

ベントナイト遮水シートとため池堤体の間のせん断強度特性と 堤体すべり破壊防止効果の検討

Shear Strength Characteristic of Interface between Bentonite Sealing Sheet and Dam Body in Irrigation Pond, and Examination of Prevention Against Sliding

神山 惇 Atsushi KOYAMA (山口大学大学院理工学研究科)
鈴木素之 Motoyuki SUZUKI (山口大学大学院理工学研究科)
河内義文 Yoshifumi KOCHI ((株) ケイズラブ)
浦部朋子 Tomoko URABE ((株) ボルクレイ・ジャパン)
深田三夫 Mitsuo FUKAZAWA (山口大学大学院農学研究科)

ため池堤体の遮水工の一つとしてベントナイト遮水シートを用いる工法がある。しかし、その工法を確立するには、シート内部のせん断強さや遮水シートと堤体土の境界面のせん断強さなどを解明しておく必要がある。本研究では、その解明を目的として、ベントナイト、ベントナイトとシート、およびシートと堤体土の、各境界面でのせん断強さを一面せん断試験機を用いて調べた。また、水浸期間を変えたベントナイト単体での一面せん断試験も実施した。その結果、シートと土試料を貼り合わせることで、強度が増減することが明らかになった。また、これらの強度を用いて、ベントナイト遮水シートを使用した堤体の安定性の評価を行った。

キーワード：ため池，遮水シート，ベントナイト，まさ土，安全率 (IGC : D-06)

1. はじめに

農林水産省ホームページによると、県内にはため池が約 11,785 箇所あり、そのうちの約 3,000 箇所のため池はかならずしも十分に維持管理がなされていない。このようなため池の中には漏水やはらみだし等の変状が生じているものがある。この対策の一つとして堤体内に遮水シートを設置して遮水性を回復させる方法がある¹⁾。そのうち、遮水シートの一種であるベントナイト遮水シートは施工が簡単であり、優れた遮水性能を有することから、近年、ため池の遮水工として使用されている²⁾。

ベントナイト遮水シートは不織布や織布でベントナイトを挟み込んだものであり、ベントナイトが水を吸収し体積が増大することによって、シートが遮水性を発揮し、堤体の漏水を防ぐことが可能になる。しかし、施工中に堤体法面に敷設した遮水シートが落脱するケースがごくまれにみられる。

ため池の設計に用いるせん断強度³⁾や安定計算⁴⁾は既往の研究において、解決されている点が多い。しかし、堤体の遮水材としてベントナイト遮水シートを用いた堤体の設計や安定性の評価は確立されておらず、シートの耐化学性⁵⁾やベントナイトの物性⁶⁾の研究は着手されているが、シート自体のせん断強度や堤体土との境界面の強度は取り上げられていない。したがって、本研究では、シートおよびシートと堤体土間のせん断強度特性の解明を目的として、実際のため池にお

ける現場試験とあわせて、堤体土とシートとの境界面および遮水シート内部のせん断強さをそれぞれ一面せん断試験機を用いて調べた。また、堤体土試料単体での一面せん断試験も実施した。更に、得られたせん断強さをを用いて、ベントナイト遮水シートを敷設した堤体の平面すべりに対する安定性を評価した。本ノートでは、これらの結果とその考察を述べる。

2. ため池堤体におけるシートの現場膨潤試験

山口県山口市嘉川のため池に遮水シートを使用した傾斜角 $\beta=34^\circ$ 、 40° 、 45° のまさ土から成る堤体を造成し、約 6 ヶ月水浸させた後、堤体土に対する現場せん断試験および堤体覆土の含水比、堤体内部に設置した遮水シート中のベントナイトの含水比測定をそれぞれ実施した。図-1 に遮水シートを設置した堤体の断面(模式図)を示す。なお、本ノートでは現場せん断試験の結果については言及しない。写真-1(a)、(b)に現場試験の状況を示す。表-1 に浸水後約 6 ヶ月経過した時点で測定した含水比を示す。シート中のベントナイトの初期含水比は 15.0%であったが、堤体内部において約 6 ヶ月間水浸させたところ、含水比は約 150~180%まで著しく増加した。また、堤体土の初期含水比は 13.0%、約 6 ヶ月間水浸後の含水比は 20~24%まで増加した。ただし、施工中および浸水後の 6 ヶ月間、遮水シート中の含水比変化に伴う堤体のすべりおよびシートの落脱

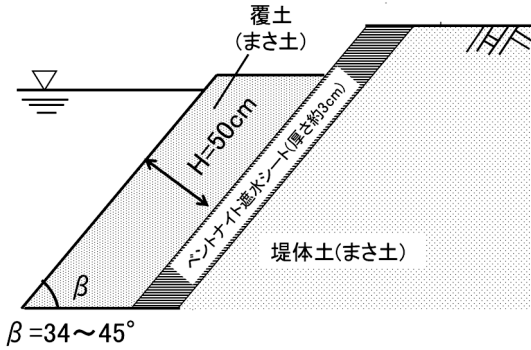
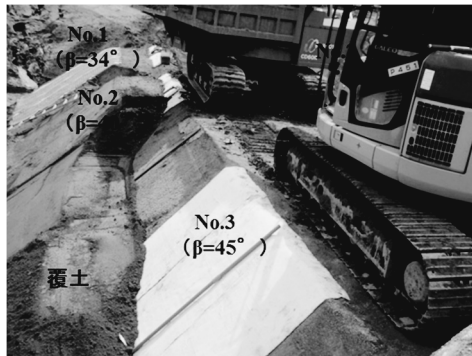
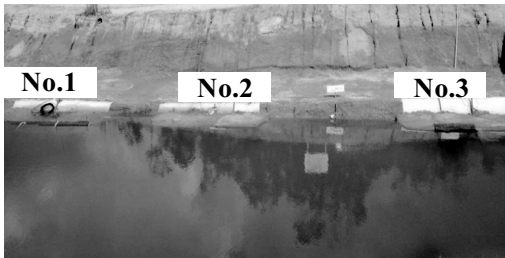


図-1 遮水シートを敷設した堤体の断面 (模式図)



(a) 堤体の施工状況



(b) 完成後、湛水した状態

写真-1 現場試験の状況

表-1 堤体土および遮水シート中のベントナイトの含水比

No.	傾斜角 β	シート中のベントナイトの含水比(%)	堤体土の含水比(%)
1	34°	151.9	20.1
2	40°	145.7	19.8
3	45°	180.4	24.3

は無かった。

3. 圧密定圧一面せん断試験

3.1 試験の目的

本研究では、下記の試験条件での供試体の排水せん断強さを求めることを室内での一面せん断試験の目的とした。

- ・まさ土単体(水浸)
- ・まさ土(水浸)とシート(不織布あるいは織布)の間の境界面

表-2 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 ρ_s (g/cm ³)	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 ρ_{dmax} (g/cm ³)	1.800

表-3 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 ρ_s (g/cm ³)	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 ³)	1.248

- ・ベントナイト単体(非水浸, 1日水浸, 7日水浸)
- ・ベントナイト(1日水浸, 7日水浸)とシート(不織布あるいは織布)の間の境界面

3.2 土試料およびベントナイト遮水シート

本研究に用いた土試料は上記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-2 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まさ土であると言える⁷⁾。

