

ETFEフィルムを用いたばねストラット式張力膜構造の 応力弛緩に関する研究

-安定ひずみの評価と応力-ひずみモデルの提案-

中島 肇^{*1} 岡田 章^{*4}
永井 佑季^{*2} 川又 哲也^{*5}
宮里 直也^{*3} 梅原 智洋^{*6}

梗 概

ETFEフィルムは低強度、低剛性、過大なクリープの発生等の材料特性をもつ。著者らは既往の研究において、ETFEフィルムの構造的弱点を克服可能な構造システムとして、ばねストラット式張力膜構造を提案し、構造システムの有効性と許容応力度の観点から適用可能性を確認している。

一方で、ETFEを用いた張力膜構造の応力弛緩に関する問題は、重要な検討課題として残されている。このことから本論文では、ETFEフィルムが有する結晶化と称される物性に着目しながら荷重履歴や張力再導入を踏まえた一軸引張試験、二軸引張試験を実施し、弾性定数および安定ひずみの評価を行う。さらに実験より得られた安定ひずみを基に、応力弛緩を考慮した応力-ひずみモデルを提案・構築するものである。

1. はじめに

ETFE(エチレンテトラフルオロエチレン共重合樹脂)フィルムはフッ素系の合成高分子材料であり、90~97%の高い透光率、耐薬品性、30年程度の耐候性、-150~200℃の耐熱性、100%リユース可能といった、優れた特徴を有している。近年、高い透明性を持つ空間を創造できることから、新たな建築用膜材料としての期待が高まっている。添加剤の混合や着色・模様等のプリントも可能であり、意匠性・遮光性の付与等による要求への対応性も高いため、ヨーロッパを中心に多くの実施例がある(図1)。しかし、低強度、低剛性、過大なクリープの発生等の材料特性から、その構造形式は空気膜構造がほとんどである。著者らは既往の研究¹⁾において、ETFEフィルムの構造的弱点を克服可能な構造システムとして、ばねストラット式張力膜構造への適用を提案し(図2、3)、構造システムの有効性と許容応力度の観点から適用可能性を示した。

一方、従来使用されてきた織布繊維膜による張力膜構造の設計においては、応力弛緩への対策は重要な課題とされてきた。ここで応力弛緩とは、膜張力導入後に時間経過により常時発生する応力緩和と、付加荷重によるクリープ等を原因として発生する膜応力が損失する現象を総称するものとする(図4)。既往の研究では、織布繊維膜の膜応力の消失に対して、張力再導入という人為的な維持管理に依存しない有効な施工法²⁾や構造システム³⁾に関する提案を行っている(図5)。また、安定した応力-ひずみ関係が得られる「安定ひずみ」を考慮し、応力弛緩を評価可能な応力-ひずみ曲線のモデル化を提案している^{4)、5)}。



図1 ETFEフィルムの建築材料としての実施例

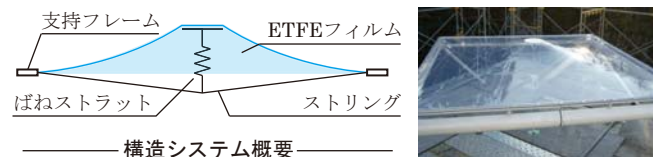


図2 ETFEフィルムのばねストラット式張力膜構造¹⁾



図3 ばねストラット式張力膜構造の事例(ガラス繊維膜使用)

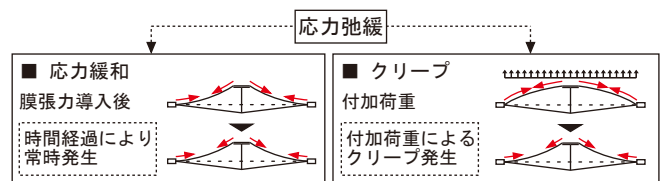


図4 張力膜構造における応力弛緩

*1 清水建設株式会社・工博

*2 日本大学大学院理工学研究科 大学院生・工修

*3 日本大学理工学部建築学科 助教・工博

*4 日本大学理工学部建築学科 教授・工博

*5 戸田建設株式会社・工修

*6 日本大学大学院理工学研究科 大学院生

織布繊維膜とは異なるが、ETFEフィルムを用いた張力膜構造においては、その材料特性から、クリープ発生に伴う応力弛緩はさらに重要な検討課題であり、ばねストラット式張力膜構造を適用し実現するためには、応力弛緩を十分に考慮した設計手法および性能を明確にする必要がある。

