

損傷過程を追跡可能な盛土の耐震性能評価手法

土井 達也* 伊吹 竜一* 井澤 淳*
小島 謙一* 鈴木 聡**

Evaluation for Seismic Performance of Embankments Considering Their Damage Process

Tatsuya DOI Ryuichi IBUKI Jun IZAWA
Kenichi KOJIMA Akira SUZUKI

In the current design standard of railway structures, the settlement of embankments during earthquakes is evaluated by the Newmark's sliding block method which is based on circular slip failure. However, it has become apparent that the actual damage process of embankments cannot always be accurately reproduced by the method. In this study, we first attempt to clarify the damage process of embankments during earthquakes by centrifuge shaking table tests. Secondly, we propose a response value calculation method that can reproduce the damage process of embankments observed in the centrifuge tests. Finally, a performance verification method for embankments is proposed based on the above knowledges.

キーワード：盛土，遠心振動台実験，性能照査，円弧すべり，揺すり込み沈下

1. はじめに

鉄道構造物等設計標準・同解説 土構造物¹⁾ (以下、土構造標準) および耐震設計²⁾ (以下、耐震標準) では、地震時の性能照査で算定する盛土本体の変位量として、ニューマーク法により算定するすべり土塊の変位、盛土本体の揺すり込み沈下の2つを挙げている。このうち、盛土本体の揺すり込み沈下量は、すべり土塊の変位より十分小さいため省略可能としており、実務上はニューマーク法により算出する滑動変位量を復旧性の限界値以内に収めるように性能照査を行っている。また、盛土全体系の破壊に対する制限値の規定が困難なこと、破壊に至るまでの大変形領域の応答値を精緻に算定する手法が確立されていないこと、安全性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。一方、ニューマーク法は円弧すべり破壊を前提とした応答値算定手法であるが、この手法では実際の盛土の損傷形態を必ずしも再現できず、適切な耐震性能評価が困難となる問題が近年顕在化している。例えば藤原ら^{3) 4)} は、東北地方太平洋沖地震における鉄道盛土の観測変位量とニューマーク法による滑動変位量の計算値を比較し、両者に明確な相関が見いだせないことを示している (図1)。このため、実際の被害状況と整合する性能照査手法の構築が求められている。藤原らはこのような差が生じた要因として、実被害と解析で円弧すべり面の位置が異なる、実際は円弧すべりが生じていない等の損傷過程の相違や、滑動変位量の算定における地震動や地

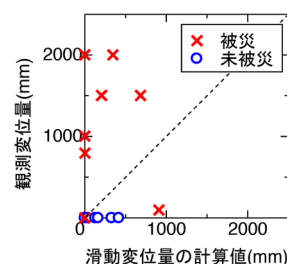


図1 観測変位量とニューマーク法による滑動変位量の計算値の関係⁴⁾に加筆

盤物性の設定による誤差などが重なったこと、被災盛土では支持地盤が軟弱である影響を受けたことを指摘している。一方、未被災盛土は13断面あるが、うち8断面では、ニューマーク法では滑動変位が生じており、ニューマーク法では実際の損傷形態を必ずしも再現できていない。

そこで本研究では、上記の要因のうち盛土の損傷過程の相違に着目し、盛土の損傷過程を追跡可能な耐震性能評価手法の構築を目指す。まず急勾配盛土、標準勾配盛土の遠心振動台実験により、盛土が円弧すべり破壊する場合、しない場合の地震時損傷過程を詳細に観察する。次に、得られた損傷過程を再現可能な応答値算定手法を構築する。最後に、盛土の地震時損傷過程に基づいた新しい性能照査手法を提案する。

