

## 研究成果報告書

研究開発課題名	ベントナイト系遮水シートを用いたため池等農業水利施設の遮水技術
研究総括者	株式会社ケイズラブ 代表取締役 河内 義文
研究開発組合	株式会社ケイズラブ 株式会社ボルクレイ・ジャパン
試験研究機関	国立大学法人山口大学

## 1 事業の実施内容

## 1. 1 事業の背景及び目的

ため池は農業用の水源としての貯水施設で、国内において、約21万箇所あるが、老朽化により水の確保が困難となり、改修を必要とする施設も多くある。

通常、老朽ため池の改修方法としては、刃金土による前刃金工法が多く適用されている。しかしながら近年、遮水性の高い良質な刃金土を施工現場近傍で確保することが困難な場合もあり、遮水シートやアスファルト、鋼板を使用した表面遮水工法が採用される場合も多い。表面遮水工法の場合、極めて高い遮水性能を発揮することが可能であるが、施工方法には熟練度を要する。また覆土がないことから、落水時に堤体内の浸透水が速やかに排除されずに上流のり面が膨張しブロック張工等構造物がすべり落ちるなど問題点もある。また、遮水工が露出しているため材料の紫外線などによる劣化による破損リスクも懸念される。

ベントナイト系遮水シートは、天然粘土鉱物であるベントナイトを2枚の不織布および織布のジオテキスタイルで挟みニードルパンチにより固定した遮水材料であり、刃金土と同様に覆土の下に施工される。施工方法は重ね合わせて敷設を行うのみで、熟練技術は不要である。ベントナイトは優れた吸水・膨潤能力があるため、万が一遮水シートが破損した場合でも、自己修復作用が期待でき、また天然鉱物であるため劣化がなく安定しているため、周辺環境との調和も期待できる。ベントナイト系遮水シートは、老朽ため池の改修や新設ため池の遮水材として既に多く使用されているが、土地改良事業設計指針「ため池整備」p.154に“ベントナイト系材料の場合は、せん断応力が働く場合の強度が期待できないことから、鉛直荷重のみが作用する場所に使用する等、設計時に十分考慮する必要がある”とあるように、法面での使用時には覆土材料の剥落や、ベントナイト吸水時のシート自身の滑りが懸念されることもあるが、法面部の安定性に関して明確に示す事例は非常に少ない。

本事業の目的は、ベントナイト系遮水シートの法面部における挙動を明確にし、設計および施工時の基本的な指針を作成し、農業用水の安定的確保に必要なため池施設のより経済的な遮水工法を提案することである。

## 1. 2 事業の内容及び実施方法

## (1) 室内実験：覆土材料およびベントナイト系遮水シートの一面せん断試験

ベントナイト系遮水シートの最低強度を求めるために、ニードルパンチを外した状態で一面せん断試験を実施した。ベントナイト系遮水シート-覆土間のせん断試験および初期含水比を変化させたベントナイト系遮水シートの一面せん断試験を行い、強度定数（粘着力 $c$ 、せん断抵抗角 $\phi$ ）を求めた。比較としてベントナイト単体-覆土間の一面せん断試験も実施し、安全性の比較検討を行った。

## (2) 実証実験：ベントナイト系遮水シートを用いた模擬堤体における現場せん断試験

敷設角度を $\alpha=45^\circ \sim 35^\circ$ に設定し、製品状態のベントナイト系遮水シートを挟んだ盛土を造成し、約6か月間湛水後に現場せん断試験実施した。

## (3) 模擬実験：ため池堤体の遮水構造を変化させた地震の影響評価

製品状態のベントナイト系遮水シートを敷設した模擬堤体を一定時間浸水させ、落水後模擬堤体を加振させ、その変形挙動を観察した。

## (4) ベントナイト系遮水シートの設計・施工基準の作成

(1)～(3)の室内および実証実験をもとに、ため池堤体へベントナイト系シートを敷設する際の設計と施工の基本指針を作成する。

(1)～(3)の試験結果が示すものとして以下表-1にまとめる。

表-1 試験結果が示すもの

	ベントナイト系遮水シート ベントナイト固定の有無	想定現場状況
室内一面せん断試験	無	・ニードルパンチが外れた際の状況 (最低強度の状態を想定) →ベントナイト系遮水シートの大変形状況
現場せん断試験	有(製品状態)	・実ため池堤体敷設現場状況 →ベントナイト系遮水シートの小変形状況
振動台実験	有(製品状態)	・実ため池堤体敷設現場状況 →ベントナイト系遮水シートの小変形状況

## 1. 3 事業着手時に想定した技術的問題点への対応

表-2 技術的問題点と対応策

技術的問題点	対応
模擬斜面を構築し遮水シートのせん断抵抗角度 $\phi$ を求めたところ、 $27.9^\circ$ であった。また比較で行った室内・一面せん断試験結果で求めたせん断抵抗角度 $\phi$ は $35.27^\circ$ であることが確認されており、その結果に差がある。過去の自主実験では、覆土・基盤・遮水シートの水分状況などを考慮していなかった。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・室内試験においては事前膨潤させた試料を使用</li> <li>・実証実験においても、模擬堤体を造成した後に半年間冠水させ水和させた後に現場せん断試験を実施した。</li> </ul>
また過去にベントナイト系遮水材に関する試験は行われているものの、比較試験は実施されていない。	・ベントナイト系遮水シートとベントナイト単体の比較を室内一面せん断試験と実証実験にて実施した。

## 1. 4 事業の実施体制

## (1) 研究開発組合内の役割分担および試験研究機関と研究開発組合の役割分担

表-3と表-4に実施計画書にて報告している、本事業の室内試験および実証実験の計画内容及び実施体制となる。


表-3 本事業の室内試験実施計画と実施役割

試験および開発・検討内容	研究開発組合		試験研究機関
	ボルクレイ・ジャパン	ケイズラブ	山口大学
国内外のベントナイト系遮水シートのせん断に関わる文献調査	◎		
条件を変えた覆土およびベントナイト系遮水シートの一面せん断試験			◎
一面せん断試験結果解析および安定計算		○	◎
可視式の振動実験による模擬堤体の地震時挙動観察と評価		○	◎
地震時の安定計算方法の検討		◎	○
ベントナイト系遮水シート法面施工時のコスト試算を含めた設計施工の基本指針の作成	◎		



