

エネルギー概念による地震時斜面流動量評価法と 2004年新潟県中越地震への適用

國生 剛治¹・石澤 友浩²

¹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

²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

地震時の斜面安定は、静的滑り面法やNewmark法により力の釣合いで評価されてきたが、破壊後の大きな流動量の評価には無力である。本研究では、エネルギーに着目した模型実験と剛体ブロックモデルとの比較から、崩壊斜面流動距離のエネルギー的評価法を提案している。そのために不可欠な斜面の等価摩擦係数を実際の崩壊事例から求めるため、中越地震で起きたいくつかの代表的な斜面崩壊事例に本評価法を適用したところ、逆算された摩擦角はすべて初期斜面勾配より小さくなり、地震時に崩壊土は加速していたこと、大規模崩壊では地震エネルギーより位置エネルギーの寄与が大きいことが分かった。

Key Words : earthquake energy, potential energy, run-out distance, back-calculation, friction coefficient

1. はじめに

従来より地震時の斜面安定は、すべり面法や加速度時刻歴を用いた Newmark 法¹⁾あるいはその改良法により計算されてきた。いずれも力のつり合いに基づき、単一のすべり面による剛体土塊のすべり破壊を仮定しているため、実際の地震時の破壊モードとのへだたりが大きく、大きな流動的変形量の評価には無力である。

そこで、筆者らは評価方法を抜本的に見直し、地震時の斜面のエネルギー収支(式(1))に基づく崩壊土砂流動現象の合理的評価法を開発した²⁾³⁾。

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

斜面は地震により震動エネルギーが与えられ、このエネルギー量がある限界を超えると崩壊が起こり、その際に土塊はせん断・流動などによりエネルギー E_{DP} を費やし残留変形が生じる。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 E_{EQ} と位置エネルギー $-\delta E_p$ (常に減少するためマイナス符号をつける) 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できる²⁾³⁾。本稿では、エネルギー法による地震時斜面崩壊の変形量の評価法の流れを提案するとともに、これを 2004 年新潟県中越地震で起きたいくつかの代表的崩壊斜面に適用し、逆算された摩擦係数について考察する。

2. 剛体ブロックモデルと模型実験の対比

図-1(a)のような滑り平面上を滑動する斜面上の剛体ブロックの滑動に関わるエネルギーを考えると、

$$-\delta E_p = Mg \beta \delta_r \quad (2)$$

$$E_{DP} = \frac{\mu(1+\beta^2)}{1+\mu\beta} Mg \delta_r \quad (3)$$

であり、崩壊土砂停止後には運動エネルギーは $E_k=0$ となるため、ブロック滑りに寄与する震動エネルギーは式(1)より

$$E_{EQ} = E_{DP} + \delta E_p = \frac{(\mu-\beta)}{(1+\mu\beta)} Mg \delta_r \quad (4)$$

で表される²⁾³⁾。ここに； δ_r = 斜面の残留水平変位， μ = 斜面の摩擦係数， β = 斜面勾配， Mg = 崩壊土の重量である。一方、滑り面が飽和している斜面では斜面法線方向の有効応力は地震の慣性力に依存せず一定であると考え、式(4)に代わり、式(4')が成り立つ。

