

損傷過程を考慮した鉄道盛土の地震時性能照査のための応答値算定手法

(公財) 鉄道総合技術研究所 正会員 ○伊吹竜一 土井達也 井澤 淳

1. 目的

筆者らは、図1に概念的に示すような法尻せん断ひずみと天端沈下量を照査指標とした地震時性能照査手法を提案している¹⁾。この手法では、盛土材のせん断応力～せん断ひずみ関係から設定される損傷レベルを用いて地震時の破壊に対する安全性の照査が可能となる点に大きな特徴があるが、照査指標を適切に評価可能な応答値算定手法が必要となる。本稿では、提案手法を適用する際に実務的な取り扱いが可能な盛土の地震時応答値算定手法を検討した。

2. 応答値算定手法

提案する地震時性能照査手法では、破壊に関する安全性の照査指標として法尻せん断ひずみを、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り、特に法尻せん断ひずみについては、初期せん断応力状態に起因する法尻へのせん断ひずみの集中を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^{例えば 2)}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 モデルを多重せん断ばねモデル³⁾(図2)に組み込んだ2次元 FEM 動的解析の適用を検討し、遠心振動台実験結果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。

3. 遠心模型実験を対象とした検証解析

3. 1 検討対象およびモデル化

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¹⁾を用いた。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、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必要となる。したがって、図3に示すように中空ねじりせん断試験装置を用いた江戸崎砂 $D_c=95\%$ の単調せん断試験から得られる $\tau-\gamma$ 関係から設定した損傷レベルをもとに、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1に示す。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ている。なお、鉄道構造物等設計標準 耐震設計⁴⁾(以降、耐震標準)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(図4)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

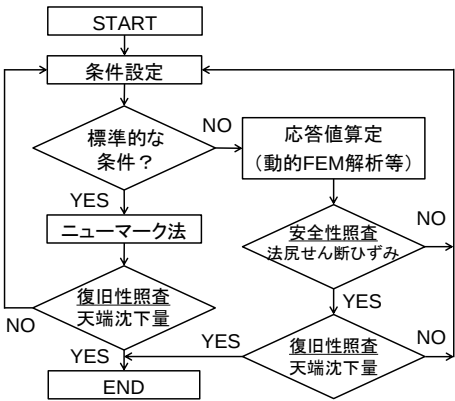


図1 提案する地震時性能照査フロー

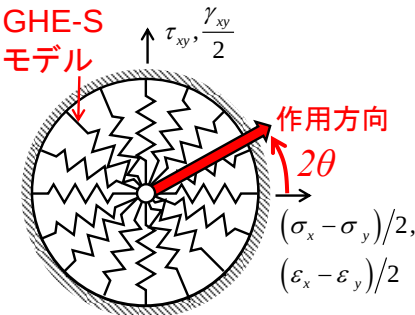


図2 多重せん断ばねモデルの概念図

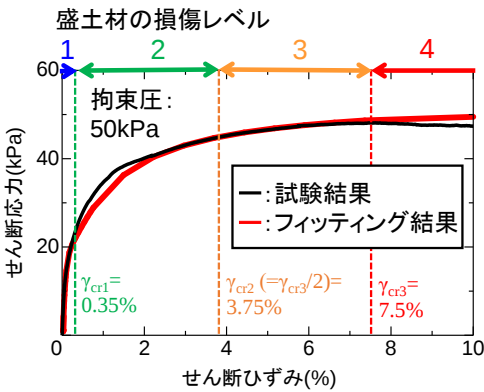


図3 盛土材の変形特性と損傷レベルおよび GHE-S モデルによる再現結果

表 1 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(∞)	C2(0)	C2(∞)	α	β
1.0	0.11	0.2	1.0	0.986	1.38

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、初期ひずみ状態を再現した後、地震動を入力した。地震動は実験¹⁾で計測された耐震標準に示されているスペクトルI地震動とした。なお、減衰にはレーリー減衰を用いて0.2Hzと9.4Hzで減衰3%となるよう $\alpha=0.07383$ 、 $\beta=0.000994$ とした。

3. 2 検証結果

再現解析から得られた天端沈下、水平変位および法尻最大せん断ひずみの時刻歴を図5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。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、その時点までは法尻最大せん断ひずみの増加傾向や法尻せん断ひずみの累積を再現出来ており、法尻最大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ことが分かる。

さらに、図6に10, 14, 18, 19, 23秒時点での最大せん断ひずみ分布の比較を示すが、法尻からせん断ひずみが蓄積し、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。

実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、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。

