第26回橋梁等の耐震設計シンポジウム
講演論文集（2023年7月）

鉄道盛土の地震時安全性能照査法に関する基礎的検討

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

[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）
[2]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北2304）

1. はじめに

鉄道盛土の耐震設計では、滑り破壊を前提としたニューマーク法により算出した天端沈下量を照査指標として復旧性の照査を実施している[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天端沈下量の算定値との比較を**図-1**に加筆して示すが、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[2)]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[4)]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。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、実際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にとどまっている場合が多いのに対して、ニューマーク法で前提としている円弧滑り破壊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できない。

以上の背景を踏まえ、筆者らは盛土が滑り破壊に至る前の損傷過程を適切に考慮可能な地震時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[9)]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。PIV解

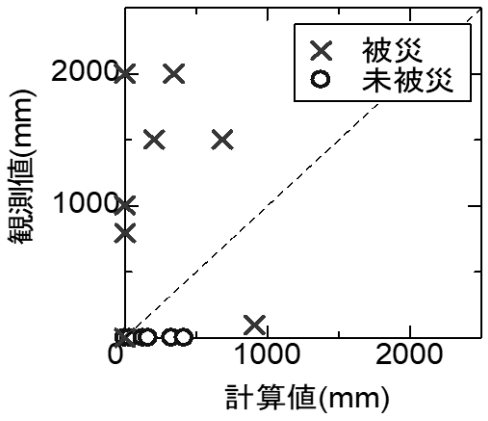


図-1　観測変位量と計算した滑動変位量の関係
（藤原ら[4)]を再整理）

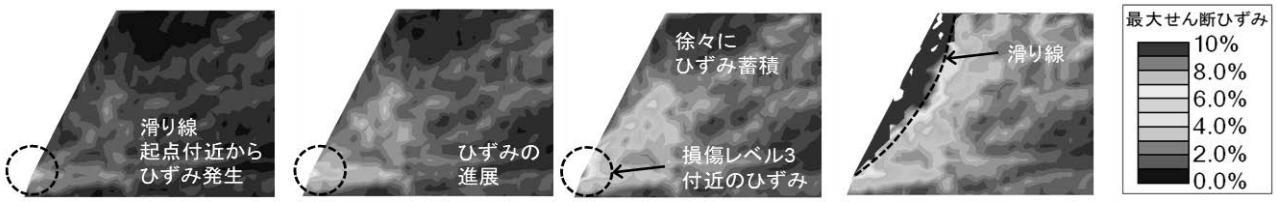


図-2　PIV解析より得られた最大せん断ひずみ分布[8)]

析の結果を**図-2**に示すが、急な勾配を持つ盛土では法尻付近に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を明らかにしている。この結果をもとに、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[8)]や、滑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[10)]を提案している。しかし、既往の実験[8)]でのPIV解析では、各加振後に撮影した画像を用いており、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詳細な損傷過程の評価が不十分であった。そこで、本研究では江戸崎砂を用いて作製した高さ5m、法面勾配1:1.0の模型盛土の遠心振動台実験を実施し、遠心場での高速度、高解像度撮影を行うことで振動中の損傷過程を評価した。さらに、振動中の損傷過程を考慮して提案手法の妥当性を確認するとともに、損傷過程を考慮した鉄道盛土の地震時性能照査手法について検討した。



図-3　遠心載荷装置搭載型加振装置の外観[11)]

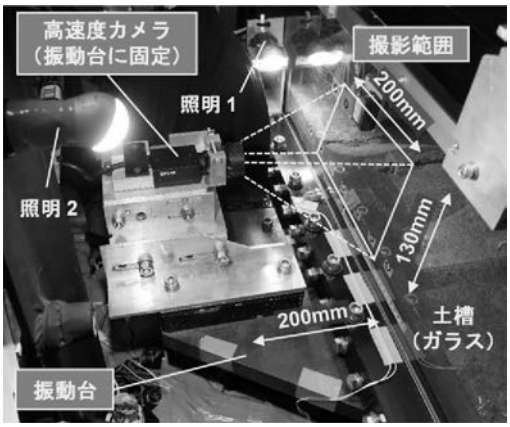


図-4　高速度カメラの設置状況

2. 実験概要

(1) 試験装置および撮影環境

試験装置は、**図-3**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-4**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、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。そして、得られた画像を用いて画像解析を実施することにより、加振中の盛土の変位やひずみを求めた。なお、計算メッシュは模型寸法で約5mm×5mmとした。

(2) 模型盛土

模型盛土形状とセンサー配置図を**図-5**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Dc = 95%に締固めて作製し、加速度計とレーザ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