既往の研究では、高分子材料の結晶化という性質に着目し、一軸引張試験によりETFEフィルムの安定ひずみの存在を確認すると共に、設計への応用が可能な応力-ひずみモデルを提案した。さらに、ばねストラット式張力膜構造における応力弛緩に関する挙動を、数値解析により検討した⁶⁾。

しかし上述の議論は、ETFEフィルムが等方性材料であることを前提として一軸引張状態で検討したものであり、二軸引張状態での利用が主である膜構造の実際の設計を考えた場合、各種材料試験に関しては二軸引張状態での検討が必要であると考えられる。

本論では、はじめに既報の一軸引張試験と共に、新たに実施した二軸引張試験による検討を加え、各種材料試験により弾性定数を算出し、等方性材料と見なすことの妥当性を確認する。次に安定ひずみについて検討を行い、最後に各種実験により得られた結果を基に、ETFEを用いた張力膜構造の設計に適用可能な応力弛緩を考慮した応力-ひずみモデルに関して提案する。

2. 高分子材料の結晶化と安定ひずみ

一般に高分子材料は、伸長によって高分子鎖が伸ばされ「結晶化」し、その進行状態(結晶度)によって物性が大きく変化する性質を有する。結晶化の進行に伴い、応力緩和速度、クリープひずみ、クリープ速度が大きく低下する性状が一般的に存在する⁷⁾(図6)。ここで、応力緩和と弾性率はひずみに対する応力比、クリープコンプライアンスは応力に対するひずみの比を示す。この特性から、伸長により一定以上のひずみをあらかじめ導入すれば、実用上応力弛緩が無視できる安定した応力-ひずみ関係が得られる可能性があると考えられる。本論では、上記の概念を用い、安定した応力-ひずみ関係が得られる安定ひずみに関して検討することにより、経年時のばねストラット式張力膜構造の挙動の把握に反映するものとする。

3. 引張試験による弾性定数の算出

3.1 実験概要

一軸引張試験概要を図7に、二軸引張試験概要を図8に示す。一般的にETFEフィルムはロール状に巻かれていることから、試験体の方向に関する表記方法として、ETFEフィルムパネル設計・施工指針(案)⁸⁾に従って、ロール方向をMD(Machine Direction)、ロール直交方向をTD(Transverse Direction)とした。

試験体にはETFEフィルム250 μ mを用い、試験体寸法及び試験方法は、(社)膜構造協会試験法標準の膜材料の品質及び性能試験方法⁹⁾及び弾性定数試験方法¹⁰⁾に準拠した試験方法とした。なお、二軸引張試験の荷重比(1:0)、(0:1)に

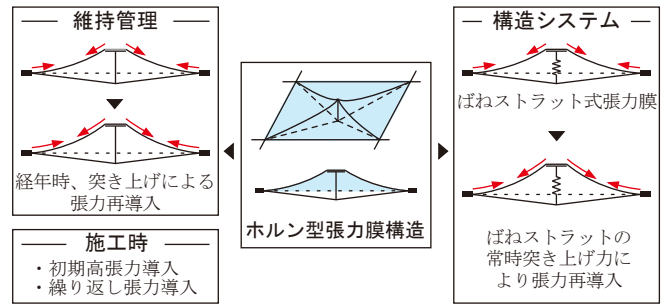


図5 張力膜構造と応力弛緩の対策(織布繊維膜)

