

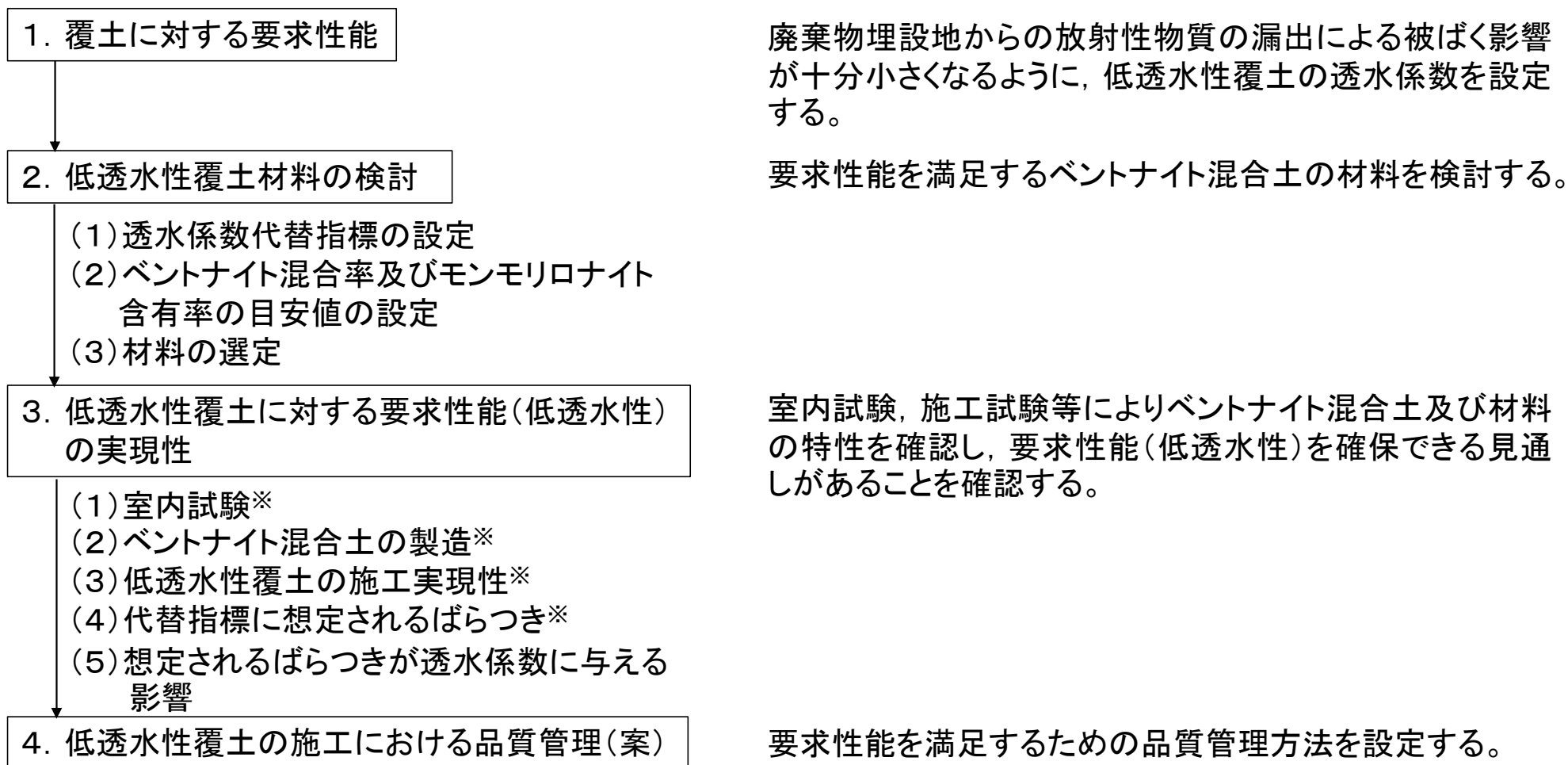


「第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び
設備の基準に関する規則第十三条
(ピット処分又はトレンチ処分に係る廃棄物埋設地)
第1項第二号及び第四号への適合性について」
の概要
【低透水性覆土の施工実現性】

2024年9月9日

日本原子力発電株式会社

低透水性覆土の施工実現性検討フロー



※第493回核燃料施設等の新規規制基準適合性に係る審査会合(2023年9月4日)資料2-1で示した試験データに対し、試験条件を改善した試験を行い、データを更新した。

低透水性覆土の施工実現性について(1/24)

1. 覆土に対する要求性能

安全機能(漏出低減機能, 遮蔽機能)に係る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。

✓ 漏出低減機能に係る低透水性覆土及び側部低透水性覆土の目標透水係数 : $1 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ 以下

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										設計要件
	技術要件 (必要な特性)	設計項目	保護土層 (上層)	保護土層 (下層)	フィルタ層	排水層	遮水シート	低透水性覆土	基礎材	側部低透水性覆土	充填砂	中間覆土	
漏出低減機能	透水特性	低透水性	材質	—	—	—	—	○	—	—	—	—	低透水性を有する材質とすること。
			透水係数	—	—	—	—	○	—	○	—	—	必要な透水係数を有すること。※ ¹
			厚さ	—	—	—	—	○	○	○	—	—	必要な厚さを有すること。※ ²
漏出低減機能を長期的に維持するための要求機能	長期機能維持特性	力学的安定性	引張強さ	—	—	—	—	○	—	—	—	—	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。
		化学的安定性	材質	—	—	—	—	○	—	—	—	—	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。
		変形追従性	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。
		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。
遮蔽機能	放射線の遮蔽性能	遮蔽性	厚さ	—	—	—	—	—	—	—	—	○	被ばく低減のために必要な遮蔽性能を有すること。※ ²

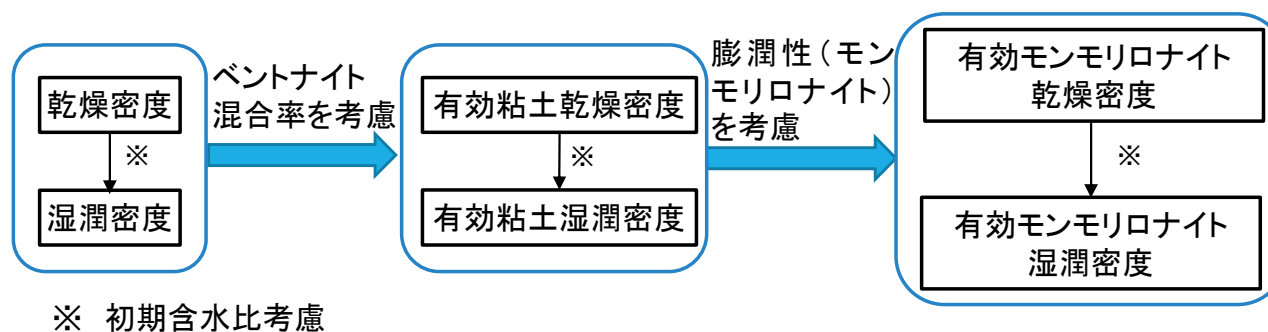
※1: 低透水性覆土及び側部低透水性覆土は $1.0 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ 以下の透水係数を施工時点で確保する。

※2: 遮水シートは厚さ 1.5 mm 以上, 低透水性覆土は厚さ 1 m 以上, 側部低透水性覆土は横方向で厚さ 0.8 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。

2. 材料の検討

(1) 透水係数の代替指標の仮設定

- ✓ 放射性廃棄物処分における透水係数の代表的な代替指標に関する考え方を第1図に示す。このように、透水係数の代替指標として、有効モンモリロナイト乾燥密度又は有効モンモリロナイト湿潤密度が用いられており、透水係数との相関が確認されている。
- ✓ 材料選定のための代替指標には、初期含水比に依存しない有効モンモリロナイト乾燥密度を仮設定する。
- ✓ ただし、実施工で用いる代替指標については、室内試験の結果を踏まえて設定する。(3.(1)にて検討)



