

膜構造物の雪荷重の考え方

本 間 義 教*

梗 概

本報告は、膜構造物の屋根雪処理に関する一連の研究成果を基に、融雪装置を有する膜構造物の雪荷重に対する考え方を述べると共に、札幌市を例にとり、実験・実測結果に基づき作成した「雪荷重計算プログラム」によりシミュレーション解析を行い、その考え方の妥当性を証明した。更に、実験・実測結果並びにシミュレーション解析結果に基づき、設計雪荷重の算定方法等を提案したものである。

1. はじめに

膜構造物は、透光性のよい膜材を用いることにより、従来の建物にない明るい空間を作り出す。このため、近年多雪地域において、冬季の活動の場を提供する建物として、膜構造物の需要が増加してきている。

多雪地域に膜構造物を建設する場合、設計上、雪荷重が支配的な外力となる。膜構造物では、構造面から積雪による膜材のクリープを防ぐため、また、建物機能面から自然照度確保のため、融雪等により屋根雪を除雪するのが通常である。

膜構造物の許認可制度であるが、大規模なものは、日本建築センターの評定を、中小規模のものは、日本膜構造協会の審査を受ける必要がある。評定等における雪荷重に関する指導は、雪荷重は、行政値またはそれ以上の値（例えば、50年或は100年再現期待値）を採用するよう指導され、更に、融雪装置を設置するよう指導されていると聞き及んでいる。

このように、融雪装置を設置した場合においても、雪荷重の低減は認められず、逆に、過大な雪荷重を見込まなければならず、多雪地域における膜構造物の普及を阻害する一要因となっている。

最近、膜構造物の設計雪荷重の低減が設計者側から

叫ばれているが、荷重低減が認められない要因として以下の項目が考えられる。

- ①多雪地域における膜構造物の実績が少ないこと。
- ②融雪装置の信頼性、性能の有効性を証明する実績が少ないこと。
- ③万が一事故が発生した場合、社会的に与える影響が大きいこと。

最大の要因としては、上記②に示した融雪装置の信頼性および性能の有効性を立証するデータを、設計者側が持ち合わせていないことによるものと考えられる。

本報告は、これまで行なって来た研究成果^{1)~4)}を基に、膜構造物に対する雪荷重の考え方について述べると共に、雪荷重の低減を提案するものである。

なお、雪荷重低減を提案するに当たり、提案内容をより具体的に説明するため、建設地点として札幌市を例にして述べる。

2. 降雪強度の再現期待値（札幌市）

札幌市における1日、3日および7日降雪強度と再現期間との関係を、図-1および表-1に示した。3日および7日降雪強度は、日降雪強度を累積して求めた。統計期間は、1951年～1986年の36年間である。再

*：（株）大林組技術研究所流体研究室

現期待値の推算方法は、Gumbel分布を採用し、回帰直線は、Gringortenの積率法で求めた。データのプロットは、Hazen plotによった。

降雪強度の100年再現期待値は、1日降雪強度が72.8cm、3日降雪強度が109.1cm、7日降雪強度が161.4cmである。

3. 雪荷重の考え方

雪荷重は、建築基準法施行令第86条（以下、第86条と記す）で規定されている。第86条では、「積雪荷重は、積雪の単位重量にその地方の垂直最深積雪量を乗じて計算しなければならない」としている。この時の積雪の単位重量は、 $2\text{Kg/m}^2/\text{cm}$ 以上としなければならないとしている。積雪の単位重量は、多雪地域においては、特定行政庁が別に定め、一般的に $3\text{Kg/m}^2/\text{cm}$ 以上としている。第86条における積雪荷重の考え方は、冬期の累進積雪量の最大値が屋根に積雪しているものとして、それにその雪の単位重量（雪密度）、即ち、圧密された状態の単位重量を乗じるものである。また、日本建築学会、建築物荷重指針・同解説では、基準となる垂直最深積雪量を50年再現期待値で与えている他は、基本的に第86条と考え方は同じである。

