K5-40

単軸引張に関するカテーテルのクリープ変形挙動
力学モデルと 2 段階のステップ応力下での数値計算について

Creep Behavior of Catheter for Uni-axial Tension

Analytical model and numerical calculation under two-stage step stress

○岡野　瑞紀[1]，加藤 保之[2]
Mizuki OKANO [1]，Yasuyuki KATO [2]

Abstract: In general, soft characteristic is necessary as the material of catheter not so as to damage vascular wall etc. On the other hand, a responsibility and enough rigidity are also required for the surgical operations such as myocardial or cerebral infarction. The purpose of this study is to investigate the physical property of the catheter, which is made of soft nylon resin and is reinforced stainless wire so called braid. In this paper, the creep deformation for the uni-axial tension is investigated under the two-stage step stress. In addition, the analytical modeling for the creep deformation is proposed and the numerical simulation is compared with the experimental results.

1．緒　言

これまでステンレス製の細いブレードで補強したナイロン樹脂から成るカテーテルを研究対象とし，その力学的な性質を調査してきた．そこでは主として一定歪下で得られる応力緩和現象に着目し，引張と剪断，曲げと捩りなどの複合負荷状態に対して，応力主軸の方位とブレードの織り込み角の相対角度がカテーテルの粘弾性挙動に及ぼす影響を明らかにしてきた．しかしながら応力制御下で得られるクリープ変形挙動に関しては，これまでの研究では検討をしていなかった．

そこで本研究では，最も基本的な単軸引張の変形に対して，ステップ応力を２段階で与えた際のクリープ変形の挙動を調査する．そしてこのクリープ変形の挙動に対してバネ要素とダッシュポットからなる３要素の力学モデルを提案し，数値解析実行し，実験結果と比較することでこのモデルの妥当性を検証する．

2．実験装置と実験方法

2･1　実験装置と試験片について

実験で用いた負荷試験機は島津卓上試験機（オートグラフ AGS-J）であり，この試験機に内外径の異なる 3 種類の試験片(表 1 参照)を装着して２段階のステップ応力下のクリープ実験を行う．

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	0.921
Contain braid No.2	1.67	1.14	0.0635	0.938
Contain braid No.3	2.01	1.40	0.0635	0.962

2･2　2段階のステップ応力下のクリープ試験の実験方法

図１に示すように，1 段階目に加えるステップ応力の大きさσ_1 に対して，2 段階目のステップ応力の大きさσ_2 を約 2 倍に設定し，1 段階目では一定速度の引張応力を与えた後に 120[sec]間その応力を一定に保持し，2 段階目もまた一定の引張応力を与えた後に 120[sec]間保持し，その後，再び無応力状態まで荷重を戻す一連の条件で実験を行う．

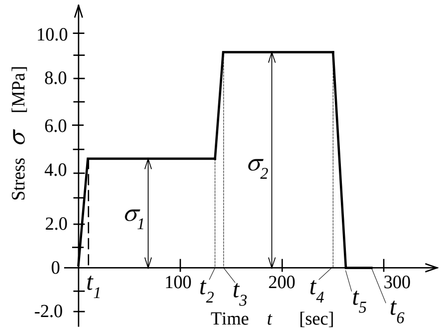

Fig.1 Two-stage step stress for uni-axial tension

3．実験結果

３種類の内外径の異なる試験片に対して２段階のステップ応力を与えて得られる応力ー歪線図を図２に示す．ここで，この図のt_1 までが一定速度で応力を加える一段目の負荷行程であり，t_1 からt_2 の間で，応力の値を一定に保持した状態で，歪が徐々に増加してクリープ変形が発生する．次にt_2 からt_3 までが一定速度で応力を加える二段目の負荷