2. 急勾配および標準勾配盛土の損傷過程

2.1 実験の概要

遠心振動台実験は、遠心加速度50G場で実施した。以降、すべての値を実物換算で表示する。模型盛土の形

* 鉄道地震工学研究センター 地震動力学研究室

** 株式会社複合技術研究所

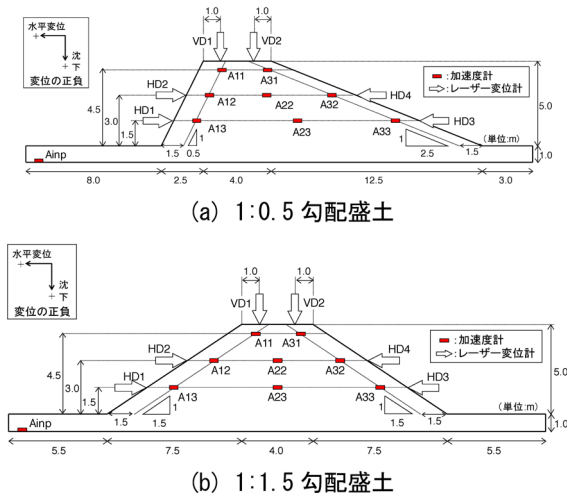


図2 模型盛土の形状とセンサー配置（実物大換算）

状とセンサー配置を図2に示す。対象盛土は、破壊に至りやすい急勾配盛土として1:0.5勾配の盛土と、標準勾配盛土として1:1.5勾配の盛土とした。盛土は江戸崎砂を最適含水比付近で締固め度 $D_c=85\%$ で締固めて製作した。江戸崎砂の物性を表1に、 $D_c=85\%$ での各種地盤材料試験結果を表2に示す。この盛土材は、土構造標準¹⁾において、土質3の低品質材料に相当する。なお、支持地盤は、盛土体の変形挙動に着目する観点から、盛土体に対して十分強度、剛性が大きくなるよう、同じ江戸崎砂を締固め度 $D_c=92\%$ で締固めて製作した。実験では振動台の加速度、盛土の応答加速度および変位を計測した。入力波としては、1:0.5勾配のケースでは徐々に変形を生じさせて破壊に至る過程を詳細に観察できるように、目標最大加速度250gal、1Hz、20波の正弦波を破壊に至るまで入力した。また、1:1.5勾配のケースでは、耐震標準²⁾に示す標準設計地震動のスペクトルIおよびIIの地震波とし、I, II, Iの順序で加振した。

2.2 急勾配盛土（のり面勾配1:0.5）の損傷過程

図2(a)中のHD1における水平変位とVD1における天端沈下量の時刻歴を図3に示す。地震動による天端沈下と水平変位が発生し、4回目の加振中に図4に示すようなすべり破壊が生じた。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位の蓄積量が大きいと、入力地震動の振幅だけでなく、繰り返し特性も考慮する必要がある。そこで、これらを併せて考慮できる指標として、地盤の液化化判定で提案されている累積損失エネルギー W ⁵⁾ (式(1))を用いて整理した。

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

ここで、盛土体のせん断応力 τ ~ せん断ひずみ γ 関係については、図5および式(2)(3)により盛土内に設置した加速度計の値を用いて推定した⁶⁾。

表1 江戸崎砂の物性

平均粒径: D_{50}	0.29 mm
均等係数: U_c	3.9
曲率係数: $U'c$	1.13
粘土分含有率: P_c	2.3 %
細粒分含有率: F_c	7.8 %
最適含水比: w_{opt}	17.8 %
最大乾燥密度: ρ_{dmax}	1.673 g/cm ³

表2 江戸崎砂 ($D_c=85\%$) の特性

乾燥密度: ρ_d	1.422 g/cm ³
圧縮指数: C_c	8.75
膨潤指数: C_s	1.21
圧密降伏応力: P_c	91.8 kPa
粘着力: c	5.0 kPa
内部摩擦角: ϕ	30.2 deg.

