

雪崩予防柵の列間斜距離算出方法に関する課題と考察

Problem of design method for slope distance between two rows of snow fences

大槻政哉¹, 松澤勝²

Masaya.OTSUKI¹, Masaru.MATSUZAWA²

¹株式会社雪研スノーイーターズ

¹Yukiken Snow-eaters Co., Ltd.

²独立行政法人土木研究所寒地土木研究所

²Civil Engineering Research Institute for Cold Region

1. はじめに ～少雪のほうが割高になる雪崩予防柵～

昨今、我が国の経済情勢は慢性的に低迷しており、公共投資も低下の一途を辿っているが、限られた予算のなかで必要な雪崩対策事業は実施されなければならない、そのためには従来よりも経済的で効果的・効率的な事業を行わなければならないことは論を待たない。本稿では雪崩予防柵を設計・施工するに際して顕在化している技術的な矛盾について考察する。



写真1 雪崩予防柵の施工状況

雪崩予防柵（以降、雪崩柵）は、雪崩の発生区に施工し雪崩発生を未然に防止する機能を有する対策施設である。大きく分けて直接基礎タイプの予防柵とアンカーからワイヤーで吊り下げる吊柵の2タイプが存在するが、ここではそれは問わない。雪崩柵の設計に際しては、各部材の構造計算・照査を行う前に、柵高や柵間隔、列間斜距離と配置方法が検討される。このうち現地条件によって変わってくるのは一般的に柵高と列間斜距離である。現在、我が国で用いられている基準では、積雪深が減少するとそれに対応

して柵高は低くなるが、同時に列間斜距離も短く設定される。ある斜面領域において、柵の列間斜距離が短くなるということは、イコール雪崩柵の基数が増加することによって他にない。仮にその斜面において設計積雪深を小さく見積もることで柵高は減少しても、一方で基数自体が増加すれば、全体として建設コストが増加することになると考えられる。同じ斜面なのに雪が少ないほうがコスト高になるというのは、技術者としてあるいは納税者として、理解しがたいものがある。もちろん、コスト高だけではなく景観阻害や圧迫感という負の影響も無視することはできない。以上のことから、ここでは雪崩柵の列間斜距離に着目して、設計手法について考察を行う。

2. 現在の斜面雪圧と列間斜距離の算出方法

現在、設計に用いられている列間斜距離の算出方法は、例えば2005除雪・防雪ハンドブック1)によると、(1)式による。なお、(2)式は柵高の算出式である。

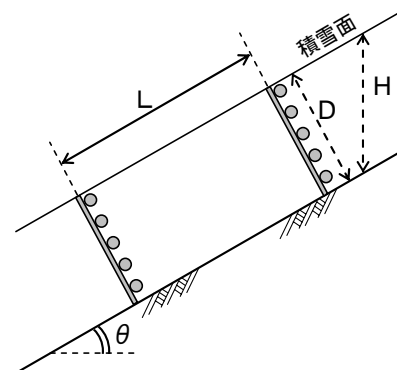


図1 斜面積雪と雪崩予防柵の概念図

$$\left. \begin{aligned} L &= f_L \cdot H \\ f_L &= \frac{2 \tan \theta}{(\tan \theta - \tan \phi)} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$D = H \cos \theta \quad (2)$$

ここで、 D : 柵高(m)、 H : 積雪深(m)、 L : 列間斜距離(m)、 f_L : 距離係数、 θ : 斜面角度、 ϕ : 雪と地面の摩擦角、である。(1)式から明らかなように、積雪深 H と列間斜距離 L は正比例の関係にあり、積雪深が大きいほど列間斜距離が大きくなるのである。

この算出方法は、もともとスイスにおける文献 (発生地における雪崩制御) に記載されており、それが、「なだれ防御構造物の設計指針～発生地におけるなだれ制御～」²⁾ というかたちで日本に紹介された。これがいわゆる「スイス示方書」と呼ばれるものである。これによると、この列間斜距離の算出式の根拠は、以降に記すように、斜面雪圧の算出法から導入されている。

設計計算の際の斜面雪圧(ここでは斜面方向成分の雪圧)の算出式は(3)式で表される。また、他方(4)式に示す別の雪圧算定式も存在する。

$$S = \rho g \frac{H^2}{2} KN \quad (3)$$

$$S = \rho g H \cos \theta (\sin \theta - \mu \cos \theta) L \quad (4)$$

ここで、 ρ : 積雪密度(kg/m³)、 g : 重力加速度(m/s²)、 K : クリープ係数、 N : グライド係数、 μ : 積雪の地面に対する摩擦係数(スイス示方書ではグライド係数に応じて0.5～0.6で設定、北海道開発局道路設計要領³⁾では安全をみて0.5で固定)である。

