

雪崩予防柵への巻きだれの安定度評価手法に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：平28～令1

担当チーム：雪氷チーム

研究担当者：高橋丞二、松下拓樹、高橋渉

【要旨】

雪崩予防柵(吊柵を含む)は、山間部を中心に多く設置されており、雪崩発生区対策の有効な手段となっている。しかし、雪崩予防柵上に巻きだれが増大し、ときに崩落することで道路交通への影響や、雪崩の誘発という問題が発生している。現時点では巻きだれに関する安定度評価手法が定まっておらず、その除去については現場の個々の判断に委ねられている。本研究では、巻きだれの形状や物性値に関する観測を、一冬を通じて行った。また、簡略化した巻きだれ形状のモデルを構築し、それらに観測で得られた物性値を代入することで、巻きだれの安定度を評価する手法を考案した。さらに、崩落時の気象条件を過去の観測データを用いて解析し、巻きだれ崩落時の気象状況の特異性を評価した。

キーワード：雪崩予防柵、巻きだれ、密度、含水率、気象条件

1. はじめに

雪崩予防柵(吊柵を含む)は、山間部を中心に多く設置されており、雪崩発生区対策の有効な手段となっている。しかし、これらの雪崩予防柵上に大きく張り出した雪塊が形成され、一冬の期間中にそれらの大きさが増大することがある。この雪塊は、“雪庇(せっぴ)”や“巻きだれ雪”など呼ばれ方は様々ではあるが、本研究では“巻きだれ”と呼ぶ。巻きだれは、崩落することによって走行車両に影響を与える恐れや、雪崩を誘発する要因となる可能性があるため、巻きだれが発達した際には除去作業が行われている。しかし、除去に要する費用や時間は、人手不足、作業員の高齢化といった社会情勢の中で大きな負担となっている。また、現時点では巻きだれに関する安定度評価手法が定まっておらず、巻きだれの除去作業の実施は、現場ごとの経験などを頼りに判断されている。

巻きだれに関する過去の研究として、竹内ら¹⁾によって、危険な巻きだれの見分け方や、除去の判別フローが示されているものの、実際に巻きだれの大きさや強度などを観測し、巻きだれが崩落するときの気象条件や、安定度評価を数値的に求めた事例はない。本研究により、雪崩予防柵に発生する巻きだれの形成条件を解明し、その安定度評価手法を提案することで、道路維持作業の省力化、冬期の安全・安心な道路の実現に資するものと考えられる。

2. 研究方法

現地における観測は道内3箇所の雪崩予防柵設置箇

所で行った。そのうち、2016年冬期から2019年冬期にかけて毎年観測を行った朱鞠内における観測方法を、以下に述べる。

現地観測を行った一般国道275号幌加内町の朱鞠内湖付近(北緯44度18分16秒、東経142度15分16秒、標高297m)の雪崩予防柵は、柵高2.0m、柵幅5.4m、斜面勾配42度の切土法面上に設置されている(図-1・図-2)。

2016年冬期は、巻きだれの断面形状の時間変化を把握することを目的として雪崩予防柵付近の積雪断面形状を観測した。観測方法は、期間を通じて同じ雪崩予防柵を対象とし、雪崩予防柵と地面との境を原点とし、そこから巻きだれや積雪の断面に沿って座標を求める方法で計測を行った。物性値の観測は、巻きだれの断面を格子状に区切り、雪温、密度、硬度、雪質を観測した。観測方法は「積雪観測ガイドブック」²⁾に従った。また、タイムラプスカメラ(ノースワン社製：KADEC21-EYE2)を設置し、昼間(5:00~19:00)の10分間隔で雪崩予防柵付近の巻きだれの状況を記録した。

2017年冬期は、基本的に2016年冬期の観測内容を引き継いで行った。変更した点は、対象とする雪崩予防柵について、2016年冬期は同一の柵を対象としたが、2017年冬期は調査によって積雪状況が改変される影響を避けるため、計測する柵を移動しながら行った。また、断面の計測は、2016年冬期は1断面のみであったが、2017年冬期は立体的形状を観察する目的で、柵に対して横断方向に2断面、正面方向に1断面の計測を行った。タイムラプスカメラの撮影間隔は、2016年

