

戦-38 雪崩対策工の合理的設計手法に関する研究(2)

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 21～平 23

担当チーム：雪氷チーム

研究担当者：松澤 勝、中村 浩、松下 拓樹、
坂瀬 修

【要旨】

雪崩予防柵の現行の設計手法では、積雪深が小さいほど斜面方向の設置間隔（列間斜距離）が短くなり、柵の設置基数が多くなる課題が指摘されている。そこで、異なる列間斜距離の雪崩予防柵に作用する雪圧と斜面積雪の移動に関する比較試験を行った。試験の結果、雪崩予防柵の列間斜距離が長いと雪圧と移動速度はともに大きくなった。既往の理論式による計算雪圧との比較から、移動速度が大きい場合の雪圧を考慮することで、列間斜距離を現行の設計条件よりも長くとることができる可能性が示唆された。

キーワード：雪崩予防柵、設計、列間斜距離、雪圧、グライド、クリープ

1. はじめに

現行の雪崩予防柵の斜面方向の設置間隔（以下、列間斜距離）の算出方法¹⁾は、40年以上前のスイスでの研究成果等に基づき導入されたものである²⁾。例えば、北海道開発局の道路設計要領³⁾では、列間斜距離 L の設計値を式(1)より算定している。

$$L = \frac{2 \cdot \tan \theta}{\tan \theta - \tan \delta} H_s \quad (1)$$

ここで、 L ：列間斜距離 (m)、 H_s ：設計積雪深 (m)、 θ ：斜面勾配 (°)、 δ ：雪と地面の摩擦角 (°)。

式(1)において、 $\tan \theta$ と $\tan \delta$ (=摩擦係数 μ で、安全を見て $\mu=0.5$ が採用される)は、斜面勾配等が同一とみなせる現地条件の場合には、定数となり、列間斜距離 L は設計積雪深 H_s に正比例する。この場合、設計積雪深が小さいほど、列間斜距離は短く設定されることから、結果として斜面に設置する雪崩予防柵の基数は増加する。そのため、積雪の少ない地域で柵の設置基数が多くなり、建設コストが割高になるケースが生じる課題が指摘されている⁴⁾。



図1 試験斜面の状況

本研究では、列間斜距離の違いによる雪崩予防柵に作用する雪圧と斜面積雪の移動状況を把握するための比較試験を行い、雪崩予防柵の列間斜距離を広げる場合の設計の考え方について検討を行った。

2. 研究方法

2.1 試験箇所の概要

雪崩予防柵の比較試験は、札幌近郊の中山峠（標高 835m）の平均勾配 37° の斜面で行った。この斜面に上下2段、左右3列の雪崩予防柵6基を用いて試験を行った（図1）。試験箇所の設計積雪深は2.6mで、これに基づいた雪崩予防柵の設計における柵高は2.5m、列間斜距離は15mである。

試験に用いた雪崩予防柵は、柵高2.5m、幅2.75mで、3列ある柵の列間斜距離は、それぞれ10m、15m、20m（図1）とした。この3列の雪崩予防柵を用いた試験から、以下に示す列間斜距離の違いによる柵への雪圧と斜面積雪の移動状況への影響を調べた。

2.2 雪崩予防柵に作用する雪圧の計測

雪崩予防柵に作用する雪圧の計測は、各列の下段の柵について、2本ある主索ケーブルのうち1本にロードセル（LU-5TE）を設置して行った。主索ケーブルの引張荷重の計測値（N）の2倍を柵全体に作用する荷重と考え、これを柵幅で除した値を雪圧（N/m）とした。測定期間は、2009年12月4日から2010年5月10日である。ただし、列間斜距離15mの柵への雪圧は、1月6日以降欠測となり解析から除いた。積雪深と気温は、近傍の平地にて計測した。

2. 3 斜面積雪の移動状況に関する断面観測

斜面積雪の移動状況は、図2に示すおがくずを用いる方法により観測した⁵⁾。積雪深が2m以上となった3月6日に、スノーサンプラー(断面積20cm²)を用いて雪面から積雪を鉛直方向に円筒状に抜き取り、地面に目印の杭を打った後に積雪内におがくずを充填した。充填箇所は、列間に3~4箇所である。おがくず充填から32日後(4月7日)と51日後(4月26日)に、おがくず充填箇所の積雪横断面を露出させ、杭位置からのおがくずの変位量を測定した。この測定値から地面における斜面方向の変位量を求め、これをおがくず充填からの日数で除した値をグライド速度 U_g (cm/day) とした。また、おがくずの変位量の測定値から、図2に示す方法により、現行の設計雪圧の計算に必要なグライド係数 N とクリープ係数 K を求めた。

