

地震による雪崩発生リスク評価技術に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 24～平 27

担当チーム：雪氷チーム

研究担当者：松澤勝、西村敦史、原田裕介、
高橋渉

【要旨】

本研究では、はじめに地震による雪崩発生事例の収集と雪崩発生条件の分析を行い、斜面積雪の安定性は地震動の水平震度に依存することを見いだした。つぎに、地震動に対する斜面積雪の応答を把握するために振動実験を行った。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、雪質によらず斜面積雪の振動の固有モードは1次モードであること、斜面積雪の応答倍率はざらめ雪の方がしまり雪よりも大きく、かつ湿雪の方が乾雪より大きいことが示された。また、振動実験の結果を用いて、静的解析により積雪の安定度を考慮した地震による雪崩発生リスクを評価する技術を提案した。

キーワード：雪崩、振動実験、斜面積雪、地震応答、水平震度

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、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、地震による雪崩発生に伴う通行止めが、被災状況の把握や救助活動の妨げになる可能性がある。近年では、2011年3月に発生した長野県北部地震¹⁾、2013年2月に発生した栃木県北部地震²⁾、³⁾によって、実際に雪崩による道路の通行止めが多発した。そのため、事前に地震によって雪崩が発生することを想定することが大切であり、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。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す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、地震時の雪崩発生リスク評価技術を提案することが、防災・減災のための対策強化に資するものと考えられる。

地震によって誘発された雪崩は、アメリカ合衆国アラスカ州、ヒマラヤ西部、ロシア連邦サハリン、スイスおよび日本などで報告されている⁴⁾。これらの雪崩事例を用いて、Podolskiyら(2010)⁴⁾は、地震誘発雪崩の発生条件として、雪崩の発生と地震の規模や震源からの距離との関係を調べた。また、上石ら(2012)⁵⁾は2011年3月12日のマグニチュード6.7の長野県北部地震、松下ら(2014)⁶⁾は2013年2月25日のマグニチュード6.3の栃木県北部で発生した雪崩

の発生区で積雪断面観測を行い、それに基づいて地震時の斜面積雪の安定度について検討を行った。なお、地震動を考慮した斜面積雪の安定度に関しては、Chernoussら(2002)⁹⁾、松澤ら(2007)¹⁰⁾、Pérez-Guillénら(2014)⁸⁾による理論検討がなされている。加えて、千葉ら(2015)¹¹⁾は、斜面積雪を質点系せん断型モデルに置き換え、地震応答解析を実施している。しかし、実際の地震時の雪崩発生箇所における積雪観測データが限られるため、その検証は十分ではない¹²⁾。

地震時の斜面積雪を想定した、雪塊を使った振動実験に基づく解析事例についても報告されている。Podolskiyら(2010)¹³⁾は、地震動による積雪の破壊が弱層の引張破壊によって生じることを示している。上石ら(2012)¹⁴⁾は、弱層を含む積雪の破壊について、水平振動の方が垂直振動よりも影響を受けやすい可能性があることを示している。松下ら(2013)¹⁵⁾は、積雪層が引っ張られる方向の加速度が、圧縮される方向の加速度よりも大きいことを示している。地震による雪崩の発生機構について、先述⁸⁾⁻¹⁰⁾の地震動を考慮した斜面積雪安定度の評価手法では、地震動による地表面の加速度がそのままの大きさと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や、雪質の違いによる差異も考えられる。このことから、積雪状態と地震動との基礎的な関係を解明することが必要と考えられる。

本研究では、地震による雪崩の発生機構を解明す

るために、はじめにこれまで報告された地震による雪崩発生事例のうち、雪崩発生箇所の積雪観測データが得られている事例^{1),2),6),7)}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の事例分析を行った¹²⁾。つぎに、振動模型実験により斜面積雪の雪質や振動の違いによる地震応答性状を調べ、その特徴をとりまとめた。加えて、これらの分析および実験の結果を用いて、静的解析により積雪の安定度を考慮した地震による雪崩発生リスクを評価する技術を提案した¹⁶⁾。なお、本研究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. 事例分析

2. 1 地震時の雪崩発生事例の収集

地震によって発生した雪崩事例のうち、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のみを整理した(表-1)。すべて日本における事例であり、1978年2月の宮城県沖地震⁶⁾、2001年1月の新潟県中里村の地震⁷⁾、2011年3月の長野県北部地震¹⁾、2013年2月の栃木県北部地震²⁾によって発生した雪崩事例である。日本以外でも地震によって発生した雪崩は報告¹³⁾されているが、雪崩発生箇所の積雪観測データがないので表からは除外した。

表-1より、6事例のうち5事例が表層雪崩、残り1事例が全層雪崩であり、乾雪と湿雪がそれぞれ2事例で乾湿不明が2事例である。雪崩のすべり面の積雪は、こしもざらめ雪やぬれざらめ雪からなり、

これらは積雪の中でも強度が小さい弱層と呼ばれる。また、雪崩となって崩れた積雪の深さは、0.55~1.00m、積雪密度は160~330kg/m³である。地震規模を示すマグニチュードは5.3~6.7で、表中の地震動の水平震度は、雪崩発生箇所の最寄りの施設で観測された地震動の水平加速度の最大値と重力加速度(=9.8 m/s²)の比である。水平震度が1より大きい場合は、地震動の水平加速度が重力加速度より大きいことを意味する。その他、表-1には積雪のせん断強度等が示されているが、これらは2.2節で説明する。

2. 2 斜面積雪の安定度について

2. 2. 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 Σ_s とそれに働くせん断応力 $\sigma_n \sin \psi$ の比(図-1a)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ている^{17),18)}。

$$SI = \frac{\Sigma_s}{\sigma_n \sin \psi} \quad (1)$$

ここで、 ψ は斜面勾配(°)、 Σ_s は弱層など対象とする積雪層のせん断強度(N/m²)、 σ_n は単位面積あたりの弱層上の積雪荷重(N/m²)で、弱層上の積雪層の厚さ D (m)と密度 ρ (kg/m³)および重力加速度 g (m/s²)から求められる(式(2))。

$$\sigma_n = g \rho D \quad (2)$$

表-1 地震によって発生した雪崩事例

事例	地震			強震度観測所と雪崩発生箇所の距離(km)	雪崩種類	斜面勾配 ψ (°)	雪崩のすべり面の積雪				積雪観測場所(備考)		
	発生年月日と震源地	規模(M)	水平震度 a				雪質	せん断強度 Σ_s (N m ⁻²)	荷重 σ_n (N m ⁻²)	厚さ D (m)		深さ H (m)	密度 ρ (kg m ⁻³)
1978山形県大蔵村 ⁶⁾	1978年2月20日 宮城県沖	6.7	0.10	24	表層	45	ざらめ雪	*1 910	1109	0.71	1.00	160	山形県大蔵村二の曲 (雪崩発生箇所から700m)
2001新潟県中里村 ⁷⁾	2001年1月4日 新潟県中里村	5.3	0.33	15	全層	40	ざらめ雪 (積雪底面)	*2 1564	1530	0.70	0.91	224	新潟県塩沢町 (雪崩発生箇所から12km)
2011長野県北部 ^{①1)}	2011年3月12日 長野県北部	6.7	0.72	15	湿雪 表層	35	ざらめ雪	1580	1204	0.61	0.75	*3 200	新潟県十日町市孟地
2011長野県北部 ^{②1)}					湿雪 表層	25	ざらめ雪	780	1817	0.56	0.62	*3 330	新潟県十日町市野中
2013栃木県北部 ^{①2)}	2013年2月25日 栃木県北部	6.3	1.25	4	乾雪 表層	42	こしも ざらめ雪	1505	741	0.41	0.55	185	栃木県日光市奥鬼怒
2013栃木県北部 ^{②2)}					乾雪 表層	42	こしも ざらめ雪	2886	1631	0.74	1.00	224	栃木県日光市奥鬼怒

