

膜屋根構造物の屋根上積雪荷重評価について

小竹 達也*1
伊東 敏幸*2
苔米地 司*3

梗 概

現在、石川県小松市において閉閉機構を持つ大型膜屋根構造物が建設中である。小松市は、その年最大積雪深の再現期待値が、再現期間50年で153cm、100年で175cmという日本でも有数の豪雪地帯に位置している。そのため、屋根上積雪荷重の評価や屋根雪処理の方法が大きな課題となる。

本論文では、こまつドームにおける屋根上積雪荷重の評価とその確認実験及び計画上の対策について報告する。

1. はじめに

1.1 屋根上積雪荷重評価の現状

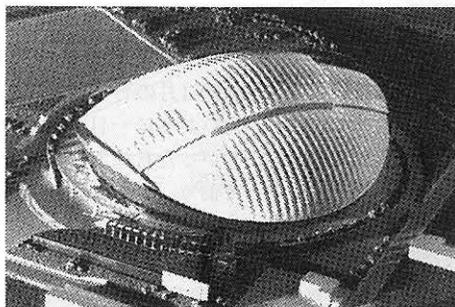
近年、多雪地域において明るく開放的な大空間に対する需要が高まっていることもあり、透光性に優れた膜材料を採用した大空間構造物が計画、建設されるようになってきた。多雪地域における屋根上積雪への対策としては、急勾配な三角屋根による滑雪方式やフラット屋根による堆雪方式等があり、その地域に適した対策がとられている。また、膜構造物においては屋根上積雪によってその透光性が損なわれるため、「融雪+滑雪」または「滑雪」により屋根上積雪を処理しているのが一般的である。

しかし、膜構造物の積雪荷重に関しては、膜材料が滑雪性が高い材料であるにもかかわらず、多雪地域における膜構造物の実績が少ないことや屋根上積雪の処理システムに関する有効性が十分に把握されていないなどの理由から、富山県における一棟¹⁾を除き、積極的に屋根雪処理をしない構造物と同等の荷重評価がなされているのが現状である。

こまつドームの計画においては、建設地の気象条件を考慮した膜屋根の滑雪特性について確認実験を含めた諸実験により検証し、実状に即した積雪荷重の設定を行った。

1.2 膜屋根構造物の概要

建物名称：(仮称)こまつドーム
建築場所：石川県小松市林町地内
建築面積：23,876.43㎡
延床面積：21,409.57㎡
階 数：地上4階
軒 高：GL+11.5m
最高高さ：GL+59.0m
構造形式：(屋根)S造
(下部)RC造(一部SRC造)
屋根材料：四ふっ化エチレン樹脂コーティングガラス繊維



図一 建物外観

*1 大成建設(株) 構造設計第一部

*2 北海道工業大学 助手

*3 北海道工業大学 教授・工博

本ドームは、屋根に開閉機構を持つ膜構造物であり、開口部の大きさは70m×55mである(図-1)。開閉方式は、2枚の開閉屋根がキールトラス上に配置された2本の円弧レール上を走行するウインチによるワイヤートラクション方式を採用した(図-2)。

屋根部分は鉄骨造であり、屋根面にはレールを支持する平行な2本のキール材を長径方向に架設し、これに直行したクロスガダーを井桁状に組み、屋根面の安定性を保持している。また、開閉屋根部分は開閉時のキール材の変形に追従し易い3ヒンジのフィーレンディール梁とした。固定屋根はV字断面の一方立立体トラスとし、下弦には直交方向の繋ぎ材を配して格子状とし安定性を高めた。エッジリングは水平方向に幅の広い鉄筋コンクリート造の変形断面で、屋根外周沿いに3次元に配置した。また、鉄筋コンクリート部材内にはPC鋼材によるプレストレスを導入した(図-3)。

