

地震による雪崩発生リスク評価手法の提案

高橋 渉*1 原田 裕介*1 松澤 勝*1 松下 拓樹*2 千葉 隆弘*3

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。いくつかの自治体の防災計画では、積雪期の地震では雪崩が発生する可能性があることが明記されている¹⁾。しかし、地震時の雪崩発生条件が明確に示されているわけではない。

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の評価手法を提案することが、防災・減災の強化に資するものと考えられる。

本稿においては、過去に発生した地震によって引き起こされたと考えられる雪崩の事例を紹介し、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検討を行った。

2. 地震雪崩の発生事例について

表1は、地震によって発生した雪崩事例のうち、日本において、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結果である。

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る。乾雪雪崩と湿雪雪崩がそれぞれ2事例で乾湿不明が2事例である。雪崩発生箇所の上り面の積雪は、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。

この中より、近年に発生した長野県北部地震と、栃木県北部で発生した地震について被害の状況を述べる。

2. 1 2011年3月12日長野県北部地震による雪崩

2011年3月12日午前3時59分頃に長野県北部を震源としたマグニチュード6.7、震源の深さ約10kmの地震が発生し、長野県栄村で最大震度6強、新潟県十日町市と津南町で震度6弱を観測した。また、その後最大震度6弱となる余震が2度発生した。

上石ら⁴⁾によると、地震による雪崩は、長野県栄村や新潟県津南町、新潟県十日町市などで見られ、道路を埋没し通行止めとなったり、予防柵を乗り越えて道路まで到達、河川をせき止めた事例が報告されている。

自然発生の雪崩と異なる点として以下の特徴が見られた。

- ・斜面では表層雪崩、全層雪崩、積雪クラックが同時に多数発生。
- ・雪崩の破断面は自然発生雪崩と異なり、直線上ではなく階段状になるなど不規則な形状であった。
- ・尾根部、勾配変化点で積雪がブロック状に破壊し崩落した。
- ・緩勾配、平坦部でも雪崩やクラックが発生、道路脇の堆雪などからも小規模な雪崩が発生した。
- ・平坦部から張り出した雪がブロック状に破壊し崩落した。

表1 日本における地震によって発生した雪崩事例および積雪観測データ

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			雪崩すべり面上の積雪			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 ²⁾	1978年2月20日 宮城県沖	6.7	0.10	24	表層	45	ざらめ雪	*1910	1113	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 ³⁾	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)	**21564	1537	0.7	0.91	224	新潟県塩沢町(雪崩発生箇所から12km)
2011長野県北部 ¹⁾⁴⁾	2011/3/12 長野県北部	6.7	0.72	15	湿雪表層	35	ざらめ雪	1580	1178	0.61	0.75	197	新潟県十日町市孟地
2011長野県北部 ²⁾⁴⁾				6	湿雪表層	25	ざらめ雪	780	1813	0.56	0.62	330	新潟県十日町市野中
2013栃木県北部 ¹⁾⁵⁾	2013/2/25 栃木県北部	6.3	1.25	4	乾雪表層	42	こしもざらめ雪	1510	744	0.41	0.55	185	栃木県日光市奥鬼怒
2013栃木県北部 ²⁾⁵⁾				4	乾雪表層	42	こしもざらめ雪	2890	1626	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⁵⁾

*2 積雪底面の最大静止摩擦力の計算値³⁾

*1 国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所

*2 国立研究開発法人 土木研究所 雪崩・地すべり研究センター

*3 北海道科学大学

2. 2 2013年2月25日栃木県で発生した地震による雪崩

2013年2月25日午後4時23分頃に栃木県北部を震源としたマグニチュード6.2、震源の深さ約10kmの地震が発生し、栃木県日光市で最大震度5強を観測した。

伊東ら⁷⁾によると、地震による雪崩は、栃木県日光市や、福島県檜枝岐村などでみられた。日光市川俣の奥鬼怒林道では、約30箇所が雪崩などのために通行できなくなり、宿泊施設4件に客と従業員51名が足止めされた。孤立の解消は翌夕方まで24時間を要した。また、福島県檜枝岐村では水平距離で2100mにも及ぶ大規模な乾雪表層雪崩が確認された。流下した沢では、多数の木々が堆積していたほか、沢底面から高さ10mを超える高さまで雪崩の痕跡が確認された。(写真1、2)

3. 斜面積雪の安定度について

3. 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)によって表される。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



写真1 奥鬼怒林道で発生した雪崩 (デブリは除去済)



写真2 檜枝岐村で発生した雪崩 (デブリは除去済)

び雪崩発生の目安として用いられている⁸⁾。

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

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))。

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

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、積雪の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⁸⁾。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⁹⁾によると、雪崩の発生は、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⁹⁾。よって、ここでは、斜面積雪の安定度が1.5以下となる場合を雪崩発生の目安と考える。

