

加振中の盛土の損傷過程把握のための 遠心振動台実験

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

¹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

²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)

³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)

本研究では、地震時に盛土が滑り破壊に至るまでの損傷過程を把握するために、高さ 5m、法面勾配 1:1 の盛土の遠心振動台実験を実施した。入力波は正弦波とし、振幅を段階的に増加させた複数回の载荷を行った。さらに、高速度カメラを振動台に固定して振動中の盛土を撮影し、PIV 解析によって盛土内部のひずみを精緻に求めた。その結果、約 300gal の加振までは揺すり込み沈下型の変形形態を示し、その後約 600gal の加振にて滑り破壊に至った。さらに、PIV 解析により、加振によって法面にせん断ひずみが集中した後、内部にせん断ひずみが進展し、滑り線が発生して滑り破壊に至る様子を確認した。また、PIV 解析結果と盛土材の応力ひずみ関係の比較により、盛土のせん断ひずみが盛土材の破壊ひずみを超過すると、せん断ひずみが急増して滑り破壊に至ることを確認した。

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ニューマーク法が使用されることが多い^(例えば1),2)。しかし、滑り破壊を仮定したニューマーク法では、滑り破壊に至るまでの実際の盛土の損傷形態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^{3),4)}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ニューマーク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、軽微な被害程度の目安となる 20cm 未満³⁾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、ニューマーク法を適用すると、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⁴⁾。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機会が多いのに対して、ニューマーク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、ニューマーク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、ニューマーク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^{5),6)}。江川ら⁶⁾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ニューマーク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ニューマーク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。

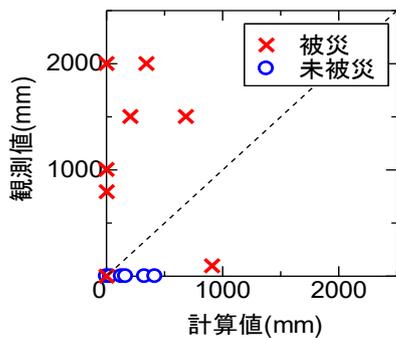


図-1 観測変位量と計算した滑動変位量の関係 (藤原ら⁹⁾を再整理)

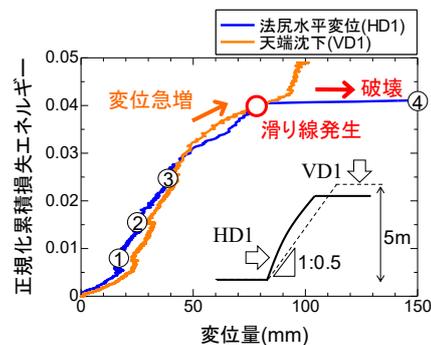


図-2 累積損失エネルギー-変位関係⁹⁾

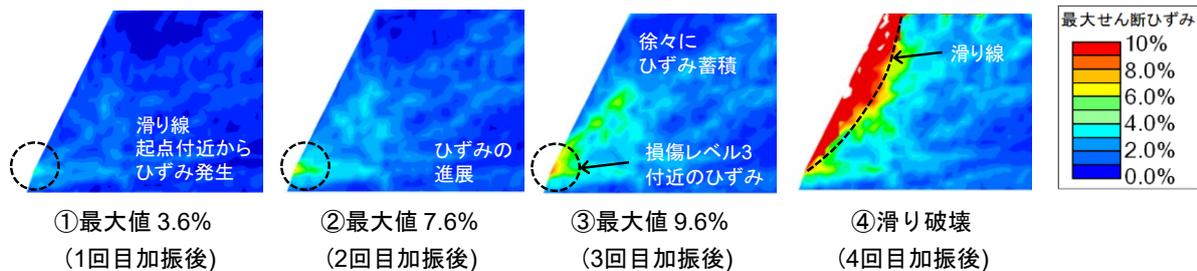


図-3 PIV解析より得られた最大せん断ひずみ分布⁹⁾

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⁷⁾⁸⁾。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⁹⁾における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⁹⁾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⁹⁾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⁹⁾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の盛土の遠心振動台実験を行うとともに、加振中の盛土の撮影を試みた。このとき、ハイスピードカメラを振動台に固定して、土槽とともに加振を行う

ことで、振動台に対する盛土の相対変位を撮影した。さらに、撮影した画像を用いてPIV解析を行うことで、加振中の盛土の損傷過程を明らかにした。また、ニューマーク法の精度検証のため、実験にて滑り破壊が生じた加振と滑り破壊には至らなかった加振について、ニューマーク法により沈下量を算定し、実験値と比較した。