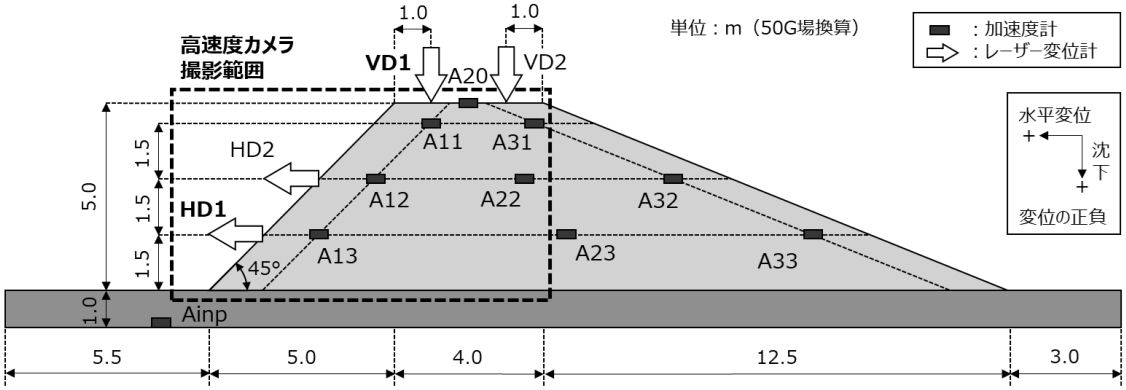


図-5　模型盛土形状およびセンサー配置図（法面勾配は撮影側1:1.0、逆側1:2.5）

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	ρ_{dmax}	1.707	g/cm^3

表-2　江戸崎砂（Dc = 95%）の特性

乾燥密度	ρ_d	1.622	g/cm^3
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	φ	36.4	deg.

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**、Dc = 95%での各種地盤材料試験結果を**表-2**に示す。

入力地震動は鉄道における標準設計地震動のうちスペクトルIを入力することとし、加振前に微小なホワイトノイズ加振を実施した際の、支持地盤（Ainp）、天端中央（A20）の絶対加速度フーリエ振幅スペクトルを**図-6**、支持地盤に対する天端中央の加速度の伝達関数を**図-7**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付近を除いて非常に小さくなっている。これは、遠心加速度50G場での加振装置の加振可能振動数が0.2～8Hzであるためである。また、天端中央の加速度フーリエ振幅スペクトルの傾向は3.5Hz, 9.5Hz, 11Hz付近にて大きくなっている。**図-7**より、伝達関数は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9.6Hzと考えられる。

