

リング付きベーン試験器による積雪剪断強度測定精度の検証

日下 稜 (北見工業大学), 大場亜紀 (北海道自然エネルギー研究会),
高橋修平 (北見工業大学)

1. はじめに

雪崩の危険性を予測するのに積雪の剪断強度を測定することは有効であるとされている。積雪剪断強度を定量的に測る方法として、シアフレームによるものが一般的であるが測定に手間と時間がかかることが欠点である。ベーン試験器による積雪剪断強度試験はシアフレームによる試験に比べ、短時間で実施できるという利点がある。また、シアフレームで測定された剪断強度と高い相関を示す (松澤ら, 2008 ; 大場ら, 2009) ことからシアフレームに代わるものとして研究が進められている (横山ら, 2009)。しかし、従来のベーン試験器は底面だけではなく側面の雪も同時に破壊してしまうため、測定する層は使用するベーンの高さ以上の雪の厚みが必要であり、薄い層での剪断強度測定には適さない。雪崩の原因と成り得る弱層は数ミリメートル程度の薄いものも存在するため、その測定に従来型のベーンを使用することは適当ではない。そこで本研究では、1 cm 以下の薄い積雪層でも剪断強度の測定が可能な「リング付きベーン試験器」(仮称) を試作し、有効性を調べる実験を行った。その結果、測定層直上に厚い氷板が存在しないなど一定の条件下で薄い弱層の検出に有効であることが確認されたので報告する。

2. 実験概要

2. 1 試験器具

本研究で使用した機器は以下の 5 点である。

- ・リング付きベーン (高さ 4 cm, 直径 8 cm)
- ・従来型ベーン (高さ 4 cm, 直径 8 cm)
- ・トルクゲージ (杉崎計器株式会社製 DID-4, 測定範囲 0.020~4 N)
- ・シアフレーム (剪断面積 248 cm²)
- ・フォースゲージ (株式会社 IMADA 製 ZP-500N, 最大荷重 500 N, 最小分解能 0.1 N)

2. 2 リング付きベーンの特徴

図-1 にリング付きベーンと従来型ベーン及びシアフレームを示す。従来型ベーンで測定する場合、回転時に底面と側面の両方で剪断が起るため、その測定値には 2 つの剪断力が含まれている。これに対し、リング付きベーンとシアフレームは側面にリングもしくはプレートが付いているため、測定層に差し込んだ時点で側面が切断され、底面のみの剪断力を測定することが可能である。また、手動で測定する場合、



図-1 測定機器
リング付きベーン (左)
従来型ベーン (中)
シアフレーム (右)

従来型ベーンでは回転時のブレが大きく測定値のばらつきが出る原因となっていたが、これもリングをつけることで解消された。しかし、リング付きベーンは雪に差し込む板の枚数が多くなるため、クラストや薄い氷板が存在する場合、差し込む時に測定層を破壊してしまう可能性が高いという欠点を持つ。ただ、これはベーンに使用する板を薄くすること解決できると思われる。現在リング付きベーンに使用しているステンレス板の厚みは 1mm だが、さらに薄く、十分な強度を持つベーンを作成することが今後の課題である。

2. 3 試験方法

リング付きベーン及び従来型ベーンは図-2に示すようにトルクゲージの先端に取り付け、雪面に対し水平に差し込み、おおよそ1秒間で90°回転させ測定した。この時の最大トルク値を以下の式を用いて剪断強度に換算した。

$$\text{リング付きベーン (底面による剪断)} : \sigma = \frac{T}{\pi \left(\frac{D^3}{12} \right)}$$

$$\text{従来型ベーン (底面及び側面による剪断)} : \sigma = \frac{T}{\pi \left(\frac{D^2 H}{2} + \frac{D^3}{12} \right)}$$



図-2 リング付きベーン試験器による測定

ベーン直径 : D, ベーン高さ : H, 剪断時の最大トルク : T である。軸の影響は小さいので無視している。

シアフレームは、剪断面積 248cm²の物を使用し、フォースゲージにシアフレームのワイヤーを掛け、積雪面に水平に差し込みフォースゲージを水平に3秒程度で崩壊するように引き、その崩壊時の最大張力を測定した。

