

# 滑り破壊前の損傷過程を考慮可能な 盛土の地震時性能照査法と安全性照査への適用例

伊吹 竜一\* 土井 達也\* 井澤 淳\*  
上村 健太郎\*\* スレン ソッキアン\*\*

**Proposal for a Method that Takes into Account the Damage Process before Sliding Failure  
to Verify the Seismic Performance of Railway Embankments and Its Application to Safety Assessment**

Ryuichi IBUKI Tatsuya DOI Jun IZAWA  
Kentaro UEMURA Sockheang SRENG

Newmark's sliding block method is used as a standard response analysis method in the seismic design of railway embankments. Although this method is very practical and useful, it has some problems, for example, that it cannot accurately simulate the actual damage to embankments observed in past major earthquakes. In this paper, the authors propose a performance verification method for the seismic stability of embankments taking into account the damage process using the shear strain accumulated at the toe of the embankment as a verification index, the validity of which is verified using the centrifuge shake table tests. In addition, as an example of application of the proposed safety assessment method, the response analysis using a finite element method is also discussed.

キーワード：盛土，性能設計，遠心模型実験，数値解析

## 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<sup>1) 2)</sup>。しかし、この手法は滑り破壊に至るまでの盛土の損傷過程を必ずしも正確に再現出来ず、適切な変位量の評価が難しいことが顕在化している。例えば藤原ら<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変位量の観測値とニューマーク法による天端沈下量の計算値との比較では、未被災であった13箇所のうち5箇所の盛土で軽微な被害程度の日安となる200mm<sup>2)</sup>よりも大きな沈下量が算定されるなど、観測値と計算値に差異が生じていることが報告されている。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り、藤原ら<sup>4)</sup>はこの差異の要因として地盤材物性および入力地震動の設定誤差、盛土直下の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着目すると、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、ニューマーク法では円弧滑り破壊を前提してお

り、このような形態の損傷を評価出来ないと考えられる。

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<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、これらの研究でも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、筆者らは遠心模型実験から得られた画像を元に画像解析を行い、地震時に盛土が損傷して破壊に至るまでのメカニズムを明らかにし、その過程を評価可能な性能照査手法を提案している<sup>7) 8)</sup>。ただし、ここで実施した画像解析では各加振後に撮影した画像を用いており、加振中の観察が不十分であった。本稿では、筆者らの提案する盛土の地震時性能照査手法のコンセプトを紹介するとともに、その妥当性を検証するために実施した模型実験における遠心場での振動中の高速度・高解像度撮影結果を示す。さらに、提案する性能照査手法の実現性を確認するため、実験で見られた損傷過程を評

\* 鉄道地震工学研究センター 地震動力学研究室

\*\* 日本工営株式会社

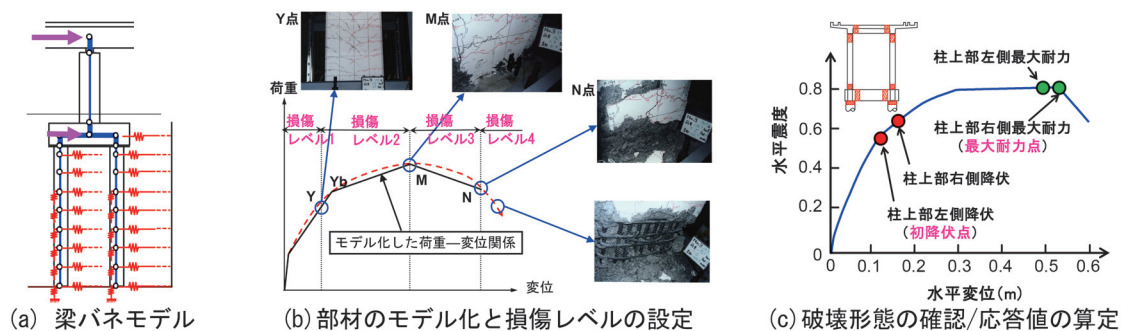


図1 地震時の橋りょう・高架橋の性能照査<sup>10)</sup>

価可能な応答値算定手法を検討し、安全性の照査を試行したので報告する。

## 2. 損傷過程を考慮可能な地震時性能照査法

### 2.1 鉄道における構造物の性能照査<sup>2)</sup>

#### 2.1.1 地震時の要求性能

鉄道システムは様々な形式の構造物で構成されており、構造形式にかかわらず要求性能を満たすように設計される。地震時の性能としては、すべての構造物に対して安全性（想定される作用のもとで構造物が使用者や周辺の人々の生命を脅かさないための性能）、重要構造物に対しては復旧性（想定される作用のもとで構造物の機能を使用可能な状態に保つ、あるいは短期間で回復可能な状態に留めるための性能）が要求される。

