

落雪による衝撃荷重と積雪硬度の関係について

Relationship between impulsive pressure due to falling snow and snow hardness

松下拓樹, 笠村繁幸*, 松澤勝, 中村浩, 上田真代
(独立行政法人土木研究所 寒地土木研究所)

(*現所属: 国土交通省東北地方整備局 青森河川国道事務所)
Hiroki Matsushita, Shigeyuki Kasamura, Masaru Matsuzawa,
Hiroshi Nakamura and Masayo Ueda

1. はじめに

落雪による衝撃荷重の把握は, 道路案内標識等の道路施設や構造物などからの落雪による被害発生の可能性を検討する上で重要である. 落雪による衝撃荷重について, 密度の大きいしまり雪や氷化させた雪を用いた測定例^{1)~3)}はあるが, 密度や硬度が小さい雪の測定例は少ない⁴⁾. そこで, 自然積雪を用いて, 密度や硬度の小さい雪を含めた落雪による衝撃荷重を把握するための実験を行った. また, 実験結果から, 落雪による衝撃荷重と関係のある硬度を用いた衝撃荷重の推定方法について検討した.

2. 実験方法

2. 1 実験の概要

実験は, 札幌市南区定山溪(定山溪ダム流木処理場)で行った. 実験に用いた雪は, 場内に積もった自然雪を一辺 10~30 cm の立方体に切り出した雪塊である. 雪塊を切り出した箇所の積雪に対して, 密度, 硬度, 雪温の測定及び雪質の観察を行った. 密度は 100cc 角型サンプラーを用いて測定し, 硬度はフォースゲージ(AIKOH RX-2)のアタッチメント(直径 30mm)を積雪に貫入して測定した. 実験は, 2012 年 1 月 30 日と 3 月 3 日及び 7 日の 3 日間, 2013 年 2 月 13~14 日と 3 月 7~8 日及び 14 日の 5 日間実施した.

2. 2 衝撃荷重の測定方法

落雪による衝撃荷重の測定は, 雪塊を高さ 1~6m から自由落下させて, コンクリートの地面上に水平に設置した受圧装置(図 1)に衝突させて行った. この受圧装置は, 2 枚の鉄板(厚さ 9 mm)の間に 3 台のロードセル(LCN-A1KN または A5KN)を設置したものである. この 3 台のロードセルによる測定値の合計値を衝撃力 F (N) とする. 衝撃力の波形の一例を図 2 に示す. 衝撃荷重 P ($N m^{-2}$) は, この波形から得られた衝撃力の極大値を雪塊が衝突した面積 S (m^2) で除した値とした.

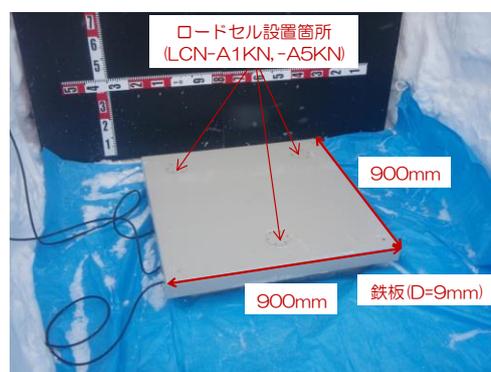


図 1 衝撃力測定の受圧装置

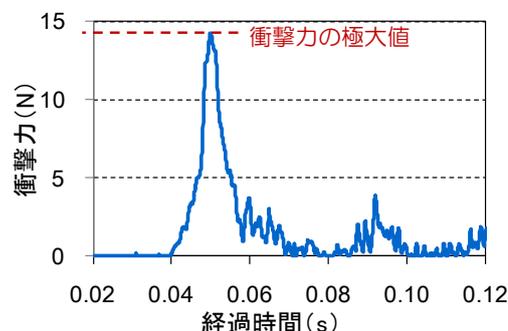


図 2 衝撃力の波形と極大値の例

3. 実験結果

3. 1 衝撃荷重の測定結果

実験に用いた雪塊の密度は $160 \sim 380 \text{ kg m}^{-3}$ 、硬度は $4 \sim 455 \text{ kN m}^{-2}$ 、雪質はこしまり雪、しまり雪、ざらめ雪の3種類、雪温は 0°C 以下である。図3は、雪の密度と衝撃荷重の関係である。図には、小竹ら(2001)¹⁾による氷化させた硬い雪塊、上石ら(2012)³⁾による高密度の雪や氷、川田(1983)⁴⁾による低密度の雪の測定結果も示す。小竹ら(2001)¹⁾は、一辺10cm、20cm、30cmの立方体の雪塊を高さ2.5~10.0mから自由落下させた。なお、上石ら(2012)³⁾と川田(1983)⁴⁾は、雪塊より小さな受

