

## 振動台実験による加振を受けたため池堤体の遮水シート敷設部の変形挙動

Deformation Behavior of Irrigation Pond That Employs Geosynthetic Clay Liner  
by Shaking Table Test

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)

老朽化したため池の改修策として、ベントナイト遮水シートを用いた遮水工法がある。しかし、遮水シートを用いた堤体の設計は確立されていない。さらに、地震に対しての検討は必須であるといえる。そこで、本ノートでは地震動を与えた堤体の変形挙動の解明を目的とし、遮水シートを設置した堤体に対して振動台模型実験を実施した。その結果、500galの水平加速度を与えた場合においても堤体のすべり破壊は発生せず、亀裂が生じたただけであった。また、遮水シートを敷設したため池堤体に対して、震度法による地震時安定評価を行った。

キーワード：ため池、遮水シート、振動台模型実験、変形挙動

(IGC:H-04)

## 1. はじめに

日本全国にはため池が約 21 万箇所あり、その内の多くは老朽化している。老朽化したため池には漏水やほらみだし等が生じ、堤体の安定性が懸念されるものがある。堤体の破壊を防ぐため、老朽ため池の対策が必要不可欠である。従来、ため池の遮水工には前刃金工法による全面改修が適用されてきた。しかし近年、刃金土の量が減少しており、材料不足のため入手が困難なケースもみられる。これに伴い、我が国では堤体の既設盛土に遮水シートを敷設し、その上に覆土(腹付け盛土)を設置する工法が着目されてきた(図-1 参照)<sup>1)</sup>。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<sup>2)</sup>。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<sup>3)</sup>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、遮水シートを用いた堤体の設計は確立されていない。また近年、我が国では地震が多発しており、ため池の防災・減災対策の重要性が高まっている。2011年に発生した東北地方太平洋沖地震では、灌漑用ダムが地震の揺れにより決壊し、下流に甚大な被害をもたらした<sup>4)</sup>。今後予測される巨大地震に対して、ため池の耐震化および安定性評価の確立は必須であるといえる<sup>5)</sup>。堤体内部において遮水シートを敷設した箇所は静的な安定性については著者ら<sup>6)</sup>により検討されている。しかし、堤体法面に敷設した遮水シートによる堤体の耐震性に及ぼす影響は未だ明らかにされていない。また、

地震によるすべり破壊が発生した場合、いかにして堤体破壊を起こすのか不明確である。

振動台実験による、道路盛土の耐震性能等については数多く検討されているが<sup>7)</sup>、遮水シートを用いたため池堤体の解析はまだ着手されていない。

そこで、本研究では今後予測される巨大地震に対して、遮水シートを敷設したため池堤体の常時および地震時における安定性を明らかにすることを目的として進めている。本ノートでは、その目的の一つとして、遮水シートをはりつけた地震時の堤体の変形挙動を解明するために実施した振動台模型実験の結果について報告する。

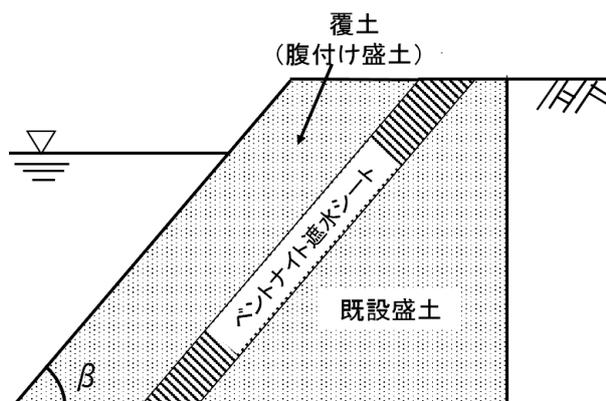
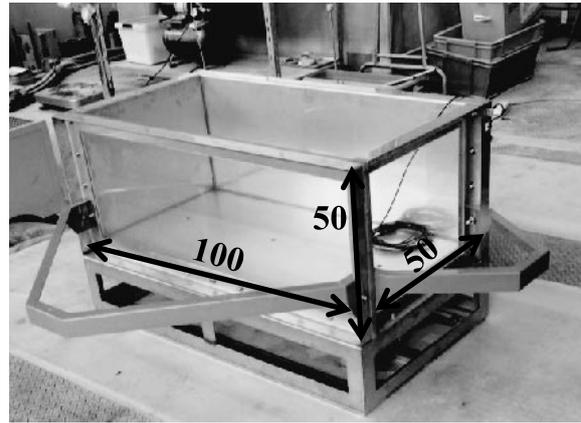


