研究論文

炭素繊維複合材ケーブルのねじり試験と電気抵抗法による モニタリング

守屋 一政^{*1}, 西山慎一郎^{*2}, 本山 泰之^{*3}

(1999年10月29日受付)

Torsion Test of Carbon Fiber Composite Cables and Their Damage Monitoring by Electrical Resistance Method

Kazumasa MORIYA,^{*1} Shinichiro NISHIYAMA^{*2} and Hiroyuki MOTOYAMA^{*3}

(Received October 29, 1999)

Experimental tests have been conducted on the mechanical behavior of a CFRP 1×7 strand cable with a central core subjected to torsional loading. The failure process of each helical string and the core has been probed independently by means of an electrical resistance method. Unloading-reloading torsion test has also been done to investigate the effects of cyclic loading. It has been found that the torsional failure of the CFRP strand cable has two stages. The first is a compressive failure of core, which does not immediately result in a loss of load-carrying capacity, but it later induces a tensile fracture of all spiral strings, i.e. the final failure of the cable. Although the tensile strength of the CFRP strand cable is almost the same as that of the steel strand cable of the same diameter, its torsional properties are far lower than those of the steel cable. Cyclic loading causes more damage to the core than to the spiral strings and it reduces the torsional strength significantly. The electrical resistance method, which requires no external sensor, works successfully for the sensitive detection of the fiber breakage in core and spiral strings and hence, the present CFRP strand cable can be regarded as a smart structural element with health-monitoring capability.

1. はじめに

撚り線ケーブルは土木・建築はもちろん宇宙開発における大型パラボラアンテナや太陽電池パドルなどの展開構造にも広く用いられ、そのネットワーク構造の力学的特性が大きな関心を集めている¹⁾。ケーブルが土木・建築分野で利用される場合、両端の回転が拘束されることがほとんどで、ねじりを受ける場合の力学的挙動が問題になることは稀である。しかし、機械や航空宇宙分野においては、端末の回転や軸方向の伸びが非拘束の状態

使われるケースが少なくない。撚り線ケーブルが引張りを受ける場合の力学的特性についてはこれまでも活発な研究が行われてきたが^{2,3)}、ねじりについての研究報告は極めて少なく⁴⁾、炭素繊維強化複合材料(CFRP)ケーブルのねじり特性についてはメーカーの公表データすらないのが実状である。また、鋼索や繊維ロープにあっても、引張試験の方法はJIS G 3525に規格化されているが、ねじり試験については未制定のままである。CFRPケーブルは現在のところ土木・建築分野での使用が中心であるが、比剛性、比強度や耐食性に優れ、低線膨張係数、低磁性などの特長を持つため、その適用範囲が機械や航空、宇宙などの分野に広がることは論を待たない。

以上の観点から、本研究では心線と6本の側線とから構成される標準的なCFRP 1×7撚り線ケーブル^{*4)}のねじり試験を行い、負荷開始から最終破壊までの力学的挙動を実験的に明らかにする。また、単純ねじり試験に加えて、負荷-除荷試験も実施し、負荷、除荷の繰り返し

^{*1,*3} 防衛大学校航空宇宙工学教室 (239-8686 横須賀市走水 1-10-20)

National Defense Academy, 1-10-20, Hashirimizu, Yokosuka 239-8686, Japan

^{*1} 教授 Professor, ^{*3} 助手 Research Assistant

^{*2} 航空自衛隊一尉 (504-8701 岐阜県各務原市那加無番地)

1st Lt., Japan Air Self-Defense Force, Naka, Kakamigahara, Gifu 504-8701, Japan

Table 1 Mechanical properties of CFRP and steel strand cables.

	Diameter (mm)	Tensile modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Breaking load (kN)	Elongation (%)
CFRP strand cable	12.5	137	2,120	161	1.57
Steel strand cable	12.4	198	1,910	178	6.40

が力学的特性に及ぼす影響を明らかにする。予備試験においては、撚りの向きにねじる順ねじり試験のほかに、逆ねじり試験も行っている。供試ケーブルの逆ねじりでは撚りが完全に戻るまではトルクの上昇をほとんど伴わずに撚り戻しが進み、更にねじり続けると、そのまま反対方向に撚れて通常の順ねじり試験に帰着する。従って、本報では順ねじりのみを対象とする。

また、供試ケーブルの側線は目視観察は勿論、ひずみゲージや AE センサーを直接取り付け、破断までの力学的挙動を連続的に捉えることが可能であるが、側線に囲まれた心線は外部からのアクセスが困難なため、挙動の捕捉が難しい。そこで、破壊過程の捕捉には外部センサーの取り付けを必要としない電気抵抗法を試みる。

CFRP 材の電気抵抗法による破壊のモニタリングに関しては、轟、武藤等によって活発な研究⁵⁻⁷⁾が行われてきた。筆者の一人も CFRP 積層材に通電し、電気ポテンシャルの変化やジュール発熱を利用してはく離やき裂の検出に成功している^{8,9)}。CFRP 一方向材については津島等が繊維方向の通電による電気抵抗変化と引張破壊の進展過程との相関を調べ、AE のカイザー効果に似た現象を発見するなど、先駆的な研究を行っている¹⁰⁾。

