

# ばねストラット式張力膜構造に関する基礎的研究

中島 肇<sup>\*1</sup>  
齋藤 公男<sup>\*2</sup>  
黒木二三夫<sup>\*3</sup>  
岡田 章<sup>\*4</sup>

## 梗 概

張力の存在によって安定性を計る張力膜構造にとっては膜材料の応力弛緩による張力の消失は極めて本質的な構造問題となる。我が国における張力膜構造の構造設計は、応力弛緩に対して「張力再導入」という維持管理作業を前提として通常行われているが、管理費や作業の困難さといった観点から、実行に対する信頼性に問題があると考えられる。

本論文はこれらの状況や問題点に着目したものであり、「維持管理までを含めた張力膜構造の構造性能に関する信頼性確保」を目的として、膜材料の応力弛緩に対する対策について、張力再導入を不要とする「ばねストラット式張力膜構造」の提案と有効性の検討に関して論じている。

### 1. はじめに

張力膜構造は張力の存在によって安定する構造であるが、膜材料は応力弛緩という構造物の剛性低下につながる特性を有している。したがって、この構造にとって初期張力の維持は極めて本質的な構造問題である。これに対して、我が国における従来の張力膜構造の設計では、膜施工時に導入した初期張力（「導入初期張力」といい、以下「導入PS」と略す）の応力弛緩に対しては、張力再導入により構造物の安定性を確保する考え方が一般的である。言い換えれば、このことは張力再導入を前提として構造設計や解析を進めるといった考えに立脚したものである。しかし、信頼性のある構造性能を確保する観点から、張力再導入という「維持管理」に依存しない対策を確立する必要があると考える。

以上の点を踏まえると、膜材料の応力弛緩は張力膜構造にとって本質的であるにも拘わらず、現状では未だ明確にされていない現象であり、膜材料の応力弛緩に対する対策の構築、すなわち、「応力弛緩による膜張力消失現象の回避に対して有効な施工法や構造システムの提案と確立」は解決すべき重要な課題であると考えられる。テーマと考えられる。

これに対しては、張力再導入作業の不要化を目的として、筆者らは施工中に張力導入を繰り返すことに

よって膜面に高初期張力を導入し、安定ひずみを得る施工方法を提案しその効果を確認している<sup>5)</sup>。

本論は、この課題に対して構造システム面からの方策を提案するものである。すなわち、張力再導入を回避できる構造システムとして、ばね機構システムを組み込んだ「ばねストラット式張力膜構造」の提案とその有効性の検討に関して取り上げる。具体的には、まず提案する構造システムの位置付けとその課題について述べる。次に、この構造システムの基本ユニットに対して、力学性状の把握と、本システムの有効性の確認を目的として行った実大実験に関して報告する。さらに、実建物に適用した事例を紹介すると共に、曲面形成時から約300日間（9.7ヶ月間）の長期実測を通して得られた本システムの有効性について考察を加える。

### 2. 構造システムの提案

#### 2.1 構造システムの位置付け

本論で提案する構造システムは、ストラット式張力膜構造<sup>1)、2)</sup>にばね機構システムを組み込んだものであり、低張力レベルの導入PSによる曲面形成と、張力再導入の不要化を意図したものである。ばねストラット式張力膜構造の位置付けと特徴を図1に示す。

まず、張力膜曲面の基本形をガウス曲率の分類から

本論の一部は文献[6]～[9]に報告している。

\*1 清水建設（株）設計本部 博士（工学）  
\*2 日本大学理工学部建築学科 教授・工博  
\*3 日本大学短期大学部建設学科 助教授・博士（工学）  
\*4 日本大学理工学部建築学科 助教授・博士（工学）

概説する。ガウス曲率が零の平面型は変形後の曲率によって外力と釣り合う抵抗機構を示し、ガウス曲率負のサドル型やホルン型は初期形状の曲率に依存した抵抗機構を示す。前者は骨組膜構造として、後者はサスペンション膜構造として利用されている。

ホルン型の一つである支柱式サスペンション膜構造は、外周または中央支柱の強制変位による張力導入法についてその有効性が評価されている<sup>1)・2)</sup>。さらに、この特徴を無柱式張力膜構造に適用したストラット式張力膜構造は、すでに筆者らにより提案されている<sup>1)・3)</sup>。基本ユニットの構成上の特徴は、周辺フレームから伸びたストリングで支えられたストラットで膜面が点支持されることであり、構造上の特徴は下記のとおりである。

- 1) ホルン型曲面の初期曲率に相当する強度と剛性が得られる。
- 2) 膜頂点を強制変位させることによるストラット部での張力導入（応力制御）が可能である。

本論で提案するばねストラット式張力膜構造は、製作の容易さおよび膜応力に対する維持管理の不要化を意図して、上記1)、2)の特徴を活用し、さらに下記のような機能を期待したものである。

- 1) 製作が容易な平面膜を使用し、膜面中央をスト

ラットにより突上げることにより、低ライズでありながらホルン型と同様の形態抵抗性が発揮できる。

- 2) ストラット部に内蔵したばねは、膜材料の応力弛緩発生時に自動的に伸張して膜面を突上げる機能を有し、ばね部の軸力に応じた膜応力を発生させることが可能である。このことより、従来の張力再導入のように人為的な作業を要することなく、膜ひずみを進捗させることで膜応力消失を回避できる。

さらに、ストラット式を含んだ一般の張力膜構造においては、風などの吹き上げ荷重時に膜材とこれを支持する骨組みあるいはストラット頂部との遊離による膜材の損傷を防止するために、遊離しないことの確認や、遊離防止のために両者をピン接合する方策が採られることが一般的であるが、本システムでは下記のような設計面の特徴も期待できる。

- 3) 風荷重による膜の浮き上がりに対して、ばねストラットを追従させることにより膜材の損傷を防ぐことができ、ストラット頂部のディテールの自由度を増すことができる。

なお、ストラット式張力膜構造と同様に、全体の構造システムは、基本ユニットをフレームに点や線状に支持したりあるいはケーブルを介して支持するなど、集積することにより構成される。

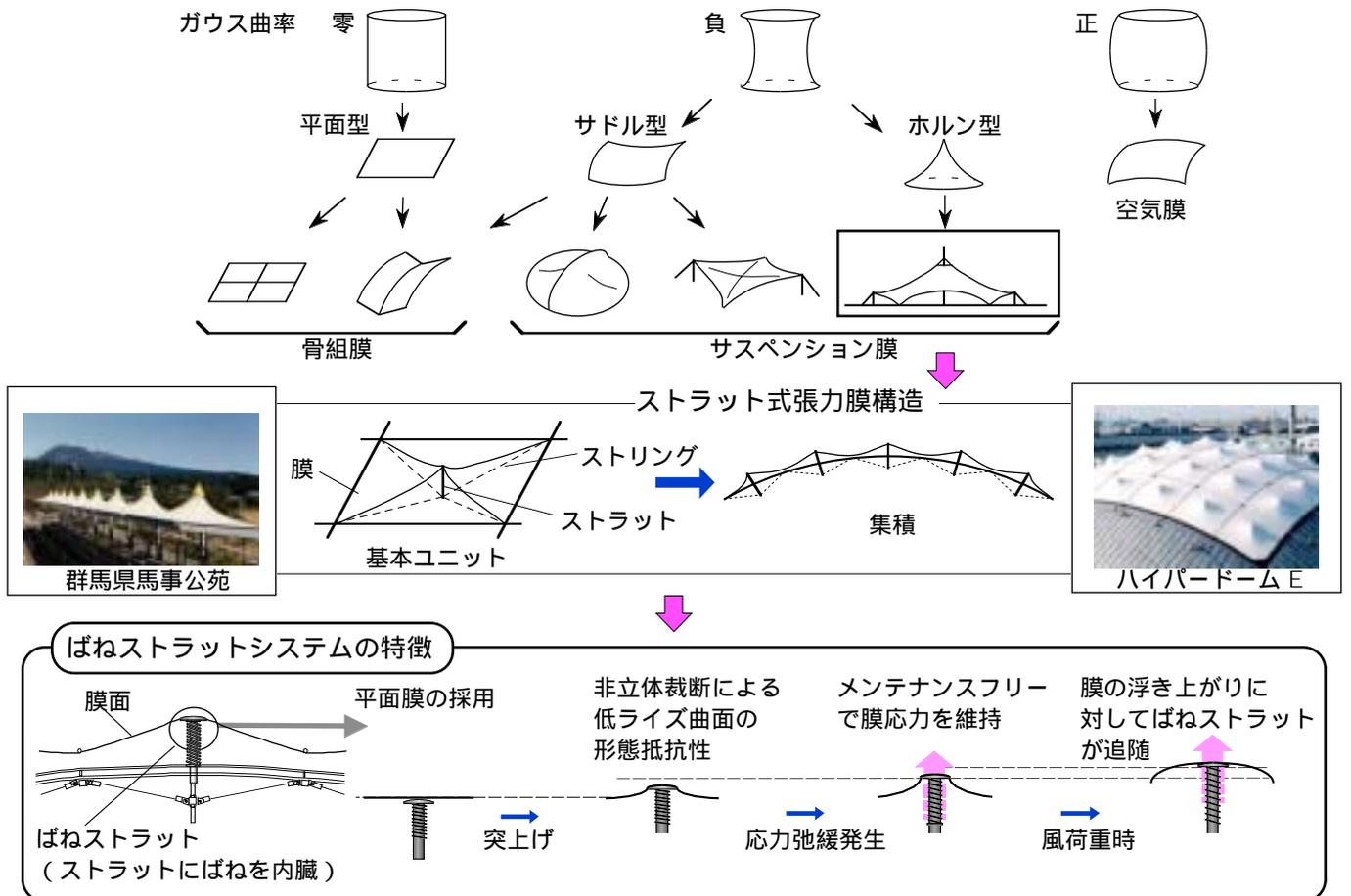


図1 ばねストラット式張力膜構造の位置付けと特徴

## 2.2 課題の整理

一般に、張力膜構造の膜応力の減少は、施工直後あるいは張力再導入後からの常時状態で発生する応力緩和によるものと、付加荷重によるクリープが複雑に混在して発生するものがある。本論においては、これら全ての要因により膜応力が減少する現象を総括して「応力弛緩」と呼ぶことにする。施工時、常時、載荷・除荷時の状態での膜材料の応力弛緩は、本構造システムだけではなく膜材料を使用するすべての構造システムで検討すべき課題である。しかし、施工時に生じる導入PS量の変化や、常時および載荷・除荷繰り返しに伴う応力の変化について、現状では明解にされていない。また、膜材料の応力弛緩が、構造システム全体の挙動に与える影響も解明する必要がある。

