

ETFEフィルムを用いた張力膜構造に関する研究
 -ETFEフィルムの応力弛緩及びクリープに関する数値解析的検討-
 Study on Tension Membrane Structure Using ETFE Film
 - Numerical Analysis Study on Stress Relaxation and Creep of ETFE Film -

○松崎浩靖³, 宮里直也¹, 岡田章¹, 廣石秀造¹, 鴛海昂¹, 吉野誠一²
 Hiroyasu Matsuzaki³, Naoya Miyasato¹, Akira Okada¹, Shuzo Hiroishi¹, Akira Oshiumi¹, Seiichi Yoshino²

Abstract: ETFE is a viscoelastic material of polymers and has characteristics that cause significant stress relaxation and creep. Although ETFE is mostly used in air membrane structures, the authors focused on the application of ETFE to tension membrane structures with few actual structures. The final purpose of this study is to quantitatively evaluate the overall behavior of the tension membrane structure against the applied load after stress relaxation by numerical analysis. In this paper, for the purpose of understanding the stress relaxation and creep phenomena of ETFE, the authors conduct stress relaxation and creep experiments and compare them with nonlinear numerical analysis.

1. はじめに

ETFEフィルム(以下「ETFE」と称す)は、平成29年6月の法改正により材料強度と設計法が確立され、今後の発展が期待されている膜構造材料である。現在、ETFEは空気膜構造での利用がほとんどである。これは、ETFEが高分子の粘弾性材料であること、また、低剛性、材料非線形性などの性質を有し、応力弛緩やクリープが顕著であることが要因である。

しかし、ETFEの利用拡大の観点から、他の膜構造形式への適用の検討も必要であると考えられる。このため、本報では実施工件数の少ない張力膜構造(以下「張力膜」と称す)に着目した。張力膜は空気膜構造と比較して使用材料の削減が可能で、内圧維持装置も不要などの利点を有する。張力膜を対象としたETFEに関する既往の研究では、丁田らがETFEの応力弛緩やクリープ時の一般化構成式や、塑性域の利用について報告している。

一方、ETFEの張力膜は、力学性状について不明な点が多く、応力弛緩後の付加荷重に対する応力変形状に関する定量的な評価は著者らの知る限り報告されていない。そのため、本研究では、数値解析により様々な条件下における膜応力状態を分析することを目的としている。

以上を踏まえ、本報では、ETFEの応力弛緩とクリープ現象の把握を目的として、非線形数値解析(汎用解析プログラムADINA Ver.9.6)を行うと共に、応力弛緩およびクリープに関する実験結果との比較検討を行い、数値解析手法の妥当性を検証する。

2. 粘弾性材料概要

ETFEは粘弾性材料であるため、力学的性質は応力依存性、時間依存性および温度依存性を示す^[1]。一般に、応力弛緩現象はバネとダッシュポッドを直列に繋いだMaxwellモデル、クリープ現象はバネとダッ

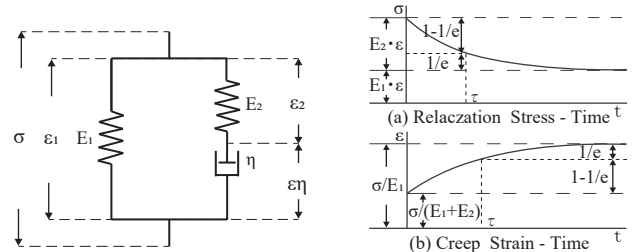


Figure.1 3-Element Maxwell

Figure.2 Changes in Stress and Strain

シュポッドを並列に繋いだVoigtモデルで評価できる。一方、本報では、応力弛緩をより精密に表現できる「3要素Maxwellモデル(Fig. 1)」を採用する。同モデルでは、クリープ現象を評価する際、ひずみの値には応力弛緩とクリープの両現象の影響が現れる。この時、一定ひずみ下の応力弛緩による応力状態は(1)式、一定応力下のクリープによるひずみは(2)式によって求められる。

$$\sigma(t) = \varepsilon_1 (E_1 + E_2 \cdot e^{-t/\tau}) \quad \tau = \frac{\eta}{E_2} \text{ (緩和時間)} \quad (1)$$

