

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）

鉄道総合技術研究所 正会員 ○土井 達也, 井澤 淳, 小島 謙一
複合技術研究所 正会員 鈴木 聡

1. はじめに

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^{1),2)}。一方、筆者らは遠心振動台実験により、良質な地盤に支持された標準的な形状の盛土では、滑り破壊の前に揺すり込み沈下が卓越し、徐々に硬化すること、滑り破壊に至るまでに過大な地震力が必要になることを確認した³⁾。このため、標準的な形状の盛土では、揺すり込み沈下量を評価することで、より実情に即した耐震設計が可能になると考えられる。盛土の揺すり込み沈下量の評価は、弾塑性FEM解析などの詳細法によるのが望ましいが、必ずしも取扱いが容易ではない。一方、簡易法としては、堀井ら⁴⁾の累積損傷度理論⁵⁾による手法が挙げられるが、実盛土の沈下量との比較を行った事例は少ない。そこで本稿では、文献3)の盛土を対象に、前稿⁶⁾で求めた盛土材の累積ひずみ特性を用いて、累積損傷度理論により揺すり込み沈下量を評価する。なお、堀井ら⁴⁾の手法では盛土形状や盛土の動的応答は考慮できないため、本稿では堀井ら⁴⁾の手法に加え、等価1自由度モデル⁷⁾により盛土の動的応答を考慮して求めた動的せん断応力に基づく手法によっても、揺すり込み沈下量を算定する。これらの結果を遠心振動台実験結果やニューマーク法と比較し、累積損傷度理論による揺すり込み沈下量の評価法の適用性を検討する。

2. 累積ひずみ特性の実験式

前稿⁶⁾の中空ねじり繰返しせん断試験より、盛土材の軸ひずみ ε_a と初期せん断応力比 SR_s 、動的せん断応力比 SR_d 、繰返し回数 N の関係は、堀井ら⁴⁾の手法を適用すると、近似的に次のように表される。

$$\varepsilon_a = (SR_d / B)^A \quad (1) \quad A = 0.31N^{0.05} \quad (2) \quad B = (0.871 - 15.32SR_s^{5.4})N^{-0.127} \quad (3)$$

ただし、 $SR_s = \tau_s / \sigma_{mi}$ 、 $\tau_s = (\sigma_{xi} - \sigma_{yi}) / 2$ 、 $SR_d = \tau_d / \sigma_{mi}$ 、 $\sigma_{mi} = (\sigma_{xi} + \sigma_{yi}) / 2$ 、 σ_{mi} は初期平均応力、 τ_s は初期せん断応力、 τ_d は動的せん断応力、 σ_{xi} は水平応力、 σ_{yi} は鉛直応力である。

3. 盛土の揺すり込み沈下量の算定

盛土の初期せん断応力比 SR_s と動的せん断応力比 SR_d が得られれば、 SR_d のピーク波列を求め、 $N \sim \varepsilon_a$ 関係から累積損傷度理論を適用することにより、累積軸ひずみ ε_{accum} が求まる。盛土の揺すり込み沈下量 s は、この累積軸ひずみが盛土全体で均一に分布すると仮定すれば $s = H \varepsilon_{accum}$ と求められる。ここで H は盛土高である。また、盛土の初期せん断応力比 SR_s は、静止土圧係数を $K_0 = 0.5$ と仮定して、 $SR_s = (1 - K_0) / (1 + K_0) = 0.333$ とした⁴⁾。動的せん断応力比 SR_d については、堀井ら⁴⁾の手法では、 $K_0 = 0.5$ の条件では盛土形状によらず $SR_d = 1.333 \alpha / g$ となるとされている（ α は入力加速度、 g は重力加速度）。この手法は簡便であるが、盛土形状や盛土の動的応答の影響を考慮していない。そこで本検討では、坂井ら⁷⁾の手法により盛土の等価1自由度モデルを構築して求めた盛土の動的せん断応力比 SR_d に基づく揺すり込み沈下量も算定した。