以上の点を踏まえると、本構造システムの設計法および施工法を確立するためには、以下のような課題の解明が必要となる。

曲面形成における特徴、すなわち平面膜の突上げに関連する課題としては、

### 1) 非立体裁断膜の突上げ量と形態抵抗性との関連

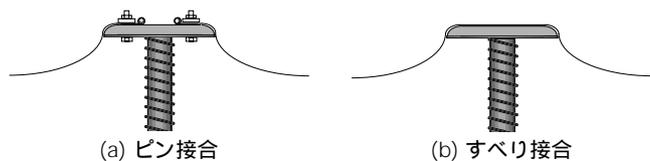


図2 ストラット頂部と膜材の接合方法

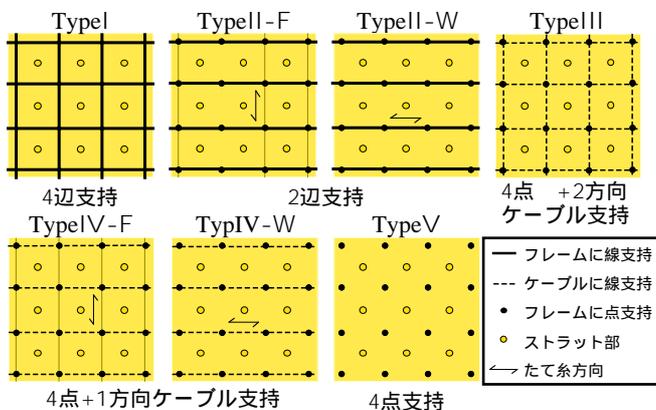


図3 基本ユニット周辺の支持方法

表1 基本ユニットに関する検討項目

項目	課題
張力膜構造全般	・膜材料の応力弛緩の把握
平面膜の突上げ	・突上げ量と形態抵抗性との関連（付加荷重(風、積雪など)時の変位と応力、ボンディング現象） ・膜頂部の応力集中とディテール
ばねストラット	・ばねの設計法と諸定数の設定方法 ・導入PS量の設定 ・ディテールと施工法
周辺支持方法	・基本ユニットの構造挙動とスパン ・全体構造システムへの影響

付加荷重（風、積雪など）により発生する変位や応力およびボンディング現象との関連

### 2) 膜頂部の応力集中とディテールに関わる課題

膜突上げ時、積雪荷重時における膜頂部の応力集中を考慮した頂部ディテール（図2）の考案がある。

また、ストラットへのばね機構の組み込みに関連する力学面の課題としては下記の事項が挙げられる。

### 3) 導入PS量の設定と施工法

膜材料の応力弛緩などに対応した導入PS量の設定方法と、ばねストラットを用いた場合の張力導入方法の検討

### 4) ばねの設計上のクライテリアの設定とディテール設計手法の確立

膜応力の維持に関する具体的な要求性能の整理、ばねの種類を選定や諸定数などの設定、施工法やばねの解放時期を踏まえたディテールの考案、外力に対するばねの影響の把握、などが必要である。ばねの設計上のクライテリアの一例として、強風時の膜面の浮き上がりに対してばねが伸びて追従し、積雪時には初期突上げレベルより下がらないようにストッパーを設けることによりボンディングを防止する考え方がある。

### 5) 基本ユニット周辺の支持方法

基本ユニット周辺の支持条件（フレームやケーブルへの取付け方法）は、基本ユニットおよび構造システム全体の挙動に影響を与える。例えば、図3に示す各支持方法に対して、膜応力に着目して基本ユニットの可能な規模を比較すると、4辺支持（Type I）が最も大きく、4点支持（Type V）が最も小さくなる。これらの支持方法は、基本ユニットの大きさ、支持フレームの構造方式および支持スパンなどの構造計画に影響を与える因子の一つである。

以上の課題を表1にまとめる。こうように数多い課題に対して、ばねストラットシステムの本質的なテーマに絞り検討する。すなわち、本論文はばねの特性に着目して膜材料の応力弛緩に対する基本挙動の確認を優先して検討する。その他の課題については本構造システムの構造計画に関する研究として今後検討していくことにする。

## 3. ばねストラット式張力膜構造の実大実験

### 3.1 実大実験概要

ばねストラット式張力膜構造の基本ユニットに対して実大規模の構造実験を行い、曲面形成時や付加荷重時および経時後の基本力学特性の把握を試みる。特に、未だ明確にされていない載荷・除荷が繰り返された後の応力弛緩などを把握、確認することを主目的とした。

試験体および測定方法などを写真1および図4に示す。試験体は4.25m×4.25mの矩形膜(PTFE(四フッ化エチレン)コーティングガラス繊維布)および膜面中央のばねストラットから構成される。ばねストラットは、頂部プレート付きの芯材、ばねおよび外筒より構成され、外筒と頂部プレート(200)を接合しているボルトを外すことによりばねが解放される機構としている。外筒は、芯材およびばねのガイドやボンディング対策のストッパーの機能を有している。ストラットに生じる軸力(本論では「ストラット反力」と称す)は、膜面の突上げ力に相当し、膜パネルの中央部応力や膜とストラットの離間状況を評価するための重要な値であるため、ロードセルを用いて測定を行っている。ストラット頂部と膜材の接合方法はすべり接合を、基本ユニット周辺の支持方法は4辺支持(Type I)とした。なお、試験体は膜の溶着ラインの影響を除くため、単一の平面膜を用いた。膜応力は測定した境界反力を測定装置の間隔(300mm)で除することにより換算している。実験パラメータとしてばねの特性(ストロークとばね定数)を取り上げ、柔らかいばね(S470)、硬いばね(S137)およびばねのない(S0)3つのストラットタイプを設定している(表2、表3)。ここでストラットタイプ名の後ろの数字(Sの部分)は、0から470mmまでのストローク量を表わしている。なお、実験パラメータの詳細については次節で述べる。

実大実験は、膜の平張りからストラット突上げによる曲面形成実験と、風荷重や雪荷重を想定した載荷実験およびストラット再突上げによる張力再導入実験から構成される。実験フローを図5に示す。まずS470のストラットを対象として実験を行い十分に応力弛緩を発生させた。次に膜材料の応力弛緩が収束した状態で、ばね特性の相違が構造挙動に与える影響を比較・検討する目的で、ストラットタイプをS0とS137に取り替え、突上げと風荷重載荷の実験を行った。

曲面形成実験は最初に平張り時の導入PSを4 kN/m

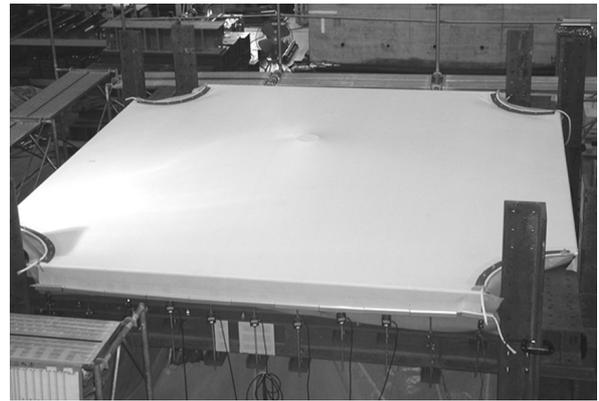
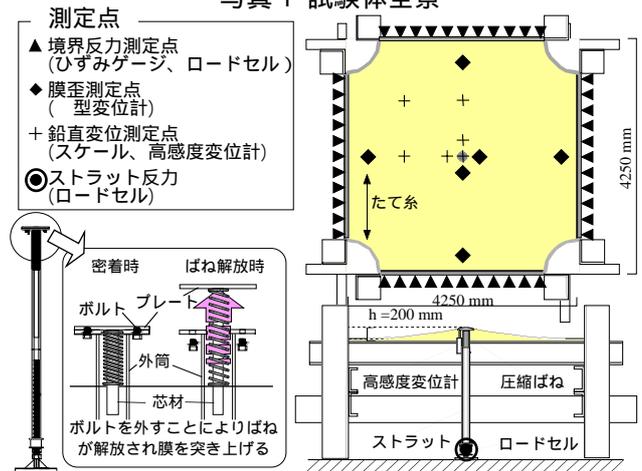


写真1 試験体全景



膜材料 (PTFE膜) の基準値

	厚さ (mm)	繊維密度 (本/25mm)	引張強さ (N/cm)	破断伸び率 (%)
たて糸方向	0.8	25	1470	3~10
よこ糸方向		19	1176	6~15

