

雪崩予防柵の列間斜距離に関する一考察

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

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

積雪寒冷地の道路における雪崩対策施設として、法面等の斜面に雪崩予防柵（以下、吊柵も含む）が多く設置されている。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。

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

ここで、 L ：列間斜距離（m）、 Hs ：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 Hs 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、



写真-1 試験斜面の状況

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という課題が指摘されている⁴⁾。

そこで、本稿では、雪崩予防柵の列間斜距離を広げた場合の設計の考え方を検討することを目的に、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ったので、報告する。

2. 試験の方法

(1) 試験箇所の概要

雪崩予防柵の列間斜距離に関する試験は、札幌近郊の中山峠（標高835m）の平均勾配37°の斜面で行った。この斜面に設置してある上下2段、左右3列の雪崩予防柵6基を用いて試験を行った（写真-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とした（写真-1）。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) 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、各列の下段の雪崩予防柵について行い、2本ある柵の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日以降欠測となったため解析から除いた。積雪深と気温は、近傍の平地において10分間隔で計測した。

(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-1に示すおがくずを用いる方法により観測した⁹⁾。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。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-1に示すとおり、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 も求めた。グライド係数 N とクリープ係数 K は、次式により求まる。ただし、 U_a 、 $\tan \beta$ は図-1に示すとおりである。

$$N = \sqrt{1 + 3 \left(\frac{U_g}{U_a - U_g} \right)^2} \quad (2)$$

$$K = \frac{\sin 2\theta}{3} \sqrt{\frac{2}{\tan \theta \tan \beta}} \quad (3)$$

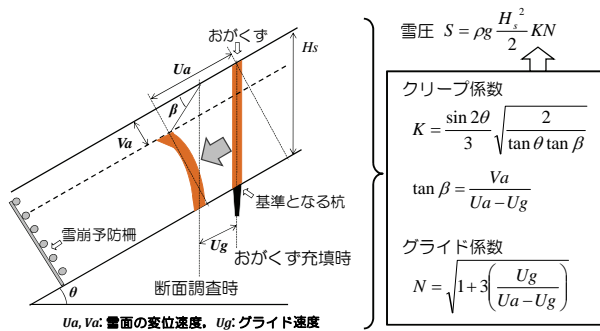


図-1 おがくずを用いた積雪移動状況の観測方法

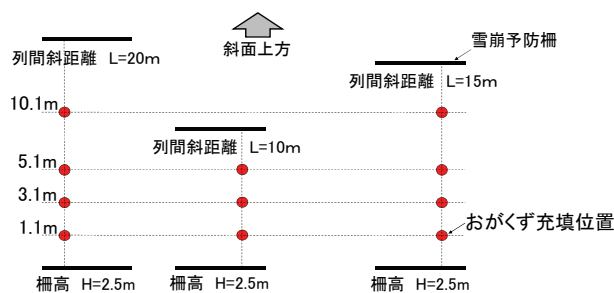


図-2 雪崩予防柵の配置とおがくず充填箇所

おがくずの充填箇所は、柵から斜面上方の斜距離で1.1m、3.1m、5.1m、10.1mの位置である(図-2)。断面観測時には積雪層構造と雪質を観察し、積雪密度(100cc角型密度サンプラー使用)と雪温を鉛直方向に30cm間隔で測定した。全層平均密度は、密度の測定値の平均値とした。

3. 結果

(1) 試験期間における気象と積雪の状況

図-3より、試験期間中の積雪深は1月初旬に2m以上となり、増減を繰り返しながら最大で3mに達した。おがくず充填から第1回断面観測までは、気温0°C以下の日が多く積雪深が増加した期間であり、第1回断面観測から第2回断面観測までは、気温0°C以上となる日が増えて積雪深が減少し融雪が進行した期間であった。

おがくず充填時の斜面の積雪深は2.0~2.5m、第1回観測時で2.5~2.7m、第2回観測時で2.0~2.5mであった。雪質はほぼ全層がざらめ雪で、所々氷板が形成されていた。積雪密度は、第1回観測で約400 kg/m³、第2回観測で400~450 kg/m³、雪温は両観測とも-1~0°Cであった。

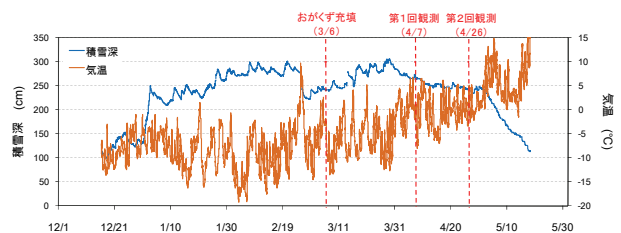


図-3 試験期間中の気温と積雪深の推移

(2) 雪崩予防柵に作用する雪圧の計測結果

図-4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-5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

