

2001年1月4日新潟県中里村で発生した地震による雪崩

小倉康子*¹・和泉 薫*²・宮崎伸夫*³・小林俊一*²

An avalanche caused by an earthquake at Nakazato village, Niigata Prefecture, on January 4th 2001

by

Yasuko OGURA, Kaoru IZUMI, Nobuo MIYAZAKI and Shun'ichi KOBAYASHI

Abstract

The earthquake of magnitude 5.3 occurred in heavily snowy area, Unuma, Niigata Prefecture, on January 4th, 2001, triggered a small avalanche.

In case that an earthquake occurs at the place where heavy snow deposits, it is dangerous to pass the way which abuts on steep slopes beside. However, there are not so much studies on the effect of the earthquake on a snow pack on a slope. We studied the effect of the earthquake on the small avalanche by stability analysis.

Before that earthquake, the snow pack which fell down as an avalanche was supported by the frictional force and the tensile force against its own weight under the gravitational force. When the earthquake shakes the snow pack, the external force, which is up to 46 percent of the gravitational force to the direction parallel to the slope, added to it. And the frictional force could reduce about 35 percent because of the external force to the direction perpendicular to the slope.

As a result it is revealed that the snow pack supported by frictional force and tensile force was stable. However, external force by the earthquake was large enough to trigger the small avalanche.

Keywords : Avalanche, Earthquake, Tensile strength, Maximum frictional coefficient,
Snow pack stability

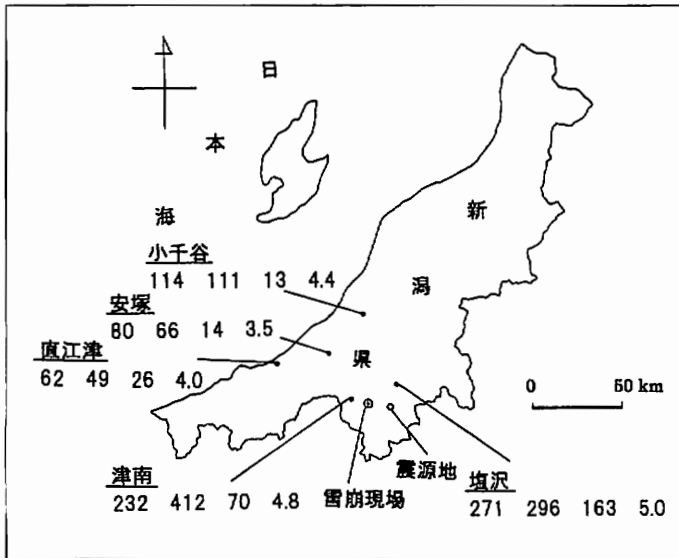
キーワード : 雪崩, 地震, 引張り破壊強度, 積雪の最大静止摩擦係数, 積雪の安定

1. はじめに

新潟県中里村を震源とするマグニチュード5.3の地震が2001年1月4日13時18分に発生し, 当時1.5 mの積雪が存在した震源地周辺において小規模な雪崩が発生した。この雪崩による被害は村道を崩落した雪がふさぐという軽い交通障害であった。

今回の雪崩は規模が小さく被害も小さかった。しかし, 地震によって発生した雪崩の研究としては東浦他 (1978) があるが, これまで例が少なく, この雪崩を解析することは今後の積雪期の地震防災対策に役立つための資料として重要である。そこで本研究では, 地震が発生する前の積雪の力学的つり合いの

*1: 新潟大学大学院自然科学研究科 *2: 新潟大学積雪地域災害研究センター *3: 佐々木クライメットエンジニアリング



図一 地震による各地の加速度(南北・東西・上下方向[gal])と計測震度

雪崩発生現場は新潟県中里村西田尻の村道西方線の道路脇斜面であり、面発生の乾雪・湿雪混合の全層雪崩で、斜面には枯れ草や低木が生えていた(写真-1, 2)。

同地は積雪が毎年3mを超える豪雪地にあり、斜面傾斜も急であることから、毎冬期に数回雪崩の起きる雪崩の常習箇所である。



写真-1 雪崩の破断面



写真-2 崩落斜面を横から見たところ

3. 雪崩概況

今回の雪崩によって崩落した斜面積雪は幅22m、斜面長7m、雪崩直後の破断面から推測される当時の積雪深は1mである。雪崩のデブリが侵入した道路は除雪がされており、斜面下部には50cm程度のやや圧雪された雪壁ができていた(図-2, 3)。斜面の傾斜角は約40°で雪崩は面発生の湿雪と乾雪が混合した全層雪崩であった。現場から12kmほどのところにある塩沢町の断面観測地点では、12月の半ばから2度の大きな寒波によってもたらされた1m余りの積雪が存在していた。積雪の下半分は1度目の寒波による降雪によって積もった後、雨が降ってザラメ化した層であり、上半分は2度目の降雪で積もったしまり層である(図-4)。密度の鉛直分布を見ると、上部しまり層と下部ザラメ層の間に大きな密度差があり、プッシュブルゲージの値ではその10cm下にやや弱い層がみられるが今回の雪崩のすべり面とはならなかった。

