



# 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 5月19日

日本原子力発電株式会社



# 審査会合における指摘事項一覧

No.	審査日	資料指摘箇所	指摘事項	指摘事項 対応箇所	回答内容
1	2022/11/14	資料2-2 添1-4	難透水性覆土の透水係数の設定について、室内試験(A法相当の締固め)を踏まえ、施工試験(C法相当)を行った結果から十分に達成できることを追記すること。	資料2-2 2~3, 5	ベントナイト混合率、密度及び初期含水比をパラメータスタディした透水試験の結果を踏まえ設定した、施工試験を行う際のベントナイト混合土の製造時及び施工時の設計値(ベントナイト混合率等)について、施工試験(混合土の製造及び施工)により、設計値が確保でき、かつ、設計透水係数を達成できる見込みであることの説明を追記しました。これに伴い、ベントナイト混合率15%、締固め度95%(A法)及び90%(C法)で得られる密度で実施した透水試験結果も追記しました。
2	2022/11/14	資料2-2 添3-7	ベントナイト混合率について、ベントナイト混合土を製造した際の計量結果から15%付近での混合率が得られたことを追記すること。	資料2-2 12	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、その重量をバッチ毎に計量して投入したことを追記しました。
3	2022/11/14	資料2-2 添付資料3	ベントナイトと例えば珪砂みたいな混合土だと比較的均質だと考えられる場合は、部分密度(この場合、有効モンモリロナイト乾燥密度)で整理することは、非常に有効だと過去言われてきた。久慈川産出の砂を用いた場合、ベントナイトの粒径とかそういうものに比べて非常に大きな砂(礫等)が入ってくることが想定されるため、均質と言えるかどうかというのが非常に大きな観点になる。また、ベントナイトの混合率が低い場合、広い範囲では均質に混合されていると言っても、非常に狭い範囲では均質に混合されているとは言えない場合があると考えられる。これらを踏まえ、有効モンモリロナイト乾燥密度によって整理(品質管理等)ができることを説明すること。	資料2-2 12~16, 24~31	施工試験に使用したベントナイト混合土の母材(久慈川砂)には、非常に大きな砂(礫)が含まれておらず、施工試験で製造したベントナイト混合土(ベントナイト混合率15%)の均質性は高いと考えています。また、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ています。それらに係る説明等を審査資料に記載しました。



# 低透水性覆土の施工実現性について(1/18)

## ➤ 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。

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	掘削抵抗性層	低透水性土層	基礎層	側部低透水性覆土	充填砂	中間覆土		
漏出低減機能※ <sup>3</sup>	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。※ <sup>1</sup>
			厚さ	—	—	○	—	○	—	—	必要な厚さを有すること。※ <sup>2</sup>
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※ <sup>3</sup>	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：低透水性土層及び側部低透水性覆土は巨視的透水係数として  $1.0 \times 10^{-10}$  m/s を施工時点で確保する。

※2：低透水性土層で厚さ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。

※3：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。

## 低透水性覆土の施工実現性について(2/18)

### (1) 漏出低減機能に係る技術要件及び設計項目

- ✓ 漏出低減機能に係る低透水性覆土(最終覆土のうち低透水性土層及び側部低透水性覆土)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。

