論 文

雪の引張強度の試料体積効果

成 田 英 器

要 旨

雪の引張強度の大幅なバラツキの原因の一つとして、試料体積効果が考えられている。しかしながら、この効果を実験的に注意深く調べた報告はない。

本研究は、上記のことから雪のテストピースの体積を変え、それ以外に考えられる破壊要因をできる限り取り除いて一軸破壊試験を行い、強度の試料体積効果を調べたものである。その結果、破壊強度 S と試料体積 V と間には、次のような関係があることがわかった。

$$S \approx (4.4 \times 10^4) \cdot V^{-0.1}$$

ここで、 S と V の単位はそれぞれ $N \cdot m^{-2}$ 、 m^3 である。この関係式により、雪の引張強度は試料の体積のちがいで著しく変わらないことがわかった。それ故、いままで得られている強度のバラツキは、試料体積効果よりもむしろ各測定者が選ぶ雪試料の質の僅かなちがいや試料成形時につくられる傷、そして試験方法の違いなどによることの方がはるかに大きいという結論に達した。

1. まえがき

雪の引張強度の測定は、定速度引張試験や遠心法で多くの人達によって行われている (Keeler and Weeks, 1967; Keeler, 1969; Martinelli, 1971; Sommerfeld, 1971, 1974; 渡辺善八, 1976; McCabe and Smith, 1978; McClung, 1979; Narita, 1980, 1983)。ところが、彼らの測定値のうちから試料の温度と密度が同一の試験条件下で得られた引張強度の値を調べてみると、測定値が大きくばらつき、その範囲は2桁にもおよんでいる。たとえば、密度 $300 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、温度 $-2 \sim -6^\circ\text{C}$ の雪の強度は $2 \times 10^3 \sim 9 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ の範囲にある。

上記の大きなバラツキの原因としてテストピースの体積効果、試験方法のちがいが考えられる。これらに加えて、破壊現象は微視的な挙動がそのまま巨視的な測定に反映するので、構造に対して非常に敏感であるため雪質のわずかな違いや試料成形時に生ずる傷の有無などによっても強度は非常にばらつく。したがって、先に述べた各測定者の値から単に温度と密度だけを統一してもその構造は決して同一といえないので、破壊強度は大巾

にばらつくのは当然かもしれない。このように、強度のバラツキの要因は非常に多いのであるが、その中の一つである試料体積効果がどの程度強度の値に影響をおよぼしているか、まだ実験的に直接確かめられていない。

また、雪の引張強度の体積効果を調べることは、前述の他にもう一つの重要な意味をもっている。それは、Sommerfeld (1974) が Weibull (1939) の破壊の確率過程の考えを用いて求めた雪の引張強度の試料体積効果を直接実験的に確かめておくことにある。彼の結果によると、強度は試料体積の増大とともに指数関数的に減少し、 1 m^3 以上の試料体積の強度は変わらなくなる。この値は通常の試験に使われているテストピースの体積 ($3 \sim 5 \times 10^{-4} \text{ m}^3$) の強度に比べて約13倍も小さい。このことは、たとえば 1 m 以上も積っている斜面積雪の崩壊現象である雪崩発生を論ずる上で極めて重要である。この点においても雪の強度の試料体積効果は確かめておかねければならないであろう。

以上のような理由から、テストピースの体積以外に考えられる要因をできる限り取り除いた上で定速度一軸引張破壊試験を行い、強度の試料体積効果を調べた。以下にその結果を報告する。

2. 試験試料の採取とテストピースの成形

(1) 試料の採取

試験に使用した雪は密度 $340 \sim 360 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ のしまりゆきであった。先づ、一様な構造の試験試料を得るために、自然積雪の中の単一層から厚さ 1 cm 程の鉛直方向の板を切り出し、それを太陽光、または電灯光で透視し、構造的に一様な（均質な）厚さ 15 cm 位の層を選ぶ。この層から $40 \times 30 \times 15 \text{ cm}$ ほどのブロックを切り出し、 -10°C の低温室に保管した。本試験は20日間で終わることができたので、この間に保管していた試料ブロックの雪は測定値に影響するほどの変態による構造変化を起こしていなかった。

