

論 文

湿潤高密度積雪の引張破壊強度の密度・含水率依存性

栗原 靖¹⁾*,**, 河島克久²⁾, 和泉 薫²⁾

要 旨

2004 年 8 月 1 日に荒沢岳 (新潟県) において 4 名が死傷する雪渓崩落災害が発生した。災害直後に行われた現地調査から、雪渓の大規模崩壊は、融雪の進行に伴い雪渓底部に形成されたトンネルが片持ち梁構造となり、その固定端上部の積雪に引張破壊が生じて発生すると推定された。そこで、著者らは雪渓崩落災害の防止対策の確立に向けて、低温室において湿潤高密度積雪を用いた引張破壊実験を行い、引張破壊強度と密度・含水率との関係を調べた。本実験で用いた雪試料は濡れ密度 $510 \sim 855 \text{ kg m}^{-3}$ 、重量含水率 $0 \sim 16.1\%$ である。実験結果から、湿潤高密度積雪の引張破壊強度は、密度のみならず含水率にも依存することが示され、含水率一定のもとでは密度が大きいほど、密度一定のもとでは含水率が小さいほど引張破壊強度は大きいことがわかった。また、本実験で得られた含水率依存性を乾き雪の引張破壊強度を測定した既往研究の成果に加味することで、密度と含水率を考慮した湿潤高密度積雪の引張破壊強度の推定式を作成した。この推定式は実験結果を良好に再現しており、密度と含水率が与えられれば湿潤高密度積雪の引張破壊強度を推定できることが示された。

キーワード：湿潤高密度積雪 (フィルン)、引張破壊試験、引張破壊強度、片持ち梁構造、雪渓崩落災害
Key words: high-density wet snow (firn), tensile fracture test, tensile fracture strength, cantilever structure, collapse accident of snow patch

1. はじめに

2004 年 8 月 1 日に新潟県の荒沢岳西本城沢において 4 名が死傷する雪渓崩落災害が発生した。この災害を受けて、著者らは、災害発生 2 日後に現地調査を実施した (河島ら, 2009)。その結果、雪渓の大規模崩壊は、融雪の進行に伴い雪渓底部にトンネル状の空洞が形成され、これが拡大することによって、トンネル上部の積雪の一部が片持ち梁構造となり、固定端 (梁の付け根) 上部の積雪において引張破壊が生じたことにより発生したと

推定された。なお、崩壊した雪塊は水を含んだ高密度積雪であり、その濡れ密度は $660 \sim 720 \text{ kg m}^{-3}$ 、重量含水率 (以降、単に「含水率」と呼ぶ) は $7 \sim 12\%$ であった。これらの結果は、雪渓の大規模崩壊の危険度を評価する上で、湿潤高密度積雪の引張破壊強度に関する知見が必要であることを示している。

積雪の引張破壊強度に関する研究は、これまで一軸定速度引張破壊試験や遠心法を用いた引張破壊試験により、主に乾いた積雪を対象として行われており、引張破壊強度の歪速度や雪温への依存性について報告されている (例えば, Keeler and Weeks, 1967; Keeler, 1969; Martinelli, 1971; Sommerfeld, 1971, 1974; McClung, 1979; Narita, 1980, 1983)。また、Mellor (1975) は、過去に測定された新雪から氷にいたるまでの幅広い密度領域の一軸引張破壊強度の測定結果を取りまとめている。これらの

1) 新潟大学大学院自然科学研究科

〒950-2181 新潟市西区五十嵐 2 の町 8050

2) 新潟大学災害・復興科学研究所

〒950-2181 新潟市西区五十嵐 2 の町 8050

* 連絡先

** 現在: (公財) 鉄道総合技術研究所防災技術研究部

〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38

一連の研究を受けて, 前野・福田 (1986) は, 乾き雪の引張破壊強度は密度の増加とともに大きくなり, 破壊強度の密度依存性は雪粒子の機械的充填による限界密度 (約 550 kg m^{-3}) を境にして異なると述べている.

一方, 湿潤積雪の引張破壊強度を対象とした研究は, 乾き雪に比べて極めて少なく, 遠心法によって湿潤積雪 (濡れ密度 $115 \sim 468 \text{ kg m}^{-3}$, 含水率 24% 以下) の引張破壊強度を測定した渡邊 (1983) の研究が唯一である. 渡邊 (1983) は, 湿潤積雪の引張破壊強度は密度のみならず含水率にも依存し, 含水率が高くなるほど引張破壊強度が低下することを示している. また, 湿潤積雪の密度と含水率から乾き密度を求め, これと引張破壊強度の関係を調べた. その結果, 含水率が一樣でないため, データにばらつきがあるものの, 両者には比較的良好な関係がみられたことから, 湿潤積雪の引張破壊強度を乾き密度のべき関数として表現した. しかし, 渡邊 (1983) が対象とした密度領域は雪粒子の機械的充填による限界密度よりも小さい領域のものであり, 消耗期における多年性雪渓の積雪の濡れ密度が $600 \sim 900 \text{ kg m}^{-3}$ 程度ある (例えば Kawashima, 1997) ことを考えると, 本研究で扱う雪渓崩壊現象へ適用することはできない.

