

地震発生時の斜面積雪の安全率評価に関する一考察

松澤勝、加治屋安彦、伊東靖彦（寒地土木研究所）

1. はじめに

2003年9月の十勝沖地震、2004年10月の中越地震など、近年、積雪寒冷地で大規模な地震が発生している。このような大規模な地震が厳冬期に発生した場合、斜面積雪の安定度が低下して雪崩が発生する可能性が考えられる。従って、地震の強さと積雪深や斜面勾配に応じた斜面積雪の安定度の関係を把握することは、地震による被害想定を行う上で必要である。

2. 既往研究に基づく雪崩危険度の評価

地震によって発生した雪崩に関しては過去に東浦ら(1979)、小倉ら(2001)の研究がある。これらの研究では、実際に発生した雪崩の現地調査と、地震によって斜面積雪に加わった力を考慮して雪崩の発生を説明した。小倉らは、積雪時に地震によって雪崩が発生する条件を(1)式と(2)式が同時に成り立つ場合とした。(図1)

$$f + T > W \sin \theta \quad \dots(1) \quad f + T < W \sin \theta + F \quad \dots(2)$$

ここで、 W : 長さ l [m]、厚さ H [m] の積雪の荷重 [N]

T : 上面での張力 [N]、 θ : 法面の角度 [度]、

f : 底面の摩擦力 [N]

F : 地震により生じる斜面下向きの外力 [N]

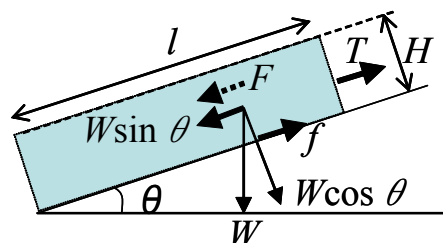


図1 斜面積雪に働く力の模式図

(2)式は、地震時の斜面積雪の安定条件を評価する式と言える。一般に、土木構造物の耐震評価を行う際には水平加速度のみを考慮する。これに習い、水平震度を k (重力加速度に対する水平加速度の比) とし、底面での摩擦係数を μ とすると、斜面積雪の安定度を示す指標 (以下安全率とする) S_l は次式で表される。

$$\text{安全率 } S_l = \frac{\mu(W \cos \theta - kW \sin \theta) + T}{W \sin \theta + kW \cos \theta} \quad \dots(3)$$

$S_l < 1$ で、地震時に雪崩に対して危険と判断される。次に、小倉ら(2001)と同じ条件 (斜度 40° 、雪崩発生法面の長さ 7 m 、密度 224 kg/m^3 の濡れ雪、底面での摩擦係数は 0.69 とし、張力 T は Watanabe(1977)の式から与え、水平震度を $0, 0.15, 0.3$ の3ケースで安全率の計算を行った (図2)。図より、近傍で観測された加速度 (約 300 gal) に相当する水平震度 0.3 の場合、安全率は約 0.7 であり、実際の雪崩発生と整合する。

ところで、図を見ると、積雪深が増加しても斜面的安全率は変わらない。一般に、積雪深が増えたと雪崩の危険度が高くなると言われているので矛盾がある。そこで、土木工学の分野で用いられている土木構造物の地震時の安全率評価の考え方を参考に(3)式を再検討することにする。

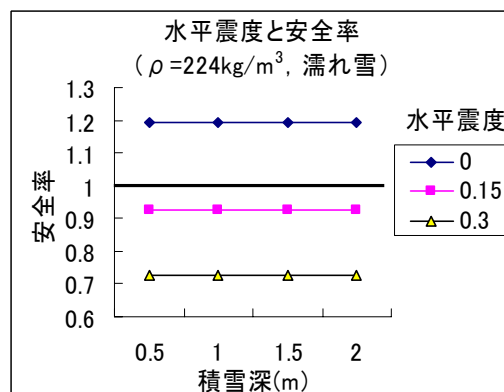


図2 地震時の斜面積雪の安全率。密度 250 kg/m^3 、濡れ雪、のり長さ 7 m 。

3. 盛土のり面における地震時の安全率評価手法

土木工学の分野では、地震時の土木構造物の安全率評価について基本的な考え方が確立されており、地震時に盛土のり面が直線滑りで崩壊する場合の安全率 S_2 は、(4)式で表されている(久保, 1981)。なお、張力 T の項が無いのは、盛土の天端から崩れるためである。

$$\text{安全率 } S_2 = \frac{Cl + (W \cos \theta - kW \sin \theta - U) \tan \phi}{W \sin \theta + kW \cos \theta} \quad \dots(4)$$

ここで、 ϕ : 内部摩擦角 ($\mu = \tan \phi$ である)、 U : 間隙水圧の上昇による力 [N]、 C : 凝集力 [Pa] である。土の剪断強度 τ は一般にクーロンの式 ($\tau = C + \sigma \tan \phi$) で表される。ここで τ はせん断強さ [Pa]、 σ はせん断面に働く垂直応力 [Pa] であり、 C 、 ϕ は土の力学的性質を決定する値である。(4)式を積雪に適用するには、 U は雪の場合無視できるが、積雪の ϕ と C を求める必要がある。

