

入力波の振動数と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, 鈴木伸平

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¹⁾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²⁾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、振動台を用いた模型実験の手法を新たに開発した。本稿では、入力波の振動数と斜面勾配の違いによる斜面変形量と震動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(質量 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つの試験体の質量、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、斜面勾配を 10, 20, 29° と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。また、振動台の上に 25, 50, 75 kg の鉄板を固定することにより、振動台の振動数 f を変化させ、上記の一連の実験を 4 種類の振動数 f について行った。

3. 試験結果

図-3 はそれぞれの振動数において初期振動台変位 $u_0 = 2.0$ cm の場合の減衰振動波形を示している。鉄板が無い場合の振動数 f_1 は約 5.0Hz になり、25, 50, 75 kg の鉄板を用いた場合の振動数 f_2, f_3, f_4 は約 4.6, 4.2, 3.8Hz であった。結果の一例として、同じ入力震動エネルギー E_{IP} を与えた際の振動台の振動数が f_1 5.0Hz f_4 3.8Hz における 1 波毎の損失エネルギー W と振動台振幅の関係を図-4 に示す。試験体 A, B の 1 波毎の損失エネルギー W_A, W_B (4 回の試験結果より得た近似曲線) を減衰振動波形より算出し、さらに模型斜面の変形で消費された 1 波毎の震動エネルギーの増分 E_{EQ} を $E_{EQ} = W_A - W_B$ で計算し、それらの値を図中にプロットしている。

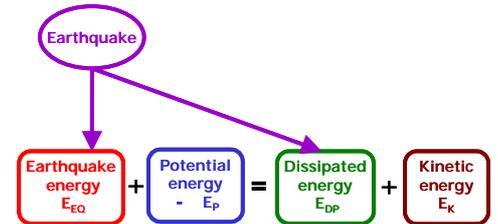


図1 エネルギーバランス

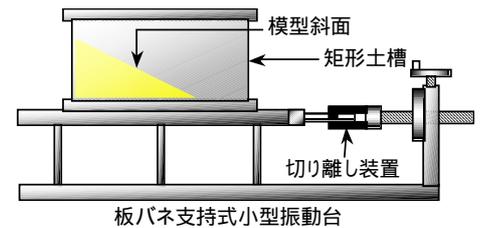


図2 試験装置, 試験試料

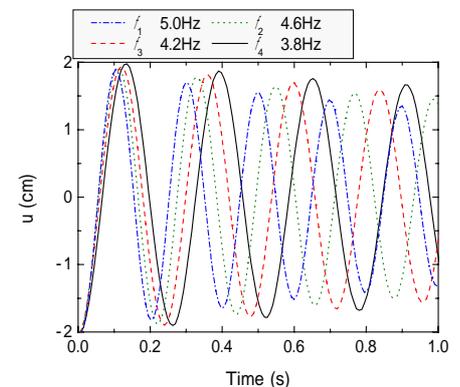


図3 減衰振動波形の比較

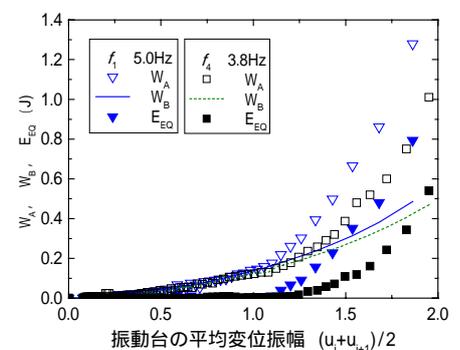


図4 試験体 A, B の損失エネルギーの比較

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

このうち、 E_{EQ} はともに8~9波目以降ほぼ0になっている。これはビデオカメラの映像より変形が見られたのが同じ波数までであることと整合している。

次に試験前後の画像整理より、鉛直断面、表面マーカーでの水平方向の変位の平均値を計算し、斜面の水平方向の平均変位量 r ²⁾を算出した。図-1に示した位置エネルギーの変化量 E_p は試験前後の斜面形状の変化から計算した²⁾。また、図-4に示した1サイクル毎の E_{EQ} を合計し、 E_{EQ} を算定した。

