

繰り返しねじりによるフレキシブルシャフトのねじり特性の変化の研究 Study on Changes in Torsional Characteristics of flexible shaft under cyclic torsion

○中野優奈(産技高専・専) 田宮高信(産技高専) 柴田芳幸(産技高専)
鈴木拓雄(産技高専) 杉本聖一(産技高専) 富田宏貴(産技高専)

Yuna NAKANO, Tokyo Metropolitan College of Industrial Technology Advanced Course,
8-17-1 Minami-Senju, Arakawa-ku, Tokyo 116-8523

Takanobu TAMIYA, Tokyo Metropolitan College of Industrial Technology, 8-17-1 Minami-Senju, Arakawa-ku, Tokyo 116-8523
Shigeyuki SHIBATA, Tokyo Metropolitan College of Industrial Technology, 8-17-1 Minami-Senju, Arakawa-ku, Tokyo 116-8523
Takuo SUZUKI, Tokyo Metropolitan College of Industrial Technology, 8-17-1 Minami-Senju, Arakawa-ku, Tokyo 116-8523
Seiichi SUGIMOTO, Tokyo Metropolitan College of Industrial Technology, 8-17-1 Minami-Senju, Arakawa-ku, Tokyo 116-8523
Hirota TOMITA, Tokyo Metropolitan College of Industrial Technology, 8-17-1 Minami-Senju, Arakawa-ku, Tokyo 116-8523

1. 緒言

フレキシブルシャフトは可撓軸、たわみ軸とも呼ばれ、コイル状の鋼線を複数層にわたって交互に巻き付けた構造をしている(図1)。この構造により、動力伝達方向を自由に変えることができる。その構造上、フレキシブルシャフトは回転方向によってねじり特性が大きく異なり、従来は一般には芝刈り機などのような単一方向に連続運転される機器で用いられてきた。しかしながら、両方向回転に対応するフレキシブルシャフトも市販されており応用も見られる。

図2に示す著者らによって開発されている上肢装具は、肩関節や肘関節などの機能を失った筋または起動力の代用、弱い筋の補助を目的として開発されており、各関節の補助をモータによって行う。その際、モータやバッテリーなどの重量部品による装着者への負担を低減するため、それらを腰部に装着しフレキシブルシャフトで動力伝達を行う機構を採用している^{1,2)}。

人が装着する上肢装具の安全を図るため、動力伝達に用いるフレキシブルシャフトのねじり特性や強度を明らかにすることは重要である。しかしフレキシブルシャフトは一般に、低トルクで一方向への高速回転で利用され、ロボットアームなどの繰り返し両方向にねじられる用途への応用や研究は限定的である。そこで本研究では、フレキシブルシャフトに繰り返しのねじりを負荷したときに生じるねじり特性の評価を定量的に行うことを目標としている。実験に用いる繰り返しねじり試験機を開発し、実験を行ったので現状を報告する。

2. 先行研究

図3は著者らが実施した先行研究の結果である³⁾。先行研究ではフレキシブルシャフトが強い非線形形のねじり特性を示すことが明らかにされている。図中、負荷トルクおよび比ねじれ角の正の値は最外層線の巻方向を表している。このような非線形な剛性の変化はフレキシブルシャフトの内部構造に起因するものであることが知られている。ねじれ角が小さな範囲では側線間の接触が密ではなくトルクが十分に伝わらずにねじり剛性は小さくなり、ねじれ角が大きくなると側線間の接触が密となり変形が拘束されてねじり剛性が大きくなる。大和田は、これらを第一種剛性、第二種剛性と呼び、理論的に説明している⁴⁾。田宮らは、使用履歴のあるシャフトのねじり特性を測定し、使用履歴を有するシャフトでは第一種剛性範囲が延長されるなど、ねじり特性が変化する結果を得た⁵⁻⁷⁾。しかしながら、ねじり特性の変化を定量的に評価するには至っておらず、任意の条件で繰り返しの負荷を加えることができる繰り返しねじり試験機を開発し、繰り返

