張力膜構造における応力弛緩に関する構造解析的研究

(その2) ばねストラット式張力膜構造の構造特性

中島 肇^{*1} 斎藤 公男^{*2} 岡田 章^{*3}

梗 概

一般に恒久膜構造に使用される膜材料の構成要素である織糸の緩みやクリンプ交換およびコーティング樹脂の 粘弾性特性に起因した膜材料の応力弛緩は、張力の存在によって安定性を計る張力膜構造にとって本質的な構造 問題である。

本論文では、「設計、施工から維持管理までを含めた構造性能に関する信頼性の確保」を目的として、筆者らが提案し妥当性を検証した「塑性および応力弛緩を包含した材料非線形に対するマクロな応カーひずみ曲線モデル」および当該モデルに基づいた「構造解析手法」を、ばねストラット式張力膜構造に適用した解析シミュレーションを 実施し、導入PSおよびばねストラットタイプが構造挙動に与える影響などについて報告するものである。

1. はじめに

膜材料の応力弛緩による初期張力の消失は、張力の存在に よって安定性を計る張力膜構造にとって本質的な構造問題であ る。しかし、膜材料の非線形性に関する研究は多数見られるも のの、現状では膜材料の応力弛緩に関する研究は少なく、中で も膜施工時に導入した初期張力(以下「導入PS」という)が風荷 重や雪荷重などの繰り返し荷重後に減少する応力弛緩に関わ る材料試験に関する報告は、筆者らの知る限りにおいては見ら れない³⁾。また、構造解析的な研究については、膜材料の構成 要素をミクロにモデル化した織構造格子モデルに関する加藤ら の一連の研究の中に、積雪荷重の載荷・除荷を想定した研究^{60、 ⁷⁾があるが、粘性に関する諸定数の設定に課題があり、また実験 などの実現象との比較による検証がなされていない。すなわち、 膜材料の応力弛緩は、現状では未だ明確にされていない現象 と考える。}

一方、我が国における張力膜構造の構造設計および構造解 析は、導入PSが減少する応力弛緩に対して「張力再導入」という 維持管理を前提として行われているが、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。

筆者らの一連の研究^{2)~5)}は、これらの状況や問題点に着目して、「設計、施工から維持管理までを含めた構造性能に関する 信頼性の確保」を研究目的としている。「載荷・除荷後の膜材料 の応力弛緩を評価可能な構造解析手法の確立」は、この目的に 対するテーマの一つとして研究を進めてきた。具体的に「塑性 および応力弛緩を包含したマクロな材料非線形に対する応力– ひずみ曲線のモデル化」を提案^{20,30}し、さらにこれに基づいた 「基本解析フローおよび構造解析手法」を提示して、ばねストラ ット式張力膜構造の実大実験結果との比較を通して、上記モデ ルと解析手法の妥当性を検証した⁴⁰。前報¹¹では、この応力–ひ ずみ曲線のモデル化および構造解析手法をフラット膜に適用し た構造解析シミュレーションを実施し、導入PSの相違が構造挙 動に与える影響などについて報告した。

本論文では、膜材料の応力弛緩に対して張力維持に有効な 構造システムとして筆者らが提案した「ばねストラット式張力膜構 造」⁴に対して、導入 PS およびばねストラットタイプを解析パラメ ータとして、上記の構造解析手法を適用した構造解析シミュレー ションを実施し、当該パラメータが構造挙動に与える影響および 有効性などについて検討、考察を加えるものである。また、「3. まとめ」では、前報¹¹の研究成果を踏まえて、フラット膜およびば ねストラット式張力膜構造に共通の構造特性や、ばねストラット 式張力膜構造の構造特性について応力弛緩に着目してまとめ、 さらに本研究の成果や今後の課題および将来展望について総 括する。

なお、本論で使用している張力膜構造に関する特有の用語 および構造解析手法は、前報¹¹の「注 1)用語の定義」および「付 録 1)応カーひずみ曲線のモデル化と構造解析手法の概説」で 示しているので参照されたい。

^{*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} 日本大学理工学部建築学科 教授·博士(工学)