表-6 実証実験の工程表

実証実験	主な業務実施機関	工程											
		H23 年度				H24 年度				H25 年度			
H23 年度作成設計基準により 法面勾配を変化させた模擬断面の造 成	ボルクレイ・ジャパン												
模擬断面におけるベントナイト系遮 水シート上の斜面覆土の滑りに関す る現場計測（経時変化）および解析	山口大学 ケイズラブ												
模擬断面におけるベントナイト系遮 水シートのせん断応力の現場計測 （経時変化）および解析	山口大学 ケイズラブ												
実証実験・および室内試験の結果比 較による安定解析および評価	ケイズラブ												
ベントナイト系遮水シート法面施工 設計時のシステム構築	◎ケイズラブ ○ボルクレイ・ジャパン												

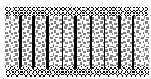

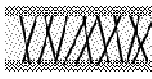


※  : 計画  : 実績

1. 6 研究開発の概要、結果、課題等

(1) 対象としたベントナイト系遮水シートの資材について

ベントナイト系遮水シートとは、遮水性の高い粘土鉱物であるナトリウム型ベントナイトをシート状に加工した、1980年代にアメリカ合衆国で最終処分場の樹脂シートのバックアップ材として開発された遮水資材である。主な種類とその性能を表-7に示す。

表-7 ベントナイト系遮水シートの種類

項目	ベントナイト拘束型		ベントナイト非拘束型		
	ニードルパンチ型 (粒状ベントナイト)		ニードルパンチ型 (粉末ベントナイト)	一次膨潤型	シート複合型
構造					
	①PP不織布 ②粒状ベントナイト ③PP織布	①HDPEシート ②PP不織布 ③粒状ベントナイト ④PP織布	①PP不織布 (粉末ベントナイト入り) ②粉末状ベントナイト ③PP織布	①PP不織布 ②一次膨潤ベントナイト ③PP織布	①HDPEシート ②粒状ベントナイト
概要	粒状ベントナイトを強度の高いPP不織布と排水性のあるPP織布に挟み、ニードルパンチで拘束した複合型の製品。	粒状ベントナイトを強度の高いPP不織布と排水性のあるPP織布に挟み、ニードルパンチで拘束をし、さらに柔軟性のある高密度ポリエチレンシートを接着した製品。	粉末状ベントナイトを強度の高いPP不織布と排水性のあるPP織布に挟み、ニードルパンチで拘束をした補強型の製品。	一次膨潤させたベントナイトを強度の高いPP不織布と排水性のあるPP織布に挟んだ製品。	高密度ポリエチレンシートに粒状ベントナイトを接着剤にて圧着接合させた製品。
使用ベントナイト	高品質のNa型ベントナイトを使用している。天然の無機物質であるため周辺に影響を及ぼさない安全な材料である。経年劣化も無い。				
透水係数	各製品の透水係数規格が、 $10^{-11} \sim 10^{-12}$ (m/sec)以下であり、高い遮水性を持っている。				

いずれもジオテキスタイル（不織布や織布）やジオメンブレン（遮水シート）の基材にベントナイトが挟まれているもしくは塗布されて構造となっている。本事業でもちいた種類は、2枚の基布（不織布、織布）の間に粒状ベントナイトを挟み、ニードルパンチ製法（多数の針でこれらをうち、不織布側の繊維を織布側に引き上げ固定）にて補強固定している資材を用いた。他の製品については、自社との競合となるために、自社製品のみにつき試験に供することとした。

(2) ニードルパンチ型ベントナイト系遮水シートのせん断強度定数について

ベントナイト系遮水シートの水浸させた状態でのせん断については、国内外で試験されているが、含水比との関連付けさせたものの事例は無い。今泉らの研究によると、ベントナイト系遮水シートはニードルパンチに場合水浸時間と内部摩擦角の関係が無く、おおよそ20~30°の間を推移しており補強繊維にせん断抵抗は依存しているとしている。

また、ニードルパンチ型の一面せん断試験は製造元 CETCO でも実施されており、ニードルパンチが施されている状態で、一面せん断試験（ASTM D 5321 に準拠：試験イメージ：図-1）を垂直応力 2~24kPa（240~2400 kgf/m<sup>2</sup>）と変化させて測定した。

乾燥状態の製品と併せ、湿潤状態の製品については、2 kPa の垂直応力をかけた状態で 3 日間水中に浸したものを供試体とし、測定を行った。試験結果よりせん断強さと垂直応力の関係（破壊線）を図-2 に示すように、内部摩擦角度は  $57^\circ$  とベントナイトが水浸しているのにも関わらず、高い値を示している事が確認されているが、含水比の変化による影響、基材と土砂の摩擦等は報告されていない。

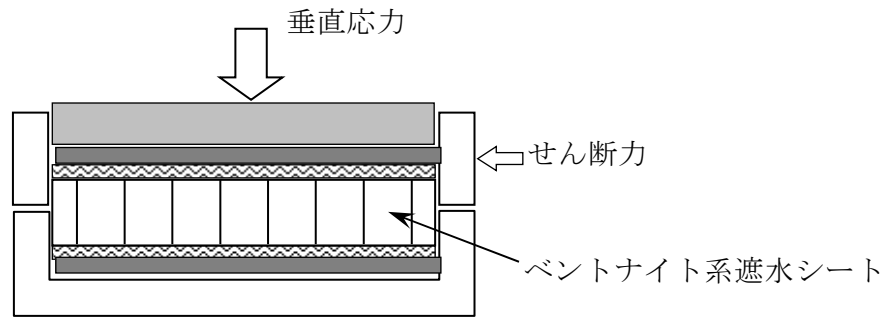


図-1 一面せん断による試験断面図

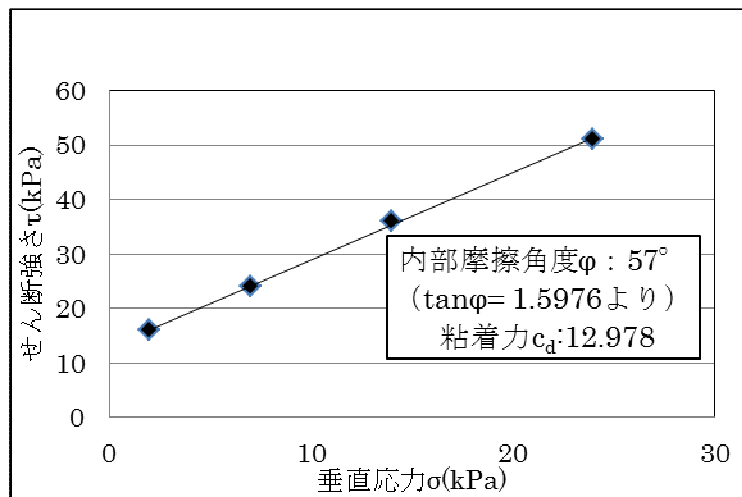


図-2 3 日水浸状態のベントナイト系遮水シートの破壊線 12)

