

# 盛土の地震時破壊過程に及ぼす 初期状態の影響に関する遠心模型実験

伊吹 竜一<sup>1</sup>・上村 健太郎<sup>2</sup>・土井 達也<sup>3</sup>・  
井澤 淳<sup>3</sup>・スレン ソッキアン<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター  
(〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)  
E-mail: ibuki.ryuichi.85@rtri.or.jp

<sup>2</sup>正会員 日本工営株式会社 中央研究所 (〒300-1259 茨城県つくば市稲荷原 2304)

<sup>3</sup>正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター  
(〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

本研究では盛土の地震時損傷過程を詳細に把握するため、盛土の遠心振動台実験を実施した。実験では、加振台に高速度カメラを固定することで、遠心場における加振中の盛土の撮影を試みた。さらに、加振前の盛土の初期ひずみ状態が地震時破壊過程に与える影響を確認するため、異なる締固め工程で作製した模型盛土を用いた 2 ケースの実験を実施した。その結果、PIV 解析より得られた最大せん断ひずみ分布より、加振中に法面付近にひずみが集中し、その箇所を起点として滑り破壊に至る様子を確認した。このとき、加振前の初期状態においてひずみが集中する箇所があるケースでは、加振時にも同様の箇所を起点として滑り破壊に至った。一方、比較的一様な初期ひずみ状態のケースでは法尻付近から滑り線が発生し、常時の安定解析より算定された滑り線と概ね一致した。

**Key Words:** centrifuge test, shaking table test, embankment, particle image velocimetry, damage process

## 1. はじめに

盛土の耐震性能評価では、円弧滑り破壊を前提とした Newmark 法が使用されることが多い<sup>(例えば 1) 2)</sup>。しかし、滑り破壊を仮定した Newmark 法では、滑り破壊に至るまでの実際の盛土の損傷過程を必ずしも正確に再現出来ておらず、適切な耐震性能評価を実施することが困難な場合が顕在化している。例えば図-1 の藤原ら<sup>3) 4)</sup>が行った 2011 年東北地方太平洋沖地震における鉄道盛土の地震時変位量の観測値と Newmark 法による滑動変位量の算定値との比較に示すが、この中で未被災盛土 13 箇所のうち 5 箇所で、軽微な被害程度の目安となる 20cm 未満<sup>2)</sup>よりも沈下量が大きくなり、実現象と計算値に差異が生じていると考えられる。このように、Newmark 法を適用すると、過度に安全側または危険側の結果となる傾向を示す場合がある。さらに、藤原らはこの差異の要因として、地盤材料物性および入力地震動の設定誤差、軟弱な支持地盤の影響、破壊形態の違いなどを挙げている<sup>4)</sup>。特に、盛土の破壊形態の違いにより、実現象と計算値の差が生じ

るのは、地震時の盛土の被害は沈下や法面のはらみだし、クラックの発生など、滑り破壊には至らない損傷が発生するケースが多いのに対して、Newmark 法で前提としている円弧滑りによる極限釣り合い法の安全率ではこのような損傷の過程を評価することができないためであると考えられる。

また、道路分野においても、Newmark 法により求めた沈下量を用いて盛土の耐震性能評価が行われており、Newmark 法の精度向上に関する既往の研究としては、盛土内部の加速度増幅を考慮した事例が挙げられる<sup>5) 6)</sup>。江川ら<sup>6)</sup>は、滑り線の発生位置および沈下量の予測精度の向上のため、動的 FEM 解析により算定した逐次の応答加速度分布を外力とした円弧滑り安定計算で滑り線を設定し、滑り土塊の重心位置の応答加速度を用いて Newmark 法を行う方法を提案している。その結果、提案する手法では通常の新mark法よりも実験結果に近い沈下量となった。しかしながら、これらの研究では滑り破壊が生じた後の盛土の変形に着目しているため、滑り破壊に至るまでの損傷過程は考慮されていない。

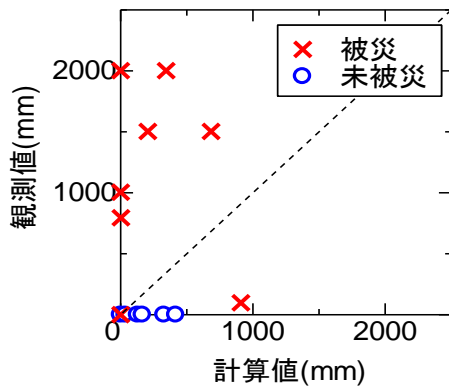


図-1 観測変位量と計算した滑動変位量の関係  
(藤原ら<sup>9)</sup>を再整理)

