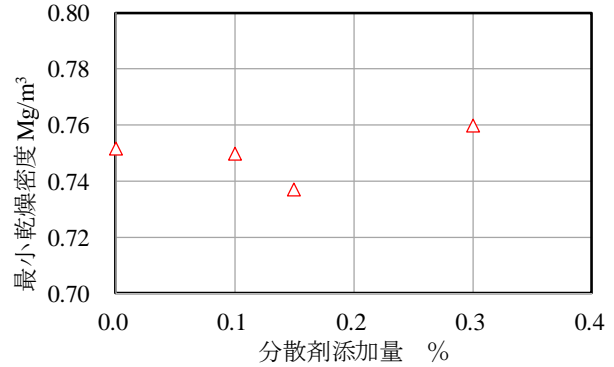


Fig. 3 分散剤の添加量と効果

Dispersion Effect

土粒子同士が反発し合う様子を確認するため最小密度・最大密度試験 (JIS A 1224に準じる) を実施した。最小密度試験の結果をFig.3 に示す。添加量0.15%のとき乾燥密度が最も小さく分散効果が発揮された。以上の結果、今回の配合に対する分散剤の最適添加量を0.15%とした。

3.3 埋め戻し材の性能

3.3.1 締固め特性 分散剤が埋め戻し後の密度におよぼす影響を把握するため、添加量を変化させた締固め試験 (JIS A 1210, A-c法) を実施した。Table 3に結果を示すように、最大乾燥密度は概ね1.67Mg/m³で分散剤の有無による有意な差は見られず、分散剤が締固め特性におよぼす影響はほぼ無いと考えられる。また最適含水比も16.6%程度でほぼ同じであった。

3.3.2 透水性能 透水特性についても分散剤の影響を調査した。分散剤を変化させたTable 2の配合のベントナイト混合土を目標密度1.60Mg/m³ (4章で後述) に圧縮成形し、JIS A 1218に準じて変水位透水試験を実施した。なお施工のばらつきを考慮し、埋め戻し後の乾燥密度が1.6Mg/m³を下回る場合も想定し、乾燥密度1.50Mg/m³のケースも実施した。

Table 4に透水試験結果を示す。分散剤の有無による透水係数の有意な差は見られず、乾燥密度が0.1 Mg/m³小さくなくても透水係数の変化はない。次に既往の研究と比較した。有効ベントナイト密度と透水係数の間に相関性があることが既往の研究で知られており、今回の有効ベントナイト密度は乾燥密度 $\rho_d=1.60\text{Mg/m}^3$ のとき1.15Mg/m³で、 $\rho_d=1.50\text{Mg/m}^3$ のとき1.05Mg/m³となる¹¹⁾。Fig. 4に示す今回の結果 (分散剤添加率0.15%) は分散剤を含まない既往の研究とも概ね傾向は一致しており、透水特性に関しても分散剤が及ぼす影響はほぼ無いと考えられる。

4. 施工性の検証

3章の室内試験で検討した材料について、Fig. 5に示すように、実規模のミキサーでベントナイト混合土を製造

Table 3 ベントナイト混合土の締固め特性
Compaction Characteristics of Bentonite Mixed Soil

分散剤 %	最大乾燥密度 Mg/m ³	最適含水比 %
0.00	1.671	16.8
0.10	1.679	16.7
0.15	1.672	16.6
0.30	1.676	16.6

Table 4 ベントナイト混合土の透水特性
Permeability Coefficient of Bentonite Mixed Soil

分散剤 %	乾燥密度Mg/m ³	
	1.50	1.60
0.00	—	3.75×10 ⁻¹² m/s
0.15	4.58×10 ⁻¹² m/s	4.32×10 ⁻¹² m/s
0.30	—	3.21×10 ⁻¹² m/s

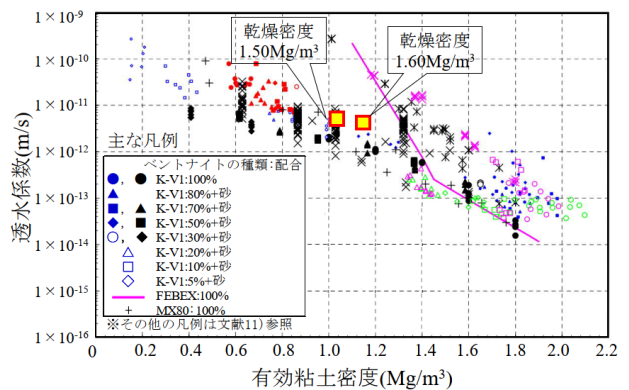


Fig. 4 有効粘土密度と透水係数 (文献11)に加筆

Permeability Coefficient and Effective Clay Density

し吹付実験を行い、埋め戻し後の品質を調査した。埋め戻し材には周辺岩盤相当以下の透水係数 (2×10⁻⁹m/s) が求められる。原環センターは目標乾燥密度を $\rho_d=1.60\text{Mg/m}^3$ としてベントナイト混合土の吹付けの研究を行っている⁶⁾。3.3.2項の結果では要求性能を満たすには十分すぎるが、今回の暫定目標値は $\rho_d=1.60\text{Mg/m}^3$ とした。

