

実大規模震動実験におけるため池堤体の 残留変形特性

中澤 博志¹・澤田 豊²・小田 哲也³・古林 智宏⁴・小林 成太⁵・
河端 俊典⁶・澁谷 啓⁷・片岡 沙都紀⁸・山下 拓三⁹

¹正会員 防災科学技術研究所 地震減災実験研究部門 (〒305-0006 茨城県つくば市天王台 3-1)
E-mail:nakazawa@bosai.go.jp

²正会員 神戸大学大学院 農学研究科食料共生システム学専攻
(〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1)
E-mail: sawa@harbor.kobe-u.ac.jp

³正会員 兵庫県 農政環境部農林水産局
(〒650-8567 兵庫県神戸市中央区中山手通 5-10-1)
E-mail: Tetsuya_Oda@pref.hyogo.lg.jp

⁴非会員 兵庫県 企画県民部防災企画局 (〒650-8567 兵庫県神戸市中央区中山手通 5-10-1)

⁵非会員 神戸大学大学院 農学研究科食料共生システム学専攻
(〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1)

⁶正会員 神戸大学大学院教授 農学研究科食料共生システム学専攻
(〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1)

⁷正会員 神戸大学大学院教授 工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1)

⁸正会員 神戸大学大学院 工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1)

⁹非会員 防災科学技術研究所 地震減災実験研究部門 (兵庫耐震工学研究センター)
(〒673-0515 兵庫県三木市志染町三津田西亀屋 1501-21)

本研究では、従来工法である前刃金工法に必要な粘性土不足への対応として、遮水シート工法によるため池堤体の耐震性検証を目的に、実大規模震動実験を実施した。本実験では、前刃金工法および遮水シート工法による堤高 3m の実大規模ため池堤体を土槽内に施工し、正弦波の同時加振により地震時挙動と加振後の残留変形や損傷状況を比較・観察した。レベル 1 およびレベル 2 地震動相当の加振を実施した結果、遮水シート工法で改修された堤体天端に、ベントナイトシートと土の剥離に起因する比較的大きなクラックが発生したが、漏水までは認められず、堤体の要求性能を満足する結果が得られた。今後、破堤・決壊に繋がる可能性判断や発災後対応の検討をするため、基礎データの収集として、3D レーザー計測による堤体の残留変形把握を試み、手法の有用性について確認した。

Key Words: small earth dam, full-scale shaking table test, geosynthetics clay liner, dynamic cone penetration, residual deformation, three-dimensional terrestrial laser scanner

1. はじめに

我が国にはおよそ 20 万カ所のため池が存在し、古くは江戸時代より前に築造されたものも 7 割を占めており¹⁾、堤体としての種々の性能に劣るものも少なくないと考えられる。このように、古くに築堤されたため池では漏水による決壊のリスクが高く、全国的にその改修が急務となっている。一般的なため池改修では、粘性土や改

良土を遮水材として上流側に用いる前刃金工法が一般的ではあるが、近年、良質な粘性土が不足しているのが現状である。土地改良事業設計指針「ため池整備」²⁾によると、遮水性材料の入手が困難な場合、合成ゴム系シートや合成樹脂系シート等を用いた表面遮水壁型による改修方法が示されている。一方、廃棄物処分場において実績を有するベントナイト系シートをため池の遮水材として採用する事例が見られることから³⁾、遮水シート工法

によるため池改修を前提とした実大規模の震動実験が著者らによって実施された。この実験では、前刃金工法および遮水シート工法による堤高 3m の実大規模ため池堤体を土槽内に施工し、正弦波の同時加振により地震時挙動の比較が行われた。盛土構造物の動的挙動に関する既往の研究の多くは、小規模～中規模クラスの模型実験か、数値解析的アプローチによるものであり、実大規模堤体を扱った実験研究事例は、今回の実験が初めてであると考えられる。本実験の全体概要と地震時挙動に関しては、すでに澤田ら⁹⁾により述べられており、また、ベントナイトシートで改修されたため池堤体の地震時安全性については、小田ら⁹⁾により報告されている。

一方、ため池堤体の被害事例に関する調査・研究については、谷・長谷川⁹⁾により、1983 年日本海中部地震を中心とする 5 つの地震被害事例が資料・現地調査を主にまとめられている。ため池堤体の地震時被害の傾向として、a) 斜面滑り・孕みだしによる変状は、上流側が下流側に比べて倍程度発生していること、b) 基礎地盤や堤体土が砂質土の場合、被害率が高いこと、および c) 地震時の貯水率が高い場合に大きな被害に結び付きやすいこと等が示されている。

近年のため池の地震時被災事例としては、1995 年兵庫県南部地震において、当時、兵庫県内約 51,000 箇所のため池のうち、約 60% が震央から半径 30km の範囲に被害が集中し、特に、淡路島北部に集中していたことが報告されている⁷⁾。淡路島のため池は多くが谷地形の農地の上部に設置されており、決壊すれば下流へ被害を及ぼすことが容易に想像されたが、被災傾向として、堤体前法の滑落、ひび割れ、および縦断方向のクラックに留まったものが大半であった。しかしながら、表面的に小さなクラックでも、堤体内部では多数発生しているケースも確認された。

先の 2011 年東北地方太平洋沖地震では、津波による沿岸部の各種被害が記憶に残るところではあるが、内陸部においても、大きな事例の一つとして、ため池の決壊等の甚大な被害が生じた。福島県内を例にとると、ため池 3,730 カ所の内およそ 20% に相当する 745 カ所で、多くの滑り・孕みだし等の被害が報告され⁸⁾、そのうち藤沼貯水池、青田新池および中池は決壊に至っている。特に藤沼貯水池では、堤防が決壊することで、約 150 万トンの濁流が一気に流下し、下流側で 7 名が死亡、1 名行方不明となった。

2016 年 4 月の熊本地震では、熊本県益城町で震度 7 が連続で発生する等、今までにない一連の地震が頻発し、甚大な被害に見舞われた。「平成 28 年（2016 年）熊本地震の農林水産業関係被害の状況」⁹⁾を確認すると、熊本県内の点検対象である 122 箇所のため池のうち、109 箇所は異常が無く、クラック等の変状が確認されたのは、

大切にため池を始めとする 13 箇所であったことが示されている。発災時の対応として、変状が認められたため池については、安全上の観点から一定の水位まで低下させ、ブルーシート養生による応急措置が施されたようである。

