

K5-12

## 曲げと振りに関する 1 段のステップ応力下で得られるカテーテルのクリープ変形挙動

### Creep Behavior of Catheter under Single Stage Step Stress for Combined Load of Bending and Torsion

○飯田 涼介<sup>1</sup>, 加藤 保之<sup>2</sup>Ryosuke IIDA<sup>1</sup>, Yasuyuki KATO<sup>2</sup>

**Abstract:** The purpose of this study is to reveal the characteristic of the creep behavior that is generated under single stage step stress with respect to proportional loading of bending and torsion. As for the mechanical model for representing the creep behavior, a three-parameter model which consists of single Voigt-unit and spring element is proposed in this paper. Then, the numerical simulations for creep behavior are conducted and those results are compared with experimental results.

#### 1. 緒言

本研究の目的は、ナイロン製の柔らかい樹脂の中にステンレス製の細いワイヤーが織り込まれたカテーテルを研究対象とし、その力学的特性を解明することである。これまでの研究では、引張と振り、曲げと振りなどの複合負荷状態に対して、ステップ歪下の応力緩和現象を解明してきた。一方で、ステップ応力下でのクリープ変形挙動に関しては、最も基本的な引張、振り、曲げなどの単軸状態に対してのみ研究が行われ、それらが同時に加わる複合負荷状態に関しては詳細な検討が行なわれていなかった。そのため前報の研究では、引張と振りの複合荷重下のクリープ変形挙動の数値解析が検討されてきた。

本研究では更に、次の研究段階として、複合負荷状態の中でも曲げと振りを研究対象とし、それらの比率を変えて、異なる主応力（相当曲げモーメント）下でクリープ変形挙動を調べる。本研究では、曲げと振りを同時に加える 1 段の比例負荷のステップ荷重で得られるクリープ変形挙動の数値計算を実行し、実験結果と比較することで、この力学モデルの妥当性を検証する。

#### 2. カテーテルの断面形状と試験片の寸法

本研究のカテーテルは、緒言で述べ様に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（ブレード径  $d_o=0.0508$ [mm]）を織り込むことにより剛性を保つ構造となっている。このカテーテルの初期形状は、図 1 に示す通りであり、ブレードは左右 16 本、合計 32 本で構成されている。また、ブレードの織り込み角  $\theta_0$  は全て 45[deg.]、標点間距離は 110[mm] である。

#### 3. 実験装置及び実験方法

##### 3-1 実験装置

実験で用いた複合負荷試験機は、引張試験機（島津オートグラフ AGS-J）に振り試験機を横向きに装着することで 3 点曲げ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変形下の応力緩和実験

試験片に一定速度で横方向変位（撓み）と振り角を 4[sec]間加えた後に、それらの変形を固定し 300[sec]間保持し、再び 4[sec]間で横方向変位（撓み）と振り角を 0

に戻し、60[sec]間保持する際に得られる試験力とトルクの測定を行う。ただし、実験では曲げと振りの比率を変えることで主軸の方位を（45[deg.]（単純剪断）、60[deg.]、75[deg.]、90[deg.]（曲げ））に固定した条件で実験を行う。

##### 3-3 比例負荷におけるステップ荷重下のクリープ実験

試験片に一定速度で試験力（横荷重）とトルクを 4[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 240[sec]間保持し、再び 4[sec]間で試験力とトルクを 0 に戻し、60[sec]間保持する際に得られる横向変位（撓み）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（45[deg.]（単純剪断）60[deg.]、75[deg.]、90[deg.]（曲げ））で実験を行う。

#### 4. 実験結果

##### 4-1 ステップ変形下の応力緩和について

図 1 は、曲げと振りの比率を変えて、45[deg.]から 90[deg.]までの各方位に対してステップ変形（1 段のステップ変形:主曲率  $\rho_1$ ）を与えた際に得られる各方位の応力緩和の実験結果を表したものである。ただし、この図では、それぞれの主軸上の応力緩和現象をまとめて表すために、各方位の相当曲げモーメント  $M_l$  を主モーメント  $M_{max}$  で除して無次元化を行っている。この図から主軸の方位が 90[deg.]（曲げ）、75[deg.]、60[deg.]、と 45[deg.]（単純剪断）に近づくほど応力緩和現象が抑制されることから、主軸の方位とブレードの織り込み角との相対角度が小さくなるほど、ブレードが母材の粘性を抑制する効果が表れていることが確認できる。

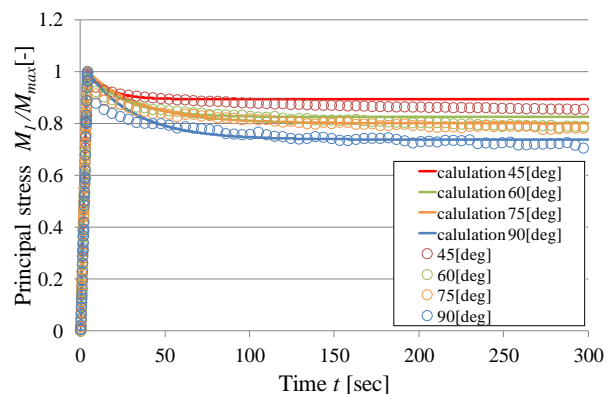


Fig.1. Stress relaxation in each principal axis

### 4.2 ステップ応力下のクリープ変形について

一方で、図 2 は、曲げと振りの比率を変えて、45[deg.] から 90[deg.] までの各方位に対して 1 段のステップモーメントを与えた際に得られるクリープ変形挙動を表したものである。これらの図から歪速度が時間と共に減少する遷移型のクリープ変形挙動が確認できる。また、応力緩和試験の場合と同様に主軸の方向が 90[deg.] から 45[deg.] に近づくほどクリープ変形挙動は小さくなる。

