

地震時斜面崩壊のエネルギー閾値の評価  
 ～2004年新潟県中越地震, 2008年岩手宮城内陸地震における分析～

Evaluation of threshold energy in slope failures

～Failure analyses during 2004 Niigata-ken Chuetsu Earthquake and 2008 Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake～

土木工学専攻 16号 斎藤 雄二郎

Yujiro SAITO

1. はじめに

本研究では斜面崩壊の発生と地震波動エネルギーの関係を検討するため、近年の地震による斜面崩壊事例の分析を行う。中でも、岩手宮城内陸地震(2008年6月14日,  $M=7.2$ ), 東北地方太平洋沖地震(2011年3月11日,  $M=9.0$ )は同エリアを含む大地震であったが、岩手宮城内陸地震では1800箇所の斜面崩壊数を記録したのに対し、東北地方太平洋沖地震での斜面崩壊数は極めて少なく両地震の斜面崩壊被害には大きな差があった。そこで既往の模型実験から得られた研究成果に基づき自然斜面に加わった地震波動エネルギーを算定し、地震波動エネルギーの面から両地震で斜面崩壊被害に差異が生じた原因を検討する。これにより地震時斜面崩壊発生予測法を開発することを目標としている。

2. 振動台実験と静的引張実験の結果

本研究室ではこれまで、斜面崩壊が始まる閾値となるエネルギーを明らかにするために様々な実験を行ってきた。図-1は既往の剛体ブロックを用いた振動台実験<sup>1)</sup>であり、図-2は振動台実験における水平慣性力による荷重条件を忠実に再現するために行った静的引張実験<sup>1)</sup>の概略図である。両実験により得られた成果を元に以下の式を得た。

$$\delta_c = \frac{\Delta E_{EQ}}{\alpha M g \tan(\phi - \theta)} \quad (1)$$

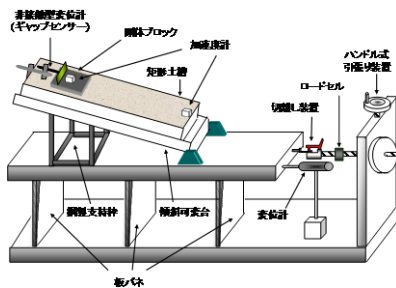


図-1 振動台実験

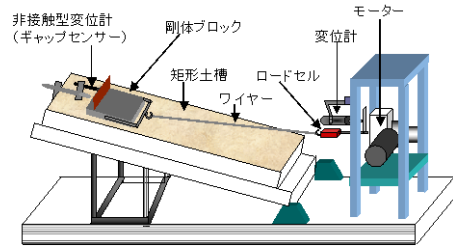


図-2 静的引張実験

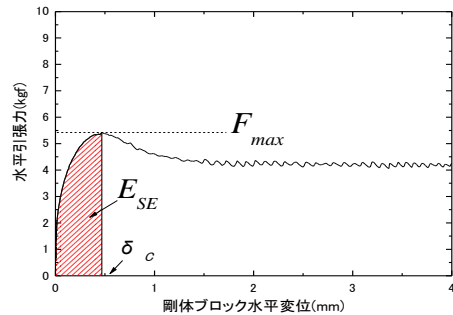


図-3 引張実験における引張力と変位の時刻歴

各変数は  $\delta_c$  : 滑動開始変位量,  $\Delta E_{EQ}$ : 1波毎の振動エネルギー,  $M$ : 剛体ブロック質量,  $g$ : 重力加速度,  $\phi$ : 摩擦角,  $\theta$ : 斜面角度である。また、図-3に示す通り水平引張力がピークに達した際の水平変位を滑動開始変位量  $\delta_c$  とし静的エネルギー  $E_{SE}$  と  $F_{max} \times \delta_c$  より求まる長方形部分のエネルギーとの比を  $\alpha$  としている。

