

張力膜構造における応力弛緩に関する構造解析的研究

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「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」を提案し妥当性を検証した構造解析手法を、フラット膜に適用した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するものである。

1. はじめに

一般に恒久膜構造に使用される膜材料は、たて糸とよこ糸を波状に織った繊維織物とこれをコーティングした樹脂により構成される。この膜材料は、a) 構成要素の材料特性、b) 繊維織物の構成特性、c) 織糸のクリンプ交換およびd) 織糸とコーティング樹脂の抵抗メカニズムに起因した(1) 非抗压性、(2) 異方性、(3) 塑性^{注1)}、(4) 粘弾性(クリープ、応力弛緩^{注1)})などの独特の材料特性を有している。

膜材料の応力弛緩による初期張力^{注1)}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が、現状では膜材料の応力弛緩に関する研究は少なく、この中でも風荷重や雪荷重などの繰り返し荷重後に膜施工時に導入した初期張力(以下「導入PS」という)^{注1)}が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²⁾。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、張力膜構造(HP曲面)に対して積雪荷重の載荷・除荷を想定した応力・変形解析に関する研究^{4)、5)}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言える。

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」^{注1)}という維持管理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。

筆者らの一連の研究^{1)~3)、6)}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^{1)、2)}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提案した応力-ひずみ曲線のモデル化およびこれを適用した構造解析手法の妥当性を検証した³⁾。

本論文では、この応力-ひずみ曲線のモデル化および構造解析手法^{付録1)}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するものである。

* 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 日本大学理工学部建築学科 助教授・博士(工学)

2. フラット膜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-ひずみ曲線の特徴を考慮し²⁾、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³⁾を採用する(図1)。

解析モデルは、基礎的な知見を得ることを目的として $4.25\text{m} \times 4.25\text{m}$ のフラット膜 (PTFE膜^{注1)}) を選定した(図2)。「ケーブル置換モデル」としてケーブル要素の引張剛性は図1(c)の弾性定数に各ケーブルの負担幅を乗ずることによってモデル化し、解析モデル周辺の支持方法は4辺支持とした。「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⁷⁾、さらにバイリニア型モデルの妥当性も検証されている^{8), 9)}。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られる。なお、既報³⁾では、まず応力弛緩を包含した応力-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

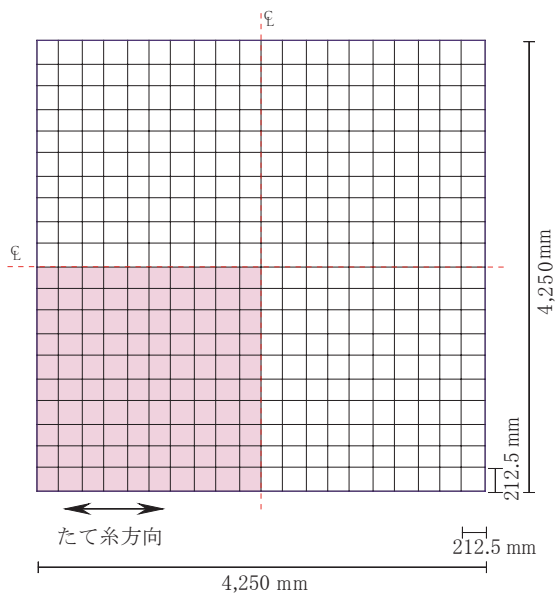
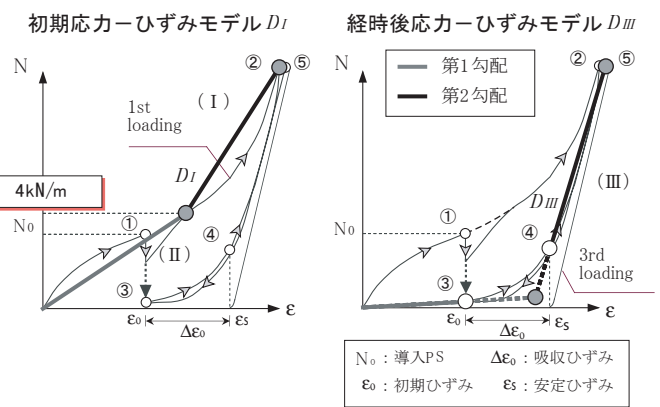
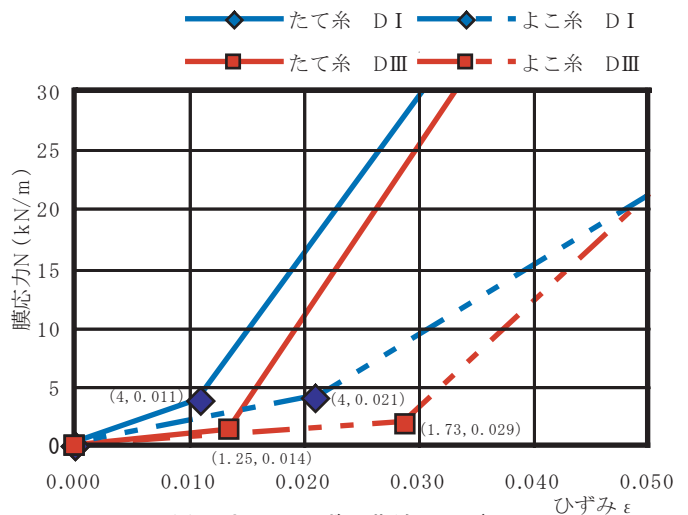


