数理科学会　第 44 回数理科学講演会講演論文集
［2025. 8. 30　東京都立産業技術高等専門学校 品川キャンパス］

# フレキシブルシャフトの繰返しねじり強さの実験的検討
# Experimental Investigation of Cyclic Torsional Strength of Flexible Shafts

○田宮高信 (産技高専)　中野優奈(芝浦工大・院)　柴田芳幸 (産技高専)
杉本聖一 (産技高専)　鈴木拓雄 (産技高専)　相楽勝裕(産技高専)　冨田宏貴(産技高専)

Takanobu TAMIYA, Tokyo Metropolitan College of Industrial Technology, 8-17-1 Minami-Senju, Arakawa-ku, Tokyo 116-8523
Yuna NAKANO, Shibaura Institute of Technology, 3-7-5 Toyosu, Koutou-ku, Tokyo 135-8548
Shigeyuki SHIBATA, Seiichi SUGIMOTO, Takuo SUZUKI, Katsuhiro SAGARA, Hirotaka 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．

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．また，繰返しねじり負荷によるフレキシブルシャフトのねじり特性（トルクー比ねじり角の関係）については検討が行われている[3-4]が，繰返しねじり負荷に対する寿命の検討は実施されていない．そこで本研究では，繰り返しのねじりを負荷した条件下におけるフレキシブルシャフトの寿命を実験的に検討することを目的としている．繰返しねじり試験機を開発し，限定的な条件に対して破断までの繰返しねじり試験を実施した結果を報告する．

## 2.　開発した繰り返しねじり試験機

### 2.1 試験装置の概要

図3に開発した繰返しねじり試験機の概略図を示す．

フレキシブルシャフトの一端はベアリングで並進を固定し，トルク伝達用アームを介してロードセルと接触させ回転を拘束する．もう一端にはモータを接続し回転動力を入力する．このとき，フレキシブルシャフトの両端（ロードセルおよびモータ）はマグネットベースを用いて定盤に固定される．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．

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．トルクはロードセル（共和電業社製 LVS-500GA），ねじり角はモータに取り付けられたロータリーエンコーダ(BROADCOM 社製 HEDM-5500)で測定し，小型マイコンArduinoを用いてデータの取得および制御を行う．

なお，ロータリーエンコーダによって角度計測を行う

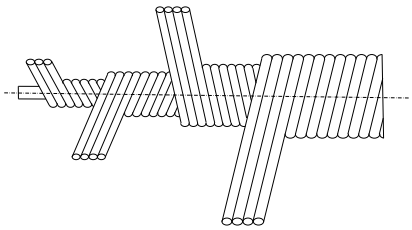

Fig. 1　Construction of a flexible shaft

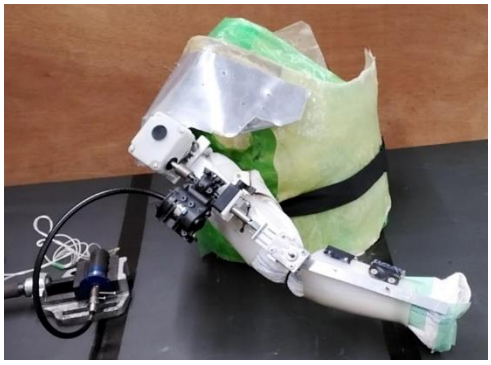

Fig.2　Active-Upper-Limb-Orthosis[2)]

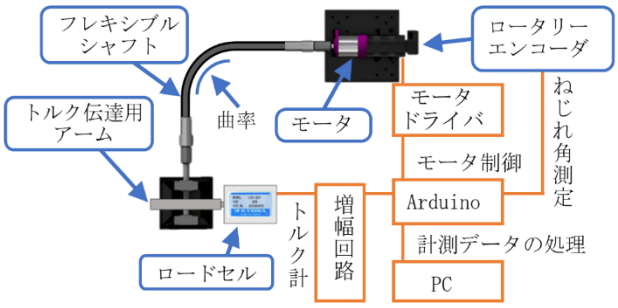


Fig.3 Schematic representation of repetitive torsion testing machine

場合，Arduinoによるパルスの読み落としが角度計測の誤差原因となる．そこで，モータ出口に細いスリットを設置し，スリットを通過した光をフォロセルで読み取らせることにより初期位置を明示しキャリブレーションに用いた．

### 2.2 実験方法

試験機の制御にはトルク制御を用いる．予め実験条件として指定した目標値にトルクが達するとモータを反転

し，それを所定の回数繰り返すようプログラムした．なお，反転制御には遅れが生じることから，トルク値を常に監視して目標値に対するオーバーシュート（またはアンダーシュート）をフィードバックし，反転制御の閾値を調整することにより目標値からの誤差を小さく押さえられるようにした．

実験は次の2つのモードで実施される．第1のモードは高速で繰返しねじり負荷を加えるモードである．第2のモードは低速で回転させ，ねじり特性を高精度で測定するモードである。本研究では第1のモードで所定の繰返しねじり負荷を実施し，その後に第2のモードを用いてねじり特性を測定する．これを破断まで繰返し実施する．