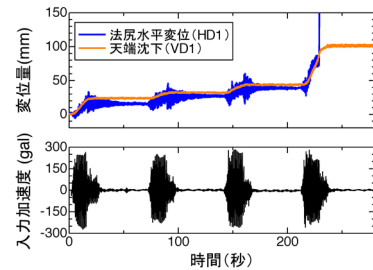


図3 1:0.5勾配盛土の変位時刻歴



図4 破壊後の1:0.5勾配盛土

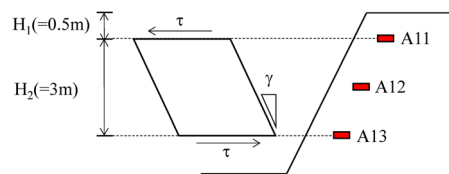


図5 加速度計記録を用いた盛土体のせん断応力～せん断ひずみ関係の算出

$$\tau = \rho H_1 A_{11} + \rho \frac{H_2}{2} A_{12} = \rho \left(H_1 A_{11} + \frac{1}{2} H_2 A_{12} \right) \quad (2)$$

$$\gamma = \left(\iint A_{13} dt dt - \iint A_{12} dt dt \right) / H_2 \quad (3)$$

ここで、 A_{11} , A_{12} , A_{13} は盛土内の加速度の計測値、 H_1 は天端から加速度計 A_{11} までの鉛直方向の距離、 H_2 は加速度計 A_{11} から A_{13} までの鉛直方向の距離、 ρ は盛土材の湿潤単位体積質量である。

図6にのり尻水平変位および天端沈下と累積損失エネルギー W を盛土中央部付近の上載圧 $\sigma'_v=50\text{kPa}$ で正規

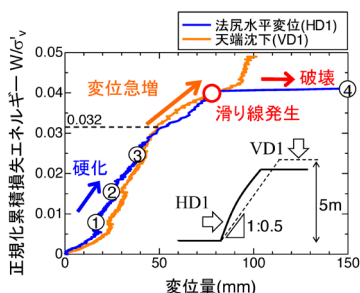


図6 正規化累積損失エネルギー～のり尻水平変位関係 (1:0.5 勾配盛土)

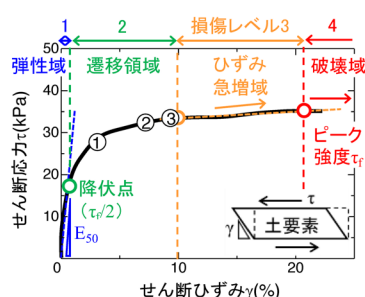


図8 盛土材の変形特性と損傷レベル (①～④は図6, 7に対応)

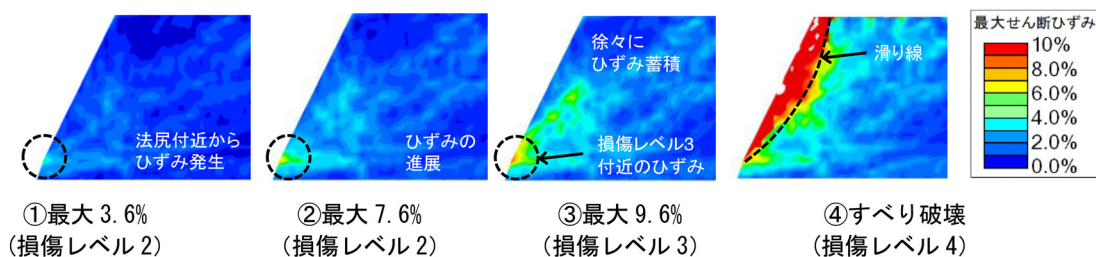


図7 盛土の最大せん断ひずみ分布 (①～④は図6に対応)

化した正規化累積損失エネルギー W/σ'_v の関係を示す。なお、本図は変位の振動成分を除去した平滑化表示をしており、①～④は1～4回目の振動後の時点を示している。この関係から、 $W/\sigma'_v=0.005$ 付近から変形の進行が鈍化する、すなわち硬化する挙動を見せたあと、 $W/\sigma'_v=0.032$ 付近から変位が急増し、破壊に至る様子が見られる。図7に図6の①～④の時点で撮影した画像のPIV解析⁷⁾により得られた最大せん断ひずみ分布を示す。のり尻からせん断ひずみが発生し始め、徐々にせん断ひずみが内部へ進行し、すべり線が発生してすべり破壊に至ったと推察される。ここで、中空ねじり試験装置を用いた江戸崎砂の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図8に示す。盛土材としての損傷レベルを下記の4つに分けることができる。