3. 入射エネルギーと震源距離の関係

入射エネルギーと震源距離  $R$  を両対数軸上で対比したのが図-4である。ここに、式(2)は、球面波エネルギー拡散理論による式である。  $E_0$  は Gutenberg<sup>2)</sup> の式(3)によるマグニチュード  $M$  の地震の震源から放出される波動エネルギーである。

$$E_u / A = E_0 / (4\pi R^2) \quad (2)$$

$$\log E_0 = 1.5M + 11.8 \quad (3)$$

後述する斜面崩壊に使われる震動エネルギー  $E_{EQ}$  に用いるマグニチュードは図-4に示す観測された入

射エネルギーを基に(2),(3)の理論式を用いて最小二乗法により近似した. 東北地方太平洋沖地震 8.4, 岩手宮城内陸地震 6.8, 新潟県中越地震 6.6 と定めた. 今後, 東北地方太平洋沖地震では地震計解析地点を増やしより正確なマグニチュードを決定する必要がある.

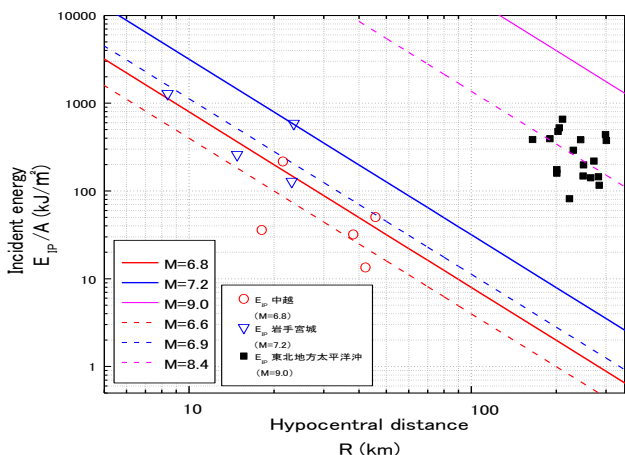


図-4 入射エネルギーと震源距離の関係

#### 4. 自然斜面への適用

先に述べた様々な模型実験から得られた知見を基に斜面崩壊事例の分析を行い, 自然斜面での斜面崩壊開始の地震波動エネルギー閾値評価法の検討を行った. まず, 斜面崩壊地点の基盤に入射するエネルギーから1波毎の振動エネルギーに相当するものを算出する必要がある. そこで, 斜面崩壊地点付近での防災科学技術研究所強震観測網 KiK-net の基盤における加速度時刻歴から速度時刻歴を算出する. なお, 今回は斜面方向の速度成分が崩壊に寄与していると考え速度成分を斜面方向とその直交方向に分解した. その後, 地震時の地盤物性非線形化を考慮した地盤インピーダンス  $\rho V_s$  [ $t/m^2 \cdot s$ ] を用いてエネルギーフラックス  $\rho V_s (du/dt)^2$  [ $kJ/m^2/s$ ] を算出し, 図-5 の模型実験が示すように加速度が斜面上流方

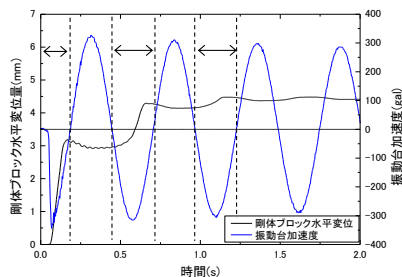


図-5 振動台加速度と剛体ブロック変位の関係

向(負の方向)に働くときに剛体ブロックに変位が生じている事から加速度が上流方向に働いている間のエネルギーフラックスと崩壊方向・崩壊直交方向の全累積エネルギーの比を求める. そして, マグニチュードと震源距離から算出した斜面崩壊に使用される震動エネルギー  $E_{EQ}$  をそれぞれに乗じた値をその間のパルスエネルギー  $\Delta E_i^*$  と定義した. このように算出したパルスエネルギー  $\Delta E_i^*$  と滑動開始時の摩擦角をパラメータとして, 既往の振動台模型実験から得られた崩壊開始変位量  $\delta_c$  の算出式 (1) を用いて滑動開始変位量を算出し, 崩壊土の厚さ  $D$  で除すことで求めた滑動開始ひずみ  $\gamma$  の値を決定した. ここで, 東北地方太平洋沖地震の崩壊前斜面角度は国土地理院の標高データから3回の計測値を平均した値を用い, 新潟県中越地震と岩手宮城内陸地震では航空レーザ測量から算出した標高データを用いた. また崩壊土厚さ  $D \cdot$  崩壊土平面積  $A$  は既往の研究結果<sup>3)</sup> (崩壊土体積  $V$ —崩壊土厚さ  $D$  の関係, 崩壊土厚さ  $D$ —崩壊土平面積  $A$  の関係) から決定した. なお定数  $\alpha=0.8$  とし, 滑動開始摩擦角  $\phi$  については崩壊前の斜面角度  $\theta$  より大きいと仮定している. また, 新潟県中越地震における斜面崩壊地点で採取した試料の一軸圧縮試験の破壊時のせん断ひずみが3%程度であることや現地にて数10cmの亀裂が入っているにも関わらず崩壊していない斜面が観測されたことなどから, 崩壊開始のひずみとして考えられる値を3~10%と仮定した.

