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)

STUDY ON MODELING OF STRESS-STRAIN CUERVES OF FABRIC MATERIAL

Fundamental study on stress relaxation of tension membrane structures Part 1

中島 肇^{*1}, 斎藤 公男^{*2}, 黒木 二三夫^{*3}, 岡田 章^{*4}Hajime NAKAJIMA, Masao SAITOH, Fumio KUROKI
and Akira OKADA

Properties of membrane materials have material nonlinearity and stress relaxation, due to slackness and crimp interchange of yarns and viscoelastic characteristic of coating material. The stability of tension membrane structures depends on existing prestress in the membrane. Therefore, the stress relaxation is an extremely essential problem for this structure. For the maintenance of the reliable structural efficiency, it is necessary to investigate the membrane behavior under construction and the stress relaxation, and to establish the relaxation analysis. This paper presents the membrane material experiments, which perform to grasp material characteristics under relaxation, and a stress-strain model for the relaxation analysis.

Keywords: membrane structure, stress relaxation, introduced prestress, re-prestressing, stress-strain curves, modeling

膜構造、応力弛緩、導入初期張力、張力再導入、応力-ひずみ曲線、モデル化

1.はじめに

一般に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、繊維の緩みやクリッ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。一方、張力の存在によって安定性を計る張力膜構造にとって、応力弛緩は極めて本質的な課題である。

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る応力減少を総括して応力弛緩と呼ぶことにする。現状では、膜材料の応力弛緩、特に載荷・除荷後の応力弛緩に関する性状が明確にされていない。しかし、設計、施工および維持管理を含めたライフサイクルにおける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ためには、応力弛緩を把握しこれを予測する解析法を確立する必要があると考える。

本論では、膜材料の応力弛緩を含んだ張力膜構造の構造特性を予測する解析モデルや数値解析手法を確立することを目的として、応力弛緩を把握する実験を行い、その結果より構築した応力-ひずみ

曲線のモデル化に関して提案するものである。具体的には、まず張力膜構造の設計と解析に関する現状を整理し、既往の研究に対して膜材料の非線形性に関する扱い方や課題について整理すると共に、実建物や構造実験における応力弛緩の報告とを対比する。また、膜材料の面内引張剛性を把握するための実験（膜引張剛性把握実験）を行い、特に導入初期張力（以下導入PSという）に対する施工時から載荷・除荷後および張力再導入後に関わる応力弛緩の解明を試みる。最後に、実験から得られた材料特性を基にした応力弛緩と材料非線形性を包含し、かつ設計への適用を想定した応力-ひずみ曲線の簡略モデルに関して提案する。なお、本研究では、恒久建築物に一般に使用される四フッ化エチレン樹脂コーティングガラス繊維布（以下PTFE膜という）を対象とする。

図1 膜材料の構成

本論の一部は文献[48]～[52]に報告している。

^{*1} 清水建設㈱ 工修

^{*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・工博

^{*4} 日本大学理工学部建築学科 専任講師・博士(工学)

Shimizu Corporation, M. Eng.

Prof., Dept. of Architecture, Nihon University, Dr. Eng.

Assoc. Prof., Junior College of Nihon University, Dr. Eng.

Assistant Prof., Dept. of Architecture, Nihon University, Dr. Eng.

2. 張力膜構造の現状と既往の研究

2.1 張力膜構造の設計、解析に関する現状

膜材料は、繊維織物にコーティングが施されたものである（図1）。繊維織物は、これを構成するたて糸とよこ糸が波状に織られていることから、一方を伸ばすと他方は織波の影響で縮むクリンプ交換という幾何学的な変形特性を有している。この他に、織糸とコーティング材が一体となって挙動したり、両者の間が滑ったり、あるいは織糸がほぼ直線となり織糸だけで抵抗するなどの複雑なメカニズムによる力学的性質が報告されている^{6)~10)}。また膜材料の粘弾性特性は、織糸に緩みがありコーティング材が応力負担している状態、つまり低応力レベルにある初期荷重時に、特に顕著であることも紹介されている^{6)~10)}。

