

雪圧と積雪の破壊条件に基づく 雪崩予防柵の列間斜距離に関する検討

(独) 土木研究所 寒地土木研究所 雪氷チーム ○松下 拓樹
坂瀬 修
松澤 勝

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である列間斜距離が短くなるため、柵の設置基数が多くなりコストが割高となる。これまでの試験結果より、列間斜距離を長くすると柵に作用する雪圧が増加することが示された。柵の部材等の強度を高めることで列間斜距離を長くとることができるが、列間の積雪が途中で破壊しない様にする必要がある。そこで、雪圧の増加と積雪の破壊条件との理論的な比較検討から、列間斜距離を長くできる範囲を考察した。その結果、主に積雪深が小さい場合または斜面勾配が小さい場合で、雪崩予防柵の列間斜距離を長くできる可能性があると考えられる。

キーワード：雪崩予防柵、設計、列間斜距離、雪圧、圧縮破壊強度

1. はじめに

積雪寒冷地では、雪崩対策として雪崩予防柵が多く設置されている(図-1)。近年、公共事業のコスト削減が求められているが、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である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^{1) 2)}。著者らは、これに関する比較試験を行い、列間斜距離を長くとることによって雪圧が増加するが、雪圧の増加分を考慮した設計の採用によってコスト削減ができる可能性を示唆した³⁾。

本論文では、雪崩予防柵の列間斜距離を長くすることができる範囲について、雪崩の発生条件として積雪の破壊条件に着目し、これと雪圧との理論的な比較検討によって考察を行った。



図-1 雪崩予防柵(吊柵)の設置状況の例

2. 雪崩予防柵の列間斜距離に関する課題

現行の雪崩予防柵の設計方法は⁴⁾、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^{5) 6)}。例えば、雪崩予防柵の斜面方向の設置間隔(以下、列間斜距離 L)は式(1)より算定され^{4) 6)}、北海道開発局の道路設計要領⁷⁾でも用いられている。

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

ここで、 H_s は設計積雪深(m)、 θ は斜面勾配($^\circ$)、 δ は雪と地面の摩擦角($^\circ$)である。 $\tan \delta$ は雪と地面との摩擦係数 μ に等しく、除雪・防雪ハンドブック⁴⁾で

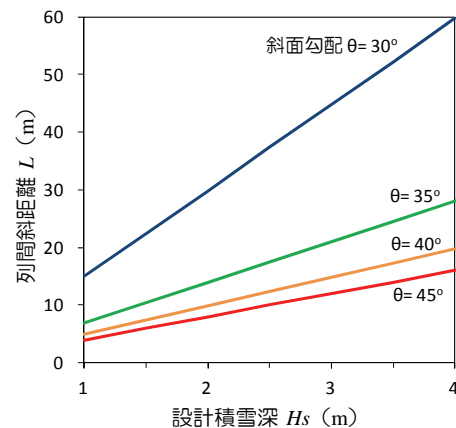


図-2 雪崩予防柵の列間斜距離と設計積雪深との関係。摩擦係数 $\mu=0.5$ とした場合の式(1)による計算結果。

は $\mu (= \tan \delta) = 0.5 \sim 0.6$ 、北海道開発局の道路設計要領⁷⁾では安全を見て0.5が採用されている。

式(1)において、 $\tan \theta$ と $\tan \delta$ 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 Hs に正比例する。図-2は、式(1)より求めた列間斜距離 L と設計積雪深 Hs の関係である。この図に示すように、同じ斜面勾配であれば設計積雪深が小さいほど、列間斜距離が短く設定される。つまり、積雪の少ない地域で、列間斜距離が短くなって斜面に設置する雪崩予防柵の基数が多くなるため、建設コストが割高になる課題が指摘されている^{1) 2)}。