(a)応カーひずみモデルの概念図



2. ばねストラットシステムに対する構造解析シミュレーション

2.1 解析モデルと解析フロー

初期応力-ひずみモデル D_I および経時後応力-ひずみモ デル D_{III} は、膜材料の応力弛緩試験から得られた応力-ひず み曲線の特性を考慮し³⁾、また既報にてモデル化の妥当性が検 証されているバイリニアモデル⁴を採用する(図1)。

解析モデルは4.25m×4.25mの矩形膜(PTFE膜)および膜面中 央のばねストラットから構成される。ばねストラットは既報⁵⁾の試 験体と同様に、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(200φ)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を想定している。

解析モデルとして「ケーブル置換モデル」を採用する(図2)。 解析モデルは膜の応力集中を考慮してストラット頂部近傍のケ ーブル要素分割を細かくしているため、ケーブルの引張剛性は 図1(c)の弾性定数に各ケーブルの負担幅を乗ずることで求め た。また、ストラット突上げ時においてストラット反力Pは、ばねの 反力Psと外筒に流れる反力Poの和と等しくなるようにモデル化 している。なお、ストラット頂点とケーブル要素との接合方法は固 定としてモデル化し、解析モデル周辺の支持方法は4辺支持と した。

(c)応カーひずみモデルの弾性定数

PTFE膜		弾性定数(kN/m)			
		たて糸	よこ糸		
DI	第1勾配	350	190		
	第2勾配	1,320	590		
D <i>]]]</i>	第1勾配	90	60		
	第2勾配	1,430	900		





「ケーブル置換モデル」は、斎藤、黒木の研究により簡素化されたモデルとして実験値の応力および変形と良く一致したことが報告され⁸⁰、さらにバイリニア型モデルの妥当性も検証されている^{90、100}。また、実設計における利便性と実用性の観点からも有効な解析モデルであると考える。なお、既報⁴⁰では、まず応力弛緩を包含した応力ーひずみ曲線のモデル化と構造解析手法の確立を優先し、直交異方性弾性体として膜材料を取り扱う場合の相反定理および相当応力などの構造解析的処理は今後の課題として「ケーブル置換モデル」を採用しており、実大実験結果との比較を通してそのモデル化の妥当性を確認している。

構造解析は、I. 初期状態での曲面形成および初期付加荷重 (風荷重)載荷から、II. 応力弛緩状態を経て、III. 経時後の風荷 重載荷に至る各状態に対して行った(図3(a))。曲面形成は平 張り時の導入 PS 量を解析パラメータとして、それぞれ2kN/m (PS200)、4kN/m(PS400)、7kN/m(PS700)導入した後に、ばね ストラットにより膜中央部をスパンの約1/20に相当する200mmを 突上げることにより行った。曲面形成後、風荷重 2.8kN/m² (280kgf/m²)に対する初期状態解析、応力弛緩解析および風荷 重 2.8kN/m²に対する経時後・張力再導入解析を行った。

解析パラメータとして上記の平張り時の導入PS 量およびストラ ットタイプを設定して(図3(b))、これらが構造挙動に与える影響 について検討する。

ストラットタイプは、ばねの特性(ストロークとばね定数)として 柔らかいばね(S470)、硬いばね(S137)および、ばねのない (S0)の3つのストラットタイプを設定した。ばねは線形ばねをモ デル化している。ストラットタイプ「S470」は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、「S137」は応力弛緩 後の風荷重時の膜面鉛直変位に対してばねが追随することを それぞれ目標としている。なお、「S0」はばねを設けないタイプ である。これらのストラットタイプは既往の研究⁵⁾より PS400 を対 象とした構造解析結果から設定したものである。

2.2 解析結果

1) 膜応カーひずみ関係(図4)

ストラットタイプ毎にそれぞれの平張り時の導入 PS 量に対する I. 初期状態での曲面形成から、II. 応力弛緩状態を経て、III. 経時後の風荷重載荷に至る膜応力--ひずみ関係を図4に示す。

ばねのない S0 についてまず述べる。平張り時に PS200 (a1)、 PS400 (b1)および PS700(c1)をそれぞれ導入し、その後にばね ストラットを突上げて曲面を形成しているために、ストラット位置と 境界中央部を結ぶ十字状領域の膜応力は、すべてのケースで 初期応力–ひずみモデル D_Iの第2勾配に推移している。このた め、応力弛緩解析では、この D_Iの第2勾配の点からそれぞれ経 時後応力–ひずみモデル D_{II}の第2勾配の点からそれぞれ経 時後応力–ひずみモデルの 「本学校のでも、 を定している。 を定しずみの値は大きくなっている。 また、応力弛緩が収束した 状態での経時後の付加荷重載荷(III)状態での膜応力およびひ