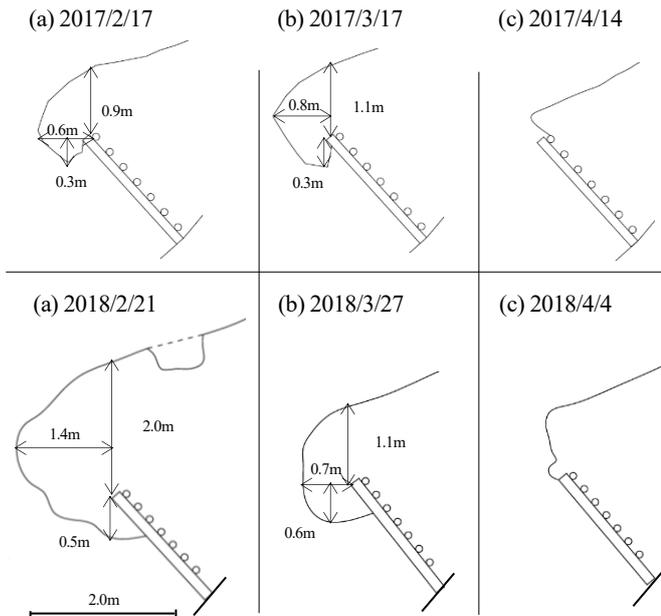


図-3 巻きだれ形状調査結果
上段 2016年冬期 下段 2017年冬期

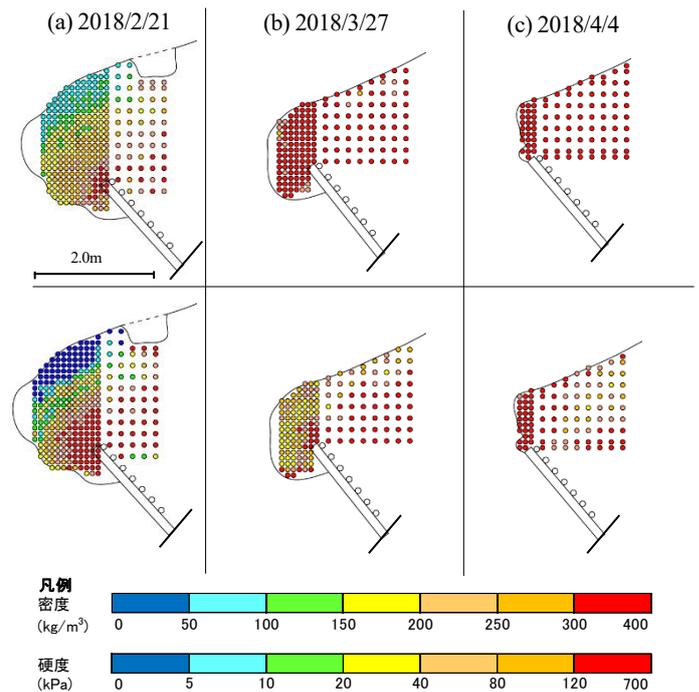


図-4 巻きだれ物性値調査結果
(上段：密度、下段：硬度)

積雪密度の平均値は接合面付近では 376kg/m^3 であり、巻きだれ全体の平均値は 348kg/m^3 であった。その後、巻きだれの崩落があったため、4/4 の観測では雪崩予防柵背後の部分の観測しかできなかったが、積雪の密度は 3/27 の観測値とほぼ同じく 300kg/m^3 を超えていた。硬度も積雪密度と同じように斜めの層状に分布しており、2/21 の観測では雪崩予防柵に近い部分は 120kPa 以上、表面は 5kPa という分布であった。3/27 の観測では、巻きだれの部分は $20\sim 80\text{kPa}$ を示しており、雪崩予防柵背面部では 120kPa 以上の観測値であった。4/4 の観測では、雪崩予防柵背面部で、3/27 の観測と同様に 120kPa 以上の観測値であった。雪温(図は省略)については、2/21 の観測では全体が $-8^\circ\text{C}\sim -10^\circ\text{C}$ となっていたが、3/27 の観測では全体が 0°C に近い値を示していた。雪質は 2/21 の観測では表面は新雪やこしまり雪の層があって内部はしまり雪であった。3/27 の観測では表面はざらめ雪で、巻きだれの内部はしまり雪という構造ではあったが、4/4 の観測ではほぼすべてがざらめ雪となっていた。

2018 年冬期における巻きだれの密度と硬度の平均値の推移を図-5 に、雪温の平均値の推移を図-6 に示す。雪温と硬度の観測は 1/11 から、密度の観測は 2/15 から開始した。途中、2/15 は硬度、3/18 は雪温の観測が機器の不調により行うことができなかった。図-5 によると、密度は 3/12 を境に増加傾向となった。また、図-5 より雪温は 3/26 以降 0°C に近い値を示した。密

度観測のためサンプルを採取した後に雪の乾湿を確認したところ、3/26 は採取した後まもなくして水がしみ出してくる状況であった。よって、3/26 頃から、巻きだれの雪質が乾雪から湿雪に変化したものと考えられる。

3/26 以降に観測した巻きだれの体積含水率 $\theta(\%)$ と重量含水率 $w(\%)$ の推移を図-7 に示す。なお、重量含水率は式(1)より求められる。

$$w = \frac{\rho_{\text{water}}}{\rho_{\text{wet}}} \times \theta \quad (1)$$

ここで、 ρ_{water} は水の密度($1,000\text{kg/m}^3$)、 ρ_{wet} は湿雪の密度(kg/m^3)である。図-7 より、3/26 以降、体積含水率、重量含水率ともに上昇した。なお、4/2 の雪温は -5.4°C となり、硬度は 195kPa を示したが、これは 3/26 以降に気温が低い状態が続き、積雪の一部が再凍結したため、硬度が高く出たものと考えられる。

3.3 タイムラプスカメラによる巻きだれの形状観測について

2017 年冬期の観測において、3/27 の調査時には存在していた巻きだれが、4/4 の調査時には崩落していた。このことは、タイムラプスカメラからも確認することができた(図-8)。3/27 に雪崩予防柵全体を覆っていた巻きだれが、3/28 の朝の画像では端部が欠けた形となり、雪崩予防柵の支柱が確認できる。3/29 の朝の画