### (2) 漏出低減機能に係る設計要件

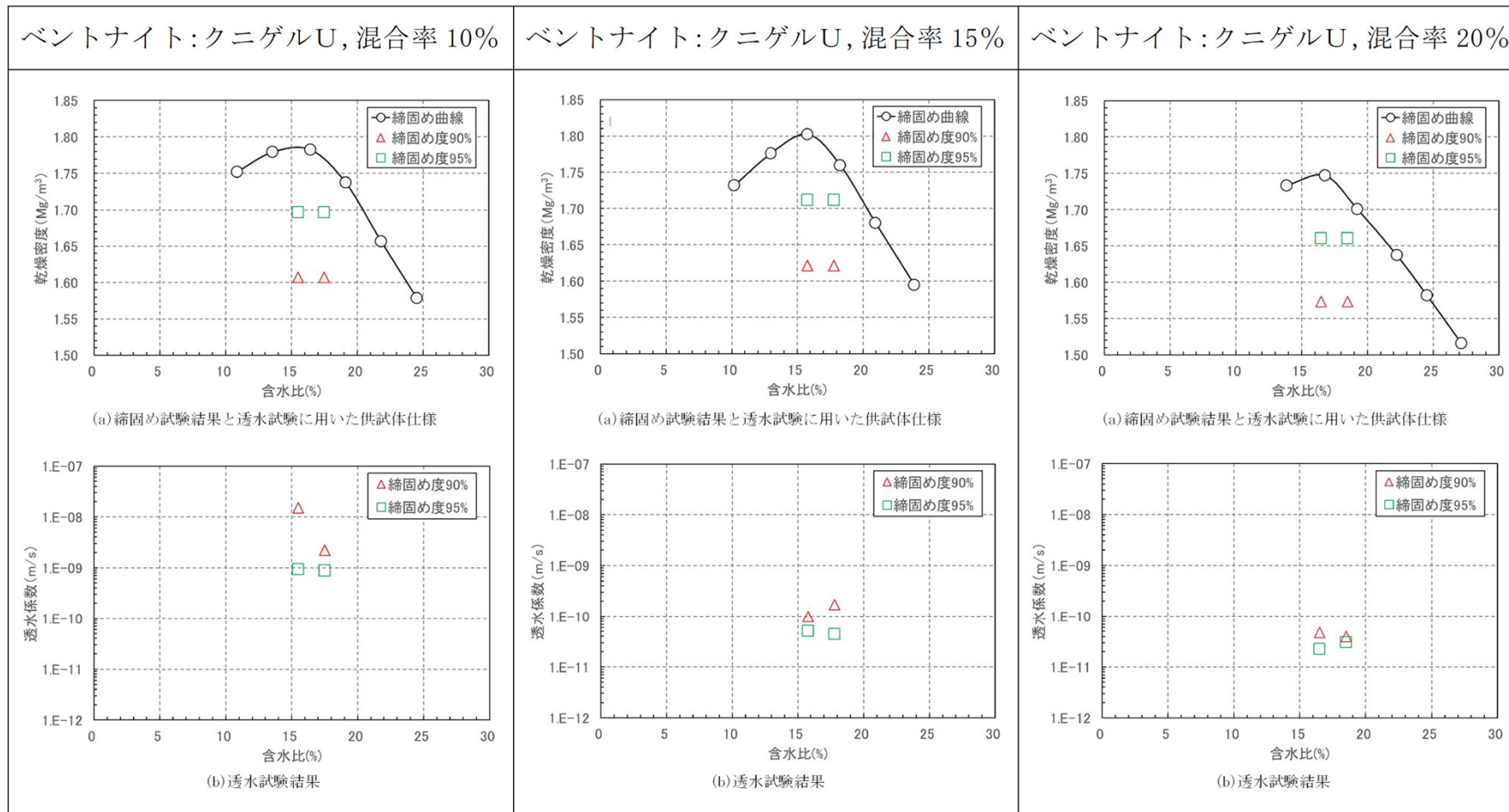
- ✓ 設計項目である透水係数及び厚さについては, 各部位が要求性能を満足するための設計要件を設定
- ✓ 覆土の技術要件のうち, 低透水性についての詳細を以下に示す。

#### a. 覆土の低透水性

- ✓ ベントナイト混合率, 密度, 初期含水比をパラメータとして, 複数の条件にて透水試験を実施(第1図及び第2図参照)
- ✓ 試験結果より, 以下の条件にて設計透水係数(巨視的透水係数として $1.0 \times 10^{-10}$  m/s以下)を確保できると考えられる。

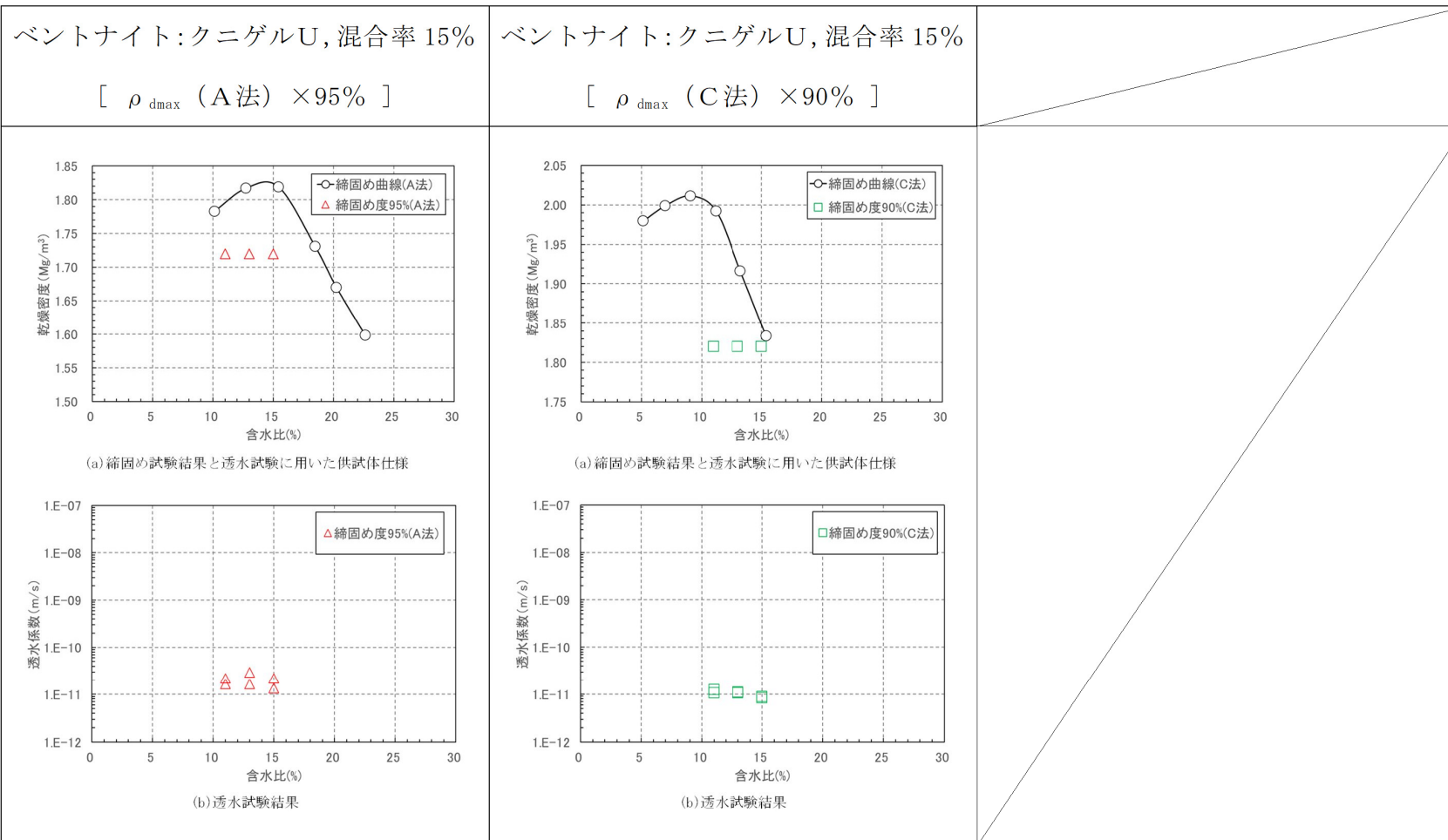
- ベントナイト混合率 : 15%以上
- 密度 : 95%(A法)の締固めによって得られる密度以上
- 初期含水比 : 最適含水比よりも若干湿潤側(試験結果を踏まえると $W_{opt} + 2\%$ 程度)