3. これまでの検討内容

雪崩予防柵の列間斜距離と柵に作用する雪圧との関係を調べるため、札幌近郊の中山峠（平均斜面勾配37°）で現地試験を行った³⁾。試験箇所の設計積雪深は2.6mで、これに基づく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。試験では、柵高2.5mの雪崩予防柵を用い、列間斜距離を設計値より短い10mと長い20mとした場合の雪圧を測定した。

図-3が列間斜距離と雪圧との関係を測定した結果の例である³⁾。列間斜距離が長いと雪圧が大きくなることがわかる。図-3には、現行の設計条件と比較するため、式(2)より求めた現行の雪崩予防柵の設計雪圧^{4) 6)}と、式(3)から求められる理論的な雪圧⁸⁾を示した。

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

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

ここで、 S は雪圧 (N/m)、 ρ は積雪密度 (kg/m^3)、 g は重力加速度 (m/s^2)、 H は積雪深 (m)、 K はクリープ係数、 N はグライド係数である。式(3)は、積雪の移動（グライド）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⁸⁾。なお、列間斜距離 L は、雪圧の式(2)と式(3)を連立させて得られた式(4)から求められる。

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

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^{5) 6)}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。

さて、図-3において、列間斜距離の設計値は、式(2)と式(3)の設計上の交点付近にあたる15mである。列間斜距離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が、式(3)から求めた理論値よりは小さい結果となった。よって、列間斜距離

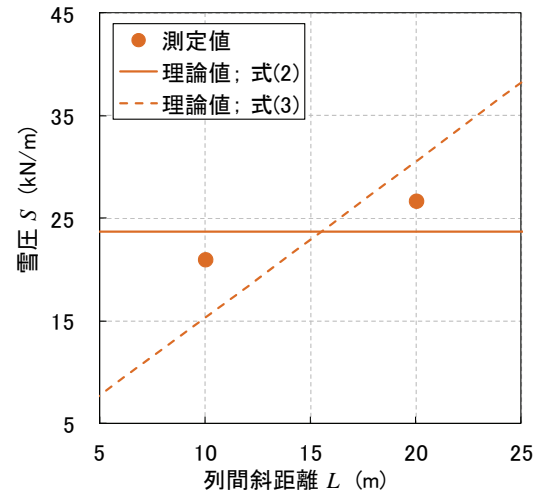


図-3 雪圧の理論値と測定値の比較³⁾。雪圧の測定値は、札幌近郊の中山峠において2010年4月26日に測定した柵高2.5mの雪崩予防柵に作用する雪圧。理論値は、雪圧測定時の柵付近の積雪深と密度の実測値に基づいて式(2)と式(3)から求めた計算値。

を長くすると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。ただし、列間斜距離を長くできる範囲を示すためには、以下に示すように雪圧の増加分を考慮した検討を行う必要がある。

4. 列間斜距離を長くできる範囲の検討方法

雪崩予防柵の列間斜距離を長くして式(3)によって雪圧の増加分を見込む場合、雪圧の増加によって斜面積雪の破壊が起き、雪崩が発生することが懸念される。そこで、列間斜距離を長くとることのできる範囲を明らかにするために積雪の破壊条件に着目し、雪圧として積雪に作用する荷重と積雪の破壊強度との比較検討を行う。

(1) 単位面積あたりの雪圧

雪崩予防柵が設置されている斜面において、雪圧は柵付近で最も大きくなると考えられる。雪圧 S を雪の破壊強度と比較する場合、式(2)と式(3)の雪圧の単位 (N/m) を単位面積あたりの荷重 (N/m^2) とする必要がある。そこで、図-4に示すように、式(2)と式(3)の雪圧 S (N/m) を斜面に垂直な方向の積雪深 $H \cos \theta$ (m) で除して、単位面積あたりの雪圧 P (N/m^2) とした（式(5)、式(6)）。

