

エネルギー概念による地震時斜面流動量評価法の開発 ~振動数の違いによる斜面変形量と振動エネルギー への影響~

石澤 友浩1・國生 剛治2・西田 京助3

□中央大学理工学部助教(〒112-8551東京都文京区春日1-13-27)
E-mail:ishizawa@civil.chuo-u.ac.jp
²中央大学理工学部教授(〒112-8551東京都文京区春日1-13-27)
E-mail:kokusho@civil.chuo-u.ac.jp
³中央大学大学院理工学研究科(〒112-8551東京都文京区春日1-13-27)
E-mail:nishida@civil.chuo-u.ac.jp

従来,地震による斜面安定は,滑り土塊の力の釣り合いにより評価されてきた.これらの方法では,一 旦大規模な崩壊が起こった後の土塊の変形量や下流域への影響範囲を評価することは困難である. そこで,本研究では,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ために,振動 台を用いた模型実験をおこなった.この模型実験において,従来用いていた土槽よりも、質量の重い土槽 を用いることにより,振動数/を変化させることができた.これらの試験結果より,振動数の違いが与え るも斜面変形量お振動エネルギーの違いについて検討した.

Key Words : earthquake energy, shaking table test, slope deformation, rigid block model

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下流域への影響範囲をこれらの方法 で評価することは難しい.

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^{2,3,4)}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 している.地震により斜面崩壊が引き起こされる場合, 斜面崩壊に寄与する震動エネルギー E_{EQ} ,重力による位 置エネルギーの変化量 - δE_P (δE_P は通常は負であるため, 負号を付けている),斜面内部での消費エネルギー E_{DP} , 崩壊土塊の運動エネルギー E_K の4つのエネルギーが Fig. 1に示す等式で結ばれる.そこで,これらの斜面変形に 寄与するエネルギーを評価するために振動台を用いた模 型実験をおこなってきた.この模型実験において,従来



用いていた土槽よりも、質量の重い土槽^{5),6)}を用いるこ とにより,振動数 fを変化させることができた.これら の試験結果より,振動数の違いが与えるも斜面変形量お 振動エネルギーの違いについて検討した.

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((1700×400×500(mm)),約 82kg), 以後,大型土槽と呼ぶ.)を載せ,この土層内に模型 斜面(以後,試験体 A)に振動を加えた.模型斜面に は,質量 30kg の室乾状態の豊浦砂を用い,空中落 下法により,相対密度 *D*_r 40%,斜面の角度 *θ* 29° で作製した.この振動台実験では,初期に振動台を 水平方向に一定変位 *u*₀まで引張り,切離すことにより 模型斜面に自由減衰振動を与える.また,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.

模型斜面の変形量を計測するために,横断面の計 測用マーカーと表面のマーカーを 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-4 は大型土槽を用いた試験 体 A, B での減衰振動波形の比較を示している.両 試験体とも振動台の固有振動数 f 2.7Hz である. しかし,振動台の初期変位 u₀は 2.0cm,質量 30kg で 等しいにも関わらず,波数が増加するごとに減衰振 動の振幅の差異は大きくなることがわかる.この振 動台の減衰振動の振幅の差より,試験装置自身の減衰 の影響を差し引いた模型斜面の変形による損失エネルギ ーを定量化することができる.

また,同図に既往の研究^{2),3),4)}で用いた中型アクリ ル土槽((800×400×500(mm),約 33kg),以後,中型土 槽と呼ぶ.)による試験体 A,B での減衰振動波形の 比較を示している.新たに用いた大型土槽は,既往 の研究で用いてきた中型土槽の試験結果^{2),3),4)}と比較 すると,固有振動数が約 2.2Hz と約 2.7Hz で異なる ことがわかる.この振動台の固有振動数 f の違いは, 大型土槽と中型土槽の質量の違いによるものである.

結果の一例として,豊浦砂を用いた斜面勾配 θ 29°の 模型斜面における 1 波毎の損失エネルギー Δ Wと振動台 振幅の関係を図 5 に示す.試験体 A, Bの 1 波毎の損失 エネルギー ΔW_A , ΔW_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 波毎の振動エネルギーの増分 $\Delta E_{\rm EQ}$ を次 式で計算し,それらの値を図中にプロットしている.

 $\Delta E_{\rm EQ} = \Delta W_{\rm A} - \Delta W_{\rm B} \tag{1}$

このうち, ΔE_{EQ}は8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 波数までであり,また,この ΔE_{EQ}が小さくなるほど斜 面の変形量も小さくなることと整合している^{2,3)}.

