

炭素繊維複合材撚り線ケーブルの引張負荷・除荷実験と履歴荷重モニタリング

Tensile loading-reloading Test of CFRP Strand Cables and monitoring of load history

本山泰之*, 守屋一政**, 香月智***, 太田俊昭****

Hiroyuki MOTOYAMA, Kazumasa MORIYA, Satoshi KATSUKI and Toshiaki OHTA

*工修, 防衛大学校助手, システム工学群航空宇宙工学科 (〒239-8686 横須賀市走水 1-10-20)

** 工博, 防衛大学校教授, システム工学群航空宇宙工学科 (〒239-8686 横須賀市走水 1-10-20)

*** 工博, 防衛大学校助教授, システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 横須賀市走水 1-10-20)

****工博,九州大学大学院教授, 工学部研究院建設デザイン部門 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

Incremental loading-reloading test on a CFRP stranded cable has been conducted under both twist free and twist fixed conditions. The effect on the tensile loading-reloading properties of CFRP cables twist confinement is investigated. The maximum tension capacity under twist free condition is 40% less than that under twist fixed condition. The electrical resistance of strand of CFRP cable along the fiber direction as well as the acoustic emission signals have been monitored during the test. The change of electrical resistance and the AE behavior are strongly correlated each other. It is suggested that the electrical resistance measurement could be effective for detecting of maximum load history of CFRP cable.

Key Words: CFRP, cable, twist fix or free condition, damage detection, electric monitoring

1. 緒 言

近年, 炭素繊維を土木構造物材として活用する機会が増加する傾向にある。例えば, 1990 年頃から塩害の深刻な地域のコンクリート橋の補強筋として CFRP ケーブルが適用され始め¹⁾, CFRP を PC 鋼線の代替部材として採用した施工例が増え続けている²⁾。また, 1995 年 1 月の阪神・淡路大震災を契機に, CFRP シートによる高架橋柱などの補修・補強が広範な業種を巻き込んで取り組まれ, 実績を挙げている^{2,3)}。さらに, 今後の動向が注目されるものとして各種橋梁への CFRP の適用^{4,5)}や CFRP による鋼材の補修・補強^{9,10)}などが考えられ, 検討が進められている。

ところで, 炭素繊維複合材 (CFRP) の用途にケーブル材としての使用法が考えられるが, CFRP ケーブルが撚り線である場合には, 図-1 に示すように, ケーブル全体としては単なる引張り力であっても, 内部の素線の集合体から生ずる振り力が作用する。このとき, ケーブルの末端の回転を拘束した状態にすると末端には振りモーメントが作用し, 末端の回転を自由にすると, ケーブルは撚りを戻す方向に自転するため, 各素線への張力配分が変化する。このように, ケーブルは末端の拘束条件によって全く異なる引張り挙動を示す。末端の回転を自由にして引っ張った場合の撚り線は, その撚り方や寸法, あるいは引張り負荷中の撚り戻しの影響を受け, 非線形な挙動を示す。しかし, 末端の回転を自由にした場合のケーブルの引張り特性は, 鋼索も含め全く未解明である。

一方, ケーブル類は, 吊橋や高塔のステイ索などのように, 人が近寄りにくい場所に敷設される場合が多く, また長尺部材として使用されるため, 点検に大きな労力を必要とする。さらに, 目視検査では, 熟練が必要とされる。CFRP ケーブルが自己の健全性や負荷を検出するセンサー機能を獲得すれば, 遠隔地からの常時集中監視が可能になり, 構造物の点検・維持補修に省力化が図れる。

さて, 複合材料を用いた知的構造物・部材の実現性は, 材料の健全性に関するモニタリング技術¹¹⁾を, いかに簡便かつ確実なものにできるかに係っている。例えば, CFRP の場合では, 導電性を持つ強化繊維を健全性センサーとして用いることができれば, 最も直接的な評価技術となり得る。このような観点から, 炭素繊維の導電性に関連した研究は, 古くから扱われてきている^{12,13)}。例えば Berg らは炭素繊維の伸びと電気抵抗変化の関係について研究し, かつ, 電気抵抗計測による CFRP のひずみ, 過負荷や損傷の検出への展望について述べている。また, 津島ら¹⁴⁾は, CFRP 一方向材に引張り負荷を与えてから, 除荷した際の電気抵抗変化にはヒステリシスが生じることを明らかにした。さらに, CFRP の線材について, 塚田ら¹⁵⁾や上田¹⁶⁾,¹⁷⁾は, 疲労試験において電気抵抗などの計測を行なって損傷との関係を報告している。現在までの電気抵抗計測による CFRP の損傷検出に関する研究は, 平板材に対するものが主流¹⁸⁾であり, 主に破壊に先立ち生じる積層板の層間剥離の検出に力が注がれている。また, CFRP 自体の破壊までの損傷進展と電気抵抗変化との関係は, 正確には把握さ

れていない。ここで、CFRP の破壊機構の解明、損傷や荷重履歴と電気抵抗など各種パラメータとの対応関係を明らかにするためには、材料に段階的な損傷を与え得る負荷～除荷試験を行なうことが有効であると考えられる。

そこで本研究は、通常、構造物に用いられる端末の回転を拘束した場合、また輸送機械の分野（曳航索、係留索、操縦索、吊索など）で重要となる回転自由の場合のCFRP 撚り線ケーブルの引張負荷～除荷試験を行なって、それぞれの場合の破壊にいたるまでの挙動を実験室レベルで調べた。その際、電気抵抗計測を素線の集合体であるCFRP ケーブルに対して適用して、未着手である履歴荷重の判定法について検討したものである。