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{(E_1 + E_2 \cdot e^{-t/\tau})} \quad \tau = \frac{\eta}{E_2} \text{ (遅延時間)} \quad (2)$$

$$E_1 = Et \cdot \delta r \quad E_2 = Et \cdot (1 - \delta r) \quad (3)$$

$$E_1 = \frac{Et}{\delta c} \quad E_2 = \frac{(\delta c - 1) \cdot Et}{\delta c} \quad (4)$$

引張剛性 E_c を持つ材料の材料定数 E_1, E_2 は、応力弛緩の応力減少割合を δ_r 、クリープのひずみ増加割合を δ_c とすると、(3)、(4)式により算出される。ここで τ は、応力弛緩では減少する応力が $1/e$ となるまで、またクリープでは増加したひずみが $(1-1/e)$ となるまでに要する時間を表す。(1)、(2)式の σ と ε の時間変化をFig. 2に示す。

3. 応力弛緩およびクリープ実験の概要

試験体の概要をFig.3に示す。応力弛緩とクリープ実験はそれぞれ幅30mm×長さ200mm、幅30mm×長さ800mmの短冊状の試験体を用いて、一方向引張荷重を

1 : 日大理工・教員・建築 2 : 株式会社よしの 3 : 日大理工・院 (前)

行った。応力弛緩実験はひずみを一定とした載荷を行い、膜張力量をロードセルにて11日間測定した。また、クリープ実験は応力を一定とした載荷を行い、膜変位量を高感度変位計にて25日間測定した。両実験のパラメータ (Table. 1) は初期応力とした。初期応力は、応力弛緩実験では長期許容応力度の100%, 70%, 50% (7, 5, 3.5MPa) の全3ケース, クリープ実験では1ケース (50%) とし, 各3試験体ずつ行った。

4. 数値解析の概要

数値解析の概要をFig. 4に示す。解析モデルは, 3章の実験と同形状とした。また, 3章の実験によって得られた材料諸元をTable.2に示す。E₁, E₂は(3), (4)式より算出した。応力弛緩解析ではe, e'端をピン支持とし, モデル面内方向へ初期ひずみを与えた後, 所定の期間の変動量を評価した。一方, クリープ解析ではモデルe'端にX方向への一定荷重を与えた。e端をピン支持, e'端をX方向ローラーとし, 評価時間はそれぞれ11日間 (950, 400秒) と, 25日間 (2, 160, 000秒) と設定した。

5. 実験結果と数値解析結果の比較

Fig. 5に応力弛緩の応力-時間関係を示す。応力弛緩実験では11日経過後の応力保持割合は, 3試験体の平均で69.5% (3.5MPa), 63.8% (5MPa), 60.3% (7MPa) となり, 初期張力が大きいほど保持割合が小さいことを確認した。また, Table. 2より応力弛緩の緩和時間τは各パラメータで20~24時間と概ね一定の値となった。

応力弛緩の数値解析結果と実験結果より, 初期応力が大きいほど, 収束するまでに大きな差を生じる事が確認された。また, 数値解析結果は1日経過以降に実験値よりも応力の減少量を過度に評価している。これはETFEの応力依存性が影響しており, 3要素Maxwellモデルでの再現は困難なため, 別途, 詳細なモデルでの検討が必要と考えられる。一方, 収束後は, 数値解析結果は実験結果と概ね一致することが確認された。

Fig. 6にクリープ解析結果と実験結果を示す。クリープ実験では25日経過後のひずみが初期ひずみに対して3試験体平均で172.0%となった。また, 数値解析値はほぼ全ての範囲において実験結果を下回ることから, クリープひずみを過小評価していることが把握された。これは遅延時間τとして, Voigtモデルの値を使用しているためと考えられる。

7. まとめ

本報では, ETFEを対象として, 応力弛緩とクリープの実現象の評価手法の確立を目的として, 基本的な材料実験と数値解析の比較検討を行った。検討の結果, 数値解析は応力弛緩およびクリープの収束状態は概ね再現出来ているが, その途中経過については, 評価できていないことが把握された。特にクリー