*1 積雪の密度とせん断強度の関係式からの推定値¹⁰⁾。

*2 積雪底面の最大静止摩擦力の計算値⁷⁾。

*3 文献¹⁾の図からの読み取り値。

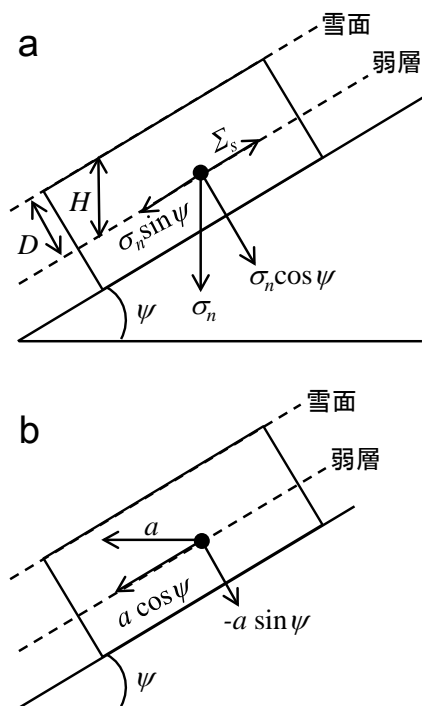


図-1 斜面積雪に作用する力

(a) 斜面積雪の荷重と強度、(b) 地震動の水平震度

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、実際の斜面では、積雪の側面等の繋がりによる影響などがあるため、必ずしも1とはならない¹⁷⁾。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、北海道の道路における雪崩発生事例について、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結果¹⁸⁾によると、雪崩は、積雪の安定度 SI が2.5以下の時に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。また、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¹⁹⁾。よって、本章では、斜面積雪の安定度が1.5以下となる場合を雪崩が発生する閾値と考える。

2. 2. 2 地震動を考慮した斜面積雪の安定度

地震動を考慮した斜面積雪の安定度 SI_E は、式(1)に地震動の水平震度 a (図-1 b) を外力として加えた式(3)により表される^{1), 2), 6), 7)-10)}。

$$SI_E = \frac{\Sigma_s}{\sigma_n (\sin \psi + a \cos \psi)} \quad (3)$$

ここで、積雪のせん断強度 Σ_s は、積雪粒子の粘着力と内部摩擦力の和であり (モール・クーロンの破壊

条件)、内部摩擦力は水平震度に依存する値^{2), 8)-10)}であるが、ここでは、地震時の雪崩発生条件の初期検討であることから、せん断強度 Σ_s は水平震度 a によらず一定とみなした。また、式(3)の水平震度 a は、地震時の盛土の安定性評価²⁰⁾や道路施設の耐震性に関する検討²¹⁾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。

2. 2. 3 積雪のせん断強度について

式(1)や式(3)の斜面積雪の安定度において、積雪のせん断強度 Σ_s が重要となる。せん断強度 Σ_s が未知な場合は、雪質や雪の乾湿に応じて、せん断強度 Σ_s と密度 ρ の関係が得られており^{22), 23)}、積雪密度 ρ との関係式から求められる。例えば、同じ密度の場合、乾いた新雪やしまり雪のせん断強度は大きく、湿雪や弱層となる雪のせん断強度は小さい。最もせん断強度が大きい乾いた新雪やしまり雪のせん断強度は式(4)²²⁾が得られており、降雪粒子等からなる弱層のせん断強度の例として式(5)²³⁾が得られている。

$$(\text{弱層がない場合 } 22)) \quad \Sigma_s = 9.40 \times 10^{-4} \rho^{2.91} \quad (4)$$

$$(\text{弱層がある場合 } 23)) \quad \Sigma_s = 14.5 \left(\frac{\rho}{917} \right)^{1.73} \quad (5)$$

2. 3 斜面積雪の安定度の計算結果

2. 3. 1 地震動の水平震度と斜面積雪の安定度

図-2 は、各地震誘発雪崩事例の斜面積雪の安定度を計算した結果であり、地震動の水平震度 a を考慮した安定度 SI_E (式(3)) と考慮しない安定度 SI (式(1)) を比較したものである。なお、2001 新潟県中里村の全層雪崩の事例では、積雪せん断強度 Σ_s の代わりに積雪底面の静止摩擦力⁷⁾を用いて計算した。これらの事例のうち、斜面積雪の安定度 SI (図の横軸) が1.5以下の事例があり、これらは、地震発生前にすでに斜面積雪が不安定な状態にあったと考えられる¹⁾。一方、斜面積雪の安定度 SI が1.5以上の事例では、地震動の水平震度 a を考慮した安定度 SI_E は1.5以下になった。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、雪崩が発生したと考えられる。

図-3 は、地震動を考慮した斜面積雪の安定度 SI_E と地震動を考慮しない斜面積雪の安定度 SI との差 ($SI_E - SI$) を、地震動による安定度の低下量と考えて、地震動の水平震度 a との関係を示したものであ

る。図-3 より、地震動の水平震度が大きいほど、斜面積雪の安定度が低下する割合が大きい。6 事例のみの関係であるが、地震動による斜面積雪の安定度のおおよその低下量として、水平震度が 0.5 のとき安定度は 0.65 低下し、水平震度が 1.0 のとき安定度は 1.30 低下した。

2. 3. 2 積雪深と水平震度からみた雪崩発生条件

図-2 より、地震動の水平震度によって斜面積雪の安定度が小さくなって 1.5 以下となり、雪崩が発生したと考えられた。ただし、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。そこで、斜面積雪の安定度 SI_E が 1.5 以下になった場合に雪崩発生の可能性が高くなると考え、式(3)をよりわかりやすい指標、つまり積雪深 H ($= D / \cos\psi$ 、図-1 a 参照) を指標として、地震時の雪崩発生条件を示すことを