また、本研究ではベントナイト遮水シートを用いた。本シートは白い面の不織布と黒い面の織布で粒状のベントナイトを挟み、ニードルパンチで固定されたものである。ベントナイトの物理特性を表-3 に示す。ため池湛水前におけるシートの敷設から湛水後の膨潤までを再現するため、膨潤前のシート中のベントナイトの初期乾燥密度および初期含水比とする供試体を作製した。さらに現場試験における、ため池湛水後のシート中のベントナイトの含水比 100%以上を目標として、試験機内で供試体を水浸、膨潤させた。なお、表-3 に示すように、シート中のベントナイトの初期含水比は 15.0%、初期乾燥密度は 1.248g/cm³であった。

写真-2 (a), (b) に本研究で用いたベントナイト遮水シートの両面すなわち白い面の不織布と黒い面の織布を示す。また、写真-2 (c) には膨潤前後の遮水シートの断面図を示す。織布と不織布で挟まれたベントナ

ベントナイト遮水シートとため池堤体の間のせん断強度特性と堤体すべり破壊防止効果の検討

イトが吸水膨潤している様子がわかる。

土試料とシートとの境界面に対するせん断試験では、図-2 に示すよう鋼材にシートをのせ、平ビスと接着剤で全面を固定し、その上に土供試体を設置した。

写真-3 (a), (b) にそれぞれ本試験で用いたシート（不織布，織布）を示す。

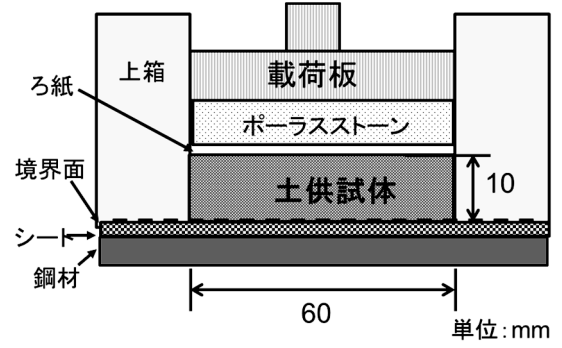
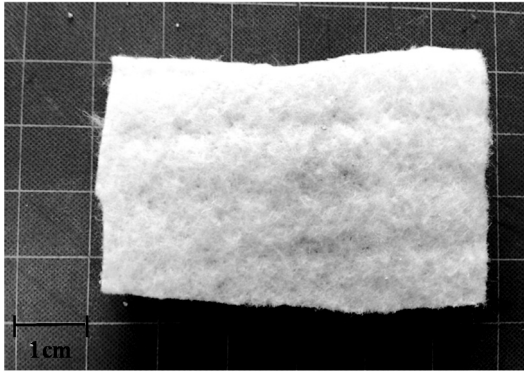
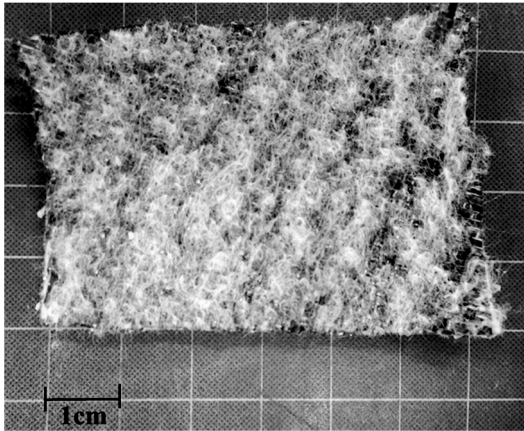


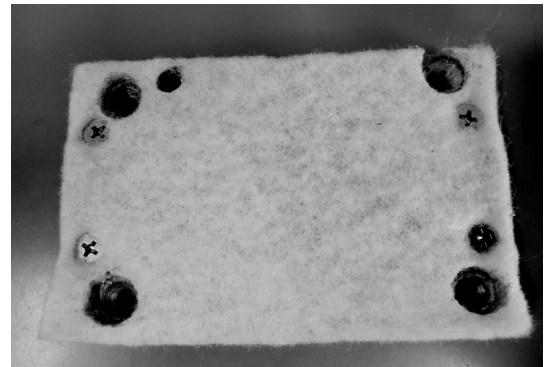
図-2 シートと土供試体を貼り合せた供試体の断面図



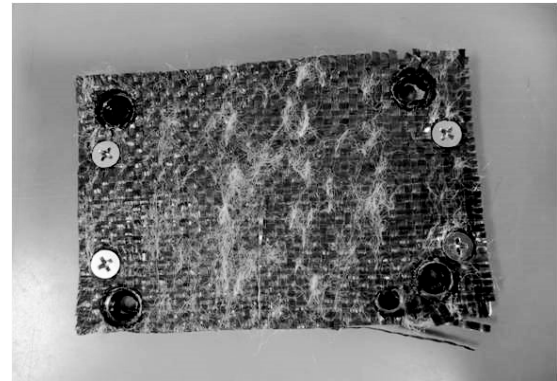
(a) シート（不織布）



(b) シート（織布）

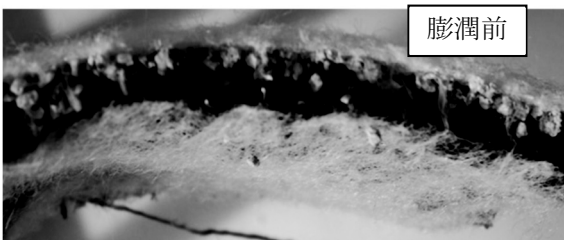


(a) 鋼材の上に固定したシート（不織布）

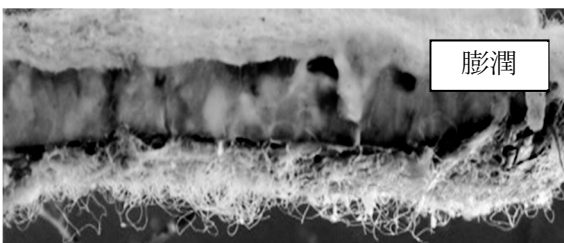


(b) 鋼材の上に固定したシート（織布）

写真-3 シートを貼りつけた鋼材



膨潤前



膨潤

(c) 膨潤前後の遮水シートの断面

写真-2 本試験で用いたベントナイト遮水シート

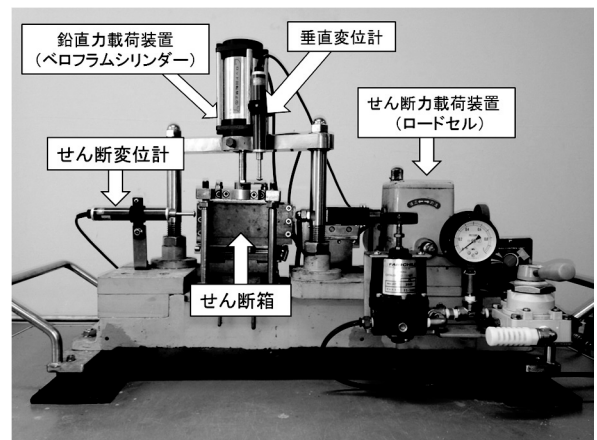


写真-4 一面せん断試験機

3.3 試験装置

写真-4 に本研究で用いた一面せん断試験機を示す。供試体は直径6cm, 高さ2cm(シートを用いる場合は1cm)であり, せん断箱の内面には周面摩擦を軽減するためにシリコングリースを塗布した。上下せん断箱のすき間はせん断時に0.2mmにした。また, 載荷された鉛直力は反力側に取り付けた高剛性ロードセルによって計測されるので, 周面摩擦力を除いた値となる。その他の試験方法は学会基準に⁷⁾ 準拠した。