ベーン、シアフレーム共に、特に明記した場合を除き1測定層につき5回計測を行い、その平均値を取った。

3. シアフレームとリング付きベーンの相関

図-3はリング付きベーンとシアフレームにより測定された剪断強度の相関を示したものである。実線は回帰式、点線は等値線である。観測は北見工業大学グラウンドで2009年1月から2010年2月にかけて様々な雪質で行った。リング付きベーンとシアフレームにより測定された値の間にはR²=0.85(データ数40)と高い相関が見られた。松澤ら、2008など過去の研究において、従来型ベーンとシアフレームにより計測された剪断強度には高い相関があることが分かっているが、リング付きベーンにおいても同様の傾向があることが

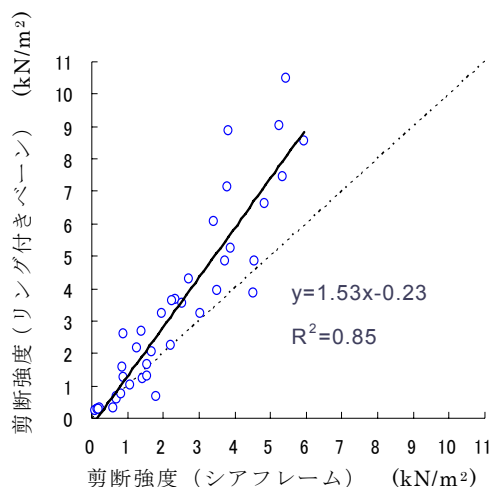


図-3 ベーンとシアフレームによる剪断強度の比較

判明した。リング付きベーンで測定された値がシアフレームで測定された値に比べ大きいのが、その理由を検証した結果を「4. リングと積雪の摩擦及び測定精度の検証」に示す。

4. リングと積雪の摩擦及び測定精度の検証

図-2に示したようにリング付きベーンは周囲の雪を取り除かずに測定している。また、先に挙げた計算式では、リングと周囲の雪との摩擦を無視している。そこで、雪とリングの摩擦が測定結果に与える影響の検証を行った。試験場所は北海道三国峠(標高 1150m)、試験日は2010年4月25日である。まず、周囲の雪を取り除かずに測定(図-2に示した通常の測定方法)。次に摩擦が生じないように、ベーン周囲の雪を取り除いて測定。これを交互に25回繰り返し、それぞれの平均値を比較した。積雪密度 0.09g/cm^3 、及び 0.26g/cm^3 で測定した結果を図-4に示す。グラフのエラーバーは $\pm 1\sigma$ (標準偏差) を表している。この測定の結果、いずれの密度においても摩擦による影響は見られなかった。したがって図-3に示した、リング付きベーンで測定した値がシアフレームより大きく出ているのには摩擦によるもの以外の別な理由があることになるため今後検証して行きたい。

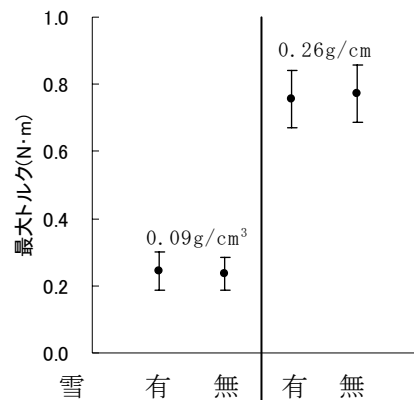


図-4 リング周囲の雪による摩擦の影響。周囲の雪の有り無しにかかわらず、測定値は一定の値を示した。

5. リング付きベーンの有効性について

図-5は2009年1月30日にリング付きベーン、従来型ベーン、シアフレームの3つの器機で測定した積雪剪断強度を示したものである。観測場所は北見工業大学グラウンド、積雪深48cm、観測開始時(8:10)の気温は -5.4°C であった。

この時、0cm地点(地表面)の温度は 0.1°C であり、0cm-6cmまでざらめ雪層が見られた。グラフを見ると上層部は全ての測定器が深くなるほど剪断強度が強くなるという同じような傾向を示していることが判る。深部においてはシアフレーム(◇印、点線)とリング付きベーン(□印、実線)が底部になると剪断強度の測定値が小さくなるのに対し、従来型ベーン(×印、破線)のみ測定深が深いほど剪断強度が強く出ている。これは地表面温度が 0°C 付近にあり、地面と積雪の結合力が弱いことが原因と思われる。