4. 積雪の凝集力と内部摩擦角

4.1 既往研究

積雪に垂直荷重をかけて剪断強度を測定して C 、 ϕ を求めた研究には、渡邊 (1983)、Perla and Beck (1983)、関ら (1998)、山野井・遠藤 (2002) がある。これらの結果について表 1 に整理する。新雪の場合、北海道の峠部では、気温が低いため焼結が進まず、新雪の状態が比較的長く続くと考えられる。そこで、著者らは、さらに降雪直後とその翌日に、 C 、 ϕ を求める試験を行った。

表 1. 既往研究における垂直荷重をかけた積雪の剪断試験結果

研究者	雪質	密度 [kg/m ³]	C [Pa]	$\tan \phi$
渡邊(1983)	しまり雪	220~300	4000~12000	無視できる
	ほぐした雪	320	0	0.87
Perla and Beck(1983)	一部焼結した新雪	200	900	0.9
関ら(1998)	新雪	50~100	120~300	0.46~1.32
山野井・遠藤(2002)	様々な雪質で実験、粘着性の弱い雪質を除くと $\tan \phi$ は無視できる。			

4.2 垂直荷重をかけた剪断強度の測定

観測装置として、250 cm² のシアーフレームと、これにかぶせるアクリル製の蓋 (自作) と錘を用いた。2007 年 3 月 7 日 15:00~16:30 および 3 月 8 日 14:30~16:30 に、寒地土木研究所構内の空き地で積雪の剪断試験を行った。3 月 6 日の夜から降雪があり 7 日の時点では、約 40 cm の新積雪があり、地表面付近がざらめ化していたのを除くと、ほぼ全層新雪であった。さらに、8 日にかけて断続的に降雪があり、8 日時点での積雪は約 45 cm であった。表 2 に、剪断強度の測定結果と、その値をクーロンの式に近似して得た C 、 $\tan \phi$ を示す。山野井と遠藤 (2002) が述べるように、焼結が進むと、垂直荷重による剪断強度の依存性は弱くなり、 $\tan \phi$ は小さな値を示す。また、降雪直後の新雪では、内部摩擦が大きく C が 200 Pa 以下の小さな値を示すが、時間が経つと焼結が進む結果、 C が増加したことが分かる。

表 2. 測定結果

測定日	高さ [cm]	密度 [kg/m ³]	雪質	錘の荷重毎の平均剪断強度 [Pa]				C [Pa]	tan φ
				錘なし	77g	196g	315g		
03/07	20	120	新雪	263	269	552	817	110	1.9
03/07	12	170	新雪	285	393	495	728	190	1.3
03/08	20	150	新雪・こしまり	634	913	959	1354	540	2.0
03/08	12	200	こしまり	1149	N/A	1085	1241	1100	0.23

5. 地震発生時の斜面積雪の安全率の評価

(3)式と(4)式から、*T*を考慮し、*U*を無視することで、安全率 *S₃*を次のように定める。

$$\text{安全率 } S_3 = \frac{C + (W \cos \theta - kW \sin \theta) \tan \phi + T}{W \sin \theta + kW \cos \theta} \quad \dots(5)$$

(5)式による安全率の評価方法の妥当性を検証するため、地震時に雪崩が発生した事例から、安全率を試算する。小倉ら(2001)の事例は全層雪崩であり、地表面と積雪面との摩擦で説明できたため、ここでは、東浦ら(1979)の雪崩の事例で試算を行う。

東浦ら(1979)の扱った1978年2月20日の肘折の雪崩の概要は、以下の通りである。面発生の表層雪崩で、滑り面は積雪内部のざらめ層、積雪の密度(推定値)160 kg/m³、雪崩の厚さ1 m、斜面の長さ26 m、斜面の角度約40°である。また、地震による水平加速度は約100 gal、当日の平均気温-3.0℃、最高気温-0.4℃である。

次に、(5)式に代入する張力 *T* と、凝集力 *C*、内部摩擦係数 tan φ の値を求める。

まず、*T*は、Watanabe(1977)の、新雪やしまり雪の密度と引っ張り強度の関係式から求め、*T*=4710 Pa とする。

また当日の気温は氷点下であり、ざらめ雪粒子間は凍結していると考えられる。山野井・遠藤(2002)によると新雪やこしまり雪などを除くと内部摩擦係数 tan φ を無視できるので、*τ* = *C* と見なす。そこで、Watanabe(1977)の乾きざらめ雪の密度と剪断強度の関係式から、*C*=910 Pa を得る。

