膜構造物における滑雪時の性状に関する研究

STUDY ON THE PROPERTY OF SNOW WHEN SLIDING OFF MEMBRANE STRUCTURE ROOF

山口英治^{*1}, 苫米地 司^{*2}, 山田利行^{*3}, 中島 肇^{*4}, 伊東敏幸^{*5}, 星野政幸^{*6}
Hideharu YAMAGUCHI, Tsukasa TOMABECHI, Toshiyuki YAMADA,
Hajime NAKAJIMA, Toshiyuki ITO and Masayuki HOSHINO

For the purpose of snow disposal on the roof of membrane structure, it is necessary to investigate on the snow-slide after the fall from the roof. The purpose of the experimental study is to obtain basic data concerning with disposal method after the fall from the roof. This experiment was done using the outdoor model apparatus. This study is investigated on the fall distance and fall dispersion of the snow from the roof under various conditions. As a result, it became clear the fact which sliding and falling distance of the snow was influenced on the snow load. Furthermore, it was proved the existence not only kinetic friction force but also viscostic resisting force between the snow and roof when it is sliding.

Keywords : snow on the roof, membrane structure, viscostic resisting force, kinetic friction force
屋根雪, 膜構造物, 粘性抵抗力, 動摩擦抵抗力

1. はじめに

1988年に東京ドームが建設されて以来、四ふっ化エチレンコーティングガラス繊維布(以下「膜材」という。)を用いた膜構造物が、短期間の仮設的な特殊施設から恒久建築物として推移してきた。恒久建築物としての膜構造物の数は、大規模から小規模に至るまで数百以上建設されている¹⁾。膜材は、透過性に優れているために明るい室内空間を得ることができ、室内空間を「屋外に近い空間」としてイメージできる。このような「空間イメージ」や「乾いた土のグラウンド」を期待して、近年、雪の少ない太平洋沿岸地域ばかりでなく、1年の半分近くを雪に閉じ込められる北海道、青森県および秋田県などの雪国にも数多くの膜構造物が建設されている¹⁾。

しかし、膜材の透過性は、わずかな積雪でも損なわれるため、雪国に膜構造物を建設する場合には屋根雪処理方法が大きな問題となる。この屋根雪処理に関する研究は、膜構造物が注目され始めた1980年代には融雪処理の考え方が中心であったが、1990年代に入ると滑雪性

状に優れた膜材の特性を生かして融雪させながら滑雪処理する考え方に移行している^{2)~6)}。このように、屋根雪を滑雪させる場合には、滑雪後の飛距離や飛散範囲などを十分に考慮する必要がある。これらの屋根雪の性状は、建築物の配置計画や防災計画に大きく影響を与え、雪国の建築物を考える場合の重要な要因となる。さらに、これらの屋根雪の性状は大スパン構造物になるほど大きな問題となる。しかし、現状では屋根雪の滑雪後の性状に関する研究の蓄積が極めて少ない状況にある。

このような背景から、本研究では屋根雪の滑雪飛距離や飛散範囲に関する基礎資料を得ることを目的に、屋根葺材に膜材を用いた滑雪装置で屋外モデル実験を実施し、屋根雪の滑雪後の飛距離や飛散範囲を検討した。

2. 実験方法

2.1 実験装置

写真-1に、屋外に設置した実験装置の概要を示す。本実験装置は、北海道工業大学内の屋上(高さ13.1m)

^{*1} 太陽工業(株)技術本部設計部(当時 北海道工業大学 大学院生)・修士(工学)

^{*2} 北海道工業大学建築工学科 助教授・博士(工学)

^{*3} 清水建設(株)設計本部

^{*4} 清水建設(株)技術開発本部・修士(工学)

^{*5} 北海道工業大学建築工学科 助手

^{*6} 北海道工業大学建築工学科 教授・博士(工学)

Design Division, Taiyo Kogyo Corporation, M. Eng.

Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Hokkaido Institute of Technology, Dr. Eng.