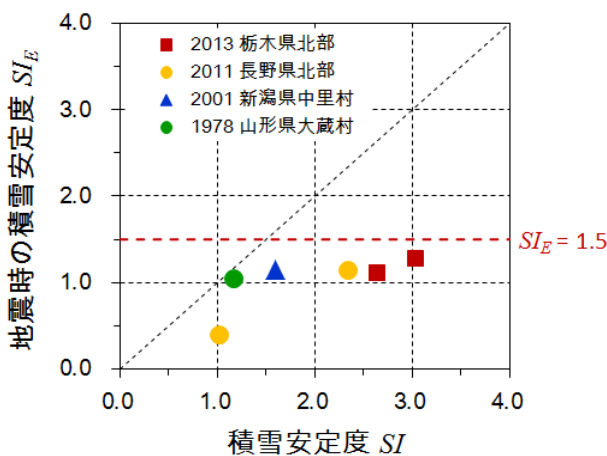


図-2 斜面積雪の安定度の計算結果
地震動の水平震度を考慮した安定度 SI_E (式(3)) と考慮しない場合の安定度 SI (式(1)) の比較

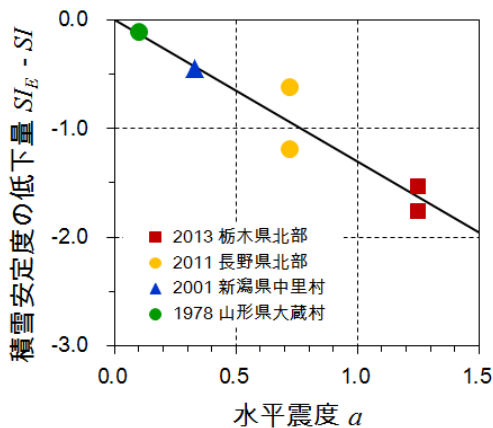


図-3 地震による斜面積雪の安定度の低下量と水平震度

検討する。式(3)を、 $SI_E=1.5$ の条件で、弱層上の積雪深 H について整理すると式(6)となる。

$$H = \frac{\Sigma_s}{1.5g\rho(\sin\psi + a\cos\psi)\cos\psi} \quad (6)$$

図-4 は、式(6)に表-1 の各事例の積雪観測データを代入して、斜面積雪の安定度 SI_E が 1.5 となるときの弱層上の積雪深 H と地震動の水平震度 a の関係を示したものである。図中の曲線の上側は、斜面積雪の安定度 SI_E が 1.5 以下となり雪崩発生の可能性が高いことを示し、各事例 (図中のプロット) はすべて雪崩発生の判定となる。よって、斜面積雪の安定度の考え方に基づいた式(6)を活用することで、積雪深と水平震度を指標に地震時の雪崩発生条件を示すことができると考えられる。ただし、ここでいう積雪深 H は、厳密には弱層上の積雪深であるが、弱層が積雪底面付近にあると考えれば、斜面における積雪深にほぼ等しくなる。つまり、式(6)の積雪深 H を、

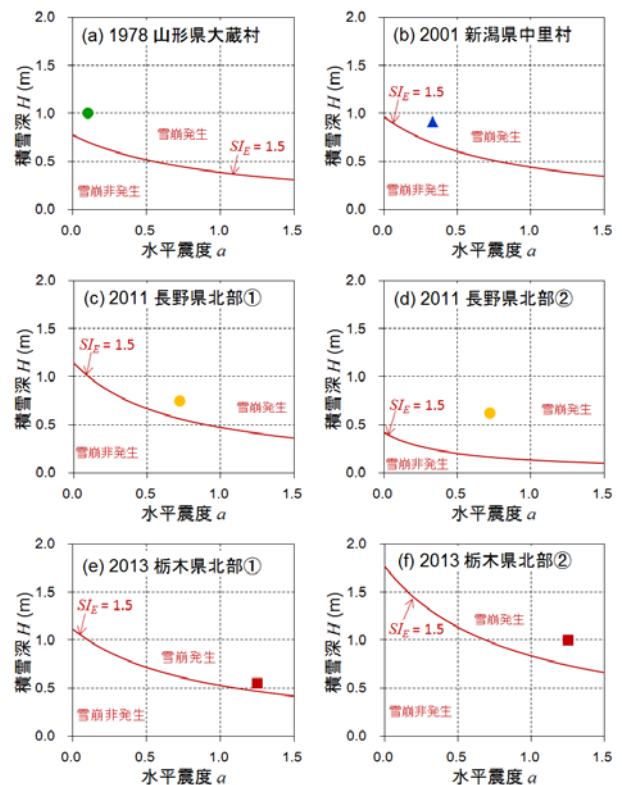


図-4 地震時の斜面積雪の安定度 SI_E が 1.5 となるときの弱層上の積雪深と地震動の水平震度の関係

図中の曲線は、式(6)を用いて表-1 の各雪崩事例の積雪観測データを入力して計算した結果。図中のプロット (●▲●●■) は、各事例の観測値を示す。

地震による雪崩発生時件における最小積雪深と考えると、これと観測された地震動の水平震度との関係から、雪崩発生の有無を推定できると考えられる。

さらに、図-4の各地震誘発雪崩事例の発生条件をまとめて一つの図で表すことを試みたのが図-5である。式(6)を用いて、図-5aは、斜面勾配 $\psi=40^\circ$ として積雪密度 ρ を変えて計算した結果であり、図-5bは、積雪密度 $\rho=300\text{ kg/m}^3$ として斜面勾配 ψ を変えて計算した結果である。積雪のせん断強度 Σ_s は、積雪内部に弱層が存在することを想定して式(5)から求めた。図-5aから、積雪密度 ρ が大きいほど、式(6)から求まる安定度 $SI_E=1.5$ の曲線が図の上側へ移動する。図-5aの場合では、積雪密度 300 kg/m^3 以下の曲線が、表-1の地震誘発雪崩事例の発生判別に比較的良好に対応している。一方、図-5bの斜面勾配 ψ を変えた場合の計算結果では、斜面勾配による安定度 $SI_E=1.5$ の条件に差はほとんどみられない。よって、式(6)を用いて地震時の雪崩発生条件を検討

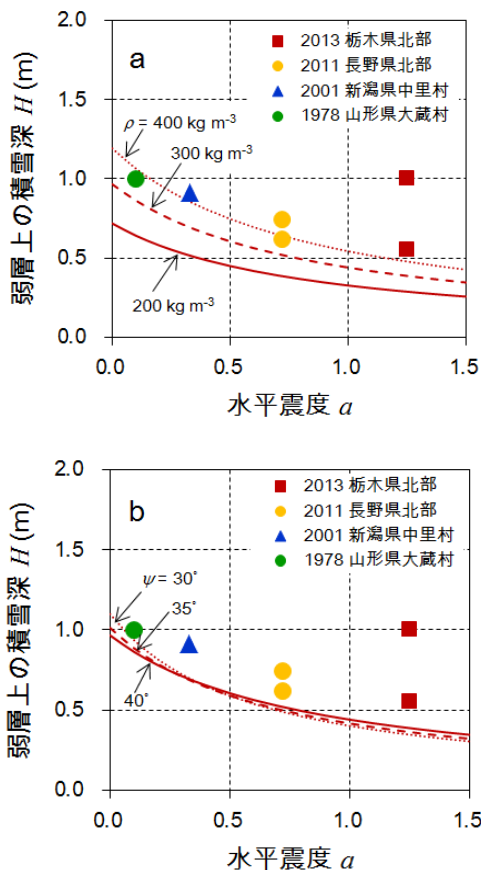


図-5 積雪安定度 SI_E が1.5となるときの弱層上の積雪深と地震動の水平震度の関係
(a) 積雪密度 ρ を変えた場合(斜面勾配 $\psi=40^\circ$)と
(b) 斜面勾配 ψ を変えた場合(積雪密度 $\rho=300\text{ kg/m}^3$)の計算結果