(D) 肝们 ハファー	シ
-------------	---

ストラットタイプ	ばね	ばねストローク (mm)	ばね定数 (N/mm)	平張り時導入PS量(kN/m)		
71721242				2	4	7
S 0	無し			PS200-S0	PS400-S0	PS700-S0
S137	有り	137	9.84	PS200-S137	PS400-S137	PS700-S137
S470		470	3.68	PS200-S470	PS400-S470	PS700-S470

図3 解析パラメータと解析フロー

ずみの値は、平張り時の導入 PS 量が多くなるに従い大きくなっ ている。

このような傾向は、S137 および S470 にも同様に見られるが、 応力弛緩前後のひずみの値の差異は、柔らかいばねほど、ま た導入 PS 量が多いほど大きくなり(S470>S137>S0、PS700> PS400>PS200)、収束計算の中でばねストラットの伸張を良く追 跡していることが確認できる。













D

- 4

0.04

たて糸

25

20

15

10

5

0

25

20

10

5

0

0.00

膜応力N(kN/m) 15

0.00

膜応力N(kN/m)





(a3)PS200-S470



(b3)PS400-S470

(b1)PS400-S0

0.02 ひずみ ε



た

(b2)PS400-S137





(c1)PS700-S0

(c2)PS700-S137 図4 膜応力N-ひずみ ε 関係

0.02

ひずみε

0.04

0.00

(c3)PS700-S470

2) 応力弛緩前後の膜面形状(図5)

PS400 に対する平張り時、ストラット突上げ時および 応力弛緩後のたて糸およびよこ糸方向(w-o-f)の鉛直 方向座標(以下「膜面形状」という)をストラットタイプ毎 に図5に示す。

平張り時およびストラット突上げ時の膜面形状には、 ストラットタイプによる相違はない。応力弛緩後の膜面 中央点 o の鉛直座標は、S470 で 22.40cm(a)、S137 で 22.07cm(b)、S0 で 20.00cm (c)であり、応力弛緩により ばねストラットがそれぞれ2.40cm、2.07cm、0cm伸張し ていることが分かる。たて糸方向(o-w)はよこ糸方向 (o-f)より直線的な形状を示しており、ストラット突上げ あるいは伸張により引張剛性の高いたて糸を主、よこ 糸を従として膜面全体を押し上げることにより、張力導 入効果を発揮していると考える。

3) 応力弛緩前後の膜応力分布(図6)

PS400 に対するストラット突上げ時および応力弛緩 後の膜応力分布を、ストラットタイプ毎に図6に示す。

曲面形成時にすべてのストラットタイプで 200mm 突 上げているので、突上げ時の膜応力分布は、ストラット タイプに関係なく平張り時の導入 PS 量に応じて同一 である。応力弛緩後は、ストラット位置と境界中央部を 結ぶ十字状領域(w-o-f)ではストラットタイプにより膜 応力分布に相違が見られるが、その他の領域では膜 応力分布に差異は見られない。

ストラット突上げ時の十字状領域の膜応力はたて糸 12.04~14.17kN/m、よこ糸 7.67~10.38kN/m である。 応力弛緩後に残存している十字状領域の膜応力は S470 でたて糸 7.93~8.71kN/m、よこ糸 1.79~ 3.06kN/m(a)、S137でたて糸7.62~8.40、よこ糸1.68~ 2.86kN/m(b)、S0 でたて糸 6.87~7.56、よこ糸 1.60~ 2.49kN/m(c)であり、柔らかいばねほど大きな膜応力 が残存しており(S470>S137>S0)、ばねストラットの 効果が見られる。

