

ETFEフィルムを用いた張力膜構造に関する基礎的研究

-2軸応力場と張力膜構造におけるクリープ現象に関する検討-

Basic Study on Suspension Membrane Structure Using ETFE Film

-Study on Creep Phenomenon in Biaxial Stress Field and in HP Shaped Suspension Membrane-

○井手健人³, 宮里直也¹, 岡田章², 廣石秀造¹, 鷺海昂¹

*Kento Ide³, Naoya Miyasato¹, Akira Okada², Shuzo Hiroishi¹, Akira Oshiumi¹

Abstract : Currently, ETFE film is mainly used in small lens-shaped air membrane structures. However, it has potential for use in tension membrane structures, but uncertainties exist about its viscoelastic properties and stress-strain behavior after stress relaxation in this context. While Matsuzaki^[1] and others have proposed an analytical method considering ETFE's viscoelasticity, there's room for improvement in existing reports. Therefore, in this study, the authors performed creep experiments on HP-type membranes and numerical analysis in biaxial stress fields and HP-type membranes, and investigated methods that can evaluate creep phenomena in suspension membrane structures.

1. はじめに

現在, ETFEフィルム(以下「ETFE」)は比較的小規模なレンズ状二重空気膜構造に多く採用されている。これは、この種の構造は, ETFE特有の材料特性(材料非線形性, 粘弾性特性など)が構造挙動に及ぼす影響を無視できることによる。

しかし, ETFEの利用拡大の観点から張力膜構造(以下「張力膜」)への適用に向けた検討も必要であると考えられる。ETFEの張力膜は力学性状, 特に粘弾性特性に関して不明な点が多いことから, 松壽ら^[1]はETFEの粘弾性を考慮した応力変形挙動を評価する汎用的な解析手法について報告している。一方, 既報では, 非等張力の挙動を1つの粘弾性定数にて再現しているため, 改善の余地が残されている。

以上を踏まえ, 本報では, ETFEを用いたHP型張力膜のクリープ性状の評価を目標として, 2軸応力場およびHP型張力膜に対して実験と数値解析を通じて検討を行った。

2. 粘弾性材料概要

汎用数値解析における粘弾性材料のモデル化では, 一般に「一般化Maxwellモデル」(以下「一般化モデル」)が用いられている。このモデルは, 粘弾性定数である弾性バネ(弾性率 E_i)とダッシュポット(緩和時間 τ_i)を直列に繋いだMaxwellモデルを, 並列に複数配置したモデルである。Maxwellモデルの項数を増やすことで, 材料の時間特性を近似的に表すことが可能である。本検討では, 既報^[1]の結果を参考に, 「7要素モデル」を採用する(Fig.1)。

一般化モデルにおいて, ひずみ一定の応力緩和条件下で定義される応力 $\sigma(t)$ は, (1)式によって表される(Fig.2(a))。また, 見かけの弾性率のみの関係である緩和弾性率 $E(t)$ は, 応力を一定ひずみで除すことで, (2)式より得られる(Fig.2(b))。これは, 時間と共に低下する弾性率であり, Prony級数と呼ばれる指数関数の減衰特性を利用して, 緩和特性を簡易に近似したものである。

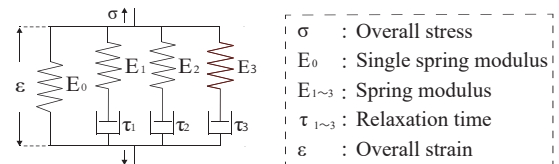
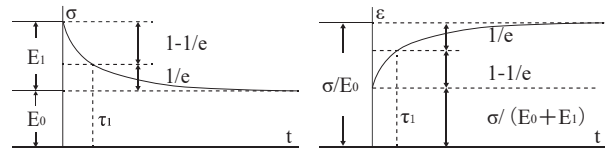


Figure 1. Generalized Maxwell model (7 elements)



(a)Stress relaxation Stress-time relationship (b) Creep Strain-Time Relationship
Figure 2. Behavioral properties of viscoelastic materials

$$\sigma(t) = E_0 \cdot \epsilon + \sum_{i=1}^3 E_i \cdot e^{-t/\tau_i} \cdot \epsilon \quad \dots (1)$$

$$E(t) = \sigma(t)/\epsilon = E_0 + \sum_{i=1}^3 E_i \cdot e^{-t/\tau_i} \quad \dots (2)$$