以上の背景に基づき, 本研究では, 雪渓崩壊の危険度評価方法の確立に向けて, 湿潤高密度積雪の引張破壊強度を実験的に明らかにするとともに, 引張破壊強度と密度・含水率との関係を解析した.

2. 実験方法

本実験は, 湿潤積雪を扱っており, 雪試料の凍結・融解をできるだけ避けるため, $0 \sim 1^\circ\text{C}$ に調節された低温室内で行った. なお, 既述の通り, これまで多くの研究者によって一軸定速度引張破壊試験や遠心法によって引張破壊強度が求められてきた. しかし, 一軸試験では雪試料を試験装置に凍着させる必要があることや, 遠心力を用いた手法では雪試料中の水が移動・排出してしまう恐れがあることのために, これらの方法を湿潤積雪に適用することは困難である. そこで, 本実験では, 雪試料を片持ち梁状に固定し, 梁の自由端部に荷重を加えることで引張破壊を生じさせ, 破壊強度

を求めることとした.

2.1 実験装置と方法

引張破壊実験に使用した装置の模式図を図 1 に示す. 本実験装置は, 直方体形状の雪試料を固定するための固定板, 雪試料に荷重を加えるための荷重板, 荷重板を鉛直下向きに定速度で引っ張るモーターとラックギア (モーターの回転運動を直線運動に変換するギア, オリエンタルモーター製, SPF86V90-15S), 引張荷重を測定するロードセル (共和電業製, LUR-A-2KNSA1), 動ひずみ測定器 (共和電業製, PCD-300A), およびデータ記録装置 (PC) から構成されている.

実験では, まず雪試料の片端を天板と固定板の間に挟み, 載荷中に雪試料が動かないようにボルトで固定する (図 2). 次に, 雪試料の自由端部付近 (片持ち梁の根元から 0.2 m の位置) に荷重板を載せ,

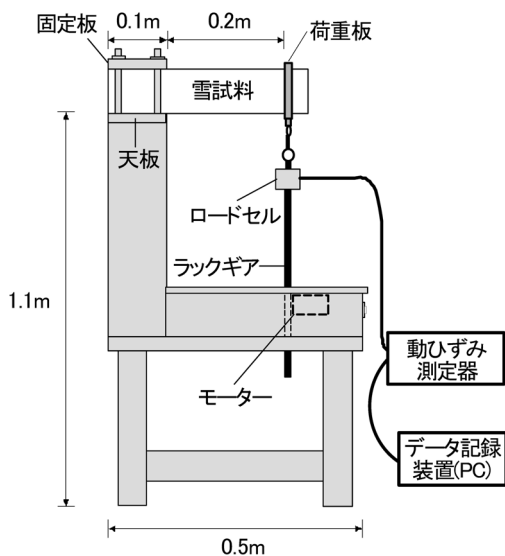


図 1 実験装置の模式図.

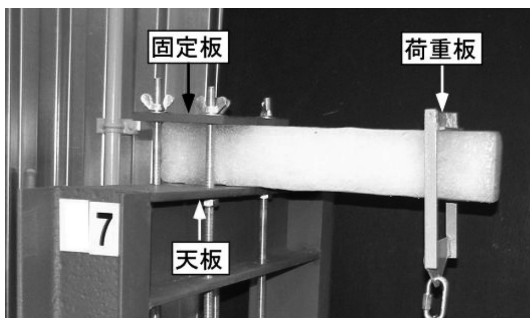


図 2 雪試料固定部の拡大図.

定速度 20 mm min^{-1} で鉛直下方へ引っ張ることに
よって雪試料の固定端で巨視的な引張破壊を生じ
させる。なお、引張速度 20 mm min^{-1} という値は、
試行錯誤の末に導いた値であり、 20 mm min^{-1} より
引張速度が遅い場合、巨視的な破壊を起こすも
のとはそうでないものがみられた。また、破壊に至
るまでに時間がかかり、実験中に雪試料の融解が
進行する恐れがあった。これらのことを踏まえ、
本実験では引張速度を 20 mm min^{-1} に設定した。

ロードセルで得られた電気信号は、動ひずみ測
定器を介して A/D 変換を行い PC に取り込み、
破壊発生時の引張荷重から引張破壊強度を算出し
た (引張破壊強度の計算方法は 2.4 節で述べる)。
実験中は、破壊時の状況を記録するため、ビデオ
カメラによる撮影を行った。

2.2 実験に用いた雪試料

本実験では、雪渓で観測される幅広い密度領域
の引張破壊強度を測定するため、2 種類の湿潤高
密度積雪を用いた。1 つは、荒沢岳西本城沢の雪
渓から切り出した積雪であり、もう 1 つは魚沼市
銀山平に人工的に貯雪された雪山から切り出した
積雪である。両者はともに 2007 年 7~8 月に採取
した。後者は冬期に降り積った雪を集め、これを
断熱シートで覆って 7 月まで野外で保存しておい
たものである。両者とも一辺約 0.4 m の立方体状
の雪塊に切り出した後、低温室へ運び込み、マイ
ナス温度の環境下で一時的保存した。そして、実験
前日から低温室の温度を 2°C まで徐々に上昇さ
せ、実験時に雪塊全体の雪温が 0°C の融解状態と
なるように制御した。この際、雪塊をプラス温度
の環境下にさらす時間を変えることで、異なる含
水率を有する雪塊を作成した。そして、実験開始
直前に雪塊の中から構造的に一樣な部分を目視に
よって選び、直方体形状 ($0.35 \text{ m} \times 0.1 \text{ m} \times 0.1 \text{ m}$
程度) の雪試料を切り出した。