#### 5. 解析対象地点と鉛直アレー記録

地震時慣性力により時間遅れなく発生すると考えられる受盤斜面の崩壊を対象とし, 2004年新潟県中越地震6地点, 2008年岩手宮城内陸地震7地点, 2011年東北地方太平洋沖地震4地点, 計17地点を対象とした. 以下, 東北地方太平洋沖地震で発生した栃木県



図-6 崩壊画像 (栃木県那珂川町押野)



図-7 解析地点（栃木県那珂川町押野）

表-1 KiK-net 馬頭観測地点地盤物性

層 No.	深度 (m)	層厚 (m)	土質	密度 (t/m <sup>3</sup> )	初期線形モデル		同定結果		測点位置 (m)
					Vs (m/s)	h (%)	Vs (m/s)	h (%)	
1	GL-0	4.0	表土	1.7	150	2.5	70	9	GL-0
2	GL-4.0	8.0	砂岩/砂岩貫岩互層	2.3	840	2.5	462	3.5	
3	GL-12.0	14.0	頁岩	2.5	1050	1.5	577.5	3.5	
4	GL-26.0	24.0	頁岩	2.5	1440	1.5	864	3	
5	GL-50.0	40.0	頁岩	2.6	1760	1.5	1060	2.5	
6	GL-90.0	51.5	砂岩貫岩互層	2.6	2010	1	2010	1	
7	GL-141.5		砂岩貫岩互層	2.6	2010	1	2010	1	GL-141.5
			基盤層						

那珂川町押野の崩壊を一例とし、考察を加える。図-6, 7は東北地方太平洋沖地震により崩壊した栃木県那珂川町押野での斜面崩壊である。崩壊斜面は現地調査による報告書<sup>4</sup>から幅55m, 水平長さ330m, 平均深さ4mであり、近隣住民の目撃情報から最大の揺れが発生している時に4~5秒で斜面崩壊が発生したと証言が得られている。また使用した鉛直アレー記録は1.1km離れたKiK-net馬頭(TCGH13)の地震記録を用いた。表-1にKiK-net馬頭(TCGH13)の簡易逆解析法により算出した地盤物性値を示す。

## 6. 分析結果

(i) パルスエネルギー $\Delta E_i^*$ 時刻歴; 前述した方法で表-2 に示す斜面特性値を用いてパルスエネルギーを算出し、図-8 の結果が得られた。滑動開始摩擦角 $23^\circ$ , 114.81s~114.89s の加速度が負を示す時間

幅で崩壊開始ひずみは $\gamma=3\%$ を上回り $\gamma=6.5\%$ を示した。この時間は目撃者が崩壊発生を証言した時間116秒とほぼ整合しており、パルスエネルギーによる斜面安定評価法の可能性を示唆している。しかし、表-3 に示す様に他の斜面崩壊地点においては時間ずれが生じていることから今後、さらに解析地点数を増やす必要がある。

表-2 那珂川町押野斜面崩壊の物性<sup>4</sup>

崩壊前斜面勾配 $\theta$ [°]	$E_{EG}/A$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	崩壊土質量M [t]
22	192.5	2880
崩壊土面積A [m <sup>2</sup> ]	崩壊土厚さD [m]	等価な摩擦角 $\phi$ [°]
720	4	12.7