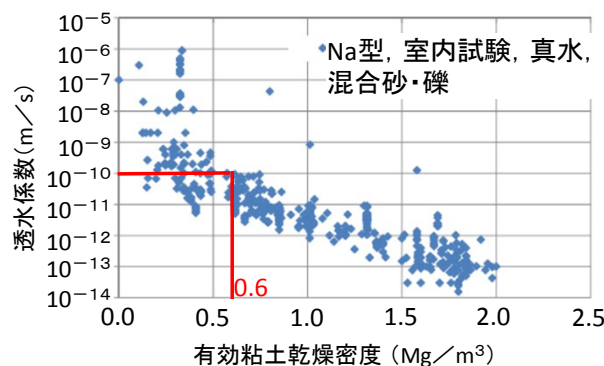
第1図 透水係数の代表的な代替指標

低透水性覆土の施工実現性について(3/24)

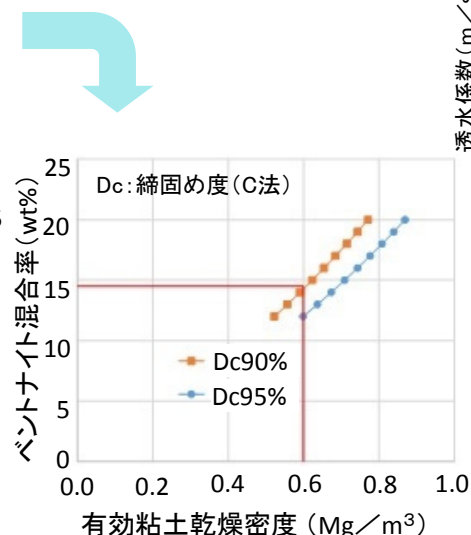
(2) ベントナイト混合率及びモンモリロナイト含有率の目安値の設定

- ✓ 既往文献から、要求性能を満足する有効粘土乾燥密度及び有効モンモリロナイト乾燥密度を推定する。
- ✓ Na型ベントナイトの有効粘土乾燥密度及び有効モンモリロナイト乾燥密度と透水係数の関係(第2図, 第3図参照)から、パラスタにより目標透水係数におけるベントナイト混合率及びモンモリロナイト含有率の関係を整理し(第4図, 第5図参照), ベントナイト混合率及びモンモリロナイト含有率の目安値を以下のとおり設定する。

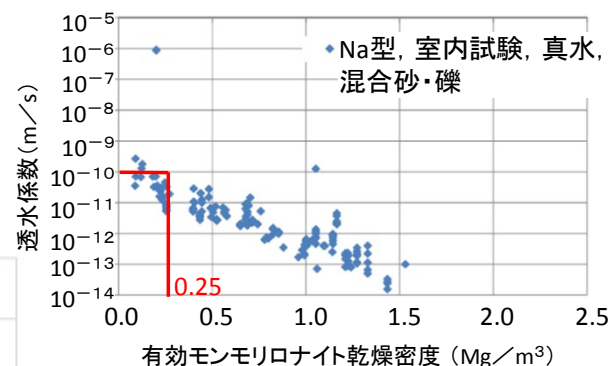
目安値: ベントナイト混合率: 15%以上, モンモリロナイト含有率: 35%以上



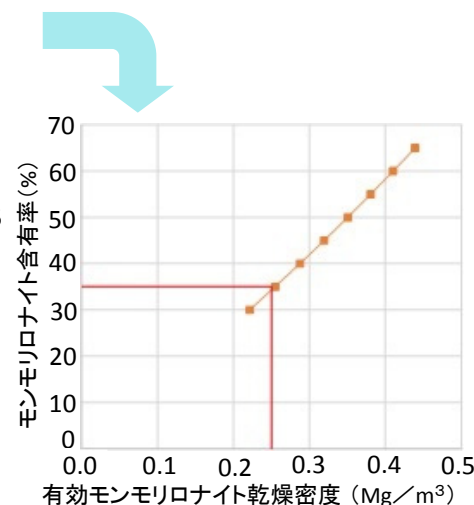
第2図 有効粘土乾燥密度と透水係数の関係



第4図 有効粘土乾燥密度とベントナイト混合率の関係のパラスタ



第3図 有効モンモリロナイト乾燥密度と透水係数の関係



第5図 有効モンモリロナイト乾燥密度とモンモリロナイト含有率の関係のパラスタ

低透水性覆土の施工実現性について(4/24)

(3)材料の選定

a. ベントナイト

候補材料(クニゲルU)の特性値(モンモリロナイト含有率, 浸出陽イオン量)を室内試験にて確認し, モンモリロナイト含有率が目安値を満足していることから, 候補材料(クニゲルU)が要求性能を満たす見通しがあることを確認した(第2表, 第3表参照)。

➤ ベントナイトの低透水性に影響を与えると考えられているモンモリロナイト含有率, 交換性陽イオン(Na^+)量をクニゲルV1と比較した結果, 候補材料(クニゲルU)とクニゲルV1で大きな差はなく, 低透水性についても大きな差がないと考える。(P26参照)

第2表 クニゲルUのMBC測定結果

サンプル名	測定	M B C (mmol/100 g)	モンモリロナイト含有率* (%)
クニゲルU	1回目	71	50
	2回目	69	
	3回目	69	
	平均値	70	

※クニゲルUを水簾(すいひ)した試料(モンモリロナイト含有率100%)のMBC138 mmol/100 g $\div$ 140 mmol/100 gに対する 割合

第3表 クニゲルUの陽イオン交換容量(CEC)及び浸出陽イオン量(LC: SFSA改良法)の測定結果

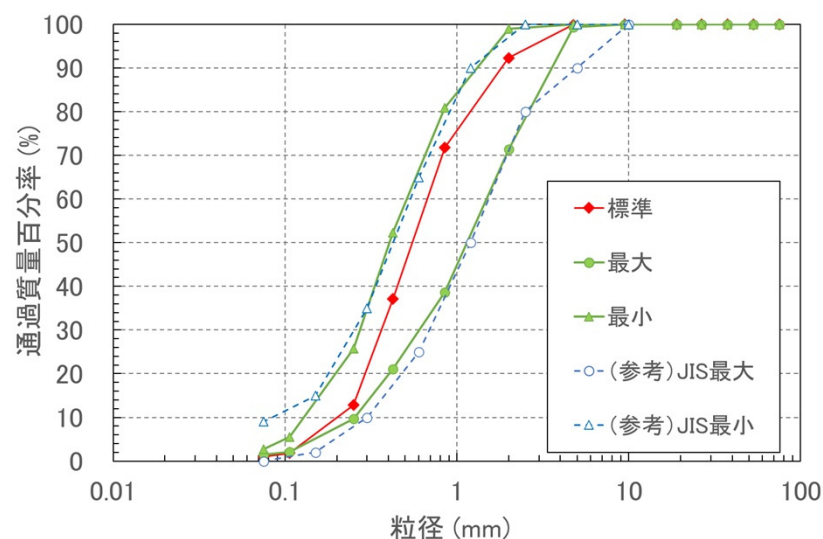
サンプル名	C E C (meq/100 g)	L C (meq/100 g)				
		N a ⁺	K ⁺	M g ²⁺	C a ²⁺	Total
クニゲルU	68.1	54.0	0.5	0.6	13.1	68.2

低透水性覆土の施工実現性について(5/24)

b. 母材

あらかじめ想定範囲の上下限(JIS A 5005:2020を参考に設定)で粒度分布を調整した材料及び平均(標準)の粒度分布(第6図参照)の材料を用いて製造したベントナイト混合土で透水係数を確認し、要求性能を満足する粒度分布の範囲を規定する。

