

含水条件下でのカテーテルの扁平化現象の発生領域について Occurrence Region of Flattening Phenomenon in a Cross Section of Catheter

○荒川 明日都¹, 加藤 保之²
Asuto ARAKAWA¹, Yasuyuki KATO²

Abstract: The flattening phenomenon in the cross section of the catheter, which is made of soft nylon resin and is reinforced with thin stainless wires called braid, is examined based on the visco-plastic theory. In consideration of the shape of cross section gradually changing into the elliptical shape during the process of applying the torsional moment, the experimental equation for the torsional moment is derived based on the shear flow theory. Then, using the test specimens, which have already contained water, the occurrence regions of the flattening phenomenon are revealed by examining the bifurcation points of torsional moment under the experimental conditions with various axial compressive loads.

1. 緒言

ナイロン樹脂に金属の細いワイヤー（ブレード）を編み込んだカテーテルを研究対象として、その力学的特性を解明することが本研究の目的である。これまでの研究では、不安定挙動の中でも座屈挙動に着目し、軸力（圧縮）だけでなく振りが連成することを考慮し、軸力と振りの比率を変えた比例負荷の場合と、最初に振りを与えた後に軸力を与える場合について変形速度を変えて座屈荷重を調査してきた。

一方で、最初に軸力を与えた後に振りを与える場合では、座屈発生時の急激な軸力やトルクの低下が確認できず、カテーテルの断面が扁平形状になりながら、徐々に不安定挙動が生じることが確認されてきたが、詳細な調査が行われていなかった。そこで前報の研究では、このテーマに着目し、振りを与える過程で生じる扁平化現象について検討してきた。ここでは、断面内が徐々に楕円形状になることを考慮し、剪断流理論に基づく振りモーメントの理論式を立てて扁平化現象が発生し始めるトルクの値を推定してきた。また、初期軸力が扁平化現象に及ぼす影響を調査するために、最初に与える軸力の大きさを種々に変えて実験を行うことで、扁平化現象の発生領域を調査してきた。

本研究では、更にカテーテルの実際の使用状況を考慮して、扁平化現象の発生領域を調査することにする。

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、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]）にブレード（ステンレス製のワイヤー：外径 $d_o=0.0508$ [mm], 初期織り込み角 $\theta_0=45$ [deg.]）が管状に織り込まれた構造であり、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。また、試験片の標点間距離 L_0 は、全て 45 [mm]である。

3. 扁平化現象の推定方法

3-1 扁平化現象の開始点

図 1 は、トルクと断面内の扁平化現象の関係を表したものであり、図中の A 点では真円であったカテーテルの断面形状が、トルクの増加と共に B 点でわずかに楕円形

状となり、C 点では更に楕円形状が進行し、D 点で振り座屈が発生すると共に更に扁平化が大きく進行して E 点でトルクが急激に減少する。本研究では、A 点から B 点までの初期の過程で起こる扁平化現象の開始点のトルク（振りモーメント）の値を調査する。この開始点の正確な値を推定することは難しく、ここでは図 1 に示すように、緑の曲線で表される塑性を考慮した応力緩和曲線と、断面が楕円形状となることを考慮し、剪断流理論に基づき求めたトルクの赤色の曲線が交差する図中の P 点を扁平化の開始点であると推定する。

3-2 塑性を考慮したトルクの応力緩和曲線

塑性を考慮したカテーテルの力学モデルを図 2 の Maxwell 要素を含むモデルで表す。この力学モデルの微分方程式は、式 (1) のように表される。

$$\frac{d\Delta\tau}{dt} + \frac{1}{T_r}\Delta\tau = \frac{1}{1+h} \left[(G_r + G_b)\frac{d\Delta\gamma}{dt} + \frac{G_b}{T_r}\Delta\gamma \right] \quad (1)$$

但し、 G_b は自然時間に寄与しない剪断弾性係数を、 G_r は時間と共に緩和減衰していく剪断弾性係数を、 T_r は緩和時間を表している。 h は歪硬化係数で、扁平化現象が発生しない単軸引張の応力歪線図を基に実験より決定できる。式 (1) の微分方程式の解（塑性域における応力増分）は、次式で表される。

$$\Delta\tau = \frac{1}{1+h} \left\{ G_b + \frac{G_r T_r}{\Delta t} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{T_r}} \right) \right\} a_1 \Delta t = \frac{1}{1+h} G^* \Delta\gamma \quad (2)$$