$$E_{EQ} = E_{DP} + \delta E_p = (\mu - \beta) Mg \delta_r \quad (4')$$

次に、実際の斜面に近い図-1(b)に示すような乾燥砂

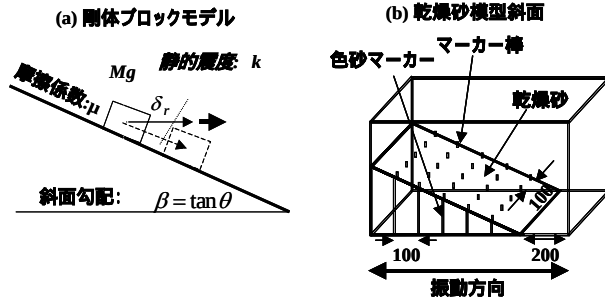


図-1 剛体ブロックと乾燥砂模型斜面の対比

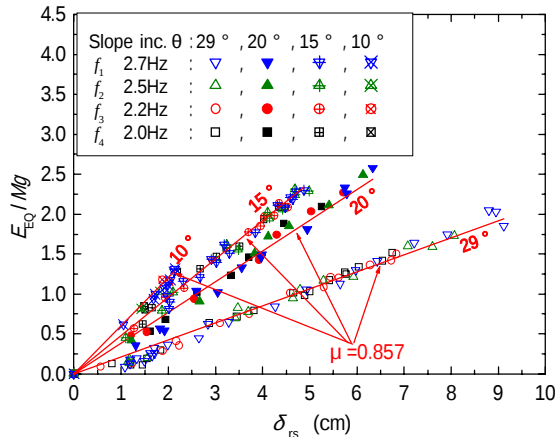


図-2 異なる振動数 f , 斜面角度 θ の模型実験による E_{EQ}/Mg と水平方向の変位量 δ_{rs} の関係

を用いた振動台模型実験を行い、不飽和斜面について成り立つ式(4)と比較した。この実験では、同質量の剛体モデルと乾燥砂斜面モデルでの減衰振動波形の比較により、斜面変形に使われる振動エネルギー E_{EQ} が直接計測できる特殊な方法が工夫され、これにより式(1)に示す各エネルギー量のバランスを算定測定することが可能である²⁾³⁾。また振動台の入力振動数を4種類に変え、振動数が斜面変形量に与える影響についても検討した⁴⁾。

図-2 は斜面角度が $\theta=29^\circ, 20^\circ, 15^\circ, 10^\circ$ の場合に、相対密度砂の斜面 ($Dr=40\%$) の残留変形 δ_r と基準化振動エネルギー (斜面変形に使われる振動エネルギーを崩壊土重量で基準化した値) E_{EQ}/Mg との関係を示している⁴⁾。これより、今回変化した2.0-2.7Hzの振動数の範囲で入力振動数によらず、両者の間に斜面角度ごとにほぼ一意的関係が成り立っており、エネルギーが斜面崩壊メカニズムを一意的に支配していることが明瞭に示された。

また、図中の実線は実験結果との一致が得られるように摩擦係数を $\mu=0.86$ と設定した場合の式(4)から算定される理論的關係であるが、実験との一致度は非常に高いことが分かる。これより、もし $\mu=\tan\phi$ を適切に設定できれば、単純な剛体ブロックモデルによっても、連続的に変形する乾燥砂の模型斜面の変形量を高精度に評価することができることが分かる。

3 斜面の地震時流動量評価フロー

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流動量の評価方法を図-3に示すように提案した。

最初に、斜面あるいは盛土直下の基礎地盤での入射エネルギー E_{IP} を定義する。SH 波の鉛直伝播を考えた場合、この入射エネルギー E_{IP} は基盤の波動インピーダンス ρV_s 、基盤速度入射波 du/dt により次式で表される⁵⁾。

$$E_{IP} = \rho V_s \int (du/dt)^2 dt \quad (5)$$

次に斜面直下の地盤での逸散エネルギー E_{ED} を仮定する。これにより斜面の変形に寄与する震動エネルギー $E_{EQ}=E_{IP}-E_{ED}$ が決まる。剛体ブロックモデルとは異なり実際の斜面では、斜面の変形に寄与する震動エネルギー E_{EQ} の中に斜面の内部減衰、液状化などに使われるエネルギー E_{EQ}' が含まれる。したがって、斜面崩壊のみに使われる震動エネルギーは $(E_{EQ}-E_{EQ}')$ となる。以上より、残留水平変位は式(4)に基づいて以下の式で計算できる。

$$\delta_r = \frac{(1+\mu\beta)(E_{EQ}-E_{EQ}')}{(\mu-\beta)Mg} \quad (6)$$

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などによって算定できる。また、滑り面が飽和している斜面では、非排水条件を考えれば滑り面の法線方向の有効応力が地