図1に等価1自由度モデルの概要を示す。質点重量 M は盛土全重量に有効質量比0.74を掛けた値とし、ばねの初期剛性 K および減衰係数 C は、遠心振動台実験³⁾で併せて実施したホワイトノイズ加振から得られた、地表面加速度に対する天端応答加速度の伝達関数（以下、伝達関数）にフィッティングさせた。ここで、1自由度解析で得

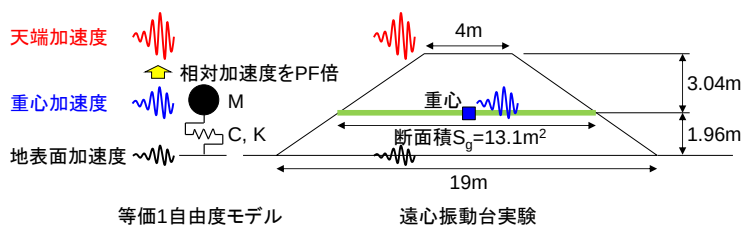


図1 等価1自由度モデルの概要

図1に等価1自由度モデルの概要を示す。質点重量 M は盛土全重量に有効質量比0.74を掛けた値とし、ばねの初期剛性 K および減衰係数 C は、遠心振動台実験³⁾で併せて実施したホワイトノイズ加振から得られた、地表面加速度に対する天端応答加速度の伝達関数（以下、伝達関数）にフィッティングさせた。ここで、1自由度解析で得

キーワード 盛土, 累積損傷度理論, 揺すり込み沈下量

連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38 (公財) 鉄道総合技術研究所 TEL: 042-573-7336

られた応答加速度は、盛土重心位置の応答加速度を表すと考えられるため、天端の応答加速度の算定の際には、基盤に対する相対加速度に刺激係数 PF (文献 7)を参考にここでは 1.4 と仮定) を乗じた。図 2 にホワイトノイズ加振に対する伝達関数のフィッティング結果を、表 1 に 1 自由度解析のパラメータを示す。盛土体の非線形性は GHE-S モデル⁸⁾で表現した。表 2 に GHE-S モデルのパラメータを示す。ここで表 2 のパラメータは、拘束圧 50kPa (盛土重心位置の鉛直応力に相当) とし、文献 3)と同じ盛土材の締固め度の条件で実施した中空ねじり試験より得られた $G \sim \gamma, h$ 関係より設定した。図 3 に、遠心振動台実験での加振波形 (L2 地震動スペクトル I 波形²⁾) に対する伝達関数の比較を示す。図 3 より、1 自由度解析は実験結果よりやや天端の応答加速度を小さく評価しているが、実験の傾向をある程度表現できている。また、等価 1 自由度モデルおよび遠心振動台実験の加速度記録³⁾から求めたせん断応力～せん断ひずみ関係の比較を図 4 に示す。ここで 1 自由度解析の動的せん断応力 τ_d は、ばね力 P (kN) を盛土の水平方向の断面積 S_g (m²) で除すことで求めた。図 4 より、ひずみレベルの大きい範囲では解析結果のほうが、せん断ひずみが小さい傾向はあるものの、せん断応力～せん断ひずみ関係の傾向を概ね表現できていると考えられる。この動的せん断応力から、盛土重心位置での平均応力を σ_{mg} として動的せん断応力比 $SR_d = \tau_d / \sigma_{mg}$ を求め、揺すり込み沈下量を算定した。

累積損傷度理論により算定した揺すり込み沈下量 (1 自由度解析を併用したものと、堀井ら⁴⁾の手法) と、ニューマーク法で算定した滑動変位量、実験結果における天端沈下量の比較を図 5 に示す。図 5 より、累積損傷度理論によって揺すり込み沈下量を評価することにより、遠心振動台実験での盛土の変形モードに即し、かつ天端沈下量を安全側に評価できることがわかる。なお、今回の検討条件では、図 5 をみるとわかるように、堀井ら⁴⁾の手法による揺すり込み沈下量が遠心振動台実験結果と最も近い結果となったが、盛土形状や盛土材料、入力地震波などの条件によっては動的応答の影響が大きくなる可能性がある。これらの検証は今後の課題である。