A-A' 付近の模式的断面

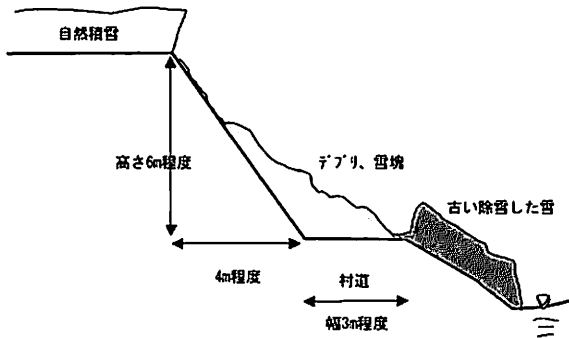


図-2 雪崩発生現場平面図
灰色の部分道路に流れ込んだ雪崩のデブリ領域

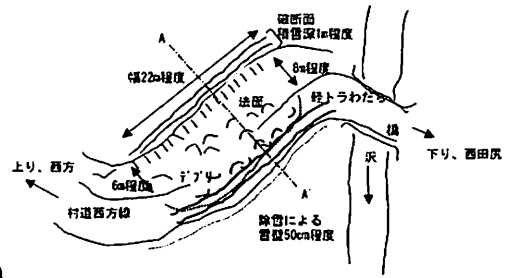


図-3 崩落斜面の断面図 (図2のA-A'断面)

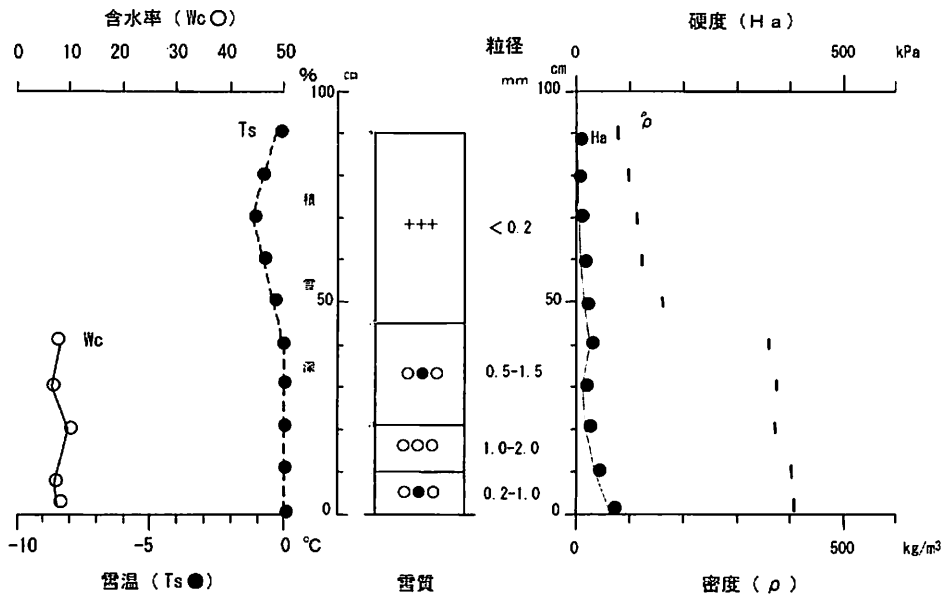


図-4 地震当時の積雪状況 (1月4日塩沢)

表-1 2001年1月4日の雪崩概況(左)と1978年山形県大蔵村の雪崩概況(東浦他,1979)(右)

標高	350m	標高	410~430m
平地積雪	91cm (塩沢)	平地積雪	3 m 37cm (肘折)
雪崩の種類	面発生全層雪崩	雪崩の種類	面発生表層雪崩
すべり面	積雪底面と地表面	すべり面	積雪内部2cmのザラメ層
滑走区	道路わき法面	滑走区	尾根の凸部, 扇状
堆積区	道路	堆積区	道路上
規模	長さ7m, 幅22m, 厚さ1m, 面積154㎡	規模	長さ20m, 幅50m, 厚さ1m, 面積1,073㎡
質量階級	1.1	質量階級	2.2
ポテンシャル階級	1.2	ポテンシャル階級	3.0
斜面傾斜	40°	斜面傾斜	平均勾配45°
斜面向き	北30° 西	斜面向き	北20° 西
地表状態	裸地十草・低木	地表状態	裸地