ねじりによる影響の定量評価が課題となってきた。

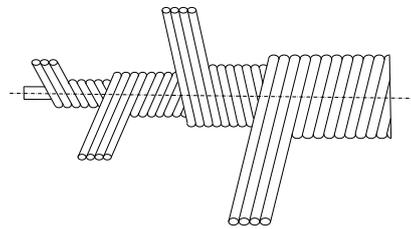


Fig. 1 Construction of a flexible shaft



Fig.2 Active-Upper-Limb-Orthosis²⁾

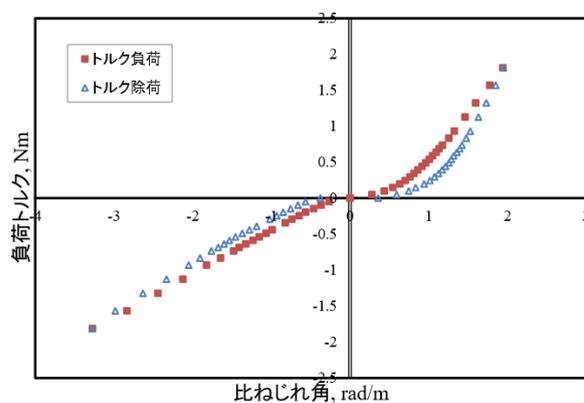


Fig.3 Relationship between Twisting angle and Torsional Moment of Flexible-Shaft.

3. 開発した繰り返しねじり試験機

3.1 試験装置の概要

図4に開発した繰り返しねじり試験機の概略図を示す。繰り返しねじり負荷によるねじり特性の変化を測定するため、フレキシブルシャフトの一端は軸受けを介して万力で固定し、もう一端にモータを接続し回転動力を入力する。このとき、軸受けおよびモータは定盤上にマグネットベースで固定される。マグネットベースを用いることにより配置位置を任意に変化させることが可能であり、フレキシブルシャフトに任意の曲げ半径を加えた実験を可能としている。試験機の計測および制御は小型マイコンArduinoを用いて行っている。モータの制御にはモータドライバ(Poulol社製 VNH5019)を用いPWM制御する。入力されたトルクは自作の歪みゲージ式トルク計により計測する。生じたねじり角はモータに取り付けられたロータリエンコーダ(BROADCOM社製 HEDM-5500)により計測する。それぞれの出力をArduinoにシリアル通信で送信し、シリアルモニタに出力して処理を行った。実

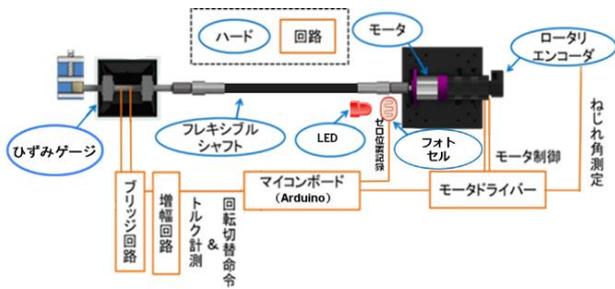


Fig.4 Schematic representation of repetitive torsion testing machine

験条件に対応する繰り返しねじりの動作や実行回数などを制御する。

また、本研究では試験機はトルク制御される。予め指定したトルクを検出すると回転を反転し、それを所定の回数繰り返すようプログラムした。

3.2 入力トルクの計測

本試験機において、トルクの計測は自作の歪みゲージ式トルク計を使用した。トルク検出部にはアクリルパイプ($\phi 10, t=1$)を用い、軸方向に対して $\pi/4$ 傾いた応力の主軸方向にひずみゲージを貼り付けた。ひずみ計測はアクティブダミー法により、温度補償回路を組み精度向上を図った。ひずみアンプ(KYOWA製WGA-670B)に対して無負荷時のアナログ出力値を2.5Vとなるよう設定し、トルク負荷時の出力電圧を計測して校正実験を行った。