安全性には機能上の安全性と、構造体としての安全性があり、機能上の安全性は車両が脱線に至る可能性をできるだけ低減するため、少なくともL1地震動に対して構造物の変位を走行安全上定まる一定値以内に留めるための性能、構造体としての安全性はL2地震動に対して構造物全体系が破壊しないための性能である。ここで、L1地震動は建設地点の構造物の設計耐用期間内に数回程度発生する確率を有する地震動、L2地震動は建設地点で想定される最大級の地震動として定義されている。

復旧性は想定される作用のもとで構造物の機能を使用可能な状態に保つ、あるいは短期間で回復可能な状態に留めるための性能である。復旧性を検討するための地震動は、構造物の耐用期間とその再現期間などを考慮して設定する必要があるが、あらかじめ設定されている標準的なL2地震動のうち、直下型地震を想定したスペクトルII地震動を便宜的に使用してよいこととなっている。

#### 2.1.2 橋りょうおよび高架橋の性能照査

橋りょうおよび高架橋の地震時の性能照査では、応答値算定法として図1(a)に示すように梁バネモデルを用いるのが一般的である。構造物全体系の損傷レベルは図1(b)に示すように部材の損傷レベルで規定し、部材の変形（主に曲率）を指標として照査を実施する。設計地

震動に対する応答値を算定する前に、図1(c)に示すようにプッシュ・オーバー解析を実施して破壊形態を確認することで、構造物が破壊に至るまでの損傷過程を把握する。その後、設計地W震動に対する設計応答値を非線形スペクトル法により算定する。

#### 2.1.3 盛土の性能照査

盛土の地震時の性能照査では、円弧滑り破壊を前提としたニューマーク法を用いて算出する滑動変位量を照査指標とし、復旧の難易度から設定される復旧性の限界値以内に収めるように性能照査を実施している<sup>1) 2)</sup>。また、①盛土全体系の破壊に対する制限値を規定することが困難なこと、②破壊に至るまでの大変形領域に至る応答値を精緻に算定する手法が確立されていないこと、③安全性の限界値に比べて復旧性の限界値がはるかに厳しいこと等を勘案し、安全性の照査を省略可能としている。

## 2.2 現在の盛土の性能照査における課題

橋りょうおよび高架橋で用いられている手法は、近年の大地震で見られた被害を適切に評価出来ることが確認されており、破壊に至る前の損傷過程を適切に評価可能な手法と言える。一方、盛土で用いられている手法では、1章で示したように実際の被害を評価できない場合がある。また、筆者らは遠心振動台実験を実施し、盛土の復旧性の限界値は安全性の限界値に比べてはるかに厳しいことを確認しているが<sup>7)</sup>、急勾配盛土の場合は盛土全体系の破壊である滑り破壊に至る可能性があることが分かっており、安全性の照査が必要となる場合もあると考えられる。これらを勘案し、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を提案する。

### 2.3 盛土の損傷過程を評価可能な性能照査法

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<sup>7) 8)</sup>。実験では複数回の加振を行い、各加振後の画像を用いたPIV解析<sup>9)</sup>により、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

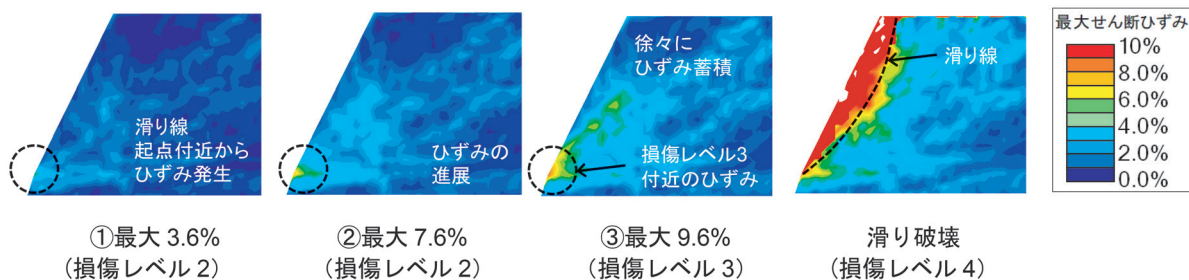


図2 盛土内部の損傷状況 (最大せん断ひずみ分布)<sup>8)</sup> (①~③は図3に対応)