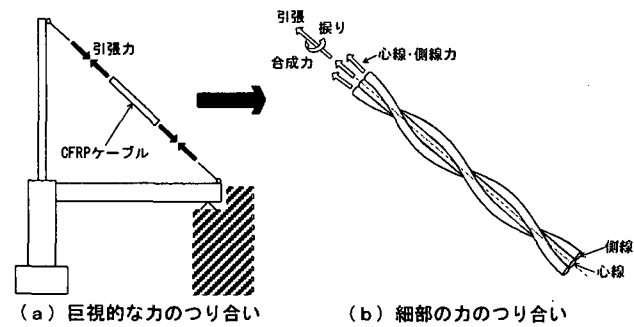


図-1 ケーブルに働く力

2. 実験方法

2.1 供試体等

供試体のケーブルは、図-2に示す1本の心線のまわりには6本の側線をらせん状に撚った公称径 10.5 mmの市販品である。このケーブルはすでに耐食性を必要とされる地域でのコンクリート構造の補強筋やグラウンドアンカー、また、高速道路橋の桁補強工事に使われた実績を持ち、最も一般的な撚り線の撚り方で製造されたものである。このように、本研究では撚り線に関する最も基礎的な力学特性を把握するため、本ケーブルを供試材として選んだ。このケーブルの心線および側線に使用される素線は、図-2(c)に示すように直径 7 μ m の炭素繊維 12000 本にエポキシ樹脂をしみ込ませ、さらにこれを複数本束ねて直径 3 mm の大きさに成形したものである。参考までに素線断面の電子顕微鏡 (SEM) 写真から直線法で調べた繊維体積含有率は 68% である。これは、FRP の全体積に対する強化繊維の体積の割合を示したものである。図-2(b)に示すように心線のまわりを6本の側線がらせん状に撚られて取り囲む構造となっている。側線のらせんピッチは 130 mm であり、図-2(a)に示すように供試体の固定治具長を除いた純標本長はピッチの 1.5 倍である 200 mm とした。この供試体には、実験目的に応じるために、以下のような工夫をしている。

(1) 素線電気抵抗計測

各素線の電気抵抗を計測するために、供試ケーブルの各素線が CFRP の本体の外側にあるポリエステル繊維の保護被覆によって、個々が電気的に絶縁されていることを確

認したうえで、図-3に示すように、ケーブルの各素線の両端にドリル孔をあけ、そこにリード線を挿入のうえ、導電性塗料で取り付けた。

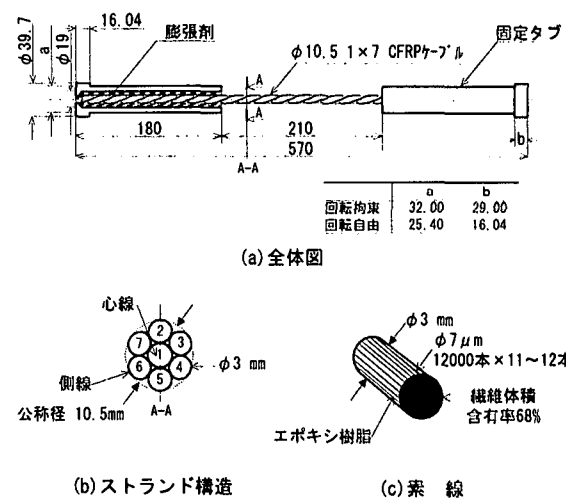


図-2 供試体

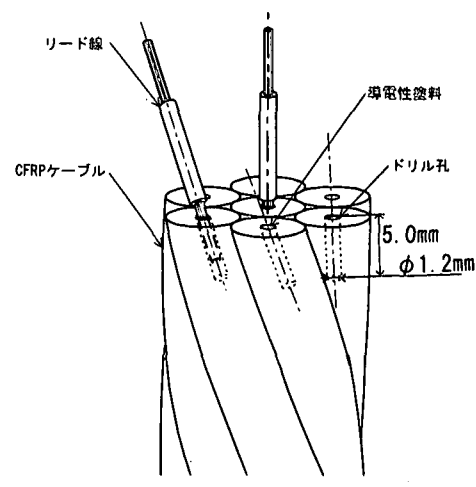


図-3 電気抵抗計測用電極の取付け

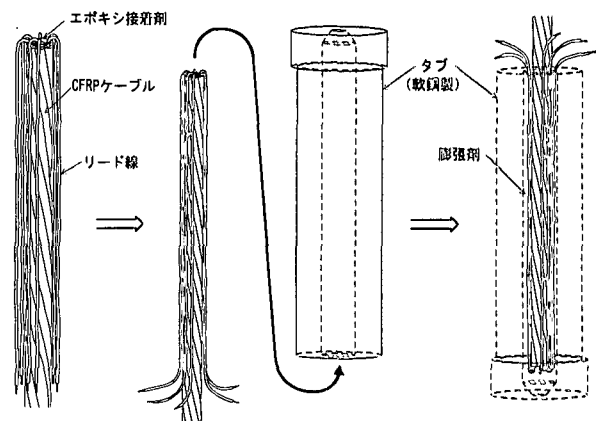


図-4 固定タブの取付け

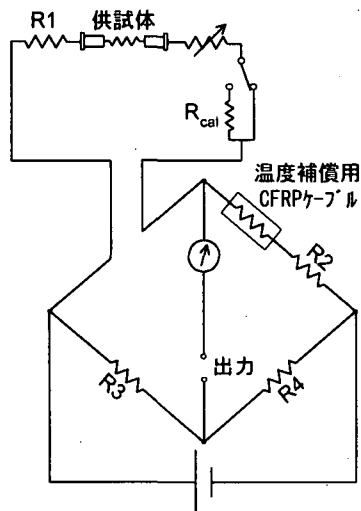


図-5 電気抵抗計測用のブリッジ回路

これを、図-4に示すように、末端で折り返し、接合したタブの口元から出して試験中の各素線の電気抵抗計測ができるようにしてある。

試験中の各素線の電気抵抗変化 ΔR は、素線両端のリード線を図-5に示すひずみゲージ計測に使用するブリッジ回路¹⁸⁾に組み込むことで次式によって求められる。

$$\Delta R = \frac{R_{cal}}{V_{cal}} \cdot \Delta V \quad (1)$$

ここに、 R_{cal} は校正用抵抗の抵抗値、 V_{cal} は校正電圧値、 ΔV はブリッジ電圧の変化である。なお、本研究では、CFRP ケーブルの素線長手方向の電気抵抗変化 ΔR を、固定タブ間の初期抵抗 R_0 で除した無次元化量 $\Delta R/R_0$ を電気抵抗変化とする。

(2) ケーブルと固定タブ治具の取り付け

図-1(b)に示すように、撚り線ケーブルでは、引張力を加えると同時に撚り線を緩める方向に回転しようとする撚り力が生ずる。回転拘束の実験では撚り回転をしないように拘束しているのでこの撚り力は、固定タブと撚り線ケーブルとの摩擦力となって生じる。この摩擦力によって、固定治具が緩むと半固定状態になってしまう。これを防止するため、図-4に示すように固定タブとケーブルとの間に建築物の破砕に用いられる膨張材を注入して固定した。また、回転拘束の試験中に回転撚り変形を拘束するとともに、ケーブルに生じた撚り力を測定するため、図-6に示すような固定治具を使用して固定タブをつかんだ。さらに、回転自由の試験の場合は、固定治具による回転の拘束を解放した。

