

地震によって起きる崩壊の移動距離評価 に関する新たな試み

～エネルギー法による摩擦係数の逆解析～

EVALUATION OF TRAVEL DISTANCE

OF LANDSLIDES INDUCED BY EARTHQUAKES

-INFLUENCE ON BACK-CALCULATION OF FRICTION COEFFICIENT BY ENERGY APPROACH-

石澤 友浩¹・國生 剛治²・酒井 直樹³

Tomohiro ISHIZAWA, Takaji KOKUSHO and Naoki SAKAI

¹(独) 防災科学技術研究所 (〒305-0006 茨城県つくば市天王台 3-1)

E-mail: ishizawa@bosai.go.jp

²中央大学理工学部(〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

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

³(独) 防災科学技術研究所 (〒305-0006 茨城県つくば市天王台 3-1)

E-mail: sakai@bosai.go.jp

Key word : Landslide, Earthquake, Energy valance, Travel distance, Equivalent coefficient of friction,

1.はじめに

従来, 斜面安定の評価には, 滑り土塊の力のつり合いなどを用いて崩壊の有無を判断し, 加速度時刻歴を用いた Newmark 法¹⁾により滑り面に沿った変形量を求める方法が用いられている. また様々な変形解析の手法が発達してきているが, 複雑な計算や初期条件および境界条件などの設定に結果が左右される傾向があり, これらの方法では容易にせん断変形を伴う崩壊や流動崩壊を評価することは困難である.

そこで本研究では, 図-1に示す斜面崩壊のエネルギーバランスに基づき, エネルギーの観点から斜面変形量を定量的に評価することを目指している^{2,3)}. このエネルギーに着目した研究では, 斜面変形に関わる摩擦係数を推定することにより, 単純な理論式で斜面変形量が評価できる可能性がみられた^{2,3)}. また, 模型実験と剛体ブロックモデルの理論的考察に基づきエネルギー法による斜面の地震時流動量の評価法を提案した^{2,3)}.

このエネルギー法による斜面流動量評価の手法を検討するに当たって, 摩擦係数がどのような値をとるのかは非常に重要である. しかし単純な室内力学

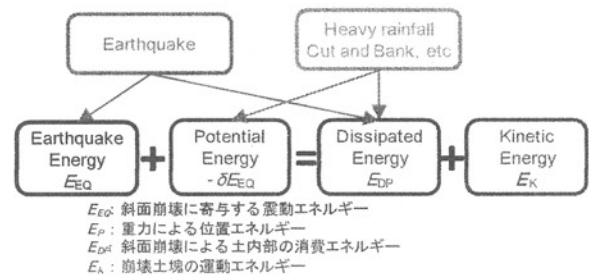


図-1 斜面崩壊のエネルギーバランス

試験のみでは自然斜面のような複雑な条件を評価することは困難である.

そこで実際の斜面崩壊にエネルギー評価法を当てはめて等価摩擦係数を逆算し, 逆算値より適切な摩擦係数を明らかにする研究を行う必要がある. 本稿では, 2004年新潟県中越地震(マグニチュード6.8, 震源深さ13km)で生じた自然の複雑な条件における斜面崩壊に対して等価摩擦係数 μ_{ene} (以後, エネルギー法による等価摩擦係数を μ_{ene} と表記)の値について分析した.

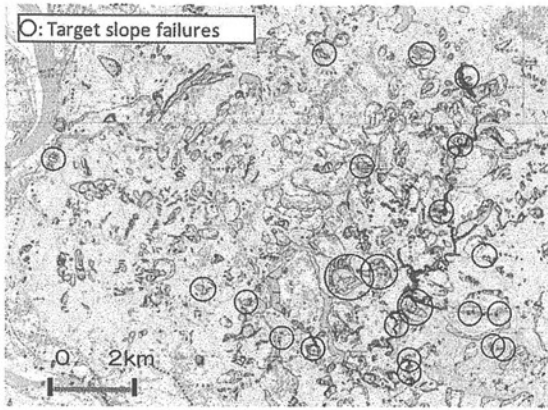


図-2 対象とした斜面崩壊
(国土地理院の災害状況図に加筆)