(3) ベントナイト系遮水シート的一面せん断試験の結果

本事業においては、安全性も考慮すると同時に、試験時の簡易性を考慮し、ベントナイト系遮水シートのニードルパンチを外した状態にて試験を実施し、ベントナイトの内部摩擦角とした。また、シートと覆土間の摩擦を評価するために、織布および不織布と覆土間のせん断強度を測定した。表-8 に本試験で測定したせん断断面のケースを示す。

用いた土試料は山口県内のため池で採取したまさ土を 9.5mm ふるいにかけて、土中の根系を除去したものである。表-9 にその物理特性を示す。本試験で使したまさ土は標準的なまさ土を使用した。なお表-10 に使用したベントナイトの物性を示す。

表-8 せん断試験のケース

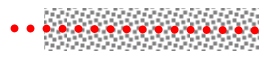
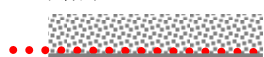
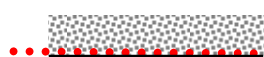
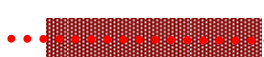


	せん断場所イメージ	せん断条件
①	粒状ベントナイト単体 (内部摩擦抵抗角)  せん断面	<ul style="list-style-type: none"> <li>水分：乾燥/水浸状態 (0~7 日水浸)</li> <li>垂直応力：10~100kPa</li> </ul>
②	ベントナイト-不織布  せん断面	<ul style="list-style-type: none"> <li>水分：乾燥/水浸状態 (0~7 日水浸)</li> <li>垂直応力：10~100kPa</li> </ul>
③	④ ベントナイト-織布  せん断面	<ul style="list-style-type: none"> <li>水分：乾燥/水浸状態 (0~7 日水浸)</li> <li>垂直応力：10~100kPa</li> </ul>
⑤	まさ土 (内部摩擦抵抗角)  せん断面	<ul style="list-style-type: none"> <li>水分：1 日水浸</li> <li>垂直応力：10~100kPa</li> </ul>
⑥	まさ土-不織布  せん断面	<ul style="list-style-type: none"> <li>水分：1 日水浸</li> <li>垂直応力：10~100kPa</li> </ul>
⑦	まさ土-織布  せん断面	<ul style="list-style-type: none"> <li>水分：1 日水浸</li> <li>垂直応力：10~100kPa</li> </ul>

表-9 9.5mm 通過分のまさ土の物理特性

試料名	まさ土
土粒子の密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.642
液性限界 $w_L$ (%)	39.7
塑性限界 $w_p$ (%)	NP
礫分 (%)	30.5
砂分 (%)	64.5
細粒分 (%)	5.0
土質分類	SG-F
最適含水比 $w_{opt}$ (%)	13.0
最大乾燥密度 $\rho_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.800

表-10 ベントナイトの物理特性と初期状態

試料名	ベントナイト
自然含水比 (%)	13.4
土粒子の密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.746
液性限界 $w_L$ (%)	511.0
塑性限界 $w_p$ (%)	44.2
礫分 (%)	5.0
砂分 (%)	80.0
細粒分 (%)	15.0
初期含水比 (%)	15.0
初期乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )	1.248



試験は一面せん断試験機を用い、せん断強さの測定を行った。供試体は各々直径 6cm、高さ 2cm(不織布・織布の場合は 1cm)に調整して試験を実施した。

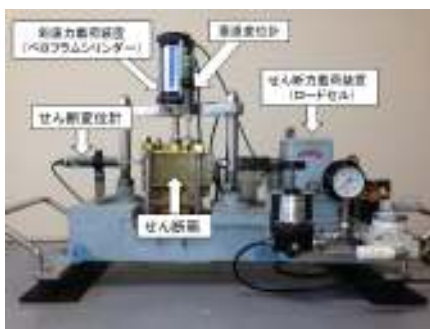


写真-1 一面せん断試験機

各せん断試験にて実施した試験ケースと結果を表-11 に示すように、各々の条件における強度定数を明らかにした。

表-11 農水省官民連携事業において実施したせん断試験ケースと結果

ケース せん断場所イメージ	水浸 条件	垂直応力 (kPa)	終了時 平均含水比	結果(強度定数)		せん断強度 $\sigma = 10\text{kPa}$ 時
				$\phi$ (°)	c(kPa)	
⑧ ベントナイト単体  せん断面	0~7 日 水浸	0 日水浸 50~200	13.8	51.5	5.5	18.1
		1 日水浸 50~100	56.8	40.6	36.7	45.3
		7 日水浸 10~100	76.4	14.6	16.6	19.2
⑨ ベントナイト-不織布  せん断面	1~7 日 水浸	1 日水浸 50~100	43.9	33.7	17.4	24.1
		7 日水浸 10~100	84.6	19.9	11.4	15.0
⑩ ベントナイト-織布  せん断面	1~7 日 水浸	1 日水浸 50~100	26.5	32.2	20.0	26.3
		7 日水浸 10~100	80.8	20.7	8.2	12.0
⑪ まさ土単体  せん断面	1 日 水浸	10~100	28.23	46.5	7.5	18.0
⑫ まさ土-不織布  せん断面	1 日 水浸	10~100	26.6	39.7	14.4	22.7
⑬ まさ土-織布  せん断面	1 日 水浸	10~100	27.8	36.0	20.8	28.1

堤体土とベントナイトおよび各土層間と遮水シートの境界面でのせん断強さを圧密定圧一面せん断試験により求め、その結果をもとに安定解析を実施し、遮水シートを敷設したときのため池堤体のすべりに対する安定度評価を行った。以下に結果をまとめる。