雪崩の特徴を東浦他(1979)に習って表にまとめたものが表-1である。1978年山形県大蔵村の地震に比べると、発生域、走路などの規模が小さく、また全層雪崩である点が相違点である。

4. 崩落した積雪に作用した力を最大に見積もった値

4.1 斜面並行方向及び斜面に垂直な方向に働いた地震の加速度の推定

ここでまず、地震による斜面方向と斜面垂直方向の最大加速度を考える。データは雪崩現場からもっとも近い津南町のものを用いる。図-1で示した通り、南北方向、東西方向、垂直上下方向の三方向についての最大加速度がわかっているが、任意の方向の成分を考える際にはそれらが同時に発生したのではないことを注意しなくてはならない。このような加速度をベクトル合成した際には、任意の方向で考える最大の加速度を計算したことになり、恐らく実際の最大加速度よりかなり大きな値になる可能性がある。

以上を踏まえて加速度のベクトル合成を行う。まず、南北方向・東西方向の最大加速度を $N30^{\circ}W$ の方向にベクトル合成すると 322 [gal]である。これと垂直上下方向の最大加速度を用いて斜面方向の考える最大加速度をベクトル合成すると ± 292 [gal]、同様に斜面に垂直な方向の最大加速度は ± 261 [gal]になる。

4.2 積雪の崩落方向及び、崩落斜面に垂直な方向に働いた応力のつり合い

地震の斜面方向最大加速度が4.1で得られているので、崩落した積雪の単位面積当たりに作用した考える最大応力のつり合いを考える。

まず、斜面垂直方向についての考える最大加速度 ± 261 [gal]をMKS単位系に直すと ± 2.61 [m/s^2]。崩落した積雪の平均密度は 224 [kg/m^3]なので、地震による応力はニュートンの力学の第二法則 $N=ma$ によって ± 585 [N/m^2]と計算される。次に重力の斜面垂直下方向成分は $mg\cos 40^{\circ}$ によって 1682 [N/m^2]である。これによって斜面垂直上方向の垂直抗力 $N=1097\sim 2267$ [N/m^2]の値をとり得ると考えられる。

次に斜面平行方向の応力のつり合いを考える(図-5)。斜面平行方向に働く力は重力の斜面平行方向成分、地震による応力、それから摩擦力である。符号は斜面上向き(積雪を支えている力の方向)をプラス、斜面下向き(雪崩の崩落方向)をマイナスとする。斜面重力の斜面平行方向成分は $mg\sin 40^{\circ}$ によって -1411 [N/m^2]、地震による斜面平行方向応力は ± 654 [N/m^2]。そして摩擦力は $f=\mu N$ であり、遠藤・秋田谷(1974)が実験的に求めた裸地の摩擦係数を平均したものを採用して $\mu=0.69$ とすると最大

大静止摩擦力 $f=757\sim 1564$ [N/m^2]と計算される。地震がない時には $f=1159$ [N/m^2]である。

以上の各成分を総合すると、地震が起きたときに積雪に作用したと考えられる最大の斜面平行方向の応力の合力は、地震による影響が最大である時(地震による斜面平行方向の応力がマイナスで、斜面垂直方向の応力が上向きである場合)、力の合力は -968 [N/m^2]と計算される。