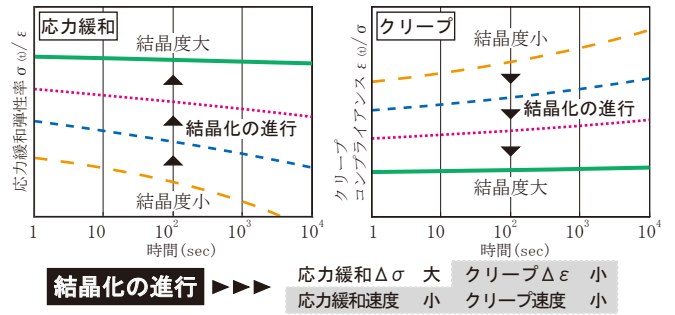
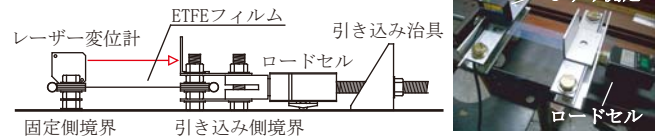


図6 結晶化の進行と応力弛緩に対する性能⁷⁾

■ 実験治具



■ 測定項目

膜応力 … ロードセル
ひずみ … レーザー変位計

■ 試験体概要

試験体 ETFE250 μ m
幅30mm×長さ100mm

図7 一軸引張試験概要

■ 試験体

ETFEフィルム 250 μ m

■ 試験体寸法

(社)日本膜構造協会試験法標準“膜材料弾性定数試験方法”に準拠した試験体寸法(右図参照)

■ 測定項目

膜応力(▲) → ロードセルより測定したつかみ部反力を試験体幅で除すことにより算出
ひずみ(◆) → ノギスにより測定(標点間距離:50mm)

■ 採用した荷重比

1:1, 2:1, 1:2, 1:0, 0:1

■ 载荷荷重

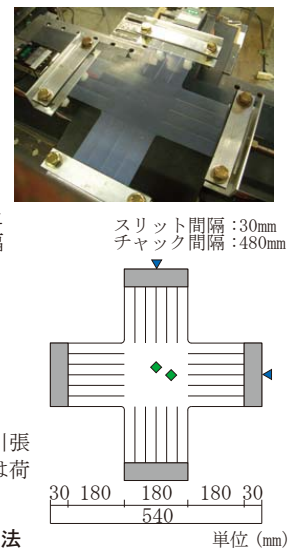
引張強さのほぼ1/4の荷重まで基準引張軸*を基に载荷する。(※基準引張軸は荷重比の大きい方向とする。)

■ 弾性定数Et及びポアソン比の算出方法

5組の測定データ(T_{xi}, ϵ_{xi}) (T_{yi}, ϵ_{yi})を用いて、以下に示す3つの未知数 E_{11}, E_{22}, E_{12} を最小二乗法により決定。これらより弾性定数、ポアソン比を算出。

$$\left. \begin{aligned} E_{11} &= E_x \cdot t / v & E_{22} &= E_y \cdot t / v \\ E_{12} &= E_{21} = v \cdot y \cdot E_x \cdot t / v = v \cdot x \cdot E_y \cdot t / v \\ v &= 1 - v_x \cdot v_y \end{aligned} \right\} \dots (1)$$

図8 二軸引張試験概要



おいては、荷重をかけない方向の腕部を切り離すことはせず、中央部応力に影響を与えないよう十分ゆるませた状態で一軸引張試験を行った。

3.2 実験結果

一軸引張試験の結果より得られた材料定数を表1に示す。試験片は、各方向で3枚とし、計6枚から得られた弾性定数、ポアソン比よりせん断弾性係数の算出を行った。

二軸引張試験の結果を表2に示す。弾性定数は、試験より得られた測定データを用いて、図8に示した(1)式により算出した(表3)。直交異方性を考慮した試験方法により算出した各弾性定数は、方向により弾性定数に大きな差異はなく、また「ETFEフィルムパネル設計・施工指針(案)」⁸⁾に掲載された値とほぼ同等の結果を得ることが出来た。

また一軸引張試験と二軸引張試験では、弾性定数の値に差が生じているが、一軸引張試験と二軸引張試験それぞれから得られた弾性定数は、MD方向とTD方向でそれぞれほぼ同じ値であることから、本論で使用しているETFEフィルムを等方性として取り扱うことが可能である。設計に用いる弾性定数としては、二軸引張状態での利用が主となることが想定されるため、二軸引張試験より得られた弾性定数を用いる方が実際の挙動を適切に評価できるものと考えられる。