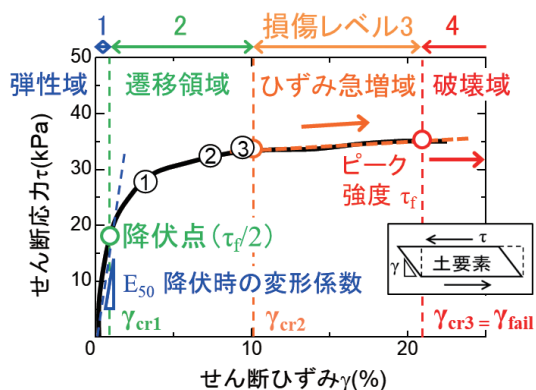


図3 盛土材の変形特性と損傷レベル (拘束圧  $\sigma'_c = 50 \text{ kPa}$ )<sup>8)</sup> (①~③は図2に対応)

備した。PIV解析結果の例を図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始め、そこ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。また、図3に示すように盛土材のせん断試験から得られる変形特性を用いて損傷レベルを規定し、法尻付近の最大せん断ひずみの最大値(以下、最大法尻せん断ひずみ)が盛土材の破壊時のせん断ひずみを越えた損傷レベル4に達すると滑り破壊に至る可能性があることも確認した。ここでは、法尻の範囲として、法面下端から1mの領域と仮定している。これは、盛土の締固める際の一層の仕上がり厚さの標準値である30cm<sup>1)</sup>の3倍程度に相当する。現状、盛土材や盛土形状が限られた実験ケースを対象としていることから、条件が異なる場合には損傷レベルや法尻範囲等の設定について別途検討が必要であると考えられる。

以上の結果をもとに、損傷レベルを考慮可能な盛土の地震時性能照査手法を提案している<sup>10)</sup>。本法では、図4に示すフローに従い、以下の手順で安全性および復旧性の照査を行う。

(1) 要求性能の設定

- 盛土の地震時の要求性能を下記の通り設定する。
- 走行安全性：鉄道構造物等設計標準・同解説 変位制限<sup>11)</sup>に従って省略する。
- 構造安全性：破壊しないための性能であることから、

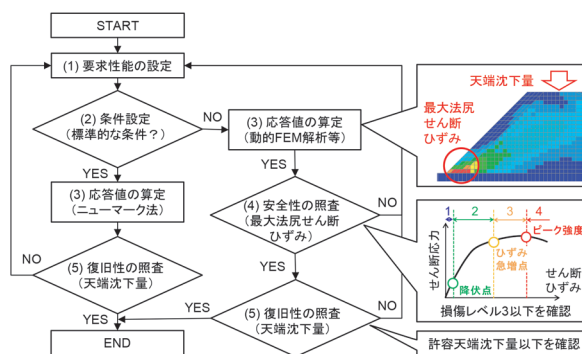


図4 損傷過程を評価可能な地盛土の性能照査フロー

盛土が滑り破壊に至らないこととする。  
復旧性：過去の復旧経験等を参考に短期間で復旧できる変形量に抑えることとする。

(2)/(3) 条件の確認/応答値算定法

鉄道盛土の標準的な条件(法面勾配1:1.5以上、盛土高さが15m以下)であれば破壊に至るまでに過大な地震力を必要とすることを確認しており、この場合、ニューマーク法により概ね妥当な変形量を与えることも確認している。そのため、標準的な条件であれば、従来通りニューマーク法により応答値を算定してもよい。また、安全性の限界値に比べて復旧性の限界値がはるかに厳しいため、安全性についても従来通り省略可能とする。一方で、標準的な条件ではない盛土は、地震時に滑り破壊に至る可能性があるため、適切な応答値算定手法を用いて地震時の最大法尻せん断ひずみを算定する。また、復旧性についても同様の応答値算定モデルから求められるとよい。

