

平成27年度

# 振動実験による斜面積雪の地震応答に関する研究

国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 雪氷チーム

○原田 裕介  
高橋 渉  
松澤 勝

冬期の地震に伴う雪崩が、被災状況の把握や救助活動の妨げになるため、地震時の雪崩発生危険度の評価手法を提案することが防災・減災に資するものと考えられる。本研究では、斜面積雪の地震応答を把握するための振動実験を行った。その結果、斜面積雪の応答倍率は、短周期で積雪の高さの増加とともに比例的に大きくなること、ざらめ雪の方がしまり雪よりも応答倍率は大きく、かつ湿雪の方が乾雪より大きいことが確認された。

キーワード：振動実験、斜面積雪、地震応答

## 1. はじめに

大規模な地震が発生した場合、被災状況の把握や救助活動および避難行動を迅速に行う必要がある。積雪期においては、地震によって発生する雪崩が、被災状況の把握や救助活動の妨げになる可能性がある。2011年3月に発生した長野県北部地震<sup>1)</sup>、2013年2月に発生した栃木県北部地震<sup>2)</sup>によって、雪崩による道路の通行止めが発生した。いくつかの自治体の地域防災計画では、積雪期の地震により雪崩が発生する可能性があることが明記されている<sup>3)</sup>。しかし、地震時の雪崩発生条件は未解明であり、雪崩発生の危険性を判断しうる積雪条件や地震動条件は示されていない。そこで、地震による雪崩の発生機構や発生条件を明らかにし、地震時の雪崩発生危険度の評価手法を提案することが、防災・減災のための対策強化に資するものと考えられる。

これまで、雪崩発生の誘因となる地震動を考慮した斜面積雪の安定度に関する解析手法が提案されている<sup>4)~6)</sup>。また、松下ら<sup>7)</sup>は、雪崩発生箇所<sup>8)</sup>の積雪観測データが得られている事例<sup>1)~6)</sup>の整理を行い、斜面積雪の安定度の考え方に基づいて、地震による雪崩発生条件を検討している。これらの解析手法では、地震動による地表面の加速度がそのままの大きさを斜面積雪に作用すると仮定されている。しかし、地震動によっては、斜面積雪の加速度が地表面の加速度より大きくなる可能性が考慮される。

本研究では、振動実験により斜面積雪の地震応答を調べ、その特徴をとりまとめた。また、振動実験の結果を用いて、地震による雪崩発生危険度について推定した。なお、ここでは横揺れの地震動のみを対象とし、せん断破壊による雪崩を想定する。

## 2. 実験方法

斜面積雪の応答実験は、寒地土木研究所石狩吹雪実験場 (N43°12'55"、E141°23'23") で、2014および2015年の1~3月に行った。観測項目は、積雪試料 (以下、試料という) および振動台の加速度と、試料の積雪物性 (高さ・層構造・粒度・密度・硬度・雪温) である。

はじめに、実験に用いる試料を作成するための雪塊を、屋外の自然積雪から切り出した (図-1)。この雪塊を幅40cm×長さ55cm×高さ40~70cm程度の平行四辺形 (対角60°、120°) の試料に整形した。建屋内に設置した振動台 (2m×2m; SPTDU-20K085L-50T) 上にL型鋼材により強固に固定した勾配30°の合板製斜面模型上 (幅50cm×長さ55cm) に、積雪層構造が斜面にほぼ平行になるように設置した (図-1)。また、積雪底面の滑りを防ぐため、斜面には長さ5cmの釘を縦横6cm間隔で打ち付けた。加えて、加速度 (正) 側のL型鋼材を透明アクリル板と万力で固定のうえ、試料前面との空間に試料と同質の雪を充填してふさいだ。つぎに、試料内に3~6個の加速度計 (18×18×24mm<sup>3</sup>、40g; ASW-5A) を鉛直高さ方向に約10~20cm間隔で挿入した。なお、実験条件によっては、試料の重量を増加させることを目的に、質量15kgの格子状のウェイト (幅30cm×長さ45cm×高さ5.3cm) を、質量0.075kg本のコの字型の固定ピン (幅8cm×長さ15cm) 32本を用いて、試料の上部に固定した。

試料および加速度計の設置後、図-1に示す水平方向に、振動台の加速度を一定とした周波数1~10Hzのスウィープ加振を3分間実施し、試料を加振した。振動台に入力する加速度の範囲は、0.1G~0.9G (1G=9.81m/s<sup>2</sup>) とした。試料および振動台の加速度は、0.04秒間隔で測定した。

