

東海低レベル放射性廃棄物埋設事業所

第二種廃棄物埋設事業許可申請

第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び

設備の基準に関する規則

への適合性について

低透水性覆土の施工実現性

2023年8月

日本原子力発電株式会社

目 次

1	覆土に対する要求性能.....	1
1. 1	漏出低減機能に係る技術要件及び設計項目.....	1
1. 2	漏出低減機能に係る設計要件.....	2
2	覆土に対する要求性能（低透水性）の実現性.....	9
2. 1	ベントナイト混合土製造時及び施工時の設計値.....	9
2. 2	ベントナイト混合土の製造.....	12
2. 3	低透水性覆土の施工実現性.....	17
2. 4	想定されるばらつき.....	23
2. 5	想定されるばらつきが透水係数に与える影響.....	28
2. 6	代替指標による低透水性覆土の管理（品質管理）の適用性.....	32
3	覆土の施工時における品質管理（案）.....	33
3. 1	完了時における品質管理項目.....	33
3. 2	材料納入時，覆土材料製造時，覆土施工時及び完了確認時の品質管理項目.....	34
4	参考文献.....	37

1 覆土に対する要求性能

覆土の部位ごとに設定した要求性能及び設計要件を第1表に示す。

1. 1 漏出低減機能に係る技術要件及び設計項目

覆土の漏出低減機能は、埋設トレンチ内を通過する雨水等に伴う浸透水量を低減することである。

埋設トレンチを通過する浸透水量（通過流量）は、覆土のうち側部低透水性覆土及び最終覆土のうち低透水性土層（以下「低透水性覆土」という。）の透水特性によって影響を受けることから、低透水性覆土に対する技術要件は透水特性（低透水性）であり、その設計項目は、透水係数及び厚さである。

また、漏出低減機能については、長期にわたり機能を維持する必要があるため、透水係数、厚さの変化に影響を及ぼす要因について抽出する。長期状態において低透水性覆土の透水特性に影響を及ぼす要因とその機構を第2表に示す。影響要因の抽出については、周辺土壌などの外部環境も含めた施設の構成及び影響要因の相互作用を網羅的に考慮する（影響要因の抽出・分析結果については、「東海低レベル放射性廃棄物埋設事業所 第二種廃棄物埋設事業許可申請 第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則第十三条（ピット処分又はトレンチ処分に係る廃棄物埋設地）第1項第三号及び第四号への適合性について 廃棄物埋設地の状態設定（影響事象分析）」を参照）。抽出した要因は、廃棄物埋設地に埋設した放射性廃棄物の容器内に残存する空隙に起因する陥没に伴う、有効粘土密度の変化及び間隙の変化並びにコンクリート類の廃棄物からの高アルカリ性の間隙水によるベントナイト材料の溶解に伴う、有効密度低下である。低透水性覆土の技術要件は、これらの要因に対する機能維持特性（変形追従性及び化学的安定性）であり、その設計項目は透水係数及び厚さである。

1. 2 漏出低減機能に係る設計要件

設計項目である透水係数及び厚さについては、各部位が要求性能を満足するための設計要件を設定する。

覆土の技術要件のうち、低透水性についての詳細を以下に示す。

(1) 覆土の低透水性

十分な低透水性を有することを達成するため、低透水性覆土は、設計透水係数 (1.0×10^{-10} m/s 以下) 及び設計厚さ (最終覆土のうち低透水性土層: 1 m 以上, 側部低透水性覆土: 0.6 m 以上) を確保するものとする。

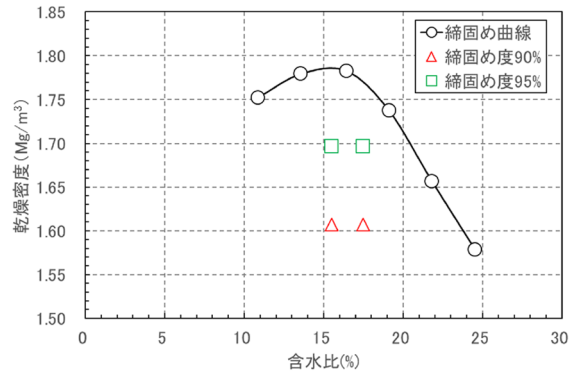
砂とベントナイト (クニゲルU相当) を使用したベントナイト混合土で構成される低透水性覆土を対象に、ベントナイト混合率、乾燥密度 (ρ_{dmax} (A法) $\times 90 \sim 95\%$) 及び初期含水比 (W_{opt} (A法) $\sim W_{opt}$ (A法) $+ 2\%$) をパラメータスタディした透水試験 (地盤工学会基準 JGS 0312-2018 相当) の結果を第 1 図及び第 3 図に示す。また、ベントナイト混合率 15% において、乾燥密度 (ρ_{dmax} (A法) $\times 95\%$ 及び ρ_{dmax} (C法) $\times 90\%$) 及び初期含水比 (W_{opt} (C法) $+ 2\% \sim +6\%$) をパラメータスタディした透水試験 (地盤工学会基準 JGS 0312-2018 相当) の結果を第 2 図に示す。なお、第 1 図及び第 2 図には、締固め試験結果と透水試験に用いた供試体仕様も併記している。

第 1 図は、ベントナイト混合率 10%、15% 及び 20% のベントナイト混合土の (a) 締固め試験結果と透水試験に用いた供試体仕様、(b) 透水試験結果を、第 2 図は、ベントナイト混合率 15% のベントナイト混合土の (a) 締固め試験結果と透水試験に用いた供試体仕様、(b) 透水試験結果を示している。ベントナイト混合率 10% のケースのみ、締固め度 90% (A法) で初期含水比が最適含水比の時に得られる透水係数が大きくなっているが、それ以外のケースに関しては、締固め度及び初期含水比が透水係数に与える影響は

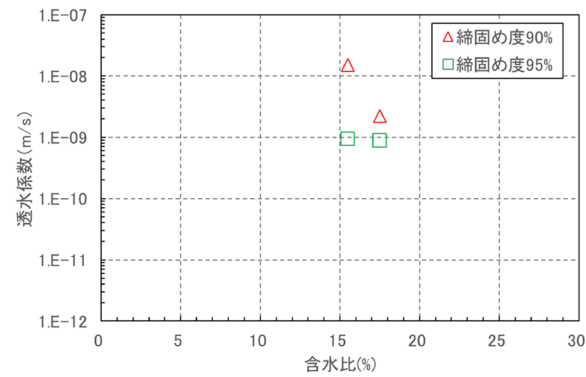
小さい。また、ベントナイト混合率が同じであっても、乾燥密度を高めることにより得られる透水係数が小さくなることが分かる。

これらの試験結果から、ベントナイトの混合率については15%以上、乾燥密度については95%（A法）の締固めによって得られる密度以上、初期含水比については、初期含水比が透水係数に与える影響は小さいと考えられるが、一般的に、締固めた地盤の透水係数は初期の含水比に依存し、初期含水比が最適含水比よりも若干湿潤側となる含水比となる場合に透水係数が最も小さくなり、含水比の増加とともに徐々に透水係数は大きくなる又は横ばいの透水係数になること、反対に最適含水比よりも乾燥側では、透水係数は著しく増加する傾向が見られることが知られている⁽¹⁾ことから、最適含水比よりも若干湿潤側（試験結果を踏まえると $W_{opt} + 2\%$ 程度）とすれば、設計透水係数（ 1.0×10^{-10} m/s 以下）を確保できると考えられる。