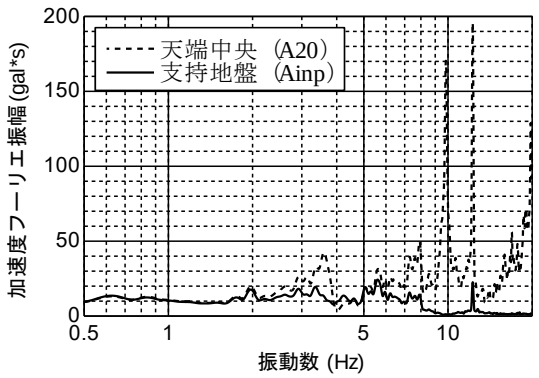


図-6　絶対加速度フーリエ振幅スペクトル

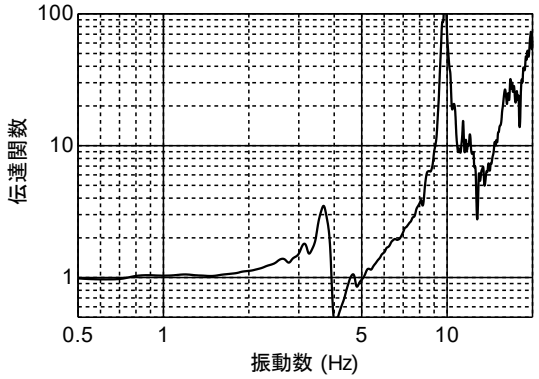


図-7　加速度の伝達関数（支持地盤Ainp～天端A20）

3. 遠心模型実験結果および考察

天端沈下VD1および水平変位HD2、高速度カメラの撮影タイミングをプロットした入力加速度の時刻歴波形を**図-8**、加振中に高速度撮影した画像を用いた画像解析より算出したひずみ分布を**図-9**に示す。**図-8**では実線がレーザー変位計、点線が画像解析により得られた変位量であるが、天端沈下量は30秒時点にて画像解析による天端沈下量のほうが約30mm大きいものの、全体の傾向は一致していることから画像解析により模型盛土の地震時挙動を追跡できていると考えられる。また、**図-9(b)**の水平変位量を見ると、変位計で計測された変位量が19秒付近で急増していることが分かる。しかし、**図-9(a)④**の撮影画像より19秒時点では模型盛土に大きな変形は見られないため、変形の傾向が一致していない。これは、加振の影響により変位計の治具に不具合が生じ、19秒以降では適切に計測ができなかったためである。一方、画像解析結果では29秒付近から変位が急増している。ここで、**図-10**に30秒時点の撮影画像を示すが、法面表層にて滑り土塊が滑動して不鮮明化していることから、画像解析で得られた水平変位の急増と傾向が一致している。また、加振終了後の模型盛土の状況を**図-11**に示すが、加振により脆性的な