# 低透水性覆土の施工実現性について(3/18)



第1図 透水試験結果(その1)

# 低透水性覆土の施工実現性について(4/18)



第2図 透水試験結果(その2)





# 低透水性覆土の施工実現性について(5/18)

## ➤ 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(巨視的透水係数として $1.0 \times 10^{-10}$  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)を確保することにより管理するが、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、施工試験(「ベントナイト混合土の製造」及び「ベントナイト混合土の施工」試験)を実施

### (1) ベントナイト混合土製造時及び施工時の設計値

- ✓ 室内試験の結果から、施工試験として行う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を設定
- ✓ ベントナイト混合率、初期含水比等の設計値は、施工(材料製造、設置工)における不均質性を考慮し、 $1.0 \times 10^{-11}$  m/s程度の透水係数が得られるように設定。設定した設計値を以下(第2表及び第3表)に示す。

第2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3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	$1.82 \text{ Mg/m}^3$ (C法締固め試験の最大乾燥密度 $\rho_{dmax} \times 90\%$ )	—

# 低透水性覆土の施工実現性について(6/18)

## (2) ベントナイト混合土の製造

- ✓ ミキサー(容量5 m<sup>3</sup>)を用いたバッチ式によりベントナイト混合土を製造
- ✓ 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
- ✓ 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・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(第3図参照)

➤ 細粒分含有率：平均値・中央値ともに17.4%である。細粒分含有率が、ベントナイト混合率の15%よりも大きいのが、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及び練り混ぜ中に母材(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。(第4図、第5図及び第4表参照)

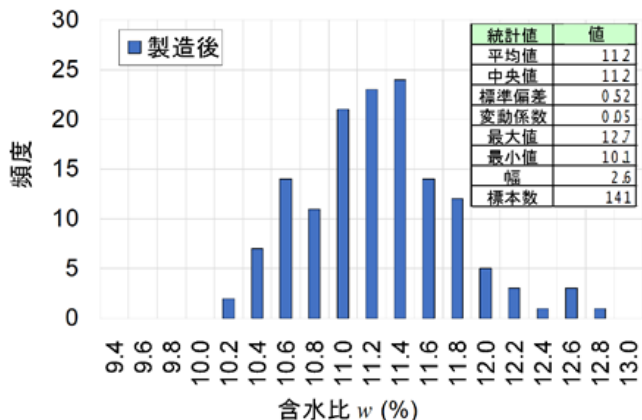
→ 平均値が15%になるように横軸をずらして、想定されるベントナイト混合土のヒストグラムを第6図に示す。

ばらつきは平均±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。

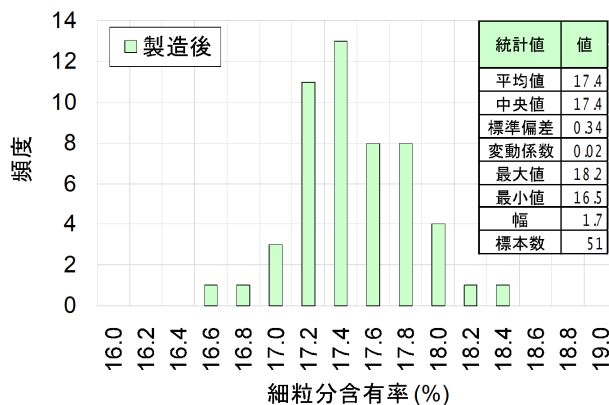
- ✓ ベントナイト混合率が15%±1%以内、含水比は $W_{opt} + 2\% \pm 2\%$ 程度であり、設計値の配合を確保できた状態で混合できていると考えられる。