本報で扱う CFRP ケーブルは、心線や側線の周りにポリエステル繊維が保護被覆として密に巻かれ、素線間で GΩ レベルの高い電気絶縁性が保たれている。従って、心線や側線はそれぞれ電氣的に独立した CFRP 一方向材と考えられ、電気抵抗法を適用して破壊の進展過程をそれぞれ独立にモニターすることが可能である。また、ねじりを受けるケーブルの心線や側線にはトルクのほかに、引張、軸圧縮、横方向の圧縮など様々な負荷が働く。これらの負荷が電気抵抗に及ぼす影響を算定するため、素線単独の引張、軸圧縮、ねじりおよび横方向の一樣圧縮試験を行い、負荷と抵抗変化との関係を求めて付録に示す。

Fig. 1 Specimen configuration of CFRP strand cable and its transverse cross section.

2. ねじり試験

2.1 供試ケーブルと試験片の作成

本研究に用いた炭素繊維複合材ケーブルは典型的な 1×7 構造を持つ呼び径 $12.5 \text{ mm}\phi$ の東京製綱製撚り線ケーブルで、炭素繊維は東邦レーヨンの PAN 系炭素繊維ベスファイト HTA、母材も同じく東邦レーヨン製 130°C 硬化タイプの変性エポキシ樹脂を使用している¹¹⁾。ケーブルを構成する心線および側線は 12,000 本の炭素繊維にエポキシ樹脂を含浸させた繊維束プリプレグを更に束ね、周りにポリエステル繊維を密に巻きつけて素線としたものである。供試ケーブルはこの素線を所定のピッチで撚り合わせ、母材樹脂を加熱硬化させたもので、素線どうしはポリエステル繊維の保護被覆から浸み出したエポキシ樹脂によって緩い接着状態にある。供試ケーブルの引張特性（メーカー公称値）を構成のほぼ等しい外径 $12.4 \text{ mm}\phi$ の鋼撚り線ケーブル（JIS-G-3536-1981 相当品）の特性とともに Table 1 に示す。両者の引張強さがほぼ等しいことに注目されたい。

ねじり試験片（Fig. 1）は全長が 500 mm で、その両端に長さ 100 mm、内外径がそれぞれ 15 mm、25 mm ϕ の軟鋼製タブを常温硬化型のエポキシ接着剤（商品名：セメダイン 1500）で接着している。タブの内壁には滑り止めのため、幅 1 mm、深さ 2.5 mm の溝を全長にわたって 8 本、 45° おきに刻んである。供試ケーブルは直径 1 m のリールにコイル巻きにして供給されるため、巻き癖による僅かな反りが見られる。この矯正を兼ねて、ケーブルを鉛直に吊して下端に質量約 60 kg の重錘を取り付け、真直に伸ばしながらタブ付けを行う。また、中心に $12.5 \text{ mm}\phi$ の貫通孔を持つ二組のポリアセタール製の 2 分割リングでタブの両端を挟み、その中にケーブルを通してタブとケーブルの軸線を一致させる。

¹¹⁾ 一般に $m \times n$ ケーブルは n 本の素線から構成される撚り線を更に m 本収束させて撚り合わせたケーブルを表す。すなわち、 1×7 ケーブルは 7 本の素線（1 本の心線と 6 本の側線）からなる撚り線 1 本のみで構成されたケーブルである。

ねじり試験ではケーブルを構成する全ての素線の長手方向の電気抵抗をそれぞれ独立に計測する。そのため、心線および側線の両端面に、直径1.2 mm ϕ 、深さ5 mmのドリル孔をあけ、その中に長さ100 mmのリード線の先端を差し込んで導電性接着剤（商品名：ドータイト D-500）で固定し、周りをエポキシ樹脂で補強して抵抗測定用の端子とする。側線の穿孔に際しては、リード線が側線の軸線に沿うように、治具を用いてケーブルをドリル刃に対してらせん角だけ傾斜させ、側線とドリル刃の軸線を一致させる。

2.2 試験方法

試験機には三精工業製の最大容量4.9 kN $\cdot$ mのリーレ式ねじり試験機に角速度一定のねじり試験ができるようにサーボ装置を増設したものを使用する。ねじり試験の概要をFig. 2に示す。ねじり試験機はモーターの回転を試験片に伝達するトルク負荷部、振子の振れ角からねじりモーメントを検出するトルク計測部およびそれら載せるベッドから構成される。計測部はレール上を移動可能な台車に取り付けられており、試験片の伸縮を拘束しないねじり試験ができる。ただし、試験片の伸縮は発生する軸力が、台車とレールとの間の最大摩擦力に打ち勝って初めて可能である。最大摩擦力は台車から水平に出したステンレス細線（0.3 mm ϕ ）の先端に取り付けたバケツをプーリーを介して鉛直に吊し、内径2

mm ϕ の細管から水を注入して実測した結果、14.0 Nであった。また、試験機には左右のつかみ具間のねじり角を動滑車の上下動に変換し、ドラムに巻かれたチャート紙に記録する自記装置が付属している。この自記装置にロータリ・エンコーダ（COPAL RE30D）とひずみゲージ式変位計（KYOWA DT-100A）を取り付けてつかみ具間のねじり角とトルクを計測する。また、つかみ具間の伸縮量はトルク計測部にひずみゲージ式変位計を

Fig. 3 Devices used for the simultaneous measurement of angle of twist and axial contraction.

Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup for torsion test of CFRP strand cable.

取り付けて台車の移動量から算出する。

こうして得られるつかみ具間のねじり角や伸縮量は、つかみ具内部での滑りなどを含んでいるため、Fig. 3に示す2種類の標点を開発し、一方を試験片の負荷側、他方を振子側に間隔200 mmで取り付け、標点間のねじり角と伸縮量を計測する。この標点はケーブルのねじりとともに軸回りに回転するだけでなく軸方向に横移動する。しかもケーブルの曲げの影響も加わるため、標点の移動量の計測には工夫が必要である。トルク計測部は台車に取り付けられているため、振子側の標点は負荷側の標点に比べて移動量が多い。そこで振子側の標点変位は測定範囲 ± 25 mmのレンズを装着した2台の光学式非接触変位計(ZIMMER社モデル100D)を用いて計測する。この標点にはアルミ合金製の薄肉円筒を用い、この円筒の側面にハロゲンランプの平行光線を半透明のスクリーンを介して水平に照射し、円筒の端面が作る明暗の境界線を光学式変位計で捉える。円筒の両端面は光の乱反射を抑えるため、鋭いくさび型にエッジ加工を施している。又、このエッジ部分ははめ込み式で、損傷時には交換が可能である。ケーブルの曲げの影響を取り除くため、Fig. 3に示すように2台の変位計を標点の中心に対して点对称に配置し、一方のカメラで左側端面の上部エッジを、他方で右側端面の下部エッジを捉え、両者の出力を平均して標点変位とする。一方、トルク負荷部は試験機のベッドに固定されているため、負荷側標点の移動量は小さい。そこで負荷側は外径160 mm ϕ 、肉厚1 mmの軟鋼製円板に回転角計測用のプーリーを一体化して標点とし、その移動量を対称に配置した2台の渦電流式変位計(SENTEC LNS-302 測定範囲8 mm)で測定する。標点の回転角は振子側、負荷側とも、ロータ

リ・エンコーダを用いて計測する。

電気抵抗の測定には横河7562マルチメータおよび7501プログラムスキャナを用い、配線抵抗による測定誤差を避けるために4線式の抵抗測定法を採用する。抵抗測定用の印加電流は0.1~1 mAと極めて低い上に間歇的な印加のため、通電による発熱の影響は無視できる。なお、抵抗測定用のリード線は、心線と側線を合わせて片側14本、両端で28本にも及ぶ。負荷側のつかみ具は負荷開始から最終破壊までに6~7回転するため、負荷側のリード線はあらかじめタブに充分巻き付け、ねじりとともに自然にほどけるようにして絡みやもつれを防ぐ。ねじり試験は一定角速度 $1/4 \pi$ rad/minで行う。

3. 結果と考察

3.1 トルクと比ねじり角

負荷開始から最終破壊までの比ねじり角とトルクおよび軸ひずみの関係の一例をFig. 4に、立ち上がり部分の拡大図を心線の電気抵抗変化から求めた軸ひずみとともにFig. 5に示す。図には文献12)の線形理論に基づく計算結果も示している。実線および点線がそれぞれトルクおよび軸ひずみの実験結果、破線および一点鎖線が計算結果、二点鎖線が心線の電気抵抗変化から求めた軸ひずみを表し、軸ひずみは圧縮を正としている。負荷初期のトルクは図に示すように比ねじり角に比例して増加する。比ねじり角5 rad/m付近にトルク曲線の傾きが急減する折れ曲がり点(二点)が現れるが、その後もトルクは比ねじり角に比例して増加を続ける。Fig. 5のトルク曲線の立ち上がり部分を詳細に観察すると、傾斜が急減する二点までのトルク域では、比ねじり角とともに曲線の傾きが僅かながら増加する傾向にある。これ

Fig. 4 Typical plots of torque, axial contraction vs. specific angle of twist during torsion testing.

Fig. 5 Torque, axial contraction vs. specific angle of twist during torsion testing (Zoomed).

