

雪崩予防柵に発生する巻きだれの安定度評価と地域特性について

寒地土木研究所 寒地道路研究グループ 雪氷チーム ○高橋 渉
松下 拓樹
高橋 丞二

積雪期に雪崩予防柵に巻きだれが発生し、その崩落による道路交通への影響が懸念される。雪崩予防柵の巻きだれの安定度評価を行うために、融雪期の含水率に着目した現地観測を行い、巻きだれの大きさ、密度、含水率が巻きだれの安定度にどのように影響を与えるか考察した。さらに、巻きだれ崩落時の積雪深や気温が、過去の観測値と比べて特異な状況であるかを定量的に評価し、巻きだれの崩落が特異な気象状況のもとに起こる現象なのか考察した。

キーワード：雪崩予防柵、雪崩、法面管理、除雪、気象統計

1. はじめに

雪崩予防柵(吊柵を含む)は、雪崩発生区対策の有効な手段の一つである。しかし、雪崩予防柵上に大きく張り出した雪塊が形成される場合があり、ここではこれを“巻きだれ”と呼ぶ。雪崩予防柵上に形成された巻きだれが落下すると、道路交通に影響を与えるおそれがあるほか、巻きだれの除去に対して多くの労力と時間を割いているのが現状である。

雪崩予防柵上に発生する巻きだれの対策方法を検討する目的として、一冬を通じた巻きだれの形成状況と物性値の観測を行い、崩落直前の気象状況の分析や、巻きだれの形状をモデル化することによって崩落に至る力学的な解析を行い、安定度という考え方をもって、その定量的な評価を行った¹⁾。

本稿では、これまでの調査結果¹⁾に基づき、融雪期に巻きだれの雪質が乾雪から湿雪に変化し、崩落することに着目し、現地での物性値の観測結果について述べる。

また、過去に巻きだれの崩落が起きた際の気象状況が、気象統計の観点から特異な状況であるかの検証を行った結果について述べる。

2. 巻きだれの現地観測について

(1) 観測方法

巻きだれの現地観測は、一般国道275号幌加内町朱鞠内湖畔における切土法面に設置されている雪崩予防柵(図-1)にて行った。現地観測を行った雪崩予防柵は、北緯44度18分16秒、東経142度15分16秒、標高300mに位置し、柵高2.0m、斜面勾配は42度である。

観測期間は2019年1月から4月までの4か月で、1月と2月は各1回、3月以降から4月中旬までは1週間おきに、計9回の観測を行った。

観測項目は、巻きだれの雪温、密度、硬度、体積含水率である。巻きだれの断面を切り出し(図-2)、その断面内を鉛直方向に均等に3~4点の観測を行った。観測方法は「積雪観測ガイドブック²⁾」に倣い、含水率の測定はデノース式含水率計を用いた。また、巻きだれの形状と、崩落状況を確認するため、現地にタイムラプスカメラ(Brinno社製:TLC200)を設置し、日中(5:00~18:00)1時間間隔で撮影を行った。

周辺の気象状況(気温、積雪深)については、現地観測箇所から西南西8kmの位置にある気象庁朱鞠内アメダスの値³⁾を参照した。

(2) 観測結果

a) 物性値の観測結果

観測した結果のうち、各観測時における巻きだれの密度と硬度の平均値の推移を図-3、雪温の平均値の推移を図-4に示す。雪温と硬度の観測は1月11日の観測から、密度の観測は2月15日の観測から開始した。途中、2月15日の観測は硬度、3月18日の観測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-3によると、密度は3月12日を境に増加傾向となった。また、図-4より雪温は3月26日以降0°Cに近い値を示した。また、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月26日以降は採取した後まもなくして、水がしみ出してくる状況となっていたことから、3月26日以降の雪質は湿雪が主体となったと推測できる。

3月26日以降に観測した巻きだれの体積含水率 θ (%)と重量含水率 w (%)、朱鞠内アメダスの積雪深の推移を表-1に示す。なお、重量含水率 w は式(1)²⁾より求まる。



図-1 観測箇所(一般国道275号幌加内町朱鞠内湖畔)



図-2 巻きだれの断面状況(2019年4月9日)