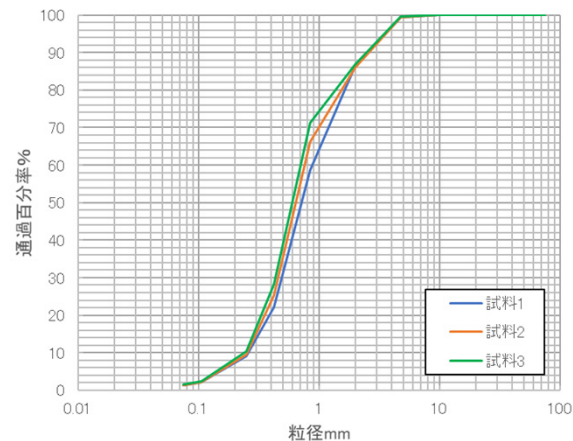
# 低透水性覆土の施工実現性について(7/18)



第3図 製造後の含水比



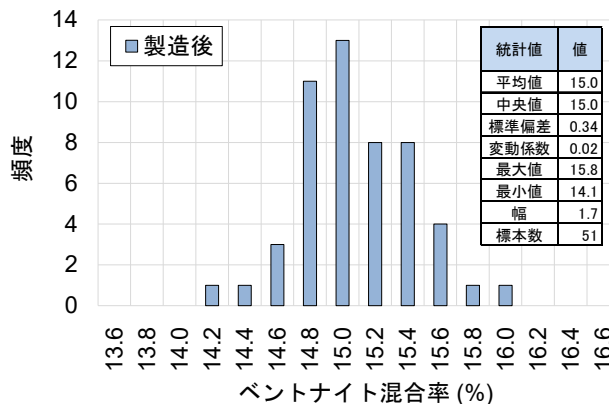
第4図 製造後の細粒分含有率



第5図 母材(久慈川砂)の粒度分布



平均値が15%になるように横軸をずらし、ベントナイト混合土のヒストグラムを想定



第6図 製造後のベントナイト混合率のイメージ(想定)

第4表 母材(久慈川砂)の細粒分含有率

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

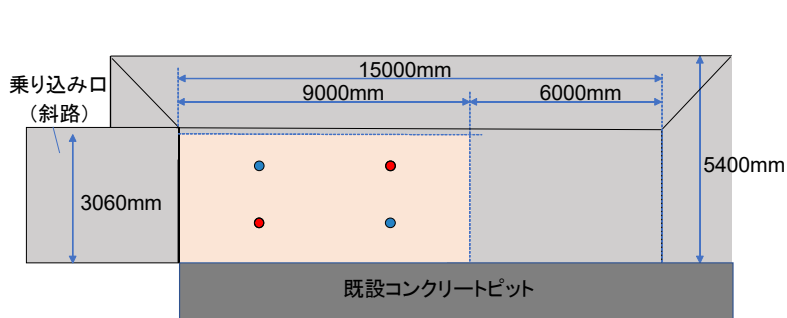
# 低透水性覆土の施工実現性について(8/18)

## (3) 低透水性覆土の施工実現性

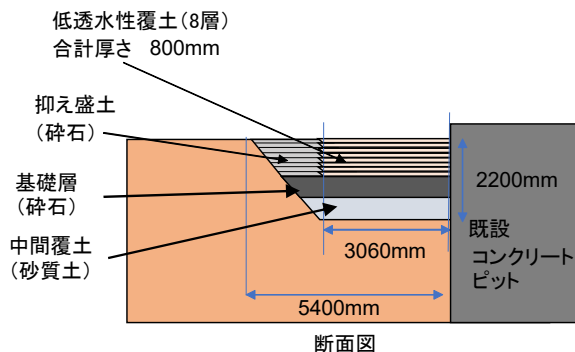
✓ 低透水性覆土の施工の実現性を確認するため、実施設に近い施設構造において施工試験を実施