- 室内試験により粒径の違いによって透水係数への影響がないことを確認し、粒度分布の規定範囲を設定した。
- 候補材料(久慈川砂)の粒度分布が規定範囲内であることを確認し、母材として選定した。



第6図 粒度試験結果

3. 低透水性覆土に対する要求性能(低透水性)の実現性

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(1.0×10^{-10} m/s以下))及び設計厚さ(最終覆土のうち低透水性覆土:1 m以上, 側部低透水性覆土:0.8 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(洗砂)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(1.0×10^{-10} m/s以下)を確保できる見込みがあることを確認する。

(1) 室内試験

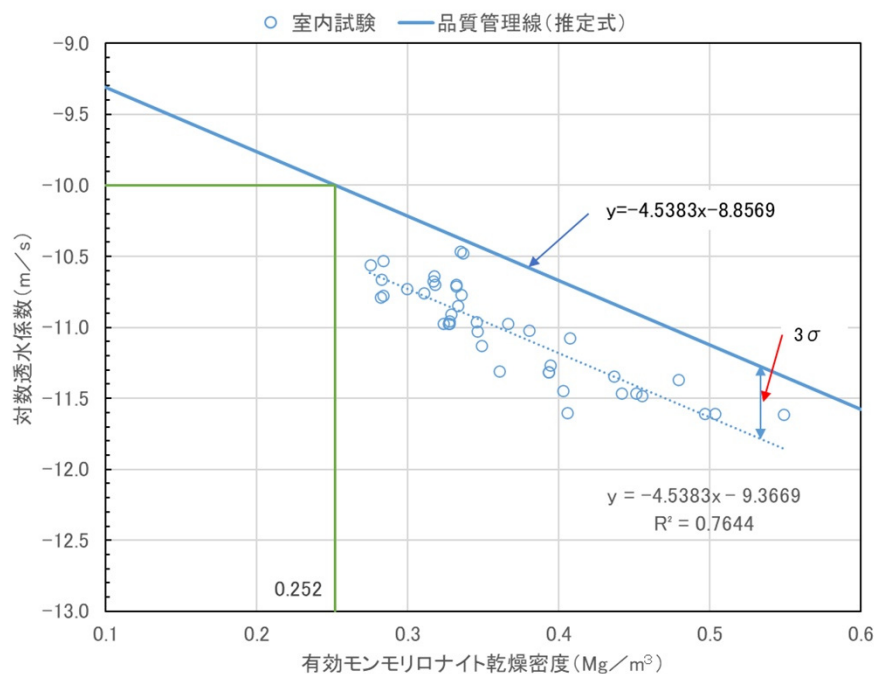
- ✓ 室内透水試験(地盤工学会基準JGS 0312-2018(低透水性材料の透水試験)に準拠)を実施し、既往の試験結果と合わせて混合土の代替指標と透水係数の関係を把握し、透水係数を推定可能な代替指標を設定する。
 - 室内試験の結果、全ての供試体で透水係数は 10^{-11} m/s若しくは 10^{-12} m/sオーダーであり、有効モンモリロナイト乾燥密度と透水係数の関係(第7図参照)から相関が確認できたことから有効モンモリロナイト乾燥密度を代替指標として設定した。
 - 有効モンモリロナイト乾燥密度と透水係数の相関が見られることから、JGS0312-2018で懸念される粒子移動による目詰まりがないことを確認した。
 - 室内試験の平均+3 σ の近似線を品質管理線として設定し、品質管理線の式を推定式として透水係数の推定に用いる。
 - 推定式により設計透水係数(1.0×10^{-10} m/s以下)を満足する有効モンモリロナイト乾燥密度をベントナイト混合土施工時の設計値として設定した(第4表参照)。

低透水性覆土の施工実現性について(7/24)

室内試験における供試体の条件

締固め度(C法) : 90%, 95%, 100%
 初期含水比 : $W_{opt}^{\ast} \sim W_{opt} + 4\%$
 ベントナイト混合率 : 13%~19%

※:最適含水比



第7図 有効モンモリロナイト乾燥密度と透水係数の関係

第4表 ベントナイト混合土施工時の設計値

項目	設計値
有効モンモリロナイト 乾燥密度	0.252 Mg/m^3 以上

(2) ベントナイト混合土の製造

- ✓ 選定した材料を用いて、第5表に示す製造時の目標値でベントナイト混合土を製造
- ✓ 二段階混合方式及び一括混合方式の二方式を用いてベントナイト混合土を製造
- ✓ ベントナイト混合土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)及び含水比の品質を確認

➤ 含 水 比 : 平均値は目標値である11.5%であり、10.3%~12.5%の間に分布し、ばらつきが±2%程度(第8図参照)

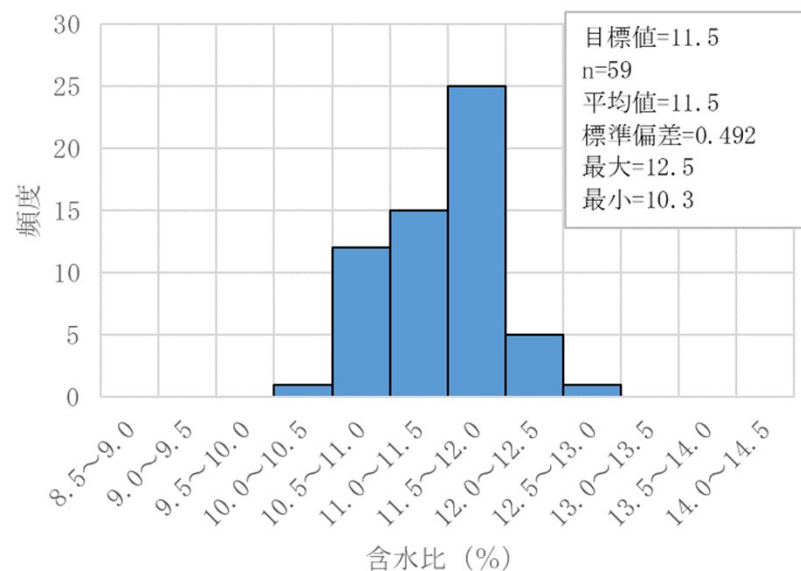
➤ ベントナイト混合率: ベントナイト混合土の細粒分含有率から、母材(久慈川砂)の細粒分含有率に0.85を乗じた値を減じることにより、想定されるベントナイト混合率を算出
平均値は13.7%であり目標値の15%よりも小さいが、この原因としては、混合率が15%となるように計量し投入したベントナイトを練り混ぜ機械内で混合した場合、練り混ぜ機械の内壁に細粒分であるベントナイトが貼り付いた可能性が考えられる。
(第9図及び第6表参照)
ばらつきは平均±1%以内と小さいことからベントナイト混合率の均質性は高い。

- ✓ ベントナイト混合率が13.7%±1%以内、含水比は $W_{opt} + 2.5\% \pm 2\%$ 程度であり、ベントナイト混合率は目標値より小さいが、均質に混合できていると考えられる。

低透水性覆土の施工実現性について(9/24)