Shimizu Corporation deputy General Eng.

Shimizu Corporation, M. Eng.

Research Assoc., Dept. of Architecture, Hokkaido Institute of Technology

Prof., Dept. of Architecture, Hokkaido Institute of Technology, Dr. Eng.

3. 実験結果

雪モデルの滑走中および滑走後の挙動を観察すると、雪モデルは、ブロック形状を保ちながら大きな揺れもなく一気に滑走して落下した。滑走後は、雪モデルの隅角部で多少の分離がみられたが、大きく分離することなくブロック形状を保ちながら雪面に衝突し、前後に大きく飛散した。これらの実験結果を基に、滑走飛距離、滑走抵抗力および滑走後の性状について検討すると、以下のようになる。なお、実験に用いた雪モデルの密度は $0.25 \sim 0.35 \text{ g/cm}^3$ 、含水率は $5 \sim 9 \%$ でしまり雪に近似した状態であった。

3.1 滑走飛距離

これまでの屋根雪の滑走飛距離に関する研究では、動摩擦抵抗力のみを考慮した質点の運動法則に従い下式で飛距離を求めている^{8),9)}。

$$D = V \cdot \cos \theta (\sqrt{(V \cdot \sin \theta \cdot g^{-1})^2 + 2H \cdot g^{-1}} - V \cdot \sin \theta \cdot g^{-1}) \dots \dots \dots (1)$$

$$\text{ただし、} V = \sqrt{2 \cdot g \cdot L (\sin \theta - \mu_k \cdot \cos \theta)} \dots \dots \dots (2)$$

$$\mu_k = (g \cdot \sin \theta - a) \cdot (g \cdot \cos \theta)^{-1} \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 D : 滑走飛距離 (m) θ : 滑走角度 ($^\circ$)

V : 飛び出し速度 (m/s) H : 軒高 (m)

L : 滑走距離 (m) μ_k : 動摩擦係数

g : 重力加速度 (m/s²) a : 加速度 (m/s²)

ここで、滑走距離 7 m の場合における式 (1) から得られた飛距離と実測値とを対比すると、図-2 となる。図のように、実測値では滑走角度 15° で 6.5 m 前後、滑走角度 20° で 8 m 前後の飛距離となり、滑走角度の増加に伴い滑走飛距離が顕著に増加する。しかし、滑走角度 25° になると 8.5 m 前後の飛距離となり、緩慢な増加傾向を示す。これらの実測値は、図中の実線で示す $\mu_k=0$ と $\mu_k=0.2$ を用いて算出した飛距離の計算値の間に位置しているが、滑走角度が低いほど計算値との差が大きくなり、計算値と必ずしも一致する傾向は見られない。各滑走角度ごとの飛距離をみると、積雪重量が大きいほど飛距離が大きくなる傾向にあり、各角度とも滑走距離の 30 % 程度に相当する 2 m 前後のバラツキがみられる。

図-3 に、積雪深が 30 cm (積雪重量 $75 \sim 105 \text{ kg/m}^2$) における滑走距離と滑走飛距離との関係を示す。図中には、前述の式 (1) から得られる滑走飛距離の値を合わせて示してある。図のように、滑走飛距離の実測値は滑走距離の増加に伴い緩慢な増加傾向を示す。これに対し、計算値は滑走距離の増加に伴い急激な増加傾向を示し、実測値と計算値とでは大きく異なる傾向を示す。これらの実測値と計算値との差をみると、滑走距離が 3.3 m では実測値が計算値を上回る。逆に、滑走距離が 7.0 m になると計算値が実測値を上回り、さらに滑走距離が長くなると両者の差が大きくなる傾向を示す。

したがって、滑走距離が長くなる大スパン構造物など

には式 (1) を適応できない。これらのことから、滑走飛距離の算出には、これまで用いられていた運動法則式だけでは不十分であり、動摩擦抵抗力以外の抵抗力も考慮することが必要と考える。

