

戦-18 豪雪時における雪崩危険度判定手法に関する研究(2)

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 18～平 20

担当チーム：寒地道路研究グループ（雪氷）

研究担当者：加治屋安彦、松澤勝、伊東靖彦、
松下拓樹

【要旨】

道路管理上のパトロール要領と北海道における雪崩対策技術資料の提案に向けて、北海道における雪崩事例の気象解析、北海道の雪質に関する積雪観測と雪崩対策に関する現地実験を実施した。その結果、北海道で近年報告が多い斜面積雪が雪崩予防柵をすり抜ける現象は、降雪強度が大きく短時間のうちに積雪安定度が低くなる場合に発生することがわかった。また北海道の積雪の剪断強度は本州における既存研究に比べて小さく、積雪安定度が高くなるのに要する時間が長い。このことは雪崩による通行規制の解除判断に影響すると考えられる。さらに現地実験より、すり抜け対策として既設の雪崩予防柵に鋼製メッシュパネルを取り付ける方法の有効性と課題点を明らかにした。

キーワード：雪崩、道路、剪断強度、安定度、豪雪

1. はじめに

近年、平成 18 年豪雪、平成 16 年北見豪雪等の記録的な豪雪に伴い各地で雪崩災害が頻発した。しかし、雪崩に対する交通路通行規制の判断に非常に苦慮している上、雪崩の危険箇所点検および応急対策手法が確立されていない状況にある。また北海道の国道では、斜面積雪が雪崩予防柵をすり抜けて道路上に達する雪崩が発生し問題となっている。このため雪崩危険度判定方法等による雪崩対策が必要とされており、寒地道路研究グループ雪氷チームでは土砂管理研究グループ雪崩・地すべり研究センターと共同でこの課題に取り組んでいる。

本文では、北海道に特有な雪崩に対するパトロール要領および対策技術資料の提案に向けて、雪氷チームで実施した北海道における雪崩事例の気象解析、雪崩危険度判定手法の検討、雪質に関する積雪観測および雪崩対策に関する現地実験の結果について報告する。

2. 前年度の結果

前年度実施した雪崩発生事例の気象解析と豪雪時の積雪断面観測から、以下のことが明らかとなった。

- ・ 斜面積雪が雪崩予防柵をすり抜ける現象は、気温 -4°C 以下で短時間に強い降雪がある時に発生する。
- ・ 豪雪時の積雪の剪断強度は既存研究に比べて小さく、圧密による密度増加がゆっくり進行する傾向にあり、積雪安定化に要する時間が長い。

今年度は北海道における雪崩事例の気象解析を引き続き行うとともに、雪崩危険度判定手法の検討、北海道の雪質に関する積雪観測と雪崩対策に関する現地実験を実施し、前年度の結果と合わせて考察を行った。

3. 研究の方法

3. 1 雪崩危険度判定手法の検討

既存文献等を調査し、北海道の雪質に適応可能で簡易に実施可能な雪崩危険度判定手法について検討した。

3. 2 北海道の雪質に関する積雪観測

北海道における豪雪時の積雪特性を把握するため、前年度実施した中山峠（標高 835m）での 2007 年 1 月 7～9 日にかけて積もった約 100cm の積雪層の剪断強度、密度の 3～12 時間ごとの測定結果を用いた。また、今年度は寒地土木研究所（札幌）にて、2008 年 1 月から 2 月にかけて新雪の剪断強度、密度、雪温の測定を 5 回行った。

3. 3 北海道に特有な雪崩発生事例の気象解析

過去 5 年間（2001 年 4 月～2006 年 3 月）に北海道の国道で発生した乾雪雪崩 23 事例について、雪崩発生地点近傍の気象観測データを用いて気象解析を行った。特に積雪が雪崩予防柵をすり抜ける現象の発生条件を明確にすることを目的とした。

3. 4 北海道における雪崩対策に関する現地実験

すり抜け現象の動態と対策工の効果を把握することを目的として、2007年12月から2008年2月の期間、中山峠の試験斜面に高さ2.5m、幅2.75mの雪崩予防柵を設置し、斜面積雪が動きやすいように柵の山側斜面にブルーシートを張った実験を行った。実験地にはすり抜け対策として鋼製メッシュパネルを取り付けた雪崩予防柵を設置し、無対策の場合との比較を行った。

実験は降雪が予測される場合にブルーシート上の除雪を行い、ビデオ監視によって雪崩の発生とすり抜け現象の有無を記録した。雪崩発生時の気象解析は、実験地に近接する寒地土木研究所の気象観測施設の気温、積雪深の観測データを用いた。