4. 安定ひずみ実験

4.1 実験概要

応力弛緩後の安定した応力-ひずみ関係のモデル化を目的として、張力膜構造の経年時の挙動を想定し、「曲面形成」→「付加荷重の載荷」→「除荷」→「張力再導入」を模擬した材料試験を実施した。実挙動と実験モデルの相関関係を図9に示す。ここで、曲面の形成と張力再導入は変位制御による端部の引き込みで、また付加荷重は試験体中央部における面外方向載荷で、それぞれ模擬した。付加荷重は風荷重を想定し、第1降伏点付近の膜応力となるように載荷荷重を決定した。

実験サイクルを図10に示す。実験における応力-ひずみ関係は、②「応力緩和」、④付加荷重による「クリープ」、⑥「回復クリープ」のそれぞれにおいて、15秒間あるいは30分間の放置時間を設定した。また、本実験では①から⑥までにおける応力の減少量を「応力弛緩」と定義した。⑥「回復クリープ」後に

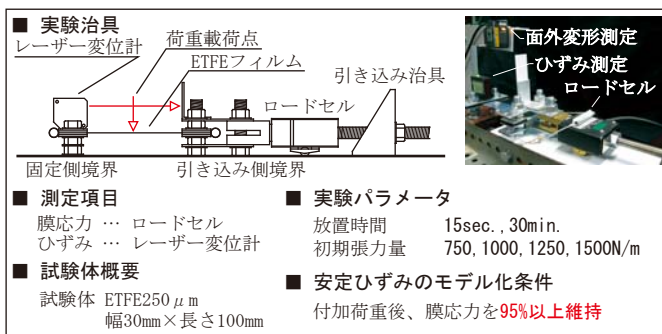


図11 安定ひずみ実験概要(一軸)

表1 一軸引張試験結果

各方向での弾性定数		弾性定数 E_t ※	129630 N/m
MD Ave.	130510 N/m	せん断弾性定数 G_t	45010 N/m
TD Ave.	128460 N/m	ポアソン比 ν ※	0.44

※ 各方向3試験体、計6試験体の平均値

表2 二軸引張試験結果

	T_{xi} (N/m)	T_{yi} (N/m)	ϵ_{xi}	ϵ_{yi}
1:1	1910	1890	0.00507	0.00203
2:1	1940	960	0.00608	-0.00203
1:2	960	1880	0.00203	0.00711
1:0	2000	0	0.01114	-0.00508
0:1	0	1980	-0.00101	0.0061

表3 弾性定数とポアソン比の算出(二軸引張試験より)