(3) アコースティックエミッション (AE)

材料内の損傷進行の程度を計測する手法の一つとしてアコースティックエミッション (AE)¹⁹⁾がある。

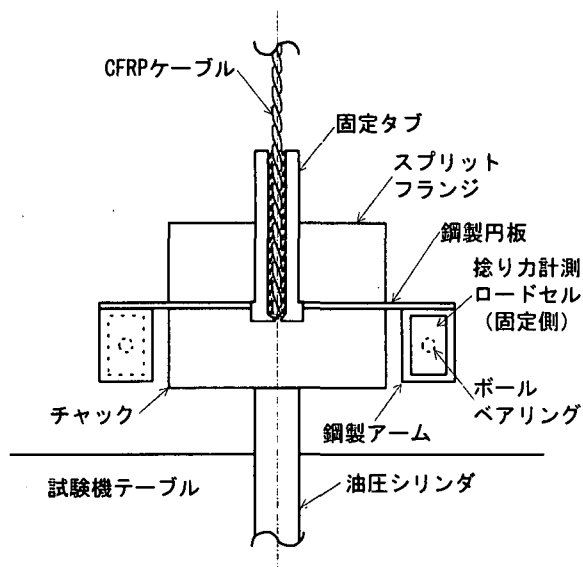


図-6 固定および撚り力計測要領

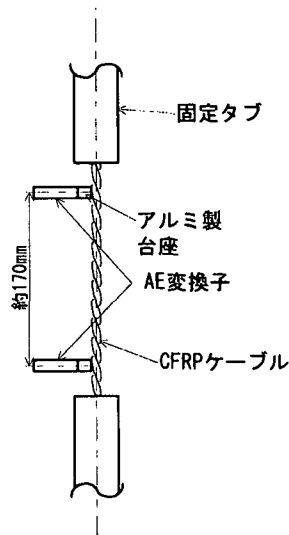


図-7 AE 計測

本研究においても、図-7に示すように、供試体の1本の側線上両端、タブ近傍に2個のAE変換子を取り付けて計測した。AE変換子はケーブルの側線上に酢酸ビニル系樹脂接着剤で接着した直径5mmのアルミニウム製の円柱台座にビニールテープで巻いて固定した。これは、ケーブルの破断時の衝撃で変換子が破損するのを防ぐための措置である。また、アルミ製台座は、一端がケーブル側線の曲率に合わせた形状に加工されており、ケーブルに密着できるようになっている。プリアンプの利得は40dB、メインアンプの利得は20dB、しきい値は45dBとし、試験中のAE事象数、振幅、エネルギー（包絡線検波波の積分値）、持続時間、計数率を計測した。

2.2 試験要領

試験はサーボコントロール式疲労試験機を使用して、図-8に示す要領で行った。

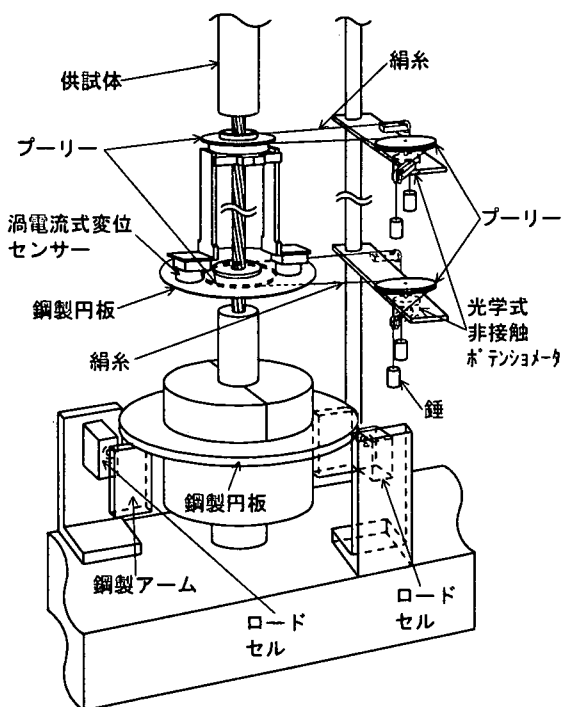


図-8 試験要領

計測項目は、①標点間距離、②引張力、③振り力、④燃り戻し、⑤素線電気抵抗、⑥AEとし、図-9に示す計測システムによって計測した。荷重計測は試験機付属のロードセルを、ケーブルの伸びや燃り戻しの計測には図-8に示す測定治具を用いた。ケーブルの軸線に関して対称に配置した2台の渦電流式変位センサー（分解能： $8\mu\text{m}$ ）と直径160 mm、厚さ0.5 mmの鋼製円板との距離の変化量の平均値がケーブルの標点間の伸びを表す^{20,21)}。標点に円板を用いるのは、引張試験中のケーブルの回転に追従させるためであり、変位計測に2台のセンサーを用いるのは、ケーブルの曲がりおよび燃りの不均一性の影響を除去するためである。回転拘束の場合は、図-6、図-8に示す治具を用い、試験機のシリンダー回りに点対称に配置した2台のロードセル（秤量0.5kN）によってシリンダーの回転を拘束するとともに、振りモーメントを計測した。また、回転自由の場合には、上下の伸び計測用標点に取り付けたプーリーと光学式非接触ポテンショメータ（分解能： 0.18° 、測定範囲： $0\sim 340^\circ$ ）とを絹糸で連結して上下標点それぞれの回転角を計測し、その差を標点間の燃り戻し角とした。絹糸の両端には、緩みや滑りを防ぐために錘を吊り下げた。载荷の要領は、図-10に示すように、载荷速度30kN/min、荷重ステップ10kNとし、回転拘束、回転自由ともに5本以上の供試体を試験に供した。負荷～除荷試験を、これに先立ち変位制御で行なった引張試験と異なり荷重制御で実施したのは、変位制御では負荷～除荷試験の制御が困難と判明したためである。荷重速度は必ずみ速度が引張試験とほぼ等しくなるように設定し、引張試験における計測結果に制御方式の相違による差が生じないことを確認してから負荷～除荷試験を行なった。

