

K5-2

ブレードで補強されたカテーテルの曲げに関するクリープ変形挙動と数値解析モデルについて
 Creep Behavior of Catheter reinforced with Braid under Bending and the Analytical Model

○豊田 義彰¹, 加藤 保之²

Yoshiaki TOYODA¹, Yasuyuki KATO²

Abstract: The purpose of this study is to examine the physical property of the catheter, which made of soft nylon resin and is reinforced with thin stainless wires called braid. In our previous study, phenomenon of stress relaxation for uni-axial tension and simple shear is investigated as the most fundamental case. In this paper, the research of creep deformation for the bending is conducted under the two-stage step stress in the following study. Moreover, the analytical model for the creep behaviors is suggested and the numerical result is compared with the experimental results and the validity of this model is confirmed.

1. 緒言

ナイロン樹脂からなる柔らかい母材にステンレス製の細いワイヤーを管状に織り込んだ所謂ブレードで補強した異種材料からなるカテーテルを研究対象とし、その力学的特性を明らかにすることが本研究の目的である。本報では、曲げに関する二段階のステップ応力を与え、その際に得られるたわみから曲率を算出し、クリープ変形挙動を調査する。また、曲げに関するクリープ変形挙動に対して、バネ要素とダッシュポットからなる3要素モデルを提案し、数値解析結果と実験結果を比較することでその力学モデルの妥当性を検証していくことにする。

2. 実験装置と実験方法について

実験で用いた曲げ試験機（島津卓上試験機 AGS-J）を図1に示す。これに内外径の異なる3種類の試験片（Table.1）を装着して二段階のステップ応力下のクリープ実験を行う。

曲げに関するクリープ実験の測定条件としては、図2に



Fig.1 The testing machine

示すように、1段階目に加えるステップ応力（ステップ曲げモーメント）の大きさ M_1 に対して、2段階目の大きさ M_2 を約2倍に設定する。そして、1段階目では一定速度のモーメントを与えた後に 120[sec]間そのモーメントを一定に保持し、2段階目も同様に 120[sec]間保持し、その後、再び0までモーメントを戻す一連の条件で実験を行う。

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 α [%]
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

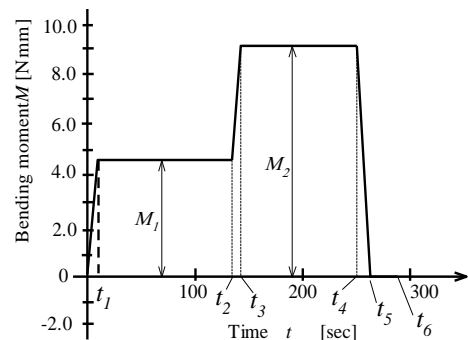


Fig.2 Two-stage step stress for bending

3. 実験結果

3種類の内外径の異なる試験片に対し、2段階のステップ応力（ステップ曲げモーメント）を与えて得られるモーメント-曲率線図を図3に示す。この図の0から t_1 までが一定速度でモーメントを加える一段目の負荷行程であり、 t_1 から t_2 の間では、モーメントの値が一定に保持された状態で、曲率が徐々に増加し、クリープ変形が発生する。 t_2 から t_3 までが二段目の負荷行程であり、 t_3 から t_4 の間で二段目のクリープ変形が発生する。そして、 t_4 から t_5 の間が除荷行程、 t_5 から t_6 間の無応力状態では一段目と二段目で発生した曲率が徐々に0に近づきクリープ変形が戻る現象が見られる。このように一連の変形過程でモーメントと曲率の