校正実験の結果、電圧変化(10bit値)に対応するトルク変化として傾き440.27Nm/bitが得られ、3%以内の誤差率で計測されることが確認できた。

4. 実験方法

試験はトルク制御により行われる。実際の実験は2つのモードで実施される。第1のモードは比較的高速で繰り返しねじり負荷を加えるモードである。第2のモードはねじり特性測定の精度を高めるため、制御速度を比較的低速に設定した計測モードである。本研究では第1のモードで1000回の繰り返しを実施し、その後第2のモードでねじり特性の測定を実施した。本報告では繰り返し回数を最大10000回とした。本来、負荷条件をさらに増加し、繰り返し回数についてもより大きな回数まで確認を要するが、実験の性質上、実験に要する時間的コストが大きい。本報告においては、開発した試験機の実用上の信頼性を

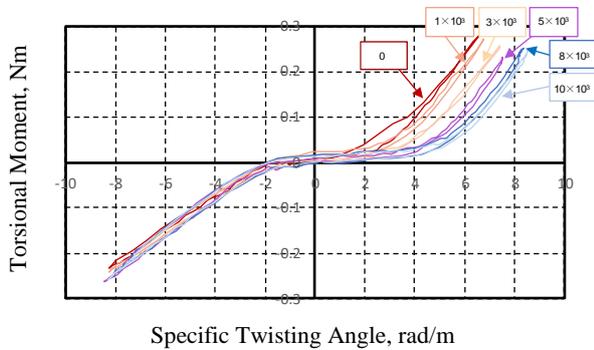


Fig.5 Changes in torsional properties due to repeated torsion (Input Torque 0.25Nm, Bending Radius ∞)

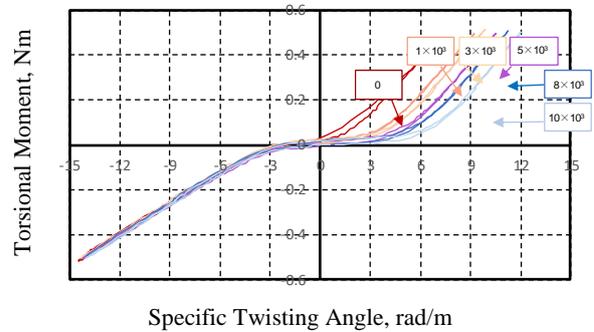


Fig.7 Changes in torsional properties due to repeated torsion (Input Torque 0.50Nm, Bending Radius ∞)

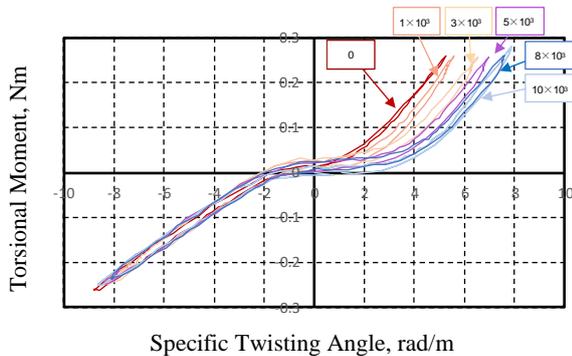


Fig.6 Changes in torsional properties due to repeated torsion (Input Torque 0.25Nm, Bending Radius 200mm)