シアフレーム及びリング付きベーンは、先に「2. 2リング付きベーンの特徴」で述べたように器機の底面のみで剪断強度を測定することが可能である。このため地表面付近の結合力の弱い層を測定できたのに対し、従来型ベーンは4cmの高さがあるため、比較的強度の大きいざらめ雪層(密度 0.38g/cm^3 、雪温 -0.4°C)を含めて測定されたと考えられる。

これらのことからわかるように、上層部のような明確な弱層が存在せず、均質な雪の場合は測定器による剪断強度に大きな違いは見られないが、当事例の地表面と積雪

の境界層のような薄い弱層を測定する場合、ベーン側面に生じる剪断力が測定結果に与える影響を無視することは出来ない。また雪崩予測の視点から考えると、側面の剪断を測定することにより値が大きく出てしまうという点においても問題がある。リング付きベーンは、シアフレームに近い測定結果を示し、かつ短時間で測定が出来ることから積雪の安定度評価に有効であると考えられる。本実験で測定に要した時間は、シアフレームが1測定層あたり約5分であるのに対し、ベーンは約3分であった(測定層を掘り出し形成する時間を除く)。試験実施に要する労力を考えるとこの時間差は小さくないと思われる。

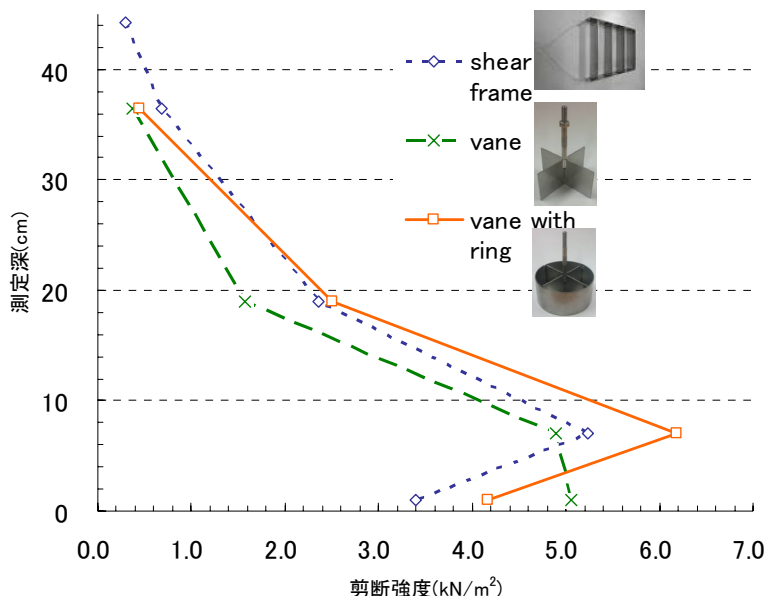


図-5 3種類の測定器により計測された剪断強度の垂直分布。
従来型ベーン(×印、破線)だけが底部の剪断強度が最も強く測定されていることから、側面の剪断が測定値に影響していることが考えられる。

6. まとめ

本研究では新しい積雪剪断強度測定器、「リング付きベーン試験器」を試作し、その有効性を実証した。リング付きベーン試験器は従来のベーン試験器の側面にリングを付けたものである。

リングを付けたことにより薄い1cm以下の弱層でも剪断強度の測定が可能になった。また、手振れが少なくなった。

リング付きベーン試験器とシアフレームにより測定された剪断強度の間には $R^2=0.85$ (データ数40)と高い相関が見られた。

リングと接触している積雪による摩擦が、測定値に影響を与えることはなかった。リング付きベーン試験器とシアフレームの測定値は良く似た傾向を示した。

【参考・引用文献】

- 1) 松澤勝・布施浩司・松下拓樹・横山博之, 2008: ベーン試験機による簡易な雪の剪断強度測定手法の開発. 寒地技術論文・報告集, 24, 415-418
- 2) 大場亜紀・高橋修平・日下稜・木下陽介, 2009: 各種ベーン試験器とシアフレームによる自然積雪の剪断強度測定. 寒地技術論文・報告集, 25, 119-121
- 3) 横山博之・松澤勝・松下拓樹・布施浩司・坂瀬修・吾田洋一, 2009: ベーンの回転速度と剪断強度およびプッシュゲージの直径と硬度の関係. 北海道の雪氷, 28, 81-84.