現状、膜構造の設計や解析では、このような膜材料を弾性体と仮定して 1) 非抗圧性 2) 直交異方性 3) 材料線形 をモデル化した幾何学的非線形解析を行っているのが一般的である。材料を線形近似した剛性モデルは、膜材料の複雑なメカニズムに起因した材料非線形性や応力弛緩に対して、応力・変形解析の容易さや一般性から応力-ひずみ関係が安定した状態をモデル化している。また、我が国の張力膜構造の設計は、2~4kN/m程度の設計初期張力が設定され、応力弛緩に対して a) 製作面：縮小率の設定 b) 施工面：膜取付け方法・導入PS量・初期張力導入方法の検討 c) 維持管理面：張力再導入の検討、をすることとして進められてきた（図2）。a)、b) に関しては、織糸の緩みの除去と施工時に導入可能な張力を考慮した設定や検討がされている。張力導入は膜パネル外周部を引き込むことにより行うのが一般的であり、導入PS量は施工中の応力弛緩および中央部への張力の伝達を考慮して膜パネルの大きさを勘案して設定される。例えば、設計初期張力が2kN/mと設定されている場合、小規模な膜構造で4~5kN/m、中・大規模では施工時に人力で導入できる最大値と考えられる7kN/m程度のPS量が、一般に導入されている。

このように、膜施工時の導入PSに生じる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計る考え方が一般的である。すなわち、張力再導入を前提として設計や解析を進める考えに立脚していると言える。

しかし、膜材料に関する基本的テーマである1) 応力-ひずみ関係の非線形性および2) 応力弛緩の取り扱い、は、張力の存在を前提条件としている張力膜構造にとって本質的な課題である。具体的に荷重・除荷後の応力弛緩を把握し、外力に対する安全性の確認や張力再導入の効果およびその必要性を検討する必要もあると考える。

2.2 膜材料の非線形性に関する既往の研究

既往文献で扱われている応力-ひずみ曲線に関する (a) 材料試験結果、(b) モデル化および (c) 織構造格子モデルによるシミュレーション結果の概要をまとめ表1に示す。

材料試験は、一般に十字形状に切り取った供試体を使用し、膜端部を引き込み（荷重）あるいは戻す（除荷）ことにより発生応力を

図2 張力膜構造の設計、解析、製作・施工フロー（一般的方法）
（----- 未検討部分）

表1 膜材料の非線形性に関する既往の材料試験結果、モデル化およびシミュレーション結果一覧（N：膜応力、ε：ひずみ）

概 念 図						
(a) 材料試験結果	a1.縮小率設定	a2.剛性評価(旧)	a3.剛性評価(新)	a4.繰り返し荷重	a5.応力弛緩	a6.クリープ
(b) 応力-ひずみ曲線のモデル化	b1.線形近似モデル	b2.多段線形近似モデル	b3.バイリニアモデル	b4.クリープ分離モデル	検討すべき課題 ・ 載荷、除荷後の応力弛緩とそのモデル化 ・ コーティング材の粘性特性の評価方法 ・ 実規模モデルに対する適用性、有効性 ・ 設計、施工、維持とモデル化との相関性(リアリティ)	
(c) レーション結果	c1.安定域	c2.単調荷重	c3.繰り返し荷重	c4.施工時シミュレーション 23), 26), 34)		
----- 2軸引張試験結果						

増減させ行われる。この時、たて糸方向とよこ糸方向の応力比をいくつかのパターン（通常1:0、0:1、1:1、1:2、2:1）で設定し、材料試験の目的に応じて長期（a1、a5、a6）あるいは短期許容応力度（a2～a4）に相当する応力レベルまで載荷される。載荷・除荷に関する材料試験では、載荷・除荷を繰り返すと膜材料繊維の初期の緩みなどが取り除かれ、応力－ひずみ関係がほぼ一定の軌跡に収束する性状が得られている（a2～a4）。また、施工中に発生する応力弛緩とその対応に関する実験、単調載荷による応力弛緩およびクリープに関する実験も行われている（a5、a6）。

現状の設計では、一般に材料試験の応力－ひずみ関係を線形近似したモデルが用いられている（b1）。従来採用されていた引張弾性定数の剛性評価方法では、材料試験の3回目の載荷における応力－ひずみ関係（a2）から線形近似モデルを設定していた。最近提案された剛性評価方法では、予備載荷の考え方を導入し安定した応力－ひずみ関係（a3）から線形近似モデルを設定している。いずれの評価方法も張力再導入を前提に繊維の緩みを除去した安定した膜面状態¹⁰⁾を想定している。その他、パイリニアモデルや多段線形近似モデルの研究（b2、b3）およびクリープを分離した応力－ひずみ曲線のモデル化の研究（b4）も行われている。

織構造格子モデルに関する解析的研究は多く、2軸材料試験の応力－ひずみ曲線を良くシミュレートしている結果が得られている（c1～c3）。しかし、施工時や付加荷重時のシミュレーションを対象としている文献（c4、c5）の一部では、特にコーティング材の粘性特性に関する諸定数の推定方法に課題があることを指摘している^{23)～26)}。これらの諸定数の推定方法として、繰り返し試行により定数を改善する方法²³⁾や、実験結果を精度良くシミュレートするために遺伝的アルゴリズムを利用して諸定数を設定する手法²⁶⁾などが提案されているが、解析による推定の妥当性について実験による検証が必要であるとも言及されている²⁶⁾。