屋根面は滑雪性を考慮し、屋根勾配を25°以上とすると共に、V字溝型断面としている(図-4)。V字型とすることにより屋根面の積雪を分断し、滑雪しやすくしている²⁾。また、膜材は四ふっ化エチレン樹脂コーティングガラス繊維布を用い、V字となるように隣り合う上弦材間に膜を張り、膜中央部を下弦材に取り付けたテンションロッドにより内側に引き込んでいく(図-5)。これは、屋根外表面に滑雪の妨げとなるものがないように配慮した結果である。

その他、積雪対策として建物周りに堆雪エリアを確保したり、温風を膜面に吹き付ける温風装置を設置する等の考慮もされている。

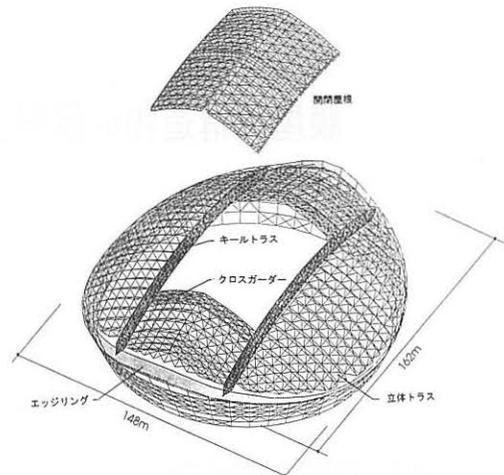


図-2 架構概要図

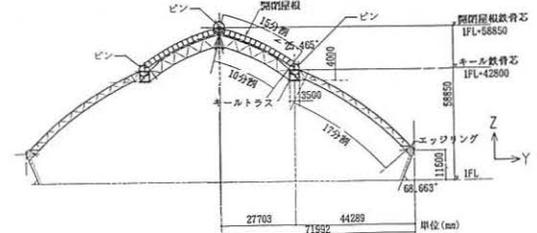


図-3 短径方向軸組図

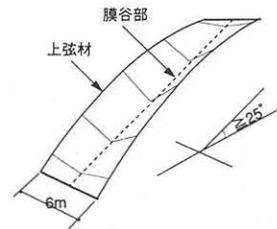


図-4 膜屋根詳細図

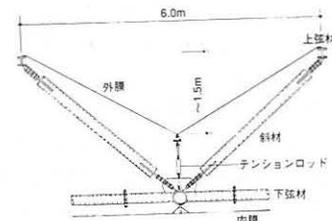


図-5 膜屋根詳細図

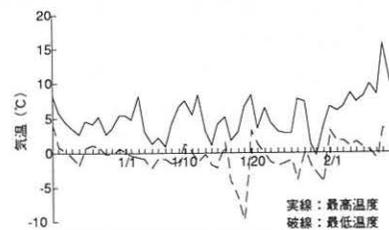


図-6 小松市の気温(1985年1月)

2. 小松市の積雪特性

2.1 小松市の気温の特徴

(財)日本気象協会・北陸センター作成の昭和40年1月から平成6年3月までの29年間の気象データによると、真冬日が13日ある。この中で2日間連続した例が2回あるだけで、3日間連続した例はない。この期間中に最低気温を記録した1985年1月の日毎の最高及び最低気温を図-5に示す。図のように一日中氷点下の日は殆どなく、-9.8℃まで下がった日においてもその日の内に+6.7℃まで上がっており、このことから小松市の冬期の気温レベルは高く、一日中氷点下の日の連続日数は最大で2日程度であると考えられる。

2.2 小松市の降雪・積雪の特徴

上記資料の内、昭和43年1月から平成6年3月までの26年間の観測結果から連続3日間積算降雪量をみると、表-1に示すように、その最大値は1985年12月の

118cmである。また、高橋の研究によると³⁾、小松市における積雪深の再現期待値は表-2となる。

3. 膜材の滑雪特性

滑雪する時に雪に働く力には図-6に示すように、①滑雪方向力、②静摩擦抵抗力、③凍着抵抗力、④引張抵抗力、⑤せん断抵抗力、がある。そして、①>②+③+④+⑤の時に滑雪は起こる。

