

特集 「品質の向上をめざして」

放射性廃棄物処分場におけるベントナイト系バリア構築技術の開発

森 拓雄 高橋 真一

武内 邦文 並木 和人

(本社LLWPT) (本社技術本部)

Bentonite Engineered Barrier Building Method for Radioactive Waste on Sub-surface Disposal Test Project

Takuo Mori Shinichi Takahashi

Kunifumi Takeuchi Kazuto Namiki

Abstract

The engineering barriers such as clay and concrete materials are planned to use for covering radioactive waste in cavern-type disposal facility. The requirement to clay barrier is very low permeability, which could be satisfied by high density Bentonite, and such a compaction method will be needed. Two methods, compaction and air shot, were tested in engineering scale for constructing a high-density clay barrier. Two types of compaction equipments, "Teasel plate" and "Plate compacter," were developed and engineering scale experiments were performed for compacting Bentonite only and Bentonite-sand-aggregate mixture. As a result, the Teasel plate can reach higher density Bentonite in relatively short time in comparison to other equipments. While, regarding air shot method, an air-shot machine in a tunnel construction site was tested by different water adding methods (wet, dry, and half wet). It is concluded that the dry and half wet constructing methods will achieve reasonable workability. As a result, the best construction option can be chosen according to the locations of radioactive waste facility.

概要

放射性廃棄物を地下に埋設する処分施設では土質材料やコンクリート材料で廃棄物を包み込む人工バリアを構築する計画である。土質系人工バリアは高い遮水機能が要求され、土質材料としてこの機能が期待できるベントナイトを高密度に構築する技術が必要である。このような土質系バリアを構築するため、締固め工法と吹き付け工法について実規模施工試験を実施した。締固め施工試験は、ベントナイト単体および礫との混合土を用いて、狭隘な地下空間での締固め用に開発した油圧ショベル搭載型プレートコンパクター及びチゼルプレートなどを用いて締固めを行った。その結果、チゼルプレートを用いた締固め工法が最も短時間で高密度の締固め地盤が得られた。一方、吹き付け工法については、トンネル工事のコンクリート吹き付け機を改良し、異なる水分調整方法（湿式、乾式と半湿式法）で試行した。その結果、乾式および半湿式で施工性が確保できることを確認した。

1. はじめに

原子力発電所で発生する廃棄物はその放射能レベルに応じて、高レベル放射性廃棄物 (HLW) と低レベル放射性廃棄物 (LLW) に大別され、さらに低レベル放射性廃棄物は、放射能レベルが高い順に、TRU処分、余裕深度処分 (L1 廃棄物処分場)、浅地中処分 (L2 廃棄物処分場) などに分類される。これら処分場は放射性物質の半減期によって定まる設置位置、耐用年数、断面の大きさ、コンクリートピットの有無などの構造・仕様が異なるものの、土質材料を用いた人工バリアで包み込む構造は共通する。土質材料としては低透水性および核種収着機能を有するベントナイトまたはベントナイトと骨材などとの混合土の使用が最も有力視されている。ベントナイトは膨潤性を有し、万一バリアに亀裂等が発生して

も自己修復機能を有するため、長期間安定した遮蔽機能が期待できる。

いずれのバリアも極めて小さな透水性が求められており、ベントナイト系材料を高い密度で均質に仕上げる必要がある。しかしながらベントナイトの粒子は単粒で非常に細かく、土質材料としては締固めにくい材料である。現在、ベントナイト系材料で人工バリアを構築する方法として、地下空洞にベントナイト系材料を運搬し現地で締固める方法、ベントナイト系材料を空気圧で吹き付ける方法、地上で圧縮成形したブロックを地下空洞に運搬定置する方法などが検討されている。このうち今回、締固め方法と吹き付け工法について実規模の施工試験を実施し、出来上がった人工バリアの乾燥密度や透水係数などの品質について調査した。