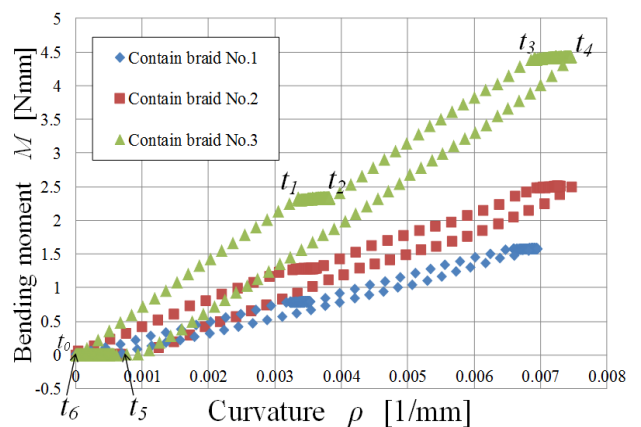


Fig.3 Bending moment-Curvature Curve

1: 日大理工・院(前)・機械 2: 日大理工・教員・機械

関係は、サイクルを描く．これに対して、時間経過に伴う曲率（クリープ変形挙動）を表したものが図4である．この図より一段目並びに二段目のステップ応力下では、歪は増加するがその歪速度が時間の経過と共に減少していく遷移型のクリープ変形挙動が確認できる．

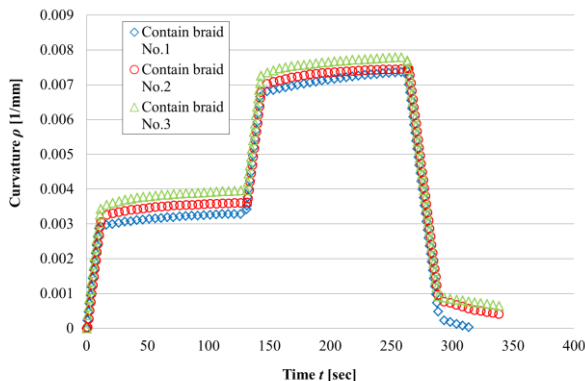


Fig.4 Creep Behavior under Two-stage Step Stress

4. 数値解析

カテーテルの力学的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．この力学モデルより、次式の常微分方程式が得られる．

$$\frac{d\rho}{dt} + \frac{1}{T'_i}\rho = \frac{C'_e}{I} \frac{dM}{dt} + \frac{C'_i + C'_e}{T'_i} \frac{M}{I} \quad (1)$$

上式中の C'_e 、 C'_i はコンプライアンスであり、バネ要素の弾性係数の逆数の次元で、 T'_i は遅延時間 (retardation time) である．ここで、2 段階のステップ応力下でのクリープ変形を考える際に以下の 6 つの区間に区分して式(1)の一般解を求める．なお、以下に示す式中の係数 b_1 、 b_3 、 b_5 は曲げ応力を与える際と除荷時の一定応力速度を意味する．

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

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

$$\rho = \frac{b_1}{I} [(C'_i + C'_e)t - C'_i T'_i (1 - e^{-\frac{t}{T'_i}})] \quad (3)$$

(ii) $t_1 \leq t \leq t_2$, $M = b_1 t = M_1$, $\frac{dM}{dt} = 0$ (4)

$$\rho = \frac{b_1}{I} [(C'_i + C'_e)t + C'_i T'_i (e^{-\frac{t}{T'_i}} - e^{-\frac{t_1}{T'_i}})] \quad (5)$$

(iii) $t_2 \leq t \leq t_3$, $M = b_3(t - t_2) + b_1 t_1 = \frac{M_2 - M_1}{t_3 - t_2}(t - t_2) + M_1$

$$\frac{dM}{dt} = b_3 = \frac{M_2 - M_1}{t_3 - t_2} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \rho = & \frac{b_3}{I} [-C'_i T'_i (1 - e^{-\frac{(t_2-t)}{T'_i}}) + (C'_i + C'_e)(t - t_2)] \\ & + \frac{b_1}{I} [(C'_i + C'_e)t_1 + C'_i T'_i (e^{-\frac{t}{T'_i}} - e^{-\frac{t_1}{T'_i}})] \end{aligned} \quad (7)$$

(iv) $t_3 \leq t \leq t_4$, $M = b_3(t_3 - t_2) + b_1 t_1 = M_2$, $\frac{dM}{dt} = 0$ (8)

$$\begin{aligned} \rho = & \frac{(C'_i + C'_e)}{I} [b_3(t_3 - t_2) + b_1 t_1] (1 - e^{-\frac{t_3-t}{T'_i}}) \\ & + \frac{b_3}{I} [(-C'_i T'_i (e^{-\frac{t_3-t}{T'_i}} - e^{-\frac{t_2-t}{T'_i}}) + (C'_i + C'_e)(t_3 - t_2) e^{-\frac{t_3-t}{T'_i}}] \\ & + \frac{b_1}{I} [t_1(C'_i + C'_e) e^{-\frac{t_3-t}{T'_i}} + C'_i T'_i (e^{-\frac{t}{T'_i}} - e^{-\frac{t_1}{T'_i}})] \end{aligned} \quad (9)$$