図4 試験体概要

表2 実験パラメータ

ストラットタイプ	ばね	ばねストローク	ばね定数	導入PS量
S0	無し			4 kN/m
S137	有り	137 mm	9.84 N/mm	
S470		470 mm	3.68 N/mm	

表3 圧縮ばねの構造諸元

タイプ	横弾性係数 [kN/mm]	材径 [mm]	コイル平均径 [mm]	有効巻数	総巻数	自然長 [mm]	ばね定数 [N/mm]
S137	80	7	45	27.45	29.45	737.1	9.84
S470	80	7	45	80	82	1070	3.68

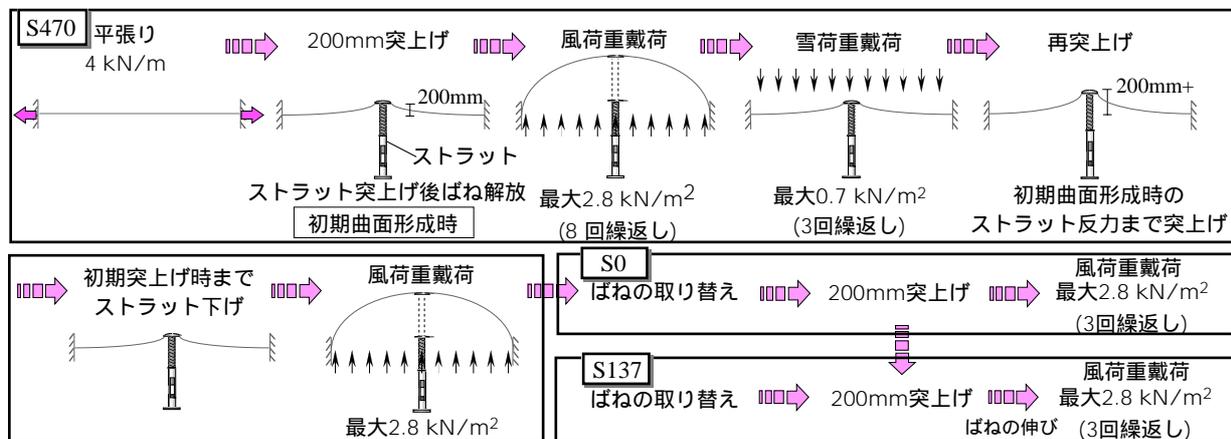


図5 実験フロー

(400kgf/m) 導入した後、ばねストラットにより膜面中央部をスパンの約1/20に相当する200mmを突上げるにより行った。その後、外筒とストラット頂部の接合ボルトを外すことによりばねが機能する状態とした(図4)。この状態を「初期曲面形成時」と呼ぶことにする。

载荷実験では、付加荷重時のばねストラットシステムの挙動を把握すると共に、強制的に応力弛緩を発生させる目的で、最大2.8kN/m<sup>2</sup>(280kgf/m<sup>2</sup>)の風荷重や0.7kN/m<sup>2</sup>(70kgf/m<sup>2</sup>)の雪荷重に相当する载荷・除荷を内圧付加により繰返し行い、その後張力再導入などを行った。

### 3.2 実験パラメータ

ばね特性により実験パラメータを設定する。まず、ばねの種類として「等ピッチ圧縮コイルばね」を採用した。このばねは、形状が単純で製作が容易なために一般に広く使用されており<sup>10)</sup>、また線形挙動を示すことから膜材料の応力弛緩を明解に制御できるなどの特徴があり、本構造システムに適したばねであると考えられる。

また本構造システムにおけるばねに対する要求性能を下記のように整理した。

- 1) 膜応力の維持
- 2) 付加荷重時の膜面の変形に対する追従性能

本論では、ばね特性(ストロークとばね定数)をパラメータとして3つのストラットタイプを設定している。上記の要求性能1)および2)に対する各タイプの目標性能を以下に示す。

- 「S470」：応力弛緩後の膜応力を導入PS量に対して、80%維持することを目標とする。
- 「S137」：応力弛緩後の風荷重時の膜面鉛直変位に対して、ばねが追従することを目標とする。
- 「S0」：ばねの無いタイプ。

このようなばねの種類および要求性能を勘案したばねの性能に関する概念を図6に示す。

ここで、ばね特性を設定する際に必要な応力弛緩後の膜面頂部鉛直変位は二軸引張試験の結果から推定

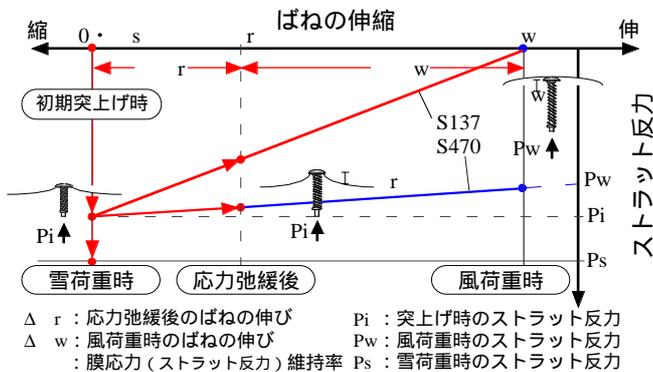


図6 ばねの性能に関する概念図

し、風荷重時の変位は応力解析により算定した<sup>注1)</sup>。なお、ばね定数kは膜面頂部鉛直変位とストラット反力Pから求められる。例えばS470の場合は、応力弛緩後の変位をr、突上げ時のストラット反力をPiおよびストラット反力を指標とした膜応力維持率をとして、

$$k = \frac{P}{r} = \frac{(1 - \text{維持率})P_i}{r} \quad (1)$$

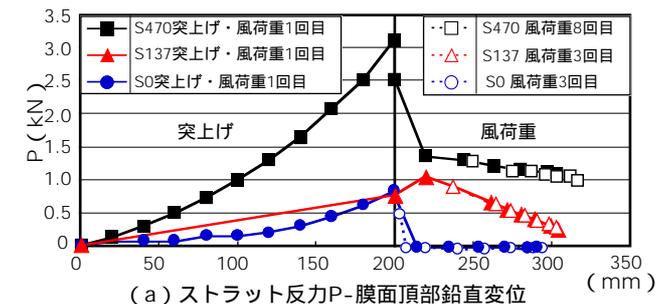
から得られる。また、S137の場合は、風荷重時の変位とストラット反力をそれぞれw、Pwとして次式のように求めることができる。

$$k = \frac{P}{r + w} = \frac{P_i - P_w}{r + w} \quad (2)$$

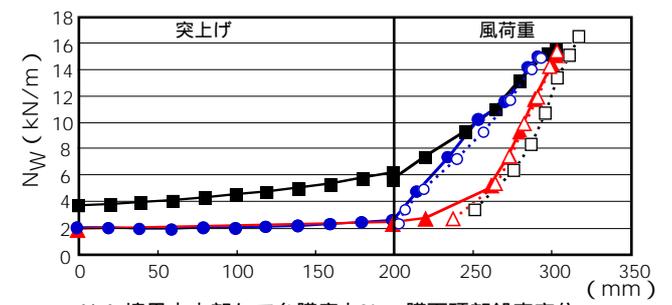
### 3.3 実験結果

1) 曲面形成から風荷重载荷までの挙動 曲面形成から風荷重载荷までの実験結果を図7(a)、(b)に示す。本図で膜面頂部鉛直変位200mmの範囲はストラット突上げによる曲面形成時、200mmの範囲は風荷重载荷時、それぞれの挙動を示す。

初期曲面形成時のストラット反力Pと膜面頂部鉛直変位wの関係には、非線形性が見られる(中間ステップで測定していないS137を除く)。また、風荷重载荷実験に移行する前に不連続な挙動を示し、その後の载荷実験では線形挙動を示す傾向がある(図7(a))。S470の初期曲面形成時のストラット反力はストラット突上げにより約3kNまで増加し、風荷重载荷直前までの約1時間半の間に約2.5kNとなり80%程度に減少したが、この時点ではばねの伸びは観測されていない。S0の突上げ後の反力は約0.8kNであり、S470の初期曲面形成時の27%である。S137の場合は突上げ後の反力はS0と同様、約0.8kNであるが、ばねを解放した時に



(a) ストラット反力P-膜面頂部鉛直変位



(b) 境界中央部たて糸膜応力N<sub>w</sub>-膜面頂部鉛直変位

図7 曲面形成から風荷重载荷までの実験結果

ばねが20mm伸び反力は約1.1kNまで増加し、S470の初期曲面形成時の約35%に達している。

境界中央部のたて糸膜応力 $N_w$ と膜面頂部鉛直変位の関係(図7(b))は、ストラット突上げ時および風荷重載荷時共に非線形挙動を示し、ストラット反力と同様に両実験の切替点で値が不連続となっている。S470の初期曲面形成時の境界中央部のたて糸方向の膜応力は、風荷重載荷前までに約90%に減少している。一方、S0とS137の突上げ後の境界中央部膜応力は、S470初期曲面形成時と比較して約40%に減少したが、S137についてはばね解放時のばねの伸びにより約45%に増加している。同様に、S470初期曲面形成時の膜応力に対して、載荷8回目直前の無荷重時の膜応力は2.84kN/m減少した。つまり、載荷を繰り返すことにより膜応力が46%減少したことになる。

風荷重時には、ばね剛性の異なるS470とS137ではストラット反力と鉛直変位の勾配に相違が見られる(図7(a))。膜応力と鉛直変位の関係ではS470載荷1回目に対して載荷8回目の勾配は増加しているが、S470載荷8回目とS137の勾配はほぼ一致している(図7(b))。これから、応力弛緩が収束し、安定した状態に至っているものと推察できる。S0のストラット反力は風荷重載荷と共に急激に減少し消失しているが、膜応力は載荷と共に増加している(図7(a)、(b))。