このように膜材料の非線形性に関する研究は多数あるものの、導入PSに対するその後の繰り返し載荷後の応力弛緩について検討している材料試験そのものが筆者らの知る限り見当たらない。また、解

析的にシミュレートしている研究では、材料特性に比較的ばらつきの多い膜材料¹²⁾の材料定数の評価と汎用性や実現象との比較、実規模モデルに対する適用性あるいは有効性などにも課題が残されていると思われる。

2.3 実建物および構造実験における応力弛緩に関する既往の研究

実建物や構造実験における膜材料の応力弛緩に関する文献のうち、形式、規模、測定内容などについて表2にまとめる。これらの文献には応力弛緩に対して容易に張力導入を行える有効な構造システムとして構築されたハンガー式やストラット式張力膜構造^{1)～3)}の報告が多く、その他基礎的な平面型の膜形状の研究も見られる。

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。実建物では吊点反力や束軸力などが計測され、これが経時後40～60%に減少し張力再導入を行ったとの報告^{38)、41)}がある。

以上より、導入PSに対する載荷・除荷後の応力弛緩および張力再導入の効果が実現象として報告されている一方で、これに関する材料試験および解析的研究との比較は筆者らの知る限り報告されていない。

3.膜引張剛性把握実験

3.1 実験目的および実験概要

膜材料の導入PSに対する載荷・除荷後の応力弛緩に関しては、確立した実験方法がなく、したがって実験データがないのが現状である。ここで我々は、膜材料の材料特性の把握、特に短期許容応力度レベルでの載荷・除荷後の応力弛緩の解明および剛性モデルを確立するための基礎データの収集を目的として実験を行った。

試験体は1.7m×1.7mの平面状十字形試験片（PTFE膜）を採用し、各腕部にスリットを入れている（写真1、図3）。この種のス

表2 実建物および構造実験における膜材料の応力弛緩に関する既往の文献

	形式(事例名)	規模	膜材料	実測・実験概要 F：曲面形成 再PS：張力再導入実験 W：風荷重実験 S：雪荷重実験	測定内容					文献
					膜の伸び	膜端反力	吊点反力	束軸力	ケーブル等	
実建物	支柱式(スパン30)(つくば85中央駅)	45m	C	F→1年後計測				○	○	(38)
	ハンガー式(馬事公苑)	22m×44m	A	F→1年後計測			○		○	(38)
	ハンガー式(日大理エレストドーム)	直径12m	A	F→30日間			○			(38)
	ハンガー式(コダ・ゆとりどーむ)	35.4m×35.4m	A	F→5日後再PS→7日後計測	○		○			(40)
	ストラット式(ハイ・アド・E)	21m×21m	A	F→4.5ヶ月計測	○			○	○	(41)
	ハンガー式(HARUMID-Δ21)	38m×48m 楕円形	A	F→積雪後計測			○		○	(42)
構造実験	ストラット式	5m×5m	A	F→90h後計測				○	○	(35)
	ハンガー式	直径10m	C	F→48h経過中計測			○		○	(36)
	ハンガー式	5m×5m	A	F→再PS→(W-PS)3回		○	○			(37)
	平面型、ストラット式	4.9m×4.9m	A	F→再PS→(W-PS)5回		○		○		(39)
	平面型	1.6m×1.6m	A	F→再PS→(W-PS)3回		○				(43)
	平面型	5.25m×5.25m	A	再PS→W5回→S1回	○	○				(44)
	V型(21ユニット)	5m×10.5m	A	F→3.5ヶ月間計測(積雪有り)					○	(34)
	ヴォールト型	1.56m×4m	A	放置→再PS3回→W20回		○				(45)
	ストラット式	1.8m×1.8m	C	放置44h→W20回→S1回		○				(46)
	ヴォールト型(4ユニット)	7m×3.2m	A	F→15h+4h放置→(W+放置)3回	○	○			○	(47)

膜材料 A:PTFE(四フッ化エチレン)コーティングガラス繊維布 C:PVC(塩化ビニール)コーティングポリエステル繊維布

リットを入れた十字形試験片は、つかみ部の荷重に対する試験片中央部の発生応力の効率が高いなどの理由で、一般の膜材料の2軸引張試験方法で採用されているものである¹⁰⁾。ただし、この引張試験方法は荷重制御に基づいており、応力弛緩の評価時には膜のつかみ部を元の位置に戻す必要があるため、精度よい測定は不可能と考える。以上を踏まえて、本実験では実際の張力膜構造の膜端部接合状態および付加荷重作用状態を反映させた試験手法を考案した。すなわち、膜端部の接合部に相当するつかみ部を初期に引き込み、その後固定した状態で荷重を試験体の面外方向に載荷・除荷して膜応力を増加・減少させる試験方法である。