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。振動中の盛土を撮影するため、図-5のように振動台に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のレンズを採用した。なお、このときの最大画角は、幅約400mm、高さ約300mmである。また、撮影速度は100fpsであり、遠心加速度50G場において0.5秒ごとの撮影が可能である。

(2) 盛土模型

盛土模型形状とセンサー配置図を図-6に示す。盛土模型は、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め固め度 $D_c=95\%$ に締め固め

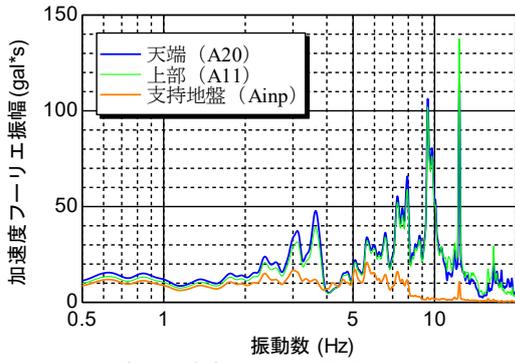


図-7 絶対加速度フーリエ振幅スペクトル

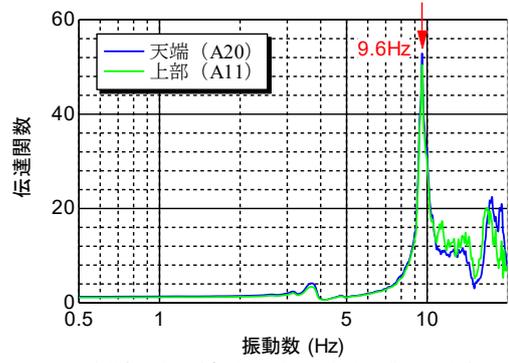


図-8 伝達関数 (支持地盤～天端、盛土上部)

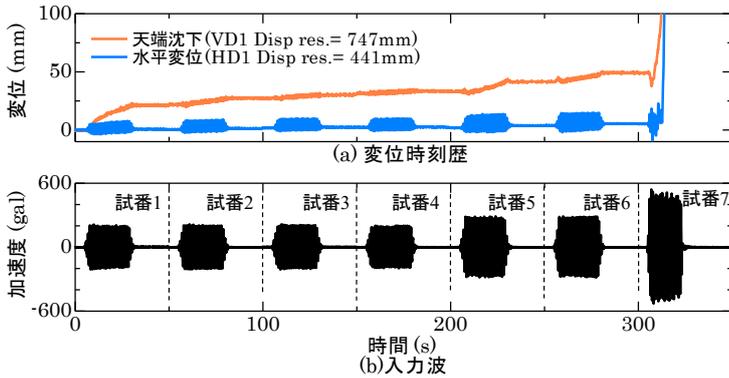


図-9 変位および入力波の時刻歴

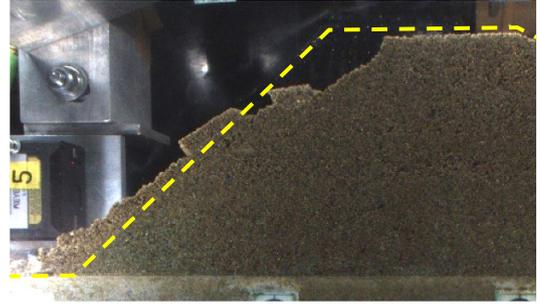


図-10 試番7加振後の模型盛土

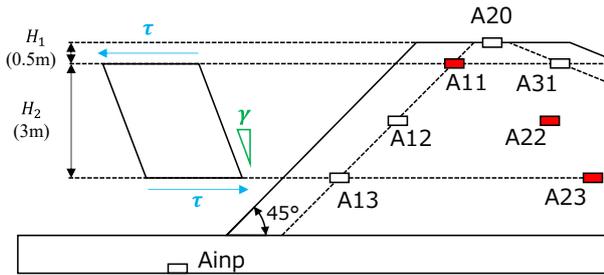


図-11 加速度記録を用いた盛土内部のせん断応力-せん断ひずみ関係の推定法

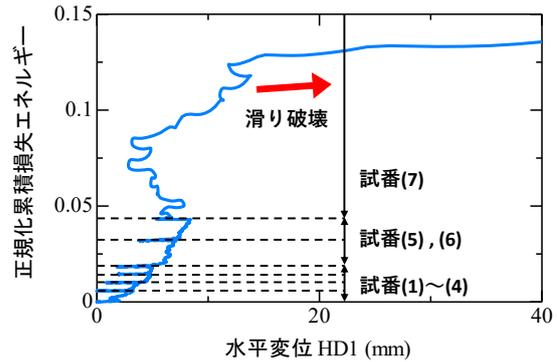


図-12 正規化累積損失エネルギー-水平変位関係

3. 実験結果

図-9 に天端沈下 VD1 と水平変位 HD1 の時刻歴を入力波とともに示す。試番1~6の加振では、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ると考えられる。一方、目標最大加速度を600galとした試番7では変位が急増し、盛土模型が図-10 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損失エネルギー W ¹⁰⁾を用いて下式のように整理した。