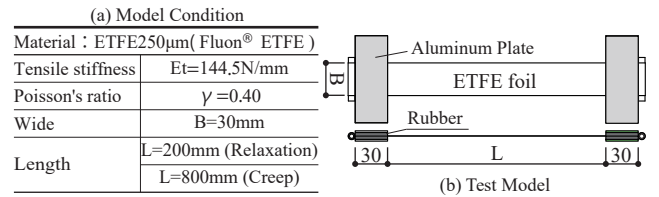


Figure.3 Outline of Test for Relaxation and Creep

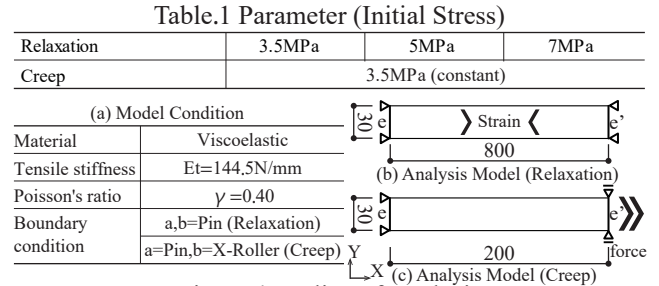


Figure.4 Outline of Analysis

Table.2 Material Specification

	Initial σ	E ₁ [N/mm]	E ₂ [N/mm]	τ [s]
Relaxation	3.5MPa	100.46	44.04	75,020
	5MPa	92.19	52.31	87,000
	7MPa	87.16	57.34	75,056
Creep	3.5MPa	84.03	60.47	424,800

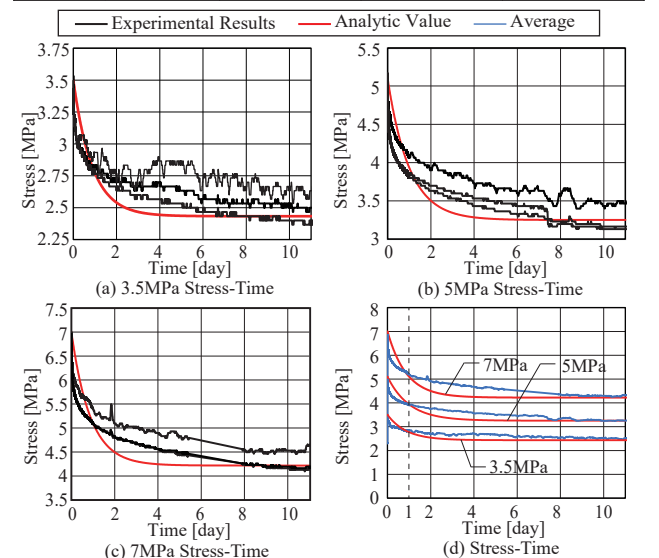


Figure.5 Relaxation Analysis and Experimental Values

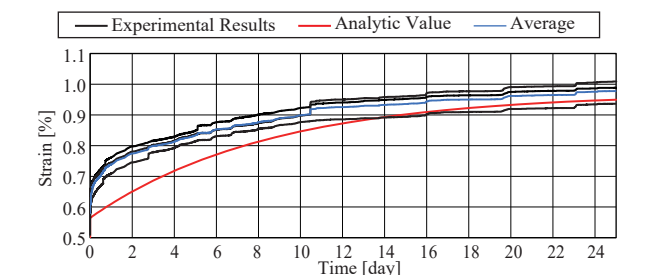


Figure.6 Creep Analysis and Experimental Values

プについては実現象を過小評価しているため, 解析モデルの再検討を行う予定である。

8. 参考文献

[1] 丁乙碩: 「ETFEフィルムを用いた張力膜構造の粘性的挙動と延伸形成に関する研究」, 横浜国立大学, 博士論文, 2013. 6
 [2] 澤口孝志 他: 「基礎高分子化学改訂版」, 共立出版株式会社, 2000. 9