実験手順を図4に示す。実験はたて糸方向、よこ糸方向からの均等な引き込みを行う「①平張り実験」と、応力弛緩を発生させるために膜端部位置の移動を拘束し荷重を載荷した「②面外載荷実験」および膜端部を再度引込む「③張力再導入実験」を行った。その後、応力の変動がなくなり応力弛緩が生じないと認められるまで、「②面外載荷実験（載荷1回）」と「③張力再導入実験」を繰り返した。本実験では、実験パラメータとして平張り時の導入PS量により、低張力の「PS400（導入PS量4kN/m）」と高張力に近い「PS700（同7kN/m）」を設定し、それぞれ1体ずつの十字膜試験体に対して実験を行った。なお実験に際しては、膜の材料特性のばらつきを考慮し、全て同一ロットの膜材料を使用した。

3.2 実験結果および考察

図5～図8にPS400、PS700の実験における主要ステップの応力-ひずみ関係を示す。膜面中央部（図5、7）は2軸引張状態、端部（図6、8）は1軸引張状態の結果に相当するものと見なすことができる。面外載荷実験での中央部の膜応力は力の釣り合いから単位長さ当たりのつかみ部反力と等しく、端部の膜応力は載荷荷重とつかみ部反力から換算して算出した^{注)}。膜ひずみは張力を導入する前の状態の長さで各状態の伸びを除いた値とした。また、図中に

は、同一ロットの膜材料に対するたて糸方向応力 N_w とよこ糸方向応力 N_f の比（以下応力比という）が1:1および2:1の2軸引張試験のうち、1回目載荷（1st loading）と3回目載荷（3rd loading）の結果についても示している。また、各実験ステップでのひずみと膜応力を表3に示す。

1) 初期状態（平張り→1回目載荷）

平張り実験終了後から1回目載荷直前までの間に、中央部たて糸方向のひずみは10～20%減少しているが、その他はほとんど変化が見られない（図5～8、表3①→①'）。一方、同区間の応力は、たて糸方向で約25%、よこ糸方向はPS400で約40%、PS700で約30%減少している（表3①→①'）。

1回目載荷の最大荷重時での中央部の応力比（*2欄に示す）は、PS400で1.96:1であるのに対しPS700では1.31:1である（表3②）。平張り時に織糸の緩みを除去し安定ひずみに近づくほど応力比は1:1に近い性状を示すものとする。

1回目除荷後の膜応力は、平張り実験終了時に対してPS400のたて、よこ糸方向共に約15%に減少し、PS700はたて糸方向10%、よこ糸方向約20%に減少している（表3①→③）。ただし、導入PSの大きいPS700の方が残存する膜応力が大きく、導入PSの違いにより残存する膜応力レベルが異なる傾向が見られる。

2) 載荷実験

平張り実験終了時と載荷・除荷を8回繰り返した後と比較する（表3①→③'）。2軸引張状態に近い中央部（図5、7）のひずみは、載荷・除荷終了後たて糸、よこ糸方向共にわずかに減少している。一方、1軸引張状態である端部（図6、8）のひずみはPS700のよこ糸方向がほぼ同じ値を示しているが、これ以外は増加している。特に導入PSの少ないPS400のひずみの増加量は糸方向に関わらず大きい。

また、8回目載荷の最大荷重時での中央部の応力比は、PS400で

《測定点と測定装置》

膜材料（PTFE膜）の基準値

	厚さ (mm)	織糸密度 (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3 試験体概要

写真1 試験体全量

図4 実験手順

図5 PS400の膜応力-ひずみ関係(中央部)

図6 PS400の膜応力-ひずみ関係(端部)

図7 PS700の膜応力-ひずみ関係(中央部)

図8 PS700の膜応力-ひずみ関係(端部)