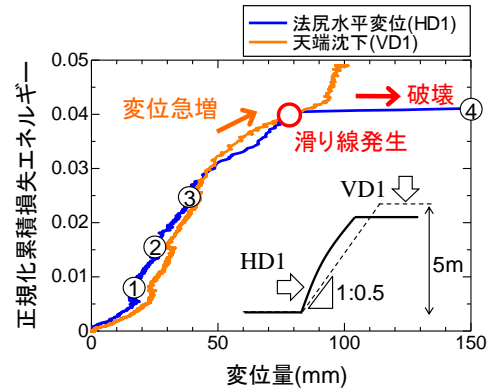


図-2 累積損失エネルギー-変位関係<sup>9)</sup>

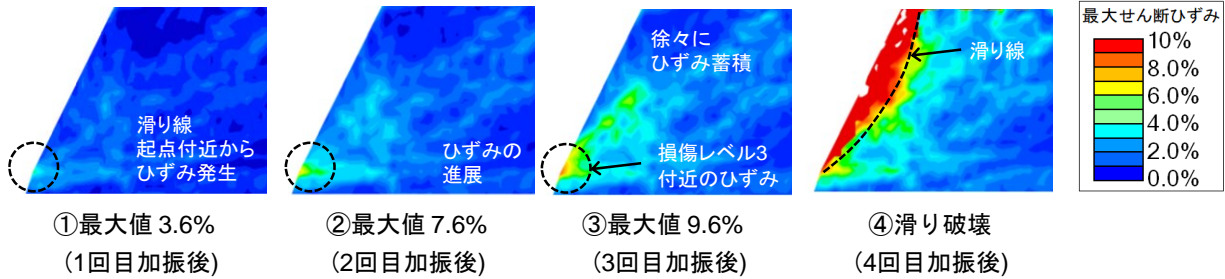


図-3 PIV解析より得られた最大せん断ひずみ分布<sup>9)</sup>

以上の背景を踏まえ、筆者らはこれまで、盛土の損傷過程を適切に考慮した耐震性能照査手法の確立を目的とし、地震時の盛土の損傷過程を把握するための遠心振動台実験を実施している<sup>7)8)</sup>。実験では複数回の加振を行い、変位や盛土内部の加速度を計測するとともに、各加振後の画像を用いてPIV<sup>9)</sup>解析を行い、盛土内部のひずみを精緻に求めて滑り破壊に至るまでの損傷過程を評価した。図-2に既往の実験<sup>9)</sup>における正規化累積損失エネルギーと変位量の関係に、各加振終了時点をプロットした図を示す。ここでは、正規化累積損失エネルギーが0.005付近を超えたときに変形の進行が鈍化しており、3回目の加振までは硬化傾向であることが分かる。そして、4回目の加振中に変位が急増し、破壊に至る様子が確認できる。また、PIV解析の結果を図-3に示すが、急な勾配を持つ盛土では、法尻付近にてせん断ひずみが集中し、その領域を起点としてせん断ひずみが内部へと進展して滑り破壊に至ることが分かる。さらに、小島ら<sup>9)</sup>は盛土材の変形特性より規定した盛土材の損傷レベルと法尻付近に生じたせん断ひずみを用いた滑り破壊に対する安全性の評価方法を提案している。また、井澤ら<sup>9)</sup>は上記の実験結果より、破壊に至るまでの盛土の損傷過程を評価可能な性能照査手法を提案している。しかし、既往の実験<sup>9)</sup>でのPIV解析では、各加振後に撮影した画像を用いているため、加振中に盛土内部にひずみが蓄積する様子や滑り破壊に至る直前の損傷過程を評価するには至っていない。

そこで、本研究では、盛土の地震時損傷過程をより詳細に把握するため、江戸崎砂を用いて作製した高さ5m、法面

勾配 1:1 の模型盛土の遠心振動台実験を実施した。このとき、遠心場における加振中の盛土の撮影を試みた。具体的には、加振台に高速度カメラを固定して土槽とともに加振することで、振動台に対する盛土の相対的な挙動を撮影した。さらに、盛土の地震時損傷過程を詳細に明らかにするため、加振中に撮影した画像によりPIV解析を実施した。また、加振前の盛土の初期ひずみ状態が地震時損傷過程に与える影響を確認するため、異なる締固め工程で作製した模型盛土を用いた2ケースの実験を実施した。

## 2. 実験概要

### (1) 試験装置および撮影環境

試験装置は、図-4に示す日本工営が所有する遠心載荷装置搭載型加振装置を使用した。このとき、振動中の盛土を撮影するため、図-5のように振動台に高速度カメラを固定して土槽とともに加振を行った。また、被写体が高速で移動する際の画像のゆがみが生じないように、グローバルシャッタータイプのカメラ (Teledyne FLIR LLC, The Grasshopper3 GS3-U3-32S4C-C) を採用した。さらに、今回の試験装置にて確保できる被写体距離が約200mmであることから、盛土の地震時挙動の観察に必要な撮影範囲を確保するために、カメラのセンサーフォーマットは1/1.8"とし、焦点距離 3.5mm のレンズ (興和オプトロニクス, LM3NCM-WP) を採用した。なお、ここでは、遠心装置に搭載されたPCにおける画像データ

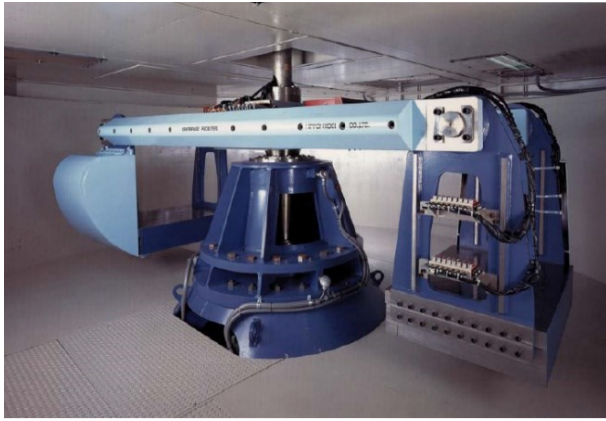


図-4 遠心载荷装置搭載型加振装置の外観<sup>1)</sup>

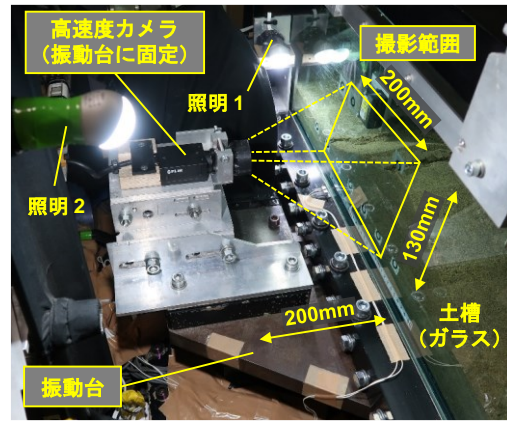


図-5 高速度カメラ設置状況

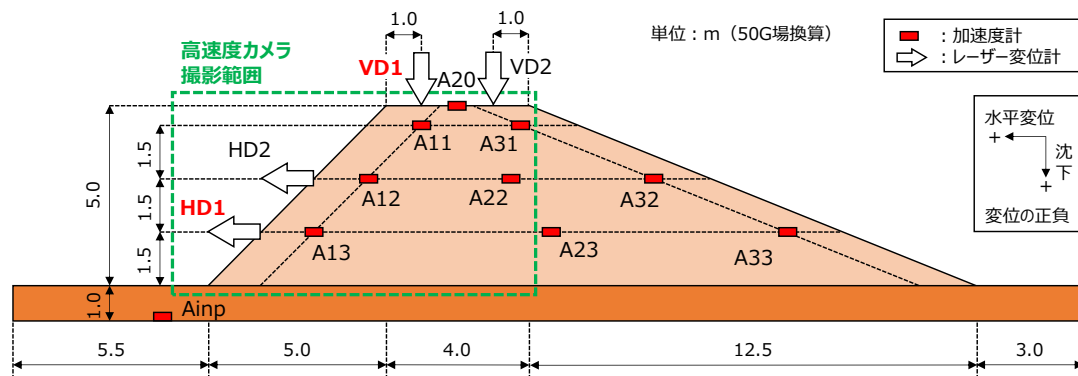


図-6 模型盛土形状およびセンサー配置図 (法面勾配は撮影側 1:1.0、逆側 1:2.5)