一方、その他の領域では、ストラット突上げ時の膜応 力はたて糸 4.00~5.61kN/m、よこ糸 4.00~4.84kN/m であり、応力弛緩後に残存している膜応力はストラット タイプに関わらずたて糸 1.03~1.37kN/m、よこ糸 1.26 ~1.37kN/m である。フラット膜モデルで残存している 膜応力は、たて糸1.03kN/m、よこ糸1.26kN/mであるこ とから1)、この領域にはストラット突上げ効果は見られ るもののばねストラットの伸張による影響は及んでい ないように思われる。これは、十字状領域の膜応力が 卓越する傾向のある「ケーブル置換モデル」の特性に 起因したものであると思われる。

4) 曲面形成から応力弛緩前後の風荷重時の挙動 (図7)







図6 応力弛緩前後の膜応力分布 (PS400)

6/12

ストラット反力と膜面頂部鉛直変位の関係を図7(a)に示す。

ストラット突上げ時には、ストラット反力と膜面頂部鉛直変位の 関係に非線形性が見られる。200mm 突上げた時のストラット反 力は、ストラットタイプに関わらず、平張り時導入 PS 量に依存し PS700 で4.4kN、PS400 で3.1kN、PS200 で1.3kNとなっている。 突上げ直後にストラット反力が変位を伴わずに減少している。こ れは、風荷重初期載荷時の低荷重域では、膜面の上方向変位 に伴い剛性の高い外筒の反力(軸力)のみが急激に減少し、ば ね反力および変位には顕著な変動が見られないことに起因して いる。このように風荷重載荷に移行する前に不連続な挙動を示 し、その後の風荷重載荷では、PS200-S470 を除き、導入 PS 量 に関わらずストラットタイプ毎に同一直線上の線形挙動が見られ る。この PS200-S470 は突上げ時のストラット反力が 1.3kN であり、 同じストラットタイプで導入 PS の異なる PS400-S470 あるいは PS700-S470 のストラット反力の 1.7kN に達していないことが、同 じ挙動の見られない原因であると考える。また、ストラットタイプ S0は、すべての導入PS量に対して風荷重時にストラット反力が 消失し膜面頂部変位が増加している。これは、ストラット頂部と膜 面が離間している現象を示している。

平張り時導入 PS 量が中張力の PS400 および低張力の PS200 では、応力弛緩後のストラット反力および頂部変位はストラットタ イプにより異なり、柔らかいばねほど大きく(S470>S137>S0)、 ばねストラットが有効に作用していることが分かる。なお、PS200 の頂部変位はどのストラットタイプでも最大の値を示している。 導入 PS 量の多い PS700 では、応力弛緩後のストラット反力はス トラットタイプに関わらず同一の 1.8kN であり、ばねは伸張して いない。

境界部たて糸膜応力と膜面頂部鉛直変位の関係を図7(b)に、 ストラット近傍の中央部たて糸膜応力と膜面頂部鉛直変位の関 係を図7(c)示す。



図7 曲面形成から風荷重載荷までの挙動

8/12

ストラット突上げ時および風荷重時共に非線形挙動を示し、スト ラット反力と同様に突上げから風荷重への切替点で値が不連続 となっている。

ストラット突上げ時には、ストラットタイプに関わらず、導入 PS 量に応じた挙動がそれぞれに見られる。応力弛緩後に残存する 膜応力は、導入 PS 量が多いほど大きい(PS700>PS400> PS200)。PS200、PS400 では、残存する膜応力および膜面頂部 鉛直変位は柔らかいばねほど大きい(S470>S137>S0)。また、 風荷重の低荷重域では、S470、S137 に膜応力の増分はほとん ど生じないが膜面頂部変位が急激に増加している挙動が見ら れる。

5) 風荷重時の挙動(図8)

風荷重とストラット反力の関係を図8(a)に示す。

風荷重初期載荷時のPS700およびPS400のストラット反力は、 それぞれ4.4kN、3.1kNから風荷重の増加と共に急激に減少し、 ストラットタイプによりそれぞれ立ち上がるように分岐している。 PS200 のストラット反力は、1.3kN を初期値として風荷重載荷直 後からストラットタイプによりそれぞれ異なった減少傾向を示して いる。