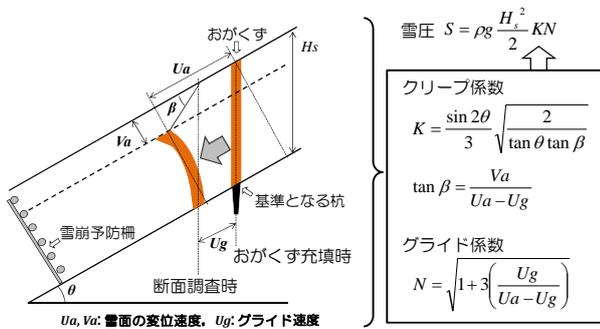


図2 おがくずを用いた積雪移動状況の観測方法

3. 結果

3. 1 雪崩予防柵に作用する雪圧の計測結果

図3の雪圧の推移より、積雪深が2mを超えた1月初旬から列間斜距離10mと20mの雪崩予防柵へ

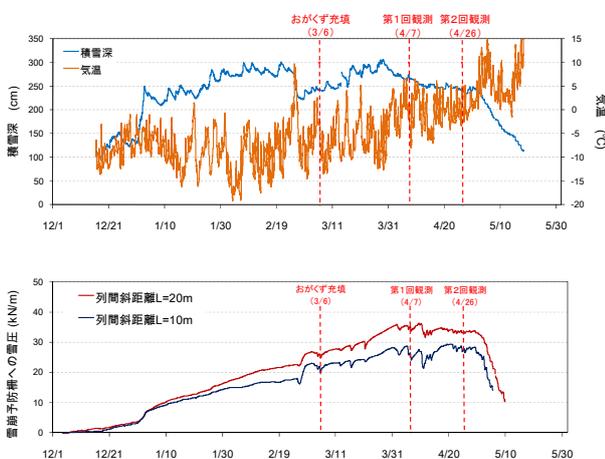


図3 試験期間中の気温と積雪深、雪圧の推移

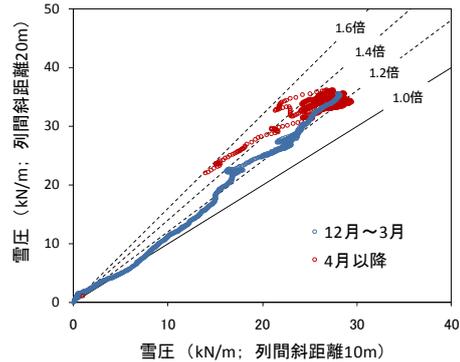


図4 列間斜距離10mと20mの場合の雪圧の比較

の雪圧に差がみられ始め、4月上旬の融雪期までその差が広がりながら雪圧は増加を続けた。

図4は、列間斜距離10mと20mの雪崩予防柵に作用する雪圧を比較したものである。積雪深が増加傾向にあった3月までの期間では、両者の雪圧はほぼ比例の関係にあり、列間斜距離20mの雪圧が、10mの雪圧に比べて約1.2倍大きい。一方、4月以降の融雪期では雪圧は減少傾向となり、両者の関係にばらつきがみられ、列間斜距離10mと20mの雪圧の差はさらに大きくなった。

3. 2 斜面積雪の移動状況

3. 2. 1 グライド速度の測定結果

図5は、おがくず充填から第1回観測までの期間と第1回観測から第2回観測までの期間に分けた場合のグライド速度と柵からの斜距離との関係である。両期間とも柵から離れるほどグライド速度が大きくなる傾向にある。図5aの積雪増加時期では、列間斜距離15mと20mの場合のグライド速度に大きな差はみられないが、列間斜距離が10mと短い場合のグライド速度は小さい。一方、図5bの融雪期では、分布にややばらつきがあるものの、列間斜距離10m、15m、20mの順にグライド速度が大きくなる傾向となった。