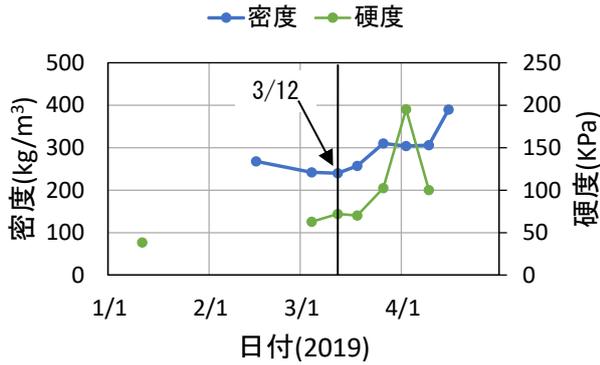


図-5 巻きだれの密度と硬度の推移(2018年冬期)

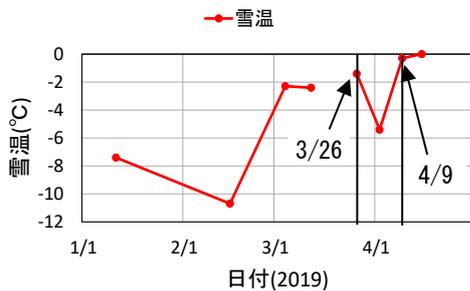


図-6 巻きだれの雪温の推移(2018年冬期)



図-7 体積含水率と重量含水率の推移(2018年冬期)

像では、さらに崩落が進み、雪崩予防柵の半分が見えるようになった。

表-1 に気象庁朱鞠内アメダスの3/24~3/29の気温と最深積雪の推移を示す。この表以前の3/21以降、日中の気温がプラスとなる日が続き、3/24からは日最高気温が5℃以上となる日が続き、崩落直前の3/28には3月の気温としては観測史上最高となる12.0℃を記録した。また、日最深積雪は3/24に245cmあったが、3/29には209cmとなり、急激に雪解けが進んだと考えられる。また、最大風速が南風6.5m/sであり、このことも崩落を促進させた要因と考えられる。以上より、朱鞠内における巻きだれの崩落は、融雪が進行する中で起きたと考えられる。崩落した時の巻きだれの大き



図-8 巻きだれ崩落時のタイムラプスカメラの映像(2017年冬期)

表-1 巻きだれ崩落前の気象状況(2017年冬期)

	積雪深(cm)	日平均気温(°C)	最高気温(°C)	最低気温(°C)
2018/3/24	245	-2.0	5.9	-12.8
2018/3/25	244	2.6	5.7	0.0
2018/3/26	236	0.7	6.2	-6.0
2018/3/27	231	0.7	8.9	-10.5
2018/3/28	226	6.5	12.0	-2.8
2018/3/29	209	3.3	7.6	-4.4

さは、直前の断面計測の結果より、上方に 1.1m、前方に 0.7m、下方に 0.6m と考えられる。

2018 年冬期は、4/9 10:00 の段階では存在していた巻きだれの先端部(図-9(a))が、11:00(図-9(b))になると欠けて背後の柵の見え方が変化している。また、4/13 16:00(図-9(c))にも巻きだれが崩落し、17:00(図-9(d))の写真では雪崩予防柵支柱の頂部が確認することができる。いずれも小崩落ではあるが、崩落前、崩落後の物性値の観測結果より、密度に大きな変化は見られないが、体積含水率は 4.0% を超える状態であった。

表-2 に巻きだれの崩落前の 4/5~4/13 の気温と最深積雪の推移を示す。4/6 以降、日平均気温が 0°C を上回る日が続いた。日最深積雪は 4/6 に 186cm あったが、その後融雪が進み、1 週間後の 4/13 には 150cm となった。このような状況下で、巻きだれの崩落が発生した。

以上の観測の結果から、巻きだれの崩落は、日平均気温が 0°C を超える日が続き、融雪が進むとともに、含水率が上昇した際に発生したと考えられる。

3. 4 巻きだれの安定度計算手法について

巻きだれの形状を図-10 のようにモデル化する。崩落の破断面を点線の位置としたとき、破断面には巻きだれの自重によって、引張応力 σ_t (Pa) と、せん断応力 σ_s (Pa) が作用するものとする。引張応力 σ_t とせん断応力

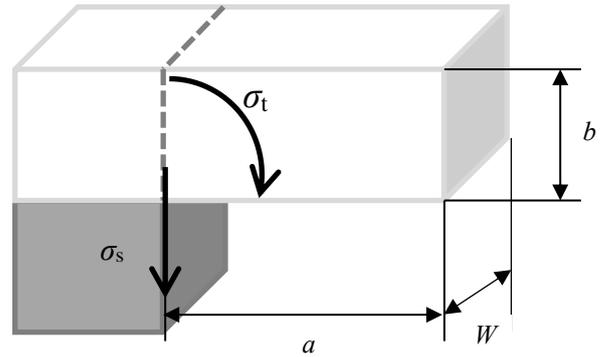


図-10 巻きだれの形状のモデル

σ_s は、以下の式(2)式(3)から求められる。

$$\sigma_t = \frac{|M|}{Z} \quad (2)$$

$$\sigma_s = \frac{mg}{A} \quad (3)$$

ここで、 M は破断面に作用する曲げモーメント(N・m)、 Z は破断面の断面係数(m³)、 m は巻きだれの質量(kg)、 g は重力加速度(m/s²)、 A は破断面の断面積(m²)である。一方、雪の引張強度 Σ_t (Pa) とせん断強度 Σ_s (Pa) については、乾雪の引張強度とせん断強度は Watanabe³⁾、湿雪の引張強度は栗原ら⁴⁾、湿雪のせん断強度は山野井・遠藤⁵⁾ によって示された式を用いて、乾雪と湿雪に区分して次のように推定する。