2. 放射性廃棄物処分場

低レベル放射性廃棄物のうち、Fig. 1に示すL1廃棄物処分場は主に原子力発電所を解体する際に排出される放射能に汚染された金属類を地下約50mに埋設する計画である。また比較的放射能レベルが低いL2廃棄物処分場は地表面に建設され、既に作業を開始している。一方、HLW処分場²⁾は燃料を再処理する際に発生する廃液をガラスで固化し鋼製容器などに収めて地下300m以深に掘削する地下空洞に埋設する計画である。TRU廃棄物処分場はL1廃棄物処分場と同様の形態の施設が地下300m以深で計画されている。

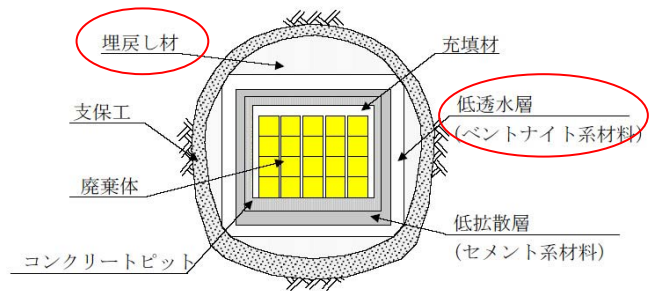


Fig. 1 低レベル(L1)放射性廃棄物処分場断面例¹⁾
Repository Concept of Radioactive Waste Disposal

2.1 放射性廃棄物処分場の概要

L1廃棄物処分場の構造はトンネル内に鉄筋コンクリート製ピットを構築し、放射性廃棄物を定置する。ピットの外側には低拡散層と呼ぶ高密度・高強度モルタル、そして低透水層と呼ばれる高密度のベントナイトの地盤で構成される。低拡散層、低透水層の2つの人工バリアと天然バリアとしての岩盤も含めた多重バリア構造である。

HLW処分場の構造は鋼製容器に収めた廃棄物をベントナイトで包み込む単純な構造である。ただし廃棄体を定置する際に放射線を発するため無人化施工（遠隔操作）を行うという施工上の制約がある。

2.2 土質系人工バリアの要求性能

土質系人工バリアに要求される機能は長期間にわたり処分施設を通過する地下水流を抑制する（低透水性）とともに、地下水に溶出した放射性核種を収着すること（高収着性）によって、放射性物質の埋設施設外への有意な漏洩を防止することである。具体的な要求性能は対象となる放射性廃棄物や処分概念ならびに処分施設内の使用部位によって異なるが、例えば低レベル放射性廃棄物処分場の低透水層では現在のところ透水係数 $k < 5.0 \times 10^{-13}$ m/s程度が要求されている。この要件を長期間満たす材料としてベントナイトが最も有力な候補である。ベントナイトは膨潤性に富み、高い遮蔽機能（低透水性）と万一亀裂等が発生しても膨潤して水みちを閉塞する自己修復機能を有し長期間安定した人工バリアとして存在できる。

2.3 ベントナイト系材料

ベントナイトには主にナトリウム (Na) 型とカルシウム (Ca) 型がある。人工バリアの材料としてはTable 1に示すように、膨潤性能が優れたNa型の使用が有力視されている。今回の施工試験では、Na型ベントナイトとして山形産の10mmアンダーベントナイト原鉱石（クニゲルGX）を使用した。ただしベントナイトは粘土であり廃棄体重量が大きい場合沈下が懸念され、ベントナイトにケイ砂などを混合して使用することも検討されている。また処分空洞やアクセス坑道は母岩相当の透水性を有す

Table 1 ナトリウム型ベントナイトの物性例
Property of Bentonite

試験項目	単位	値	備考
自然含水比	%	6.2	JIS A 1203
最大粒径	10mm以下	○	JIS A 1204
膨潤力	m l / 2g	15	日本ベントナイト工業会
塑性限界	%	21.9	
メチレンブルー吸着力	mmol / 100g	68	日本ベントナイト工業会