応力弛緩後の風荷重時では PS700 のストラット反力は、すべ てのストラットタイプで反力 1.8kN を初期値としてストラットタイプ 毎にそれぞれ減少している。PS400、PS200 はそれぞれのストラ ットタイプで異なった反力を起点として減少している。S470 はど の導入PS量においても、ストラット反力は消失していない。S137 は、応力弛緩後の PS200 を除いて、ストラット反力は消失してい ない。S0はすべての導入PS量において風荷重の増加と共にス トラット反力が消失している。ストラット反力の消失は、膜面頂部 鉛直変位と共に膜面とストラットとの離間を分析するための重要 な判断材料である。

風荷重と膜面頂部鉛直変位の関係を図8(b)に示す。

風荷重と膜面頂部鉛直変位の関係には非線形性が見られ、 平張り時の導入 PS 量が少ないほど風荷重に対する鉛直変位は 大きい。また、応力弛緩後には S470、S137 で載荷前に既にば ねストラットが伸張しており、鉛直変位も大きい。これらは、載荷 前の膜応力が小さいほど、鉛直変位あるいはばねストラットの伸 張が大きくなる傾向を示している。

風荷重の低荷重域では、導入 PS 量が少ないほど、また応力 弛緩のより膜応力が低下するほど、剛性が低い傾向が見られる。 PS200 では、わずかな風荷重の増加により急激に変位し、風荷 重 0.3kN/m²(30kgf/m²)付近から剛性が立ち上がっている。ただ し、PS200-S0 は風荷重が 0.5kN/m²(50kgf/m²)付近まで変位せ ず、その後膜面の変位と共に膜面とストラットが離間している。風 荷重がほぼ1kN/m²(100kgf/m²)以上での剛性は、導入 PS 量お よび応力弛緩の前後に関わらず、ストラットタイプによりほぼ同 様の傾向で推移しているように見えるが、低荷重域での挙動の 相違により最終的な変位の値は異なっている。PS400 および PS700 では、応力弛緩後の S470、S137 を除いて、それぞれ風 荷重 0.5 および1kN/m²程度までは膜面頂部の鉛直変位は見ら れない。

風荷重と境界部のたて糸方向の膜応力との関係を図8(c)に、 よこ糸方向の膜応力との関係を図8(d)に示す。同様に、風荷重 とストラット近傍中央部のたて糸方向の膜応力との関係を図8(e) に、よこ糸方向の膜応力との関係を図8(f)に示す。

風荷重と膜応力の関係には低荷重域で一度膜応力が減少す るような非線形性が見られるが、荷重の増加に共ない線形挙動 を示す傾向が見られる。この傾向は、導入PS量が多いほど顕著 に見られるように思われる。一度膜応力が減少する傾向は、曲 面形成時の形状から風荷重の載荷により膜面が反転する現象 を示していると考えられる。

応力弛緩前の PS700 を除いて、導入 PS 量が多いほど膜応力 が大きく、応力弛緩前と比較して応力弛緩後の膜応力は小さい 傾向が見られる。応力弛緩後の PS400 および PS200 を除いて、 膜応力の起点は導入 PS 量毎のそれぞれ一致し、風荷重が増加 すると風荷重と膜応力の関係は導入 PS 量毎にほぼ同様の傾向 を示している。この傾向は境界部よこ糸方向膜応力に顕著であ る。

3. まとめ

本論文では、「塑性および応力弛緩を包含した材料非線形に 対するマクロな応力--ひずみ曲線のモデル化」およびこれに基 づいた「構造解析手法」をばねストラット式張力膜構造に対して 適用し、導入PS およびばねストラットタイプを解析パラメータとし て構造解析シミュレーションを行った。ここでは、前報¹¹のフラッ ト膜に関する研究成果も含め、下記のような項目に対して応力 弛緩に関する構造特性および今後の課題などについて総括す る。

- 1)フラット膜およびばねストラット式張力膜構造に共通の構造特 性
- 2)ストラット式張力膜構造の構造特性

3)研究成果、今後の課題および将来展望

1) フラット 膜および ばねストラット 式張力 膜構造に 共通の構造 特性

4.25m×4.25mのフラット膜(PTFE 膜)¹¹、および4.25m×4.25m の矩形膜(PTFE 膜)と膜面中央のばねストラットから構成される ばねストラット式張力膜構造を対象として、平張り時の導入 PS 量 あるいはストラットタイプを解析パラメータとして、構造挙動に与 える影響について比較検討し、下記のような共通の知見を得 た。