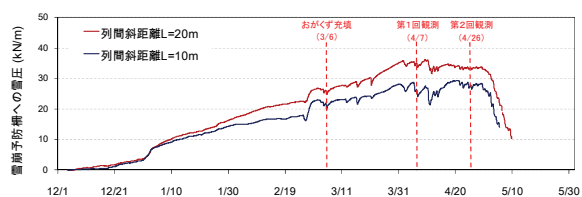


図-4 試験期間中の雪圧の推移

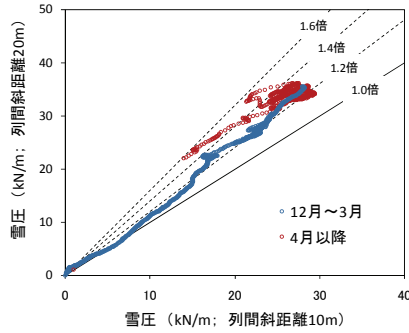


図-5 列間斜距離10mと20mの場合の雪圧の比較

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) 斜面積雪の移動状況

a) グライド速度の測定結果

図-6は、おがくず充填から第2回断面観測までのおがくずの変位量の測定結果である。断面観測期間を通した全体的な傾向として、各箇所とも地面からの高さが高くなるほど、また雪崩予防柵から離れるほど変位量が大きくなった。各箇所の変位量を比較すると、列間斜距離が10m、15m、20mの順に変位量が大きい結果となった。

図-7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

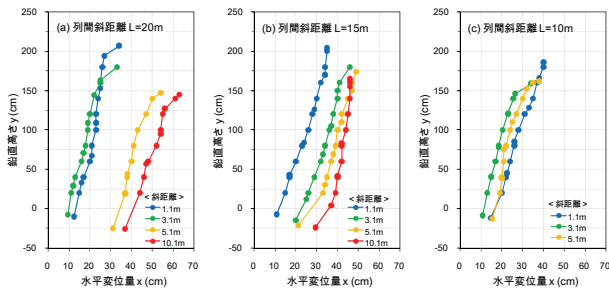


図-6 おがくずの変位量

おがくず充填から第2回断面観測までの期間の変位量で、(a)列間斜距離20m、(b)15m、(c)10mの場合の測定結果。

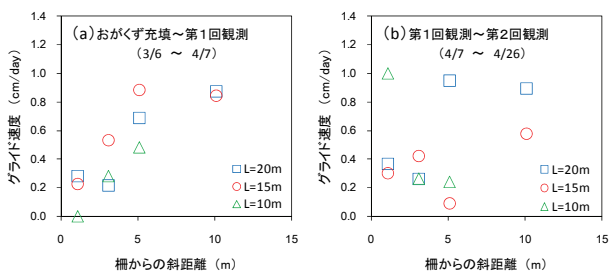


図-7 グライド速度と柵からの斜距離との関係

(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。

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-7a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-7b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。期間全体のグライド速度の傾向は、4章で考察する。

b) グライド係数の測定結果

図-8は、グライド係数と柵からの斜距離との関係を、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て示したものである。グライド係数は、柵から離れるに従い大きな値となるが、列間斜距離の違いによる差はみられなかった。

図-9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-9の太破線上側）である。また図-9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-9より、グライド係数の測定値は、当該斜面の設計値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。

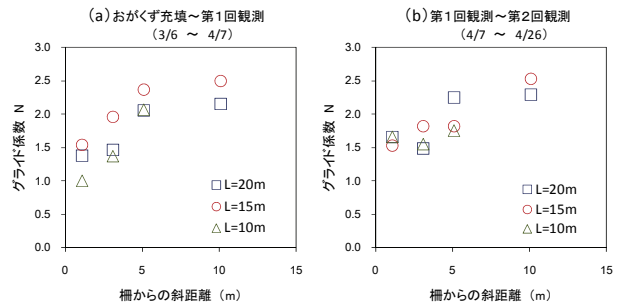


図-8 グライド係数と柵からの斜距離との関係

(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。

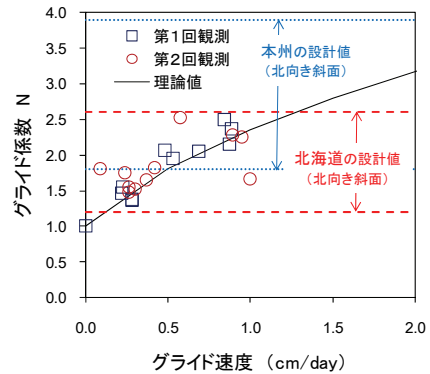


図-9 グライド係数とグライド速度の関係
図中の破線は、北向き斜面の設計値¹⁾、実線は理論値⁷⁾。

c) クリープ係数の測定結果

図-10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-10a)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-11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-11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/sin²θ=0.79)、理論値は0.72 (K/sin²θ=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。

