

地震時斜面崩壊のエネルギー的評価方法

國生剛治¹・石澤友浩²・原田朋史²

¹中央大学理工学部土木工学科教授 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

E-mail : kokusho@civil.chuo-u.ac.jp

²中央大学大学院理工学研究科土木工学専攻 博士前期課程 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

地震時の斜面安定は、静的震度を考慮した滑り面法や加速度時刻歴を用いた Newmark 法により評価されてきたが、これらの方法は破壊後の大きな変形量や下流への影響範囲の評価には無力である。そこで、本研究では地震時の斜面崩壊に関わるエネルギーに着目したエネルギー的評価方法の開発を目指し、まず斜面上を滑動する剛体ブロックモデルに関わるエネルギーの分析を行った。さらに、新たに工夫した振動台実験により乾燥砂模型斜面の滑り破壊に関わるエネルギーを定量的に計測し、剛体ブロックモデルとの対比を行った。これらの結果に基づき、エネルギー的斜面変形量評価法の可能性を明らかにし、その骨子を提案した。

Keywords : earthquake energy, energy dissipation, shaking table test, slope deformation

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。これらの方法では、崩壊の有無を判断するための滑り安全率を求めたり、Newmark 法によって滑り土塊のすべり面に沿った変位量を計算したりしている。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のような方法で評価することは困難である。

ここに提案するエネルギー的アプローチでは、斜面崩壊のために使われる震動エネルギーと位置エネルギーを共に考慮することにより、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。

本論文では、まずはじめに Newmark¹⁾ が想定した滑り平面上を滑動する剛体ブロックのエネルギーバランスを検討する。次に、新たに開発した振動台を用いた模型実験手法により、斜面崩壊により使われる震動エネルギーを計測し、模型斜面でのエネルギーバランスを定量化する。さらに、模型実験と剛体ブロックモデルのエネルギーバランスの比較検討に基づき、エネルギー的アプローチによる斜面変形量評価法の可能性を明らかにし、その骨子を提案する。

2. エネルギー的アプローチ

斜面崩壊がおよぼす影響を考慮するためには、単に滑り安全率だけでなく、どのくらい大きな変形に発展するのか、またその結果どのくらい下流域に影響を与えるのかを評価することが重要である。Newmark 法¹⁾では、潜在的に滑る剛体土塊に加わる地震加速度の2重積分に基づき、仮定したすべり面に沿って斜面変位を計算することができる。この方法にはさらに種々の改良が施され、ダムおよび重要な構造物の斜面安定解析にしばしば使用されている。しかし、単一滑り面上の剛体滑りが前提とされ、間隙水圧上昇などによる斜面地盤の強度低下の効果なども十分評価されないことなど、いくつかの問題点が挙げられる。実際の大規模斜面崩壊では、滑り土塊は剛体とは異なる大きなせん断変形を示し、明瞭な滑り面なしに変形するケースが多い。さらに、土の強度が崩壊開始後に極端に減少する場合には、剛体的滑りから流動破壊に変わり、より破壊的になる傾向が見られる。

このような斜面崩壊の重要性を考慮し、この研究では流動的破壊を含む斜面崩壊を評価可能なエネルギー的アプローチの確立を目指している。そこで用いるエネルギーバランスの考え方は図-1に示す通りである²⁾。

一般的に、斜面崩壊はさまざまな異なる原因(地震、激しい降雨、人工盛土や切土など)によって引き起こさ

れる．これらの原因は斜面滑動力を増加させたり，土の強度を弱めたりする．地震により引き起こされる斜面崩壊の場合，4つのエネルギー（重力による位置エネルギー E_p ，崩壊土塊の運動エネルギー E_k ，斜面崩壊に寄与する震動エネルギー E_{EQ} ，斜面崩壊による土内部の消費エネルギー E_{DP} ）が関与するが，それらは，次の方程式によって相互に関連づけられる．

$$E_{DP} + E_k = E_{EQ} - \delta E_p \quad (1)$$

または，増分形で表すと，次式になる．

$$\Delta E_{DP} + \Delta E_k = \Delta E_{EQ} - \Delta \delta E_p \quad (1')$$

位置エネルギー E_p については崩壊の前と後の位置エネルギーの変化量が通常，負であるために負号を付けている．過去の事例でしばしば見られた地震が終わったあとの斜面崩壊の場合には，このエネルギー・バランスは震動エネルギーが関係しない降雨や他の原因による斜面崩壊と同一になる．

$$\Delta E_{DP} + \Delta E_k = -\Delta \delta E_p \quad (2)$$

この場合には， $-\delta E_p$ が式(2)で E_{DP} より大きければ， $E_k > 0$ であり，崩壊が始まる．すなわち崩壊の開始のための条件は

$$\Delta E_k = -\Delta \delta E_p - \Delta E_{DP} > 0, \quad -\Delta \delta E_p > \Delta E_{DP} \quad (3)$$