振動実験の終了後、試料の積雪物性をそれぞれ計測した。その際、積雪観測ガイドブック「4.積雪断面観測」

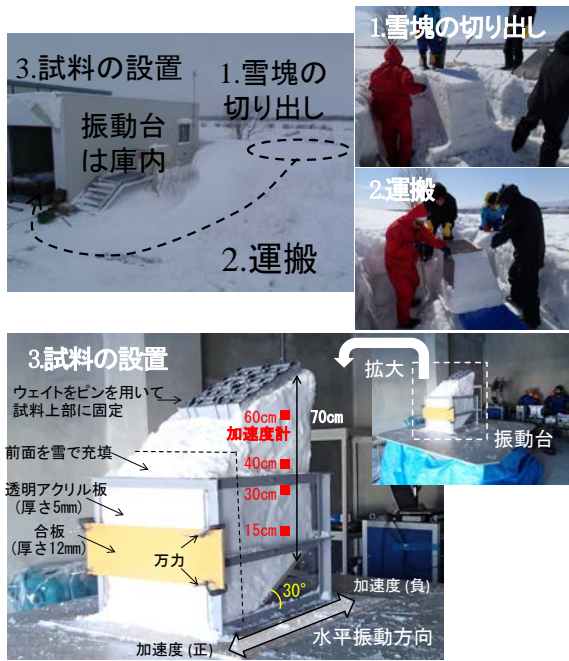


図-1 振動実験の様子

9)の手法にしたがった。計測項目と使用機器(括弧内)は、試料の高さ(折尺)、層構造・雪質・粒度(折尺、ルーペ(×10)、粒度ゲージ)、密度(100cm<sup>3</sup>角型密度サンプラー、電子天秤)、硬度(プッシュプルゲージ(デジタル式荷重測定器))、気温と雪温(サーミスタ温度計)である。

### 3. 実験結果および考察

#### (1) 試料の応答特性

振動実験は、様々な試料の条件および加速度により計194回行った。その結果、振動実験で得られた斜面積雪の固有振動数をみると、いずれの斜面積雪においても測定した範囲では10Hz(固有周期0.10s)となっており、試料と振動台との加速度比(以下、応答倍率という)は入力加速度または重量が大きい場合、また試料の上層ほど大きい値を示した。振動数と応答倍率との関係の一例を図-2に示す。

#### (2) 雪質および高さ別の応答倍率

振動実験の結果を用いて、試料ごとに雪質、積雪平均密度(kg/m<sup>3</sup>)と平均硬度(kN/m<sup>2</sup>)、積雪深(m)、試料全体の重量(kg)、ウェイトを考慮した換算積雪深(m)(ウェイトと試料の重量をもとに算定)、入力加速度(G)、ならびに加速度計の応答倍率の最大値(10Hzの応答倍率)を記載した、測定結果のプロファイルを800通り作成した。本研究では、実験時の試料のうち50%以上を占める雪質と乾湿をもとに、しまり雪(乾雪)、しまり雪(湿雪)、

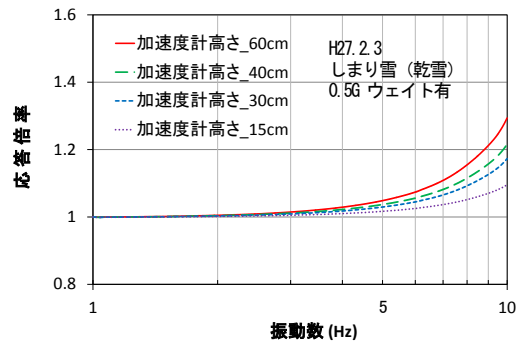


図-2 応答倍率と振動数の関係(例)

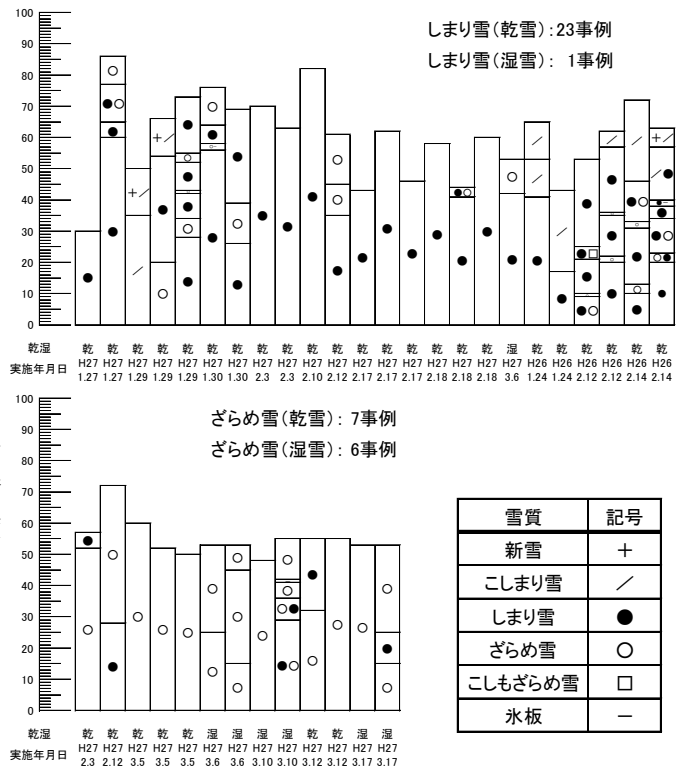


図-3 試料の層構造, 乾雪・湿雪, 実施年月日

ざらめ雪(乾雪)、ざらめ雪(湿雪)に分類した(図-3)。また、実験時の加速度計高さを10~20cm、30~39cm、40~49cm、50~60cmに分類した。

雪質および加速度計高さごとに入力加速度に対する応答倍率の最大値を目的変数、積雪平均密度・平均硬度・積雪深・試料全体の重量・換算積雪深・入力加速度を説明変数とした項目別の単相関係数を求めたところ、いずれの雪質とも入力加速度(G)と重量(kg)との単相関係数が高かった<sup>10)</sup>。そこで、表-1に示す重回帰式を雪質および加速度計の高さごとに作成した。ここで、Yは応答倍率の最大値、x<sub>1</sub>は入力加速度(G)、x<sub>2</sub>は重量(kg)である。なお、しまり雪(湿雪)は事例数が少ないため、本解析から除外した。