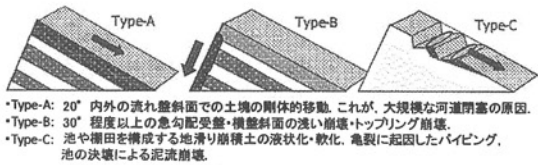


図-3 3つの崩壊タイプの分類

2.新潟県中越地震で生じた斜面崩壊について

図-2に国土地理院により作成された2004年新潟県中越地震の災害状況図⁴⁾を示す。この図にはこの地震による様々な斜面崩壊が記入されており、この地震では4000箇所以上の斜面崩壊が生じた⁵⁾。その原因としては、この地域は地すべり地帯であり大部分の堆積層は第三紀で活褶曲活動により風化が進み非常に脆弱であることと、活褶曲の性質をもつ多数の背斜軸と向斜軸が、地震に伴う崩壊地の集中的分布域⁵⁾とも一致していたことや、本震や多くの余震の震源が浅く、この山岳地帯のほぼ直下に生じたことが指摘される。また、地震直前の多雨や地すべり地形を利用した多数の棚田や養鯉池が存在するため斜面が含水比の高い状態であったことも関係していると推察される。

そこで、図-3に示すように、斜面の崩壊タイプを流れ盤、受盤、主に池を含む崩壊の3つの崩壊タイプに分類した。これらに特徴付けられる代表的な斜面崩壊に着目した。

3 実斜面崩壊事例への適用

2004年新潟県中越地震で発生した図-2に示す22箇所での斜面崩壊で等価摩擦係数 μ_{enc} の逆解析を行った。この逆解析の流れを図-4に示す。ここでは、まず結果の一例として、横渡地区の流れ盤崩壊(Type-A)と梶金地区の池を巻き込んだ崩壊(Type-C)

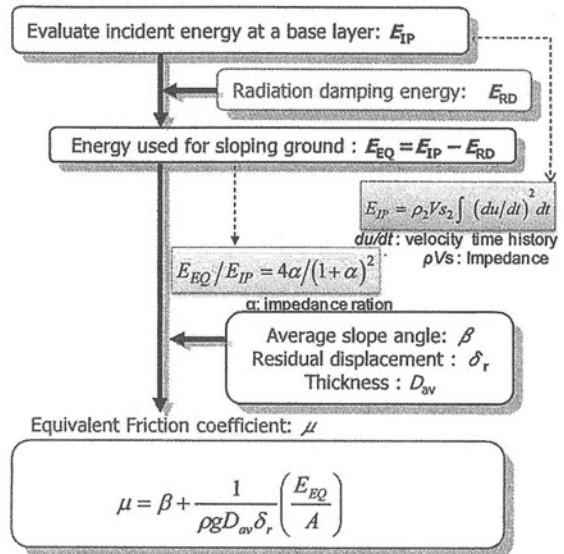


図-4 エネルギー法による等価摩擦係数の逆解析の流れ

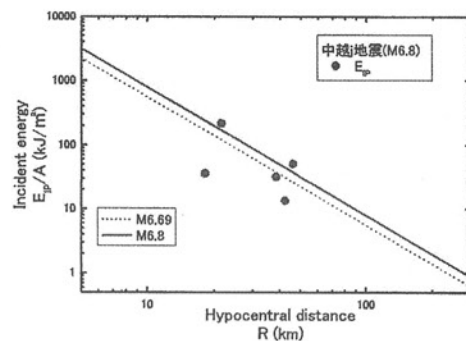


図-5 震源距離 R と単位面積当たりのエネルギー E_{IP}/A

の逆解析事例を紹介する。

(1) 斜面変形に寄与する震動エネルギーの算出

まず、入力エネルギー E_{IP} ⁶⁾の算出の流れを示す。図-5は、崩壊地域周辺のKiK-net観測点(独)防災科学技術研究所の本震記録から得た地中観測点での単位面積あたりの入力エネルギー E_{IP}/A と震源距離 R の関係を示している³⁾。ここで、入力エネルギー E_{IP} は、微小時間内にある深度を通過する単位面積当たりの運動エネルギーとひずみエネルギーから算出することができ、その合計は粒子速度 $\dot{u}(=du/dt)$ とインピーダンス ρV_s で次式となる。

$$E_{IP} = \rho V_s \int \dot{u}^2 dt \quad (1)$$

図中の直線は Gutenberg-Richter の式⁷⁾と点震源からの球面減衰を仮定して次式で示している。

$$\begin{aligned} E_{IP}/A &= E/4\pi R^2 \\ &= (10^{(1.5M+11.8)}) / \left(4\pi (\sqrt{R_0^2 + R_1^2})^2 \right) \end{aligned} \quad (2)$$