損傷レベル1： E_{50} 相当の弾性域

損傷レベル2： 損傷レベル1と3の遷移領域

損傷レベル3： ピーク強度に至るまで直線的な変位増加を示す領域

損傷レベル4： ピーク強度到達後すべり破壊が生じる領域

この損傷レベルとPIV解析から得られた最大せん断ひずみ分布を比較すると、遠心振動台実験において変位が急増した時点③におけるのり尻せん断ひずみ(9.6%)は、盛土材のひずみが急増する損傷レベル3に達する直前の値とほぼ整合している。以上より、すべり線の起点となるのり尻付近のひずみが盛土材の損傷レベル3に達すると変位が急増し、盛土材のピーク強度に達する損傷レベル4に至るとすべり線が発生し、脆性破壊したと推測できる。以下、本研究ではこのような盛土の損傷形態を「円弧すべり破壊型」と分類する。

2.3 標準勾配盛土(のり面勾配1:1.5)の損傷過程

図2(b)中のHD1における水平変位とVD1における天端沈下量の時刻歴を図9に示す。1:0.5勾配盛土と同様に、振動により徐々に天端沈下とそれに伴う水平変位が発生していることがわかる。ただし、1:0.5勾配盛土と比較して残留水平変位量は小さい。これは、図10に示すのり尻水平変位および天端沈下と正規化累積損失エネルギー W/σ'_v の関係からも見て取れる。図11(a), (b)に3回目加振後のPIV解析から得られた体積、最大せん断ひずみ分布をそれぞれ示す。1:1.5勾配のような標準的な盛土形状の場合、揺すり込みによる盛土体の鉛直ひずみが卓越し、体積圧縮する、すなわち締め固まるため、図10から分かるように地震動とともに硬化する(剛性が増大する)様子が確認された。これは1:0.5勾配盛土の初期段階でも見られたが、1:1.5勾配盛土ではのり尻付近でのひずみの集中が見られず、潜在的なすべり線も確認されなかった。なお、下部に水平方向に広がるせん断ひずみの集中域が見られるが、盛土作成の際に分割した締め固め境界の影響と考えられる。以下、本研究ではこのような盛土の損傷形態を「揺すり込み沈下型」と分類する。揺すり込み沈下型の損傷形態の盛土は、破壊に至るまでに非常に大きな地震力が必要と考えられる。

3. 盛土の損傷過程を再現可能な応答値算定手法の提案

2章で確認された損傷過程を再現可能な応答値算定手法の詳細法として、2次元弾塑性FEM解析による手法を検討した。解析対象盛土は1:0.5勾配の盛土とした。

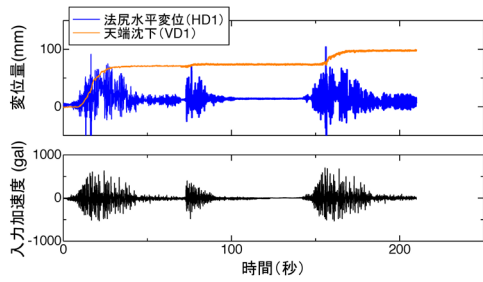


図9 1:1.5 勾配盛土の変位時刻歴

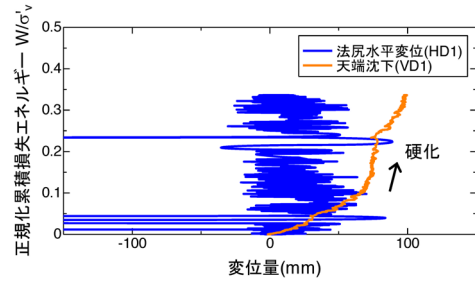


図10 正規化累積損失エネルギーのり尻水平変位関係 (1:1.5 勾配盛土)

