P054 カテーテルの変形挙動と強度に関する研究

(曲げに関する応力緩和の数値解析)

Study on Deformational Behavior and Strength of Catheter
(Numerical Analysis of Stress Relaxation under Bending Deformation)

正 加藤 保之, 上田 政人, 〇学 大塚 辰規, 作山 弘幸 (日大理工), 山村 要一郎(日大院)

Yasuyuki KATO, Masato UEDA, Tatunori OHUTUKA, Hiroyuki SAKUYAMA, Youichirou YAMAMURA

Nihon University 1-8, Kanda Surugadai, Chiyoda-ku, Tokyo

Key Words : Catheter, Visco-elastic Response, Braid, Vascular Wall, Bending, Two-stage Step Strain

1. 緒言

ナイロン樹脂からなる柔らかい母材に金属(ステンレス)製の細いワイヤーを管状に織った所謂ブレードで補強した異種材料から成るカテーテルを研究対象とし,これまで引張と振りを同時に加える複合負荷実験を行い,粘弾性特性に及ぼすブレードの影響を調べ,応力主軸の方位とブレードの織り込み角との相対角度の関係がカテーテルの粘弾性挙動に及ぼす影響について考察してきた.更に,引張及び振りに関するステップ歪を2段階で与え,引張と振りの順序を変えて得られる複合負荷状態の応力緩和現象を調べ,粘弾性特性に及ぼすそれらの履歴の影響を明らかにしてきた.また,それらの実験結果に基づき,応力主軸の方位とブレードの織り込み角の相対角度と粘性係数の関係を推定して数値解析のモデル化を試みてきた⁽¹⁾.

実際のカテーテルの使用状況を想定すると,引張,振り,曲げが練成する多軸負荷状態にある.これまでの研究では,上述した様に,主として引張と振りについてのものであり,曲げについては検討が行われていなかった.そこで,これまで検証を行っていない曲げ変形について検討していくことが次の研究課題であると考えられるが,本報では,その最初の段階として,最も基本的な単軸状態(純曲げ)の粘弾性特性を応力緩和実験から明らかにする.特に,2段階のステップ歪の数値解析を試み,実験結果と比較することでその解析モデルの妥当性を検証する.

2. ブレードを有するカテーテルの断面二次モーメント

カテーテルの形状は,緒言で述べたように,ナイロン樹脂からなる母材(外径 D_o , 内径 D_i , 平均径 D_m)にステンレス製の細いワイヤーを管状に織り込んだブレード(外径 d_o , 初期織り込み角 θ_o)で構成されている(Fig.1(a)参照).ブレード部は左右8本ずつ合計16本から構成されている.

Fig.1(b)はカテーテルの断面形状の拡大図を表しており,

(a)Configuration (b)Cross-section

Fig.1 Schematic diagram of catheter

y_n は中立軸から n 番目のブレードまでの距離, ψ_n は各ブレードの規定面から角度, R_m は平均半径である.

ブレード部の曲げモーメント M_{bn} は平衡軸の定理を用いて,ブレード部の局所座標系内の断面二次モーメント I_{yn} とブレードまでの距離の2乗に断面積をかけたもので表され,式(1)のように定式化できる.

$$M_{bn} = E_b (y_n^2 A + I_{yn}) \rho \quad \dots(1)$$

ただし,ブレードの断面積 A と y_n は,

$$A = \frac{\pi d_o^2}{4 \sin^2 \theta_o}$$

$$y_n = R \sin \psi_n \quad \psi_n = (n-1) \frac{\pi}{8} \quad (n=1,2,\dots,16)$$

局所座標系内の断面二次モーメント I_{yn} は,座標変換により,

$$I_{yn} = \frac{I_1 + I_2}{2} - \frac{I_1 - I_2}{2} \cos 2\psi_n \quad \dots(2)$$

と表される.ただし, I_1, I_2 はFig.1(b)に表示したように断面二次モーメントの主値である.

(1)式を合計して得られるブレードの曲げモーメントは,

$$M_b = \sum_{n=1}^{16} M_{bn} = E_b \left[8R^2 A + \frac{\pi d_o^4}{8} \left(\frac{1}{\sin^2 \theta_o} + \frac{1}{\sin^2 \theta_o} \right) \right] \rho$$

$$= E_b I_b \rho \quad \dots(3)$$

一方で母材のモーメントは,次式のように定式化できる.

$$M_m = E_m \left[\frac{\pi}{64} (D_o^4 - D_i^4) - 8R^2 A + \frac{\pi d_o^4}{8} \left(\frac{1}{\sin^2 \theta_o} + \frac{1}{\sin^2 \theta_o} \right) \right] \rho$$

$$= E_m I_m \rho \quad \dots(4)$$

したがって,全モーメントは,

$$M = M_b + M_m = (E_b I_b + E_m I_m) \rho = E_c I_c \rho \quad \dots(5)$$

ただし, $E_c I_c$ は複合材としての曲げ剛性である.

3. 実験方法

島津卓上試験機に予め取り付けられた4点曲げ治具(ポンチ間距離10[mm],支点間距離30[mm])に内外径の異なる3種類の試験片(Table 1)を装着し,以下の実験を行った.

Table 1 Diameter and ratio of area

Type of test piece	Outside diameter D_o [mm]	Inside Diameter D_i [mm]	Diameter of Braid d_{b0} [mm]	Ratio of content area of braid α [%]
Contain Braid No.1	1.37	1.067	0.0508	0.92082
Contain Braid No.2	1.67	1.14	0.0635	0.938454
Contain Braid No.3	2.005	1.40	0.0635	0.961923

3.1 曲げ剛性の測定

変形速度(変位速度10,20,30[mm/sec])を種々に変化させて得られる実験値から接線係数を求め,曲げ剛性 $E_c I_c$ を測定する.