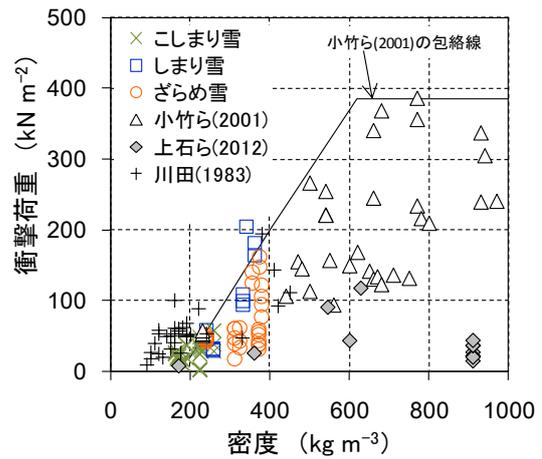


図3 衝撃荷重と雪塊の密度の関係

圧板を用いた衝撃荷重の測定結果であり、本実験や小竹ら(2001)¹⁾と測定方法が異なる。図3より、本実験の測定結果は、小竹ら(2001)¹⁾より密度が小さい 400 kg m^{-3} 以下の雪の衝撃荷重を示し、おおむね小竹ら(2001)¹⁾による包絡線以下の値である。よって、落下高が10m以下の場合において、雪の密度が分かれば図3から落雪による衝撃荷重の最大値を把握できると考えられる。しかし、衝撃荷重を定量的に求めるにはばらつきが大きく、密度以外の要素も衝撃荷重に関与していると考えられる。