一方、地震がないときは斜面方向の合力は -252 [N/m^2]となり、地震が起きなくても摩擦力だけでは支えきれず積雪は動き出すことになる。

4.3 斜面積雪上部に作用した雪粒子の結合による張力

雪崩発生には多くの場合、積雪の破壊を伴う。積雪の破壊には引張り、せん断、圧縮の3つが考えられ、

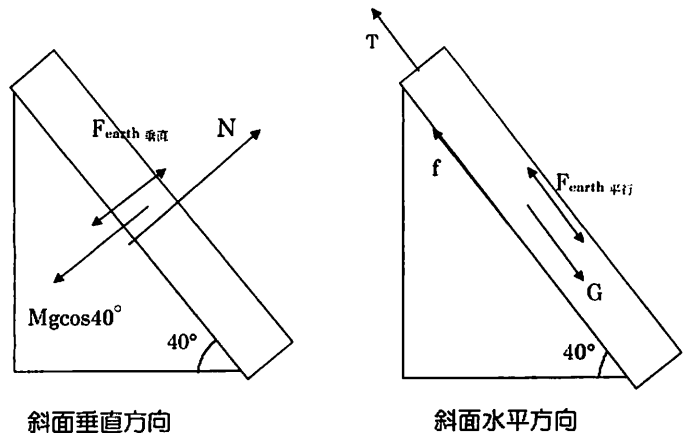


図-5 斜面垂直方向と斜面水平方向の力のつり合い

破壊強度

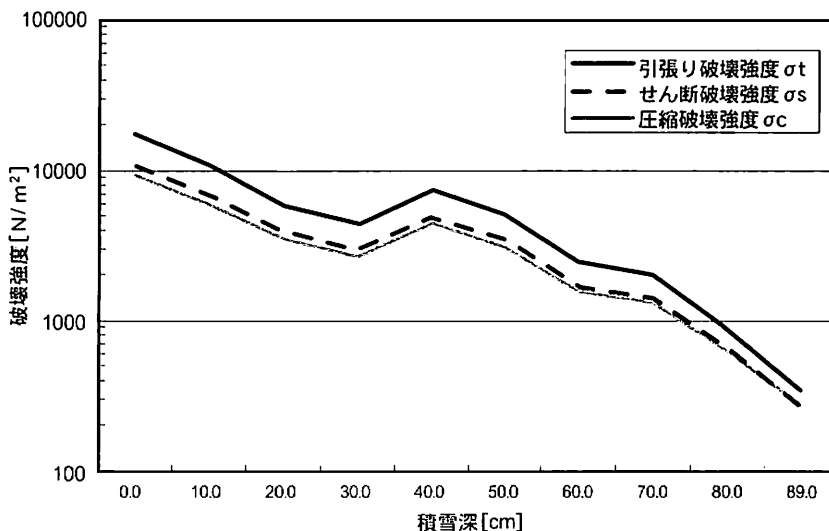


図-6 塩沢町における積雪の破壊強度の鉛直分布
Watanabe(1977)の式により積雪断面の硬度測定値から算出

引張り破壊強度は最も大きく、続いてせん断破壊強度、圧縮破壊強度の順に大きな力が必要である。硬度と破壊強度にはよい相関関係があることが勝谷(1940)やMellor(1975)など過去の多くの研究によって明らかにされている。塩沢町の断面観測地点で得られた積雪深10cmごとのプッシュプルゲージによる硬度からWatanabe(1977)の式によってそれぞれ引張り破壊強度、せん断破壊強度、圧縮破壊強度を計算したものを図-6に示す。

ここで、斜面積雪は地震前にクラックなどが入っていなかったと想定すると、上部において接続する平坦な地形の積雪から張力によって支えられていたことになる。積雪下部は除雪で雪が反対側の崖に捨てられていたため積雪下部における支えはなかったものと考えられる(図-3)。よって、ここでは積雪上部の引張りの力のみを計算する。

崩落した積雪をひとつの剛体として計算すると積雪の体積は154 [m³]であるから、重力による斜面平行方向成分 $G = Mg \sin 40^\circ = 2.17 \times 10^5$ [N]、最大の地震による力は $F_{\text{earth平行}} = Ma_{\text{平行}} = 1.01 \times 10^5$ 、最大静止摩擦力は $f = 1.17 \sim 2.41 \times 10^5$ [N] (地震がないときには $f = 1.78 \times 10^5$ [N]) である。破断面に作用した積雪の最大張力は図6のグラフを利用して積雪深10cmごとに平均の引張り破壊強度を面積でかけて足し合わせると $T = 1.04 \times 10^5$ [N] である。

これらを総合して、張力を加え崩落した積雪全体をひとつの剛体として考えた斜面平行方向の力のつり合いは、地震による外力が働いたとき雪崩が発生したので、次の不等式が成り立たなくてはならない。

$$f + T \leq G + F_{\text{earth平行}} \quad \dots (1)$$

これに先ほど得られた数値を代入すると、左辺 = $(1.17 + 1.04) \times 10^5$ [N] = 2.21×10^5 [N] であり、右辺 = $(2.17 + 1.01) \times 10^5$ [N] = 3.18×10^5 [N] であるから、不等式を満たすことになる。