3.2 滑走抵抗力

前述のように、滑走飛距離の算出には動摩擦抵抗力を考慮するだけでは不十分である。さらに、これまでの屋根雪の滑走性状に関する研究によると、滑走抵抗力として動摩擦抵抗力のほかに粘性抵抗力もあることが指摘されている^{10),11)}。これらの考え方から判断すると、滑走飛距離は動摩擦抵抗力と粘性抵抗力とを同時にとらえて検討する必要がある。ここで、滑走時の屋根雪に作用する抵抗力は図-4 のように仮定できる。滑走抵抗力 R (kg/m²) は式 (4) に示すように、粘性抵抗力と動摩擦抵抗力との和となる。この関係を用いて屋根雪の飛跡を求めると式 (5) となる。式 (5) から R を求めると式 (6) となる。

$$R = C + \mu_k \cdot M \cdot \cos \theta \dots \dots \dots (4)$$

$$(M(4 \cdot L(M \cdot \sin \theta - R) \cos^2 \theta)^{-1}) D^2 + \tan \theta \cdot D - H = 0 \dots \dots \dots (5)$$

$$R = M(\sin \theta - (D^2(4 \cdot L \cdot \cos^2 \theta(H - D \cdot \tan \theta)^{-1}))) \dots \dots \dots (6)$$

ここに、 μ_k : 動摩擦係数 H : 軒高 (m)

図-2 滑走飛距離と滑走角度との関係(滑走距離 7 m との関係)

図-3 滑走飛距離と滑走距離との関係(積雪深 30 cm, 積雪重量 $75 \sim 105 \text{ kg/m}^2$)

θ : 滑雪角度 (°) D : 滑雪飛距離 (m)
 L : 滑走距離 (m)
 C : 粘性抵抗力 (kg/m²)
 M : 積雪重量 (kg/m²)

ここで、本実験結果を用いて式 (6) から得られる R と $M \cdot \cos \theta$ との関係を見ると、図—5 となる。図のように、いずれの滑雪角度においても $M \cdot \cos \theta$ の増加に伴い R の値は大きくなる傾向を示し、図中の式で近似できる。この回帰式は式 (4) に対応し、式の傾きが μ_k 、切片が C に相当する。これらの回帰式から得られた動摩擦係数および粘性抵抗力の関係を見ると、図—6 となる。図のように、粘性抵抗力 C は滑雪角度の増加に伴い増加する傾向を示し、逆に動摩擦係数は滑雪角度の増加に伴い減少する傾向を示す。これらの値を遠藤らのフッ素樹脂塗装鋼板などを用いた実験結果 ($C=2.5 \sim 3 \text{ kg/m}^2$, $\mu_k=0.13 \sim 0.15$) と対比すると、両者とも本実験結果の方が比較的小きな値を示し、膜材が滑雪し

図—4 滑雪時の屋根雪に作用する力の釣合い

図—5 滑雪距離抵抗力と $M \cos \theta$ との関係

図—6 粘性抵抗力、動摩擦係数と滑雪角度との関係

やすい屋根葺材であることを示している¹¹⁾。滑雪直後の膜面上を観察すると、滑走時の摩擦熱によって発生したと考えられる微量の水膜がみられる。前述の膜材と雪モデルとの界面に働く粘性抵抗力は、この水膜によって発生していると考えられる。膜材と雪モデルとの界面に生ずる水膜の厚さは粘性流体の法則に従うと下式で求められる¹²⁾。

$$C = \mu_c \cdot A \cdot \Delta V \cdot \Delta Y^{-1}$$

ここに、 μ_c : 水の粘性係数 (kgf·s/m²)

A : 膜材と雪モデルとの見かけ状の接触面積 (m²)

ΔY : 膜材と雪モデルとの界面の微小な距離 (m)

ΔV : 雪モデルが傾斜台を滑雪する時の速度 (m/s)