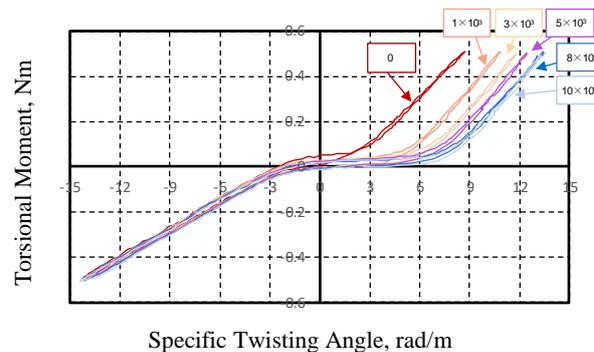


Fig.8 Changes in torsional properties due to repeated torsion (Input Torque 0.50Nm, Bending Radius 200mm)

確認することも重要な観点となっており、実験繰り返し数を所定の条件に押さえることとした。ただし、今回の繰り返し数においても上肢装具への適用に参考となる結果が得られたものと考えている。

実験に用いたフレキシブルシャフトは昭和発條製CS-04MM(長さ0.4m両回転用)である。シャフトへの負荷トルクは低トルク($T=0.25\text{Nm}$)と高トルク($T=0.50\text{Nm}$)の2条件とした。低トルクは上肢装具の動作トルク、高トルクはフレキシブルシャフトの許容トルクに対応している。開発中の上肢装具に置いては「過負荷」を生じる状態が実験における高トルク条件に対応すると考えている。また、試験装置の配置によるフレキシブルシャフトの曲げ半径は「直線配置(曲げ半径 $R=\infty$)」および「曲げ配置(曲げ半径 $R=200\text{mm}$)」の2条件とした。 $R=200\text{mm}$ は本研究室で開発している上肢補助装具で利用されるフレキシブルシャフトが曲げられる最小半径に対応している。

5. 実験結果および考察

5.1 結果の概要

図5, 6, 7, 8に実験結果を示す。それぞれ縦軸はねじりモーメント、横軸は比ねじれ角である。正のねじれ角は最外層線が締まる方向、負のねじれ角は最外層線が緩む方向である。また、図5, 6は低トルク($T=0.25\text{Nm}$)と図7, 8は高トルク($T=0.50\text{Nm}$)の結果であり、それぞれ図5, 7が「直線配置(曲げ半径 $R=\infty$)」、図6, 8が「曲げ配置(曲げ半径 $R=200\text{mm}$)」である。

結果より、開発した繰り返しねじり試験機により、フレキシブルシャフトの構造特有の非線形性が計測されることが確認できた。これは、当研究室の先行研究において田宮ら³⁾が報告しているフレキシブルシャフトの特性曲線と同様の傾向を示しており、当試験機の実用性が示されたものと考えられる。

結果に現れているように、実験に供したフレキシブルシャフトには傾きの小さい「第一種剛性」範囲と、傾きの大きい「第二種剛性」範囲が明確に認められる。また、第二種剛性は正方向へのねじりでは傾きが大きく、負方向へのねじりでは傾きが小さくなった。これはフレキシブルシャフトの構造上、正方向ねじりは最外装の巻き方向と一致するため側線が締まる一方、負方向は逆向きであるため側線が緩み剛性に違いが発生することが原因と考えられる。

5.2 繰り返しねじりによる変化

図のように、ねじり回数が増えていくに従って、第一種剛性範囲が拡大して、第一象限に現れる第二種剛性の立ち上がり方が右に移動し、最大トルクに達するまでに生じるねじり角の大きさが次第に大きくなった。これは、シャフト内部の側線の層同士が摩擦することで摩擦が生じ、側線間に次第に隙間が生じるためだと考えられる。

このような第二種剛性の立ち上がりの右方向への移動が繰り返し数と共にどのように変化するか比較すると、この右方向への移動は、ねじり回数が少ない実験初期に大きく、ねじり回数が増加すると次第に小さくなることが分かった。例として図5(低トルク(0.25Nm), 直線配置($R=\infty$))の結果を見ると、入力トルク 0.2Nm に対するねじり角は、前半5000回の繰り返しねじりによる変化に比し、後半の5000回の繰り返しねじりによる変化は小さくなる傾向にあることが読み取れる。その変化を比で表せば概ね3:2であった。これは、繰り返しねじりを加えることによって生じる摩擦に関係していると考えられる。各層の側線同士の接触ははじめ点接触となるが、繰り返しねじりによって摩擦が生じ、次第に面接触となって摩