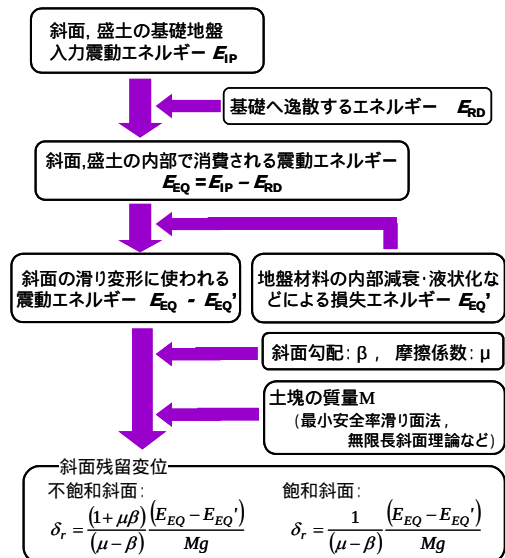


図-3 エネルギー法による地震時斜面流動量評価の流れ

震の慣性力に依存せず一定であると考えられる．このことを考慮すると，飽和地盤では，式(6)は以下の式で表される．

$$\delta_r = \frac{1}{(\mu - \beta)} \frac{(E_{EQ} - E_{EQ})}{Mg} \quad (6')$$

図-2 で示したように摩擦係数 μ を適切に設定することにより，模型実験結果が剛体ブロックモデルと非常に良く一致することが示されている．したがって，この単純なモデルにより，実際の斜面についても摩擦係数 μ を適切に設定できれば，地震時斜面崩壊の残留変位 δ_r を震動エネルギー E_0 を用いて評価できることが期待できる．

4. 2004 年新潟県中越地震の大規模斜面崩壊へのエネルギー法の適用

上記のエネルギー的評価方法により，適切な摩擦係数が現地調査などから得られれば，条件の単純な斜面には容易に適用できる．一方，地形・地質条件が複雑な斜面への適用性を増すためには，多数の実斜面崩壊例に本評価方法を適用して摩擦係数 μ を逆算し， μ のとり得る値の範囲と地形・地質条件や崩壊特性との関連を明らかにすることが必要となる．ここでは新潟県中越地震の代表的な斜面崩壊に適用し，摩擦係数の逆解析をおこなう．

この地域の斜面を構成する地質が新第3紀と第4紀の堆積岩で，また活褶曲により揉まれて風化が進んでいるため非常に脆弱である．層理面に沿っての滑りが起きやすい流れ盤では受け盤より斜面の安定勾配が低く，等高線の勾配が山の東西斜面で明らかに異なる差別侵食地形（ケスタ地形）が目立つ．また，山が多数の養殖池の存在や直前の多雨によって含水比の高い状態であったことも関係していると推定される．これらの条件を考慮して，今回起きた斜面崩壊を便宜的に図-4 に示す3タイプの破壊モードに分類してきた⁶⁾．

タイプ A：20°内外の流れ盤斜面での土塊の剛体的移動．これが，大規模な河道閉塞の原因．

タイプ B：30°程度以上の急勾配受盤・横盤斜面の浅い崩壊・トップリング崩壊．

タイプ C：池や棚田を構成する地滑り崩積土の液化・軟化，亀裂に起因したパイピング，池の決壊による泥流崩壊．

ここでは，各タイプの代表的な大規模崩壊に対してエネルギー法を適用し，等価な摩擦係数を逆算する．今回適用対象とした各タイプ別の斜面は，7箇所の大規模な

崩壊について検討する．タイプ A は東竹沢，横渡，大日山，タイプ B は羽黒トンネル入口，檜木，タイプ C は梶金，虫亀であり，被災状況や摩擦係数 μ の逆解析法などの説明は土木学会の2006年度報告書⁶⁾に示している．

(1) 入力エネルギーの算定

まず，2004年10月23日17:56に発生したM6.8，震源深さ13kmの本震について，防災科学技術研究所のKIK-netより得た強震記録のSH波に着目し被災地域全体での入力エネルギー量を算出した．

解析方法は，観測地震については加速度波形の基線補正を行い，地表と基盤の記録のフーリエスペクトルを計算する．さらに両者のスペクトルに0.3HzのParzenウィンドウをかけて，地表/基盤のスペクトル比を求める．次に，観測点での地盤データより，複数の層境界までの1次固有振動数 f を各層の層厚 l_s と1/4波長則を