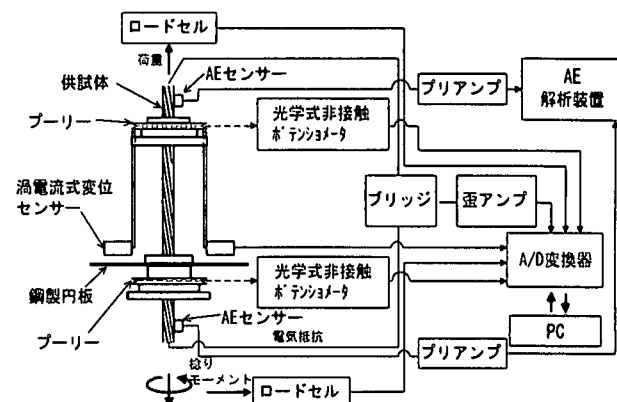


図-9 計測システム

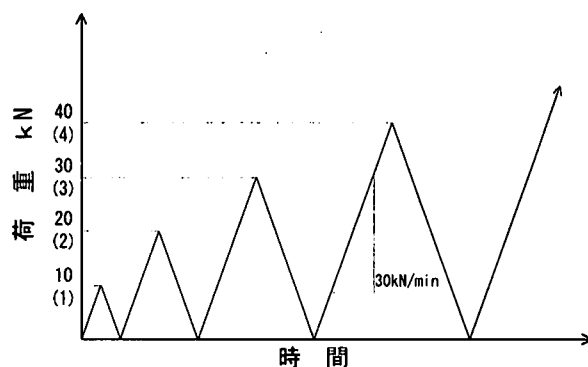


図-10 負荷～除荷試験の載荷要領

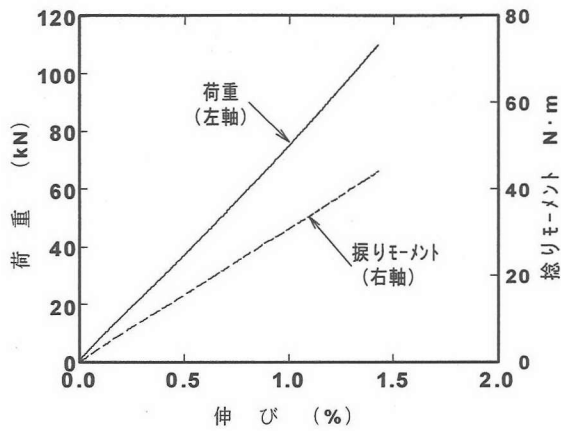
なお、本研究で扱う応力、引張り強さ等は、引張力を公称断面積で除したものであり、各素線での真の応力とは異なる。

3. 実験結果と考察

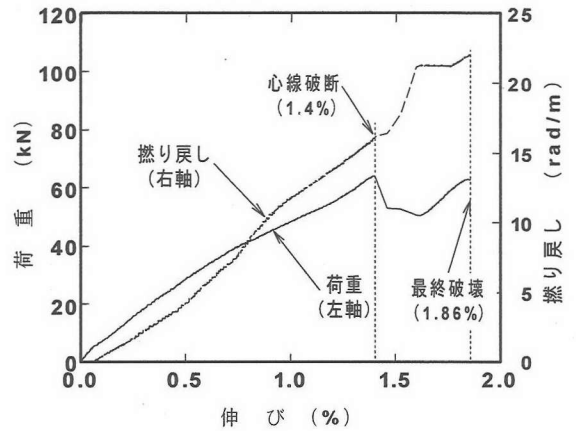
3.1 引張試験結果

引張試験は負荷～除荷試験とは異なり、変位制御とし、変位速度 1.5 mm/min で試験を行った。

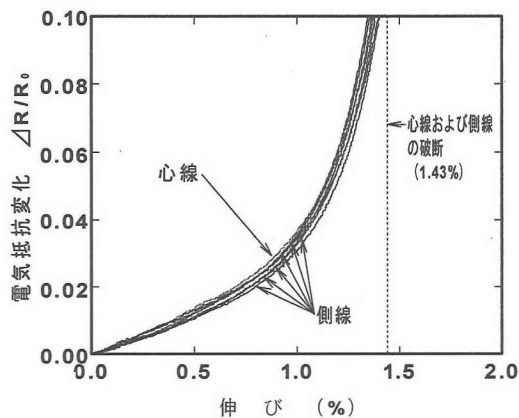
図-11(a)に回転拘束の場合の荷重，振りモーメント～伸び関係，(b)に各素線の電気抵抗変化～伸び関係を示す。回転拘束の場合の荷重～伸び関係は，精ちに分析すると伸び0.2%付近で傾きがわずかに減少するが，最終破壊までほぼ直線で，引張強さは平均110kN（5体），最終破壊までの伸びは約1.4%である。また，鋼撚り線のように引張り負荷中の心線と側線の接触の程度や撚りの不均一によって，載荷初期の剛性が大きく増加する現象²²⁾は見られない。載荷初期の荷重～伸び関係の直線部分の傾きから求めた引張弾性係数は，平均で134GPaである。一般に撚り線構造の初期の遊びを除去するプレテンション加工を施していない鋼撚り線の引張弾性係数は，これを構成する素線の引張弾性係数より小さくなるといわれているが，供試ケーブルの引張弾性係数は別途求めた素線のそれ（150GPa）の約90%であった。振りモーメントについても線形的に増加し，最終破壊時には45N・m程度に達している。最終破壊時は全ての素線が同時に激しく破断し，写真-1に示すように，ケーブルはばらばらになる。