上述の調査・研究や被災事例を俯瞰すると、ため池堤体は、崩壊や大規模な損傷に至るケースもあるが、大半は天端でのクラック発生が主であったものと判断される。しかし、一見軽微であるように見えても、1995 年兵庫県南部地震での事例にあるように、堤体内部構造が損傷していたケースも見受けられる。この事実から類推すると、被災程度が軽微と判断されても、実際には破堤・決壊に繋がる可能性を秘めていた堤体は想像以上に存在していたことも考えられる。したがって、地震時の安定性だけでなく、地震後の被害拡大の可能性を迅速に判断するための評価方法を検討しておく必要があるものと思われる。

一連の実大規模震動実験のうち、発災後対応の検討に資するための基礎データの収集を目的に、加振前後において 3D レーザー計測を行い、堤体の損傷度合いと加振後残留変形の把握を行った。本報告では、加振後の損傷状況の目視観察結果を含め、残留変形を中心に報告する。

2. 加振実験の概要

本実験は、前刃金工法および遮水シート工法で改修されたため池堤体の同時加振による実大規模震動実験である。最終的な震動実験に至るまで、堤体地盤材料、ベントナイトシートの物理・力学試験¹⁰⁾、小型模型実験・数値解析による実験時の挙動予測¹¹⁾および試験施工による施工要領の策定を行った。また、これらの検討の間、本震動実験専用として、大型土槽 2 基を作製した。

震動実験の実施にあたり、防災科学技術研究所所有の実大三次元震動破壊実験施設（E-ディフェンス）を用いた。震動台施設の仕様を表-1 に示すが、堤高 3m を有する実大規模のため池堤体の地震時の破壊挙動を再現するには十分な性能を有している。

表-1 震動台の仕様

項 目	仕 様	
最大搭載質量	12MN (1,200 tonf)	
搭載面積	20m × 15m	
駆動方式	アキュムレータ蓄圧／電気油圧制御	
加振方向	水平(X,Y)	鉛直(Z)
最大加速度 (最大質量搭載時)	900cm/s ² 以上	1500cm/s ² 以上
最大速度	200 cm/s	70 cm/s
最大変位	±100 cm	±50 cm
許容モーメント	水平軸周り	鉛直軸周り
	150MN・m 以上	40MN・m 以上

以下に、震動実験に至るまでの概要について示す。

(1) ため池堤体の諸元

2種類のため池堤体造成にあたり、写真-1に示すように、内寸が長さ $L=12.59\text{ m}$ 、高さ $H=3.55\text{ m}$ および幅 $W=2.50\text{ m}$ の鋼製土槽2基をそれぞれ用いた。また、写真-1は、手前が遮水シート工法、奥が前刃金工法による堤体であり、堤体右側は湛水部となっている。この湛水部は、堤体造成後、上流側所定水位まで注水したものである。実験に際しては、水の飛散を防止するため、湛水側の一部をビニールシートで覆うとともに、水面に消波材を設置した。

前刃金工法および遮水シート工法により改修された堤体断面を図-1に示す。施工方法は一部異なるものの、両堤体の基本諸元は堤高 3 m 、天端幅 1.5 m 、法面勾配 $1:1.5$ および基礎層 0.2 m であり、上流側には水位 2.5 m の湛水部が設けられている。

(2) 地盤材料特性

ため池堤体の主な構成材料はランダム土であるが、前刃金工法による堤体の上流側には、刃金土と呼ばれる粘性土、一方、遮水シート工法では、ベントナイトシートが用いられている。実験で用いた刃金土は、兵庫県小野市で採取した礫混じりの粘性土であり、ランダム土と併せ、粒径加積曲線および締固め特性を図-2および図-3にそれぞれ示す。なお、実験工程上の制約により、湛水後、3～4日程度で堤体内部に水を浸透させることが必要であったため、実際には、刃金土と掛津珪砂 ($D_{50}=0.33\text{ mm}$, $U_c=1.57$) の混合土をランダム土とし、室内・屋外混合による確認を通じ、ランダム土の透水性を高める試みを行った。その結果、刃金土に比べ大きな粒径の構成比率が高い混合土の最大乾燥密度 ρ_{dmax} が増加している。また、室内試験により求めた透水係数 k は、刃金土のみで $9.42 \times 10^{-6}\text{ m/s}$ であったのに対し、混合土では $2.39 \times 10^{-5}\text{ m/s}$ と僅かに透水性が上昇した。また、三軸圧縮試験(CUB)試験から求まる強度定数に関しては、刃金土のみで、 $c'=38.4\text{ kN/m}^2$, $\phi=33.2^\circ$ 、一方、礫を除いた混合土では、 $c'=6.1\text{ kN/m}^2$, $\phi=35.5^\circ$ となった。

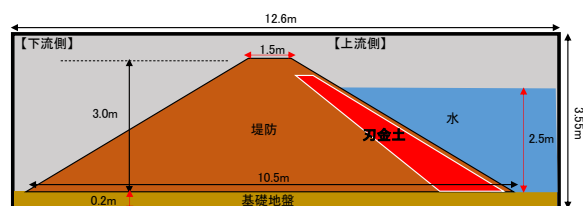
遮水シート工法で用いた厚さ約 6 mm のベントナイトシートの力学的性質については、既往の検討¹⁰⁾における一面せん断試験により、 $c=15\text{ kN/m}^2$, $\phi=28^\circ$ が得られている。また、メーカーによる試験成績証明書による引張り強さ (JIS L 1908 準拠) は、試験片 $5\text{ cm} \times 25\text{ cm}$ に対し、たて 13.2 kN/m 、よこ 16.7 kN/m であった。

(3) 堤体の施工

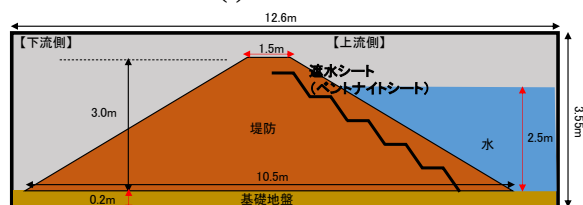
土槽内における堤体の造成にあたり、事前に試験盛土を行い、締固め回数等の施工要領を検討した⁴⁾。試験盛