また、各雪質における加速度計の高さ30~39cmのデータを用いて、10Hzにおける応答倍率を100%とした場合の応答倍率の増加割合の平均値を0.5Hzごとに算出し、これらの関係を求めたところ表-2に示す結果を得た。

### (3) 斜面積雪の応答倍率の試算

表-1 を用いて、任意の加速度(G)を  $x_1$  に、雪質ごとの平均的な積雪重量を  $x_2$  に代入して、応答倍率の最大値を算出した。積雪重量は体積と密度を乗じて求められる。体積は、実験時の試料の断面積の平均値(0.176m<sup>2</sup>)と、換算積雪深の平均値(しまり雪(乾雪) 0.689m、ざらめ雪(乾雪) 0.658m、ざらめ雪(湿雪) 0.624m)を乗じて求めた。密度は、雪氷辞典<sup>11)</sup>を参照し、しまり雪(乾雪)がしまり雪・こしまり雪の密度 150~500kg/m<sup>3</sup>の平均である 325kg/m<sup>3</sup>、ざらめ雪(乾雪)はざらめ雪の密度 300~500kg/m<sup>3</sup>の平均である 400kg/m<sup>3</sup>、ざらめ雪(湿雪)は上記密度の最大値である 500kg/m<sup>3</sup>を採用した。これらを用いて、しまり雪(乾雪)は 39.4kg、ざらめ雪(乾雪)は 46.3kg、ざらめ雪(湿雪)は 54.9kg を平均的な積雪重量とした。表-1 の重回帰式と加速度、上記で求めた平均

的な積雪重量を用いて、加速度計の高さごとに応答倍率を求め、プロットした(図-4)。あわせて、入力加速度ごとに、プロットされた応答倍率を線形で近似した。その結果、加速度計の各高さで応答倍率との間に比例関係が見られ、上層ほど加速度が増加していた。このことから、雪質によらず斜面積雪を想定した試料の固有モードは 1 次モードであることがわかる。また、加速度 0.2G では、加速度計高さに対する応答倍率の分布形状はしまり雪、ざらめ雪ともほぼ同様である。一方、0.4G 以上では、ざらめ雪の応答倍率がしまり雪よりも大きくなり、湿雪の応答倍率が乾雪より大きい結果となった。

図-4で得られた結果について、雪質と乾湿により応答倍率に差異が出た原因を以下に推察する。積雪は、積雪に作用する力が小さく、かつ作用時間が短い場合は、弾性体とみなすことができる。本振動実験では水平方向に加振してせん断力を与えているので、それに対する弾性(剛性)は次のように考えられる。しまり雪(乾雪)の場合、密度の増加により硬度やせん断強度が増加する<sup>10)</sup>。一方、ざらめ雪は、乾き雪の場合しまり雪よりもせん断強度が小さいため<sup>12)</sup>、水平力に対するせん断ひずみがしまり雪よりも大きくなる。加えて、重量も影響を与えるため、入力加速度が大きくなるにしたがい、しまり雪よりも応答倍率が大きくなったと考えられる。また、濡れ雪(湿雪)になると、この傾向がより顕著になった。

表-1 応答倍率の最大値Yと、入力加速度 $x_1$ および重量 $x_2$ との関係

雪質	加速度計高さ	平均高さ	N	重回帰式	R <sup>2</sup>
し まり 乾 雪	10~20cm	15.7cm	140	$Y=0.116x_1+0.003x_2+0.944$	0.452
	30~39cm	30.3cm	97	$Y=0.190x_1+0.005x_2+0.919$	0.449
	40~49cm	40.7cm	91	$Y=0.257x_1+0.007x_2+0.868$	0.487
	50~60cm	54.4cm	77	$Y=0.399x_1+0.007x_2+0.844$	0.407
ざ ら め 乾 雪	10~20cm	15.0cm	51	$Y=0.261x_1+0.005x_2+0.808$	0.513
	30~39cm	30.0cm	44	$Y=0.513x_1+0.008x_2+0.676$	0.778
	40~49cm	40.8cm	49	$Y=0.546x_1+0.009x_2+0.639$	0.523
	50~60cm	50.4cm	39	$Y=0.677x_1+0.011x_2+0.524$	0.539
ざ ら め 湿 雪	10~20cm	15.0cm	55	$Y=0.357x_1+0.006x_2+0.761$	0.582
	30~39cm	30.0cm	48	$Y=0.577x_1+0.009x_2+0.630$	0.554
	40~49cm	40.0cm	48	$Y=0.725x_1+0.011x_2+0.543$	0.607
	50~60cm	50.0cm	41	$Y=1.043x_1+0.012x_2+0.442$	0.629

