

せん断速度制御装置による雪のせん断強度の測定

研究代表者 上之 和人¹⁾
研究分担者 秋山 一弥¹⁾
研究分担者 原田 裕介¹⁾
研究分担者 河島 克久²⁾

1) 国立研究開発法人 土木研究所 2) 新潟大学災害・復興科学研究所

研究要旨

積雪安定度評価の精度向上のために、土の一面せん断試験と同様にせん断速度を制御できる装置を用い、低温室に保存しておいた乾きしまり雪を対象に、上載荷重やせん断速度および待機時間に対するせん断強度を評価した。その結果、せん断強度は、臨界垂直応力より小さいと垂直応力にほとんど依存せず、臨界垂直応力を超えると垂直応力とともに増加する傾向にあった。また、せん断強度はせん断速度が小さいほど大きく、待機時間が長いほど大きくなった。これらの結果から、乾きしまり雪の粘着力や内部摩擦角は、せん断速度や待機時間に依存することが明らかになった。

A. 研究目的

雪崩災害箇所の積雪の安定度を評価するために、通常、上載積雪を取り除き張力計を取り付けたシアーフレームを用いた弱層のせん断破壊テストが行われる。このため、シアーフレームテストでは上載荷重のせん断強度への影響は考慮されていない。またシアーフレームの引っ張り速度は破壊が3秒以内に起こるような速度と規定されているが、人の手によりシアーフレームを引っ張るためせん断速度は一定でなく破壊時間にバラツキが生じる。したがって、測定者によってせん断強度の値のバラツキが大きく、積雪安定度の値のバラツキの原因となる。本研究では、積雪安定度評価の精度向上のために、土の一面せん断試験と同様にせん断速度を制御できる装置を用い、せん断強度の上載荷重やせん断速度および待機時間に対する依存性を明らかにすることを目的とする。

B. 研究方法

図1は開発したせん断強度測定装置を示す。デジタルフォースゲージはUSBケーブルを介してノートPCに接続され、ノートPC上でせん断速度を

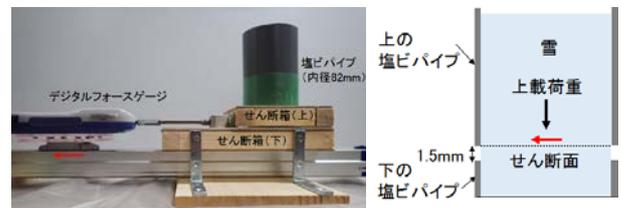


図1 せん断強度測定装置

設定すると、デジタルフォースゲージの下の架台は一定速度で矢印方向に動く。実験手順は以下の通りである。

- 1) 内径 82mm の塩ビパイプの中が空のとき、デジタルフォースゲージを用いて上のせん断箱を下のせん断箱に対して一定速度で引っ張ったときの摩擦力を測定する。
- 2) 低温室に保存しておいた雪温が約 -6°C の乾きしまり雪を、電子天秤ばかりに載せた容器に、メッシュ 2mm の金網でほぐしながら指定した質量になるまで入れる (図2)。このほぐした雪を塩ビパイプの中へすばやく掻き落とし詰める。詰める雪の質量は 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6kg の 6 通りとした。上と下のせん断箱に固定した塩ビパイプはお互いの接触を避けた

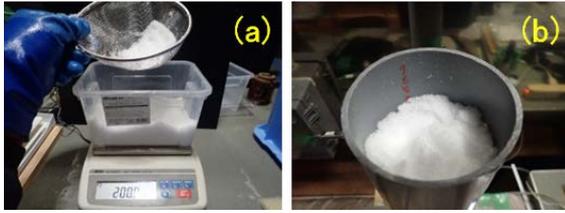


図 2 (a)金網でほぐした雪、(b)塩ビパイプに詰め
た雪

め 1.5mm の隙間をつけた (図 1)。せん断面より上の雪の荷重を測定し塩ビパイプの断面積で除したものを垂直応力とする。別途、角型密度サンプラーを用いてほぐしたしまり雪の密度を測定すると、210~260kg/m³であった。

- 3) 下の固定したせん断箱に対して上のせん断箱を一定速度で引っ張ることによって、塩ビパイプの中の雪をせん断破壊させる。デジタルフォースゲージで計測したせん断力の時系列データはノート PC に保存され、せん断力の最大値から 1) の摩擦力を差し引いた力を塩ビパイプの断面積で除することによってせん断強度を評価した。せん断速度は 10⁻⁵、10⁻⁴、10⁻³、10⁻²m/s の 4 通りとした。
- 4) ほぐした雪の氷粒同士の焼結による結合の発達具合が経過時間によって異なる可能性があるため、塩ビパイプに雪を詰めてから 3 分間待機 (以下待機時間と呼ぶ) した後に上のせん断箱を引っ張ることにした。せん断強度の待機時間の影響を見るために、待機時間が 600、1200、1800、3600s に対しても同様の測定を行った。