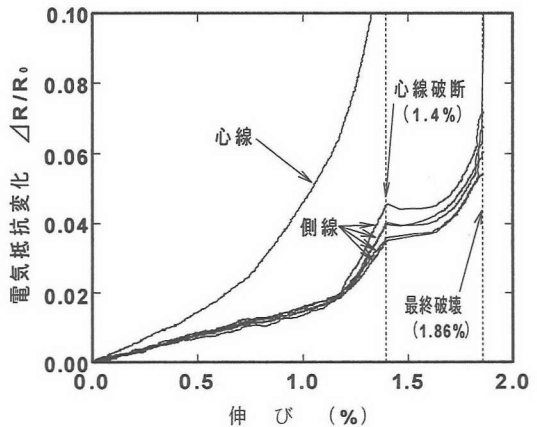
(a) 荷重～伸び関係



(a) 荷重～伸び関係



(b) 電気抵抗変化～伸び関係
図-11 回転拘束の引張試験結果



(b) 電気抵抗変化～伸び関係
図-12 回転自由の引張試験結果



写真-1 回転拘束引張試験における破断の状況

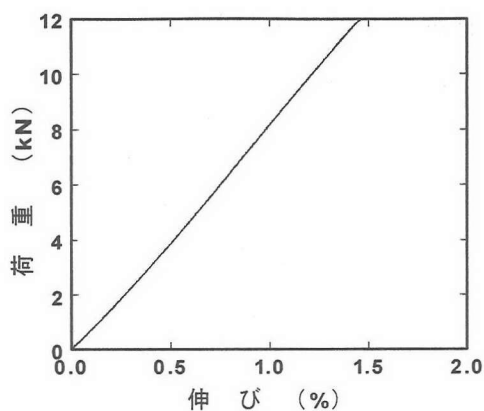


写真-2 回転自由引張試験における破断の状況

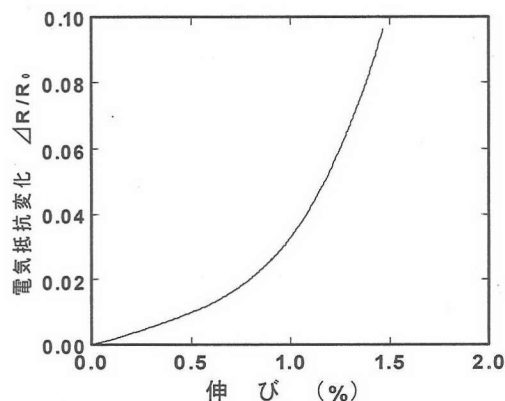
図-11(b)に示す回転拘束の場合の伸びに対する電気抵抗変化は伸び 0.5%付近まではほぼ直線であるが、その後は傾きを増しながら単調に増加する。また、電気抵抗変化曲線は心線、側線の区別なくほとんど重なって変化する。よって、側線相互の荷重負担はほぼ均一であると考えられる。また、載荷初期の直線部分は繊維の伸びとポアソン効果による電気抵抗変化を表し、その後の傾きの増加は繊維破壊が連続的に進行することに対応していると考えられる。

図-12(a)は回転自由の場合の荷重、単位長さ当たりの撓り戻し角～伸び関係、(b)には各素線の電気抵抗変化～伸び関係を示す。回転自由の場合、ケーブルは引張られると、撓りを戻す方向に自転する。

供試ケーブルの場合では、荷重 3kN 付近から撓り戻しが発生し始め、荷重～伸び関係の傾きは大きく減少し、その引張弾性係数は回転拘束の 50%程度になる。その後、荷重 20kN を超えるあたりから荷重～伸び関係の傾きは徐々に減少し、荷重が 60kN になると破壊音とともに心線が破断する。すなわち、ケーブルの耐力は、回転を自由にするると拘束された場合より 40%以上低下する。心線の破断と同時にケーブルの撓り戻しは 17rad/m から 21rad/m まで大きく増加し、荷重が 50kN まで急に減少する。その後、荷重および撓り戻しは再び増加し始め、心線破断時の荷重 (60kN) に達すると全ての側線が同時に破断する。この時の撓り戻しは約 22rad/m である。また、伸びは心線破断時が約 1.4%で、最終破壊時は約 1.8%である。

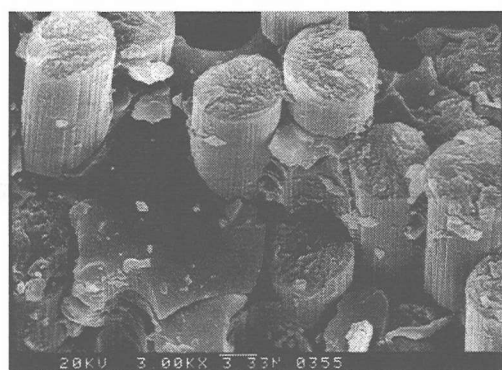


(a) 荷重～伸び関係



(b) 電気抵抗変化～伸び関係

図-13 素線の引張試験結果

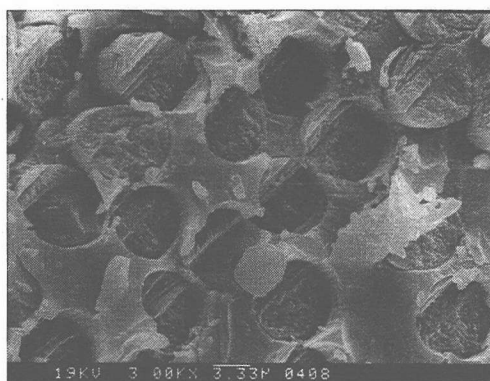


3.33 μm — (3000 倍)

写真-3 回転拘束における破断 (心線外周)

供試ケーブルの回転自由における引張強さは平均で 62kN (20 体) であり、回転拘束の場合の約 56% である。供試ケーブルを末端の回転を自由にして引っ張った場合、引張強さが減少するのは、撓り戻しの発生とともに、心線が先に破断するためと考えられる。撓り戻しの発生に伴い、側線は軸方向に伸びる余地が生まれるが、心線は側線よりも早く限界伸びに達して破断してしまう。このように、最終破壊時の強度は残存している側線 6 本の強度に帰することになる。

回転自由の場合の電気抵抗変化は、心線と側線とは全く異なり、心線のみは、回転拘束の変化曲線に良く似ている。



3.33 μm — (3000 倍)

写真-4 回転自由における破断 (心線外周)

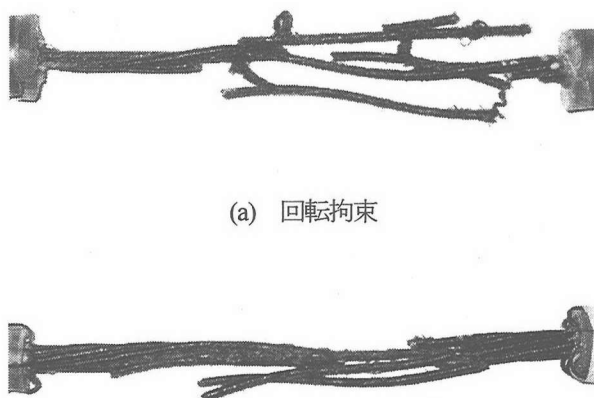
すなわち、心線の電気抵抗変化は、伸び 0.5% 付近まではほぼ直線で、その後は次第に傾きを増し、伸び約 1.4% の心線の破断時に急増する。回転自由における最終的な破壊の状況は、写真-2 に示すとおりであり、回転拘束の場合ほど激しく各素線が飛び散ることはない。以上の観察より、回転自由の場合のケーブルの破壊は、心線の破断に支配されていると言え、それ以後の側線破断までは、いわゆる冗長領域と考えられる。そこで、心線のみ素線応答が回転拘束と回転自由において、最終破壊時の荷重を 100% としたときの相対荷重に対して一致した変化を示すのであれば、後述する負荷～除荷試験における履歴荷重モニタリングも心線に焦点を当てるのが可能である。図-13 は別途行った素線のみに対する引張実験の荷重～伸び関係および、電気抵抗変化～伸び関係を示している。素線 1 本での荷重～伸び関係も破断まではほぼ直線で、破断伸びは約 1.4% である。この素線の場合の伸びに対する電気抵抗変化は、回転拘束 (図-11(b)) および回転自由 (図-12(b)) の心線の変化に一致することがわかる。