図6は,豊浦砂における斜面角度 *θ* 29°の条件でお こなった幾つかの初期変位 *u*₀を変化させた試験結果よ り斜面表面の水平方向の平均変位量 *δ* と振動エネルギ



図 3 試験装置



図 4 試験体 A,B の減衰振動波形の比較



図 5 試験体 A,B の損失エネルギーの比較

 $-E_{EQ}$ の関係を図示している.ここで,斜面表面の水平 方向の平均変位量 δ_s は,試験前後の画像整理より, 図 2 に示す斜面表面の計測用マーカーの試験前後のマ ーカーの動きよりを算出し⁴⁾,斜面変形に寄与した振動 エネルギー E_{EQ} は,図5に示した1サイクル毎の ΔE_{EQ} を 合計し, E_{EQ} を算定した.図6より,両者の間には,明 瞭な相関関係が見られる.

また同図には,振動数 f 2.7Hz(中型土槽を用いた実験)による試験結果についても示しているが,振動数に ほとんどよらず1本のカーブでほぼ近似できる.以上の ことより,振動数 fに依存せず,地震による斜面の残留 変位量と斜面変形に使われるエネルギー E_{EQ} の間には密 接な関係があることが明らかになった.

一方,同じ実験結果に基き,変位量 δ_s と一般的に斜面安定解析で用いられる加速度との関係を整理した. 図7は,図6に示した試験結果を最大加速度 $(a)_{MAX}$ (1波目の値)と平均変位量 δ_s の関係を示している. $(a)_{MAX}$ の算定に当たっては,振動台切離し時の加速度測定値のばらつきの影響を避けるため,2波目以降の減衰曲線より1波目を外挿した.その結果,最大加速度 $(a)_{MAX}$ と平均変位量 δ_s の間には,図中の破線の近似カーブのように明瞭な相関関係は見られるが,振動数によりその関係は大幅に異なり,エネルギーのように普遍的な関係は得られない.

次に加速度とは異なり,地盤ひずみとの関連の深い 速度について同じデータを用いて整理した.図8は, 図6に示した試験結果を最大速度(V)_{MAX}(1波目の値) と平均変位量 δ_{s} の関係を示している.ここに示す最大 速度(V)_{MAX}は,単純に最大加速度(a)_{MAX}と振動数 fより 次式により行った.

$$(V)_{\rm MAX} = \frac{(a)_{\rm MAX}}{2\pi f} \tag{2}$$

同図より,速度と平均変位量 δ_sの間には図中の破線カ ープで近似できる相関関係が見られ,加速度よりも振動 数fによる違いが小さい.しかし,図 6 に示す振動エネ ルギーE_{EQ}と変位量 _sの関係と比較すると,やはり振動 数による影響が表れていることがわかる.

これらの結果より加速度,速度よりエネルギーによる 方が斜面変形の評価に適していることが明瞭に示された. 従来,地震による斜面安定は加速度を用いて評価されて きたが,加速度の値は必ずしも破壊に対して直結してい ないことは明らかである.また,地震波の速度値は,地 盤中の発生ひずみや波動エネルギーに直結しているため ^{5,00},地盤の破壊により密接に関連したパラメーターだと 考えられているが,それだけでは破壊が決定されないよ うである.本試験により,地震による斜面の残留変位量 と斜面変形に使われるエネルギーE_{EQ}の間には密接な一 意的な関係が見られ,地震時の斜面変形の評価にはエネ ルギーが適していることが明確に示された.

ここで,図6に示す近似曲線に着目すると,この近 似曲線は縦軸の原点よりわずかに上を出発点としている ことに気付く.これは,斜面の変形が生じ始める振動エ ネルギー*E*_{EQ}の閾値の存在を示唆しているものと思われ る.そこで,斜面の変形が生じ始める閾値について検討 してみた.

図 9(a)は図 6 に示した振動エネルギーと変位量 。の 関係より,原点近くの拡大した図を示している.同図に 示す斜線で示した範囲は,斜面の変形が生じ始める振動



図 6 振動エネルギー Ea と斜面表面の平均変位量 。の関係



図 7 最大加速度(*a*)_{MAX}と斜面表面の平均変位量 δ_{s} の関係



図 8 取入迷侵(V_{MAX}と料面衣面の平均安位重 0_sの関係

エネルギー E_{EQ} の閾値を示す.同図には,2つの異なる 入力振動数fにおける試験結果を示しているが,斜面変 形が生じ始める閾値は同様な値である.図9(b)は, 図6で示した実験結果の原点近くの拡大図を示してい る.同図にも,2つの異なる入力振動数fにおける試験 結果を示している.同図に示す斜線で示した斜面の変形 が生じ始める最大加速度 $(a)_{MAX}$ の閾値に着目すると,そ の閾値は振動数により大幅に異なることがわかり, 図9(a)に示したエネルギーのように一意的な関係は得 られない.これらのことより,斜面変形が生じ始める閾 値は,振動数によらず一意的に評価できることがわかる.