表3 各実験ステップでのひずみと膜応力

実験ステップ	パラメータ	部位	たて糸方向				よこ糸方向			
			ひずみ (%)		膜応力 (kN/m)		ひずみ (%)		膜応力 (kN/m)	
			*1	*2	*1	*2	*1	*2	*1	*2
①平張り後	PS400	中央部	1.288	1.00	3.97	1.00	1.952	1.00	3.86	1.00
		端部	1.547	1.00	3.97	1.00	2.425	1.00	3.86	1.00
	PS700	中央部	1.245	1.00	7.34	1.00	2.562	1.00	7.06	1.00
		端部	2.174	1.00	7.34	1.00	3.975	1.00	7.06	1.00
①'1回目载荷直前	PS400	中央部	1.197	0.93	2.99	0.75	1.944	1.00	2.43	0.63
		端部	1.516	0.98	2.99	0.75	2.583	1.07	2.43	0.63
	PS700	中央部	1.016	0.82	5.68	0.77	2.556	1.00	5.04	0.71
		端部	2.123	0.98	5.68	0.77	4.018	1.01	5.04	0.71
②1回目载荷時(最大)	PS400	中央部	2.215		21.73	1.96	2.150		11.09	1.00
		端部	3.567		23.00	—	4.919		13.41	—
	PS700	中央部	1.596		24.61	1.31	3.553		18.78	1.00
		端部	3.428		25.96	—	5.062		20.52	—
③1回目除荷後	PS400	中央部	1.064	0.83	0.63	0.16	1.540	0.79	0.57	0.15
		端部	1.872	1.21	0.63	0.16	3.035	1.25	0.57	0.15
	PS700	中央部	0.979	0.79	0.93	0.13	2.683	1.05	1.61	0.23
		端部	2.191	1.01	0.93	0.13	3.910	0.98	1.61	0.23
②'8回目载荷時(最大)	PS400	中央部	2.274		26.97	1.39	2.867		19.35	1.00
		端部	3.999		26.45	—	5.854		22.67	—
	PS700	中央部	1.693		25.18	1.27	3.193		19.89	1.00
		端部	3.705		26.78	—	5.210		21.88	—
③'8回目除荷後	PS400	中央部	1.273	0.99	0.21	0.05	1.668	0.85	0.26	0.07
		端部	2.414	1.56	0.21	0.05	3.488	1.44	0.26	0.07
	PS700	中央部	0.957	0.77	0.20	0.03	2.396	0.94	0.77	0.11
		端部	2.423	1.11	0.20	0.03	3.865	0.97	0.77	0.11
④最終張力再導入後	PS400	中央部	1.507	1.17	4.12	1.04	2.831	1.45	4.06	1.05
		端部	2.957	1.91	4.12	1.04	4.728	1.95	4.06	1.05
	PS700	中央部	1.177	0.95	3.99	0.54	2.926	1.14	4.03	0.57
		端部	2.973	1.37	3.99	0.54	4.498	1.13	4.03	0.57
⑤'最終载荷時(最大)	PS400	中央部	1.979		23.26	1.31	3.168		17.81	1.00
		端部	3.809		24.16	—	5.439		18.96	—
	PS700	中央部	1.627		23.90	1.27	3.256		18.88	1.00
		端部	3.703		24.80	—	5.069		19.99	—
⑤'最終荷重除荷後	PS400	中央部	1.511	1.17	2.86	0.72	2.827	1.45	3.11	0.81
		端部	2.946	1.90	2.86	0.72	4.763	1.96	3.11	0.81
	PS700	中央部	1.175	0.94	2.96	0.40	2.926	1.14	3.44	0.49
		端部	2.963	1.36	2.93	0.40	4.482	1.13	3.44	0.49

*1: ①平張り後の値に対する
各実験ステップ値の比率

*2: よこ糸方向膜応力に対する
たて糸方向膜応力の比率

1.39 : 1、PS700で1.27 : 1であり、PS400の応力比はPS700の値に近付いていく傾向にある（表3②'）。平張り実験終了時の導入PSに対して全ての実験結果で応力弛緩が見られ、たて糸方向で約5%に、よこ糸方向で約10%に減少している（表3③'）。

3) 張力再導入後

張力再導入、荷重・除荷を繰り返した後にひずみ、膜応力はある値に収束する傾向が見られる。ひずみの値はPS400、PS700の中央部、端部共にそれぞれほぼ同じ値になっており、中央部たて糸方向は1.2~1.5%、よこ糸方向は2.8~2.9%、端部たて糸方向は2.9%、よこ糸方向は4.5~4.8%である（表3⑤）。全般にひずみの値は2軸引張状態の方が、1軸引張状態より小さいことも確認できた。このような各面外荷重実験の除荷後および張力再導入後の値（図5~8▲△●○印）は、張力再導入後の最終的な「面外荷重実験」の応力-ひずみ曲線の経路へ連続して行く傾向が見られる。

最終荷重の最大荷重時のPS400の応力比は1.31 : 1となり、張力再導入、荷重・除荷を繰り返すことにより、PS700の応力比1.27 : 1に近付いていく傾向が見られる（表3⑤'）。一方、PS700の応力比は上述の2)の値（表3②'）と変化が見られない。