2.3 密度・含水率の測定

雪試料の密度は、雪塊から切り出した直後に各
辺の長さを複数回測定し、それらの平均値から求
めた体積と雪試料の質量から算出した。この値が
破壊面の密度を代表し得るか否かを確認するた
め、実験終了直後に破壊面付近の雪試料を直方体
形状に切り出し、上記の方法で密度を算出した。
前者は雪試料全体の密度、後者は破壊面付近の密

度である。両者の密度を比較したところ、その差
は 10 kg m^{-3} 程度であったことから、本研究で
は、前者の値を雪試料の密度として用いることと
した。

雪試料の含水率については、実験終了直後に密
度を測定するために破壊面付近から切り出した直
方体形状の雪試料に対して、熱量式含水率計
(Kawashima *et al.*, 1998) を用いて複数回測定
し、その平均値を用いることとした。

2.4 引張破壊強度の算出方法

本実験のように片持ち梁状に固定された雪試料
が鉛直下方の荷重を受けた場合、雪試料の上部に
は引張応力、下部には圧縮応力が生じる。そして、
引張応力は雪試料の固定端最上部で、圧縮応力は
固定端最下部でそれぞれ最大となり、雪試料に生
じる両応力が破壊強度を上回ると破壊が生じる。
Mellor (1975) によると、本研究で対象とする高
密度積雪の引張破壊強度は、同密度の圧縮破壊強
度に比べて小さい。このことから、著者らは固定
端最上部において最初に引張破壊が生じると考
え、破壊時における固定端最上部の最大引張応力
を雪試料の引張破壊強度とみなした。以下に最大
引張応力の算出方法を示す。

雪試料に生じる引張応力 σ は、曲げモーメント
 M をその抵抗である断面係数 Z で除することで
求めることができる (たとえば、大島, 2002)。

$$\sigma = M / Z \quad (1)$$

固定端における曲げモーメント M (N m) は、図
3 に示すように、雪試料の梁の長さを l (m)、幅を
 b (m)、高さを h (m)、密度を ρ (kg m^{-3})、重力
加速度を g (m s^{-2})、荷重板の重さを W (N)、引

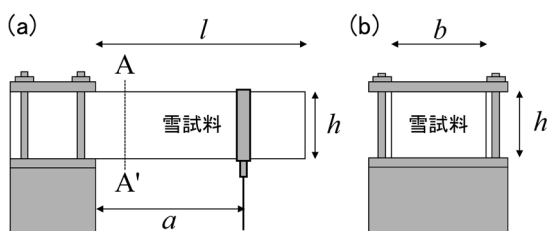


図 3 雪試料固定部の模式図。

(a) 固定部の側面図。

(b) A-A' 断面で切ったときの断面図。

張荷重を F (N), 荷重板と梁の根元までの長さを a (m) とすると,

$$M = (F + W)a + l^2 hb\rho g / 2 \quad (2)$$

で与えられる. 断面係数 Z (m^3) とは, 梁が曲げられようとするときに生じる抵抗であり, 断面形状によって決まる固有の数値である. 本実験で用いた雪試料のように直方体形状の場合, 断面は正方形断面もしくは長方形断面となり (図 3 (b)), 次式で表すことができる.

$$Z = bh^2 / 6 \quad (3)$$

式 (1)~(3) より引張応力 σ (Pa) は,

$$\sigma = \frac{6(F + W)a + 3l^2 hb\rho g}{bh^2} \quad (4)$$

となる. 本実験では, 式 (4) の F に破壊時の引張荷重の値を入れることによって最大引張応力を求めた.

3. 結果と考察

本実験では, 密度と含水率の異なる合計 25 個の雪試料を用いて実験を行った. 雪試料の濡れ密度は $510 \sim 855 \text{ kg m}^{-3}$ (乾き密度 $497 \sim 855 \text{ kg m}^{-3}$), 含水率は $0 \sim 16.1\%$ である. 以下に, 本実験で得られた結果と考察について述べる.

3.1 雪試料の破壊状況

図 4 に本実験で得られた代表的な引張荷重の時間変化を示す. 引張荷重は時間とともに増加し,

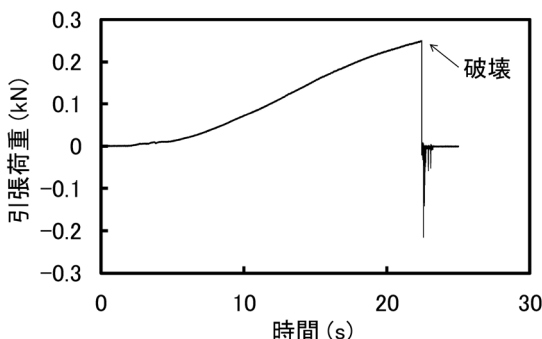


図 4 引張荷重の時間変化.