写真-1 震動台の状況



(a) 前刃金工法



(b) 遮水シート工法

図-1 ため池堤体断面図

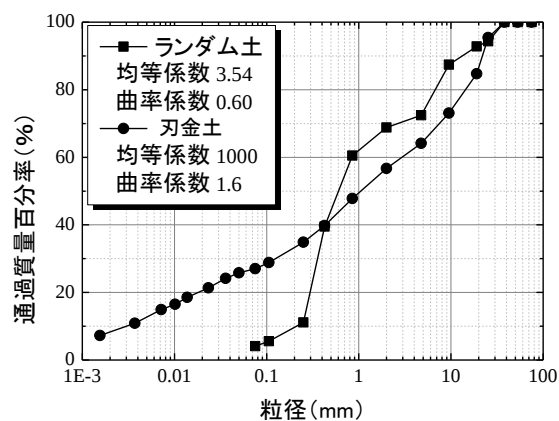


図-2 粒径加積曲線

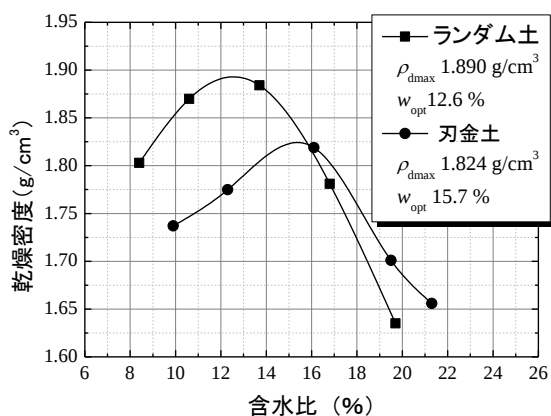


図-3 締固め曲線

土では、ランダム土を用い、およそ 20cm とした基盤上に所定の転圧回数 (0, 4, 6, 8 および 10 回) の盛土を 2 層造成 (盛土厚 40cm) し、密度試験を実施した。巻出厚 25cm とした敷均しはバックホウ及び人力で行い、転圧機械は 800kg のハンドローラーを使用した。一連の検討結果から、締固め度 D 値の目標を 95%以上とした場合に、ハンドローラーによる締固め回数を 6 回、仕上げ層厚を 20cm にするための巻出厚は 23cm であることを確認し、実際の土槽内の造成作業の目安とした。各層の転圧後には、締固め密度および含水比を測定し、堤体造成完了後、法面整形を行った。遮水シート工法に関しては、写真-2 に示すように、堤体の造成後、ベントナイトシート敷設位置を段切りし、ベントナイトシートを敷設した。敷設後には、再度ランダム土を敷均し、振動プレートコンパクタにより 8 回の転圧を実施し、堤体の仕上げを行った。すべての施工完了後、上流側に注水を開始した。

(4) 加振条件

震動実験における加振条件は、図-4 に示す様に、漸増・漸減部それぞれ 10 波を含む 5Hz の正弦波 60 波を堤体横断面方向に入力した。加振は加速度入力とし、1 回目はレベル 1 地震動を想定し、150 Gal を目標に加振し (振動台応答値で最大 177 Gal) 、続けて 2 回目の加振ではレベル 2 地震動相当とした 400 Gal を目標に加振を行った (振動台応答値で最大 471 Gal) 。なお、加震時には、前刃金工法と遮水シート工法で加速度 (各々 50CH, 55CH) 、間隙水圧 (それぞれ 24CH) 、およびレーザー型変位計による堤体変位 (それぞれ 24CH) の計測を行った。参考文献⁴⁾に詳しく述べられているため、ここでは割愛する。

(5) 堤体の加振前調査結果

堤体造成時、撤出し各層において、RI 計器による土の密度試験および砂置換法による土の密度試験を実施し、施工管理を行った。また、造成終了後、注水前には、天端から簡易軽量動的コーン貫入試験¹²⁾を行い、堤体の品質の確認を実施した。簡易軽量動的コーン貫入試験は、ハンマーによる打撃でロッドとその先端に接続したコーンを地盤に打ち込み、そのときの 1 打撃ごとにコーン先端抵抗 q_d を得ることが出来る。特徴として、a)狭い場所において、一人で試験が可能、b)打撃力が任意であり試験に時間をそれほど要さない、および c)試験後直ちにデータのチェックが可能な点が挙げられる。

図-5 にランダム土を対象とした締固め度 D 値およびコーン先端抵抗 q_d の分布を示す。前刃金工法および遮水シート工法における D 値を見ると、RI および砂置換法による手法間の相違や 5% 程度のばらつきが見られる

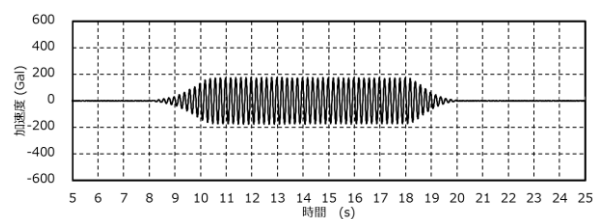


(a) ベントナイトシートの敷設部の段切り

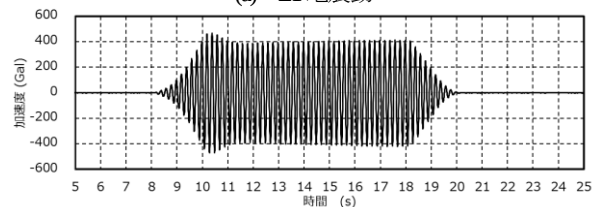


(b) ベントナイトシートの敷設

写真-2 遮水シート工法における施工状況



(a) L1 地震動



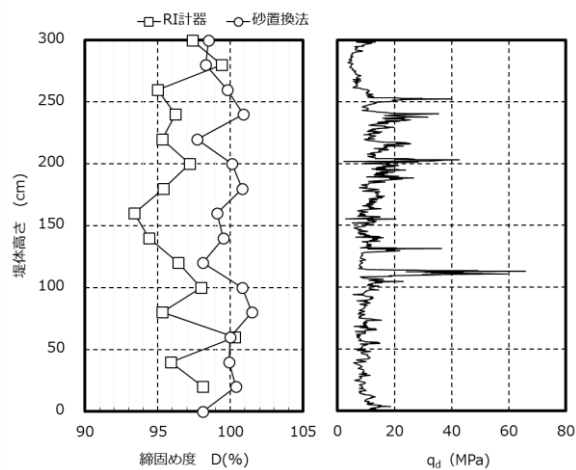
(b) L2 地震動

図-4 入力波

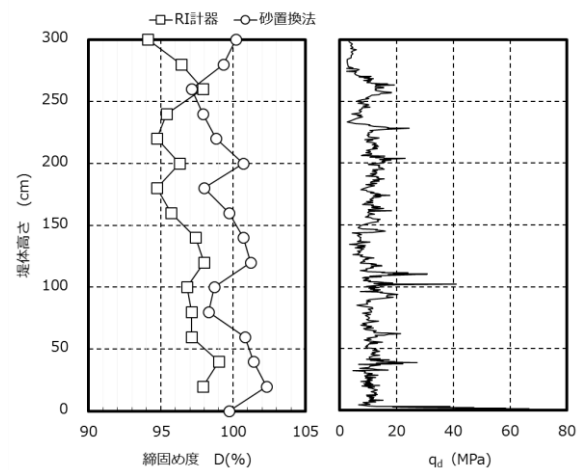
ものの、一部堤体高さ深度を除き、全体的に 95% の目標値をクリアしていることが確認できる。 q_d については、ランダム土に含まれていた礫当たりの影響と思われる堤体高さ (例えば、前刃金工法 110cm の高さ等) を除き、周期的にピークが現れていることから、撤出し後の転圧面を反映しているものと考えられる。また、 D 値と q_d の相関については、それぞれ感度が異なるため、明瞭な関係は見られない。