弾性定数(N/m)		ポアソン比	
$E_x \cdot t$	$E_y \cdot t$	ν_x	ν_y
201106	209882	0.43	0.45

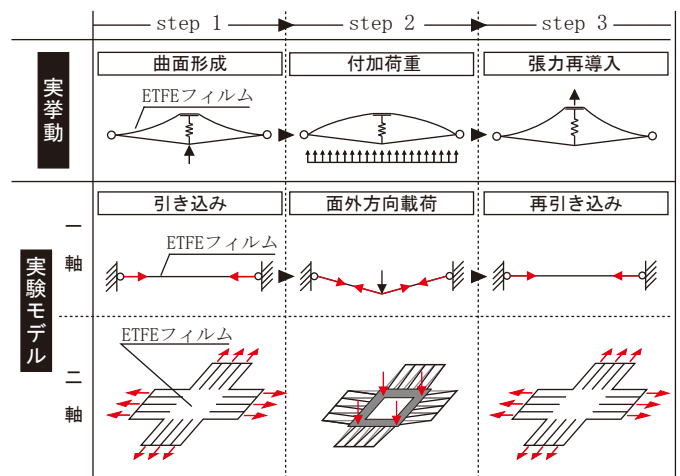


図9 実挙動と実験モデルの相関

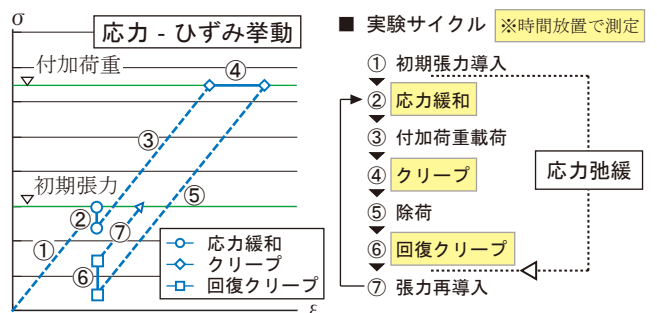


図10 実験サイクル

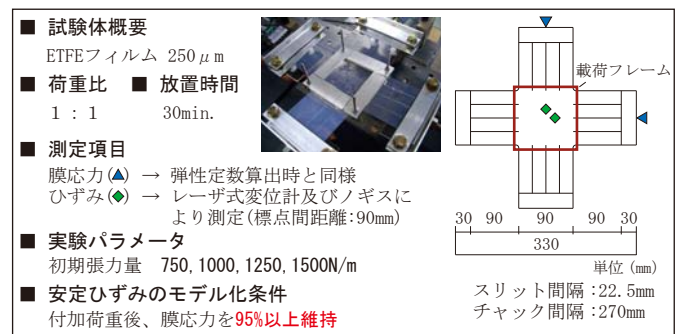


図12 安定ひずみ実験概要(二軸)