3.4 試験手順

3.4.1 まさ土単体およびまさ土とシートの貼り合わせ供試体

まさ土試料は空気乾燥させた後, 0.85mmふるいを通過させ, 最適含水比のもとで, 「突固めによる土の締固め試験 (JIS A 1210)」のA-b法を用いて突き固めた。この突固め試料から直径6cm, 高さ2cmの一面せん断試験用供試体を切り出した。

一方, まさ土とシートを貼り合わせた供試体に対するせん断試験では, 上述のように, まさ土供試体の高さを1cmとして締固め度が90%になるように, せん断箱内でタンパーを用いて一定の力で突き固めた。

まさ土単体およびまさ土とシート(不織布, 織布)を貼り合わせた3種類の供試体に対して, 圧密応力 $\sigma_c=50, 75, 100\text{kPa}$ の3通りで各々圧密した。圧密の打ち切り時間は3t法により決定し, 一律に30分間とした。圧密終了を確認した後, 上下間の隙間を0.2mmにセットし, せん断速度 $\dot{\delta}$ を0.2mm/minに設定し, 直ちに定圧(排水)せん断を開始した。

3.4.2 ベントナイト単体およびベントナイトとシートの貼り合わせ供試体

自然含水比状態のベントナイトに霧吹きで加水し, シート中の初期含水比15.0%になるように調整した。また, せん断箱内においてシート中の初期乾燥密度 1.248g/cm^3 になるようにタンパーを用いて突固め法により供試体を作製した。

ベントナイトとシートを貼り合わせた供試体のせん断試験を行うケースでは, まさ土と同様に, 供試体の高さを1cmとした。

(a) 非水浸および1日水浸の場合

まさ土と同様に, 3種類の供試体に対して $\sigma_c=50, 75, 100\text{kPa}$ の3通りで各々圧密した。非水浸の場合, 圧密終了後, 直ちに定圧(排水)せん断を開始した。1日水浸の場合, 圧密終了後, せん断箱内と載荷板の上部に蒸留水を注水して, 供試体を完全に水没させた。1日間の水浸後, 上下箱の隙間を0.2mmにセットし, $\dot{\delta}$ を0.02mm/minに設定し, 直ちに定圧(排水)せん断を開

始した。非水浸, 1日水浸ともに圧密打ち切り時間 t_c は3t法により決定し, 一律 t_c を超える30分間とした。図-3(a)~(d)にベントナイト単体およびベントナイトとシート(織布, 不織布)を貼り合わせた供試体の圧密量~経過時間曲線を示す。同図より, いずれの供試体も圧密後1分間を経過した以降, 圧密量はほとんど変化していないことが分かる。

(b) 7日水浸の場合

上記と同じ供試体に対して, 初期圧密応力 $\sigma_{c0}=10\text{kPa}$ で30分間予備圧密を行い, 圧密終了を確認した後, 載荷板の上部とせん断箱内に蒸留水を注水して, 供試体を完全に水没させた。7日間の水浸後, 各供試体に対して $\sigma_c=50, 75, 100\text{kPa}$ の3通りで24時間本圧密させた。24時間後, 上下箱の隙間を0.2mmにセットし, $\dot{\delta}$ を0.02mm/minに設定し, 直ちに定圧(排水)せん断を開始した。

3.5 試験ケース

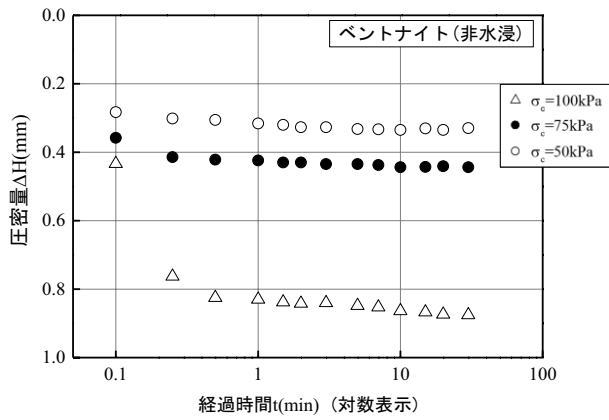
表-4に試験ケースを示す。表には各試料の初期含水比 w_0 , 初期乾燥密度 ρ_{d0} , 予備圧密応力 σ_{c0} , 予備圧密時間 t_{c0} , 水浸時間, 膨潤量 ΔH_s , 本圧密応力 σ_c , 本圧密時間 t_c , せん断速度 $\dot{\delta}$ を表記している。

4. 試験結果

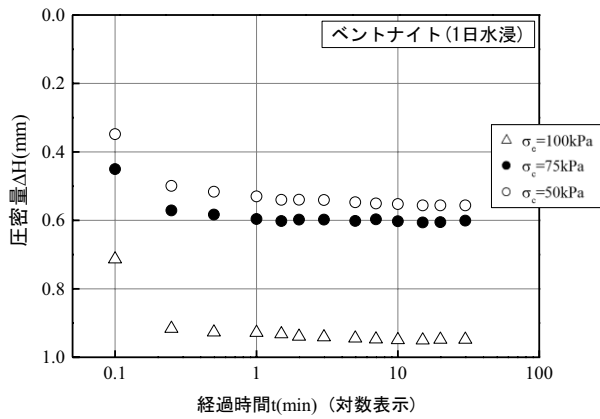
4.1 まさ土

4.1.1 せん断挙動

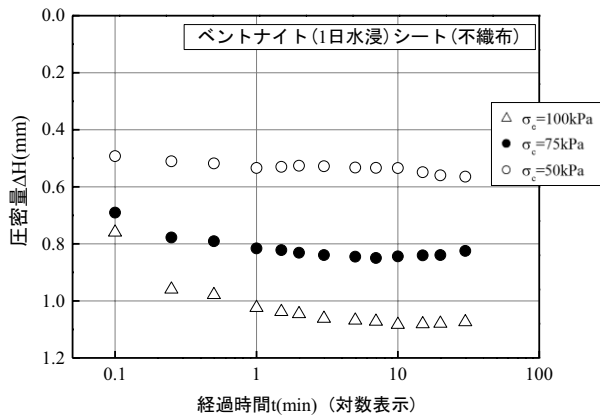
図-4(a)~(c)にそれぞれまさ土単体およびまさ土とシートを貼り合わせた供試体のせん断挙動を示す。図の横軸にせん断変位 δ , 縦軸にせん断応力 τ , 垂直変位 ΔH をとっている。各図には $\sigma_c=50, 75, 100\text{kPa}$ の場合における $\tau\sim\Delta H\sim\delta$ 曲線が示されている。また, 試験は水浸条件で実施された。図-4(b), (c)のどちらにおいても, まさ土とシートの貼り合わせ供試体は, 図-4(a)のまさ土単体よりも, いずれの各 σ_c においても総じて $\tau\sim\delta$ 曲線のレベルは低い。また, 最適含水比状態で供試体を作製したため, まさ土単体では供試体が一旦収縮した後, 膨張に転じる挙動を示している。それに対してまさ土とシートの貼り合わせ供試体の場合, シートの種類によらず, せん断過程を通じて収縮挙動を示している。なお, まさ土とシートの貼り合わせ供試体では σ_c の増加に伴って, ΔH が大きくなる傾向がみられなかった。また, まさ土単体よりも, まさ土とシートを貼り合わせた供試体のほうが密度が高くなっていった(後掲の表-5参照)。まさ土とシートを貼り合わせた供試体が正のダイレイタンスを示さなかった原因として, せん断中にまさ土粒子が底面のシートの繊維



