

Present State of Membrane Structures in Japan



Kenshi Oda*

Summary

Formerly, it was called a tent and now, it is called membrane structure. If saying a tent, it imagines the tent of Bedouin, Mongolia and North American Indian. It became clear from the excavated wall painting that have been covered with the retractable roof of the canvas on the auditorium at the amphitheater in Pompeii and became a topic. These tents were made of the animal skins or fabric woven with the flax plants, and these tents are still used. However, if saying membrane material at present, it says the one to have applied a coating resin to the textile. Because the base fabric of membrane material is a woven fabric, the relation between the stress and the strain is different to the direction of the weaving thread. Moreover, the tensile force must always occur in the membrane surface. From these reasons, because the membrane structure corresponds to the particular building material and the construction method about the Building Standard Law, it must be examined specially that the membrane structural building have the same or

any more safety as the provisions which was set to the Building Standard Law. Therefore, the technical standards about the membrane structural building became indispensable. In the paper, the kinds of the membrane materials, which are used for the membrane structural buildings, and technical standards process of the creating for the membrane structure buildings are introduced. Lastly, some of the soccer stadiums for 2002 FIFA World Cup KOREA/JAPAN which be covered with the roof of the membrane structures are presented.

1.はじめに

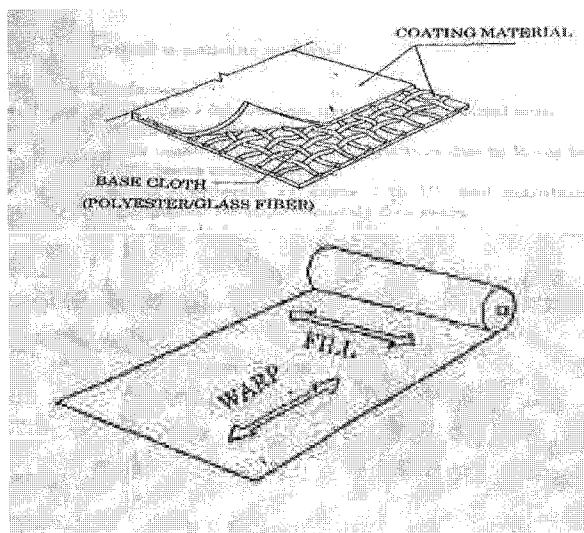
かつてはテントと呼ばれ今は膜構造と言う。テントと言えば、ベドウィンのテント、モンゴルのユルタ(ゲル)や北アメリカインディアンのティピーなどが思い浮かぶ。また、ポンペイの円形劇場の観覧席上屋は帆布の可動式屋根が取り付けられていたことが、発掘された壁畫から明らかになり話題となった。これらのテントは、動物の皮や麻を織りあげたものが使われ、今も使われているものもある。しかし、現在、膜材料と言えば、基布にコーティング材を塗布したものを言う。基布は織物であるため、織

* (株) 太陽工業 空間技術研究所 所長

の方向によって応力とひずみの関係が異なり、さらに、膜面内部は常に張力が生じていなければならない。これらの理由から、膜材料を用いた膜構造建築物は、日本の建築基準法上では特殊な建築材料及び構造方法に該当し、建設に当たって、特別に建築基準法・同施行令の規定と同等以上の安全性を有することの審査を受けなければならない。そのために、膜構造に関する技術基準が不可欠になる。本稿では、膜構造建築物で使われている膜材料の種類及び日本における膜構造建築物の技術基準の作成経緯を紹介する。最後に、2002 FIFA World Cup KOREA/JAPANにおける膜構造の屋根をもつサッカースタジアムのいくつかを紹介する。

2. 膜材料の発展

膜構造建築物に使われている膜材料は、図1に示すように繊維織布とコーティング材で構成され、織布は主に張力を負擔し、コーティング材はせん断力を負擔するうえ織布を保護し防水性や耐久性を付與する。