(4) 安全性の照査

盛土の破壊に関する安全性は、最大法尻せん断ひずみを照査指標とし、盛土材のせん断試験から求まるせん断応力~せん断ひずみ関係を用いて損傷レベルを設定し、照査を行う。損傷レベルの設定例を表1に示すが、盛土材の破壊時せん断ひずみを損傷レベル3の限界値とし、一般的には滑り破壊に対する安全性の限界値とする。また、鉄道盛土は、線区の重要性などから性能ランクがI~Ⅲの三段階に規定され、性能ランクに応じて復旧性の限界値が決まる。上述のように、滑り破壊に対する損

表1 盛土材の損傷レベルの設定例  
(各限界値は図3に対応)

損傷レベル	限界値	被害の目安
1	$\gamma_{cr1}$	無損傷 ( $E_{50}$ 相当の弾性レベル)
2	$\gamma_{cr2}$	軽微な損傷 ( $\gamma_{fail}$ の 1/2 程度以内)
3	$\gamma_{cr3} (= \gamma_{fail})$	比較的大きな損傷 ( $\gamma_{fail}$ 以内)
4	-	破壊 ( $\gamma_{fail}$ 以上)

傷レベルを規定することで、安全性についても盛土の性能ランクに応じた限界値を設定することが可能となる。

### (5) 復旧性の照査

盛土の復旧性についても、表1に示す損傷レベルを用いて設計限界値を適切に設定できる。例えば、損傷レベル3に達すると変形が急増する可能性があり、早急に復旧する必要があるため、重要度の高い盛土に対しては損傷レベル2を限界値とすること等が考えられる。一方、従来から用いられている沈下許容値を用いてもよく、その場合は後述するFEM解析結果から求まる天端沈下量を照査指標として用いる。

以上の性能照査法を適用することで、安全性の照査が可能となるだけでなく、滑り破壊に至るまでの損傷過程を考慮した性能照査が可能となり、復旧性と安全性の限界値の関係も把握できる。なお、盛土材はコンクリート材料に比べてせん断強度が小さいため、破壊形態は基本的に滑り破壊形態であると言える。そのため、破壊形態の確認作業としては、開削トンネルと同様<sup>2)</sup>に1.2倍の設計地震動に対して滑り破壊に至らず、十分な安全度を有していることが確認出来ればよいこととする。

## 3. 遠心模型実験による振動中の滑り破壊に至るまでの損傷過程の確認

### 3.1 実験の目的

2章で示した性能照査手法は、既往の実験を元に提案しているが、この時の変形観察で実施したPIV解析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、遠心場での高速度・高解像度撮影システムを構築することで振動中の損傷過程を評価可能とし、提案手法の妥当性を確認した。

### 3.2 実験概要

#### 3.2.1 試験装置および撮影環境

試験装置は中型の遠心載荷装置搭載型加振装置を使用し、振動中の盛土を撮影するため、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

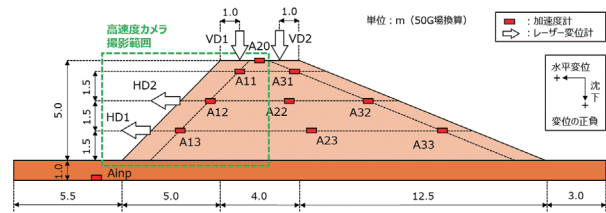


図5 模型形状とセンサー配置

表2 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>

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と短いことから、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、試験装置に搭載された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、画像解析はDitect社製DippStrainを用いてデジタル画像相関法によって実施しており、計算メッシュは模型寸法で約5mm×5mmとした。