2)風荷重時の挙動 風荷重 $W$ とストラット反力 $P$ の関係を図8(a)に示す。S470の風荷重載荷1回目のストラット反力は、初期状態での低荷重域で急激に減少し、その後緩やかに減少している。S137においては、載荷1回目と3回目ではほぼ同様の挙動を示している。また載荷荷重に対する反力の減少量は、初期載荷ステップと比較すると、その後の荷重域ではわずかに

少なくなっている。S0の反力は、初期載荷ステップで急激に減少した後に消失している。これは膜とストラットの離間を意味しており、この傾向は載荷3回目の方が顕著である。無荷重時の反力は、S470の処女載荷前に対して、S470の載荷8回目で約50%に、S137およびS0の載荷3回目でそれぞれ約35%、約20%に減少している。

風荷重 $W$ -膜面頂部鉛直変位 関係図(図8(b))のS470の結果より、無荷重時の頂部高さは処女載荷前に対して載荷8回目開始時点で51mm高くなり、載荷時の剛性が増加し載荷終了後56mmになった。なお、S137載荷1回目と3回目ではほぼ同様の挙動を示しており、また初期荷重ステップではわずかに低剛性を示すが、その後は緩やかに増加している。前述したようにS0は初期荷重ステップで膜とストラットが離間しているのに対し、S470、S137共に膜面の変形に追随しており、ばねストラットが要求性能を満足していることが確認された。

境界中央部のたて糸方向膜応力 $N_w$ (図8(c))より、S470のみ処女載荷前と複数載荷の初期値に大きな差が認められ、後者は前者の約60%となっている。他のストラットタイプS0およびS137の初期値はほぼ同じ値を示し、S470処女載荷前に対して40~45%である。よこ糸方向の膜応力(図8(d))にも同様の傾向が見られ、S470処女載荷前に対してS470は約40%に、S0およびS137はそれぞれ20~30%に減少している。また、S470の処女載荷以外の載荷実験の勾配はほぼ一致している。これは、載荷・除荷の繰返しにより徐々に応力弛緩が低減され、膜応力が安定した状態になったことによると考えられる。

このようにばねストラットにより膜応力の維持効果

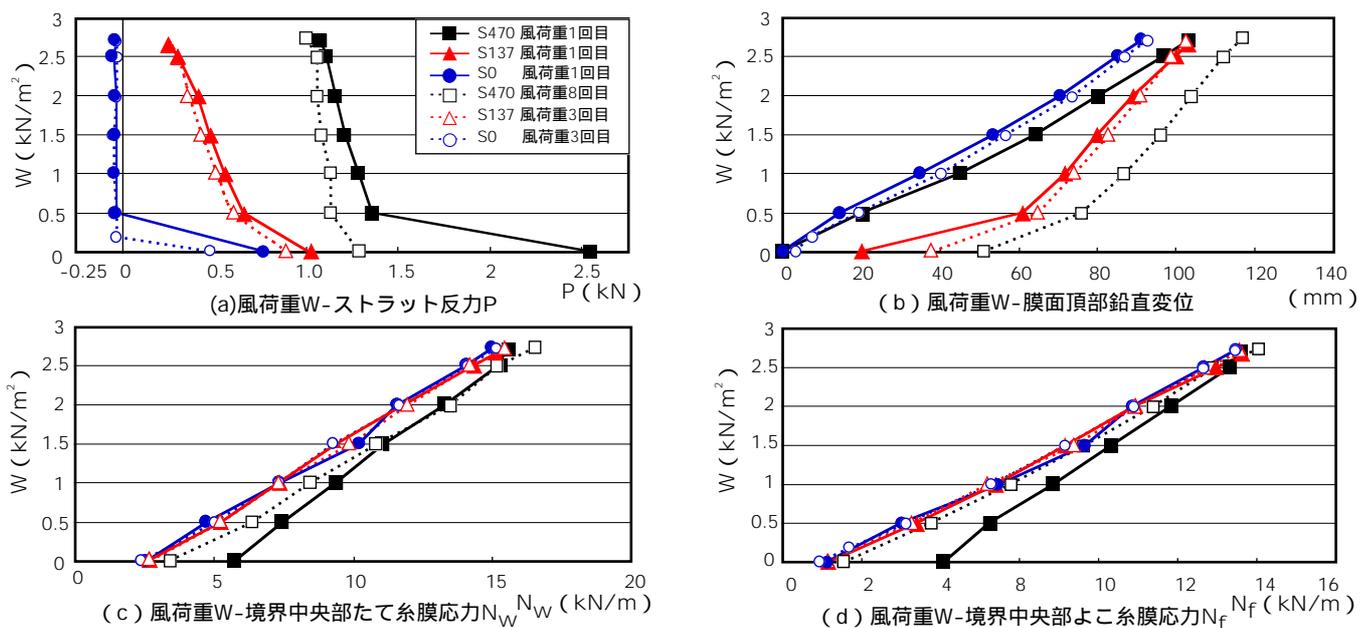


図8 風荷重載荷実験における挙動

が発揮されることが確認できた。

3) 膜応力・ストラット反力・ばねの変位の推移 実験の各ステップにおける境界中央部膜応力、ストラット反力の推移を図9に、およびばねの変位の推移を図10に示す。ここでは、横軸を曲面形成、载荷および張力再導入の各実験ステップとして、これまで述べた構造挙動について経時変化に注目して報告する。特に記述がない限り、比較する基準値はS470の初期曲面形成時としている。

S470の膜応力とストラット反力共に、初期曲面形成後にわずかに減少し、その後風荷重载荷1回目に応力弛緩の影響が大きく現れ、载荷後の膜応力は約40~60%に、ストラット反力は約40%に、それぞれ減少している。風荷重载荷2回目以降には载荷・除荷の影響は少ないが、载荷8回目後には膜応力は約30~50%に減少し、反力はさらに数%減少している。無荷重状態からのS470のばねの伸び(変位)は、载荷1回目後で約30mmと著しく増加し、その後の载荷とともに単調な増加を続け、風荷重8回目終了時点で56mmとなるが、その後の増減はほとんど見られず、雪荷重3回目終了時点で57mmとなった。

S0の実験では、ストラット突上げから風荷重载荷実験終了までの間に、たて糸方向膜応力は約40%に、よこ糸方向膜応力は約20%に、またストラット反力は15%にそれぞれ低下している。これはS0の突上げ時に対して、それぞれ約90%、80%および55%に低下していることになる。

S137では、突上げからばね解放の間にばねが20mm伸び、ストラット反力および膜応力は共に増加している。この時点から、風荷重载荷実験終了までにばねはさらに約20mm伸び、ストラット反力は82%に低下し

た。この間の膜応力の低下はほとんど見られないが、S470初期曲面形成時に対してたて糸は約40%に、よこ糸は約25%に、またストラット反力は約30%に低下している。

S470の風荷重载荷実験終了時のたて糸方向、よこ糸方向膜応力およびストラット反力は、S0およびS137の载荷実験終了時と比較すると、S0に対してそれぞれ1.7、2.0、2.8倍の値に、S137に対してはすべて約1.5倍の値に維持されている。このようにばねストラットにより膜応力の維持効果が発揮されることが確認できた。

4) ばねストラットの目標値と実験値 図11にストラット反力とばねの伸びの関係について、ばね設計時に用いた目標値と共に示す。実験値は突上げ終了時から载荷1回目の値と、S470は風荷重载荷実験8回目の値をプロットした。なお、それぞれのストラットタイプで無荷重時の最小反力を応力弛緩後としてプロットし、S470では再突上げ後の値もプロットした。

S470のストラット反力は初期曲面形成後約80%に減少し、続く風荷重1回目の初期载荷ステップで43%と著しく低下し、同時にばねも20mm伸びている。その後の風荷重载荷ではストラット反力は単調に減少し、風荷重8回目との連続性が見られると共に目標値と良く一致している。S137のストラット反力は突上げ後のばね解放時にばねの伸び20mmを伴いながら増加し、その後単調に減少しており、これも目標値と良く一致している。このように初期段階での膜剛性の評価方法の相違や応力弛緩の発生により、ストラット突上げ時の反力が目標値と実験値で異なるが、その後は両者共良く一致している。