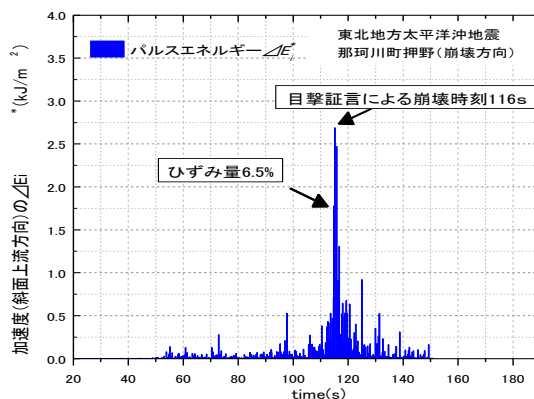


図-8 パルスエネルギー $\Delta E_i^*$ 時刻歴(那珂川町押野)

(ii) 崩壊開始ひずみが3%を超えた時の $\Delta E_i^*$ と崩壊土厚さDの関係; 図-9 はKiK-net 観測点の地震波から導出した17地点における斜面崩壊のパルスエネルギー $\Delta E_i^*$ と崩壊土厚さDの関係を示している。はじめに崩壊開始エネルギー閾値 $\Delta E_{cr}$ に着目すると、 $\Delta E_{cr}$ は式(1)の $\Delta E_{EQ}$ を崩壊斜面の面積Aで除し、質量 $M = AD$ として次式により表される(D=滑り面深さ)。

$$\Delta E_{cr} = \frac{\Delta E_{EQ}}{A} = \rho D^2 g \gamma \tan(\phi - \theta) \quad (4)$$

$$\Delta E_{cr} = \rho D^2 g \gamma \tan[\tan^{-1}(c/\sigma_v + \tan(\theta + 2^\circ)) - \theta] \quad (5)$$

表-3 東北地方太平洋沖地震の崩壊開始ひずみと時間誤差

崩壊地点	$\Delta E_i^*$ により算出		目撃者証言により算出		$\Delta E_i^*$ により算出した崩壊開始時間と目撃証言による崩壊開始時間誤差
	崩壊開始時間	ひずみ量 $\gamma$ (%)	崩壊開始時間		
岡ノ内斜面崩壊(長沼)	57	3.9	130~140		72~82
葉の木平斜面崩壊(矢吹基盤入力)	80	3.3	100~110		20~21
那珂川町押野斜面崩壊(馬頭基盤入力)	115	6.5	120~121		1.5
烏山市神長斜面崩壊(馬頭基盤入力)	98	4.9			

式(4)は粘着力  $c$  を考慮していないパルスエネルギー  $\Delta E_{cr}$  であり、式(5)は式(4)において粘着力を考慮したパルスエネルギー  $\Delta E_{cr}$  を示している。密度は  $\rho=1.8[t/m^3]$ 、 $\phi-\theta=2^\circ$ 、式(5)では粘着力  $c=0.5[tf/m^2]$  と仮定した。また  $\sigma'_v = \rho D$  (滑り面深さでの鉛直有効応力)と定めている。すなわち、層厚  $D$  の2乗に比例して  $\Delta E_{cr}$  は大となる。

ここで地震波から導出した  $\Delta E_i^*$  と崩壊土厚さ  $D$  を比較すると、各地震共に崩壊土厚さ  $D$  が厚くなるに従い  $\Delta E_i^*$  は大となる傾向があり、崩壊開始エネルギー閾値の理論式(4)、(5)における傾向とほぼ整合していると考えられる。今後地点数を増やし、より明瞭な傾向を算出する必要がある。