Haefeli (1954)⁴⁾は、斜面上に垂直な面に作用する雪圧を、モール応力円により求まる静雪圧とクリープやグライドによる積雪内部応力から求まる移動雪圧とに分け、30°以上の斜面では前者が無視できるとし後者の近似計算を行った(このHaefeliの雪圧論がスイス示方書に反映されたものである)。

斜面上の積雪の背圧領域(圧縮領域)の末端に位置する雪崩柵に作用する雪圧を、積雪底面のせん断強度が積雪の斜面分力より大きい場合に、以下のように求めた。ある積雪深における圧縮領域上端の変移速度を U_0 、圧縮粘性係数の逆数を a_c とすると、圧縮応力 σ_c は(5)式のように表される。

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{4 U_0 \gamma}{3 a_c}} \sin \theta \quad (5)$$

Haefeli の雪圧理論(クリーププロファイルが三角形分

布)に則り、また各層の積雪変移速度と粘性係数の逆数が比例関係にあるという仮定に基づき、(5)式の圧縮応力を斜面垂直方向に積分すれば、雪崩柵に及ぼす雪圧は(6)式で表される。ここで(7)式のようにクリープ係数 K とグライド係数 N を定義することで(3)式が得られる。

$$S = \rho g \frac{H^2}{2} \sin 2\theta \sqrt{\frac{2}{9 \tan \theta \tan \beta}} \times \sqrt{1+3n} \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} K &= \frac{\sin 2\theta}{3} \sqrt{\frac{2}{\tan \theta \tan \beta}} \\ N &= \sqrt{1+3n} \\ n &= \frac{U_G}{U_A - U_G} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

ここで U_A : 積雪表面の積雪変移速度、 U_G : 積雪底面の積雪変移速度である。

他方、積雪底面のせん断強度が積雪の斜面分力より小さい場合に柵に作用する雪圧を、スイス示方書では、柵と柵に挟まれた積雪ブロック(質量 M)の、積雪底面の静摩擦による抵抗力を考慮した斜面下向きの積雪静荷重と仮定することで(8)式を提示、さらに展開して(4)式を導入している。

$$\left. \begin{aligned} S &= M \sin \theta - \mu M \cos \theta \\ M &= \rho g H \cos \theta \cdot L \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

そして、(3)式と(4)式を連立させることで、以下のように列間斜距離 L が得られる。

$$\frac{L}{H} = \left(\frac{K}{\sin 2\theta} \right) N \left(\frac{\tan \theta}{\tan \theta - \mu} \right) \quad (9)$$

スイス示方書によれば、積雪密度 270kg/m³と仮定してクリープ係数を $(K / \sin 2\theta) = 0.74$ 、グライド係数 $N = 2.7$ を標準状態の値として採用し、ラウンドさせることで列間斜距離を求める(2)式が得られる。この関係をグラフで表したものが図2であり、両式の交点が L である。

なお、スイス示方書では標準状態について説明はなされていない。松澤 (2008)⁵⁾は、本来クリープ係数は国内で設計に用いられる積雪密度 350kg/m³に対応する値 $(K / \sin 2\theta) = 0.795$ を使うべきだが、両者の値にほとんど差異がないためそのまま使われているだろうと推察している。また、積雪底面の滑り易さを表すグライド係数 N は、スイス示方書では、測定値に基づく値(1.2～3.2)が示されており、その範囲のなかで比較的大きな値 2.7 を標準状態としている。遠藤 (1996)⁶⁾は、その理由は明らかではないと

しながら、グライド係数が大きい滑りやすい斜面の場合は、スイス示方書にある列間斜距離と雪圧の関係は、自身により得られた理論値と近似的に等しく妥当であるとしている。

いずれにしろ、このように異なる雪圧の算定式を連立させて列間斜距離を求めたことが、積雪深Hが小さくなれば列間斜距離Lも小さくなるという技術的矛盾を生じさせたと言える。次章でこの一連の流れの根拠を検証・考察する。