- ① まさ土と織布および不織布シート間の境界面でのせん断強さはまさ土単体よりも低下する。また、基布の違いによってせん断強さに差がみられる。
- ② ベントナイト単体において、水浸に伴う膨潤量の増加によって、せん断強さは低下する。
- ③ 1日水浸させたベントナイトと織布および不織布シートの間でのせん断強さは、ベントナイト単体よりも低い。ただし、このときシートの違いによるせん断強さの差はない。
- ④ 7日水浸させたベントナイトと織布および不織布シート間の境界面のせん断強さはともに低く、かつ、ベントナイト単体の強度も同様に低くなる。なお、三者の強度特性はほぼ同じである。
- ⑤ 安全率が最も高いのはまさ土とシート（織布）との境界面であり、安全率が最も低いのは7日水浸させたベントナイトとシート（織布）との境界面のケースであった。

(4) 実証実験：ベントナイト系遮水シートの現場せん断試験について

現場実証実験では、図-3に示す様な断面、表-12に示す敷設角度および遮水材にて、模擬堤体を山口市嘉川白河原ため池内にて造成した。6か月間湛水後に、ポンプで排水し、その後現場せん断試験を実施した。なお、すべり変形が把握できる歪ゲージをベントナイト系遮水シート（ボルクレイ・マット）およびペースト状ベントナイトの遮水材と覆土材の間に予め挿入している。築堤後の状況を写真-2に、湛水後の状況を写真-3に示す。

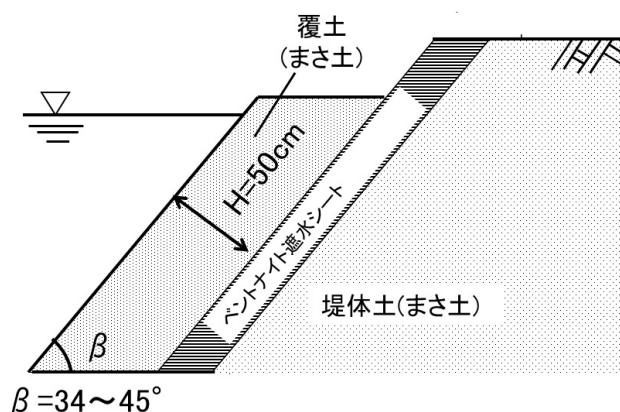


図-3 実証実験の模擬堤体断面

表-12 実験盛土の種類

	勾配（実測角度）	遮水材の種類	覆土勾配
ケース1	1:1.0(46°)	ボルクレイ・マット	1:0.5
ケース2	1:1.2(40°)	ボルクレイ・マット	
		ペースト状ベントナイト	
ケース3	1:1.5(34°)	ボルクレイ・マット	

※築堤時の覆土の締固度は90%以上にて密度管理を実施した。

覆土の施工時は、コア用土としての仕様に基づき、25cm撒出し厚とし、4tの振動ローラーで6回転圧とした。



写真-2 ベントナイト系遮水シート敷設後状況

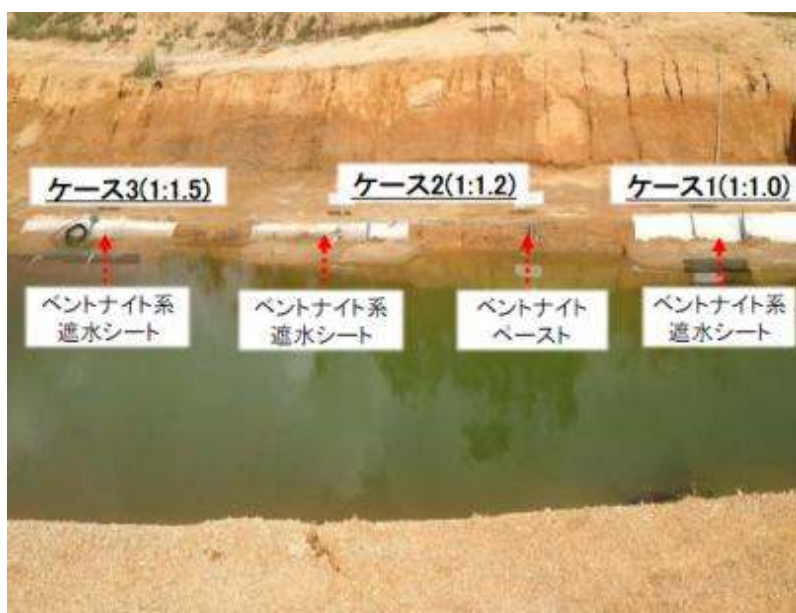


写真-3 湛水状況

6か月湛水を行ったのちに排水し、現場せん断試験を実施した。ベントナイト系遮水シート敷設箇所については覆土の変形等は生じていないことが確認されており、ベントナイトペーストのみが塗布された箇所は覆土の表面に亀裂が生じていることが観察されている。

写真-4に落水後の堤体全体状況と、写真-5にベントナイトペーストを塗布したケースの覆土のクラックについて示す。



写真-4 6か月湛水後に落水をさせた後の状況



写真-5 ベントナイトペーストを塗布した覆土の落水後状況

落水後、模擬堤体天端部を1.0tのバックホウのバケットで載荷した（写真-6）。載荷重を荷重計で、堤体の変形は予め設置している歪ゲージで計測を実施した（写真-7）。

計測した載荷データと歪量の関係から、覆土に荷重を増大させた際、歪量の増大が観測された荷重を覆土が変形しはじめた時点をも安全率  $F_s=1.0$  とし、以下の力学的釣合式にて安定検討を行った。各々のケースについての  $c \cdot \tan \phi$  の関係を図-4 に示す。

$$F_s = \{ (T + W) \times \cos \alpha \times \tan \phi + c \times A \} / (T + W) \sin \alpha$$

3 ケースが平行状態になっており、斜度が高いケースほど強度が強い傾向になっている。これは現場実証実験から直接せん断状態にすることが非常に困難であることを示している。本実証実験からは現場実験の3 ケースの結果により、室内試験で実施したベントナイトのみの一面せん断試験から得られた強度定数  $\phi 14.6^\circ$  を用い図-4 から求めた粘着力から、ベントナイトシートは  $\phi = 14.6^\circ$  ,  $c = 3.3$  (kN/m<sup>2</sup>) として計算に供し、安全側の整理とすることとする。