一方、地震による外力が働かないときは雪崩が発生しなかったので、次の不等式が成立しなくてはならない。

$$G \leq f + T \quad \dots (2)$$

先ほどと同様に数値を代入すると左辺 = 2.17×10^5 [N]、右辺 = 2.82×10^5 [N] であり、不等式を満たしている。

よって、この斜面積雪が地震前は破断面が形成されておらず、斜面積雪上部において雪粒子の結合による張力が働いていたとした仮定は妥当であると考えられる。

5. 過去の事例との比較・評価

東浦他(1979)の研究で解析された1978年山形県最上郡大蔵村の地震の最大加速度は南北方向に100[gal]、東西方向に87.5[gal]、上下方向に12.5[gal]であった。このとき、単位面積当たりの積雪に対する重力による作用が961[N/m²]であるのに対して、地震による応力は128[N/m²]と計算されている。斜面下向きの応力全体のうち、地震による寄与は最大12%程度である。

今回の雪崩ではこれよりも雪の密度が大きかったため重力による作用1411[N/m²]と大きく、また地震の最大加速度も3倍程度であるため、地震により単位面積当たりの積雪に作用した応力は約5倍の654[N/m²]になっている。斜面下向きの応力全体のうち、地震による寄与は最大約32%と大きくになっている。

6. 考 察

地震によって積雪に与えられる影響は、最大の見積もりで重力の斜面平行方向分力の半分程度の大きさになり、また、斜面垂直方向では上向きの加速度により積雪を支えている摩擦力を3割程度減少させる結果となった。これにより、地震発生前は地面との摩擦力と、積雪上部の雪粒子の結合力に起因する張力によって、十分に積雪は支えられていたが、地震によって積雪に対して瞬間的に斜面平行下向きに大きな外力が加わったことで積雪が引張り破壊を起こし、張力による支えがなくなったことによって発生したと考えられる。また、斜面垂直上向き方向の外力によって底面摩擦力が瞬間的に減少したことも雪崩発生を助長している可能性がある。

現場付近では、北西斜面のみ雪崩が発生し、そのカーブを曲がって西方地区側にすぐ行ったところの北東斜面では積雪上部にクラックが入って上からの張力の支えがなくなったにもかかわらず雪崩は発生していなかった。これは方位の違いによって雪質が多少違っていたことや、地震の加速度が北西方向に卓越していたことが推測されるが、今回のような平地積雪の断面観測データと3方向の地震の最大加速度データのみからでは解析することができない。

7. ま と め

地震により積雪に働いた外力は重力の斜面下向き成分の最大46%にあたり、摩擦力は地震による加速度の斜面垂直成分により、最大35%減少する計算結果となった。すなわち、斜面下向きの力が最大46%増加し、斜面上向きに支える力が最大35%減少したために、積雪に働く力の合力が上部斜面の屈曲点において引張り破壊強度を越え、引張り破壊を起こして雪崩が発生したものと考えられる。

他の斜面に比べ今回の雪崩箇所が崩れやすかった原因の一つには、除雪によって下からの支えがなかったため上部の張力を断ち切れれば雪崩が起きる状況にあったことがいえる。しかし、現場周辺の他の斜面でこのとき雪崩が起きなかった理由を同様の力学的安定度解析によって説明するには、さらに詳細な加速度データと広域積雪観測データが必要である。

本研究では、地震による雪崩の一例に関する詳細なデータを提示すると共に、当時の積雪の破壊強度を調べ、地震による外力で破壊し得る積雪状態にあったことが明らかになった。地震発生の際には毎年雪崩が頻発するような急な斜面について十分な警戒が必要である。

謝 辞

この研究は、京都大学防災研究所の入倉孝次郎教授から提供して頂いた地震の加速度データを用いて今回の解析を行った。入倉教授に深く感謝する。

また、北海道教育大学の尾関俊浩助教授には、積雪上部に働く引っ張りの応力を考慮すべきという有益な助言を頂いた。

積雪断面観測を行った財団法人鉄道総合技術研究所塩沢雪害実験所の河島克久博士、遠藤徹氏、高橋正夫氏には多くのアドバイスと協力を頂いた。この場を借りて厚くお礼申し上げます。

参考文献

遠藤八十一・秋田谷英次(1974):斜面積雪の滑動実験(序報),低温科学 物理篇,32,267-272.

勝谷稔(1940):積雪の密度,硬度,抗張力及び抗剪力測定成績,日本雪氷協会論文集,1,44-66.

東浦将夫・中村勉・中村秀臣・阿部修(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.

Mellor, M. (1975): A review of basic snow mechanics, IAHS-AISH Pub., 114, 251-291.

Watanabe, Z. (1977): The influence of snow quality on the breaking strength, *Sci. Rep. Fukusima Univ.*, 27, 27-35.