・乾雪

$$\Sigma_t = 3.4 \times 10^{-4} \rho_{dry}^{3.24} \quad (4)$$

$$\Sigma_s = 9.4 \times 10^{-4} \rho_{dry}^{2.91} \quad (5)$$

・湿雪

$$\Sigma_t = 1.0 \times 10^{-6} \rho_{dry}^{4.17} \exp(-0.058w) \quad (6)$$

$$\Sigma_s = 4.97 \times 10^{-4} \rho_{dry}^{2.91} \exp(-0.235\theta) \quad (7)$$

また、巻きだれの安定度を示す指標として、積雪の強度 Σ に対する、破断面に作用する応力 σ との比を安定度 S と定義した。 S は

$$S = \frac{\Sigma}{\sigma} \quad (8)$$

と表される。

(1) 巻きだれの安定度の試算について

2017 年冬期の巻きだれの観測結果(図-3、図-4)を用いて、 A 、 m 、 M 、 Z を求めた。(表-3) これらの計算に用いる式は以下のとおりである。

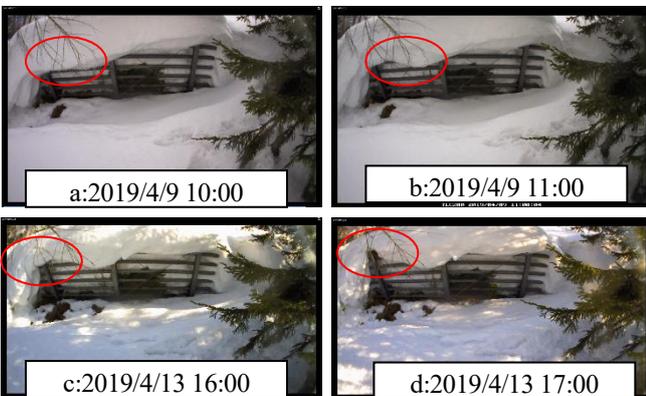


図-9 巻きだれ崩落時のタイムラプスカメラの映像 (2018 年冬期)

表-2 巻きだれ崩落前の気象状況(2018 年冬期)

	積雪深(cm)	日平均気温(°C)	最高気温(°C)	最低気温(°C)
2019/4/5	185	-2.4	3.5	-10.2
2019/4/6	186	0	1.7	-1.6
2019/4/7	178	0.2	5.1	-5.5
2019/4/8	171	1	4.7	-1.9
2019/4/9	169	1	5.2	-3.8
2019/4/10	167	0.6	7.3	-4.8
2019/4/11	160	0.6	7.7	-7.9
2019/4/12	156	1	7.7	-6.6
2019/4/13	150	3.3	11.5	-4.9

$$A = b \times W \quad (9)$$

$$m = a \times b \times W \times \rho \quad (10)$$

$$M = m \times g \times \frac{1}{2} \times a \quad (11)$$

ここで、 a 、 b 、 W については巻きだれの寸法であり、図-10を参照。 g は重力加速度(m/s^2) ≈ 9.81 、 ρ は巻きだれの全体の平均密度とした。巻きだれは一つの柵に単独で発生するものとし、巻きだれの延長 W は雪崩予防柵の柵幅と同じ $w=5.5m$ とした。また、巻きだれの形状は直方体(図-10)と考えた。

表-3で求めた値をそれぞれ式(4)~(7)に代入して求めた接合部に作用する引張応力 σ_t 、せん断応力 σ_s と、巻きだれの破断面付近の積雪密度より求めた引張強度 Σ_t 、せん断強度 Σ_s を表-4に示す。なお、巻きだれの雪温の観測結果から、 $0^\circ C$ に近い3/27を乾雪、2/21を乾雪とした。また、体積含水率 θ は5%とした。なお、(6)式は高密度($450kg/m^3$ 以上)の雪に適用されるが、含水率の変化に伴う強度への影響を把握するため用いることとする。表-5に式(8)より求めた巻きだれの安定度 S を観測事例ごとに示した。なお、 S_t は引っ張りに対する安定度、 S_s はせん断に対する安定度である。表-5によると、いずれの場合も安定度は1を上回っているものの、3/27の観測時には S_s は1.01となっており、今回算出した中では最も小さい値となった。なお、3/27の観測の翌日に巻きだれの崩落が発生したことから、表-5の安定度 S によって巻きだれが崩落寸前の状態であったことを示しており、このことからモデルや算定方法もおおむね正しいことが示された。