3-3 剪断流理論に基づくトルクの計算

断面が潰れて扁平形状となることを考慮するトルク

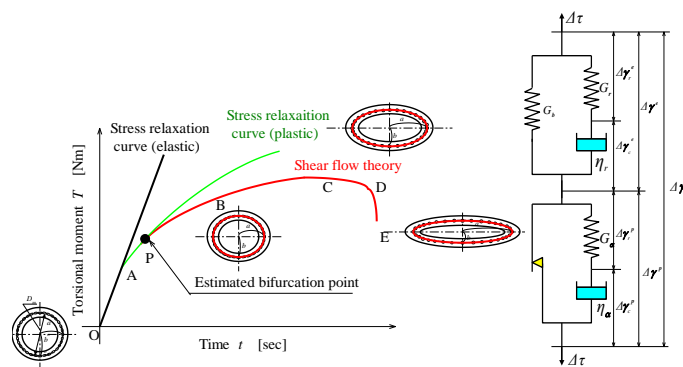


Fig.1 Flattening phenomenon in a cross section Fig.2 Mechanical model

1: 日大理工・学部・機械, 2: 日大理工・教員・機械

の解析方法として剪断流理論を採用する。断面内に発生するトルクは、式 (3) で表される。但し、 G_b は、自然時間に関係しない弾性係数を、 G_r は、時間と共に緩和減衰していく剪断弾性係数である。 T_r は、緩和時間であり、 R は、扁平化する前の平均半径、 T は厚さを表す。また、 A_c は図 1 中の赤線で表された楕円の面積に相当する。

但し、式中の a と b は、図 1 中の楕円の長軸と短軸であるが、この値は、扁平化現象が進行して行く過程で、カテーテルの平均直径上の周の長さ (すなわち πD_m) が変化しないことを考慮して、図 1 中の赤線の楕円の周の長さが初期の周の長さ πD_m と等しくなるように決定される。

$$T = G^* \frac{4A_c^2}{\int_t ds} \frac{d\phi}{dx} = \left\{ G_b + G_r \frac{T_r}{t} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_r}} \right) \right\} \frac{4(\pi ab)^2}{2\pi R} \frac{\pi \phi_{deg}}{180 L_o} \quad (3)$$

4. 実験装置ならびに実験方法について

4-1 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) に振り試験機を組み合わせた構造であり、圧縮と振りを同時に加えることができる機構となっている。

4-2 実験条件

初期変位 (0, 0.2, 0.4, 0.6 [mm]) の圧縮、ならびに 0.2 [mm] の引張) を与えた後に、それらの変位を固定した状態で、振り速度を 2 通り (0.5 [rpm] と 1.0 [rpm]) に変えて扁平化現象が起こり始める領域を調べる。また、本実験ではカテーテルに施す含水時間を 180 [min] に設定する。

5. 実験結果

図 3 は、上述の実験条件の中で、0.6 [mm] の場合に対して、振り速度を速く与えた 1.0 [rpm] の条件のもとで得られる時間と振り角ならびにトルクの実験結果を示したものである。但し、この図はトルクを振り剛性 ($G_c I_{pc} / L_o$) で除して、振り角 ϕ の次元で表し、振り角の結果に重ねて表わした図である。図中のプロット \circ が振り角、一方でプロット \bullet がトルクを、黒の実線が理論上の純弾性の応力緩和曲線、緑色の実線が塑性性を考慮した応力緩和曲線を、赤の実線が断面の扁平形状を考慮した剪断流理論に基づく応力緩和曲線を表している。図中の緑と赤の曲線