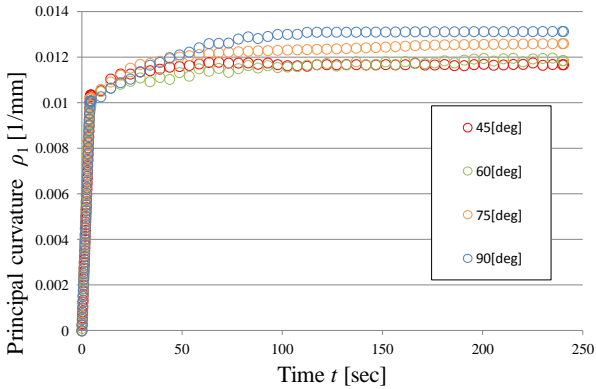


Fig. 2. Creep behavior of catheter in each principal axis

### 5. 数値解析モデル

本研究では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 (図 3 (a)).

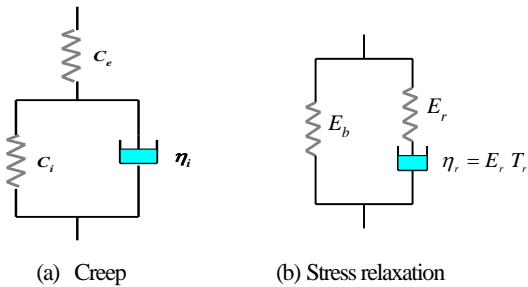


Fig.3 Mechanical model (creep and stress relaxation)

このモデルに対する微分方程式は、式 (1) となる。

$$\frac{d\rho}{dt} + \frac{1}{T_i} \rho = \frac{1}{I_c} \left[ C_e \frac{dM}{dt} + \frac{C_i + C_e}{T_i} M \right] \quad (1)$$

なお、式中の  $C_e$ ,  $C_i$  は、コンプライアンス係数であり、バネ要素の弾性係数の逆数の次元を表し、 $T_i$  は遅延時間 (retardation time) である。また、 $I_c$  は曲げ剛性である。

この微分方程式の一般解を 1 段のステップモーメントに関して解くと以下ようになる。

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

$$\frac{dM}{dt} = b_1 = \frac{M_1}{t_1} \quad (2)$$

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

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

$$\frac{dM}{dt} = 0 \quad (4)$$

$$\rho = b_1 \frac{1}{I_c} [(C_i + C_e) t_1 + C_i T_i (e^{-\frac{t}{T_i}} - e^{-\frac{t_1}{T_i}})] \quad (5)$$

一方で、応力緩和現象に関しては、これまで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てきた (図 3 (b)). そして、その微分方程式は、式 (6) で表される。

$$\frac{dM}{dt} + \frac{M}{T_r} = (E_r + E_b) I_c \frac{d\rho}{dt} + \frac{E_b I_c}{T_r} \rho \quad (6)$$

ここで、式 (6) の応力緩和の微分方程式と、式 (1) のクリープ変形の微分方程式は、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ぬ。そのため、コンプライアンス係数  $C_e$ ,  $C_i$ , 遅延時間  $T_i$  は、弾性係数  $E_b$ ,  $E_r$ , 緩和時間  $T_r$  を用いて次式の様に表される。

$$C_e = \frac{1}{E_r + E_b}, \quad C_i = \frac{1}{E_r + E_b} \frac{E_r}{E_b}, \quad T_i = \frac{E_b + E_r}{E_b} T_r \quad (7)$$

図 4 にクリープ変形挙動の数値解析結果の一例を示す。ここで、実線で表された数値解析結果と実験値がほぼ一致していることから本数値解析の妥当性を確認することができる。また、この図より明らかなように、45[deg.] から 90[deg.] に近づくにつれてクリープ変形が大きくなる実験の傾向を本解析における力学モデルで再現できる。

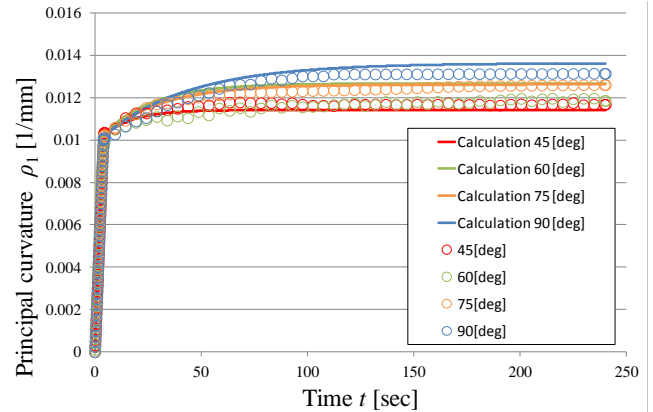


Fig.4 Numerical simulation of creep behavior

### 6. 結 言

曲げと振りの比率を変えた 1 段のステップモーメントを与えた際に得られるクリープ変形挙動を調べた結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 主軸の方向が 90[deg.] から 45[deg.] に近づくほどクリープ変形挙動は小さくなりブレードの効果が表れる。
- (2) クリープ変形が徐々に小さくなる実験の傾向を本解析における力学モデルで再現でき、その妥当性を確認することができた。