### 2.3 実験条件

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0.4 m 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 Nm）と高トルク（$T$ = 0.50 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．高トルクの条件は，開発中の上肢装具の使用において生じるは過負荷に対応するものと考えている．

また，フレキシブルシャフトに曲げを加えて実験を行うため，マグネットベースの固定位置を調整した．加える曲げは曲率の小さい条件（曲率半径 $R$ = 200 mm）および曲率の大きい条件（曲率半径 $R$ = 100 mm）の2条件とした．曲率の小さい条件は上肢補助装具の使用時に生じる曲率，曲率の大きい条件はフレキシブルシャフトの仕様上の最大曲率に対応している．

以上のようにトルクおよび曲率にそれぞれ2条件を設定し，これらの組み合わせによる合計4条件を実験条件とした．原則として破断まで繰返しねじり負荷を継続し，破断までの繰り返し数および判断の位置を観察した．

## 3. 実験結果

### 3.1 破断までの繰り返し数および破断部位

実験の結果を表1に示す．No.1（トルク大・曲率大）において，曲げを加えたシャフトの中央において破断を生じた．No.2，3の場合，それぞれシャフトの端部で破断を生じた．上肢装具の使用条件を想定したNo.4の条件では1.40×$10^6$回まで繰返しねじり負荷を加えたが破断を生じなかった．

この結果から，No.1のように大きな曲率と高トルクが共に加えられる条件において中央で破断し，その他の条件で破断に至る場合には端部破断であることが示された．端部はフレキシブルシャフトを構成する側線が固定される部位であり，構造上の弱点であると考えられる．相対的に条件厳しさが小さいNo.2，3の条件では端部において損傷が先行し破断に至ったものと考えられる．

それに対し，No.1の条件では高トルクによる大きなせん断応力に加え，大きな曲率による大きな曲げ応力が作用し，これらの重ね合わせによってシャフト中央部において摩耗や疲労が進行し破断を生じたものと推察される．

Table 1 Experimental results

| No. | トルク $T$ Nm | 曲率半径 $R$ mm | 繰返し数（寿命） | 破断位置 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 0.50 | 100 | 6.82×$10^4$ | 中央 |
| 2 | 0.50 | 200 | 1.28×$10^5$ | 端部 |
| 3 | 0.25 | 100 | 1.20×$10^6$ | 端部 |
| 4 | 0.25 | 200 | 1.40×$10^6$ | 未破断 |

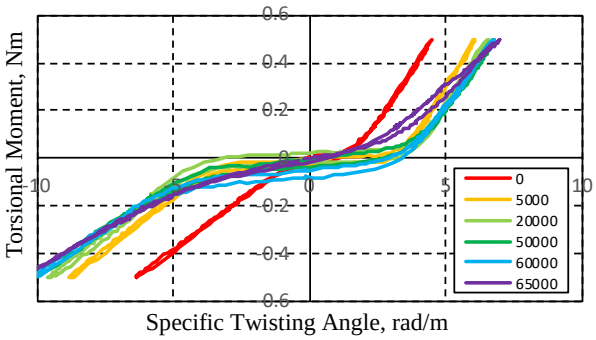


Fig.4 Changes in torsional properties due to repeated torsion (No.1 Input Torque 0.50 Nm, Bending Radius 100 mm)

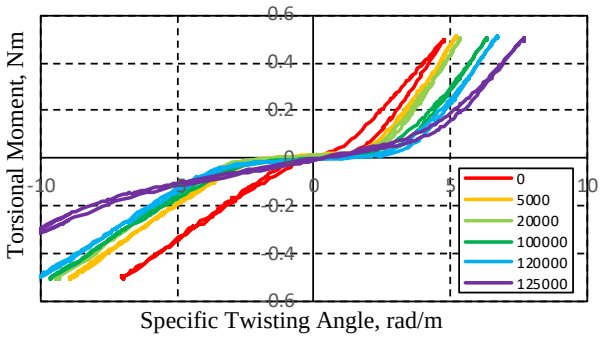


Fig.5 Changes in torsional properties due to repeated torsion (No.2 Input Torque 0.50Nm, Bending Radius 200 mm)

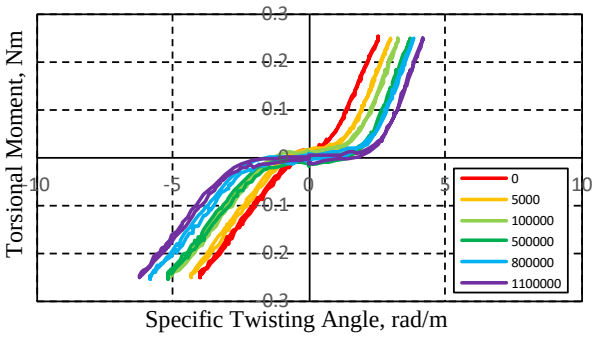


Fig.6 Changes in torsional properties due to repeated torsion (No.3 Input Torque 0.25 Nm, Bending Radius 100mm)