(2) 形状に応じた巻きだれの安定度の変化について

図-10において、巻きだれが形成された際、前に張り出す長さ(以下、張出長 a という。)と高さ b との比率を、縦横比 c と定義し式(12)で表す。

$$c = \frac{a}{b} \quad (12)$$

図-11に巻きだれの張出長 a と引張に対する安定度 S_t との関係を、縦横比 c ごとに図示した。なお、雪質は乾雪とし、雪の密度は観測における乾雪時の平均密度の $250kg/m^3$ とした。巻きだれの縦横比 c と張出長 a を定めると、自動的に高さ b が求まる。そのことから、図-11はある巻きだれの大きさに対する引張安定度を示している。同じ縦横比 c で見たとき、張出長 a が増加するという事は、高さ b も大きくなり、巻きだれが大きくなるということを意味しており、引張安定度 S_t は小さくなった。また、同じ張出長 a で見たとき、縦横比 c が大きくなるということは、巻きだれの高さ b も大きくなるということを意味しており、巻きだれの体積が大きい方が、引張安定度 S_t は大きくなる結果となった。このことは、巻きだれが大きくなり重量が増すことに伴う引張応力の増加よりも、断面積が増えることによる引張強度の増加が、巻きだれの安定化に寄与していることを示している。

図-12に巻きだれの張出長 a とせん断に対する安定度 S_s との関係を縦横比 c ごとに示した。せん断安定度は、巻きだれの質量増加に伴うせん断応力の上昇と、断面積が増えることに伴うせん断強度の増加の割合が同じであるため、縦横比 c が変化してもせん断安定度 S_s は変わらない結果となった。

高さ1.0m、張出長1.0m(縦横比1.0)の巻きだれに対し、雪の密度を変化させたときの安定度の推移を図-13に示す。雪の密度が大きくなるほど、巻きだれの引張安定度 S_t とせん断安定度 S_s はともに大きくなる。密度が $400kg/m^3$ の時の巻きだれの安定度は $200kg/m^3$ の時の4倍程度高い値となった。この結果か

表-3 巻きだれの各パラメータ

観測日	A(m ²)	m(kg)	M(m ² ·kg/s ²)	Z(m ³)
2018/2/21	11	2,787	19,138	3.7
2018/3/27	6	1,474	5,061	1.1

表-4 巻きだれに作用する応力と強度

観測日	乾湿	σ_t (Pa)	σ_s (Pa)	Σ_t (Pa)	Σ_s (Pa)
2018/2/21	乾雪	5,172	2,485	13,803	6,408
2018/3/27	湿雪	4,601	2,410	8,997	2,430

表-5 巻きだれの安定度

観測日	S_t	S_s
2018/2/21	2.67	2.58
2018/3/27	1.96	1.01

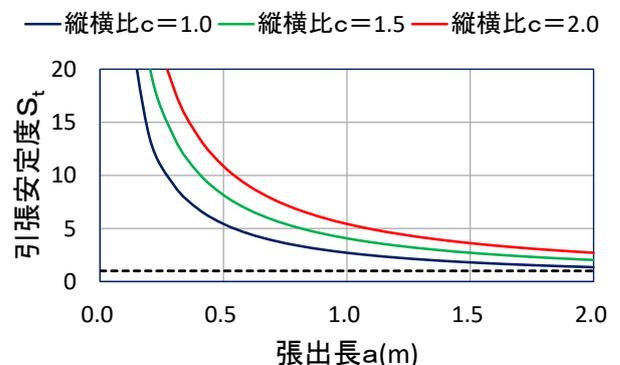


図-11 縦横比別の引張安定度 S_t と張出長 a の関係(乾雪密度 $250kg/m^3$)

図中の点線は引張安定度1.0を示す

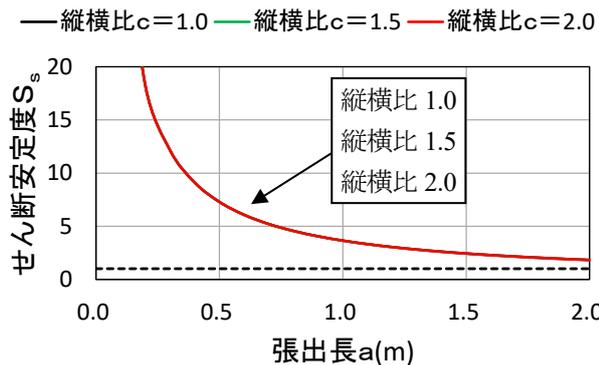


図-1 2 縦横比別のせん断安定度 S_s と張出長 a の関係(乾雪密度 250kg/m^3)
 図中の点線はせん断安定度 1.0 を示す
 縦横比 1.0、1.5、2.0 の線が重なっている