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

ここで、 τ はせん断応力、 γ 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-11 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¹¹⁾。

$$\tau = \rho H_1 A_{11} + \rho \frac{H_2}{2} A_{22} \quad (2)$$

$$\gamma = \left(\iint A_{23} dt dt - \iint A_{22} dt dt \right) / H_2 \quad (3)$$

ここで、 A_{11} , A_{22} , A_{23} 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A22からA23までの鉛直方向の距離、 ρ は盛土の湿潤単位体積重量である。そして、盛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水平変位の関係を図-12 に示す。ここで、水平変位は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200とした単純移動平均により平滑化した。試番1~6にて水平変位が徐々に蓄積しており、試番7の加振中に正規化累積損失エネ

ルギーが急増し、それに伴い水平変位も急増している。また、この変位の急増は図-10 に示す滑り破壊後の模型の状況とも対応している。

次に、試番 4 加振終了後、試番 6 加振終了後、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-13 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-14 には試番 7 加振中の撮影タイミングを入力波および水平変位 HD1 について赤い点でプロットした。なお、撮影のタイミングは、連続で撮影された画像から載荷された時点を目視で判断し、撮影速度を 100fps とすることで求めた。

		最大せん断ひずみ (%)	体積ひずみ (%)
		0 10 20	-5.0 0 5.0 (膨張) (圧縮)
試番 4 加振後		最大値: 3.40% 	最大値: 2.93% 最小値: -3.59%
試番 6 加振後		最大値: 5.00% ひずみが徐々に蓄積 	最大値: 4.74% 最小値: -3.85%
試番 7 加振中 (撮影画像の左上の番号は図 14 に対応)	③	最大値: 5.82% 	最大値: 4.39% 最小値: -8.57%
	④	最大値: 19.4% 法面中腹でひずみ急増 	最大値: 5.69% 最小値: -24.06%
	⑤	最大値: 18.5% 	最大値: 5.40% 最小値: -13.35%
	⑥	最大値: 25.8% ひずみが内部に進展 	最大値: 7.12% 最小値: -23.54%
	⑦		
(a) 撮影画像	(b) 最大せん断ひずみ分布	(c) 体積ひずみ分布	