破壊直後に 0 に戻った. また, ビデオカメラで記録した映像から, 引張破壊は想定していた通り, 最初に固定端最上部から破壊が生じ, その後, 鉛直下方へ向かって破壊が進行していることが確認できた (図 5). 図 4 に示す引張荷重の時間変化に加えて, ビデオカメラおよび目視による破壊過程の観測から, 雪試料の破壊は固定端においてぜい性的に生じたことがわかった. 他の全ての事例についても上記と同様な破壊形式が確認された.

3.2 引張破壊強度と密度・含水率との関係

本実験で得られた引張破壊強度と乾き密度との関係および引張破壊強度と含水率との関係をそれぞれ図 6, 図 7 に示す. 実験に使用した雪試料の乾き密度・含水率領域が幅広いいため, 図 6 は含水率 (w) 3% ごと, 図 7 は乾き密度 (ρ_{dry}) 100 kg m^{-3} ごとにマーカーを変えて引張破壊強度を示した. 両図とも引張破壊強度にばらつきが見られるが, 含水率がほぼ等しい場合には乾き密度が大きいほど, また乾き密度がほぼ等しい場合には含水率が小さいほど, 引張破壊強度が大きくなる傾向が認められる.

ここで一例として, 乾き密度 702 kg m^{-3} , 含水率 1.2% の雪試料と乾き密度 702 kg m^{-3} , 含水率 12.3% の雪試料の引張破壊強度を比較したところ, 乾き密度が同一であるにも関わらず, 後者の引張破壊強度は, 前者の引張破壊強度の約 50% であった.

以上から, 湿潤高密度積雪の引張破壊強度についても, 渡邊 (1983) が指摘したように, 密度のみならず含水率に強く依存することが明らかになった.

同様な含水率依存性は, 湿潤積雪の圧縮破壊強度を測定した大前・若浜 (1980) や湿潤積雪のせん断破壊強度を測定した山野井・遠藤 (2002) でも確認されており, いずれの測定結果も, 含水率の増加に伴って破壊強度が低下する傾向を示した. 大前・若浜 (1980) や山野井・遠藤 (2002) は, 含水率の増加に伴う破壊強度の低下には, 雪粒子の連結面積が関与していること示し, 水を含むことによって雪粒子の連結面積が減少するため破壊強度が低下すると説明している.

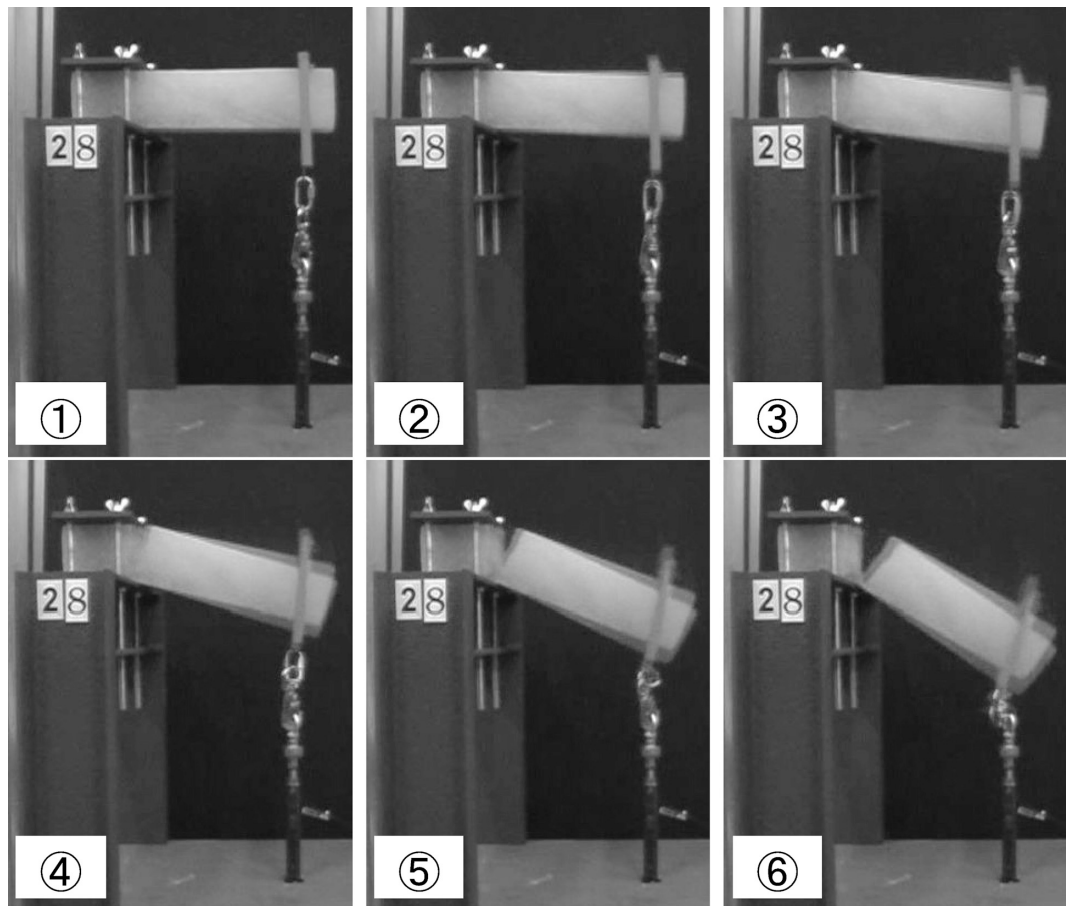


図 5 雪試料固定端における破壊の進行状況.