図-1 遮水シートを敷設した堤体の断面図(模式図)

## 2. 振動台による模型実験

### 2.1 試験システムおよび土層

本研究で用いた振動台実験における加振試験システムは、油圧サーボ式振動台、制御盤、アクチュエーター、土層、動ひずみアンプ、記録用 PC から構成されている。本研究で用いた土層を写真-1 に示す。本装置は長さ 100cm、高さ 50cm、幅 50cm であり、正面および側面のアクリル板から堤体の断面を観察することが可能である。



単位:cm

写真-1 土層

### 2.2 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-1 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<sup>8)</sup>。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<sup>9)</sup>。

表-1 9.5mm 通過分のまさ土の物理特性<sup>6)</sup>

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

### 2.3 試験手順

初めに、土層の底面にまさ土を高さ 5cm までになるよう突き固めた。次に、ため池堤体となる盛土の突き固めおよび成型を行い、盛土の法面に遮水シートを敷設した。シートの上部は、ピンによって盛土に固定されている。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。

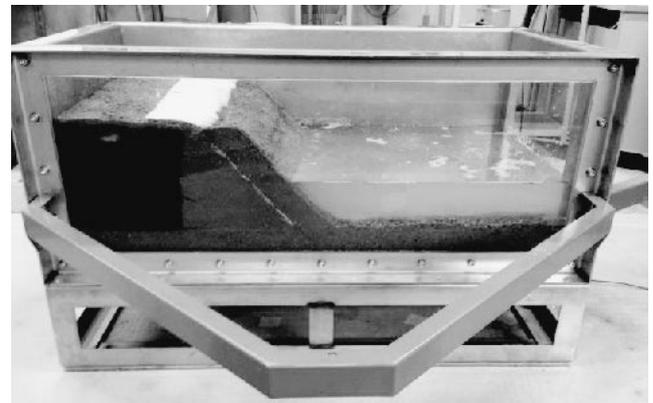


写真-2 完成した模型堤体

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。本実験は地震時における堤体の挙動を把握する目的で行った。そのため、堤体法面がスロッシングによって浸食されるのを防ぐため、加振前に水を排出した。なお、排水後から振動開始までの時間は十分短い。

測定箇所をそれぞれ示す。堤体の試験ケースおよび加振条件を変えることにより、堤体が破壊に至る水平加速度と堤体の寸法による違いを検討した。

加振方法は堤体の天端（上面）あるいは法先に明らかに変状が生じるまで、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<sup>9)</sup>。

### 2.4 試験ケース

表-2 に試験ケースを示す。表には、試験 No.1~3 までの模型堤体それぞれの盛土および覆土の寸法および加振条件を記載している。また、図-2 に模型堤体の模式図を示す。表中の各寸法は同図に対応している。なお、堤体 No.2 は No.1 を元に、No.3 は No.2 を元に成型、作製したものである。