これらの値を(5)式に与えて計算した結果を図

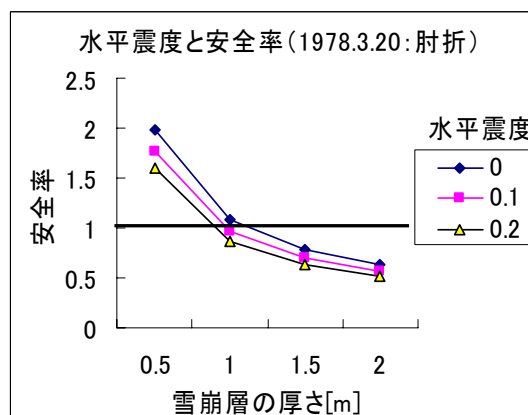


図 3 地震時の斜面積雪の安全率。斜面長 26m、斜面勾配 40°、雪密度 160kg/m³での計算結果

3に示す。雪崩層の厚さが1mで、水平震度0.1(約100 galに相当する)の場合に安全率が1を下回る。よって、(5)式による地震発生時の斜面積雪の安全率の評価は、実際の雪崩発生を説明しうる。ただし、検証できるのは、この1事例だけなので、地震時に発生した雪崩の(極めて希なケースであるが)データの追加が必要と考えられる。

6. 地震発生時の斜面積雪の安全率の試算例

以下では(5)式に、表2で示した高さ12 cmでの *C*、φを適用して地震発生時の斜面積雪の安全率を求める。計算条件は、斜面の勾配45°、法尻から法頭までの長さを20 m、水平震度は0、0.15、0.3の3ケースである。

図4より、新雪の場合、水平震度0.3で安全率が1を下回るのは、積雪が1.5mを越える場合に限られる。しかし、水平震度毎のグラフの間隔が大きいことから、加速度の増加による安全率の低下が大きい傾向があることが分かる。また、図5より、こしまり雪では、水平震度0.3の場合、積雪深が1.5m以上で安全率が1を下回る。また、積雪深の増加によって急激に安定率が低下する傾向が見られる。

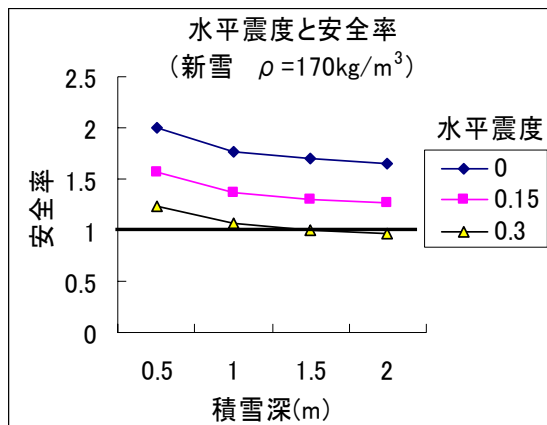


図4 地震時の斜面積雪の安全率。密度 170kg/m³、C=190Pa、tan φ=1.3

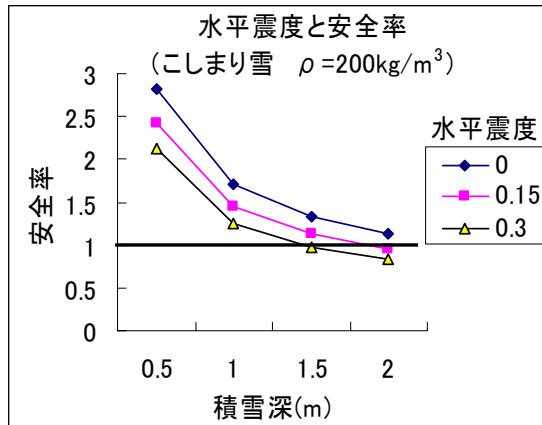


図5 地震時の斜面積雪の安全率。密度 200kg/m³、C=1100Pa、tan φ=0.23

7. まとめ

地震発生時の斜面積雪の安全率評価について、従来の手法を改良して、新しい評価手法を考案した。この評価手法を用いて、過去に地震時に発生した雪崩（東浦ら(1979)）を対象に、評価手法の検討を行った。その結果、この評価手法によって実際の雪崩発生危険度を評価できる可能性があることが示された。なお、評価手法の妥当性の検討にあたっては、今後、更にデータを追加した検証が必要と考えられる。

なお、この研究の一部は、科学研究費基礎研究(B)「地震と豪雪の複合災害の被害想定および地域防災に関する研究」によって行われた。

参考文献

東浦ら, 1979: 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, 103-112.
 久保, 1981: 地震と土木構造物, 鹿島出版会, 279p.
 小倉ら, 2001: 2001年1月4日新潟県中里村で発生した地震による雪崩, 新潟大災害研年報, 23, 9-15.
 Perla and Beck, 1983: Instruments and Methods Experience with Shear Frames, *J. glaciology*, 29, 485-491.
 関ら, 1998: シアーフレームによる積雪層内弱層の剪断強度測定手法の考察, 1998年度日本雪氷学会予稿集.
 Watanabe, 1977: The Influence of Snow Quality on the Breaking Strength, *Sci. Rep. Fukushima Univ.* 27, 27-35.
 渡邊, 1983: 積雪の剪断面に垂直な圧力と剪断強度, 昭和58年度日本雪氷学会予稿集.
 山野井・遠藤, 2002: 積雪における剪断強度の密度及び含水率依存性, 雪氷, 64, 443-451.