写真-3 には、回転拘束の心線の破断面の SEM (電子顕微鏡) 写真を示す。写真は外周部分を示しているが、炭素繊維の破断面には小さな凹凸がある引張破壊特有の痕跡が見られた。この様子は、心線の中心部分および素線のみ引張試験の破断面にも認められ、これらはいずれも引張破壊による破壊であると考えられる。写真-4 には、回転自由の場合の心線外周における破断面の SEM 写真を示す。この破断面は、小さな凹凸を持つ部分と縞模様の領域とがある曲げ破壊特有の様相を呈し、写真-3 とは異なることがわかる。しかし、このような破断面は外周の一部にしか見られず、断面中心部のほとんどは、写真-3 と同様の断面であったことから、心線の破壊は端末条件のいかんにかかわらず引張破壊によって生じたものと考えられる。

3.2 負荷～除荷試験結果

(1) 破壊状況

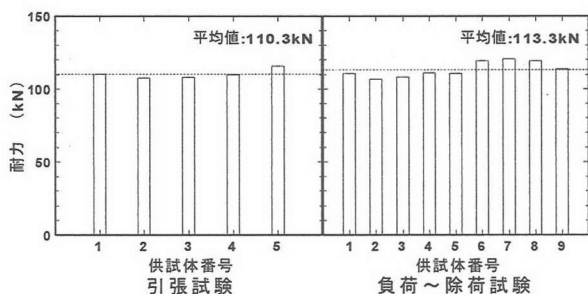
写真-5 に負荷～除荷試験における破壊を示す。回転拘束、回転自由試験ともに、それぞれ同一条件の引張試験と同様の破壊の形態を示している。ちなみに、微視的にも写真-3、4 と同様であった。



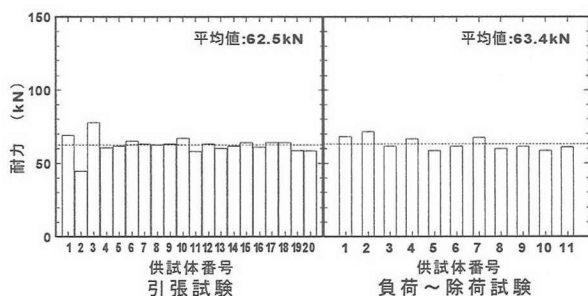
(a) 回転拘束

(b) 回転自由

写真-5 負荷～除荷試験における破断の状況



(b) 回転拘束



(b) 回転自由

図-14 引張試験と負荷～除荷試験の耐力比較

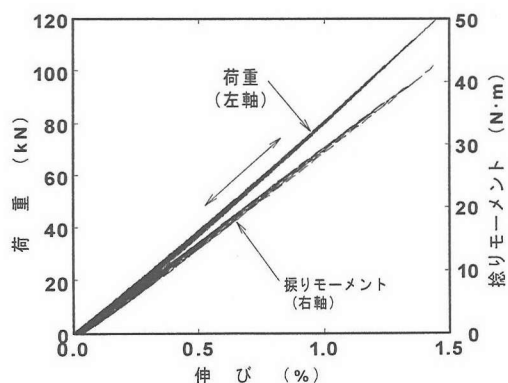


図-15 負荷～除荷試験の荷重～伸び関係 (回転拘束)

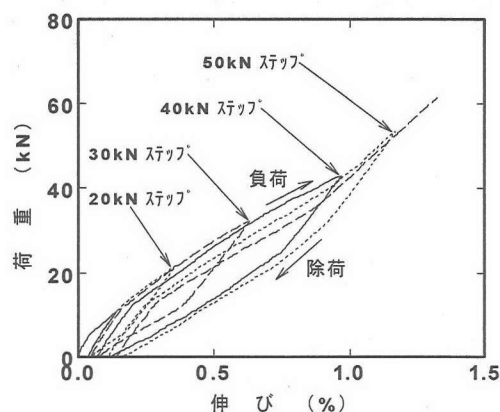


図-16 負荷～除荷試験の荷重～伸び関係 (回転自由)

(2) 耐力

図-14 に負荷～除荷試験で得られた破断耐力を単純引張実験結果と比較して示す。これより、負荷～除荷試験においても CFRP ケーブルの破断耐力は、回転拘束条件に応じて変化するが、単純引張耐力とほぼ等しいことがわかる。一般に CFRP は、きわめて疲労特性に優れることが知られているが、本実験結果においても繰り返し载荷による耐力への影響はほとんど見られなかった。

(3) 各種物性変化

図-15、図-16 にそれぞれ回転拘束および回転自由の場合の負荷～除荷試験における荷重～伸び関係を示す。図-15 の回転拘束の場合、各荷重ステップの伸びと荷重は最終破壊までほぼ比例関係にあり、負荷、除荷を繰り返しても前回履歴に対してほとんどずれを生じることはない。これは、CFRP 特有の性質である。また、振りモーメントも比例関係を保っている。残留伸びは荷重ステップごとにわずかながら累積されていくが、最終ステップでも 0.02% 程度であり、鋼然り線のように初回負荷で大きく伸びる²⁾ことはない。

図-17 に各荷重ステップの引張弾性係数の推移を示す。回転拘束の場合、繰り返し载荷によって、引張弾性係数がわずかに減少していく傾向があるが、10～15% の低下であり、ほぼ一定と考えられる。

一方、図-16 に示す回転自由の場合、各荷重ステップの荷重～伸び関係には明瞭なヒステリシスが生じている。残留伸びは、各荷重ステップごとに累積され、最終破壊直前のステップでは約 0.14% と回転拘束の場合の 7 倍にもなる。破断伸びは約 1.3% であり、単純引張りの心線破断時とほぼ等しい。