図2 解析モデル (ケーブル置換モデル)



(a) 応力-ひずみモデルの概念図

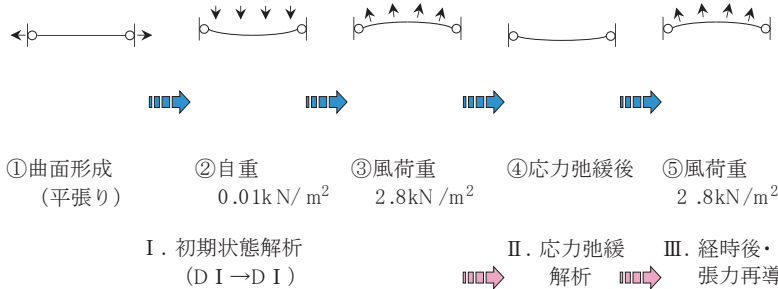


(b) 応力-ひずみ曲線のモデル化

(c) 応力-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
D_I	第1勾配	350	190
	第2勾配	1,320	590
D_{III}	第1勾配	90	60
	第2勾配	1,430	900

図1 応力-ひずみモデル



(a) 解析フロー

(b) 解析パラメータ

平張り時 導入PS量 (kN/m)	2	4	7
名称	PS200	PS400	PS700

図3 解析パラメータと解析フロー

よび相当応力などの構造解析的处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（自重および風荷重）载荷から、II. 応力弛緩状態を経て、III. 経時後の風荷重载荷に至る各状態に対して行った（図3（a））。曲面形成における平張り時の導入PS量を解析パラメータとして、それぞれ2、4、7 kN/m導入する（図3（b））。その後、自

