

ケースヒストリーによる地震時斜面崩壊・流動メカニズムのエネルギー的検討
 Study on seismically induced slope failures and energy-based flow mechanism by case histories.

土木工学専攻 20号 小泉 佳祐
 Keisuke KOIZUMI

1. はじめに

これまで、地震による斜面安定の評価には、滑り土塊の力のつり合いにより崩壊の有無を判断し、Newmark法¹⁾など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きた。それらの方法は崩壊の有無や滑り面に沿った剛体的な変形量の算定に適用されるものの、せん断変形を伴う崩壊や長距離流動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⁾。そのため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⁾。エネルギー評価法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2004年新潟県中越地震における実際の斜面崩壊にエネルギー評価法を当てはめ等価摩擦係数 μ を逆算し、摩擦係数と地質地盤条件などの関連を明らかにする研究を行ってきた^{4),5)}。本稿では、新潟県中越地震での斜面崩壊事例と岩手宮城内陸地震での斜面崩壊事例において、等価摩擦係数の算出方法、計算結果ならびにそこから得られた知見などについて述べる。

2. 斜面崩壊での摩擦係数算出法

2004年新潟県中越地震（中越と略称）で発生した斜面崩壊事例については、図3のように斜面崩壊のタイプを3つに分けて検討している。

- ・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状化・軟化，亀裂に起因したパイピング，池の

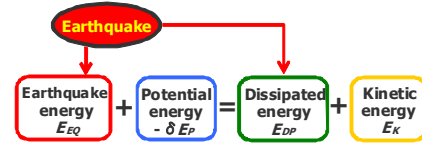


図-1 エネルギーバランス

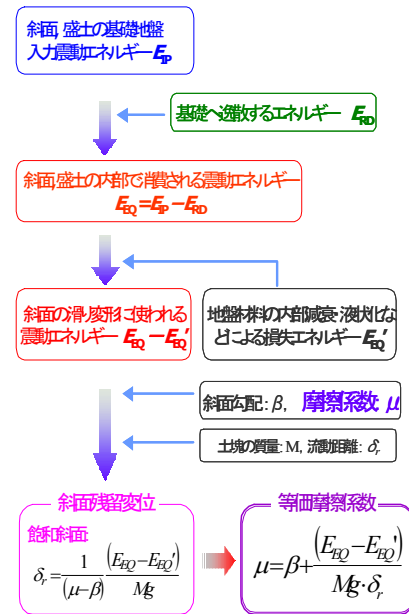


図-2 エネルギー法による地震時斜面流動量評価フロー

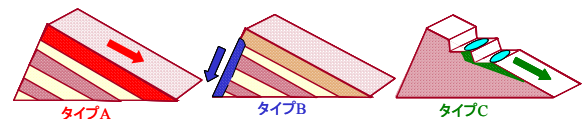


図-3 崩壊タイプ（新潟県中越地震）



図-4 崩壊タイプ（岩手宮城内陸地震）

決壊による泥流崩壊.

2008年岩手宮城内陸地震（岩手宮城と略称）で発生した斜面崩壊事例については、崩壊が剛体的に滑っているか否かを各斜面崩壊箇所を図4のようにタイプを3つに分けて検討している.

- ・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2の評価フローのスタートに位置する入力エネルギーの算出方法を以下に示す. 図4は、9つの防災科研 KiK-net 観測点（丸印は新潟県中越地震, 三角印は岩手宮城内陸地震）での本震記録から得た 83.4~260m の深度における単位面積あたりの入射エネルギー E_{IP}/A と震源距離 R の関係を示している⁶⁾. 図中の実線と破線の直線以下に示す Gutenberg-Richter の式⁷⁾と点震源からの球面減衰の式,

$$\log E = 1.5M + 11.8 \quad (1)$$

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

を用いて計算したものである. ここに E : 地震動の全エネルギー R : 震源距離である. 実測記録に基づく地点ごとのエネルギーはばらついてはいるが、震源距離 R の増加に伴いエネルギー E_{IP}/A が減少する傾向が現れている. 図中に示した破線は2つの地震での実測エネルギー E_{IP}/A を式(1), 式(2)の理論式を用いて最小二乗法により近似したものであり、新潟県中越地震ではマグニチュード $M = 6.6$, 岩手宮城内陸地震では $M = 6.9$ に対応する. 以下ではこれらの値を用いて式(1), (2)から E_{IP}/A を計算している.