3. 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1b)を外力として加えた式(3)により表される⁹⁾。

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

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⁵⁾であるが、本稿では、地震時の雪崩発生条件の初期検討として、せん断強度 Σ_s は水平震度 a によらず一定と考える。また、前述のように、式(3)の水平震度 a は、重力加速度 g に対する地震動の水平加速度の比である。水平震度 a は、地震時の盛土の安定性評価¹⁰⁾や道路施設の耐震性に関する検討¹¹⁾で用いられており、本稿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. 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、積雪密度 ρ との関係式から求められ、雪質や雪の乾湿に応じて、せん断強度 Σ_s と密度 ρ の関係が得られている⁶⁾¹²⁾。例えば、同じ密度に対して、乾いた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。乾いた新雪やしまり雪のせん断強度は式(4)¹²⁾で表され、弱層となりうるしもざらめ雪やざらめ雪のせん断強度は式(5)⁶⁾で表される。

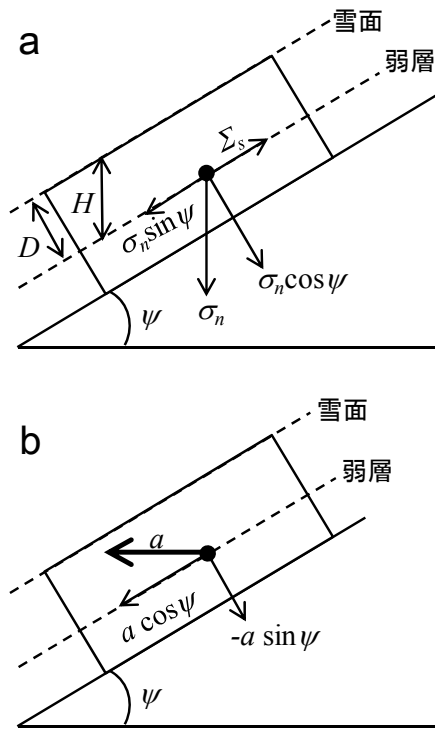


図1 斜面積雪モデルと作用する力

(a)斜面積雪の荷重と強度 (b)地震動の水平震度

(しまり雪の例¹²⁾) $\Sigma_s = 9.40 \times 10^{-4} \rho^{2.91}$ [Nm²] (4)

(しもざらめ雪、ざらめ雪の例⁶を改変) $\Sigma_s = 4.37 \times 10^{-4} \rho^{3.36}$ [Nm²] (5)

4. 斜面積雪の安定度の計算結果

4.1 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、地震動による水平震度 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年の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³⁾を用いて計算した。これらの事例のうち、地震動の水平震度 a を考慮しない場合の斜面積雪の安定度 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⁴⁾。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。よって、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。

4.2 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、つまり積雪の深さ H ($= D / \cos \psi$, 図1a参照) を指標に、地震時の雪崩発生条件を示すことを検討する。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3は、式(6)に表1の各事例の積雪観測データと地震動の水平震度 a を代入して、斜面積雪の安定度 SI_E が1.5となる