応力弛緩終了時のばねの伸び量はS470とS137で異な

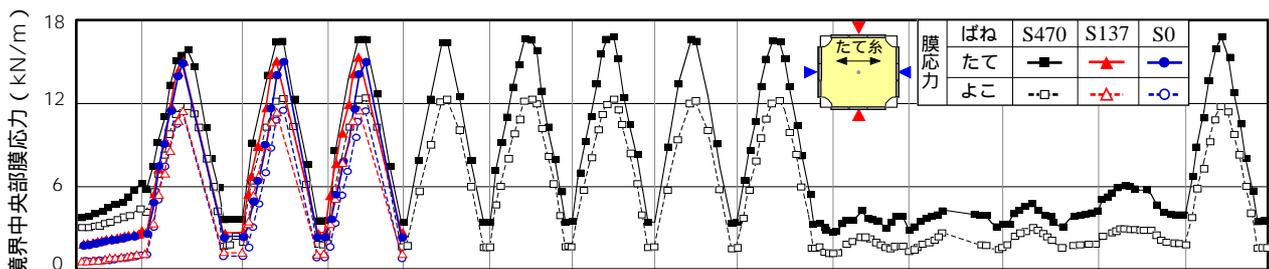


図9 境界中央部膜応力の推移

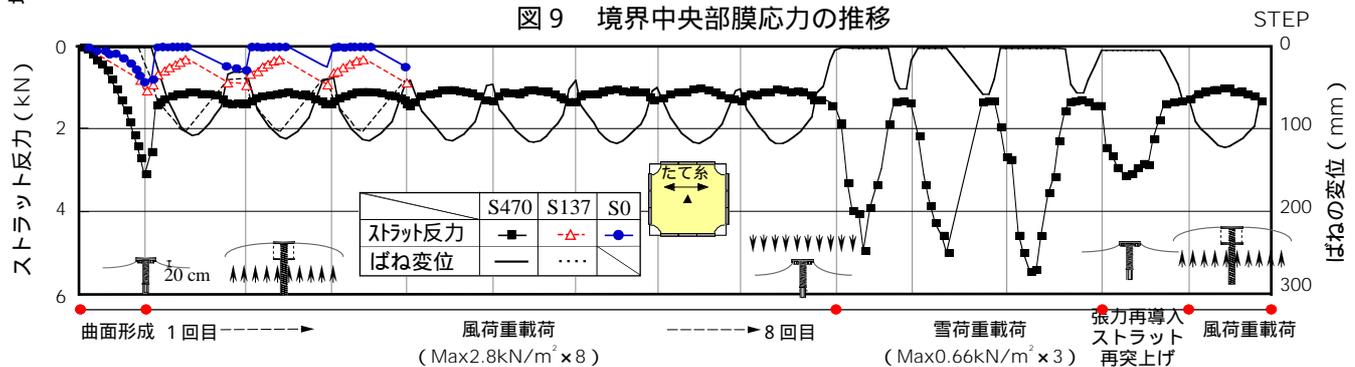


図10 ストラット反力およびばね変位の推移

り、それぞれ57mmおよび39mmとなった。これらは、膜材料の二軸引張試験結果と幾何学的な関係から推定したばね剛性に関わらない値(80mm)とは異なっている。また、この応力弛緩後の最終的な中央鉛直変位の推定値は、実験値に対して大き目の評価となっており、応力弛緩や解析モデルとばね剛性との関係などに課題を残したものの、安全側の評価であると考えられる。各ストラットタイプの反力を応力弛緩後の値で表すと、S0、S137およびS470の順にそれぞれ0.46kN、0.87kNおよび1.26kNであり、後者になるほど応力維持に有効であると考えられる。

これらのことからストロークが大きくばね定数の小さいばねほど、ストラット反力の変動が少なく、膜応力を維持する効果が大いことが確認された。

5)膜応力とひずみの関係 曲面形成から載荷実験までの膜応力とひずみ関係を図12に示す。処女載荷後のひずみの増加および膜応力の低下は著しく、その後の荷重履歴に伴い膜応力およびひずみは増減しながらある点に収束している。

各ストラットタイプでの載荷・除荷後の膜応力とひずみの最終点はばねストラットの種類により異なり、S470が最大であり、S137、S0がこれに続いている。このことから、ストロークの大きいストラットタイプほど膜応力の維持効果が大きく、より安定ひずみに到達し易いと考えられる。

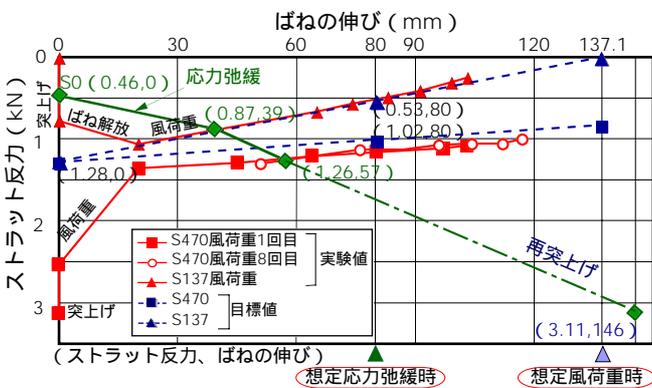


図11 ストラット反力とばねの伸びの関係 (印はh=200mmからの突上げ量)

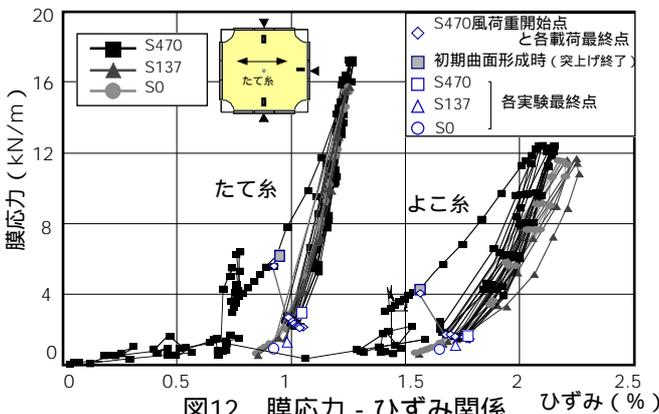


図12 膜応力 - ひずみ関係

#### 4. 実建物への適用および実測結果

(日本大学理工学部テクノプレース15を対象として)

膜材料の応力弛緩に対して張力維持が有効な構造システムとして本研究で提案したばねストラット式張力膜構造を実建物に適用し、曲面形成時から約300日間(9.7ヶ月間)の長期実測を通してばねストラットシステムの有効性について考察を加える。

##### 4.1 構造概要とばねストラットの設計方針

1) 構造概要 ばねストラット式張力膜構造を屋根架構に適用した実建物として、日本大学理工学部・船橋キャンパスに実験施設として建設されたテクノプレース15を取り上げる(写真2、表4)。開かれた施設として計画されたこの建築は、空調や照明に対する省エネルギー環境を目指して、半外部空間による自然通風や膜屋根による自然採光などの実際の”風と光”を利用することにより建築的に具現化している点に特徴がある<sup>11)</sup>。

屋根形状は単純な幾何曲面のひとつであるシリンダー(円筒形)を斜に切取った形態を採用している。いくつかの実験施設や広場・回遊空間を内包した大屋根架構には、機能的にも視覚的にも開放的であることが要求された。格子梁構造とばねストラット式張力膜構



写真2 全景写真(施工中)

表4 建物緒元

名称	日本大学理工学部・船橋校舎テクノプレース15		
設計	建築	日本大学理工学部 坪山幸王 + 坪山研究室	三橋博巳(風対応計画) 梓設計
	構造	日本大学理工学部 斎藤公男 黒木二三夫	(膜構造技術指導) 梓設計
	設備	梓設計	
施工	西松建設(膜施工 太陽工業)		
敷地面積	379,048.70m <sup>2</sup>		
建築面積	3,355.400m <sup>2</sup>	延床面積	4,950.519m <sup>2</sup>
階数	地下1階 地上2階		
構造	鉄骨造一部鉄筋コンクリート造 鉄骨鉄筋コンクリート造		
工期	2000.11~2002.3 膜工事2001.12~2002.2		

造が、両者の開放性を実現している。格子梁はシリンダー形状を母線と円弧によりシンプルに分割して配置し、格子梁間隔は膜材料(PTFE膜)の溶着ラインと重ねることを目的として、膜材料の最大製作幅から決定している。また、膜体は膜材料のたて糸方向を母線方向と合わせた単純な平面膜のまま製作することで、製作性の向上と共に膜材の有効活用をも意図している。さらに、膜ユニットの支持方法を、格子梁交点と1方向押えケーブル(図3 Type IV-W)とすることにより、両者は接触せず格子から膜ユニットを浮遊させ、さらに開放性を演出している<sup>12)</sup>。

ばねストラット式張力膜構造の採用は、立体裁断をしない平面膜を低張力で展張し突上げることによる曲面形成が可能になり、また経時後の膜材料の応力弛緩に対するメンテナンスフリーを意図している。なお、屋根中央部の比較的扁平な部分には積雪や雨水による

ポンディング現象を回避するパイプアーチを挿入している<sup>12)</sup>。

本建物は、外壁を部分的になくした半外部空間による自然通風を具現化していて、屋内に外気が貫通できる空気層が存在することが特徴となっている。このため、風荷重の算定に必要な屋根および外壁の風力係数を決定するために風洞実験を行っている。外壁に開閉可能な開口のある北側コーナー部を閉状態にした風向Nでは、風上側のA点で最大負圧 $C_p = -1.65$ が観測された。また、風向Sの開状態では建物南面の大きな開口から流れ込む風が建物内を通過するため、全体的に小さな風力係数が分布している(図14)<sup>13), 14)</sup>。骨組設計用風力係数と各膜ユニットの解析モデルを図15に、解析モデルの一例を図16に示す。なお、骨組設計用の速度圧は下式のように、 $q = 1068 \text{ (N/m}^2\text{)} = 110 \text{ (kgf/m}^2\text{)}$  としている。