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

ここで、 ρ_{water} は水の密度(1,000kg/m³)、 ρ_{wet} は湿雪の密度(kg/m³)である。表-1より、3月26日以降、体積含水率、重量含水率ともに上昇した。なお、4月2日の雪温は-5.4℃であり、硬度は195kPaを示した。これは、3月26日の直後から気温の低い状況が続き、積雪が再凍結したために硬度が高く出たものと思われる。

b) 巻きだれ崩落状況および気象状況について

図-5は現地に設置したタイムラプスカメラのうち、巻きだれの小崩落が生じた時の画像を抜粋したものである。4月9日10:00(図-5a)の段階で存在していた巻きだれの先端部が、11:00(図-5b)になると欠けてしまい、背後の柵の見え方が変化している。また、4月13日16:00(図-5c)の後にも巻きだれの崩落があり、17:00(図-5d)の写真では雪崩予防柵支柱の頂部を確認することができる。いずれも、小崩落ではあるが、前項の崩落直前、直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。

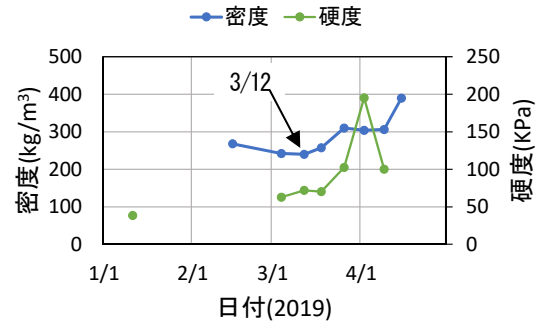


図-3 巻きだれの密度と硬度の推移

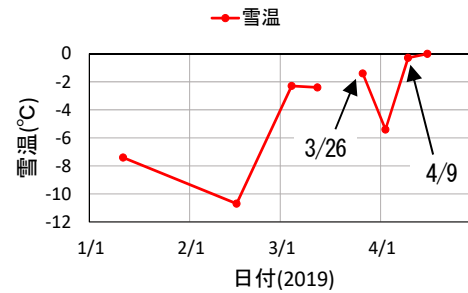


図-4 巻きだれの雪温の推移

表-1 体積含水率、重量含水率、積雪深の推移

	2019/3/26	2019/4/2	2019/4/9	2019/4/15
体積含水率(θ)	1.3	3.1	4.0	10.4
重量含水率(w)	4.2	10.2	13.1	26.7
積雪深(cm)	183	175	169	135

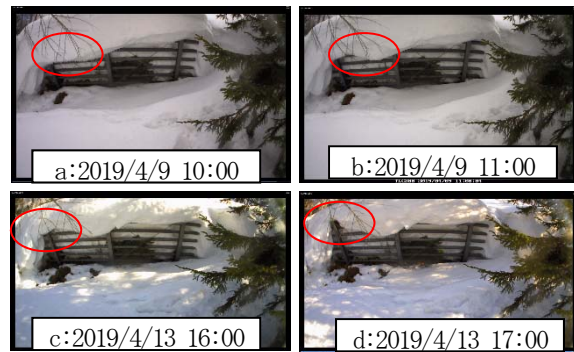


図-5 巻きだれ崩落前後のタイムラプスカメラ画像

巻きだれの崩落前1か月の朱鞠内アマダスの積雪深と気温の推移を図-6に示す。3月30日より日最高気温が0℃を上回る日が続いた。積雪深は4月4日頃に降雪があり、186cmまで増加した。その後融雪が進み、4月13日までの1週間で積雪深が36cm減少していた。

このような状況下で、巻きだれの崩落が発生した。巻きだれの崩落は日最高気温が0℃を超える日が続き、融雪が進むことにより、含水率が上昇して発生すると考えられる。

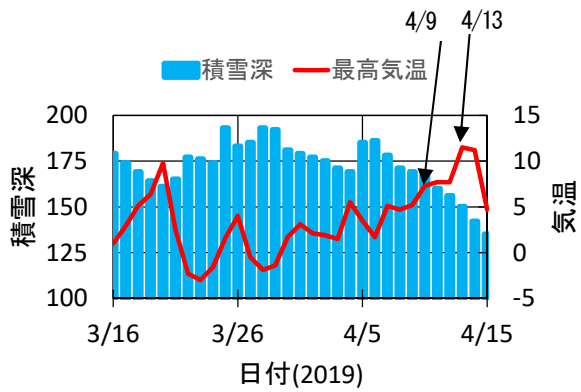


図6 朱鞠内アメダスの日最深積雪と日最高気温の推移

3. 巻きだれの安定度について

巻きだれの安定度を検討するにあたり、巻きだれ形状を簡素な形状のモデル化を行い、破断面に作用する応力と、強度の比をもって安定度と定義した¹⁾。

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Watanabe⁴⁾、湿雪の引張強度は栗原ら⁵⁾、湿雪のせん断強度は山野井・遠藤⁶⁾によって式(1a) (1b) (2a) (2b)の形で推定される。