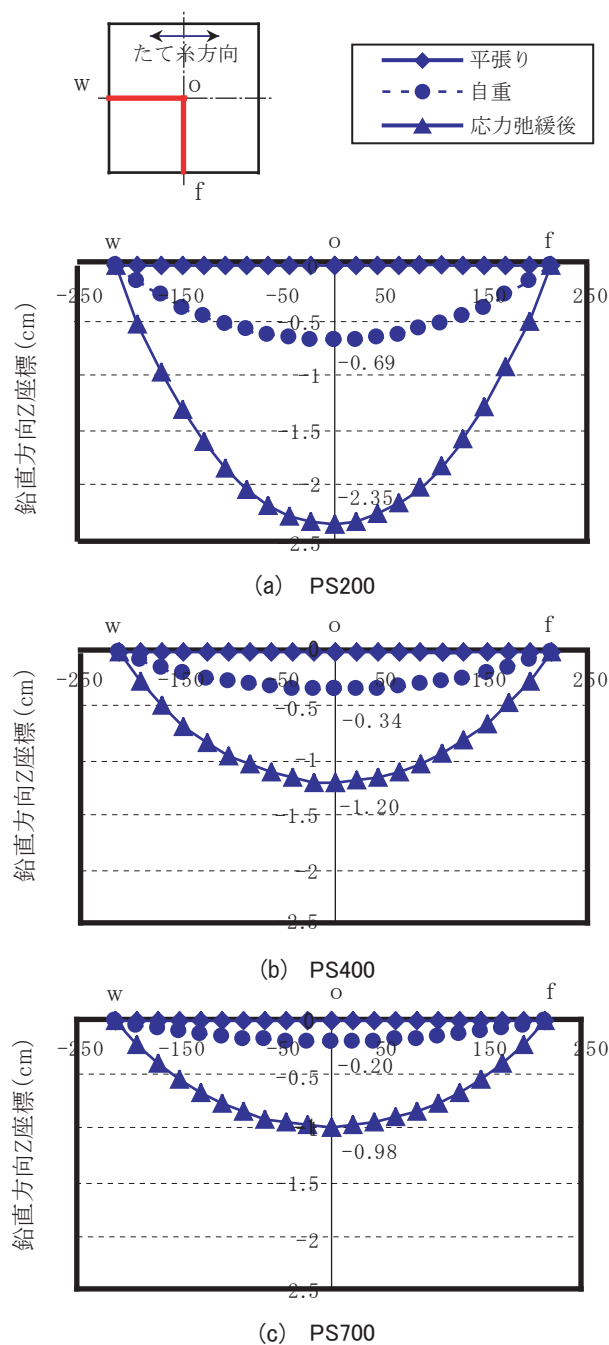
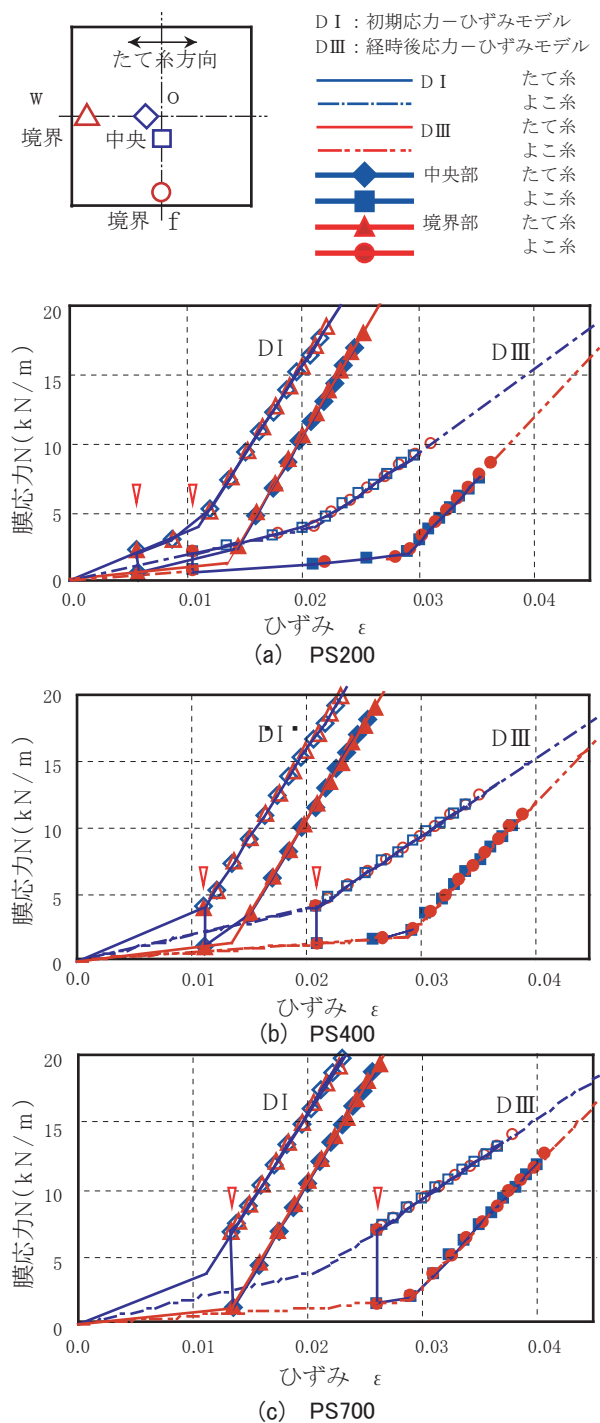
重 0.01kN/m^2 (1kgf/m^2) および風荷重 2.8kN/m^2 (280kgf/m^2) に対する初期状態解析、応力弛緩（e））にも同様の傾向が見られる。