第5表 ベントナイト混合土製造時の目標値

項目	目標値	備考
ベントナイト混合率	15%	—
初期含水比	$W_{opt} + 2.5\%$	$W_{opt} + 2.5\% = 11.5\%$



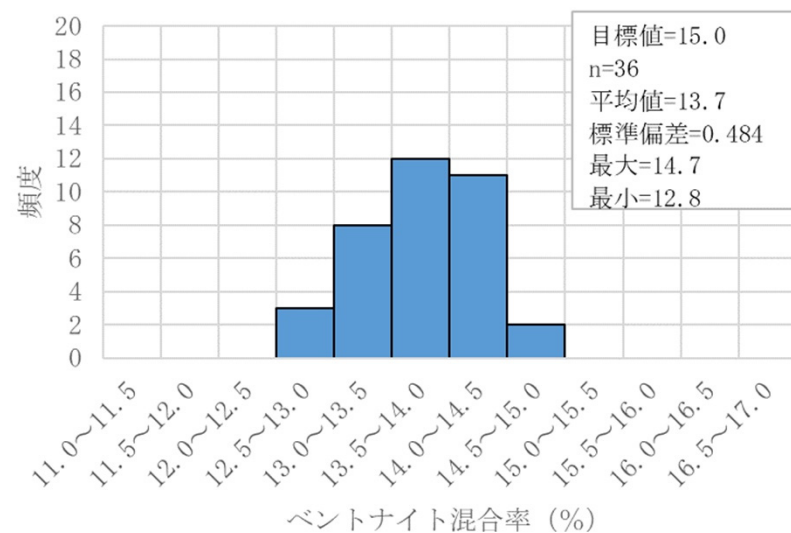
第8図 製造後の含水比のヒストグラム

第6表 母材(久慈川砂)の細粒分含有率

項目	測定数	細粒分含有率 F_c (%)		
		最小値	最大値	平均
母材	7	1.8	3.3	2.6



ベントナイト混合土の細粒分含有率から母材の細粒分含有率の最大値×混合率(0.85)を減じた値



第9図 細粒分含有率から想定されるベントナイト混合率のヒストグラム

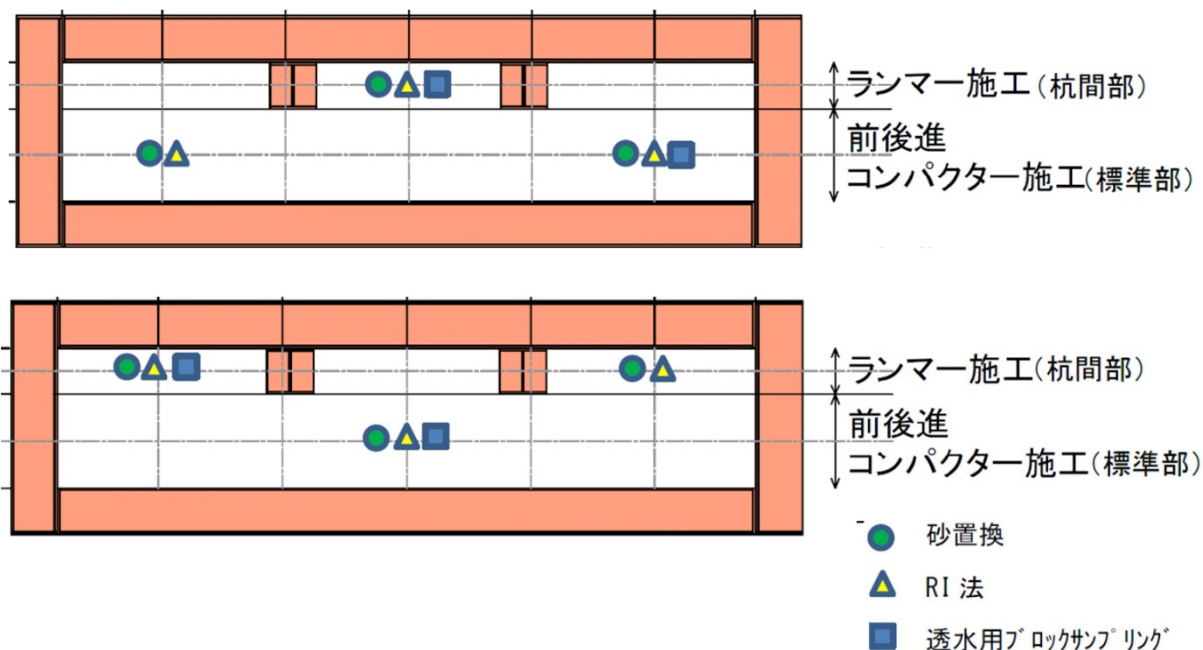
低透水性覆土の施工実現性について(10/24)

(3) 低透水性覆土の施工実現性

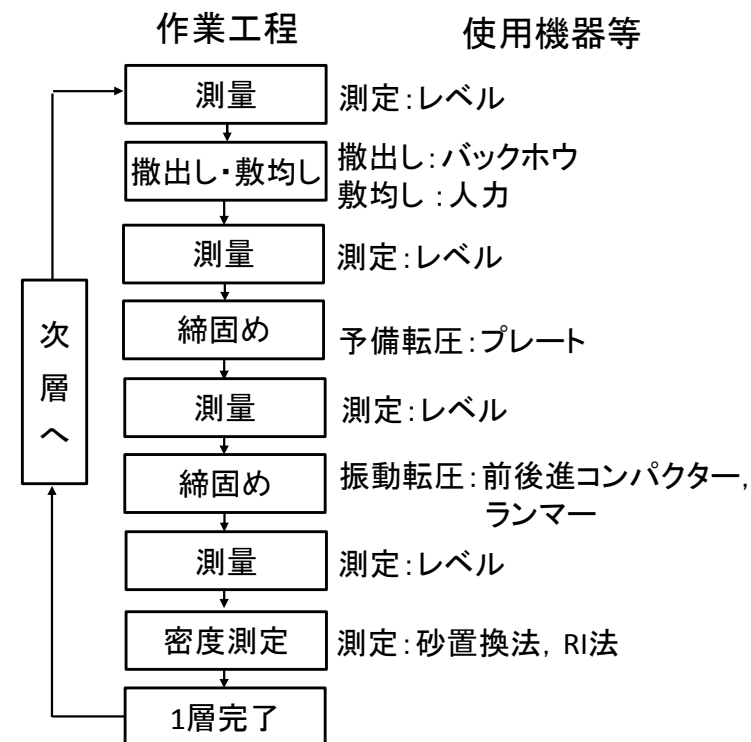
✓ 低透水性覆土の施工実現性を確認するため、実施設に近い施設構造において施工試験を実施

a. 施工試験の概要

✓ 第10図及び第11図に試験エリア(例)及び施工試験フロー(例)を示す。



第10図 試験エリア(例)



第11図 施工試験フロー(例)

低透水性覆土の施工実現性について(11/24)

b. 施工試験の結果

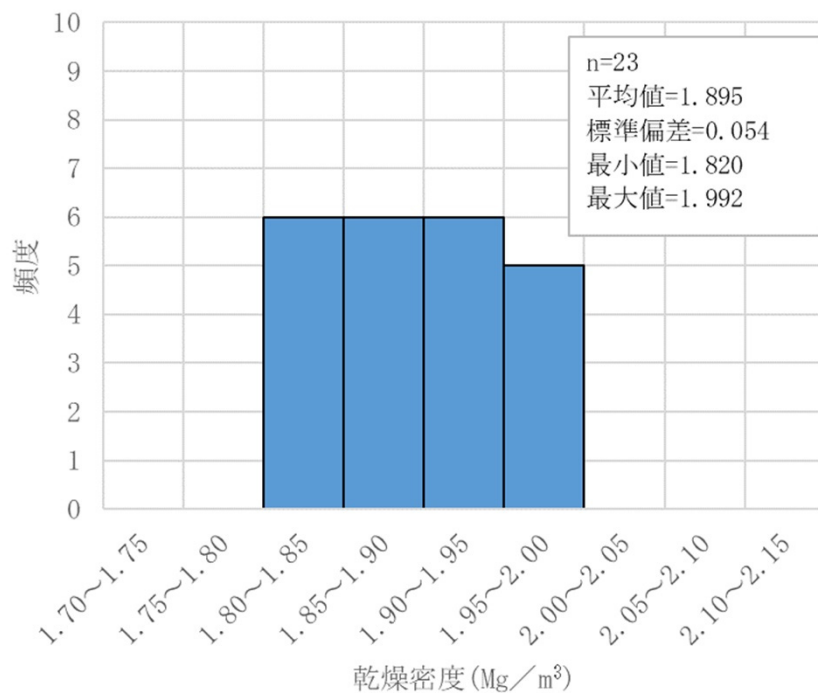
低透水性覆土(目標値:ベントナイト混合率15%, 初期含水比11.5%($=W_{\text{opt}}+2.5\%$), 撒出し厚10cm/層~20 cm/層, 乾燥密度 1.82 Mg/m^3 (C法締固め試験の最大乾燥密度 $\rho_{\text{dmax}} \times 90\%$))を対象とした施工試験の結果及び概要を第7表に示す。