そこで、図4に、衝撃荷重と落下高、雪塊の質量及び一辺の長さとの関係を示す。いずれの関係においても、衝撃荷重の最大値を把握できる可能性があるが、雪質ごと

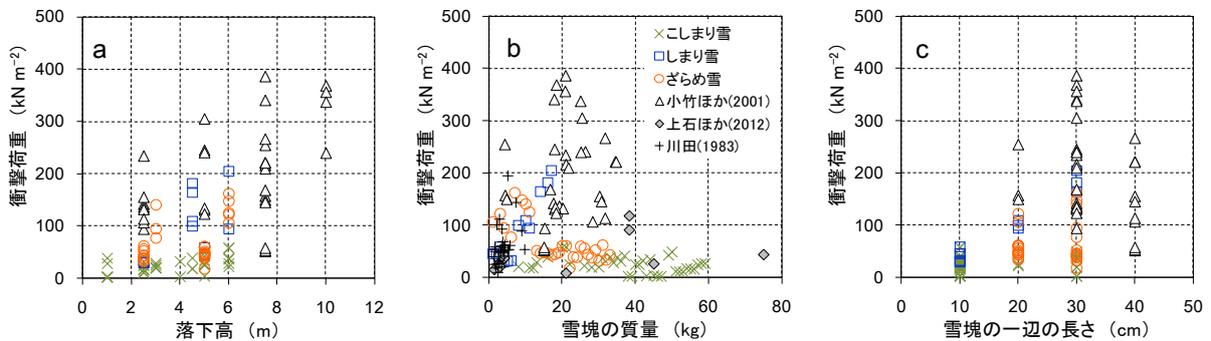


図4 衝撃荷重と(a)落下高、(b)雪塊の質量、(c)雪塊の一辺の長さとの関係。

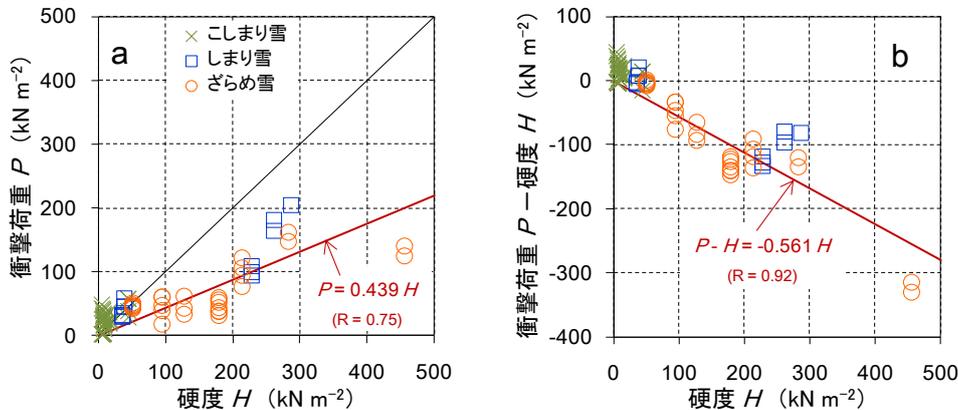


図5 雪塊の硬度と(a)衝撃荷重、(b)衝撃荷重と硬度の差との関係。

赤実線は回帰式、Rは相関係数。

にこれらの関係を求める必要があるなど、一つの要素だけで衝撃荷重を求めることは難しいといえる。そこで、雪質を代表する指標として硬度に着目した。衝撃荷重と雪塊の硬度との関係を図5aに示す。衝撃荷重と硬度の間には、密度や質量との関係ではみられない、雪質に依存しない直線的な関係がみられる。また、衝撃荷重と硬度の差をとって硬度との関係(図5b)をみると、両者の関係は図5aよりも明確となった。ただし、こしまり雪だけをみると、硬度が小さく衝撃荷重との対応が不明瞭である。本実験で測定した雪塊の硬度は、フォースゲージを積雪に貫入した測定値であり、雪の圧縮破壊抵抗が寄与している⁵⁾。そのため、衝突によって雪が破壊したときの衝撃荷重と硬度との間に関係がみられたと考えられる。

3. 2 衝撃荷重の推定方法の検討

図5aの衝撃荷重と硬度の関係を使って、落雪による衝撃荷重の推定を試みる。図5aに、硬度 H (kN m^{-2})を説明変数、衝撃荷重 P (kN m^{-2})を目的変数、 y 切片を0として求めた回帰式(式(1))を示す。式(1)によると、雪の硬度の約44%がその落下による衝撃荷重に寄与するといえる。

$$P = 0.439 H \quad \dots(1)$$

図6は、式(1)から推定した衝撃荷重と測定値を比較した結果である。衝撃荷重の推定値と測定値は、ほぼ等値線近くに分布し、両者の相関係数 R は0.84である。よって、密度 400 kg m^{-3} 以下の雪を使った本実験結果より、硬度を用いることで、落雪による衝撃荷重を雪質や落下高に関わらず推定できると考えられる。

ところで、雪の硬度 H (kN m^{-2})と密度 ρ (kg m^{-3})の関係式(式(2))が、竹内ら(2001)⁶⁾によって得られている。式(2)は、乾いたしまり雪とこしまり雪に対する関係式であるが、この式を活用することによって、雪の密度から落雪による衝撃荷重を推定できる。

$$H = 1.31 \times 10^{-8} \rho^4 \quad \dots(2)$$

図7は、本実験で用いた雪塊の密度と硬度の関係で、式(2)との対応がよい。そこで、式(2)より、密度 ρ の測定値から硬度 H を推定し、これを式(1)に代入することで落雪による衝撃荷重を推定した。図8が、この方法で推定した衝撃荷重と測定値の比較であ

