

斜面勾配の違いによる変形量と震動エネルギーの関係

中央大学理工学部 正会員 國生剛治

学生会員 石澤友浩, 原田朋史, 根本進平

1. はじめに

一般的に地震による斜面安定はこれまで、滑り土塊の力の釣り合いにより評価されてきた。これらの方法は、崩壊の有無を判断するための滑り安全率を求め、さらに、Newmark 法によって滑り土塊のすべり面に沿った変形量も算定できる。しかし、一旦大規模な崩壊が起こった後の土塊の変形量や流動量をこれらの方法で簡便に評価することは困難である。

そこで本研究では、図-1 に示すように斜面の流動崩壊のエネルギーバランスを用いて、エネルギーの観点から流動変形を含む斜面崩壊を定量的に評価することを目指し、新たに開発した振動台を用いた模型実験をおこなった。これらの試験結果より、斜面勾配の違いによる残留変形量と損失エネルギーの関係について検討した。

2. 試験方法

図-2 に示すような板バネ支持式小型振動台の上に矩形アクリル土槽を載せ、その中に豊浦砂を用いて作った模型斜面(以後、試験体 A)に振動を加えた。この振動台実験では、初期に台を水平方向に一定変位まで引張り、切り離すことにより模型斜面に自由減衰振動を与える。模型斜面は、室乾状態の豊浦砂(重量 30kg)を用い、空中落下法により相対密度 $Dr \approx 40\%$ で作製した。図-2 に示すように数個のコンクリート円柱からなる剛体モデル(以後、試験体 B)を用い、2つの試験体の重量、重心を一致するように調節し、同様な条件に基づき試験を行った。

試験体 A においては、斜面勾配 β を $11^\circ \sim 29^\circ$ まで変化させ試験をおこなった。模型砂斜面の変形量を計測するためには、横断面の計測用マーカーと表層面のマーカーを 10cm 間隔で図-2 に示すように挿入し、この模型斜面の横と上から2つのビデオカメラで観察し、試験前後には、レーザー変位計を用いて斜面の変形を測定した。

3. 試験結果

結果の一例として、図-3 は、振動台の初期変位が 1.5cm において、試験体 A の減衰振動より算出した 1 波毎の損失エネルギーの増分 ΔW_A と振動台の平均変位振幅 $(u_i + u_{i+1})/2$ の関係を示している。また、同図には異なる斜面勾配の試験結果も示した。図中に示す近似曲線は、試験体 B について同様な試験条件のもとでの 4 回の試験結果より得られた試験体 B の損失エネルギーの増分 ΔW_B を示している。また、模型斜面の変形で消費された震動エネルギーの増分 ΔE_{EQ} ($\Delta E_{EQ} = \Delta W_A - \Delta W_B$) は、同図に塗りつぶしの記号で示している。この図より、斜面勾配が減少するほど、 ΔE_{EQ} は減少することがわかる。また、ビデオカメラの映像を 1 波毎に整理すると、図中に矢印でしめすように、

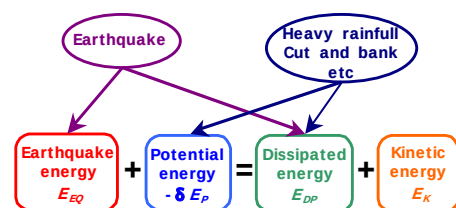
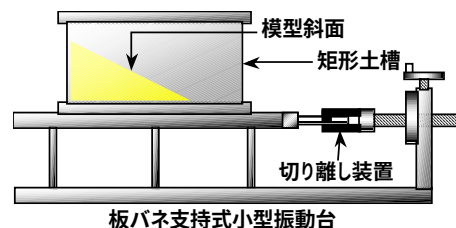