写真-6 現場せん断状況



写真-7 現場せん断状況

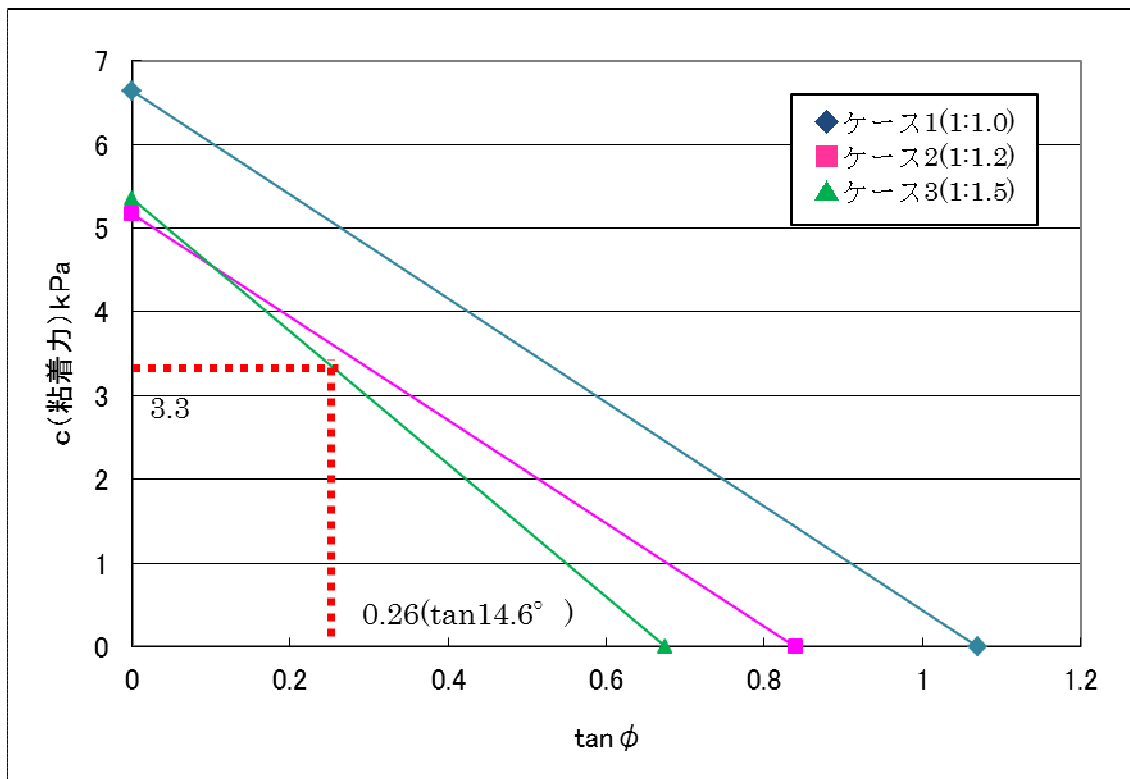


図-4 式①②③より得られた  $c$ - $\tan \phi$  の関係図

表-13 6か月湛水後の覆土およびベントナイト（シート中）の含水比

	シートの含水比 (%) (ベントナイト)	覆土の含水比 (%)
ケース1	180.4	24.3
ケース2b	145.7	19.8
ケース3	151.9	20.1

(初期含水比は 覆土 : 13.3% 、ベントナイト (シート中) : 約18.5%)

落水後の覆土及びシート中のベントナイトの含水比測定結果を表-13 に示す。

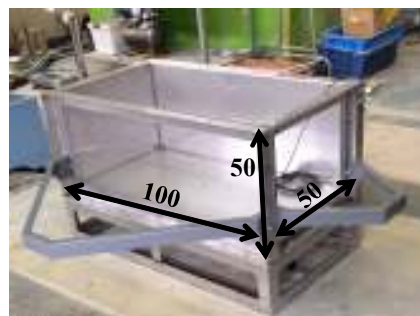
シート中のベントナイトは吸水し、含水比が上昇しているものの現場試験での変位量は非常に小さく、シート部分の変位が発生しても盛土には目視による変形は現れていない。このことは、ベントナイトを織布、不織布で挟み、しかもニードルパンチする構造は、ベントナイト自体のせん断破壊の影響を緩和する。このような構造のシートを用いれば、ベントナイトの強度による微小な変形はあるものの、堤体の安定に影響する変形に至ることはない利点が明らかとなった。

#### (5) 模擬実験：ため池堤体の遮水構造を変化させた地震の影響評価

本実験は地震時における堤体中に敷設されたベントナイト系遮水シートの挙動を把握する目的で実施した。用いた土試料は山口県山口市嘉川のため池から採取したまさ土を 9.5mm ふるいにかけて、土中の根系を除去したものである。表-14 にその物理特性を示す。本試験で使用したまさ土は標準的な物理特性を有するまさ土である。また試験に用いた土槽を写真-8 に示す。

表-14 まさ土の物理的特性

試料名	まさ土
土粒子の密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.642
礫分 (%)	30.5
砂分 (%)	64.5
細粒分 (%)	5.0
土質分類	SG-F
最適含水比 $w_{opt}$ (%)	13.0
最大乾燥密度 $\rho_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.800



単位:cm

写真-8 振動台土槽

土槽の底面にまさ土を高さ 5cm までになるよう突き固め、ため池堤体となる盛土の突き固めおよび成型を行い、盛土の法面にベントナイト系遮水シートを敷設しシートの上部は、ピンによって盛土に固定した。シートの敷設角度は 45°、50°、60° と変化させた。その後、覆土を設置することで遮水シートを敷設した堤体の模型を作製した。いずれもまさ土の最適含水比  $w_{opt}=13.0\%$  の下、4kg ランマーを使用し締固め度が 90% となるよう突き固めた。実際の現場におけるため池の寸法形状は様々であるが、本実験における模型堤体のスケールは実物の 1/10 程度とした。堤体の作製完了後、堤体の約半分の高さまで水浸させ、1 日以上最大 6 日間放置した。模型の断面図を図-5 に、完成後の模型を写真-9 に示す。

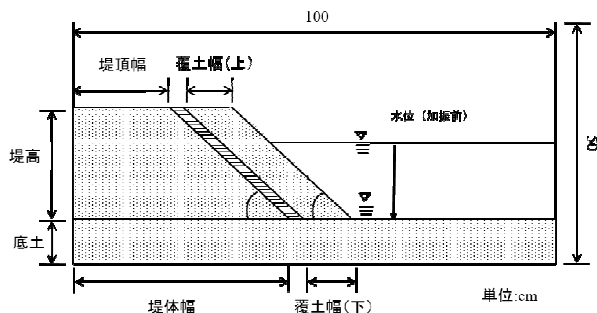


図-5 模型断面図



写真-9 完成後の模型

その後、加振を行う前に土層内の水を排出し、振動台を一方向に揺らすことで、模型堤体に

振動を与えた。加振方法は堤体の天端（上面）あるいは法先に明らかな変状が生じるまで、水平加速度を 200/300/400/500gal と段階的に増加させた各水平加速度において、それぞれ加振回数が 100 回に達した時点で加振を終了した。なお、加振波形は正弦波を用いた。また、周波数は土構造物に最も影響を及ぼすといわれる 3Hz とした。加振前の堤体の寸法を測定することで、堤体の変状を観察した。測定箇所は堤体上面右側および左側、堤体側面 2 か所の計 4 か所である。写真-9、写真-10 に測定箇所をそれぞれ示す。