ベントナイト:クニゲルU, 混合率 10%

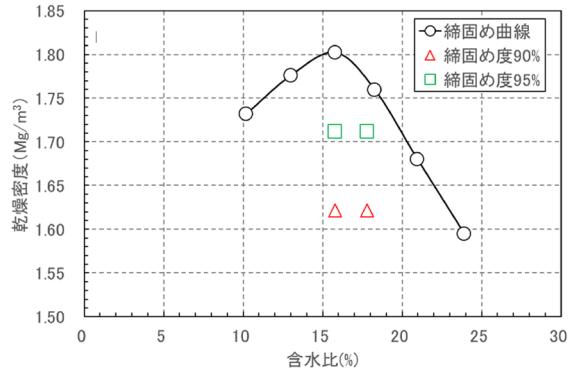


(a) 締固め試験結果と透水試験に用いた供試体仕様

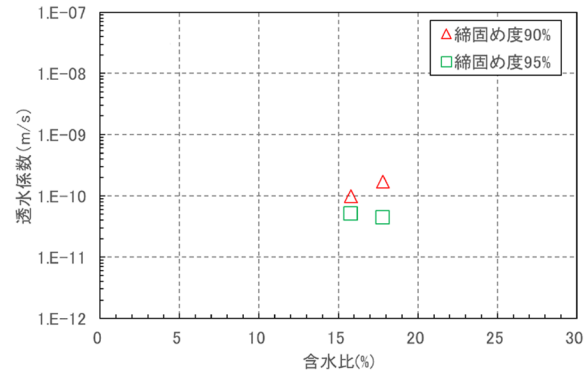


(b) 透水試験結果

ベントナイト:クニゲルU, 混合率 15%

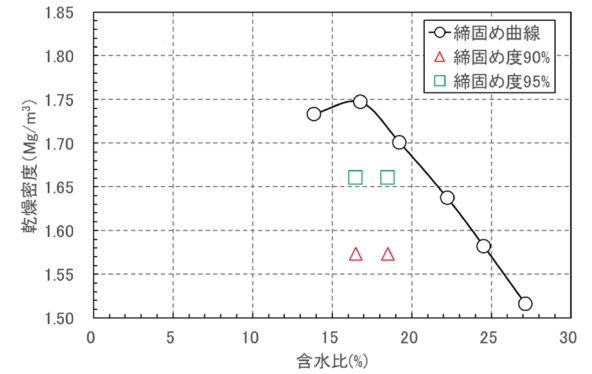


(a) 締固め試験結果と透水試験に用いた供試体仕様

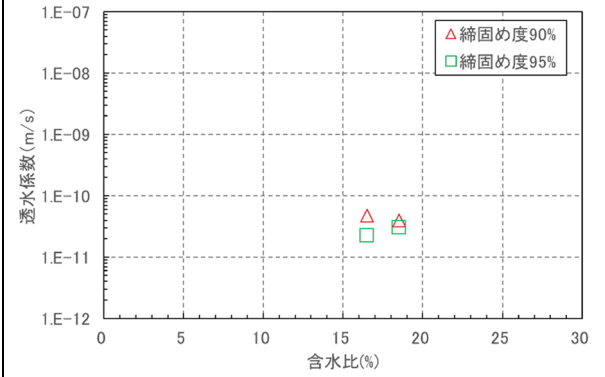


(b) 透水試験結果

ベントナイト:クニゲルU, 混合率 20%



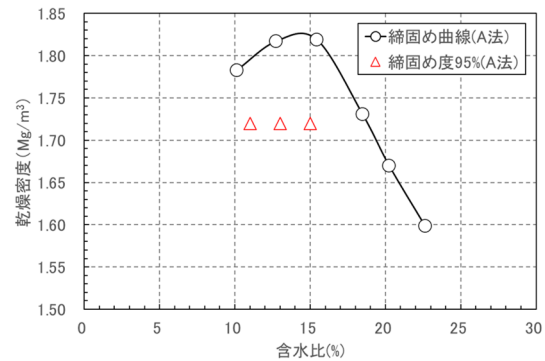
(a) 締固め試験結果と透水試験に用いた供試体仕様



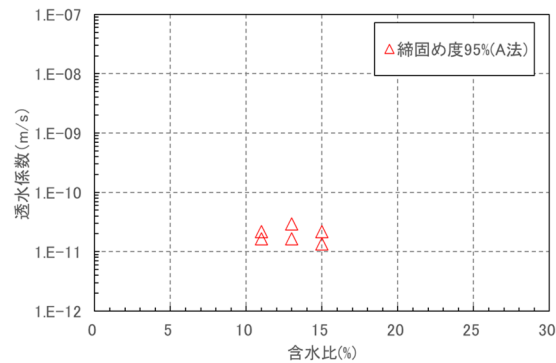
(b) 透水試験結果

第 1 図 透水試験結果 (その 1)

ベントナイト:クニゲルU, 混合率 15%

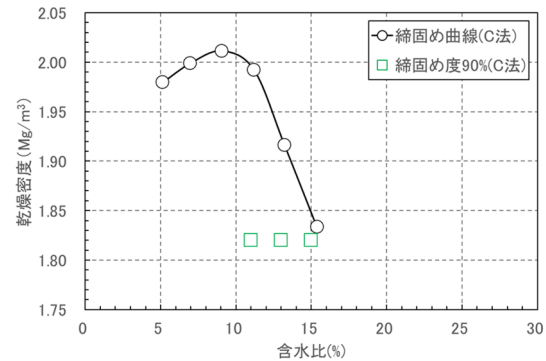
[ρ_{dmax} (A法) $\times 95\%$]

(a) 締固め試験結果と透水試験に用いた供試体仕様

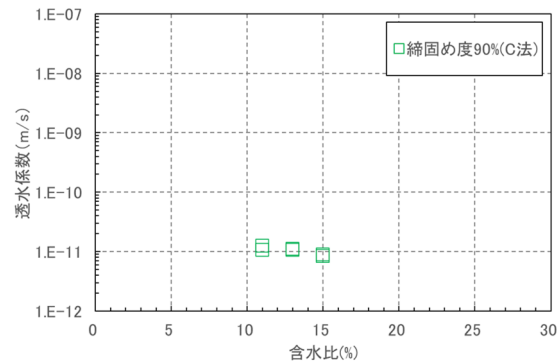


(b) 透水試験結果

ベントナイト:クニゲルU, 混合率 15%

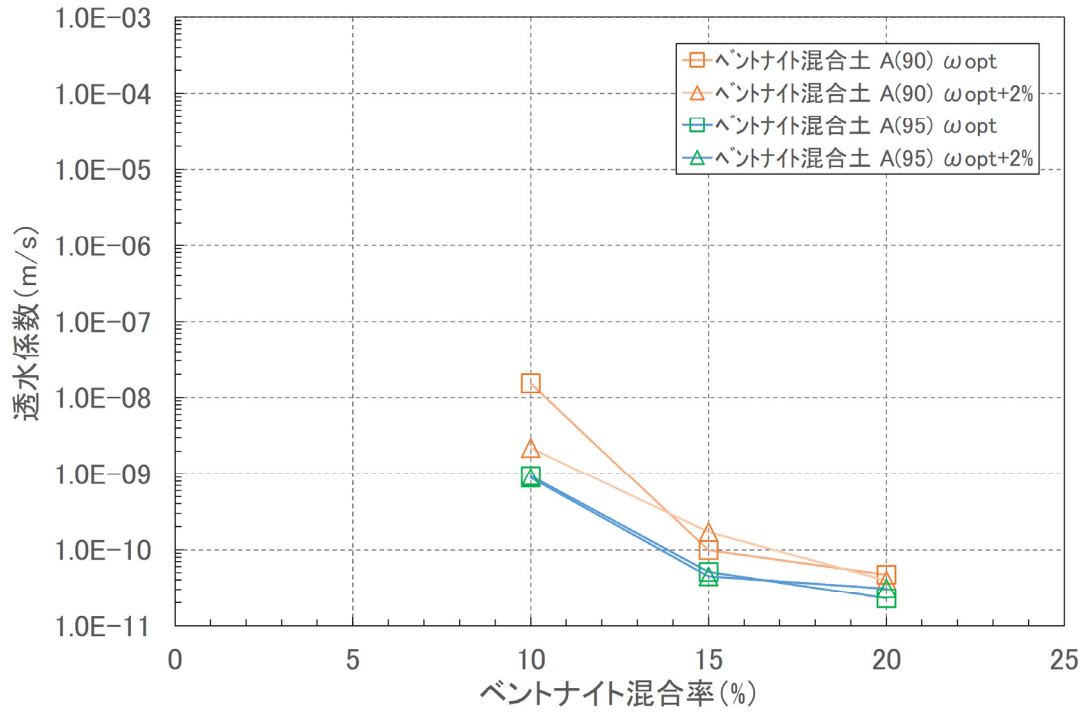
[ρ_{dmax} (C法) $\times 90\%$]

(a) 締固め試験結果と透水試験に用いた供試体仕様



(b) 透水試験結果

第2図 透水試験結果 (その2)



第3図 ベントナイト混合率と透水係数の関係

第 1 表 覆土の要求性能及び設計要件

安全機能	要求性能		最終覆土				側部低透水性覆土	充填砂	中間覆土	設計要件	
	技術要件 (必要な特性)	設計項目	保護土層	掘削抵抗性層	低透水性土層	基礎層					
漏出低減機能 ^{※4}	透水特性	低透水性	透水係数	—	—	○	—	○	—	—	必要な透水係数を有すること。 ^{※2}
			厚さ	—	—	○	—	○	—	—	必要な厚さを有すること。 ^{※3}
漏出低減機能を維持するための要求機能	機能維持特性	変形 ^{※1} 追従性	透水係数	—	—	○	—	○	—	—	廃止措置の開始後の評価において考慮する性能を満たす見通しがあること。
			厚さ	—	—	○	—	○	—	—	廃止措置の開始後の評価において考慮する性能を満たす見通しがあること。
		化学的 ^{※1} 安定性	透水係数	—	—	—	—	○	—	—	廃止措置の開始後の評価において考慮する性能を満たす見通しがあること。
遮蔽機能 ^{※4}	放射線の遮蔽性能	遮蔽性	密度	—	—	—	—	—	—	○	被ばく低減のために必要な遮蔽性能を有すること。
			厚さ	—	—	—	—	—	—	—	○

※1：影響要因及び影響機構を第2表に整理している。

※2：低透水性土層及び側部低透水性覆土は 1.0×10^{-10} m/s の透水係数を施工時点で確保する。

※3：低透水性土層は厚さ 1 m 以上，側部低透水性覆土は横方向で厚さ 0.6 m 以上，中間覆土（最上段を除く）は厚さ 0.2 m 以上，中間覆土（最上段）は厚さ 0.5 m 以上を施工時点で確保する。

※4：その機能の喪失により公衆又は従事者に放射線障害を及ぼすおそれがあるもの。

第2表 低透水性覆土の透水特性に影響を及ぼす要因とその機構

設計項目	長期状態における影響要因			影響機構	要求性能 (技術要件)
透水係数	有効粘土密度 ※ ¹ の 変化	力学的 影響	容器内に 残存する 空隙	容器内の空隙に起因する陥没により、低透水性土層の変位に伴う透水性が変化した領域の発生。	変形追従性
		化学的 影響	モンモリ ロナイト の溶出	コンクリート類の廃棄物からの高アルカリ性の間隙水によるベントナイト材料の溶解に伴う密度低下。	化学的安定性