図中の写真 (①～⑥) は、ビデオで記録した映像を静止画像として切り出したものであり、各写真の時間間隔は 1/30 秒である。

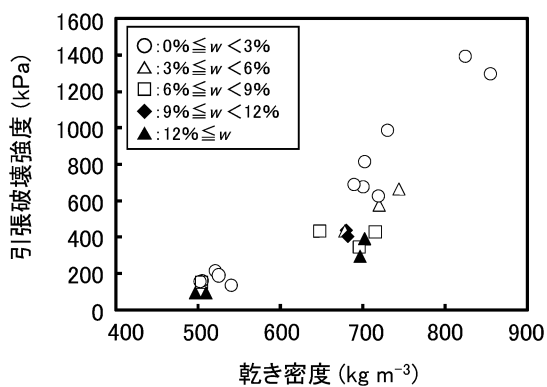


図 6 引張破壊強度と乾き密度との関係.

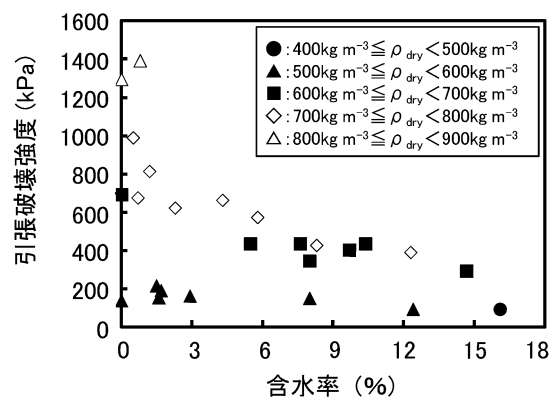


図 7 引張破壊強度と含水率との関係.

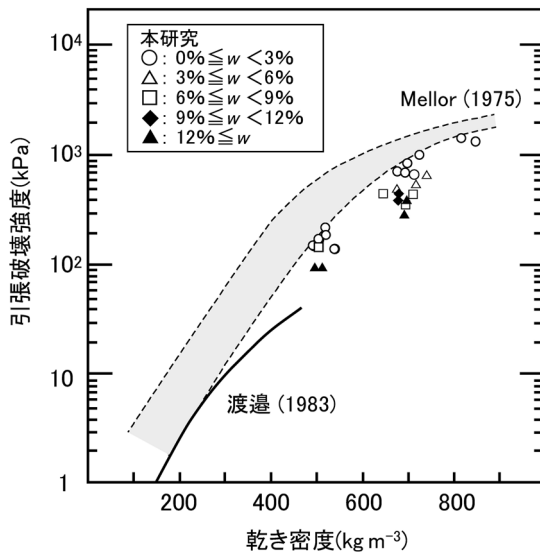


図 8 本実験結果と既往研究の比較。
本実験の結果は含水率 3% ごとにマーカーを分けて示す。2 本の破線に挟まれた領域は Mellor (1975) が示した乾き雪の引張破壊強度が取り得る範囲を、実線は渡邊 (1983) による湿雪の引張破壊強度の実験式をそれぞれ示す。

3.3 Mellor (1975) および渡邊 (1983) の研究との比較

図 8 は Mellor (1975), 渡邊 (1983) および本研究で得られた引張破壊強度と乾き密度の関係を同一グラフ上に整理したものである。

Mellor (1975) では、既述の通り、多数の研究者によって測定された乾き雪の引張破壊強度が取りまとめられているが、個々の実験で雪温や雪試料の構造等が異なるため、引張破壊強度は図 8 中の 2 本の破線に挟まれた領域で示されている。なお、この 2 本の曲線の実験式は与えられていない。一方、渡邊 (1983) の濡れ雪を対象とした測定結果は、図 8 の実線で示される。この曲線に関しては、式 (5) に示す実験式が作成されている。

$$\log \sigma = 3.23 \log \rho_{\text{dry}} - 4.03 \quad (5)$$

ここで、 ρ_{dry} は乾き密度 (kg m^{-3}) である。

既往の研究結果に対して、本実験結果は含水率 3% ごとにマーカーを変えて図 8 に示している。

本実験で得られた湿潤高密度積雪の引張破壊強度は、同一の乾き密度で比較した場合、Mellor

(1975) の示す乾き雪の引張破壊強度に比べて全体的に小さいことが分かる。その中でも、本実験における低含水率 (0~3%) の雪試料の引張破壊強度 (図中○印) は、Mellor (1975) の示す引張破壊強度領域の下限線の直下に位置している。これに対して、雪試料の含水率が高くなるにつれて引張破壊強度は小さくなり、この下限線から離れていく傾向が認められる。