ここでは、小松市の気象条件及び本ドームの形状を考慮した時の各抵抗力を算出し、屋根上積雪の挙動を推測する。

3.1 検討条件

滑雪に係わる常数は気温によって大きく異なり、既往の研究によると⁴⁾表-3となる。以下、気温を想定し滑雪状況を算定する。計算における記号及び計算条件を以下に示す。

- 積雪深さ：h cm
- 積雪幅：W m
- 積雪長さ：L m
- 屋根勾配：25°
- 積雪重量：1.5WLh kg

3.2 最高気温0℃以上の場合

(1) 滑雪方向力

$$F_g = m g \sin \theta$$

$$= 6.21 W L h$$

(2) 静摩擦抵抗力

$$F_{st} = \mu m g \cos \theta$$

$\mu = 0.15$ の場合：Fst=2.00WLh
 $\mu = 0.45$ の場合：Fst=5.99WLh

(3) 凍着抵抗力

気温が0℃以上より凍着抵抗力は働かない。
 $F_a = 0.0$

(4) 引張抵抗力

本ドームにおいては、棟部に雪割を設置し引張抵抗力の発生を防いでいる。

$$F_t = 0.0$$

(5) せん断抵抗力

V字型膜パネルを採用することによりせん断抵抗力は働かない。

$$F_s = 0.0$$

以上より

$$\textcircled{1} : F_g = 6.21 W L h$$

$$\textcircled{2} + \textcircled{3} + \textcircled{4} + \textcircled{5} : F_r = F_{st} + F_a + F_t + F_s$$

$$= 5.99 W L h \quad (\mu = 0.45)$$

ここで、 $F_g > F_r$ が成立している。即ち、屋根勾配が

°以上あり、気温が0℃以上の場合、積雪量hに係わらず滑雪が起こるといえる。

3.3 最高気温が0℃未満の場合

(1) 滑雪方向力

$$F_g = m g \sin \theta$$

$$= 6.21 W L h$$

(2) 静摩擦抵抗力

$$F_{st} = \mu m g \cos \theta$$

$\mu = 0.15$ の場合：Fst=2.00WLh
 $\mu = 0.20$ の場合：Fst=2.66WLh

表-1 連続3日間積算降雪量（過去26年間）

順位(発生日)	積算降雪量
第1位(1985.12.15~18)	118cm
第2位(1986.01.09~11)	98cm
第3位(1977.02.16~18)	81cm
第4位(1986.01.25~27)	77cm
第5位(1980.1.31~2.2)	75cm

表-2 小松市の積雪深の再現期待値

	50年	100年
年最大積雪深	153cm	175cm
年最大3日増分積雪深	113cm	129cm
年最大7日増分積雪深	129cm	147cm

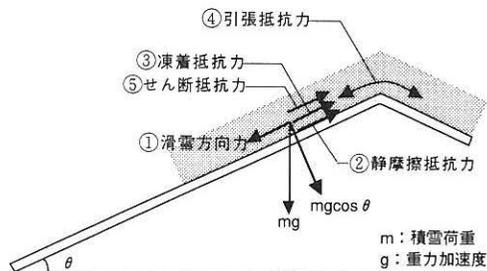


図-7 滑雪のメカニズム

表-3 気温と滑雪特性に係わる常数の関係

最高気温	積雪密度 ⁶⁾	静摩擦係数 ⁴⁾	凍着強度 ⁵⁾
0℃以上	0.15前後	0.15~0.45	0Pa
-1℃以上0℃未満	0.15前後	0.15~0.20	100Pa
-1℃以下	0.07前後	0.20~0.35	10000Pa

