

ベーン試験器を用いた簡易な 積雪安定度調査手法の提案について

(独) 土木研究所寒地土木研究所 道央支所 ○布施 浩司
同 上 雪氷チーム 松澤 勝
同 上 雪氷チーム 松下 拓樹

積雪寒冷地の道路では、しばしば雪崩が発生し交通に障害を与えている。道路を維持管理する上で斜面積雪の安定度合いを定量的に把握することは重要であるが、積雪の剪断強度を測定する一般的方法（シアーフレーム試験¹⁾）は計測に手間と時間がかかるため、道路維持現場では使用されていない。そこで寒地土木研究所では簡単に雪の安定度を把握する方法として、土質試験のベーン試験器を参考にして、短い測定時間で積雪の剪断強度を測定出来る手法を開発しているその途中経過を報告する。

キーワード：冬期維持管理、測定手法、積雪の剪断強度、雪崩

1. はじめに

積雪寒冷地の国道において、雪崩が発生したり発生することが予想される場合、通行止めとなることがある。

その解除に際し、道路管理者は「道路防災ドクター」を呼び、各種の助言や指導を受けながら通行止め解除の時期を決定している²⁾。

雪崩は斜面上の雪が斜面を滑り落ちようとする力（動力）が、斜面の雪崩に対する抵抗力（支持力）を上回った時に発生する³⁾（図-1）。

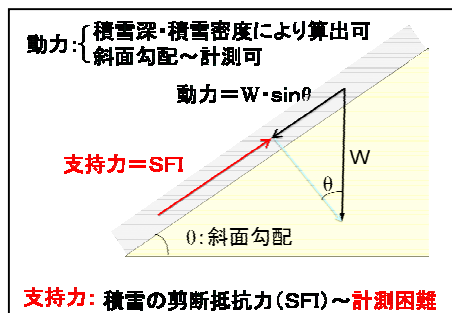


図-1 雪崩発生メカニズム

積雪の安定度：S I（Stability Index）は、式（1）で計算される。ここでS F Iは Shear Flame Index と呼ばれシアーフレーム試験器を用いて測定した積雪の剪断強度の事を言う。

$$S I = S F I / W \cdot \sin \theta \quad \dots \text{式 (1)}$$

Wは鉛直積雪荷重、θは斜面勾配であり、アメリカやカナダではS I = 2～4で警戒、S I = 1.5を雪崩発生予測基準としている¹⁾。

式（1）の雪崩の動力（ $W \cdot \sin \theta$ ）は、すべり面から上の積雪深と密度を計測することにより容易に把握できるが、雪崩の支持力（S F I）の測定は、シアーフレームを用いた測定では計測に手間と時間がかかるので道路維持の現場では行われていない。

そのため、雪氷関係の道路防災ドクターは現地の雪を実際に見たり、指で押したりする「感覚的な評価手法」で積雪の剪断強度を推定しているのが実態である。

このため、道路雪崩における斜面積雪の安定度評価のためには、短時間で積雪の剪断強度を計測する手法の開発が必要とされてきた。

ここで、雪崩には弱層（厚さ1cm前後の非常にもろい層）を伴う雪崩と伴わない雪崩があり、近年の北海道では多量降雪時やその直後に、明確な弱層のない雪崩が多発しており問題となっている⁴⁾。明確な弱層を伴わない雪崩では、かつて栗山らが開発していた土質試験で使用するベーン試験器を応用した試験器⁵⁾が有用であると考えられる。

ただし、ベーン試験器による積雪の剪断強度測定では明確な弱層を伴わない最近の北海道のような雪崩発生では有用であるが、弱層があることの多い本州の雪崩では適用が難しかったと思われ、このことが、今までベーン試験器による計測方法が一般的になってこなかった原因と考えている。

以上の現場における斜面積雪の剪断強度把握の現状をふまえ、著者らは北海道の道路維持現場での実用化を想定し、「ベーン試験器による積雪の剪断強度測定実験」を平成19年度から行っている。現在器具の改良および検証実験を実施しており、道路維持現場での実用も間違いなく考えているので、現在までの検証結果を報告する。