- (1)ストラットにばねを内蔵した「ばねストラット」は膜材料の応力 弛緩に対して膜応力を維持する効果があり、これを組み込 んだばねストラット式張力膜構造は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。
- (2)導入PS量が多いほど、突上げ時の膜応力、応力弛緩量、残 存している膜応力および安定ひずみの値が大きい。
- (3) 導入 PS 量が多いほど、自重時および応力弛緩前後での膜 面の形状変化および風荷重時の鉛直変位が小さく、変位が 生じにくい。



図8 風荷重時の挙動

- (4) 導入 PS 量が多いほど、また柔らかいばねほど、残存してい る膜応力および安定ひずみの値が大きい。
- (5)風荷重と膜面中央鉛直変位の関係には非線形性が見られ、 載荷前の膜応力が小さいほど鉛直変位が大きい。風荷重の 低荷重域では、導入PS 量が少ないほど、また応力弛緩によ り膜応力が低下するほど、わずかな風荷重の増加により急 激に変位する低剛性の傾向が見られる。
- (6) 風荷重と膜応力の関係には低荷重域で若干の非線形性が 見られるが、荷重の増加に伴ない線形挙動を示す傾向が見 られる。載荷前の膜応力が大きいほど膜応力が大きい。

以上のようにフラット膜およびばねストラット式張力膜構造に 対する基本特性を明らかにした。さらに、フラット膜およびばね ストラット張力膜構造に対する風荷重と、応力弛緩後の膜面中央 部鉛直変位との関係を、平張り時の座標を基準として図9のよう にプロットした。上記にも述べたが、導入 PS 量が多いほど鉛直 変位が小さく、張力により付加される幾何剛性の影響が見られる。 また、フラット膜とばねストラットを比較すると、最大の風荷重で はそれぞれの導入 PS 量に対する鉛直変位には大きな相違は 見られない。しかしフラット膜では、導入 PS 量が少なく、あるい は応力弛緩により膜応力が低下した場合には、風荷重の低荷重

> フラット膜 Ⅲ S470

Ш

PS200

PS400

PS700

域において、わずかな風荷重の増加により剛体変形を伴う大き な変位が生じる特性が見られ、風荷重の低荷重域での不安定 性が懸念される。ここでは本研究のテーマである膜材料の応力 弛緩による導入 PS の減少による張力膜構造の構造安定性に対 する課題を示し、導入PS 量などの設定の重要性を明らかにした。 さらに、フラット膜と剛性を比較すると、ばねストラット式張力膜構 造は膜中央部をライズ/スパン比でわずかに0.047だけ突上げ ただけであるが、空間構造の特徴である形態抵抗性を有してい る。

2) ばねストラット式張力膜構造の構造特性

ばねストラット式張力膜構造に関して得られた知見を下記にま とめる。

- (1)ストラット突上げ時には、ストラット反力および膜応力と膜面 頂部鉛直変位との関係に非線形性が見られ、その挙動は平 張り時の導入 PS 量に依存している。
- (2) 導入 PS 量が少ないほど、また柔らかいばねほど、応力弛緩 によりばねストラットは大きく伸張し、ばねストラットが有効に 作用している。ただし、導入 PS 量が高張力の場合にはばね は伸張していない。

w

たて糸方向

0



図9 風荷重 W - 膜面中央部鉛直変位 δ (応力弛緩後)

(3)応力弛緩後に残存している膜応力は、ストラット位置と境界 中央部を結ぶ十字状領域では、柔らかいばねほど大きく、 ばねストラットの効果が見られる。その他の領域では、残存 している膜応力はストラットタイプに関わらず同じである。

また、同構造システムの風荷重時の挙動に関しては、下記の ような構造特性を有している。

- (4) ストラット反力と膜面頂部鉛直変位との関係には、導入 PS 量 に関わらず、ストラットタイプ毎に定まる同一直線上の線形 挙動が見られる。ただし、導入 PS 量が少なくストラット反力が 著しく低下している場合にはこの限りではない。
- (5) ストラットタイプ S0 は、すべての導入 PS 量(2-7kN/m) に対して風荷重時にストラット頂部と膜面が離間している。
- (6)風荷重と膜応力の関係には、ストラットタイプに関わらず導入 PS 量に依存し、導入 PS 量に応じた挙動を示す。
- (7) ストラット反力は、初期付加荷重(処女状態の膜面に最初に 載荷される荷重)時には、導入 PS 量に応じた初期値から風 荷重の増加と共に急激に減少し、その後ストラットタイプ毎 に分岐して緩やかに減少している。応力弛緩後は、S470 は どの導入PS 量においてもストラット反力は消失していないが、 S137 は PS200 で、S0 は全ての導入 PS 量で消失している。