図-5は斜面勾配約29度における異なる入力振動数 f でおこなったいくつかの試験結果に基づき平均変位量 r に対する震動エネルギー E_{EQ} の関係を図示している。変位 r と震動エネルギー E_{EQ} の間にも明確な正の相関関係が見られ、しかも、振動数にほとんどよらず図-5中の1本のカーブでほぼ近似できる。同図には異なる斜面勾配においての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 r と E_{EQ} との関係も示しているが同様な傾向が見られる。また、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。

一方、一般的に斜面安定解析で用いられる加速度によって同じ実験結果を整理してみよう。図-6には各試験での最大加速度 $(a)_{MAX}$ （1波目の値）と水平方向の平均変位量 r の関係を示している。最大加速度の決定は振動台切離し時の不安定性をさけるため、2波目以降の減衰曲線より1波目を外挿した。この結果、最大加速度 $(a)_{MAX}$ と平均変位 r の間には、正の相関関係は見られるが、振動数により大幅に異なることが分かる。また同図にも異なる斜面勾配においてのいくつかの試験結果を示しているが、どの勾配においても振動数により差異が見られる。

図-7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 E_p の関係を示している。図中の実線は E_{EQ} と E_p の間の直線近似を示している。この傾きは、斜面勾配が29°の場合は2.6、20°の場合は1.0、10°の場合0.3となり、斜面勾配の減少と共に低下している。これより斜面の勾配が大きい場合では、震動エネルギー E_{EQ} 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 E_p が当てられ、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 E_{EQ} が当てられると解釈できる。

4. 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 r の間には、振動数によらない一意的関係が成立することが示された。
- 2) それに対し最大加速度 $(a)_{MAX}$ と斜面変位 r の関係は、振動数によって異なる。ゆえに、従来の斜面安定解析で用いられている加速度より、エネルギーの方が斜面変形の評価に適していることが示された。
- 3) 斜面勾配が小さくなるほど、同じ 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。また、斜面勾配が大きいと斜面変形に使われるエネルギーは、主に位置エネルギー E_p が当てられ、逆に斜面勾配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。

[参考文献] 1) Newmark, "Effects of earthquakes on dams and embankments," Fifth Rankine Lecture, Geotechnique Vol.15, 139-159, 1965. 2) 國生剛治, 石澤友浩, 原田朋史: 地震時の斜面崩壊のエネルギー的評価方法, 土木学会地震工学論文集, Vol.27, 論文 No.346, pp. 1-8, 2003.

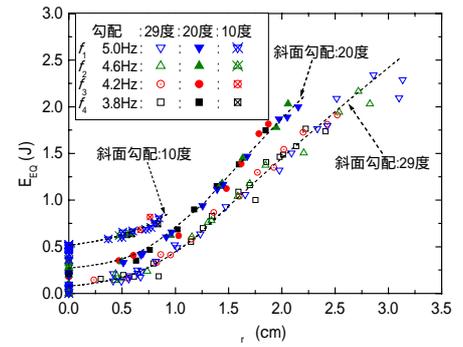


図-5 異なる入力振動数 f , 斜面勾配における震動エネルギーと水平方向の変位量の関係

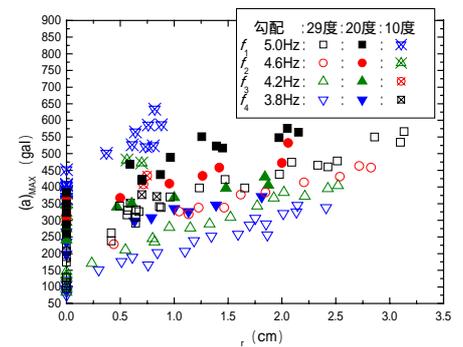


図-6 異なる入力振動数 f , 斜面勾配における最大加速度と水平方向の変位量の関係

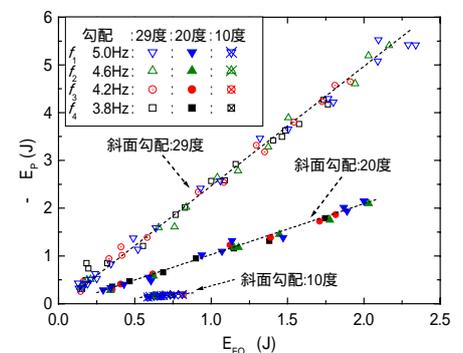


図-7 異なる入力振動数 f , 斜面勾配における震動エネルギーと位置エネルギーの関係