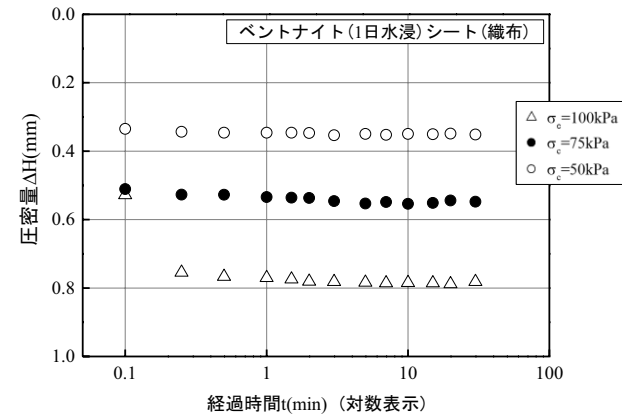
(a) 非水浸



(b) 1日水浸

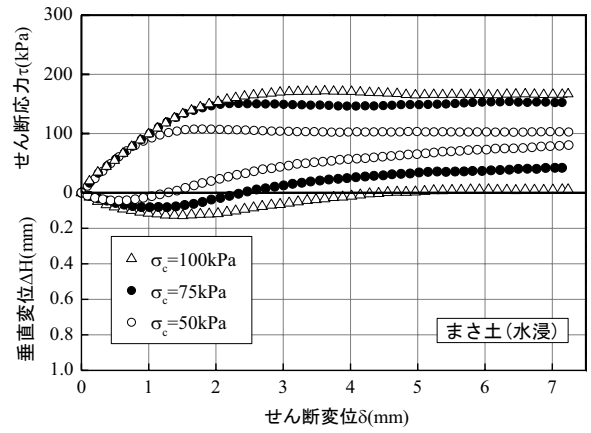


(c) 1日水浸+シート (不織布)

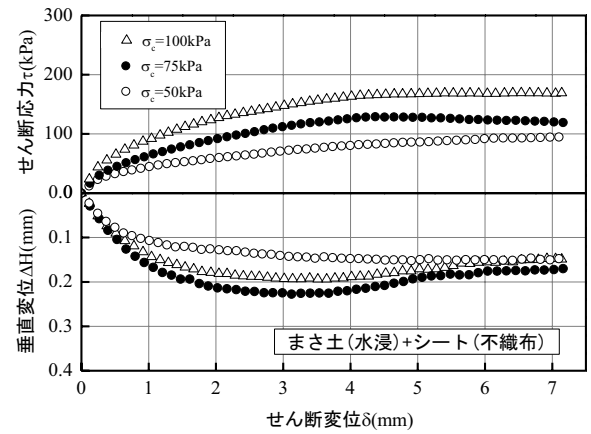


(d) 1日水浸+シート (織布)

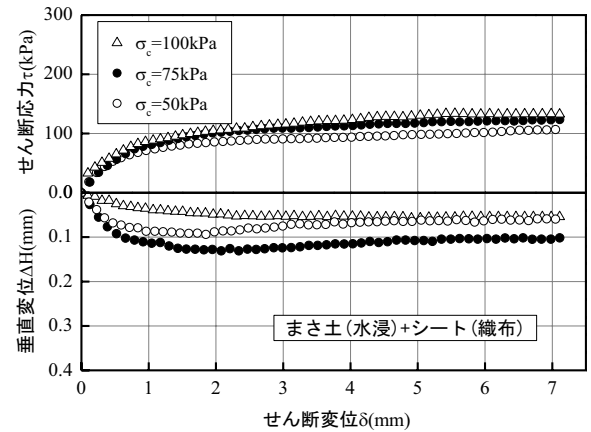
図-3 ベントナイト単体およびシートを貼り合わせた供試体の圧密量～経過時間曲線



(a) まさ土単体



(b) シート (不織布)



(c) シート (織布)

図-4 まさ土単体およびまさ土とシートを貼り合わせた供試体のせん断挙動

の隙間に入り込んだためと考えられる。

4.1.2 強度特性

図-5 にまさ土単体およびまさ土とシートを貼り合わせた供試体のそれぞれの各破壊線を示す。まさ土単体と比較して、まさ土とシートの境界面ではどちらのシートにおいても内部摩擦角 ϕ_d は低く、見かけの粘着力 c_d は高かった。特に、 c_d および ϕ_d は、まさ土とシート(織布)の方が、まさ土単体のそれよりも大きく変化してい

る。織布と不織布で強度変化が違うのは、材質による差であり、織布の方が、不織布よりも繊維の隙間が大きく、まさ土粒子がその隙間に入りこみやすい構造であったことが影響したものと考えられる。

4.2 ベントナイト

4.2.1 膨潤挙動

図-6 (a) ~ (c) にそれぞれベントナイト単体およびベントナイトとシート（不織布，織布）を貼り合わせた供試体の膨潤挙動を示す。なお、一般的に圧縮を正、膨潤が負とされるが、グラフの縦軸を膨潤量の大きさとすることで、正の値で表わしている。いずれにおいても、1日水浸の場合、 $\sigma_c=50\text{kPa}$ 以上の場合はベントナイトの膨潤量は1.0mm以下と小さい。また、 σ_c が大きいほど膨潤量は小さくなっている。他方、7日水浸の場合、 $\sigma_{c0}=10\text{kPa}$ の下で供試体は一樣に5~8mm程度膨潤している。

図-6 (a) には予備的に実施したベントナイト単体が14日間水浸した時の最大膨潤量(8.3mm)を示している。同図より、7日水浸と14日水浸では膨潤量に差がないことから、水浸7日目の時点で膨潤量が限界に達していると判断した⁸⁾。一方、ベントナイトとシートを貼り合わせた供試体は、ベントナイトの層厚が半減したことにより、同じ7日水浸でも膨潤量は低下したものの、膨潤量は半減とはならなかった。これはシート

の材質の違いによって、ベントナイトとシートの境界面の排水条件が不明確になったためと考えられ、供試体の層厚と膨潤量の相関がみられなくなったものと考えられる。

図-7に7日水浸の場合の膨潤前、膨潤後および圧密後の間隙比の変化を示す。膨潤後の供試体の間隙比は全て2.0以上であり、圧密応力の増加に伴って間隙比が減少していることが図より見て取れる。しかし、圧密後の間隙比は膨潤前の間隙比よりもまだ高い。