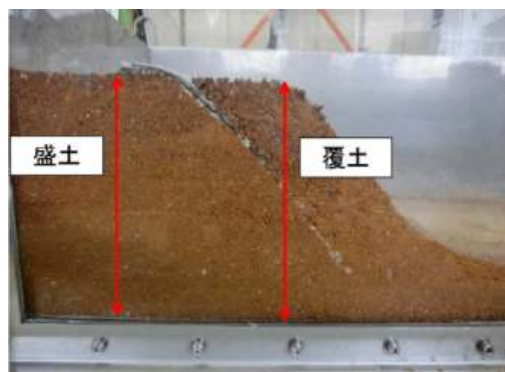


写真-9 測定箇所

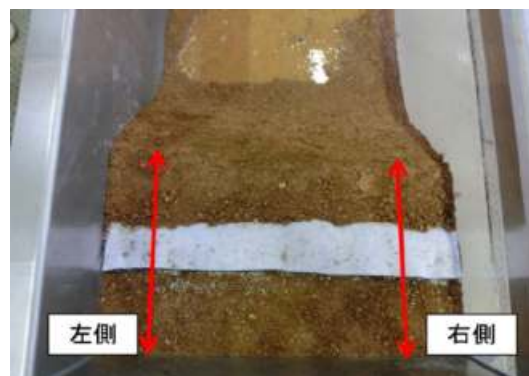


写真-10 測定箇所

試験ケースとその結果を以下表-15 に示すように、ケース①～③においては加振後堤体の変形や亀裂などの形状変化は無かった。なお、敷設角がもっとも大きく湛水日数が本実験で最も長いケース④については、200gal(震度 5 強程度)加振後天端に亀裂が生じ、その後 500gal(震度 7 以上)まで加振を続けても形状変化や亀裂が増すこともなかった。図-6 に加速度を変化させ振動を与えた際の堤長幅の変位の関係を示す。

表-15 振動台実験 各ケースの結果

	湛水 日数	覆土厚 (cm)	マット 敷設角	加速度 (gal)	震度	加振 回数	結果	含水比(%)	
								ベントナイト (シート中)	覆土
①	1	10	45	200～400	5 強～6 強	50	形状変化無	137.1	-
②	1	10	45	200～400	5 強～6 強	100	形状変化無	-	-
③	1	9	50	200～400	5 強～6 強	100	形状変化無	-	-
④	6	6	60	200～500	5 強～7	100	形状変化有	179.8	19.1

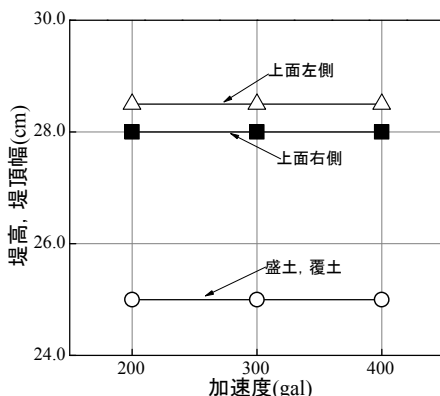


図-6 各加速度による加振後の堤体形状変化

(6) 設計水平震度を用いたため池堤体の地震時安定計算

図-5 に示した断面に対して、堤体の平面すべりに対する地震時の安全率を算出した。模型堤体と図-5 の断面図とでは堤体上部に固定した遮水シートの傾斜が異なっている。しかし、すべり面は実験において亀裂が生じた覆土とシート(不織布)との境界面と設定したため、シート上部の傾斜の違いは安定解析に影響していない。盛土の覆土厚は  $H=1.0\text{m}$ 、傾斜角は  $\beta=40^\circ / 45^\circ / 60^\circ$  の 3 通りとし、まさ土の最大乾燥密度  $\rho_{\text{dmax}}=1.800\text{g/cm}^3$ 、土粒子の密度  $\rho_s=2.642\text{g/cm}^3$  から、間隙比を算出し、水中単位体積重量  $\gamma'=11\text{kN/m}^3$  を安定計算に用いた。また、実際のため池堤体内部に発生する間隙水圧およびシート内部のベントナイトの厚さとその重量は考慮しないこととし、安全率の算出は以下の式を用いた。

$$F_s = \frac{c_d + (\gamma' H \cos^2 \beta - k_h \gamma' H \cos \beta \sin \beta) \tan \phi_d}{\gamma' H \cos \beta \sin \beta + k_h H \cos \beta^2}$$

なお、みかけの粘着力  $c_d$  および内部摩擦角  $\phi_d$  は、別途実施した一面せん断試験(水浸条件)から得られた  $c_d=14.4\text{kpa}$ 、 $\phi_d=36.7^\circ$  を計算に用いた。今回の計算では地震によって強度定数は変化しないものと仮定した。図-7 に設計震度  $k_h$  と安全率  $F_s$  の関係図を示す。同図より、 $k_h=0.5$  すなわち約  $500\text{gal}$  の加速度を受けても安全率は 2 を上回っていることが分かる。これは、本実験では、模型堤体のサイズが小さいため、 $c_d$  の影響が大きく出ているためと考えられる。なお、本実験で使用した遮水シートは模型実験用に調整されていない。そのため、シートの有無が堤体の安定性に及ぼす影響を調べる必要がある。