3. 加振実験および堤体損傷調査結果の概要

加振実験から得られた堤体の動的挙動および加振後に実施した損傷観察結果を次に述べる。

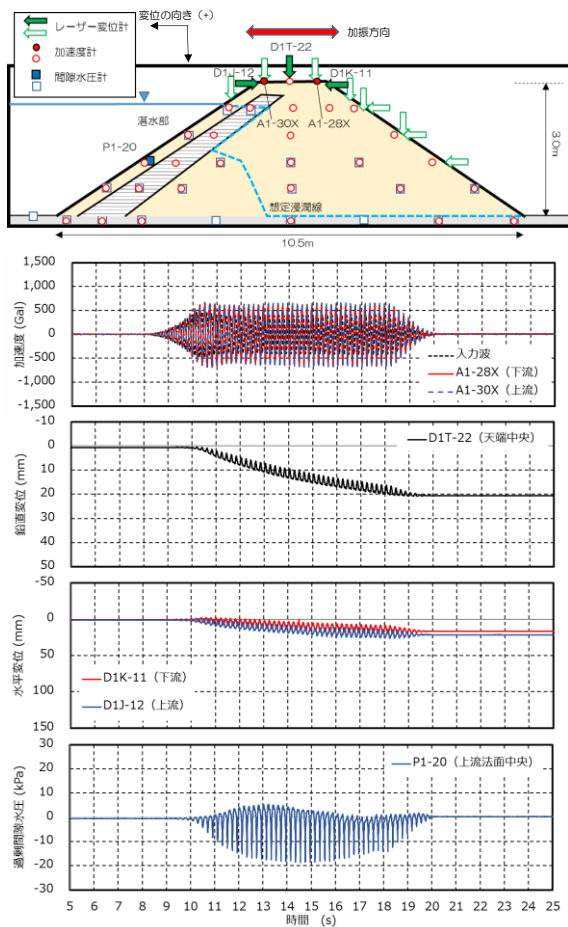


(a) 前刃金工法

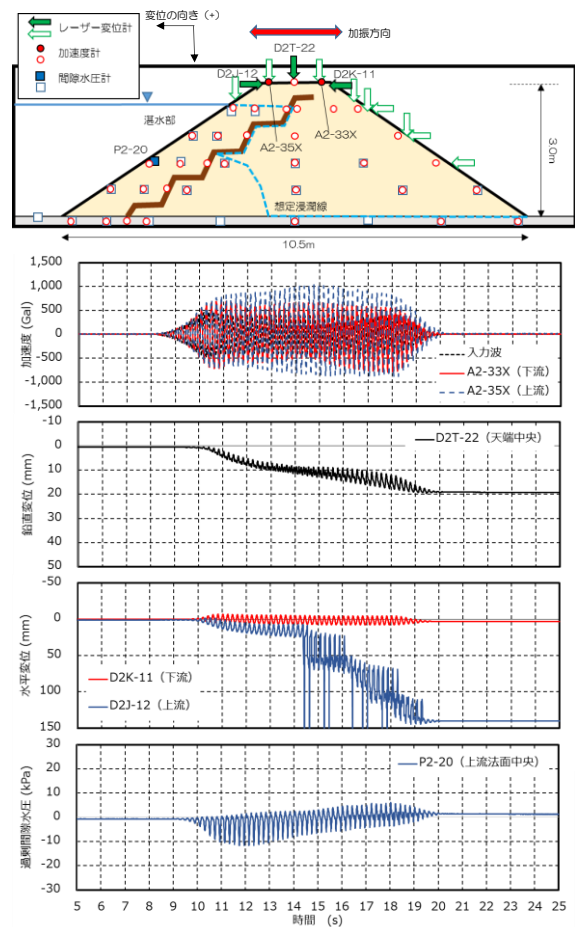


(b) 遮水シート工法

図-5 加振前の締固め度および簡易軽量動的コーン貫入試験結果



(a) 前刃金工法



(b) 遮水シート工法

図-6 代表箇所における時刻歴データ

(1) 加振時動的挙動

最初に実施したレベル 1 地震動（最大 177 Gal）による加振の結果、前刃金工法と遮水シート工法ともに漏水は発生せず、天端の沈下量、下流側法面の水平変位量ともに 1mm 以下ではほぼ無被害あったことが、澤田ら⁴⁾により既に報告されている。

続いて実施したレベル 2 地震動（最大 471 Gal）による加振結果から、代表的なデータを図-6 に示し、動的

挙動の概要を述べる。前刃金工法および遮水シート工法ともに法肩の加速度応答が増幅し、上流・下流での差は殆ど認められない。両工法で比較すると、前刃金工法で最大 600Gal、一方、遮水シート工法では 1000Gal 程度を示した。また、変位に着目すると、加振直後から堤体が変形し始め、天端では約 20mm の沈下が生じている。一方、水平変位については、正の値が上流側の方向を示すことから、両工法共に、天端部では全体的に上流側へ変

形していたことが伺える。なお、遮水シート工法では、図-6 中に示す時刻 14s で天端にクラックが生じたため、上流側に設置したレーザー変位計からのレーザーがターゲットから一時外れる等の影響によるデータの乱れがあった。間隙水圧挙動については、両工法共に様な傾向を示し、加振中は負圧側に偏りながら過剰間隙水圧が発生しているが、加振終了時には、殆ど残留しない結果となった。加振中の間隙水圧挙動に関しては、密度が高いため膨張的挙動を示したか、あるいは飽和度が低かった可能性が考えられるが、提示したデータから明確な理由を推察し言及するのは難しい。

(2) 加振後堤体損傷調査

加振実験終了後の排水後において、ため池堤体造成後の加振前に引き続き、簡易軽量動的コーン貫入試験を行い、また、目視による詳細な損傷調査および掘削調査を実施した。以下に、これらの調査結果について述べる。

a) 加振前後のコーン貫入抵抗値の比較

図-7 に加振前後で実施した簡易軽量動的コーン貫入試験結果を示す。前刃金工法および遮水シート工法における加振前後の q_d の傾向に著しい相違は見られないものの、局所的に傾向の異なる深度が認められる。