### a. 施工試験の概要

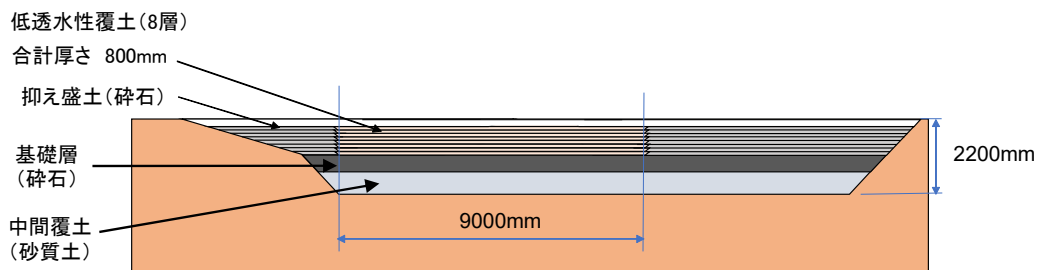
✓ 以下(第7図及び第8図)に試験エリア(採取位置)及び施工試験フローを示す。



平面図 透水試験用試料採取位置:  
奇数層 ● 偶数層 ●

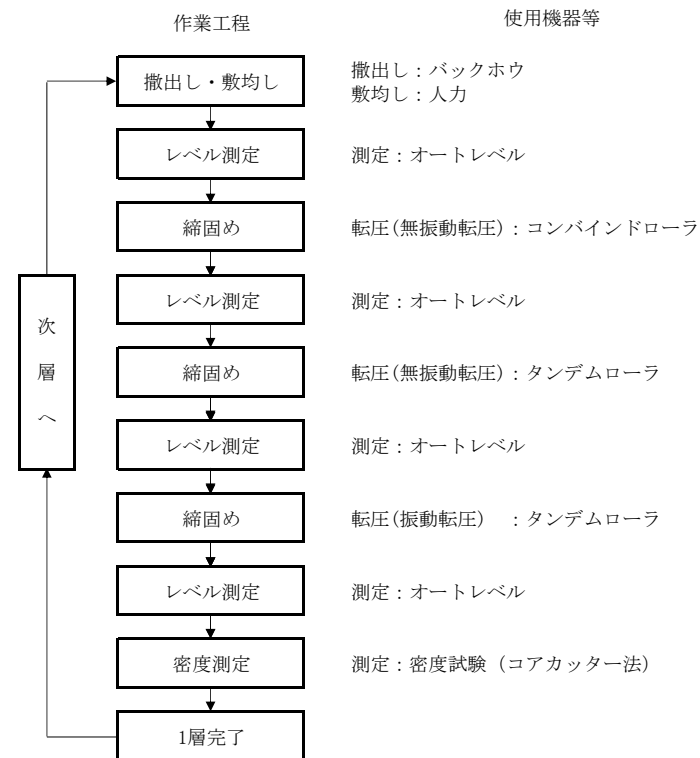


断面図



側面図

第7図 試験エリア



第8図 施工試験フロー

# 低透水性覆土の施工実現性について(9/18)

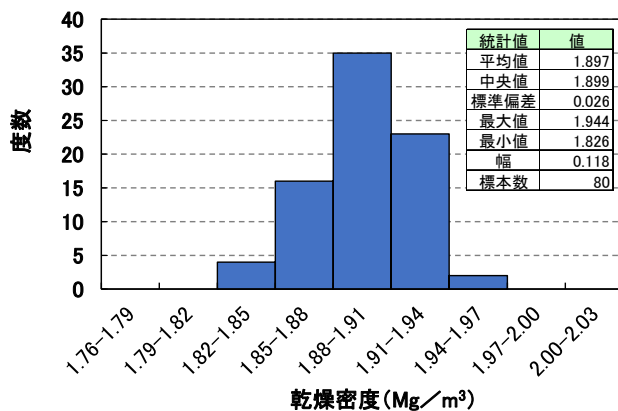
## b. 施工試験の結果

第5表 施工試験の結果及び概要一覧

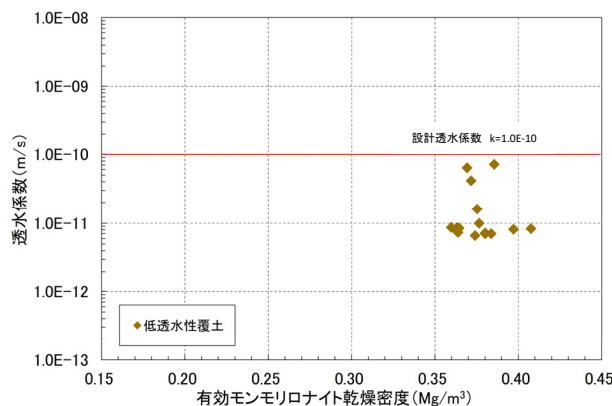
試験対象	透水係数 (m/s)	締固め度 (C法)	施工機械等
低透水性 覆土	$6.58 \times 10^{-12}$ ~ $7.11 \times 10^{-11}$ 【n=16】	90.8~96.6 (平均 94.3) 【n=80】	4t 級コンバインドローラ ・無振動転圧 2 往復 7t 級タンデムローラ ・無振動転圧 2 往復, 振動転圧 6 往復

- ✓ ベントナイト混合土施工後のサンプリングにより、乾燥密度の品質を確認
  - 乾燥密度: 設計値である $1.82 \text{ Mg/m}^3$ に対して最小値 $1.826 \text{ Mg/m}^3$ と設計値を確保した状態で施工できている。(第9図参照)
- ✓ 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
  - 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、ベントナイト混合土(低透水性覆土)の設計透水係数(巨視的透水係数として $1.0 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ 以下)を確保している。(第10図参照)
  - 既往の知見と同じような結果が得られている。(第11図参照)
- ✓ 巨視的透水係数を評価
  - 施工試験の結果(原位置サンプリング試料による透水試験の結果)より、Daganの巨視的透水係数の計算式(P11参照)を用いて巨視的透水係数を評価
  - 巨視的透水係数は $1.4 \times 10^{-11} \text{ m/s}$ であり、低透水性覆土の設計透水係数(巨視的透水係数として $1.0 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ 以下)を確保している。