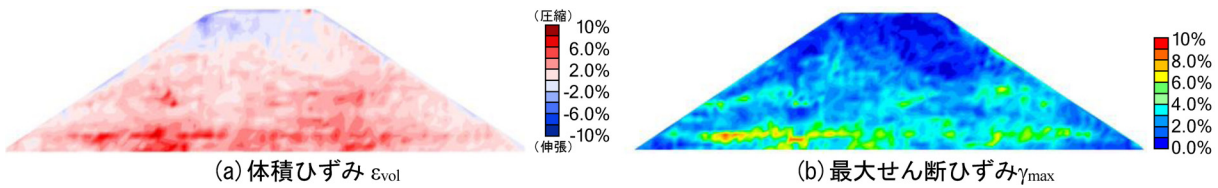


図11 3回目加振後のひずみ分布

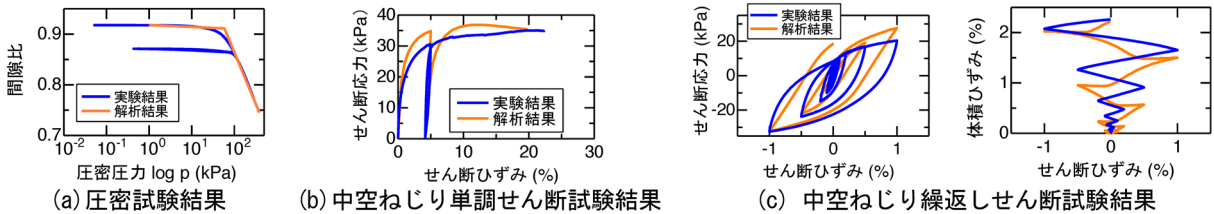


図12 ECモデルによる各種要素試験のフィッティング結果

表3 使用した解析パラメータ

D	A	M	ν	λ	n_e	m	OCR
0.056	0.98	0.8	0.45	0.088	2.4	0.24	9.38
$MD=A\lambda/(1+e_0)$ より	$A=1-\kappa/\lambda$ より	単調せん断試験のフィッティングより		圧密試験のフィッティングより	単調および繰返しせん断試験のフィッティングより		

D : ダイレイタンス係数, A : 非可逆比, M : 限界応力比, ν : ポアソン比, λ : 圧縮指数(=2.303 C_c), κ : 膨潤指数(=2.303 C_e), n_e : ECモデルパラメータ, m : 下負荷面パラメータ, OCR: 過圧密比

土の弾塑性構成則として様々な応力状態での土の体積変化を評価可能なECモデル⁸⁾を採用し、降伏曲面内での繰返し载荷による塑性ひずみの発生を精緻に算定可能な下負荷面モデル⁹⁾を組み合わせ適用した。モデルのパラメータは締固め度 $D_c=85\%$ の江戸崎砂の圧密試験、中空ねじり単調载荷試験および繰返し载荷結果をフィッティングして設定した。各試験のフィッティング状況と設定したパラメータを図12および表3にそれぞれ示す。

図13に1回目加振を再現した弾塑性FEM解析から得られた天端沈下量と高さ1.5m位置(図2(a)中のHD1の位置)における水平変位時刻歴を、実験結果とともに示す。実験で見られたような振動とともに変位が蓄積している様子が再現できており、残留変位は天端沈下量で3倍程度、水平変位量で1.5倍程度の誤差はあるものの、ニューマーク法から求めた天端沈下量(897mm)と比較して大幅に精度が向上している。また、加振中の最大せん断ひずみ分布を図14に示す。図14(a)より、実験で見られた、のり尻付近からひずみが蓄積し始め、内部にひずみが進行していく様子が再現できている。図

14(d)より、1回目加振後の最大せん断ひずみは3%程度であるが、実験でも3.6%程度であったことから、高い精度で再現できていると考えられる。なお、実験では盛土下部にひずみが集中しているが、解析では盛土上部にひずみが集中する傾向がある。考えられる原因としては、本解析で用いた構成則は要素の引張破壊を表現できないため、盛土の天端において応力が伝播し続けることにより、ひずみが累積したことが挙げられるが、今後の検討課題である。なお、1:1.5勾配の盛土についても、弾塑性FEM解析により1:0.5勾配の盛土と同等の精度で実験結果を再現できることを確認している¹⁰⁾。