前刃金工法における結果を見ると、堤体高さ 200～300 cm 区間である天端から概ね 1m の深度区間において、加振後の q_d の低下が見られるが、それ以深では特に大きな変化は見られなかった。一方、遮水シート工法では、堤体高さ 250～300cm 間である天端から概ね 0.5m の深度区間において、加振前後の q_d の傾向が異なること、また、堤体高さ 100～150cm 区間である盛土内部において、加振後の q_d が増加している様子が見える。

b) 損傷状況の確認調査

加振後、堤体表面におけるクラックの発生状況を目視により観察した。また、幅が比較的大きなクラックについては、水に溶いた石灰をクラックに流し込み、その到達深さを調べた⁵⁾。前刃金工法の堤体中央および遮水シート工法の堤体中央におけるクラックの発生状況を図-8 にそれぞれ示す。

詳細は 5 章で述べるが、一連の観察・調査結果から、前刃金工法では上流および下流法面に深さ 10cm 程度で幅 1mm 程度の小さなクラックが生じ、遮水シート工法では、堤体天端に幅 10mm 程度の大きなクラックが堤体軸方向に複数発生したことを確認した。

4. 堤体残留変形計測結果

堤体全体の残留変形について、3D レーザー計測を実施し、前刃金工法および遮水シート工法の損傷状況の傾

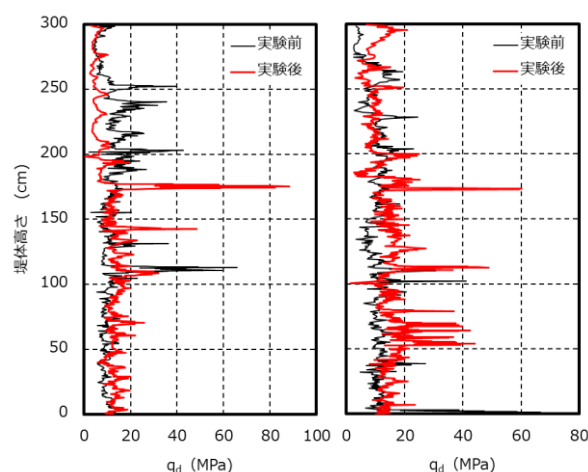


図-7 加振前後におけるコーン貫入抵抗値の比較

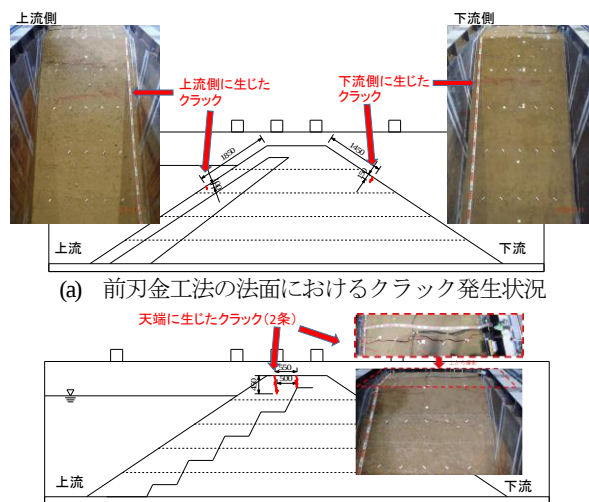


図-8 クラック発生状況

向を把握した。併せて実施した光波測量により、3D レーザー計測との比較と検証を実施した。以下に、3D レーザー計測方法と計測結果について述べる。

(1) 3D レーザー計測方法

ため池堤体造成後の湛水部への注水前と L2 地震動による最終的な加振後における排水後、3D レーザー計測を実施した。なお、排水後の計測であるが、排水に伴う堤体の変形自体は殆どなかったことから、この影響については、検討外とした。

a) 測定要領

写真-3 に示す様に、計測に先立ち、データ合成のための固定用マグネット付きの球形ターゲット（直径サイズ 14.5mm）を 6 箇所ほど設置した。設置はすべて土槽上とし、実験の計測器の配置による作業場の制約を加味し、計測器を上下逆向きに三脚に設置した。なお、計測器の主な性能は、測定範囲が 0.6～330m、レーザークラス 1（波長 1550nm）により、測定速度が 976000 点/s および測定誤差が ±2mm である。

測定箇所は、土槽四隅、長辺方向中央および盛土中心の7箇所から複数回の計測を実施し、合成処理により点群を取得することを基本とした。計測箇所を写真-4に示す。

b) データの合成・編集

加振前後に実施した2時期のデータについて、各土槽の7地点から計測したデータに合成処理を施し、各種データを作製した。合成にあたり、前処理として、ターゲットの算出および計測器内蔵カメラで撮影した写真から点群への色付けを行った後、測量座標を基準に合成を行った。色付け前後のデータについて、図-9に示す。編集用データには、計測機材（三脚、ターゲット）、計測作業員、建屋、計測対象外の足場等の不要点やノイズを含むため、これらの除去を行い色付け点群データを作製した。

c) 計測結果

加振前後における前刃金工法および遮水シート工法の堤体部分のみの切り出し図、堤体表面の計測結果（点群データ）および同図を基に、点群を5mmグリッドデータに調整し作製した等高線図を図-10に示す。切り出し図から、下流側に比べ上流側において、実験前後での湛水部による地表面の乱れの差が大きい様子が捉えられている。なお、等高線図の作製にあたり、高さは震動台床面を基準（ $Z=0$ ）としたため、ため池堤体天端の標高は、加振前に概ね3.6mとなっている。

先に述べた加振実験結果から、両工法ともに、天端で約20mmの沈下、法肩の変形から全体的に上流側へ変形していたことが示されている。図-10を見ると、加振前後での堤体形状の変化までは微かに確認できるが、残留変形の傾向までは確認するまでに至っていない。そこで、定性的ではあるが、加振前後の変状の様子を視覚的にわかるようにするため、加振前の堤体表面を青色、加振後は赤色に着色した加振前後の堤体の重ね図を図-11に示す。両工法ともに加振により沈下したことから、天端を見ると、加振前の青色着色部は見えており、一方、法面では、下部で加振後の赤色着色部が確認でき、上流側で堤体高さの下部約1/3付近からやや孕み出し見られ、下流側の状況と比較すると、堤体が全体的に上流側に変形していることがわかる。また、法尻には流出した土砂が堆積した状況もとらえている。この変形傾向は、前刃金工法よりも遮水シート工法の方がやや顕著であり、加振時の計測データと定性的に一致するものと思われる。