※1：単位体積当たりに含まれるベントナイト分の乾燥重量をそれぞれ自身の体積で割ることにより得られる密度であり、ベントナイト混合材料の特性を把握するときの指標の一つ。

2 覆土に対する要求性能（低透水性）の実現性

低透水性覆土に求められる要求性能は低透水性であり、その設計項目は透水係数と厚さである。

低透水性覆土の品質は、使用材料、製造方法又は施工方法によらず施工時において要求性能（設計透水係数 $(1.0 \times 10^{-10} \text{ m/s 以下})$ ）及び設計厚さ（最終覆土のうち低透水性土層：1 m 以上，側部低透水性覆土：0.6 m 以上）を確保することにより管理する。

設計項目のうち、透水係数については、低透水性覆土に砂とベントナイト（クニゲルU相当）を使用したベントナイト混合土で構成する計画であることから、この材料において設計透水係数 $(1.0 \times 10^{-10} \text{ m/s 以下})$ を確保できることの見通しを得ておく必要がある。

計画している材料を用いたベントナイト混合土において目標とする性能（透水係数）を確保できることの見通しを得るために実施した事項の概要を以下に示す。

なお、実施工において低透水性覆土に使用する材料が今回使用したものと異なる場合、今回得られた知見（ベントナイト混合土製造時及び施工時の設計値等）を適用することが難しくなるため、実施工に用いる材料を使用し、同様なプロセスにより、低透水性覆土の設計透水係数 $(1.0 \times 10^{-10} \text{ m/s 以下})$ を確保できる見込みがあることを確認する必要がある。

2. 1 ベントナイト混合土製造時及び施工時の設計値

「1. 2（1）覆土の低透水性」に示す試験結果から、低透水性覆土の設計透水係数 $(1.0 \times 10^{-10} \text{ m/s 以下})$ を確保するためには、ベントナイトの混合率については15%以上，乾燥密度については95%（A法）の締固めによって得られる密度以上，初期含水比については最適含水比よりも若干湿潤側

(試験結果を踏まえると $W_{opt}+2\%$ 程度)とする必要があると考えられること、施工(材料製造工, 設置工)における不均質性を考慮する必要があることを踏まえて設計値を設定した。

「1.2(1) 覆土の低透水性」に示す試験結果から、ベントナイトの混合率は15%以上とする必要があることから、ベントナイトの混合率を15%とし、この時の乾燥密度及び初期含水比の設計値を設定した。

低透水性覆土の設計透水係数は、 1.0×10^{-10} m/s以下であるが、施工(材料製造工, 設置工)における不均質性を考慮すると、ベントナイト混合土製造時及び施工時におけるベントナイト混合率、初期含水比等の設計値は、 1.0×10^{-11} m/s程度となるように設定する必要があると考えられる。

「1.2(1) 覆土の低透水性」に示す試験結果から、ベントナイトの混合率15%において、 1.0×10^{-11} m/s程度の透水係数が得られると考えられる乾燥密度及び初期含水比の条件としては、乾燥密度については 1.82 Mg/m^3 (C法締固め試験の最大乾燥密度 $\rho_{dmax} \times 90\%$)、初期含水比については W_{opt} (C法) +2%であると考えられることから、これらをベントナイト混合土製造時及び施工時の設計値として設定する。

ベントナイト混合土製造時の設計値を第3表に、ベントナイト混合土施工時の設計値を第4表に示す。

第3表 ベントナイト混合土製造時の設計値

項目	設計値	備考
ベントナイト混合率	15%	—
初期含水比	$W_{opt}^{*} + 2\%$	$W_{opt} + 2\% = 11\%$

※：最適含水比

第4表 ベントナイト混合土施工時の設計値

項目	設計値	備考
乾燥密度	1.82 Mg/m^3 (C法締固め試験の最大乾燥密度 $\rho_{dmax} \times 90\%$)	—

2. 2 ベントナイト混合土の製造

ベントナイト混合土製造時の設計値を第 5 表に、ベントナイト混合土製造に用いた主要材料を第 6 表に示す。

ベントナイト混合土の製造は、ミキサー（容量 5 m³）を用いたバッチ式により行った。なお、材料の投入は、ベントナイト混合率が 15%になるように事前にベントナイトと母材（久慈川砂）の投入重量を計算しておき、その重量をバッチごとに計量して投入した。

ベントナイト混合土の製造後のサンプリングにより、ベントナイト混合率（ここでは代替指標として細粒分含有率）及び含水比に対して、品質確認を行った。ベントナイト混合土の製造後の含水比の測定結果を第 4 図に、細粒分含有率の測定結果を第 5 図に示す。

含水比は、平均値・中央値ともに設計値である 11%に近い値である 11.2%であり、10.1～12.7%の間に分布し、ばらつきが 11%±2%程度であった。

細粒分含有率は、平均値・中央値ともに 17.4%であり、ベントナイト混合率の 15%よりも大きくなっている。細粒分の全てがベントナイトであるとした場合、ベントナイト混合率が 15%になるように材料を計量して投入していること、15%で投入したベントナイトを練り混ぜ機械内で混合した場合、装置内（ミキサーの内壁）に細粒分であるベントナイトが貼り付くことが想定されることから、細粒分含有率の平均値が投入した混合率以上となることは考えにくい。このことから、第 5 図に示す細粒分含有率の平均値 17.4%には、母材（久慈川砂）の細粒分含有率が含まれていると考えられる。

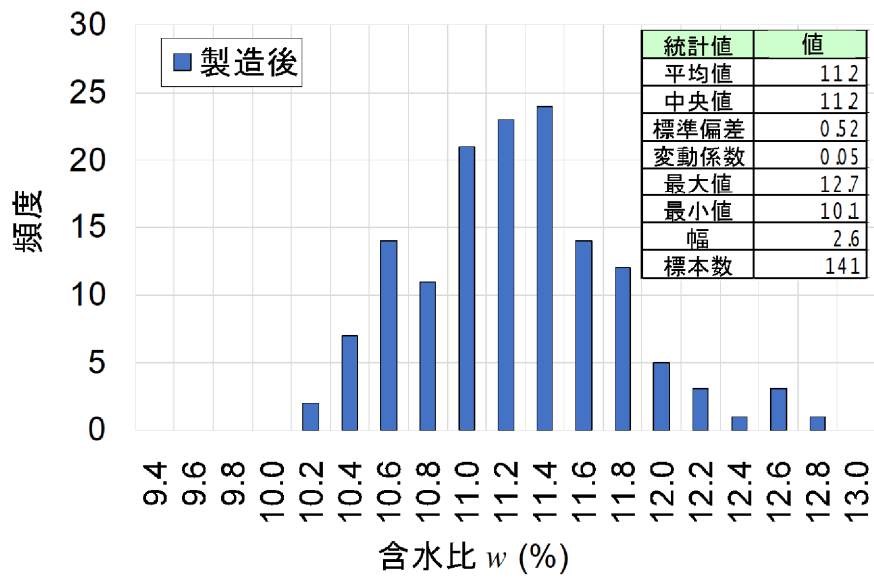
ベントナイト混合土の製造に用いた母材（久慈川砂）の粒度分布を第 7 図に、母材（久慈川砂）の細粒分含有率を第 7 表に示す。細粒分含有率は 1.3%程度（3 点の平均値）であった。ベントナイト混合土における母材（久慈川砂）の割合は 85%であるため、混合土に占める母材（久慈川砂）の細粒分含

有率は $1.3 \times 0.85 = 1.1\%$ となる。よって、ベントナイト混合土の細粒分含有率（計算値）は $15\% + 1.1\% = 16.1\%$ となるが、第 5 図に示す細粒分含有率（平均値 17.4% ）の方が大きくなっている。この原因としては、母材（久慈川砂）の粒度試験の点数が少なく精度が低いことによって、混合土に占める母材（久慈川砂）の細粒分含有率を過少に見積もった可能性又は練り混ぜ中に母材（久慈川砂）が細粒化して細粒分が増加した可能性が考えられる。

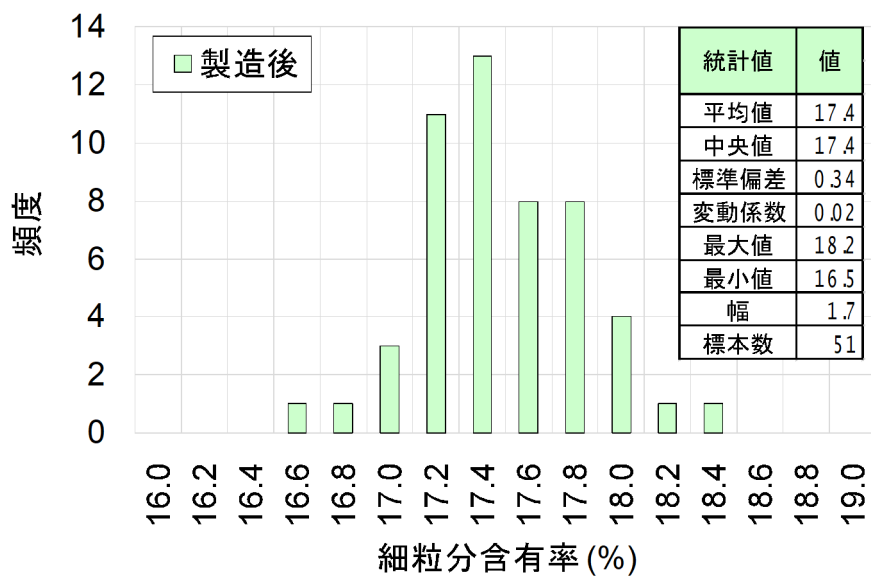
なお、混合後の細粒分含有率のばらつきは、第 5 図に示すように、平均 $\pm 1\%$ 以内と小さいことから混合土における細粒分の均質性は高い。