する場合、斜面勾配 ψ よりも積雪密度 ρ をどのように設定するのが重要であると考えられる。

また、図-6は、積雪のせん断強度 Σ_s を式(4)から求めた場合の斜面積雪の安定度 $SI_E=1.5$ の計算結果である。つまり、積雪内部に弱層が無いと考えた場合の計算結果である。各地震誘発雪崩事例と比較すると、安定度 $SI_E=1.5$ の曲線は、各事例のプロットの上側になる。つまり、この図では雪崩は発生しないと判断される。よって、地震時の雪崩発生条件を検討する際は、積雪内部の弱層の存在を想定することが望ましいと考えられる。

3. 振動模型実験

3.1 実験方法

振動模型による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年および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-7)。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試料を設置した(図-7)。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

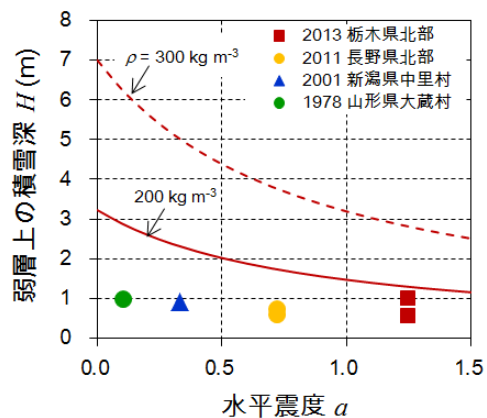


図-6 積雪安定度 SI_E が1.5となるときの弱層上の積雪深と地震動の水平震度の関係
積雪せん断強度 Σ_s を式(4)から求めた場合の計算結果

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 (18×18×24mm³、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-7 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 のスイープ加振を 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/s²)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」¹⁶⁾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(100cm³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。

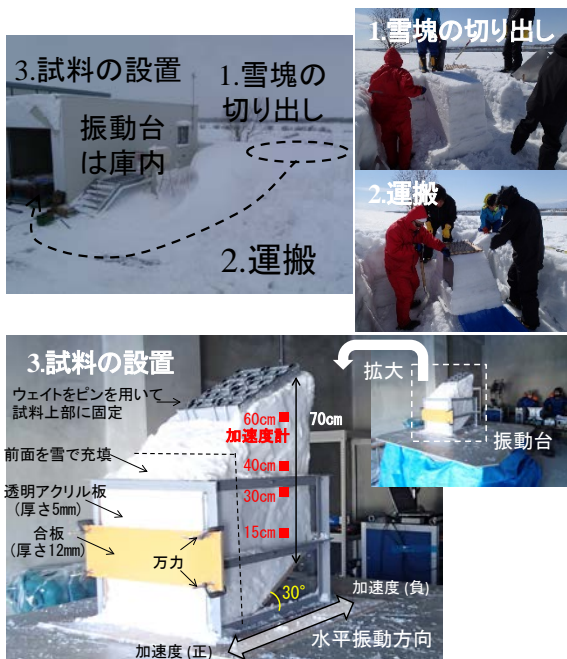


図-7 振動実験の様子

3. 2 実験結果および考察

3. 2. 1 試料の応答特性

振動実験は、様々な試料の条件、加速度ならびにウェイトの有無により計 194 回行った。その結果、振動実験で得られた試料と振動台との加速度比 (以下、応答倍率という) の最大値をみると、いずれの試料においても測定した範囲では 10Hz (周期 0.10s) となっていた。また、応答倍率は、1Hz から 10Hz に変化するにつれて入力加速度または重量が大きい場合、および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-8 に、試料の層構造および実施年月日を図-9 に示す。

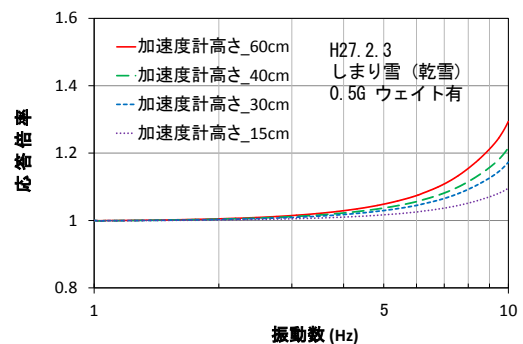


図-8 応答倍率と振動数の関係 (例)

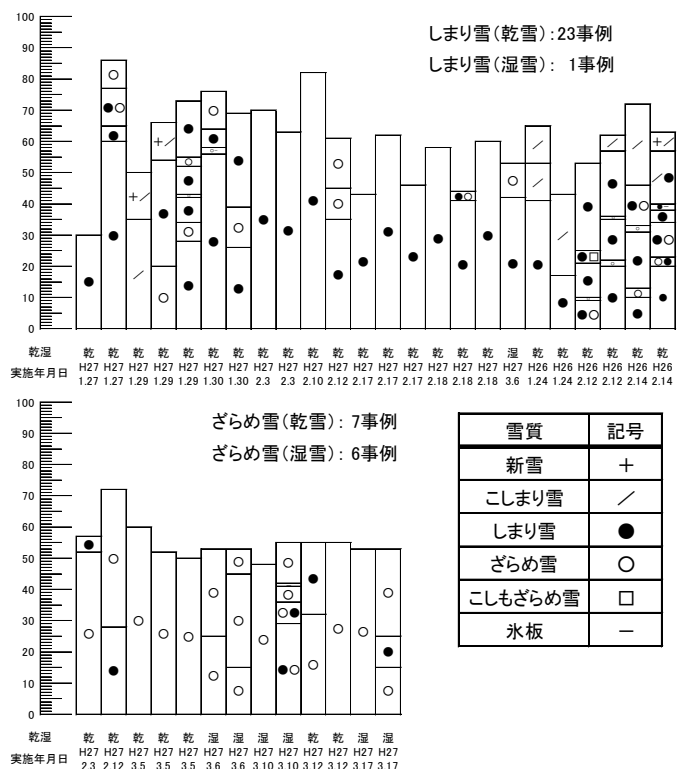


図-9 試料の層構造、乾雪・湿雪、実施年月日

3. 2. 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/m³)と平均硬度 (kN/m²)、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)、ざらめ雪(乾雪)、ざらめ雪(湿雪)に分類した(図-9)。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。つぎに、雪質および加速度計高さごとに、目的変数を入力加速度に対する応答倍率の最大値、説明変数を入力加速度・試料全体の重量・換算積雪深・積雪深・平均硬度・積雪平均密度とした項目別の単相関係数を求めた(図-10)。その結果、いずれの雪質とも入力加速度(G)、重量(kg)、換算積雪深(m)は、すべての雪質および加速度計高さで正の相関関係が得られた。一方、積雪深、平均硬

度、平均密度は、正負または0に近い相関関係が見られた。そこで、表-2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、x₁は入力加速度(G)、x₂は重量(kg)である。換算積雪深は、重量をもとに積雪深を求めていることから、ここでは重量に包含されているものとして扱った。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。

表-2 応答倍率の最大値yと、入力加速度x₁および重量x₂との関係

雪質	加速度計高さ	平均高さ	N	重回帰式	R ²
しまり雪	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。