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-3 (a), (b) に

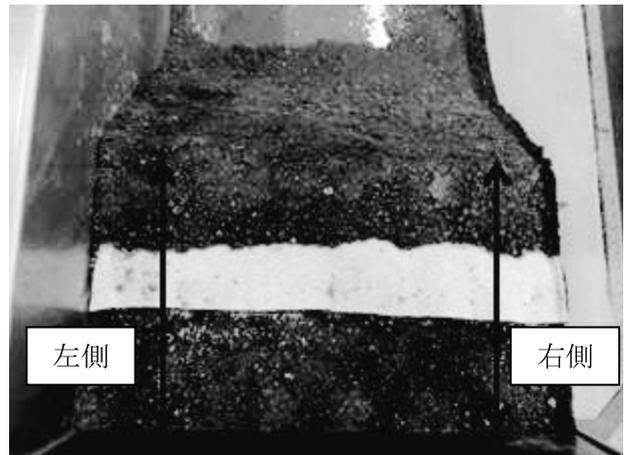
### 3. 試験結果

#### a) 模型堤体 No. 1, 2

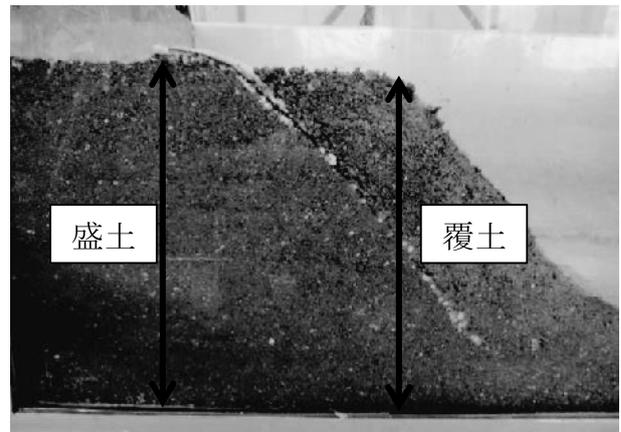
初めに、堤体 No.1 を対象に加速度 200~400gal の下で試験を行った。しかし、400gal での加振終了時においても堤体の変状は確認されなかった。そのため、No.1 を成型することで、盛土および覆土の傾斜が異なる堤体を作製した。この堤体を No.2 とした。No.2 においても上記と同じ加振条件で試験を行ったが、試験終了時まで堤体の破壊は確認されなかった。

#### b) 模型堤体 No. 3

堤体 No.2 を成型し、覆土の傾斜を 60° とした。まず、加速度 200gal の下で試験を行った。その結果、加振終了時に覆土と遮水シート（不織布側）の境界面において 2ヶ所の亀裂が確認された。写真-4 (a) ~ (c) に発生した亀裂を示す。その後、300~500gal まで加振を行ったが、堤体の破壊は起こらず、亀裂の変状進展も確認されなかった。また、試験終了時に覆土およびシート内部のベントナイトの含水比を計測した。表-3 に堤体 No.3 における水浸日数、試験終了後の遮水シート内部のベントナイトの含水比、覆土の含水比を示す。遮水シートの含水比は堤体上部（天端付近）、中央、底面の高さの異なる 3 ヲ所から計測した。また、既往の研究<sup>9)</sup>により得られた、傾斜角 34~45° の 3 種類のため池堤体において遮水シートを 6 ヲ月水浸させた際のベントナイトおよび堤体土の含水比を表-4 に示す。これらと比較すると、模型実験における遮水シートの含水状態は現場でのそれに近い状態であったといえる。



(a) 上面



(b) 側面

写真-3 測定箇所

表-2 試験ケース

試験No.	盛土部分					覆土部分			加振条件		
	底土 (cm)	堤高 (cm)	堤頂幅 (cm)	堤体幅 (cm)	傾斜角 (°)	覆土幅(上) (cm)	覆土幅(下) (cm)	傾斜角 (°)	加速度 (gal)	周波数 (Hz)	加振回数
1	5	20	15	35	45	10	10	45	200~400	3	100
2				31	50	9	9	50			
3				31	50	6	4	60	200~500		