※しまり雪(湿雪)は事例数が少ないため、本解析から除外した。

表-2 10Hzを100%とした場合の応答倍率の増加割合Y(%)と、周波数xとの関係

雪質	N	関係式	R <sup>2</sup>
しまり雪(乾雪)	97	$Y=0.41x^{2.41}$	0.989
ざらめ雪(乾雪)	44	$Y=0.45x^{2.34}$	0.992
ざらめ雪(湿雪)	48	$Y=0.41x^{2.37}$	0.994

※加速度計高さ30-39cm、1.0-10Hzのデータによる。

## 4. 地震による雪崩発生危険度の推定

ここでは、3章の振動実験の結果、および過去の地震による雪崩発生時の積雪観測データを用いて、地震動を考慮した斜面積雪の安定度SI(Stability Index)を評価のうえ、雪崩発生危険度を推定した。

### (1) 斜面積雪の安定度

自然状態の斜面積雪の安定度SIは、式(1)に示すように、対象とする積雪層のせん断強度 $\Sigma_s$ とそれに働くせん断

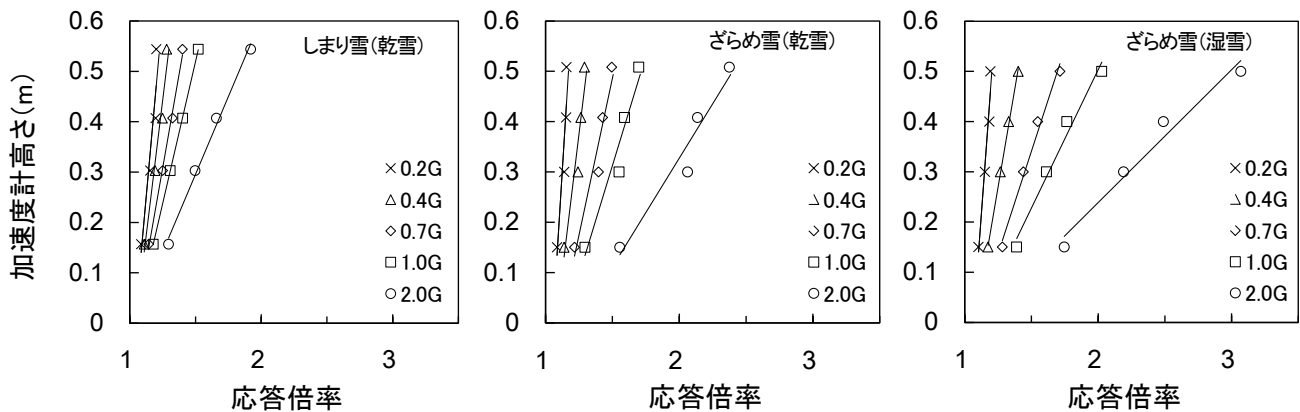


図-4 実験結果に基づく斜面積雪の高さと応答倍率との関係 (10Hz)

応力 $\sigma_n \sin \psi$ の比(図-5(a))によって表され、安定度 $SI$ が小さいほど斜面積雪が不安定であり、斜面における積雪安定性評価および雪崩発生の目安として用いられる<sup>9),13)</sup>。

$$SI = \frac{\Sigma_s}{\sigma_n \sin \psi} = \frac{C + \sigma_n \cos \psi \tan \phi}{\sigma_n \sin \psi} \quad (1)$$

ここで、 $\Sigma_s$ は弱層など対象とする積雪層のせん断強度(N/m<sup>2</sup>)、 $\sigma_n$ は単位体積あたりの弱層上の積雪荷重(N/m<sup>2</sup>)で、弱層上の積雪層の厚さ $D$ (m)と密度 $\rho$ (kg/m<sup>3</sup>)および重力加速度 $g$ (m/s<sup>2</sup>)から求められる( $\sigma_n = \rho g D$ )。  $\psi$ は斜面勾配(°)である。式(1)の右辺は、せん断強度 $\Sigma_s$ をモール・クーロンの破壊条件で表したものである。  $C$ は積雪粒子の凝集力(N/m<sup>2</sup>)で、ここではせん断強度指数 $SFI$ (Shear Frame Index)の測定値を用いることとする。また、 $\tan \phi$ は雪粒子の内部摩擦角である。これ以降の $SI$ の計算において内部摩擦角 $\tan \phi$ は、新雪、こしまり雪、こしもざらめ雪の場合において $\tan \phi = 0.21$ とし、それ以外の雪質では0とする<sup>14)</sup>。