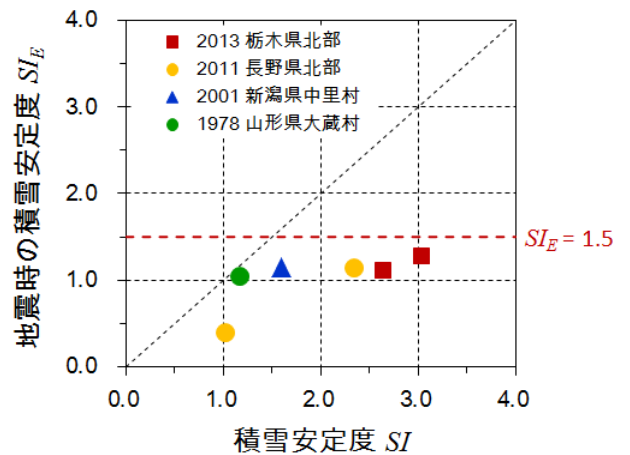


図2 斜面積雪の安定度の計算結果

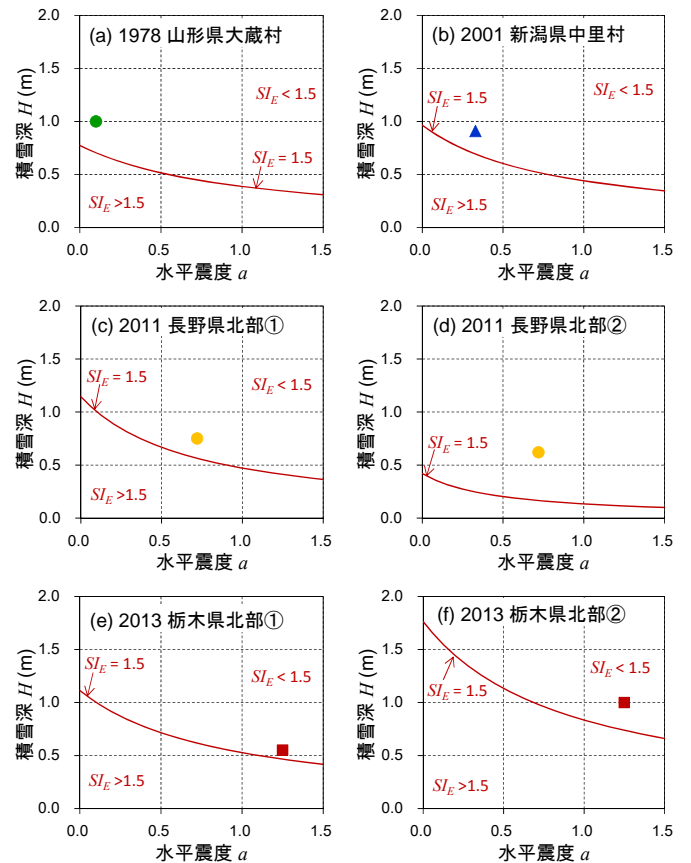


図3 地震時の斜面積雪の安定度 SI_E が1.5となるときの弱層上の積雪深と地震動の水平震度の関係

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。図中の曲線の上側が、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。

5. まとめ

本論文では、地震時の雪崩発生リスクの評価のために、図 1 に示す積雪斜面モデルを用い、式(6)から雪崩発生の判定を試みた。その結果、過去に発生した地震による雪崩における現地調査の結果から得られた条件を基に、雪崩の発生リスクの評価を行うことができた。

ただし、この方法による評価を行う際には以下の課題がある。

弱層上の積雪深 H においては、そもそも弱層がどの位置にあるのか不明な点が多い。弱層の位置を把握することは、地震によって引き起こされる雪崩に限らず、雪崩現象を把握する上では非常に重要な値となる。厳密には積雪断面観測で弱層の位置を把握する必要があるが、頻繁に観測することはできないので、何らかの方法で推定することが現実的である。現在、表 1 に示した雪崩事例ならびに既往研究¹³⁾¹⁴⁾より、雪崩が発生した際に積雪表面から弱層までの積雪深は 60~70cm 程度であると言われているが、この数値の妥当性も含めて今後の検討が必要と考えられる。

つぎに、 Σ_s や ρ についても、季節や場所、斜面状況に応じて大きく異なる。本稿では、式(4)、(5)などで、一例を示したが、現地調査の結果と一致しない例もある。弱層の位置と同様に、厳密には断面観測から求める必要があるが、データ取得には限界があるので、これらの値をどう与えるかも検討の必要がある。

本研究では単純に水平震度のみを考慮し、簡易な評価手法を提案したが、他の分野においては構造物の特性によって応答が異なることを考慮している。これに関しては別報¹⁵⁾にて、積雪深、雪質や周波数によって応答が異なることを紹介しているが、詳細は別の機会に改めて報告したいと考えている。

参考文献

- 1) 新潟県防災会議：新潟県地域防災計画、pp32、2013。
- 2) 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、pp103-112、1979。
- 3) 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、pp9-15、2001。

- 4) 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、74-2、pp159-169、2012。
- 5) 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。
- 6) Zempachi Watanabe：The Influence of Snow Quality on the Breaking Strength, *Sci. Rep. Fukushima Univ.*, 27, pp27-35, 1977。
- 7) 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、第29回寒地技術シンポジウム、pp147-152、2013。
- 8) 日本雪氷学会編集：雪崩斜面における積雪安定性評価と弱層テスト、積雪観測ガイドブック、朝倉書店、pp76-96、2010。
- 9) 西村浩一・平島寛行・Michel Lehning・石本敬志・河見博文：雪崩発生危険度指標図の作成、第21回寒地技術シンポジウム、pp244-248、2005
- 10) 社団法人日本道路協会：地震動の作用に対する盛土の安定性照査、道路土工 盛土工指針（平成22年度版）、pp119-127、2010。
- 11) 社団法人日本道路協会：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、pp48-107、2002。
- 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、64-4、pp443-451、2002。
- 13) Perla, R：Slab avalanche measurements, *Candidan Geotechnical Journal*, 14, pp206-213, 1977。
- 14) McClung, D. and P. Schaerer：The Avalanche Handbook, The Mountaineers, pp271, 1993
- 15) 高橋渉・原田裕介・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特性について、雪氷研究大会（2015・松本）講演要旨集、pp260、2015。