第 5 図をもとに、平均値が 15% になるように横軸をずらして、想定されるベントナイト混合土のヒストグラムを第 6 図に示す。

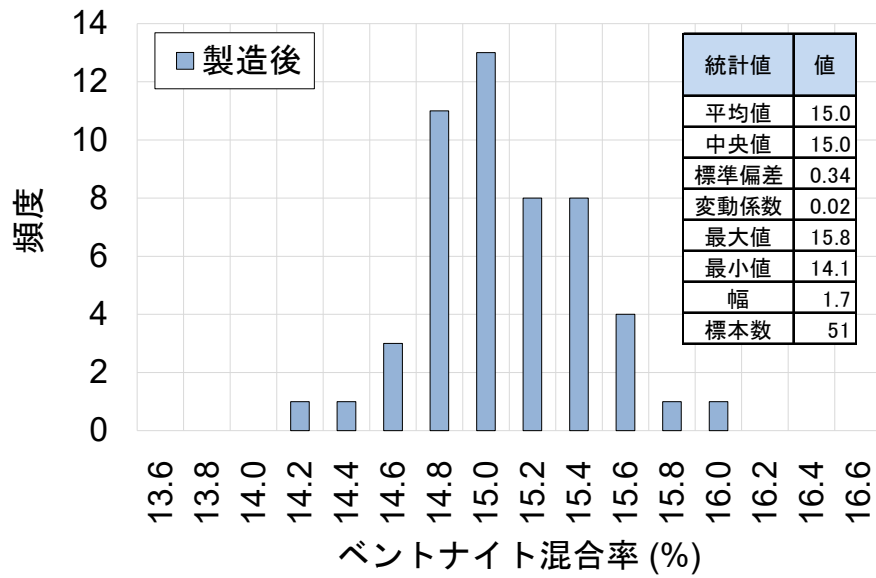
これらにより、ベントナイト混合率は $15\% \pm 1\%$ 以内、含水比は $W_{opt} + 2\% \pm 2\%$ 程度であり、設計値の配合を確保した状態で混合できていると考えられる。



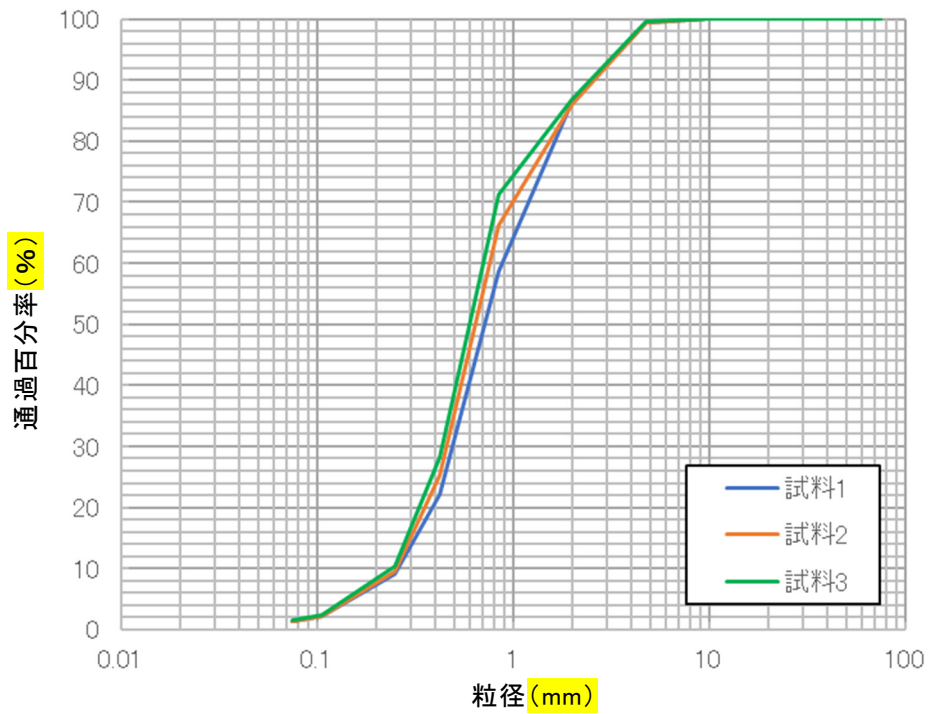
第 4 図 製造後の含水比



第 5 図 製造後の細粒分含有率



第 6 図 製造後のベントナイト混合率のイメージ (想定)



第 7 図 母材 (久慈川砂) の粒度分布

第5表 ベントナイト混合土製造時の設計値（再掲）

項目	設計値	備考
ベントナイト混合率	15%	—
初期含水比	$W_{opt}^* + 2\%$	$W_{opt} + 2\% = 11\%$

※：最適含水比

第6表 主要材料

項目	仕様
Na型ベントナイト（クニゲルU）	MBC66
母材	洗砂（久慈川産出）

第7表 母材（久慈川砂）の細粒分含有率

項目	細粒分含有率 F_c (%)			
	試料1	試料2	試料3	平均
母材	1.3	1.3	1.2	1.3

2. 3 低透水性覆土の施工実現性

「2. 1 ベントナイト混合土製造時及び施工時の設計値」にて設定した設計値のとおり低透水性覆土を施工でき、設計透水係数 (1.0×10^{-10} m/s 以下) を達成できることを施工試験により確認した。

(1) 施工試験の概要

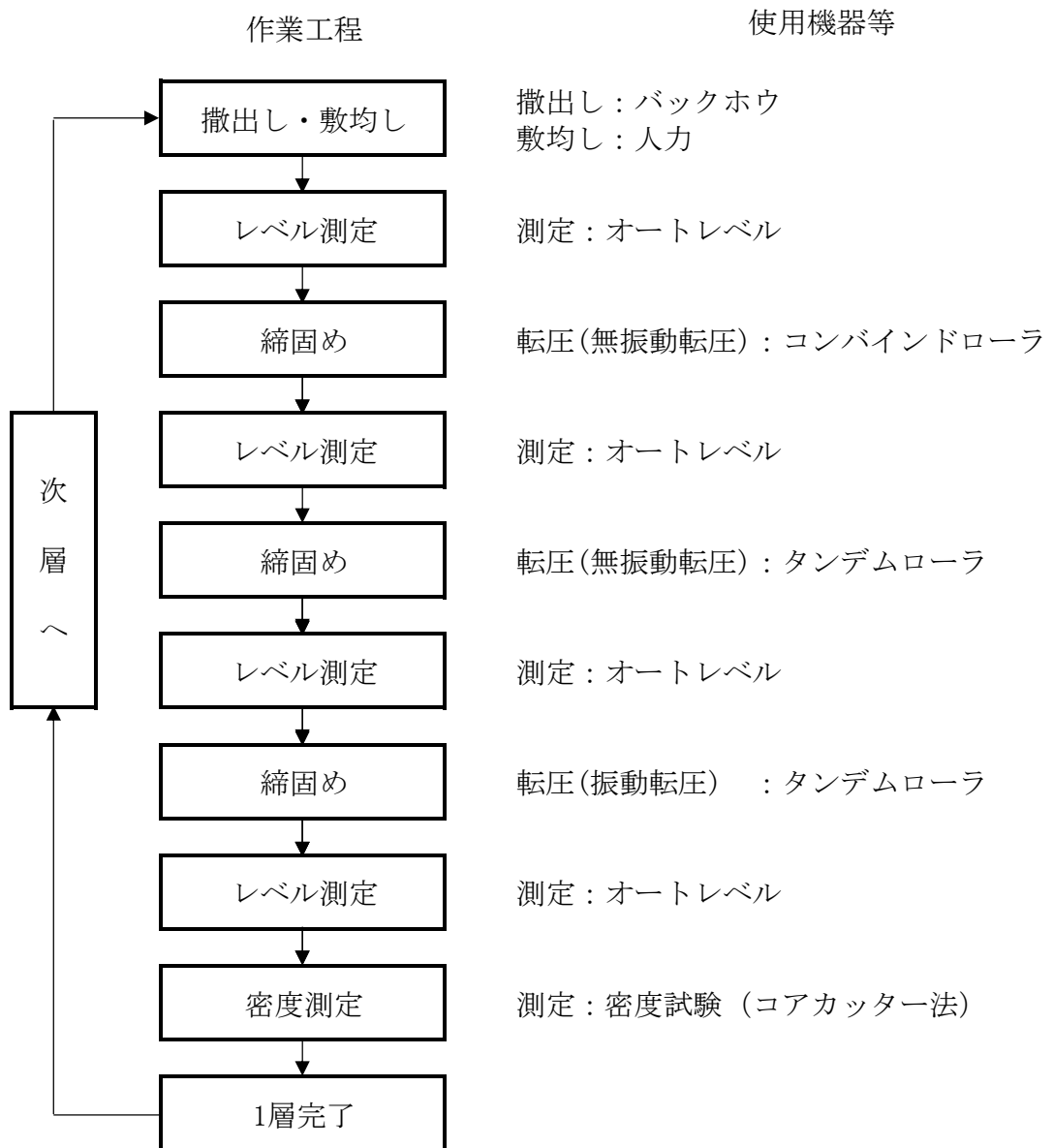
低透水性覆土について、施工の実現性を確認するために実施に近い施設構造において施工試験を実施した。また、施工試験で得られた試験結果を整理し、設計透水係数 (1.0×10^{-10} m/s 以下) を確保できることを確認した。