は、負荷とともに素線どうしが互いに馴染んで剛性が次第に増すという撚り線の特性に加えて、引張弾性率が伸びに対して単調に増大する炭素繊維特有の剛化現象によるものと考えられる。トルクが二一点に近づくと「ピシッ」という樹脂割れの音が発生し始め、この音は最終破壊まで続く。比ねじり角が10 rad/m、トルクが15 N・m付近でトルク曲線は最初のピークを迎える。この時、大きな破裂音の発生とともにエポキシ樹脂が粉末となって飛散し、トルクが約15 N・mから12 N・m近くまで急激に低下する。Fig. 5に見られるトルク曲線の最初のピーク後の平坦部分はトルクの増加を伴わずにケーブルのねじりが瞬時に進んだことを示す。この時、ケーブルに外観上の変化は見られず、後に述べる電気抵抗の解析から明らかになるように、心線内の炭素繊維に大規模な断裂が発生し、心線と側線の間および側線間の隙間を埋めていたエポキシ樹脂が破壊して粉末状に飛散し、素線間の結束が緩んで比ねじり角の急増とそれに続くトルクの急低下を招いたものと考えられる。更にねじり角が増すとトルクは再び小さな凹凸を伴い、徐々に傾きを増しながら増加して、80 rad/m付近で最大トルクに到達する。この時、側線の中の数本が破断するとともにトルクが大きく急低下する。更にねじり続けると、トルクは再び穏やかに増加し始める。このようなトルクの急減と漸増を繰り返すうちに全ての側線が破断して最終破壊に至る。

3.2 軸ひずみ

一般に撚り線を撚りの向きにねじると、撚り角が増大して軸方向に収縮する。供試ケーブルの軸圧縮ひずみは、Fig. 4およびFig. 5の点線で示すようにトルク曲線の最初のピークまでは比ねじり角に比例して増加し、二一点においても元の傾きを保持したまま増加し続ける。

Fig. 6 Typical plots of electrical resistance and torque vs. specific angle of twist during torsion testing.

Fig. 5を見ると、トルク曲線の最初のピークで軸ひずみの傾きが大きく増加している。これは心線の断裂によって撚りの形状が崩れ、素線どうしの結束が緩んでケーブル全体の軸剛性が低下したためである。その後、軸ひずみは比ねじり角20 rad/m付近から次第に傾きを増して、下に凸の曲線を描く。また、比ねじり角50 rad/m付近に軸ひずみの変化率が減少する折れ曲がり点が見られる。ここでトルクも僅かに低下し、次節に述べるように比ねじり角に比例していた側線の電気抵抗が増加率を次第に増して、それまでの直線から下に凸の曲線へと遷移を始める。これは側線内でも炭素繊維の大規模な断裂が始まったことを示している。

3.3 心線および側線の電気抵抗変化

試験中の電気抵抗変化に寄与するのはケーブルのタブ間部分の抵抗変化のみで、タブ内部や測定用の引出し線などの電気抵抗は変化しないと考える。全長が1,400 mmと700 mmの2種類のケーブル試験片の無負荷状態での電気抵抗を室温(温度20°C, 湿度62%)で計測し、両者の差から、端子部分の抵抗を除いたケーブルそのものの電気抵抗を求めると、ケーブルの単位長さあたりの平均値は、心線が2.33 Ω/m、側線が2.47 Ω/mとなる。心線と側線の計算上の長さの比0.98に対して抵抗比は0.94で、長さ比に対して抵抗比の方が僅かに小さい。これは成形時の撚り工程で生じる炭素繊維の初期損傷による抵抗増加が、真直なままの心線よりもらせん状に撚られる側線の方が大きいためと思われる。また、室温付近での抵抗の温度係数は全長が1,400 mmと700 mmの2種類の試験片を用いて実測した結果、 $-8.0 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ となった。ねじり試験における心線や側線の抵抗変化はそれぞれのタブ間部分の長さに相当する電気抵抗 R_0 で

Fig. 7 Electrical resistance and torque vs. specific angle of twist during torsion testing (Zoomed).

除して無次元化する。標点間の比ねじり角とトルク、心線および側線の電気抵抗変化の関係の一例を Fig. 6 に、立ち上がり部分の拡大図を Fig. 7 に示す。両図とも点線はトルク、実線は電気抵抗を示すが、右縦軸の下端値は 0 ではなく -0.02 であることに注意されたい。

心線の電気抵抗は、負荷開始からトルク曲線の最初のピークまでは比ねじり角の増加とともに直線的に減少する。トルク曲線の最初のピークでステップ状に急上昇し、その後も傾きを増しながら大きく増加する。側線の電気抵抗は負荷開始から比ねじり角に比例して直線的に増加し、心線の抵抗値が負荷とともに減少するのとは対照的である。

負荷初期の心線の電気抵抗曲線の傾きは Fig. 5 の軸圧縮ひずみ曲線の傾きと付録の素線試験で導いた式 (A2) を用いて計算した値にほぼ一致している。Fig. 5 には心線の電気抵抗変化と素線の軸圧縮試験で導いた式 (A2) を用いて計算したケーブルの軸ひずみを二点鎖線で示しているが、実験結果と文献 [12] に基づく解析結果との間に挟まれた直線となっている。

比ねじり角が 5 rad/m 付近に現れるトルク曲線の二点では、心線や側線の電気抵抗に特別の変化は見られない。これは二点でのねじり剛性の低下が、素線内の炭素繊維の損傷によるものではなく、心線や側線の間を埋めてその動きを拘束していたエポキシ樹脂の破壊によるものであるという 3.1 節の推論を裏付けている。

心線の電気抵抗はトルクが最初のピークに到達する際に急増するが、側線の抵抗曲線に目立った変化はない。これはトルク曲線の最初のピークで、心線内の炭素繊維に軸圧縮による大規模な断裂が発生し、供試ケーブルの破壊が心線から始まることを示している。また、Fig. 4