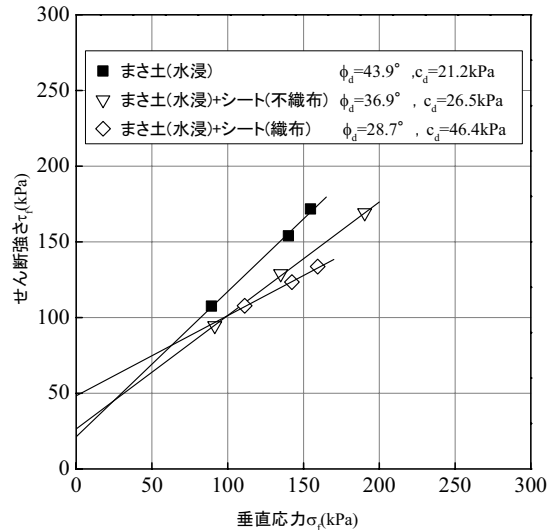


図-5 まさ土単体およびまさ土とシートを貼り合わせた供試体の破壊線

表-4 試験ケース

試料名	試験番号	初期含水比 w ₀ (%)	初期乾燥密度 ρ ₀₀ (g/cm ³)	予備圧密応力 σ _{c0} (kPa)	予備圧密時間 t _{c0} (min)	水浸時間 (min)	膨潤量 ΔH _s (mm)	本圧密応力 σ _c (kPa)	本圧密時間 t _c (min)	せん断速度 δ̇(mm/min)				
まさ土	MS-1	13.5	1.633			1440		50	30	0.2				
	MS-2	13.4	1.634					75						
	MS-3	12.9	1.630					100						
まさ土+シート(不織布)	WMS-1	12.9	1.628			1440		50	30	0.2				
	WMS-2	12.9	1.632					75						
	WMS-3	13.3	1.636					100						
まさ土+シート(織布)	BMS-1	13.3	1.622			1440		50	30	0.02				
	BMS-2	13.1	1.630					75						
	BMS-3	13.1	1.622					100						
ベントナイト	DB-1	13.8	1.203			1440		50	30	0.02				
	DB-2	13.2	1.258					75						
	DB-3	13.9	1.251					100						
	SB-1	13.5	1.269					10	30		1440		-0.79	50
	SB-2	13.2	1.258										-0.26	75
	SB-3	13.7	1.268										-0.18	100
	SB-7.1	15.0	1.248					10	30		10080		-8.09	50
	SB-7.2	15.3	1.235										-8.10	75
	SB-7.3	14.6	1.247										-7.86	100
ベントナイト+シート(不織布)	WSB-1	13.4	1.232	10	30	1440		-0.86	50	0.02				
	WSB-2	13.5	1.255					-0.27	75					
	WSB-3	13.4	1.241					-0.20	100					
	WSB-7.1	14.9	1.246					-5.97	50					
	WSB-7.2	15.2	1.249					-5.77	75					
	WSB-7.3	15.3	1.248					-5.89	100					
ベントナイト+シート(織布)	BSB-1	13.2	1.249	10	30	1440		-0.70	50	0.02				
	BSB-2	12.4	1.265					-0.46	75					
	BSB-3	13.0	1.283					0.29	100					
	BSB-7.1	14.8	1.247					-5.16	50					
	BSB-7.2	14.5	1.247					-5.09	75					
	BSB-7.3	14.7	1.242					-5.17	100					

ΔH_s: 正の値を収縮とした

4.2.2 せん断挙動

図-8 (a) ~ (c) にそれぞれベントナイト単体の非水浸, 1日水浸および7日水浸のせん断挙動を示す. 非水浸および1日水浸の場合とはともに, せん断の進行に伴って, τ が単調増加するのに対して, 7日水浸の場合はせん断初期に τ は単調増加しているが, その後定常状態に移行する傾向がみられる. 7日水浸の場合, 各 σ_c において供試体はせん断中常に収縮挙動を示しており, そのときの τ ~ δ 曲線のレベルが著しく低下していることが分かる.

図-9 (a), (b) にそれぞれ1日水浸させた場合のベントナイトとシート(不織布, 織布)を貼り合わせた供試体の試験結果を示す. τ ~ δ 曲線は, 図-8 (b)の1日水浸のベントナイト単体の結果よりも各 σ_c において低くなっていることが分かる. また, δ が2mmに達すると, τ はほぼ定常状態に到達している. また, 1日水浸の場合, ベントナイトとシートを貼り合わせた供試体はいずれもせん断開始後に収縮し, $\delta=2\text{mm}$ 以降において定常状態に移行している. このときの ΔH は1日水浸のベントナイト単体と比べて小さい.

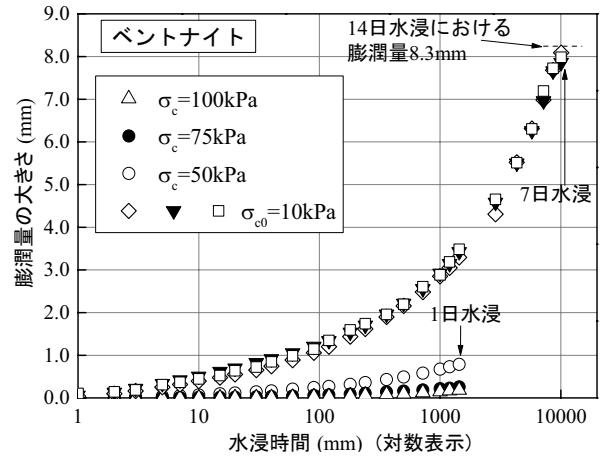
図-10 (a), (b) には7日水浸の試験結果を示しているが, 1日水浸の場合よりもさらに τ ~ δ 曲線のレベルが低くなっている. 図-8 (c)の7日水浸のベントナイト単体の結果と比較しても, この段階ではもはやシートの影響を受けておらず, 7日水浸ではシートの有無に関係なくせん断挙動に差はみられない. なお, ベントナイトは透水性が低いとされているが⁹⁾, 本研究では定圧試験の規定⁷⁾に従い, 0.02mm/minでせん断を行った. 図-7~9においてせん断中に供試体の体積変化が確認できることから, 非排水であるとは必ずしも言えない. ベントナイトに対して真の排水条件を決定するため, せん断速度の影響を調べる試験をする必要がある.

表-5に以上の試験結果の一覧を示す. せん断強さ τ_f , 最大せん断応力時における垂直応力 σ_f , 間隙比 e_f , せん断変位 δ_f およびせん断終了時の含水比 w_f を表記している. 間隙比はせん断応力最大時の値であり, 含水比はせん断終了直後の値である. ただし, せん断終了後に供試体を取り出す際, せん断箱内および載荷板上部から水が混入するため, せん断応力最大時の間隙比とこの含水比の関係が整合していない.

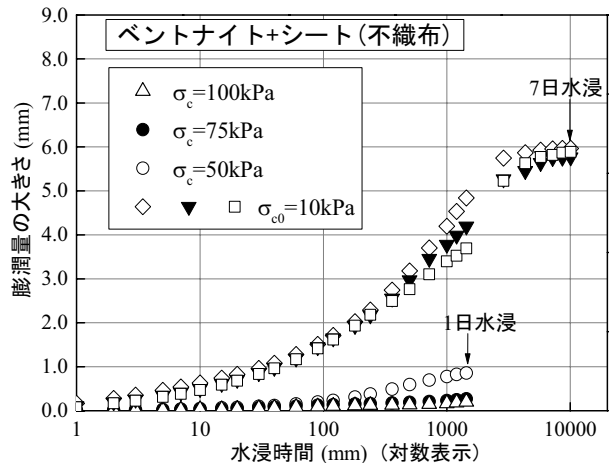
4.2.3 強度特性

図-11に水浸日数の異なるベントナイト単体の破壊線を示す. また, 図-12にベントナイト単体の膨潤量と強度定数の関係を示す. 両図より, ベントナイトの内部摩擦角 ϕ_d は水浸中の膨潤量の増加に伴い低下することがわかる. 一方, みかけの粘着力 c_d は1日水浸で一旦増加し, 7日水浸において低下した.