である．土塊中で消費されるエネルギー E_{DP} の大きさは，いったん崩壊が始まった後，それが流動タイプの崩壊に発展するかどれくらいの距離を流動するかを決定する重要な因子となる． E_{DP} が $-\delta E_p$ より小さい場合， E_k は増加し，土の移動は加速される．すなわち，遅い斜面滑りから早い流動崩壊への変化は $-\delta E_p$ の増加によるだけでなく，崩壊土中の間隙水圧の増加や，鋭敏比の高い粘土での強度消失などによる E_{DP} の減少によっても起きると考えられる． $-\delta E_p$ が E_{DP} より小さい場合， E_k は負になり，崩壊土の速度は低下し，現有の運動エネルギー E_k が全て消費された時点で停止する．このようなエネルギー・バランスの考え方をを用いることにより，流動する土塊の崩壊モードとエネルギー消費メカニズムが与えられれば，流動や変形の大きさや，下流方向への影響を評価することができる．

3. 斜面上剛体ブロックのエネルギー的評価

Newmark 法¹⁾あるいはその改良法は，土構造物の地震により引き起こされる変位を評価するために実務で一般的に用いられている．この方法は，原論文では水平面上のブロックを対象としているが，いくつかの修正が加え

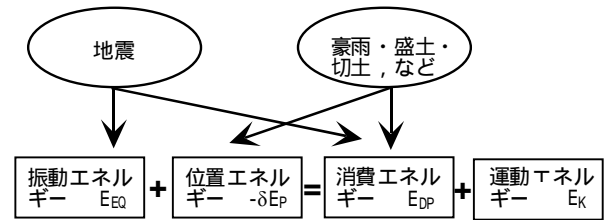


図-1 斜面の流動崩壊のエネルギー・バランス

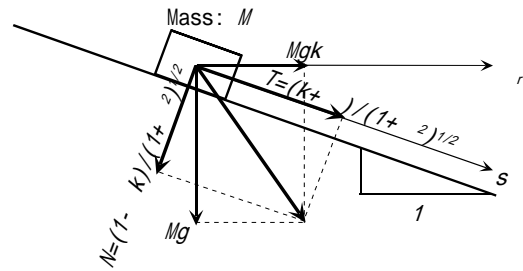


図-2 地震の影響を受ける斜面上のブロックモデル

られ，斜面・曲がった平面上の剛体ブロックの滑り³⁾，さらにはFEMモデルにも適用されている⁴⁾．水平震度 k の下で，斜面上に重量 M のブロックの滑りを考える．ブロックの滑り面に沿っての変位を s ，水平方向変位を r とする．この滑り面の勾配を $1 : \beta$ とすると，

$$\delta_r / s = 1 / (1 + \beta^2)^{1/2} \quad (4)$$

と表され，このブロック重量の垂直，接線成分を図-2に示すように N, T とすると，

$$N = (1 - \beta k) Mg / (1 + \beta^2)^{1/2} \quad (5)$$

$$T = (\beta + k) Mg / (1 + \beta^2)^{1/2} \quad (6)$$

斜面に沿っての力の釣り合い式では

$$-M \frac{d^2 s}{dt^2} - Mg \mu \frac{1 - \beta k}{(1 + \beta^2)^{1/2}} + Mg \frac{\beta + k}{(1 + \beta^2)^{1/2}} = 0 \quad (7)$$

$\mu = \tan \phi$ は斜面とブロックの間の摩擦係数である．一定の水平震度 k が時間 $t = 0 \sim T$ のあいだ持続し，ブロックの初速度が0の場合，ブロックの相対速度と相対変位の時間に対する変化は図-3のようになる．また $t = T$ のときの相対速度と相対変位は次式で表される．

$$v_T = \left. \frac{ds}{dt} \right|_{t=T} = \frac{(1 + \mu \beta)}{(1 + \beta^2)^{1/2}} (k - k_{cr}) g T \quad (8)$$

$$s_T = \frac{(1 + \mu \beta)}{2(1 + \beta^2)^{1/2}} (k - k_{cr}) g T^2 \quad (9)$$

ここで

$$k_{cr} = \frac{\mu - \beta}{1 + \mu\beta} \quad (10)$$

は限界震度で、 $k > k_{cr}$ のとき滑りがおこる。最終的なブロックの変位 s_0 は

$$s_0 = \frac{k}{k_{cr}} s_T \quad (11)$$

となり、それまでの経過時間は、

$$t_0 = \frac{1 + \mu\beta}{\mu - \beta} kT \quad (12)$$

である。

一方、エネルギー的にみると、斜面に沿ってブロックの滑り変位が s_0 のとき、位置エネルギーの変化量 E_p は、

$$\delta E_p = -Mg\beta\delta r = -\frac{\beta}{(1 + \beta^2)^{1/2}} Mgs_0 \quad (13)$$

となる。この間のエネルギー消費 E_{DP} はブロック底面で生じ、次式で表される。

$$\begin{aligned} E_{DP} &= \frac{\mu(1 - \beta k)}{(1 + \beta^2)^{1/2}} Mgs_T + \frac{\mu}{(1 + \beta^2)^{1/2}} Mg(s_0 - s_T) \\ &= \frac{\mu(1 + \beta^2)^{1/2}}{1 + \mu\beta} Mgs_0 \end{aligned} \quad (14)$$

斜面崩壊の開始前と終了後のエネルギーを考えると、運動エネルギー E_K は 0 となるため、式-1より、ブロック滑りに寄与する震動エネルギーは

$$E_{EQ} = E_{DP} + \delta E_p = \frac{(\mu - \beta)}{(1 + \mu\beta)(1 + \beta^2)^{1/2}} Mgs_0 \quad (15)$$