膜構造物において、屋根上の積雪は、融雪等により1日或は数日で除去し、屋根上に長期間積雪させないとした場合、第86条の考え方は妥当とは言えない。

膜構造物では、融雪等により屋根上の雪を数日で除去するものとした場合、雪荷重は、除去しえるまでの期間の降雪強度に、積雪直後の雪密度を乗じて算定できるものと考えられる。

この場合、雪密度および降雪強度を、どの程度の値に設定すれば良いか問題となる。積雪直後の新雪の密度は、本研究における実測では、雪質にかかわらず 0.08g/cm^3 ($0.8\text{Kg/m}^2/\text{cm}$)程度であった。また、北陸地方の新雪の密度は、雪質にかかわらず 0.08g/cm^3 程度と言われている。これより、雪荷重の算定に用いる雪密度 ρ は、 $\rho=0.10\text{g/cm}^3$ と設定すれば安全側の値となる。降雪強度は、豪雪の発生確率と構造物の耐用年数を考慮して、再現期間を定める必要がある。降雪強度の再現期間は、設計地震力或は設計風速の再現期間を参考にとすると、一般的な膜構造物で100年、重要度高いもので100年以上とすることが望ましい。

即ち、融雪装置を有する膜構造物の雪荷重は、次式で算定できるものと考えられる。

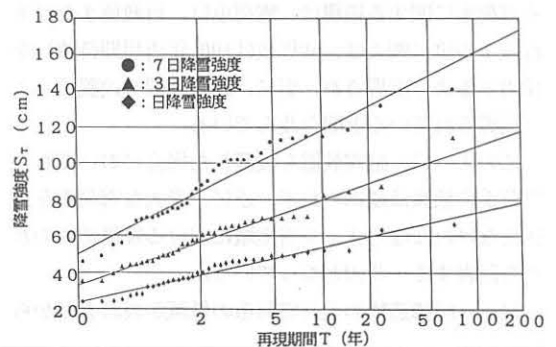
$$\text{雪荷重} = \text{雪密度} \times \text{降雪強度} \times \text{除雪に要する期間の100年再現降雪強度 (cm)} \quad (3.1)$$

札幌市における雪荷重は、行政値が 300Kg/m^2 ($= 100\text{cm} \times 3\text{Kg/m}^2/\text{cm}$)、建築学会荷重指針による50年再現期待値は、 486Kg/m^2 ($= 162\text{cm} \times 3\text{Kg/m}^2/\text{cm}$)である。前述の考え方に基づいて、100年再現7日降雪強度の雪荷重を式(6.3.1)から算定すると 161.4Kg/m^2 ($= 161.4\text{cm} \times 1\text{Kg/m}^2/\text{cm}$)となる。このように、行政値等と(3.1)式による算定値とで約 140Kg/m^2 以上の差がある。どちらが実情に即し、妥当であるかについては、後述する。

表一 降雪強度と再現期間の関係（札幌）

| 再現期間 | 降雪強度 | | |
|------|------------|------------|------------|
| | 7日 (cm) | 3日 (cm) | 1日 (cm) |
| 200 | 174 | 118 | 78 |
| 100 | 161 | 109 | 73 |
| 50 | 149 | 101 | 67 |
| 10 | 119 | 80 | 54 |
| 年平均値 | 88.5 | 59.4 | 40.3 |
| 標準偏差 | 23.2 | 15.9 | 10.4 |

$$\begin{aligned} 7\text{日降雪強度 } S_T &= 88.47 + 18.12 \{[-\ln\{-\ln(1-1/T)\}] - 0.5572\} \\ 3\text{日降雪強度 } S_T &= 59.39 + 12.36 \{[-\ln\{-\ln(1-1/T)\}] - 0.5572\} \\ 1\text{日降雪強度 } S_T &= 40.25 + 8.90 \{[-\ln\{-\ln(1-1/T)\}] - 0.5572\} \end{aligned}$$