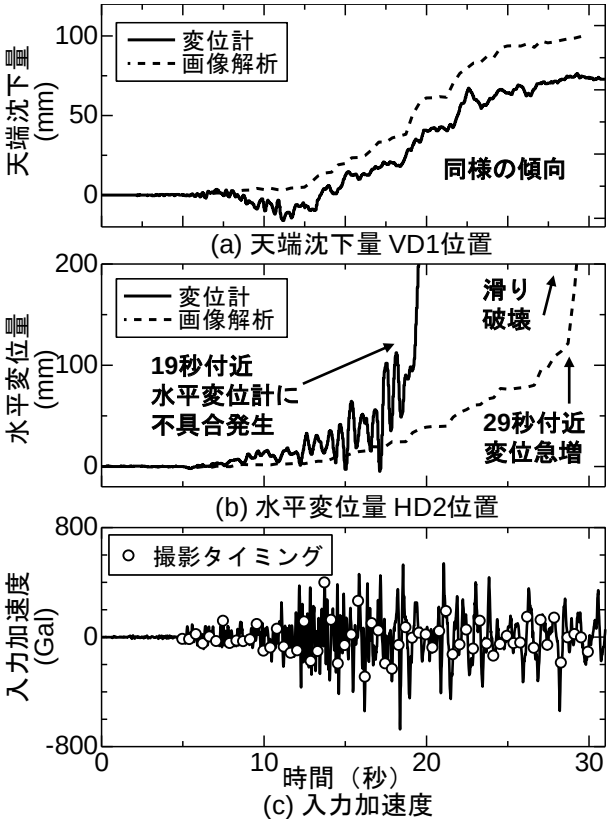


図-8 入力加速度および変位時刻歴波形

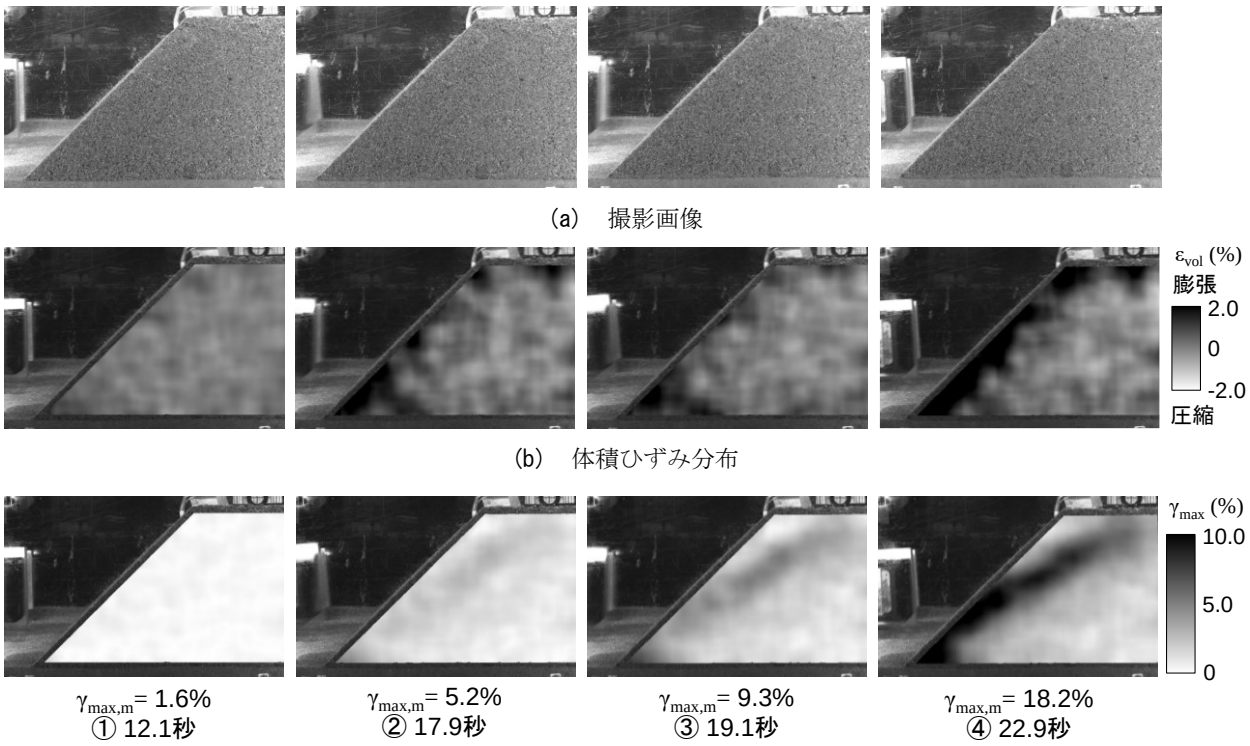


図-9 加振中の撮影画像および画像解析結果（体積ひずみ分布および最大せん断ひずみ分布）

滑り破壊が生じていることが分かる。

ここで、**図-9(b), (c)**の画像解析の初期状態は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模型盛土の挙動を正確に捉えていることが分かる。**図-9(c)**中の$\gamma_{max,\,m}$は法尻部で発生している最大せん断ひずみの最大値であるが、加振中に法尻部にせん断ひずみが集中し始めるとともに、$\gamma_{max,\,m}$が増大していることが分かる。さらに、19秒付近では**図-10**に見られる滑り線付近にひずみが集中しており、いわゆる潜在的な滑り線が発生していることが確認できる。このように、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う損傷過程は、既往の研究[8]と良く整合している。また、**図-9(b)**の体積ひずみ分布は盛土表層にて膨張傾向、中央部にてやや圧縮傾向を示すが、中央部の体積ひずみの大きさは1%程度と小さいことが分かる。このように締固めが十分かつ均質に行なわれた盛土では、大きな体積変化は生じないと考えられる。

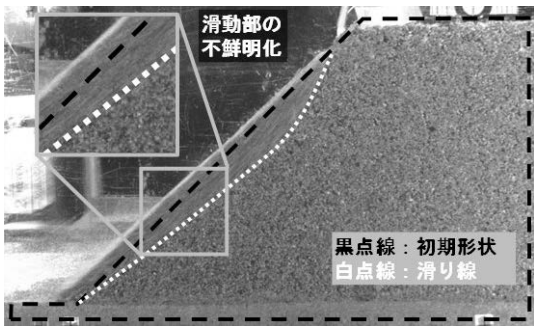


図-10　滑り破壊時の模型盛土（30 秒時点）

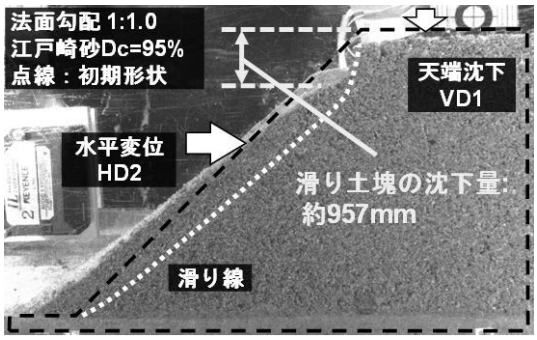


図-11　加振終了後の模型盛土

4. 性能照査手法の妥当性確認

本実験について、提案する性能照査手法[10]を適用して、地震時安全性照査手法の妥当性を確認する。まずは、**図-12**に模型盛土と同材料、同条件で作製した供試体に対して中空ねじりせん断試験機により拘束圧50kPaで実施した単調載荷試験から得られたせん断応力～せん断ひずみ関係を、提案する損傷レベルとともに示す。盛土材の破壊と定義できる最大せん断応力（τ_{max} = 48kPa）を示す時点のせん断ひずみは7.5%（以降、破壊時せん断ひずみ）であり、これが損傷レベル3の限界値に相当する。したがって、損傷レベル3に達すると大きな変形が生じる可能性があり、損傷レベル4に達すると破壊に至ると定義できる。なお、高い拘束圧100kPa, 150kPaについても試験を実施しているが、今回の材料については拘束圧に影響されることなく、概ね同等なひずみレベルで限界値が設定できることを確認している。