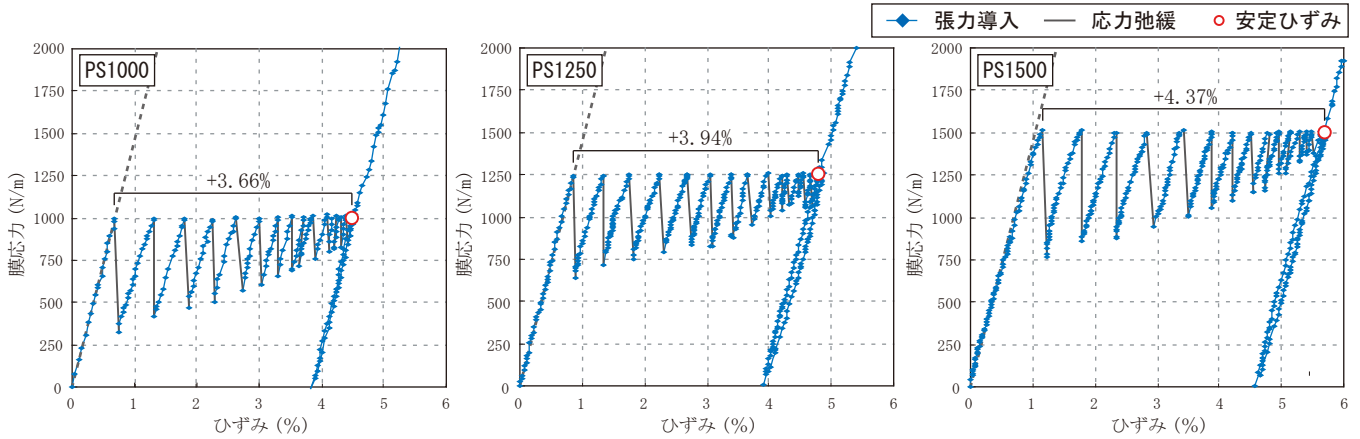


図13 実験結果【一軸・载荷時間30min.】

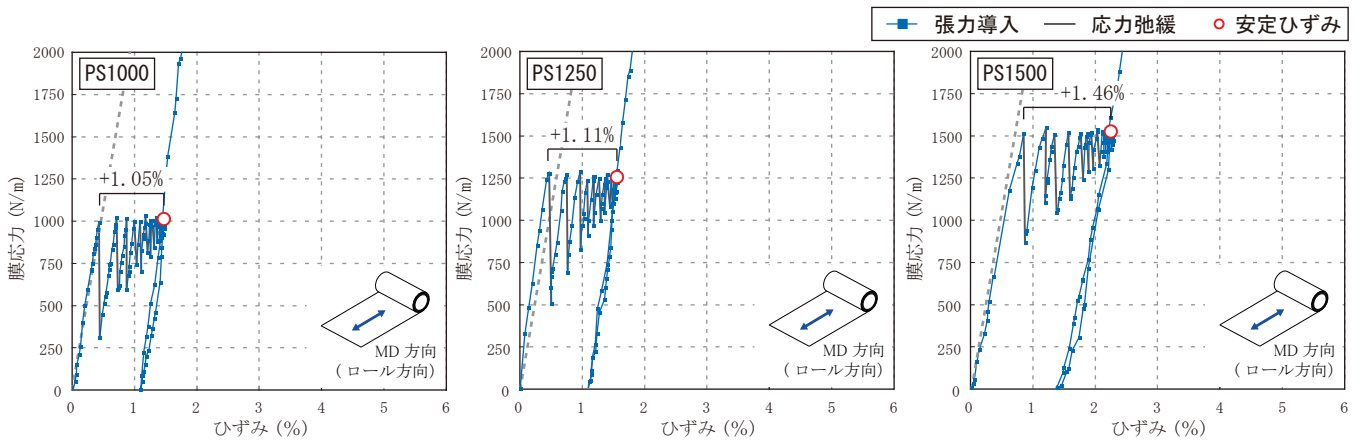


図14(a) 実験結果【二軸・MD方向】

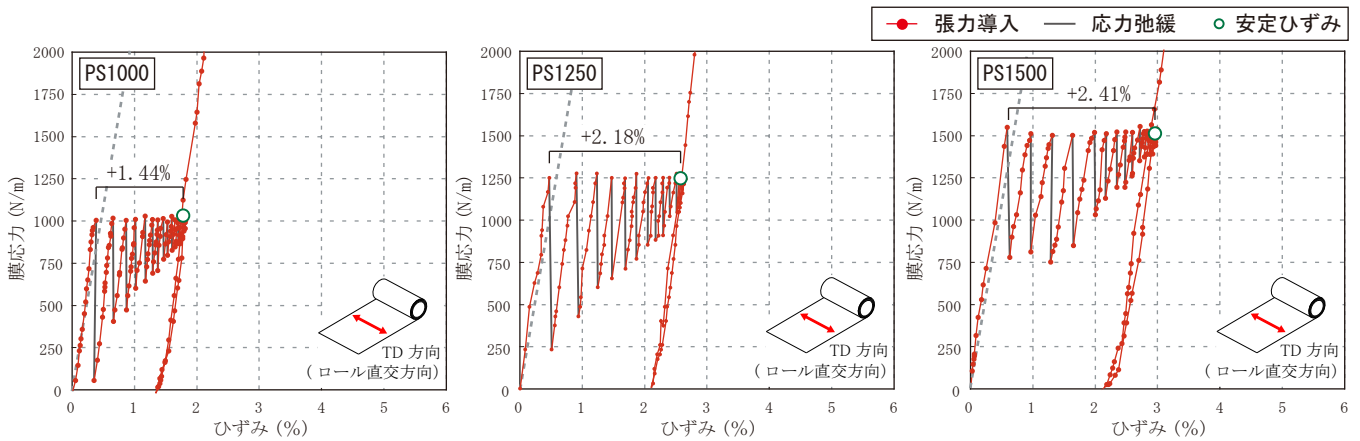


図14(b) 実験結果【二軸・TD方向】

膜応力が95%以上維持できた場合、安定した応力-ひずみ関係が得られたと判断し、初期張力導入時からの増分ひずみを「安定ひずみ」と称することにした。

実験は、一軸、二軸それぞれ3節で用いた実験装置とほぼ同様のもを使用し、二軸用試験体には付加荷重载荷のためのフレームを取り付けた(図11、12)。パラメータは初期張力とし、一軸引張試験ではクリープ・応力緩和等を考慮した放置時間(15秒、30分)もパラメータとした。

4.2 一軸引張試験結果

実験結果を図13に示す。図中、試験体を表わす「PS〇〇」における数字は、初期張力量(N/m)を表わしている。初期载荷後の応力弛緩は50~70%と大きい、応力弛緩は徐々に減少していき、安定ひずみへと収束していく傾向が確認された。安定ひずみは初期張力量により異なり、初期張力量が大きいほどその値は大きくなる。また、载荷前の初期弾性定数と