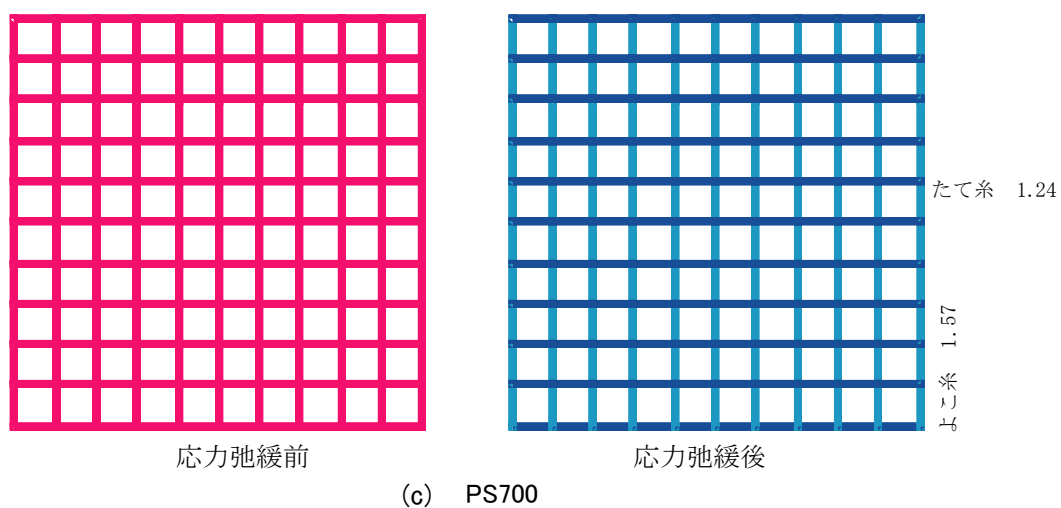
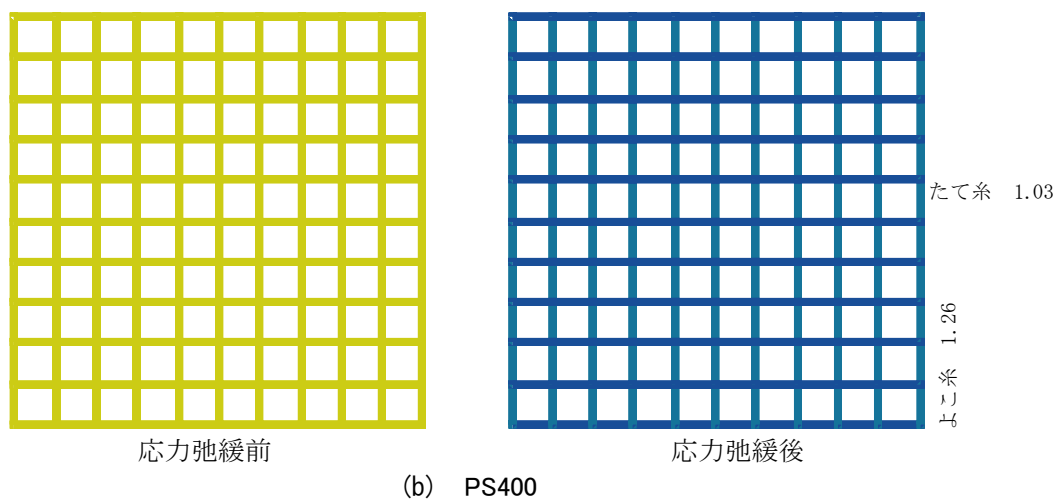
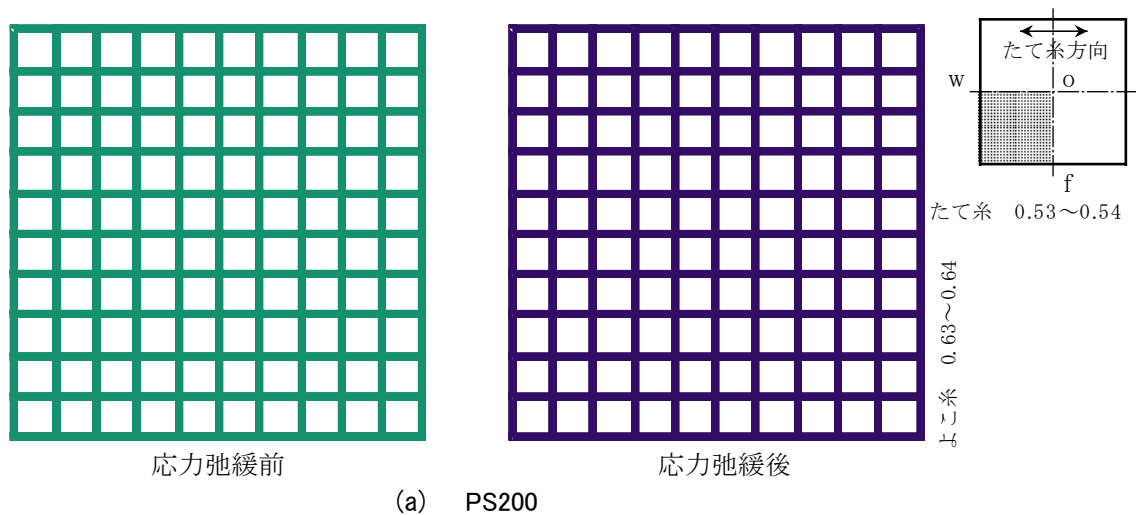
動に与える影響について比較検討する。ここで、応力弛緩後の挙動は解析モデルのすべての要素の応力弛緩が収束した状態での挙動を示している。

2.2 解析結果

1) 膜応力-ひずみ関係

それぞれの平張り時の導入PS量に対する、I. 初期





膜応力(kN/m)



図6 応力弛緩前後の膜応力分布 (自重時)

状態での曲面形成および初期付加荷重（自重および風荷重）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膜応力-ひずみ関係を図4に示す。

応力弛緩解析において、PS200は初期応力-ひずみモデルDI上の第1勾配の中間点（図4(a)）から経時後応力-ひずみモデルDIII上に収束計算され、PS400は第1勾配と第2勾配の変換点から（図4(b)）、PS700は第2勾配に推移した点（図4(c)）からそれぞれ経時後応力-ひずみモデルDIII上に収束計算されていることが確認できる。平張り時の導入PS量が、PS200、PS400、PS700の順に多くなると、応力弛緩量は多くなるが残存している膜応力は大きくなっている。同様に、初期ひずみの値も大きくなっていることが確認できる。また、初期付加荷重載荷（I）および応力弛緩が収束した状態での経時後の付加荷重載荷（III）状態での最大荷重時の膜応力およびひずみの値は、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。