3. HP型張力膜のクリープ実験

実験概要をFig.3に示す。実験には500mm四方, ライズ・スパン比0.1の試験体を用いた。試験体は4分割したETFEフィルムを溶着して製作した。端部はクランプにて固定し, 荷重は試験体中央部に100N, 直径110mmの丸型おもりを載せることで行った。中央変位はレーザー変位計を用いて, ETFEフィルム裏面を測定した(Fig.3(c))。なお, 測定期間は変位が収束するまでとした。

4. 2軸応力場およびHP型張力膜の数値解析

4-1. クリープ数値解析概要

2軸応力場およびHP型張力膜の数値解析概要をFig.4に示す。解析モデルは実験を模擬し, 形状と材料を設定した。要素は2D-solid(四角形要素)を用いた。外周の4辺はピン支持とし, モデル中央を中心軸とする直径110mmの円周上に, 100Nの荷重を面外(Z軸)方向へ荷重した。評価時間は11日間(950,400秒)とした。

1 : 日大理工・教員・建築 2 : 日大理工・上席研究員 3 : 日大理工・院(前)・建築

既報^[1]では、膜面の応力分布を考慮して、1つの粘弾性定数で再現を試みたが、本報では応力状態に応じて領域を設定し、粘弾性定数を適用させた。

2軸応力場およびHP型張力膜の領域設定をそれぞれFig.5,6に示す。これらは、事前に行った静的解析の主応力図 (Fig.5(a),6(a))を基に設定しており、Type[i]~[iii]になるにつれて、主応力図に合わせた領域設定とした。Type[i]は膜の荷重円周部、中間部、端部の3カ所の主応力の平均値を参考にして、5.0MPaの粘弾性定数を適用した。また、Type[ii]は2つ、Type[iii]は3つの粘弾性定数を適用させ、応力が小さい箇所に3.5MPa、大きい箇所に7.0MPa、それ以外の箇所に5.0MPaの粘弾性定数を適用させた。なお、粘弾性定数は既報^[1]の一軸引張試験より算出した値を用いた (Table 1)。数値解析には汎用解析プログラムADINA (Ver.9.10) を用いた。

4-2. 数値解析結果および実験結果との比較

2軸応力場およびHP型張力膜のクリーブ解析の中央変位-時間関係をそれぞれFig.7,8に示す。2軸応力場とHP型張力膜の中央変位はそれぞれ荷重直後は21.8mm, 11.51mm, 11日経過後はそれぞれ26.7mm, 13.21mmとなった。

Fig.7より、2軸応力場では全てのTypeにおいて、概ね実験の性状を模擬できていることを確認した。特に、Type[iii]が最も変形量が大きく、実験値と近い性状を示した。また、Fig.8より、HP型張力膜においても、Typeによらず、概ね実験の性状を模擬できていること、2軸応力場と同様に、Type[iii]が最も変形量が大きく、実験値と最も近い性状を示した。

以上より、粘弾性定数の領域を設定し、複数の粘弾性定数を適用させることにより、既報のモデルであるType[i]と比較して、実験をより詳細に模擬できていることを確認した。一方、各ケースの実験値との差は大きくないことから、1つの粘弾性定数を用いたType[i]の場合でもある程度の評価が可能であることが示唆された。なお、2軸応力場およびHP型張力膜の実験値と解析値において、一定の差が生じた要因としては、粘弾性定数を算出した試験時との試験環境の違いが要因として考えられる。

5.まとめ

本報では、ETFEを用いたHP型張力膜のクリーブ性状に関する実験および2軸応力場とHP型張力膜の数値解析を行い、応力状態に応じて、粘弾性定数を変化させた検討を行った。本検討より、2軸応力場およびHP型張力膜は共に、複数の粘弾性定数を適用することにより、実験値を概ね評価できることを確認した。今後は、粘弾性定数の応力度の拡充と、HP型張力膜の応力弛緩の検討を行う予定である。

6.参考文献

[1] 松寄浩靖, 他: 「ETFEフィルムを用いた張力膜構造に関する研究」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造I, pp.841-844, 2023.9