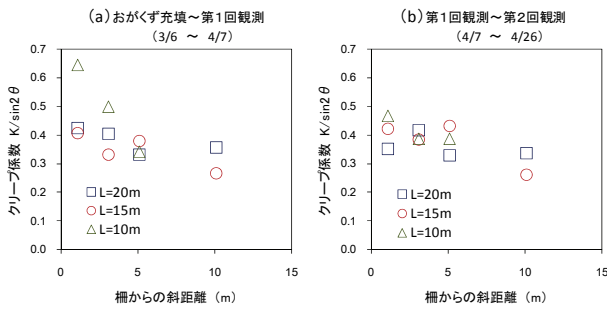


図-10 クリープ係数と柵からの斜距離との関係
(a)おがくず充填から第1回断面観測までの期間、
(b)第1回断面観測から第2回断面観測までの期間。

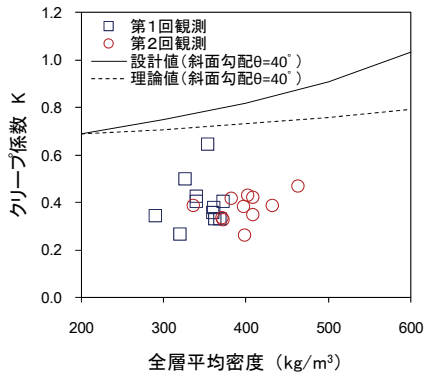


図-11 グライド係数とグライド速度の関係
図中の破線は、北向き斜面の設計値¹⁾、実線は理論値⁶⁾。

4. 考察

(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(4)から求められる¹⁾。また、雪圧の理論式には式(5)もある⁶⁾。式(4)は底面の抵抗力がグライド速度に比例する場合、式(5)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⁾。

$$S = \rho g \frac{H^2}{2} KN \tag{4}$$

$$S = \rho g H \cos \theta (\sin \theta - \mu \cos \theta) L \tag{5}$$

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(4)と式(5)を連立させることで、式(6)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(6)にK/sin²θ=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/sin²θ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。

$$L = \left(\frac{K}{\sin^2 \theta} \right) N \left(\frac{\tan \theta}{\tan \theta - \mu} \right) H \tag{6}$$

図-12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(4)と式(5)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θ=37°、摩擦係数μ=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 (ρ=350kg/m³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-12において、設計雪圧は、式(4)より設計積雪深2.6m等の条件で算出した23.5kN/mである。また、列間斜

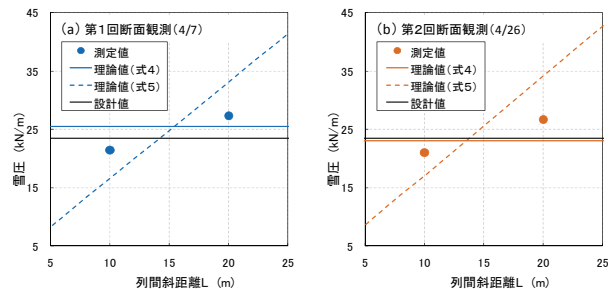


図-12 雪圧の理論値と設計値の比較
(a)第1回断面観測、(b)第2回断面観測。

距離の設計値は、式(4)と式(5)の設計上の交点にあたる15mである。この交点より列間斜距離が短い場合は式(4)の雪圧が大きく、交点より長い場合は式(5)の雪圧が大きい。

図-12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(4)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(4)よりも大きくなった。特に、融雪期にあたる4月26日(図-12b)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(5)から求めた雪圧の理論値よりは小さい結果となった。

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が大きくなることがわかった。この雪圧の増加分を考慮する方法として、現行の式(4)によって雪圧の増加分を見積もる方法と、式(5)による雪圧を考慮する方法が考えられる。しかし、前者の方法では、そもそも式(4)に列間斜距離Lの要素が入っていないばかりか、3章で示したようにグライド係数Nとクリープ係数Kの列間斜距離による明瞭な差がみられないので、列間斜距離を考慮した雪圧を求めることは難しいと考えられる。よって、後者の方法である式(5)によって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る。

ただし、列間斜距離による雪圧の差が融雪期で大きくなることから、次節で示すように今回測定したグライド速度より大きい条件での試験が必要である。また、実際に列間斜距離が課題となっている積雪深が少ない地域での試験も必要と考えられる。

