

斜面の地震時残留変位解析と振動台実験結果を用いた検証

防衛大学校 学生会員 ○久保 隼人・高倉 太希
防衛大学校 正会員 篠田 昌弘・宮田 喜壽

1. 背景と目的

近年、日本各地で地震が多発しており、盛土や自然斜面に被害が発生している。自然斜面の耐震性評価は、地盤の状態を簡易に把握できる現地調査法が確立していないことから、簡易な安定解析や変形解析が有効となる。本稿では、すべり線を非円弧と仮定した Spencer 法による力の釣合いに基づき、ニューマーク法による斜面の地震時残留変位量の算定方法を示す。提案法の妥当性の検証のため、慣性力方向を制御した斜面の振動台実験結果を用いて検証解析を実施する。

2. 地震時残留変位量の算定方法

本研究では、斜面の地震時残留変位量の算定方法に、Spencer 法に基づいた地震時残留変位量の算定方法を採用した。地震時残留変位量の算定では、水平方向と鉛直方向の力の釣合いとモーメントの釣合いから運動方程式を導き、降伏震度を超過した加速度を積分することで残留変位量を算定する。すべり土塊重心の運動方程式を式(1)から(3)に示す。ここで、 W_i はスライス i のスライス重量、 X_G はすべり土塊重心の水平変位、 Y_G はすべり土塊重心の鉛直変位、 F_{Xi} と F_{Yi} はスライスの水平方向と鉛直方向の力の総和、 x_{oi} は任意のモーメント中心とスライス底面の中心までの水平距離、 y_{oi} は任意のモーメント中心とスライス底面の中心までの鉛直距離、 MR_i^* は地震動を与えた際に初めて $FS=1.0$ を示す時のモーメント、 θ_c は任意のモーメント中心に対する回転角である。本研究では、式(1)から(3)の運動方程式を線形加速度法により解いた。Spencer 法による地震時残留変位量の算定では、地震時残留変位量の水平成分、鉛直成分、回転成分のそれぞれが算定される。地震時残留変位量の回転量 d_θ と水平成分と鉛直成分の合成変位量 ds は式(4)と式(5)から求めた。本研究では、斜面の地震時残留変位量を、回転量と水平成分と鉛直成分の合成変位量の和として算定した。

$$\sum_{i=1}^n \frac{W_i}{g} \ddot{X}_G = \sum_{i=1}^n F_{Xi} \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^n \frac{W_i}{g} \ddot{Y}_G = \sum_{i=1}^n F_{Yi} \quad (2)$$

$$-\left(\sum_{i=1}^n W_i (x_{oi}^2 + y_{oi}^2)\right) \ddot{\theta}_c = \sum_{i=1}^n MR_i^* \quad (3)$$

$$d_\theta = \theta_c \sqrt{x_{oi}^2 + y_{oi}^2} \quad (4)$$

$$ds = \sqrt{X_G^2 + Y_G^2} \quad (5)$$

3. 検討に用いる振動台実験

図1に振動台実験に用いた斜面模型を示す。斜面模型は基盤層、弱層、表層の3層で構成されている。基盤層は安定した地山を想定しているため、セメント安定処理した粒度調整碎石を十分に締め固めることで作成した。弱層には、珪砂・水・ベントナイトを重量比 100:10:1 で混合した人工配合試料、北海道胆振東部地震の斜面崩壊の大部分を占めていた滑り層である樽前d層と恵庭 a 層の合計 3 種類の材料を使用した。表層には起動力を確保するため磁砂鉄・早強ポルトランドセメント:ベントナイト・水を重量比 21:9:2:8 で混合した材料を用いた。弱層勾配は、35 度、40 度、45 度の 3 種類とした。本振動台実験では、永久磁石を用いた電気式の二次元(水平・鉛直方向)振動台を用いた。振動台実験の入力波は、5Hz の正弦波 180 波として、水平方向、水平鉛直同時加振(同位相)、水平鉛直同時加振(逆位相)の3種類の加振波を用いて、慣性力の向きを変化させて加振した。加振方法については 100Gal から 100Gal ずつ段階的に増加させ、模型が大崩壊に至った段階で実験を終了した。斜面模型には標点の埋め込みがあり、加振中に動画を撮影して、標点の変位を画像解析により求めた。振動台実験の詳細は文献 2)を参照されたい。