の保存処理速度を考慮し、撮影範囲は幅約 200mm、高さ約 130mm と設定した。また、撮影速度を 100fps に設定し、実物換算で 0.5 秒ごとに撮影を行った。

## (2) 模型盛土

模型盛土形状とセンサー配置図を図-6 に示す。なお、以降では各種数値は遠心加速度 50G 場換算した値を示す。模型盛土は、セメント改良土で構築した強固な支持地盤上に、江戸崎砂を最適含水比付近で締固め度  $D_c=95\%$  に締固めて作製し、加速度計とレーザー変位計により盛土内部の加速度および天端、法面の変位を計測した。このとき、加振によって滑り破壊が生じるよう、高速度カメラにより撮影する側の法面勾配は 1:1.0 とし、逆側の法面勾配は破壊に至らないように 1:2.5 とした。使用した江戸崎砂の物性を表-1、 $D_c=95\%$  での各種地盤材料試験結果を表-2 に示す。

盛土高さは 5m と設定し、締固め工程が異なる 2 種類の模型盛土を作製した。Case-1 では図-7 のように土槽底面より実応力場で 20mm ごとに所定の締固め度となるように締固めを行うことで模型盛土を作製した。このときの締固め層は模型鉛直方向に対して 5 層となる。一方、Case-2 では、撮影断面にて締固め状態が一様になるように、図-8 のような工程で模型盛土を作製した。まず、容器を倒して土槽背面を取り外し、前面のガラス面側より 25mm ごとに所定の締固め度となるように締固めを行

表-1 江戸崎砂の物性等

土粒子の比重	$G_s$	2.68
平均粒径	$D_{50}$	0.34 mm
有効径	$D_{10}$	0.15 mm
均等係数	$U_c$	2.6
曲率係数	$U'_c$	1.00
細粒分含有率	$F_c$	4.4 %
最適含水比	$w_{opt}$	14.6 %
最大乾燥密度	$\rho_{dmax}$	1.707 g/cm <sup>3</sup>

表-2 江戸崎砂 ( $D_c=95\%$ ) の特性

乾燥密度	$\rho_d$	1.622 g/cm <sup>3</sup>
圧縮指数	$C_c$	0.055
圧密降伏応力	$P_c$	318.1 kPa
粘着力	$c$	8.65 kPa
内部摩擦角	$\phi$	36.4 deg.

うことで模型盛土を作製した。このときの締固め層は模型奥行き方向に対して 10 層となる。また、模型盛土とガラス面、模型盛土と土槽背面の間には OHP シートを設置し、図 8(c) のように法面を整形して土槽を立てた後、盛土模型が乱れないようゆっくりと引き抜いた。

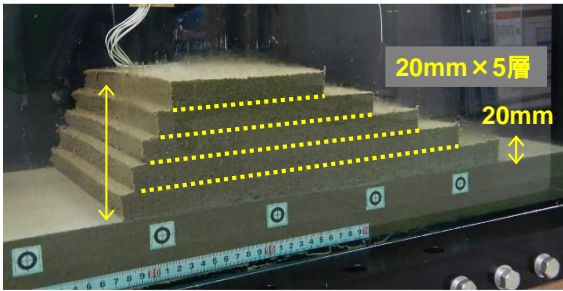


図-7 模型作製方法（土槽底面より作製、Case-1）



(a) 加速度計配置



(b) 締め固め完了



(c) 法面整形

図-8 模型作製方法（ガラス面より作製、Case-2）

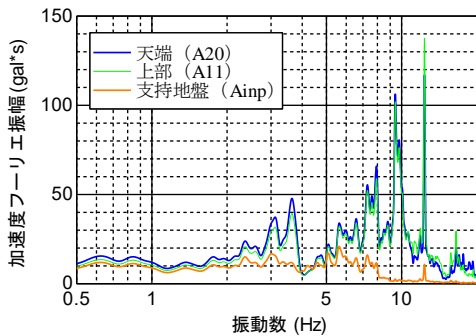


図-9 絶対加速度フーリエ振幅スペクトル (Case-1)

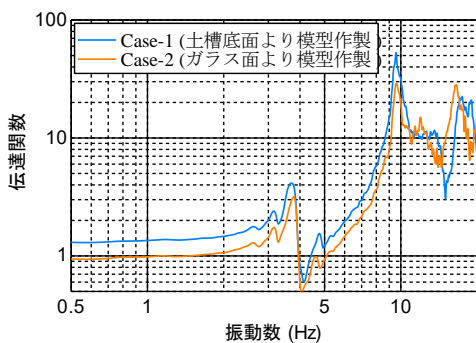


図-10 加速度の伝達関数（支持地盤 Aimp～天端 A20）

### (3) 入力地震動

模型盛土が滑り破壊に至るまでの挙動を確認するため、入力地震動は正弦波を繰り返し载荷することとし、目標最大加速度を 200gal とした 1.0Hz の正弦波を 4 波（試番 1～4）、目標最大加速度を 300gal とした 1.0Hz の正弦波を 2 波（試番 5～6）、目標最大加速度を 600gal とした 1.2Hz の正弦波を 1 波（試番 7）の順に入力した。