4 斜面変形に寄与する各エネルギー

ここで,斜面変形に寄与する各エネルギーについて 検討する.まず,位置エネルギーの変化量-*&*P,は,試 験前後にレーザー変位計で読み取った斜面形状の変化か ら次式により算出した.

$$\delta E_{\rm P} = \left(\rho_{\rm d} g B \int z dx dz \right) = M g \beta \delta_{rs} \tag{3}$$

ここに, x は水平座標, z は上向きにとった鉛直座標, g は重力加速度, B は斜面の奥行き幅, ρ_dは乾燥砂の密 度(一定と仮定)であり,式中の積分は斜面の断面積全 体について行っている

図 7 は,豊浦砂におけるいくつかの試験結果に基づき,横軸の振動エネルギー E_{EQ} と縦軸の位置エネルギー - δE_P の関係を示している.同図には,大型土槽と中型 土槽を用いておこなった試験結果を示している.同図よ り,振動数に関わらず斜面変形に寄与する振動エネルギ $-E_{EQ}$ と位置エネルギーの変化量 - δE_P の間には明瞭な比 例関係が見られる.また,図中の破線は両者の間の近似 直線を示している.

ここで,図1に示すエネルギーバランス式は,斜面 崩壊終了後に *E*_K=0であるため,次式となる.

$$E_{EO} + (-\delta E_P) = E_{DP} \tag{4}$$

近似直線の傾き - $\delta E_{\rm F}/E_{\rm EQ}$ は,式(4)を考慮すると, - $\delta E_{\rm F}/E_{\rm EQ}$ は崩壊土塊中での損失エネルギー $E_{\rm DP}$ に当てられるエネルギーの比率を示していることになる.斜面角度 θ 29°の場合では,この近似直線の傾き - $\delta E_{\rm F}/E_{\rm EQ}$ は約 2.6 であり,これは振動エネルギー $E_{\rm EQ}$ より約 2.6 倍の位置エネルギーが斜面変形に使われたことを意味しており,すなわち,実際には崩壊土塊中での損失エネルギー $E_{\rm DP}$ には主に位置エネルギーが当てられると解釈できる.

この斜面変形に寄与するエネルギー比率は単純な剛体 ブロックモデルによる理論式^{2/3)4)}では,斜面勾配 β =tan θ と摩擦係数 μ =tan から次式で表される.

$$\frac{-\delta E_{\rm p}}{E_{\rm EO}} = \frac{\beta (1 + \mu \beta)}{\mu - \beta} \tag{5}$$

図 6 に示す実験結果より得た近似直線の傾きと式(5) より,摩擦係数μの逆算値を求め,その結果を示した. この逆算結果を平均するとμ=0.858=tcm(40.6°)が得られる. すなわち, =40.6°をとることにより,振動台実験の 実験結果が振動数にかかわらず説明できることになる.

ここで,単純な剛体ブロックモデルにおいて,振動エ ネルギー E_{EQ} を崩壊土塊 M_g で正規化すると,斜面勾配 β =tan θ ,摩擦係数 μ =tan ,斜面水平方向の変位量 $_{ES}$ を



図 9 斜面変形が生じ始める振動エネルギー*E*_{EQ}, 最大加速度(*a*)_{MAX}の閾値の範囲



図 40 振動エネルギー*E*_{EQ}と位置エネルギー - *δE*_Pの関係



図 -11 E_{EO} Mg と斜面表面の平均変位量 δ_{s} の関係

用いてら次式の形で表される^{2),3),4)}.

$$\frac{E_{\rm EQ}}{Mg} = \frac{(\mu - \beta)}{(1 + \mu\beta)} \delta_{\rm rs} \tag{6}$$

図 41 は振動数 f を変化させたすべての実験結果を $E_{\rm E}/Mg$ と水平方向の変位量 $_{\rm rs}$ のグラフ上にプロットし ている.ここで,崩壊土塊の質量 M は式(3)を用い,位 置エネルギーの変化量 $-\delta E_{\rm P}$ の計測値と水平変位量 $\delta_{\rm s}$ よ り算出した.水平方向の変位量 $\delta_{\rm s}$ と $E_{\rm EQ}/Mg$ の間には振 動数 fの違いに関わらず,ほぼ比例的な関係が見られる. また図中に示す実線は,逆算値 µ=0.858 を用いて式(6)で 計算した結果である.この逆算した摩擦係数を用いるこ とにより,剛体ブロックモデルによって,実際は破壊メ カニズムがかなり異なる砂斜面の変位量が振動数に関わ らず非常に精度よく算定できることがわかる.