4. 損傷過程を追跡可能な盛土の耐震性能評価手法の提案

橋りょう・高架橋の破壊に関する安全性の照査では、破壊形態の確認を実施したうえで、設計地震動に対する部材の損傷レベルを求める。そして、部材の損傷レベルから規定される構造物全体系の損傷レベルにより性能照

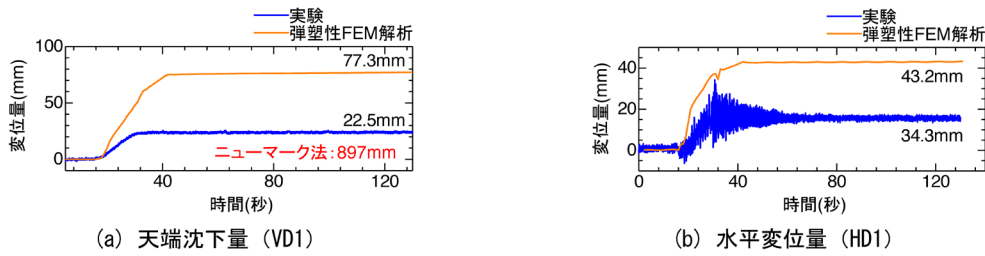


図 13 弾塑性 FEM 解析結果と実験結果の比較 (1:0.5 勾配盛土)

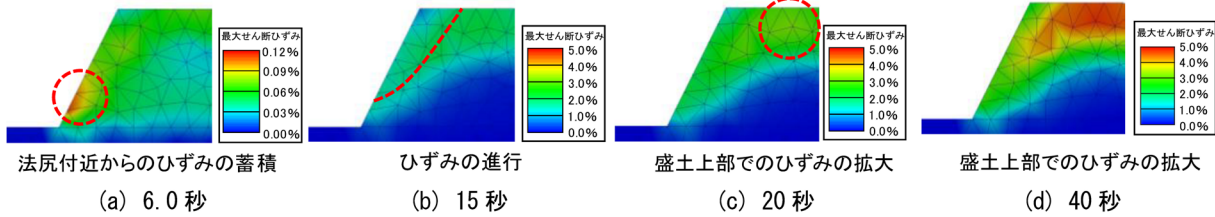


図 14 弾塑性 FEM 解析から得られた最大せん断ひずみ分布 (1:0.5 勾配盛土)