(2) テストピースの成形

本試験では、テストピースより僅かに大きい試料をブロックから切り出し、それに円筒サンプラーを差し込んで試験用テストピースを作った。このことにより、サンプラー先端で削られた雪は外側に自由に落下し、サンプラー内側のテストピースに対しての損傷を最小限におさえることができた。ここで、テストピースの軸方向は自然積雪の層方向と平行に取られた。図1に本試験で使った4種類のテストピースを示した。各々の寸法などは表1の通りである。各試料の高さ (h) と直径 (d) の比 (h/d) は 2.5 と一定にした。

図1 本試験で用いた雪のテストピース。

3. テストピースの試験装置への装着と試験方法

テストピースを引張試験機に装着するために、テストピースの両底面に真鍮製の円板ブロックを凍着させた。真鍮ブロックの凍着面側には、テストピースとの凍着面積を増すために深さ 1.5 mm、巾 1.5 mm の溝が 2 mm おきに同心円状に掘ってある。凍着作業では、真鍮ブロックとテストピースの軸を一致させること、凍着面の氷の厚さを一様にするように特に注意を払った。これはテストピースを引張ったときに生ずる応力分布を一様にするために特に重要である。このために、 -10°C の下で先づ真鍮ブロックを平板電気ヒーターの上にのせ、 $+0.5^\circ\text{C}$ 程度まで温めてそれにテストピースを凍着させた。この結果、各々の軸は 0.4 度以内で一致し、凍着面の氷の厚さは 1 mm くらいになった状態で固定することができた。

凍着後は全体が試験温度である -10°C になるまでそのまま放置した。さらに、サンプラーの差し込みで生じたかもしれないテストピース表面の傷を自然焼鈍してで

図2 定速度引張試験装置の略図、S: 雪試料、M: モーター、 D_1, D_2 : 減速機、 G_1, G_2 : 歯車、L: ロードセル、A: 増幅器、R: ペンレコーダー、H: ヒーター、T: サーミスター温度計、C: 温度調節器、P: ファン、F: 変位計。

表1 図1に示した各テストピースの寸法と体積値

テストピース番号	直径 (cm)	高さ (cm)	高さ/直径(比)	試料体積 (cm^3)	雪質と密度
No. 1	5.0	12.5	2.5	245.3	しまりゆき $340 \sim 360 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
No. 2	6.0	15.0	2.5	423.9	
No. 3	8.2	20.5	2.5	1082.0	
No. 4	11.4	28.5	2.5	2907.5	

きるだけ消す意味で5～6時間放置した後、試験機に装着し、引張り破壊試験を行った。

試験装置の略図を図2に示した。Sはテストピースである。この装置では、テストピースをモーター(M)と減速機(D_1, D_2)と歯車(G_1, G_2)の組合わせによって引張速度を $0.22 \sim 16.2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ の範囲内で任意に変えることができる。引張抵抗力はロードセル(L)を用い、増巾器を通してペンレコーダーに記録させた。テストピースの変形量はダイヤルゲージを用いて測定し、記録させた。この試験機全体は、 $-10 \pm 0.5^\circ\text{C}$ に温度調節した恒温箱におさめられた(図2)。

4. 雪の破壊形式とその強度

雪の引張破壊形式と強度は、雪の密度、温度、雪質、そして変形速度のちがいによって変わる。(Narita, 1980, 1983)。この試験では、密度 $340 \sim 360 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、温度が $-10 \pm 0.5^\circ\text{C}$ の構造的に様なしまりゆきを試料として選んだのであるが、破壊形式の違いによる強度の体積効果も調べるために、歪速度にして雪が脆性破壊を起こす $5.4 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ と延性破壊を起こす $2.2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ の2通りの変形速度を選んだ。

図3に雪が脆性破壊を起こしたときの応力-歪曲線の例を示した。この場合、応力は歪の増加とともに直線的に増え、歪 0.18% で引張方向に直角な破壊面を作って雪は破断した(図4)。また、図5に延性破壊を起こしたときの応力-歪曲線を示した。図に見られるように、応力は最初歪の増加とともに直線的に増し、降伏点Cを経てまもなく一定となった。さらに引き伸ばしてゆくと、やがて雪の中に引張軸に直角な方向に成長した小クラックが沢山発生した(図6)。この小クラックが発生し出す歪は、応力が減少しはじめるG点と考えられる。小クラックは歪の増加とともにその数を増やしてゆくが、そのうち小クラックの2、3個が優先的に拡大して雪の破断につながった(図7)。

ここでは、各々の破壊形式における強度を次のように定義した。脆性破壊のときは、テストピースが破断したときの応力、つまり図3のF点。延性破壊のときは、小クラックが発生しはじめたと予想されるG点での応力を破壊強度の値とした。