また、ばねストラット式張力膜構造の解析モデルやばねストラットタイプに関する検討課題を以下に示す。

- (1) 応力弛緩後に残存している膜応力は、ストラット位置と境界 中央部を結ぶ十字状領域(w-o-f)では、柔らかいばねほど 大きく、ばねストラットの効果が見られるが、その他の領域で は、残存している膜応力はストラットタイプに関わらず同じで ある。フラット膜モデルでの残存している膜応力と比較すると、 この領域にはストラット突上げ効果は見られるものの、ばねス トラットの伸張による影響は及んでいないように思われる。こ れは、十字状領域の膜応力が卓越する傾向のある「ケーブ ル置換モデル」の特性に起因したものであるとも考えられ、 今後、さらに精度向上を図り、膜面全体に対する突上げ効果 も期待できる「膜要素モデル」を適用した詳細な検討を加え る必要があると思われる。
- (2) 導入PS 量が高張力のPS700 においては、応力弛緩後のスト ラット反力はストラットタイプに関わらず同一であり、ばねは 伸張していない。高張力導入タイプは、高張力の導入 PS に より膜材料の応力弛緩を取除くことを意図したものであり、本 検討より PS700 が高張力の一つの目安になると考える。中・ 低張力を対象にばねストラット式張力膜構造を提案した意図 を考慮すれば、高張力導入タイプへの適用の合理性および 適用の際のばね特性について検討する必要があると考え る。

3) 研究成果、今後の課題および将来展望

筆者らの一連の研究では、膜材料の応力弛緩が張力膜構造 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 ていない現象であることを明らかにした。これに対して、設計、 施工から維持管理までを含めた構造性能を、信頼性をもって評 価し明確な根拠をもって提示することを目的として、「塑性および応力弛緩を包含した材料非線形に対するマクロな応力-ひずみ曲線のモデル化」およびこれに基づいた「構造解析手法」に関して提案し^{2)、3)}、妥当性を検証した⁴⁾。さらに、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」を提案し、その有効性を実証した⁵⁾。

本論文では、上述のように本研究のテーマである膜材料の応 力弛緩による導入 PS の減少による張力膜構造の構造特性およ び構造安定性に対する課題を示し、導入PS 量およびばねストラ ットタイプの設定の重要性を明らかにした。

また、応力弛緩解析において、フラット膜では応力弛緩前後 で同一のひずみの値が得られたのに対して、ばねストラット式 張力膜構造ではひずみの値は構造モデルの全体系の中で収 束計算が実行されるので、必ずしも一定値を示していないが、こ の現象は妥当である。このように、本研究成果である応力弛緩 解析は各種構造システムに対応可能であることが示唆された。

今後の課題としては下記が挙げられる。

- (1)本応カーひずみ曲線のモデル化を膜要素モデルに適用した構造解析手法などを検討しさらなる精度の向上を図る。
- (2)本論文では、膜応カーひずみ曲線にバイリニアモデルを採用した。例えば、経時後応カーひずみモデル Dmにトリリニア型の応カーひずみモデルを適用し検討することにより、モデル化による性状の差を定量的に評価する。
- (3) 引張弾性定数算定時の値のばらつきが解析結果に及ぼす 影響度を検討する。
- (4)応力弛緩は繰り返し荷重による膜応力の履歴および付加荷 重の種類(雪荷重、風荷重)の影響を受けると考えられる。こ れらの影響を評価する材料試験データを蓄積し、その影響 を検討する。