#### 3.2.2 模型盛土

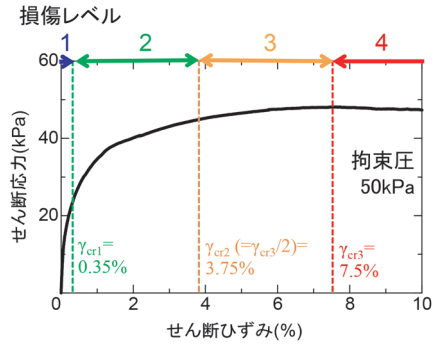
模型盛土形状とセンサー配置図を図5に示す。なお、以降では各種数値は遠心加速度50G場換算した値を示す。模型盛土は、セメント改良土で構築した強固な支持地盤上に、江戸崎砂を最適含水比付近で締固め度 $D_c=95\%$ に締固めて作製し、加速度計とレーザー変位計により盛土内部の加速度および天端、法面の変位を計測した。このとき、撮影側の盛土に確実に滑り破壊が生じるよう、高速度カメラにより撮影する側の法面勾配は1:1.0とし、逆側は1:2.5とした。使用した江戸崎砂の物性を表2、 $D_c=95\%$ での各種地盤材料試験結果を表3に示す。また、 $D_c=95\%$ の江戸崎砂の中空ねじりせん断試験を実施し、2章に従って設定した損傷レベルを図6に示す。

### 3.3 実験結果

実験では、耐震標準<sup>2)</sup>に示されているスペクトルI地

表 3 江戸崎砂 (Dc=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.



限界値	定義
損傷レベル1 $\gamma_{cr1}$	$E_{50}$ 相当の弾性領域の限界点 = 0.35%
損傷レベル2 $\gamma_{cr2}$	最大せん断応力点に向かってひずみが急増する点 = 3.75% (便宜的に破壊時せん断ひずみの1/2とする)
損傷レベル3 $\gamma_{cr3}$	最大せん断応力を示す点 (破壊時せん断ひずみ) = 7.5%

図 6 江戸崎砂 Dc=95% の変形関係と損傷レベル

震動を入力した。図 7 に 5~30 秒間に撮影した画像を用いた画像解析より算出した天端沈下量, 盛土中腹部の水平変位, 最大法尻せん断ひずみの時刻歴を入力波と合わせて示す。損傷レベル 3 の限界値である 7.5% を赤破線で示しているが, 29 秒付近で水平変位が急増して滑り破壊に至っていること, それ以前に最大法尻せん断ひずみが損傷レベル 3 の限界値である 7.5% を超えて損傷レベル 4 に達した 19 秒付近 (図中の③) から急増していることが分かる。図 8 に図 7 中に示した①~④の時点における最大せん断ひずみ分布を示すが, 加振中に法尻部にせん断ひずみが集中しはじめ, 損傷レベル 4 に達した③ 19.1 秒では内部に進展し, いわゆる潜在的な滑り線が発生していることが分かる。したがって, 最大法尻せん断ひずみが損傷レベル 4 に達すると滑り破壊が始まると考えられ, 損傷レベル 3 の限界値を安全性の限界値と設定するのが妥当であると判断出来る。なお, ③ 19.1 秒時点の盛土内部の各種ひずみ分布を図 9 に示すが, 滑り線に沿って膨張の水平ひずみ, 圧縮の鉛直ひずみが生じているが, 体積ひずみ分布としては 1% 程度と小さいことが分かる。したがって, 鉄道盛土のように締固めが十分に行われている場合は, 体積変化は無視してよいと考えられる。