上式は、地震動の全エネルギー E (単位は erg)、震源距離 R 、仮想マグニチュード M 、震源深さ R_0 、KiK-net 観測点 (および斜面崩壊地点) までの震央距離 R_1 を用いて計算したものである。実測記録に基づく地点ごとのエネルギーはばらついているが、震源距離 R の増加に伴い入力エネルギー E_{IP}/A が減少する傾向が現れている。図中に示した点線は新潟県中越地震での地中に到達したエネルギー E_{IP}/A を式(2)の理論式を用いて近似したものであり、 $M=6.69$ に対応する。

以上より、各崩壊地点までの入力エネルギー E_{IP} については、式(2)に仮想マグニチュード $M=6.69$ と斜面崩壊地点までの震央距離 R_1 を用いて、エネルギー法に当てはめ摩擦係数 μ_{ene} の逆解析を行う。

次に斜面崩壊に使われる震動エネルギー E_{EQ} については、工学的基盤への逸散減衰を考慮した場合の上限値を次式⁸⁾により与える。

$$E_{EQ}/E_{IP}=4\alpha/(1+\alpha)^2 \quad (3)$$

また、インピーダンス比 $\alpha=0.3$ を仮定し、

$$E_{EQ}/E_{IP}=0.71 \quad (4)$$

として計算を行った。

また、式(3)、(4)より求めた震動エネルギー E_{EQ} から、地盤材料の内部減衰や液状化などによる損失エネルギー E_{EQ}' を差し引く必要がある。しかし、この地震で崩壊が生じた地域の地盤条件はそれほど軟弱ではないことや、既往の非排水繰返し三軸試験⁹⁾によれば液状化に至るまでの損失エネルギーは 2kJ/m^3 程度であり、 $E_{EQ}' \ll E_{EQ}$ と考えられるため、入力エネルギー E_{IP} から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 ($E_{EQ}'=0$) として計算している。

(2) 崩壊地のデータについて

本稿に示す解析の対象とした崩壊地のデータを整理および比較するために、以下のような単純な剛体モデルを作成した。

崩壊地のデータについて、崩壊前後の断面や影響範囲を調べるために、崩壊前は 1975 年または 1976 年、崩壊後は 2004 年 10 月 24 日、2004 年 10 月 28 日、2005 年 5 月 5 日の 4 時点でのオルソ画像、3 次元画像、3 次元座標に基づき、崩壊前後の地表面変化やすべり面を分析した。

結果の一例として、図-6 および図-7 は、横渡 (Type-A) と梶金 (Type-C) で生じた地震前後の航空写真 (a) と地形図 (b) の比較を示している。

図-6 に示す小千谷市横渡における斜面崩壊は、国道 291 号線東側斜面が西向きに崩壊した。同図よりこのような崩壊が数箇所発生しているのがわかり、この崩壊は国道を通行止めにした。これらの崩壊のうち、本稿で着目する崩壊は、北側の崩壊であり、図中には破線で影響範囲を示している。この崩壊は

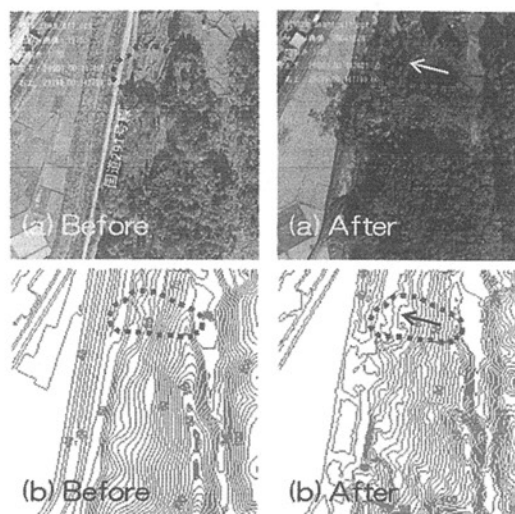


図-6 航空写真 (a) と地形図 (b) の地震前後の比較 (横渡 (Type-A))