キーワード 斜面崩壊, エネルギー, 斜面安定性評価, 振動台

連絡先 〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20 防衛大学校

Tel : 046-841-3810(3512), E-mail : shinoda@nda.ac.jp

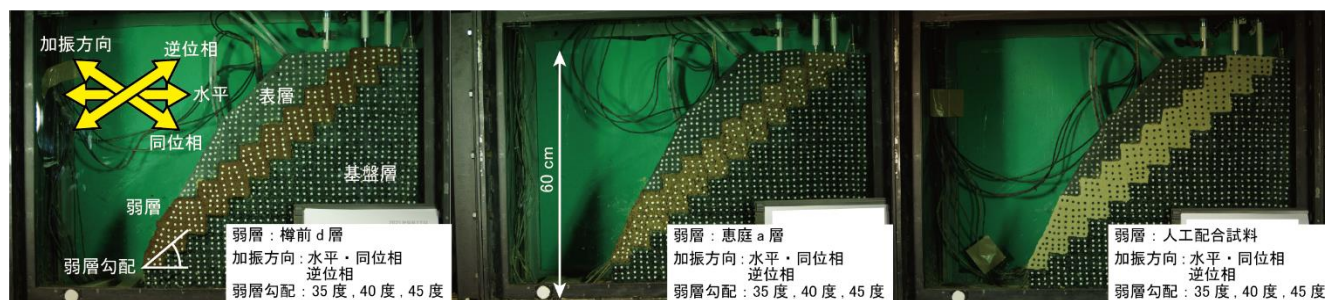


図1 振動台実験に用いた斜面模型

4. 検討結果

事前に実施した三軸圧縮試験から求めた強度定数と斜面安定解析結果を参考にして、全ての振動台実験結果を説明できるような弱層材料の強度定数を推定した。図2に代表的な解析結果として、弱層材料に人工配合試料を用いた斜面の解析結果と実験結果の比較を示す。図2より、解析結果は実験結果を概ね説明できることが分かる。なお、他の弱層材料でも検証した結果、同様な結果が得られた。

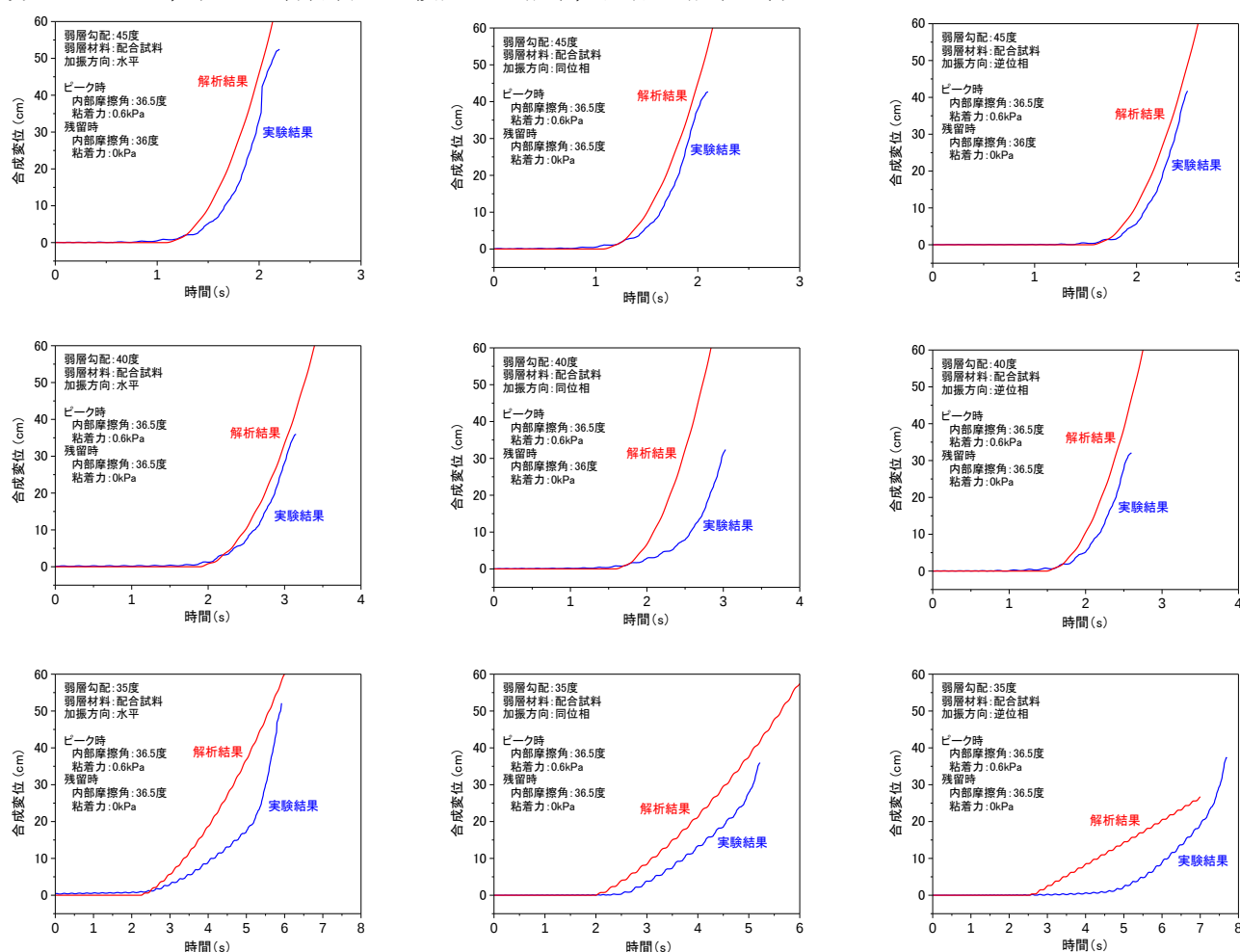


図2 解析結果と実験結果の比較

5. まとめ

斜面の地震時残留変位量の算定方法に、Spencer法に基づいた地震時残留変位量の算定方法を用いて、斜面の振動台実験結果と比較した。その結果、解析結果は実験結果を概ね説明できることが分かった。

参考文献: 1) 篠田昌弘, Spencer法に基づいた斜面の地震時残留変位量の算定法, 土木学会論文集, Vol.69, No.4, pp.491-503, 2013.

2) 高倉太希, 丸尾光平, 篠田昌弘, 宮田喜壽ら, 北海道胆振東部地震の崩壊斜面地盤材料を用いた斜面の振動台実験, 日本地震工学会第16回年次大会梗概集, T2021-013, 2021.