一方、同じ湿潤積雪同士の比較では、対象とする密度領域が大きい本実験の方が渡邊 (1983) より大きな値となった。渡邊 (1983) と本実験の密度領域の境界付近 (乾き密度 500 kg m^{-3} 前後) における引張破壊強度に着目すると、両者には差がみられる。この差は、雪試料の含水率の違いによってもたらされた可能性も否定できないが、これに加えて、渡邊 (1983) が融雪期の平地積雪を測定対象としているのに対して、本実験では約 5 ヶ月間にわたり湿潤環境下で上載荷重を受け続けた積雪が測定対象であることも関係していると考えられる。すなわち、本実験で用いた雪試料は、長期間に及ぶ圧密によって、雪粒子の粗大化と結合部の発達が著しく進行していた可能性があり (若浜, 1965), このため力学的強度の大きい積雪構造となっていたと考えられる。

4. 引張破壊強度の推定式の作成

本実験から、乾き密度一定の条件下において、高密度湿潤積雪の引張破壊強度は、雪温 0°C の乾き雪の引張破壊強度を上限として、含水率の増加とともに低下するとみなすことができる。そこで、同一乾き密度における湿潤積雪と乾き雪 (雪温 0°C) の引張破壊強度の関係を次式で表すこととする。

$$\sigma_{\text{wet}} = A \sigma_{\text{dry}} \quad (6)$$

ここで σ_{wet} は湿潤高密度積雪の引張破壊強度 (kPa)、 σ_{dry} は雪温 0°C の乾き雪の引張破壊強度 (kPa) である。 A は含水率の増加に伴う引張破壊強度の減少率であり、含水率 0% のとき $A=1$ 、湿潤積雪では $A<1$ となる。このような減少率の考え方は、山野井・遠藤 (2002) がせん断破壊強度の推定式を作成する際や竹内ら (2007) が湿潤積雪の硬度の推定式を作成する際にも用いられている。

本実験では、低含水率の引張破壊強度が Mellor (1975) の示す下限線直下に位置することから、雪温 0°C の乾き雪の引張破壊強度をこの下限線で代表させることにした。ただし、既述の通り、この下限線は数式として与えられていないため、Mellor (1975) の原図 (乾き密度と引張破壊強度の関係図) から、本実験の雪試料の乾き密度を包括する密度範囲 ($450 \sim 885 \text{ kg m}^{-3}$) に対して、下限線上の座標を 16 点読み取り、これを用いて最小二乗法によるフィッティングを行った。その結果、この下限線を表す式として式 (7) が得られた (相関係数 0.99)。

$$\sigma_{\text{dry}} = 1.0 \times 10^{-9} \rho_{\text{dry}}^{4.17} \quad (7)$$

減少率 A は、湿潤高密度積雪の引張破壊強度の実測値と、式 (7) に雪試料の乾き密度を代入して得られる雪温 0°C の乾き雪の引張破壊強度との比から求めることができる。図 9 に本実験における A と含水率の関係を示す。データに多少のばらつきはあるが、含水率 $w(\%)$ の増加とともに A は指数関数的に減少する傾向が見られ、最小二乗法により両者の関係を求めたところ、式 (8) に示す回帰式が得られた (相関係数 -0.60)。

$$A = \exp(-0.058 w) \quad (8)$$

式 (6) に式 (7) と式 (8) を代入すると、湿潤高密度積雪の引張破壊強度の推定式として式 (9) が得られる。

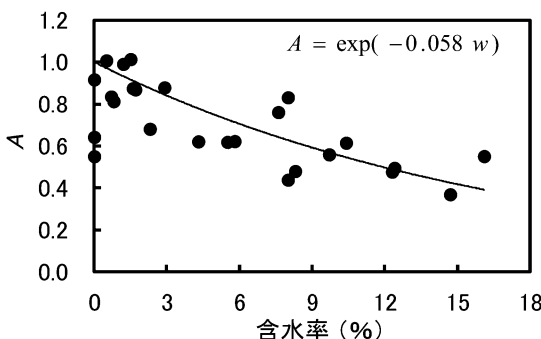


図 9 引張破壊強度の減少率 A と含水率との関係。実線は含水率が 0% のときに $A=1$ になると仮定して求めた回帰式を示す。

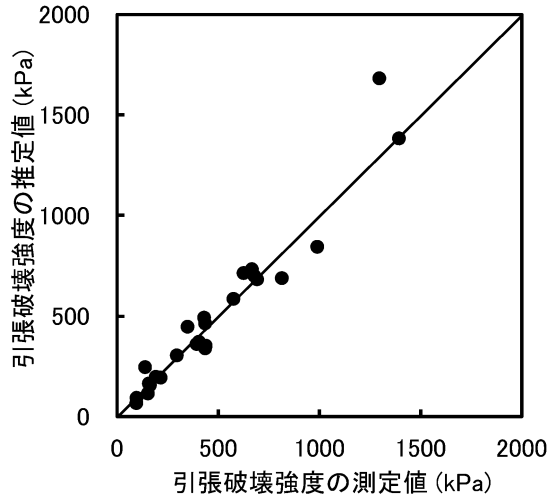


図 10 引張破壊強度の測定値と推定値の比較。実線は $1:1$ の関係を示す。

$$\sigma_{\text{wet}} = 1.0 \times 10^{-9} \rho_{\text{dry}}^{4.17} \exp(-0.058 w) \quad (9)$$