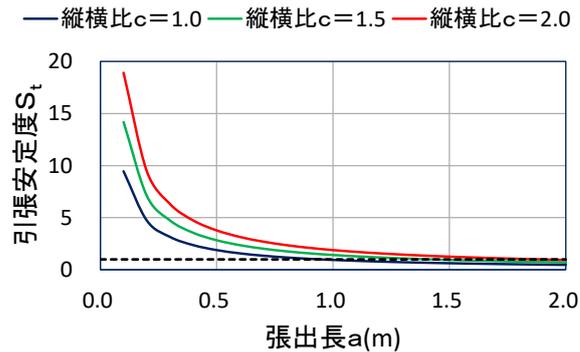


図-1 4 縦横比別の引張安定度 S_t と張出長 a の関係(湿雪密度 330kg/m^3 、体積含水率 4.0%)
 図中の点線は引張安定度 1.0 を示す

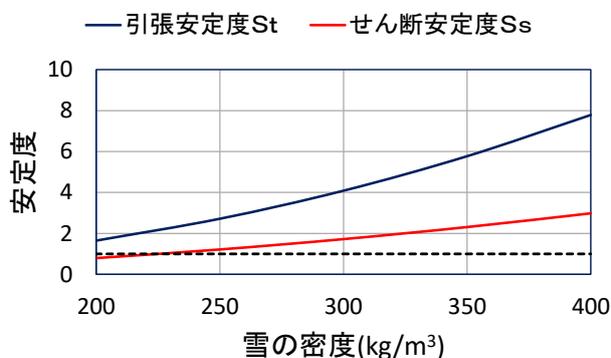


図-1 3 雪の密度と安定度の関係(乾雪)
 (巻きだれの張出長 1.0m、高さ 1.0m の場合)
 図中の点線は安定度 1.0 を示す

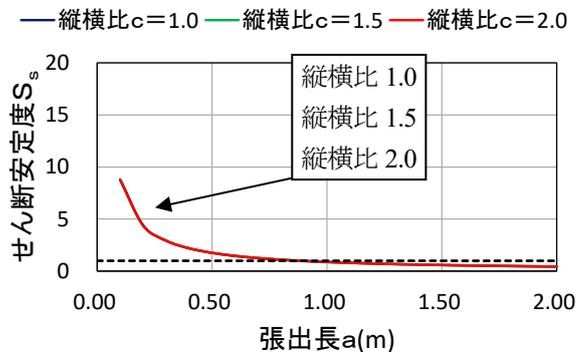


図-1 5 縦横比別のせん断安定度 S_s と張出長 a の関係(湿雪密度 330kg/m^3 、体積含水率 4.0%)
 図中の点線はせん断安定度 1.0 を示す
 縦横比 1.0、1.5、2.0 の線が重なっている

ら、積雪初期は、雪の密度が小さく安定度が 1.0 を下回り、巻きだれが形成されたとしても崩れてしまうことが多いことが考えられる。そして、巻きだれの密度が増加して、ある程度の大きさになった乾雪の巻きだれは安定することが、図-1 3 からわかる。

次に、湿雪の場合について考える。乾雪と同じように巻きだれの張出長 a と引張安定度 S_t との関係を縦横比 c ごとに図-1 4 に示す。なお、雪の密度は観測における湿雪時の平均密度 330kg/m^3 、体積含水率は崩落前の値である 4.0% とした。その結果、張出長 1.0m、縦横比 1.0 のとき、安定度 1.0 を下回る結果となり、乾雪における結果と比較しても、安定度が小さくなる傾向が示された。また、巻きだれの張出長とせん断安定度 S_s との関係を縦横比 c ごとに図-1 5 に示す。こちらは、乾雪の時と同様に縦横比に依らず同じ安定度を示すが、張出長が 0.9m 付近より大きくなると、せん断安

定度 S_s が 1.0 を下回る結果となり、こちらも乾雪時と比較して、安定度が小さい結果が示された。

乾雪の時と同様に、高さが 1.0m、張出長が 1.0m (縦横比は 1.0) の巻きだれに対し、雪の密度を変化させたときの安定度の推移を図-1 6 に示す。湿雪の場合は、乾雪の場合に比べて密度変化に伴う安定度増加割合は鈍い。最後に、雪の密度を 330kg/m^3 に固定し、体積含水率 θ を変化させたときの安定度の変化を図-1 7 に示す。引張安定度、せん断安定度ともに体積含水率が 4.0% 以上で、安定度が 1.0 を下回る結果となった。以上のことから、ここで提案した巻きだれの安定度計算手法を、巻きだれ崩落の推定に活用することができると考えられる。特に、巻きだれの雪質が乾雪から湿雪に変わり、体積含水率が上昇することで、安定度は急激に低下し、巻きだれの崩落に至るものと考えられる。

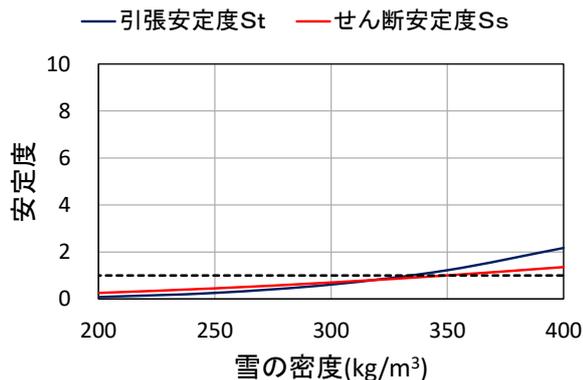


図-16 積雪の密度と安定度の関係(湿雪)
(巻きだれの張出長 1.0m、高さ 1.0m、体積含水率 4.0%の場合)図中の点線は安定度 1.0 を示す

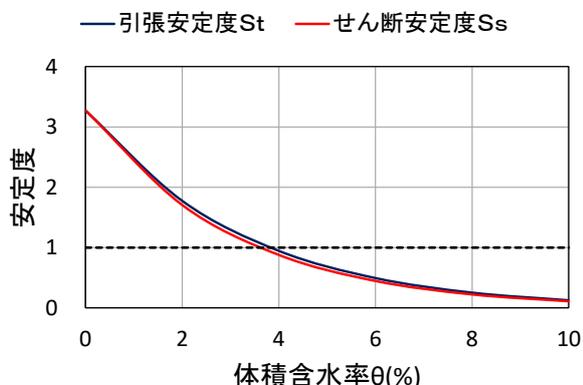


図-17 体積含水率 θ と安定度の関係(湿雪)
(巻きだれの張出長 1.0m、高さ 1.0m、密度 330kg/m³ の場合)図中の点線は安定度 1.0 を示す