- ✓ ベントナイト混合土施工後のサンプリングにより, 乾燥密度及び有効モンモリロナイト乾燥密度の品質を確認
 - 乾燥密度: 目標値である 1.82 Mg/m^3 に対して最小値 1.820 Mg/m^3 と目標値を確保した状態で施工できている(第12図参照)。
 - 有効モンモリロナイト乾燥密度: 平均値が 0.365 Mg/m^3 , 標準偏差が 0.031 Mg/m^3 であることから, 平均 -3σ の値は 0.272 Mg/m^3 となり, 設計値(0.252 Mg/m^3 以上)を満足している(第13図参照)。

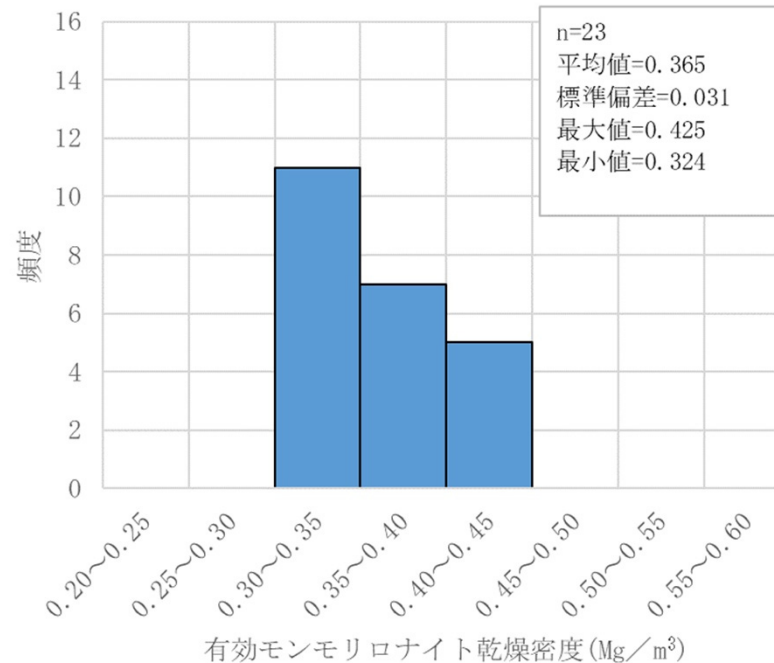
第7表 施工試験の結果及び概要一覧

試験対象	透水係数(m/s)	締固め度(C法)	施工機械等(例)
低透水性 覆土	1.38×10^{-12} ~ 8.28×10^{-12} 【n=12】	91.0 ~ 99.6 (平均 94.7) 【n=23】	・ プレート(予備転圧) ・ 前後進コンパクター(標準部) ・ ランマー(杭間部)

低透水性覆土の施工実現性について(12/24)



第12図 乾燥密度のヒストグラム

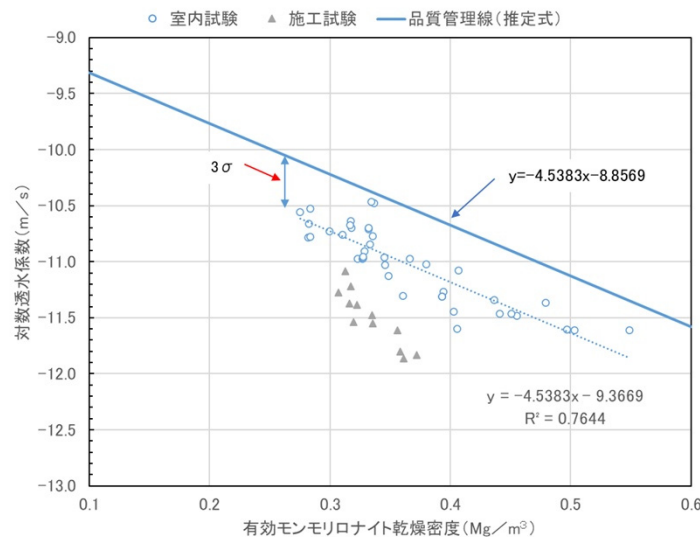


第13図 有効モンモリロナイト乾燥密度のヒストグラム

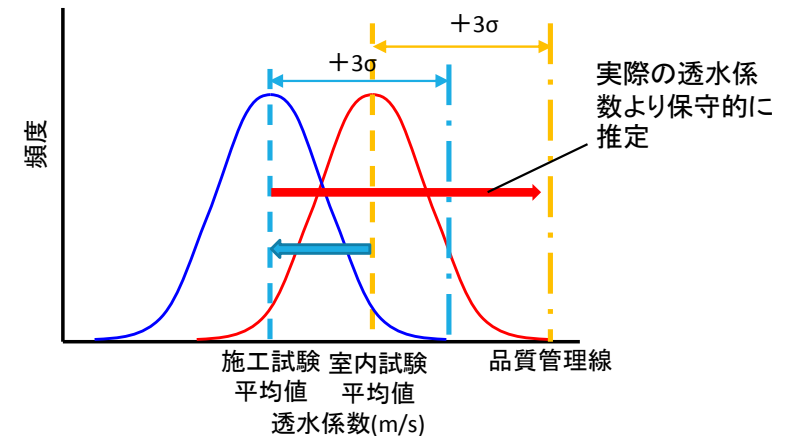
低透水性覆土の施工実現性について(13/24)

✓ 透水係数と有効モンモリロナイト乾燥密度の関係を整理

- 原位置サンプリング試料を用いた透水試験による透水係数は、施工時における目標である 1.0×10^{-11} m/s程度を満足し、かつ、ベントナイト混合土(低透水性覆土)の設計透水係数(1.0×10^{-10} m/s以下)を確保している(第14図参照)。
- 室内試験から設定した品質管理線より透水係数が十分小さいことを確認することにより、施工した低透水性覆土の有効モンモリロナイト乾燥密度から品質管理線(推定式)を用いて保守的に透水係数を推定できると考えられる(第14図, 第15図参照)。



第14図 有効モンモリロナイト乾燥密度と透水係数の関係
(施工試験結果追記)



第15図 品質管理線と施工試験結果のばらつきの関係
(イメージ)

(4)代替指標に想定されるばらつき

- ✓ 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、既往の試験結果等を例に、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「影響項目」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。

a. 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/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 (%)

低透水性覆土の施工実現性について(15/24)

b. 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)とベントナイト(クニゲルU相当)であることから、これらの材料の影響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8表に示す。

- 骨材の土粒子密度(砂の土粒子密度):母材(洗砂)の土粒子密度(3試料)の測定値は 2.673 Mg/m^3 , 2.671 Mg/m^3 , 2.671 Mg/m^3 であったことから、測定結果の最小値と最大値の範囲でばらつきが生じると想定。
- ベントナイト(クニゲルU相当)のモンモリロナイト含有率: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)(3試料)の測定値は 71 mmol/100 g , 69 mmol/100 g , 69 mmol/100 g , 既往試験結果では、 $66 \text{ mmol/100 g} \sim 74 \text{ mmol/100 g}$ であったことから、同ロットではばらつきは小さいが、ロットが異なると既往試験の測定結果の最小値と最大値の範囲でばらつきが生じると想定。
- ベントナイト(クニゲルU相当)の随伴鉱物の土粒子密度:文献の最小値と最大値より 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。