・乾雪

$$\Sigma_t = 3.4 \times 10^{-4} \rho_{\text{dry}}^{3.24} \quad (1a)$$

$$\Sigma_s = 9.4 \times 10^{-4} \rho_{\text{dry}}^{2.91} \quad (1b)$$

・湿雪

$$\Sigma_t = 1.0 \times 10^{-6} \rho_{\text{dry}}^{4.17} \exp(-0.058w) \quad (2a)$$

$$\Sigma_s = 4.97 \times 10^{-4} \rho_{\text{dry}}^{2.91} \exp(-0.235\theta) \quad (2b)$$

ここで、 ρ_{dry} は乾雪の密度 (kg/m^3)、 θ は体積含水率(%), w は重量含水率(%), 「積雪観測ガイドブック²⁾」より ρ_{dry} を式(3)表す。

$$\rho_{\text{dry}} = \left(1 - \frac{w}{100}\right) \times \rho_{\text{wet}} \quad (3)$$

式(1)および式(2)から、3月26日以前は乾雪として、3月26日以降は湿雪として、巻きだれの引張強度、せん断強度を推定した。これらの強度の推移を図-7に示す。なお、式(2a)⁵⁾は、高密度($450\text{kg}/\text{m}^3$ 以上)の雪に適用するとされているが、含水率の変化に伴う強度への影響を把握するために活用することとする。図-3で示した密度は3月12日以降増加しているが、図-7より引張強度、せん断強度は乾雪から湿雪に変化した3月26日以降減少に転じた。これらのことから、乾雪から湿雪への変化に伴い、含水率が増加して強度が低下したことが、巻きだれの崩落に作用したと考えられる。巻きだれの大きさに応じた安定度の算出手法については既報⁸⁾を参考にされたい。

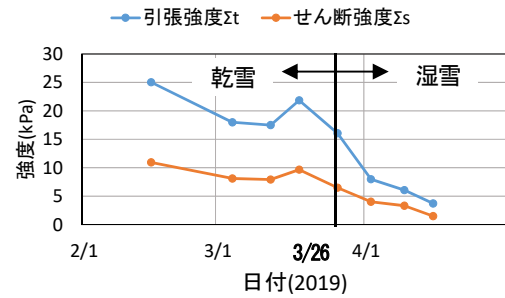


図7 引張強度とせん断強度の推定値の推移

4. 巻きだれ崩落時の気象状況の評価について

当観測箇所では2016年冬季(2016年11月~2017年4月)から毎冬季観測を行っている。タイムラプスカメラを設置し、崩落の事例が観測されたのは2017年冬季が2回(図-8)、2018年冬季が2回(図-5)である。崩落時の、気象庁朱鞠内アメダスの日最高気温と日最深積雪³⁾を表-2に示す。

朱鞠内アメダスの気温は1978年冬季から、積雪深は1981年冬季から観測が開始されており、2020年現在も観測が続けられている。そこで、2018年冬季までの(11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³⁾から、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(例えば4月上旬)の中で過去にそれら値を超過した観測日数をそれぞれ求めた。さらに、超過した観測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、表-2に併せて示す。

これによると、2017年冬季に二回目の崩落の事象があった2018年3月28日の日最高気温は 12.0°C であった。このことは過去の観測において3月下旬に日最高気温が 12.0°C を超過する割合は0.2%となり、過去41年の観測の中でも1度しかない希な状況であった。一方、日最深積雪は226cmであり、3月下旬に積雪深が226cmを超過する割合28.5%となった。なお、この時は雪崩予防柵の半分を覆っていた巻きだれが崩落しており、観測された中では一番大きい崩落となった。

ところで、日最高気温は日変動が大きく、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。たとえば、日最高気温の超過割合が10%の時、旬の中で1日程度その気温を超える日最高気温を観測するといえる。一方で、日最深積雪は旬の中でも連続する値であり、ある積雪深の超過割合が10%だとしても、旬の中で1日超過するというよりも、ある年の旬全体が超過しているともいえる状況と考えられ、10年に1度超過する旬があるといった方が実態に即しているものとする。つまり、日最深積雪の超過割合28.5%とは、旬の中で3日程度超過するというよりは、10年に3回程度超過する旬がある状況と