〈図 1〉 膜材料の構成と糸方向

繊維織布は、1950年頃まで帆船などに多く使われていた天然繊維による綿布が使われ、それに防水処理を施しサーカステントやキャンプテント等に使われていた。その後、化学繊維や合成繊維の開発により、1960年代には、レーヨンやナイロン、ビニロン

繊維が繊維織布に使われるようになった。1970年代には加工性や耐久性に優れたポリエステル繊維へと、さらに、ガラス繊維へと移っていく。ガラス繊維は、1940年頃にアメリカで工業化されるが、繊維の径が太く脆いため、膜材料に使われることはなかった。1970年頃になり、径が約 $3\mu\text{m}$ という極細のガラス繊維が製造可能となり、この繊維を約9600本束ねた糸で織った織布が開発された。このガラス繊維織布は耐折り曲げ性が著しく改良され、しかも高強度であるため大規模な膜構造建築物を可能にしていく。1970年に開催された萬國博覽會アメリカ館の空気膜構造に用いられた膜材料の繊維織布はガラス繊維が使われた。

コーティング材は、鹽化ビニル、シリコンやフッ素系樹脂が一般的に用いられている。1960年頃より鹽化ビニルをコーティングした膜材料が用いられるようになったが、不燃性に問題があり、この膜材料を用いた膜構造は、ほとんどが假設建築物であった。その後、四フッ化エチレン樹脂が用いられるようになり、建物用途において条件付きではあるが不燃性への問題が解決し、建築用材料としてその用途が一気に広がった。

建築用膜材料を、繊維織布とコーティング材の組合せによって分類すると表1のようになる。膜材料Aは不燃性、耐久性、透光性が要求される建築物に用いられ、膜材料Cは耐久性や防汚性にやや劣るが経済性が要求される建築物に用いられ、膜材料Bはその中間的なものである。最近、より透光率を上げるため、ガラス繊維糸による網目状織物に四フッ化エチレン樹脂をコーティングした膜材料が開発され、ワールドカップ用スタジアムに使われている。さらに、膜材料Cの耐候性を向上させるために、コーティング材の上にフッ素樹脂フィルムを貼合わせた

〈表 1〉 膜材料の種類

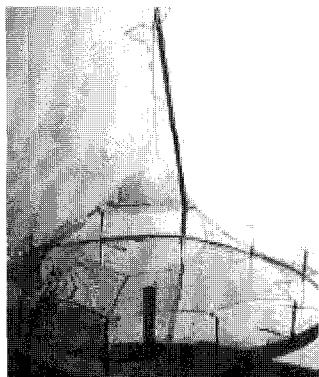
	織布	コーティング材	厚さ
膜材料A	ガラス繊維	四フッ化エチレン樹脂	0.5mm以上
膜材料B	ガラス繊維	? 化ビニル樹脂 クロロレンゴム	0.5mm以上
膜材料C	ポリアミド系繊維 ポリアラミド系繊維 ポリエステル系繊維	? 化ビニル樹脂 クロロレンゴム	0.5mm以上

膜材料や表面に酸化チタン層を施しその光触媒作用によって防汚効果が大幅に向上する膜材料が実用化されている。

3. 膜構造の設計技術

膜構造の特徴は、軽量で、その形態を複雑な三次元の廣がりをもつ曲面で形成することができることである。ところが、膜構造を構成する膜材料やケーブル材は、引張力のみ傳達し、壓縮力と曲げを負担することができないので、膜構造は、豫め膜面内に張力（初期張力）を導入し、様々な外力に對して膜面に緩み（しわ）が生じることなく抵抗しうる安定した形態を確保しなければならない。ここに張力構造特有の形状決定問題が生じる。

1950年後半よりドイツのフライ・オットー博士は、石鹼膜を使って表面積極小曲面を探り(圖2)、膜構造の設計を行ってきた。この方法により、1967年にモントリオール博の西ドイツ館、1972年にミュンヘンオリンピックのスタジアム等の優美な膜構造建築を造った。