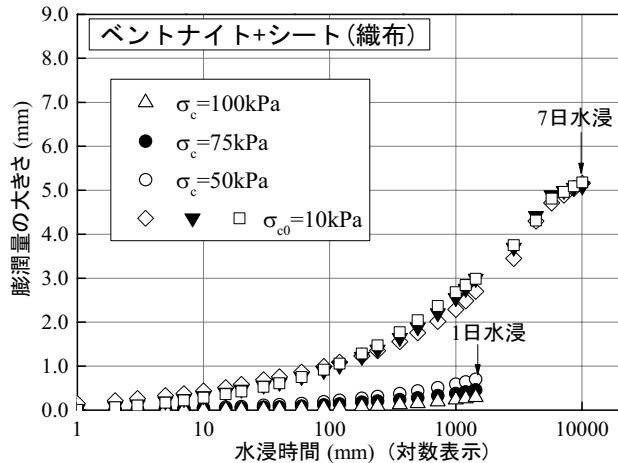
図-13に1日水浸におけるベントナイト単体およびベ



(a) ベントナイト



(b) シート(不織布)



(c) シート(織布)

図-6 ベントナイト単体およびベントナイトとシートを貼り合わせた供試体の膨潤挙動

ントナイトとシートを貼り合わせた供試体の破壊線を示している. 1日水浸の場合, ベントナイトとシートの境界面の強度定数はともにベントナイト単体よりも小さくなり, また, 織布と不織布の違いによる強度定数の差はみられなかった.

図-14には7日水浸におけるベントナイト単体とベン

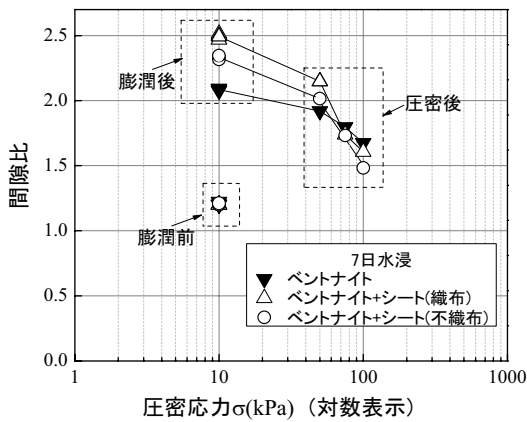


図-7 ベントナイト(7日水浸)の間隙比

トナイトとシートを貼り合わせた供試体の結果を示す。これらの強度定数には差はほとんどみられなかった。この原因として、7日水浸によって、ベントナイトの膨潤が十分かつ均一になり、その結果として供試体の密度が低くなったため、せん断面がベントナイトとシートの境界面ではなく、ベントナイト内部に発生したことが考えられる。以上から、シートとベントナイトとの境界面のせん断強さはベントナイトの含水状態によって変化するといえる。

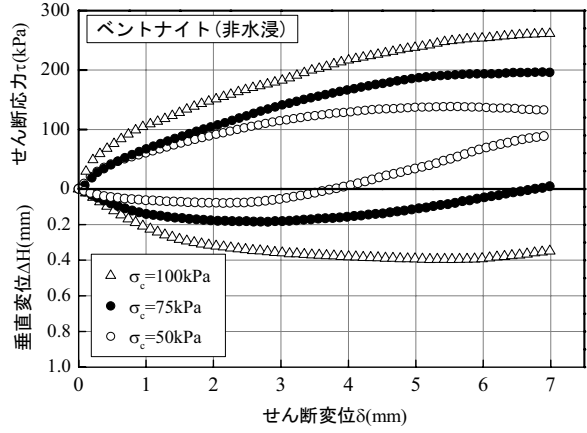
5. シートを敷設したため池堤体の安定解析

一面せん断試験により得られた強度定数を用いて、図-1 に示した断面に対して、まさ土内部、まさ土とシートとの境界面、ベントナイト内部およびベントナイトとシートとの境界面における平面すべりに対する安全率を計算した。

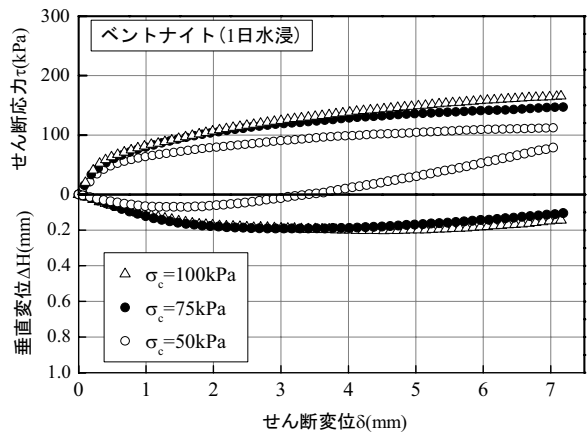
盛土の覆土厚は $H=50\text{cm}$ 、傾斜角は $\beta=34^\circ, 40^\circ, 45^\circ$ の3通りとし、まさ土の最大乾燥密度 $\rho_{d\max}=1.800\text{g/cm}^3$ 、土粒子の密度 $\rho_s=2.642\text{g/cm}^3$ から、間隙比を算出し、水中単位体積重量 $\gamma'=11\text{kN/m}^3$ を安定計算に用いた。また、実際のため池堤体内部に発生する間隙水圧およびシート内部のベントナイトの厚さとその重量は考慮しないこととし、安全率の算出は以下の式を用いた¹⁰⁾。

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

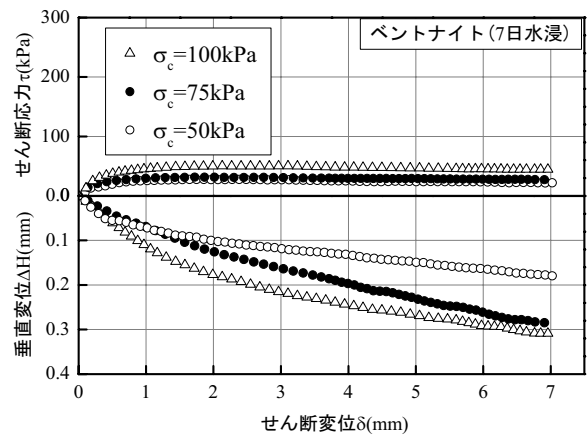
図-15 (a), (b) にまさ土およびベントナイト7日水浸の平面すべりに対する安全率をそれぞれ示す。いずれのケースにおいても β が増大すると、 F_s は低下している。また、いずれのケースにおいても F_s の値は1以上であり、特にまさ土とシート(織布)との境界面のケースでは c_d が最も高いため、 F_s の値は17以上と非常に高い値を示している。なお、 F_s の値が最も低いケースは、7日水浸させたベントナイトとシート(織布)との境界面で $\beta=45^\circ$ における平面すべりであり、その時の F_s の値は2.8であった。