Table 2 使用材料
Examples of Bentonite-Sand Gravel mixture

配合名	配合 (重量比)			最大乾燥密度 ρ_{dmax} g/cm ³	最適含水比 %
	ベントナイト	砂	礫		
A	100%	0%	0%	1.501	18.20
B	60%	40%	0%	1.682	19.30
C	15%	35%	50%	2.042	9.60

る材料で埋戻すことが想定され、砂礫等を混合したベントナイト混合土が候補材料として検討されている。Table 2に今回使用した材料の配合を示す。

2.4 土質系人工バリアの品質管理

人工バリアの要求性能を考慮すると主たる品質管理項目は透水係数であるが、人工バリアの透水係数は非常に小さく試験に長期間を要するため原位置での試験が困難である。異なる配合のベントナイト混合土でも混合土に含まれるベントナイトの量に着目した密度（有効粘土密度）で整理すると、Fig. 2に示すように透水係数と強い相関性があることが知られており、品質を密度（乾燥密度）で管理するのが合理的である。L1廃棄物処分場の低透水層の乾燥密度は1.6Mg/m³程度が想定されている。

3. 締固め工法による人工バリアの構築

3.1 高密度締固め工法（チゼルプレート）

3.1.1 チゼルプレート工法の開発 L1廃棄物処分場の底部低透水層のように広い面積の人工バリアの施工は大型の振動ローラーによって施工するのが合理的であ

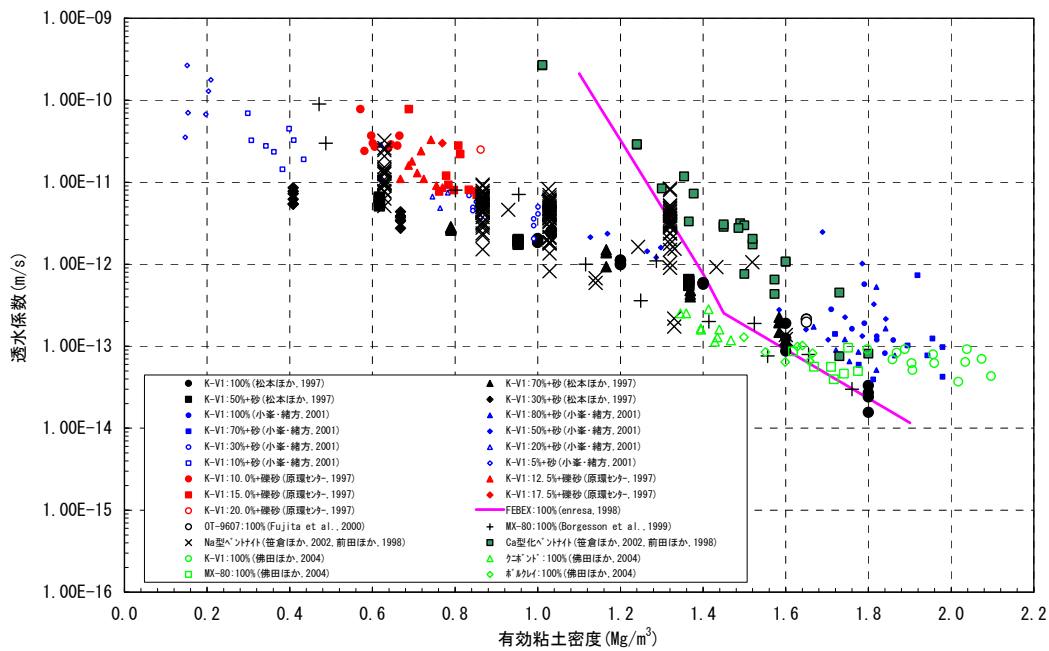


Fig. 2 有効粘土密度と透水係数の関係³⁾
Relation between Effective Clay Density and Permeability

るが、その端部や側部底透水層など大型の締固め機械が使用できない箇所がある。そこで部位を問わず確実に締固めが可能な装置の必要性に着目し、Fig. 3に示すチゼルプレートを開発した。独自の接合部の形状を有するプレートを採用することで、応力を分散させかつ繰返し施工による劣化・破損の抑止を図った。ベースマシンには、オフセット機構を持つ超小旋回型の0.14m³クラスの油圧ショベルを用いた。