で求められる。また、 E_{EQ} と E_{DP} 、 E_{EQ} と E_p の比は次式で表される。

$$\frac{E_{EQ}}{E_{DP}} = \frac{(\mu - \beta)}{\mu(1 + \beta^2)} \quad (16)$$

$$\frac{E_{EQ}}{-\delta E_p} = \frac{(\mu - \beta)}{\beta(1 + \mu\beta)} \quad (17)$$

図4には、式(16)、(17)によって計算した E_{EQ} / E_{DP} および $E_{EQ} / -\delta E_p$ と斜面勾配 の関係を示している。意外なことに、震動エネルギーの斜面崩壊への寄与率は地震係数 k には全く無関係であり、斜面勾配 および摩擦係数 μ のみに依存していることになる。さらに震動エネルギー E_{EQ} の斜面崩壊への寄与の割合は、斜面勾配が大きくなり摩擦係数が小さくなるほど E_p に対して相対的に小さくなるとの結果が剛体ブロックモデルから導かれる。

滑り平面上のブロックモデルは斜面崩壊メカニズムの本質の多くを捉えていると考えられるが、言うまでもなく実際の斜面崩壊を正確に再現できてはいないと言えよう。最も著しい違いの1つは、実際の斜面崩壊では滑り変位量が大きくなるほど土塊が剛体ではなくせん断的に

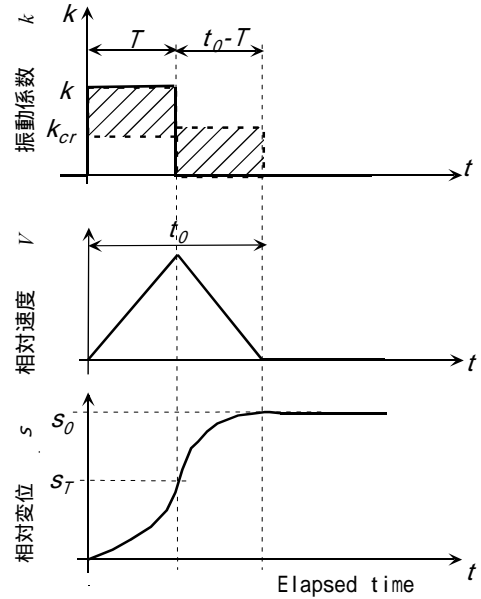


図-3 ブロックの振動係数と相対速度と相対変位の時間依存性の変化

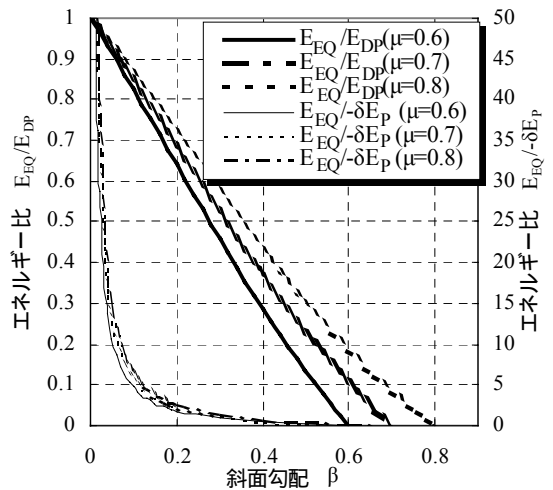


図-4 エネルギー比 E_{EQ} / E_{DP} 、 $E_{EQ} / -\delta E_p$ と斜面勾配の関係

変形し流動性を増す傾向となる点である。さらに、固定された明瞭な滑り面にあって滑るのではなく、滑り面なしで連続的にせん断変形したり、滑り面が時々刻々変化することも考えられる。さらに、崩壊開始後に間隙水圧の上昇やその他のメカニズムで摩擦係数 μ が減少する場合もその影響を適切に評価することが難しい。