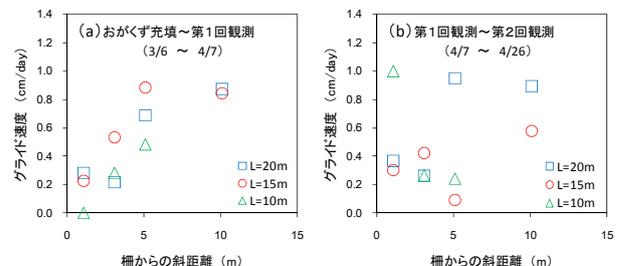


図5 グライド速度と柵からの斜距離との関係
(a) おがくず充填から第1回断面観測までの期間、
(b) 第1回断面観測から第2回断面観測までの期間

3. 2. 2 グライド係数の測定結果

図6のグライド係数と柵からの斜距離との関係より、グライド係数は柵から離れるに従い大きくなるが、列間斜距離の違いによる差はみられなかった。

図7は、グライド係数とグライド速度との関係において、今回の測定値と現行の設計値を比較したものである。試験斜面のグライド係数の設計条件¹⁾は、北向き斜面の地表面状態IV（葉の長い草地）に該当し、設計上のグライド係数は2.6(図7の太破線上側)である。また、図7には、積雪密度400kg/m³、斜面勾配40°、斜面に垂直な積雪深2mの場合の理論曲線⁷⁾も示した。図7より、グライド係数の測定値は、設計値2.6に比べて小さいが、グライド速度との関係において理論曲線によく対応した分布を示した。

3. 2. 3 クリープ係数の測定結果

図8に示すクリープ係数の測定値は、柵から離れるほど小さくなる傾向となり、雪崩予防柵の列間斜距離の違いによる差は明確ではない。ただし、積雪増加期(図8a)における列間斜距離10mの柵付近のクリープ係数が最も大きい結果となった。

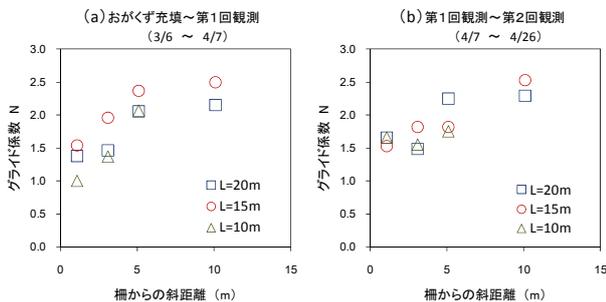


図6 グライド係数と柵からの斜距離との関係
(a) おがくず充填から第1回断面観測までの期間、
(b) 第1回断面観測から第2回断面観測までの期間

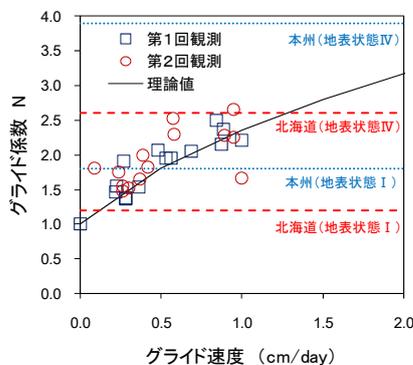


図7 グライド係数とグライド速度の関係
破線は、北向き斜面の設計値¹⁾、実線は理論値⁷⁾

図9は、クリープ係数と積雪の全層平均密度との関係において、測定値と斜面勾配 θ が40°の場合の設計値¹⁾と理論値⁶⁾比較したものである。図9より、例えば、密度350kg/m³のクリープ係数Kの設計値は0.77 ($K/\sin 2\theta=0.79$)、理論値は0.72 ($K/\sin 2\theta=0.74$)で、これらに比べてクリープ係数の測定値は全体的に小さい結果となった。

4. 考察

4. 1 雪圧と列間斜距離の関係について (設計条件からの検討)

現行の雪崩予防柵の列間斜距離の決定は、雪圧論に基づき行われている¹⁾。今回の雪崩予防柵に作用する雪圧の測定結果から、列間斜距離が長くなると雪圧が大きくなることが示された。この節では、雪崩予防柵の設計に直接関係する雪圧の観点から、列間斜距離を現行の設計条件よりも長くとする場合の考え方について考察する。