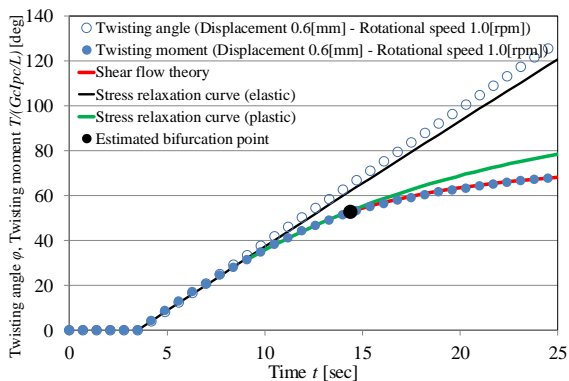


Fig.3 Estimated bifurcation point (Water condition) (Torsional speed 1.0[rpm], Displacement 0.6[mm])

●	0.0 / 0.2 / 0.4 / 0.6 / (-0.2) [mm] - 1.0 [rpm] (Non-water condition)
●	0.0 / 0.2 / 0.4 / 0.6 / (-0.2) [mm] - 0.5 [rpm] (Non-water condition)
●	0.0 / 0.2 / 0.4 / 0.6 / (-0.2) [mm] - 1.0 [rpm] (Water condition)
●	0.0 / 0.2 / 0.4 / 0.6 / (-0.2) [mm] - 0.5 [rpm] (Water condition)

where, displacement [mm] - rotational speed [rpm]

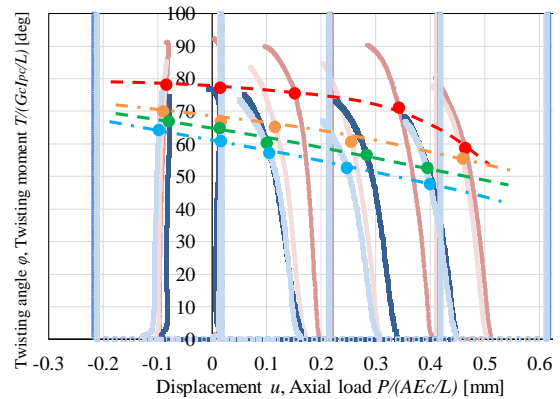


Fig.4 Occurrence region of flattening phenomenon (Water condition, Non-water condition)

が交わる点が扁平化現象の発生箇所を \bullet で表示されている。

図 4 は、上述の全ての初期変位の実験条件に対して、扁平化現象の発生箇所であるプロットを 2 通りの振り速度に対して求め、発生領域を示したものである。この図では、軸力を伸び剛性で (AE_c / L_o) で除し、一方で振りモーメントを振り剛性 ($G_c I_{pc} / L_o$) で除して、軸力ならびにトルクを変位 u と振り角 ϕ の次元で表し、変位と振り角の結果に重ねて表示している。ここで、図中の緑色の破線が振り速度を速く与えた 1.0 [rpm] 場合、一方で青色の一点鎖線が遅く与えた 0.5 [rpm] の場合の境界領域である。この図より、振り速度が速い 1.0 [rpm] の方が、遅い 0.5 [rpm] より扁平化現象の発生領域が大きくなる事がわかる。また、比較のために、この図の中には含水を施していない条件の発生領域も示されている。赤色の破線が振り速度 1.0 [rpm]、橙色の一点鎖線が 0.5 [rpm] の発生領域であり、上述の含水を施した条件に比べて発生領域が大きくなる事がわかる。また、含水を施した場合と施さない場合の両方に対して、初期圧縮力が増加するほど、扁平化現象の開始点のトルクの値は低下し、扁平化現象が起こりやすくなる。一方で、引張側では、扁平化開始点のトルクの値は大きく、扁平化現象が起こりにくくなる。

6. 結言

含水した試験片を用い、初期軸力後の振りの過程で扁平化現象を調べた結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 扁平化現象の開始点のトルクの値は、含水を施した場合と施さない場合では、含水を施した場合の方が小さく、発生領域も小さくなる。したがって、含水を施した方がより小さい振り角で扁平化現象が発生する。
- (2) 初期圧縮力が増加するほど、扁平化の発生点のトルクの値は低下し、扁平化現象が起こりやすくなる。
- (3) 含水を施した場合と施さない場合の両方に対して、振り速度が速い場合は、遅い場合に比べて扁平化の開始点でのトルクの値は大きく、発生領域も大きい。