図-1 エネルギーバランス



板バネ支持式小型振動台

図-2 試験装置, 試験試料

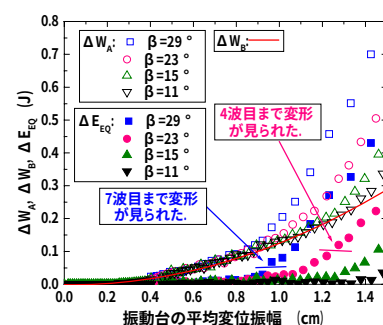


図-3 試験体 A,B の損失エネルギーの比較

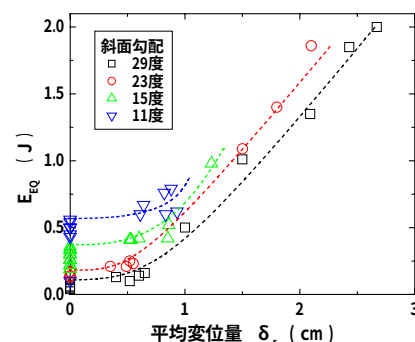


図-4 異なる初期振動台変位の震動エネルギー E_{EQ} と斜面の水平方向の変位量 δ_r の関係

キーワード： 地震 斜面安定 減衰 振動台実験 エネルギー

連絡先： 中央大学理工学部土質研究室 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27

Tel：03-3817-1799

勾配 $\beta=29^\circ$ の場合は 7 波目まで, $\beta=23^\circ$ の場合は 4 波目まで斜面の変形は見られたが, $\beta=11^\circ, 15^\circ$ の場合は斜面の変形が見られなかった. また, 試験前後の画像整理より, 鉛直断面, 表層面マーカーでの水平方向の変位の平均値を斜面の水平方向の平均変位量 δ_r , 表層面マーカーの水平方向の変位を $\delta_{r(\text{surface})}$, 斜面下流の先端での水平方向の変位を $\delta_{r(\text{tip})}$ として算出した. ここで, 図-1 に式中の $-\delta E_p$ は試験前後の斜面形状の変化から次式により計算した.

$$\delta E_p = \rho_d g B \int z dx dz \quad \left[\begin{array}{ll} \cdot x, z: \text{鉛直, 水平座標} & \cdot B: \text{奥行き幅} \\ \cdot g: \text{重力加速度} & \cdot \rho_d: \text{密度 (一定)} \end{array} \right] \quad (1)$$

式中の積分は斜面の断面全体について行っている. また, 図-3 に示した 1 サイクル毎の ΔE_{EQ} を試験終了後までを合計し, E_{EQ} を算定した.

図-4 は, 異なる斜面勾配においての種々の初期振動台変位でおこなったいくつかの試験結果に基づき, 模型斜面の水平方向の変位量 δ_r と E_{EQ} との関係を示したものである. また, 図-5, 6 も E_{EQ} と表層面マーカーの水平方向の変位 $\delta_{r(\text{surface})}$, 斜面下流の先端での水平方向の変位 $\delta_{r(\text{tip})}$ との関係を示している. 全体的に E_{EQ} が大きくなるほどそれぞれの変位量が大きくなる傾向は明瞭に見られる. また, これらの図より, 同じ斜面変位に対する震動エネルギーは勾配が小さいほど大きくなるのが分かる.

図-7 は, 図-4 の水平方向の平均変位 $\delta_r=0\sim0.5\text{cm}$ の範囲を詳細に示している. この図より, 斜面の変形が生じ始める E_{EQ} の閾値の存在を示唆され, その閾値は当然のことながら斜面勾配が大きくなるにつれて減少すること, すなわち小さな地震エネルギーで変形し始めることがわかる.