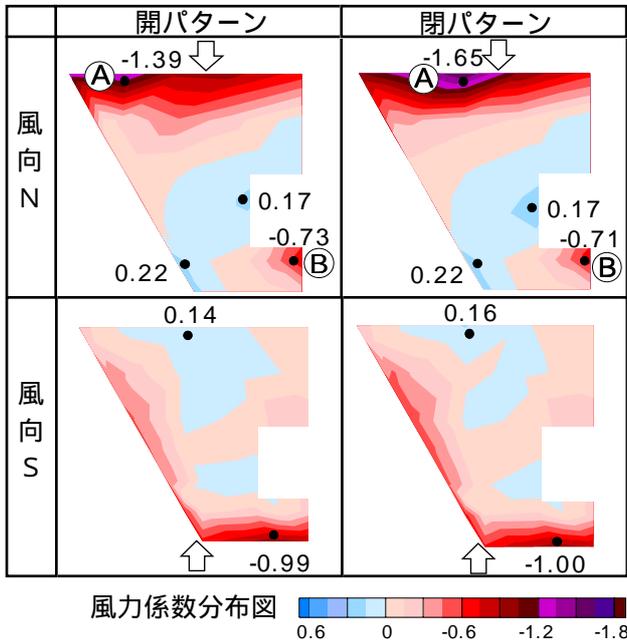


図13 実験風向と風力係数分布

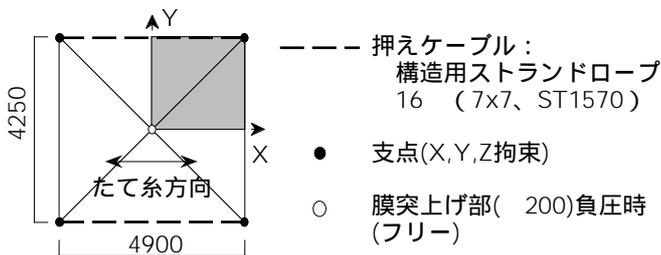
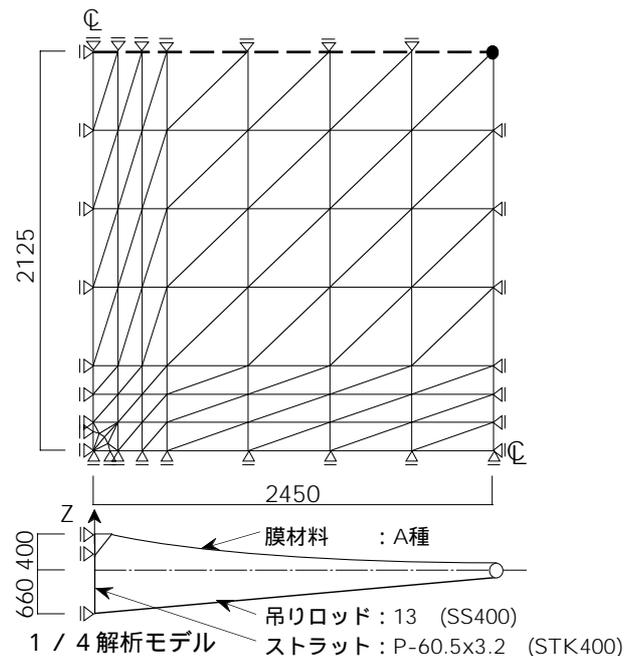


図14 風洞実験による骨組設計用風力係数

膜材料の解析用構造諸元

膜材		引張弾性定数 (kN/m)	ポアソン比	剪断弾性定数 (kN/m)
1st Loading	たて糸	340	0.12	65
	よこ糸	120	0.042	
3rd Loading	たて糸	1200	0.78	65
	よこ糸	960	0.63	

図15 解析モデル (Model-A1)



速度圧の算定  $q=0.6EV_0^2$  (N/m<sup>2</sup>)  
 船橋市の基準風速  $V_0=34$ m/sec.  
 屋根高さ  $H'=(7.81+11.1)/2=9.46$ m  
 地表面粗度区分III  $Z_b=5$ 、 $Z_G=450$ 、 $\alpha=0.2$ 、 $G_f=2.5$   
 $E_r=1.7(H'/Z_G) = 1.7 \times (9.46/450)^{0.2}=0.785$ 、  
 $E = E_r^2 G_f=0.785^2 \times 2.5=1.54$   
 $q=0.6EV_0^2=0.6 \times 1.54 \times 34^2=1068$  (N/m<sup>2</sup>)  
 110 (kgf/m<sup>2</sup>)

また、設計用雪荷重は、積雪深を30cmとして600 (N/m<sup>2</sup>) 60 (kgf/m<sup>2</sup>)としている。

2) ばねストラットの設計方針 膜ユニットは、4.25m×4.9mの大きさを基準とした矩形膜(PTFE膜)、膜面中央のばねストラット、吊りロッドおよび水平ロッドから構成される(写真3)。膜ユニットは、格子梁交点と1方向押えケーブルに支持されている(図3 Type IV-W)。

ばねストラット(写真4、図16)の設計方針は、「3. ばねストラット式張力膜構造の実大実験」を参照して、下記のような目標性能を表わす式を再録しこ

れより設定する。

a) ストラット反力を維持する

$$k = (1 - \dots) \times P_i / \dots \quad (1)$$

b) 風荷重時にストラット頂部が膜から離れない

$$k = (P_i - P_w) / (\dots + \dots) \quad (2)$$

ここで、 $k$ ：ばね定数、 $\dots$ ：膜応力(ストラット反力)維持率、 $P_i$ ：突上げ時のストラット反力、 $P_w$ ：風荷重時のストラット反力、 $\dots$ ：応力弛緩後のばねの伸び、 $\dots$ ：風荷重時のばねの伸びである。

1st Loadingの引張剛性を用いた形状解析において、初期張力2kN/mとした後にばねストラットを200mm突上げた時のストラット反力 $P_i$ は1490N(152kgf)と得られた。また、3rd Loadingの引張剛性を用いた応力変形解析により、風荷重時の膜面頂部鉛直変位は $w=199$ mmと得られた。さらに、実大実験と同様に膜材料の応力弛緩による膜面頂部鉛直変位を $r=80$ mm<sup>注1)</sup>と推定して、ばねストラットのばね定数を設定する。

a) ストラット反力を維持する。ストラット反力の維持率  $\dots=80\%$ として、

$$k = (1 - 0.8) \times 52 / 80 = 0.38 \text{ kgf/mm} \quad (3)$$

b) 風荷重時にストラット頂部が膜から離れない

$$k = (152 - 0) / (80 + 199) = 0.545 \text{ kgf/mm} \quad (4)$$

上記a)より、ストラット反力の維持率  $\dots=80\%$ としたばね定数 $k=0.38$ kgf/mmを、ラウンド数値として次の

表5 圧縮ばねの構造緒元

材 質	SWOSM-B
横弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	78.5
材 径 (mm)	6.5
コイル平均径(mm)	44
有効巻数	60
総巻数	62
自然長 (mm)	800
ばね定数 (N/mm)	3.43



写真3 膜ユニット



写真4 ばねストラット

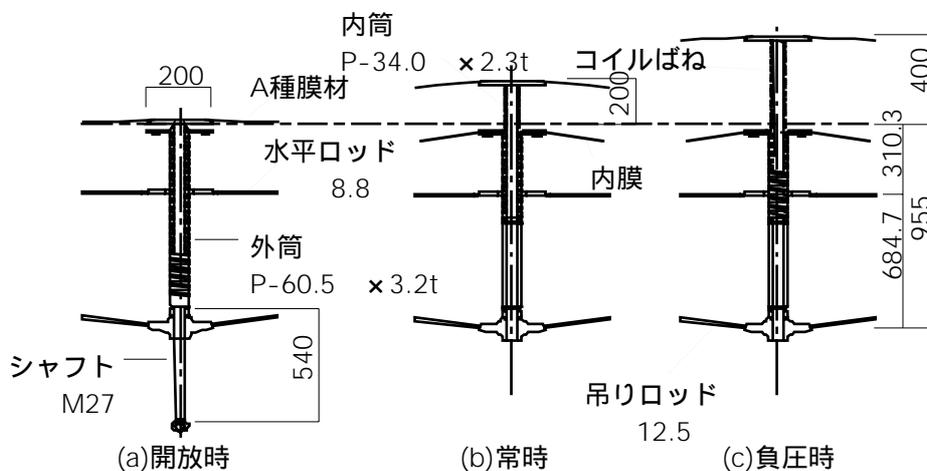


図16 ばねストラットの詳細

ようなばね定数を採用した（表5）。

ばね定数  $k=0.35 \text{ kgf/mm}=3.43 \text{ N/mm}$

#### 4.2 実測概要と実測結果

屋根膜は7つに分割され現場に搬入され、それぞれ現場で接合された。ここでは、北側の一つの膜ユニットに対して、曲面形成から約300日間（9.7ヶ月間）の長期実測をした結果を報告する（図17）。

膜応力の具体的な測定方法に関しては、機械的な方法で直接的に測定する方法の開発も行われているが、現状では膜材料の非線形性や異方性などから一般の材料のようにひずみを測定しこれを応力に変換することが困難である。このため、膜端部や吊点の反力あるいは束やケーブルの軸力を測定し、これらから膜応力を推定する方法が用いられることが多い。本建物の実測においても、吊りロッドにひずみゲージを貼付してこれを変換した軸力の経時変化を調査することにより、膜材料の応力弛緩などを推定する（図18）。

曲面形成は吊りロッドの長さ調整によりばねストラット位置を決定し、膜展張後にばねストラットを突上げることにより行った。この時、吊りロッドの軸力を測定することにより間接的にストラット軸力を管理しながら行った（写真5）。次に、北側膜ユニットのばねストラット突上げ、および南側膜ユニットのばねストラット突上げを行い曲面形成を完了した（図19）。

実測ユニットのばねストラットを突上げた時を初期値として、吊りロッド軸力から換算したばねストラット

軸力の残存率の経時変化を図20に示す。ここで、吊りロッドN2およびN4の実測値が安定しているのに対して、吊りロッドN1およびN3はストラット突上げ後2週間程度でひずみの値が著しく低下しほとんど0軸力になっている。このN1およびN3のひずみ低下の理由が説明できず、信頼性がないと判断し、吊りロッドN2およびN4の実測結果を代表して評価し、図24に示している。