各ケースの試番 1 加振前には微小なホワイトノイズ加振を実施しており、Case-1 における支持地盤 (Aimp)、盛土上部 (A11)、天端 (A20) の絶対加速度フーリエ振幅スペクトルを図-9、各ケースにおける支持地盤に対する天端の加速度の伝達関数を図-10 に示す。支持地盤では加速度フーリエ振幅スペクトルが 0.5～8Hz にて概ね一定となり、それ以降では 11Hz 付近を除いて小さくなっている。これは、遠心加速度 50G 場での加振台の加振可能振動数が 0.2～8Hz であるためである。また、盛土上部および天端の加速度フーリエ振幅スペクトルの傾向は類似しており、3.5Hz, 9.5Hz, 11Hz 付近にて大きくなっている。図-10 より、伝達関数は 2 ケースとも 10Hz 付近にて最大となり、概ね同様の傾向を示している。また、今回の条件では、支持地盤において 8Hz 以上の加速度フーリエ振幅がほぼ 0 であるため、伝達関数の値が大きくなっている。一方、加速度フーリエ振幅スペクトルにおいても 9.0～10Hz の範囲にピークが見られることから、盛土の 1 次固有振動数は、伝達関数がピークとなる振動数であると考えられる。以上より、盛土の 1 次固有振動数は Case-1 で 9.57Hz、Case-2 で 9.59Hz となり、模型作製方法の違いによる差はほぼないことが分かる。したがって、正弦波の入力地震動の振動数に比べて盛土は 10 倍程度高い固有振動数を有していることとなる。

### 3. 実験結果

図-11、12 に試番 6 からの Case-1 および Case-2 の天端沈下 VD1 と水平変位 HD1 の時刻歴を入力波とともに示す。目標最大加速度を 200～300gal とした試番 6 の加振までは、天端沈下が徐々に増大しているが、急激な変位の増大はみられないため、揺すり込み沈下が主な変形形態であったと考えられる。一方、目標最大加速度を 600gal とした試番 7 では加振中に変位が急増し、どちらのケースでも盛土が図-13、14 に示すように滑り破壊に至った。ここで、地震時の盛土の変形性状を評価する場合、繰り返しせん断による変形量の蓄積が大きいため、入力波の振幅だけでなく、繰り返し特性も考慮する必要がある。そこで、それらを併せて考慮できる指標として、地盤の液状化判定で提案されている累積エネルギー  $W^{12}$  を用いて下式のように整理した。

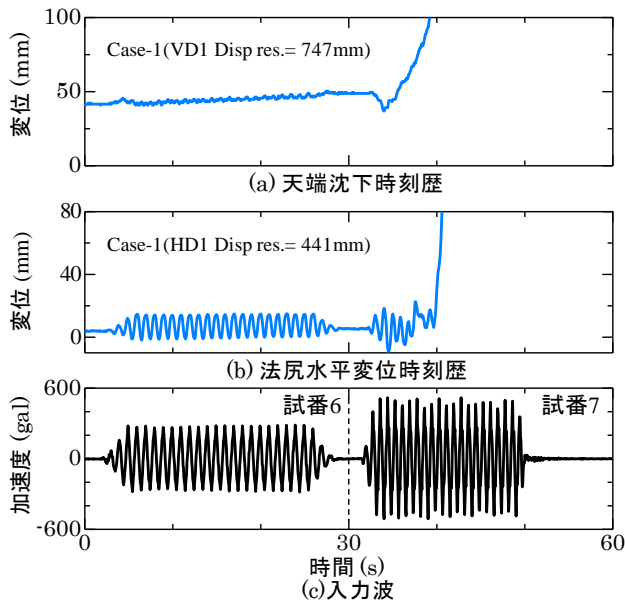


図-11 変位および入力波の時刻歴 (Case-1)

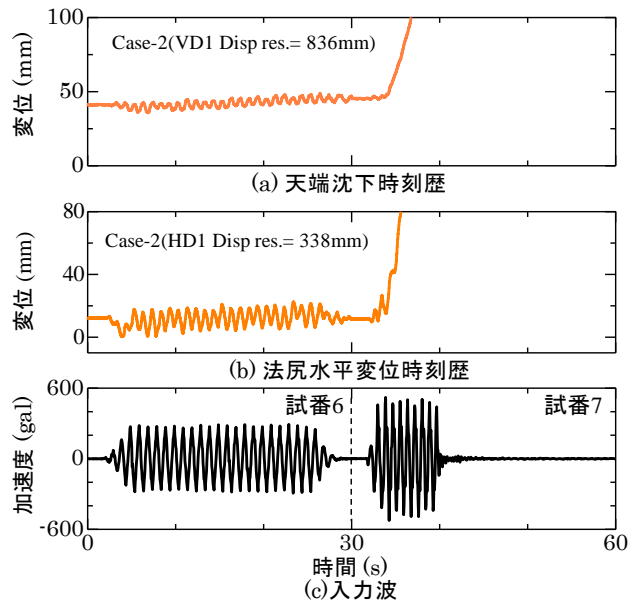


図-12 変位および入力波の時刻歴 (Case-2)

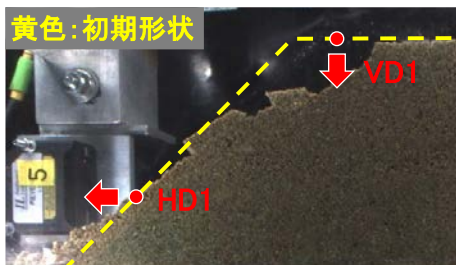


図-13 試番7加振後の盛土模型 (Case-1)

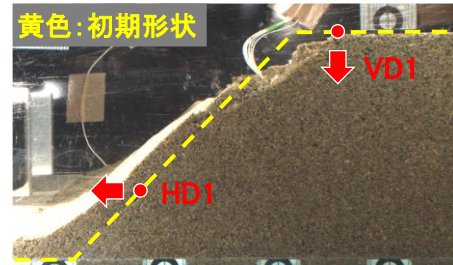


図-14 試番7加振後の盛土模型 (Case-2)