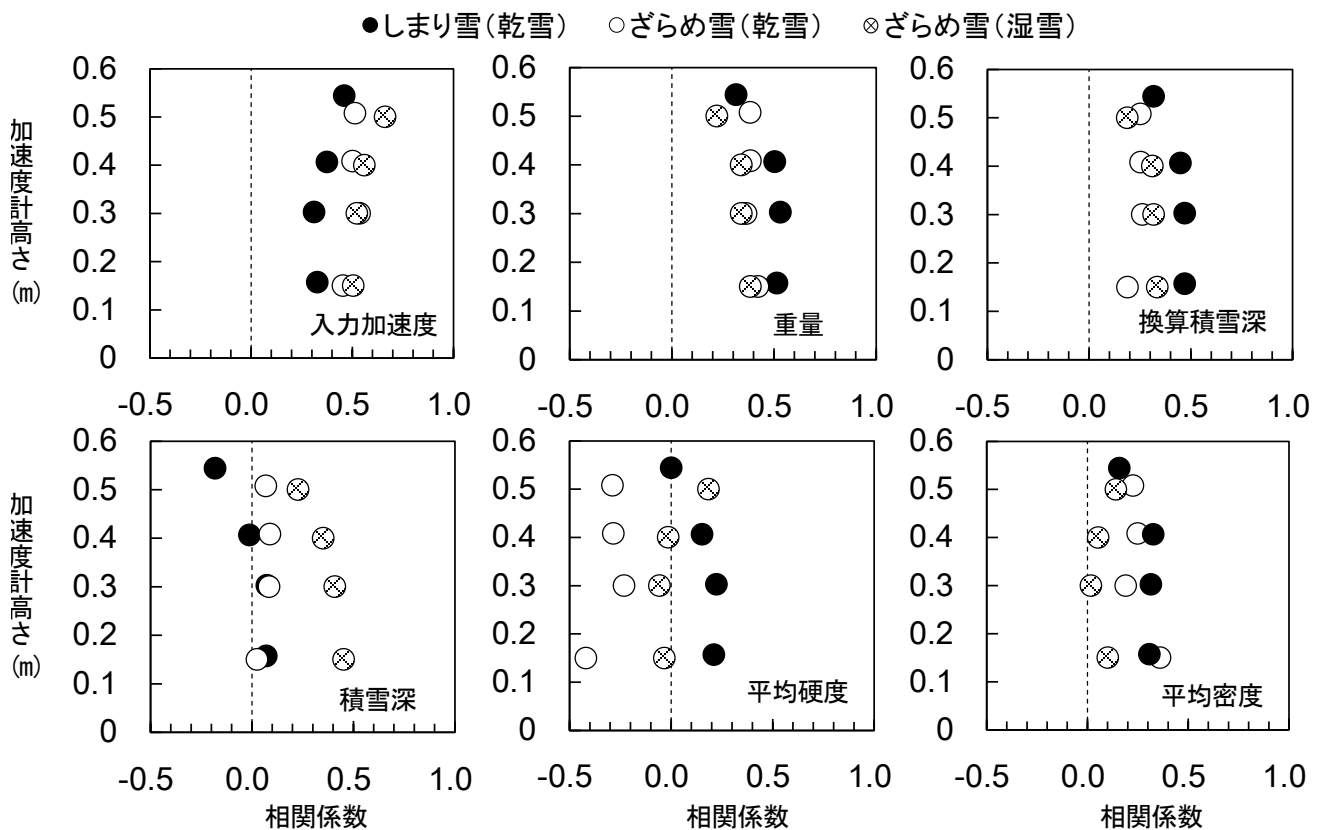


図-10 加速度計平均高さ、応答倍率の最大値と各測定項目の相関係数との関係
各雪質における加速度計平均高さ N は表-2を参照

各雪質における試料の重心付近となる加速度計の高さ30~39cmのデータを用いて、振動数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ごとに算出した(表-3)。これによると、各雪質とも1Hz(周期1.0S)では0%つまり振動台と同様の加速度であるのに対し、10Hz(周期0.10S)に変化するにしたがい増加することが示されている。特に、5Hz(周期0.20S)から10Hz

表-3 10Hzにおける応答倍率の増加割合を100%とした場合の応答倍率の増加割合

周期 S	周波数 Hz	しまり雪 (乾雪) N=97		ざらめ雪 (乾雪) N=44		ざらめ雪 (湿雪) N=48	
		平均値	標準 偏差	平均値	標準 偏差	平均値	標準 偏差
1.00	1	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
0.50	2	2.4%	1.6%	2.7%	1.4%	2.3%	1.2%
0.33	3	6.7%	2.5%	6.7%	2.3%	6.2%	2.1%
0.25	4	12.9%	3.2%	12.3%	3.3%	11.6%	3.2%
0.20	5	21.1%	3.6%	19.7%	4.5%	18.8%	4.6%
0.17	6	31.3%	4.3%	29.2%	5.8%	27.9%	6.1%
0.14	7	44.1%	4.8%	41.1%	6.8%	39.5%	7.4%
0.13	8	59.5%	4.8%	56.4%	7.3%	54.3%	8.1%
0.11	9	77.7%	3.8%	75.3%	6.1%	73.6%	6.9%
0.10	10	100.0%	0.0%	100.0%	0.0%	100.0%	0.0%

※加速度計高さ30-39cmのデータによる

表-4 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 ²
しまり雪(乾雪)	97	$y=0.041x^{2.41}$	0.989
ざらめ雪(乾雪)	44	$y=0.045x^{2.34}$	0.992
ざらめ雪(湿雪)	48	$y=0.041x^{2.37}$	0.994

※加速度計高さ30-39cm、1.0-10Hzのデータによる

(周期0.10S)にかけて約80%、9Hz(周期0.11S)から10Hzにかけて約25%の増加が見られる。雪質による顕著な増加傾向の差異は認められなかった。また、しまり雪と比較してざらめ雪のほうが標準偏差は大きく、試料によるバラツキが見られた。また、これらの関係を求めたところ表-4に示す結果を得た。

3. 2. 3 斜面積雪の応答倍率の試算

表-2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(0.176m²)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²⁴⁾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/m³の平均である325kg/m³、ざらめ雪(乾雪)はざらめ雪の密度300~500kg/m³の平均である400kg/m³、ざらめ雪(湿雪)は上記密度の最大値である500kg/m³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-2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-11)。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

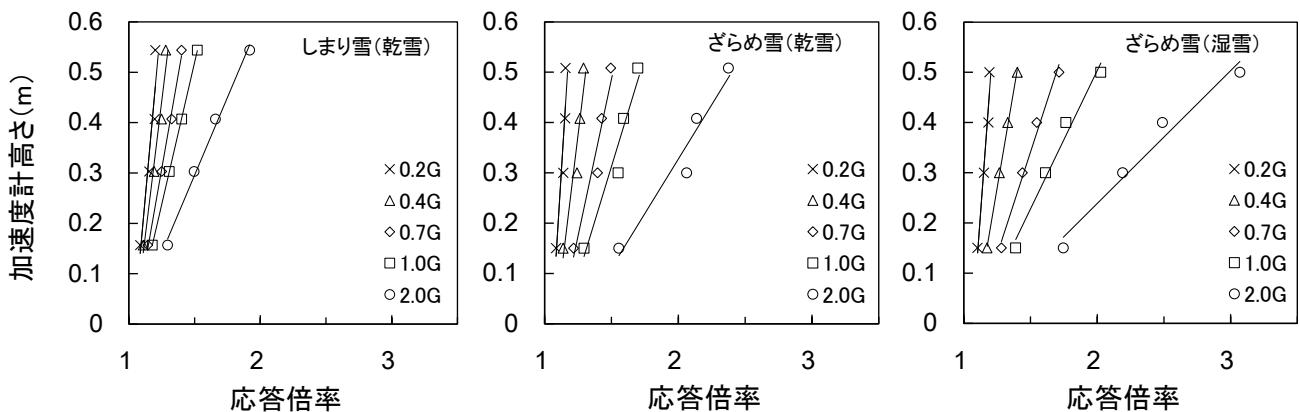


図-11 実験結果に基づく斜面積雪の高さと応答倍率との関係(10Hz)