この工法によって構築される人工バリアの品質を調査するため実規模締固め試験を実施した。コンクリート床板上に鋼材を用いて仮設ヤード（幅160cm、奥行100cm）を作製し、その中にて締固め施工を行った。材料にはTable 2に示す3種類を用いた。材料の含水比は室内締固め試験により求めた最適含水比に調整のうえ締固めを実施した。締固め試験は、撒出し層厚を20cm（目標仕上り厚さ10cm）としプレートサイズ（30cm角、50cm角）を組合せて実施した。試験はFig. 4に示すように、材料撒出し後、手動の小型コンパクターを用いて予備転圧を行い、その後にチゼルプレートによる本転圧を行った。

3.1.2 チゼルプレート工法によって出来上がる人工バリアの品質 Fig. 5に材料Aの締固め時間とレベル計測より算定した密度の関係を示す。締固め時間が長いほど密度が増加し、概ね45秒～60秒でほぼ一定値を示す。50cmプレートに関して収束する値が異なっているが、これは1層目が底版（コンクリート）に拘束されているため密度が大きくなり、層を追うごとにその影響が小さくなり密度も減少すると考えられる。締固めの完了後、コアサンプリングを実施し、密度試験を実施した。その結果

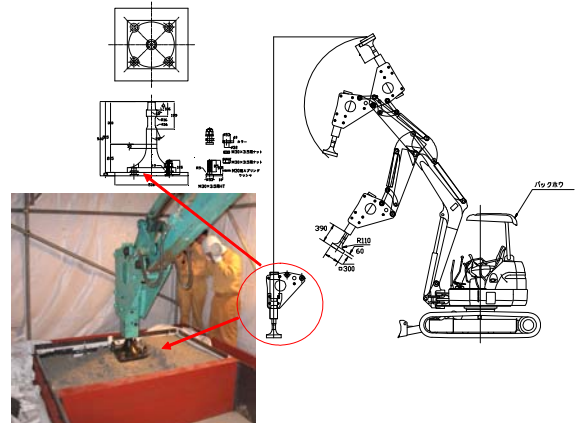


Fig. 3 チゼルプレート工法
Tease Plate Compaction Method

をFig. 6に示す。ボーリング試料の乾燥密度は比較的均一で概ね1.6Mg/m³強であった。また平面的にも、境界部（コーナーとサイド）での変化が小さい。コアサンプリング全18試料での平均は1.635 Mg/m³でレベル計測の平均（1.635 Mg/m³）と一致した。ただし、レベル計測とコアサンプリングによる密度測定を比較すると、平均値は一致しているが、層単位では異なる層がみられる。これは、締固め中に全体が均質化されたものと判断され、第1層はその後の上層の締固めにより緩んで密度が低くなり、また逆に第2、3層は増し締めされたと判断できる。この結果より、実施工では必要十分な締固め時間の管理を実施すれば所定の均一な人工バリアを構築できることが明らかになった。