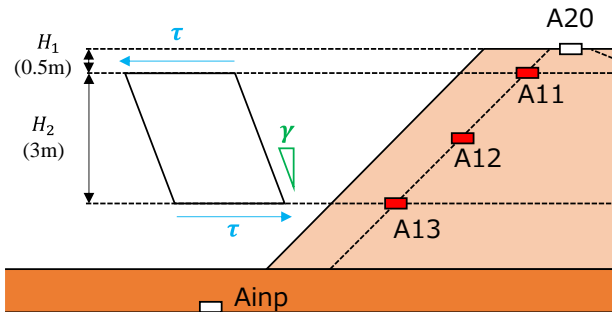


図-15 加速度記録を用いた盛土内部のせん断応力-せん断ひずみ関係の推定法

$$W = \int \tau(\gamma) d\gamma \quad (1)$$

ここで、 $\tau$ はせん断応力、 $\gamma$ はせん断ひずみであり、盛土体のせん断応力-せん断ひずみ関係は、図-15 および式(2)、(3)のように測定した加速度記録より推定した<sup>13)</sup>。

$$\tau = \rho H_1 A_{11} + \rho \frac{H_2}{2} A_{12} \quad (2)$$

$$\gamma = \left( \iint A_{13} dt dt - \iint A_{11} dt dt \right) / H_2 \quad (3)$$

ここで、 $A_{11}$ 、 $A_{12}$ 、 $A_{13}$ は盛土内の上部、中部、下部にて測定した加速度、 $H_1$ は天端から加速度計A11までの鉛直方向の距離、 $H_2$ は加速度計A11からA13までの鉛直方向の距離、 $\rho$ は盛土の湿潤単位体積質量である。そして、盛

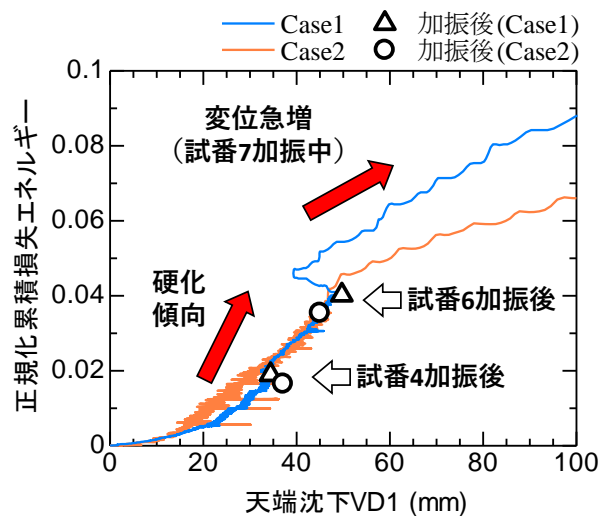


図-16 正規化累積損失エネルギー-水平変位関係

土中央部付近の有効上載圧 ( $\sigma'_v = 50 \text{ kPa}$ ) によって正規化した累積損失エネルギーと天端沈下 VD1 の関係を図-16 に示す。なお、振動成分を除去するため、0.01 秒間隔のデータに対して区間数を 50 とした単純移動平均により平滑化している。図-16 より、試番 1~6 では正規化累積損失エネルギーの増加に対して天端沈下の増加傾向は緩やかであるため、盛土は硬化傾向を示していると考え

られる。その後、試番7加振中で正規化累積損失エネルギーが急増し、それに伴い天端沈下も急増したことが分かる。また、この天端沈下の急増は盛土の滑り破壊に対応しており、図-13、14の盛土の状況とも一致している。

#### 4. 高速度カメラで撮影した画像を用いたPIV解析

Case-1における試番4加振後、試番6加振後、試番7加振中に撮影した画像からPIV解析によって求めた最大せん断ひずみ分布と体積ひずみ分布を図-17に示す。ここで、PIV解析の初期状態はG上げ後とし、ひずみ分布は初期状態からの累積としている。また、撮影した画像には大きなゆがみなどは見られず、遠心場での加振中の盛土の挙動を正確に捉えている。さらに、図-18には試番7における入力加速度と水平変位HD1の拡大図を示す。加振中の撮影タイミングを入力加速度と水平変位について赤い点でプロットしている。なお、各撮影タイミングの丸括弧の数字は図-18と対応している。

図-17(a)の試番4および試番6加振後の撮影画像からは盛土模型の明瞭な変形は見られないものの、試番7加振中では⑥にて天端にクラックが発生し、その後⑦でクラックが拡大していることが分かる。さらに、⑦では法肩から法面中腹にかけて盛土内部に滑り土塊と考えられる画像の不鮮明な箇所が見られるため、この時点にて滑り破壊が開始したと推定できる。また、図-17(b)の体積ひずみ分布より、試番4および試番6加振後では盛土下部にて圧縮、盛土上部にて膨張傾向であることが分かる。したがって、試番6までは盛土下部が揺すり込み沈下していると考えられる。試番7加振中には盛土上部も圧縮傾向を示し、天端クラック発生箇所付近や法面中腹にて大きな膨張の体積ひずみが生じている。同様に、図-17(c)に示す試番4加振後のひずみ分布においても法尻と法面中腹に最大せん断ひずみが集中しており、試番6加振後でも同箇所においてひずみが蓄積している。その後、試番7加振中では、法面中腹において最大せん断ひずみが急増して卓越するとともに、盛土内部に進展し、滑り線が生じている様子が確認できる。

同様にCase-2に対して試番4加振後、試番6加振後、試番7加振中に撮影した画像からPIV解析を行った結果を図-19に示す。また、図-20に試番7における入力加速度と水平変位HD1の時刻歴の拡大図に各撮影タイミングを併せて示す。Case-2においても、図-20(a)のように、試番4および試番6加振後の撮影画像からは顕著な変形は見られない。試番7加振中では⑤において法肩から法尻にかけて盛土内部に滑り土塊と考えられる、画像が不鮮明な領域が生じており、この時点より滑り破壊が開始したと推定される。一方、最大せん断ひずみ分布の傾向

はCase-1と異なっており、試番4加振後では主に法尻付近に最大せん断ひずみが集中していることが分かる。その後、試番7加振中に徐々にひずみが蓄積していき、⑤において急増することで滑り線が発生している。

Case-1では法面中腹、Case-2では法尻を起点として滑り線が生じたが、破壊前に最大せん断ひずみが集中する箇所を起点として盛土が滑り破壊に至るといった損傷過程は、2ケースとも既往の研究<sup>8)</sup>と良く整合している。