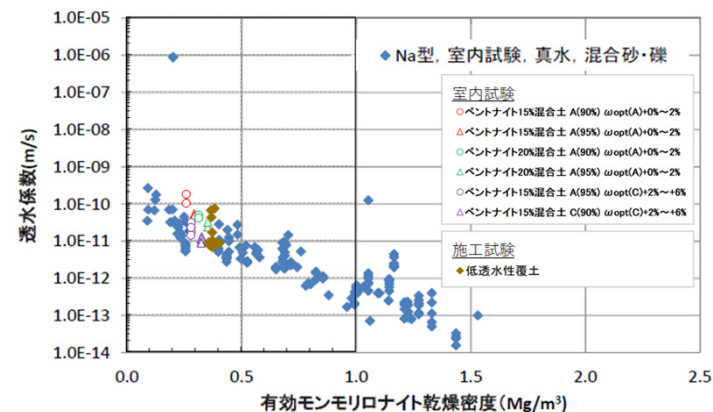
# 低透水性覆土の施工実現性について(10/18)



第9図 乾燥密度の頻度分布  
(全8層・80点)



第10図 有効モンモリロナイト乾燥密度  
と透水係数の関係



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

※施工試験のデータ等を加筆

## 【 Daganの巨視的透水係数の計算式】

$$k_{eff} = 10^{\lambda_k} \left( 1 + \frac{C^2 \zeta_k^2}{6} \right)$$

$k_{eff}$  : 巨視的透水係数

$\lambda_k$  : 透水係数の常用対数平均値

$C$  :  $\ln(10)$

$\zeta_k$  : 透水係数の常用対数標準偏差

# 低透水性覆土の施工実現性について(11/18)

## (4) ベントナイト混合率等のばらつきが透水係数に与える影響

- ✓ 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品質管理を行うことから、ベントナイト混合土製造時及び施工時の設計値を設定する項目(ベントナイト混合率, 含水比及び乾燥密度)のばらつきが、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
- ✓ 具体的には、ばらつきの範囲内で施工後の透水係数が大きくなる側に(保守側の評価となるように)ベントナイト混合率を変化させることにより、施工後の透水係数に与える影響を確認し、その影響が小さいことを確認

### 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。なお、下式に示す項目のうち、骨材混合率( $R_s$ )には、ベントナイト混合率が反映され、乾燥密度( $\rho_d$ )は、ベントナイト混合率及び初期含水比により変化する。



- ✓ 有効モンモリロナイト乾燥密度は、設計項目(設計値を設定する項目)を加味した指標であると言える。

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

ここに、

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

$\rho_{em}$  : 有効モンモリロナイト乾燥密度 (Mg/m<sup>3</sup>)

$\rho_b$  : 有効粘土乾燥密度 (Mg/m<sup>3</sup>)

$C_m$  : モンモリロナイト含有率 (%)

$\rho_{nm}$  : 随伴鉱物の土粒子密度 (Mg/m<sup>3</sup>)

$\rho_d$  : 乾燥密度 (Mg/m<sup>3</sup>)

$\rho_s$  : 骨材の土粒子密度 (Mg/m<sup>3</sup>)

$R_s$  : 骨材混合率 (%)

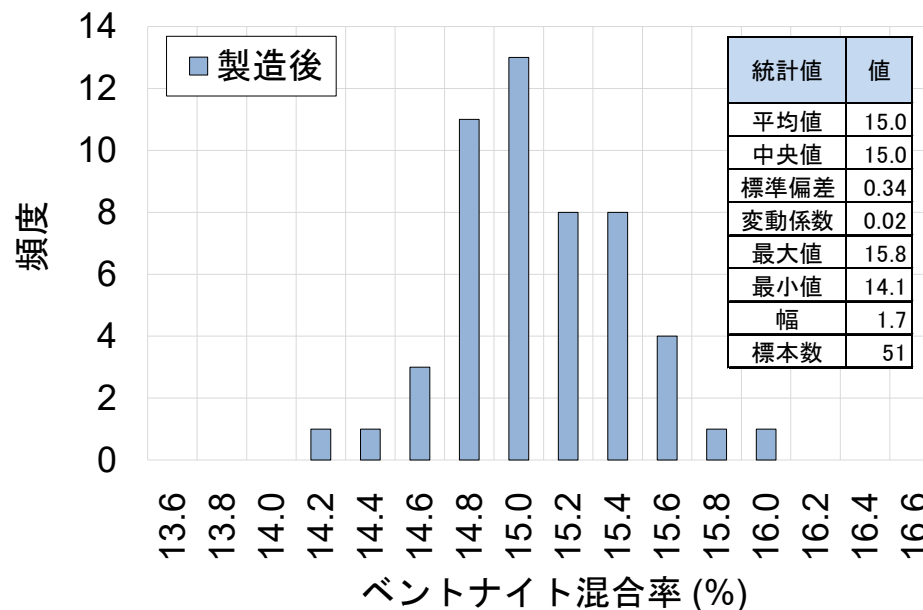
# 低透水性覆土の施工実現性について(12/18)

## b. ベントナイト混合率のばらつき

✓ ベントナイト混合率は、15%±1%で製造できていることから、ばらつきを保守的に+2%と仮定



✓ ベントナイト混合土の透水係数がより大きくなる側の混合率を、前述したばらつきの範囲内で考えると、混合率は-2%とした13%を想定し、その際の透水係数に与える影響を確認