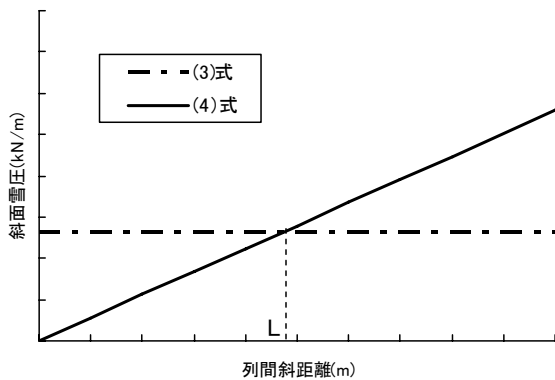


図2 列間斜距離と雪圧の関係

3. 雪圧式の交点をLにした理由の考察

スイス示方書では列間斜距離 L 算出の根拠として、Haefeli の雪圧論に基づいて、積雪底面のせん断強度と積雪の斜面分力の大小によって二つの雪圧算出式 ((3)式と(4)式) を提示している。一方で遠藤 (1996) は、笹地面上のグライド速度と地面抵抗の関係 (Endo, 1983) ⁷⁾を以下のように一般化し、地面抵抗がグライド速度に比例する場合 ((10)式) と、地面抵抗が垂直応力に比例する場合 ((11)式) とに分けて雪圧の算出式を導入している。

$$U_g \leq U_{g1} \text{ のとき } \tau_g = kU_g \quad (10)$$

$$U_g > U_{g1} \text{ のとき } \tau_g = \mu\sigma_g \quad (11)$$

ここで、 U_g : グライド速度、 U_{g1} : グライド速度のしきい値 (Endo(1983)は室内実験により笹地面では 0.22m/day を得た)、 τ_g : 地面抵抗、 σ_g : 垂直応力である。

(11)式の場合の雪圧算出式は(4)式となり、(10)式の場合にも(3)式に極めて類似した算出式が示されているが、ここでは、特に雪圧算定式について議論することが目的ではない。

連立させる(3)式と(4)式の場合分けの条件が、スイス示方書では「せん断応力とせん断強度の大小」、遠藤 (1996) によると「グライド速度と地面抵抗の関係の違い」としている。厳密には各々異なる状態ではあるが、積雪層が地面に対して動き易い状態なのか否かということでは類似していると言える。

この2つの条件の雪圧式を連立させたことに関して、上

記の遠藤の考えを適用して、雪崩柵の近くではグライドが遅く、ある程度離ればグライドが速くなることから、柵間隔が短い場合には(3)式が、長い場合には(4)式が適用でき、両式の交点をLにしているとの見解がある⁸⁾。しかしこの説明は、グライド速度のしきい値 (U_{g1}) が現れる斜面位置に雪崩柵を設置するとしているだけで、その位置に雪崩柵を設置することの必要性あるいは合理性については説明がない。ましてや雪崩柵上方の積雪のグライド速度分布は、積雪深や密度や雪質、つまりその時期によって異なるものであり、雪圧の理論式を連立させて求まるLが、実際のグライド速度のしきい値と対応するものではないと考えられる。もちろん、スイス示方書で提示している条件 (せん断応力とせん断強度の大小) についてもその疑問は解決しない。従って、異なる理論からなる雪圧算定式を連立させて列間斜距離Lを求めることに、現象的・物理的な意味はないと思われるのである。

遠藤 (1996) は、スイス示方書で雪圧算定に(3)式を採用するにあたり、L が大きくなることでグライド速度が大きくなると地面抵抗とグライド速度の比例関係が成り立たなくなり(3)式が適用できなくなるため、(4)式との交点をLの適用範囲 (上限) としたのではないかと推察している。この推察についても、(3)式の適用に拘らなければ、グライド速度が大きい場合の(4)式により雪圧は求まるため、両式の交点をLとすることの理由にはならないと思われる。

また防雪工学ハンドブック⁹⁾では、グライド速度が数 cm ~ 1m/day となることが経験的に知られており、その場合スイス示方書で提示されるグライド係数 (最大で $N=3.2$) を大きく上回る可能性があるため、(2)式で列間斜距離を制限することで大きなグライド係数を採用しなかった、と推察している。

松澤 (2008) は、両式の交点をLとして採用することで、雪崩柵の設計荷重が最小、且つLが一番大きく基数が少なくなり経済設計となると考えたのではないかと推察している。筆者もこれが妥当な推察ではないかと考える。

さて、松澤が推察しているように、(3)式と(4)式の交点をLとして配置することが経済的なのかどうか、以下に検証する。

表1 雪崩柵設計緒元

斜面	延長	65m
	斜面距離	47m
	傾斜	1:1.2 (40°)
雪崩柵	柵高D	2.0m
	柵幅W	5.5m
	パイプアンカー	L=2.5m
	最下段位置	斜面下端から直高5m
積雪条件	積雪密度	350kg/m ³
	摩擦係数μ	0.5
	クリープ係数K	0.783
	グライド係数N	2.4