図一 降雪強度と再現期間の関係（札幌）

4. 屋根積雪のモデル計算

ここでは、降雪下における、融雪或は強制落雪による屋根積雪の経時変化、および融雪装置が故障した場合の積雪の経時変化について、シミュレーション解析結果を基に述べる。

表一2 解析条件

| | |
|-------------------------|--|
| ①解析モデル | 膜屋根の直径 100 m、 ライズスパン比 0.3 |
| ②融雪能力 | 2 cm/時間、48 cm/日 |
| ③雪密度 | 0.10 g/cm ³ |
| ④降雪強度 | 3 cm/時間、72 cm/日 100年再現 1日降雪強度相当 |
| ⑤融雪装置 運転停止後 の降雪強度 | 100年再現 3日降雪強度 (109cm/3日) |
| ⑥融雪装置 運転条件 | 融雪運転：24時間運転 |
| | 融雪・強制落雪併用運転： 融雪 6～18時運転 18～6時休止 |
| ⑦融雪装置の 熱源燃料の 備蓄量 | 融雪装置熱源動力の外部からの 供給停止後、最大能力で3日間 連続運転可能な備蓄量 |
| ⑧融雪装置の 系統数 | 2系統 |

融雪能力は、5年再現 1日降雪強度程度の降雪を、1日24時間で融雪できる能力とした。

降雪強度は、100年再現 1日降雪強度相当とし、この降雪が連日継続するものとした。このような降雪は、実際には起こり得ないものであるが、解析の有効性および前章の雪荷重の考え方の妥当性を証明するため、この条件を採用した。

融雪装置故障後の降雪強度を 100年再現 3日降雪強度(109cm/3日)とした。過去の豪雪において、都市部でライフライン停止後、復旧に要した期間が大概一週間程度であり、また、降雪をもたらす低気圧の通過期間も長くて一週間程度である。

これより、融雪装置熱源動力の外部からの供給停止後、復旧に要する期間を一週間とし、その間の最低3日間はバックアップ運転できるものとして、バックアップ停止後から復旧までの期間の降雪強度とした。

融雪装置故障子の対応は、装置を2系統以上にし、融雪能力を維持するものとする。

4.1 解析条件

解析方法については、文献1で詳述したので参照されたい。解析条件は、表一2に示した。

4.2 解析結果

解析結果は、図一2に示した。

(1) 融雪運転

融雪運転のみの場合、屋根面には、時間降雪量と時間融雪量の差が積雪し、面圧20Kg/m²(積雪深20cm相当)以上になると、一部で自然落雪が誘発される。最大雪荷重は、約34Kg/m²であった。

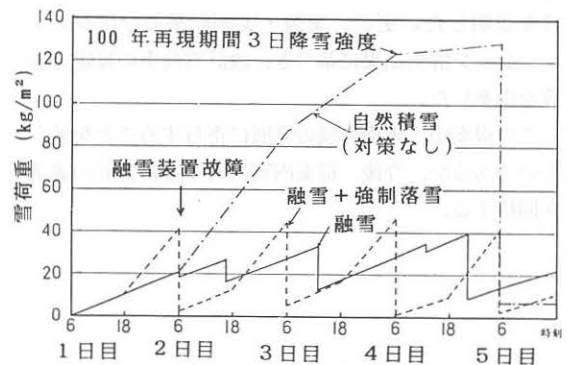
(2) 融雪・強制落雪併用運転

この方式は、日中融雪し、夜間は融雪を停止して積雪させ、翌朝融雪開始と同時に落雪させるものである。強制落雪後の荷重が零にならないのは、屋根中央部の屋根勾配が緩やかな部分で、落雪が生じないためである。この方式による最大雪荷重は、48Kg/m²であった。