5. 堤体の残留変形および機能

(1) 堤体残留変形特性

ため池堤体の残留変形の特徴として、前刃金工法と遮

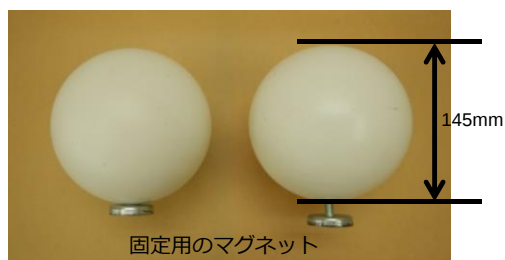
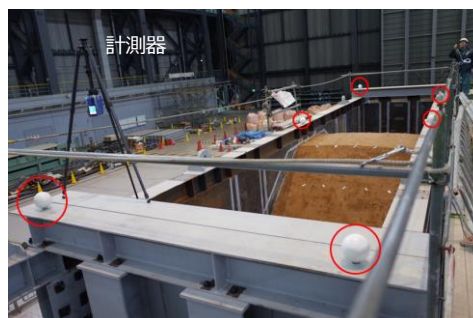


写真-3 固定用マグネット付きのターゲット



(a) ターゲット配置状況（土槽上）

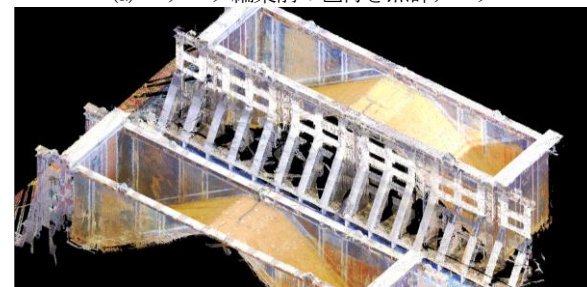


(b) 全体（手前土槽は遮水シート工法）

写真-4 ターゲット配置状況（赤丸部がターゲット箇所）



(a) データ編集前の色付け点群データ



(b) データ編集後の色付け点群データ

図-9 データの編集

水シート工法で差はあるものの、両工法で堤体が全体的に上流側に変形していることを3Dレーザー計測より確認した。図-10に図示した様に、堤体軸直交方向に3断面の側線を設けたが、図-12にセンターラインを通る断