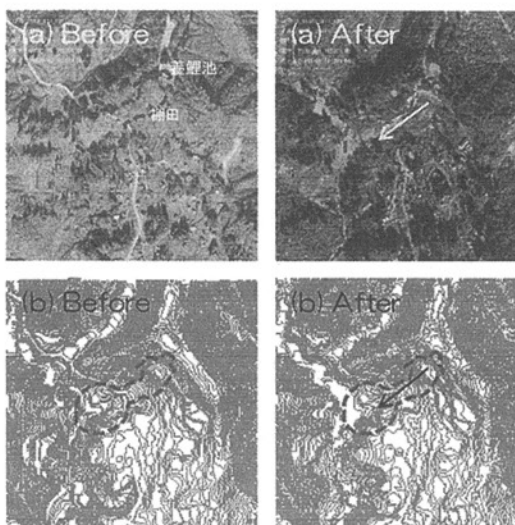


図-7 航空写真 (a) と地形図 (b) の地震前後の比較 (梶金 (Type-C))

平滑なすべり面が露出している。この崩壊土塊は、傾斜角約 24 度の層理面に平行するように滑動しており、剛体的に全て斜面下方に滑落した流れ盤すべりである。ここ横渡の崩壊の要因は、直接の誘因は地震であるが、信濃川による側方侵食や道路切土による斜面末端部の欠損も要因となったと考えられる。著者らはこのような剛体的な崩壊を Type-A と分類した。

図-7 に示す梶金地域の崩壊では、崩壊上部の養鯉池が崩壊した。この崩壊した土砂が道路を閉鎖し、河道閉塞を引き起こした。この崩壊地域は多くの養鯉池や棚田が存在しており、養鯉池や棚田が決壊したことにより、水を巻き込み土砂を長距離流動させたと推察される。また、この崩壊地の周辺を現地踏

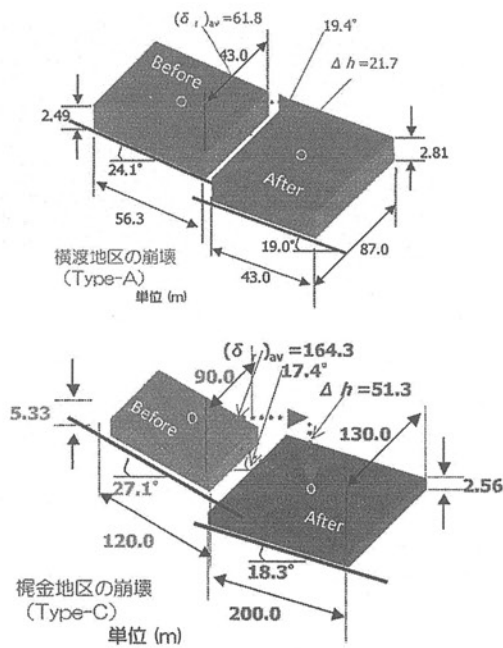


図-8 土塊の崩壊前後の剛体モデル化

査したところ、多く場所で亀裂が見られた。斜面や池の小さな亀裂により、地震後しばらく時間経ってから崩壊が生じるタイプもあるが、目撃談によるとこの崩壊は地震と同時に崩壊が始まったようである。

このように、地震により、池の堤などに亀裂が生じ、養鯉池の水が漏水して下流側の斜面で決壊し、大きな災害に繋がることも、今回の地震での得た教訓である。

また、この地域は地層の走行、傾斜から見て受盤と判断されるが、実際は岩盤の風化が進み、この風化層が池や棚田に利用されてきた。上記に示したように水を巻き込み大流動する崩壊を Type-C と分類した。

図-6 および図-7 に示した三次元の標高データや航空写真および現地調査などよりすべり線を推定し、崩壊前後の土塊のデータを抽出した。以上の整理により、図-8 に示すような崩壊前後の土塊の剛体モデルを作成した。同図の横渡地区の崩壊 (Type-A) は崩壊前後の土塊が大きく変化せず、剛体的に土塊が崩壊したことが明瞭にわかる。また、梶金地区の崩壊が明瞭に変化しており、崩壊後に大きく流動していることがわかる。