雪崩の発生と式(1)の斜面積雪の安定度 $SI$ との関係について、実際の斜面では積雪側面等の繋がりによる影響などがあるため、式(1)の斜面積雪の安定度 $SI$ における雪崩発生の臨界値は必ずしも1とはならない<sup>9)</sup>。そのため、実際の雪崩発生事例を用いた安定度 $SI$ の臨界値の検討が行われている。例えば、カナダでは、安定度 $SI$ の雪崩発生の目安として、1.5程度の値が示されている<sup>15)</sup>。また、北海道の道路における雪崩事例について、雪崩発生時の安定度 $SI$ を積雪変質モデルを用いて調べた研究<sup>13)</sup>によると、雪崩の発生は積雪安定度 $SI$ が2.5以下の条件で発生する傾向にあり、2.0以下に低下すると雪崩発生数が著しく増加する。よって、ここでは斜面積雪の安定度2.0以下を雪崩発生の目安と考え、1.5~2.0を発生危険度小、1.0~1.5を発生危険度中、1.0以下を発生危険度大とする。

## (2) 地震動を考慮した斜面積雪の安定度

地震時の斜面積雪の安定度 $SI_E$ は、式(1)に地震動の水平震度 $a$  (図-5(b)) を外力として加えた式(2)により表される<sup>1),2),4),5)</sup>。

$$SI_E = \frac{C + \sigma_n (\cos \psi - a \sin \psi) \tan \phi}{\sigma_n (\sin \psi + a \cos \psi)} \quad (2)$$

式(2)の水平震度 $a$ は、重力加速度 $g$ (gal)に対する地震動の水平加速度(gal)の比、すなわち水平加速度( $G$ )である。

水平震度 $a$ は、地震時の盛土の安定性評価<sup>16)</sup>や道路施設の耐震性に関する検討<sup>17)</sup>で用いられており、本研究でも地震動の水平震度 $a$ を用いて地震時の雪崩発生条件を検討する。

3章で得た斜面積雪の固有モードが、振動実験条件よりも大きい積雪深でも成り立つと仮定すると、任意の積雪深さ $H'$ および周波数 $f$ の水平震度 $a'$ は式(3)により表される。

$$a' = a \{ (SR_{10Hz} - 1) IR + 1 \} \quad (3)$$

ここで、 $SR_{10Hz}$ は10Hzにおける斜面積雪高さ $H'$ の応答倍率(表-1、図-4)、 $IR$ は10Hzを100%とした場合の応答倍率の増加割合(表-2)を示す。

式(2)に加えて、松澤ら<sup>5)</sup>は、地震時の盛土法面の安全率評価方法を参考として、地震動と斜面積雪上部に作用した雪粒子の結合による張力(引張破壊強度)を考慮した斜面積雪の安定度 $SI_E'$ を提案した。本研究では、松澤らの式に、上記の水平震度 $a'$ を考慮した式(4)を提案する。

$$SI_E' = \frac{CL + \sigma_n L (\cos \psi - a' \sin \psi) \tan \phi + \Sigma_t D}{\sigma_n L (\sin \psi + a' \cos \psi)} \quad (4)$$

ここで、 $L$ は弱層より上部の積雪層の長さ(m)、 $\Sigma_t$ は雪の引張破壊強度(N/m<sup>2</sup>)、 $D$ は弱層より上部の積雪の厚さ(m)である。

## (3) 地震発生時の斜面積雪の安定度

松下らは、地震による雪崩発生条件を検討するために、地震によって発生した事例のうち、雪崩の種類や積雪密度等の積雪観測データが示されている事例を整理した<sup>8)</sup>。本研究では、そのうち、表層雪崩かつ防災科学研究所強震観測網(K-NET、KiK-net)より最大加速度(gal)と周波数(Hz)が得られている前述の地震について斜面積雪の安定度を試算した(表-3)。なお、雪崩すべり面より上部

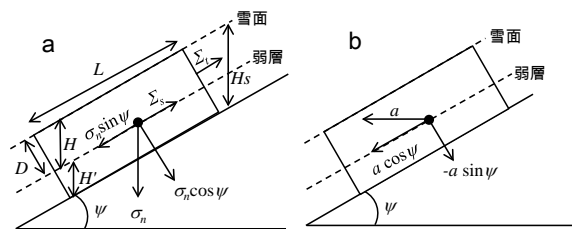


図-5 斜面積雪に作用する力

(a)斜面積雪の荷重と強度、(b)地震動の水平震度

表-3 地震によって発生した雪崩事例の条件

事例	地震				強震度観測所と雪崩発生箇所との距離(km)	雪崩種類	斜面勾配 $\psi$ (°)	雪崩すべり面の積雪			雪崩すべり面より上部の積雪				雪崩すべり面より下部の積雪		積雪観測場所(備考)	
	発生年月日と震源地	規模	水平震度 $a$ <sup>※1</sup>	周波数 $f$ <sup>※1</sup> (Hz)				長さ $L$ (m)	雪質	凝集力 $C$ (N/m <sup>2</sup> )	荷重 $\sigma_n$ (N/m <sup>2</sup> )	厚さ $D$ (m)	深さ $H$ (m)	密度 $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	主体となる雪質	深さ $H'$ (m)		密度 $\rho'$ (kg/m <sup>3</sup> )
2011長野県北部①	2011/3/12 長野県北部	6.7	0.72	11.2	15	35	10 <sup>3B2</sup>	ざらめ雪	1580	1178	0.61	0.75	197 <sup>※2</sup>	ざらめ雪	1.62	197 <sup>※3</sup>	ざらめ雪(湿雪)	新潟県十日町市孟地
2011長野県北部②					6	25	10 <sup>3B2</sup>	ざらめ雪	780	1813	0.56	0.62	330 <sup>※2</sup>	ざらめ雪	2.04	330 <sup>※3</sup>	ざらめ雪(湿雪)	新潟県十日町市野中
2013栃木県北部①	2013/2/25 栃木県北部	6.3	1.25	4.3	4	42	9.5	こしまり雪	1510	744	0.41	0.55	185	しまり雪	0.99	316	ざらめ雪(乾雪)	栃木県日光市奥鬼怒
2013栃木県北部②					4	42	9.5	こしまり雪	2890	1626	0.74	1.00	224	しまり雪	0.66	224	ざらめ雪(乾雪)	栃木県日光市奥鬼怒