2) 応力弛緩前後の膜面形状

平張り時、自重時および応力弛緩後のたて糸およびよこ糸方向の膜面鉛直方向座標（以下「膜面形状」という）を図5に示す。

平張り時の膜面形状には、平張り時の導入PS量による相違は見られない。自重時の中央点oの膜面鉛直座標は、PS200で-0.69cm（図5(a)）、PS400で-0.34cm（図5(b)）、PS700で-0.20cm（図5(c)）であり、平張り時の導入PS量が多いほど変位が生じにくい傾向が見られる。さらに、応力弛緩後の自重時の中央点oの膜面鉛直座標は、PS200で-2.35cm（図5(a)）、PS400で-1.20cm（図5(b)）、PS700で-0.98cm（図5(c)）であり、平張り時の導入PS量が多い場合には膜面形状の変化は少ないが、導入PS量が少ない場合には膜面形状にかなり大きな変化があることが分かる。

3) 応力弛緩前後の膜応力分布

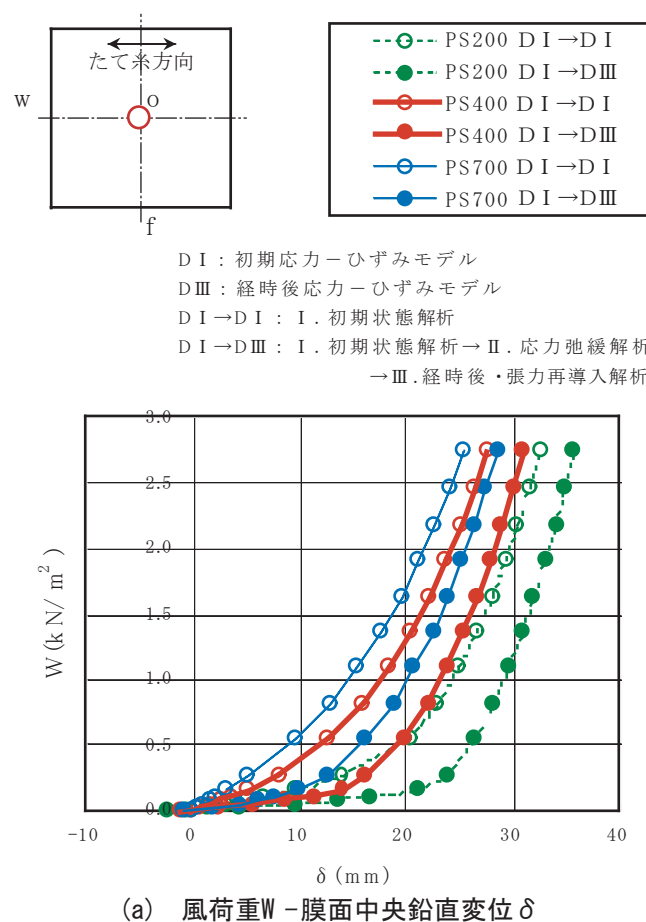
平張り時の導入PS量に対応した応力弛緩前後の自重時の膜応力分布をそれぞれ図6に示す。

自重時の応力弛緩前の膜応力は平張り時の導入PS量と変化は見られない。しかし、応力弛緩後に残存している膜応力は、PS200でたて糸0.53~0.54kN/m、よこ糸0.63~0.64kN/m（図6(a)）、PS400でたて糸1.03、よこ糸1.26kN/m（図6(b)）、PS700でたて糸1.24、よこ糸1.57kN/m（図6(c)）であり、平張り時の導入PS量が多いほど、残存する膜応力は大きな値となっている。

4) 風荷重時の挙動

風荷重と膜面中央鉛直変位の関係を図7に示す。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、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く、また応力弛緩前と比較して応力弛緩後の鉛直変位の方が大きい傾向が見られる。風荷重の低荷重域では、導入PS量が少ないほど剛性が低い傾向が見られる。特に応力弛緩後のPS200は、平張り時形状より下がった位置から、わずかな風荷重の増加により剛体変形を伴って急激に変位していき、風荷重 0.2kN/m^2 (20kgf/m^2) 付近から剛性が増加している。風荷重がほぼ 0.5kN/m^2 (50kgf/m^2) を超える領域での剛性は、導入PS量および応力弛緩の前後に関わらずほぼ同様の傾向が見られるが、低荷重域での挙動の相違により最大荷重時の変位の値は異なっている。