5. 測定結果

上述の定義に基づいた破壊強度Sと試料体積Vとの関係を図8に示した。図の中の黒丸印、または白丸印に付けた縦線は測定値のバラツキの範囲を示し、各々の印の値は、脆性破壊試験においては4～5回、延性破壊

図3 歪速度 $5.4 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ で引張試験を行ったときの応力-歪曲線。雪はF点で図4のように破断した。

図4 図3で示した試験のときの雪の破断(脆性破壊)。

試験においては3～4回の測定値の算術平均値である。図からわかるように、2つの破壊形式における強度はいずれも試料体積が増えると共に減少した。これらの関係を実験式で示すと次のようになる。

脆性破壊の場合(歪速度: $5.4 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$)

$$S = (3.48 \times 10^4) \cdot V^{-0.096} \quad (1)$$

延性破壊の場合(歪速度: $2.2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$)

図 5 歪速度 $2.2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ で引張試験を行ったときの応力-歪曲線。G点で図6のような小クラックが発生し出し、K点から多くの小クラックの中の2、3個が成長、拡大した(図7)。

図 6 図5で示した試験で生じた小クラック。白く横筋に見える部分が小クラックである。

図 7 図5で示した試験のときの雪の破壊状況(延性破壊)。

図 8 引張強度 (S) と試料体積 (V) との関係。

$$S = (5.32 \times 10^4) \cdot V^{-0.106} \quad (2)$$

ここで、 S と V の単位はそれぞれ $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ と m^3 である。(1),(2)式から、破壊形式が違っても V にかかる指数はほとんど同じであった。つまり、破壊強度が試料体積の増加によって減少する傾向は破壊形式にあまり依存しないことがわかった。さらに、試料体積が約12倍になっても強度は最大 20% 程度しか減少しないことがわかった。また、これらの式は Davidenkov 等が金属材料の試片の大きさの影響を調べたときに提出した式：

$$S \propto V^{-1/m} \quad (3)$$

と同じ型で、形式上 Weibull (1939) の破壊の確率の式と一致するものとなった(横堀, 1964)。

6. 考 察

一般に試料体積が大きくなると、その強度は減少する。

これは、試料内部または表面に破壊のキッカケとなる傷(ノッチ)や微小クラックなど破壊の核の発生源となる弱点が試料体積の増大とともに含まれる確率が増すからである。すなわち、それら弱点が試料ブロックの中に統計的に不均一に分布していれば、そのブロックから取られるテストピースの大小によって弱点の含まれる確率もちがってくるので、当然強度の値にも差が生じてくる。本試験でわかったことは、雪の強度には顕著な体積効果がないということであるが、このことについて以下に考えてみる。

雪は非常に多くの空隙をもつ物質である。その構造は無数の氷粒が氷の細い柱で網目状に無秩序につながり合ったものである。そして、2章(1)で述べたように雪試料を採取するときに視覚的に一様な構造の雪と判断されても、その中には微視的にみると大小様々な空隙や氷の柱が混在している。Kinosita (1966), 若浜 (1960a, 1960b) 等の雪の破壊、変形の実験によれば、相対的に大きな空隙周辺の氷の柱や細い氷の柱が優先的に破壊し、また変形している。これらの箇所は雪の中の弱点というべきものである。本試験でも、4章で述べた脆性破壊は雪を比較的大きな速度で引っ張ったため上述の弱点に応力集中が生じ、そこからクラックが発生、急速に伝播したものと考えられる。また、延性破壊では、変形が進むにつれて多数の小クラックが発生した。これも弱点が核になったと考えられる。

本試験の結果は、テストピースの体積が $2.453 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ から $2.907 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ の範囲での強度試験によるものであった。その体積効果は最大 20% の違いにすぎなかった。このことは、テストピースの体積を $2.453 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ 以上とすれば、それらの雪の中には上述のような弱点がほぼ同じ確率で含まれていることを示している。つまり、強度試験として約 $2.45 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ 以上のテストピースを用いればよいと考えることができよう。

