

## 引張と振りの複合荷重下のカテーテルのクリープ変形挙動と数値解析モデル Creep Behavior of Catheter under Combined Loading of Tension and Torsion and the Analytical Model

○田畑 勇太<sup>1</sup>, 小山 佳佑<sup>1</sup>, 加藤 保之<sup>2</sup>  
Yuta TABATA<sup>1</sup>, Keisuke KOYAMA<sup>1</sup>, Yasuyuki KATO<sup>2</sup>

Abstract: In this paper, the experiments for the creep deformation behaviors for the combined load of tension and torsion are conducted under the step stress with the various ratios of tension and torsion. Moreover, the analytical model for the creep behaviors, which consist of single Voigt- unit and spring element, is suggested and the numerical result is compared with the experimental results and the validity of this model is confirmed.

### 1. 緒言

本研究では、最も基本的な変形である引張と振りに関する複合負荷状態を研究対象とし、それらの変形の比率を変えて、異なる主応力下でクリープ変形挙動を調べる。また、クリープ変形挙動を表す解析モデルとしてバネ要素とダッシュポットからなる3要素モデルを提案する。

このクリープ変形の解析モデルに対して立てた微分方程式が応力緩和現象に対して立てた微分方程式とアナロジーの関係にあることから、クリープ変形に対するコンプライアンス係数や遅延時間は応力緩和試験の実験から測定したヤング率や緩和時間を用いて表すことが可能となる。そこで本報では、それらの係数間の関係を用いて数値計算を実行し、解析結果を実験と比較することで、その妥当性を確認する。

### 2. カテーテルの断面形状と試験片の寸法

ナイロン樹脂からなる母材（外径  $D_o=1.37$ [mm], 内径  $D_i=1.07$ [mm]）に細いステンレス製のワイヤー（ブレード外径  $d_b=0.0508$ [mm], 初期織り込み角  $\theta_0=45$ [deg.]）を織り込んだカテーテルの初期形状を図1に、また、試験片の詳細寸法を表1示す。このブレードは左右16本ずつ合計32本から構成されている。なお、試験片の標点間距離  $L_0$  は、全て190[mm]である。

### 3. 実験装置ならびに実験方法について

#### 3-1 実験装置

実験で用いた試験機は、島津卓上試験機（オートグラフ AGS-J）に振り試験機を装着したものであり、引張と振りを同時に加えることができる機構となっている。

#### 3-2 比例負荷におけるステップ歪下の応力緩和実験

試験片に一定速度で軸方向変位と振り角を3[sec]間加えた後に、それらの変形を固定し300[sec]間保持した際に得られる試験力とトルクの測定を行う。ただし、実験では引張と振りの比率を変えることで主軸の方位を（45[deg.]（単軸剪断）、60[deg.], 75[deg.], 90[deg.]（単軸引張））の4通りに固定した条件下で実験を行う。

#### 3-3 比例負荷におけるステップ応力下のクリープ実験

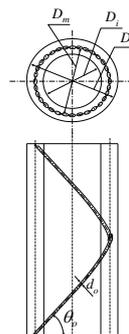


Fig.1 Shape of the catheter

Table.1 Diameter and ratio of area

Types of test pieces	Outsides diameter $D_o$ [mm]	Inside diameter $D_i$ [mm]	Diameter of braid $d_b$ [mm]	Ratio of matrix- area $a[-]$
Contain braid No.1	1.37	1.07	0.0508	0.842
Contain braid No.2	1.67	1.14	0.0635	0.876
Contain braid No.3	2.005	1.4	0.0635	0.924

試験片に一定速度で試験力とトルクを3[sec]間加えた後に、それらの試験力やトルクを固定した状態で300[sec]間保持した際に得られる軸方向変位ならびに振れ角の測定を行う。ただし、主軸の方位は、応力緩和実験と同一の条件で実験を行う。

### 4. 数値解析モデル

#### 4-1 力学モデルと微分方程式

カテーテルのクリープ変形に関する力学モデルを弾性バネ要素とダッシュポットからなるVoigtモデルと弾性バネ要素を直列に結合した3要素モデルで考えることにする（図2参照）。このモデルに対する微分方程式は式（1）で表される。

$$\frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{1}{T_i} \varepsilon = C_e \frac{d\sigma}{dt} + \frac{C_i + C_e}{T_i} \sigma \quad \dots (1)$$

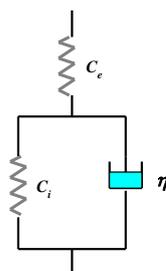


Fig.2 Three parameter model

なお、式中の  $C_e$ ,  $C_i$  は、コンプライアンス係数であり、 $T_i$  は遅延時間 (retardation time) である。

#### 4.2 ステップ応力下のクリープ応答

この微分方程式の一般解を図3の1段のステップ応力に関して解くと以下ようになる。

(i)  $0 \leq t \leq t_1$ ,

$$\frac{d\sigma}{dt} = b_1 = \frac{\sigma_1}{t_1} \quad \dots(2)$$

$$\varepsilon = b_1 [(C_i + C_e)t - C_i T_i (1 - e^{-\frac{t}{T_i}})] \quad \dots(3)$$