以上のことより,斜面変形に寄与するエネルギーに 着目することにより,等価な摩擦係数を適切に推定する ことができれば,実際の斜面崩壊を単純な剛体ブロック モデルにより評価できる可能性が見られた.今後,以上 に述べた模型実験と剛体ブロックモデルの理論的考察に 基づいて,エネルギー法による斜面の地震時変形量の評 価方法を検討し^{2,3,4}これらの因子の影響を明らにするた めに,さらに,模型実験や既往の斜面崩壊事例^{5,6}をも とに検討する必要性がある.

5 まとめ

振動数を変化させた乾燥砂を用いた振動台実験の試験 結果より以下の知見を得た.

- 斜面の変形に寄与する振動エネルギーE_{EQ}と水平方 向の斜面表面の平均変位量 δ_sの間には,密接な関 係が見られた.
- 2) エネルギーに着目することにより,斜面の変形が生 じる限界の振動エネルギー*E*_{EQ}の閾値を一意的に評 価することができる.
- 3) 最大加速度(a)_{MAX}, 最大速度(V)_{MAX} と斜面変位 δ_sの間 の関係には,振動数によって差異が見られるのに対し, 斜面変形に寄与する振動エネルギーE_{EQ}と斜面変位量 δ_sの関係は,振動数に依存せず一意的に決まる.ゆえ に,従来の斜面安定解析で用いられている加速度に代 わり,エネルギーを用いることにより斜面変形や変形 が生じ始める閾値を評価できる可能性が見られた.
- 4) 乾燥砂を用いた試験結果より,振動エネルギー E_{EQ} と 位置エネルギー - δE_P の間や斜面の残留変位量と振動

エネルギーをブロック重量で基準化した値(*E_{EQ}/Mg*)の 関係は,摩擦係数を逆算することにより単純な剛体ブ ロックモデルで実験結果を説明できることがわかった.

5) 以上より,崩壊土塊の適切な摩擦係数を推定すること により,実際の斜面崩壊を単純な剛体ブロックモデル により評価できる可能性が見られた.さらに模型実験 や既往の斜面崩壊事例の調査などをおこない,摩擦係 数のとり得る値を明らかにすることにより,エネルギ ー法の実物斜面への適用性を高めていく予定である.

謝辞:本研究の一部は,文部科学省科学技術振興調整費 による委託研究開発(活褶曲地帯における地震被害デー タアーカイブスの構築と社会基盤施設の防災対策への活 用法の提案,研究代表者:小長井一男)の一環として実 施した.末筆ながら各位に感謝の意を表します.

参考文献

- Newmark, N. M.: Effects of earthquakes on dams and embankments, Fifth Rankine Lecture, Geotechnique Vol. 15, pp.139-159, 1965.
- 2) 國生剛治,石澤友浩,原田朋史:地震時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.346,2003.
- Kokusho, T. and Ishizawa, T.: Energy approach for earthquake induced slope failure evaluation, Soil Dynamics and Earthquake Engineering 26, 221-230, 2006.
- 4) 石澤友浩,國生剛治:エネルギー法による地震時斜面変形量 評価法の開発,土木学会論文報告集,C, Vol.62, No.4, 2006.
- 5) 土木学会:活褶曲地帯における地震被害データアーカイブスの構築と社会基盤施設の防災対策への活用法の提案 17 年度報告書
- 6) 土木学会:活褶曲地帯における地震被害データアーカイブスの構築と社会基盤施設の防災対策への活用法の提案 18 年度報告書

(2007.06.29受付)

DEVELOPMENT OF ENERGY APPROACH FOR EARTHQUAKE-INDUCED SLOPE DISPLACEMENT

-Influence of input frequency on slope displacement versus earthquake energy relationship -

Takaji KOKUSHO, Tomohiro ISHIZAWA and Kyosuke NISHIDA

Earthquake-induced slope stability has been evaluated by force-equilibrium of soil mass. But this method can't evaluate how large the deformation will develop and how far the effect reaches down-slope. The present study aims the development of evaluation method for residual displacement of slope during earthquakes by energy approach. We conducted an innovative model test on a shake table, in which energy balance in sliding slopes is measured. From these experimental results, a correlation between slope displacement and earthquake energy was obtained for variable input frequency indicating that the displacement can be uniquely correlated to the input energy the difference in input frequency.