そこで、次に上記の剛体ブロックモデルより実現象に近い砂斜面の模型振動実験を行い、その崩壊メカニズムについてのエネルギー的分析を試みた。

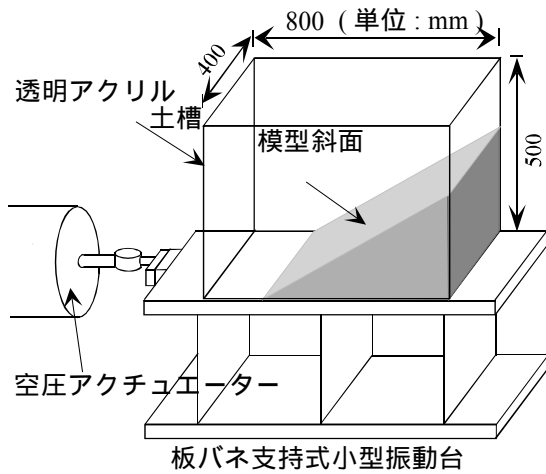


図-5 試験装置

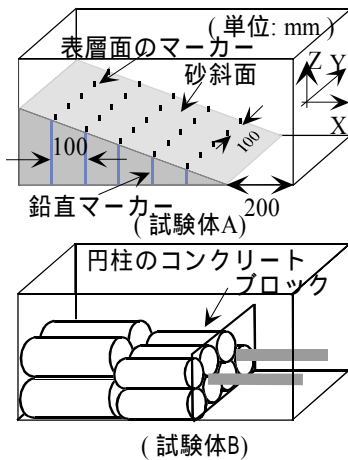


図-6 試験体 A と試験体 B

4. 振動台による模型実験

図-5 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、その中に砂を用いて作った模型斜面（以後、『試験体 A』と呼ぶ）に振動を加えた。模型斜面（底面長さ； $L=60\text{cm}$ 、高さ； $H=33\text{cm}$ 、奥行； $B=40\text{cm}$ ）は、室乾状態の豊浦砂を用い、空中落下法により相対密度 $D_r \approx 40\%$ で作製した。斜面勾配は約 29 度である。この模型斜面の摩擦係数 μ をあらかじめ把握しておくために、この斜面を静的に毎秒 0.01 度の割合で傾けた。同じ 29 度の勾配の斜面について 3 回行った試験の結果、斜面の安息角として 34.8 ~ 36.0（平均 35.3）度、 $\mu=0.71$ が求められた。

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ことができる。減衰振動の振幅から一波ごとに減衰定数が計算できるが、この減衰メカニズムには斜面変形によるエネルギー損失だけでなく、振動台の基礎への波動逸散など他のエネルギー損失も含まれている。そこで斜面変形による減衰だけを挿出するために、図-6 に

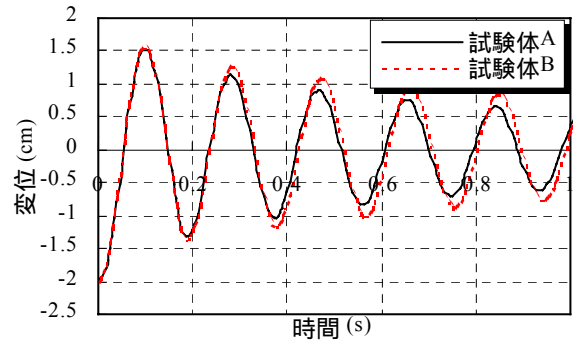


図-7 試験体 A,B の LVDT 変位ゲージにより測定された減衰振動

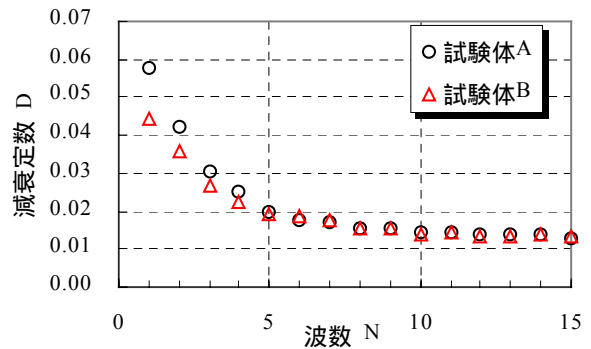


図-8 試験体 A, B の減衰定数 D と波数 N の関係

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』と呼ぶ）を同じ土槽中に設置して試験を行った。なお、2 つの試験体の重量および重心はほぼ一致するように調節した。

図-7 では試験体 A, B について、LVDT 変位計により測定された振動台の減衰振動波形を重ね書きしている。台の初期変位 2.0cm、重量 60kg はほぼ等しいにも関わらず、波数が増すごとに減衰振動の振幅の違いが大きくなることに気付く。試験体 B のコンクリートブロック内部で失われるエネルギーが無視できると考えられるため、この違いは、試験体 A の砂斜面の変形により使われたエネルギーを反映している。つまりこの差により、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。

結果の一例として、図-8 では減衰定数 D と波数 N との関係を試験体 A および B の減衰振動から次式により計算し示している。

$$D = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{u_i}{u_{i+1}} \quad (18)$$

ここに、 u_i と u_{i+1} は、減衰振動での i 波目と $i+1$ 波目の変位振幅を示している。これより、試験体 A, B の差は明瞭に見られる。減衰定数 D より 1 波毎の損失エネルギー W は以下のように計算できる。