雪崩柵 (吊柵) について、表1に定めた設計条件をもとに、列間斜距離を(2)式から求まる通常設計のLと、それよりも長いLについて工事費の試算を行った。通常設計の雪圧は(3)式によるが、それより大きいLの場合は、図2にあるように(4)式により算出した。

図3によると、列間斜距離が大きくなるにつれて雪崩柵1基あたりの工事費は増加する。これは雪圧が増加することによって、梁材や支持ロープ、主索ケーブル等部材の規格があがることによる。一方で、列間斜距離が大きくなるほど雪崩柵の基数が減少する。その結果として斜面全体の工事費は減少している。つまり、松澤が推察した内容もこの試算では否定されたことになる。

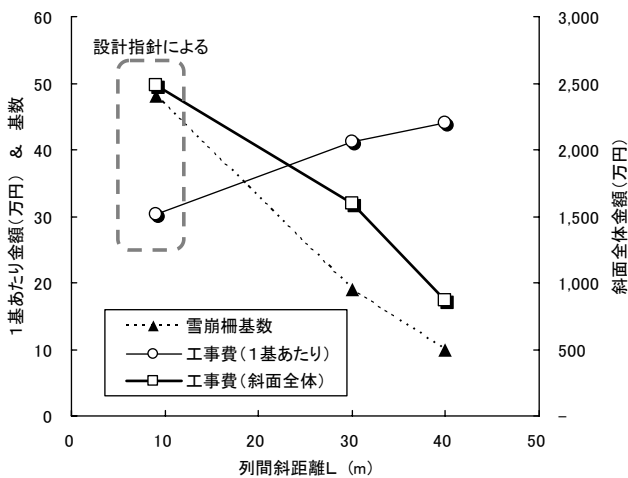


図3 列間斜距離毎の工事費の推計

おそらくこれ以上検討を行っても、現在の列間斜距離Lの算出方法である(2)式の根拠は得られないものと考えます。そこで、積雪深が小さくなると列間斜距離も小さくなるという矛盾を解消するため、次章に、筆者が考える列間斜距離のあり方について提案する。

4. 列間斜距離の考え方の提案

本来、災害等を抑制するための対策を検討するときには、その災害を引き起こす現象 (ここでは雪崩) の発生を防ぐ機能を持たせることを第一義に考えるべきである。雪崩以外の場合、例えば岩盤崩落等を抑止するためのグラウンドアンカー工などは、地質調査等により岩盤の滑動を抑えるための必要抑止力を算出し、その抑止力を得るためのアンカーの配置や荷重を決定する。これは、岩盤滑動を発生させないための必要な規格で対策工を検討するという意味で、防止効果発現を第一に考えるということに他ならない。雪崩柵の場合もこのような考え方にに基づき、一定程度の安全率を考慮した雪崩抑止効果を有する設計手法、且つ最小コストになる設計手法 (具体的には列間斜距離や柵高 etc) を採用するべきではないだろうか。これまで述べてきたこと

に関して言うと、雪崩柵にかかる雪圧に拘ることなく、雪崩抑止効果が確保される斜距離を算出し、安全率を考慮して雪崩柵の列間斜距離Lとし、そのL以内で、最小コストとなる設計とすることが必要だと考える (例えば、列間斜距離をさらに2m小さくすることで部材規格をワンランクダウンさせ、全体でコストが下がる etc)。

それでは、雪崩抑止効果が確保される斜距離を得るために、雪崩の発生を抑止する効果をどう評価したらいいのであろうか。そのためには、表層雪崩や全層雪崩等いくつかの雪崩現象のメカニズムを仮定した定量的なモデルを確立し、その中に雪崩予防柵を取り込み、雪崩発生の有無を検討することが必要になると考える。例えば全層雪崩は、斜面積雪上部にクラックが形成されてグライドが早くなり、積雪を支持していた斜面下流の積雪の圧縮応力の増加または圧縮強度の低下により引き起こされると言われている。そこで、雪崩柵直上での圧縮破壊による全層雪崩を想定し、積雪深や積雪密度、融雪期のグライド速度とそれによる地面抵抗力を仮定して、雪崩柵直上の圧縮強度 f_c を、安全率 F_s を考慮した圧縮応力 σ_c 以上にするという、(12)式のような判定方法を採用することもひとつの案だと思われる。