4. まとめ

本稿では、筆者らが提案する盛土の地震時性能照査手法の実務的な適用に向けて、GHE-Sモデルを多重せん断ばねモデルに組み込んだ2次元FEM動的解析の応答値算定手法との適用性を検討した。遠心模型実験の再現解析の結果、安全性および復旧性の照査指標となる法尻せん断ひずみおよび天端沈下量を精緻に評価出来ることを確認した。

参考文献 1) 井澤ら：損傷過程を考慮した鉄道盛土の地震時性能照査手法に関する基礎的検討，土木学会第78回年次学術講演会，2023。（投稿中） 2) 山本ら：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。 3) 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。 4) 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。

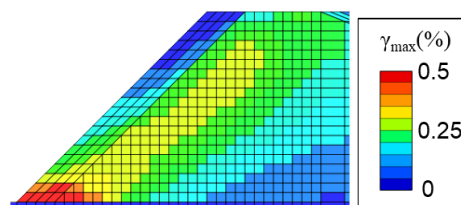


図4 非線形自重解析後の最大せん断ひずみ分布図

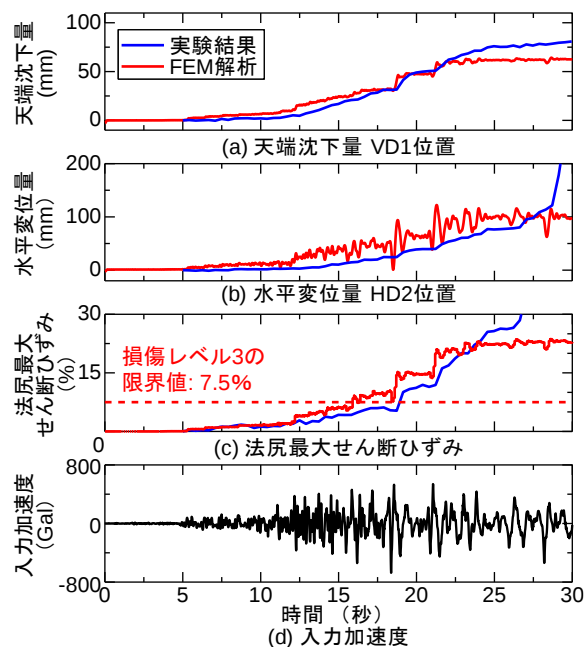


図5 遠心振動台実験およびFEM解析から得られた各種応答時刻歴の比較

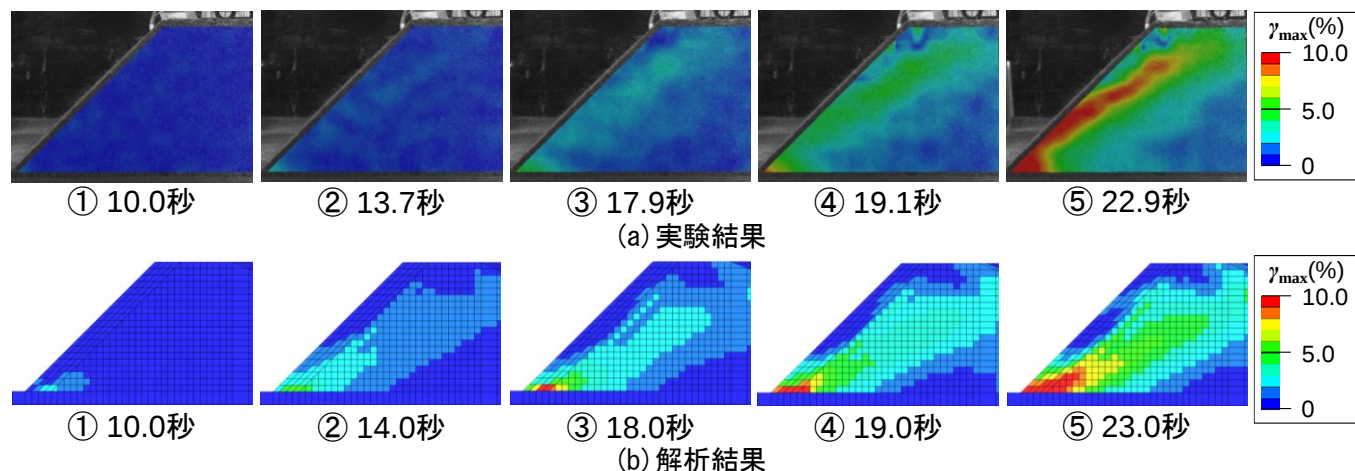


図6 遠心振動台実験およびFEM解析から得られた最大せん断ひずみ分布の比較