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、ざらめ雪(湿雪)の応答倍率がざらめ雪(乾雪)より大きくなる結果となった。

3. 2. 4 雪質ごとの応答倍率の差異

高さ30~39cm、入力加速度0.5Gにおける試料の重量ごとの応答倍率と、平均硬度および密度との関係を図-12に示す。この結果、しまり雪(乾雪)では、平均密度、硬度、重量の増加に伴って応答倍率が増加している。一方、ざらめ雪(乾雪、湿雪)では、上記のような相関性は見られない。また、ざらめ雪はしまり雪よりも密度が高く、応答倍率の大きいデータが多い。

3. 2. 5 まとめ

上記および3.2.3節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について以下に推察する。積雪は、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²⁵⁾。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。山野井・遠藤(2002)²²⁾は、乾いた新雪・こしまり雪・しまり雪、および乾きざらめ雪のせん断強度を密度のべき乗の関数で示し、乾きざらめ雪は乾いた他の雪質に比べるとせん断強度が小さく、濡れ雪のせん断強度は乾き雪より小さいことを示している。また、木下(1960)²⁶⁾は、乾き雪の硬度を密度のべき乗の関数で示している。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。このことで、水平力に対する剛性が高くなるが、重量も同様に増加することから、その影響により図-12では応答倍率が大きくなったものと考えられる。一方、ざらめ雪(乾雪)では、しまり雪よりもせん断強度が小さいため、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(図-11)。また、ざらめ雪(湿雪)になると、この傾向がより顕著になった。

4. 地震による雪崩発生リスク評価技術の提案

ここでは、2章の事例分析、および3章の振動実験の結果を用いて、地震動を考慮した斜面積雪の安定度SI(Stability Index)を用いた雪崩発生リスク評価技術を提案した。

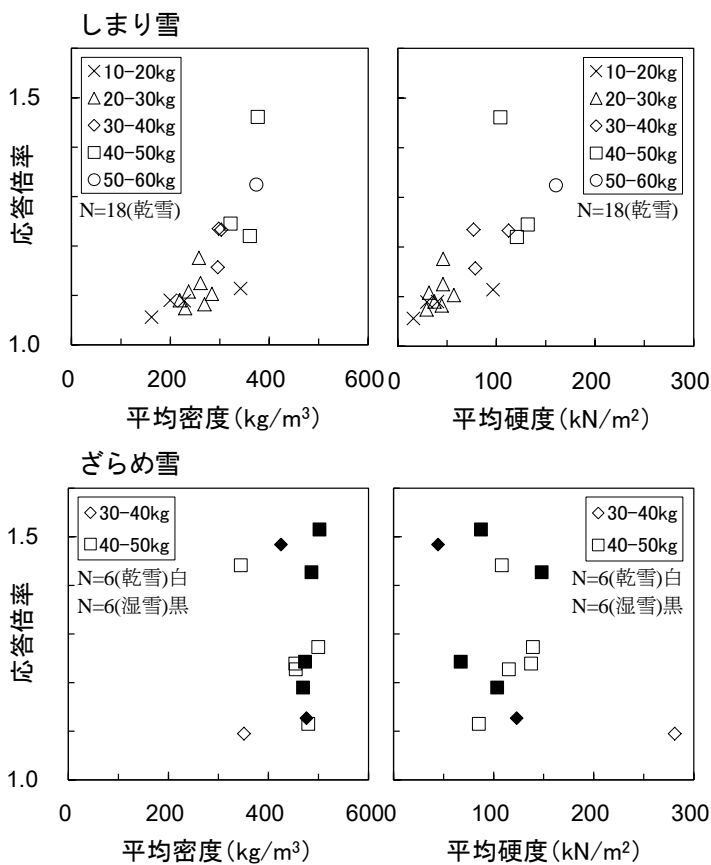
4. 1 斜面積雪の安定度

式(7)は、式(1)で示した自然状態の斜面積雪の安定度SIについて、せん断強度 Σ_s をモール・クーロンの破壊条件で表したものである(図-13(a))。

$$SI = \frac{\Sigma_s}{\sigma_n \sin \psi} = \frac{C + \sigma_n \cos \psi \tan \phi}{\sigma_n \sin \psi} \quad (7)$$

前野・黒田(1986)²⁵⁾は、低密度の雪や垂直荷重 σ_n が大きい場合、雪の圧縮性のため厳密には適用できないとしている。しかし、Nakamura(2010)²⁷⁾らによれば、低密度の雪でも成り立つことが示されている。よって、この研究では、すべての雪質に対してモール・クーロンの破壊条件が成り立つとする。Cは積雪粒子の凝集力(N/m²)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係数である。

なお、本章では2.2.1節で示した資料をもとに、斜面積雪の安定度SIが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。



※加速度計高さ30-39cm、入力加速度0.5G、ウェイト無し
のデータ 図中の凡例は、試料の重量を示す

図-12 応答倍率と平均密度、硬度との関係

4. 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(7)に 2.2.2 節で検討した地震動の水平震度 a (図-13 (b)) を外力として加えた式(8)により表される^{1), 2), 4), 10)}。

$$SI_E = \frac{C + \sigma_n(\cos \psi - a \sin \psi) \tan \phi}{\sigma_n(\sin \psi + a \cos \psi)} \quad (8)$$

なお、水平震度 a は、重力加速度 $g(\text{gal})$ 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。また、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(9)により表される。

$$a' = a \{ (SR_{10\text{Hz}} - 1) IR + 1 \} \quad (9)$$

ここで、 $SR_{10\text{Hz}}$ は 10Hz における斜面積雪高さ H' の応答倍率 (表-2、図-11)、 IR は 10Hz を 100% とした場合の応答倍率の増加割合 (表-4) である。

式(8)に加えて、松澤ら(2007)¹⁰⁾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(10)を提案する。

$$SI_E' = \frac{CL + \sigma_n L(\cos \psi - a' \sin \psi) \tan \phi + \Sigma_t D}{\sigma_n L(\sin \psi + a' \cos \psi)} \quad (10)$$

ここで、 L は斜面積雪の長さ(m)、 Σ_t は雪の引張破壊強度(N/m^2)、 D は弱層より上部の積雪の厚さ(m)である。

4. 3 地震発生時の斜面積雪の安定度

ここでは、2章の事例分析結果のうち、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 (表-5) について斜面積雪の安定度を試算した。なお、雪崩すべり面より上部の積雪は、長野

