

ケースヒストリーによる地震時崩壊斜面の等価摩擦係数の再検討

中央大学理工学部 正会員 國生 剛治
中央大学理工学部 学生会員 ○佐川 拓也
中央大学理工学部 学生会員 川合 昭彦

1. はじめに

これまで、地震による斜面安定は、滑り土塊の力のつり合いや Newmark 法¹⁾などにより評価されてきたが、それらの方法ではせん断変形を伴う崩壊や流動的崩壊を評価することは困難である。

本研究では、図-1 に示すように斜面崩壊のエネルギーバランスにより、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⁾。我々は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図-2 のように提案した³⁾。エネルギーにより斜面の流動量を評価するに当たって、摩擦係数 μ がどのような値をとるのかは非常に重要であるが、単純な室内力学試験のみでは自然斜面の複雑な条件を考慮することは困難である場合が多い。そこで過去の地震における実際の斜面崩壊に図-2 の評価フローを当てはめて等価摩擦係数 μ 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ってきた^{4), 5)} μ の逆算に使う地震動エネルギーは、これまでは水平方向のすべてのエネルギーを使っていたが、今回は斜面崩壊方向の滑りに関わるエネルギーのみによる再検討を行なう。また、従来より行なってきた新潟県中越地震での自然斜面崩壊、岩手・宮城内陸地震での自然斜面崩壊に加え、能登半島地震での人工盛土崩壊などを加えた検討を行い、摩擦係数の適切な評価法について考える。

2. 斜面滑りに寄与するエネルギーの算定

崩壊斜面付近にある KiK-net 地震観測点の地中地震記録を使用して、エネルギー法による等価摩擦係数 μ の逆算を行う。なお、KiK-net 観測点における加速度時刻歴の基線補正（カット周波数:0.1Hz）を行った後、周波数領域で積分することにより速度時刻歴を算出する。また、速度加速度時刻歴について斜面崩壊方向とその直交方向に分解する。その際崩壊下流方向を北から反時計回り測った方向角を θ° とする。加速度が上流方向に向かっている間の速度時刻歴のみを用いたエネルギー累積値と全上昇波エネルギーを式(1)により計算し、そのエネルギー比を用いて μ の逆算を行う。ここで、 $\dot{u}$ は速度上昇波、 ρV_s は各層の波動インピーダンスであり、 $t=0 \sim t$ で積分することにより、その時間で累積したエネルギーが計算される。

$$E = \rho V_s \int_0^t (\dot{u})^2 dt \quad (1) \quad \mu = \beta_{av} + \frac{\gamma(E_{EQ} - E_{EQ}')}{Mg \cdot \delta_r} \quad (2)$$

$$E_p / A = E / (4\pi R^2) \quad (3) \quad \log E = 1.5M + 11.8 \quad (4)$$

3. 等価摩擦係数 μ の算出方法

斜面崩壊から逆算される等価摩擦係数 μ は式(2)により、斜面の流動距離 δ_r 、初期勾配 β_{be} 、崩壊に使われる地震動エネルギー E_{EQ} 、上昇波伝播中の内部損失エネルギー E'_{EQ} （ゼロと仮定）、斜面上流方向エネルギー比から計算される。

E_{EQ} は単位面積当たりの入射エネルギー E_p から導かれ、 E_p は点震源からの球面減衰を仮定して式(3)で計算する。ここに E : 地震動の全エネルギーで、Gutenberg-Richter の式(4)⁶⁾により計算し、 R : 震源距離である。地震動の全エネルギー E 。地震前と地震後の航空写真と航空レーザー測量データ（DEM データ）を用いて、崩壊前後の断面図の作成、影響範囲面積の推定をする。その後、崩壊前後の土塊のブロック化を行い、質量 M 、斜面勾配 β 、重心流動距離 δ_r を算出する。それらの値と対象とする地点の震動エネルギー E_{EQ} 、 δ_r を用いて等価摩擦係数 μ が算出される。なお、地下水位は滑り面上にあると仮定している。

4. 逆算等価摩擦係数と各種パラメータの関係

2004 年に新潟県中越地震で発生した斜面崩壊事例については、以下のようにタイプ分けを行なった。タイプ A : 20°内外の流れ盤斜面での土塊の剛体の移動。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 :