$$P = \frac{S}{H \cos \theta} = \rho g \frac{H}{2 \cos \theta} KN \quad (5)$$

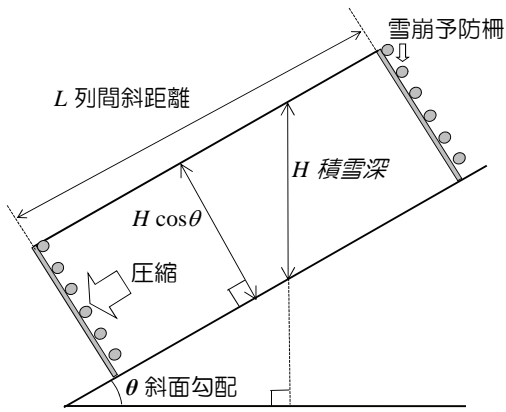


図4 雪崩予防柵と斜面における積雪深

$$P = \frac{S}{H \cos \theta} = \rho g (\sin \theta - \mu \cos \theta) L \quad (6)$$

雪圧 P の計算にあたり、北海道開発局の設計要領⁷⁾に基づいて、積雪密度 ρ は 350 kg/m^3 、摩擦係数 μ は 0.5 、クリープ係数 K は斜面勾配 θ ごとの設計値（例えば、 $\theta = 30^\circ$ で $K = 0.69$ 、 $\theta = 45^\circ$ で $K = 0.80$ ）、グライド係数 N は、列間斜距離の設計条件（式(1)）の導出に用いられた 2.7 とした。

(2) 雪の圧縮破壊強度の推定方法

雪圧 P として斜面積雪に作用する荷重は、図4に示すように、ここでは単純に雪を斜面下方に圧縮する方向に働くと考える。雪の圧縮破壊強度は、式(7)と式(8)に示す積雪密度 ρ との関係式⁹⁾から求めた。式(7)は新雪としまり雪の関係式、式(8)はざらめ雪やしもざらめ雪の関係式である。

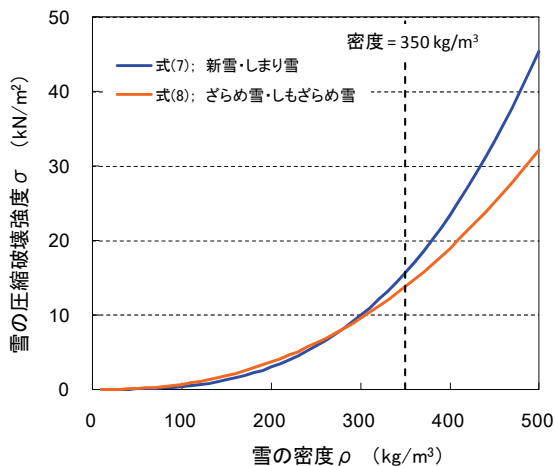


図5 雪の密度と圧縮破壊強度の関係。Watanabe(1977)⁹⁾によって得られた式(7)の新雪としまり雪における関係と、式(8)のざらめ雪としもざらめ雪における関係。

$$\sigma = 10g \times 10^{2.97 \log \rho 10^{-3} + 3.56} \quad (7)$$

$$\sigma = 10g \times 10^{2.37 \log \rho 10^{-3} + 3.23} \quad (8)$$

ここで、 σ は雪の圧縮破壊強度 (N/m^2) である。図-5は、式(7)と式(8)から求めた積雪の圧縮破壊強度 σ と密度 ρ との関係である。積雪密度 ρ が 300 kg/m^3 以上では、式(7)に比べ式(8)の圧縮破壊強度 σ の方が小さい。以下で行う雪圧 P との比較検討では、雪の圧縮破壊強度 σ は、雪圧 P の計算と同様に、積雪密度 $\rho = 350 \text{ kg/m}^3$ の値を式(7)と式(8)から求めた。

以上、式(5)と式(6)から求められた単位面積あたりの雪圧 P と、式(7)と式(8)から求まる積雪の圧縮破壊強度 σ との比較を行い、列間斜距離 L を長くともとのできる範囲について検討した。