(3) 逆解析による等価摩擦係数について

上記のデータを用いて、横渡 (Type-A) と梶金 (Type-C) の崩壊について、図-4 に示す逆解析のフローに基づき、次式³⁾より等価摩擦係数 μ_{ene} を算出した。

$$\mu_{ene} = \beta + \frac{1}{\rho g D_{av} \delta_r} \left(\frac{E_{EQ}}{A} \right) \quad (4)$$

その逆解析結果を表-1 に示す。

表-1 逆解析の結果

	崩壊土の平均厚み	崩壊土の平均面積	崩壊土の平均体積	重心の水平方向の移動距離	崩壊先端移動距離	初期斜面勾配	崩壊後の斜面勾配
	D (m)	A (m^2)	V (m^3)	δ_r (m)	δ_{rt} (m)	β_{in} ($^\circ$)	β_{out} ($^\circ$)
横渡 (Type-A)	3.2	3595.0	9550.0	61.8	92.0	24.1	19.0
梶金 (Type-C)	3.9	18490.0	62090.0	164.3	198.0	27.1	18.3
	入力エネルギー	震動エネルギー	崩壊変形に用いられる震動エネルギー	位置エネルギーの変化量	エネルギー比率	逆解析による等価摩擦係数	摩擦角
	E_p/A (kJ/m^2)	E_v/A (kJ/m^2)	$(E_{eq}-E_{eq0})/A$ (kJ/m^2)	$-S E_p/A$ (kJ/m^2)	$-S E_v/E_{eq0}$	$\tan(\phi_{eq})$	ϕ_{eq} ($^\circ$)
横渡 (Type-A)	265.5	77.0	188.5	1018.9	5.1	0.417	22.6
梶金 (Type-C)	293.8	85.2	208.6	3036.9	14.6	0.335	18.5

この2つの崩壊地点に到達し、斜面変形に寄与した震動エネルギー E_{EQ}/A はそれぞれ $188.5kJ/m^2$, $208.6kJ/m^2$ とほぼ同様な値であった。

横渡地区 (Type-A)、梶金地区 (Type-C) の崩壊データを用いて逆解析した結果、エネルギー法による等価摩擦係数 $\mu_{ene} (= \tan \phi_{eq})$ はそれぞれ 0.417, 0.335 となり、摩擦角 ϕ_{eq} は 22.6° , 18.5° となった。それぞれの初期斜面勾配は、 24.1° , 27.1° であり、崩壊前斜面勾配は等価摩擦係数を上回っていることがわかる。また、両者の規模 (流動距離や崩壊土塊) は異なるが、剛体的な Type-A の崩壊に比べて、水を大量に含み流動した Type-C の崩壊の方が、崩壊前斜面勾配と等価摩擦係数の減少率は大きい。これは崩壊メカニズムの違いによる影響が考えられる。そこで、同地震で生じたその他の斜面崩壊について同様な分析をおこなった。

4. エネルギー法による等価摩擦係数 μ_{ene}

図-2 に示す 22 か所の斜面崩壊を対象として、エネルギー法による逆解析手法を適用し、等価摩擦係数 μ_{ene} を算出し下記のような考察を行った。なお、崩壊タイプは既述した 3 タイプを用いている。

図-9 は崩壊土塊全体の重心の移動距離から求めた水平方向変形量 δ_r と崩壊土体積 V の関係を示している。同図より、変形量 δ_r と崩壊土体積 V の間には相関関係が見られた。また同図には 3 つの崩壊タイプに分類した結果も示しているが、本稿で対象とした 22 箇所の崩壊箇所において Type-B よりも Type-A の方が大規模な崩壊が多いことが分かる。また、特に、図-7 に示した梶金 (Type-C) の崩壊は、養鯉池や棚田の水を巻き込み大きく流動していることがわかる。

次に図-10 は、斜面変形に寄与した位置エネルギーと震動エネルギーの比と崩壊土体積 V の関係を示している。これより、崩壊土体積 V が大きいほど、このエネルギー比が大きい傾向がわかる。ここに示