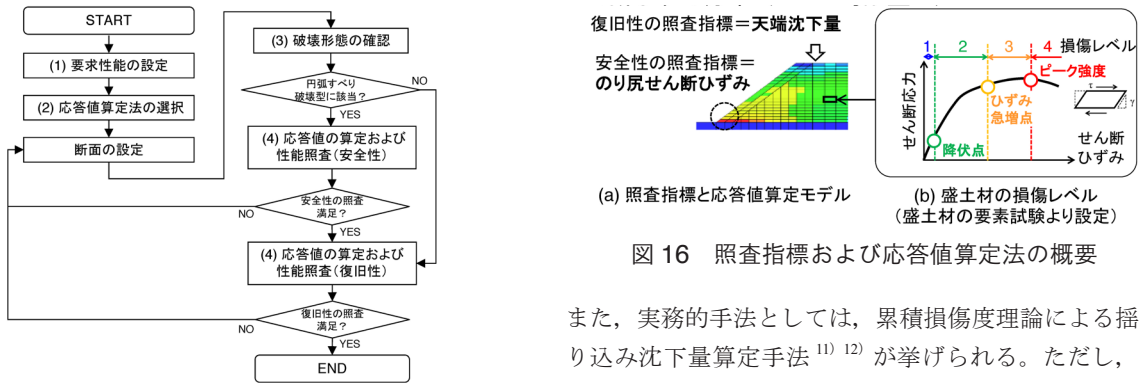


図 15 提案する盛土の性能照査手法の流れ

査を行う。4章では、2章、3章の知見に基づき、橋りょう・高架橋と同様に損傷レベルに基づいた盛土の性能照査手法を提案する。

図 15 に提案する盛土の性能照査手法の流れを示す。以下では、図 15 中の (1)～(4) の項目について詳細を説明する。

(1) 要求性能の設定

構造体としての安全性 (以下、安全性) については、図 16(a) に示すように、のり尻におけるせん断ひずみの応答値を照査指標とし、図 16(b) に示す盛土材の損傷レベルから定めた設計限界値を超えないことを照査する。設計限界値は一般的には、L2 地震動に対して盛土材が破壊に至らない損傷レベル 3 以内とすることが望ましい。復旧性については、図 16(a) に示すように、天端沈下量を照査指標とし、復旧性から定まる設計限界値を超えないことを照査する。設計限界値は、盛土の性能ランクに応じて、耐震標準²⁾ などによって設定する。

(2) 応答値算定法の選定

遠心振動台実験結果で観察された損傷過程を再現可能な手法としては、3章でとりあげた、盛土材の圧密試験、単調せん断試験、繰り返しせん断試験結果を再現可能な 2次元弾塑性 FEM 解析などが推奨法として挙げられる。

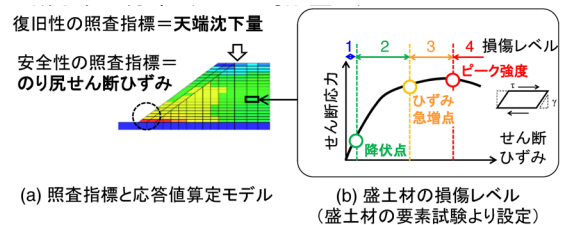


図 16 照査指標および応答値算定法の概要

また、実務的手法としては、累積損傷度理論による揺すり込み沈下量算定手法^{11) 12)}が挙げられる。ただし、実務的手法では、のり尻のせん断ひずみの応答値を直接的に評価できないため、後述する損傷レベルの評価や、破壊形態の確認の手法については今後の課題である。

(3) 破壊形態の確認

地震時の盛土の破壊形態は、繰り返しせん断によるひずみの累積の影響が大きいため、橋りょう・高架橋のようなプッシュ・オーバー解析による破壊形態の確認は適切ではない。そこで、応答値算定モデルに設計地震動を数回入力し、地震動の振幅と繰り返し回数を考慮可能な指標 (例えば累積損失エネルギー) と変位量の関係を算出し、破壊形態 (円弧すべり破壊型、揺すり込み沈下型) を把握する (図 17)。推奨法は盛土材のせん断ひずみの非線形性を考慮した解析であるため、数回の設計地震動の入力に対してのり尻せん断ひずみの急増を示すか否かで判断できる。一方、実務的手法ではのり尻せん断ひずみの応答値を直接的に評価できないため、破壊形態の確認手法については今後検討する必要がある。

(4) 応答値の算定および性能照査

円弧すべり破壊型の場合、図 18 に示すように、応答値算定モデルにそれぞれの性能項目 (安全性、復旧性) に対する設計地震動を入力して設計応答値を算定し、性能照査を行う。安全性の照査では、のり尻におけるせん断ひずみの応答値が (1) で定めた設計限界値を超えない

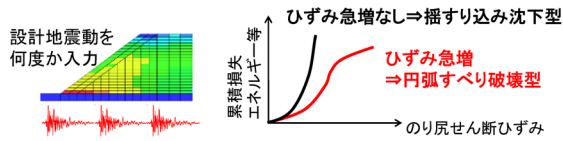


図 17 破壊形態の確認の概要

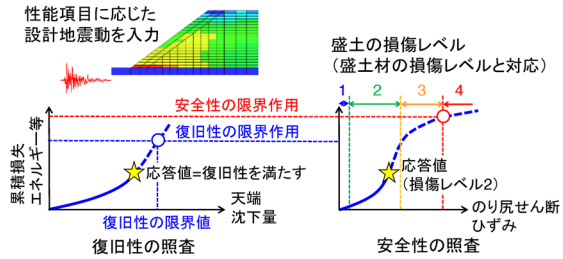


図 18 性能照査手法

ことを照査する。復旧性の照査では、天端沈下量が(1)で定めた設計限界値を超えないことを照査する。なお、揺すり込み沈下型の場合は、安全性の照査を省略し、復旧性の照査のみを行えばよい。