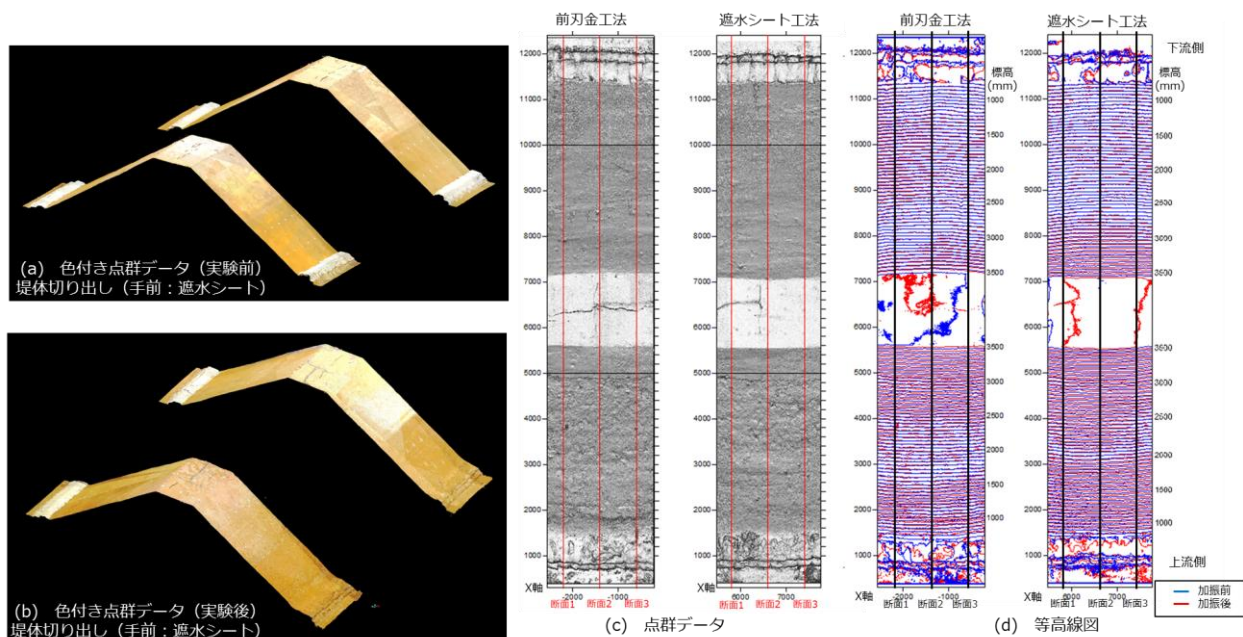


図-10 計測結果

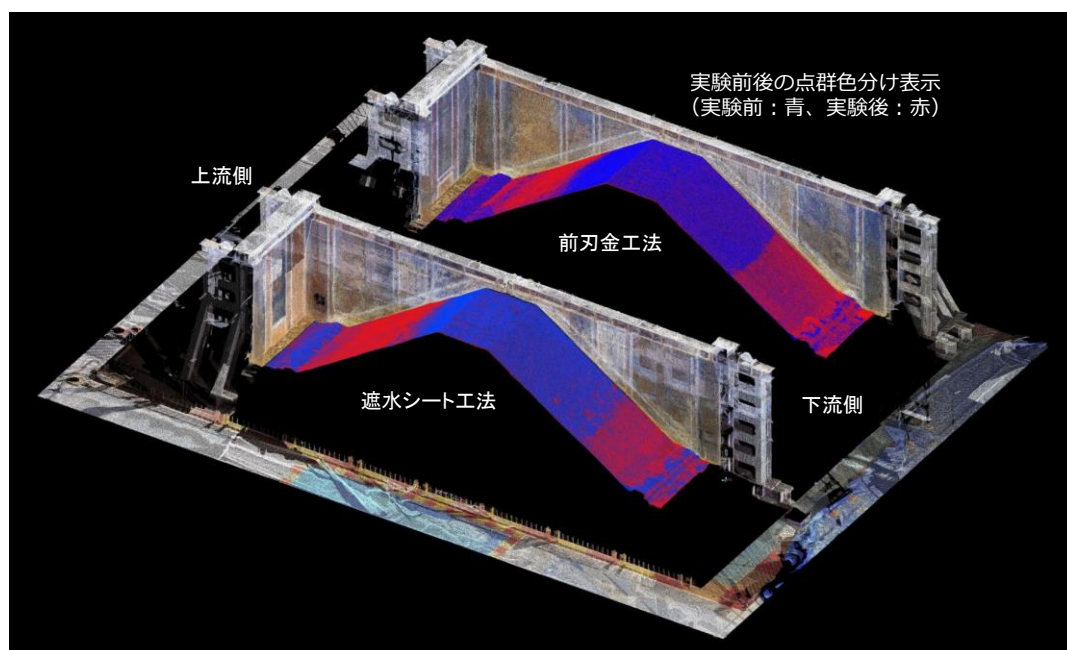


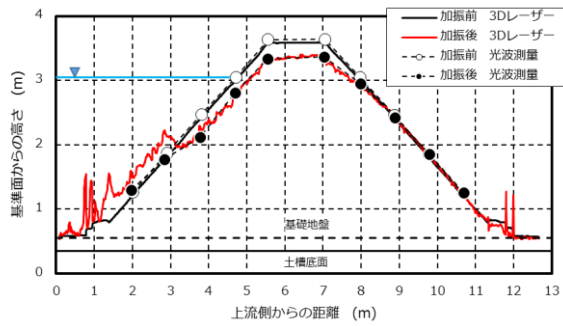
図-11 加振前後における堤体形状の重ね図

面 2 の加振前後の堤体形状を示す。同図には、別途実施された光波測量結果も併記し、加振後の変形量は 10 倍に引き延ばした。なお、図の縦軸の基準面は、震動台上の表面高さを意味する。

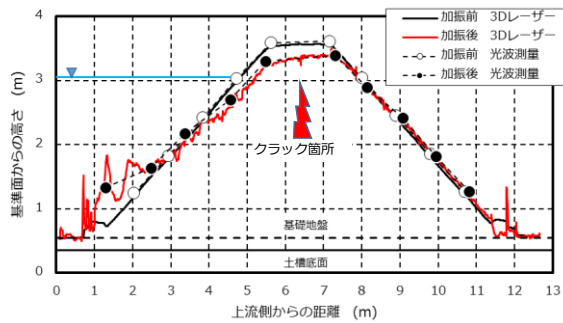
今回実施した 3D レーザー計測結果は、連続的に堤体形状を捉えているが、水平 1m ピッチで法面に据えた光波測量結果と比較すると、変状が大きかった上流側法尻付近以外では概ね一致している。なお、加振時に計測した鉛直変位は、前刃金・遮水シート両工法において、それぞれ 9箇所づつ測定しているが、残留変位の平均は前刃金工法で 22mm、一方遮水シート工法のケースで 19mm であった。また、天端沈下量の平均値は、前刃金

および遮水シート工法のそれぞれに対し、3D レーザー計測では 22.6mm、21.6mm、また、光波測量では 28.0mm および 25.5mm であり、それぞれ手法の異なる計測結果で概ね整合しているものと考えられる。

図-13 に加振前後の堤体高さの差分の分布を示すが、残留変形の特徴としては、上流側の沈下が中央および下流側の沈下よりも大きく発生し、前刃金工法よりも遮水シート工法の方がやや顕著な変形を示している。本報では、各種センサーで捉えた時刻歴データを図示していないが、澤田ら⁴⁾によると、沈下は法面の水平変位とともに、徐々に増大したことが報告されていることから、上流側の堤体中央部から下部における繰返しせん断に伴う

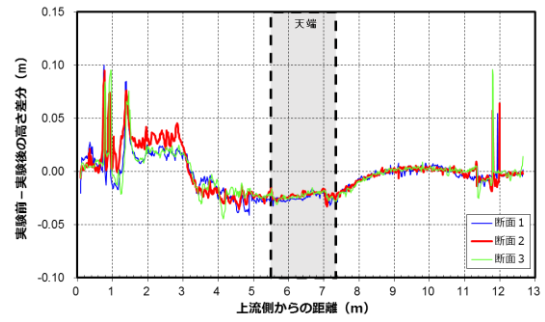


(a) 前刃金工法

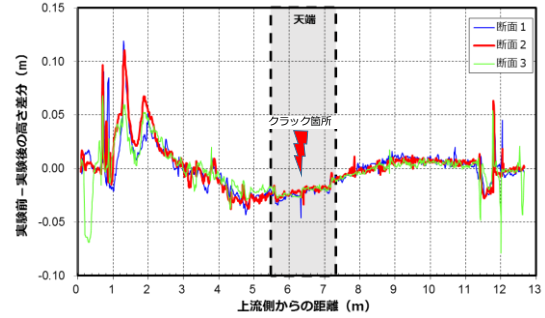


(b) 遮水シート工法

図-12 盛土形状 (加振後の変形量は $\times 10$ に調整)



(a) 前刃金工法



(b) 遮水シート工法

図-13 ため池堤体の変形量

せん断剛性低下により生じた変形が残留したものと推察される。

(2) 遮水シート工法における天端クラック

図-12(b)に示す遮水シート工法天端に比較的大きな凹部が見られ、図-13では、上流側からの距離が6.4m付近の断面1および2において、最大深度25cm程度のクラックとして確認できる。ここで、データ処理段階における加振後のレーザー計測結果を引き延ばし、図-14に図示すると、大小含め、部分的に凹みが認められる。これらのすべてが実験で堤体天端に見られた亀裂に該当するかについて、写真-5(a)と照合すると、堤体天端の堤体軸方向に生じた幅10mm程度の大きなクラックに相当することが確認できる。

先にも述べたように、小田ら⁵⁾により、クラック幅が比較的大きなものについて、水に溶いた石灰をクラックに流し込み、掘削調査によりその到達深さが調べられている。上述のクラックについて、写真-5(b)に示す掘削調査における天端中央石灰到達状況を確認すると、クラックに注ぎ込んだ石灰は、鉛直方向に深さ30cmまで達したのち、ベントナイトシートの表面前法側全体的に付着し、ベントナイトシートと上流側盛土間で最大1cmの空隙が発生していることが確認された。上記の観察より、加振時により大きな空隙が発生していたことが容易に推察でき、また、表面からの確認では分かり得ない内部損傷が生じていたことが分かった。しかし、少なくとも、堤体天端の堤体軸方向に生じた幅10mm程度の大きなクラックがであれば、その位置や表面形状が明確に特定できることが確かめられた。