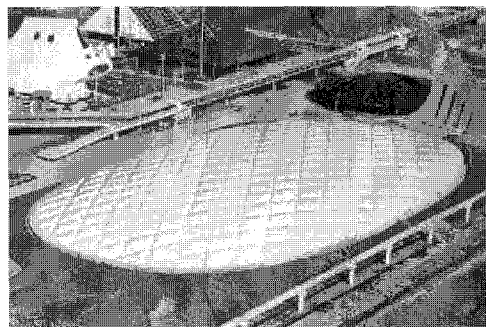
〈圖 2〉石鹼膜實驗法

形状決定は、この石鹼膜實驗法によるほか、布を用いて等張力曲面を探索する方法が実用されていた。非常に伸縮性のある生地を用い、その絲目の形が同じになるように生地を展張しながら、木製の境界構造にピンで固定して設計曲面を探した。1980年始めまで、このような方法で、簡単な鞍型あるいはホルン型曲面の假設サーカステントやスケートリンク等が建設されてきた。このように膜構造の設計には模型が不可欠であったが、1980年代になると、コン

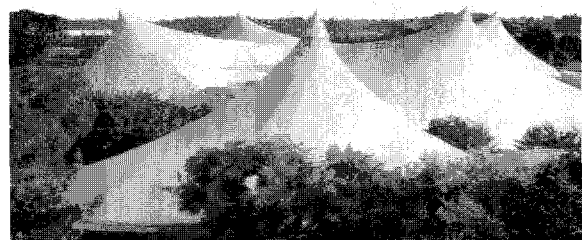
ピューターを用いて等張力曲面或いは等價な極小曲面を解析するようになり、迅速に形状が求められるようになった。さらに、膜構造の設計曲面は、等張力曲面に限らず任意の張力状態の釣合曲面とすることも可能になった。だが、現在でも布を用いた模型による形状決定が行われることがある。

その間、膜材料の二軸同時に載荷する引張試験やクリープ試験及びせん断試験等による膜材料の力學特性の研究が進み、設計上必要な諸定數の算定法が提案され、應力變形解析から裁断解析までの設計技術が大きく飛躍した。ここで言う二軸とは直交する縦絲と横絲の方向を指す。

1970年に開催された日本萬國博覽會において、ケーブルで補強された空氣膜構造のアメリカ館(圖3)、タイヤ狀のチューブを10數本繋ぎ合せたエアーム構造の富士グループ館など各種の膜構造建築物が登場し、膜構造の設計技術のみならず製作及び施工技術が大きく飛躍した。アメリカでは、偏平な空氣膜構造の安全性が日本萬國博覽會のアメリカ館で實證されたうえ、同じ頃に膜材料Aの開発されたことにより、1970年代後半から、空氣膜構造によるスタジアムが數多く建設された。なお、膜材料Aを用いた最初の恒久膜構造建築物は、1973年にアメリカで建設されたラバーン大學體育館(圖4)である。