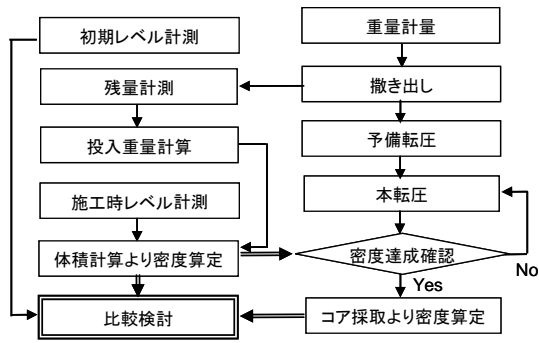


Fig. 4 締固め手順
Compaction Process

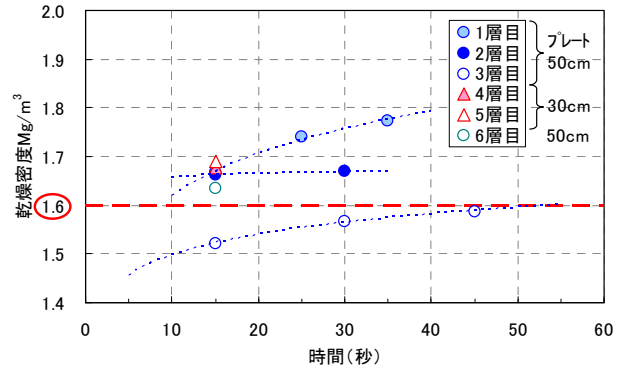


Fig. 5 締固め時間と密度の関係 (ベントナイト100%)
Relation between Compaction Time and Dry Density

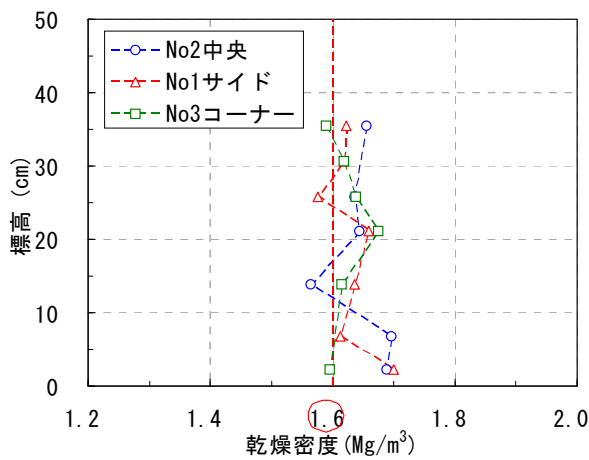


Fig. 6 チゼルプレートで締固めた人工バリアの品質
Bentonite Dry Density by Teasel Plate

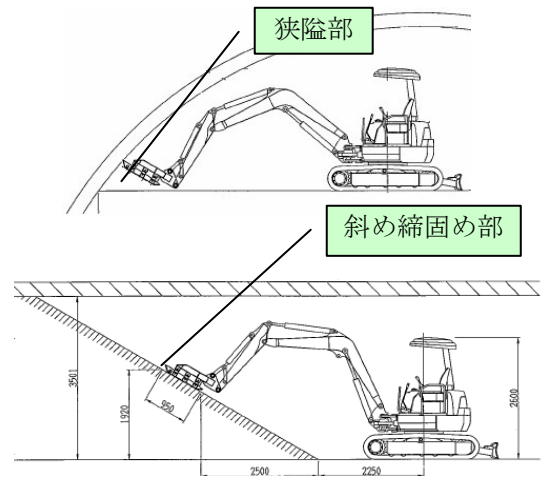


Fig. 7 狭隘部の締固め
Compaction of Narrow Area

3.2 狭隘部締固め工法 (振動コンパクター)

3.2.1 振動コンパクター工法の開発

L1 廃棄物処分場の上部埋戻しはセメント系またはベントナイト系材料による埋戻しが想定されている。また、処分空洞の周辺には主要坑道やアクセス坑道が建設されるが、この部分は土質系材料で埋戻される計画のため、大量の埋戻し工事のための合理的な施工技術の開発が望まれる。そのためFig. 7に示すように、狭隘なトンネル部に土質系埋戻しを合理的に施工する機械としてバックホウ搭載型振動コンパクターを開発し、ベントナイト混合土の締固め現場施工実験を実施した。材料はチゼルプレート工法と同じくTable 2に示すベントナイト単味および混合土を使用した。Fig. 8がこの実験用に製作した鋼製の型枠で、①狭隘部 (水平) 締固め実験と②斜め締固め実験をこの型枠の中で再現した。