斜面崩壊に使われる震動エネルギー E_{EQ} は、基礎への逸散減衰を考慮した場合の上限値を次式により与える⁸⁾.

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

ここでインピーダンス比 $\alpha = 0.3$ を仮定し、 $E_{EQ}/E_{IP} = 0.71$ により E_{EQ} を求めている. また、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が、今回対象とした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⁴⁾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 $E_{EQ}' \ll E_{EQ}$ であることから、 E_{EQ} がすべて斜面崩壊に使われたとして計算している.

地震前と地震後の航空写真と航空レーザー測量データから作成した DEM に基づいて崩壊前後の平面図・断面図の作成、影響面積の算定とすべり面の推定をする. その後、崩壊前後の土塊を図5のようにブロック化し、質量 M , 斜面勾配 β , 重心流動距離 δ_m 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} を用いて土塊重心の残留変位から等価摩擦係数 μ が式(4)により算出される^{4),5)}. なお、今回算出した等価摩擦係数 μ は全て滑り面上に地下水位があると仮定している.

$$\delta_m = \frac{1}{(\mu - \beta)} \frac{(E_{EQ} - E_{EQ}')}{Mg} \quad (4)$$

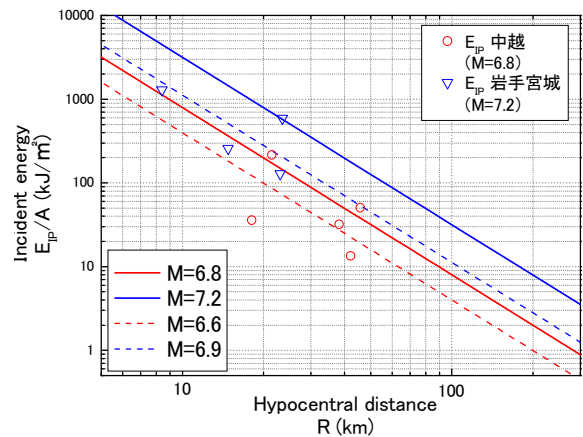


図5 震源距離 R と単位面積当たりのエネルギー E_{IP}/A の関係

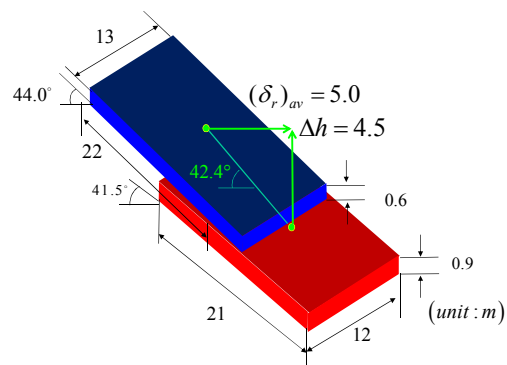


図6 剛体ブロックモデル化の例 (P-52 付近)

3. 結果と考察

まず逆解析以前にDEMデータの分析から以下の結果が得られる。

図7は崩壊土塊全体の重心の移動距離から求めた水平方向流動距離 δ_m を横軸にとり、縦軸にとった土塊先端の距離 δ_n と対比している。一般にハザードマップ作製上重要なのは崩壊土塊先端の流動距離であるが、この図からはバラツキはあるものの、重心に着目した以下の検討でも岩手宮城での1つの長距離崩壊を除いては流動距離に大きな違いはないことが分かる。

図8は土塊重心の水平流動距離 δ_m と崩壊前斜面勾配 β_{be} の関係である。これから中越においては、タイプAは崩壊前斜面勾配が低く流動距離が大きい流れ盤の特徴を、タイプBについては崩壊前斜面勾配が大きく流動距離は小さいことから受け盤の特徴が現れている。タイプCについては泥流化しているため、流動距離が大きくなっているものがある。岩手宮城においては、ほぼ剛体的な滑りのタイプ1が中越のタイプAと同様に崩壊前斜面勾配が低く流動距離が大きい特徴を現している。タイプ2, 3においてはデータ数が少なくバラつきがみられる。しかし、個々のタイプ別にも全体的にも斜面勾配 β_{be} が小さくなるほど、流動距離 δ_m が大きくなる意外な傾向が読み取れる。