ここで、本実験結果で得られた粘性抵抗力から膜材と雪モデルとの界面の微小な距離 ΔY を求めると、0.13 ~ 0.28 mm の薄い厚さとなる。なお、水の粘性係数は、1 atm, 0°C における水の粘性係数 ($182.7 \times 10^{-6} \text{ kgf·s/m}^2$) を用いた。すなわち、屋根雪の滑雪に必要な水分量は、この薄い微小空間に介在していることになる。

このように、滑雪抵抗力として動摩擦抵抗力と微量の水膜によって発生していると考えられる粘性抵抗力とが作用している。ここで、各滑雪角度における両者の抵抗力の作用度合いをみると図—7 となる。図のように、動摩擦抵抗力は積雪重量の増加に伴い大きくなり、滑雪角度の増加に伴い減少する。この減少傾向は積雪重量が大きいほど顕著である。これに対し、粘性抵抗力は滑雪角度の増加に伴い増加し、両者は相反する傾向を示す。これらの傾向をみると、滑雪抵抗力として滑雪角度 15° では動摩擦抵抗力が大きく作用し、滑雪角度 25° では粘性抵抗力が大きく作用している。すなわち、低い角度では動摩擦抵抗力が大きく作用し、逆に角度の増加に伴い粘性抵抗力の影響が大きくなる。

次に、滑雪抵抗力と滑雪角度との関係を見ると図—8 となる。図のように、積雪重量 60 kg/m² を超える範囲では滑雪角度 20°, 25° に比べて滑雪角度 15° の滑雪抵

図—7 粘性抵抗力、動摩擦抵抗力と滑雪角度との関係

図-8 降雪抵抗と降雪角度との関係

図-9 飛散範囲の模式図

抗力が大きくなる。これに対して、積雪重量 60 kg/m^2 未満の範囲では降雪角度による降雪抵抗の差異がみられない。また、降雪角度 20° 、 25° では、いずれの積雪重量においても降雪抵抗が同程度の値を示す。したがって、この範囲が降雪飛距離の最大値を示す増減の分岐角になると考えられる。

3.3 屋根雪の降雪後の飛散

降雪飛距離を検討する場合、屋根雪は降雪後に飛散することから降雪飛距離に飛散の範囲を加える必要がある。滑走距離 7 m の実験で図-9 に示す L_F と L_R を測定して飛散範囲を検討した。なお、落下場所はアスファルト上に $3\sim 4 \text{ cm}$ 程度積雪させた状態とした。飛散距離と降雪角度との関係を見ると、図-10 となる。図のように、いずれの積雪重量においても降雪角度の増加に伴い飛散範囲が増加する傾向を示す。各降雪角度ごとの L_F と L_R とを対比すると、 L_F が L_R の $1.5\sim 2.3$ 倍程度となり常に L_F の方が大きい値を示す。この傾向は積雪重量が大きいほど顕著である。さらに、この飛散距離は降雪角度 20° を超えると降雪飛距離よりも大きくなる場合がある。なお、屋根雪の落下位置に 30 cm 程度の新雪（全層平均積雪密度 0.15 g/cm^3 程度）がある場合における予備実験結果をみると、飛散距離が小さくなることから落下位置の積雪状況によっても飛散距離が大きく

図-10 飛散距離と降雪角度との関係

図-11 飛散距離と衝撃力との関係

異なると考える。

このように、飛散距離は積雪重量によって大きく異なることから、屋根雪が雪面に衝突するときの衝撃力の影響を大きく受けていると考えられる。ここで、力学的エネルギー保存の法則から求められる衝突時の運動エネルギー量を衝撃力として、この衝撃力と L_F との関係をみると図-11 となる。図のように、衝撃力の増加に伴い L_F が大きくなる傾向を示し、図中の式で近似できる。したがって、飛散距離は衝撃力を考慮して算出しなければならない。

4. 降雪飛距離および飛散距離の算出法

前述のように、降雪飛距離は粘性抵抗と動摩擦係数の影響を大きく受け、飛散距離は落下時の衝撃力の影響を大きく受けることが明らかとなった。これらの要因を考慮した降雪角度 25° 程度までの降雪飛距離と飛散距離の算出法を整理すると以下ようになる。