第6図 製造後のベントナイト混合率のイメージ(想定)(再掲)



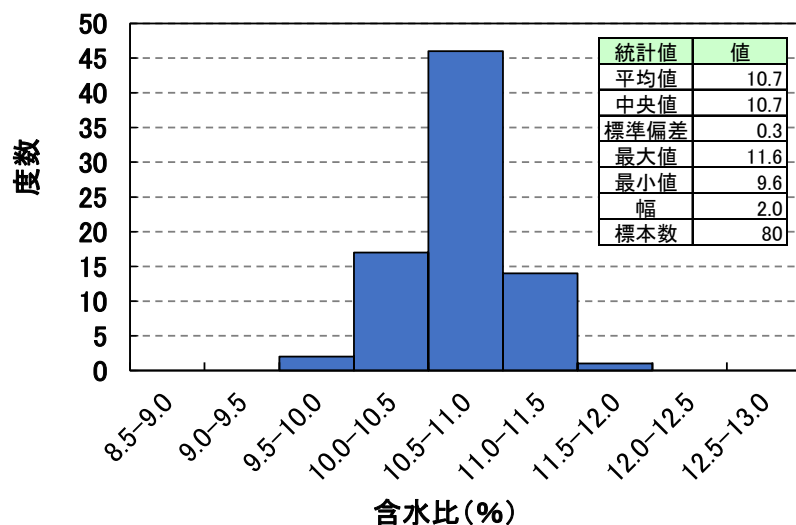
# 低透水性覆土の施工実現性について(13/18)

## c. 含水比及び密度のばらつき

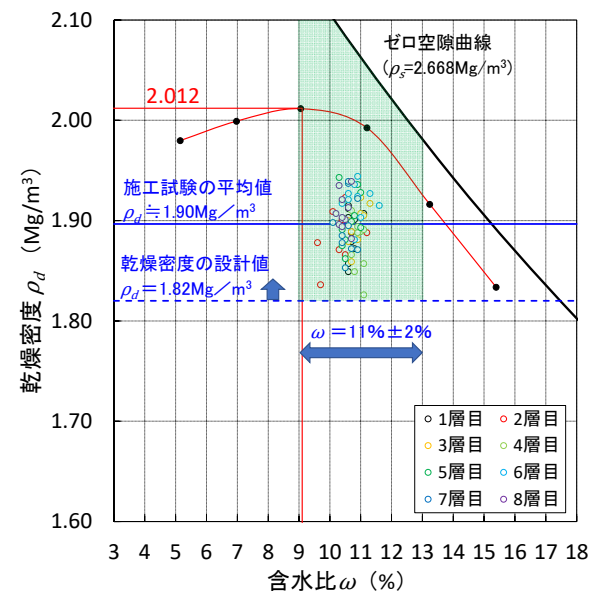
- ✓ 含水比は,  $11\% \pm 2\%$ 程度( $W_{opt} + 2\% \pm 2\%$ 程度)で製造できていることから, ばらつきを $\pm 2\%$ と仮定
- ✓ 乾燥密度は, 全8層・80点において $1.82 \text{ Mg/m}^3$ 以上 (第12図及び第13図参照)



- ✓ 初期含水比が $11\% \pm 2\%$ 程度( $W_{opt} + 2\% \pm 2\%$ 程度)の範囲内でばらつきが生じても, ベントナイト混合土の施工時の設計値である密度 $1.82 \text{ Mg/m}^3$ (C法締固め試験の最大乾燥密度 $\rho_{dmax} \times 90\%$ )を確保できると考えられる。



第12図 含水比の頻度分布(全8層・80点)



第13図 締固め試験結果と施工試験結果(全8層・80点)

# 低透水性覆土の施工実現性について(14/18)

## d. ばらつきが透水係数に与える影響

✓ 「b. ベントナイト混合率のばらつき」及び「c. 含水比及び密度のばらつき」の結果から、ばらつきとして、ベントナイト混合土の混合率13%を想定し、そのばらつきが透水係数に与える影響を確認



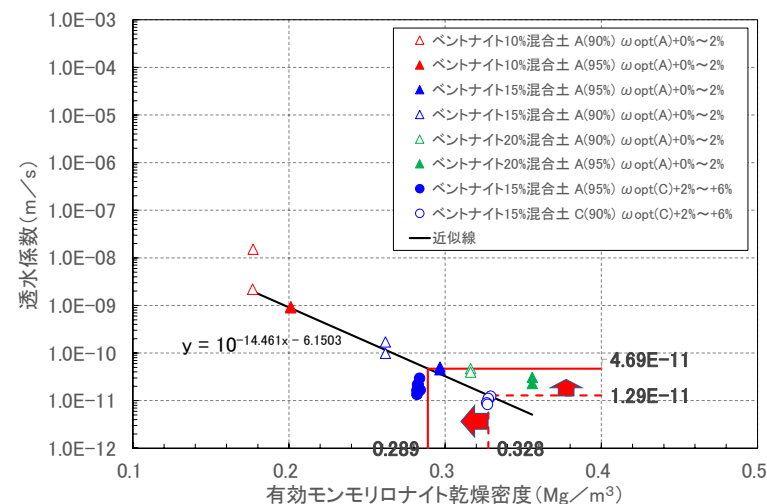
✓ ベントナイト混合土の混合率13%を想定した時に算定される有効モンモリロナイト乾燥密度と、施工試験で用いた材料と同じものを使用した透水係数の結果を有効モンモリロナイト乾燥密度と透水係数の関係を整理した結果から得られる近似式を用いて透水係数を推定