では比ねじり角 50 rad/m 付近にトルクが小さく急低下し、軸ひずみの変化率が急減する折れ曲がり点が見られる。この前後から側線の電気抵抗もそれまでの直線から次第に傾きを増し、側線内でも炭素繊維の大規模な断裂が始まったことがわかる。その後も側線の電気抵抗は傾きを増しながら下に凸の曲線を描いて増加を続ける。トルクが最大値に達すると同時に、数本ないし全ての側線の電気抵抗が急増して測定範囲を超え、ケーブルは最終破壊を迎える。

3.4 AE 挙動

トルク、累積 AE 事象数および心線と側線の電気抵抗の時間的な変化の一例を拡大図とともに Fig. 8 および Fig. 9 に示す。両図とも抵抗変化の下限値は 0 ではなく -0.02 である。センサー間の累積 AE 事象数はトルク曲線の二点近くで急増し、トルクの最初のピークで増加率が一旦下がる。二点付近の AE は振幅が数居値 (45 dB) から 60 dB までの樹脂割れや素線どうしのこすれに起因すると思われる低振幅のものがほとんどで、AE データもトルク曲線の二点が素線間の樹脂破壊による剛性低下であることを裏付けている。トルクが最初のピークに近づくにつれて繊維破壊を示す 80 dB 以上の AE の発生が多くなり、心線の電気抵抗の急増と符合している。また、累積 AE 事象数は 500 s 付近すなわち比ねじり角が 50 rad/m 付近で再びステップ状に急増し、その後はほぼ一定の傾きで最終破壊まで増加し続ける。 50 rad/m 付近では、 80 dB 以上の大振幅の AE が多く見られ、側線の繊維破壊を捉えたものであることがわかる。

3.5 ねじり剛性

Table 1 に示したように CFRP 撚り線ケーブルの引

Fig. 8 Typical plots of electrical resistance, AE cumulative events and torque vs. time during torsion testing.

Fig. 9 Electrical resistance, AE cumulative events and torque vs. time during torsion testing (Zoomed).

張強さは外径のほぼ等しい鋼撚り線ケーブルと同等である。ねじり特性については鋼線ケーブルの公表された資料がないため、長さ540 mm、外径3.2 mm ϕ の一般軟鋼用ガス溶接棒を束ねて1 $\times$ 7構成の鋼索（外径9.6 mm ϕ ）を作製し、この両端に長さ120 mm、外径25 mm ϕ の軟鋼製タブを接着してねじり試験を実施した。鋼索のねじり試験でも負荷初期のトルクは比ねじり角とともに直線的に増加する。トルクは15 N $\cdot$ m前後で増加率を大きく低下させるが、その後も比ねじり角とともに増加し、トルク20 N $\cdot$ m、比ねじり角60 rad/mでも破壊に至らない。

次に、CFRPケーブルの比ねじり角-トルク曲線の立ち上がり部分をトルク増分2 N $\cdot$ mごとに区切り、それぞれの区間における曲線の傾きを最小自乗法によって求めて局所ねじり剛性とする。局所ねじり剛性とトルクとの関係はFig. 10のようになる。5本の供試ケーブルの局所ねじり剛性を○で、平均値を+で表す。図にはまた、ガス溶接棒を用いて作製した外径9.6 mm ϕ の鋼撚

Fig. 10 Torsional rigidity of CFRP and steel strand cables as a function of applied torque.

り線の局所ねじり剛性を◇で、その5本の平均値を+で示す。

CFRPケーブルの比ねじり角とトルクとの関係は、負荷初期においても厳密には線形でなく、ねじり剛性はトルクが0~2 N $\cdot$ mの範囲では約1.6 N $\cdot$ m²、2~6 N $\cdot$ mでは約2 N $\cdot$ m²と負荷開始から約5 N $\cdot$ mまでは、トルクとともに増加し、その後は逆に低下する。この負荷初期のねじりに対する剛化現象は、トルクの増加とともに素線どうしが互いに馴染んで次第に接触領域が増大して剛性が増すという撚り線の特性に加えて、引張弾性率が伸びとともに増加する炭素繊維の特性にも起因すると考えられる。軟鋼ケーブルのねじり剛性とトルクとの関係もCFRPケーブルと同様の傾向を持つが、呼び径12.5 mm ϕ のCFRPケーブルの局所ねじり剛性は、図の全てのトルク範囲で自作した外径9.6 mm ϕ の鋼索の40%程度である。

3.6 SEMによる破面観察

単純ねじり試験によって破断したケーブルの写真をFig. 11に示す。側線はタブ間のほぼ中央で破断し、破断部が外側に飛び出ている。一方、心線は内部の炭素繊維束がタブ間の各所で破断し、その外側に巻かれたポリエステル繊維の保護被覆によって辛うじて繋がっている状態である。また、心線の破断部は凹凸が少なく平坦で

Fig. 11 Photograph of fractured CFRP strand cable specimen.