第8表 材料に想定されるばらつきの範囲

	影響項目	ばらつきの範囲
ベントナイト (クニゲルU相当)	モンモリロナイト含有率	44 %～49%
	随伴鉱物の土粒子密度	$2.636 \text{ Mg/m}^3 \sim 2.810 \text{ Mg/m}^3$
母材(洗砂)	骨材の土粒子密度	$2.671 \text{ Mg/m}^3 \sim 2.673 \text{ Mg/m}^3$

低透水性覆土の施工実現性について(16/24)

(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、影響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。
- ベントナイト混合率15%を目標値として製造したベントナイト混合土に対し、細粒分含有率から想定される製造後のベントナイト混合率の平均値は13.7%である(第9図参照)ことから、これらをベントナイト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85%から86.3%の範囲を、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、影響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。
- 乾燥密度は、施工したベントナイト混合土の乾燥密度(23試料)を測定しており、その値は第12図に示すとおり、平均値1.895 Mg/m³、最小値1.820 Mg/m³、最大値1.992 Mg/m³であった。このことから、測定結果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9表 製造時及び施工時に想定されるばらつきの範囲

	影響項目	ばらつきの範囲
製造時	骨材混合率	85% ~ 86.3%
施工時	乾燥密度	1.820 Mg/m ³ ~ 1.992 Mg/m ³

低透水性覆土の施工実現性について(17/24)

(5) 想定されるばらつきが透水係数に与える影響

- ✓ 影響項目に想定されるばらつきは「(4)代替指標に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。

a. 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、「(4)代替指標に想定されるばらつき」に示した内容を踏まえ、以下のとおり有効モンモリロナイト乾燥密度が小さくなる側に設定する。

(a) モンモリロナイト含有率

モンモリロナイト含有率が小さくなる側として、「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が大きくなる側として、「2.810 Mg/m³」と設定する。

(c) 乾燥密度

乾燥密度が小さくなる側として、「1.820 Mg/m³」と設定する。

(d) 骨材の土粒子密度

骨材の土粒子密度が大きくなる側として、「2.673 Mg/m³」と設定する。

(e) 骨材混合率

骨材混合率が大きくなる側として、「86.3%」と設定する。

低透水性覆土の施工実現性について(18/24)

b. ばらつきが透水係数に与える影響

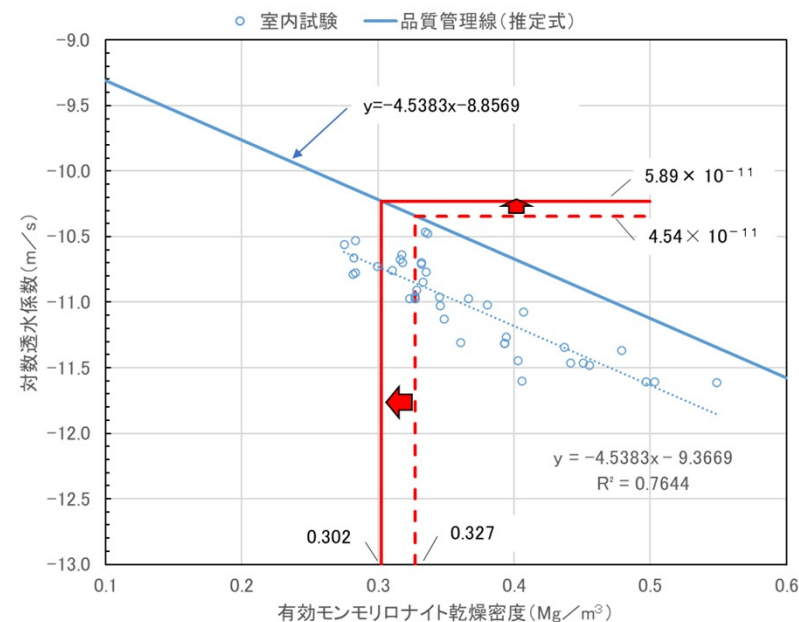
- ✓ a. で設定した想定値を用いて算定した、想定されるばらつきが相乗的に働いた場合の有効モンモリロナイト乾燥密度と、室内試験から設定した推定式を用いて透水係数を推定。推定結果を第10表に示す。



- ✓ 第16図に示すとおり、「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1.3倍程度である。
- ✓ 有効モンモリロナイト乾燥密度の目標値をあらかじめ保守的に設定することで、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。

第10表 ばらつきを考慮した場合の透水係数の推定結果

		目標値からの推定値	想定したばらつきからの推定値	変化率
透水係数		$4.54 \times 10^{-11} \text{ m/s}$	$5.89 \times 10^{-11} \text{ m/s}$	130%
想定値 目標値 ／	ベントナイト混合率	15%	13.7%	91.3%
	乾燥密度	1.820 Mg/m^3	1.820 Mg/m^3	100%
換算値	有効モンモリロナイト乾燥密度	0.327 Mg/m^3	0.302 Mg/m^3	92.4%



第16図 ばらつきを考慮した場合の透水係数の変化

低透水性覆土の施工実現性について(19/24)

4. 低透水性覆土の施工における品質管理(案)

- ✓ 第11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、管理値及び管理方法)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。

(1) 材料納入時の品質管理項目

- ✓ 材料納入時は、納入した材料が選定した材料と同等であることを品質成績書等により確認する。
- ✓ ベントナイトは、MBC測定を実施し、モンモリロナイト含有率を確認する。
- ✓ ベントナイトの随伴鉱物の土粒子密度は、容易に測定することができないことから、保守的に有効モンモリロナイト乾燥密度が小さくなるような値として、文献値の最大値である「 2.810 Mg/m^3 」と設定する。
- ✓ 母材については、粒度試験を実施し、粒度分布が規定範囲内であることを確認するとともに、土粒子の密度試験を実施し、骨材の土粒子密度を確認する。