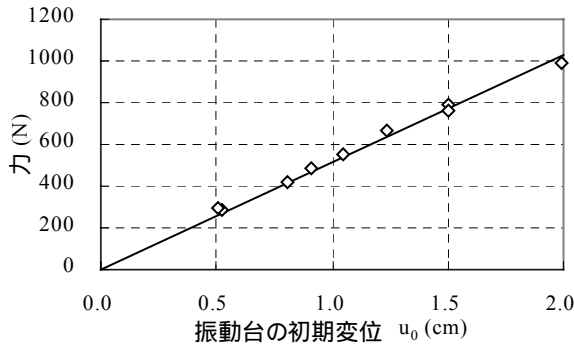


図-9 静的に引張った力と振動台と変位の関係

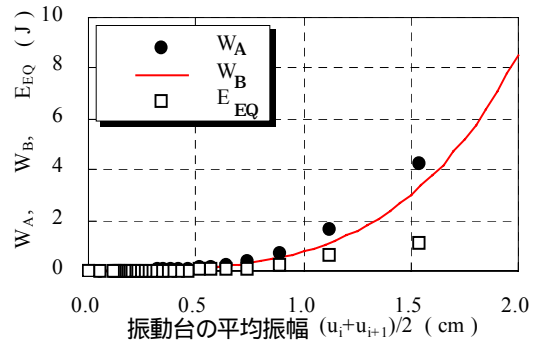


図-11 試験体 A, B の損失エネルギー比較

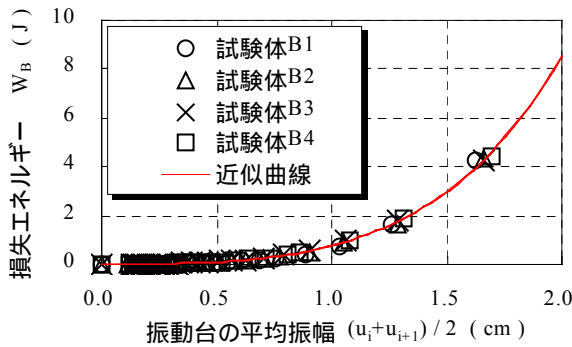


図-10 試験体 B の損失エネルギーと振動台の平均振幅 $(u_i+u_{i+1})/2$ の関係

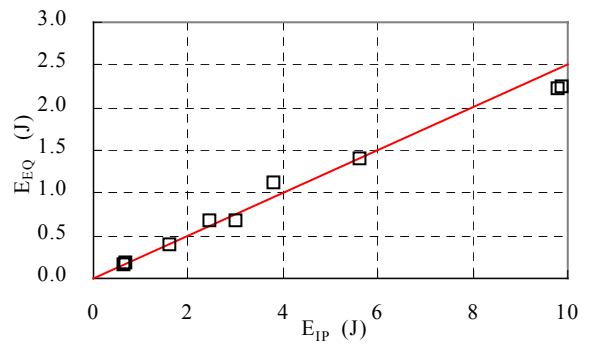


図-12 斜面変形に使われた震動エネルギー E_{EQ} と全震動エネルギー E_{IP} の関係

$$\Delta W = 4\pi W D \quad (19)$$

同じ波数においてのひずみエネルギーを表す W は、バネ定数 κ と振動台の変位振幅より以下のように算出できる。

$$W = \frac{1}{2} \kappa \left(\frac{u_i + u_{i+1}}{2} \right)^2 \quad (20)$$

図-9 は、振動台を初期に静的に引張った時の力と変位の関係を示している。これより、バネ定数 κ はほぼ一定値で近似できることが分かる。

試験体 A および B の損失エネルギーの一波ごとの増分を W_A 、 W_B とすると、模型斜面の変形で消費された震動エネルギーの増分 E_{EQ} は両者の差として得られる。

$$\Delta E_{EQ} = \Delta W_A - \Delta W_B \quad (21)$$

図-10 には、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 の損失エネルギーと振動台の平均振幅 $(u_i + u_{i+1})/2$ の関係を示している。図中に近似曲線を示すが、データのバラツキが少なく再現性の良い結果が得られていることがわかる。図-11 は、一例として試験体 A の試験結果より得られた損失エネルギー W_A と、図-10 で示した W_B の近似曲線との比較であり、式(21)により 1 波毎に計算した E_{EQ} も示されている。

E_{EQ} は 6 波目以降はほぼ 0 に収束しているが、これは模型斜面の変形がビデオによる観察では試験開始から 5 波

目までに限られていたことと整合している。

さて、模型斜面に変位が見られる波数までの E_{EQ} を合計することにより斜面滑りに使われた全震動エネルギー E_{EQ} が計算できる。一方、振動台に与えた全入力エネルギー E_{IP} は、以下の式を用い、振動台の最初の引張変位 u_0 から計算することができる。

$$E_{IP} = \frac{1}{2} \kappa u_0^2 \quad (22)$$

図-12 は E_{EQ} と E_{IP} の関係を示している。 E_{EQ}/E_{IP} の比率は、 E_{IP} が増加するとともにわずかに減少する傾向があるが、 $E_{EQ}/E_{IP} = 0.25$ の直線でほぼ近似できる。すなわち、斜面崩壊に使われる震動エネルギーと振動台に与えた全入力エネルギーの比率は、入力の大きさや斜面崩壊規模の大小によらず、ほとんど一定であることを示している。

5. 斜面変形

模型斜面の変形はアクリル土槽の横と上から 2 つのビデオカメラで観察した。斜面の断面計測用のマーカーとして、図-6 のように細かい粒径のビーズを 10cm 間隔で柱状に並べた。斜面表面の計測用マーカーとしては、長さ 5cm、0.8mm の乾麺を表面から鉛直に 2.5cm の深さま