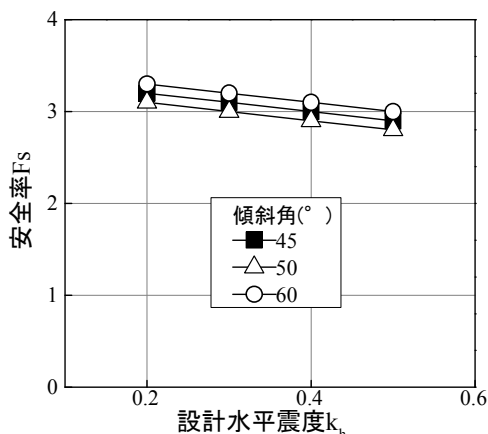


図-7 地震時の安全率計算結果

## 2 事業の成果

### 1. 1 成果の内容

#### (1) ベントナイト系遮水シートの設計時の強度定数の設定

本事業では、ベントナイト系遮水シートをため池堤体に用いる際の設計強度定数（せん断抵抗角  $\phi$ 、粘着力  $c$ ）を設定するために室内および現場におけるせん断試験を実施した。

室内試験では最低強度定数を得るためにシートに施されているニードルパンチを外した状態で試験に供した。

実施試験	強度定数
室内：一面せん断試験	$\phi : 14.6^\circ$ $c : 16.6\text{kPa}$
現場せん断試験	$\phi : 14.6^\circ$ $c : 3.3\text{kPa}^*$

\*現場せん断試験で得られた  $c \cdot \tan \phi$  の関係図から、室内試験の最低強度定数  $\phi 14.6^\circ$  より粘着力  $c 3.3$  を以下式により算出した。

$$\tau f \text{ (せん断強さ)} = c \text{ (粘着力)} + \sigma \text{ (垂直応力)} * \tan \phi \text{ (内部摩擦角)}$$

#### (2) ベントナイト系遮水シートの振動台実験

模擬堤体（1/10 スケール）に製品ベントナイト系遮水シートを敷設し、水浸後、水平震度  $k_h 0.2 \sim 0.5$ （200~500gal）の振動を与えたところ、覆土等のすべり破壊は発生せず、覆土と遮水シートとの境界面にわずかな亀裂が生じるのみであった。

#### (3) ベントナイト系遮水シートの設計・施工基準の作成

ベントナイト系遮水シートに関して、①基本情報②設計時の安定性の検討方法③施工時に遮水性を確保する条件④施工上の留意点⑤他工法との比較他について含む項目を設計・施工基準（案）として作成した（別添）。

## 2. 2 目標の達成度

## (1) 成果から得られる効果

ベントナイト系遮水シートを、堤体遮水材である刃金土の代替として使用することが可能となり、リスク軽減・安全性向上・コスト削減ができる。

## (2) 従来技術との比較

## 1) 比較する従来技術

## 前刃金土工法

## 2) 従来技術に対する優位性

前刃金工法は、堤体の全面に、遮水性の高い粘性土（刃金土）を使い表面に保護盛土（抱土）を施工する方法（図-8）で、一般的に使用される止水工法であるが、近年現場付近での刃金土不足から、ベントナイト系遮水シート（図-9）への代替例が増えつつある。

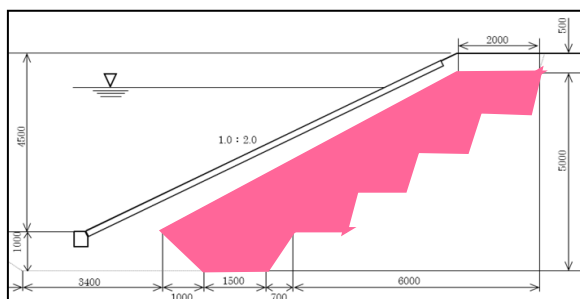


図-8 前刃金土工法（例）

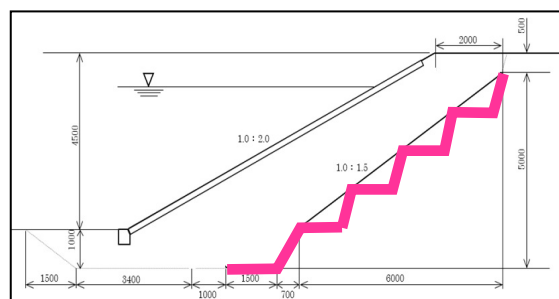


図-9 ベントナイト系遮水シート工法（例）

表-16 に前刃金土工法とベントナイト系遮水シート工法の経済性比較を、表-17 に施工時の比較を示す通り、

- ① 経済性：刃金土購入運搬距離が 10km 以上の場合、土砂輸送量、施工時の敷設・転圧手間が刃金土にはあるが、ベントナイト系遮水シートについては敷設時重ねの幅の管理のみで、刃金土のように施工時の締固め密度計測などの品質管理が無いいため、経済性はベントナイト系遮水シートのほうが高い。
- ② 工程：刃金土施工時は(1)基盤処理(2)土砂敷均し(3)土砂転圧・締固め(4)表面整形(5)品質管理（密度・透水係数など）の工程があるのに対し、ベントナイト系遮水シートは(1)基盤処理(2)シートの敷設(3)品質管理（重ね幅の確認のみ）とその工程は少ない。
- ③ 品質：刃金土の品質は、土砂の種類と品質などの事前選定を要するだけでなく、施工時の締固め状況によっても透水係数などの品質が異なってくるのに対し、ベントナイト系遮水シートは、工場で製造された最終製品であるため、現場における均一性の確認は必要無い。
- ④ 安全性：両材料とも天然無機土壌を主成分としているため、安全性には問題無い
- ⑤ 施工性：表-17 参照
- ⑥ 周辺環境への影響：両材料とも天然無機土壌を主成分としているため、堤体に使用することでの影響は無い。

表-16 前刃金土工法とベントナイト系遮水シート工法の経済比較  
(地方自治体様・設計会社様へのヒアリングおよび積算基準の価格参照)

工 種	①前刃金土工法 (刃金土採取運搬 20 km程度)				②ボルクレイ・マット工法 (遮水シート工法)			
	単 価	数 量	価 格	数 量	価 格	数 量	価 格	
旧堤体施工								
掘 削	380 円/m <sup>3</sup>	26.7 m <sup>3</sup>	10,146 円	26.7 m <sup>3</sup>	10,146 円			
土捨場 運搬～整地(必要な場合)	1,200 円/m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	0 円					
刃金土施工								
購入運搬 (価格は想定)	4,000 円/m <sup>3</sup>	15.3 m <sup>3</sup>	61,200 円					
敷均・転圧	550 円/m <sup>3</sup>	12.7 m <sup>3</sup>	6,985 円					
抱土施工								
敷均・転圧	550 円/m <sup>3</sup>	14.0 m <sup>3</sup>	7,700 円	26.7 m <sup>3</sup>	14,685 円			
ボルクレイ・マット施工								
材 料 費	2,900 円/m <sup>2</sup>			15.8 m <sup>2</sup>	45,820 円			
敷 設 費	700 円/m <sup>2</sup>			13.7 m <sup>2</sup>	9,590 円			
堤体幅1m当り直接工事費			86,031 円/m		80,241 円/m			
そ の 他								
土質調査・試験			要		不 要			
盛土管理費			要 (粒度、密度、透水性など)		不 要			
工 期			築堤 1～2ヵ月		敷設・覆土 1週間程度			
評 価			△		○			