現行の雪崩予防柵の設計雪圧は、式(2)から求められる¹⁾。また、雪圧の理論式には式(3)もある⁶⁾。

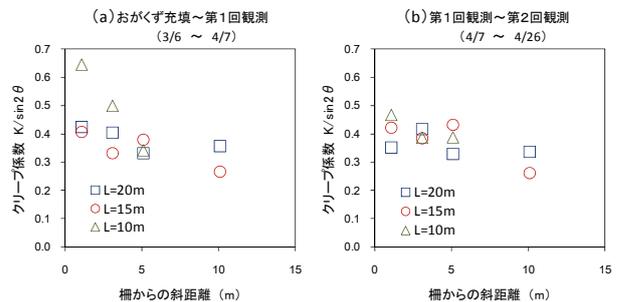


図8 クリープ係数と柵からの斜距離との関係
(a) おがくず充填から第1回断面観測までの期間、
(b) 第1回断面観測から第2回断面観測までの期間

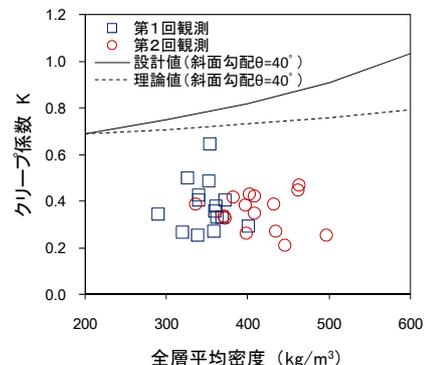


図9 クリープ係数と全層平均密度の関係
破線は設計値¹⁾、実線は理論値⁶⁾

式(2)は底面の抵抗力がグライド速度に比例する場合、式(3)は垂直応力に比例する場合に適用され、後者はグライド速度が大きく斜面積雪が滑りやすい状態の理論式と考えることができる(但し適用条件は明確ではない)⁶⁾。

$$S = \rho g \frac{H^2}{2} KN \quad (2)$$

$$S = \rho g H \cos \theta (\sin \theta - \mu \cos \theta) L \quad (3)$$

ここで、 ρ :積雪密度(kg/m³)、 g :重力加速度(m/s²)、 H :積雪深(m)、 θ :斜面勾配(°)、 μ :積雪の地面に対する摩擦係数、 L :列間斜距離(m)である。

これらの雪圧の式(2)と式(3)を連立させることで、式(4)が得られる。現行の列間斜距離の設計値の算定式(式(1))は、スイスの示方書²⁾により、式(4)に $K/\sin 2\theta=0.74$ と $N=2.7$ を与えることで得られたものである⁸⁾。これら $K/\sin 2\theta$ と N の値は、3章で示したように今回の測定条件においても安全側の値である。

$$L = \left(\frac{K}{\sin 2\theta} \right) N \left(\frac{\tan \theta}{\tan \theta - \mu} \right) H \quad (4)$$

図10は、雪圧 S と列間斜距離 L の関係において、2回の積雪断面観測時の測定値と式(2)と式(3)による理論値を比較した結果である。雪圧の測定値は、周辺積雪の辺縁荷重¹⁾を設計計算により見積もって差引いた値とした。雪圧の理論値の計算では、斜面勾配 $\theta=37^\circ$ 、摩擦係数 $\mu=0.5$ 、グライド係数 N とクリープ係数 K は設計値¹⁾として、 $N=2.6$ 、 $K=0.77$ ($\rho=350\text{kg/m}^3$ の場合)を用いた。積雪深 H と積雪密度 ρ は断面観測の測定値を用いた。

図10において、設計雪圧は、式(2)より設計積雪深2.6m等の条件で算出した23.5kN/mである。ま

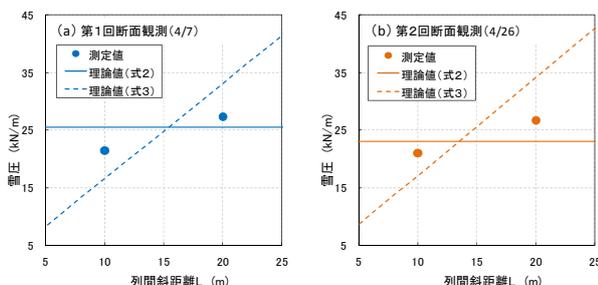


図10 雪圧の理論値と設計値の比較
(a) 第1回断面観測、(b) 第2回断面観測

た、列間斜距離の設計値は、式(2)と式(3)の設計上の交点にあたる15mである。

図10より、列間斜距離が設計条件より短い10mの場合、雪圧の測定値は、式(2)よりも小さく、設計条件からみて安全側の値となった。一方、列間斜距離 L が設計値よりも長い20mの場合、雪圧の測定値は、設計雪圧の式(2)よりも大きくなった。特に、融雪期にあたる4月26日(図10b)でその差が大きい。ただし、列間斜距離20mの雪圧の測定値は、式(3)から求めた理論値よりは小さい。

以上より、列間斜距離を長くすることにより雪崩予防柵に作用する雪圧は大きくなるが、式(3)によって雪圧の増加分を考慮することで、列間斜距離を現行の設計条件よりも長くとることができる可能性が示唆される。

4.2 グライド速度と列間斜距離との関係について (雪崩発生条件からの検討)