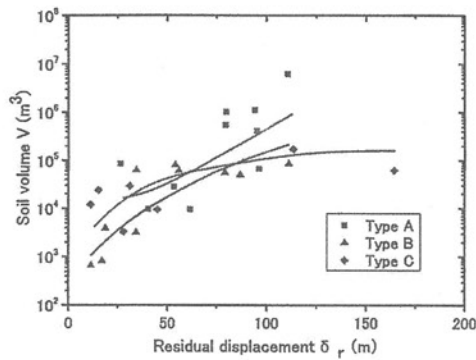


図-9 水平方向変形量 δ_r と崩壊土体積 V の関係

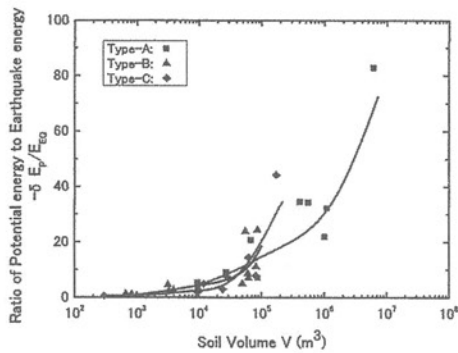


図-10 エネルギー比 ($-\delta E_p / E_{E0}$) と崩壊土体積 V の関係

すエネルギー比は斜面崩壊に寄与したエネルギーの比率を示している。

これは、流動距離の大きな滑りの土塊の中での損失エネルギーの大半は震動エネルギーではなく位置エネルギーによって供給されることを意味しており、逆に、小規模崩壊では、震動エネルギーが大きく寄与したと考えられる。

図-11 ではエネルギー法により逆算した等価摩擦係数 μ_{ene} と崩壊前斜面勾配 β_{be} の関係を示している。同図より、多くの斜面で等価摩擦係数 μ_{ene} が崩壊前斜面勾配 β_{be} より下回る傾向が多く現れている。地震前において初期勾配 β_{be} は摩擦係数より大きいはずであるから、つまりこれは、地震を契機に摩擦係数が低減したと考えられる。

図-12 はエネルギー法により逆算した斜面崩壊に関わる等価摩擦係数 μ_{ene} と崩壊土塊の水平方向流動距離 δ_r の関係を示している。この図より、摩擦係数が減少するほど、変形量が増加することが読み取れる。また、Type-A は、摩擦係数が低く変形量大きい流れ盤の特徴を示し、Type-B は崩壊前斜面勾配が大きく変形量は小さいことから受け盤の特徴を示している。Type-C については泥流化しているものがあるため、大きくなっていることがわかる。