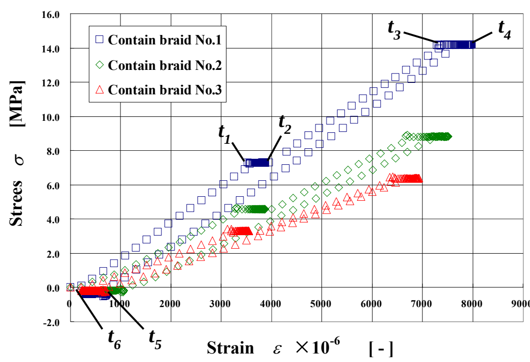

Fig.2 Stress-strain curve under two-stage step stress

1: 日大理工・学部・機械，　2: 日大理工・教員・機械

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 の間が除荷行程であり，t_5 から t_6 間の無応力状態では一段目と二段目のクリープ変形によって発生した歪が 0 に近づき元に戻る現象が現れる．このように一連の変形過程で応力と歪の関係は，サイクルを描く．

一方で，時間経過に伴う歪曲線(クリープ変形挙動)を図３に示す．この図より一段目ならびに二段目のステップ応力下では，歪速度が時間の経過とともに減少していく遷移型のクリープ変形挙動が発生していることを確認できる．

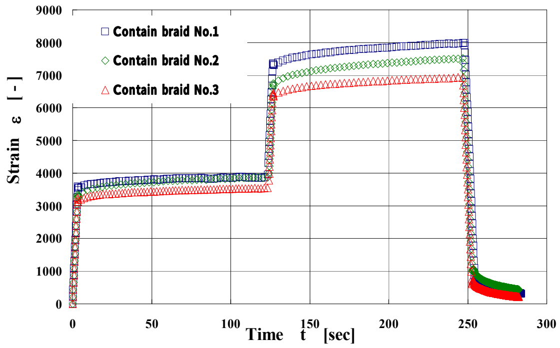

Fig.3 Creep behavior under two-stage step stress (tension- tension)

4．力学モデルと数値解析

4・1　力学モデルの常微分方程式について

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所謂 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．

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

ただし，式中の C_e， C_i はコンプライアンスであり，縦弾性係数の逆数の次元である．また、T_i は遅延時間(retardation time)である．

4・2　微分方程式の解

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，以下の６つの区間に区分して(1)式の一般解を求める．また，以下の式中の係数 b_1, b_3, b_5 はステップ応力を与える際の一定応力速度を意味する(ただし，ステップ応力であるので $b_2 = b_4 = b_6 = 0$)．

(ⅰ) $0 \le t \le t_1$，$\sigma = b_1 t = \dfrac{\sigma_1}{t_1}t$，$\dfrac{d\sigma}{dt} = b_1 = \dfrac{\sigma_1}{t_1}$　…(2)

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

(ⅱ) $t_1 \le t \le t_2$，$\sigma = b_1 t_1 = \sigma_1$，$\dfrac{d\sigma}{dt} = 0$　…(4)

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

(ⅲ) $t_2 \le t \le t_3$，$\sigma = b_3(t_1 - t_2) + b_1 t_1 = \dfrac{\sigma_2 - \sigma_1}{t_3 - t_2}(t - t_2) + \sigma_1$，

$$\frac{d\sigma}{dt} = b_3 = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{t_3 - t_2} \quad \ldots(6)$$

$$\varepsilon = b_3[-C_i T_i(1 - e^{\frac{t_2 - t}{T_i}}) + (C_i + C_e)(t - t_2)] + b_1[(C_i + C_e)t_1 + C_i T_i(e^{-\frac{t}{T_i}} - e^{\frac{t_1 - t}{T_i}})] \quad \ldots(7)$$