#### 5. 初期ひずみ状態が盛土の地震時損傷過程に与える影響

図-21には、加振前の初期ひずみ状態が盛土の地震時損傷過程に与える影響を確認するため、各ケースの試番1加振前(G上げ後)および試番7加振中の滑り破壊直前のひずみ分布を示す。図-21(a1)より、Case-1では遠心力を载荷させた初期状態においても、加振時に滑り破壊の起点となった法面中腹付近に最大せん断ひずみが集中していることが分かる。また、同図には締固め層の境界として、盛土を高さ方向に5分割するように白点線を描いている。図-21(a1)、(a2)ともに、下から2つ目の締固め境界にて最大せん断ひずみが卓越しており、この箇所から滑り線が生じている。これは、土槽底面より模型盛土を作製したことで締固め層の境界が弱点箇所となり、初期ひずみ状態にて法面中腹付近にひずみが集中したためであると考えられる。

図-21(a4)には、修正フェレニウス法を用いた常時の安定解析より得られた円弧滑り形状を実験で生じた滑り線とともに示す。ここで、入力パラメータは表-2の値を使用した。なお、粘着力については別途実施した同材料、同条件で作製した高さ5m、1:0.5勾配の盛土のG上げによる破壊実験を元に2.77kPaとして設定した。すなわち、遠心加速度32Gにて盛土が自重崩壊に至ったことから、この時点で円弧滑り安全率がちょうど1となるような粘着力を求めた。その結果、安定解析では法尻から法肩に向かうような滑り線が得られたが、実験で生じた滑り線とは一致しなかった。これは、解析では一様地盤を考えているのに対して、実験においては上述の通り締固め状態が均一でなかったためであると考えられる。

撮影断面にて締固め状態が均一となるように模型盛土を作製したCase-2における実験結果を図-21(b)に示す。図-21(b1)より、Case-2では締固め層の境界がないため、初期状態において盛土断面で概ね一様な最大せん断ひずみ分布となっていることが分かる。また、試番7加振中に滑り破壊した直前のひずみ分布を図-21(b2)、(b3)に示す。Case-2では、法尻付近に最大せん断ひずみが集中しており、明瞭な滑り線が確認できる。また、体積ひ

		体積ひずみ (%) -10.0 0 10.0 (膨張) (圧縮)	最大せん断ひずみ (%) 0 15 30
試番 4 加振後		最大値: 2.93% 最小値: -3.59%	最大値: 6.80% ひずみ集中
試番 6 加振後		最大値: 4.74% 最小値: -3.85% 上部: 膨張 下部: 圧縮	最大値: 9.22% ひずみが徐々に蓄積
試番 7 加振中 (撮影画像の左上の番号は図 18 に対応)	③	最大値: 4.39% 最小値: -8.57%	最大値: 11.6%
	④	最大値: 5.69% 最小値: -24.06%	最大値: 38.7% 法面中腹でひずみ急増
	⑤	最大値: 5.40% 最小値: -13.35%	最大値: 37.1%
	⑥	最大値: 7.12% 最小値: -23.54% クラック付近に膨張ひずみ	最大値: 51.7% ひずみが内部に進展
	⑦	クラック拡大 滑動部が不鮮明化	
(a) 撮影画像	(b) 体積ひずみ分布	(c) 最大せん断ひずみ分布	

図-17 Case-1 の撮影画像および PIV 解析結果 (最大せん断ひずみ分布および体積ひずみ分布)

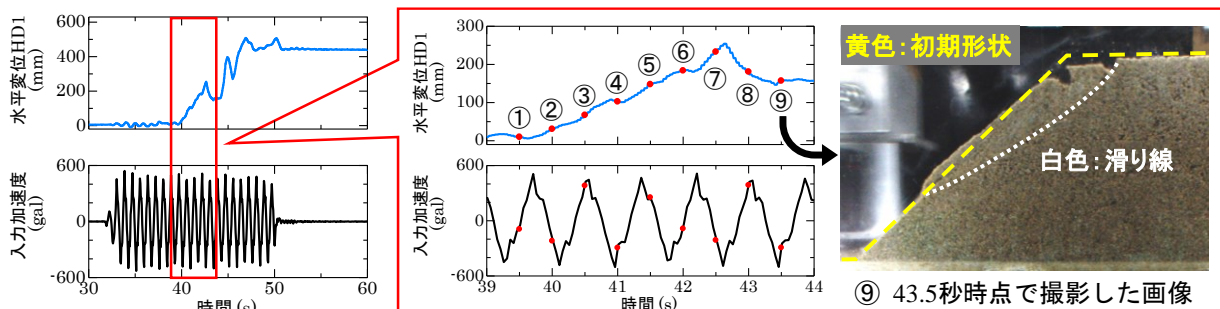


図-18 Case-1 試番 7 加振中における時刻歴波形および撮影タイミング

		体積ひずみ (%) -10.0 0 10.0 (膨張) (圧縮)	最大せん断ひずみ (%) 0 15 30
試番 4 加振後		最大値: 3.02% 最小値: -3.23%	最大値: 5.49%
試番 6 加振後		最大値: 4.62% 最小値: -5.66%	最大値: 11.0% ひずみが徐々に蓄積
試番7加振中 (撮影画像の左上の番号は図20に対応)	③	最大値: 4.60% 最小値: -5.44%	最大値: 12.1%
	④	最大値: 5.25% 最小値: -6.47%	最大値: 11.7%
	⑤	最大値: 22.6% 最小値: -16.4%	最大値: 28.6% 法尻でひずみ急増
	⑥	最大値: 5.41% 最小値: -15.5%	最大値: 30.9%
	⑦		
	(a) 撮影画像	(b) 体積ひずみ分布	(c) 最大せん断ひずみ分布

図-19 Case-2の撮影画像およびPIV解析結果(最大せん断ひずみ分布および体積ひずみ分布)