4. 結果

4. 1 雪崩危険度判定手法の検討

北海道では降雪中または降雪直後の乾雪雪崩が多く、簡易に実施可能な雪崩危険度判定手法として、斜面積雪の安定度を表す次式が有用と考えられる。この積雪安定度 SI は、積雪の剪断強度 σ と上載積雪荷重 Q による斜面勾配 θ の剪断応力の比である。

$$SI = \frac{\sigma}{Q \sin \theta} \quad (1)$$

上載積雪荷重 Q は積雪深の観測値から計算される。剪断強度 σ は密度 ρ との関係式から求められ、弱層を伴う場合と伴わない場合について以下の関係式がある。

$$(\text{弱層を伴わない場合}^{\text{2)})} \quad \sigma = 9.40 \times 10^{-4} \rho^{2.91} \quad (2)$$

$$(\text{弱層を伴う場合}^{\text{3) 4)})} \quad \sigma = 22.3 \left(\frac{\rho}{917} \right)^{1.73} \quad (3)$$

密度 ρ は圧密によって時間の経過とともに増加するが、時刻 t における密度 ρ_t はこれを考慮した次式³⁾から求め

ることができる。

$$\rho_t = \left\{ \frac{2Ag}{C} \cdot \cos^2 \theta \cdot t^2 + \rho_0^4 \right\}^{1/4} \quad (4)$$

ここで g は重力加速度、 A は降雪強度、 ρ_0 は積雪の初期密度、 t は経過時間である。 C は圧密の進行に関する係数で、以下に示す雪温 T_s との関係式³⁾を用いる。

$$C = 0.21 \exp(-0.166T_s) \quad (5)$$

新雪の場合は気温と雪温が同じと仮定でき、気温と積雪深の観測値から求まる降雪強度 A と雪温 T_s を入力条件として、式(1)～式(5)を用いて時々刻々の積雪安定度 SI を求めることができる。

4. 2 北海道の雪質に関する積雪観測

雪崩危険度判定手法において、式(2)と式(3)の剪断強度と密度の関係が重要となる。図1は積雪の剪断強度と密度の関係で、前年度の中山峠における測定結果と今年度の札幌における測定結果を示す。この図より、密度 100 kg/m^3 以上の場合、剪断強度の測定値は弱層を伴わない場合の関係式(式(2))に比べて小さい。特に密度 $100 \sim 150 \text{ kg/m}^3$ では、寒冷なカナダで測定された弱層を伴う場合の関係式(式(3))に近い結果となった。本研究の測定結果から剪断強度と密度の回帰式を求めたところ、

$$\sigma = 2 \times 10^{-5} \rho^{2.23} \quad (6)$$

となり、式(2)と式(3)の中間に位置する結果となった。

4. 3 北海道に特有な雪崩発生事例の気象解析

図2aは、乾雪雪崩発生前の降雪期間における平均気温と降雪強度の関係である。斜面積雪が雪崩予防柵をすり抜ける現象の発生気象条件に着目すると、すり抜け現象を伴わない雪崩に比べて気温が低かつ降雪強度が大きい気象条件で発生している。

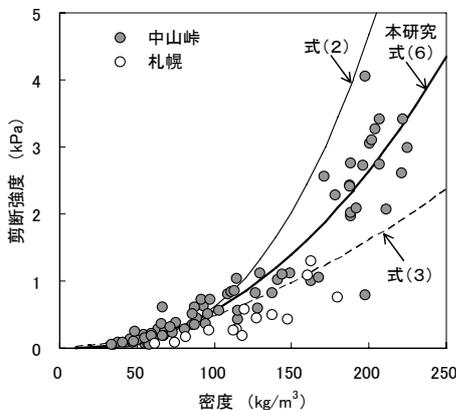


図1 積雪の剪断強度と密度の関係

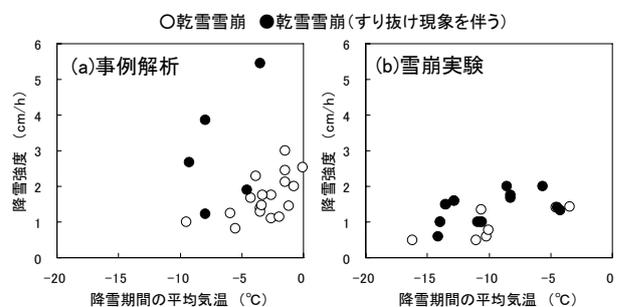


図2 雪崩発生前の降雪期間の平均気温と降雪強度の関係
(a)事例解析、(b)現地実験の結果

4. 4 北海道における雪崩対策に関する現地実験

図2bは、現地実験において雪崩が発生する前の降雪期間の平均気温と降雪強度の関係である。すり抜け現象を伴う雪崩は、すり抜け現象を伴わない雪崩に比べて降雪強度が大きい場合で発生し、気象解析の結果と同じ傾向となった。