(3)凍着抵抗力

表-3より気温0℃付近の凍着強度は約100Pa (= 100N/m²)となる。

$F_a = 100WL$

(4)引張抵抗力

棟部雪割により働かない。

$F_t = 0.0$

(5)せん断抵抗力

V字型膜パネルを採用により働かない。

$F_s = 0.0$

以上より

a) $\mu = 0.15$ の場合

①: $F_g = 6.21WLh$

②+③+④+⑤: $F_r = F_{st} + F_a + F_t + F_s$
 $= 2.00WLh + 100WL$

ここで、 $F_g > F_r$ の場合、

$6.21WLh > 2.00WLh + 100WL$

従って、 $h > 23.8cm$

b) $\mu = 0.20$ の場合、 $F_r = 2.66WLh + 100WL$

同様に、 $F_g > F_r$ の場合、 $h > 28.2cm$

従って、気温が0℃未満においては24~29cm積雪する毎に滑雪が起こるといえる。

4. 小松市における滑雪実験

4.1 実験計画

本ドームの滑雪特性に対する確認実験を小松市内において行った。屋外試験体は、本ドームの屋根と類似した形状の屋根とし、本ドームの雪対策の有効性の確認と膜内部の加温により滑雪が促進されることの確認を行った。

- ・実験場所：石川県小松市大杉町マ52番地
大杉青年の家敷地内
- ・実験期間：1994年12月27日～1995年3月7日

4.2 屋外試験体及び観測方法の概要

図-8に屋外試験体の概要を示す。試験体の膜パネル形状は棟部がフラットで、軒部で谷深さが最大となるようなV字形状とし、滑雪幅は本ドームの1/2スケールの3.0mとした。

試験体上の積雪状況は、試験体から約10m離れた高さ約5.4mの位置にタイムラプスビデオを設置して2秒間隔で観測した。実験パラメーターとして、屋根勾配が20°の場合と25°の場合、試験体内部での採暖の有無の場合についてそれぞれ観測を行った。

測定項目としては、熱伝対を用いて、内部温度、膜面温度、膜面近傍温度についてハイブリッドレコーダーにより記録した。

4.3 観測地における気象条件

試験体を設置した小松市大杉における観測期間の降雪深及び外気温は、石川県土木事務所の雪量観測情報から収集した。これらの観測データは、1時間毎の観測値である。また、現地の風速が極めて弱いため、試験体上の積雪深は、滑雪または融滑雪が終了するまでの累積降雪深とした。

図-9に観測期間における1時間当たりの降雪深と発生回数との関係を示す。なお、この期間における1時間当たり1cm以上の降雪は180回観測された。1時間当たりの降雪深は1~2cmの場合が最も多く、最大で7cmの観測がみられた。累積降雪深は405cmであった。一般に1時間当たりの降雪量は降水量に換算すると10mm以上になることは希で通常1~2mmである。ここで、本調査期間の降雪深を密度0.15g/cm³と仮定して降水量に換算すると降雪深の最大値7cmは10.5mm/hとなる。すなわち、本観測で1時間当たりの降雪量としては極値に近い値が観測されたことになる。

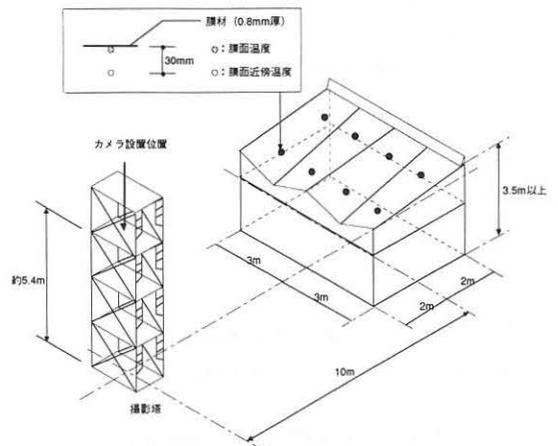


図-8 屋外試験体の概要

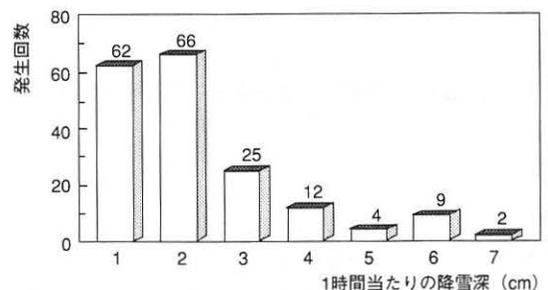


図-9 1時間当たりの降雪深と発生回数との関係

これらの降雪時における外気温の推移をみると、図-10に示すように0℃近傍で推移する場合が最も多く、-3℃以下での降雪は観測されなかった。これまでの研究によれば⁹⁾、滑雪抵抗力として最も大きな部分を占めている凍着強度は-2℃以上になると急激に減少する。従って、本実験で得られる滑雪現象は凍着強度の影響が小さいものと考えられる。