図-13 PIV 解析より求めた最大せん断ひずみ分布および体積ひずみ分布

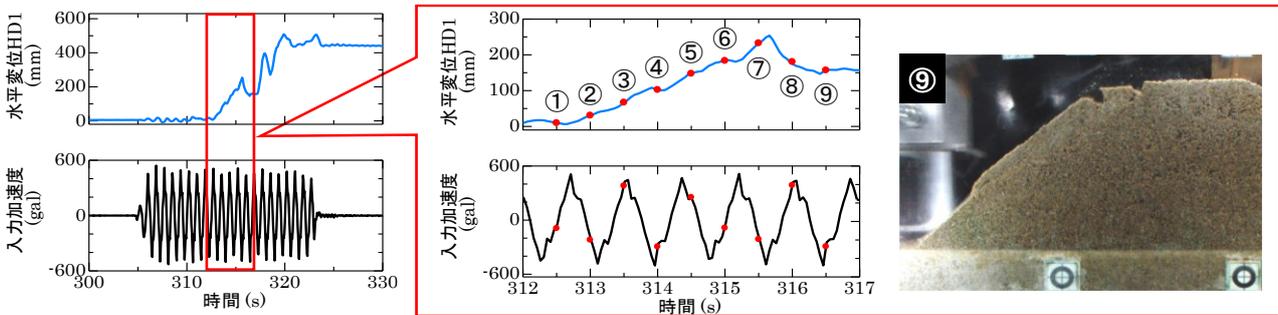


図-14 撮影タイミング（試番7加振中）

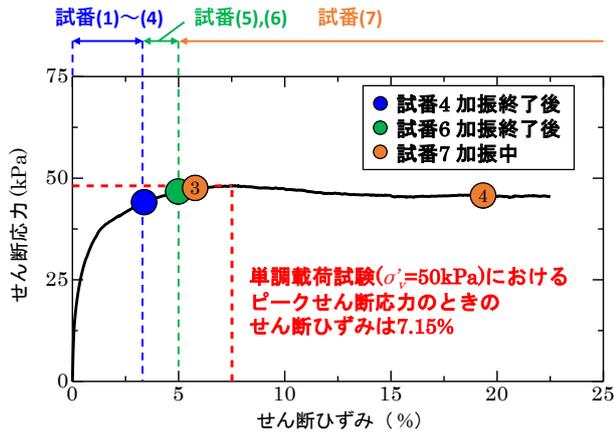


図-15 盛土材の変形特性と PIV 解析より得られた最大せん断ひずみの最大値

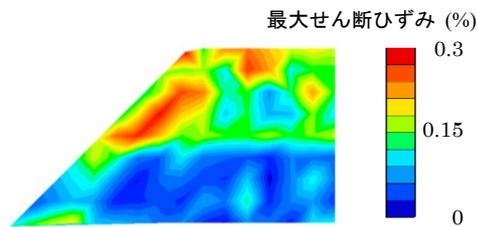


図-16 G 上げ過程の最大せん断ひずみ分布

図-13(a)では、試番4および試番6の加振終了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にてクラックが拡大していることが分かる。また、⑦では法肩から法面中腹にかけて画像のぼやけが見られるため、この時点にて滑り破壊が開始したと推定できる。

図-13(b)のうち試番7加振中③～⑤より、最大せん断ひずみは法面中腹よりやや下において急増し、その箇所を起点として盛土内部に進展している。これは、既往の研究⁸⁾で示された滑り破壊に至る損傷形態と一致している。さらに、図-13(c)より、試番4および試番6加振終了時点では、体積ひずみは盛土底部にて圧縮、盛土上部にて膨張傾向である。そして、試番7加振中に盛土上部も圧縮傾向となり、天端クラック発生箇所および滑り線の起点にて大きな膨張の体積ひずみが生じている。以上より、滑り

破壊に至るまでは盛土は圧縮傾向を示し、主な損傷形態は揺すり込み沈下となることを確認した。また、今回の実験では、300galの加振によって盛土底部が先行して揺すり込み沈下し、その後600galの加振によって盛土上部にも圧縮の体積ひずみが生じた。

ここで、盛土模型と同材料、同条件で作製した供試体の中空ねじり単調載荷試験（拘束圧 50kPa）から得られたせん断応力 - せん断ひずみ関係を図-15に示す。このとき、図-13(b)の試番4、試番6加振終了後および試番7加振中③、④における最大せん断ひずみの最大値をプロットしている。試番7加振中の③～④間において、盛土体に発生するせん断ひずみが、盛土材のピークせん断応力を示すせん断ひずみ（7.15%）を超えていることが分かる。したがって、盛土体の最大せん断ひずみが盛土材のピークせん断応力を示すせん断ひずみを超えたときに、盛土体のせん断ひずみが急増し、滑り線が形成され滑り破壊に至ったと推測できる。そのため、本実験に対しても小島ら⁸⁾が提案するように、盛土材の変形特性に応じて盛土の損傷レベルを設定し、盛土の滑り破壊に対する安全性を評価できると考えられる。

図-16には、G上げの前後に撮影した画像を用いた PIV 解析より求めた最大せん断ひずみ分布を示す。滑り破壊の起点となった法面中腹付近から、クラックが生じた天端にかけてせん断ひずみが発生しており、自重状態においても潜在的な滑り線が形成されている。また、揺すり込み沈下が卓越した試番6までにおいても、法面中腹付近に徐々にせん断ひずみが蓄積していることが分かる（図13(b)参照）。よって、この潜在的な滑り線に沿ってせん断ひずみが急増、進展することで盛土が滑り破壊に至ったと考えられる。

4. ニューマーク法による沈下量の算定

ニューマーク法の精度検証のため、滑り破壊が生じた試番7および揺すり込み沈下が卓越した試番1に対して、ニューマーク法により沈下量を算定し、実験結果と比較する。ここでは、入力パラメータとして表-2の値を使用した。ただし、別途同材料、同条件で作製した高さ5m、1:0.5勾配の盛土のG上げを行ったところ、遠心加速度32Gにて盛土が自重崩壊に至ったが、表-2のパラメータを用いて50G場

表-3 天端沈下量の比較

	試番 1	試番 7
	最大加速度 200gal	最大加速度 600gal
ニューマーク法	123 mm	2348 mm
実験値 (VD1)	21 mm	699 mm