(3) 融雪装置停止の場合

これは、融雪装置が故障し、復旧するまでの期間に、100年再現 3日降雪強度の大雪があった場合を想定したものである。融雪装置は、図中2日目に備蓄燃料による運転が停止し、5日目に復旧したものとした。積雪は、降雪がそのまま積もるものとし、自然落雪の発生は考慮していない(実際には落雪が生じる)。この場合の最大雪荷重は、128Kg/m²であった。

このように、札幌市における行政値或は建築学会荷重指針値は、本解析結果と比べ3～5倍の荷重値となっており、融雪装置を有する膜構造物にとって、如何に過大な荷重を与えているかが分かる。



図一2 雪荷重の時間変化(計算値)

5. 雪荷重の低減について

ここでは、これまでの研究成果を基に、融雪装置を有する膜構造物に対する雪荷重の低減を提案すると共に、雪荷重低減に必要な条件について述べた。

5.1 設計雪荷重の算定 (案)

- (1) 融雪装置を有する膜構造物の設計雪荷重は、次節に示した荷重低減に必要な条件を満足した場合に、次の算定方法で算出した値とすることができる。
- (2) 設計雪荷重は、降雪強度に雪密度を乗じて算定するものとする。但し、降雪強度は、再現期間100年以上の3日降雪強度とし、密度は $1 \text{ Kg/m}^2/\text{cm}$ 以上とする。

5.2 荷重低減に必要な条件 (案)

- (1) 対象は、正規に維持管理される膜構造物とする。
- (2) 融雪装置は、2系統以上とし、熱源の燃料備蓄は3日以上とする。
- (3) 融雪能力は、5年再現1日降雪強度の降雪に対し1日で融雪できる能力以上とする。
- (4) 融雪装置の性能は、実験或は解析等により定量的に提示するものとする。

6. まとめ

以上、融雪装置を有する膜構造物の雪荷重に対する考え方を述べると共に、札幌市を例にとり、実験・実測結果に基づき作成した「雪荷重計算プログラム」によりシミュレーション解析を行い、その考え方の妥当性を証明した。更に、実験・実測結果並びにシミュレーション解析結果に基づき、設計雪荷重の算定方法等を提案した。

この提案が、膜構造物の発展に寄与することを願うものであるが、今後、提案内容に対する各方面の論議を期待する。

謝辞

本研究の遂行に当たり、北海道大学工学部建築工学科教授・柴田拓二博士並びに同助教授・城攻博士のご指導を賜りました。ここに、厚く謝意を表します。

参考文献

- (1) 大塚清敏、本間義教、他6名、膜構造物の雪処理に関する研究、膜構造研究論文集'90、No.4、日本膜構造協会、1990.11
- (2) 大塚清敏、本間義教、他5名、膜構造物の融雪・滑雪に関する研究、膜構造研究論文集'91、No.5、日本膜構造協会、1991.12
- (3) 本間義教、大塚清敏、他5名、膜構造物の雪処理に関する研究その1～4、日本建築学会大会講演梗概集、1990.10
- (4) 本間義教、大塚清敏、他5名、膜構造物の雪処理に関する研究その5～9、日本建築学会大会講演梗概集、1991.9

A PROPOSAL OF AN IDEA OF
DESIGN SNOW LOADS FOR MEMBRANE STRUCTURES

Yoshinori HOMMA*

SYNOPTICS

A new idea of determining the design snow loads for membrane structures in the snow rich regions is presented in this paper. Based on the results obtained in the field experiments on the artificial removal of snow from membrane structures along with numerical simulations, it turned out that the basic concept of the new idea would be appropriate in considering the design snow loads for membrane structures. Numerical simulations were performed on the behaviors of the roof snow loads on the full scale membrane structures in the Sapporo City under the possible heaviest snow fall event accompanied by the breakdown of snow melting equipments. From the experiments and numerical simulations made here, new criteria for use in the determination of design snow loads for membrane structures are derived and proposed.

* Technical Reseach Institute, Obayashi Corporation