図3に、すり抜け対策の有無別に観測期間中の雪崩発生回数をまとめた。対策なしの場合は雪崩の約70%ですり抜け現象を伴った。一方、対策ありの場合はすり抜け現象の発生がなかった。

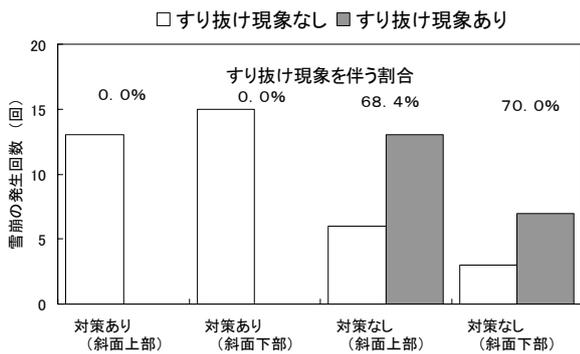


図3 雪崩実験における雪崩発生回数

5. 考察

5. 1 雪質に応じた雪崩危険度判定手法について

すり抜け現象を伴う雪崩の発生条件をより明確に示すために、気温と降雪強度を変数として積雪の安定度SIを計算した。積雪安定度の計算は、斜面勾配 $\theta=45^\circ$ の条件で行った。またすり抜け現象が比較的短時間の降雪で発生する傾向にあることから、降雪開始12時間後の計算結果をまとめた。

図4に、すり抜け現象が発生した時の気温と降雪強度の関係(図2)に積雪安定度の計算結果を合わせて示し

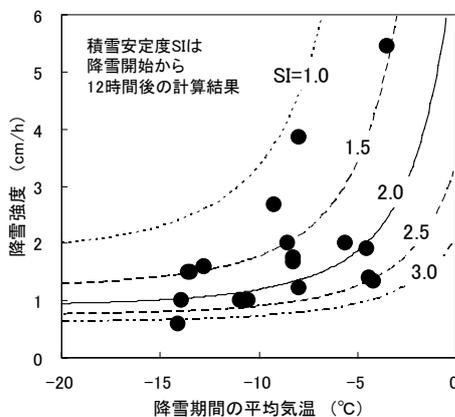


図4 すり抜け現象の発生条件

た。すり抜け現象を伴う雪崩は、降雪開始から12時間以内において積雪の安定度が2.0または2.5以下となる条件で発生している。つまり、すり抜け現象を伴う雪崩は、短時間のうちに上載積雪による剪断応力が積雪の剪断強度を上回るときに発生したと考えられる。このとき、降雪後間もないことから焼結による積雪粒子間の結合力が弱いと考えられ、雪崩予防柵を斜面積雪がすり抜ける現象が発生したと考えられる。北海道では降雪強度が大きくかつ低温である場合の雪崩危険度判定が重要と考えられる。

5. 2 道路管理上のパトロール要領について

雪崩に関する道路パトロール上の課題点として、雪崩による通行規制の客観的な解除判断の難しさがあげられる。そこで降雪強度が大きい場合の積雪の安定度SIの時間変化を試算した。このとき密度から剪断強度を推定する方法として、式(2)の既存関係式と式(6)の本研究で得た関係式を用いた場合の計算結果を比較した。計算は、降雪強度 $A=5\text{cm/h}$ 、雪温 $T_s=-5^\circ\text{C}$ 、斜面勾配 $\theta=45^\circ$ の条件で、24時間降雪が続いた場合について行った。

図5が積雪安定度の計算結果である。図の横軸は、降雪開始からの経過時間である。雪が降り始めると積雪安定度が小さくなって雪崩発生危険度は高まる。この傾向は既存関係式(式(2))と本研究の関係式(式(6))で同じである。一方、雪が止んだ降雪開始後24時間以降、積雪安定度が大きくなって雪崩発生の危険度は低くなる。このとき既存関係式(式(2))と本研究の関係式(式(6))では、積雪安定度の回復傾向に大きな差がある。例えば積雪安定度が2.0以上となる時間差は11時間であった。よって雪質の違いに応じた剪断強度と密度の関係式を捉えることが、雪崩による通行規制の解除判断を明確にする上で重要となる。今後は雪質に応じた雪崩危険度判定手法についてさらなる検討を行い、道路管理上のパトロール要領へ反映する予定である。