次に逆解析により得られた結果について述べると、図9は崩壊土体積 V とエネルギー比 $-\delta E_p / E_{EQ}$ の関係である。崩壊土体積 V が大きくなるほど $-\delta E_p / E_{EQ}$ は増加している。つまり大きな滑りのエネルギーの大半は地震エネルギー 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。その一方で小規模崩壊では位置エネルギーばかりではなく地震エネルギーも無視しえない大きさになる傾向が読み取れる。中越と岩手宮城を比較してみると、小規模崩壊になるにつれて傾向がそれていくが、大規模崩壊では同様の傾向が現れている。

図10は崩壊前斜面勾配 β_{be} と逆算した等価摩擦係数 μ の関係である。全体的に、 μ は斜面勾配と共

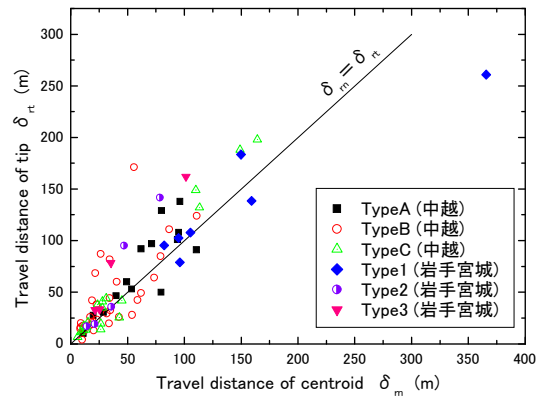


図-7 水平方向流動距離と先端流動距離の関係

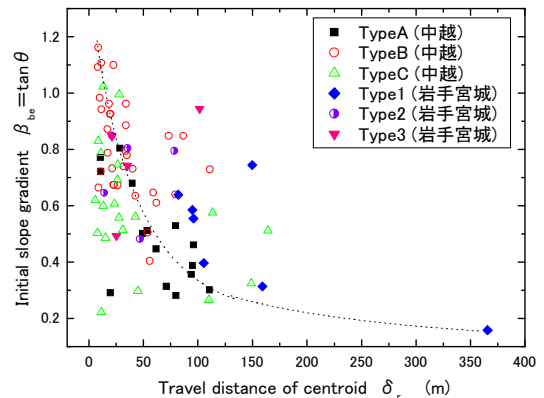


図-8 水平方向流動距離と崩壊前斜面勾配の関係

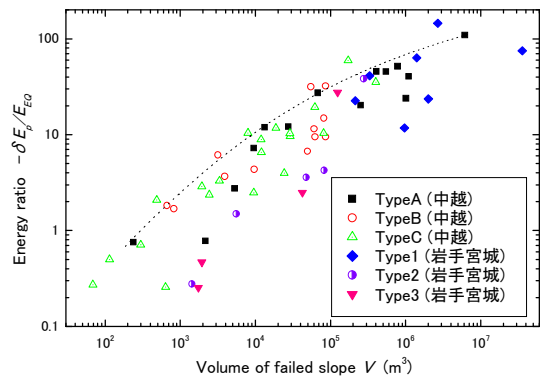


図-9 崩壊土体積とエネルギー比の関係

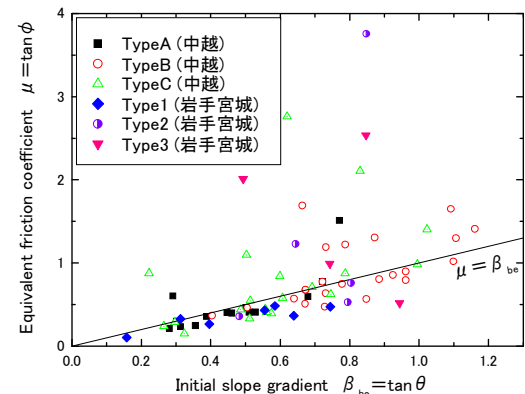


図-10 崩壊前斜面勾配と等価摩擦係数の関係

に大きくなる傾向が読み取れる。これは摩擦係数を一定値として検討することの多い人工斜面とは対照的であり、自然斜面の勾配が長期間の自然災害の履歴により決定されてきたことを示唆している。また β_{be} の小さい範囲では等価摩擦係数 μ は崩壊前斜面勾配 β_{be} より下回る傾向がタイプ A, C, さらにタイプ 1 について多く現れている。地震前は当然、 $\mu \geq \beta_{be}$ であるから、地震を契機に摩擦係数が低減したと考えられる。しかし、小規模崩壊では震動エネルギーに対して流動距離・崩壊土量が極端に小さいため、等価摩擦係数 μ が崩壊前斜面勾配 β_{be} を上回るケースが見て取れる。