3.2.2 振動コンパクター工法によって構築される人工バリアの品質

施工の際の管理指標としては仕上がり表面の高さ管理を中心に行い、仕上がった土構造の品質確認は、コアサンプリングで密度を測定して行った。Fig. 9にサンプリング位置と乾燥密度の結果を示す。乾燥



Fig. 8 プレートコンパクターによる締固め試験
Compaction Test by Plate Compactor

密度は概ね1.8Mg/m³であったが先端部は1.5 Mg/m³を下回った。そこでプレートコンパクターの先端部を平坦に改良し、再度試験した結果をFig. 10に示す。各層毎に、仕上がり表面高さ計測結果から算定した乾燥密度とコアサンプリング試料から求めた結果を示したが、両者の値は整合的であり、コンパクターを水平に使用しても、斜めに使用しても所定の密度の地盤が均質に仕上がること

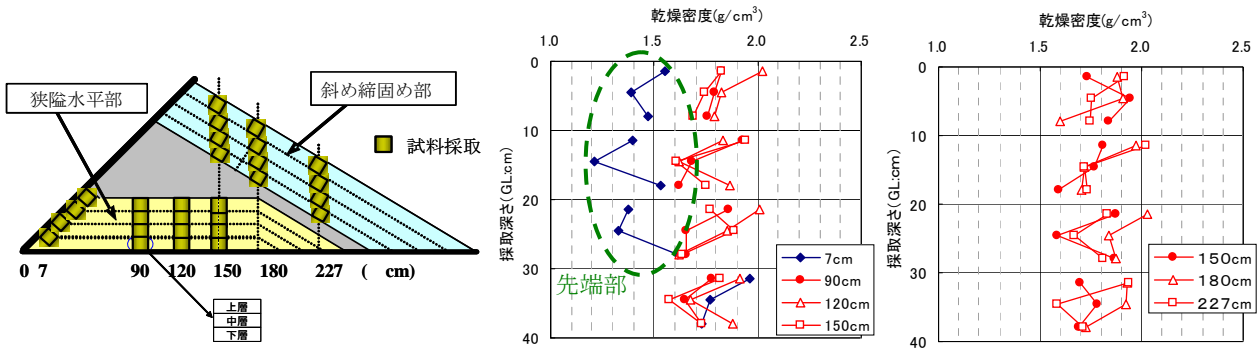


Fig. 9 プレートコンパクターで締固めた人工バリアのサンプリング位置と乾燥密度 (材料C: 混合土)
Dry Density of Compacted Bentonite by Plate Compactor

を確認できた。したがって、この機械は狭隘なトンネル等における施工技術として合理的な施工法であることを確認した。

4. 吹付け工法による人工バリアの構築

4.1 人工バリア構築のための吹付け工法の開発

上部埋戻し部など狭隘な部分の施工は、前述の特殊な施工機械利用のほか、トンネル一次覆工で用いられる吹付け工法の適用が挙げられる。吹付け施工が可能になると、狭隘な部分も含め連続的な施工が可能となり、品質向上や施工の効率化が期待できる。しかし、一方でベントナイト材料はよく知られているように含水比を調整すると膨潤や粘性が高くなり、搬送や吹付けの過程で閉塞する可能性が高く、これまでも大規模な吹付けを適用した事例は見当たらない。吹付け施工能力を考慮して、トンネル工事で広く用いられている大型の吹付けシステムに工夫を加え、人工バリアの吹付け施工システムを構築するとともに、実際の試験施工を行い、施工能力、吹付け部分の品質を確認した。