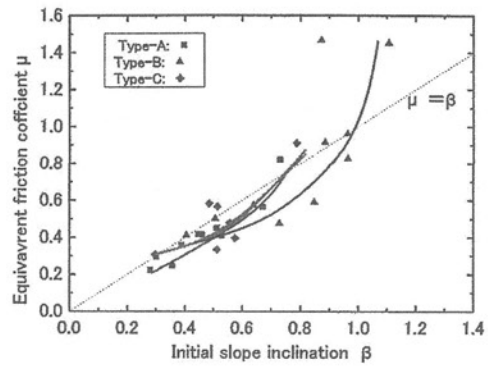


図-11 崩壊前斜面勾配 β_{be} と等価摩擦係数 μ_{ene} の関係

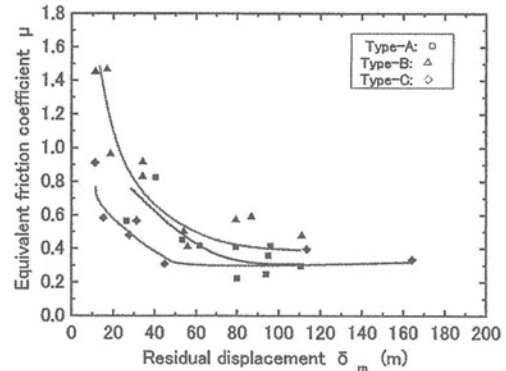


図-12 水平方向変形量 δ_r と等価摩擦係数 μ_{ene} の関係

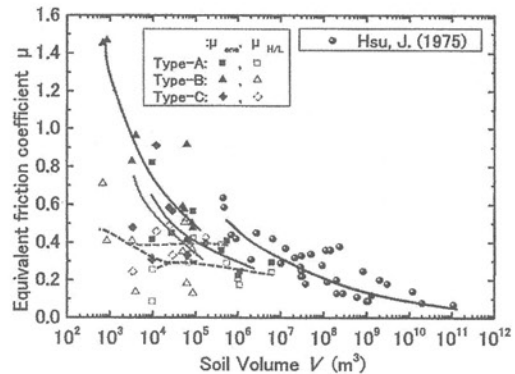


図-13 崩壊土体積 V と等価摩擦係数 μ の関係

5. 既往の等価摩擦係数との比較

図-13 はエネルギー法により逆算した等価摩擦係数 μ_{ene} と崩壊土体積 V の関係を示している。同図には Hsu による大規模崩壊での同関係の結果⁸⁾も示しているが、エネルギー法で逆算した摩擦係数 μ_{ene} も、崩壊土体積が大きくなるほど摩擦係数が小さくなる傾向が読み取れる。これは、流れ盤斜面の Type-A で層厚の厚い土塊が長距離流動をしており、逆に受け盤斜面の Type-B では層厚が薄く比較的変形量も

小さいためであると考えられる。

ここで、既往の研究で検討されている等価摩擦係数 μ_{HL} について同様な整理をしてみた。崩壊前後の最大高さ H と最大流動距離 L から地すべりの流動性を示す等価摩擦係数 $\mu_{(HL)}$ ($=H/L$) を図-2 に示した 22 か所の斜面崩壊から算出し、図-13 に白抜き記号および破線で示している。これより等価摩擦係数 $\mu_{(HL)}$ は、対象とした斜面箇所では、大きなばらつきが見られた。これより、 $\mu_{(HL)}$ は、既往の大規模な剛体的な崩壊では相関関係が見られたが、泥流化するメカニズムなど考慮されていないため、特に Type-C のような崩壊を評価することが難しいことが示された。

6.まとめ

エネルギー法による斜面変形量評価の手法を検討するに当たって、2004 年新潟県中越地震で生じた代表的な 22 箇所の斜面崩壊を対象に等価摩擦係数を逆解析した結果、以下の知見が得られた。

- 等価摩擦係数をエネルギー法により逆解析した結果、崩壊前斜面勾配 β_{be} を等価摩擦係数 μ_{ene} が下回る傾向となった。これは、地震を契機に摩擦係数が低減したと考えられる。また、大規模崩壊ほど等価摩擦係数は小さくなることがわかった。
- 大規模崩壊ほど損失エネルギーの大半は地震エネルギーではなく位置エネルギーによって供給されることがわかった。
- エネルギー法による等価摩擦係数 μ_{ene} と崩壊土体積 V の間には相関関係が見られた。同関係について、既往の評価法を用いた摩擦係数 $\mu_{(HL)}$ で整理した結果、大きくばらつくことが示された。以上より、エネルギー法による等価摩擦係数 μ_{ene} は崩壊メカニズムを考慮した評価法であることが示された。

参考文献

- 1) Newmark, N.W.: Effects of earthquakes on dams and embankments, Fifth Rankine Lecture, Geotechnique Vol.15, 139-159, 1965.
- 2) 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方法の開発, 土木学会論文集 C, Vol.62, No.4, pp. 736-746, 2006.
- 3) T.Kokusho, and T.Ishizawa, Energy Approach to Earthquake-Induced Slope Failures and Its Implications, Journal of Geotechnical and Geo environmental Engineering, ASCE, Vol. IV, No.181, CD-Rom, 2007.
- 4) 国土地理院: 平成 16 年 (2004) 新潟県中越地震災害状況図, 2006.
- 5) 西田京助, 國生剛治, 石澤友浩: 新潟県中越地震における斜面災害の要因分析, 第 29 回土木学会

地震工学研究発表会報告集, pp.1017-1022, 2007.

- 6) Kokusho, T. and Motoyama, R.: "Energy dissipation in surface layer due to vertically propagating SH wave." Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol.128, No.4, pp. 309-318, 2002.
- 7) Gutenberg, B. and Richter, C. F., Earthquake magnitude, intensity, energy and acceleration (Second paper), *Bullentin of Seismological Society of America*, Vol. 46, pp. 105-14, 1956.
- 8) J.Hsu., Catastrophic Debris Streams Generated by Rockfalls, Geological Society of America Bulletin, v.86, pp.129-140, 1975.

(2010. 5. 14 受付)