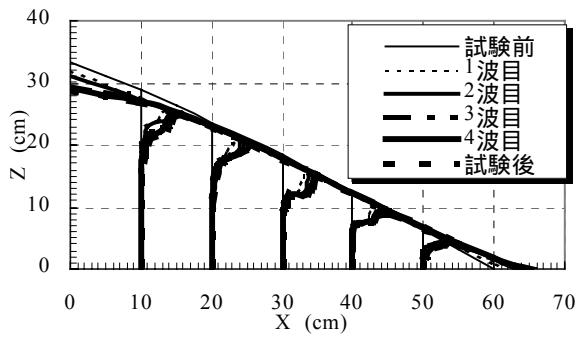


図-13(a) 横断面のマーカの動き

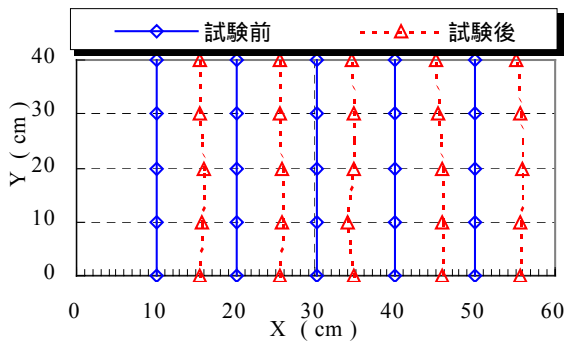


図-13(b) 斜面表層のマーカの動き

で 10cm 間隔で挿入した。また、試験前後にレーザー変位計を用いて斜面の変形を測定した。

図-13(a)は 5 波目までの断面の鉛直マーカの動きを示している。斜面の中間部分では滑り面らしきものが見えるが、斜面の上方や下方ではほぼ連続的に変形していることがわかる。同図にビデオ画像とレーザー変位計により測定した斜面表面形状の 1 波毎の変化も示した。図-13(b)は、模型の上方からとらえた試験前後の斜面表面のマーカの動きを示しているが、奥行き方向にほぼ様な変位が見られることが分かる。これらの測定値に基づき、斜面の残留変位とエネルギーとを関連づけるために、まず各鉛直マーカでの水平方向の残留変位の平均値を求めた。つまり、図-14 に示すように鉛直マーカの変形が見られる最も深い点より上部の水平変位量を各マーカについて平均する。奥行き方向には、図-13(b)を根拠に、観察断面と同様な変形が見られると仮定する。各マーカごとにこのように算出した平均水平変位量をさらに全鉛直マーカについて平均した値を水平方向の残留変位 δr とした。この計算は、残留変位の増加量 δr を得るために各サイクル毎に行なった。

図-15 は、 δr と波数 N の関係を示したものである。また、振動エネルギーの波数 N に対する変化量 E_{EQ} と位置エネルギーの変化量 δE_P も同図に示した。ここで δE_P は各サイクルでの斜面形状の変化から次式により算出した。

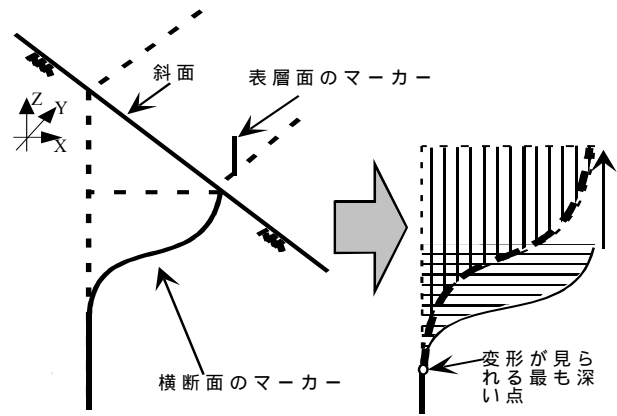


図-14 斜面の水平方向の平均残留変位 δr の評価

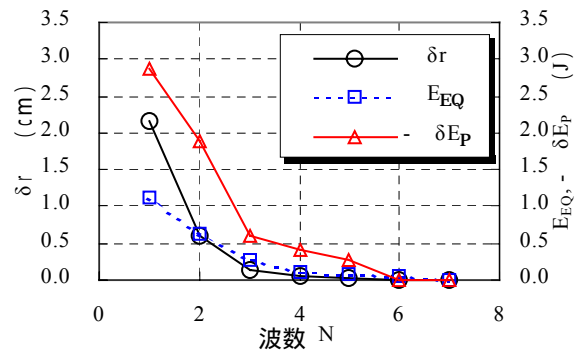


図-15 1 波毎の δr と震動エネルギーの変化量 E_{EQ} と位置エネルギーの変化量 δE_P の関係

$$\Delta \delta E_P = \Delta \left(\rho_d g B \int z dx dz \right) \quad (23)$$

ここに、 z は鉛直座標、 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-15 から、斜面の残留変形が 5 波目までで終息しており、震動エネルギーや位置エネルギーの変化傾向とほぼ整合していることがここでも確認できる。

6. 斜面変形量とエネルギー評価

この試験では、土塊の滑り速度はそれほど大きくないことがビデオ画像から判断できるため、式(1')の運動エネルギー E_K を無視すると、次式が成り立つ。

$$\Delta E_{DP} = \Delta E_{EQ} - \Delta \delta E_P \quad (24)$$

図-16 は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各サイクルにおける斜面残留変位増分 δr と式(24)によって評価した E_{DP} との関係を示したものである。いずれの場合も線形ではなく上に凸の関係が見られ、今回用いた模型材料について δr が大きくなるほど $E_{DP} / \delta r$ の勾配が小さくなるような何らかのメカニズムの存在を示唆していると思われる。