施工試験の実施に際しては、一般土工として広く適用されている道路土工—盛土工指針⁽²⁾の他に、本施設と同様に透水性に留意している土構造物として河川堤防に着目した河川土工マニュアル⁽³⁾を参照し、低透水性覆土の要求性能である低透水性を満足するための締固め機械、締固め厚さ、締固め回数及び含水比を確認した。

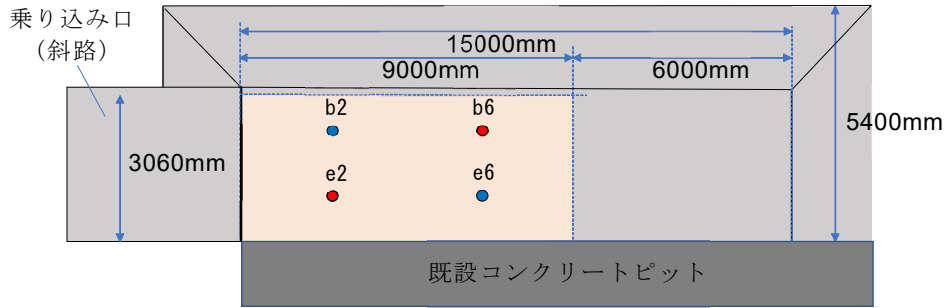
低透水性覆土の施工試験フローを第8図に、試験エリアを第9図に示す。

施工試験の手順としては、バックホウを用いて低透水性覆土の撒出し後、人力により敷均しを行い、測定機器（オートレベル）を用いて撒出し厚さを確認し、敷均し後、河川土工マニュアル⁽³⁾で一般的と示されている重機を用いて締固めを行い、1層目の低透水性覆土を設置する。品質確認のため、高さ及び密度をそれぞれ測定し、2層目以降を同様に実施する手順とした。

低透水性覆土（ベントナイト混合率 15%、初期含水比 = $W_{opt} + 2\%$ 、撒出し厚さ 20 cm/層）を対象とした施工試験の結果及び概要を第8表に示す。

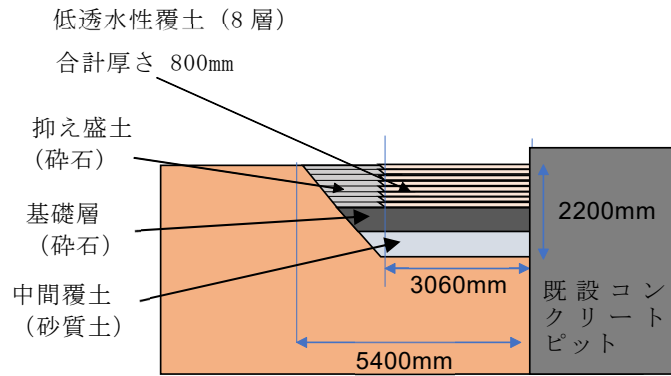


第8図 低透水性覆土の施工試験フロー

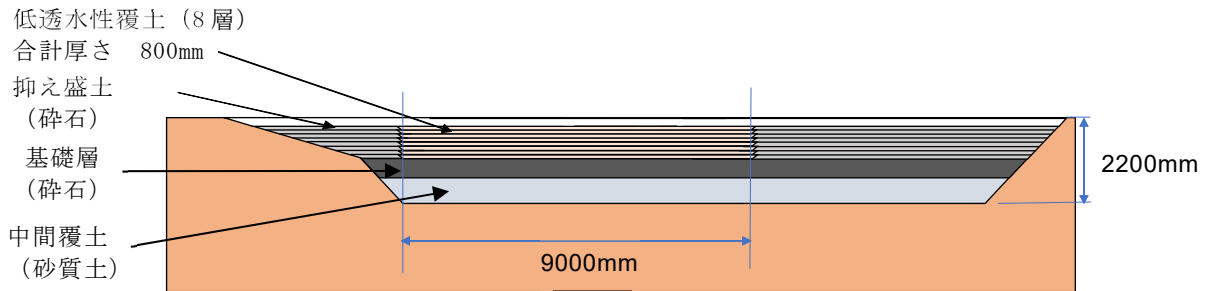


平面図

座標 ● 座標 ●
 透水試験用試料採取位置：奇数層 ● 偶数層 ●



断面図



側面図

第9図 試験エリア

第8表 施工試験の結果及び概要一覧

試験対象	透水係数 (m/s)	締固め度 (C法)	施工機械等
低透水性覆土	6.58×10^{-12} ~ 7.11×10^{-11} 【n=16】	90.8~96.6 (平均 94.3) 【n=80】	4t 級コンバインドローラ ・無振動転圧 2 往復 7t 級タンデムローラ ・無振動転圧 2 往復, 振動転圧 6 往復

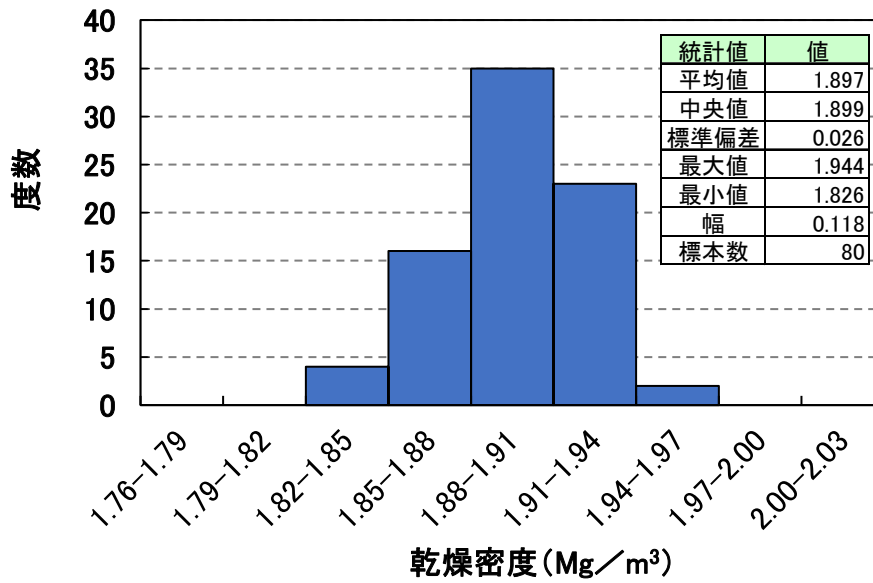
(2) 施工試験の結果

施工試験において取得した乾燥密度のヒストグラムを第 10 図に示す。乾燥密度は、設計値である 1.82 Mg/m^3 に対して最小値 1.826 Mg/m^3 と設計値を確保した状態で施工できている。

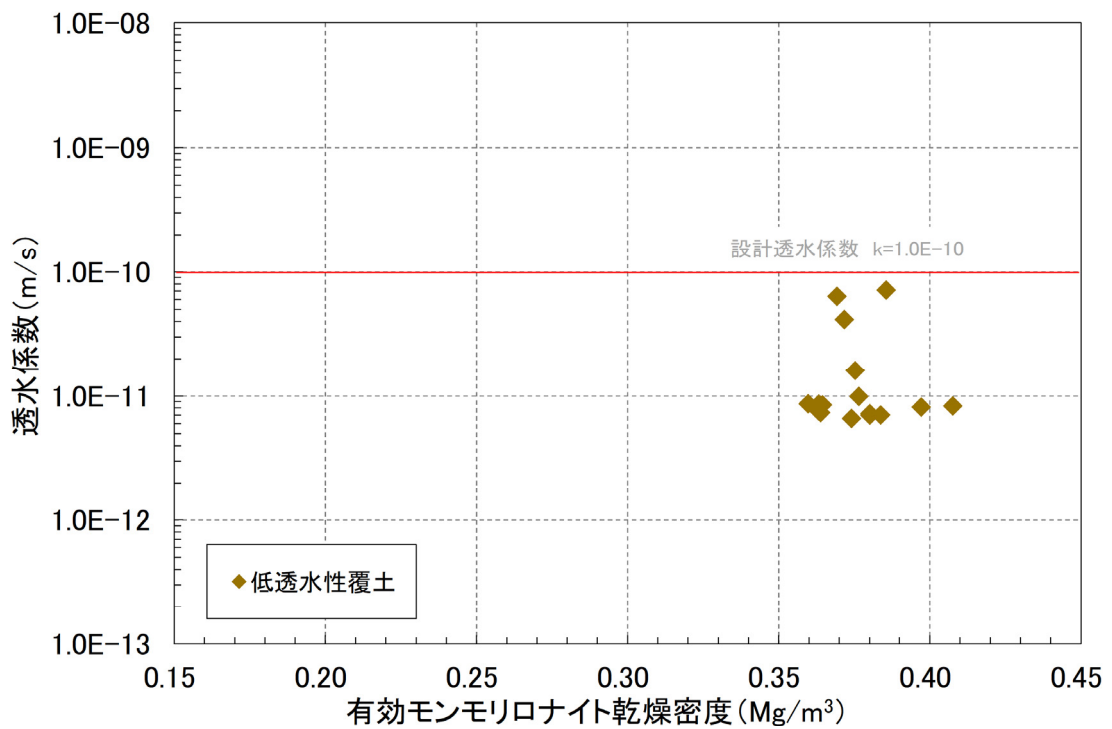
有効モンモリロナイト乾燥密度及び透水係数の関係（試験結果）を第 11 図に示す。透水係数は、施工時における目標である $1.0 \times 10^{-11} \text{ m/s}$ 程度をおおむね満足し、かつ、低透水性覆土の設計透水係数（ $1.0 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ 以下）を確保している。