(a) 非水浸



(b) 1日水浸

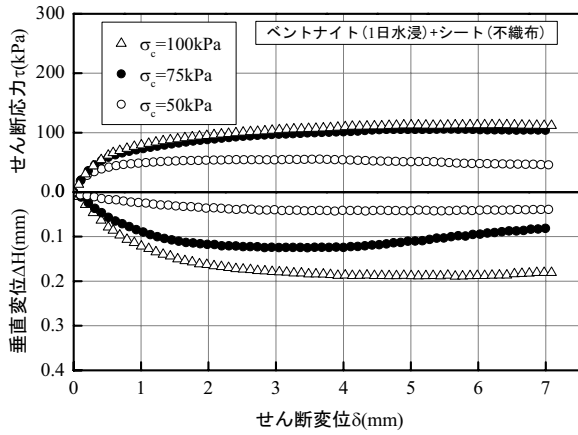


(c) 7日水浸

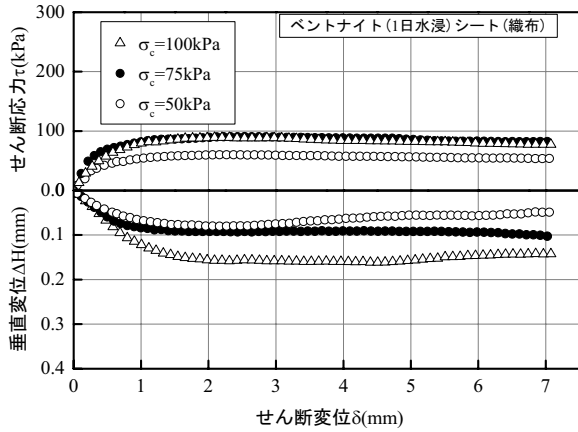
図-8 ベントナイト単体のせん断挙動

また、 H が小さいため粘着力 c_d の値が結果に大きく影響していると考えられる。したがって、せん断試験における低拘束圧領域の強度評価が非常に重要となる。しかし、本研究に用いた試験機では、低拘束圧条件下での実験の実施が困難なため、50~100kPa の拘束圧領域で得られた試験結果を基に破壊線を決定した。そのため、今回の実験は低拘束圧域でのせん断強度特性が反映されていない点に留意する必要がある。今後、実験方法を検討し、実施した上で、本研究の最終的な結論を出す必要があると考える。

ベントナイト遮水シートとため池堤体の中のせん断強度特性と堤体すべり破壊防止効果の検討

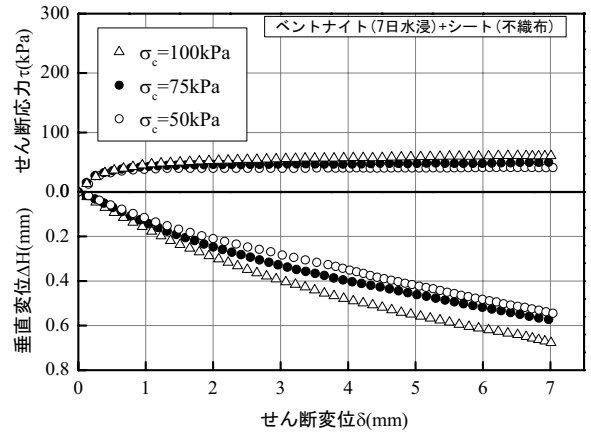


(a) シート (不織布)

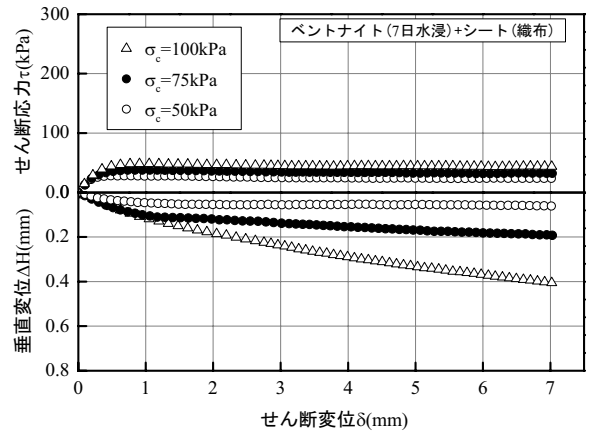


(b) シート (織布)

図-9 ベントナイト (1日水浸) とシートを貼り合わせた供試体のせん断挙動



(a) シート (不織布)



(b) シート (織布)

図-10 ベントナイト (7日水浸) とシートを貼り合わせた供試体のせん断挙動

表-5 試験結果

試料名	試験番号	せん断応力最大時				試験終了後の含水比 w_f (%)
		せん断強さ τ_r (kPa)	垂直応力 σ_r (kPa)	間隙比 e_r	せん断変位 δ_r (mm)	
まさ土	MS-1	107.6	89.2	0.608	1.80	21.5
	MS-2	154.0	140.1	0.595	6.36	24.5
	MS-3	171.7	154.6	0.570	2.69	23.7
まさ土+シート(不織布)	WMS-1	94.5	91.0	0.493	6.97	21.7
	WMS-2	128.9	134.9	0.456	4.37	24.5
	WMS-3	169.2	190.3	0.452	6.54	21.4
まさ土+シート(織布)	BMS-1	106.6	110.0	0.602	7.05	24.0
	BMS-2	123.1	141.3	0.526	6.98	24.5
	BMS-3	133.7	159.3	0.492	5.55	23.7
ベントナイト	DB-1	138.6	103.9	1.267	5.62	13.7
	DB-2	196.7	156.8	1.134	6.88	12.8
	DB-3	261.2	201.1	1.061	6.99	15.0
	SB-1	112.1	88.5	1.131	7.04	71.3
	SB-2	146.7	126.5	1.084	7.04	38.8
	SB-3	164.2	149.9	1.044	6.99	60.3
	SB-7.1	27.6	48.6	1.910	1.65	77.8
	SB-7.2	31.4	82.2	1.785	1.72	78.8
	SB-7.3	50.2	111.0	1.650	3.10	68.0
ベントナイト+シート(不織布)	WSB-1	55.4	73.7	1.097	3.65	33.9
	WSB-2	105.8	126.7	0.980	5.49	51.0
	WSB-3	113.1	147.4	0.936	6.31	46.8
	WSB-7.1	41.2	79.8	2.037	6.31	80.5
	WSB-7.2	49.8	116.0	1.614	6.98	85.1
	WSB-7.3	61.1	131.0	1.466	6.37	69.7
ベントナイト+シート(織布)	BSB-1	60.0	71.4	1.103	2.16	26.6
	BSB-2	90.8	94.7	1.075	2.54	30.0
	BSB-3	89.0	115.7	0.935	2.20	23.0
	BSB-7.1	27.9	52.3	2.009	0.48	72.6
	BSB-7.2	37.7	83.9	1.711	0.84	71.0
	BSB-7.3	48.4	103.2	1.456	1.05	69.7