3.2 ステップ歪下での応力緩和実験

変形速度20[mm/sec]で一定歪(曲率)速度を与えた後に,最大曲率0.024[mm⁻¹]で10800[sec]間保持し,その間に得られる応力の測定を行い,緩和時間 T_r を決定する.

3.3 2段階のステップ歪(曲率)下での応力緩和実験

変形速度20[mm/sec]で一定歪(曲率)速度を与えた後、曲率を0.012[mm⁻¹]で120[sec]保持し、再度変形速度20[mm/sec]で一定歪(曲率)速度を与えた後に最大曲率0.024[mm⁻¹]で120[sec]保持し、その後、速度20[mm/sec]で除荷をして再び無変形状態まで戻す(Fig.2参照)。

Fig.2 Strain history

4. 実験結果

2段階のステップ歪(曲率)下での応力緩和実験のうち、曲率と曲げモーメントの関係を Fig.3 に示す。この図の t_1, t_2, t_3, t_4, t_5 は、上述の Fig.2 中の時間にそれぞれ対応している。 t_1 から t_2 の一定曲率のもとでは、緩和現象によりそれぞれの試験片の応力は減少する。これは2段目の t_3 から t_4 の過程においても、同様の傾向を示す。この図では、 t_5 点で理論値は負のモーメントになるのに対し実験は、その間の測定が行われていない。これは除荷終了時に治具と試験片に間隙が生じ非接触状態になるためである。

次に、時間と曲げモーメントの関係を Fig.4 に示す。ただし、この図では、それぞれの試験片を同一条件で比較するため、それぞれの試験片の曲げモーメントの最大値(緩和現象による曲げモーメントの減少を含まない値 $M^* = E_c I_c \rho_{max}$)で除して無次元化を行っている。この図から明らかなように、試験片 No.1, No.2, No.3 の順に、母材面積比が大きくなるほど、曲げモーメントが小さくなることからわかる。これは、全面積に占めるブレードの断面積が大きくなるほど、応力緩和の現象が抑制されるためである。

Fig.3 M-ρ relations for various test pieces

Fig.4 M-T curves for various test pieces

5. 2段階のステップ歪の数値解析

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所謂マックスウェルモデルと弾性バネ要素を並列に結合した3要素モデルで考えることにする。この力学モデルにより単軸の曲げの場合に対して次式の常微分方程式が得られる。

$$\frac{dM}{dt} + \frac{M}{T_r} = (E_r I + E_e I) \frac{d\rho}{dt} + \frac{E_e I}{T_r} \rho \quad \dots(6)$$

ここで、式中の E_e と E_r は、縦弾性係数、 T_r は、緩和時間である。ここで、Fig.2 の各区分に場合分けをして上式を解くと以下の結果が得られる。

(1) 第1段階のステップ歪(曲率)

i) $0 < t < t_1$, $\rho(t) = a_1 t$, $d\rho/dt = a_1$

$$M = M_I = a_1 \left\{ E_r I T_r \left(1 - e^{-\frac{t}{T_r}} \right) + E_e I t \right\} \quad (7)$$

ii) $t_1 < t < t_2$, $\rho(t) = a_1 t_1$, $d\rho/dt = 0$

$$M = M_I' = a_1 \left\{ E_e I t_1 + E_r I T_r \left(e^{-\frac{t_1-t}{T_r}} - e^{-\frac{t}{T_r}} \right) \right\} \quad (8)$$

(2) 第2段階のステップ歪(曲率)

iii) $t_2 < t < t_3$, $\rho(t) = a_1 t_1 + a_2 (t - t_2)$, $d\rho/dt = a_2$

$$M_{II} = a_2 \left\{ E_r I T_r \left(1 - e^{-\frac{t-t_2}{T_r}} \right) + E_e I (t - t_2) \right\} \\ M = M_I' + M_{II} \quad (9)$$

iv) $t_3 < t < t_4$, $\rho(t) = a_1 t_1 + a_2 (t_3 - t_2)$, $d\rho/dt = 0$

$$M_{II}' = a_2 \left\{ E_e I (t_3 - t_2) + E_r I T_r \left(e^{-\frac{t_3-t}{T_r}} - e^{-\frac{t_3-t_2}{T_r}} \right) \right\} \\ M = M_I' + M_{II}' \quad (10)$$

v) $t_4 < t < t_5$,

$$\rho(t) = a_1 t_1 + a_2 (t_3 - t_2) + a_3 (t - t_4), \quad d\rho/dt = a_3 \\ M_{III} = a_3 \left\{ E_r I T_r \left(1 - e^{-\frac{t-t_4}{T_r}} \right) + E_e I (t - t_4) \right\} \\ M = M_I' + M_{II}' + M_{III} \quad (11)$$

Fig.3,4 にはこれらの解析結果が実線で示されている。解析結果は実験値とほぼ一致することが確認できる。

6. 結言

2段階のステップ歪(曲率)下での応力緩和実験から、粘弾性特性に及ぼすブレードの抑制効果を確認することができた。また、数値解析を試み実験結果と比較することでこの解析モデルの妥当性を検証した。

今後の課題として、曲げと振りが連成する複合負荷状態の下でカテーテルの粘弾性特性を明らかにしていく予定である。また、強度特性に及ぼすブレードの補強効果を明らかにするために、座屈等の変形挙動を解明する必要がある。

参考文献

(1) 加藤保之, 山村要一郎, 2006 年度年次会講演論文集 No. 06-1, p. 829.

E_e : Young's modulus
 E_r : relaxation modulus
 T_r : relaxation time

Fig.5 Three parameter mechanical model