4. 膜材料の応力-ひずみ曲線のモデル化

ここでは設計への適用を想定し、数値解析を実施する際の簡略化した応力-ひずみ曲線のモデルを、図9のように提案する。このモデルは前述した引張剛性把握実験結果を基に、張力膜構造を対象とした応力-ひずみ曲線を想定したものであり、応力弛緩を考慮している点が特徴である。想定した経路の概要を下記に示す。

- 1) 曲面形成時の導入PSは、その導入量(N_{0a} 、 N_{0b} 、 N_{0c})に応じた初期（施工直後）の応力弛緩を生じる（経路①）。本実験でのよこ糸方向応力はPS400で約60%、PS700で約70%に減少した。
 - 2) 最初に荷重荷重を受けた際には、処女状態の膜剛性（1st loading）により膜挙動が決定される（経路②）。
 - 3) 荷重・除荷が繰り返された後、応力弛緩は導入PS量に応じて発生し、その導入PSにより生じたひずみを維持する（経路③）。
 - 4) 張力再導入時は、膜応力、ひずみ共に増加し、安定する経路へ収斂していく（経路④）。
 - 5) 張力再導入などにより、安定したひずみに到達した後は、安定した剛性（3rd loading）が確保される（経路⑤）。
- これらの仮定をひずみに着目して以下のようにまとめる。

(a) 応力-ひずみ曲線

(b) (a)と対応した荷重-変位関係

(c) (a)の経路に対応した張力膜構造の形状変化

図9 膜材料の応力-ひずみ曲線モデルの提案

- 1) 応力弛緩は常に進行し、特に载荷により促進されるが、経時後のひずみは導入PS量に応じた初期ひずみ ε_0 から変化しない。
- 2) 何らかの方法（張力再導入あるいは施工時緊張など）により安定ひずみ ε_s に到達した時点で、安定した膜剛性は確保される。ちなみに本実験で得られた安定ひずみの値は、たて糸方向1.2～1.5%、よこ糸方向2.8～2.9%であった。
- 3) 初期ひずみ ε_0 と安定ひずみ ε_s との差である吸収ひずみ $\Delta \varepsilon_0$ により、再载荷後に剛体変形が発生する（図9(b)）。例えば平面膜の場合（図9(c)）、④張力再導入が行われず撓んだ状態の③から⑤付加荷重により反転するまでの間に剛体変形が生じる。

5.まとめ

本研究では下記のような知見が得られた。

- 1) 現状の張力膜構造の設計・解析および既往文献などを調査し、膜材料の応力弛緩や非線形性に関する扱い方を整理した。その結果、载荷・除荷後の実現象としての応力弛緩に対する材料試験および解析的研究の課題を明確にした。
- 2) 膜材料の引張剛性把握実験を行い、応力弛緩を把握するための膜剛性モデル構築に用いる応力-ひずみ関係のデータを得ることができ、これを基に簡略化した膜剛性モデルを提案した。

今後、本論で提案した剛性モデルを用いて数値解析を行い、その妥当性を検証する予定である。

また、応力弛緩は繰り返し荷重による膜応力の履歴とレベル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を行いデータを蓄積することが今後の課題である。