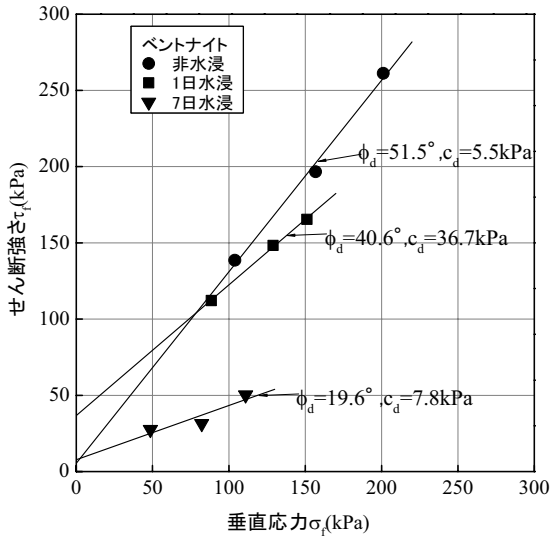


図-11 水浸日数が異なるベントナイト単体の破壊線

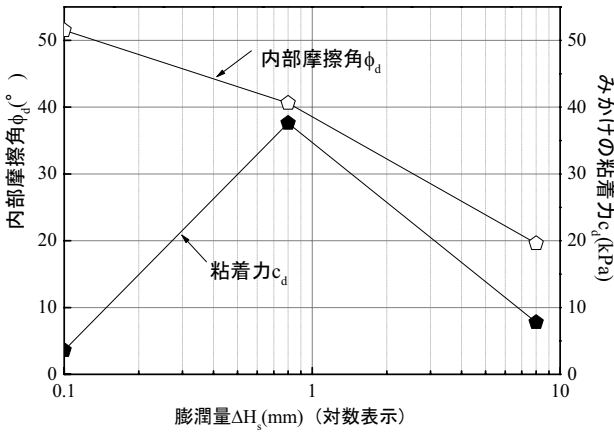


図-12 ベントナイト単体における膨潤量と強度定数の関係

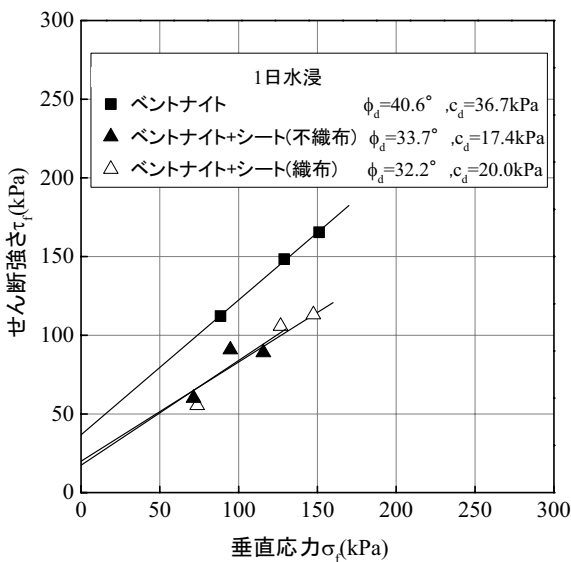


図-13 1日水浸におけるベントナイト単体およびベントナイトとシートを貼り合わせた供試体の破壊線

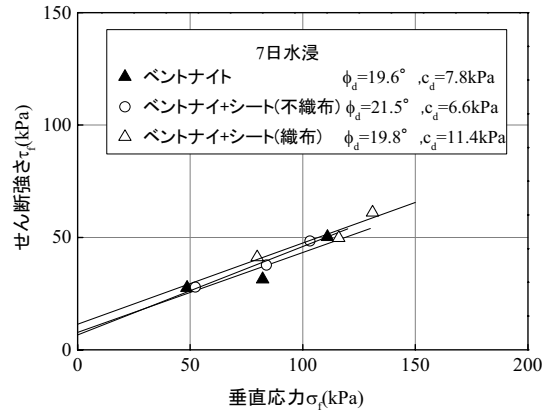
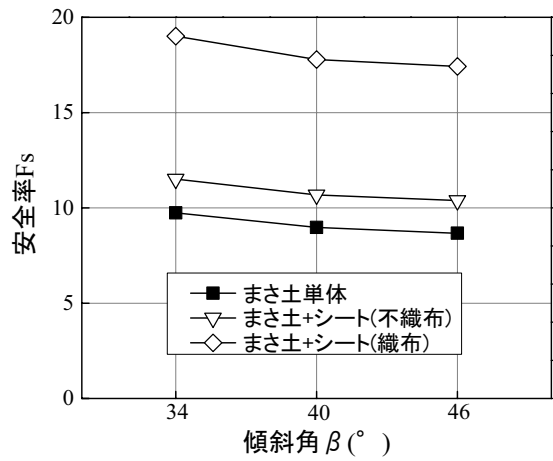
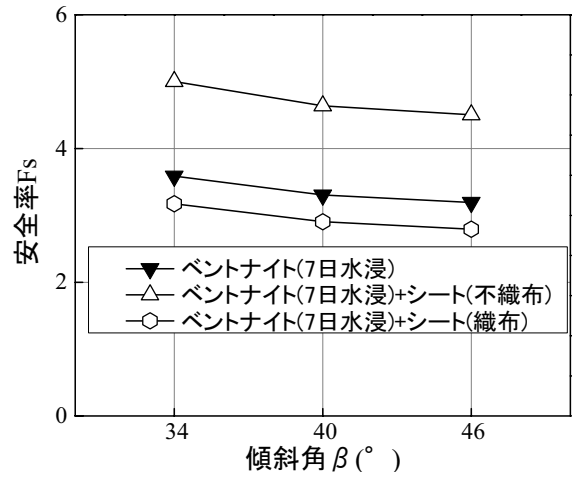


図-14 7日水浸におけるベントナイト単体およびベントナイトとシートを貼り合わせた供試体の破壊線



(a) まさ土内部, まさ土とシートの境界面における平面すべりに対する安全率



(b) ベントナイト内部, ベントナイトとシートの境界面における平面すべりに対する安全率

図-15 まさ土およびベントナイト7日水浸の平面すべりに対する安全率

6. 結論

本ノートでは、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。

- (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、シート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間のせん断強さは、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。

今回の検討では、低拘束圧条件でのせん断強度特性を考慮していないので、ベントナイトシートに関する安定性について結論を得るまでに到っておらず、今後の重要な検討課題とした。

謝辞

本研究は農林水産省官民連携新技術開発事業として実施した。関係各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) 鬼形正伸：ベントナイトの特性とその応用，粘土科学，Vol.46，No.2，pp.131-138，2007.
- 2) 原孝明，迫田克己，藤田美鈴，河内義文：ベントナイトシート遮水工法を用いたため池の水理特性，農業農村工学会誌，Vol.77，No.2，pp.124-125，2009.
- 3) 松井家孝：設計における土のせん断強さと c ， ϕ の考え方：8.フィルダム，土と基礎，Vol.33，No.1，pp.57-64，1985.
- 4) 松本徳久，安田成夫：フィルダムの耐震安定計算における地震力とせん断強度，土と基礎，Vol.36，No.8，pp.7-12，1988.
- 5) 勝見武，Craig H.Benson，嘉門雅史：ベントナイトを用いた遮水ライナーの耐化学性について，土と基礎，Vol.49，No.2，pp.21-24，2001.
- 6) 水野克己，近藤三二，嘉門雅史：各種ベントナイトのコンシステンシー特性およびその他の基礎的特性に関する研究，粘土科学，Vol.43，No.1，pp.1-13，2003.
- 7) 地盤工学会編：地盤材料の方法と解説，p.101，pp.115-125，pp.135-149，2009.
- 8) 小西純一，鈴木素之，三須尊洋，甲斐康広，藤井公博：不攪乱粘土試料の一次元膨潤圧特性とその異方性，土木学会論文集 C，Vol.66，No.2，pp.264-279，2010.
- 9) BAE Kee Sun，呉祥根：ベントナイトマット型防水材料の膨潤と透水性に関する研究，日本建築学会学術講演梗概 Vol.49，No.2，pp.881-882，2003.
- 10) 地盤工学会編：斜面の安定・変形解析入門-基礎から実例まで，地盤工学会，2006.

(2013年6月24日 受付)