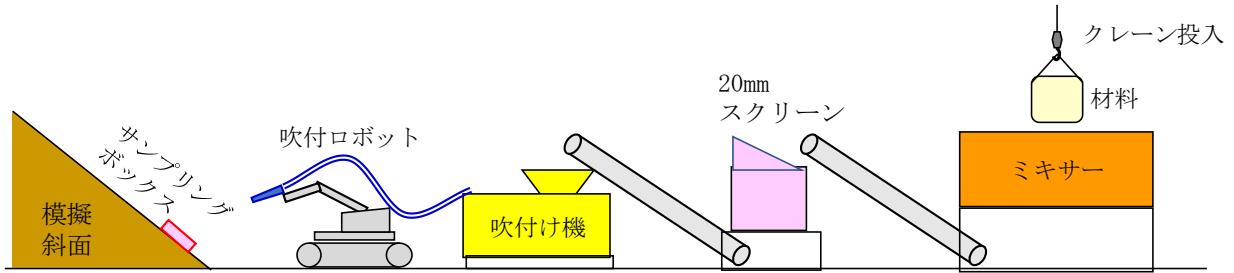


Fig. 5 吹付実験の機械構成
Shotcrete Machine Component

Table 5 ミキサー（北川鉄工社製:W-500）の仕様
Mixer Specifications

混合容量	0.5 m ³
電動機	2×7.5 KW
排出方式	プラグゲート (エアシリンダー駆動)
寸法	1,480×2,040×1,530mm
重量	2,800 kg

4.1 ベントナイト混合土の製造

ベントナイト混合土の製造で使用したバッチ式の2軸強制練りミキサーの仕様をTable 5に示す。まず混合時間を決定するため、混合時間と団粒化の関係を調査した。Photo 1に混合状況を示す。Table 2の配合でベントナイト混合土の合計が500kgになる珪砂とベントナイトを混合し、その後Table 3で示した最適含水比になるように加水した。加水方法は3か所のノズルから材料全体に水分がいきわたるように噴霧した。加水終了後から所定の時間混合ごとに試料を採取し、ふるい分けを行った。4.75mmふるいの残留分で団粒化を評価した結果をFig. 6に示す。室内試験と同様に、混合が進むにつれ団粒化する量は減少するが、混合開始から120秒後からは増加する。造粒化が始まったと推察される。今回のTable 2の材料とTable 5のミキサーとの組み合わせでは120秒が最適混合時間であると判断した。

次に分散剤の効果について調査した。Fig. 7に分散剤を添加した場合の混合時間と団粒化量の関係を示す。分散剤の有無による有意な差は見られなかった。またいずれのケースも施工に大きな悪影響を及ぼす20mm (Fig. 5のスクリーン残留分) を超える団粒化物は生じず、加水方法と混合時間を適切に管理すれば団粒化は防止できることが明らかになった。

4.2 吹付け施工

4.1節で製造した分散剤あり（添加量0.15%）およびなしのベントナイト混合土500kgをFig. 5およびPhoto 2に示すように吹付けロボットで斜面に吹付けた。Table 6に吹付け施工のパラメーターを示す。吹付けノズルは30mmと40mmのものを使用し、斜面との距離は1mを保持した。斜面には300mm×300mm×150mmの木製サンプリングボックスを設置し、4.3節で後述する密度の測定を行った。