既往文献⁽⁴⁾に記載されている「透水係数と有効モンモリロナイト乾燥密度の関係」に施工試験の結果等を加筆したものを第 12 図に示す。施工試験で得られた結果は、既往の知見と同じような結果が得られていることが分かる。

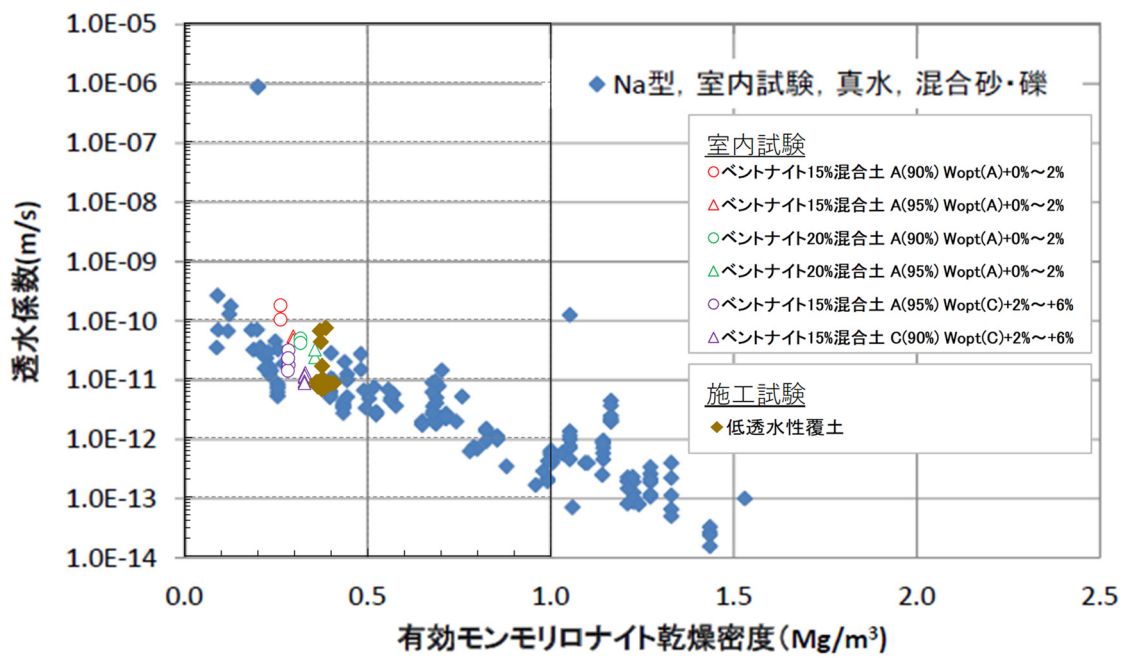
以上のことから、実施工においても「2. 1 ベントナイト混合土製造時及び施工時の設計値」に示す設計値のと通りの低透水性覆土を施工でき、設計透水係数（ $1.0 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ 以下）を達成できる見込みがあると考えられる。



第 10 図 乾燥密度の頻度分布 (全 8 層・80 点)



第 11 図 有効モンモリロナイト乾燥密度と透水係数の関係



第12図 有効モンモリロナイト乾燥密度と透水係数の関係⁽⁴⁾※

※：施工試験のデータ等を加筆

2. 4 想定されるばらつき

低透水性覆土の設計項目である透水係数は、透水試験により確認するには時間が数ヶ月必要となることから、透水係数を代替指標により確認する必要がある。

既往文献⁽⁴⁾に記載されている「透水係数と有効モンモリロナイト乾燥密度の関係」から、透水係数と有効モンモリロナイト乾燥密度には相関性があると考えられること、施工試験で用いた材料と同じものを使用した透水試験（地盤工学会基準 J G S 0312-2018 相当）の結果を有効モンモリロナイト乾燥密度と透水係数の関係を整理した結果（第 13 図参照）においても同様な傾向となっていることから、有効モンモリロナイト乾燥密度を透水係数の代替指標とすることで透水係数の品質管理を行うことができると考えている。

有効モンモリロナイト乾燥密度を透水係数の代替指標とすることで透水係数の品質管理を行う考えであることから、施工試験等の結果を例に、有効モンモリロナイト乾燥密度に影響を与える可能性のある項目（以下「M○乾燥密度に影響を与える可能性のある項目」という。）に着目し、それらに想定されるばらつきについて、以下に示す。

(1) 有効モンモリロナイト乾燥密度の算定方法

有効モンモリロナイト乾燥密度は、下式で示される。

$$\rho_{em} = \frac{C_m \cdot \rho_b}{100 - (100 - C_m) \frac{\rho_b}{\rho_{nm}}}$$

ここで、

$$\rho_b = \frac{\rho_d(100 - R_s)}{100 - \frac{R_s \cdot \rho_d}{\rho_s}}$$

ρ_{em} : 有効モンモリロナイト乾燥密度 (Mg/m³)

ρ_b : 有効粘土乾燥密度 (Mg/m³)

- C_m : モンモリロナイト含有率 (%)
- ρ_{nm} : 随伴鉱物の土粒子密度 (Mg/m^3)
- ρ_d : 乾燥密度 (Mg/m^3)
- ρ_s : 骨材の土粒子密度 (Mg/m^3)
- R_s : 骨材混合率 (%)

(2) 各段階において想定されるばらつき

ベントナイト混合土は、「材料」の調達、ベントナイト混合土の「製造」、ベントナイト混合土の「施工」といった段階を経て設置される。

この各段階において想定されるばらつきについて、以下に示す。

a. 材料に想定されるばらつき

ベントナイト混合土の材料は、母材（洗砂）及びベントナイト（クニゲルU相当）であることから、これらの材料がM₀乾燥密度に影響を与える可能性のある項目及び想定されるばらつきを示す。また、これらを取りまとめた情報を第9表に示す。

(a) M₀乾燥密度に影響を与える可能性のある項目

i. 母材（洗砂）

- ・骨材の土粒子密度

ii. ベントナイト（クニゲルU相当）

- ・モンモリロナイト含有率
- ・随伴鉱物の土粒子密度

(b) 想定されるばらつき

i. 母材（洗砂）

- ・骨材の土粒子密度（砂の土粒子密度）は、 $2.671 \text{ Mg}/\text{m}^3$ から $2.673 \text{ Mg}/\text{m}^3$ の範囲でばらつきが生じると想定。

・母材（洗砂）の土粒子密度を測定（3 試料を測定）しており、その値は 2.673 Mg/m^3 、 2.671 Mg/m^3 、 2.671 Mg/m^3 であった。このことから、その最小値と最大値をばらつきの範囲と想定。

ii. ベントナイト（クニゲルU相当）

・モンモリロナイト含有率は、ばらつきは生じないと想定。

・ベントナイト（クニゲルU相当）のメチレンブルー吸着量（MBC）を測定（3 試料を測定）しており、その値は 66 mmol/100g 、 66 mmol/100g 、 66 mmol/100g であった。このことから、ばらつきは生じないと想定。なお、モンモリロナイト含有率は、ベントナイト（クニゲルU相当）のメチレンブルー吸着量（MBC）を、クニピアFのメチレンブルー吸着量（MBC）で除した値としている。

・随伴鉱物の土粒子密度は、 2.636 Mg/m^3 から 2.810 Mg/m^3 の範囲でばらつきが生じると想定。

・随伴鉱物の土粒子密度を測定していないことから、文献^{(5), (6)}に示された値の最小と最大をばらつきの範囲と想定。

b. 製造時に想定されるばらつき

ベントナイト混合土の製造時に、M_o乾燥密度に影響を与える可能性のある項目及び想定されるばらつきを示す。また、これらを取りまとめた情報を第10表に示す。

(a) M_o乾燥密度に影響を与える可能性のある項目

・骨材混合率

(b) 想定されるばらつき

・骨材混合率は、84.2%から85.9%の範囲でばらつきが生じると想定。

- ・骨材混合率は、100%からベントナイト（クニゲルU相当）の混合率を差し引いた値としている。

- ・ベントナイト（クニゲルU相当）の混合率は、製造したベントナイト混合土の細粒分含有率を測定（51 試料を測定）している。その測定値の平均値が 15%になるように横軸をずらした値の最小値は 14.1%，最大値は 15.8%である（第 6 図参照）ことから、その最小値と最大値をベントナイト（クニゲルU相当）混合率のばらつきの範囲とし、100%からそれらの値を差し引いた値を、骨材混合率のばらつきの範囲と想定。