耗の進行が緩やかになっていると考えられる。

曲げ配置($R=200\text{mm}$)とした図6の場合にも同様の傾向が見られた。ただし、図6の曲げ配置では直線配置に比べ、上述の変化が顕著に現れているように見受けられる。図6において入力トルク 0.2Nm に対応するねじり角を比較すると、前半5000回の変化と後半の5000回の変化の比は概ね3:1となった。同様の変化は、入力トルクの大きい条件($T=0.50\text{Nm}$)である図7, 8でも同様に読み取ることができる。図7, 8において入力トルク 0.4Nm に対するねじり角で比較すれば、直線配置の場合2:1に対し、曲げ配置の場合4:1程度であった。この現象が生じる原因として、曲げが加えられることにより曲げの内側に生じる負の圧縮変形(圧縮力)によりフレキシブルシャフトを構成する側線間の摩擦がより早く進行し、面接触状態に早期に至ったことなどが原因と推察される。ただし、本報告における実験回数がそれぞれ1回であり、確証を得るには至っていない。しかし、入力トルクの2条件で同様の結果が得られたことは今後の実験において重要な知見となると考えている。

上肢装具へのフレキシブルシャフトの応用を想定した場合、今回の結果から次の諸点が確認できる。使用の初期には第一種剛性範囲の拡大によって制御に変化が生じるため注意が必要である。しかし、使用を継続するとその変化は小さくなり、少なくとも10000回程度の使用には問題を生じないことが確認できた。また過負荷を生じた場合であっても、過負荷の生じる回数が10000回程度までは使用上に問題を生じないことが分かった。今後、実験回数や条件をさらに増やし、摩擦による劣化や強度低下がどのように現れてくるのかを明らかにすることは課題である。

7. 結言

- (1) 繰り返しねじり試験装置の継続運用が可能となり、フレキシブルシャフトの非線形の繰り返しねじりによるねじり特性の変化を計測できた。
- (2) ねじり回数の増加と共に、第一種剛性の範囲が大きくなる傾向が確認された。
- (3) 第一種剛性範囲の変化速度は、繰り返しねじり回数が増加するにしたがって小さくなる傾向を示した。
- (4) 実験回数の蓄積と定量評価、劣化や強度低下について明らかにすることは今後の課題である。

参考文献

- 1) 久保ほか, 数理科学会, 第39回数理科学講演会, 久保遼太, 柴田芳幸, 田宮高信: フレキシブルシャフトを動力伝達に用いた能動型上肢装具の開発—肩関節の補助—, 数理科学会, 第39回数理科学講演会, Web会議システムによる開催 (2020-9)
- 2) 竹内啓人, 柴田芳幸, 田宮高信: フレキシブルシャフトを動力伝達に用いた能動型上肢装具の開発, 数理科学会, 第38回数理科学講演会(CD-ROM), 首都大学東京秋葉原サテライトキャンパス (2019-8)
- 3) 田宮高信, 浅野瑞, 田中英一郎, 池原忠明, 宮川睦巳, 鈴木拓雄: フレキシブルシャフトの静的非線形ねじり特性に関する研究, 数理科学会論文集, 14, 1, pp.17-22 (2013-8)
- 4) 大和田信: 撚線の機械的性質に関する研究, 東京大学生産技術研究所報告, 4, 6, pp.238-282 (1955)
- 5) 中原大吾, 田宮高信, 田中英一郎, 宮川睦巳, 鈴木拓雄, 杉本聖一: 繰り返しねじりがフレキシブルシャフトのねじり特性に及ぼす影響, 数理科学講演会, 33, CD-ROM (2014-8)