2. 試験概要

(1) 試験時の条件

積雪の剪断強度について、ベーン試験器による測定とシアーフレーム試験器による測定の比較試験を行った。比較試験は、札幌市にある寒地土木研究所の構内（写真－1）における降雪後2日以内の自然積雪（屋外試験）と、山形県新庄市の防災科学技術研究所の低温実験室（写真－2）における人工雪（室内試験）の2条件で行った。表－1に測定対象とした積雪の雪質と密度を示す。



写真－1 屋外試験箇所（寒地土木研究所・札幌）



写真－2 室内試験箇所（防災科学技術研究所・新庄）

表－1 測定した積雪の雪質と密度

	測定日	雪質	密度 (kg/m^3)
屋外試験	2008年1月22日	こしまり、しまり	127.4～162.7
	2008年1月25日	新雪	61.9～96.8
	2008年2月15日	新雪	74.8～137.3
	2008年2月26日	こしまり、しまり	118.3～244.6
	2008年2月28日	新雪 こしまり	112.2～180.0
屋内試験	2008年6月19日	新雪（人工雪）	49.2～58.8
	2008年6月20日	新雪（人工雪）	65.5～82.1

(2) シアーフレーム試験器

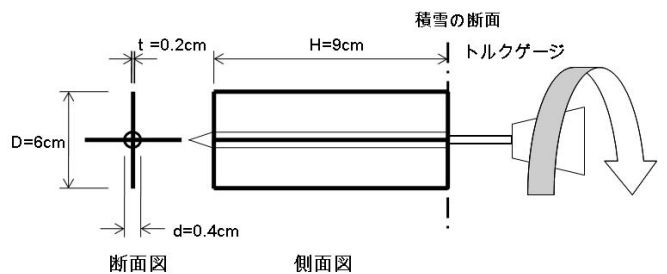
シアーフレームは、屋外試験時に剪断面積 248.2cm^2 （チタン製）および剪断面積 248.0cm^2 （ステンレス製）の試験器を用いた。また室内試験時は剪断面積 251.0cm^2 （チタン製）の試験器を用いた。（写真－3参照）



写真－3 シアーフレーム試験器

(3) 試作したベーン試験器の仕様

ベーンは、 $3 \times 9\text{cm}$ の羽根4枚で構成される（図－2）。羽根の縦横比については、栗山らの既往研究⁵⁾⁶⁾に習った。羽根の厚さは 0.2cm 、軸の太さは直径 0.4cm で、材質はステンレスである。このベーンはアタッチメントを介してデジタルトルクゲージに接続した（写真－4）。なお、回転軸がぶれないように金具の先端に突起を付けた。



図－2 ベーン試験機模式図



写真－4 ベーン試験器の外観

(4)試験方法について

a) シアーフレームによる積雪の剪断強度測定

フレームの端部には、張力計で引っ張るためのワイヤーが取り付けられている。測定では注目する積雪をフレームの高さより僅か厚く残して取り去り、フレームを測ろうとする積雪の少し上まで差し込んで、剪断破壊が3秒以内に起こるような速度でフレームを引っ張り（写真-5～写真-8、図-3参照）、そのときの力の最大値（N）をフレーム断面積（ m^2 ）で除した値を剪断強度（Pa）とした。

測定は、計測する測定層1箇所あたり5回測定（異常値があった場合は測り直し）して平均をとった。



写真-5 ①測定層を掘り出し整形する



写真-6 ②測定層にシアーフレームを設置する



写真-7 ③シアーフレームの周りの雪を取り除く



写真-8 ④デジタルフォースゲージによりシアーフレームを引っ張り剪断させ、その最大値を読み取る。

b) ベーン試験器による測定方法について

今回の測定で用いたベーン試験器は、2章(3)節で述べたように、デジタルトルクゲージの先端にベーンをとりつけたもので、積雪に水平にベーン部分を差し込み、ベーンを回転させたときの最大トルク値を読み取るものである（写真-9～写真-12）。