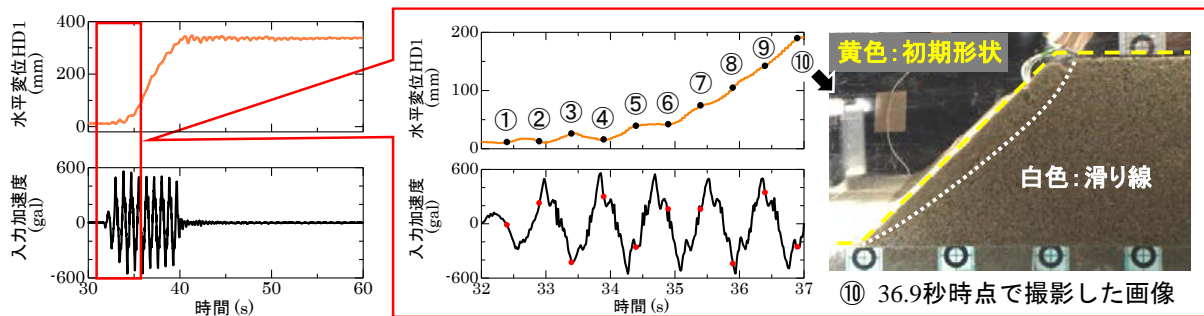


図-20 Case-2 試番7加振中における時刻歴波形および撮影タイミング

ずみ分布を見ると、盛土は内部下側で圧縮傾向であることと、天端にクラックが生じた箇所において膨張の体積ひずみが表れていることが分かる。さらに、**図-21 (b4)**からは、安定解析で算定した滑り形状と実験における滑り線が概ね一致していることが確認できる。

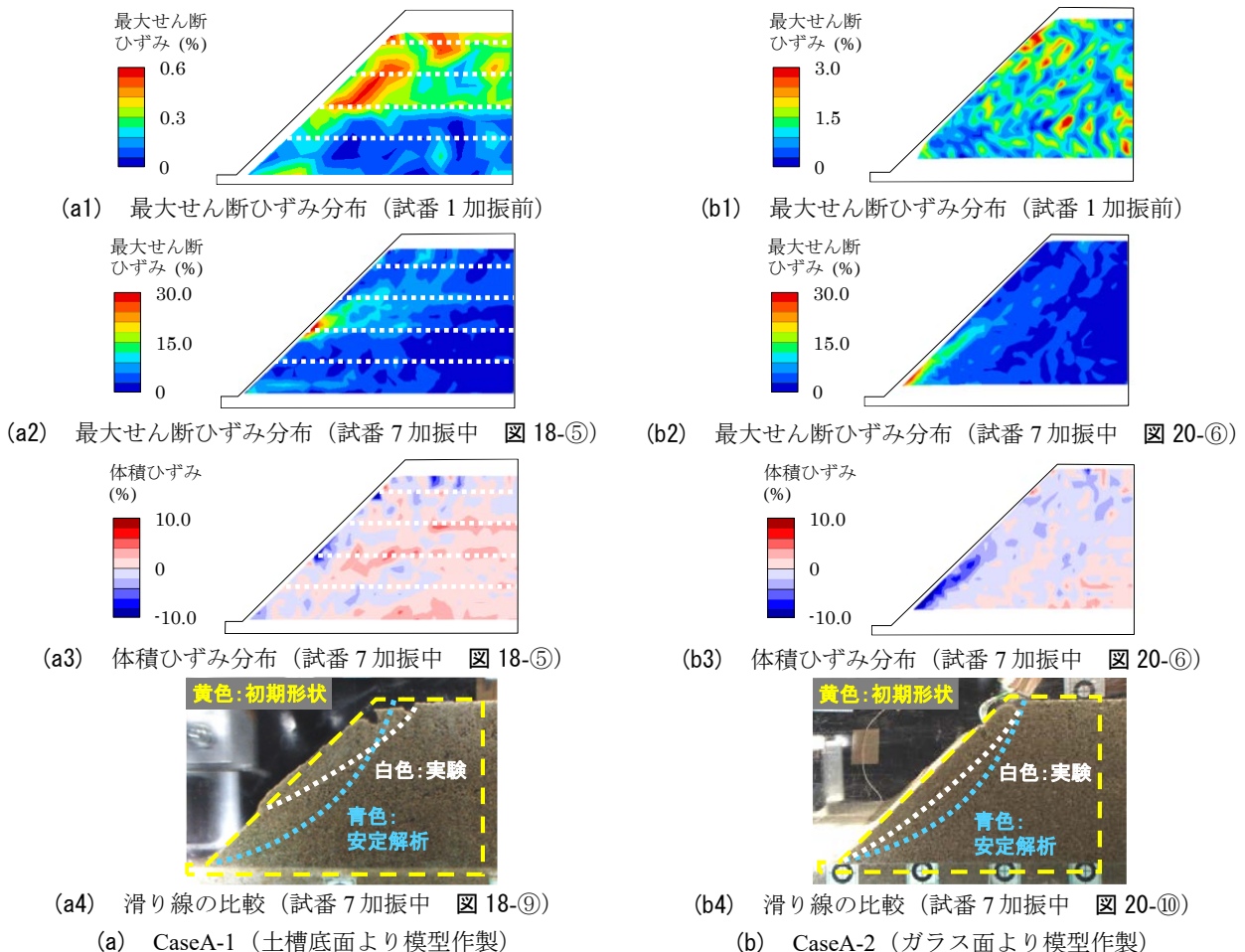
実際の盛土は、**Case-1**のように高さ方向対して施工されるものの、鉄道盛土において標準の締固め層厚は30cm程度りとされており、盛土高さに対して十分に薄く設定されている。今回の実験条件では、実物換算で高さ5m盛土の盛土に対して締固め層厚は1mであるため、実盛土に比べて締固め層が厚く、かなり不均一な締固めとなり、締固め層の境界に弱点箇所が生じたと考えられる。一方、**Case-2**のように容器を倒した作製方法は実盛土の施工方法とは異なるものの、観察断面では均一な締固め状態となる。よって、**Case-2**のほうがより実盛土に似た初期ひずみ状態が得られたと考えている。

以上より、**Case-2**のように締固め状態が均一な模型盛土を作製することで、初期状態においてひずみが集中する弱点箇所がなくなり、安定解析結果と類似した滑り形状となることを確認した。また、盛土の地震時損傷過程を評価する際には、地震時のみでなく地震前の初期ひずみ状態を考慮することで、より精緻な評価が可能となると考えられる。