5. 雪圧と圧縮破壊強度との比較検討による列間斜距離

図-6は、列間斜距離 L との関係において、柵付近の積雪に作用する単位面積あたりの雪圧 P と、雪の圧縮破壊強度 σ を比較したものである。雪圧 P は、斜面勾配 θ を 30° 、 35° 、 40° 、 45° とした4つの場合について計算した。式(5)と式(6)から計算された雪圧 P は、いずれも斜面勾配が大きくなるほど大きくなる。また、現行の設計に用いられる式(5)から求めた雪圧 P は、積雪深 H によって異なるため、積雪深 H が 2m と 3m の場合について求めた。式(5)と式(6)により求められた雪圧 P の交点が、設計上の列間斜距離であり、図-6には、積雪深 H が 2m と 3m の場合に対応した2つの交点がある。この交点を移動することが、列間斜距離を変更することとなる。

また、図-6には、式(7)と式(8)から求めた積雪密度 ρ が 350 kg/m^3 のときの圧縮破壊強度 σ も示した。この圧縮破壊強度 σ と、現行の設計に用いられる式(5)から求めた雪圧 P を比較すると、積雪深 H が 2m の場合、いずれの斜面勾配 θ においても雪圧 P は圧縮破壊強度 σ より小さく、斜面積雪の圧縮破壊が起こる可能性は低いと考えられる。ただし、積雪深 H が 3m で、斜面勾配 θ が 40° （図-6c）及び 45° （図-6d）の場合、式(5)による雪圧 P は、ざらめ雪の圧縮破壊強度（式(8)）を上回る結果となった。

一方、式(6)による雪圧 P と雪の圧縮破壊強度 σ を比較すると、列間斜距離 L が長くなるに従って雪圧 P は大きくなり、ある列間斜距離以上になったときの雪圧 P は雪の圧縮破壊強度 σ を上回る（式(9)）。

$$\sigma \leq P = \rho g (\sin \theta - \mu \cos \theta) L \quad (9)$$

図-6において、式(9)となる条件は、式(6)による雪圧 P と圧縮破壊強度 σ との交点より列間斜距離 L が長い場合であり、このとき斜面積雪の圧縮破壊が起こる可能性がある。