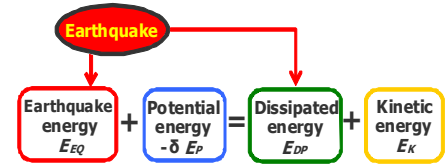


図-1 エネルギーバランス

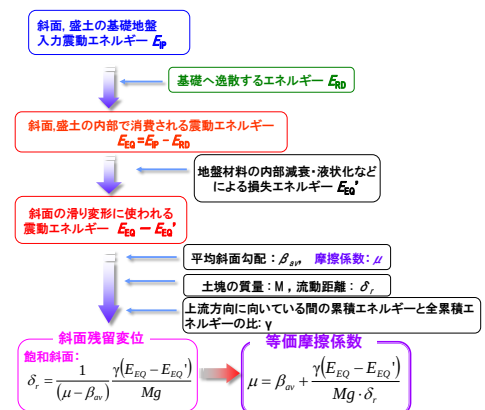


図-2 エネルギー法による地震時斜面流動量評価

池や棚田を構成する地滑り崩壊土の液状化・軟化・亀裂に起因したパイピング・泥流崩壊。

また、2008年に岩手・宮城内陸地震で発生した斜面崩壊事例については、以下のようにタイプ分けを行なった。タイプ1：比較的大部分が剛体的に滑っている。タイプ2：比較的小規模な部分が剛体的に滑っている。タイプ3：剛体的に滑っている部分が全くない。

図-3 は崩壊前の斜面勾配 β_{be} と等価摩擦係数 μ の関係のグラフである。平均斜面勾配が大きくなるにつれて等価摩擦係数も大きくなる傾向が読み取れ $\mu = \beta_{be}$ の線に近づく結果となった。一般に設計に用いる摩擦係数は斜面勾配とは無関係と考えがちであるが、自然斜面については勾配と連動して変化する傾向が見られる。

図-4 は崩壊土平均厚さ D_{av} と等価摩擦係数 μ の関係のグラフである。厚さ D_{av} が大きくなるほど μ が小さくなる傾向がはっきりと見られる。これより $D_{av}=5\text{m}$ 付近に明らかな変化点があり、それより薄い滑りで等価摩擦係数が急激に増加するのに対し、それより厚い滑りでは $\mu=0.5$ かそれ以下の値となることがわかる。これより D_{av} は μ を推定するための良いパラメータであると言える。

図-5 は崩壊土体積 V と等価摩擦係数 μ の関係のグラフである。今回対象とした2つの地震で多数の崩壊斜面について全体的に V が大きくなるほど μ が小さい傾向が見て取れる。また、図中に黒い四角で示すプロットは世界での巨大斜面崩壊についての既往研究のデータ⁷⁾であるが、今回の崩壊は既往の大規模崩壊とも整合する傾向が得られた。

図-3～5を通して、崩壊タイプの違いにもかかわらず摩擦係数は各パラメータに対し類似の変化を示すが、盛土については小さ目の値となる傾向が得られた。

5. まとめ

- ・崩壊タイプや地震の違いによらず、斜面勾配や崩壊土厚さ、崩壊土体積と摩擦係数の間には、ほぼ一意的な傾向が得られた。
- ・斜面崩壊から逆算される自然斜面の等価摩擦係数は一定値ではなく、斜面勾配が大きいくほど大きくなる傾向を示す。
- ・崩壊土厚さ D_{av} や崩壊土体積 V を事前に想定できれば、崩壊影響面積 A や等価摩擦係数 μ をある程度予想することが可能である。
- ・これらの関係より摩擦係数 μ を推定することでエネルギー法により流動距離 δ_r や崩壊土体積 V を予測することにより、防災上重要である崩壊の規模を特定できる。

なお、新潟県中越地震、岩手・宮城内陸地震の崩壊斜面については国土地理院、能登半島地震の斜面崩壊については北陸電力(株)の情報を使わせて頂きました。関係各位に感謝の意を表します。