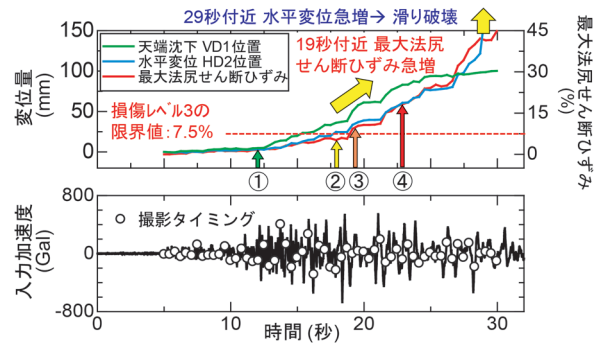


図 7 最大法尻せん断ひずみと各種変位量の時刻歴

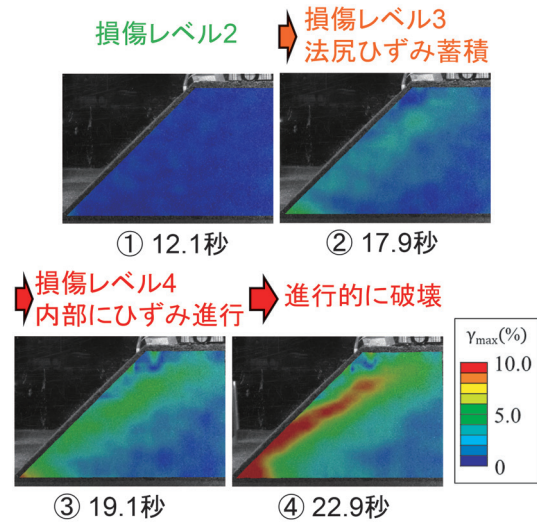


図 8 各損傷レベルの最大せん断ひずみ分布

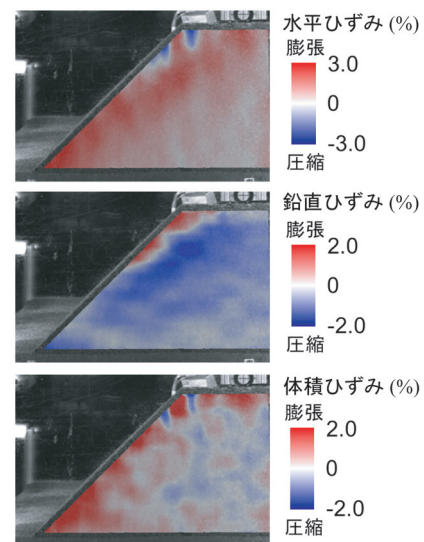


図 9 損傷レベル 3 超過時 (19.1 秒) のひずみ分布

## 4. GHE-S モデルを用いた応答値の算定例

### 4.1 応答値算定手法

3 章に示した遠心振動台実験結果から, 提案する地震

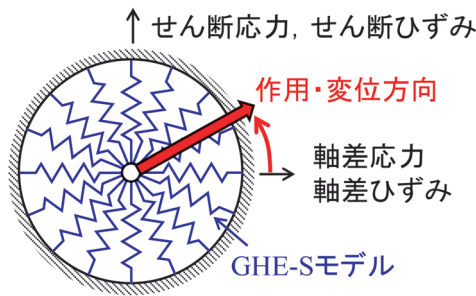


図 10 多重せん断ばねモデルの概念図

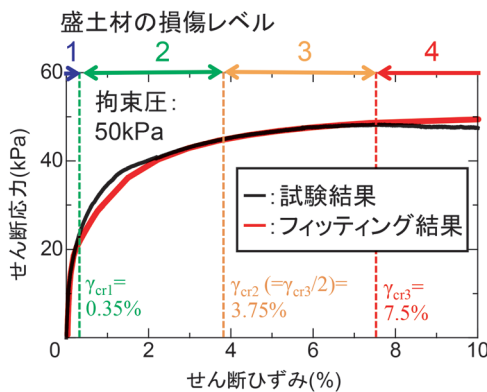


図 11 盛土材の変形特性と損傷レベルおよび GHE-S モデルによる再現結果

表 4 解析パラメータ

(a) せん断強度パラメータ

	粘着力(kPa)	内部摩擦角(度)
表層部(2m)	3.0	32.5
深部	9.5	32.5

(b) GHE モデルパラメータ

C1(0)	C1( $\infty$ )	C2(0)	C2( $\infty$ )	$\alpha$	$\beta$
1.0	0.11	0.2	1.0	0.986	1.38

時の性能照査手法が妥当であると判断出来る。この方法では、破壊に関する安全性の照査指標として最大法戻せん断ひずみを、復旧性の照査指標として天端沈下量を用いる。これらの値を適切に求めるためには地震時の土の繰り返しせん断挙動を精緻に再現する必要がある。このような挙動の再現手法として弾塑性構成モデルを適用した FEM 動的解析の適用<sup>例えば<sup>12)</sup></sup>が第一に考えられるが、パラメータ設定等で煩雑な作業が必要となり、実務上の適用が難しいのが現状である。そこで、鉄道の表層地盤の挙動評価において一般的に使用されている GHE-S モデル<sup>13)</sup>を多重せん断ばねモデル<sup>14)</sup>(図 10)に組み込んだ 2次元 FEM 動的解析の適用を検討し、遠心振動台実験の再現解析を試みた。なお、今回は多重せん断ばねを 18 本とし、5 度間隔でせん断挙動を考慮出来るようにした。