c. 施工時に想定されるばらつき

ベントナイト混合土の施工時に、M_o 乾燥密度に影響を与える可能性のある項目及び想定されるばらつきを示す。また、これらを取りまとめた情報を第 10 表に示す。

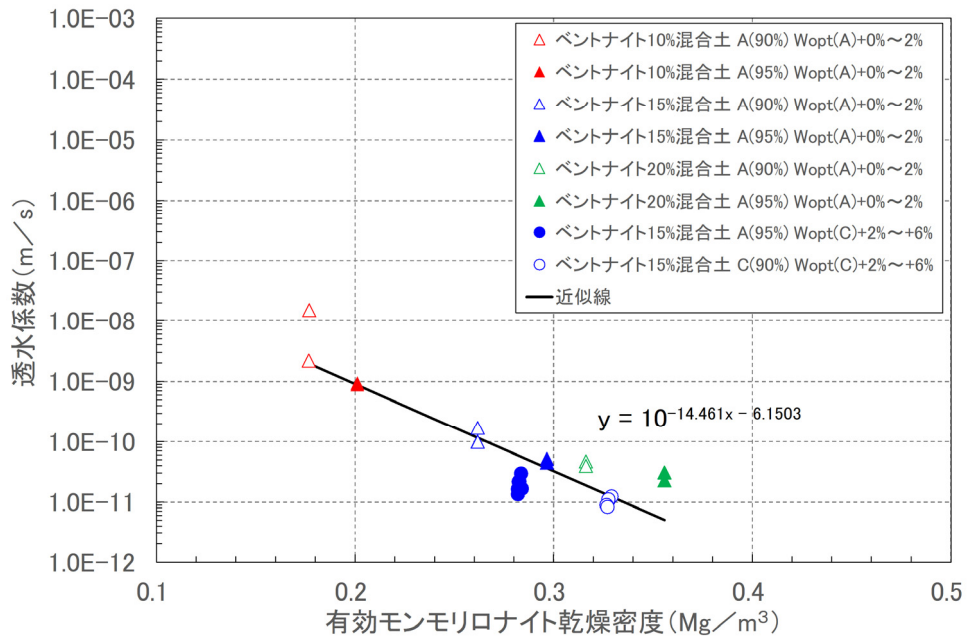
(a) M_o 乾燥密度に影響を与える可能性のある項目

- ・乾燥密度

(b) 想定されるばらつき

- ・乾燥密度は、1.826 Mg/m³から 1.944 Mg/m³の範囲でばらつきが生じると想定。

- ・乾燥密度は、施工したベントナイト混合土の乾燥密度を測定（80 試料を測定）しており、その値は第 10 図に示すとおり、平均値 1.897 Mg/m³、最小値 1.826 Mg/m³、最大値 1.944 Mg/m³であった。このことから、その最小値と最大値を乾燥密度のばらつきの範囲と想定。



第 13 図 有効モンモリロナイト乾燥密度と透水係数の関係

第 9 表 材料に想定されるばらつきの範囲

項目	項目	ばらつきの範囲
ベントナイト	モンモリロナイト含有率	44%
	随伴鉱物の土粒子密度	$2.636 \text{ Mg}/\text{m}^3 \sim 2.810 \text{ Mg}/\text{m}^3$
母材 (洗砂)	土粒子密度	$2.671 \text{ Mg}/\text{m}^3 \sim 2.673 \text{ Mg}/\text{m}^3$

第 10 表 製造時及び施工時に想定されるばらつきの範囲

項目	項目	ばらつきの範囲
製造時	骨材混合率	84.2%~85.9%
施工時	乾燥密度	$1.826 \text{ Mg}/\text{m}^3 \sim 1.944 \text{ Mg}/\text{m}^3$

2. 5 想定されるばらつきが透水係数に与える影響

M_o乾燥密度に影響を与える可能性のある項目に想定されるばらつきは「2. 4 想定されるばらつき」に示したとおりであるが、これらのばらつきが相乗的に働いた場合、ばらつきの影響が大きくなることが想定される。

このため、M_o乾燥密度に影響を与える可能性のある項目に、想定されるばらつきが相乗的に働いた場合を想定し、その影響を確認する。

有効モンモリロナイト乾燥密度が最も小さくなる組合せは、ベントナイト混合土中に含まれるモンモリロナイトの量が減少する側にばらつき、かつ、ベントナイト混合土の密度が小さくなる側にばらついたケースである。つまり、骨材混合率、母材の土粒子密度及び随伴鉱物の土粒子密度が大きな値となる側にばらつきが生じ、かつ、乾燥密度が小さな値となる側にばらつきが生じるケースである。

これらのばらつきが生じたケースにて、有効モンモリロナイト乾燥密度に与える影響を確認することにより、透水係数に与える影響を確認する。

(1) 影響確認におけるばらつきの想定値

透水係数に与える影響を確認するための想定値は、「2. 4 想定されるばらつき」等に示した内容を踏まえ、以下のとおり設定する。

a. モンモリロナイト含有率

モンモリロナイト含有率は、ばらつきは生じないと想定し、モンモリロナイト含有率を「44%」と設定する。

b. 随伴鉱物の土粒子密度

随伴鉱物の土粒子密度のばらつきの範囲は、 2.636 Mg/m^3 から 2.810 Mg/m^3 と想定されること、随伴鉱物の土粒子密度が大きな値となる側にばらつきが生じると、有効モンモリロナイト乾燥密度が小さくなることから、随伴鉱物の土粒子密度を「 2.810 Mg/m^3 」と設定する。

c. 乾燥密度

乾燥密度のばらつきの範囲は、 1.826 Mg/m^3 から 1.944 Mg/m^3 と想定されること、乾燥密度が小さな値となる側にばらつきが生じると、有効モンモリロナイト乾燥密度が小さくなることから、乾燥密度の設定値は「 1.826 Mg/m^3 」となる。一方で、ベントナイト混合土施工時における乾燥密度の設計値は 1.82 Mg/m^3 （C法締固め試験の最大乾燥密度 $\rho_{\text{dmax}} \times 90\%$ ）であり、想定されるばらつきの範囲よりも小さな値であるため、設計値までばらつきが生じたと仮定し、乾燥密度を「 1.82 Mg/m^3 」と設定する。

d. 骨材の土粒子密度

骨材の土粒子密度のばらつきの範囲は、 2.671 Mg/m^3 から 2.673 Mg/m^3 と想定されること、骨材の土粒子密度が大きな値となる側にばらつきが生じると、有効モンモリロナイト乾燥密度が小さくなることから、骨材の土粒子密度を「 2.673 Mg/m^3 」と設定する。

e. 骨材混合率

骨材混合率のばらつきの範囲は、84.2%から85.9%と想定されること、骨材混合率が大きな値となる側にばらつきが生じると、有効モンモリロナイト乾燥密度が小さくなることから、骨材混合率の設定値は「85.9%」となる。一方で、ベントナイト混合率のばらつきの範囲は、製造したベントナイト混合土の細粒分含有率を測定した結果を、その測定値の平均値が15%になるように横軸をずらした値から設定している。骨材混合率のばらつきの範囲は、100%から前述したベントナイト混合率のばらつきの範囲の値（最小値及び最大値）を差し引いた値を、骨材混合率のばらつきの範囲と想定している。これらの事項を踏まえ、ベントナイト混合土製造時におけるベントナイト混合率の設計値 15%から-2%のばらつ

きが生じたと仮定し、骨材混合率を「87%」と設定する。

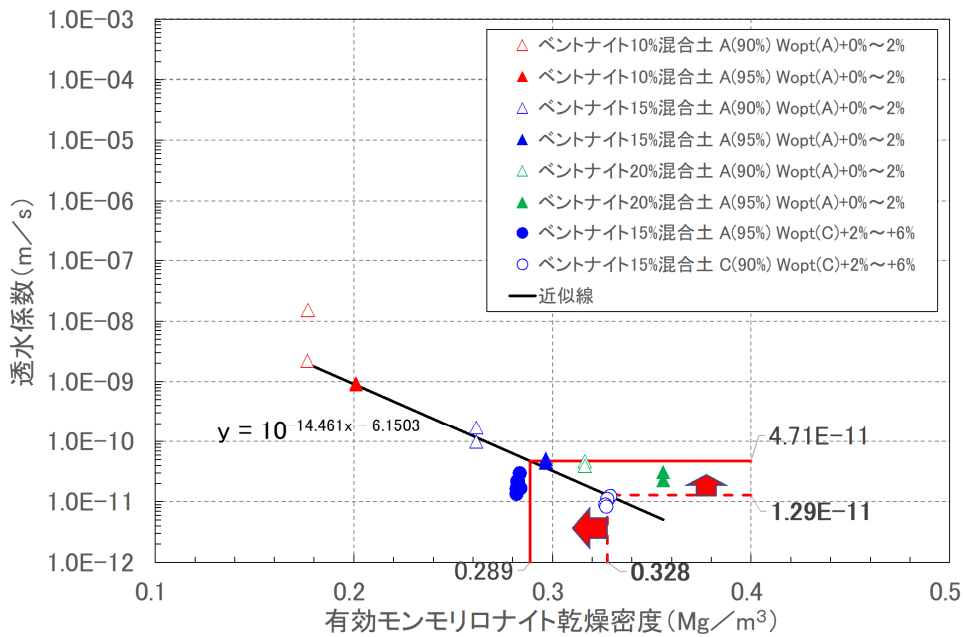
(2) ばらつきが透水係数に与える影響

想定したばらつきが透水係数に与える影響を確認した。具体的には、(1)で設定した想定値を用いて算定される有効モンモリロナイト乾燥密度及び施工試験で用いた材料と同じものを使用した透水試験（地盤工学会基準 JGS 0312-2018 相当）の結果を有効モンモリロナイト乾燥密度と透水係数の関係を整理した結果から得られる近似式を用いて透水係数を推定した。

想定したばらつきにおける透水係数の推定結果を第 11 表に、想定したばらつきにおける透水係数の変化を第 14 図に示す。「材料」の調達、ベントナイト混合土の「製造」、ベントナイト混合土の「施工」といった各段階において想定されるばらつきが相乗的に働いた場合を考慮しても、透水係数に与える影響は半オーダー程度であり、低透水性覆土の設計透水係数 (1.0×10^{-10} m/s 以下) を確保できる。