県北部地震はざらめ雪¹⁾、栃木県北部地震はしまり雪が主体のため²⁾、ここでは Watanabe(1977)²⁸⁾の各雪質における引張破壊強度の関係式を用いた (式(11a, 11b))。

$$\Sigma_t = 7.78 \times 10^{-3} \rho^{2.60} (\text{ざらめ雪}) \quad (11a)$$

$$\Sigma_t = 3.40 \times 10^{-4} \rho^{3.24} (\text{しまり雪}) \quad (11b)$$

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-14 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(10)) と、考慮しない安定度 SI (式(7)) 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¹⁾。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-14 右は、式(10)による SI_E' (図の縦軸) と、式(4)に地震動の水平震度 a を代入した SI_E' (松澤ら¹¹⁾の式、図の横軸) 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

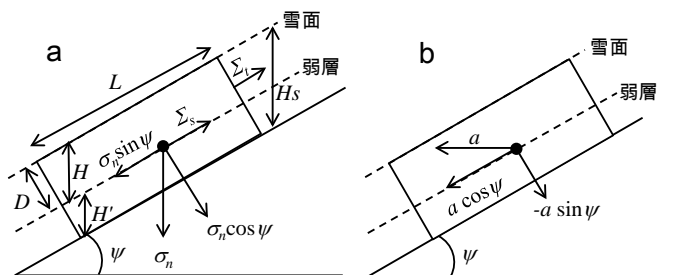


図-13 斜面積雪に作用する力
(a) 斜面積雪の荷重と強度、(b) 地震動の水平震度

表-5 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の距離 (km)	雪崩種類	斜面勾配 ψ (°)	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)	
	発生日と震源地	規模 (M)	水平震度 a ※1	周波数 f ※1 (Hz)				長さ L (m)	雪質	凝集力 C (N/m^2)	荷重 σ_n (N/m^2)	厚さ D (m)	深さ H (m)	密度 ρ (kg/m^3)	主体となる雪質	深さ H' (m)	密度 ρ' (kg/m^3)		主体となる雪質
2011長野県北部①	2011/3/12 長野県北部	6.7	0.72	11.2	15	湿雪表層	35	10 ^{※2}	ざらめ雪	1580	1178	0.61	0.75	197 ^{※2}	ざらめ雪	1.62	197 ^{※3}	ざらめ雪(湿雪)	新潟県十日町市孟地
2011長野県北部②					6	湿雪表層	25	10 ^{※2}	ざらめ雪	780	1813	0.56	0.62	330 ^{※2}	ざらめ雪	2.04	330 ^{※3}	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	乾雪表層	42	9.5	こしもざらめ雪	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	乾雪表層	42	9.5	こしもざらめ雪	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¹⁾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¹⁾。

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-5) に低下量は

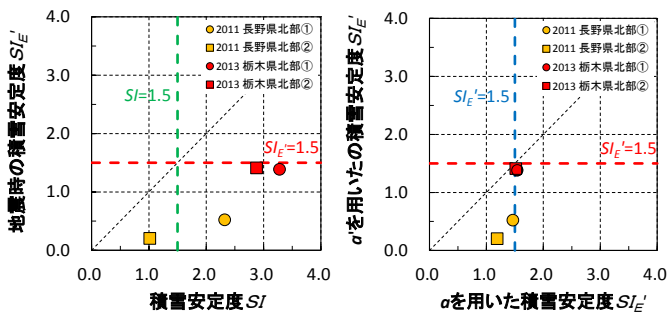


図-14 斜面積雪の安定度の計算結果 左:応答倍率を考慮した水平震度 a' を用いた安定度 SI_E' (式(10))と考慮しない場合の SI (式(7))との比較 右:式(10)において a' を代入した SI_E' と a を代入した SI_E' との比較

きくなることが示された。

3. 3. 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(10)をもとに斜面積雪深 H_s (m) (図-13 (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-13 (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 325kg/m^3 (3.2.3節参照)、こしもざらめ雪は密度 $200\sim 400\text{kg/m}^3$ の最小値である 200kg/m^3 とする²⁴⁾。また、斜面勾配 ψ 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° 付近にあることから²⁹⁾、ここでは 40° を採用した。加えて、式(10)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 (N/m^2) は、Watanabe²⁸⁾による弱層上の積雪荷重がない状態で測定したせん断強度 Σ_s の関係式を用いた(式(12))。この場合、式(7)より積雪荷重 σ_n が0となるため、 $\Sigma_s =$

C と見なすことができる。

$$C = 3.56 \times 10^{-5} \rho^{3.36} \text{ (こしもざらめ雪)} \quad (12)$$

式(12)にこしもざらめ雪の密度 200kg/m^3 を代入し、 $C = 1918\text{N/m}^2$ を求めた。

内部摩擦係数 $\tan\phi$ は、新雪、こしまり雪、こしもざらめ雪の場合において考慮され、それ以外の雪質では無視できる^{22), 23)}。既往研究によると、新雪では $\tan\phi = 0.46\sim 2.0$ ^{10), 30)}、こしまり雪では $\tan\phi = 0.23$ ¹⁰⁾、こしもざらめ雪では $\tan\phi = 0.21$ ³¹⁾である。ここでは、こしもざらめ雪を弱層とするため、内部摩擦係数を0.21に設定する。

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 0.60m を採用した²⁹⁾。

単位体積あたりの弱層上の積雪荷重 σ_n (N/m^2)は、しまり層の密度(325kg/m^3)に、弱層より上部の積雪の厚さ $D = 0.6\text{m}$ と重力加速度 g を乗じて、 $\sigma_n = 1911\text{N/m}^2$ とした。

弱層より上部の雪の引張破壊強度 Σ_t (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。

斜面積雪の長さ L (m)は、10m および 20m の条件で計算した。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(9)および表-2、図-11により求めた。なお、任意の積雪深さ H' は式(13)で求められる。

$$H' = H_s - \frac{D}{\cos\psi} \quad (13)$$

図-15 は斜面積雪の長さが 10m、および図-16 は斜面積雪の長さが 20m における、斜面積雪の安定度 SI_E' が 1.0、1.5 および 2.0 となる際の積雪深 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。図中の曲線の上側は、斜面積雪の安定度 SI_E' が 2.0 以下であり、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、水平震度や斜面積雪の長さが大きくなるにつれて、雪崩発生危険度が高くなる積雪深が小さくなった。

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。

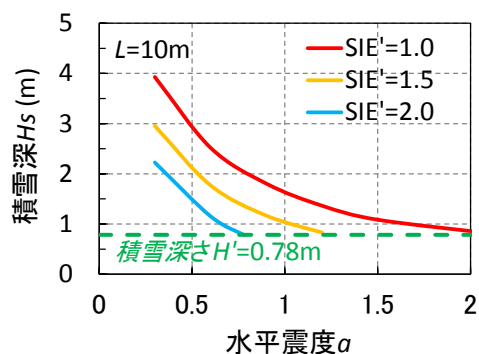


図-15 積雪深 H_s と地震動の水平震度 a との関係
(計算条件 周波数: 10Hz、斜面勾配: 40°、積雪層: しまり雪、弱層: こしもざらめ雪、弱層の内部摩擦係数: 0.21、斜面積雪の長さ: 10m)