風荷重と境界中央部のたて糸方向の膜応力との関係を図7(b)に、よこ糸方向の膜応力との関係を図7(c)に示す。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、荷重の増加に伴い線形挙動を示す傾向が見られる。平張り時の導入PS量が多いほど

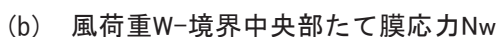


(a) 風荷重W - 膜面中央鉛直変位 δ

図7 風荷重時の挙動 (1)

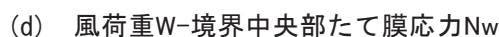


D I : 初期応力-ひずみモデル
D III : 経時後応力-ひずみモデル
D I $\rightarrow$ D I : I . 初期状態解析
D I $\rightarrow$ D III : I . 初期状態解析 $\rightarrow$ II . 応力弛緩解析
 $\rightarrow$ III . 経時後・張力再導入解析



4.25m×4.25mのフラット膜(PTFE膜)を対象として、導入PS量の相違が構造挙動に与える影響について比較検討し、下記のような知見を得ることができた。

応力弛緩前後での膜応力やひずみの変動は少ないものの、膜面形状の変化は著しい。



6/9

性が増加する傾向が見られる。

2) 平張り時の導入PS量が多い場合

応力弛緩前後での膜応力の減少は大きい、応力弛緩後に残存している膜応力は大きな値となっている。また、初期ひずみも大きな値となっている。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、変位が生じにくい特性が見られる。しかし、膜応力は導入PS量が少ない場合と比較して大きい傾向がある。

3) 風荷重と膜面中央鉛直変位の関係

こ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、また応力弛緩後の方が、風荷重に対する鉛直変位は大きい傾向が見られる。すなわち、載荷前の膜応力が小さいほど鉛直変位が大きいと言える。風荷重がほぼ 0.5 kN/m^2 (50 kgf/m^2) を超える領域での剛性は、導入PS量および応力弛緩の前後に関わらずほぼ同様の傾向が見られるが、低荷重域での挙動の相違により最大荷重時の変位の値は異なっている。

4) 風荷重と膜応力の関係

低荷重域で若干の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。導入PS量および応力弛緩前後の挙動より、載荷前の膜応力が大きいほど膜応力が大きいと言える。風荷重がほぼ 0.5 kN/m^2 (50 kgf/m^2) を超える領域での風荷重とたて糸方向膜応力の関係は、導入PS量および応力弛緩の前後に関わらずほぼ同様の傾向および値を示している。しかし、よこ糸方向膜応力は、導入PS量の大小および応力弛緩前後の膜応力の値に相違が見られ、たて糸方向膜応力よりもこれらの影響を受け易い傾向が見られる。

上記のように、導入PS量が少ない場合には、風荷重の低荷重域において、わずかな風荷重の増加により剛体変形を伴って急激に変位する特性が見られ、風荷重時の低荷重域での不安定性が懸念されることを示唆した。以上のように、本研究のテーマである膜材料の応力弛緩による導入PS量の減少による張力膜構造の構造安定性に対する課題の一部を明らかにし、導入PS量設定の重要性を示すことができた。

また、応力弛緩解析において、PS200は初期応力-ひずみモデルDⅠ上の第1勾配の中間点から経時後応力-ひずみモデルDⅢ上に収束計算され、PS400は第1勾配と第2勾配の変換点から、PS700は第2勾配に移した点からそれぞれ経時後応力-ひずみモデルDⅢ上に収束計算されていることが確認できる。

なお、本論文では、膜応力-ひずみ曲線にバイリニアモデルを採用した。例えば、経時後応力-ひずみモデルDⅢにトリリニア型の応力-ひずみモデル(図8)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ことも課題である。このよ

うな検討を含め、今後本研究成果を広範囲に展開していきたいと考えている。

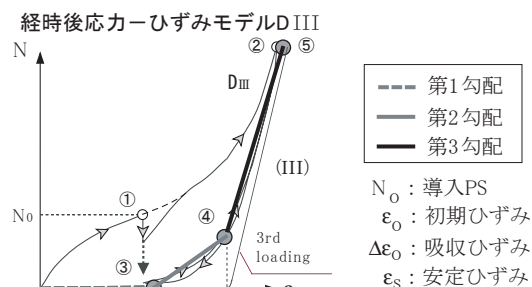


図8 トリリニア型の応力-ひずみモデルの概念図

謝辞

本構造解析に協力頂いた工学博士 宮里直也君(現(株)構造計画プラス・ワン)、佐藤裕子君(現(株)中田捷夫研究室)および坂本憲太郎君(現金箱構造設計事務所)をはじめとする斎藤研究室の卒業生各位ならびに櫻井優貴君他の日本大学現大学院生諸君に対し厚く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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)、pp.1087-1090、2000.9
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 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—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—、膜構造研究論文集、pp.17-28、1996.12
- 5) 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
- 6) 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、2006投稿予定
- 7) 斎藤公男、黒木二三夫：棚型張力膜構造の基本的力学性状と単一膜の構造実験、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
- 8) 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
- 9) 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