Photo 1 ベントナイト混合土の製造
Bentonite Mixed Soil

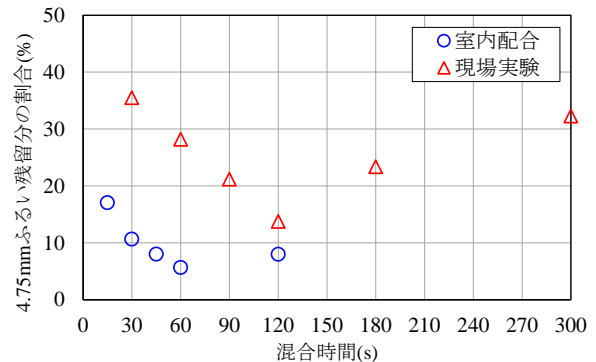


Fig. 6 混合時間と団粒化の関係：分散剤なし
Mixing Limps and Interval: No Dispersants

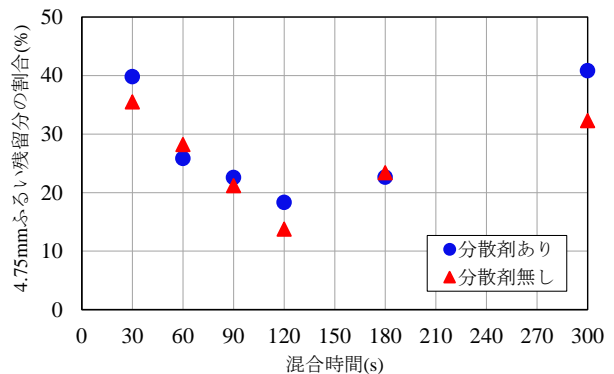


Fig. 7 分散剤が団粒化に及ぼす影響
Dispersants Effect against Mixing Limps

分散剤なしの場合、吹付け開始から1分後に管が閉塞した。また粉塵が非常に多かった。一方、分散剤ありの場合は管が閉塞することはなく約5分間で500kg（材料圧送量:100kg/分）の材料を吹付けることができた。さらに材料圧送量を2倍（ローター回転数：5→10rpm）に増やしても管が閉塞しないことも確認できた。

4.3 埋め戻し材の品質

吹付け終了後サンプリングボックスを回収し、平らな場所へ移動させ、砂置換法（JIS 1214）で乾燥密度を求めた。Fig. 8に示すように、ノズル径40mmの場合、埋め戻し材の密度は1.2~1.3Mg/m³程度で目標密度1.60Mg/m³に達しなかった。一方、ノズル径30mmの場合は、目標密度

Table 6 吹付パラメーター
Shotcrete Parameters

項目	数値
エア量	12m ³ /h
ローター回転数	5rpm
圧送距離	20m
ノズル径	30mm, 40mm
ノズル距離	1.0m



Photo 2 吹付け状況
In-Suit Test of Shotcrete

を満足した。分散剤の有無を比較すると、分散剤を加えると乾燥密度は1.69Mg/m³で若干小さくなる傾向がみられるが、目標密度1.60Mg/m³を十分満足している。

5. 分散剤のはたらき

各プロセスにおけるベントナイト混合土に分散剤を添加する影響について調査した結果の一覧をTable 7にまとめる。分散剤には閉塞防止や粉塵抑制など主に施工面での改善に期待できる。