4.4 膜屋根上における積雪状況の観測結果

a) 採暖していない場合の積雪状況

膜屋根上の滑雪現象は、採暖がない場合に顕著に発生している。この時の滑雪現象は、図-11、12に示すように、まず軒先A部に巻だれが発生し、その後2つのV字部分を分割する形でB部からC部にかけて亀裂が発生するケースが多い。亀裂発生後、V字状の谷部へ移動しながら左右どちらかのV字屋根で滑雪が起こり、残りの屋根積雪が追従するように滑雪し、屋根面全体の滑雪が終了するケースが多い。これらの現象をみると、膜材をV字状に張ることは、屋根上積雪を分割し滑雪を促進させる有効な手段であるといえる。

b) 採暖している場合の積雪状況

採暖をしている場合の積雪状況をみると、外気温や降雪状況によって異なるが、融滑雪あるいは融雪現象が発生している。降雪が始まってから採暖をした場合は、膜面に一端雪が堆積し、融雪しながら融滑雪している。降雪が始まる前から採暖をしていた場合は、降雪量が6cm/h以下では融雪現象が発生している。

図-13に滑雪及び融滑雪が発生した場合の累積降雪深と膜面及び膜面近傍温度との関係を示す。採暖しない場合の滑雪現象は、いずれの累積降雪深においても膜面及び膜面近傍温度が0℃前後で発生している。融滑雪時の膜面及び膜面近傍温度は2~23℃の広範囲に分布しておりバラツキが大きい。これらの融滑雪現象をみると、移動状況が極めて緩慢で、滑雪の終了までの時間は、いずれの場合も6時間以上を要している。

図-14に融雪した場合における1時間当たりの降雪強さと膜面及び近傍温度との関係を示す。多少のバラツキがあるが、膜面温度で7.5℃以上、膜面近傍温度で15℃以上であれば、降雪強さ6cm/h程度の降雪は融雪可能であるといえる。この降雪深を前述と同様に降雪量に換算すると、9mm/hとなり極値に近い値となる。

4.5 膜屋根滑雪の実状と問題

豪雪地域でも比較的温暖な北陸地方に建つ膜構造物の実状に即した積雪荷重を設定するために、本実験は行われた。その結果以下のことが確認できた。

- ①膜材をV字状に張ることは、屋根上積雪を分割処理する上で有効な手段である。
- ②25°以上の勾配があれば、外気温0℃以上の時、数cmの屋根上積雪深で滑雪が起こる。
- ③外気温が-3℃以下では殆ど降雪がみられない。
- ④降雪現象は外気温が0℃近傍で多くみられ、この時の凍着強度の影響は小さいため、滑雪現象が起こりやすい。
- ⑤膜面温度で7.5℃以上、膜面近傍温度で15℃以上あれば降雪強さ6cm/h程度の降雪は融雪可能である。なお、1990年に富山市で行われた滑雪実験¹⁰⁾において