ここで、**図-13**にひずみが最も集中した法尻部の最大せん断ひずみの時刻歴を水平変位HD2および入力加速度およびとあわせて示す。また、**図-9**における①～④のタイミングを矢印で示している。加振に伴い、法尻最大せん断ひずみが増加していき、①12.1秒時点では法尻部の盛土材が損傷レベル2に至っている。その後、ひずみがさらに大きくなり②

損傷レベル 1：無損傷（E50 相当の弾性レベル）
損傷レベル 2：軽微な損傷（破壊時せん断ひずみの 1/2 以内）
損傷レベル 3：比較的大きな損傷（破壊時せん断ひずみ以内）
損傷レベル 4：破壊（破壊時せん断ひずみ以上）

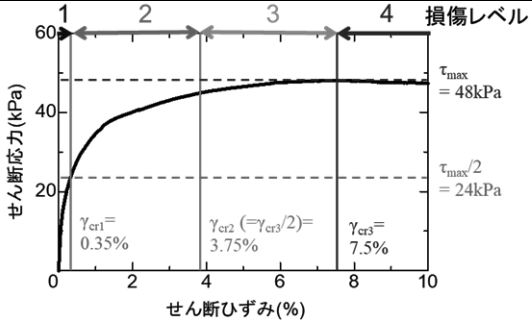


図-12　盛土材の変形特性と損傷レベル

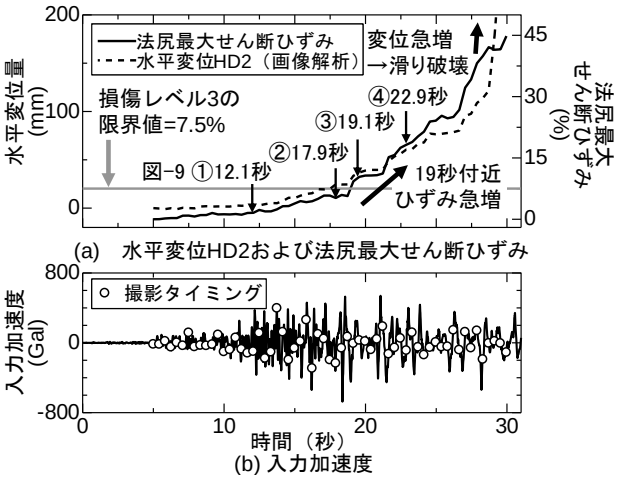


図-13　法尻最大せん断ひずみの時刻歴

17.9秒で損傷レベル3となり、③19.1秒の段階で法尻最大せん断ひずみが破壊時せん断ひずみ7.5%を超え、損傷レベル4に達すると、ひずみが急増して29秒付近で全体の滑り破壊が生じたことが分かる。また、**図-9**からも、法尻が損傷レベル4となる③19.1秒時点にて潜在的な滑り線が発生していることが分かる。そして、④22.9秒ではひずみの急増に伴ってひずみが内部へ進行していき、より明瞭な滑り線が生じている。したがって、法尻の最大せん断ひずみが盛土材の破壊時せん断ひずみを超えて損傷レベル4に達した場合、法尻部が局所的にせん断破壊し、進行性破壊が生じて全体の滑り破壊に至ったことが分かる。

以上より、提案する地震時安全性照査手法[10]を本実験結果に適用することで、地震中に盛土が滑り破壊に至るまでの損傷状態を評価できることを確認した。また、本実験結果から、破壊に対する安全性については盛土の盛土材の損傷レベル3を限界値として設定できる。これにより、鉄道橋りょう等の地震時性能照査と同様に、構造物全体系の損傷レベルを部材の損傷レベルで規定し、部材の変形を照査指標として安全性の照査を実施できることから、実際の被害を合理的に説明可能となると考えられる。

5. まとめ

本研究では、盛土の遠心振動台実験を行い、高速、高解像度撮影により加振中の損傷過程を評価するとともに、筆者らが提案する地震時性能照査手法の妥当性を確認した。以下に結論を示す。

- 高速度カメラを振動台に固定し、遠心場において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を観察できた。
- 加振中に法尻にひずみが集中して盛土材の損傷レベル3を超えると、ひずみが急増するとともに進行性破壊が生じて全体の滑り破壊に至った。
- 提案する性能照査手法により、加振中に盛土が滑り破壊に至るまでの損傷を評価できることを確認した。
- 滑り破壊に対する安全性の限界値として、盛土材の損傷レベル3を設定することで、橋りょう・高架橋等と同様に安全性の照査が実施可能であると考えられる。

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) 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.