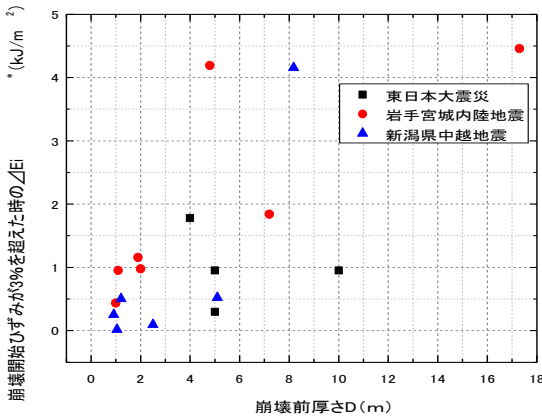


図-9 崩壊開始ひずみが3%を超えた時の  $\Delta E_i^*$  と崩壊土厚さ  $D$  の関係 ( $c=0$ ,  $\phi-\theta=1^\circ$ )

(iii)  $\Delta E_i^*$  と理論式から算出した  $\Delta E_{cr}$  の関係：図-10はKiK-net観測点の地震波から導出した17地点における斜面崩壊のパルスエネルギー  $\Delta E_i^*$  と崩壊開始エネルギー閾値  $\Delta E_{cr} = \Delta E_{E0}$  を比較している。ここで、目撃証言のない崩壊における斜面崩壊開始エネルギー閾値を推測するため、葉ノ木平斜面崩壊に着目する。粘着力を考慮したパルスエネルギーの式(5)から  $\Delta E_{cr} = 3.2[kJ/m^2]$  である。一方「揺れ始めから30秒～40秒で崩壊した」という近隣住民の目撃証言から地震波から導出したパルスエネルギーは  $\Delta E_i^* \approx 3.4[kJ/m^2]$  で崩壊が発生したと考えられる。そこで図-10においてこの座標点と原点とを結ぶ近似線を引き、目撃証言のない崩壊における斜面崩壊開始エネルギー閾値を推測した。層厚の比較的厚い崩壊(図

中右側のプロット)は近似線との信憑性は高いと考えられる。しかし層厚が薄くなる程(図中左側のプロット)、最大の  $\Delta E_i^*$  に比べ非常に低いエネルギーで崩壊が開始したことになり今後より詳細に検討をする必要があることを示した。

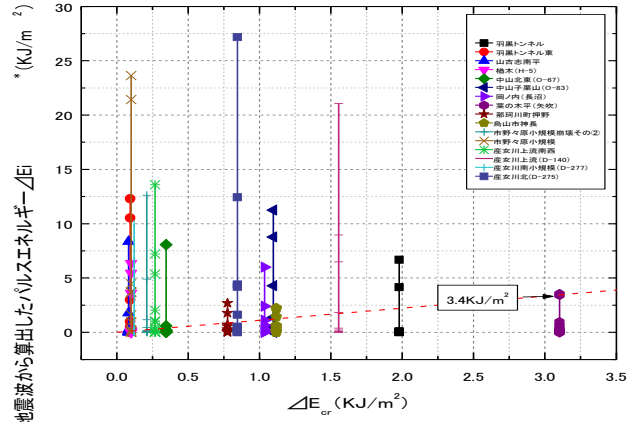


図-10  $\Delta E_i^*$  と理論式から算出した  $\Delta E_{cr}$  ( $c=0.5$ ,  $\phi-\theta=2^\circ$ ,  $\gamma=3\%$ )

## 7. まとめ

- $\Delta E_i^*$  時刻歴から計算した崩壊斜面のひずみと崩壊発生時間についての日撃情報の比較からパルスエネルギーによる評価法の可能性を示した。しかし両者の間に時間誤差が大きく生じた地点もあることからさらに検討する必要がある。
- 崩壊開始ひずみ3%を上回る  $\Delta E_i^*$  は崩壊土厚さ  $D$  が厚くなるに従い増加する傾向が得られ  $\Delta E_{cr}$  の理論式とほぼ整合する結果となった。
- エネルギー的評価法の問題点として、式(4)、(5)では崩壊土厚さ  $D$  が薄くなる程  $\Delta E_{cr}$  が急激に低下し、実態を説明しにくくなる点が明らかとなった。今後粘着力の効果の観点などから検討が必要である。

## 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 2)Gutenberg,B.and Richter,C,F,1956 Earthquake magnitude,intensity,energy and acceleration(Second paper),paper).Bulletin of Seismological Society of America,Vol.46,105-14
- 3)佐々木大輝;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 4) 京都大学防災科学技術研究所現地調査報告書