(ii)  $t_1 \leq t \leq t_2$ ,

$$\frac{d\sigma}{dt} = 0 \quad \dots(4)$$

$$\varepsilon = b_1 [(C_i + C_e)t + C_i T_i (e^{-\frac{t}{T_i}} - e^{-\frac{t_1}{T_i}})] \quad \dots(5)$$

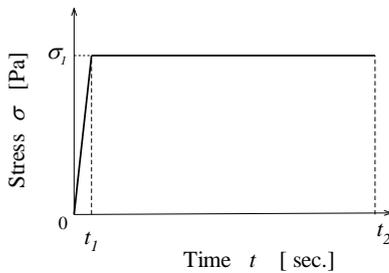


Fig.3 Step stress

一方で、応力緩和現象に関する力学モデルをこれまでの研究では、弾性バネ要素とダッシュポットからなる Maxwell モデルと弾性バネ要素を並列に結合した 3 要素モデルで提案し、式 (6) の微分方程式で表してきた。

$$\frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{T_r} = (E_r + E_b) \frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{E_b}{T_r} \varepsilon \quad \dots(6)$$

ここで式 (6) の応力緩和の微分方程式とクリープ変形の微分方程式である式 (1) は、アナロジーの関係にあることからそれぞれの各項が恒等的に等しくなければならない。その結果、コンプライアンス  $C_e$ ,  $C_i$  を弾性係数  $E_b$ ,  $E_r$  を用いて式 (7), (8) の様に、また、遅延時間  $T_i$  は、式(9)の関係で表すことができる。

$$C_e = \frac{1}{E_r + E_b} \quad \dots(7)$$

$$C_i = \frac{1}{E_r + E_b} \frac{E_r}{E_b} \quad \dots(8)$$

$$T_i = \frac{E_b + E_r}{E_b} T_r \quad \dots(9)$$

以上の説明は、引張に関するものであるが、振り (剪断変形) についても同様の方法でコンプライアンスと弾性係数の関係を求めることができる。

一方で、引張と振りの複合負荷状態では、引張の粘性係数と振りの粘性係数が異なるため、引張と振りの複合負荷状態での粘性係数をあらかじめ求めておく必要がある。図4は、応力主軸の方位とブレードの相対角度と粘性係数の関係を表したものである。そして、遅延時間は、図4の粘性係数を用いて式 (10) より算出した緩和時間を更に前述の式 (9) に代入して決定できる。

$$T_r = \frac{\eta_r}{E_r} \quad \dots(10)$$

#### 5. 数値解析結果と実験結果の比較

図5に数値解析結果の一例として試験片 No.1 の場合に対して、クリープ変形挙動の数値解析の結果と実験結果の比較を示す。ここで、図中の実線が数値解析の結果であるが、45[deg]から 90[deg]に近づくにつれクリープ変形が大きくなる傾向が本解析モデルで再現でき、また、クリープ変形挙動のすべての実験結果と解析結果がよく一致していることが確認できる。

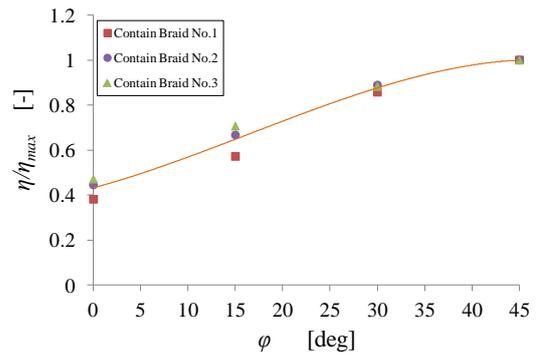


Fig.4 Relation of viscosity  $\eta$ , and relative angle  $\phi$

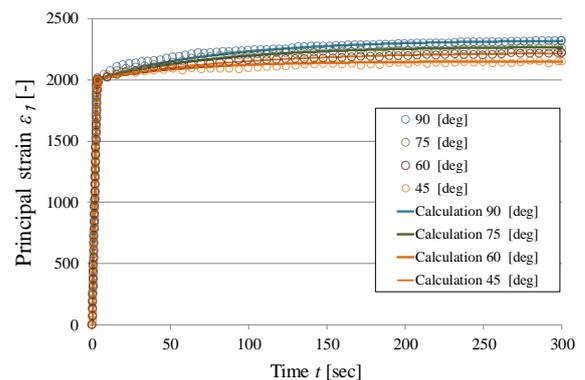


Fig.5 Comparison of numerical results with experiments

#### 6. 結 言

本研究では、引張と振りの複合変形荷重に対して、単位ステップ応力下のクリープ変形挙動を調べた。また、3要素からなる力学モデルを提案し、数値解析を実行した結果、数値解析結果が実験結果とよく一致することから、本解析モデルの妥当性を確認することができた。