このベーンを用いた5回以上の測定結果の平均値を測定層1箇所あたりの測定値として採用した。なお、測定値の比較のため、挿入するベーンの軸高さと、シアーフレームの剪断面高さを同じにした（図-3参照）。



写真-9 ①測定層の選定



写真-10 ②ベーンを差し込む



写真-11 ③ベーンを回転させる



写真-12 ④トルク値を読み取る

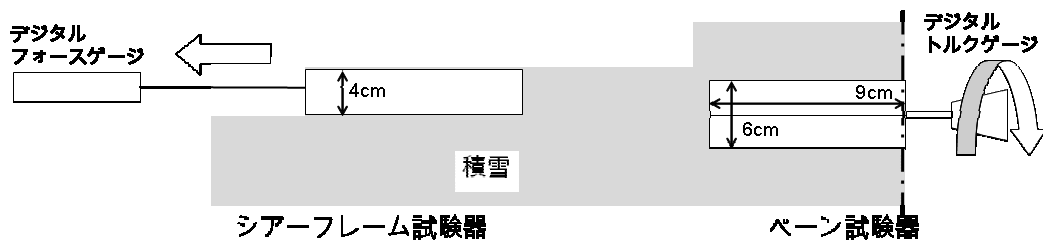


図-3 剪断強度の測定方法の模式図

(5) ベーンによる積雪の剪断強度の求め方

ベーン試験器による積雪の剪断強度は、トルク値 T をもとに式(2)から算出する⁵⁾。

$$\sigma_v = T / \pi \left(\frac{D^2 H}{2} + \frac{D^3}{6} - \frac{d^3}{12} \right) \dots (2)$$

ただし、 D はベーン幅 (m)、 H はベーン高さ (m)、 d は軸の直径 (m) で、 σ_v は剪断強度 (Pa) である。

(2) ベーン試験とシアーフレーム試験の測定時間比較

表-2は、室内試験でベーン試験とシアーフレーム試験を行ったときのロット数に対する測定時間を表している。測定時間には測定面の掘り出しなどの準備時間が含まれており、測定の作業人数は3~4人で行った。その結果、シアーフレームの測定時間は1ロットあたり約2分(120秒)であった。

一方、ベーン試験器による測定時間は1ロットあたり約30秒であった。

4. 試験結果

(1) シアーフレーム試験値とベーン試験値との相関

図-4にシアーフレーム試験器とベーン試験器による積雪の剪断強度の測定結果の比較を示す。

今回測定したデータ数は屋外試験の測定層12箇所、室内試験での測定層6箇所、合わせて計18箇所であり、それぞれについて比較を行った。

シアーフレーム試験器とベーン試験器による積雪の剪断強度を比較したところ、ほぼ等値線付近に分布し、相関係数は0.922となった。特に、人工雪の室内試験の測定では、両者の計測値がほぼ等値線上に分布しており、ベーン試験器による剪断強度はシアーフレーム試験器による剪断強度とほぼ同じ値が得られることが分かる。

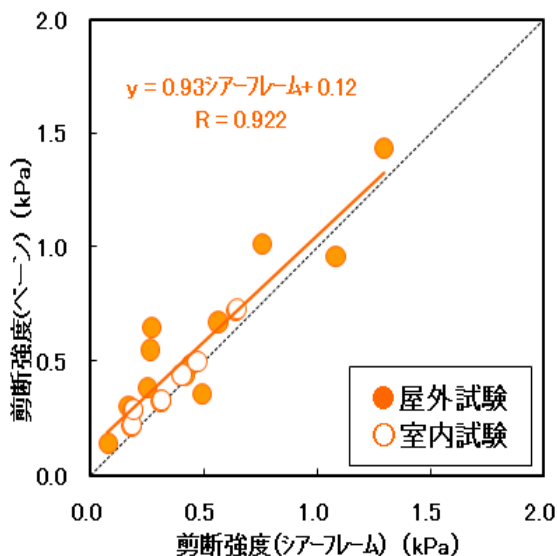


図-4 ベーンとシアーフレームによる剪断強度の比較 (図中の太実線は回帰直線、Rは相関係数)