3.5 観測時における気象の状況と評価について

ここでは、観測時の気象の状況と、巻きだれ崩落時の気象状況が、特異なものであるかについて評価を行った。

(1) 観測期間中の気象について

2016年冬期の朱鞠内アメダスにおける日最高気温と日最深積雪の変化を図-18に示す。日最高気温は12月上旬から3月上旬まで0℃を下回る真冬日であった。日最高気温は、-10.1℃を観測した2017/1/24が最も低い日となり(日最低気温は-32.1℃)、最深積雪は、232cmを観測した2017/2/26が最も大きい日となった。

2017年冬期の朱鞠内アメダスにおける日最高気温と日最深積雪の変化を図-19に示す。気温に関しては2016年冬期とほぼ同様の傾向であった。日最高気温は、-10.1℃を観測した2018/2/12が最も低い日となり(日最低気温は-29.2℃を観測した2018/2/2が最も低い)、最深積雪は、296cmを観測した2018/2/25が最も

大きい日となった。最深積雪の296cmは、朱鞠内アメダスが積雪深の観測を開始した1981年からの中でも歴代2位となると記録的な積雪であった。

2018年冬期の朱鞠内アメダスにおける日最高気温と日最深積雪の変化を図-20に示す。2018年冬期は、2月下旬より日最高気温が0℃を超える日が多かった。日最高気温は-13.4℃を観測した2019/2/8が最も低い日となり(日最低気温は-28.1℃を観測した2019/1/13である)、最深積雪は、225cmを観測した2019/2/13が最も大きい日となった。

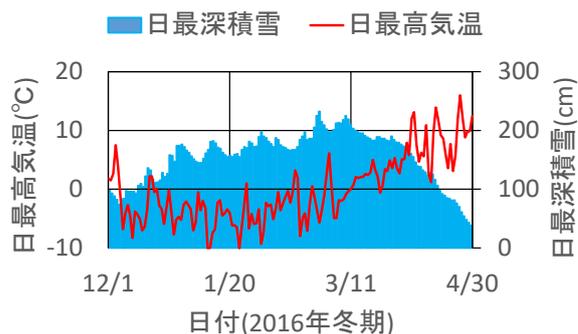


図-18 朱鞠内アメダスにおける日最高気温と日最深積雪の推移(2016年冬期)

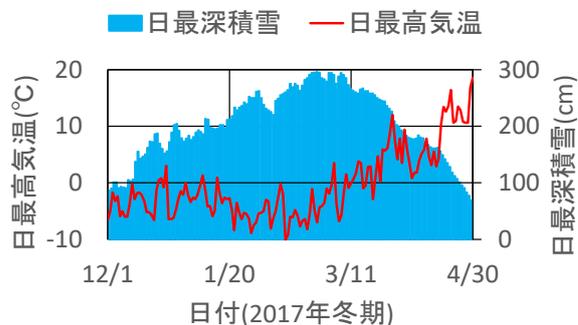


図-19 朱鞠内アメダスにおける日最高気温と日最深積雪の推移(2017年冬期)



図-20 朱鞠内アメダスにおける日最高気温と日最深積雪の推移(2018年冬期)

(2) 気象値の評価手法について

朱鞠内アメダスの気温は 1978 年冬期から、積雪深は 1981 年冬期から観測が行われており、2020 年現在も観測が続けられている。そこで、観測開始から 2018 年冬期(12 月 1 日から翌年 4 月 30 日)までの日最高気温と日最深積雪のデータを、気象庁ホームページ⁹⁾より収集し、各月を 10 日ごとに区切った旬(1 日～10 日は上旬、11 日～20 日は中旬、21 日～31 日は下旬)ごとに集計した。そして、ある日(例えば 4 月 1 日)に観測された日最深積雪と日最高気温に対して、旬(ここでは 4 月上旬)の中で過去にそれらの値を超過した日数を求めた。さらに、超過した日数をその観測地点のその旬における総観測日数で割った値を超過割合(%)と定義した。3. 3 節で説明した、過去に巻きだれの崩落を観測した日最高気温と、最深積雪の観測値と超過割合を表-6 に示す。

例えば、2018/3/28 の日最高気温は 12.0℃であった。過去の観測において 3 月下旬に日最高気温が 12.0℃を超過する割合は 0.2%であり、3. 3 節で前述したように、過去 41 年の観測の中でも 1 度しかない稀な状況であった。一方、この時の日最深積雪は 226cm であり、3 月下旬に 226cm を超過する割合は 28.5%となった。

ところで、日最高気温は日による変動が大きいため、超過割合は旬の中で超過する日数と言い換えることもできる。例えば、ある日最高気温が超過割合 10%の時、これは旬の中で 1 日程度その気温を超える日最高気温が観測される状況といえる。一方、日最深積雪は連続する値であり、ある日最深積雪が超過割合 10%とした時、このことはある旬の中で 1 日程度その積雪深を超えるというよりも、旬全体の積雪深が 10 年に 1 度程度その積雪深を超過している状況と考えることもできる。よって、先ほどの日最深積雪の超過割合が 28.5%というのは、旬の中で 3 日程度超過する日があるというよりは、10 年に 3 回程度超過する旬があるといえる。