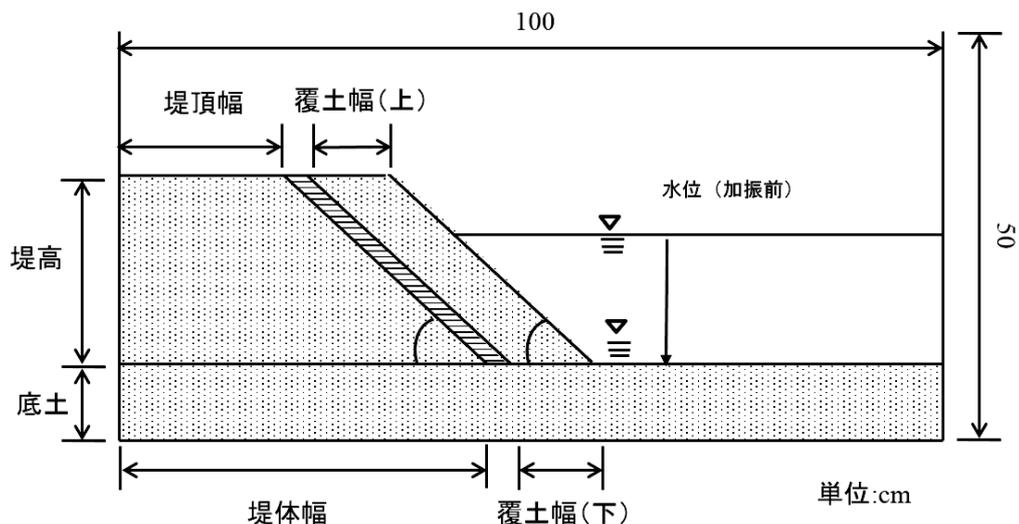


図-2 模型堤体の模式図

図-3 は、各加速度での加振終了時に対する堤体 No.1 の測定寸法をグラフで表したものである。堤体作製完了時から試験終了時まで、上面左側は 28.5cm、右側 28.0cm、盛土および覆土高さは 25.0cm のままであった。なお、堤頂幅の異なる No.2, 3 についても図-3 と同じ傾向がみられた。

以上より、傾斜角 45°以上の急勾配においても、遮水シートを敷設した堤体のすべり破壊は発生せず、堤体の変状は、シート（不織布）と覆土との境界面において亀裂が発生するだけであった。今回の実験では堤体の詳細な変位、加速度等が測定されていないため、最終的な結論を出すまでに至っていない。しかし、今回実施した 3 ケースから、遮水シートが堤体の耐震性低下を招く可能性は高くはなく、堤体の安定性には覆土の厚さおよび勾配が大きく関与していると考えられる。

### 5. 設計水平震度を用いたため池堤体の地震時安定計算

図-1 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計算した。模型堤体と図-1 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  $\rho_{dmax}=1.800\text{g/cm}^3$ 、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。

表-3 加振試験終了後の含水比

No.	傾斜角 $\beta$	シート中のベントナイトの含水比(%)			覆土の含水比(%)	水浸日数(day)
		上面	中央	底面		
4	60°	19.7	173.7	179.8	19.1	6

表-4 現場試験終了時の含水比<sup>6)</sup>

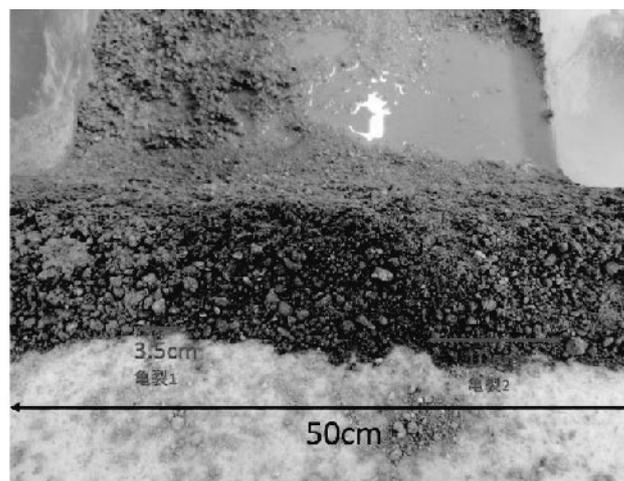
No.	傾斜角 $\beta$	シート中のベントナイトの含水比(%)	堤体土の含水比(%)
1	34°	151.9	20.1
2	40°	145.7	19.8
3	45°	180.4	24.3



(a) 亀裂 1 (3.5cm)



(b) 亀裂 2 (10cm)



(c) 亀裂が生じた位置

写真-4 覆土とシートの間に生じた亀裂

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

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-4 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 500gal 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。