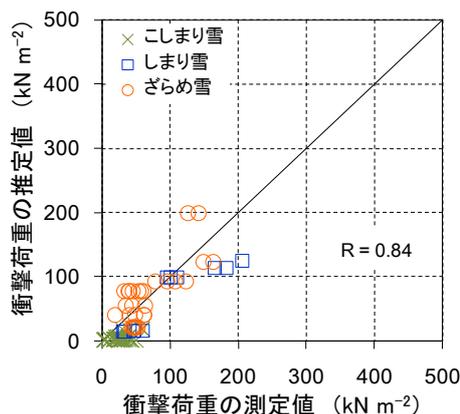


図6 衝撃荷重の推定値と測定値の比較。推定値は式(1)より求めた値。Rは相関係数。

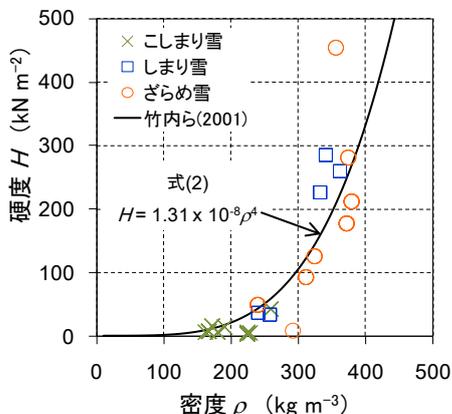


図7 雪塊の密度と硬度の関係。曲線は竹内ら(2001)による式(2)。

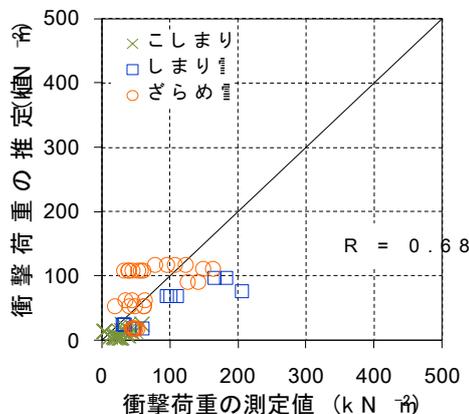


図8 衝撃荷重の推定値と測定値の比較。推定値は式(1)と式(2)により求めた値。

る。図 6 に比べて全体のばらつきが大きく、相関係数 R は 0.68 となった。今回の実験では、落雪による衝撃荷重の推定において、硬度の測定値を用いる方がよいといえる。

4. 考察

雪の衝撃荷重と硬度との関係は、これまでも指摘されている^{2),4),7)}。例えば、川田(1983)⁴⁾は密度 $90\sim 450\text{ kg m}^{-3}$ の雪塊を用いて実験を行い、硬度の大きい雪の衝撃荷重は硬度に近い値をとるが、硬度の小さい雪の衝撃荷重は密度に関係することを示した。このことは、硬度の大小により衝撃荷重の推定方法を分けて検討する必要性を示唆している。また、横澤ら(2005)²⁾の密度 300 kg m^{-3} 以上のざらめ雪を用いた実験によると、雪塊の表面硬度によって雪塊の破壊や飛散の状況が異なり、表面硬度が大きいと衝撃荷重が大きく受圧板に作用する時間(衝突時間)が長くなる。硬度が大きい雪塊を剛体とみなす場合、衝撃荷重への衝突時間の寄与を考慮した力積の概念が重要となる。

以上のように、落雪による衝撃荷重と硬度の関係が指摘されているが、硬度を用いた衝撃荷重の推定方法はまだ得られていない。本実験では、密度 400 kg m^{-3} 以下の雪を落下させたときの衝撃荷重の推定方法として、硬度のみを用いた関係式を提示した。今後は、雪塊の破壊形態や衝突時間なども考慮して衝撃荷重の推定方法を検討する。

5. おわりに

密度や硬度の小さい雪を含めた落雪による衝撃荷重を把握するための実験を行った。その結果、落雪による衝撃荷重は雪の硬度と関係があり、雪の硬度を用いることで雪質や落下高に依存せずに衝撃荷重を推定できる可能性を示した。雪塊の衝突時の破壊形態や衝突時間なども考慮した推定方法の検討は、今後の課題である。

謝辞

実験の実施にあたり、北海道開発局札幌開発建設部豊平川ダム統合管理事務所及び定山溪ダム管理支所の関係各位のご協力に対し、ここに記して感謝申し上げる。

【参考・引用文献】

- 1) 小竹達也, 苫米地司, 西川薫, 2001: 屋根上積雪の落雪による衝撃荷重に関する一考察, *日本建築学会構造系論文集*, **543**, 31-36.
- 2) 横澤直幸, 諏訪宗行, 相茶日出海, 細川和彦, 苫米地司, 2005: 雪氷塊の落下衝撃荷重について その2, *日本建築学会大会学術講演梗概集*, 37-38.
- 3) 上石勲, 佐藤威, 本吉弘岐, 平島寛行, 安達聖, 山口悟, 佐藤篤司, 石坂雅昭, 西田陽一, 橋立広隆, 大宮哲, 2012: 雪氷塊の落下衝撃実験, *寒地技術論文・報告集*, **28**, 188-191.
- 4) 川田邦夫, 1983: 小さな円形受圧板に対する雪塊の衝撃力, *雪氷*, **45**, 65-72.
- 5) 佐藤威, 阿部修, 小杉健二, 納口恭明, 2002: 携帯式荷重測定器による積雪硬度の測定と木下式硬度計との比較, *雪氷*, **64**, 87-95.
- 6) 竹内由香里, 納口恭明, 河島克久, 和泉薫, 2001: デジタル式荷重測定器を利用した積雪の硬度測定, *雪氷*, **63**, 441-449.
- 7) 庄司敦, 和泉薫, 河島克久, 伊豫部勉, 2004: 高密度雪塊の衝撃力特性に関する研究, *寒地技術論文・報告集*, **20**, 268-273.