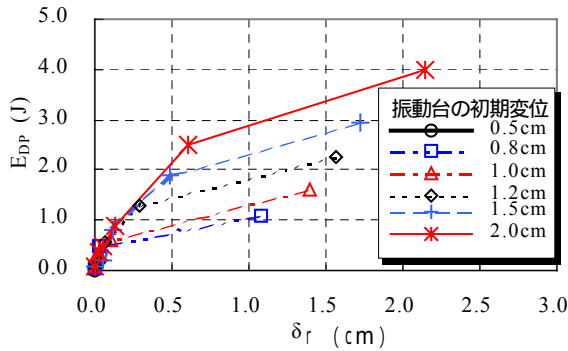


図-16 1波毎の異なる初期変位の平均残留変位 r と消費エネルギー E_{DP} の関係

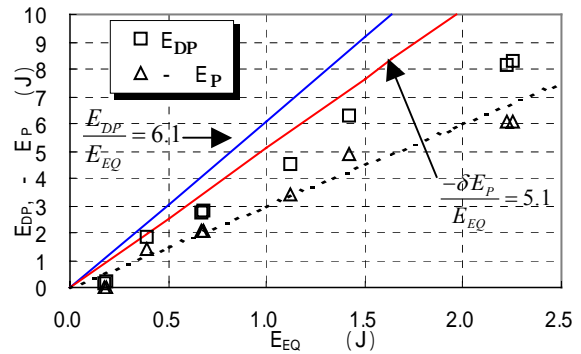


図-17 1波毎の異なる初期変位の震動エネルギー E_{EQ} と E_{DP} , E_P の関係

1サイクル毎の E_{EQ} , E_P , E_{DP} を5波目まで合計し, E_{EQ} , E_P , E_{DP} を算定した. 図-17はいくつかの初期変位の異なる試験結果に基づき, 横軸の E_{EQ} と縦軸の E_{DP} , E_P の関係を示している. 図中の点線は E_{EQ} と E_P の間の直線近似を示しているが, その勾配は約3であり, 位置エネルギー E_P が震動エネルギー E_{EQ} より約3倍も斜面崩壊に寄与していることが分かる. これは以下に述べるように模型斜面の勾配がかなり大きいので, このような条件では, 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解釈される.

ここで, 模型斜面について得られた E_{DP}/E_{EQ} と E_P/E_{DP} の実験値を式(16), (17)で計算される剛体ブロックモデルの理論値と対比してみよう. 模型では斜面勾配が 29° ($\beta=0.55$), 安息角が 35° ($\mu=0.70$) であるので, $E_{DP}/E_{EQ} = 6.1$, $E_P/E_{DP} = 5.1$ となり, これらの関係を図-17に二本の実線の直線で示す. これより剛体モデルと砂斜面との間には明白な違いがあることが分かる. しかし, 実験値についても勾配は緩いものの, 直線関係である程度近似できる. すなわち, 震動の大きさに関わらず E_{EQ} に対して E_P と E_{EQ} がほぼ比例的に増加する傾向がうかがえ, 式(16), (17)で示される剛体ブロックモデルの特性もある程度保持しているものと思われる.

図-18では, 初期変位の異なるいくつかの試験結果によって得られた消費エネルギー E_{DP} と残留変位 r の関係を示している. 剛体ブロックモデルによれば, 消費するエネルギーは式(14)から分かるようにブロックの残留変位に比例する. 図-18に示す実験結果でも両者の間に明らかな正の相関が認められるが, わずかに下に凸な非線形関係である. この不一致には単純化したブロックモデルと連続的な砂斜面の間の崩壊メカニズムの違いが反映していると考えられる. また, この曲線は原点ではなくそのわずかに上を出発点としており, 斜面の残留変形が生じ始める E_{DP} の閾値の存在を示唆している.

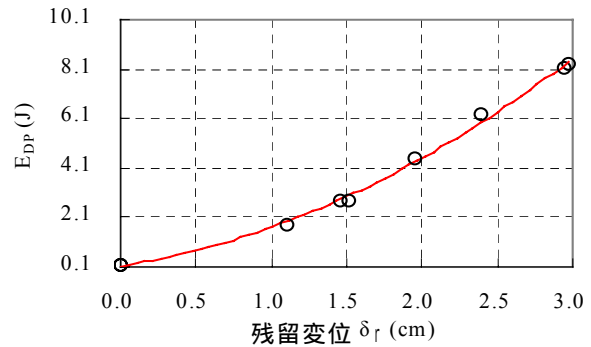


図-18 異なる初期変位の残留変位 r と消費エネルギー E_{DP} の関係

7. エネルギー的な斜面崩壊評価法の骨子

以上に述べた剛体ブロックモデルの理論的考察および模型斜面の振動実験に基づいて, 地震時の斜面崩壊を評価するための枠組みは以下のように組み立てられる.

まず最初に, 斜面あるいは盛土の基礎地盤でサイト固有の入力震動エネルギー E_{IP} を定義する. 次に, 基礎へ逸散するエネルギー比を仮定することによって, E_{IP} のうち斜面あるいは盛土の内部で消費される震動エネルギー E_{EQ} を決めることができる. 厳密に言えば E_{EQ} にはここで注目している斜面崩壊によって消費されるエネルギー以外に, 斜面を構成する地盤材料の内部減衰に起因した損失エネルギーが含まれている. 後者についてはここまでの議論では無視してきたが, それが前者に比較して無視し得ない大きさであれば斜面の FEM 解析などにより比較的容易に評価できる. したがって, 斜面の滑り変形に使われる震動エネルギー E_{EQ}^* の算定が可能となる.