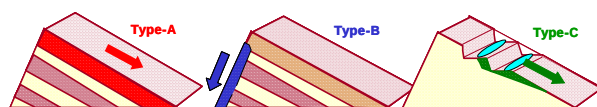


図-4 A,B,C 3タイプの斜面崩壊モード

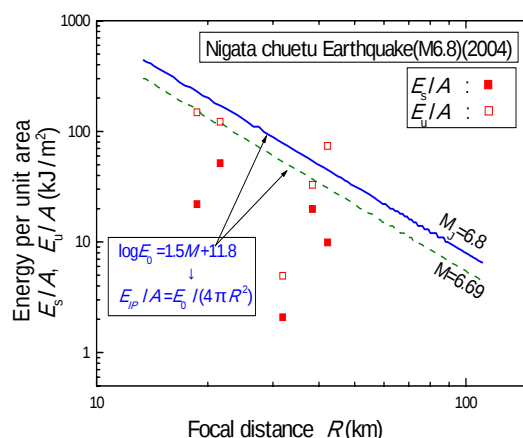


図-5 KIK-Net 記録により算定した各観測点基盤と地表での上昇波エネルギーと震源距離の関係

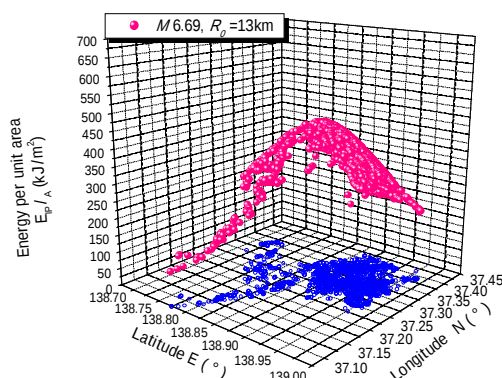


図-6 全崩壊斜面位置での上昇波エネルギー

用いて求めた固有振動数 $f = \sum_{i=1}^n (H_i / V_{s_i}) / 4$ と観測波のスペクトル比の1次ピーク周波数を比較し、一致度の高い観測点に関して、振動数 f に対応した層厚 $H_s = \sum_{i=1}^n H_i$ とS波速度 $V_s = 4H_s f$ を設定する。

次に¹⁾、補正した V_s と1次元重複反射解析を用いて各層の減衰定数を求める。この減衰定数の推定は、ボーリングデータを基に各層での減衰を推定し、モデル地盤を作成する。そして、地盤内の地震計設置震度における観測波を入力し、1次元重複反射解析を用いて地表における再現波を算出する。これより算出される地表での再現波と実際の地表での観測波、モデル地盤における伝達関数と観測波よりも求められたスペクトル比を同時に比較することにより、この両者が比較的一致する減衰定数が求まるまで一連の試行を繰り返す。

次に、これらの V_s と減衰定数を用いて、表層地盤での地震波動エネルギーを計算する。まず、地表と地中2深度の観測加速度時刻歴より速度時刻歴を求める。このとき数値積分による基線のずれを防止するため0.1Hz以下の周波成分を取り除く。次に重複反射理論を用いて各観測震度における上昇波と下降波に分解する。そして、速度時刻歴と式(5)より観測点の存在する地中と地表に到達する上昇エネルギーを算出した⁵⁾。

図-5 はこのようにして算定した被災地近傍の KIK-Net 観測点でのエネルギーと震源距離の関係を表わしている。

図中に示した直線は点震源からの震動エネルギーの球面減衰を仮定して

$$E_{IP}/A = E/(4\pi R^2) \quad (7)$$

から計算した平面積 A あたりの入射エネルギー E_{IP}/A と R の関係である。ここに、地震動の全エネルギー E (単位: erg) は、Gutenberg-Richter の式⁷⁾

$$\log E = 1.5M + 11.8 \quad (8)$$

により計算している。ここにマグニチュード M は、本来 Richter マグニチュードであるが、違いはわずかであることを前提に気象庁マグニチュード M_J を使っている。実測記録に基づく地点ごとのエネルギーはかなりばらついているが、大局的には R の増加に伴い E_{IP} が減少する傾向が現れており、特に震源近くでの大きなエネルギーはかなり近似できていると言える。斜面の基盤の V_s は地中地震計設置深度での V_s に近いと考え、地中地震計埋設深度に到達したエネルギー E_I/A を図中の破線から求められる $M=6.69$ を用いて式(7)、(8)で近似する。図-6 はこのようにして算定した全被災斜面での基盤での単位面積当たりのエネルギー入力値を示している。震央付近の斜面の多くで $E_{IP}/A=200\text{kJ/m}^2$ を超えていることが分かる。