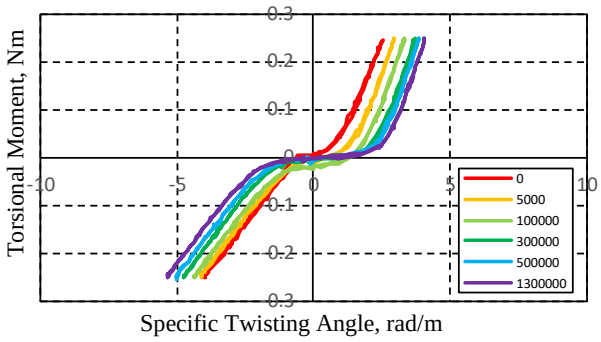


Fig.7 Changes in torsional properties due to repeated torsion (No.4 Input Torque 0.25 Nm, Bending Radius 200mm)

また，No.4の条件では破断を生じなかった．このことから，上肢装具への本シャフトの応用は可能であると考えられる．

### 3.2 ねじり特性（トルクー比ねじり角の関係）への繰り返しねじりの影響

次にねじり特性の変化について考察する．図4～7は，繰返しねじりにより生じたねじり特性の変化を示したものである．縦軸に負荷トルクを横軸に比ねじり角を示している．なお，図4, 5と図6, 7では縦軸のスケールが異なる．図はフレキシブルシャフトの構造に起因する強い非線形のねじり特性を示している．フレキシブルシャフトのねじり特性は，負荷トルクが小さい領域では側線間の接触が疎となるため傾きが小さい。これを「第一種剛性」と言う．また負荷トルクが大きくなると側線間の接触が次第に密となり次第に傾きが大きくなる．これを「第二種剛性」と言う．

実験の結果はいずれも繰返し数と共に第一種剛性の範囲が拡大し，第二種剛性へ遷移する傾きの立ち上がりが左右方向へ移動している．特に入力トルクの大きい条件（図4, 5 $T$ = 0.50 Nm）においては，入力トルクの小さい条件（図6, 7 $T$ = 0.25 Nm）に比べ図中の左右方向への変化が大きく，第一種剛性の範囲が顕著に大きくなっている．このことから，負荷トルクはねじり特性の変化に大きな影響を及ぼしているものと考えられる．

負荷トルクの大きい条件である図4と図5を比較すると，繰り返し数2万回までの第一種剛性の範囲の変化は，曲率の大きい（曲率半径$R$ = 100 mm）図4において，曲率の小さい（曲率半径$R$ = 200 mm）図5に比べて大きく変化していることが読み取れる．また，負荷トルクの小さい条件である図6と図7の比較においても，曲率の大きい（曲率半径$R$ = 100 mm）図6において，曲率の小さい（曲率半径$R$ = 200 mm）図7に比べて第一種剛性の範囲がわずかながら大きく変化していることが読み取れる．これらのことから，曲率はねじり特性の変化に影響を及ぼしているものと考えられる．

負荷トルク，曲率のねじり特性への影響は，フレキシブルシャフトを構成する側線の摩耗と関係しているものと考えられる．すなわち，繰返しねじりを加えることによって，フレキシブルシャフトの側線は繰返し接触状態が変化し，その度に摩擦が蓄積される．このとき，負荷トルクは直接的に側線の接触力に影響を及ぼすものと考えられ，また曲率は曲げの内側において側線が密となることが摩耗に影響を及ぼしているものと考えられる．なお，図4～7はねじり特性の変化が繰り返し数の小さい範囲で大きく，繰り返し数が大きい範囲では小さくなることを示している．このことはねじり特性の変化が摩耗によるとする考察を裏付けていると考えている．しかしながら，本報告における実験回数は各条件に対して1件であり実験結果の信頼性が十分であるとは言えない．今後，実験結果の蓄積による実験結果の信頼性向上や側線および破断部の電子顕微鏡観察などによる詳細な検討が課題である．

## 4. 結言

(1) 繰り返しねじり試験装置を開発し，繰返しねじり負荷に対するフレキシブルシャフトの寿命計測が可能となった．
(2) 実験条件によってフレキシブルシャフトの寿命および損傷部位に変化を生じるが示された．
(3) ねじり特性の変化には側線の摩耗が影響していると考えられる．
(4) 上肢装具の駆動トルクに対応する低トルクでは$10^6$回の繰返し負荷に耐えることが示された．
(5) 実験結果の蓄積と電子顕微鏡観察による検討は今後の課題である．

## 参考文献

1) 久保ほか, 第39回数理科学講演会, Web会議システム (2020-9).
2) 竹内ほか, 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) 田宮ほか, 数理科学会論文集, 14, 1, pp.17-22 (2013-8)
4) 中原ほか, 第33回数理科学講演会, CD-ROM, 産業技術高等専門学校荒川キャンパス (2014-8)