表-2 室内試験における測定時間の比較

シアーフレーム試験器の測定時間			
測定日	測定時間	総ロット数	1ロット当たり測定時間
2008/6/17 9:00~10:50	1:50	71	0:01:33
2008/6/17 13:00~14:10	1:10	28	0:02:30
2008/6/17 15:00~17:00	2:00	66	0:01:49
2008/6/18 9:00~10:50	1:50	34	0:03:14
2008/6/18 13:00~14:00	1:00	21	0:02:51
2008/6/19 9:00~11:00	2:00	75	0:01:36
2008/6/19 14:30~16:20	1:30	75	0:01:12
2008/6/20 8:50~11:15	1:25	64	0:01:20
2008/6/20 13:00~15:00	2:00	58	0:02:04
平均時間			0:02:01
ベーン試験器の測定時間			
測定日	測定時間	総ロット数	1ロット当たり測定時間
2008/6/19 14:30~16:20	0:10	21	0:00:29
2008/6/20 8:50~11:15	0:30	60	0:00:30

(3) シアーフレームとベーン試験器との計測誤差の対比

表-3はベーン試験器による剪断強度の計測を行った密度 65.5, 71.6, 82.1kg/m³の3種類の積雪条件で各5回ずつ測定した、シアーフレーム試験の剪断強度の測定値と、平均値からの差をパーセントで示している。表-3より、各測定値は平均値の-15%~+15%の範囲内にあることが示された。また、このときの標準偏差は0.028~0.064であった。

表-4は、ベーン試験器による計測値（測定者別・密度別）である。これは異なる測定者（男性3名、女性1名）が、各5回ずつ測定した剪断強度と、平均値からの差をパーセントで示している。また、このときの標準偏差は0.028~0.048であった。

表-4より、測定における個人差は、今回の試験では-11%~+12%の範囲内にあることが示された。測定者別の結果では、密度の違いにかかわらず、男性1と男性2が+2%~+12%と大きめの値になっているのに対し、男性3と女性1が-11%~-1%と小さめの値になっている。

表-3 シアーフレーム試験器による測定値（密度別）

シアーフレーム試験器による測定(密度65.5kg/m ³)							
測定回数	1	2	3	4	5	平均値	標準偏差
測定値(Pa)	0.29	0.27	0.32	0.30	0.36	0.31	0.028
各平均値/ 全体平均値 (%)	95	88	104	98	115		
シアーフレーム試験器による測定(密度71.6kg/m ³)							
測定回数	1	2	3	4	5	平均値	標準偏差
測定値(Pa)	0.51	0.49	0.46	0.45	0.43	0.47	0.028
各平均値/ 全体平均値 (%)	109	104	99	96	92		
シアーフレーム試験器による測定(密度82.1kg/m ³)							
測定回数	1	2	3	4	5	平均値	標準偏差
測定値(Pa)	0.71	0.60	0.65	0.55	0.72	0.64	0.064
各平均値/ 全体平均値 (%)	110	93	101	85	111		