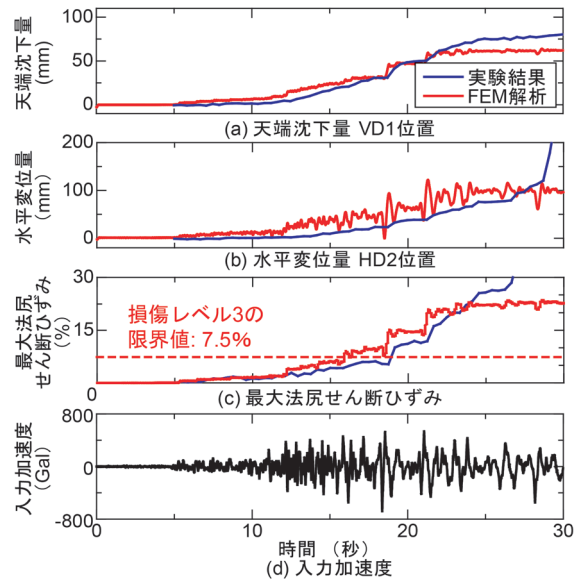


図 12 遠心振動台実験および FEM 解析から得られた各種応答時刻歴の比較

#### 4.2 遠心模型実験を対象とした検証解析

検証対象としては、盛土材として江戸崎砂  $D_c=95\%$  を用いた 1:1.0 勾配盛土の 50G 場での遠心振動台実験とした。一般的に動的解析における地盤モデルのパラメータ設定では繰り返しせん断試験から得られる  $G/G_0-\gamma$  関係をフィッティングすることでパラメータを設定するが、提案する盛土の安全性照査では破壊に関する安全性の限界値である損傷レベル 3 の限界値付近のモデル化が重要となる。したがって、図 11 に示すよう図 6 に示した盛土材のせん断応力～せん断ひずみ関係のうち、損傷レベル 3 区間を精緻にフィッティングするように設定した。使用した解析パラメータを表 4 に示す。なお、耐震標準<sup>2)</sup>での盛土表面の取り扱いや、実験における盛土表層の乾燥による強度低下を勘案し、表層 2m までは粘着力を 3.0kPa として設定している。FEM モデル作成後、せん断剛性一定(盛土中央部付近の拘束圧である 50.0kPa として設定)で実施した自重解析から得られた各要素の拘束圧を用いて初期剛性を設定し、その後、非線形自重解析により盛土の初期応力状態を再現した後、地震動を入力した。また、十分に剛な支持地盤上の盛土を想定し、支持地盤は弾性体とし、実験で計測され地震動を入力した。減衰にはレーリー減衰を用い、0.2Hz と 9.4Hz で減衰 3% となるよう  $\alpha=0.07383$ ,  $\beta=0.000994$  とした。

#### 4.3 検証解析

再現解析から得られた天端沈下、水平変位および最大法戻せん断ひずみの時刻歴を図 12 に示す。実験において全体の滑りが生じた 29 秒付近まで、非常に精度良く天端沈下、水平変位を再現できていることが分かる。実