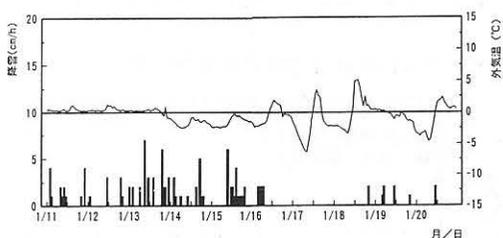


図-10 小松市の外気温と降雪深の関係

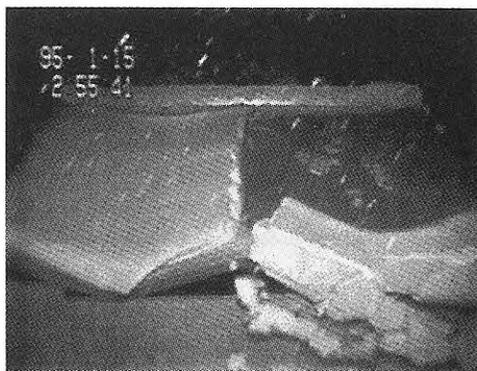


図-11 滑雪現象の様子（屋根勾配25°）

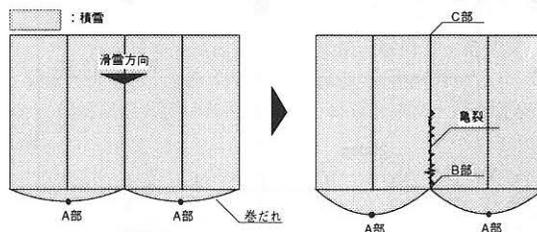


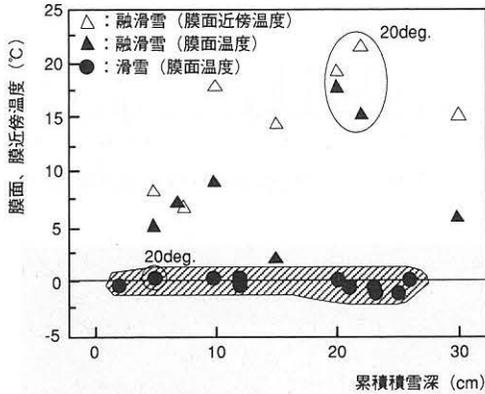
図-12 滑雪現象の模式図

でも本実験と同様な内容が確認されている。

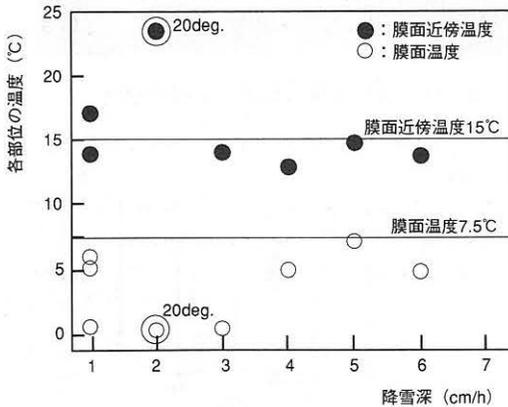
以下に滑雪実験及び既存膜構造物の調査から、屋根上に積もった雪の滑雪を妨げる要因として考えられる事柄を以下に列挙する。

- ①屋根棟部の積雪により滑雪を妨げる方向に引張抵抗力が生じる。
- ②屋根面上に突起物があるとその周りに雪が付着しこれが滑雪に対し抵抗する。
- ③積雪が屋根上横方向へ拡がる。
- ④滑雪後、軒下に堆雪した雪の高さが軒高を超えると屋根上積雪と軒下の堆雪がつながり滑雪が起きない。
- ⑤膜面温度が0℃以下になると凍着抵抗力（雪が凍って膜面に付着する力）が発生し、滑雪を妨げる。