✓ 製造時のばらつき(ベントナイト混合土の混合率のばらつき)を考慮しても、透水係数の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(巨視的透水係数として $1.0 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ 以下)を確保できる。(第6表及び第14図参照)

第6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	ばらつきを考慮した推定値
透水係数		$1.29 \times 10^{-11} \text{ m/s}$	$4.69 \times 10^{-11} \text{ m/s}$
設計値／想定値	混合率	15%	13%
	初期含水比	11%	11% ± 2%
	乾燥密度	$1.82 \text{ Mg/m}^3$	$1.82 \text{ Mg/m}^3$
換算値	有効モンモリロナイト乾燥密度	$0.328 \text{ Mg/m}^3$	$0.289 \text{ Mg/m}^3$



第14図 ばらつきを考慮した場合の透水係数の変化

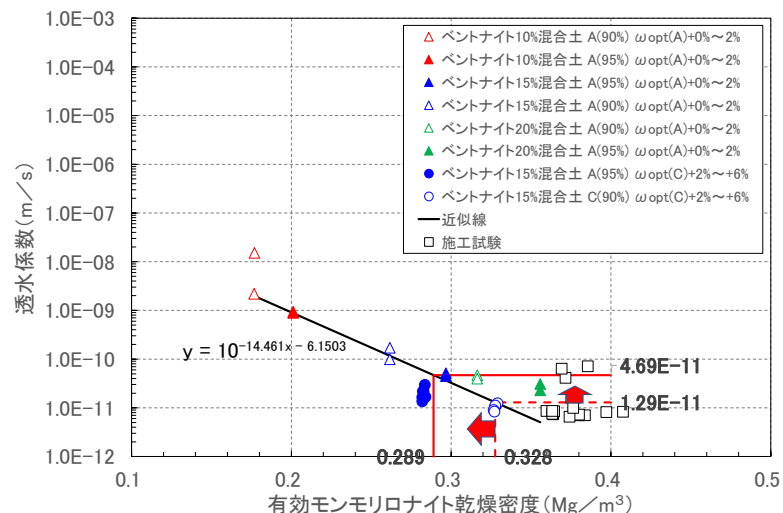
# 低透水性覆土の施工実現性について(15/18)

## (5) 代替指標による低透水性覆土の管理(品質管理)の適用性

- ✓ 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 $0.328 \text{ Mg/m}^3$ 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図参照)



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

## 低透水性覆土の施工実現性について(16/18)

### ➤ 覆土の施工時における品質管理(案)

- ✓ 第7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。

### (1) 完了時における品質管理項目

#### 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とする。

#### b. 原位置サンプリング試料による透水係数の確認

- ✓ 原位置サンプリング試料を用いた透水試験結果より、巨視的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。

## 低透水性覆土の施工実現性について(17/18)

### (2) 材料納入時、覆土材料製造時及び覆土施工時の品質管理項目

- ✓ 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。

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

ここに、

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

$\rho_{em}$  : 有効モンモリロナイト乾燥密度 (Mg/m<sup>3</sup>)

$\rho_b$  : 有効粘土乾燥密度 (Mg/m<sup>3</sup>)

$C_m$  : モンモリロナイト含有率 (%)

$\rho_{nm}$  : 随伴鉱物の土粒子密度 (Mg/m<sup>3</sup>)

$\rho_d$  : 乾燥密度 (Mg/m<sup>3</sup>)

$\rho_s$  : 骨材の土粒子密度 (Mg/m<sup>3</sup>)

$R_s$  : 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(ベントナイト混合率, メチレンブルー吸着量)」、「乾燥密度(現場密度)」及び「土粒子密度」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」の各段階において、第7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巨視的透水係数が所定の値(1.0×10<sup>-10</sup> 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、「ベントナイト混合土の製造」の確認結果より混合土は均質に製造できていることから、第7表における覆土施工時の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。

# 低透水性覆土の施工実現性について(18/18)

## 第7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	ミルシート確認	—
		(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以上	メチレンブルー吸着試験	J I S Z 2451:2019
	購入砂	(1)-③	基本物理特性 (粒度分布等)	所定の粒度分布等であること	粒度試験	J I S A 1204:2020 J G S 0051-2020
(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 ※サンプリング試料において一定のベントナイト混合率であることを確認	細粒分含有試験	J I S A 1223:2009
(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 RI 測定	J I S A 1214:2013 J G S 1614-2012
(4) 完了確認 	混合土	(4)-①	透水係数	所定の透水係数	一軸透水試験	J G S 0312-2018
				所定のモンモリロナイト乾燥密度	有効モンモリロナイト乾燥密度を算定	—