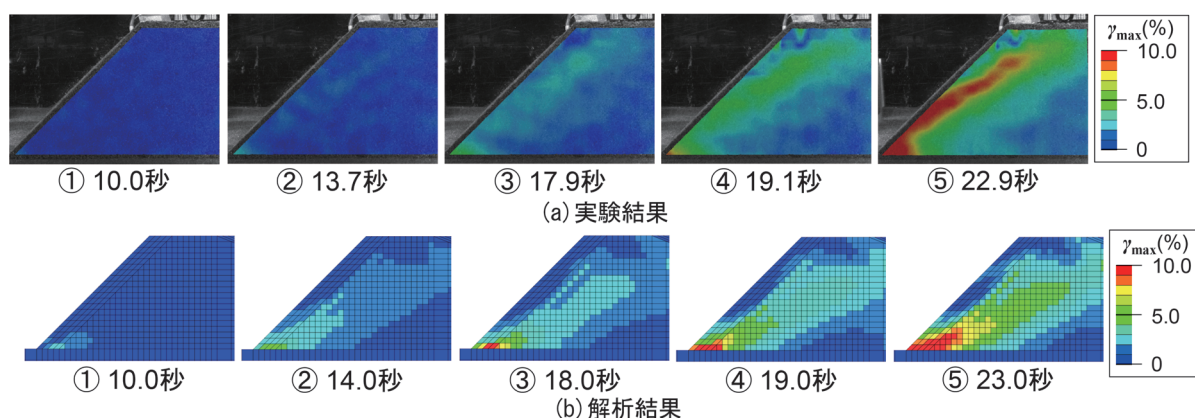


図 13 遠心振動台実験および FEM 解析から得られた最大せん断ひずみ分布の比較

験結果の天端沈下量は滑り土塊よりも天端中央側で計測しており滑りの影響が小さいため、破壊後の挙動を考慮しない本モデルでも精度良く評価できている。また、実験では 19 秒付近より進行性破壊が始まったと考えられるが、その時点までは最大法尻せん断ひずみの増加や累積傾向を再現出来ており、最大法尻せん断ひずみが損傷レベル 3 の限界値である 7.5% を超過する時点を精緻に評価出来る事が分かる。図 13 に実験と解析における加振中の最大せん断ひずみ分布の比較を示す。なお、解析では 1.0 秒間隔でひずみ分布等を出力したのに対して、実験では画像撮影を 0.5 秒間隔で設定したものの実際には約 0.4~0.5 秒間隔で撮影されたため、完全に一致した時刻ではないが、概ね同時刻のひずみ分布を示している。法尻を起点にひずみが蓄積し、滑り線付近にひずみが集中する損傷過程が適切に再現されている。また、本モデルでは体積変化を考慮出来ていないが、実験でも体積ひずみは非常に小さかったことも、実験と解析が一致した要因の一つである。したがって、鉄道盛土では十分な締固めを実施するため、復旧性の照査にも本モデルが適用可能と考えられる。

## 5. まとめ

本研究では、筆者らが提案する盛土の滑り破壊前の地震時損傷過程を考慮可能な性能照査手法の妥当性を確認することを目的とし、遠心模型実験による振動中の盛土の挙動観察と、応答値算定のための数値解析手法の検討を実施した。その結果、以下の知見を得た。

- (1) 遠心力場で振動中の高速度・高解像度撮影が可能な計測システムを構築した。得られた画像から変形解析を行うことで、加振中の盛土の地震時損傷過程を観察可能とした。
- (2) 標準的な勾配である 1 : 1.5 勾配未満の場合は加振中に法尻部にせん断ひずみが集中し、盛土材の損傷

レベル 3 の限界値（破壊時せん断ひずみ）を超過すると全体の滑り破壊に至る可能性があることを確認した。これにより筆者らが提案する性能照査手法の妥当性を確認した。

- (3) 実験結果を再現可能な応答値算定手法として、鉄道分野で標準的に用いられる GHE-S モデルに多重せん断ばねモデルを組み合わせた構成モデルによる 2 次元動的 FEM 解析を検討した。本モデルを用いる際、実験から得られる盛土材のせん断応力~せん断ひずみ関係の損傷レベル 3 付近が整合するようにパラメータフィッティングすることで、初期状態から滑り破壊直前までの盛土の応答を精緻に算定可能であることを確認した。これにより、提案する盛土の性能照査手法を用いて安全性の照査が実施可能であることが確認できた。

## 文 献

- 1) 国土交通省鉄道局監修，鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 土構造物，丸善出版，2007
- 2) 国土交通省鉄道局監修，鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，丸善出版，2012
- 3) 藤原真士良，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) 藤原真士良，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) 国土交通省鉄道局監修, 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説 変位制限, 丸善出版, 2006
- 12) 山本百華, 加藤知彦, 竹山智英, 飯塚敦: 盛土の遠心模型実験に対する動的数値シミュレーション, 第55回地盤工学研究発表会, 2020
- 13) 室野剛隆, 野上雄太: S字型の履歴曲線の形状を考慮した土の応力～ひずみ関係, 第12回日本地震工学シンポジウム, pp.494-497, 2006
- 14) Towhata, I. and Ishihara, K. : Modelling soil behavior under principal stress axes rotation, Fifth international conference on numerical methods in geomechanics, pp.523-550, 1985.