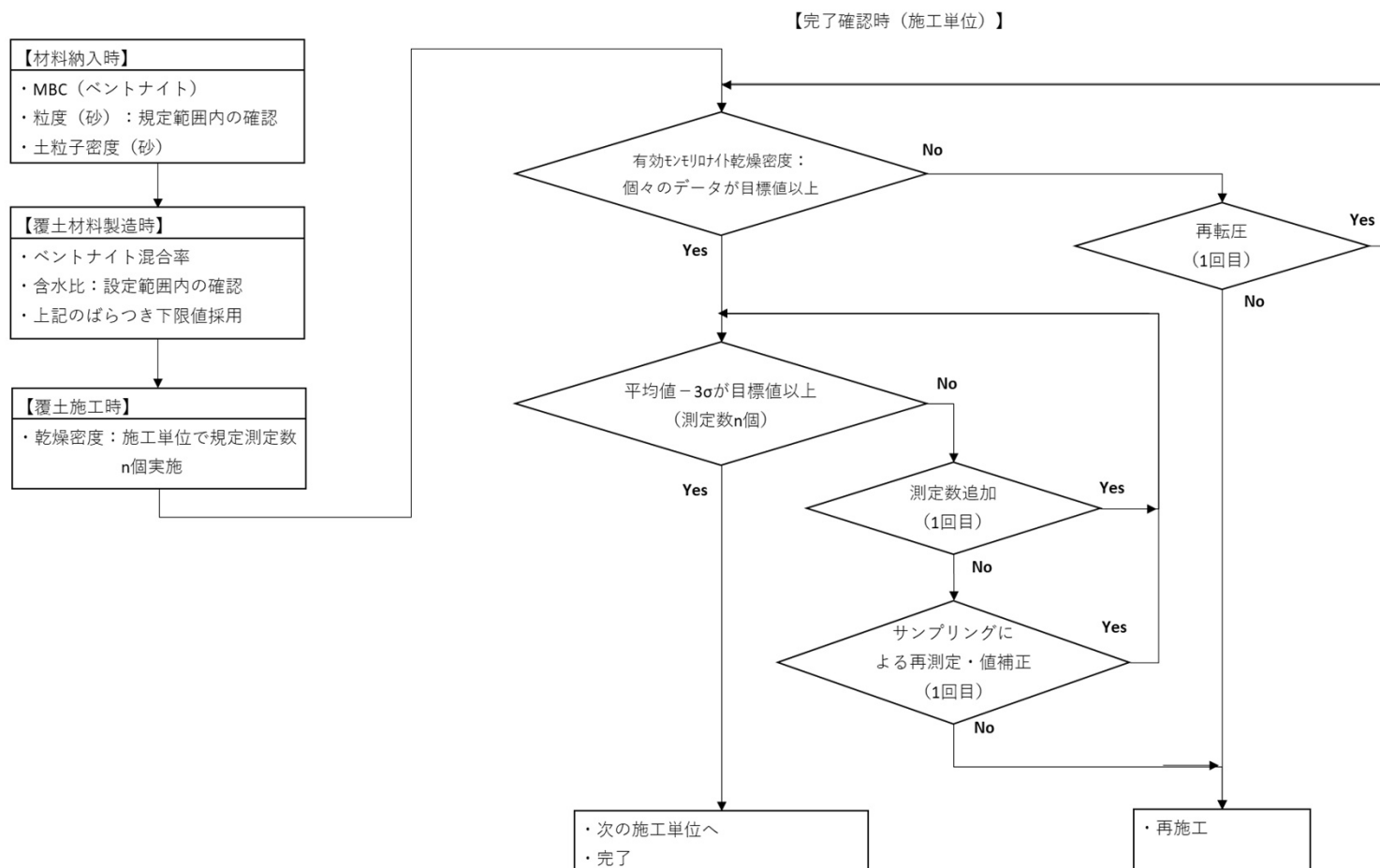
(2) 覆土材料製造時の品質管理項目

- ✓ 製造段階では、試料採取を行うことが容易であり十分な試料数を得ることが可能である。よって、代替指標を算出する際の乾燥密度以外のパラメータについては、製造段階において実施する試験の測定結果によりばらつきの上下限値等の保守的な値を設定することで管理値を定める。
- ✓ 覆土材料製造時は、使用する材料が有効モンモリロナイト乾燥密度の設計値を満足するように、「3. (4) 代替指標に想定されるばらつき」に示す影響項目に想定されるばらつきを考慮してベントナイト混合率を保守的に設定する。
- ✓ 設定したベントナイト混合率においてベントナイト混合土の締固め試験を実施し、最大乾燥密度と最適含水比を確認する。
- ✓ 締固め試験結果から、覆土施工時における締固め度(乾燥密度)の目標値を設定するとともに、有効モンモリロナイト乾燥密度の目標値を設定する。
- ✓ 有効モンモリロナイト乾燥密度の目標値は、「3. (5) 想定されるばらつきが透水係数に与える影響」に示すように、有効モンモリロナイト乾燥密度の想定されるばらつきが透水係数に与える影響を考慮した場合、最大で10%程度の有効モンモリロナイト乾燥密度のばらつきが想定されることから、材料納入時及び製造時のばらつきを考慮して保守的に目標値を設定する。
- ✓ 使用するベントナイト及び母材の含水比試験を実施し、設定したベントナイト混合率及び初期含水比が最適含水比より若干湿潤側となるように材料構成比を設定する。
- ✓ 材料製造後にMBC及び細粒分含有率を測定し、ベントナイト混合率を算出することで、設定どおりの混合率で混合されていることを確認する。

(3) 覆土施工時の品質管理項目

- ✓ 覆土の施工に当たっては、あらかじめ施工試験を実施し、1層当たりの撒出し厚、仕上がり厚及び締固め回数並びに許容誤差を決定するとともに、低透水性覆土全体の性能を推定可能な十分な測定数で乾燥密度を測定し、有効モンモリロナイト乾燥密度のばらつき(平均値・分散)から実際の施工時の測定数を決定する。
- ✓ 覆土の施工における乾燥密度の測定については、覆土を乱し難い測定方法を採用する必要があることから、施工試験では実際の施工で採用する測定方法に加えて異なる測定方法で測定を行い、補正を行う。
- ✓ 覆土の施工は、施工後の品質確認として施工範囲、最終仕上がり厚及び乾燥密度を測定するとともに、乾燥密度の測定値並びに材料納入時及び覆土材料製造時のばらつきを考慮した設定値から各測定点における有効モンモリロナイト乾燥密度を算定し、施工単位ごとに第17図に示す低透水性覆土の性能判断フロー(案)に基づき判断基準を満足することにより、施工した覆土が部材単位の性能として設計透水係数(1.0×10^{-10} m/s以下)を満足していることを確認する。
- ✓ 上記にかかわらず、廃棄物埋設地の外で施工した低透水性覆土を使用する場合、その施工方法に応じて、あらかじめ施工試験を実施したうえで、廃棄物埋設地の外での敷均し、転圧、保管及び運搬に相当する品質管理を実施するとともに、覆土の設置及び施工完了後に係る品質管理を実施する。

低透水性覆土の施工実現性について(22/24)



第17図 低透水性覆土の性能判断フロー(案)

(4) 完了確認時の品質管理項目

a. 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。
- ✓ 低透水性覆土全体の性能判断としては、施工単位ごとに前項に示す確認を行った結果、全ての層で判断基準を満足していることにより、設計透水係数(1.0×10^{-10} m/s以下)を満足していることを確認する。

b. 原位置サンプリング試料による透水係数の確認

- ✓ 施工試験では、原位置サンプリング試料を用いた透水試験結果が室内試験により設定した平均 $+3\sigma$ の品質管理線を下回っていることを確認することにより、施工した低透水性覆土が室内試験と同等以上の品質で施工できていることを確認する。
- ✓ 実際の施工では、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が平均 $+3\sigma$ の品質管理線を下回っていることを確認することにより、施工した低透水性覆土が施工試験と同等の品質で施工でき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。また、廃棄物埋設地の外で施工した低透水性覆土を使用する場合、その一部を原位置サンプリング試料として採取する。

低透水性覆土の施工実現性について(24／24)

第11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	管理値(案)	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率	所定のモンモリロナイト含有率	—※1	メチレンブルー収着試験 JIS Z 2451:2019
	母材	(1)-③ 基本物理特性(粒度分布等)	所定の粒度分布等	規定範囲内であること等※1	粒度試験 土粒子の密度試験 JIS A 5005:2020 JIS A 1204:2020 JGS 0051-2020 JIS A 1202:2020
(2)覆土材料製造 	ベントナイト、母材	(2)-① 材料構成比	所定の構成比	—※1	混合前の計量
	混合土	(2)-② 初期含水比	所定の含水比	$W_{opt} + 2\% \pm 2\% \text{※1}$	含水比試験 JIS A 1203:2020
		(2)-③ ベントナイト混合率	所定のベントナイト混合率	$15\% + 2\% \pm 2\% \text{※1}$	メチレンブルー収着試験 JIS Z 2451:2019
(3)覆土施工 	低透水性覆土	(3)-① 1層当たり撒出し厚	所定の厚さ かさ密度測定	$20 \text{ cm} + 10\% \pm 10\% \text{※1}$	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	$10 \text{ cm} + 10\% \pm 10\% \text{※1}$	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	—※1	目視確認 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	—※1	測量 レーザ測量等
		(3)-⑤ 最終仕上がり厚	所定の厚さ	低透水性覆土: $1.0 \text{ m} + 10\% \pm 10\% \text{※1}$ 側部低透水性覆土: $0.8 \text{ m} + 10\% \pm 10\% \text{※1}$	測量 レーザ測量等
		(3)-⑥ 現場密度	所定の現場密度 所定の測定頻度	$1.82 \text{ Mg/m}^3 \text{以上} \text{※1}$ —※1	砂置換法 Ri測定 目視確認 JIS A 1214:2024 JGS 1614-2012 記録管理
		(3)-⑦ 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	$0.252 \text{ Mg/m}^3 \text{以上}$	各パラメータから算定
(4)完了確認 	低透水性覆土	(4)-① 透水係数	所定の透水係数	$1.0 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ 以下	有効モンモリロナイト乾燥密度と推定式から部材単位の性能を推定 一軸透水試験※2 JGS 0312-2018