表-4 ベーン試験器による測定値（測定者別・密度別）

ベーン試験器による測定(密度65.5kg/m ³)						
被験者	男性1	男性2	男性3	女性1	平均値	標準偏差
剪断強度 (Pa)	0.426	0.328	0.357	0.349	0.331	0.028
	0.347	0.299	0.267	0.230		
	0.380	0.323	0.338	0.236		
	0.310	0.426	0.320	0.312		
各平均値/ 全体平均値 (%)	112	103	97	89		
ベーン試験器による測定(密度71.6kg/m ³)						
被験者	男性1	男性2	男性3	女性1	平均値	標準偏差
剪断強度 (Pa)	0.700	0.455	0.468	0.529	0.501	0.033
	0.513	0.446	0.444	0.594		
	0.470	0.523	0.444	0.500		
	0.600	0.579	0.441	0.426		
各平均値/ 全体平均値 (%)	109	102	91	99		
ベーン試験器による測定(密度82.1kg/m ³)						
被験者	男性1	男性2	男性3	女性1	平均値	標準偏差
剪断強度 (Pa)	0.724	0.785	0.804	0.639	0.728	0.048
	0.717	0.692	0.762	0.684		
	0.772	0.883	0.631	0.669		
	0.833	0.898	0.642	0.685		
各平均値/ 全体平均値 (%)	104	109	96	92		

(4)ベーン試験器の強度について

今回試験に使用したベーン試験器による剪断強度測定は、新雪およびこしまり雪での測定には問題がなかったが、密度244.6kg/m³のしまり雪の測定を行う際にアタッチメント部分が損壊し、測定不能に陥る状況となった。

4. 考察

(1)シアーフレーム試験値とベーン試験値との相関

シアーフレーム試験器とベーン試験器による剪断強度の測定値を比較したところ両者の値は等値線付近に分布し、相関係数0.922と非常に強い相関が得られたので、ベーン試験器はシアーフレーム試験器と同等の積雪の剪断強度の測定が可能と判断できる。

(2)ベーン試験とシアーフレーム試験の測定時間比較

ベーン試験器による積雪の剪断強度測定はシアーフレーム試験に比べると1ロットあたり約120秒の測定時間が約30秒と、1/4の時間で済むので、ベーン試験器の活用により雪の剪断強度の測定時間を大幅に短縮できると言える。

(3)シアーフレームとベーン試験器との計測誤差の対比

ベーン試験器の測定者と計測値との関係では、被験者の違いにより、±10%程度の測定差がでている。これは、測定者のベーン回転速度が影響しているのではないかと考えられる。

栗山らは、ベーン剪断試験の特徴である積雪の剪断強度の簡易計測の精度を向上させるために、これまでの手動測定に変わる、簡単なベーンの低速回転装置の開発が必要であると記している^{5) 6)}。しかし、シアーフレームにおいても測定者の個人差は指摘されている⁷⁾。また、今回の試験ではシアーフレーム試験器による測定標準偏差が0.028~0.064であったのに対し、ベーン試験器による測定標準偏差が0.028~0.048とほとんど同じになった。以上のことから、計測誤差の面でも、人力によるベーン測定がシアーフレームによる測定に比べて劣ることはないと考えられる。

また、ベーンによる計測では、ベーンを手動で回すことにより積雪の剪断強さが手に感覚として伝わってくる。道路の通行規制の判断は最終的には人間が行うので、積雪の剪断強さを手の感覚で知ることが出来ることは、道路の維持管理上大きなメリットと考えられる。

今回の実験で、ベーン試験器による計測誤差がシアーフレームによる計測誤差程度以内であることが確認されたので、ベーン試験器による積雪の剪断強度測定では、定速回転装置を使わなくても、手動による測定で十分制度を確保できると考えられる。

今後の実用に向けてベーン試験器の回転速度については、早い速度（例えば1秒程度）や遅い速度（例えば3

秒程度)で回転させるなどの実験を実施し、個人差を抑えた計測方法の提案も行っていきたいと考えている。

(4)ベーン試験器の強度について

ベーン試験器の強度については、今回の実験ではしまり雪の計測で破損した。しかし、本試験器は道路斜面における雪崩の発生に影響がある多量降雪直後の積雪層を対象として開発しており、しまり雪の計測を対象としていない。そのため、現地での積雪安定度の把握における強度上の問題は無いと考えられる。