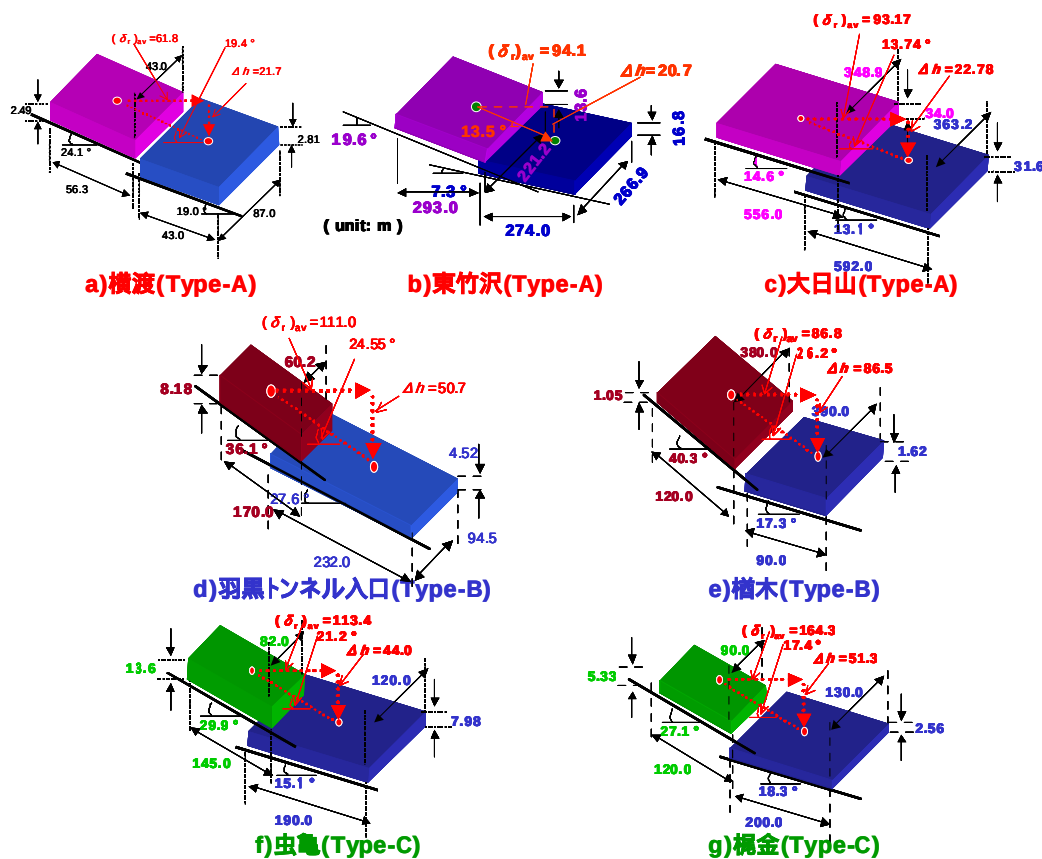


図-7 2004年新潟県中越地震での7個所の代表的崩壊斜面のブロックによるモデル化

(2) 摩擦係数の逆算

図-7 は、今回適用対象とした7個所の崩壊斜面の剛体ブロックによるモデル化である．地震前の航空写真（1975 年撮影）と地震直後の航空レーザ測量データ（2004 年 10 月 28 日）を用いた DEM から 3 次元画像を作成し、滑り面は現地踏査や破壊モードから判定した．ブロック平面サイズは長方形に近似し、厚さは 3 次元的に計算した総土量を平面積で除して算出した．このよう