注 1)用語の定義

本論では張力膜構造に特有の用語を下記のように定義し用いている。

応力弛緩：

一般に張力膜構造に使用される膜材料は、たて糸とよこ糸とを織った繊維織物に樹脂をコーティングしたものであり、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材料非線形性や応力弛緩などの材料特性を有するものである。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と思われる。本論では、これら全ての要因により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。

塑性：

膜材料の材料試験における残留ひずみに見られるような、繊維織物、織糸およびコーティング樹脂の初期伸びあるいは相互間の密着度の変化などに起因して生じる性質の内、荷重を取り除いた後にもとの状態に戻らない性質を本論文では総称して「塑性」と呼ぶことにする。

初期張力：

設計時に設定される張力。初張力、設計初期張力あるいは設計初張力とも言われている。

導入初期張力（導入PS）：

施工時に導入される張力。施工時にストラット突上げにより発生する張力も含む。導入初張力とも言われている。施工中の応力弛緩発生後に初期張力が維持されるように導入初期張力が設定されることが多いが、一方で施工中に応力弛緩が急激に進行するため、実現象として導入初期張力が目標値に達することはほとんどない。施工時限界張力は概ね7kN/mである。膜材料を裁断する際の縮小率は、この導入初期張力と施工方法が考慮され設定される。

導入初期張力量（導入PS量）：

施工中に導入される張力の量。

張力導入：

張力を導入する行為、一般には施工中に張力を導入する行為を示す。初期張力導入とも言われている。張力導入により張力膜構造の安定性を計ることを目的としている。また、膜材料の構造上の特長であり、低い応力レベルで発生すると考えられる織糸の緩み、クリンプ交換およびコーティング樹脂の粘弾性特性が取り除かれることを期待している。

張力再導入：

完成後一定期間を経た後に生じる応力弛緩に対して、張力膜構造物の安定性の確保を目的として張力を導入する行為。長期間に渡る施工中に張力を導入する場合は、張力再導入とは言わない。

なお、本論では下記の用語を省略して用いている。

PTFE膜：

四フッ化エチレン樹脂コーティングガラス繊維布

付録 1) 応力ーひずみ曲線のモデル化と構造解析手法の概説

ここでは、筆者らが既報^{1)～3)}にて提案し、実験との比較により妥当性を実証した「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ーひずみ曲線のモデル化」、およびこれに基づいた基本解析フローおよび構造解析手法に関して再録する。

応力ーひずみ曲線のモデル化

膜材料の応力弛緩を明確にする試験法を考案、実施し、その結果を分析、評価することにより提案した「塑性及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ーひずみ曲線のモデル化」と、想定した経路の概要を付図1に示す。この応力ーひずみモデルは、等時応力ーひずみ曲線を弾塑性解析に適用することによりクリープ解析として評価する簡易クリープ解析法の考え方を応用したものである。