また、これらの状況がどれほど特異であるかを示す一つの考え方として、年最大積雪深をもとに算出された 5 年、10 年、30 年確率最大積雪深との対比が考えられる。表-7 に、「設計積雪深に関する技術資料」⁷⁾より、朱鞠内アメダスにおける各年の確率最大積雪深を示す。表-7 には併せて、過去の観測でそれらの積雪深を超過した日数と超過割合も示した。これによると、朱鞠内アメダスにおける 30 年確率最大積雪深は 312cm であり、1981 年冬期からの観測開始以来観測はされていない。10 年確率最大積雪深の 286cm は 19 日観測され、超過割合は 0.4%であった。5 年確率最大積

表-6 巻きだれ崩落時の朱鞠内アメダスの日最高気温、最深積雪とそれらの超過割合

		日最高気温		最深積雪	
		観測値(℃)	超過割合(%)	観測値(cm)	超過割合(%)
2017冬①	2018/3/27	8.9	4.4	231	22.5
2017冬②	2018/3/28	12.0	0.2	226	28.5
2018冬①	2019/4/9	5.2	48.0	169	48.7
2018冬②	2019/4/13	11.5	13.9	150	36.6

表-7 朱鞠内アメダスにおける各年の確率最大積雪深とそれらの超過日数、超過割合。北海道内気象官署・アメダスにおける平均超過割合

	確率最大積雪深(cm)	超過日数	超過割合(%)	平均超過割合(%)
5年	265	93	1.8	2.0
10年	286	19	0.4	0.6
30年	312	0	0.0	0.2

雪深の 265cm は 93 日観測され、超過割合は 1.8%であった。また、北海道内の気象官署とアメダス 89 箇所における各年の確率最大積雪深に対する超過割合の平均値も表-7 に示した。朱鞠内で観測された値は 30 年確率こそ観測されていないが、他の確率最大積雪深については、北海道内におけるほぼ平均的な傾向であることがわかった。

表-7 で示した超過割合を参考に、表-6 で示した巻きだれの崩落時の気温や積雪深を評価すると、2018/3/28 における最高気温 12.0℃は表-7 より、30 年に 1 度程度の事象に相当すると考えられる。この時の巻きだれの崩落は、比較的大きいものであった。一方、前日の巻きだれの小崩落が起きた 2018/3/27 の最高気温 8.9℃や 2019/4/13 の最高気温 11.5℃は、5 年確率最大積雪深の目安となる超過割合 2.0%を上回っており、稀な状況ではないことがわかる。

以上のことから、それぞれの旬に応じた日最高気温と日最深積雪の超過割合という考えを用いて、巻きだれの崩落を評価できると考えられる。

4. まとめ

本研究では、雪崩予防柵に発生する巻きだれの安定性評価手法について検討を行った。検討していく過程で、巻きだれの形成過程の把握、物性値の計測を行い、時期に応じて形や物性を変える巻きだれの現状を把握した。また、巻きだれの形状を適当なモデルに置き換えることで、巻きだれの安定度の物理的な計算を容易にし、巻きだれが持つ物性と大きさによって安定度が変化することを把握した。

ただし、巻きだれの大きさを容易に計測する手法、時期に応じた巻きだれの物性値を容易に計測する手法

または予測する手法については、実際の道路を管理していく上では省力化がより求められる。よって、それらの計測技術については、今後の課題として発展的継続する「道路における斜面積雪の安定性評価手法に関する研究」にて、検討を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 竹内政夫、成田英器、佐々木勝男：巻きだれ雪の形成と消滅－危険な巻きだれの見分け方、北海道の雪氷、30、pp.111-114、2011
- 2) 日本雪氷学会編：積雪観測ガイドブック、朝倉書店、136p、2010
- 3) Zempachi Watanabe : The Influence of Snow Quality on the Breaking Strength、*Sci. Rep Fukushima Univ*、27、 pp.37-35、1977
- 4) 栗原靖、河島克久、和泉薫：湿潤高密度積雪の引張破壊強度・含水率依存性、雪氷、74、pp.23-31、2012
- 5) 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
- 6) 気象庁ホームページ：<http://www.jma.go.jp>(2020年4月27日確認)
- 7) 北海道開発局：設計積雪深に関する技術資料、2001

STUDY ON A STABILITY ASSESSMENT METHOD FOR SNOW EAVES ON SNOW BRIDGES

Research Period : FY2016-2019

Research Team : Cold-Region Road Engineering
Research Group (Snow and Ice)

Author : TAKAHASHI Joji

MATSUSHITA Hiroki

TAKAHASHI Wataru

Abstract : Many snow bridges, including hanging fences, have been installed mainly in mountainous areas and useful facilities for snow avalanche-prone road sections. However, there have been snow bridges-related problems, such as developing snow eaves on the bridges and collapses of such snow eaves, which affect the road traffic and induce snow avalanches. Currently, no stability assessment method for snow eaves has been established, and the decision-making for the removal of snow eaves is left to the individual judgment of each road management office. In this study, we observed the shapes and physical properties of the snow eaves throughout one winter. In addition, we constructed a model of appropriate shape and devised a method for assessing the stability of snow eaves by substituting the values obtained in our observation into the model. Furthermore, by assessing the meteorological conditions under which the collapses of snow eaves occurred, we evaluated the specificities of the weather under which the collapses of snow eaves occur.

Key words : snow bridges, snow eaves, density, moisture content, weather conditions