## 6. まとめ

本ノートでは、遮水シートを敷設したため池堤体の地震時における変形挙動を調べ、設計水平震度を用いた安定度評価を行った。その結果、500gal の加速度を与えても堤体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亀裂が生じた程度であった。また、安全率は設計水平震度 0.5 においても 1 以上であった。覆土の形状が堤体の安定性に影響を与えると考えられることから、覆土の原勾配の影響を解明する必要がある。なお、今後は計測器等を追加し、詳細に変形挙動を計測することを検討している。

## 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) 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.
- 4) 中村晋，仙頭紀明，梅村順，大塚悟，豊田浩史：2011年東北地方太平洋沖地震による福島県中通りおよびいわき地域における地盤災害-造成盛土や自然斜面の崩壊と変状，および液状化-，地盤工学ジャーナル，Vol.7，No.1，pp.91-101，2012.

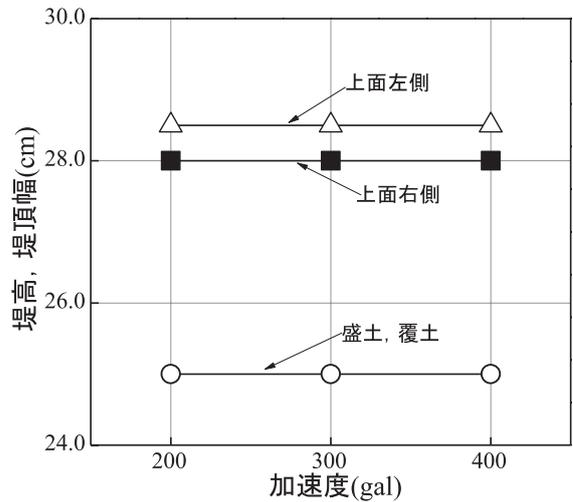


図-3 堤体 No.1 における加振終了時の堤体寸法

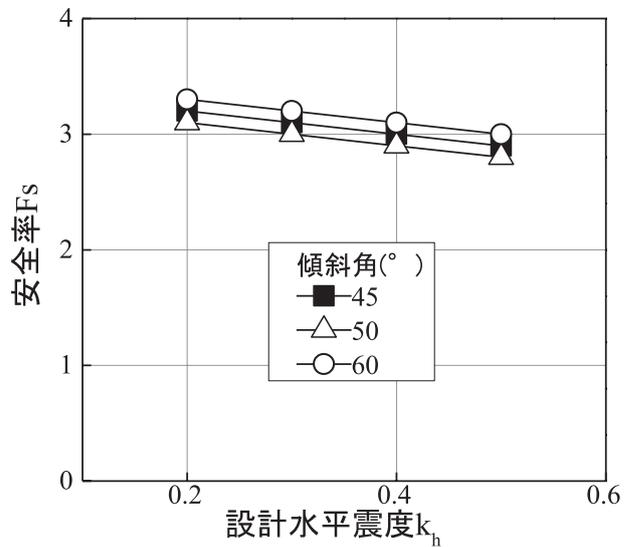


図-4 設計水平震度と安全率の関係

- 5) 福島伸二，谷茂，北島明：大原ダムにおける砕・転圧盛土工法による堤体耐震補強の設計・施工，地盤工学ジャーナル，Vol.7，No.1，pp.377-388，2012.
- 6) 神山惇，鈴木素之，河内義文，浦部朋子，深田三夫：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防止破壊の検討，地盤と建設，Vol.31，No.1，pp.157-167，2013.
- 7) たとえば鍋島康之，田中雄太，豊田新悟法尻補強した道路盛土の振動台実験，明石工業高等専門学校研究紀要，No.50，pp.35-40，2007.
- 8) 地盤工学会編：地盤材料の方法と解説，p.101，pp.115-125，2009.
- 9) 酒井久和，野津厚：地中構造物の耐震性に影響を及ぼす地震動の周波数帯域に関する一考察，土木学会第 57 回年次学術講演会，2002.

(2014 年 6 月 23 日 受付)