図-17 滑り線の比較

換算の寸法で常時の円弧滑り安全率を算定したところ、1を上回る結果となった。そこで、以降の試算では、表-2のうち粘着力のみについて、自重崩壊に至った実験結果を再現できるように、遠心加速度32G場にて円弧滑り安全率がちょうど1となるような値(2.77kPa)に変更した。

表-3に各計算値を実験の天端沈下VD1とともに示す。なお、計算では各試番の入力波のみを作用させ、実験値は各試番加振前の変位量を0として整理した。その結果、試番1,7ともにニューマーク法では実験よりも天端沈下量を過大評価した。試番1に対する計算では、実験値の約6倍の沈下量となった。ここで沈下量を過大評価した要因の一つとして、実験では盛土模型は揺すり込み沈下が卓越するのに対し、ニューマーク法では滑り破壊を仮定しており、想定される破壊形態が異なることが挙げられる。また、盛土模型が滑り破壊に至った試番7は、計算と実験にて破壊形態が一致しているものの、計算では実験の約3.4倍の沈下量となった。これは、実験では滑り破壊が生じたあと、土塊が流動して法面が安定化するように挙動するのに対して、ニューマーク法では滑り土塊を剛体とし、降伏震度を超えると滑り土塊が滑動するという仮定に基づくため、滑り破壊後の土塊の流動などの現象を再現しきれていないためであると考えられる。

また、図-17には算定された滑り線と実験での滑り線の比較を示すが、実験では法面中腹付近、計算では法尻に滑り線が生じており、今回の条件では両者が一致していないことが分かる。この要因としては、ニューマーク法では盛土全体に一律の地震作用が作用するが、実際の盛土体では位相差などが生じることや、盛土模型作製時の締固めのばらつきの影響などが考えられる。ただし、既往の実験では実験と計算において滑り線がほぼ一致する場合もあるため、今後、実験ケースを増やして滑り線の発生位置について検討する必要がある。以上より、本実験で

確認された破壊形態と、ニューマーク法での仮定(剛な土塊が滑り破壊するものとし、滑り破壊後の沈下量を算定する)が必ずしも一致しないため、ニューマーク法による計算値が実験の沈下量を過大評価したと考えられる。

5. まとめ

本研究では、振動中の盛土の損傷過程を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、ニューマーク法により算定した沈下量と実験結果を比較し、計算精度を検証した。以下に得られた結論を示す。

- 1) 今回の条件では、入力波の最大加速度が約300galまでは揺すり込み沈下が卓越し、その後約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、法面中腹付近にてせん断ひずみが急増し、その箇所を起点に盛土内部へとせん断ひずみが進展して滑り破壊に至ることを確認した。
- 4) 盛土材のせん断応力-せん断ひずみ関係と盛土に生じるせん断ひずみを比較することで、滑り破壊に対する損傷レベルを評価可能であることを確認した。
- 5) G上げ段階において、滑り線が生じた箇所にせん断ひずみの蓄積が見られたことから、自重による潜在的な滑り線に沿って滑り破壊が生じたと考えられる。
- 6) ニューマーク法では簡易に天端沈下量を算定できるものの、滑り破壊に至らずに揺すり込み沈下型の変形が生じる場合など、ニューマーク法における仮定と異なる損傷形態となると沈下量を過大評価する場合がある。

参考文献

- 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) 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.
 - 10) 風間基樹, 鈴木崇弘, 柳澤栄司: 地盤に投入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.
 - 11) 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.

(?)
(?)

A CENTRIFUGE SHAKING TABLE TEST OF AN EMBANKMENT FOR EVALUATION DAMAGE PROCESS DURING EARTHQUAKES

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

In this study, we conducted a centrifuge shaking table test for evaluating the damage process of a 1:1 slope embankment during earthquakes. To observe the seismic behavior of an embankment during earthquakes in a centrifugal acceleration field, a high-speed digital camera was fixed on the shaking table and took photographs at 100 fps under the centrifugal acceleration field of 50 G, which corresponds to intervals of 0.5 seconds under a 1 G field. Accordingly, we could observe the damage process of an embankment up to the sliding failure and the occurrence of tension cracks at the crest 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 the lower part of the embankment; (iii) the shear strain progresses into the inside of the embankment; (iv) sliding failure occurs as soon as a sliding plane appears. In addition, we compared the maximum shear strain that occurred at the lower part of the embankment with the stress-strain curve of the embankment material. The results showed that the sliding plane appears when the maximum shear strain at the lower part of the embankment reaches the shear strain at the failure of the embankment material.