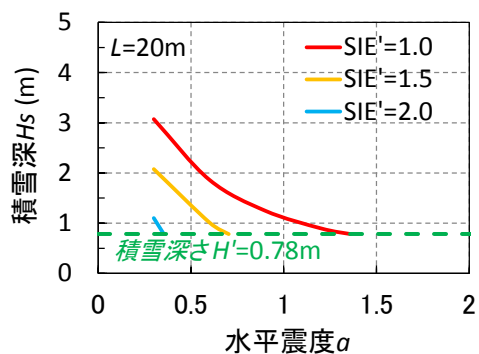


図-16 積雪深 H_s と地震動の水平震度 a との関係
(計算条件 周波数: 10Hz、斜面勾配: 40°、積雪層: しまり雪、弱層: こしもざらめ雪、弱層の内部摩擦係数: 0.21、斜面積雪の長さ: 20m)

4. まとめ

本研究では、はじめに過去に発生した地震時の雪崩事例の収集と雪崩発生条件の分析を行い、斜面積雪の安定度は地震動の水平震度に依存することを見いだした。つぎに、地震動に対する斜面積雪の応答を把握するために振動実験を行った。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、雪質によらず斜面積雪の振動の固有モードは1次モードであること、斜面積雪の応答倍率はざらめ雪の方がしまり雪よりも大きく、かつ湿雪の方が乾雪より大きいことが示された。また、振動実験の結果を用いて、地震時に

おける積雪深 H_s と水平震度 a を指標とした雪崩発生リスクを評価する技術を提案した。

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, pp. 159-169, 2012
- 2) 松下拓樹, 松澤勝, 中村浩 : 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, 2014
- 3) 伊東靖彦, 池田慎二, 松下拓樹, 野呂智之 : 2013年2月に栃木県で発生した地震による雪崩, 寒地技術論文・報告集, Vol. 29, pp. 147-152, 2013
- 4) Podolskiy, E. A., K. Nishimura, O. Abe and P. A. Chernous: Earthquake-induced snow avalanches: I. Historical case studies, Journal of Glaciology, Vol. 56, No. 197, pp. 431-446, 2010
- 5) Kazakov, N. A.: O vozmozhnom mekhanizme formirovaniya seismogennykh lavin (On the possible mechanism of seismogenic avalanche formation), Mater. Glyatsiol. Issled. (Data of Glaciological Studies), Pub. 88, pp. 102- 106, 2000
- 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, pp. 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, pp. 9-15, 2001
- 8) Pérez-Guillén, C., M. Tapia, G. Furdada, E. Suriñach, J.N. McElwaine, W. Steinkogler and M. Hiller: Evaluation of an avalanche triggered by a local earthquake at the Vallée de la Sionne, Switzerland, Cold Regions Science and Technology, 108, pp. 149-162, 2014
- 9) Chernouss, P., E. Mokrov, Y. Fedorenko, E. Husebye and E. Beketova : Russian-norwegian project on seismicity-induced avalanches, Proceedings of the International Snow Science Workshop (ISSW), Penticton, BC, Canada, pp. 25-30, 2002
- 10) 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, pp. 95-98, 2007
- 11) 千葉隆弘, 佐藤雄輝, 原田裕介, 大宮哲, 伊東靖彦, 松

- 下拓樹：地震による雪崩発生リスク評価に関する研究—地震応答解析に基づく雪崩発生条件の検討—, 北海道の雪氷, 34, pp.91-94, 2015
- 12) 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, pp.39-44, 2014
- 13) Podolskiy, E. A., K. Nishimura, O. Abe and P. A. Chernous: Earthquake-induced snow avalanches: II. Experimental study, Journal of Glaciology, Vol.56, No.197, pp.447-458, 2010
- 14) 上石勲, 町田敬, 加藤務, 佐藤威 : 表層雪崩を対象とした積雪の震動破壊実験, 寒地技術論文・報告集, 28, pp.49-52, 2012
- 15) 松下拓樹, 原田裕介, 笠村繁幸, 松澤勝, 中村浩 : 地震動に対する斜面積雪の応答特性に関する実験, 雪氷研究大会(2013・北見)講演要旨集, p222, 2013
- 16) 原田裕介, 高橋渉, 大宮哲, 松澤勝 : 振動実験に基づく斜面積雪の地震応答と雪崩発生推定手法の提案, 寒地土木研究所月報, 754, pp.9-18, 2016
- 17) (社)日本雪氷学会編 : 積雪観測ガイドブック, 朝倉書店, pp.31-53, pp.79-96, 2010
- 18) 西村浩一, 平島寛行, M. Lehnig, 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, pp.244-248, 2005
- 19) Perla, R. : Slab avalanche measurements, Canadian Geotechnical Journal, 14-2, pp.206-213, 1977
- 20) (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), pp.119-127, 2010
- 21) (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, pp.57-108, 2010
- 22) 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, pp.443-451, 2002
- 23) Jamieson, J. B., and C. D. Johnston. 1998
Refinements to the stability index for skier-triggered dry-slab avalanches. Ann. Glaciol., 26, pp.296-302
- 24) (公社)日本雪氷学会編 : 新版雪氷辞典, 古今書院, pp.246, 2014
- 25) 前野紀一, 黒田登志雄 : 基礎雪氷学講座 I 雪氷の構造と物性, 古今書院, pp.162-164, 1986
- 26) 木下誠一 : 積雪の硬度 I, 低温科学, A19, pp.135-146, 1960
- 27) Nakamura, T., O. Abe, R. Hashimoto and T. Ohta: A dynamic method to measure the shear strength of snow. J. Glaciol., 56(196), pp.333-338, 2010
- 28) Watanabe, Z. : The influence of snow quality on the breaking strength, Sci. Rep. Fukushima Univ., 27, pp.27-35, 1977
- 29) McClung, D.M. and P. Schaerer : The avalanche handbook, 3rd Edition. The Mountaineer, Seattle, U.S.A., 2006
- 30) 関伸介, 早川典夫, 上石勲 : シアフレームによる積雪層内弱層のせん断強度測定手法の考察, 1998年度日本雪氷学会全国大会講演予稿集, p183, 1998
- 31) 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, pp.194-205, 2006

STUDY ON THE TECHNOLOGIES FOR RISK ASSESSMENT OF
EARTHQUAKE-INDUCED AVALANCHES

Budget : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2012-2015

Research Team : Cold-Region Road Engineering

Research Group

(Snow and Ice Research Team)

Author : MATSUZAWA Masaru

NISHIMURA Atsushi

HARADA Yusuke

TAKAHASHI Wataru

Abstract : In this study, the authors examined occurrence conditions using previous earthquake-induced avalanches, and revealed that the stability of the snowpack on the slope was depended on the horizontal seismic motion. Subsequently, a vibration experiment was conducted to understand the seismic response of the snowpack on a slope. The following were found. 1) The dynamic magnification factor of a snowpack on a slope increases linearly with increase in the height of the snowpack when the input seismic motion has a short period. 2) Regardless of the snow grain shape, the natural mode of a snowpack on a slope is the primary mode. 3) The dynamic magnification factor is greater for melt forms than for rounded grains, and is greater for wet snow than for dry snow. Using the results of this experiment, we suggest the method that estimates earthquake-induced avalanche risk assessment that incorporate the stability of the snowpack on the slope by using the modified static lateral force method.

Key words : Earthquake-induced avalanche, Risk assessment, Vibration experiment, Seismic response