表-2 巻きだれ崩落時の朱鞠内アメダスの日最高気温、最深積

		日最高気温		最深積雪	
		観測値(°C)	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



2018/3/27 2018/3/28 2018/3/29

図-8 巻きだれ崩落時のタイムラプスカメラの画像

いえる。

また、これらの状況がどれほど特異な現象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。「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5年、10年、30年確率最大積雪深の値を表-3に示す。表-3には併せて、冬季(11月1日から4月30日まで)において、過去の観測(1981年11月～2019年4月)で、それらの積雪深を超過した日数、ならびに超過割合を示す。超過割合は、各確率最大積雪深以上の日最深積雪であった日数を朱鞠内アメダスの冬季観測日数の総数で割ったものである。

これによると、朱鞠内アメダスにおいて30年確率最大積雪深である312cmは、1981年冬季からの観測開始以降観測されていない。一方で、10年確率最大積雪深である286cmは19日、超過割合は0.4%。5年確率最大積雪深である265cmは93日、超過頻度は1.8%であった。これは、北海道内の気象官署とアメダス89箇所における確率最大積雪深の超過割合の平均値(表-3に示す。)と比較して、平均的な超過割合であると考えられる。

表-3で示した超過割合と確率年の関係を参考に、表-2で示した巻きだれ崩落時の気温や積雪深の特異性を評価すると、2018年3月28日における最高気温12.0°Cは表-3の平均超過割合と比較すると、30年に1度程度の事象といえる。一方で、前日の2018年3月27日の最高気温8.9°Cや、2019年4月13日の最高気温11.5°Cは、5年確率最大積雪深の目安となる超過割合2.0%を上回ることから、さほど希な事象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が、超過割合という考え方をを用いて評価できる。しかし、表-2からも巻きだれ崩落時は旬における日最深積雪よりも日最高気温が希な状況であることが多いものの、特異な気象状況ではない場合においても崩落する事例があることから、気象条件だけで判断するのは危ういといえる。

表-3 朱鞠内アメダスにおける確率最大積雪深、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

5. まとめ

本稿では、雪崩予防柵に発生する巻きだれに対して、3冬季目の観測として、体積含水率の観測を追加した。また、雪の強度を求める既往の推定式を用いることで、融雪に伴い巻きだれの強度が低下していることが分かった。さらに、巻きだれ崩落時の気象状況と、過去の気象状況と比較し、巻きだれ崩落時の気象状況の超過割合を算出した。他の確率統計手法で得られた結果と比較することで、気温に対しても超過割合から、巻きだれ崩落時の気象状況が希な現象か否かを定量的な評価を行った。

今後は、日平均気温や、数日間の気温の推移といったものから、巻きだれの崩落の危険度評価を試みるとともに、巻きだれ崩落に至る日最高気温の閾値の算出を行いたい。

謝辞：本観測に際し、旭川開発建設部士別道路事務所の関係各位には、巻きだれの観測箇所の提供をいただき、本研究を進める上で多大なご協力をいただいた。また、道北支所の成田研究員と桜井研究員には、現地観測の際に多大なご協力を頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 高橋渉, 松下拓樹, 高橋丞二, 松澤勝, 2018: 雪崩予防柵に発生する巻きだれの観測について. 寒地土木研究所月報, 786, 26-32.
- 2) 日本雪氷学会編, 2010: 積雪観測ガイドブック. 朝倉書店, 136.
- 3) 気象庁 過去の気象データ検索: <http://www.jma.go.jp> (2020年1月14日閲覧)
- 4) Zempachi Watanabe, 1977: The Influence of Snow Quality on the Breaking Strength. Sci. Rep Fukushima Univ, 27, 27-35.
- 5) 栗原靖, 河島克久, 和泉薫, 2012: 湿潤高密度積雪の引張破壊強度・含水率依存性. 雪氷, 74, 23-31.
- 6) 山野井克己, 遠藤八十一, 2002: 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, 443-451.
- 7) 北海道開発局, 2001: 設計積雪深に関する技術資料.
- 8) 高橋渉, 松下拓樹, 成田徳昌, 桜井裕万, 高橋丞二, 2019: 雪崩予防柵に発生する巻きだれの安定度評価について. 寒地土木研究所月報, 796, 24-29.