6. まとめ

一軸引張試験、二軸引張試験により、弾性定数等の各種材料データの算出を行った。さらに、実挙動を模擬した実験モデルを用い、一軸・二軸での安定ひずみ実験を実施し、安定ひずみの存在を確認した。これらの実験により二軸引張試験から得られた安定ひずみを設計に適用することが妥当であると考え、設計に適用可能な応力-ひずみモデルを提案した。本提案モデルは、本論で対象としているばねストラット式張力膜構造のみならず、ETFEフィルムを用いた張力膜構造全般に応用可能であると考え。

今後、本論で提案した応力-ひずみモデルを用いて数値解析を行い、実験との比較を通してその妥当性を検証する必要があると考える。さらに、初期張力量やばねストラットの剛性等をパラメータとした解析的検討を行い、ばねストラット式張力膜構造の実設計に有用な設計資料を構築する予定である。

[参考文献]

- 1) 水野公義, 梅原智洋, 川又哲也, 宮里直也, 岡田章, 斎藤公男: ETFEフィルムの張力膜構造への適用性に関する基礎的研究(その1~3), 日本建築学会学術講演梗概集, pp.925-930, 2008.9
- 2) 斎藤公男, 黒木二三夫, 高田雄一, 浦映二, 竹内一博: 初期高張力導入膜に関する実験的研究(その1~2), 日本建築学会学術講演梗概集B-1, pp.1069~1072, 2000.9
- 3) 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1~2), 日本建築学会学術講演梗概集B-1, pp.1065~1068, 2000.9
- 4) 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
- 5) 中島肇, 斎藤公男, 黒木二三夫, 岡田章: 材料の応力弛緩を考慮した応力-ひずみ曲線モデルを適用した構造解析-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
- 6) 川又哲也, 岡田章, 宮里直也, 永井佑季, 中島肇, 斎藤公男, 梅原智洋: ETFEフィルムを用いたばねストラット式張力膜構造の応力弛緩に関する研究(その1~2), 日本建築学会学術講演梗概集, pp.839-842, 2009.8
- 7) L.E.Nielsen: 高分子と複合材料の力学的性質, 化学同人, 1980
- 8) ETFEフィルムパネル設計・施工指針(案), (社)日本膜構造協会, 2006
- 9) 膜材料の品質および性能試験方法 (MSAJ/M-03-2003), (社)日本膜構造協会, 2003
- 10) 膜材料弾性定数試験方法 (MSAJ/M-02-1995), (社)日本膜構造協会, 1995
- 11) 森山史朗, 河端昌也, 正木佳代子: ETFEフィルムの弾塑性挙動について, 膜構造論文集2003, pp.21-26, 2003
- 12) 吉野達矢, 瀬川信哉, 小田憲史: ETFEフィルムの2軸引張特性と弾塑性応力・変形解析, 膜構造論文集2004, pp.31-39, 2004

STUDY ON STRESS RELAXATION OF TENSILE MEMBRANE STRUCTURES
WITH SPRING-STRUT SYSTEM USING ETFE-FILM

- Evaluation of "Stable Strain" and Proposal of Stress-Strain Model -

Hajime Nakajima^{*1)} Akira Okada^{*4)}
Yuki Nagai^{*2)} Tetsuya Kawamata^{*5)}
Naoya Miyasato^{*3)} Tomohiro Umehara^{*6)}

SYNOPSIS

ETFE-film has the characteristics of weak strength, low rigidity and large creep strain. In the past, the authors proposed the tensile membrane structure with a spring-strut system, which based on the characteristic of ETFE-film. And this research clarified an availability of this system from the point of the allowable stress design method.

On the other hand, we consider that the stress relaxation for tensile membrane structures using ETFE-film is becoming one of the agenda to be examined in the future. From this point of view, in this paper, focusing on the physical properties called a crystallization of the ETFE-film, the several material experiments based on hysteretic loading and re-introduction of tensile force are executed. These experiments are mainly the uniaxial extension test and the biaxial extension test. Based on the results of these tests, "stable strain" is evaluated and the authors propose the stress-strain model for the design.

*1) Shimizu Corporation, Dr.Eng.

*2) Graduate Student, Dept. of Architecture, Nihon Univ., M. Eng.

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

*4) Prof., Dept. of Architecture, Nihon Univ., Dr. Eng.

*5) Toda Corporation, M.Eng.

*6) Graduate Student, Dept. of Architecture, Nihon Univ.