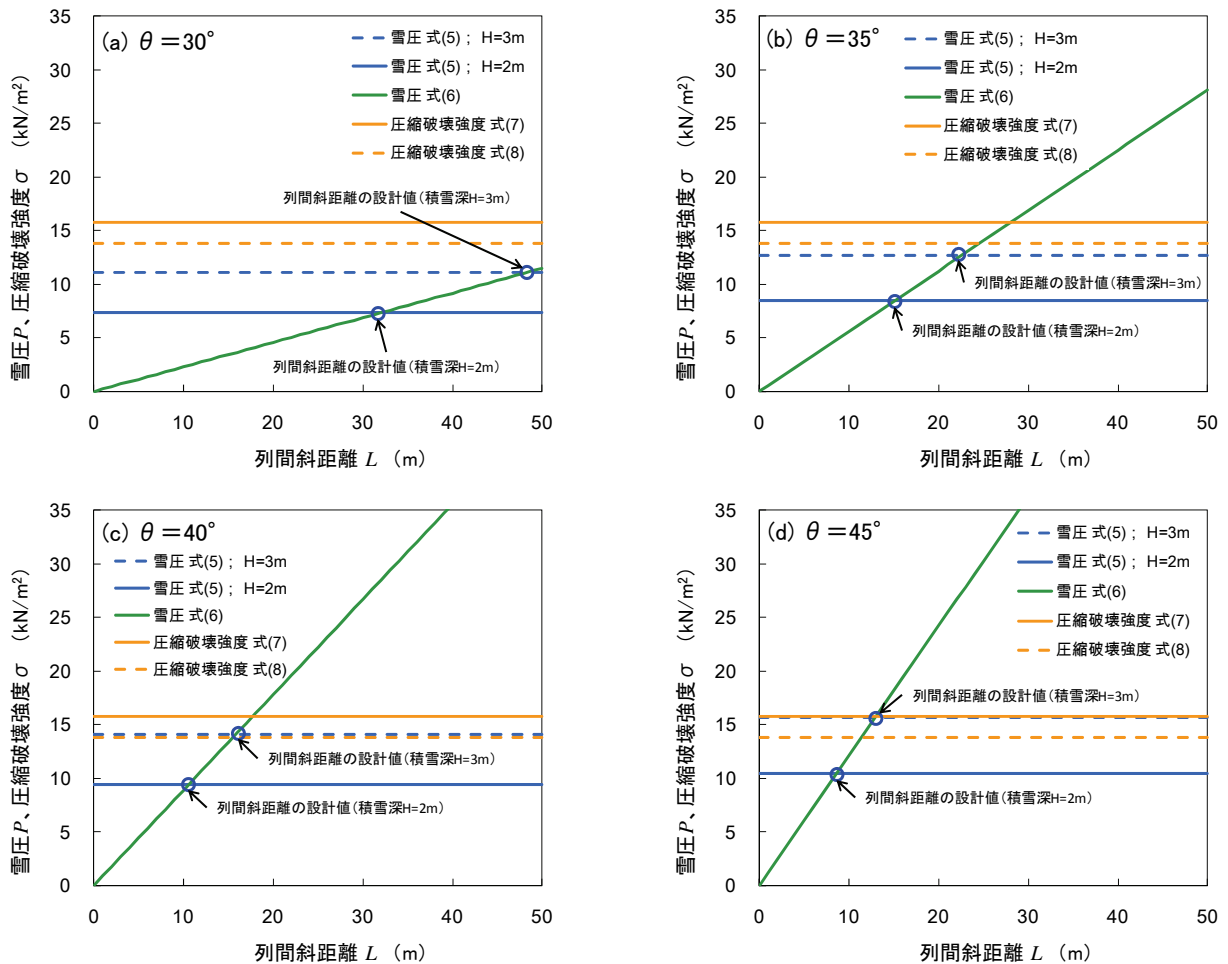


図-6 列間斜距離と雪圧及び雪の圧縮破壊強度との関係。斜面勾配 θ が(a)30°、(b)35°、(c)40°、(d)45°の場合の比較。積雪密度 ρ は350 kg/m³とし、摩擦係数 μ は0.5、クリープ係数 K は斜面勾配 θ ごとの設計値⁷⁾、グライド係数 N は2.7とした。

ると考えられる。よって、列間斜距離 L を現在の設計条件である式(5)と式(6)の交点よりも長くとも場合、式(9)とならない条件、つまり式(10)で表される条件を満たすことが要求され、これが列間斜距離 L を長くできる範囲になると考えられる。

$$L < \frac{\sigma}{\rho g (\sin \theta - \mu \cos \theta)} \quad (10)$$

以上の検討結果について、列間斜距離 L と斜面勾配 θ との関係について整理したのが図-7である。図-7は、積雪深 H が2mから4mまで0.5mごとに示したもので、北海道開発局の設計要領⁷⁾に示されている列間斜距離 L の設計値である。また、図-7には、式(6)の雪圧 P と雪の圧縮破壊強度 σ が同じとなる列間斜距離 L (図-6で示した式(6)の雪圧 P と雪の圧縮破壊強度 σ との交点) を求め、これと斜面勾配 θ との関係を示した。

図-7より、積雪深が3m以下の列間斜距離の設計値は、雪の圧縮破壊強度から求めた列間斜距離よりも短く、安全側の設計条件と言える。つまり、現行の設計で求まる列間斜距離を長くできる余地があると考えられる。しか