式 (9) より、乾き密度と含水率が与えられれば、湿潤高密度積雪の引張破壊強度を推定することが可能である。

図 10 に本実験で得られた引張破壊強度の測定値と式 (9) から求めた推定値との比較結果を示す。図中の実線は測定値と推定値の $1:1$ の関係を意味しており、式 (9) を用いることで湿潤高密度積雪の引張破壊強度を良好に再現できることがわかった。

5. 荒沢岳の雪渓崩落災害への適用

本研究結果を用いて、2004 年 8 月 1 日に荒沢岳西本城沢で崩壊した積雪の引張破壊強度を推定すると、災害後に測定された濡れ密度 $660 \sim 720 \text{ kg m}^{-3}$ (乾き密度 $600 \sim 660 \text{ kg m}^{-3}$)、含水率 $7 \sim 12\%$ から、その引張破壊強度は $192 \sim 381 \text{ kPa}$ と見積られる。

一方、河島ら (2009) は、荒沢岳の大規模崩壊時にはトンネル上部の積雪が片持ち梁構造となっていたと推定している。式 (4) を用いてこの片持ち梁の固定端最上部に生じる引張応力を彼らの現地調査結果に基づいて試算する。この場合、式 (4) における F と W は 0 と見なせるため、現地調査から推定される平均的な梁の長さ l 、高さ h 、密度 ρ として、それぞれ 7 m 、 2.7 m 、 690 kg m^{-3}

を代入すると引張応力は 368 kPa となる。この値は上記の引張破壊強度の上限とほぼ均衡しており、大規模崩壊直前のトンネル上部の積雪は構造的に不安定な状況にあったといえる。

以上のように、湿潤高密度積雪の引張破壊強度を推定できるようになったことで、引張破壊強度と雪渓に生じる引張応力との比較から、崩壊の危険性を定量的に議論できるようになった。今後は、本研究成果を雪渓崩落災害の防止対策に活用するため、雪渓内部に生じる引張応力（雪渓内部の応力分布）について定量的な検討を行う必要がある。

6. まとめ

本研究では、湿潤高密度積雪の引張破壊強度を明らかにするため、低温室において密度、含水率の異なる雪試料を用いて引張破壊実験を行った。実験結果から、湿潤高密度積雪の引張破壊強度は、密度のみならず含水率にも大きく依存することが示され、含水率一定のもとでは密度が大きいほど、また密度一定のもとでは含水率が小さいほど引張破壊強度が大きいことがわかった。

本実験結果を乾き雪の引張破壊強度をまとめた Mellor (1975) の結果と比較したところ、本実験における低含水率の試料では乾き雪の引張破壊強度の下限値とほぼ等しいことが明らかになった。そこで、湿潤高密度積雪の引張破壊強度が、雪温 0°C の乾き雪の引張破壊強度を上限として、含水率の増加とともに低下するとみなし、乾き密度のべき乗関数で与えられる雪温 0°C の乾き雪の引張破壊強度の推定式に含水率の指数関数で与えられる強度の減少率を乗じることで、湿潤高密度積雪の引張破壊強度の推定式を作成した。本推定式で必要なデータは積雪の乾き密度と含水率のみであり、これらが与えられれば、雪渓の積雪の引張破壊強度を推定することができる。

今後、本研究成果を雪渓崩落災害の防止・軽減対策へと反映させるためには、消耗期のトンネル周辺における雪渓内部の応力分布を把握することが課題として残されている。雪渓内部の応力分布に関しては、これまでほとんど研究がなされていないが、シミュレーション等により雪渓内部の応力分布が明らかになれば、雪渓内部に生じる引張応力と本研究で得られる引張破壊強度との比較か

ら雪渓崩壊の危険度を定量的に議論することが可能となり、雪渓崩落災害の防止・軽減対策へ大きく貢献できると考えている。

謝 辞

引張破壊実験を行うにあたり、公益財団法人鉄道総合技術研究所の遠藤徹氏（当時）、飯倉茂弘博士、新潟大学災害・復興科学研究所の鈴木幸治氏には、実験装置の作成、及び実験を行う際に有効なアドバイスをいただいた。実験試料の採取にあたり、新潟大学理学部の梶壮志氏（現在（株）ホーチキ）にご協力いただいた。また、銀山平キャンプ場組合からは実験で用いた雪試料の提供を受けた。さらに、2名の匿名査読者からは、本稿に対して貴重なコメントをいただいた。以上の方々に厚く御礼申し上げる次第である。なお、本研究は、新潟大学大学院自然科学研究科地球温暖化地域学寄附講座研究助成「地球温暖化に伴って顕在化・多発化する新潟地域の雪氷災害の研究（代表：河島克久）」からの助成を受けて実施された。