※1 各段階又は事前の試験における確認結果に応じて設定するため、既往試験結果を基に設定した暫定値(施設確認時に確定値とする)又は未定

※2 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

【参考】候補材料(クニゲルU)とクニゲルV1の特性値の比較

- ✓ 候補材料(クニゲルU)のモンモリロナイト含有率はクニゲルV1のばらつきの範囲となっている(第12表参照)。
- ✓ 候補材料(クニゲルU)の交換性陽イオン量(Na^+)も大きな差はなく、陽イオン交換容量に対する交換性陽イオン(Na^+)量の割合(ESP)の差は1割程度でクニゲルV1のばらつきの範囲と考えられる(第13表参照)。
- ✓ ベントナイトの低透水性に影響を与えると考えられているモンモリロナイト含有率、交換性陽イオン量を比較した結果、候補材料(クニゲルU)とクニゲルV1で大きな差はないことから、低透水性についても大きな差がないと考える。

第12表 クニゲルUとクニゲルV1のモンモリロナイト含有率の比較

項目	実施 年度	M B C (mmol/ 100g)	試験数	モンモリロ ナイト含有 率(%)	備考
クニゲルU 試験結果 (当社実施)	2023①	69～71	3	50 ^{*1}	
	2023②	72～74	3	52.9 ^{*1}	2023①とは 別ロット品
	2021	68～70	3	45～47 ^{*2}	
	2022	66	3	44 ^{*2}	
クニゲルV1 試験結果 (文献値)	—	66～92	—	44～61 ^{*2}	

※1：モンモリロナイト 100%時のM B C 値はクニゲルU 水簾品のM B C 138 (mmol/100g)

※2：モンモリロナイト 100%時のM B C 値はクニピアFのM B C 150 (mmol/100g)

第13表 クニゲルUとクニゲルV1の陽イオン交換容量(CEC)及び浸出陽イオン量(LC)の比較

項目	C E C (meq/ 100 g)	L C (meq/100g)					備考
		N a ⁺	K ⁺	M g ²⁺	C a ²⁺	Total	
クニゲルU 試験結果 (当社実施)	68.1	54.0	0.5	0.6	13.1	68.2	S F S A 改良法
クニゲルV1 試験結果 (文献値)	60.1	51.4	0.6	0.7	7.4	60.1	

【参考】後段規制を想定した低透水性覆土の品質管理項目(案)

第14表 後段規制を想定した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	管理値(案)	管理方法	事業許可	後段規制
(1)材料納入	ベントナイト	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	—	○
		モンモリロナイト含有率	所定のモンモリロナイト含有率	—※1	メチレンブルー収着試験	JIS Z 2451:2019	○
		随伴鉱物の土粒子密度	固定値(2.81Mg/m ³)	—	—	—	—
	母材	粒度分布等	所定の粒度分布等	規定範囲内であること※1	粒度試験	JIS A 5005:2020 JIS A 1204:2020 JGS 0051-2020	○
		土粒子密度	測定	—	土粒子の密度試験	JIS A 1202:2020	○
(2)覆土材料製造	ベントナイト・母材	材料構成比	所定の構成比	—※1	混合前の計量	—	○
		ベントナイトの含水比	測定	—	含水比試験	JIS A 1203:2020	○
		母材の含水比	測定	—	含水比試験	JIS A 1203:2020	○
		練り混ぜ機械	所定の機械	—	目視確認	記録管理	○
		最大乾燥密度	測定	—	締固め試験	JIS A 1210:2020	○
	混合土	最適含水比	測定	—	締固め試験	JIS A 1210:2020	○
		初期含水比	所定の含水比	W _{opt} +2%±2%※1	含水比試験	JIS A 1203:2020	○
		ベントナイト混合率	所定のベントナイト混合率	15%+2%±2%※1	細粒分含有率試験 メチレンブルー収着試験	JIS A 1223:2020 JIS Z 2451:2019	○
	低透水性覆土	1層当たり撤出し厚	所定の厚さ かさ密度測定	20 cm+10%±10%※1	測量 密度、含水比測定	レーザ測量等	○
		1層当たり仕上がり厚	所定の厚さ	10 cm+10%±10%※1	測量	レーザ測量等	○
		締固め回数	基準密度を満たす回数	—※1	目視確認	記録管理	○
		締固め機械	所定の機械	—	目視確認	記録管理	○
		施工範囲	所定の範囲・位置に施工されていること	—※1	測量	レーザ測量等	○
		最終仕上がり厚	所定の厚さ	低透水性覆土:1.0 m+10%±10%※1 側部低透水性覆土:0.8 m+10%±10%※1	測量	レーザ測量等	○
		現場密度	所定の現場密度	1.82 Mg/m ³ 以上※1	砂置換法 RI測定	JIS A 1214:2024 JGS 1614-2012	○
(4)完了確認	低透水性覆土	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	0.252 Mg/m ³ 以上	各パラメータから算定	—	○
		透水係数	所定の透水係数	1.0×10 ⁻¹⁰ m/s以下	有効モンモリロナイト乾燥密度と推定式から部材単位の性能を推定 一軸透水試験※2	— JGS 0312-2018	○

※1 材料納入時、覆土材料製造時、施工試験時の確認結果に応じて設定するため、既往試験結果を基に設定した暫定値(施設確認時に確定値とする)又は未定

※2 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



【参考】 後段規制を想定したその他覆土の品質管理項目(案)

第15表 後段規制を想定したその他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	管理値(案)	管理方法		事業許可	後段規制
(1)材料納入	充填砂, 中間覆土, 基礎材, 排水層, フィルタ層, 保護土層(下層), 保護土層(上層)	粒度分布等	所定の粒度分布等	—※	粒度試験	JIS A 1204:2020 JGS 0051-2020	—	○
	充填砂, 中間覆土, 基礎材, 排水層, フィルタ層	土粒子密度	測定	—※	土粒子の密度試験	JIS A 1202:2020	—	○
(2)覆土施工前	充填砂, 中間覆土, 基礎材, 排水層, フィルタ層	最大乾燥密度	測定	—※	締固め試験	JIS A 1210:2020	—	○
		最適含水比	測定	—※	締固め試験	JIS A 1210:2020	—	○
	充填砂	最小密度, 最大密度	測定	—※	最小密度, 最大密度試験	JIS A 1224:2020	—	○
	充填砂, 中間覆土, 基礎材, 排水層, フィルタ層	初期含水比	所定の含水比	—※	含水比試験	JIS A 1203:2020	—	○
(3)覆土施工	中間覆土	1層当たり 撒出し厚	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	—	○
		1層当たり 仕上がり厚	所定の厚さ	—※	測量	レーザ測量等	—	○
		締固め回数	基準密度を満たす回数	—※	目視確認	記録管理	—	○
		締固め機械	所定の機械	—※	目視確認	記録管理	—	○
	充填砂, 中間覆土, 基礎材, 排水層, フィルタ層, 保護土層(下層), 保護土層(上層)	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	—	○
	中間覆土, 基礎材, 排水層, フィルタ層, 保護土層(下層), 保護土層(上層)	最終仕上がり厚	所定の厚さ	—※	測量	レーザ測量等	○	○
	充填砂, 中間覆土, 基礎材, 排水層, フィルタ層, 保護土層(下層), 保護土層(上層)	現場密度	所定の現場密度	—※	砂置換法	JIS A 1214:2024	—	○
			所定の測定頻度	—※	RI測定 かさ密度 目視確認	JGS 1614-2012 — 記録管理		

※ 材料納入時, 覆土施工前の確認結果に応じて設定するため未定