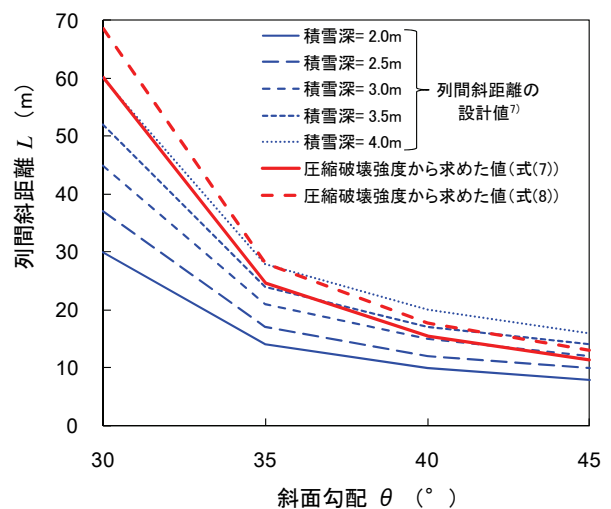


図-7 斜面勾配と列間斜距離の関係。青線は、積雪深と斜面勾配に応じた列間斜距離の設計値⁷⁾、赤線は、図-6で示した雪圧 P (式(6))と圧縮破壊強度(式(7)、式(8))が同じとなる列間斜距離の計算結果。

し、斜面勾配が40°以上になると列間斜距離の設計値と圧縮破壊強度から求めた列間斜距離が近い値となり、また積雪深が3.5m以上で斜面勾配が35°以上となる場合、列間斜距離の設計値は圧縮破壊強度から求めた距離を上回り、これ以上列間斜距離を長くすることは難しいと判断される。

以上、図-6と図-7の検討結果をまとめると、積雪深が大きいほど、及び斜面勾配が大きいほど現行の列間斜距離の設計値と雪の圧縮破壊強度から求めた列間斜距離が近い値となる。よって、列間斜距離を長くとることができるのは、主に積雪深が小さい場合または斜面勾配の小さい場合であると考えられる。ただし、列間斜距離を長くとることのできる具体的な数値条件については、今後、さらなる検討が必要である。

6. おわりに

雪崩予防柵の列間斜距離を長くすることができる範囲について、雪圧の増加と雪の圧縮破壊条件との理論的な比較検討に基づいて考察した。その結果、列間斜距離を長くとることができるのは、主に積雪深が小さい場合または斜面勾配が小さい場合であると考えられる。

ただし、列間斜距離を長くとることのできる具体的な数値条件については、今後、さらなる検討が必要であり、現在行っている列間斜距離と雪圧との関係に関する現地

試験や雪の圧縮破壊実験等の結果をまとめ、引き続き検討を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 松澤勝, 2008: 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. コンサルタンツ北海道, No. 115, 45-47p.
- 2) 大槻政哉, 2009: 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, 25, 270-275p.
- 3) 松下拓樹, 松澤勝, 中村浩, 坂瀬修, 2011: 雪崩予防柵の列間斜距離に関する一考察. 寒地土木研究所月報, 701, 10-16p.
- 4) (社)日本建設機械化協会, (社)雪センター, 2005: 雪崩対策. 2005除雪・防雪ハンドブック(防雪編), 143-246p.
- 5) 荘田幹夫ほか, 1966: なだれ防御構造物の設計指針(その1), 道路, 昭和41年5月, 63-73p.
- 6) Margreth, S., 2007: Defense structures in avalanche starting zones. Technical guideline as an aid to enforcement. Environment in Practice no. 0704. Federal Office for the Environment, Bern; WSL Swiss Federal Institute for Snow and Avalanche Research SLF, Davos, Switzerland, pp134.
- 7) 北海道開発局, 2011: 雪崩対策施設. 北海道開発局 道路設計要領 第2集 道路付帯施設, 2-2-14 - 2-2-21p.
- 8) 遠藤八十一, 2000: 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, 24-42p.
- 9) Watanabe, Z., 1977: The influence of snow quality on the breaking strength. Sci. Rep. Fukushima Univ., 27, 27-35p.