図-18 には、荷重と撓り戻し角の時間変化を示す。荷重は制御されて線形の三角波を形成するのに対して、撓り戻し角の応答は、台形の波を形成しており、さらに、上昇、減少時にも若干の非線形性が現われている。特に重要なことは荷重を零に戻した時の残留回転角が徐々に増加していることである。図-17 に示す回転自由の弾性係数は、図-18 に示すような、繰り返し载荷に伴う撓り戻しの累積によって、供試ケーブルの撓り角(ケーブルの軸線に対する角度)が減少するため、増加するものと考えられる。

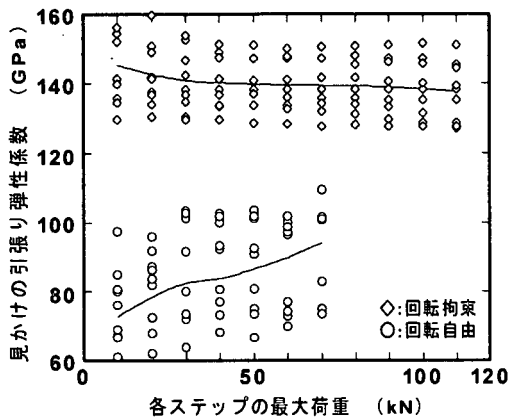


図-17 負荷～除荷試験の引張弾性係数の変化

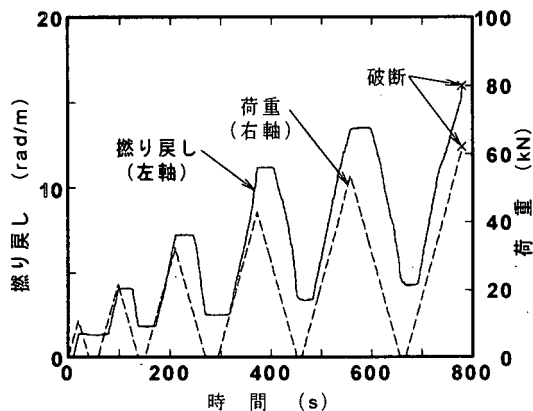
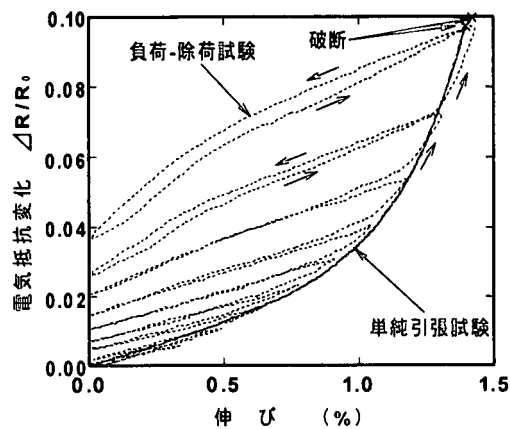


図-18 回転自由負荷～除荷試験の挙動

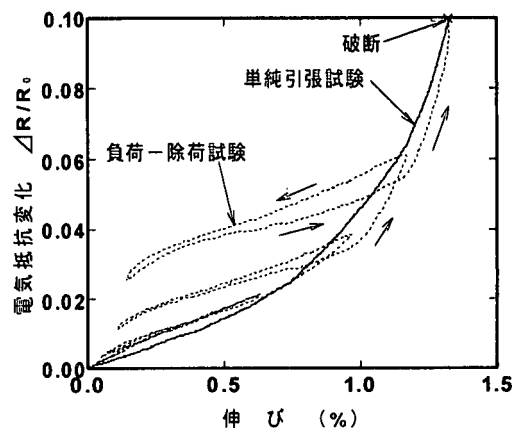
なぜなら、つる巻バネと同様に捩り線は、捩り角が小さいほど引張弾性係数が高くなるからである。

3.3 電気抵抗変化と破断予測

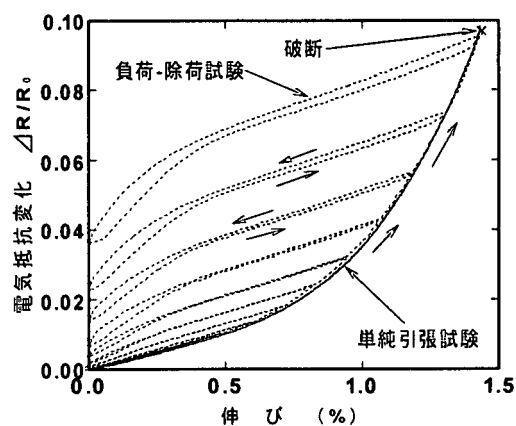
図-19(a), (b)には、それぞれ回転拘束および自由条件における心線の電気抵抗変化～伸び関係を示す。また、参考のために図-19(c)には素線における結果も示している。それぞれの図中には、比較のために単純引張試験における関係も示している。図-11, 12 および 13 で示したように、電気抵抗変化は、伸びに対して非線形的な単調増加曲線を示し、破断が近づくにつれて、その勾配は急になる。これに対して、負荷～除荷試験での曲線の包絡線は、明らかに単純引張り時の曲線にほぼ一致した曲線をたどっていることがわかる。ただし、図-19(b)の回転拘束をしない場合には、図-17, 18 で考察したように、荷重載荷の繰り返して心線と側線の応力配分が変化するため、振り回転を拘束した場合に比べて、一致度が小さい。除荷領域と履歴荷重までの再負荷領域の応答は、単純引張試験の経路とは異なったものになるが、回転拘束の場合には、図-19(c)に示した素線のみのもとはほぼ相似のヒステリシスを描くことがわかる。また、後述するように、履歴荷重があると、残留電気抵抗に変化が生じており、履歴最大荷重が大きいと大きくなることわかる。



(a) 回転拘束、心線



(b) 回転自由、心線



(c) 素線

図-19 負荷～除荷試験の電気抵抗変化

ここで、興味あることは、破断時の電気抵抗変化は、繰り返し荷重を受けているにも拘わらず、回転拘束、自由および素線において、単純引張試験のものとはほぼ等しいことである。これは、図-14 で考察した破断荷重が低下しないことに関連していると考えられ、CFRP 特有のものとも考えられる。とにかく、モニタリングシステムの視点からは、きわめて便利な特徴である。すなわち、拘束条件に応じた単純引張試験で得られた破断電気抵抗変化の事前情報を