最後に、本研究で示した成果が、張力膜構造の設計に展開 および適用されること、さらに下記のような研究に発展していくこ とを期待している。

- (1) 膜材料の応力弛緩による導入 PS の減少に伴う張力膜構造 の構造安定性に対する評価方法、さらに、形態抵抗性、導 入 PS 量およびばねストラットの特性(ストロークとばね定数) を踏まえた風荷重の低荷重域での構造安定性に関する研究
- (2)本論で提案した応力ーひずみ曲線モデルを利用することにより「ばねストラット式張力膜構造」の構造計画から施工までの詳細な設計法に関する研究

謝辞

本構造解析に協力頂いた博士(工学) 宮里直也君(現 構造 計画プラス・ワン)、佐藤裕子君(現 トニー)、坂本憲太郎君(現 金箱構造設計事務所)および櫻井優貴君(現 山下設計)をはじ めとする空間構造デザイン研究室の卒業生各位ならびに本論 文作成に協力頂いた永井佑季君、畠山峰行君他の日本大学大 学院生諸君に対し厚く感謝の意を表します。

参考文献

- 中島肇、斎藤公男、岡田章:張力膜構造における応力弛緩 に関する構造解析的研究、膜構造研究論文集、pp.13-23、 2006.12
- 2) 中島肇、斎藤公男: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)、 pp.1087-1090、2000.9
- 3) 中島肇、斎藤公男、黒木二三夫、岡田章: 膜材料の応力-ひ ずみ曲線のモデル化に関する研究、張力膜構造の応力弛 緩に関する基礎的研究(その1)、日本建築学会構造系論文 集、第579号、pp.63-70、2004.5
- 4) 中島肇、斎藤公男、黒木二三夫、岡田章: 膜材料の応力弛 緩を考慮した応力-ひずみ曲線を適用した数値解析、張力 膜構造の応力弛緩に関する基礎的研究(その2)、日本建築 学会構造系論文集、第591号、pp.85-92、2005.5
- 5) 中島肇、斎藤公男、黒木二三夫、岡田章: ばねストラット式張 力膜構造に関する基礎的研究、膜構造研究論文集、 pp.23-36、2006.12

- 6)加藤史郎、吉野達矢:膜の材料非線形性を考慮した応力・変 形解析ー構成則に直交異方性弾性体と織構造格子モデル を用いた場合の比較ー、膜構造研究論文集、pp.17-28、 1996.12
- 加藤史郎、吉野達矢、南宏和: 膜構造物の応力減少に関する解析的予測、 膜構造研究論文集、 pp.13-22、 1997.12
- 斎藤公男、黒木二三夫:ホルン型張力膜構造の基本的力学性 状と単一膜パネルの構造実験、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、pp.115-128、 1989.10
- 9) 佐藤起司、斎藤公男、黒木二三夫: 膜材料の剛性評価法に 関する基礎的研究、(その3) 正方形平面膜における剛性評 価法の提案、日本建築学会大会学術講演梗概集B(関東)、 pp.1373-1374、1993.9
- 10) 黒木二三夫:サドル型張力膜構造の力学特性と構造解析手 法に関する研究、学位申請論文、1994.4

STRUCTURE ANALYTICAL STUDY ON STRESS RELAXATION IN TENSILE MEMBRANE STRUCTURES

Part 2 Stuructural Principle on Tensile Membrane Structure with Spring-Strut System

Hajime Nakajima^{*1)}, Masao Saitoh^{*2)} and Akira Okada^{*3)}

SYNOPSIS

Membrane materials commonly used for permanent membrane structures have particular material characteristic such as the stress relaxation, which are caused by slackness and crimp interchange of yarns and viscoelasticity of coating resin. On the other hand, the disappearance of prestress by the stress relaxation of membrane materials is an extremely essential problem for Tensile Membrane Structure (hereafter TMS) stabilized by existing prestress in the membrane.

In order to secure the structure performance, which includes design, construction and maintenance, "the macro-modeling of stress-strain curves which shows material nonlinearity including plasticity and stress relaxation of membrane materials" and "the structure analytical technique using this modeling" were proposed in our study, and their validity was verified. In this paper, the structure analytical technique is applied to the TMS with Spring-Strut System, and structural behaviors influenced by the amount of the introducted prestress and spring-srut type are presented.

*1) Design Department, Shimizu Corporation, Dr. Eng.

*2) Prof., Dept. of Architecture, Nihon University, Dr. Eng.

*3) Prof., Dept. of Architecture, Nihon University, Dr.Eng.