図 11 は崩壊土体積 V と等価摩擦係数 μ の関係である。ここで白抜き星印は既往の大規模崩壊についての分析結果である⁹⁾。この図より、体積が小さい小規模崩壊では等価摩擦係数 μ は大きく、崩壊土体積 V が大きくなるほど摩擦係数 μ が小さくなる傾向が読み取れる。全体的に大きなスケールで見ても既往の大規模崩壊との整合性がよいことが分かり、特に受け盤斜面のタイプ B, 岩手宮城のタイプ 1 についてはデータの連続性がよく、タイプ A, C についてはそれよりも μ が低くなる傾向が読み取れる。また、中越と岩手宮城を比較すると、 $V = 10^5 \text{ m}^3$ あたりから小規模崩壊になるにつれて互いの傾向はそれていく。逆に、中越と岩手宮城ともに大規模崩壊になるほど、互いの取りうる値は類似する結果が得られている。

4. まとめ

まず逆解析以前に、新潟県中越地震と岩手宮城内陸地震で多数の崩壊斜面の流動距離や斜面勾配などの整理により以下の知見が得られた。

- 全体的にも崩壊タイプごとにも、崩壊前斜面勾配の小さい斜面ほど流動距離が大きくなる予想外の傾向が得られた。

次に、エネルギー法により等価摩擦係数を逆計算することにより以下の知見が得られた。

- 体積の大きな大規模崩壊ほど等価摩擦係数 μ は小さくなる。
- 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

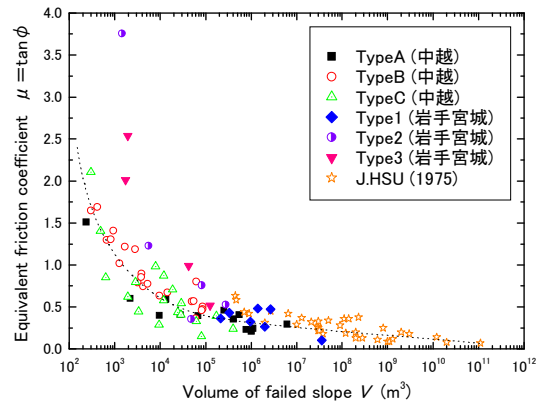


図-11 崩壊土体積と等価摩擦係数の関係

される傾向がある。

- 逆算した等価摩擦係数は初期斜面勾配とともに増加する傾向が読み取れ、斜面勾配が既往の災害履歴を反映して決定されたことを示唆している。
- 新潟県中越地震タイプ A, C の緩勾配斜面、岩手宮城内陸地震タイプ 1 の剛体的滑りでは崩壊前斜面勾配 β_{be} を等価摩擦係数 μ が下回る傾向となり、地震を契機に摩擦係数が低減したと考えられる。
- 新潟県中越地震と岩手宮城内陸地震を比較したところ、小規模崩壊では多少の傾向のズレはあるものの、大規模崩壊では等価摩擦係数と各パラメータの関係は類似の傾向を示すことがわかった。

【参考文献】

- 1) Newmark: "Effects of earthquakes on dams and embankments," Fifth Rankine Lecture, Geotechnique Vol.15, 1965, pp.139-159
- 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法の開発、土木学会論文集 C, Vol.62, 論文 No.4, 2006 年, pp. 736-746.
- 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, pp.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, pp.1159-1169.
- 6) 鈴木拓: 2009 年度中央大学大学院理工学研究科修士論文
- 7) Gutenberg, B.: The energy of earthquakes, Quarterly Journal of the Geological Society of London, Vol.CXII, No.455, 1955, pp.1-14.
- 8) Kokusho.T, and Ishizawa.T: "Energy Approach to Earthquake-Induced Slope Failures and Its Implications" journal of geotechnical and geoenvironmental engineering ASCE, 2007
- 9) Hsu.J: Catastrophic Debris Streams Generated by Rockfalls, Geological Society of America Bulletin, v.86, Doc.no.50117, 1975, pp.129-140.