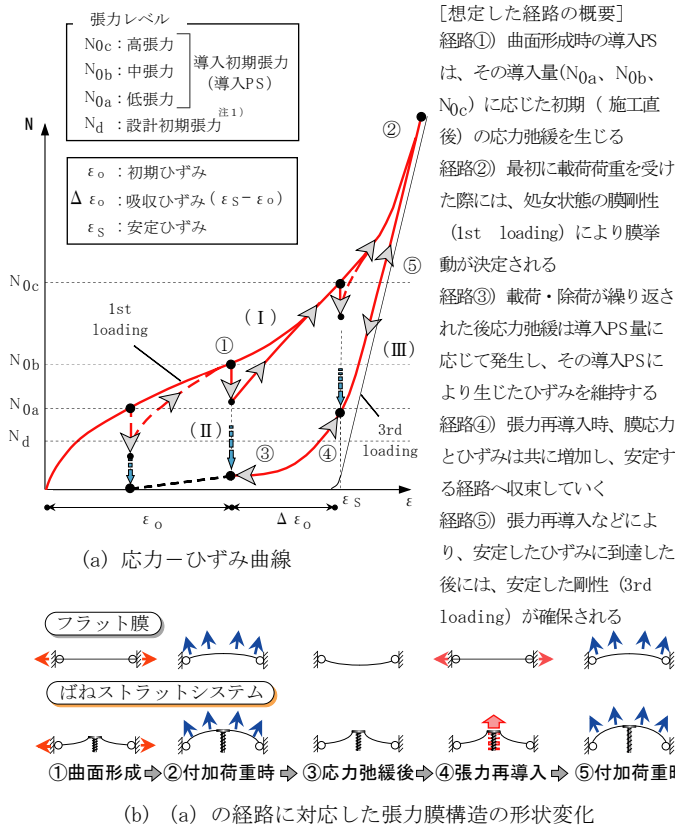
基本解析フローと構造解析手法

施工時および初期付加荷重（処女状態の膜面に最初に風や雪などが載荷される荷重をいう）時の初期状態（I）から、載荷・除荷が繰り返され応力弛緩が収束した状態（II）を経て、経時後の張力再導入や付加荷重が載荷・除荷される状態（III）を設定する。ここでは、初期状態の経路①、②の履歴に相当する初期応力ーひずみモデルを DI 、および応力弛緩が収束した状態の経時後の張力再導入や付加荷重時の経路③、④、⑤の状態に相当する経時後応力ーひずみモデルを $DIII$ として、幾何学的非線形解析および材料非線形解析を適用することにより構造挙動を追跡する。このように両者の非線形を扱う構造解析手法そのものは大変形あるいは大ひずみの応力ーひずみ関係に基づいた問題として既に一般的に定式化されているものである。それぞれの状態の挙動を追跡するための基本解析フローを付図2に、またその概要を下記に示す。

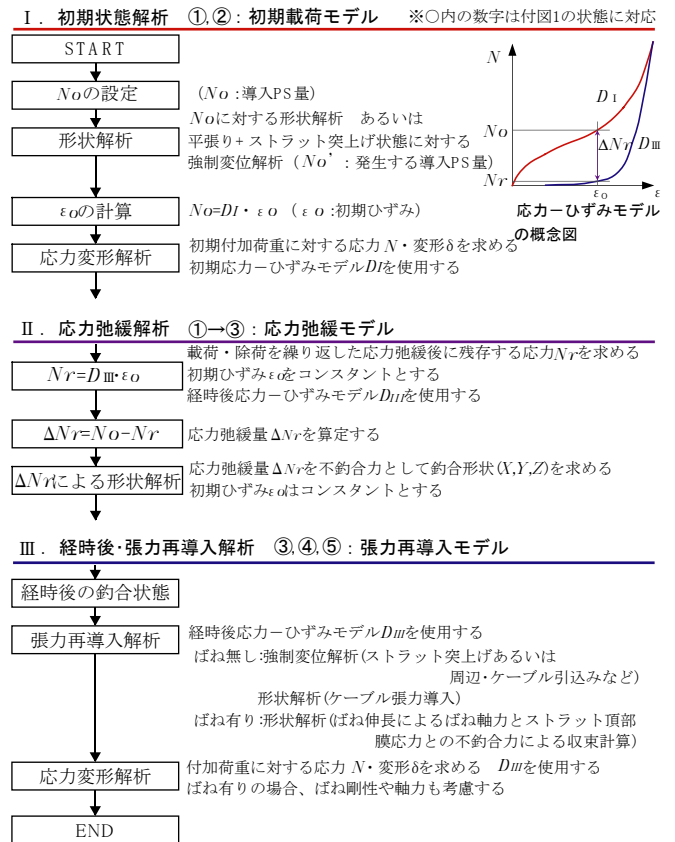
I. 初期状態解析 初期曲面形状を決定する形状解析には、導入PS量 No ^{注1)}に応じた等張力曲面を利用した形状解析と、導入PS量 No に応じた平張り状態からストラットの突上げなどによる強制変位解析を行うものなどがある。後者の場合には、初期応力ーひずみモデル DI を用いて応力変形解析し、部位により異なる導入PS量 No' ^{注1)}が発生する。ここで導入PS量 No あるいは発生した導入PS量 No' に応じた初期ひずみ ϵ_o を初期応力ーひずみモデル DI を用いて求める。初期付加荷重に対しては、初期応力ーひずみモデル DI による応力変形解析を行い挙動を追跡する。

II. 応力弛緩解析 初期状態から荷重履歴を経て応力弛緩が発生した状態を想定する。この時初期ひずみ ϵ_o を一定とし、経時後応力ーひずみモデル $DIII$ により応力弛緩後に残存する応力 Nr を計算する。次に残存応力 Nr と導入PS量 No あるいは No' の差である応力弛緩量 ΔNr を不釣り合い力として、新たな釣合形状を求める。

III. 経時後・張力再導入解析 応力弛緩後の釣合状態から張力再導入解析あるいは経時後の付加荷重に対する応力変形解析を行う。ここでは、経時後応力ーひずみモデル $DIII$ を用い応力変形解析を行う。張力再導入解析は、ストラットの突上げなどによる強制変位解析あるいはケーブルによる張力再導入を想定したケーブル張力指定による形状解析などを適用することができる。



付図1 膜材料の応力-ひずみ曲線のモデル化



付図2 基本解析フロー

STRUCTURE ANALYTICAL STUDY ON STRESS RELAXATION IN TENSILE MEMBRANE STRUCTURES

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 in flat surface, and structural behaviors influenced by the amount of the introduced prestress are presented.

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

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

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