(2) グライド速度と列間斜距離の関係について (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、斜面積雪のグライド速度を、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とする場合の考え方について考察する。

図-13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といえる。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、積雪の圧縮領域であると考えられる。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

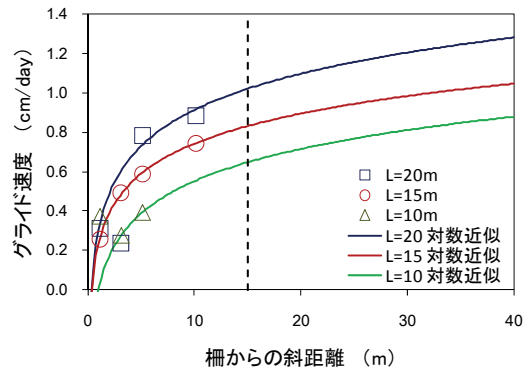


図-13 グライド速度と柵からの斜距離との関係
おがくず充填から第2回断面観測までの期間全体のグライド速度と斜距離との関係。実線は対数近似曲線。

と考えられる。

以上より、列間斜距離を長くする場合、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、雪崩発生に必要な条件(1cm/h=24cm/day)⁹⁾より小さい。ここで、今後の試験において着目すべき斜面積雪挙動の条件について考察する。式(2)と式(3)より、グライド係数Nとクリープ係数Kの間に次の関係式が得られる。

$$\frac{K}{\sin 2\theta} = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{6Ug/Va}{(N^2 - 1)\tan \theta}} \quad (7)$$

この式(7)より求まるグライド係数Nとクリープ係数K/sin2θの関係と今回の測定結果を比較すると、図-14のようになる。図-14より、グライド係数Nとクリープ係数

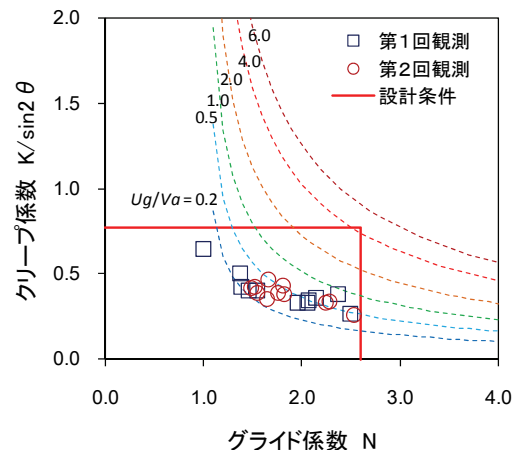


図-14 グライド係数とクリープ係数の関係

K の間には反比例の関係があり、これらの関係曲線の位置はグライド速度 U_g と垂直変位速度 V_a の比によって決まる。今回の測定は、 $U_g/V_a=0.5$ の条件における結果であった。グライド係数 N の設計値2.6と、クリーブ係数 $K/\sin^2\theta$ の設計値0.77に対応した状況で試験をするためには、 $U_g/V_a=4.0$ の条件で行うことが必要と考えられる。つまり、着目すべき現象として、積雪の垂直変位速度 V_a が今回と同じ条件であれば、グライド速度 U_g が8倍大きい場合の斜面積雪条件で測定すること、あるいは雪崩予防柵が設置されている斜面でこのように大きなグライド速度になる条件に着目して試験を行う必要があると考えられる。

今後は、雪崩予防柵が設置されている斜面で、雪崩発生に必要なグライド速度に達するののかという観点で、グライド速度の大きい場合の観測も行い、雪崩発生条件からみた安全な列間斜距離の設定方法も検討していく必要があると考えられる。

5. おわりに

雪崩予防柵の列間斜距離を広げた場合の設計の考え方を検討するため、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。

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とグライド速度がほぼ一定の中立領域の積雪が加わり、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(式(5))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。ただし、今回測定されたグライド速度は、雪崩発生条件より小さく、今後グライド速度が大きくなる状況で列間斜距離との関係がどのようになるか、雪崩発生条件からの検討も必要と考えられる。

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) (社)日本建設機械化協会, (社)雪センター, 2005: 2005 除雪・防雪ハンドブック. pp417.
- 2) 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, pp63-73.
- 3) 北海道開発局, 2010: 北海道開発局 道路設計要領 第2集 道路付帯施設
- 4) 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.
- 5) 本郷栄次郎, 1998: 送電用鉄塔脚部に作用する積雪荷重について. 雪氷, 60, 473-490p.
- 6) 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.
- 7) 日本建設機械化協会, 1988: Haefeliの雪圧論, 新編 防雪工学ハンドブック, 49-55p.
- 8) 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, pp45-47.
- 9) 納口恭明, 山田穰, 五十嵐高志, 1986: 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, 169-180p.