ただし、道路維持の現場では計測器具の耐久性も求められるので、器具の耐久性も考慮した改良を行っていきたいと考えている。

(5)道路管理上での利用に向けた今後の課題

ベーン試験器による積雪の剪断強度を求めるに際しては、そのトルク値から換算式を用いて積雪の剪断強度を求めている。しかし道路維持現場で剪断強度の換算を行うのは煩雑であるため、読み取り値のみで判断できる方が望ましい。そのためには、積雪におけるベーン試験器具の形状寸法を確定することが必要となる。

このことを実現することによりベーン試験器による積雪の剪断強度測定は、北海道の道路維持管理において、有用な測定手法に成り得ると考えている。

5. おわりに

ベーン試験器による積雪の剪断強度の測定は、短時間で簡単に測定でき、シアフレームとほぼ同等の計測結果が得られるので、短時間に大量の降雪があり、明確な弱層が見られない事が多い北海道の道路維持現場では有用な試験方法と考えている。

寒地土木研究所・雪氷チームと道央支所では、平成22年度の道路維持現場での実用化を目指し、試験器具の耐久性の向上を目指した改良と、現地検証試験を続けている(図-5参照)。今後は道路実斜面での検証実験も予定しているので、関係各位については、今後のご協力をよろしくお願いしたい。

謝辞: 検証試験における人工雪の計測では防災科学技術研究所の阿部修博士と望月重人博士にご協力いただきました。ここに記して感謝いたします。

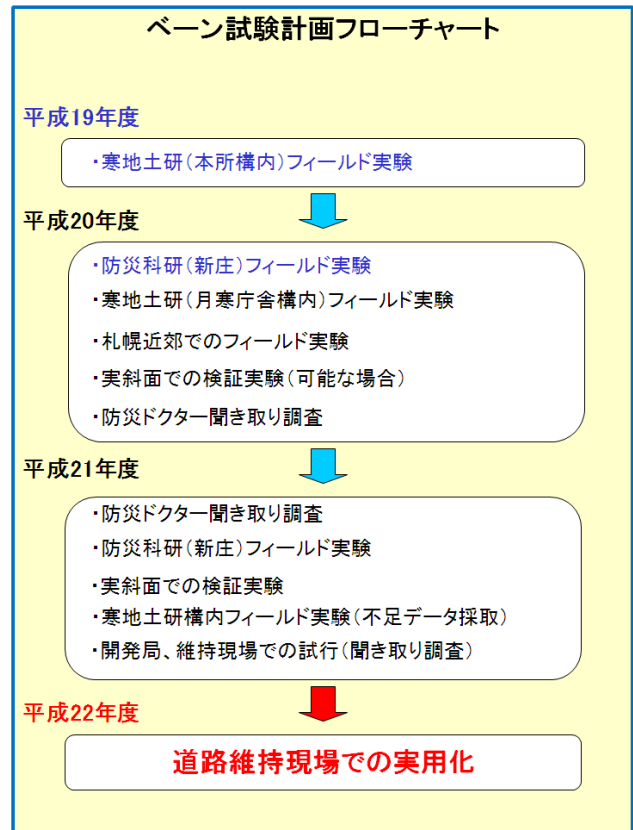


図-5 ベーン試験器の実用化に向けた研究計画

参考文献

- 1) 日本雪氷学会北海道支部(1991): 雪氷調査法, P59, P53
- 2) 伊藤清治(2002): 北の交差点 vol.11 SPRING・SUMMER 2002, pp. 58-59.
- 3) (社) 日本建設機械化協会: 新編防雪工学ハンドブック(1988), P78
- 4) 松下拓樹, 松澤勝, 伊東靖彦, 加治屋安彦(2008): 斜面積雪が雪崩予防柵面をすり抜ける現象の発生条件, 寒地土木研究所月報, 665, pp. 10-17.
- 5) 栗山弘(1984): 雪のベーン剪断強度(1), 雪氷, 46, pp. 101-108.
- 6) 栗山弘, 伊藤広(1986): 雪のベーン剪断強度(2), 雪氷, 48, pp. 133-140.
- 7) Perla R. and Beck T.M. (1983): Instrument and method - experience with shear frames, J. Glaciology, pp. 103, pp. 485-491.