4.2 吹付けシステムと試験施工

吹付けシステムは、トンネル施工現場で実使用している乾式コンクリート吹付けの設備(バッチャープラント、吹付ロボット、ミキサー車)を基本に材料の準備方法、先端ノズル、施工条件に工夫を盛り込んだものである。

吹付けに用いた材料は、Table2の配合C: ベントナイト混合土を用いた。ただし、ベントナイトとして原鉱石(クニゲルGX)のほかに混合性を考慮し粉体(クニゲルV1)も用いた。

Fig. 11に実験状況を示す。ベントナイト混合土は、吹付ロボットへ投入後、材料の初期含水比条件に応じてノズル先端部での加水を調整し、平面(パネル)容器(90cm×90cm×h20cm)および狭隘部模擬容器(50cm×50cm×h50cm)へ薄層状に吹付けた。吹付け後の試料は、各容器よりブロックサンプリングし、密度や透水性などの品質を確認した。

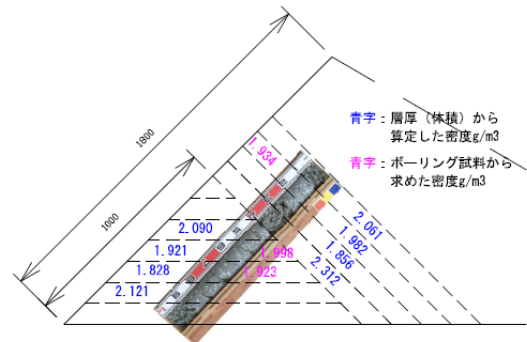


Fig. 10 改良プレートコンパクターで締固めた人工バリアの乾燥密度 (材料C: 混合土)
Dry Density of Compacted Bentonite by Plate Compactor

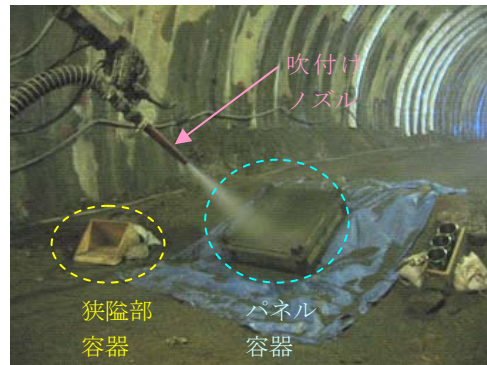


Fig. 11 ベントナイト混合土吹付け工法試験
Bentonite Mixture Spraying Construction Method

4.3 吹付け工法で施工した人工バリアの品質

施工に関してコンクリート吹付けの設備をベントナイト混合土吹付けへ転用したが、最適含水比に調整するため材料の噴射直前に加水を行う乾式吹付けについては問題ないこと、また事前に加水する湿式については、バッチャーでの混練およびミキサー車での運搬過程において混合土の団粒化が進み、吹付けが円滑になされることが確認できた。また、効果的な吹付けノズル径の範囲、吐出量など、品質を確保するための施工条件も明らかになった。