## 6. まとめ

本研究では、振動中の盛土の損傷過程を詳細に把握するために遠心振動台実験を実施した。振動台に高速度カメラを固定して振動中の盛土を撮影するとともにPIV解析を行うことで、盛土内部に発生するひずみを精緻に求めた。また、盛土の初期ひずみ状態が損傷過程に及ぼす影響を確認するため、異なる締固め工程で作製した模型盛土を用いた実験を実施した。以下に得られた結論を示す。

- 1) 滑り破壊に至るまでの盛土の挙動を観察するため、複数の正弦波加振を実施した。今回の条件では、目標最大加速度が300galの加振までは揺すり込み沈下が卓越したものの、600galの加振によって滑り破壊に至った。
- 2) 振動台に高速度カメラを固定することで、振動中の盛土を撮影した。撮影した画像には大きなゆがみなどもなく、滑り破壊に至るタイミングや天端クラックの進行を観察できた。
- 3) 滑り破壊に至る損傷過程として、法面において最大せん断ひずみが急増し、その箇所を起点に盛土内部へとひずみが進展して滑り破壊に至ることを確認した。
- 4) 模型盛土作成時の締固め工程の違いにより、加振前の盛土内部の初期ひずみ状態が異なること



**図-21** 初期ひずみ状態と地震時損傷過程の比較

を確認した。

- 5) 初期ひずみ状態が概ね均一な盛土では、法尻にひずみが集中し、法尻を起点として滑り線が発生することを確認した。また、この滑り線は、常時の安定解析より得られた滑り線と概ね一致した。

## REFERENCES

- 1) (公財) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 土構造物, 2007.
- 2) (公財) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計, 2012.
- 3) 藤原寅士良, 中村貴志, 谷口善則, 高橋英明, 金田淳：東北地方太平洋沖地震における鉄道盛土の被害要因に関する考察, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 71, No. 4, pp. I\_79-86, 2015.
- 4) 藤原寅士良, 中村貴志, 谷口善則, 高崎秀明, 金田淳：東北地方太平洋沖地震鉄道盛土円弧すべり解析による被害要因の考察, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 71, No. 4, pp. I\_87-94, 2015.
- 5) 三好忠和, 常田賢一：盛土の地震時残留変位に及ぼす地震動の影響に関する一考察, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 70, No. 4, pp. I\_1018-1031, 2014.
- 6) 江川祐輔, 常田賢一, 小田和広, 中平明憲：地震時における道路盛土の滑り破壊の制御工法に関する解析的検討, 土木学会地震工学論文集 (報告), Vol. 29, pp. 1319-1327, 2007.
- 7) 鈴木聡, 太田剛弘, 井澤淳, 土井達也, 小島謙一, 大村直哉, 高橋章浩：地震時の滑り破壊前の盛土の損傷レベル評価に関する遠心振動台実験 その1, 第55回地盤工学研究発表会, 2020.
- 8) 小島謙一, 井澤淳, 土井達也, 鈴木聡, 太田剛弘, 高橋章浩, 大村直哉：地震時の滑り破壊前の盛土の損傷レベル評価に関する遠心振動台実験 その2, 第55回地盤工学研究発表会, 2020.
- 9) White, D. J., Take, W. A. & Bolton, M. D : Soil deformation measurement using particle image velocimetry and photogrammetry, Geotechnique, Vol. 53, No. 7, pp.619-631, 2003.
- 10) 井澤淳, 土井達也, 小島謙一：滑り破壊前の損傷過程を考慮した盛土の地震時性能照査手法の検討, 第55回地盤工学研究発表会, 2020.
- 11) S. Sreng, Y. Okochi, K. Kobayashi, H. Tanaka, H. Sugiyama, T. Kusaka, H. Miki & M. Mkakino : Centrifuge model tests of embankment with a new liquefaction countermeasure by ground improvement considering constraint effect, 6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, 2015.
- 12) 風間基樹, 鈴木崇弘, 柳澤栄司：地盤に入力された累加損失エネルギーの評価法と液状化予測への適用, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), No 631 / III-48, pp.161-177, 1999.
- 13) Koga Yasuyuki, Osamu Matsuo : Shaking table tests of embankments resting on liquefiable sandy ground, Soil and Foundations, Vol.30, No.4, pp.162-174, 1990.

(?)  
(?)

## CENTRIFUGE SHAKING TABLE TESTS ON EFFECT OF INITIAL STAIN CONDITION FOR DAMAGE PROCESS OF EMBANKMENT DURING EARTHQUAKES

Ryuichi IBUKI, Kentaro UEMURA, Tatsuya DOI,  
Jun IZAWA, SRENG Sokkheang

In this study, we conducted a series of the centrifuge shaking table tests for evaluating damage process of a 1:1 slope embankment during earthquakes in detail. To observe deformation behavior of an embankment during earthquakes in a centrifugal acceleration field, the high-speed digital camera was fixed directly to the shake table in order to exclude camera shake. Therefore, we obtained digital images at 100 fps under the centrifugal acceleration field of 50 G, which corresponds to intervals of 0.5 seconds under a 1 G field. In addition, to investigate an effect of a initial strain condition on the seismic behavior of the embankments, we conducted two cases, of which model embankments were made with different compaction methods, and simulated un-uniform and uniform initial strain conditions.

Accordingly, we could observe the damage process of the embankments up to the sliding failure from the obtained digital images. Furthermore, strain distributions inside the embankment were calculated with the particle image velocimetry (PIV) analysis at intervals of 0.5 seconds. The strain distributions clearly showed the following damage process, (i) an embankment tends to compress before sliding failure; (ii) the shear strain concentrate at near the surface of the slope; (iii) the shear strain progresses into the inside of the embankment; (iv) sliding failure occurs as soon as a sliding plane appears. Furthermore, in the case of the model embankment with non-uniform initial strain condition, the sliding plane appeared at the strain concentration part of the slope in initial state during shaking. On the other hand, in the case with uniform initial strain condition, the sliding plane appeared at the toe of the slope, which was corresponding to that obtained from the stability analysis based on the circular sliding failure.