謝辞

本実験の実施に当たり材料試験および膜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)の関係各位、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（現 清水建設(株)）、浦映二君（現(株)TIS & PARTNERS）、高田雄一君（現(株)佐藤総合計画）、宮田真紀君（現 日本イーアールアイ(株)）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：糸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、p.p.115-128、1989.10
- 2) Saitoh, M. and Kuroki, F.: Horm 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) Kudoh, K.: An Analysis of Cutting Pattern and the Fabrication of Membrane Panels for the Membrane Structure, Proc. IASS Symp.(Osaka), Vol.2, p.p.127-132, 1986
- 5) 田中耕太郎、菊池哲雄：剛境界バネ構造に用いられる膜の張力導入方法について、日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿）、p.p.1325-1326、1987
- 6) 西川薫、石井一夫、達富浩：構造用膜材料の荷重-歪特性と構造モデル、膜構造研究論文集、p.p.39-50、1988.11
- 7) 西川薫、石井一夫、小竹達也：織布特性を考慮した膜構造の応力・変形解析法、膜構造研究論文集、p.p.41-56、1989.11
- 8) 石井一夫：膜構造用膜材料概説、膜構造研究論文集、p.p.91-119、1992年12月
- 9) 日野吉彦、石井一夫：膜構造解析における材料非線形性の評価、膜構造研究論文集、p.p.35-50、1994.12
- 10) 石井一夫：膜材料弾性定数試験法及び設計用弾性定数に決定法について—膜構造協会試験法標準の考察—、膜構造研究論文集、p.p.87-118、1995.12
- 11) 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）、p.p.1373-1374、1993.9
- 12) 南 宏和、豊田宏、瀬川信哉：膜構造用膜材料であるコーテッド平織物の1軸・2軸応力状態での応力緩和とクリープの特性、日本建築学会構造系論文報告集、第408号、p.p.1-9、1990.2
- 13) 南 宏和：PTFEコーテッドガラス繊維平織物（膜材料A種）の非線形伸長曲線への多段線形近似とその応用、日本建築学会構造系論文報告集、第436号、p.p.13-19、1992.6
- 14) 南宏和、山本千秋、瀬川信哉、河野義裕：多段線形近似による膜の材料非線形解析のための弾性バネ計算法、膜構造研究論文集、p.p.45-52、1996.12
- 15) 南宏和、山本千秋、瀬川信哉、河野義裕：応力緩和後およびクリープ後の膜の弾性応力解析に適合する応力-ひずみ曲線の測定法、膜構造研究論文集、p.p.23-30、1997.12
- 16) 南宏和、山本千秋、瀬川信哉、河野義裕：応力緩和後およびクリープ後の膜の材料非線形弾性解析に適合する2軸応力-ひずみ曲線の推定結果とその適合性、膜構造研究論文集、p.p.27-33、1998.12
- 17) 南宏和、瀬川信哉：コーテッド平織物の2軸伸張実験、材料、Vol.41 No.463、p.p.451-457、1992.4
- 18) 小松清：局部破断を有する膜材料の織構造モデルによる応力変形シミュレーション、膜構造研究論文集、p.p.45-78、1992.12
- 19) 加藤史郎、Pongpo Petch：材料非線形性を考慮した膜材料の構成方程式の定式化、膜構造研究論文集、p.p.11-22、1993.12
- 20) 加藤史郎、Pongpo Petch、武田文義、松本恵美：Schockモデルに基づいて膜材料の構成方程式を誘導する方法について—連続体としての増分型構成方程式の提案—、膜構造研究論文集、p.p.11-26、1994.12
- 21) 加藤史郎、Pongpo Petch：材料非線形性を考慮した膜構造解析—織構造格子モデルによる構成方程式の適用—、膜構造研究論文集、p.p.27-34、1994.12
- 22) 加藤史郎、吉野達矢、武田文義、小野智子：織構造格子モデルの構成則の検証—日本膜構造協会の新試験法による実験結果との比較—、膜構造研究論文集、p.p.1-16、1996.12
- 23) 加藤史郎、南宏和、吉野達矢、並田忠政：粘性特性を考慮した織構造格子モデルによる構成方程式—クリープ及び応力緩和試験の数値シミュレーション—、膜構造研究論文集、p.p.29-44、1996.12
- 24) 加藤史郎、吉野達矢、小野智子、南宏和、瀬川信哉：織構造格子モデルによる膜構造の粘弾塑性解析—実験と解析との比較—、膜構造研究論文集、p.p.1-12、1997.12
- 25) 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、p.p.13-22、1997.12
- 26) 加藤史郎、吉野達矢、南宏和、瀬川信哉：施工手順を考慮した膜構造の粘弾塑性応力・変形解析—織構造格子モデルによる定式化と解析—、膜構造研究論文集、p.p.11-26、1998.12
- 27) 加藤史郎、武田文義、吉野達矢：繰り返し荷重を受ける四角化エポキシ樹脂コーティング繊維織物の履歴特性に関する実験的研究、構造工学論文集、Vol.42B、pp.369-378、1996.3
- 28) 加藤史郎、吉野達矢、武田文義：織構造格子モデルに基づいた膜材料の構成方程式に関する研究—繰り返し荷重に対する応力・ひずみ関係の実験と解析との比較—、構造工学論文集、Vol.43B、pp.17-29、1997.3
- 29) 松本譲、皆川洋一：除荷を考慮した織格子モデルによる膜材料の履歴特性の解析、日本建築学会大会学術講演梗概集B-1（東海）、p.p.1969-1970、1994.9月
- 30) 松本譲、皆川洋一：コーティング材を有するガラス繊維平織膜の履歴を含む構成則、日本建築学会大会学術講演梗概集B-1（北海道）、p.p.717-