Fig. 12にベントナイト混合土を吹き付けた容器からコ

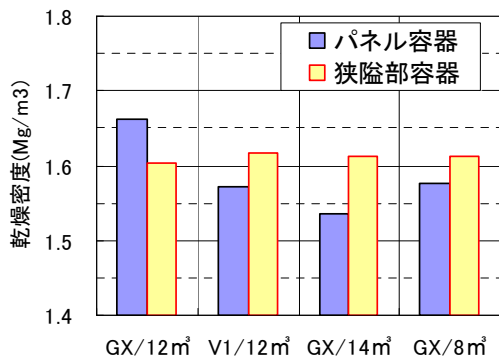


Fig. 12 吹付け工法による人工バリアの品質
Bentonite Dry Density by Spraying Construction

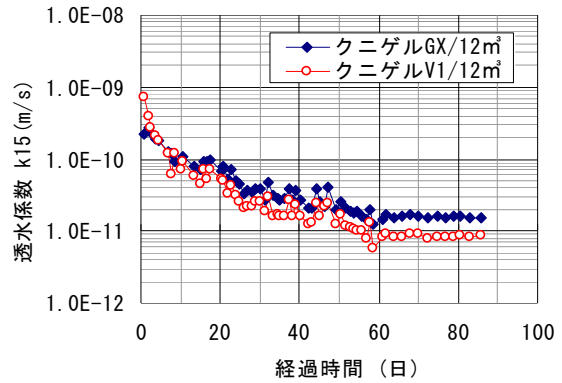


Fig. 13 ベントナイト混合土の透水係数
Result of Permeability Tests

Table 3 各工法で出来上がる人工バリアの品質
Concept Picture of Spraying Construction

施工機械	施工箇所	配合					
		A		B		C	
		ベントナイト100%		ベントナイト+砂		ベントナイト+砂+礫	
		乾燥密度	締固度	乾燥密度	締固度	乾燥密度	締固度
		Mg/m³	%	Mg/m³	%	Mg/m³	%
チゼルプレート	平坦部	1.64	109	1.83	109	2.18	107
プレートコンパクター	平坦部	1.49	99	1.56	93	2.07	101
	斜め部					1.96	96
汎用コンパクター	平坦部	1.66	111	1.72	102	2.18	107
吹付け工法	平坦部					1.66	81
	狭隘部					1.60	78

アサンプルして得られた代表的な乾燥密度を示す。パネル容器では時間当たりの吐出量が12m³の場合、最も密度が大きく乾燥密度が1.65Mg/m³以上になった。また狭隘部では概ね乾燥密度は1.6 Mg/m³を程度であった。Fig. 13は変水位透水試験の結果を示した。粉体（クニゲルV1）、粒状体（クニゲルGX）を用いた混合土のいずれも10⁻¹¹m/s程度の低い透水性が確保されている。以上の結果から、吹付け工法は、所定の低透水係数が求められる埋戻し材として十分な性能を確保できる施工法の1つであることが確認できた。

5. まとめ

総括としてTable 3に試験結果の一覧を示す。材料によって仕上がる人工バリアの乾燥密度は異なるものの、締固め度で整理すると締固め工法では概ね100%程度が得られた。この密度は100%ベントナイトの場合、Table2の有効粘土密度と透水係数の関係より透水係数 $k = 10^{-13}$ m/sオーダーの人工バリアが構築できることを示しており、L1 廃棄物処分場において最も厳しい遮水性能が求められる低透水層で現在想定される仕様を満足する。単位面積あたりの施工時間は、チゼルプレート>プレートコンパクター>汎用コンパクターの順に長く、構築す

る部位、施工条件によって今回開発、改良した技術が汎用機械による従来の技術と比較して施工的に優れていることが検証できた。すなわち側部低透水層など狭隘な平坦部ではチゼルプレート工法が、上部埋戻しなど斜めの斜面を締固める場合にはプレートコンパクターが有利である。また吹付け工法に関しては、締固め工法と比較して仕上がる人工バリアの品質は劣るものの、遮水性能は埋戻しなどには適用可能であることを確認した。

L1 廃棄物処分場に関しては基本設計が終了した段階であり最終的な要求性能は示されていない。しかし今回の研究で現在想定されているいかなる仕様も提示されても十分に対応できるノウハウが蓄積できた。

参考文献

- 1) 京谷修：放射性廃棄物処分施設の設計検討状況，土木学会平成17年度全国大会研究討論会コンクリート建造物の長期耐久性評価資料（2005）
- 2) 核燃料サイクル機構：わが国における高レベル放射性廃棄物処分場に技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ（2000年レポート），（1999）
- 3) 電気事業連合会・核燃料サイクル機構：TRU廃棄物処分技術検討書（第2次TRUレポート），（2005）