ところで、過去に測定されてきた引張強度には大きなバラツキがあることを1章で述べ、そしてその原因の1つに試料体積効果を上げた。図9は多くの測定者によって求められた引張強度と密度の関係を示したものである。強度の値は大幅にばらついている。これらの測定には $2.4 \times 10^{-4} \sim 3.2 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ の範囲のテストピースが用いられた。測定温度はこれらのデータに記載されていないものもあるし、測定方法もすべて同じでない。正確に比べることはできない。しかしながら、本試験の結果から、図9の強度のバラツキは雪試料体積以外の要素、つまり雪質(構造の僅かな違い)、実験方法、試料の成形方法などによるものと考えられる。

図9 いままでに得られた引張強度と雪密度との関係。1: Keeler and Weeks (1967), 2: Keeler (1969), 3: Martinelli (1971), 4, 5: Sommerfeld (1973, 1974), 6: 渡辺 (1976), 7: McCabe and Smith (1978), 8: McClung (1979), 9: Narita (1980)。

また、1章に強度の試料体積効果についてのもう1つの問題点をかかげた。それは Sommerfeld (1974) の結果の検討であった。彼は遠心法を用い、 $2.3 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ の試料体積をもつテストピースの引張強度を測定し、そして、Weibull (1939) の累積分布関数である(4)式を利用して体積効果を調べている。

$$P = 1 - \exp \left[- \int \left(\frac{\sigma - \sigma_u}{\sigma_0} \right)^n \cdot dV \right] \quad (4)$$

ここで、 P は応力 σ で破壊する確率、 V は試料体積、 σ_u , σ_0 , n は分布定数である。(4)式は(3)式の形に書き換えることができる。彼の結果によると、 V にかかる指数は $0.9 \sim 1.6$ であった。この値は本試験で得た値よりも $10 \sim 16$ 倍大きい。図10は本試験で得られた体積効果曲線⑦、⑧と(4)式を使って計算した曲線⑨、⑩そして、他の測定者による実測値を示したものである。ここで、黒丸印は密度 $300 \sim 340 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ の雪の強度(ただし、黒丸印に付けた縦線は測定値のバラツキの範囲を示し、その黒丸の値は算術平均値である)、そして三角印は密度 $186 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ の雪の強度である。また、⑥の

図 10 いろいろな試料体積による引張強度の測定と強度の試料体積効果計算曲線。黒丸と三角印は密度 $300 \sim 340 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ と $186 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ の雪の強度の測定値である。1: Keeler(1969), 2: Martinelli(1971), 3: Sommerfeld(1973), 4: 渡辺 (1974), 5: McCabe and Smith (1978), 6: Sommerfeld (1973) による予想値, 7, 8: 本試験による結果(図 8), 9, 10: Sommerfeld (1974) が求めた分布定数を使って計算した体積効果曲線。

値は(4)式を使って Sommerfeld (1973) が求めた体積 1 m^3 の予想強度値である。計算曲線は②, ③, ⑤の各々の値に一致しているようにみえる。しかし, 本試験の結果(⑦, ⑧)からは非常にかけ離れている。②, ③, ⑤の値は各々測定者もちがうので, 試料の雪質, 試験条件など一致しているとはいえない。それ故, 彼らの測定値を試料体積効果のみに注目して単純に比較することには問題がある。

7. まとめ

本研究は, 試験に用いる雪試料体積が引張強度にいかに影響を及ぼすかを確かめるのが目的であった。このために, 構造的に様々になりゆきを使い, 雪質, 密度, 温度, 引張歪速度を限定して雪試料体積のみを変えて引張破壊試験を行った。その結果, 雪が脆性破壊を起こしたとき, すなわち歪速度が $5.4 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ のとき, 引張強度 $S(\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$ と試料体積 $V(\text{m}^3)$ との間には,

$$S = (3.48 \times 10^4) \cdot V^{-0.096}$$

同様に, 延性破壊のとき, すなわち歪速度が $2.2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ のとき

$$S = (5.32 \times 10^4) \cdot V^{-0.106}$$

なる関係が見い出された。破壊強度の体積効果は, 破壊形式の違いによって顕著な差はなく, また, いままで一

般に使用されてきた引張試験のテストピースの体積である $2.4 \times 10^{-4} \sim 3.1 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ の範囲, つまり体積が約12倍になっても強度は最大 20% しか減少しなかった。したがって, 従来の引張強度の大幅なバラツキは試料体積が大きく関与しているのではなく, むしろ試験方法, 試料の成形のしかたや試料の雪質に由来していると考えられる。

謝 辞

本研究試験は北海道大学農学部附属天塩地方演習林内にある低温科学研究所の雪崩観測所で行われた。御援助いただいた附属演習林研究部の滝川貞夫助教授はじめ, 天塩地方演習林の皆様にごで感謝の意を表します。