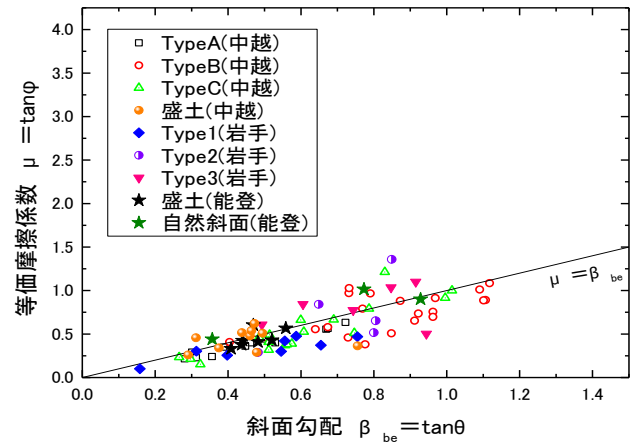


図-3 崩壊前の斜面勾配と等価摩擦係数の関係

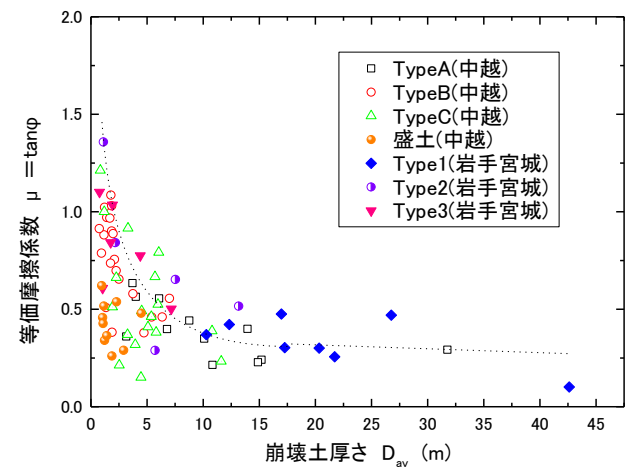


図-4 崩壊土厚さと等価摩擦係数の関係

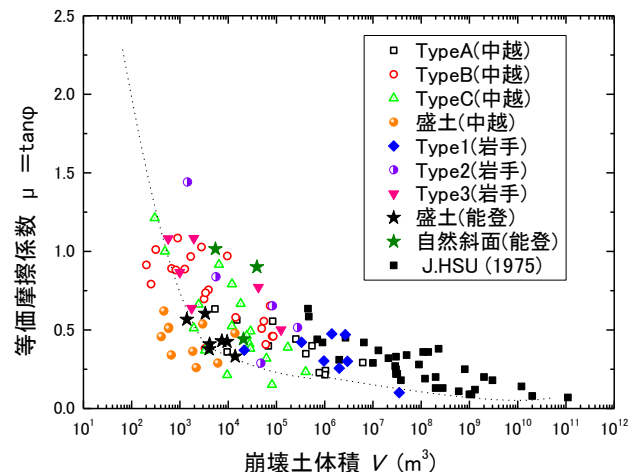


図-5 崩壊土体積と等価摩擦係数の関係

参考文献： 1) 小柳智行；地震時斜面崩壊開始のエネルギー閾値についての模型実験と斜面安定評価への適用，中央大学大学院2012年度修士論文 2) 齊藤雄二郎；地震時斜面崩壊のエネルギー閾値の評価，中央大学大学院2013年度修士論文 3) 國生剛治、石澤友浩：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，土木学会地震工学研究発表会2007 4) 國生剛治、石澤友浩；地震時斜面崩壊における土塊流動距離のエネルギー的評価法と実崩壊事例への適用，日本地すべり学会誌，Vol.47，No.3，2010年，121-128. 5) Kokusho.T, Ishizawa.T, Nishida.K：Travel Distance of Failed Slope During 2004 Chuetsu Earthquake and Its Evaluation in Terms of Energy, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol.29, No.7, 2009, 1159-1169 6) Gutenberg.B.：The energy of earthquakes, Quarterly Journal of the Geological Society of London, Vol.CXII, No.455, 1-14, 1955. 7) Hsu.J：Catastrophic Debris Streams Generated by Rockfalls, Geological Society of America Bulletin, v.86, Doc.no.50117, 1975, 129-140