Newmark タイプの単純なモデルによれば, 水平方向の残留変位は式(15)により, 以下のように表される.

$$\delta_r = \frac{s_0}{(1+\beta^2)^{1/2}} = \frac{(1+\mu\beta) E_{EQ}^*}{(\mu-\beta) Mg} \quad (25)$$

上式中に現れる土塊の質量 M または滑り層厚は従来の

滑り面解析の最小安全率滑り面や無限長斜面理論によって算定できる。

より現実的な破壊モードを考慮に入れるためには、式(25)の係数 $(1 + \mu - \mu)$ を、模型試験の結果あるいは既往の事例調査に従って修正する必要がある。とくに、地震動による斜面崩壊や地すべりによる被害では、土の強度が間隙水圧上昇などにより大きく減少したと考えられるため、式(25)に示す μ の設定においてこのような影響を取り込むことが重要である。

以上が、エネルギーアプローチによる斜面変形評価法の骨子である。今後、さらに多くの模型実験や実際の斜面破壊事例との対比などを通じて、評価法の精緻化を図る予定である。

8. 結論

地震時斜面崩壊のエネルギー的評価法の開発を目指して斜面上の剛体ブロックモデルのエネルギー分析と乾燥砂模型斜面の振動台実験を行い、以下の知見を得た。

- 1) 剛体ブロックモデルによれば、斜面崩壊により使われた震動エネルギー E_{EQ} と位置エネルギー E_p の比、および E_{EQ} と斜面内部で消費されたエネルギー E_{DP} の比は震度 k に依存せず、斜面勾配 や摩擦係数 μ のみに依存している。また、 k が大きくなり μ が小さくなるほど、 E_{EQ} の寄与は小さくなる。
- 2) 本研究で開発した模型実験手法により、斜面崩壊のために使用された震動エネルギー E_{EQ} を測定することができ、斜面崩壊に関わるエネルギーの定量化が可能となった。
- 3) 今回の実験では、用いた砂の安息角約 35° に近い 29° の大きな斜面勾配でおこなったために、斜面崩壊における位置エネルギーの貢献が震動エネルギーよりもかなり大きくなったことが剛体ブロックモデルとの

対比により明らかになった。

- 4) 剛体ブロックモデルによれば滑り変位量は E_{DP} と比例関係になる。一方、試験結果より得られた残留変位 r と消費エネルギー E_{DP} の関係は、ブロックモデルと傾向的には一致しているが、わずかに非線形で、上に凹の形状である。また、震動エネルギー E_{EQ} と位置エネルギー E_p の比、および E_{EQ} と斜面内部で消費されたエネルギー E_{DP} の比についても、ブロックモデルと模型斜面の間での乖離が見られる。この違いは、剛体ブロックモデルと連続的に変形する土モデルの間の崩壊メカニズムの違いを反映していると考えられる。上記の結果に基づいて、実務設計において斜面変形を算定するためのエネルギー的評価法の骨子を提示した。これをベースに信頼できる設計ツールを開発するためには、さらに幅広い実験条件について模型実験を積み重ねるとともに、実際の斜面破壊事例のエネルギーバランスについての分析を通して、実規模斜面への適用性を明らかにしていく必要がある。

参考文献

- 1) N. M. Newmark, "Effects of earthquakes on dams and embankments," Fifth Rankine Lecture, Geotechnique Vol.15, 139-159, 1965.
- 2) T. Kokusho and K. Kabasawa, "Energy approach to flow failure and its application to flow due to water film in liquefied deposits," Proc. of International Conference on Fast Slope Movement, Naples, May, 297-302, 2003.
- 3) M. Beikae: "Is Newmark Method conservative?," Proc. 4th international Conf. on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering, San Diego, March, Paper No. 5.16, CD publication., 2001.
- 4) H. Watanabe, S. Sato and K. Murakami: "Evaluation of earthquake-induced sliding in rockfill dams", Soils and Foundations, Vo.24, No.3, 1-14, 1984.

(2003.9.30 受付)

Energy approach for earthquake induced slope failure evaluation

T. Kokusho, T. Ishizawa and T. Harada, Department of Civil Engineering, Chuo University, Japan.

So far, earthquake-induced slope stability has been evaluated by the force-equilibrium of soil mass in normal engineering practice. This method provides a safety factor for initiating the failure or displacement by the Newmark model along a fixed slip surface but cannot evaluate failure deformation once large failure occurs. The energy approach may serve as an alternative means to evaluate slope failures including their flow deformations, in which the amount of earthquake energy is evaluated in conjunction with the gravitational potential energy to be used for slope displacement. As a first step of the research, an energy balance in a Newmark-type model of a rigid block resting on a slope is examined. Then, an innovative model test is developed, in which the energy balance in a sliding slope is measured on a shake table. The earthquake energy used for the slope failure can be successfully quantified in the test and its contribution is discussed in the light of the energy balance in the rigid block model.