この研究費の一部は低温科学研究所のなだれ事業費で賄われた。

文 献

- Keeler, C. M. and Weeks, W. F. 1967: Some mechanical properties of alpine snow, Montana 1964-1966. Res. Rep. 227, U.S. Cold Reg. and Eng. Lab., Hanover, N. H., 1-56.
- Keeler, C. M. 1969: Some physical properties of alpine snow. Res. Rep. 271, U.S. Cold Reg. and Eng. Lab. Hanover, N. H., 1-67.
- Kinosita, S. 1966: Compression of snow at constant speed. Physics of Snow and Ice. I, 2, ed. by H. Oura. Sapporo, Inst. Low Temp. Sci., Hokkaido Uni., 911-927.
- Martinelli, M., jr. 1971: Physical properties of alpine snow as related to weather and avalanche conditions. U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Res. Pap. RM-64. 1-35.
- McClung, D. M. 1979: *In-situ* estimates of the tensile strength of snow utilizing large sample sizes. J. Glacio., 22, 321-329.
- Narita, H. 1980: Mechanical behavior and structure of snow under uniaxial stress. J. Glacio., 26, 275-282.
- Narita, H. 1983: An experimental study on tensile fracture of snow. Contr. from the Inst. of Low Temp. Sci. Ser. A, 32, 1-37.
- Sommerfeld, R. A. 1971: The relationship between density and tensile strength in snow. J. Glacio., 10, 357-362.

- Sommerfeld, R. A. 1973: Statistical problems in snow mechanics. U.S. Dept. of Agriculture. Forest Service. General Techni. Rep. RM-3, 29-36.
- Sommerfeld, R. A. 1974: A Weibull prediction of the tensile strength-volume relationship of snow. J. Geophys. Res., 79, 23, 3353-3356.
- 若浜五郎, 1960a: 積雪の薄片を応用した積雪の組織と変部歪の研究 I — 静荷重による積雪薄片の圧縮一. 低温科学, 物理篇, 19, 37-72.
- 若浜五郎, 1960b: 積雪の薄片を応用した積雪の組織と内部歪の研究 II — 積雪薄片の定速度圧縮一. 低温科学, 19, 73-96.
- 渡辺善八, 1976: 積雪の粘弾性と破壊強度. 文部省科研費, 自然災害特研(I), 積雪災害の防止に関する基礎的研究—研究報告—(代表者, 渡辺善八), 53-60.
- Weibull, W. 1939: A statistical theory of the strength of materials. Ingeniorsvetenskapsakademiens, Handl., 151, 1-45.
- 横堀武夫, 1964: 材料強度学, 技報堂, 86.

Effect of specimen-volume on the tensile strength of snow

Hideki NARITA

*Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University,
Sapporo, Japan 060*

Abstract: A study was carried out to clarify the effect of specimen-volume upon the tensile strength of snow. For the purpose, unconfined tensile strength of snow was measured by means of apparatus for uniaxial tensile experiment. Specimens used were fine-grained old snow of density ranging from 340 to 360 kg·m⁻³. The test-temperature was -10°C. Volumes of cylindrical specimens for the tests were prepared to the following four specifications: 2.4×10⁻⁴, 4.2×10⁻⁴, 1.1×10⁻³ and 2.9×10⁻³ m³, respectively. Ratio of height to diameter of the specimen was 2.5.

It was found, in the experimental results, that the relations between the strength and the volume were as follows: In the case of brittle fracture occurring (when the strain rate was 5.3×10⁻⁴ s⁻¹),

$$S = (3.48 \times 10^4) \cdot V^{-0.096}$$

and in another case of ductile fracture occurring (when the strain rate was 2.2×10⁻⁵ s⁻¹),

$$S = (5.32 \times 10^4) \cdot V^{-0.106}$$

where, S is strength (N·m⁻²) and V is specimen-volume (m³). The relations indicated that the change in strength with volume was only about 20% in the range of volumes used in the experiments, although the volume increased up to about 12 times.

In previous experiments, scatter in data of tensile strength was about 2 orders of magnitude. From the present results, the reasons could be attributed to damage caused in forming the specimen, to differences of experimental methods, and to the snow qualities used for tests rather than to the effect of specimen-volume.

(1986年12月24日受付, 1987年4月11日改稿受付, 1987年5月8日受理)