列間斜距離を求める別の方法として、斜面積雪移動量等の現象面から検討する方法が考えられる。つまり、グライド速度を雪崩の発生条件⁹⁾以下になるように列間斜距離を決める方法である。この節では、雪崩の発生条件に関するグライド速度に着目して、列間斜距離を現行の設計条件よりも長くする場合の考え方について考察する。

図11は、おがくず充填から第2回観測までの期間全体のグライド速度と柵からの斜距離との関係である。データ数が少ないため試みとして、グライド速度の柵からの斜距離に対する対数近似曲線を図に示した。この対数近似が当てはまると仮定すると、列間斜距離を長くするほど斜面積雪全体のグライド速度が大きくなる。柵から10m以内の箇所では、グライド速度の斜面方向の差が大きく、積雪の圧縮領域

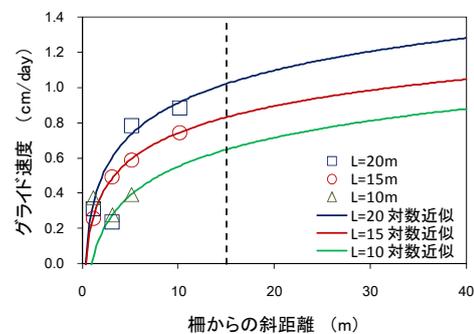


図11 グライド速度と柵からの斜距離との関係
おがくず充填から第2回観測までの期間全体のグライド速度と斜距離との関係。実線は対数近似曲線

と考えられる。一方、柵から 10m 以上離れた箇所では、グライド速度の斜面方向の変化が緩やかで、ある一定値に漸近する傾向となり、積雪の圧縮や引張の影響が比較的少ない中立領域であると考えられる。

以上より、列間斜距離を長くとり、グライド速度がほぼ一定の中立領域の積雪が、柵付近の圧縮領域の積雪に加わり、これによって斜面積雪全体のグライド速度が大きくなると考えられる。また、このことが前節で示した雪圧の増加に寄与したと考えられる。ただし、今回の試験で測定されたグライド速度は最大で 1cm/day となっており、雪崩発生に注意が必要な条件 (1cm/h=24cm/day)⁹⁾ より小さい。

5. まとめ

本研究では、異なる列間斜距離の雪崩予防柵に作用する雪圧と斜面積雪の移動に関する比較試験を行い、雪崩予防柵の列間斜距離を広げる場合の設計の考え方について検討を行った。

雪圧計測の結果、雪崩予防柵の列間斜距離が長いと、柵に作用する雪圧と斜面積雪のグライド速度はともに大きくなった。この理由として、列間斜距離を長くすることによってグライド速度がほぼ一定の中立領域の積雪に加わり、これにより柵付近の圧縮領域の積雪のグライド速度も大きくなり、雪圧の増加に寄与したと考えられる。また、既往の雪圧の理論式による計算雪圧との比較から、グライド速度が大きい場合の理論式による雪圧を考慮することで、列間斜距離を現行の設計条件よりも長くとることができる可能性が示唆された。

今後も雪崩予防柵の列間斜距離に関する比較試験を継続し、積雪の少ない地域における雪崩予防柵設計の課題解決を見据えた設計手法を検討する予定である。

参考文献

- 1) 日本建設機械化協会、雪センター：「雪崩対策」、2005 除雪・防雪ハンドブック、pp143-246、2005 年
- 2) 荘田幹夫ほか：「なだれ防御構造物の設計指針(その 1)」、道路、pp63-73、1966 年 5 月
- 3) 北海道開発局：「北海道開発局 道路設計要領 第 2 集 道路付帯施設」、2010 年
- 4) 大槻政哉：「雪崩対策施設の設計に関する課題～雪崩予防柵の列間斜距離に着目して～」、日本雪工学会誌、Vol.25、pp270-275、2009 年
- 5) 本郷栄次郎：「送電用鉄塔脚部に作用する積雪荷重について」、雪氷、60 巻、pp473-490、1998 年
- 6) 遠藤八十一：「斜面積雪の動きと応力分布」、雪崩と吹雪 (前野紀一・福田正己編)、古今書院、pp24-42、2000 年
- 7) 日本建設機械化協会：「Haefeli の雪圧論」、新編 防雪工学ハンドブック、pp49-55、1988 年
- 8) 松澤勝者：「設計積雪深が小さくなるとなぜ雪崩柵の数が増えるのか」、コンサルタント北海道、No.115、pp45-47、2008 年
- 9) 納口恭明、山田穰、五十嵐高志：「全層なだれにいたるグライドの加速のモデル」、国立防災科学技術センター研究報告、38、pp169-180、1986 年