(ⅳ) $t_3 \le t \le t_4$，$\sigma = b_3(t_3 - t_2) + b_1 t_1 = \sigma_2$，$\dfrac{d\sigma}{dt} = 0$　(8)

$$\varepsilon = (C_i + C_e)[b_3(t_3 - t_2) + b_1 t_1](1 - e^{\frac{t_3 - t}{T_i}}) + b_3[(-C_i T_i(e^{\frac{t_3 - t}{T_i}} - e^{\frac{t_2 - t}{T_i}}) + (C_i + C_e)(t_3 - t_2)e^{\frac{t_2 - t}{T_i}}] + b_1[t_1(C_i + C_e)e^{\frac{t_3 - t}{T_i}} + C_i T_i(e^{\frac{t_1}{T_i}} - e^{\frac{t_1 - t}{T_i}})] \quad \ldots(9)$$

(Ⅴ) $t_4 \le t \le t_5$，$\sigma = b_5(t - t_4) + b_3(t_3 - t_2) + b_1 t_1$

$$= \frac{-\sigma_1}{t_5 - t_4}(t - t_4) + \sigma_2,\ \frac{d\sigma}{dt} = \frac{-\sigma_2}{t_5 - t_4} \quad \ldots(10)$$

$$\varepsilon = b_5[-C_i T_i e^{\frac{t_4 - t}{T_i}} + (C_i + C_e)(t - t_4)] + (C_i + C_e)[(b_3(t_3 - t_2) + b_1 t_1]e^{\frac{t_3 - t}{T_i}} + b_3[-C_i T_i(e^{\frac{t_3 - t}{T_i}} - e^{\frac{t_2 - t}{T_i}}) + (C_i + C_e)(t_3 - t_2)e^{\frac{t_3 - t}{T_i}}] + b_1[t_1(C_i + C_e)e^{\frac{t_3 - t}{T_i}} + C_i T_i(e^{-\frac{t}{T_i}} - e^{\frac{t_1 - t}{T_i}})] \quad \ldots(11)$$

(ⅵ) $t_5 \le t$，$\sigma = 0$，$\dfrac{d\sigma}{dt} = 0$　…(12)

$$\varepsilon = b_5[-C_i T_i(e^{\frac{t_5 - t}{T_i}} - e^{\frac{t_4 - t}{T_i}}) + (C_i + C_e)(t_5 - t_4)e^{\frac{t_5 - t}{T_i}}] + (C_i + C_e)[(b_3(t_3 - t_2) + b_1 t_1](e^{\frac{t_5 - t}{T_i}} - e^{\frac{t_3 - t}{T_i}}) + b_3[-C_i T_i(e^{\frac{t_3 - t}{T_i}} - e^{\frac{t_2 - t}{T_i}}) + (C_i + C_e)(t_3 - t_2)e^{\frac{t_3 - t}{T_i}}] + b_1[t_1(C_i + C_e)e^{\frac{t_3 - t}{T_i}} + C_i T_i(e^{-\frac{t}{T_i}} - e^{\frac{t_1 - t}{T_i}})] \quad \ldots(13)$$

4・3　数値解析と実験結果の比較

数値解析の一例として，試験片 No.2 の場合に対して，解析結果を図４内の実線で示す．この図から明らかなように，単軸負荷状態では１段目並びに２段目のステップ応力下得られる歪応答曲線の結果は，ほぼ実験値と一致する．

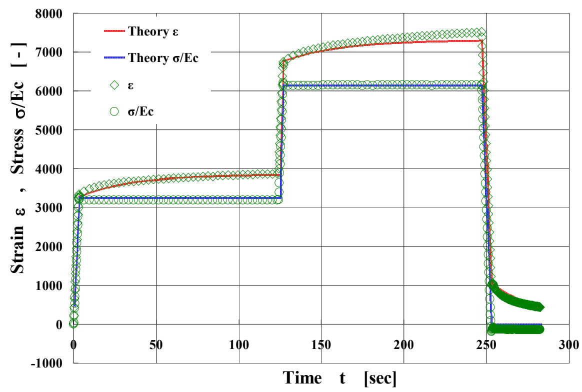

Fig.4 Comparison of numerical simulation and experiment

5．結　言

今後の展望としては，捩り変形下ならびに引張と捩りの複合負変形下で，更にクリープ変形挙動を解明していく予定である．