5. 本ドームにおける雪対策と滑雪予測



図一13 滑雪及び融滑雪の場合における
累積降雪深と膜面及び膜面近傍温度との関係



図一14 融雪の場合における
1時間当たりの降雪深と各温度との関係

5.1 本計画における対策と効果

上記の要因に対する対策を以下に記す。なお、各番号は、上記要因の番号に対応させている。

- ①過去26年間のデータより最大1日降雪量（67cm）を求め、その状況でも有効に機能する高さ（70cm）の雪割を本ドームの棟部に設置する。
- ②膜への張力導入を膜下部からの引き込みにより行い、膜表面にはケーブル等、滑雪の障害や積雪の原因になるようなものを出さない。また、開閉屋根の走行レールが滑雪の妨げとなることを防ぐため防雪カバーをレール上に設置する。
- ③屋根の膜パネルには山谷を作り、山＝雪割、谷＝滑雪溝の役割を持たせている。これにより雪の横方向への拡がりを防いでいる。
- ④平年の積雪においては除排雪が不要であるような、十分な堆雪エリアを軒下にとる。平年を超える堆雪が予測された場合は、重機による除雪を行う。
- ⑤滑雪を促すように温風を膜面に吹き付ける温風装置を設置する。これにより凍着抵抗力の発生を防ぐ。

5.2 雪対策による効果

先の『4. 小松市における滑雪実験』で記したように、膜屋根では気温が0℃以上の場合、屋根上に積雪すると数cmで滑雪することが確認されている。本ドームでは、屋根勾配25°の確保、雪割の設置、押えケーブルを膜表面に出さない等、より滑雪しやすいように考慮されており、その結果として実験棟に近い形状になっているので滑雪の予測がしやすい。

また、『3. 膜材の滑雪特性』の検討結果より気温が0℃以下の場合においても24～29cmの積雪で滑雪することが予測でき、実際は温風装置の稼働により屋根面の温度は0℃以上になるので、もっと少ない積雪で滑雪することが予測できる。

以上の点において、本ドームは屋根面に積雪する可能性は極めて低いといえる。

6. 設計用屋根積雪荷重の検討

設計用屋根積雪荷重は、建築基準法施行令（以下令という）第三章第86条2項及び3項の規定に基づき、本建設地において小松市が規定で定める最深積雪量150cm、積雪単位重量 $3.0\text{kg/m}^2 \cdot \text{cm}$ を採用した。更に、令第86条4項の規定に基づき膜屋根の滑雪実験の結果、積雪荷重に乗すべき数値を屋根勾配25°以上において0.75以下と設定した。この結果、積雪荷重は

$$150\text{cm} \times 3.0\text{kg/m}^2 \cdot \text{cm} \times 0.7 = 337.5\text{kg/m}^2$$

を採用した。

以下に、この数値の量的な意味について記す。

- (1) 屋根勾配が 25° を超えると新雪が5cm積雪する毎に落雪するという実験結果より算出した積雪荷重 $7.5\text{kg}/\text{m}^2$ の45倍に相当する。
($5\text{cm} \times 1.5\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{cm} = 7.5\text{kg}/\text{m}^2$)
 - (2) 屋根上に29cmの積雪がある場合の積雪荷重 $43.5\text{kg}/\text{m}^2$ の7.8倍に相当する。
($29\text{cm} \times 1.5\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{cm} = 43.5\text{kg}/\text{m}^2$)
 - (3) 異常気象等により1日分の降雪が屋根に積雪するような事態を想定して小松市観測所における日最大降雪量(67cm)により算出した積雪荷重 $100.5\text{kg}/\text{m}^2$ の3.4倍に相当する。
($67\text{cm} \times 1.5\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{cm} = 100.5\text{kg}/\text{m}^2$)
 - (4) 2日間氷点下の日が続き上記積雪が2日分屋根に積雪するような事態を想定して、3日間の最大積算降雪量(118cm)により算出した積雪荷重 $117.0\text{kg}/\text{m}^2$ の1.9倍に相当する。
($118\text{cm} \times 1.5\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{cm} = 117.0\text{kg}/\text{m}^2$)
- * $1.5\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{cm}$: 新雪としての単位重量

今回の低減係数の設定は、多雪地域でも比較的温暖な富山県、石川県、福井市などの北陸地方については適用可能であるが、東北地方や北海道等の気温が低く一日中氷点下という日が続く地域には適用できない。また、屋根材料の四ふっ化エチレン樹脂コーティングガラス繊維布は極めて優れた耐候性を有しており、その耐久性は20年以上とされている。また、屋外暴露試験による表面状態の経年変化についても、5年経過後もほとんど変化がみられない¹⁰⁾。従って、今回の低減係数は時間経過による影響はほとんどないといえる。

