

損傷過程を考慮した鉄道盛土の地震時性能照査に関する基礎的検討

(公財) 鉄道総合技術研究所 正会員 ○井澤 淳 伊吹竜一 土井達也
日本工営 (株) スレン ソッキアン 上村健太郎

1. 目的

鉄道盛土の耐震設計では、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¹⁾。本手法は標準的なスペックの盛土に対しては妥当な結果を与える一方で、高盛土や急勾配盛土の場合など、特殊な条件下で発生が危惧される滑り破壊の発生、すなわち安全性の照査が難しい場合がある。このような盛土の滑り破壊の発生について、筆者らは、遠心振動台実験結果をもとに図1に示すような盛土材のせん断応力～せん断ひずみ関係から規定される損傷レベルと法尻せん断ひずみを用いた評価法²⁾を提案しているが、加振前後の撮影画像を用いた推論に基づいており、振動中の挙動についての評価は不十分であった。本稿では、遠心場での高速度高解像度画像撮影により提案手法の妥当性を確認し、損傷過程を考慮した鉄道盛土の地震時性能照査法を検討する。

2. 遠心模型実験による盛土の損傷レベルの評価

2. 1 実験概要

振動中の盛土の損傷・破壊過程を観察するため、遠心振動台実験を行った。特に振動中の盛土を高速度・高解像度で撮影することにより、盛土の地震時の損傷過程を観察した。遠心振動台実験はすべて遠心加速度 50G 場で実施しており、以降、すべての値を実物換算で示す。盛土材は江戸崎砂を締固め度 $D_c=95\%$ (乾燥密度: $\gamma_d=1.622\text{g/cm}^3$, 粘着力: $c=9.5\text{ kPa}$, 内部摩擦角: $\phi=32.5^\circ$) で使用した。中空ねじりせん断試験機を用いて拘束圧 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筆者らの提案する損傷レベルの定義と共に図 2 に示す。模型形状およびセンサー配置を図 3 に示すが、盛土高さは 5m とし、破壊に至りやすい急勾配盛土を想定して 1:1.0 勾配とした。片方の斜面に被害が集中するよう、左側斜面を上記の勾配とし、右側斜面は安定するように 1:2.0 勾配より緩やかにした。入力波は鉄道における標準設計地震動のうちスペクトル I を入力した。加振中は 0.01 秒間隔 (実物換算 0.5 秒間隔) で高速度撮影³⁾を実施し、得られた画像を用いて DIC 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。計算メッシュは約 0.25m×約 0.25m (模型寸法で約 5mm×約 5mm) とした。なお、画像解析で取得した変位とレーザー変位計で計測した変位が概ね一致することを確認している。

2. 2 実験結果

図 4 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、法尻部の最大せん断ひずみの時刻歴を入力波と合わせて示す。図 4 には損傷レベル 2, 3 の限界値である 3.5%と 7.5%のラインを示している。29 秒付近で水平変位が急増して滑り破壊に至っている

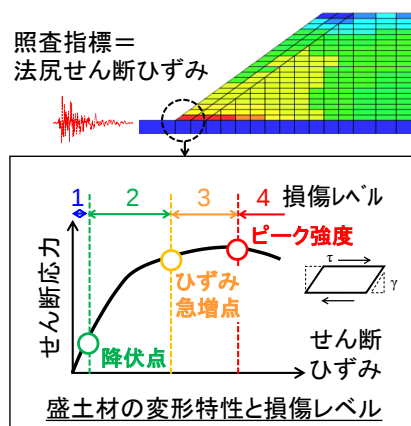


図1 盛土材の損傷レベルを用いた
盛土全体系の損傷レベルの概念図

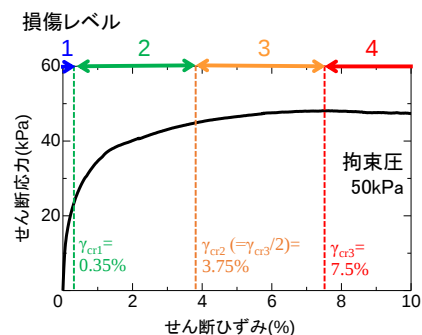


図2 江戸崎砂 $D_c=95\%$ の変形関係と
損傷レベル

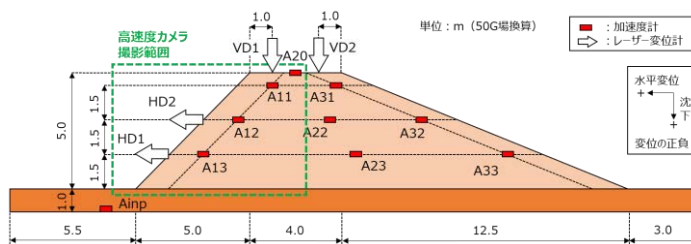


図3 模型形状とセンサー配置

ことが、それ以前に法尻最大せん断ひずみが損傷レベルの限界値である 7.5%を超えた 19 秒付近から急増していることが分かる。図 5 に図 4 中の①～④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、19 秒付近では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分かる。したがって、法尻せん断ひずみが損傷レベル 3 の限界値を超過すると滑り破壊が始まると考えられ、これ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、19.1 秒時点の盛土内部の各種ひずみ分布を図 6 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、締固めが十分かつ均質に行われている場合は、体積変化をほぼ無視してよいと考えられる。