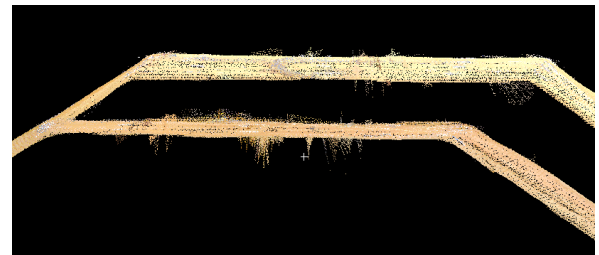
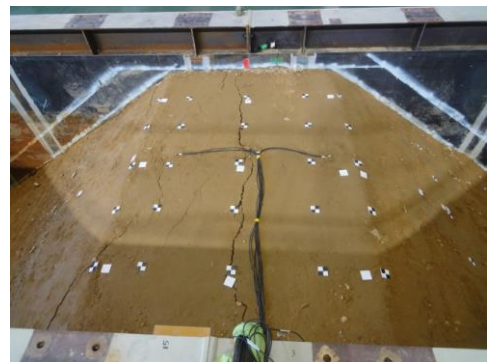


図-14 天端における計測結果



(a) 遮水シート工法の堤体天端



(b) シート側天端中央石灰到達状況

写真-5 遮水シート工法におけるクラックの到達深さ

7. まとめ

本研究では、前刃金工法と遮水シート工法により改修されたため池堤体の実大規模震動実験を実施した。堤高3mの実大規模ため池堤体を対象に L2 相当の正弦波加振後、遮水シート工法による堤体天端に比較的大きなクラックが発生したが、漏水までは至らず、前刃金工法とともに、堤体の要求性能を満足する結果が得られた。

また、加振後には、簡易軽量動的コーン貫入試験による損傷状態の確認や 3D レーザー計測による堤体の残留変形把握を試みた。コーン貫入試験結果を見ると、前刃金工法では、 q_d の傾向に大きな差が見られなかったが、遮水シート工法では、クラック等の弱部が生じた堤体天端から概ね 0.5m の深度区間において、加振前後で q_d の傾向が異なる結果が得られた。また、3D レーザー計測では、当然、内部損傷までの把握は困難であるが、計測結果から、幅 10mm 程度の大きなクラックがであれば、その位置が明確に把握可能であることが示された。これらの手法により把握できた現象や結果については、地震後に堤体機能を維持する上で十分な判断材料となる結果と言えるか、更なる検討が必要である。

謝辞：本研究は、防災科学技術研究所と兵庫県の共同研究および兵庫県・神戸大学の協力型共同研究の下に実施された。研究計画策定や実験実施にあたり、E - ディフェンスを活用した減災対策推進委員会（岡田恒男委員長）の助言を受けた。関係者各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 農林水産省：ため池，http://www.maff.go.jp/j/nousin/bousai/bousai_saigai/b_tameike/（平成 28 年 8 月 22 日閲覧）
- 2) 農林水産省農村振興局：土地改良事業設計指針「た

め池整備」，農業農村工学会，2015。

- 3) 小田哲也，森脇馨，谷垣和彦，野村純数，澤田豊，河端俊典：兵庫県におけるため池の耐震調査と保全・管理について，*水土の知*，Vol.83, No.12, pp.7-10, 2015.
- 4) 澤田豊，中澤博志，片岡沙都紀，小林成太，小田哲也，古林智宏，澁谷啓，山下拓三，谷和夫，梶原浩一，河端俊典：前刃金工法および遮水シート工法により改修されたため池堤体の実大規模震動実験，*ジオシンセティックス論文集*，Vol.33, 2016.(投稿中)
- 5) 小田哲也，澤田豊，中澤博志，小林成太，澁谷啓，河端俊典：階段状に設置したベントナイト系遮水シートがため池堤体の地震時挙動におよぼす影響，*ジオシンセティックス論文集*，Vol.33, 2016.(投稿中)
- 6) 谷茂，長谷川高士：日本海中部地震を中心とした溜池の地震被害，*農業土木学会誌*，第 55 巻，第 10 号，pp.17-25, 1987.
- 7) 兵庫県農林水産部農地整備課：兵庫県南部地震農地農業用施設震災記録誌平成 7 年 1 月 17 日発生，p.11, 1996.
- 8) 堀俊和，上野和広，松下健一：平成 23 年度（2011 年）東北地方太平洋沖地震による福島県のため池被災の特徴と応急対策，*農村工学研究所技報*，第 213 号，pp.175-199, 2012.
- 9) 農林水産省：平成 28 年（2016 年）熊本地震の農林水産業関係被害の状況，<http://www.maff.go.jp/j/saigai/zisin/160414/kumamoto/taiou.html>（平成 28 年 8 月 9 日閲覧）
- 10) 佐々木貴，川口貴之，川尻俊三，澁谷啓：ベントナイト系遮水シートと土の摩擦抵抗に関する実験的検討，*ジオシンセティックス論文集*，Vol.30, pp.133-140, 2015.
- 11) 丁経凡，澁谷啓，片岡沙都紀，白濟民，河端俊典，澤田豊：ベントナイトシートを敷設した小型ため池堤体模型の振動台実験，第 51 回地盤工学研究発表会，pp.1007-1008, 2016.
- 12) Langton, D.D. : The Panda lightweight penetrometer for soil investigation and monitoring material compaction, *Ground Engineering Septemer*, pp.33-34, 1999.

CHARACTERISTICS ON RESUDUAL DEFORMATION OF SMALL EARTH DAMS IN FULL-SCALE SHAKING TABLE TESTS

Hiroshi NAKAZAWA, Yutaka SAWADA, Tetsuya ODA, Tomohiro KOBAYASHI, Seita KOBAYASHI, Toshinori KAWABATA, Satoru SHIBUYA, Satsuki KATAOKA and Takuzo YAMASHITA

In this study, full-scale shaking table tests for embankments were carried out in order to estimate the earthquake resistance of small earth dams with geosynthetics clay liner for a short supply of clay material which requires sloping core zones at many sites. In the experiment, two types of embankments of 3 m of height were constructed in large soil containers respectively. The dynamic behaviors of embankments were observed by two sinusoidal waves of maximum acceleration of 177 and 471 Gal. After shaking, several longitudinal cracks without water leakage were occurred at the crest of the embankment with geosynthetics clay liner. Finally, a series of the three-dimensional terrestrial laser measurements was tried to grasp the characteristics on the residual deformations of the embankments. As a result, it was found out that some locations and forms of the cracks can be confirmed relatively. Therefore, it was indicated that three-dimensional terrestrial laser scanner is effective as a utility of the measurement method.