これらの結果から分散剤の効果のメカニズムを推測した。ベントナイトの結晶は複数の板状で、その層間に水

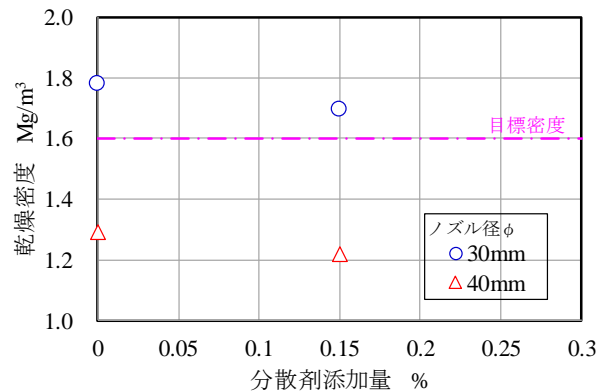


Fig. 8 吹付けノズルと埋め戻し後の密度の関係
Nozzle Diameter and Backfill Density

Table 7 分散剤の影響および効果
Dispersants Advantages and Disadvantages

プロセス	影響または効果	
混合	団粒化抑制	効果小
吹付け	閉塞防止	効果大
	粉塵防止	効果大
吹付後	埋戻し材の密度	影響あり
	透水特性	影響なし

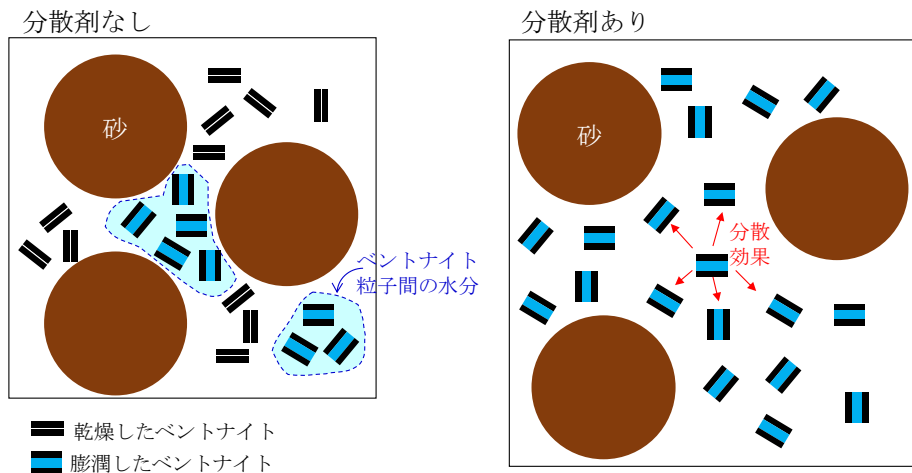


Fig. 9 分散剤のはたらき（イメージ図）
Dispersants Functions

分子が入り込むことで膨潤する¹²⁾。ベントナイト混合土において、Fig. 9に示すように砂と砂の間にベントナイト粒子が存在する。分散剤なしの場合は、膨潤したベントナイトの周りに水分が存在し、粘性を有するため圧送管に付着する。また水分が不均一なため、乾燥したベントナイトも存在し、粉塵のもととなる。一方、分散剤ありの場合は、膨潤したベントナイトが分散剤の働きにより静電的に反発しあう。その結果、水分も均等に行きわたると考えられる。

6. まとめ

分散剤を添加したベントナイト混合土の施工性と品質を調査した。その結果、ベントナイト混合土製造時の団粒化を抑制する手法を構築するとともに、吹付け方式の課題であった施工速度の改善が期待できることを明らかにした。得られた知見を以下に示す。

- 1) ベントナイト混合土製造時に生じる団粒化は、水分の添加方法を工夫し、混合時間を適切に管理すれば制御可能で、材料ロスを大幅に縮減することができる。
- 2) 分散剤を添加したベントナイト混合土は空気圧送の際に管に付着することなく、施工速度を改善することができる。また作業中の粉塵を低減する効果も期待できる。
- 3) 分散剤が埋め戻し材の品質に及ぼす影響は非常に少なく、所定の密度以上であれば埋め戻し材として天然バリアと同等の機能を満足する。

課題として、分散剤を添加した埋め戻し材の長期安定性について検証する必要がある。

今後、埋め戻し材の要求性能にあった、ベントナイト混合土の配合設計、合理的な施工パラメーターの設定などに取り組みたい。

謝辞

本研究の実施にあたり、公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センターの川久保政洋氏より貴重なご意見を賜りました。ここにお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) Tomoo Fujita, Masashi Nakayama, Kenji Tanai, Yutaka Sugita: Plan of Full-scale Experiment on Engineered Barrier System in Horonobe Underground Research Laboratory, International Conference on the Performance of Engineered Barriers 2014
- 2) 森拓雄, 丹生屋純夫, 小林正人, 西村政展, 中山雅: ベントナイトペレットによるPEM隙間充填技術の実規模実証試験, 土木学会第74回年次学術講演会, VII-137, 2019
- 3) 磯さち恵, 本島貴之, 白瀬光泰, 小林正人, 中山雅: 幌延地下URLにおけるベントナイト混合土の原位置機械吹付け施工試験, 土木学会第74回年次学術講演会, VII-138, 2019
- 4) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター: 平成29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(可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発)のうち(1/2), 地下環境での搬送定置・回収技術の高度化開発—実証試験—「隙間充填・除去技術の実証的整備」, 2018
- 5) 窪田茂, 勝又尚貴, 鈴木覚: 地層処分施設における操業期間中の火災リスクの検討に関する全体概要, 土木学会第73回年次学術講演会, CS7-031, 2018
- 6) 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, NUMO-TR-20-03, 2021.2
- 7) 並木 和人, 武内 邦文, 高橋 真一, 新村 亮, 田島 孝敏, 金田 勉: 吹付け工法によるベントナイト混合埋め戻し土の実用規模施工実験, 土木学会第62回年次学術講演会, CS5-012, 2007
- 8) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター: 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(地層処分施設閉鎖技術確認試験) スクリュー工法による埋め戻し材の要素試験報告書
- 9) 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 幌延深地層研究センターホームページ: <https://www.jaea.go.jp/04/horonobe/old/cyousakenkyu2609.html>, 2021.9.1
- 10) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター: 平成30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(可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発)のうち(1/2) 地下環境での搬送定置・回収技術の高度化開発—実証試験—地下環境での隙間充填技術の実証的検討報告書, 2019
- 11) 核燃料サイクル開発機構: TRU廃棄物処分技術検討書—第2次TRU廃棄物処分研究開発取りまとめ—, JNC-TY1400 2005-002, 第3章, pp.14, 2005.
- 12) Hideo Komine: Theoretical Equations on Hydraulic Conductivities of Bentonite-Based Buffer and Backfill for Underground Disposal of Radioactive Wastes, JOURNAL OF GEOTECHNICAL AND GEOENVIRONMENTAL ENGINEERING, ASCE pp.497-508, Apr. 2008