Fig. 12 Scanning electron micrographs of fracture surfaces: (a) fibers in central part of core string, (b) strand fibers adjacent to core string, (c) strand fibers close to outer surface of the cable.

あるが、側線は繊維束や繊維の間に縦割れが入り、破断した繊維や繊維束が切り立っている。心線および側線の破断面のSEM写真をFig. 12に示す。(a)は心線の芯部で、破断面が繊維軸に垂直なものや斜めになっているものが混在しているが、いずれも比較的滑らかで凹凸が少なく、圧縮破壊ないし軸圧縮によるせん断破壊を示している。(b)は側線のケーブル外周部分で、繊維一本一本の破断面にも多数の小さな凹凸が見られ、典型的な引張破壊を示している。(c)は側線の心線寄りの部分で、繊維の破断面は中央の稜線が左右を滑らかな領域と多数の小さな凹凸のある領域に二分する山脈状で、この部分では曲げ破壊を生じていることがわかる。心線の外側部分すなわち側線に近い部分の繊維の破断面にも(c)のような曲げないし繊維座屈を伴う圧縮破壊の痕跡が見られる。SEMによる破面観察の結果も、心線の破断面は軸方向の圧縮による破壊、側線の破面は引張と曲げによる破壊の様相を示す。

4. ねじりの負荷-除荷試験

負荷-除荷試験は折り返し点のトルクないし比ねじり角を所定量ずつ増しながら負荷、除荷、再負荷を繰り返す。供試ケーブルのねじりではトルクに大きな不連続を生じるため、折り返し点の比ねじり角を5, 10, 15, 20, 40, 80 rad/mのステップで増加させる。

トルク、電気抵抗、累積AE事象数の時間変化をFig. 13にそれぞれ点線、実線および破線で示す。心線の抵抗変化率のみが対数表示となっている。折り返し点のトルクがニー点を越える第3ステップ以降でトルク曲線にヒステリシスが現れるが、軸ひずみは負荷時と除荷

時の経路がほぼ重なり、心線破断後のヒステリシスも小さい。第4ないし第5ステップからはねじり座屈を生じて試験片全体がらせん状にうねる。負荷-除荷試験ではねじり強さが単純ねじり試験に比べて平均で約11%も低く、最終破壊までの比ねじり角も7%小さい。これは負荷、除荷の繰り返しによって繊維や樹脂の損傷が増加するとともに、第4ステップ以降に生じるうねりによる損傷も加わって、荷重負担能力が低下するものと思われる。

心線の電気抵抗は心線が破断するトルク曲線の最初のピークまでは単純ねじり試験同様、負荷時、除荷時にそれぞれ比ねじり角に比例した減少と増加を繰り返す。トルクはニー点を越えると直ちにヒステリシスを生じるが、心線の電気抵抗曲線にヒステリシスが現れるのはトルク曲線の最初のピークすなわち心線内の炭素繊維に大規模な断裂が発生した後で、トルク曲線のニー点が直接、心線の損傷に関わるものではないことがわかる。トルクが最初のピークを過ぎると心線の電気抵抗が急増し、除荷終了時に最大となる。再び負荷すると抵抗は急減し、トルクが直前のステップの最大トルクに到達する少し手前で最小となる。心線の抵抗変化率 $\Delta R/R_0$ の最大値はステップごとに増加し、心線破断前は $O(10^{-2})$ であったものが最終破壊が近づくと $O(10^3)$ にも達する。 $\Delta R/R_0$ の最小値もステップを重ねる度に増加し、最終破壊直前のステップでは $O(10^{-1})$ となる。心線は負荷時に軸圧縮、除荷時には引張を受ける。負荷時の軸圧縮によって心線内の断裂した炭素繊維の端面どうしが再接触するとともに、側線からの横圧縮によって隣接繊維間の電流路が復活して電気抵抗が減少し、除荷時には再び離れて電気抵抗が増すものと考えられる。

側線の電気抵抗はトルク曲線の最初のピークまでは負荷時に増加、除荷時に減少するが、第3ステップで心線内の炭素繊維に大規模な断裂が発生した後は心線同様、除荷時に増加、負荷時に減少するようになる。除荷が完了してトルクがほぼ0の時に最大となり、再負荷の過程でトルクが直前のステップの最大トルクに近づいて心線の抵抗が最小となる時に側線の抵抗も最小値をとる。ただし、心線断裂後の抵抗変化率の最大値は心線と側線とでオーダーが異なり、前者は $O(10^1) \sim O(10^3)$ 、後者は $O(10^{-2}) \sim O(1)$ となる。このように心線の抵抗変化率は側線よりも二桁以上大きい。単純ねじり試験においても心線の電気抵抗変化率はトルク曲線の最初のピークで急増するものの、比ねじり角15 rad/mで0.05程度に収まっており、負荷-除荷試験の1/100である。一方、

Fig. 13 Typical plots of torque, electrical resistance and AE cumulative events vs. time during unloading-reloading torsion testing.