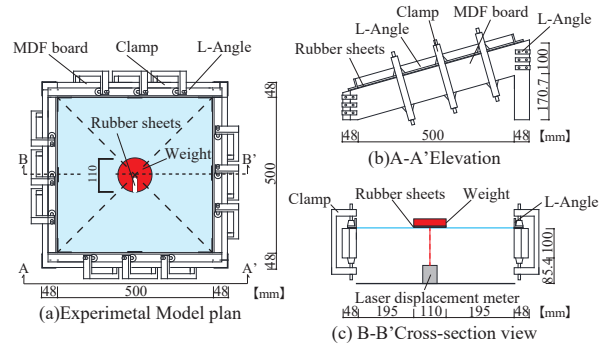


Figure 3. Overview of Creep Experiment (HP)

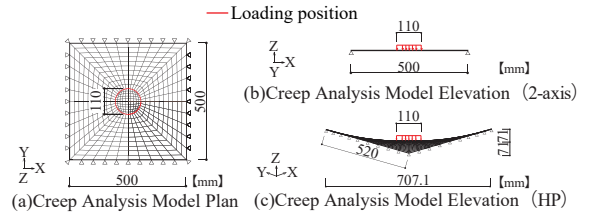


Figure 4. Overview of Creep Numerical Analysis

▼ Materials and Structural Specifications

Material properties : 2-D Solid rectangular elements
7-element Maxwell model
Thickness : 250um
Material Conditions : Et: 160 N/mm, γ : 0.43
Boundary Conditions : Membrane end pin support
Loading Conditions : Out-of-plane loading in the center
Loading load : 100N
Evaluation time : 950,400 Seconds (11 days)

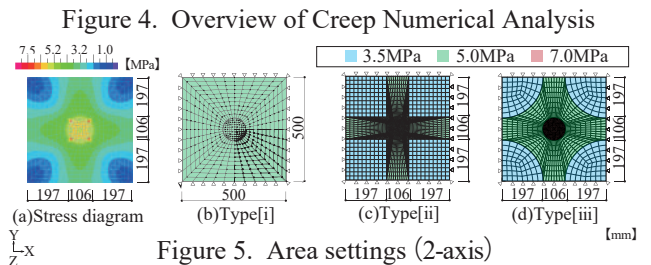


Figure 5. Area settings (2-axis)

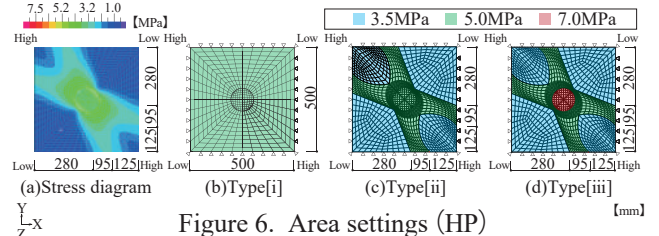


Figure 6. Area settings (HP)

Table 1. Viscoelastic constant of the 7 element model

	E ₀ [N/mm]	E ₁ [N/mm]	E ₂ [N/mm]	E ₃ [N/mm]	τ ₁ [s]	τ ₂ [s]	τ ₃ [s]
3.5MPa	126.088	3.044	14.497	16.171	3979	101165	934195
5.0MPa	98.264	9.088	16.323	36.325	3394	91469	1919430
7.0MPa	64.720	21.053	41.900	32.328	9399	283128	1829579

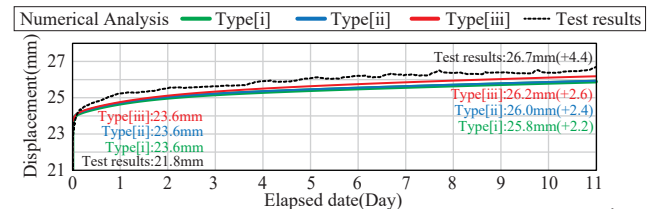


Figure 7. Central point displacement-time relationship (2-axis)

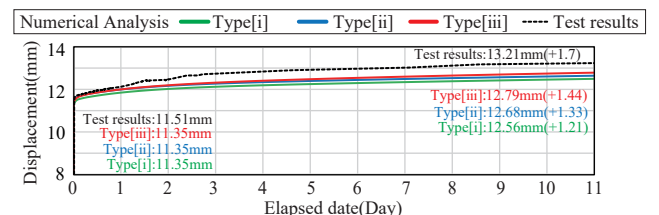


Figure 8. Central point displacement-time relationship (HP)