本ドームの屋根勾配が 25° 以上であることから積雪荷重を $337.5\text{kg}/\text{m}^2$ としたが、これは想定される最大積雪荷重 $117.0\text{kg}/\text{m}^2$ の約2.9倍に相当することからも十分な積雪荷重であるといえる。

7. 設計用屋根積雪荷重の設定

表-4 積雪荷重の勾配低減の設定

勾配低減率	建築基準法	今回の設定
1.00	$0^\circ \leq \theta < 30^\circ$	$0^\circ \leq \theta < 25^\circ$
0.75	$30^\circ \leq \theta < 40^\circ$	$25^\circ \leq \theta < 30^\circ$
0.50	$40^\circ \leq \theta < 50^\circ$	$30^\circ \leq \theta < 40^\circ$
0.25	$50^\circ \leq \theta < 60^\circ$	$40^\circ \leq \theta < 60^\circ$
0.00	$60^\circ \leq \theta$	$60^\circ \leq \theta$

以上より表-4に示すように、本ドームでは建築基準法で屋根勾配 30° 以上において積雪荷重の勾配低減を行っているところを屋根勾配 25° 以上から適用した。

以上、建設地の気象特性の調査、膜屋根の降雪実験等により、膜屋根の降雪特性を考慮した積雪荷重の評価を行った。また、平成9年3月竣工後も完成したドームにおいて、降雪・融降雪の状況について観測していきたいと考えている。

最後に屋外実験の観測に際しては、小松市ならびに大杉青年の家の職員の方々には多大なご協力を頂きました。ここで感謝の意を表します。

(参考文献)

- 1) 「岩瀬スポーツ公園健康スポーツドーム膜屋根の積雪に対する耐久性の分析等業務報告書」アルセッド建築研究所
- 2) 福祉、山田、苫米地「構造物の屋根雪処理に関する実験的研究 その1 屋上積雪形状について」日本建築学会大会学術講演梗概集 1991年9月 P2054~2055
- 3) 高橋「建築構造物設計荷重の規定要因と総合評価に関する研究」東北大学博士論文 1990年
- 4) 苫米地、山口ほか「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 1991年8月 P99~105
- 5) 苫米地、山口「膜構造物における屋根上積雪荷重の制御に関する研究」(社)日本膜構造協会 膜構造研究論文集 1993年12月 P71~79
- 6) 「地域防災データ総覧危険物災害・雪害編」(財)消防科学総合センター
- 7) 雪氷辞典 日本雪氷学会編 1990年10月 P27
- 8) 苫米地ほか「屋根上積雪荷重の制御に関する基礎的研究」日本雪氷学会誌 雪氷56巻3号 1994年9月 P215~222
- 9) 石井、西川ほか「富山県膜構造屋根 融降雪・落雪実験報告書Ⅱ」(社)日本膜構造協会 1990年7月
- 10) 「建築用恒久膜材料技術資料」日東ケミファ株式会社

AN EVALUATION METHOD OF A SNOW LOAD FOR MEMBRANE ROOF STRUCTURES

Tatsuya Kotake *1

Toshiyuki Ito *2

Tsukasa Tomabechi *3

SYNOPSIS

A membrane roof structure with the retractable mechanism is built in Komatsu, Ishikawa prefecture currently. Komatsu is situated on a heavy snowy area, and the value for return period is 153cm for 50 years and is 175cm for 100 years. So the evaluation method of the snow load on the membrane roof and the method to control snow sliding on the roof are the main theme.

This paper deals with the evaluation method of the snow load on the membrane roof, the field experiment, and the measure against the snow on the plan.

*1 Taisei Corporation, Structural Engineering 1, Design and Proposal Div.

*2 Assistant, Dept. of Architecture, Faculty of Eng., Hokkaido Institute of Technology, Dr. Eng.

*3 Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Eng., Hokkaido Institute of Technology, Dr. Eng.