C. 研究結果

図 3 は、同じ垂直応力 $\sigma = 657\text{Pa}$ と異なるせん断速度 V に対するせん断力の時系列の一例を示す。 $V=10^{-5}\text{m/s}$ のとき、塑性変形するのみで破壊に至らなかった (図 3(a))。 $V=10^{-4}$ 、 10^{-3} 、 10^{-2}m/s のとき、せん断力の最大値はそれぞれ 29N、14N、13N であり、破壊時間はそれぞれ 29s、1.4s、0.1s (赤矢印) であった。せん断速度が増加すると破壊時間は短くせん断強度は小さくなった。

(1) せん断強度と垂直応力の関係

図 4 は、せん断速度 10⁻⁴、10⁻³、10⁻²m/s に対するせん断強度 τ と垂直応力 σ の関係を示し、およそ次式で表せる。

$$\tau = \begin{cases} c & (\sigma < \sigma_c) \\ \tan\phi \times \sigma & (\sigma \geq \sigma_c) \end{cases} \quad (1)$$

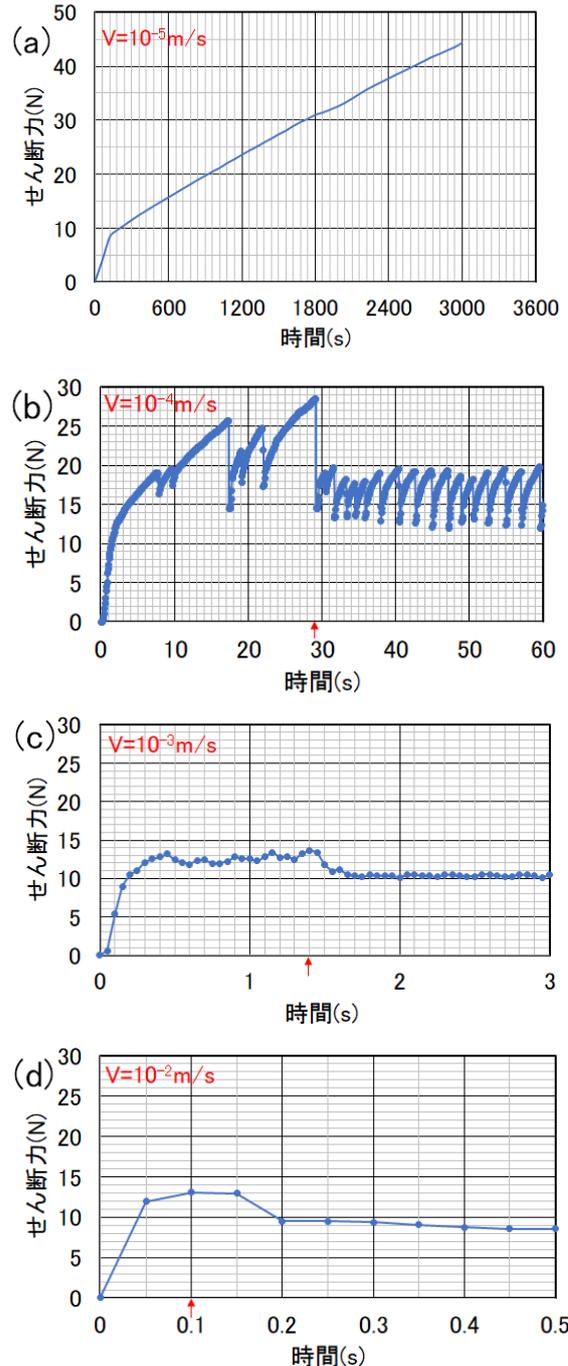


図 3 異なるせん断速度 V に対するせん断力の
時系列

ここで c と ϕ は、それぞれ雪の粘着力と内部摩擦角である。何れのせん断速度に対しても $\sigma_c = 500\text{Pa}$ (以下臨界垂直応力と呼ぶ) までは τ は σ にほとんど依存せず、 σ_c を超えると τ は σ とともに増加する傾向にある。 ϕ はせん断速度が小さいほど大きい。