(v) $t_4 \leq t \leq t_5$, $M = b_5(t - t_4) + b_3(t_3 - t_2) + b_1 t_1$
 $= \frac{-M_2}{t_5 - t_4}(t - t_4) + M_2$, $\frac{dM}{dt} = \frac{-M_2}{t_5 - t_4}$ (10)

$$\begin{aligned} \rho = & \frac{b_5}{I} [-C'_i T'_i (e^{-\frac{t_4-t}{T'_i}} - e^{-\frac{t_3-t}{T'_i}}) + (C'_i + C'_e)(t - t_4)] + \frac{(C'_i + C'_e)}{I} [b_3(t_3 - t_2) + b_1 t_1] \left(1 - e^{-\frac{t_5-t}{T'_i}}\right) \\ & + \frac{b_3}{I} [-C'_i T'_i (e^{-\frac{t_5-t}{T'_i}} - e^{-\frac{t_2-t}{T'_i}}) + (C'_i + C'_e)(t_3 - t_2) e^{-\frac{t_5-t}{T'_i}}] \\ & + \frac{b_1}{I} [t_1(C'_i + C'_e) e^{-\frac{t_5-t}{T'_i}} + C'_i T'_i (e^{-\frac{t}{T'_i}} - e^{-\frac{t_1}{T'_i}})] \end{aligned} \quad (11)$$

(vi) $t_5 \leq t$, $M = 0$, $\frac{dM}{dt} = 0$ (12)

$$\begin{aligned} \rho = & \frac{b_5}{I} [-C'_i T'_i (e^{-\frac{t_5-t}{T'_i}} - e^{-\frac{t_4-t}{T'_i}}) + (C'_i + C'_e)(t_5 - t_4) e^{-\frac{t_5-t}{T'_i}}] \\ & + \frac{(C'_i + C'_e)}{I} [b_3(t_3 - t_2) + b_1 t_1] (e^{-\frac{t_5-t}{T'_i}} - e^{-\frac{t_3-t}{T'_i}}) \\ & + \frac{b_1}{I} [t_1(C'_i + C'_e) e^{-\frac{t_5-t}{T'_i}} + C'_i T'_i (e^{-\frac{t}{T'_i}} - e^{-\frac{t_1}{T'_i}})] \end{aligned} \quad (13)$$

一例として、試験片No.3の場合の数値解析結果を図5内の黄緑色の実線で表す．この図より 1 段階目および 2 段階目のステップ応力下で得られる曲率 ρ に関する数値解析結果は実験値とほぼ一致していることが確認できる．

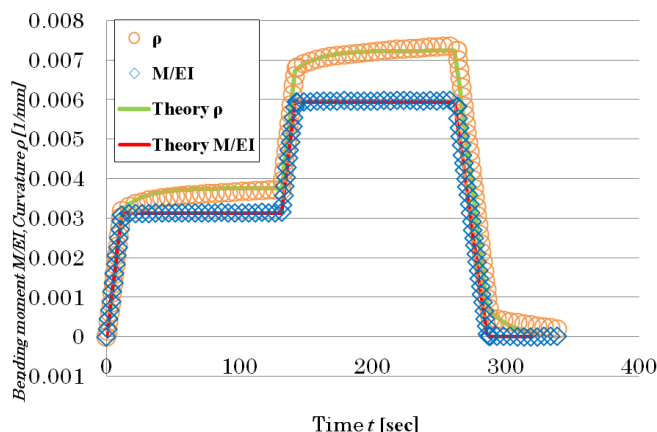


Fig.5 Buckling region in case of axial load after torsion

6. 結言

今後の展望としては、引張と振り、曲げと振りなどの複合負変形のクリープ挙動や含水の影響を更に解明していく予定である．