$$f_c > F_s \cdot \sigma_c \quad (12)$$

この案について試算を行う。表1に示す条件で列間斜距離を40mで固定して、積雪密度毎の雪圧と圧縮強度を図4に示した (ここでは安全率は考慮していない)。

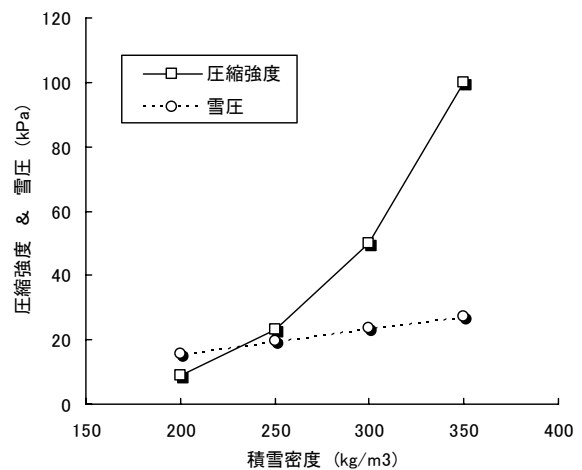


図4 積雪の圧縮強度と雪圧

積雪密度と圧縮強度の関係は Mellor (1975)¹⁰⁾が示したグラフから読み取った。一般に設計に使われている 350 kg/m³では雪圧の4倍以上の圧縮強度となり、相当の安全率を考慮しても圧縮破壊 (雪崩発生) は発生しないことになり、上述の設計思想では40m以上の列間斜距離を設定することが可能になる。ただし 250 kg/m³では両者が同等の

値となり危険な状態となるため、時間的に変化する積雪密度をどのような値とするべきか十分な検討を要する。また、圧縮強度は密度のほかにも含水率によっても変化することが知られており、このことをどのように評価し取り込むのかを検討する必要もあろう。

それらの検討課題に対する詳細な検討は必要であるが、ここで示したように圧縮強度と雪圧は一般的な積雪密度において概ね同じオーダーであることから、以下の取り組みを行い列間斜距離に応じた雪崩発生の危険度評価法の精度を高めることで、本章で示した設計思想で雪崩予防柵の列間斜距離を最適設計することが可能になると考えられる。

- ・ 既往の雪圧算出式はすべてが理論式である。(12)式にあるような(圧縮)応力を正確に評価するためにも、列間斜距離や地表面状態(グライド状態)に応じた雪圧を実際に計測することが必要である。
- ・ また、雪崩柵の雪崩抑止効果を明らかにするためには、現状ではSIによる1次元モデルのみと考えられる、定量的な雪崩発生モデルの確立が必要であり、現地における調査や実験、数値実験の取り組みが必要である。

5. おわりに

これまで、スイス示方書に基づく防雪ハンドブックや防雪便覧といった設計指針によって、全国的に雪崩予防柵は設計・施工されてきた。今後は雪崩予防柵に関しても、今まで以上に経済性を考慮した設計をすることが求められるため、前述したような提案について、多くの課題がありハードルは高いと思われるが、たくさんの意見や指導を頂戴しながら調査研究を行い実現していきたいと考えている。

なお、本稿の執筆にあたり(独)土木研究所寒地土木研究所の松澤勝 首席研究員、(独)防災科学技術研究所の上石勲主任研究員には貴重な助言を頂戴した。ここに記して謝意を表するものである。

6. 参考文献

- 1) (社)日本建設機械化協会：2005 除雪・防雪ハンドブック，2005，pp1-417.
- 2) 日本道路協会：なだれ防御構造物の設計指針(その1)，道路，昭和41年5月，1966，pp63-73.
- 3) 北海道開発局：北海道開発局道路設計要領，2007.
- 4) Haefeli,R. : Snow mechanics with references to soil mechanics. In Snow and its metamorphism(Bader,H.,et al), U.S. Snow Ice and Permafrost Research Establishment, Translatin14, 1954, pp59-218.
- 5) 松澤勝：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.115，2008，pp45-47.
- 6) 遠藤八十一：雪崩防止柵に作用する斜面雪圧，雪氷北信越，第16号，1996，pp34-46.

- 7) Endo,Y. : Glide processes of a snow cover as a release mechanism of an avalanche on a slope covered with bamboo bushes, Contributions from the Institute of Low Temperature Science, A32, 1983, pp39-68.
- 8) 古今書院：雪崩と吹雪，2000. P41
- 9) (社)日本建設機械化協会：防雪工学ハンドブック，昭和43年，p57.
- 10) Mellor,M. : A review of basic snow mechanics, IAHS-AISH Pub., 114, 1975, pp251-291.