実測は、初期の4日間を1時間毎に、20日後までを2時間毎に行い、その後は約200日（6.7ヶ月）後および約300日（9.7ヶ月）後に行っている。この実測結果では、約200日（6.7ヶ月）経過後のストラット反力の維持率は80%程度確保されているが、約300日（9.7ヶ月）経過後のストラット反力の維持率は70%程度になっている。これは、約260日（8.8ヶ月）経過後の2002年10月1日に台風21号が千葉県北西部を通過し、大きな風荷重を受けて膜応力が低下したものと推定する。千葉測候所（千葉市中央区中央港1-12-2 千葉港湾合同庁舎内5階）の10月1日の観測記録では、最大風速  $26.3\text{m/s}$ （西南西）、最大瞬間風速  $40.6\text{m/s}$ （西南西）であり、1966年4月の統計開始から両者共第3位の記録である。この最大風速は、船橋市の基準風速から算定される速度圧に対して3～4割程度に相当するものであ

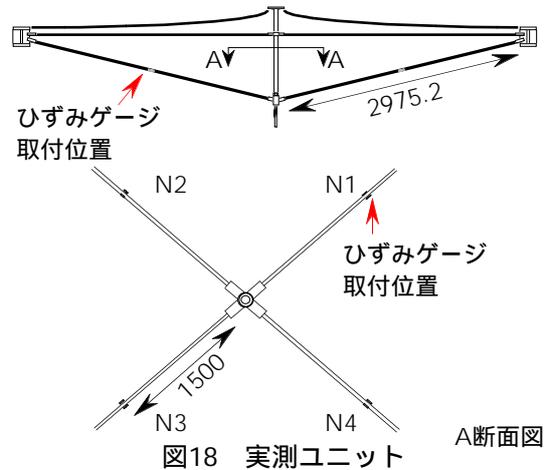


図18 実測ユニット

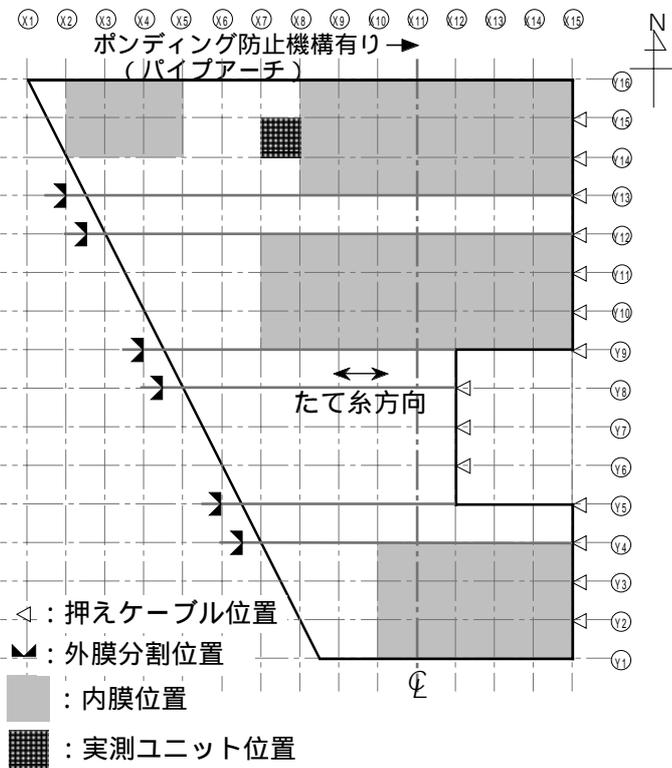


図17 膜屋根伏図



写真5 実測状況（膜施工中）

る。

なお、図20には、同一敷地内に建設されている単層トラスドームからホルン型張力膜構造を吊った日大理工レストドーム（設計：日本大学理工学研究所（若色峰郎、斎藤公男）、1989竣工）で実測された吊点反力の残存率の経時変化も合わせてプロットした。直径12m、吊点高さ5.4mのホルン型の張力膜（PTFE膜）は、初期の曲面形成直後に急激な吊点の低下が見られ、1日経過後に再度吊点を吊上げる張力調整を実施しているが、約100日（3.3ヶ月）後には吊点反力は約30%程度に低下している<sup>14）、15）</sup>。

竣工年および膜パネルの規模が異なる両者を直接比較することはできないが、直近を大きな台風（千葉測候所：最大風速 26.3m/s、最大瞬間風速 40.6m/s）が通過したにも拘わらず、約300日（9.7ヶ月）経過後にストラット反力の残存率が70%程度維持されたことは注目できる。このような実建物の長期実測結果を通し、「ばねストラット式張力膜構造」は、付加荷重に対する膜材料の応力弛緩に対して張力維持に有効な構造システムであることが実証できたと考える。

## 5. まとめ

本研究で提案した「ばねストラット式張力膜構造」の位置付けとその課題を含めて、得られた知見を下記に示す。

(1) 「ばねストラット式張力膜構造」は、ストラット式張力膜構造にばね機構システムを組み込み、低張力レベルの導入PSによる曲面形成と、張力再導入の不要化を意図した構造システムであり、下記のような特徴を有する。

(1-1) 製作が容易な平面膜を使用し、膜面中央をス

トラットにより突上げることにより低ライズでありながらホルン型と同様の形態抵抗性が発揮できる。

(1-1) ストラット部に内蔵したばねは、膜材料の応力弛緩発生時に自動的に伸張して膜面を突上げる機能を有し、ばね部の軸力に応じた膜応力を発生させることが可能である。このことにより、従来の張力再導入のように人為的な作業を要することなく、膜ひずみを進行させることで膜張力消失現象を回避できる。

また、以下のような検討課題を挙げた。

- (a) 非立体裁断膜の突上げ量と形態抵抗性に関する課題
- (b) 膜頂部の応力集中とディテールに関する課題
- (c) 導入PS量の設定と施工法
- (d) ばね設計上のクライテリアの設定とディテール設計手法
- (e) 基本ユニット周辺の支持方法

(2) 上記のような課題に対して、本章ではばねストラットシステムの本質的なテーマである「ばねの特性と膜材料の応力弛緩に対する基本挙動の確認」に絞り、ばねストラット式張力膜構造の基本ユニットに対して、実大実験（試験体：4.25m×4.25mの矩形膜(PTFE膜)）を行い、下記のような本構造システムの有効性を確認した。

(2-1) ばね定数とストロークをパラメータとした実験の結果、ばねストロークが大きくばね定数が小さいほど、例えばS137よりS470の方がストラット反力の変動が少なく、膜応力の維持効果が大きい。

(2-2) 風荷重による膜の浮き上がりに対するばねス

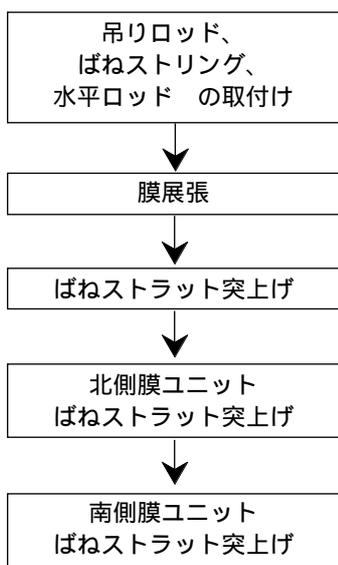


図19 曲面形成フロー

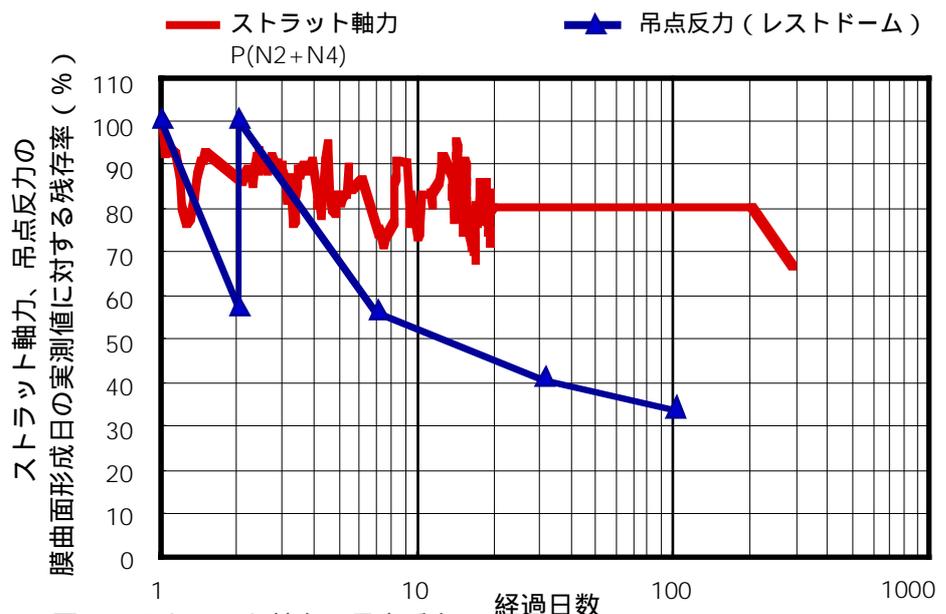


図20 ストラット軸力、吊点反力の膜曲面形成日の実測値に対する経時後の実測値の割合

トラットの追従性がある。

- (3) ばねストラット式張力膜構造を実建物（日本大学理工学部テクノスペース15）に適用し、曲面形成時からの長期実測期間中に直近を台風（千葉測候所：最大風速26.3m/s、最大瞬間風速40.6m/s、設計用速度圧の3～4割に相当）が通過したにも関わらず、約300日（約9.7ヶ月）経過した後のストラット軸力は約70%を維持しており、膜材料の応力弛緩に対する張力維持に有効な構造システムであることを実証した。