〈圖 3〉Expo70 アメリカ館

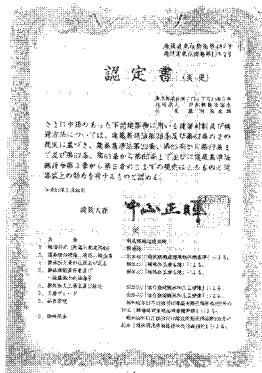


〈圖 4〉ラバーン大學體育館

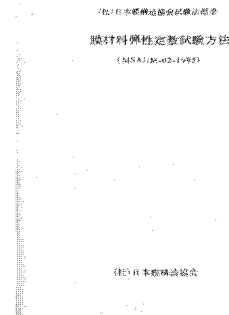
4. 膜構造の技術基準

日本でも、1980年代になると、膜構造の屋根付きスタジアムの建設に対する期待が高まる。ところが、日本では、膜構造建築物は特殊な建築材料及び構造方法に該当するため、建設に当たっては、特別に、建築基準法・同施行令の規定と同等以上の安全性を有することの審査を受けなければならない。1983年に建設会社からの委託を受けた(財)日本建築センターが、建設省の協力を得ながら大規模な空気膜構造の安全性に対する評価基準作成のための研究委員会を發足させ、1年後に、構造、防災及び維持管理について評価基準がまとめられた。この評価基準に基づいて東京ドームの安全性が評価され、1988年に日本で初めて大規模な膜構造屋根付きスタジアムが出現する。東京ドームが完成してから膜構造が一般に知られるようになり、大規模のみならず中規模の空間構造に至るまで膜構造が注目を集めるようになり、1980年後半になると、膜構造の技術基準作成の氣運が高まる。

そこで、(社)日本膜構造協會が、中規模膜構造を対象にした「特定膜構造建築物」を定め、それに用いる膜材料及び構造方法に関する技術基準を作成した。1987年、この特定膜構造建築物が、建築基準法の規定によるものと同等以上の効力を有するものとして建設大臣の認定(圖5)を取得、以後、この技術基準に従って設計及び審査をすることになった。この技術基準とは別に、膜構造を設計する上で缺かすことのできない膜材料定数を定めるための試験方法及び定め方(圖6)について整備されている。



〈圖 5〉建設大臣の認定書



〈圖 6〉膜材料弾性定数試験方法

2001年までに、700を超える特定膜構造建築物が審査を受け建設された。その間に、日本建築センターの審査を受けた大規模膜構造も、数多く建設された。

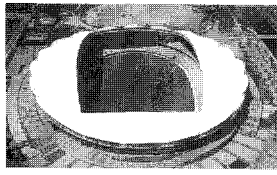
2000年6月に建築基準法施行令の改正が行われ、膜材料及び膜構造の構造方法に関する安全上必要な技術基準を定める国土交通省告示を作ることになった。即ち、膜構造は、一般的な建築材料及び構造方法と見なされるまでになった。本告示は、

- ・膜材料が建築材料として適合すべき品質に関する技術基準
- ・膜構造部分の構造方法に関する安全上必要な技術基準

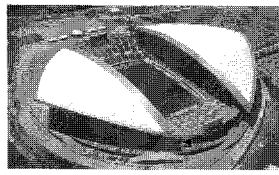
から成り、改正後、2年間の経過措置を待って、2002年5月末までに施行される予定である。この告示が施行されると、多くの膜構造建築物が、日本膜構造協會或いは日本建築センターの審査を経ることなく、鐵骨造や鐵筋コンクリート造等と同じ確認ルートとなる。

5. おわりに

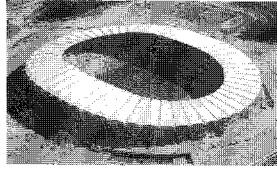
2002 FIFA World Cup KOREA/JAPANにおける、10のサッカースタジアムのうち、6つが膜構造の屋根をもつスタジアムである。圖6にいくつかのサッカースタジアムの外観寫眞を示す。さらに、キャンプ地のサッカースタジアムの多くが膜構造の屋根付きである。



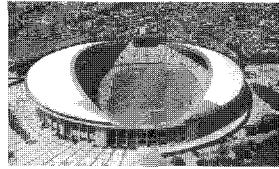
(a) 新潟スタジアム



(b) 埼玉スタジアム



(c) 小笠山スタジアム



(d) 長居スタジアム



(e) 大分スタジアム

〈写真 6〉 膜構造の屋根を持つサッカースタジアム例

最後に、張弦張構造、ケーブルドーム構造、テンセグリティ構造など構造形式や架構法は、長足の進歩を遂げつつ、そのポキャブラリーを増やしている。これらと組み合わせた膜構造は無論のこと、新しい構造形式の膜構造建築物の出現を期待するとともに、新しい告示が施行されることにより、膜構造建築物が多くの設計者にとって身近な建築物になることを祈っている。