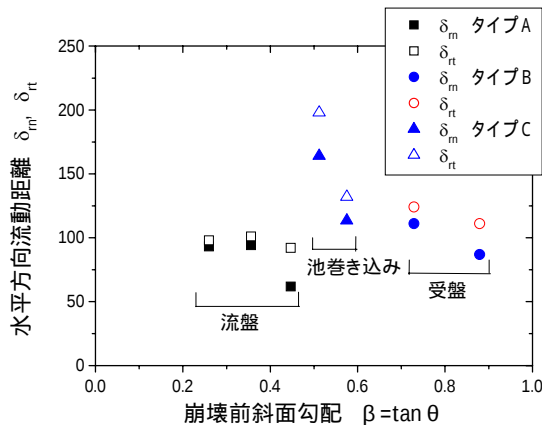


図-8 各タイプごとの斜面勾配と流動距離の関係

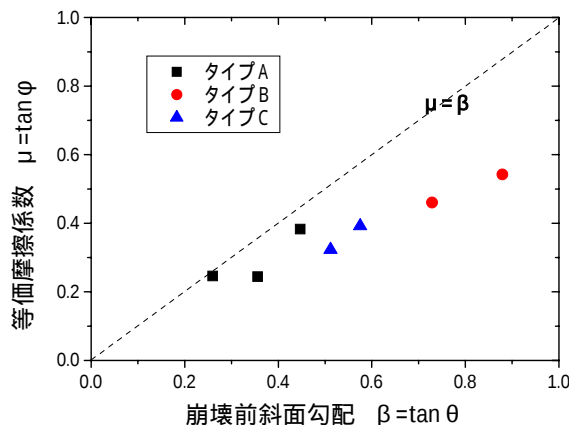


図-9 崩壊前斜面勾配と等価摩擦係数の関係

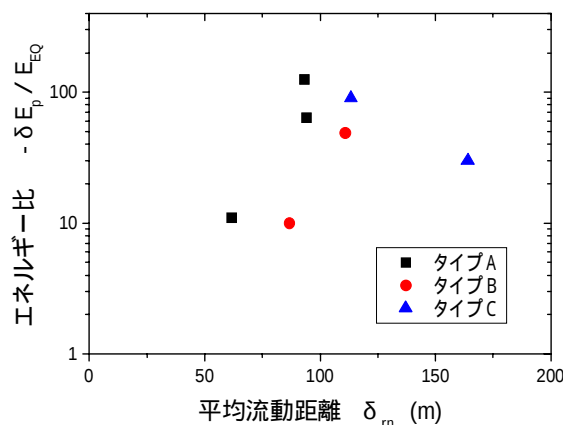


図-10 タイプごとの流動距離とエネルギー比の関係

な整理により、崩壊後の土量は 3%（大日山）～74%（横渡）膨張していると算定された．図中には崩壊前後のブロックの重心位置を結んだ線から算出した水平・鉛直流動距離と水平面からの角度が記されている．この角度は崩壊前の斜面角度とは当然異なっていることに注意が必要である．たとえば東竹沢のように、崩壊土の先端部が谷の対岸に乗り上げたケースでは重心を結んだ線の角度は 13.5°であり、滑り面の角度（19.6°）より大分小さくなっている．

図-8 は各タイプの崩壊前斜面勾配 β と水平流動距離の関係である．崩壊土全体の重心の移動距離から求めた平均流動距離 δ_m と先端流動距離 δ_{rt} について示している．斜面勾配 β は A, C, B の順で大きくなるが、いずれも β との関係は薄く、むしろ A, B, C のタイプ別にグループ化できる．池を巻き込んだタイプ C では泥流化しやすいため流動距離が大きく、タイプ A では斜面勾配が緩いに関わらず、勾配の急なタイプ B と大差ない流動量を示している．

これらにエネルギー法を当てはめ、滑り面の勾配は崩壊前の斜面勾配 β に等しいと仮定して摩擦係数の逆算を行った．地震直後の現地踏査により多くの滑り面で地下水のながれを確認したことから、いずれの場合にも滑り面付近は飽和条件として式(6)を用いた．図-7 に分布を示す上昇波エネルギーを斜面の基盤に与え、逸散減衰分を除いた震動エネルギー E_{EQ} がすべて斜面崩壊に使われたとし、 $E'_{EQ} = 0$ として等価摩擦係数 μ を逆算した．