側線の抵抗変化率は負荷-除荷試験と単純ねじり試験とでオーダーの差はなく、負荷、除荷の繰り返しが側線よりも心線に大きな損傷を与えることがわかる。

5. 結 論

CFRP 1×7 撚り線ケーブルのねじり試験を行い、トルク、比ねじり角、軸ひずみ、AE および心線や側線の電気抵抗変化を計測して、負荷初期から最終破壊までの力学的挙動を明らかにした。本研究で得られた知見は以下の通りである。

(1) 負荷初期のトルクは比ねじり角に比例し、その後、二点を経て最初のピークに到達して急減する。更にねじり続けるとトルクは下に凸の曲線を描いて再び増加し、最大トルクに到達する。最大トルクの平均値は 41 N・m である。

(2) トルク曲線の二点は、素線内の炭素繊維の損傷によるものではなく、心線や側線の間を埋めていたエポキシ樹脂が破壊して素線間の結束が緩んだために生じる。二点までのトルクや軸ひずみの変化は線形理論を用いた解析結果とほぼ一致する。

(3) ねじり剛性は負荷初期の低トルク域で小さく、次第に増加してほぼ一定値を保ち、更にトルクが増すと再び低下する。呼び径 12.5 mmφ の CFRP 撚り線ケーブルの引張強さはほぼ同じ構成の鋼撚り線と同等であるが、ねじり剛性はガス溶接棒を束ねて作製した外径 9.6 mmφ の鋼撚り線の 40% 程度である。

(4) 心線の電気抵抗は負荷初期には比ねじり角の増加とともに直線的に減少するが、トルク曲線の最初のピークで突然、増加に転じ、この時、ケーブルの軸圧縮ひずみも急増する。これは、CFRP 撚り線ケーブルのねじりによる破壊が心線の圧縮破壊から始まることを示している。

(5) トルク曲線の最初のピークでは側線の電気抵抗に特別な変化は現れず、側線内の繊維はまだ大きな損傷を受けていない。トルクが 15 N・m 付近で側線内の繊維に大規模な断裂が発生し、側線の抵抗曲線の傾きが大きく増加する。

(6) ケーブルを構成する CFRP 素線の引張試験、軸圧縮試験、ねじり試験および膨張剤を用いた横方向の圧縮試験を行い、CFRP 素線の力学的な挙動と電気抵抗変化の関係を求めた。素線の電気抵抗を変化させる要因は、軸方向の伸縮と炭素繊維の断裂であって、ねじりや側圧の影響は比較的小さい。素線の軸ひずみと電気抵抗の関係は負荷初期の線形範囲において引張で $\Delta R/R_0/\Delta \epsilon = 1.54$ 、圧縮では $\Delta R/R_0/\Delta \epsilon = 1.56$ となった。

また、素線の電気抵抗は比ねじり角が増すと僅かに増加し、側圧が増すと僅かに低下する。

(7) ねじり試験によって破壊した CFRP ケーブルの心線の芯部の繊維の破面は滑らかで圧縮破壊、側線内のケーブル外周寄りの繊維の破面は凹凸が激しく引張り破壊を示す。側線内の心線寄りの繊維および心線の側線寄りの繊維の破面は中央の稜線が左右を滑らかな領域と凹凸の激しい領域に分ける山脈状で曲げ破壊の様相を呈する。

(8) 負荷-除荷試験でのねじり強さは単純ねじり試験に比べて 10% 以上も低く、負荷、除荷の繰り返しによって繊維や樹脂の損傷が増加し、荷重負担能力が低下する。また、心線の電気抵抗変化率が単純ねじり試験と比べて二桁以上大きいものに対して、側線の抵抗変化率は単純ねじり試験の場合とオーダーの差はなく、負荷、除荷の繰り返しは側線よりも心線に大きな損傷を与える。

本研究を行うにあたり、東京製網株式会社研究所の高木 宏元所長、木村 浩係長および技術部の川田幸次課長に一方ならぬ御支援を頂いた。ここに厚く感謝申し上げます。

付録：素線の力学的特性と電気抵抗変化

ケーブルを撚りの向きにねじると、側線はらせん方向の引張やねじり、心線はねじりに加えて軸方向の圧縮や周りの側線からの横圧縮を受ける。そこで素線単独の引張、軸圧縮、ねじりおよび横方向の圧縮試験を行い、これらの負荷が素線の電気抵抗に及ぼす影響を明らかにする。引張、軸圧縮およびねじりについては、同一形状のタブを有し、タブ間距離の大きく異なる 2 種類の試験片について試験を行い、両者の電気抵抗の差をとってタブ内部や電極部の電気抵抗を相殺する。また、各試験項目ごとに最低 5 組の試験片について実験を行う。

A.1 素線の引張による電気抵抗変化

長さ 600 mm および 450 mm の素線について引張試験を行った結果、抵抗変化率は負荷初期の線形域で

$$\Delta R/R_0/\Delta \epsilon = 1.54 \quad (A1)$$

となる。ここに ΔR は電気抵抗の変化量、 $\Delta \epsilon$ は軸ひずみ、 R_0 は無負荷状態における素線の電気抵抗を表す。式 (A1) の値は、理論から得られる比例定数 $1+2 \nu_{LT}$ に近い。ここに ν_{LT} は主ポアソン比である。

A.2 素線の軸圧縮による電気抵抗変化

タブ間距離が 20 mm および 40 mm の素線試験片によ

Fig. A1 Typical plots of torque, electrical resistance vs. specific angle of twist on a CFRP string specimen during torsion testing.