(2) せん断強度とせん断速度の関係

図 5 は、異なる垂直応力に対するせん断強度 τ とせん断速度 V の関係を示し、およそ次式で表せる。

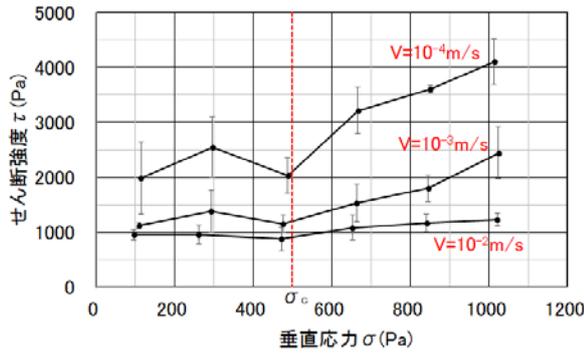


図 4 せん断強度と垂直応力の関係

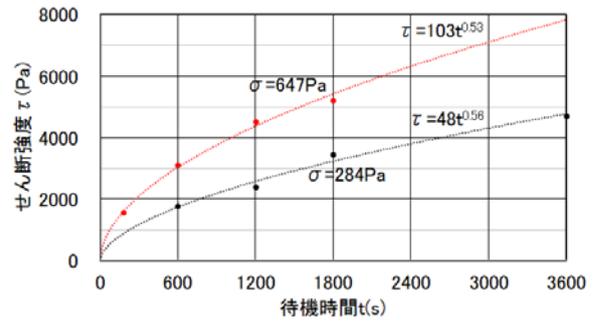


図 6 せん断強度と待機時間の関係

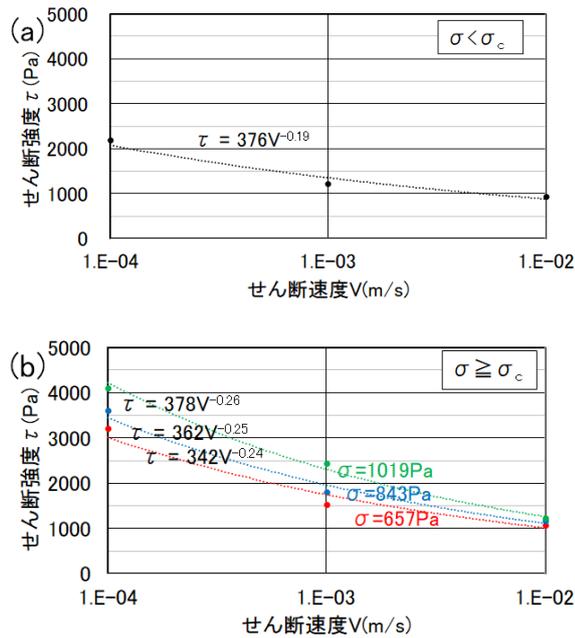


図 5 せん断強度とせん断速度の関係

(a) $\sigma < \sigma_c$ 、(b) $\sigma \geq \sigma_c$

$$\tau = A_1(\sigma)V^\alpha \quad (2)$$

ここで、 $\sigma < \sigma_c$ のとき、 $A_1(\sigma)$ は垂直応力 σ に依存せず、 $\alpha = 0.19$ 、 $\sigma \geq \sigma_c$ のとき、 $A_1(\sigma)$ は σ に依存し、 α の平均値は0.25である。

(3)せん断強度と待機時間の関係

図 6 は、せん断速度が 10^{-3}m/s のとき、異なる垂直応力に対するせん断強度 τ と待機時間 t の関係を示し、およそ次式で表せる。

$$\tau = A_2(\sigma)t^\beta \quad (3)$$

ここで、 $A_2(\sigma)$ は垂直応力 σ に依存する関数、 β の平均値は0.55である。せん断強度は待機時間が長いほど大きくなる。

D. 考察

式(1)、(2)、(3)を同時に満たす関係式として、

$$\tau = \begin{cases} c & (\sigma < \sigma_c) \\ \tan\phi \times \sigma & (\sigma \geq \sigma_c) \end{cases}$$

$$c = 17V^{-0.19}t^{0.55}$$

$$\tan\phi = 0.025V^{-0.25}t^{0.55}$$

が最適である。乾きしまり雪の粘着力 c や内部摩擦角 ϕ は、砂 ($\alpha = \beta = 0$) とは異なり、せん断速度や待機時間に依存する。

E. 結論

せん断強度測定装置を開発し、雪のせん断力の時間変化から破壊に至るまでの過程や破壊時間など、シアーフレームテストでは得られないデータが取得可能になった。雪温や粒径、密度がほぼ一定の乾きしまり雪に対するせん断強度の特性として以下のことが明らかになった。

- 1) せん断強度は、臨界垂直応力より小さいと垂直応力にほとんど依存せず、臨界垂直応力を超えると垂直応力とともに増加する。
 - 2) せん断速度が増加すると破壊に至るまでの時間が短くなることから、焼結による雪粒同士の結合が発達せずせん断強度は減少する。
 - 3) 待機時間が長い場合は焼結による雪粒同士の結合が発達するため、せん断強度は増加する。
- 以上の1)、2)、3)の特性を同時に満たすせん断強度の実験式を提示し、雪の粘着力や内部摩擦角は砂とは異なり、せん断速度や待機時間に依存することが明らかになった。

F. 研究発表

上之和人, 秋山一弥, 原田裕介, 河島克久:雪のせん断強度の特性, 雪氷学会北信越支部研究発表会, 2019年6月1日, 長岡技術科学大学