※1 水平震度 $a$ は最大値、周波数 $f$ は水平震度最大値での値を示す

※2 文献<sup>1)</sup>の図からの読み取り値。

※3 データがないため、上部の積雪の密度を代用した<sup>1)</sup>。

の積雪は、長野県北部地震はざらめ雪<sup>1)</sup>、栃木県北部地震はしまり雪が主体のため<sup>2)</sup>、ここではWatanabe<sup>18)</sup>の各雪質における引張破壊強度の関係式を用いた(式(5a, 5b))。

$$\Sigma_t = 7.78 \times 10^{-3} \rho^{2.60} (\text{ざらめ雪}) \quad (5a)$$

$$\Sigma_t = 3.40 \times 10^{-4} \rho^{3.24} (\text{しまり雪}) \quad (5b)$$

上記をもとに、各地震誘発雪崩発生事例の斜面積雪安定度を計算した。図-6左は、応答倍率を考慮した水平震度 $a'$ を用いた安定度 $SI_E'$ (式(4))と、考慮しない安定度 $SI$ (式(1))を比較したものである。これらの事例のうち、 $SI$ (図の横軸)が1.5以下(発生危険度中以上)の事例があり、地震発生前から斜面積雪が不安定な状態にあったと考えられる<sup>1)</sup>。一方、 $SI$ が1.5以上の事例では、 $SI_E'$ は1.5以下となった。つまり、これらの事例は、地震発生前は比較的安定していた斜面積雪が、外力として地震動が加わることで不安定となり、雪崩が発生したものと考えられる。また、図-6右は、式(4)による $SI_E'$ と、式(4)に地震動の水平震度 $a$ を代入した $SI_E'$ (松澤ら<sup>5)</sup>の式)を比較したものである。両者の違いは、求められる $SI_E'$ の差として表され、長野県北部地震(周波数11.2Hz)では①が0.95、②が0.99低下した。また、栃木県北部地震(周波数4.3Hz)では、①が0.15、②が0.11低下した。以上より、地震動が短周期である場合、また弱層より下部の積雪深 $H'$ が大きい場合(表-3)に低下量は大きくなることが示された。

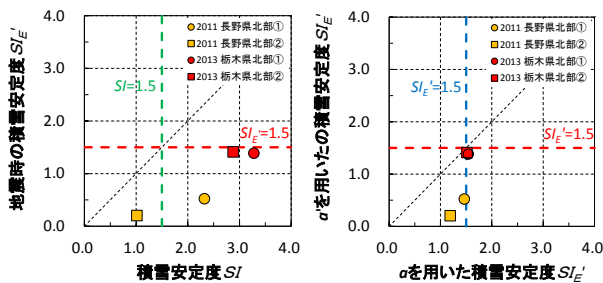


図-6 斜面積雪の安定度の計算結果 左:応答倍率を考慮した水平震度 $a'$ を用いた安定度 $SI_E'$ (式(4))と考慮しない場合の $SI$ (式(1))との比較 右:式(4)において $a'$ を代入した $SI_E'$ と $a$ を代入した $SI_E'$ との比較

#### (4) 積雪深と水平震度からみた雪崩発生危険度の試算

雪崩発生条件を示す場合、斜面積雪の安定度を指標にすると、積雪観測データに基づいて斜面積雪の安定度をその都度見積もる必要があり実用的ではないと考えられる。ここでは、斜面積雪の安定度 $SI_E'$ が2.0以下になった場合に雪崩発生の危険度が段階的に高くなると考え、式(4)をもとに斜面積雪深 $H_s$ (m)(図-5(a)参照)を指標として、雪質を考慮した地震時の雪崩発生危険度を示すためのケーススタディを行った。ここでは面発生乾雪表層雪崩を想定し、図-5(a)に示すモデル斜面について、しまり雪層内に弱層となるこしもざらめ層が存在し、周波数

10Hzの地震動(横揺れ)によってせん断破壊することによりその弱層から上部の積雪(しまり雪層)が流下する雪崩が発生すると仮定する。密度は、しまり雪が $325\text{kg/m}^3$ (3章(3)参照)、こしもざらめ雪は密度 $200\sim 400\text{kg/m}^3$ の最小値である $200\text{kg/m}^3$ とする<sup>11)</sup>。また、斜面勾配 $\psi$ は、面発生乾雪表層雪崩の多くが $30\sim 45^\circ$ で発生し、その頻度のピークは $40^\circ$ 付近にあることから<sup>19)</sup>、ここでは $40^\circ$ を採用した。加えて、式(4)で用いられる各変数を以下のように設定した。