ボルクレイ・マット工法は現場発生土を使用することができ、前刃金土工法と比較して施工管理が容易であり、工期短縮なども見込むことができる。

表-17 施工方法の比較

工法	①前刃金土工法	②ボルクレイ・マット工法
長所	<ul style="list-style-type: none"> <li>旧堤体を大きく掘削し、コア部も含めた改修を行う場合に適する。</li> <li>施工部分が大きい割にはコア部の間隙圧の消散が早い。</li> <li>古くからの実績がある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>旧堤体の掘削量が少なく、表土はぎ程度の土工で済む。</li> <li>現場発生土を覆土材として利用できる場合がある。</li> <li>特殊な技術を必要とせず、施工が容易である。</li> <li>工期短縮が計れる。</li> <li>遮水用土の選られない地域での実績は多い。</li> </ul>
短所	<ul style="list-style-type: none"> <li>大規模な土工が必要となる。</li> <li>不透水性の盛土が必要となる。</li> <li>コア部の施工は慎重に行う必要があり、(含水比調整、転圧など) 品質管理が難しい。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>堤体掘削後の下地にある木根等の突起物は取り除く必要がある。</li> </ul>

## 2. 3 成果の利用に当たっての適用範囲・留意点

- (1) 農業用ため池堤体遮水材として（新規・改修）
- (2) 河川堤体遮水材として
- (3) 調整池の遮水材として
- (4) 最終処分場の底部遮水材として
- (5) 最終処分場の最終覆土・遮水材として
- (6) 汚染土壌の封じ込め・キャッピング材として

### 留意点

- ・覆土等の保護工が必要。
- ・基盤が軟弱地盤もしくは湧水が発生する場合は、対策が必要。
- ・現場諸条件による施工方法等は要相談。

## 3 普及活動計画

### 3. 1 想定される利用者

- ・地方自治体農業農村整備/ため池整備ご担当
- ・農業農村整備/ため池整備の設計企業

### 3. 2 利用者への普及啓発等の方法

#### ① 現場説明会の実施

堤体の改修工事にて実際にベントナイトシートが設計・施工されている現場にて、施主ご担当者に依頼するなどして、現場説明会を実施し、材料の性質および資材の設計時・施工時の基本的な要領について説明させていただく機会を設ける。

#### ① 学術会議へ技術報文として投稿

本事業の成果および追加実験（他社ベントナイトシート・自己修復ポリマーシートとの一面せん断の比較/低拘束圧下によるせん断挙動）により、ベントナイトシートの利点・優位性をまとめ公的な場で発表を行う。

#### ② 設計会社への PR・勉強会実施

堤体の改修を計画されている設計会社様へのベントナイトシートの PR および勉強会を開催させていただく。その際に、本事業で作成を行った資材の設計・施工時の基本的な要領書を配布・説明をさせていただく。

### 3. 3 利用者に対するサポート体制、参考資料等

設計時における、安定計算等の検討補助

施工時における、施工指導補助

設計・施工の基準書の配布および説明の実施

### 3. 4 特許・実用新案等の申請予定

- (1) 申請者予定者 無
- (2) 申請予定時期 無

## 4 研究総括者による自己評価

項 目	自己評価	自己評価の理由
研究計画の効率性・妥当性	B	<ul style="list-style-type: none"> <li>・膨潤性粘土の一面せん断試験は吸水に時間がかかり、なおかつ試験器の制約もあるため、高圧力条件にすることで時間効率を向上させた*。</li> <li>・ベントナイトシートを使用する際、冠水・降雨時の法面の安定性が利用者からの懸念事項として質問が多いため、湿潤時のベントナイトシートの法面安定性を検討する際の一助となるデータは取得できた点では妥当性が高いと考える。</li> </ul>
目標の達成度	B	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ニードルパンチ型ベントナイトシートとベントナイト単体については比較できたが、他社品およびポリマー材などとの比較ができず、今後の課題となる。</li> <li>・拘束圧力については高圧力～実際の現場を加味した条件にて実施ができた。</li> <li>・現場実証実験について</li> </ul>
研究成果の普及可能性	A	<ul style="list-style-type: none"> <li>・刃金土の不足は全国各地で問題となっているため、代替方法に関する問い合わせを多く、需要は高まっている。</li> </ul>
総合コメント		

注) 評価結果欄は、A、B、Cのうち「A」を最高点、「C」を最低点として3段階で記入する。

\*高膨潤性粘土の土質実験については、実験例も少なく規定はされていないがせん断試験や透水試験については、飽和に時間がかかることから、高拘束圧下で実験を実施するケースが多い。

## 5 今後の課題及び改善方針

### ・室内実験について

本事業においては、粒状ベントナイトを不織布と織布で挟んだタイプの遮水材を対象に室内および実証実験を実施したが、全ての種類についてのベントナイト系遮水シートについての検証ができなかったため、今後の課題となる。またシートの基材と覆土材のせん断試験について、覆土材は一種類のみを使用しているため、他の土質における確認も必要となるため、データの収集を実施したい。

### ・現場実証実験について

本事業の実証実験については、覆土工については施工時の密度管理は実施していたが（締固め度：90%以上）、一種類の覆土材のみを使用しているため、再現性に乏しい箇所もあり今後の確認が必要である。しかしながら、一般的な土質の強度定数は、道路土工の盛土工指針等に掲載がされており参考値となる。

### ・現場および振動台実験について

本事業における現場実証実験および振動台実験については、土質選定および施工方法については密度管理を行っているがある限定条件で実施しており、再現性に乏しい事も懸念される。安定計算時には、盛土工指針等に掲載されている各土質の強度定数や、上述したベントナイト系遮水シートに使用されている基材と代表土質間の強度定数を参考に実施することはできるが、今後代表的な土質についてはさらなる実験（室内実験、現場・振動台実験）を実施し、データの蓄積が要される。