4. まとめ

遠心振動台実験を行った標準形状の盛土に対して、累積損傷度理論により揺すり込み沈下量を評価し、実験結果と比較した。その結果、累積損傷度理論により、遠心振動台実験で観測された天端沈下量を安全側に評価できることがわかった。今後は本手法の盛土形状や盛土材料が異なる条件での適用性について検討していきたい。

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) 鈴木ら: 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. (投稿中) 4) 堀井ら: 砂質土盛土の地震による残留沈下予測, 土木学会第 52 回年次学術講演会, 1997. 5) Bransby, P. L. et al.: Soil deformations near cantilever sheet pile walls, *Geotechnique*, Vol. 51, No. 5, pp. 945-958, 2011. 6) 鈴木ら: 累積損傷度理論を用いた盛土の法尻せん断ひずみの予測 (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. (投稿中) 7) 坂井ら: 等価 1 自由度モデルを用いた盛土の地震時非線形挙動の評価, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 73, No. 1, 174-186, 2017. 8) 室野ら: 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.

表 1 1 自由度解析のパラメータ

項目	値
マス重量 M (ton)	70.8
ばね初期剛性 K (kN/m)	1.217×10^5
減衰係数 C (kNs/m)	293.1

表 2 GHE-S モデルのパラメータ

$C_1(0)$	$C_2(0)$	$C_1(\infty)$	$C_2(\infty)$
1.00	0.15	0.21	1.0
α	β	κ	h_{max}
0.591	0.575	2.00	0.35
除荷時 G_{max}/G_{min}		標準変位 δ_r (m)	
1.0		3.66×10^{-3}	

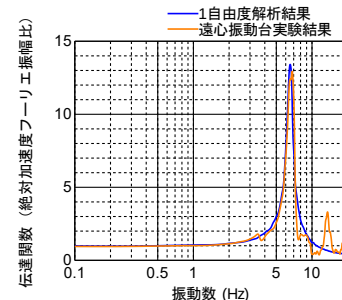


図 2 ホワイトノイズ加振に対するフィッティング結果

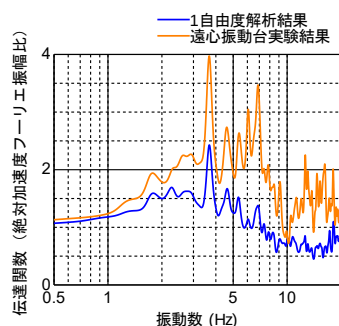


図 3 遠心振動台実験での地震波形に対する伝達関数

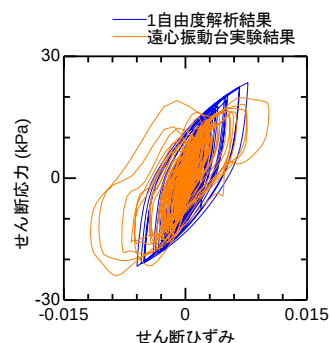


図 4 盛土のせん断応力～せん断ひずみ関係の比較

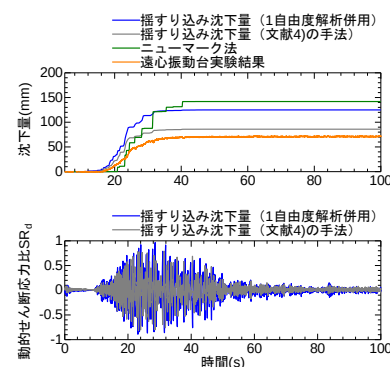


図 5 天端沈下量の比較