積雪層内の弱層における雪粒子の凝集力 $C$ ( $\text{N/m}^2$ )は、ここではWatanabe<sup>18)</sup>による関係式を用いた(式(6))。

$$C = 3.56 \times 10^{-5} \rho^{3.36} (\text{こしもざらめ雪}) \quad (6)$$

式(6)にこしもざらめ雪の密度 $200\text{kg/m}^3$ を代入し、 $C = 1918\text{N/m}^2$ を求めた。

弱層より上部の積雪の厚さ $D$ (m)は、McClung and Schaererによる面発生乾雪雪崩の200件の事例から得た、スラブ(弱層より上部の積雪)厚さの出現頻度分布の大よそ平均値である $0.60\text{m}$ を採用した<sup>19)</sup>。

単位体積あたりの弱層上の積雪荷重 $\sigma_n$ ( $\text{N/m}^2$ )は、しまり層(密度 $325\text{kg/m}^3$ )に、弱層より上部の積雪の厚さ $D = 0.7\text{m}$ と重力加速度 $g$ を乗じて、 $\sigma_n = 2230\text{N/m}^2$ とした。

弱層より上部の雪の引張破壊強度 $\Sigma_t$ ( $\text{N/m}^2$ )は、しまり雪における引張破壊強度を求める式(5b)をもとに、 $\Sigma_t = 46771\text{N/m}^2$ を求めた。

弱層から上部の積雪層の長さ $L$ (m)は、北海道開発局設計要領<sup>20)</sup>などに記載されている、雪崩予防柵の斜面方向の設置間隔を算定する式(7)を採用した。

$$L = \frac{2 \cdot \tan \psi}{\tan \psi - \tan \delta} \cdot H_s \quad (7)$$

ここで、 $\psi$ は斜面勾配で $40^\circ$ 、 $\delta$ は雪と地面の摩擦角( $^\circ$ )で $\tan \delta$ は $0.5$ を採用した<sup>20)</sup>。また、任意の積雪深さ $H'$ および周波数 $f$ の水平震度 $a'$ は式(3)および表-1、図-4により求めた。なお、任意の積雪深さ $H'$ は式(8)で求められる。

$$H' = H_s - \frac{D}{\cos \psi} \quad (8)$$

図-7は、周波数10Hzにおける斜面積雪の安定度 $SI_E'$ が1.0、1.5および2.0となるとき積雪深 $H_s$ と地震動の水平震度 $a$ との関係を示したものである。図中の曲線の上側が、斜面積雪の安定度 $SI_E'$ が2.0以下となり、積雪深の増加に伴い $SI_E'$ が1.0以下となるにつれて雪崩発生の可能性が段階的に高くなることが示された。また、水平震度が大きくなるにつれて、雪崩発生危険度が考慮される積雪深が小さくなった。また、気象庁<sup>21)</sup>によれば、均一な揺れが数秒間続くと仮定した時、地震波の周期、加速度と地震との関係を示している。参考として、10Hzに着目した場合の震度階級と加速度の関係を表-4に示す。併せて、各震度階級の水平震度 $a$ の平均値を算出のうえ、 $SI_E'$



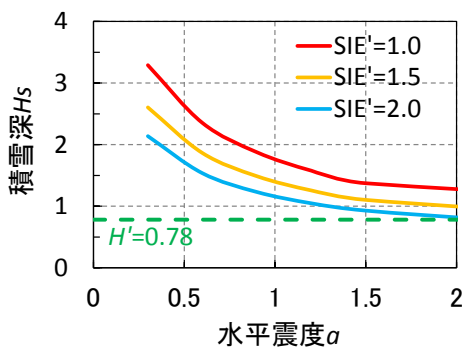


図-7 積雪深  $H_s$  と地震動の水平震度  $a$  との関係  
(周波数 10Hz、斜面勾配  $40^\circ$ 、面発生乾雪表層雪崩)

表-4 震度階級と加速度、水平震度  $a$  に応じた積雪深  $H_s$   
(周波数 10Hz、斜面勾配  $40^\circ$  面発生乾雪表層雪崩)

震度階級	加速度(gal) (10Hz)	水平震度 ( $a$ ) 平均値	積雪深 $H_s$ (m)		
			危険度小	危険度中	危険度大
震度5弱	280 ~ 500程度	0.4	1.91 ~ 2.32	2.0 ~ 2.93	2.0 ~ 2.93
震度5強	500 ~ 880程度	0.7	1.43 ~ 1.74	1.5 ~ 2.20	1.5 ~ 2.20
震度6弱	880 ~ 1,050程度	1.0	1.17 ~ 1.42	1.0 ~ 1.79	1.0 ~ 1.79
震度6強	1,050 ~ 2,800程度	2.0	0.81 ~ 0.98	0.81 ~ 1.23	0.81 ~ 1.23