3. 損傷過程を考慮した鉄道盛土の地震時性能照査法

鉄道橋りょう等の地震時性能照査では、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や復旧性の照査を実施しており、実際の被害を合理的に説明可能な手法となっている。そこで、盛土についても同様の体系の性能照査法を目指し、盛土全体の損傷レベルを盛土材の損傷レベルで規定し、法尻せん断ひずみを照査指標とした安全性の照査が可能な手法を提案した（図 7 参照）。上記の実験結果から、破壊に対する安全性については盛土材の損傷レベル 3 を限界値として設定できる。復旧性についても盛土内部の損傷状況に応じて必要となる復旧レベルを勘案して限界値を設定するのがよいと考えられるが、経験的に天端沈下量を照査指標とすることが合理的である。なお、一般的な鉄道盛土の場合はニューマーク法を用いた場合でも同等の盛土が設計出来ることを確認出来ており、従来通りの性能照査が可能である。

4. まとめ

遠心振動台実験を実施し、法尻部に蓄積するせん断ひずみが盛土材の損傷レベル 3 の限界値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。この結果をもとに破壊に関する安全性の照査を実施可能な地震時の性能照査手法を提案した。本手法を適用するには適切な応答値算定手法が必要なるが、別報⁴⁾において実務的な手法を検討する。

参考文献

1) 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. 2) 井澤ら：損傷過程を考慮した鉄道盛土の地震時性能照査法に関する基礎的検討, 土木学会第 78 回年次学術講演会, 2020. 3) 土井ら：遠心場における盛土の地震時損傷過程の撮影手法構築と PIV 解析, 土木学会第 76 回年次学術講演会, 2021. 4) 伊吹ら：損傷過程を考慮した鉄道盛土の地震時性能照査の試行, 土木学会第 78 回年次学術講演会, 2023. (投稿中)

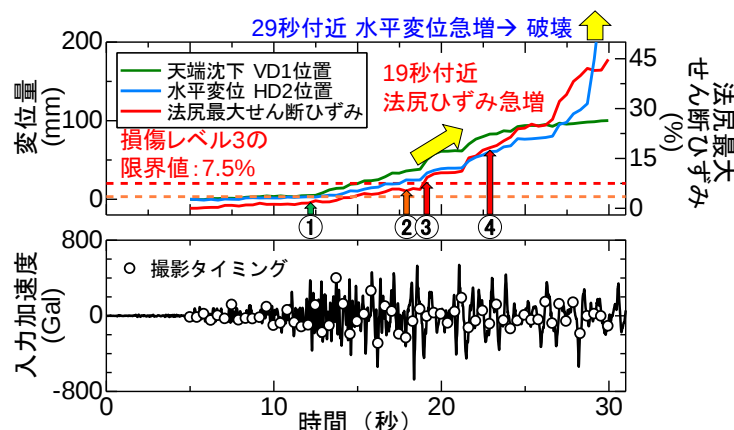


図 4 法尻せん断ひずみ、水平変位、天端沈下量の時刻歴

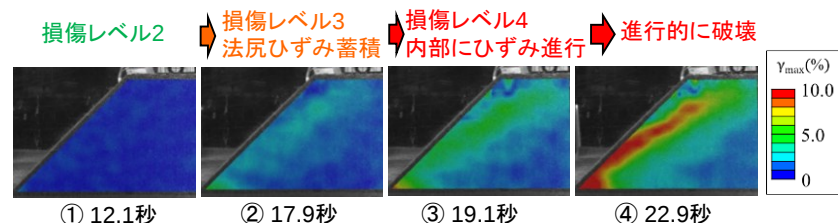


図 5 各損傷レベルの最大せん断ひずみ分布

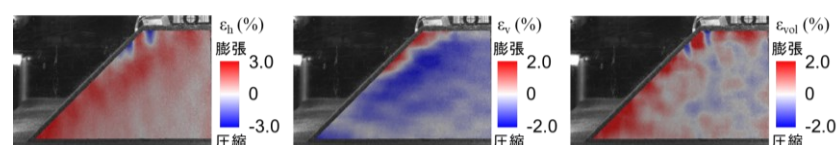


図 6 損傷レベル 3 超過時 (19.1 秒) の各種ひずみ分布

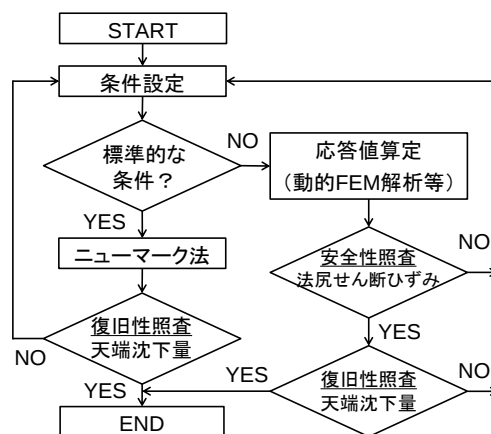


図 7 提案する地震時性能照査フロー