以上のように、ばね機構システムを組み込んだ「ばねストラット式張力膜構造」を提案し、基本ユニットに対する実大実験を行い力学性状を把握した結果、張力再導入を回避できる構造システムとして有効であることを確認した。さらに実建物の長期実測結果から、「ばねストラット式張力膜構造」は付加荷重に対する膜材料の応力弛緩に対する張力維持に有効な構造システムであることが実証できたと考える。

なお、「ばねストラット」の設計において本論では応力弛緩後のばねの伸びなどを推定して設定したが、「ばねストラット」の詳細な設計法を含めた「ばねストラット式張力膜構造」の構造計画は今後の検討課題である。今後、膜材料の応力弛緩を予測可能な構造解析手法を適用し、導入PS量およびばねストラットタイプの相違によりばねストラット式張力膜構造の基本力学特性に対する影響について報告する予定である。

#### 謝辞

本実験の実施に当たり試験体製作に関する貴重な資料を提供して頂いた太陽工業(株)斉藤嘉仁氏はじめ関係各位、ならびに実験の実施と論文作成に協力頂いた鷹羽直樹君、浦映二君、高田雄一君、宮田真紀君をはじめとする日本大学大学院生や斎藤研究室の卒業生各位に対し厚く感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 斎藤公男、黒木二三夫：ハコ型張力膜構造の基本的力学性状と単一膜ハコ構造の実験、張力膜構造の研究（その1）、日本建築学会構造系論文報告集、第404号、p.p.115-128、1989年10月
- 2) Saitoh,M. and Kuroki,F. : Horn Type Tension Membrane Structures, IASS Symp.(Madrid),1989
- 3) Saitoh,M., Sugizaki,K. and Nakajima,H. : Experimental Study of the Structural Properties on the Unit Type of Hybrid Tension Membrane Structures, IASS Symp.(Madrid)Vol.3,1989
- 4) 斎藤公男、中島肇：張力膜の応力-ひずみ曲線のモデル化に関する提案 - 載荷・除荷後の応力弛緩と張力再導入 -、日本建築学会大会学術講演梗概集B-1（東北）、p.p.1087-1090、2000年9月
- 5) 斎藤公男、黒木二三夫、浦映二、高田雄一、竹内一博：初期高張力導入膜に関する実験的研究（その1）、（その2）、日本建築学会大会学術講演梗概集B-1（東北）、p.p.1069-1072、2000年9月
- 6) 斎藤公男、黒木二三夫、中島肇、鷹羽直樹、浦映二：ばねストラット式張力膜構造に関する基礎的研究、（その1）、（その2）、日本建築学会大会学術講演梗概集B-1（東北）、p.p.1065-1068、2000年9月
- 7) 斎藤公男、黒木二三夫、岡田章、中島肇、浦映二、高田雄一：張力膜構造の応力弛緩に関する実験的研究（その1）ばねストラット式張力膜構造におけるばねの有効性の検討、日本建築学会大会学術講演梗概集B-1（関東）、p.p.901-902、2001年9月
- 8) 斎藤公男、黒木二三夫、岡田章、中島肇、浦映二、高田雄一：張力膜構造の応力弛緩に関する実験的研究（その2）膜剛性把握実験および剛性モデルの提案、日本建築学会大会学術講演梗概集B-1（関東）、p.p.903-904、2001年9月
- 9) Saitoh,M., Kuroki,F., Okada,A. and Nakajima,H. : Fundamental Study on Tension Membrane Structures with Spring-Strut, IASS Symp. 2001, Nagoya , TP049
- 10) 例えば、ばね技術研究会編：第2版 ばねの設計、丸善株式会社、1994年10月
- 11) 坪山幸王、永池雅人：日本大学理工学部テクノスペース15、日本建築学会編、「建築雑誌」増刊、日本建築学会作品選集2004、pp.8-9、2004.3
- 12) 斎藤公男：PICK UP テクノスペース15、新建築、p.180、2002.10
- 13) 斎藤公男、黒木二三夫、竹内一博：周辺開口部を持つシリンドラー型膜屋根の風荷重に関する研究、日本大学理工学部学術講演会論文集、構造・強度、B-20 pp.60-61、2000.11
- 14) 黒木二三夫、斎藤公男：ばねストラット式張力膜構造からなる大屋根の構造的検討テクノスペース15の研究報告、日本建築学会大会学術講演梗概集B-1（東海）、pp.957-958、2003.9
- 15) 斎藤公男、黒木二三夫：ハコ-式およびエト式張力膜の構造特性に関する模型および実大実験（その2）張力膜構造の研究、日本建築学会構造系論文報告集、第410号、pp.107-121、1990.4

注  
注1)

膜材料の応力弛緩後の中央鉛直変位は二軸引張試験結果と幾何学的な関係から下記のように推定した。

1) 二軸引張試験結果から概略の安定ひずみ  $s_s$  をたて糸、よこ糸方向それぞれに対して、以下のように設定する。

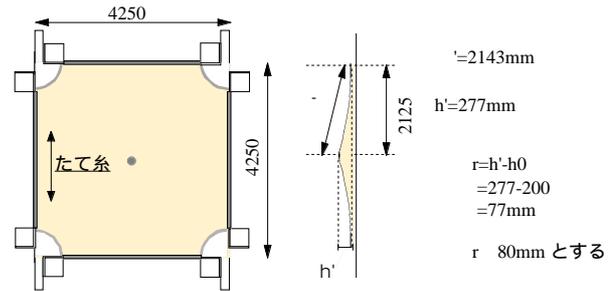
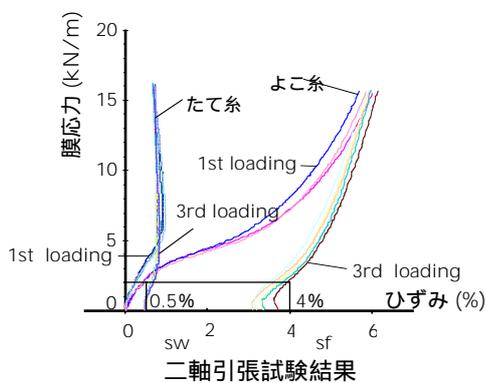
$$s_w = 0.005, \quad s_f = 0.04$$

2) 平張り時のひずみ  $\theta$  と安定ひずみ  $s_s$  の差  $s$  を 1st loading の膜剛性を用いて計算する。せん断応力を無視した応力とひずみで表現すると、下式ようになる。

$$N = D \times \theta, \quad \theta = D^{-1} \times N \text{ より}$$

$$N = \begin{bmatrix} N_w \\ N_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \\ 2 \end{bmatrix} \text{ kN/m の時 } \theta = \begin{bmatrix} \theta_w \\ \theta_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.005 \\ 0.016 \end{bmatrix}$$

$$s = s_s - \theta = \begin{bmatrix} 0.0 \\ 0.024 \end{bmatrix}$$



試験体寸法

4) 風荷重時の中央鉛直変位は、載荷実験時の風荷重を  $3 \text{ kN/m}^2$  と設定して、3rd loading の弾性定数を用いた膜要素による幾何学非線形解析により算定した。なお、二軸引張試験における1回目の荷重載荷を 1st loading と、また3回目の荷重載荷を 3rd loading と省略して表現した。

膜材料の解析用構造諸元

膜材	引張剛性 (kN/m)	ポアソン比	剪断剛性 (kN/m)
1st Loading	たて糸	0.12	65
	よこ糸	0.042	
3rd Loading	たて糸	0.78	65
	よこ糸	0.63	

3)  $s_s$  と 1st loading の引張弾性定数のたて糸：よこ糸 = 2.83 : 1 より  $r$  を推定した。

5) 以上を整理して下記の値を得た。

- 突上げ時ストラット反力  $P_i = 1.28 \text{ kN (131 kgf)}$   
( 1st loading の膜剛性 )
- 風荷重 (  $3 \text{ kN/m}^2$  ) のばねの伸び  $w = 57 \text{ mm}$   
( 3rd loading の膜剛性 )
- 応力弛緩後のばねの伸び  $r = 80 \text{ mm}$

## FUNDAMENTAL STUDY OF TENSION MEMBRANE STRUCTURES WITH SPRING-STRUT SYSTEM

Hajime Nakajima<sup>\*1</sup>, Masao Saitoh<sup>\*2</sup>, Fumio Kuroki<sup>\*3</sup> and Akira Okada<sup>\*4</sup>

### SYNOPSIS

The stability of Tension Membrane Structures (hereafter TMS) depends on existing prestress in the membrane. Therefore, the stress relaxation is an extremely essential problem for this structure. In Japan, the TMS is usually designed based on the idea that the stability of structures is secured by re-prestressing for relaxation. On the other hand, the TMS with spring-strut system proposed in this paper based on the different concept from the conventional TMS.

The purpose of this paper are to proposes of the TMS with spring-strut system and to reports on the effectually results obtained from a full-scale experiment on this system.

\* 1 Design Department, Shimizu Corporation, Dr. Eng.  
\* 2 Prof., Dept. of Architecture, Nihon University, Dr. Eng.  
\* 3 Associate Prof., Junior College of Nihon University, Dr. Eng.  
\* 4 Associate Prof., Dept. of Architecture, Nihon University, Dr. Eng.