Fig. A2 Typical plots of pressure, electrical resistance and temperature vs. time on a CFRP string specimen during uniform compression testing.

る軸圧縮試験の結果、負荷初期の素線の軸圧縮ひずみ $\Delta\epsilon$ と電気抵抗変化との関係は

$$\Delta R/R_0/\Delta\epsilon = 1.56 \quad (A2)$$

となり、抵抗変化率は引張の場合よりも僅かに大きい。

A.3 素線のねじりによる電気抵抗変化

全長が 500 mm と 350 mm の素線試験片について行ったねじり試験の結果、負荷初期のトルクや電気抵抗は Fig. A1 に示すように比ねじり角に比例し、比ねじり角 $\Delta\theta$ と抵抗変化 ΔR との関係は、

$$\Delta R/R_0/\Delta\theta = 9.7 \times 10^{-5} \quad (A3)$$

となる。素線のねじりが長手方向の電気抵抗に及ぼす影響は小さく、長さ 300 mm の素線の一端が 1 回転しても抵抗変化率 $\Delta R/R_0$ は $9.7 \times 10^{-5} \times (2\pi/0.3) = 2 \times 10^{-3}$ に過ぎない。

A.4 素線の横圧縮による電気抵抗変化

素線が周囲から一様に圧縮される場合に側圧が電気抵抗に及ぼす影響を明らかにするため、全長 150 mm、外径 25 mm ϕ 、肉厚 5 mm の軟鋼円管に素線を挿入し、素線と円管との隙間にコンクリート破砕用の膨張剤を注入して膨張させる。内圧は時間とともに上昇し、100 時間後には母材樹脂の引張強さを越える 50 MPa にも達する。内圧、電気抵抗および試験片温度の時間的な変化を Fig. A2 に示す。内圧 p による素線の長手方向の抵抗変化率は温度補正を施して

$$\Delta R/R_0/p = -4.9 \times 10^{-10} \quad (1/\text{Pa}) \quad (A4)$$

となる。側圧の上昇とともに素線内の炭素繊維間の接触が密になり、半径方向の電流路が増して長手方向の電気抵抗は僅かに減少する。

一方、心線が側線から受ける側圧 p は簡単な計算に

より

$$p = M \tan \alpha / (2\pi r^3) \quad (A5)$$

と書ける¹³⁾。ここに M はトルク、 α および r はそれぞれケーブルの捻り角とらせん半径を表す。供試ケーブルの心線に働く側圧は、式 (A5) からトルク 1 N $\cdot$ m あたり $p = 3.6 \times 10^5$ Pa となる。これを式 (A4) に代入すると、単位トルクあたりの抵抗変化率は

$$\Delta R/R_0 = 1.8 \times 10^{-4} \quad (A6)$$

となる。しかし、順方向のねじりでは、ねじりとともにらせん半径が増大して側線は心線から離れる傾向にあるため、側圧の影響は式 (A6) で算定される値よりも更に小さい。

以上、素線単独の試験から、ケーブルの電気抵抗を変化させる要因は、軸方向の伸縮と炭素繊維の断裂であって、ねじりや側圧の影響は比較的小さい。

参考文献

- 1) 高野 忠, 名取通弘, 三好一雄: 三菱電機技報, 68 (1994), 611-614.
- 2) 大和田信: 東京大学生産技術研究所報告, 4, 6 (1965), 238-282.
- 3) H. Kimura, K. Kawata & M. Itabashi: *Adv. Composite Mater.*, 6, 1 (1996), 19-32.
- 4) 赤坂 隆, 加藤 満, 野田 顕: 日本複合材料学会誌, 14, 6 (1988), 228-232.
- 5) 武藤範雄, 柳田博明, 宮山 勝, 中辻照幸, 杉田 稔, 大塚 靖: 日本複合材料学会誌, 18, 4 (1992), 144-150.
- 6) 轟 章, 小林英男, 松浦克也: 日本複合材料学会誌, 21, 3 (1995), 89-95.
- 7) 轟 章, 鈴木洋之, 島村佳伸: 日本複合材料学会誌, 24, 5 (1998), 176-182.

-
- 8) 守屋一政, 遠藤 隆: 日本航空宇宙学会誌, **36**, 410 (1988), 139-146.
 - 9) 守屋一政: 日本航空宇宙学会誌, **38**, 424 (1989), 238-246.
 - 10) 津島栄樹, 吉澤弘之: 日本機械学会材料力学講演会講演論文集, No. 900-86 (1990), 203-205.
 - 11) 東京製網株式会社: CFCC 技術資料 (1992), 1-54.
 - 12) S. Machida & A.J. Durelli: *J. Mech. Eng. Sci.*, **15**, 4 (1973), 241-251.
 - 13) F. Hruska: *Wire and Wire Products*, **26**, 9 (1951), 766-767, 799-801.