降雪飛距離 D は下式で求められる。

$$D = V \cdot \cos \theta (\sqrt{(V \cdot \sin \theta \cdot g^{-1})^2 + 2 \cdot H \cdot g^{-1}} - V \cdot \sin \theta \cdot g^{-1})$$

ただし,

$$V = \sqrt{(2 \cdot g \cdot L (M \cdot \sin \theta - \mu_k \cdot M \cdot \cos \theta - C)) \cdot M^{-1}}$$

ここに, D : 滑雪飛距離 (m) M : 積雪重量 (kg/m^2)

θ : 勾配 ($^\circ$) V : 飛び出し速度 (m/s)

L : 滑走距離 (m) H : 軒高 (m)

g : 重力加速度 (m/s^2)

μ_k : 図—6 から得られる動摩擦係数

C : 図—6 から得られる粘性抵抗力

滑雪後の飛散距離 L_F は下式で求められる。

$$L_F = 3.4 \cdot \ln(P) - 15.4$$

ここに, P : 衝撃力 ($\text{kgf} \cdot \text{m/m}^2$)

5. まとめ

本研究では, 膜構造物を対象とした屋根雪の滑雪後の飛距離や飛散範囲について屋外実験で検討した。その結果, 滑雪飛距離は粘性抵抗力と動摩擦係数の影響を大きく受けることが明らかとなった。したがって, 滑雪飛距離は動摩擦抵抗力と粘性抵抗力とを同時にとらえて検討する必要がある。さらに, 落下後の飛散範囲は衝撃力の増加に伴い大きくなる傾向を示すことから, 衝撃力を考慮して算出する必要がある。本実験結果から, これらの要因を考慮した滑雪飛距離や飛散距離の算出法に関する基礎的な資料を得ることができた。なお, 本実験では最も単純な屋根形状を想定して実施したため, 滑雪飛距離や飛散に関する一般式を得るためには屋根形状の影響や膜面の温度条件などの検討が必要である。

参考文献

1) 新建築社企画編集部: 膜構造デザインの系譜, (株) 新建築社, 1990. 9

- 2) 川島 実ほか 3 名: 空気膜構造 (エアサポートドーム) 融雪実験 第 1 報, 第 2 報, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 787~790, 1984. 10
- 3) 宮川保之ほか 1 名: 空気膜構造棟に関する実験・研究その 8 大型模型による融雪実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 629~630, 1985. 10
- 4) 西 安信ほか 2 名: 空気膜構造における融雪実験その 2, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 895~896, 1986. 8
- 5) 苫米地司ほか 3 名: 膜構造物の屋根雪処理に関する基礎的研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 426 号, 1991. 8
- 6) 大塚清敏ほか 5 名: 膜構造の雪処理に関する研究, (社) 日本膜構造協会, 膜構造研究論文集'90, No. 4, pp. 55~68, 1990. 12
- 7) 渡辺正朋: 屋根葺材の滑雪特性に関する基礎的研究, 東北大学学位論文, pp. 65~73, 1990. 6
- 8) 阿部 修: 大型傾斜屋根における軒下落雪の堆積形状, 平成 2 年度日本雪氷学会全国大会講演予稿集, p. 7, 1990. 6
- 9) 渡辺正朋: 屋根葺材の滑雪特性に関する基礎的研究, 東北大学学位論文, pp. 155~168, 1990. 6
- 10) 前田博司ほか 1 名: 屋根の雪荷重に関する基礎的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 559~560, 1975. 6
- 11) 遠藤八十一ほか 6 名: 屋根雪の滑落条件と飛距離, 寒地技術シンポジウム'88 講演論文集, pp. 220~225, 1988. 11
- 12) 生井武文: 流れの力学, (株) コロナ社, pp. 3~7, 1976. 10

(1991 年 9 月 10 日原稿受理, 1992 年 4 月 13 日採用決定)