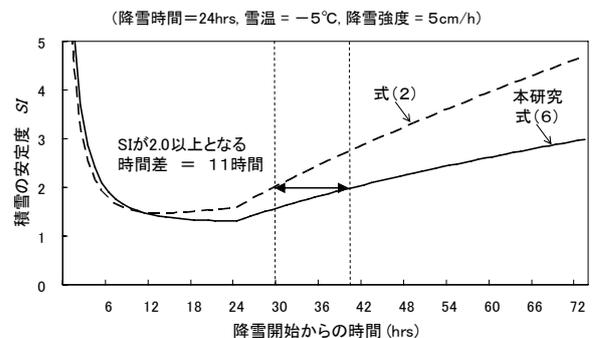


図5 積雪安定度の試算結果

5.3 北海道における雪崩対策技術資料について

現地実験より簡易に実施可能なすり抜け対策工として、既設の雪崩予防柵に鋼製メッシュパネルを取り付ける工法の有効性が確認された。しかしすり抜け対策を施工した場合でも、雪崩予防柵の堆雪容量を超えると斜面を流下してきた雪が柵の側方より流出した。今後は現地の積雪深や降雪強度と雪崩予防柵の堆雪容量の関係について調査を行い、雪崩予防柵高さ配置等について検討することが必要であると考えられる。以上を検討した上で最終年度に北海道における雪崩対策技術資料を作成する予定である。

6. まとめ

北海道における雪崩事例の気象解析、北海道の雪質に関する積雪観測および雪崩対策に関する現地実験を実施し、以下のことが明らかとなった。

- ・ 雪崩危険度判定手法として積雪の剪断強度と剪断応力の比を積雪安定度として評価する方法を示した。
- ・ 上記手法において剪断強度は密度との関係式から求められる。ただし積雪断面観測より積雪の剪断強度は既存研究に比べて小さいことがわかった。
- ・ 上述の剪断強度の差は雪崩危険度判定手法において雪崩による通行規制の解除判断に影響を及ぼすことが明らかとなった。
- ・ 気象解析と現地実験から、斜面積雪が雪崩予防柵をすり抜ける現象は降雪強度が大きくかつ気温が低い場合に発生することが明らかとなった。
- ・ 北海道では降雪強度に着目した雪崩危険度判定手法を構築する必要があり、雪質に応じた剪断強度と密度の関係式を見出すことが必要である。
- ・ 雪崩対策に関する現地実験より、鋼製メッシュパネルを既設柵に取り付けるすり抜け対策工の有効性と問題点が確認された。

以上の研究結果をもとに、雪質に応じた雪崩危険度判定方法の構築、北海道に特有な雪崩に対するパトロール要領および対策技術資料の提案に向けて、土砂管理研究グループ・地すべり研究センターと共同で取り組んで行く予定である。

参考文献

- 1) Matsushita, H., M. Matsuzawa, Y. Ito, and Y. Kajiya : Characteristics of meteorological condition and an example of countermeasures for road avalanches in recent years in Hokkaido, Japan, Proc. 8th International Symposium on Cold Region Development, in CD-ROM, Tampere, Finland, 2007
- 2) 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
- 3) Jamieson, B., and C. D. Johnston : Evaluation of the shear frame test for weak snowpack layers、Annals of Glaciology、32、pp.59-69、2001
- 4) Jamieson, J. B., and C. D. Johnston : Refinements to the stability index for skier-triggered dry-slab avalanches、Annals of Glaciology、26、pp.296-302、1998
- 5) 遠藤八十一：降雪強度による乾雪表層雪崩の発生予測、雪氷、55、pp.113-120、1993
- 6) Abe, O. : Creep experiments and numerical simulations of very light artificial snowpacks, Annals of Glaciology、32、pp.39-43、2001
- 7) 松下拓樹、松澤勝、伊東靖彦、加治屋安彦：雪崩予防柵を斜面積雪がすり抜ける現象の発生気象条件について―大雪湖周辺の事例解析―、北海道の雪氷、26、pp.91-94p、2007

RESEARCH ON AVALANCHE RISK ASSESSMENT METHOD IN HEAVY SNOW (2)

Abstract : In this study, data analysis, snow pit observations and a field experiment were carried out in relation to proposals for road management to mitigate avalanche risk and a manual to prevent avalanches in Hokkaido. The data analysis showed that avalanches with slip-through phenomena (in which snow slides through avalanche fences and onto roads) tends to occur when snowfall intensity is high and the stability of snow accumulated on slopes decreases rapidly in a short period of time. The snow pit observations indicated that snow cover in Hokkaido has lower shear strength than that in mainland Japan, meaning that it takes longer to stabilize. Consequently, the properties of the snow must be taken into account when formulating traffic regulations. The field experiment confirmed the effectiveness of installing steel mesh on avalanche fences to prevent the slip-through phenomena, as well as problems related to such installation.

Key words : avalanche, road, shear strength, stability, heavy snow