が2.0、1.5、1.0の場合における積雪深  $H_s$  を付記した。

以上より、斜面積雪の安定度の考え方に基づいた式(4)に各変数を設定のうえ活用することで、積雪深  $H_s$  と水平震度  $a$  を指標に地震時の雪崩発生危険度を示すことができると考えられる。また、弱層が積雪底面付近にあると考えれば、適切な摩擦係数を与えることで全層雪崩の評価も可能になると考えられる。

## 5. まとめ

本研究では、斜面積雪の地震応答に着目した振動実験を実施し、短周期で積雪の高さの増加とともに比例的に大きくなること、ざらめ雪の方がしまり雪よりも応答倍率は大きく、かつ湿雪の方が乾雪より大きいことが確認された。また、地震時における積雪深  $H_s$  と水平震度  $a$  を指標として雪崩発生危険度を推定する手法を提案した。

冬期地震時における斜面積雪条件は、地域や期間で異なる。また、雪崩が発生しやすい斜面積雪の場合は、推定値よりも小さい積雪深や水平震度により雪崩が発生することも考えられる。今後、周波数や雪質の違いによる雪崩危険度を推定し、冬期間で想定される地震による雪崩発生リスクについて取りまとめる予定である。

謝辞：本研究では、防災科学研究所強震観測網 (K-NET、KiK-net) のデータを利用した。ここに記して御礼申し上げる。

## 参考文献

- 1) 上石勲, 本吉弘岐, 石坂雅昭, 佐藤威: 2011年3月12日に発生した長野県北部地震による雪崩発生状況と地震の影響. 雪氷, 74, p.159-169, 2012.
- 2) 松下拓樹, 松澤勝, 中村浩, 2014: 地震時の雪崩発生条件に関する検討-2013年2月の栃木県北部地震の事例-, 第57回(平成25年度)北海道開発技術研究発表会.
- 3) 例えば, 新潟県防災会議: 新潟県地域防災計画, p.32, 2013.
- 4) Podolskiy, E.A., K. Nishimura, O. Abe and P. A. Chemous: Earthquake-induced snow avalanches: II. Experimental study, Journal of Glaciology, Vol.56, No.197, pp.447-458, 2010.
- 5) 松澤勝, 加治屋安彦, 伊東靖彦: 地震発生時の斜面積雪の安全率評価に関する一考察, 北海道の雪氷, 26, p.95-98, 2007.
- 6) 東浦将夫, 中村勉, 中村秀臣, 阿部修: 地震によって発生した雪崩, 国立防災科学技術センター研究報告, 21, p.103-112, 1979.
- 7) 小倉康子, 和泉薫, 宮崎伸夫, 小林俊一: 2001年1月4日新潟県中里村で発生した地震による雪崩, 新潟大学積雪地域災害研究センター研究年報, 23, p.9-15, 2001.
- 8) 松下拓樹, 中村浩, 松澤勝: 地震による雪崩発生条件に関する検討, 寒地土木研究所月報, 733, p.39-44, 2014
- 9) (社)日本雪氷学会編: 積雪観測ガイドブック, 朝倉書店, p.31-53, p.79-96, 2010.
- 10) 原田裕介, 高橋渉, 大宮哲, 松下拓樹, 千葉隆弘: 振動実験に基づく斜面積雪の地震応答, 寒地技術論文・報告集, 31, p.52-57.
- 11) (公社)日本雪氷学会編: 新版雪氷辞典, 古今書院, p.246, 2014.
- 12) 山野井克己, 遠藤八十一: 積雪におけるせん断強度の密度および含水率依存性, 雪氷, 64, p.443-451, 2002.
- 13) 西村浩一, 平島寛行, M. Lehning, 石本敬志, 河見博文: 雪崩発生危険度指標図の作成. 寒地技術論文・報告集, 21, p.244-248, 2005.
- 14) Zeidler, A. and B. Jamieson: Refinements of empirical models to forecast the shear strength of persistent weak snow layers: Part A: Layers of faceted crystals, Cold Regions Science and Technology, 44, p.194-205, 2006.
- 15) Perla, R.: Slab avalanche measurements, Canadian Geotechnical Journal, 14-2, p.206-213, 1977.
- 16) (社)日本道路協会: 地震動の作用に対する盛土の安定性の照査, 道路土工盛土工指針(平成22年度版), p.119-127, 2010.
- 17) (社)日本道路協会: 静的照査法による耐震性能の照査方法, 道路橋示方書・同解説 V耐震設計編, PP57-108, 2010
- 18) Watanabe, Z.: The influence of snow quality on the breaking strength, Sci. Rep. Fukushima Univ., 27, p.27-35, 1977.
- 19) McClung, D.M. and P. Schaerer: The avalanche handbook, 3rd Edition. The Mountaineer, Seattle, U.S.A., 2006
- 20) 北海道開発局: 平成27年度 北海道開発局設計要領 第2集 道路付帯施設, PP2-2-15, 2015.
- 21) 気象庁: 震度と加速度, <http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/kaisetsu/comp.htm>; 2016年1月5日閲覧.