図-9 は崩壊前斜面勾配 β と逆算摩擦係数 μ の関係であるが、 β が大きい急な斜面ほど μ も大きくなる傾向がある．また、すべてのプロットで $\mu < \beta$ となる．地震前は当然 $\mu > \beta$ であるから、地震を契機に摩擦係数が低下するメカニズムが働いたと考えられる．また、 $\mu < \beta$ であることは、崩壊土塊は地震で滑り始めたあとで加速することを意味している．この傾向は特に勾配の急なタイプ B や池を巻き込んだタイプ C で目立ち、流盤のタイプ A では $\mu = \beta$ の線からの離れはそれほど大きくはない．

図-10 は今回対象とした斜面の平均流動距離とエネルギー比 $-\delta E_p / E_{EQ}$ の関係をプロットしている．縦軸のエネルギー比は対数である．すべての斜面で $-\delta E_p / E_{EQ}$ は 10～100 以上の極めて大きな値をとっており、 δ_m が大きくなるほど増加する傾向があることが読み取れる．すなわち、流動距離の大きな厚い滑り土塊中での損失エネルギーの大半は実は地震エネルギー E_{EQ} ではなく位置エネルギー $-\delta E_p$ によって供給されることを意味している．すなわち、仮想斜面での計算例により既に示されているように⁸⁾、地震エネルギーは破

壊開始のきっかけを与え、また液状化や軟化などにより図-9 に示されるように滑り面の摩擦係数を低下させる作用をするが、長距離流動に対するエネルギーの直接的寄与はわずかであると言える。

今後は、より多くの斜面について逆算した等価摩擦係数を崩壊斜面のタイプやその他の地質・地盤要因によって分類し、エネルギーによる斜面崩壊距離評価法が、実用的に使えるようにする予定である。

5. まとめ

- 1) 乾燥砂の模型実験結果により、斜面変形量が振動エネルギーにより一意的に決まることが示され、模型実験と剛体ブロックモデルとの比較により、適切な摩擦係数を用いれば斜面の流動変位 δ_f を震動エネルギー E_{EQ} から簡便に評価できることが分かった。それに基づき、エネルギー概念による斜面の崩壊後の流動量を評価する式と評価フローを提案した。
- 2) 新潟県中越地震で発生した代表的斜面崩壊にこの評価法を適用し、観測波から算出した地震入力エネルギーと崩壊斜面の調査結果に基づき、摩擦係数を逆算した。逆算された摩擦角はすべて初期斜面勾配より小さくなり、地震時に崩壊土は加速していたこと、大規模崩壊では地震エネルギーより位置エネルギーの貢献が大きくなることが分かった。

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。また、防災科学技術研究所のKIK-net地震観測データを使わせていただいた。末筆ながら各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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の評価方法, 土木学会地震工学論文集 Vol.27, 論文NO.346, 2003.
- 3) 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) 國生剛治, 本山隆一: 地震波の上昇波と下降波の分離による表層地盤でのエネルギー収支, 土木学会論文集 No.652/III-51, 257-267, 2000.
- 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, <http://www.active-folding.com/public/17report/17report.html>
- 7) Gutenberg, B. and Richter, C. F.: Earthquake magnitude, intensity, energy and acceleration (Second paper) BSSA, Vol.46, pp.105-145, 1956.
- 8) Kokusho, T. and Ishizawa, T.: Energy approach to Earthquake-induced slope failures and its implications. Geotech. & Geoenviron. Journal, ASCE, July, 2007.

(2007.06.29 受付)

ENERGY-BASED RUN-OUT DISTANCE EVALUATION FOR EARTHQUAKE-INDUCED SLOPE FAILURES AND ITS APPLICATION TO 2004 NIIGATAKEN CHUTSU EQ.

Takaji KOKUSHO and Tomohiro ISHIZAWA

So far, earthquake-induced slope stability has been evaluated by force-equilibrium of soil mass in engineering practice, which cannot evaluate run-out distance once large flow occurs. An energy method is proposed based on shake table model tests and an energy balance in a rigid-block model, in which run-out distance of a failed slope can be evaluated if an appropriate friction coefficient of the slope is specified. The evaluation method is applied to typical slopes failed during the Chuetsu earthquake. This indicates that the back-calculated friction angles are all smaller than initial slope angle, indicating the failed soils were accelerated, and the contribution of earthquake energy was much smaller than potential energy in large scale slope failures.