本手法により、橋りょう・高架橋と同様に部材(盛土材)の損傷レベルに基づいた安全性の照査が可能となる。さらに、実際の盛土の損傷過程を反映した性能照査手法であるため、ニューマーク法と比べてより実際の被災形態と整合した耐震性能照査が可能となる。

5. まとめ

本研究では、盛土の損傷過程を追跡可能な耐震性能評価手法の構築を目指し、遠心振動台実験により盛土の地震時損傷過程を観察し、2次元弾塑性FEMによる応答値算定手法を構築した。さらに、盛土の損傷過程に基づいた性能照査手法を提案した。得られた結論を以下に示す。

- (1) 遠心振動台実験により、急勾配盛土では繰返しの加振により変位が急増してすべり破壊に至ること、標準勾配盛土では、揺すり込み沈下により振動とともに硬化する傾向があることを確認した。
- (2) 急勾配盛土の変位の急増やすべり線の発生は、のり尻のせん断ひずみを盛土材のせん断応力～せん断ひずみ関係と対応させることで説明できる。
- (3) ECモデルに下負荷面を組み合わせた2次元弾塑性有限要素法のパラメータ設定法を提案した。また、同手法により、天端付近のせん断ひずみ分布の再現については課題を残すものの、実験で観測された天端沈下量を概ね再現できることを確認した。
- (4) 盛土の損傷過程を追跡可能な性能照査手法を提案した。本手法により、盛土の安全性の照査が可能となるとともに、ニューマーク法と比べてより実際の被災形態と整合した耐震性能照査が可能となった。

今後は、様々な盛土材や盛土形状の盛土に対して遠心

振動台実験や数値解析を追加し、提案した性能照査手法の適用性を検討する予定である。

謝 辞

本研究における弾塑性FEM解析の実施にあたり、神戸大学の竹山准教授をはじめ関係者には多大なご協力をいただいた。記して謝意を示す次第である。

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，高崎秀明，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，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における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 (地震工学論文集第 34 巻)，I_87-I_94, 2015
- 5) 風間基樹，鈴木崇弘，柳沢栄司：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，No. 631/III -48, pp. 161-177, 1999
- 6) Koga, Y. and Matsuo, O.: Shaking table tests of embankments resting on liquefiable sandy ground, Soils and Foundations, Vol.30, No.4, pp.162-174, 1990.
- 7) S.A. Stainer, J. Blaber, W.A. Take, and D.J. White: Improved image-based deformation measurement for geotechnical applications, Can. Geotech. J. 53: 727-739, 2016.
- 8) 大野進太郎，飯塚敦，太田秀樹：非線形コンラクタンシー表現式を用いた土の弾塑性構成モデル，応用力学論文集，Vol. 9, pp. 407-414, 2006
- 9) 橋口公一，上野正実，陳忠平：下負荷面および回転硬化の概念に基づく土の弾塑性構成式，土木学会論文集，No. 547/III-36, pp. 127-144, 1996
- 10) 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
- 11) 鈴木聡，太田剛弘，井澤淳，土井達也，小島謙一，山田真一，米岡威：累積損傷度理論による盛土の揺すり込み沈下量の評価 (その 1：中空ねじり試験)，土木学会第 75 回年次学術講演会，2020
- 12) 土井達也，井澤淳，小島謙一，鈴木聡：累積損傷度理論による盛土の揺すり込み沈下量の評価 (その 2：揺すり込み沈下量の評価)，土木学会第 75 回年次学術講演会，2020