文 献

- Kawashima, K., 1997: Formation processes of ice body revealed by the internal structure of perennial snow patches in Japan. *Bulletin of Glacier Research*, **15**, 1-10.
- Kawashima, K., Endo, T. and Takeuchi, Y., 1998: A portable calorimeter for measuring liquid-water content of wet snow. *Annals of Glaciology*, **26**, 103-106.
- 河島克久, 栗原 靖, 和泉 薫, 2009: 2004 年 8 月に新潟県荒沢岳で発生した雪渓崩落災害の実態と過去 40 年間の災害分析. *雪氷*, **71**, 455-469.
- Keeler, C. M., 1969: Some physical properties of alpine snow. U.S. Cold Regions Research and Engineering Laboratory. Research Report, **271**, 1-67.
- Keeler, C. M. and Weeks, W. F., 1967: Some mechanical properties of alpine snow, Montana 1964-1966. U.S. Cold Regions Research and Engineering Laboratory. Research Report, **227**, 1-56.
- 前野紀一, 福田正巳, 1986: 雪の物性. 基礎雪氷学講座第 I 巻, 雪氷の構造と物性, 東京, 古今書院, 156-198.
- Martinelli, M., jr., 1971: Physical properties of alpine snow as related to weather and avalanche conditions. U.S. department of Agriculture, Forest Service. Research Paper **RM-64**, 1-35.
- McClung, D. M., 1979: *In-situ* estimates of the tensile strength of snow utilizing large sample sizes. *Journal of Glaciology*, **22**, 321-329.

- Mellor, M., 1975: A review of basic snow mechanics. IAHS Publication, **144**, 251-291.
- Narita, H., 1980: Mechanical behavior and structure of snow under uniaxial stress. *Journal of Glaciology*, **26**, 275-282.
- Narita, H., 1983: An experimental study on tensile fracture of snow. *Contributions from the Institute of Low Temperature Science. Series A*, **32**, 1-37.
- 大前宏和, 若浜五郎, 1980: 湿雪の圧縮実験. *低温科学 物理篇*, **39**, 17-24.
- 大島俊之, 2002: はりの応力とたわみ. *現代土木工学シリーズ 1 構造力学*, 東京, 朝倉書店, 103-128.
- Sommerfeld, R. A., 1971: The relationship between density and tensile strength in snow. *Journal of Glaciology*, **10**, 357-362.
- Sommerfeld, R. A., 1974: A Weibull prediction of the tensile strength-volume relationship of snow. *Journal of Geophysical Research*, **79**, 3353-3356.
- 竹内由香里, 遠藤八十一, 村上茂樹, 庭野昭二, 2007: 2005/06 年冬期の十日町における積雪の硬度特性. *雪氷*, **69**, 61-69.
- 若浜五郎, 1965: 水を含んだ積雪の変態. *低温科学 物理篇*, **23**, 51-66.
- 渡邊善八, 1983: 積雪の力学的性質と雪崩の発生に関する研究. 昭和 57 年度東北大学博士論文, 124-170.
- 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.

Dependence of tensile fracture strength of high-density wet snow on density and liquid-water content

Yasushi KURIHARA^{1)*,**}, Katsuhisa KAWASHIMA²⁾ and Kaoru IZUMI²⁾

1) Graduate School of Science and Technology, Niigata University,
Nishi-ku, Niigata, 950-2181

2) Research Institute for Natural Hazards
and Disaster Recovery, Niigata University,
Nishi-ku, Niigata, 950-2181

* corresponding author

** Present affiliation: Disaster Prevention Technology Division,
Railway Technical Research Institute,
Kokubunji, Tokyo, 185-8540

Abstract: To clarify the tensile fracture strength of high-density wet snow, which can be seen in perennial snow patches of Japan during the ablation period, tensile fracture tests were carried out in a cold room at 0-1°C. Test specimens were taken from the Nishi-honjyozawa snow patch on Mt. Arasawa; these specimens had a dry density ranging from 497 to 855 kg m⁻³ and liquid-water content ranging from 0% to 16.1% by weight. The test data showed the tendency of the tensile fracture strength to increase with dry density, although the data was scattered. This scatter indicates that the tensile fracture strength of high-density wet snow is highly dependent on density as well as liquid-water content. Therefore, after the relationship between the tensile fracture strength of dry snow and its density was formalized using the data obtained by Mellor (1975) in addition to this test data, the following relationship was obtained by taking into consideration the decreasing rate of tensile fracture strength in response to the increase in liquid-water content: $\sigma_t = 1.0 \times 10^{-9} \rho_{dry}^{4.17} \exp(-0.058w)$, where σ_t is the tensile fracture strength of high-density wet snow (kPa); ρ_{dry} , the dry density of wet snow (kg m⁻³); and w , the liquid-water content (% by weight). This empirical formula was found to be suitable for estimating the tensile fracture strength of high-density wet snow with sufficient accuracy.

(2011 年 9 月 19 日受付, 2011 年 11 月 13 日改稿受付, 2011 年 12 月 3 日受理,
討論期限 2012 年 7 月 15 日)