第 11 表 ばらつきを考慮した場合の透水係数の推定結果

		設計値からの推定値	想定したばらつき からの推定値
透水係数		$1.29 \times 10^{-11} \text{ m/s}$	$4.71 \times 10^{-11} \text{ m/s}$
設計値 ／ 想定値	混合率	15%	13%
	乾燥密度	1.82 Mg/m^3	1.82 Mg/m^3
換算値	有効モンモリロナイト乾燥密度	0.328 Mg/m^3	0.289 Mg/m^3



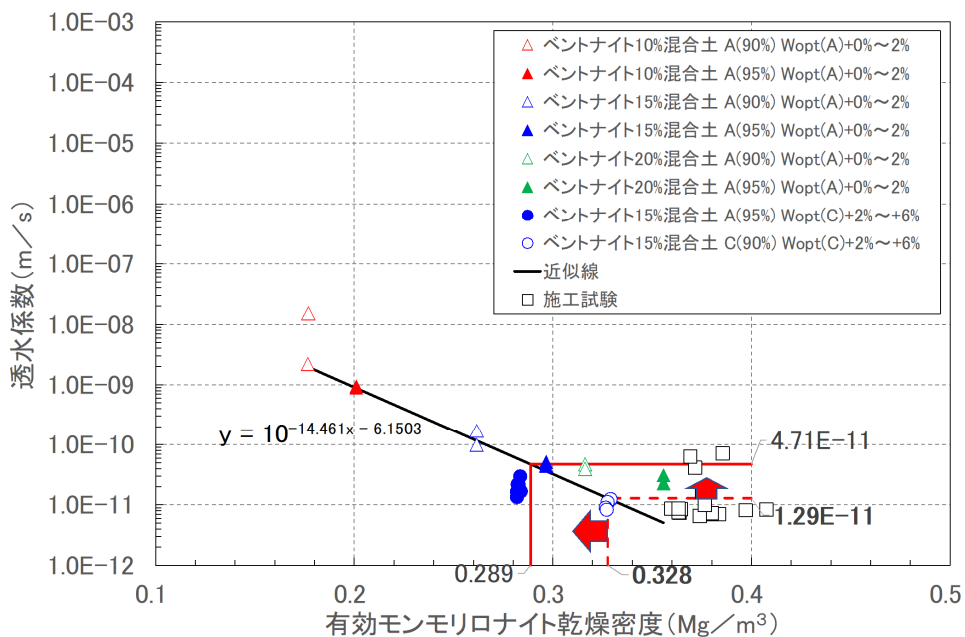
第 14 図 ばらつきを考慮した場合の透水係数の変化

2.6 代替指標による低透水性覆土の管理（品質管理）の適用性

ばらつきを考慮した場合の透水係数の変化を示す図（第14図参照）に、施工試験の結果を加筆したものを第15図に示す。

施工試験の有効モンモリロナイト乾燥密度は、全点で設計値から算定される値である 0.328 Mg/m^3 よりも大きくなった。透水係数は、16点中13点で設計値より算定される透水係数 $1.29 \times 10^{-11} \text{ m/s}$ よりも低く、残り3点は、ばらつきを考慮した場合の透水係数付近に分布した。

施工試験の結果は、代替指標を用いてばらつきを想定した範囲に分布していることから、有効モンモリロナイト乾燥密度を透水係数の代替指標として用いて管理（品質管理）することにより、製造時や施工時のばらつきを包含した管理（品質管理）が可能であると考えられる。



第15図 ばらつきを考慮した場合の透水係数の変化と施工試験結果

3 覆土の施工時における品質管理（案）

第 12 表に低透水性覆土の品質管理項目（案）を示す。品質管理は、「材料納入」、「覆土材料製造」、「覆土施工」及び「完了確認」の各段階において、所定の管理項目を実施する。

なお、ここで示す品質管理（案）は現在の覆土仕様から想定しているものであり、設計透水係数及び設計厚さを確保するための詳細な品質管理方法（管理項目、管理基準、管理方法及び管理頻度）については、実際の施工時に行う施工試験結果を用いて、平均値及びばらつき（分散）を考慮して最終決定する。その際、本書で示す考え方を基本として品質管理方法を設定するものとする。

3. 1 完了時における品質管理項目

(1) 有効モンモリロナイト乾燥密度の確認

低透水性覆土の主要機能である透水係数は、透水試験により確認するには時間が数ヶ月必要となることから、ベントナイト混合率及び乾燥密度のばらつきを包含した形で評価可能な有効モンモリロナイト乾燥密度を確認することで、間接的に透水係数を確認する。

(2) 原位置サンプリング試料による透水係数の確認

有効モンモリロナイト乾燥密度による透水係数の推定結果を裏付ける目的から、原位置サンプリング試料を用いた透水試験結果より、平均透水係数として設計透水係数が確保されていることを確認する。なお、低透水性覆土の機能に支障のない範囲で採取することとする。

3. 2 材料納入時，覆土材料製造時，覆土施工時及び完了確認時の品質管理項目

完了確認時における品質管理項目である有効モンモリロナイト乾燥密度は，下式で示される。

$$\rho_{em} = \frac{C_m \cdot \rho_b}{100 - (100 - C_m) \frac{\rho_b}{\rho_{nm}}}$$

ここで，

$$\rho_b = \frac{\rho_d(100 - R_s)}{100 - \frac{R_s \cdot \rho_d}{\rho_s}}$$

ρ_{em} : 有効モンモリロナイト乾燥密度 (Mg/m³)

ρ_b : 有効粘土乾燥密度 (Mg/m³)

C_m : モンモリロナイト含有率 (%)

ρ_{nm} : 随伴鉱物の土粒子密度 (Mg/m³)

ρ_d : 乾燥密度 (Mg/m³)

ρ_s : 骨材の土粒子密度 (Mg/m³)

R_s : 骨材混合率 (%)

これにより有効モンモリロナイト乾燥密度を定義するための管理項目として，「モンモリロナイト含有率 (モンモリロナイト含有量[メチレンブルー吸着量])」，「乾燥密度 (現場密度)」，「土粒子密度」及び「骨材混合率 (ベントナイト混合率)」があげられる。

よって，その他の品質管理では，覆土完了時に所定の品質を確保できるように「材料納入」，「覆土材料製造」，「覆土施工」及び「完了確認」の各段階に

において、第 12 表に示す所定の管理を実施することにより、有効モンモリロナイト乾燥密度の確認を間接的に行う。

この管理基準は、覆土完了時の覆土全体の平均透水係数が所定の値 (1.0×10^{-10} m/s) 以下となるような目標値として設定する。透水係数と各種代替指標との関係性は、実際の覆土施工時に行う施工試験で確認を行う。

また、第 4 図、第 5 図及び第 6 図に示すベントナイト混合土の製造確認結果よりベントナイト混合土は均質に製造できていることから、第 12 表の覆土施工時におけるばらつきを確認することで、覆土内に連続的な弱部がないことを確認する。

第12表 低透水性覆土の品質管理項目（案）

施工フロー	対象	管理項目	管理基準	管理方法	
(1) 材料納入 	ベントナイト	(1)-① 基本物理特性 (粒度分布等)	製品における各種品質基準	品質成績書確認	—
		(1)-② モンモリロナイト含有量	所定のメチレンブルー吸着量 <input type="text"/>	メチレンブルー収着試験	J I S Z 2451:2019
	購入砂	(1)-③ 基本物理特性 (粒度分布等)	所定の粒度分布等 <input type="text"/>	粒度試験 土粒子の密度試験	J I S A 1204:2020 J G S 0051-2020 J I S A 1202:2020
(2) 覆土材料製造 	混合土	(2)-① 材料構成比	所定の構成比	混合前の計量	—
		(2)-② 含水比	所定の構成比	含水比試験	J I S A 1203:1999
		(2)-③ ベントナイト混合率	所定のベントナイト混合率 <input type="text"/>	細粒分含有試験 メチレンブルー収着試験	J I S A 1223:2009 J I S Z 2451:2019
(3) 覆土施工 	混合土	(3)-① 1層当たり撤出し厚	所定の厚さ かさ密度測定	測量 密度, 含水比測定	レーザ測量等
		(3)-② 1層当たり仕上がり厚	所定の厚さ	測量	レーザ測量等
		(3)-③ 締固め回数	基準密度を満たす回数	目視	記録管理
		(3)-④ 施工範囲	所定の範囲・位置に施工されていること	測量	レーザ測量等
		(3)-⑤ 現場密度	所定の現場密度	砂置換法	J I S A 1214:2013
				RI 測定	J G S 1614-2012
(3)-⑥ 有効モンモリロナイト乾燥密度	所定の有効モンモリロナイト乾燥密度 <input type="text"/>	各パラメータから算定	—		
(4) 完了確認 ① 性能確認	混合土	(4)-① 透水係数	所定の透水係数 <input type="text"/>	有効モンモリロナイト乾燥密度から推定	—
				一軸透水試験*	J G S 0312-2018

※代替指標からの推定値による判断を裏付けるために実施

4 参考文献

- (1) 地盤工学会 (2020) : 地盤材料試験の方法と解説 第一回改訂版 二分冊
の1
- (2) 日本道路協会 (2010) : 道路土工—盛土工指針
- (3) 国土技術研究センター (2009) : 河川土工マニュアル
- (4) 地盤工学会 (2016) : 低透水性土質系材料の活用と性能評価技術に関する
研究委員会 研究報告書
- (5) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター (2016) : 平成 27
年度地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発報告
書 (第4分冊) —人工バリア材料長期挙動評価・人工バリア評価の初期
条件の設定—
- (6) 山本他 (2019) : サクション制御試験に基づくベントナイト系人工バリア
材の不飽和力学特性と保水特性

以上