図-8 は, いくつかの初期振動台変位の異なる試験結果に基づき, 横軸の E_{EQ} と縦軸の $-\delta E_p$ の関係を示している. 図中の実線は E_{EQ} と $-\delta E_p$ の間の直線近似を示している. この傾きは, 勾配が $23^\circ, 29^\circ$ の場合は, 1 を上回っているが, 勾配が $11^\circ, 15^\circ$ の場合, 1 を下回っている. この近似直線の傾きは, 斜面変形への各エネルギーの寄与の比率を示しているが, 勾配が $23^\circ, 29^\circ$ の場合は, 位置エネルギーの方が斜面変形に大きく寄与するが, 斜面勾配が $11^\circ, 15^\circ$ の場合は, 震動エネルギーの方が斜面変形に大きく寄与していることがわかる. つまり, 模型斜面の勾配がかなり大きい場合では, 震動エネルギーは斜面崩壊のきっかけを与えるが, 実際に崩壊土塊中で使われるエネルギーには主に位置エネルギーが当てられると考えられ, 勾配の小さい場合では斜面変形に使われるエネルギーは主に震動エネルギーが当てられると解釈できる.

まとめ

- 1) 斜面の変形に寄与する震動エネルギー E_{EQ} と水平方向の斜面平均変位量 δ_r , 表層面マーカーの水平方向の変位を $\delta_{r(\text{surface})}$, 斜面下流の先端での水平方向の変位を $\delta_{r(\text{tip})}$ の間には正の相関関係がみられ, また, 斜面勾配 β が小さくなるほど, 同じ δ_r に対して大きなエネルギーが必要であることを示された.
- 2) 斜面の変形が生じる限界の震動エネルギー E_{EQ} の閾値を求めることができたため, 今後, 斜面崩壊の発生条件についてもエネルギー的評価方法を適用していく予定である.
- 3) 斜面勾配 β が大きいと斜面変形に使われるエネルギーは, 位置エネルギー $-\delta E_p$ が当てられ, 逆に斜面勾配 β が小さいと斜面変形に使われるエネルギーは主に震動エネルギー E_{EQ} が当てられることが実験結果から示された.

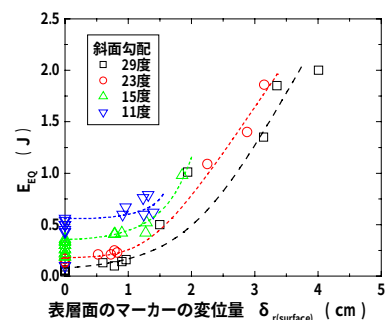


図-5 震動エネルギー E_{EQ} と斜面下流の先端での変位 $\delta_{r(\text{surface})}$ の関係

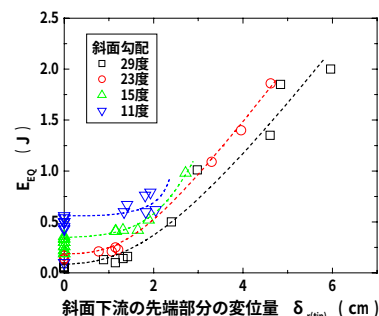


図-6 震動エネルギー E_{EQ} と斜面下流の先端での変位 $\delta_{r(\text{tip})}$ の関係

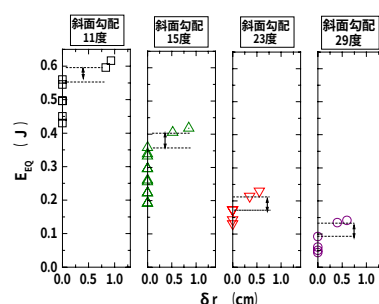


図-7 斜面変形が生じ始める震動エネルギー

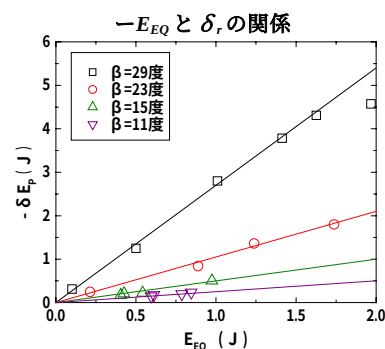


図-8 異なる斜面勾配の E_{EQ} と $-\delta E_p$ の関係