- 718, 1995.8
- 31) 松本謙、皆川洋一：コテンガ材を有する平織膜の物理型構成則とバネストラット式張力膜の構造特性に関する研究（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（九州）、p.p.993-994、1998.9
- 32) 松本謙、皆川洋一：織糸の形状を円弧形とする織構造を用いた平織膜の構成式とバネストラット式張力膜の構造特性に関する研究（その2）一ユニット式張力膜構造の曲面形成実験一、日本建築学会大会学術講演梗概集B-1（中国）、p.p.1067-1068、1999.9
- 33) 瀬川信哉、三井康司、笹川明：膜材の応力-ひずみ曲線からカーブを分離した材料定数評価に関する実験的研究、構造工学論文集、Vol.41B、p.p.259-269、1995.3
- 34) 小竹達也、菊島誠、西川薫：膜材の織布特性を考慮した縮小率の設定方法、膜構造研究論文集、p.p.71-78、1996.12
- 35) 中島肇、斎藤公男、黒木二三夫、杉崎健一、宮田勝利、和田昌樹：ハイブリッド張力膜構造の構造特性に関する研究（その2）一ユニット式張力膜構造の曲面形成実験一、日本建築学会大会学術講演梗概集B（近畿）、p.p.1341-1342、1987
- 36) 鎌倉孝光、斎藤公男、黒木二三夫、和田昌樹：ハンガー式張力膜構造の構造特性に関する研究（その2）、（その3）、日本建築学会大会学術講演梗概集B（関東）、p.p.1349-1350、1988
- 37) 黒木二三夫、斎藤公男、鈴木英次、野口孝、樋口聡、松野浩一：角錐形張力膜構造の基本的力学性状に関する研究（その2）一単一膜材の曲面形成実験一、日本建築学会大会学術講演梗概集B（九州）、p.p.1187-1190、1989
- 38) 斎藤公男、黒木二三夫：ハンガー式およびユニッ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、p.p.107-121、1990.4
- 39) 樋口聡、斎藤公男、黒木二三夫、岡田章、山岸俊之、真柄栄毅：張力膜材の曲面形成及び力学的特性に関する実験的研究（その2）一解析及び実験結果一、日本建築学会大会学術講演梗概集B（中国）、p.p.1193-1194、1990.10
- 40) 松野浩一、斎藤公男、橋本和雄、仲田鉄山：角錐形張力膜構造の基本的力学性状に関する研究（その5）：“コクド・ゆとりどーむ”の曲面形成、日本建築学会大会学術講演梗概集B（中国）、p.p.1185-1186、1990.10
- 41) 斎藤公男、岡田章、高橋裕、遠藤精一、石徳秀一：テンション・リフト・ドームの設計と施工（その2）施工時・屋根工事完了後の測定および長期観測、日本建築学会大会学術講演梗概集B（東北）、p.p.1279-1280、1991
- 42) 斎藤公男、黒木二三夫ほか：ケブラーネット式ガスベンション膜構造の構造特性に関する研究（その3）HARUMIドームの曲面形成及び静力学特性、日本建築学会大会学術講演梗概集B（北陸）、p.p.1803-1804、1992.8
- 43) 米田稔彦、斎藤公男、黒木二三夫、渡辺朋弘：膜材料の剛性評価法に関する基礎的研究（その1）一小規模平面膜材の模型実験一、日本建築学会大会学術講演梗概集B（関東）、p.p.1369-1370、1993.9
- 44) 加藤秀弥、斎藤公男、黒木二三夫、小笠原孝二：膜材料の剛性評価法に関する基礎的研究（その2）一実規模平面膜材の構造実験一、日本建築学会大会学術講演梗概集B（関東）、p.p.1371-1372、1993.9
- 45) 松田仁、斎藤公男、黒木二三夫、力瀬康介：ウェット型張力膜構造における応力弛緩に関する実験的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集B-1（九州）、p.p.1011-1012、1998.9
- 46) 鷹羽直樹、斎藤公男、黒木二三夫、松田仁：ストラット式矩形膜の曲面形成および構造特性に関する研究（その2）応力弛緩性状の実験的検討、日本建築学会大会学術講演梗概集B-1（中国）、p.p.1045-1046、1999.9
- 47) 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、2000.9
- 48) 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、2000.9
- 49) 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、2000.9
- 50) 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、2001.9
- 51) 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、2001.9
- 52) Saitoh,M., Kuroki,F., Okada,A. and Nakajima,H.: Fundamental Study on Tension Membrane Structures with Spring-Strut, IASS Symp. 2001, Nagoya, TP049

注）試験体端部の膜応力 N' は、全載荷荷重 P とつかみ部反力 R から下式により換算した。ここで、 N' 、 R は単位長さ当たりの力である。また、十字形試験片の腕部の幅を ℓ (900mm)とすると、載荷荷重は単位長さ当たりの荷重として $P/4\ell$ と表すことができる。

(2003年9月9日原稿受理、2004年1月22日採用決定)