基準として、繰り返し荷重下における電気抵抗変化をモニタリングすれば、破断に対する精度の高い予測が可能であることを示唆している。ここで、これらの荷重～除荷試験における電気抵抗計測結果から、供試ケーブルの損傷およびその電気抵抗変化の機構について考察する。電気抵抗が伸びに対して比例し、ヒステリシスを生じない荷重領域では、供試ケーブルは強化繊維である炭素繊維の破断が発生していない健全な状態であると考えられる。電気抵抗変化曲線が伸びに比例しなくなり、傾きが増加し始める荷重領域では、破断などの炭素繊維の損傷が進展し始めており、また、除荷の際の伸び0.3%付近までの電気抵抗変化は、破断せず残存した炭素繊維の伸びに対する電気抵抗変化を示していると考えられる。除荷時に伸びが0.3%付近より小さくなると、電気抵抗はさらに急激に減少するが、これはすでに破断した炭素繊維が再接触し始めるためと考えられる。次回ステップに再び荷重始めると、電気抵抗は前回除荷時と同一経路をたどるが、伸び0.3%付近でその勾配が減少するのは、それまで接触していた前回ステップまでで破断した炭素繊維の分離が完了するためとみられる。それ以降の電気抵抗変化は、健全で残存している炭素繊維の伸びに対する電気抵抗変化を示しており、また、荷重が履歴最大荷重を超過したあたりから電気抵抗変化曲線の傾きが急増し始めるのは、その時点で炭素繊維に新規の損傷が始まったことを意味していると考えられる。さらに、これらのことから、無荷重状態における残留電気抵抗は、損傷を免れた炭素繊維の量を示していると考えられる。

3.4 残留抵抗と履歴荷重

ここでは、荷重を零にした無荷重状態における過去に受けた最大荷重の推定について検討する。これが可能であれば、3.3節に示したような引張り荷重を加える必要がなく、実用上きわめて有用な履歴荷重の判定法になると考えられる。図-20には、履歴最大荷重を破断荷重で除した比率と各ステップで無荷重状態にしたときの電気抵抗、すなわち残留電気抵抗の関係を示している。なお、ここで示す残留電気抵抗とは、前述の電気抵抗変化と同一の無次元化量である。これより、回転拘束、自由および素線のいずれの場合も破断荷重の60%以上の履歴荷重を受けると残留電気抵抗が急激に増加する傾向が見られる。よって、残留電気抵抗にしきい値を設定することにより、履歴最大荷重が破断荷重に対してどの程度まで達していたかについて判定することが可能ではないかと思われる。例えば、図-20において、残留電気抵抗が0.01を超過した際に、履歴最大荷重の破断荷重に対する比が60%を超えると仮定してモニタリングする場合には、2個のデータが60%未満にもかかわらず超過していると判定され、10個のデータは60%を超えているにもかかわらず超過していないと判定されるミスを生じる。32個のデータが予測通り、60%を超過している。すなわち、予測的中率は、約80%とかなり高い。

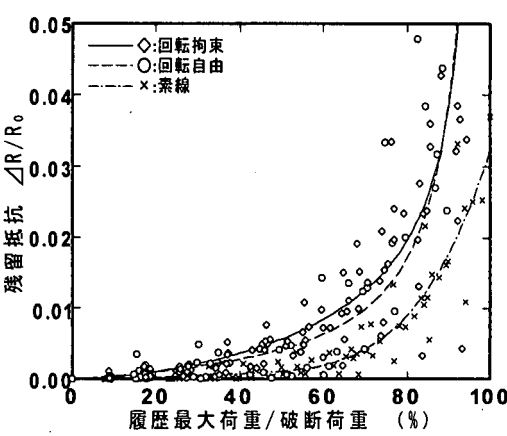


図-20 履歴最大荷重／破断荷重～残留抵抗関係

3.5 履歴最大荷重超過判定法

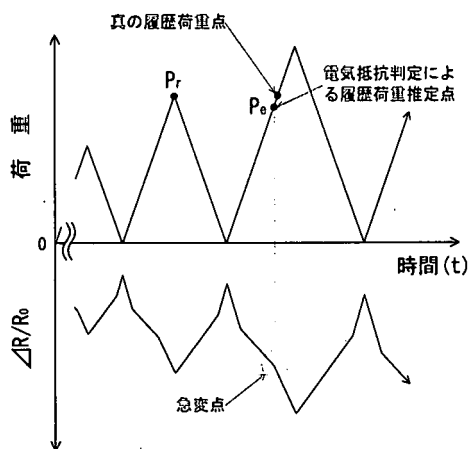
図-19では、除荷から再荷重すると履歴最大荷重までとそれを超過して以降では電気抵抗変化の挙動が異なることが示されている。この超過以降は、単純引張時の挙動とほぼ一致しており、何らかの新たな損傷が内部に蓄積されていくものと考えられる。

この観点から、モニタリングデータを使って増加中のケーブル張力が過去の履歴最大値を超過したか否かを判定することが可能であるか検討を行う。ここでは、電気抵抗変化とAEの2種類の情報に立脚する手法を比較考察する。図-21に電気抵抗変化およびAEモニタリングデータから、履歴最大荷重を求める方法を模式的に示す。また、図-22に回転拘束荷重～除荷試験の荷重90kN以上のステップにおける荷重、AE累積事象数および電気抵抗変化の計測結果を示す。既に履歴荷重がある場合、電気抵抗変化による方法では再荷重し始めた後に一旦電気抵抗変化の増加率がやや小さくなる。その後、概ね履歴最大荷重値付近に達すると増加率が若干大きくなる。この増加率がその直前の値より10%以上大きくなった時の荷重を推定履歴最大荷重と定義する。

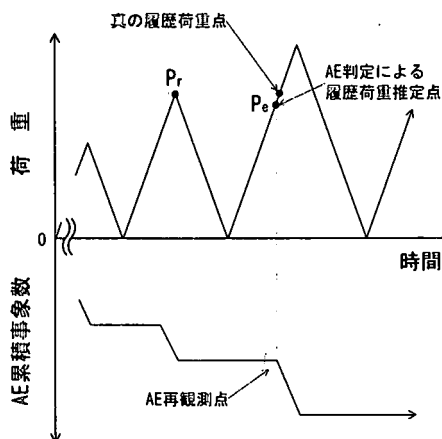
AEによる方法では、履歴最大荷重より小さな荷重ではAE事象があまり増加しないが、履歴最大荷重を超過すると急激に増加する現象を利用する。すなわち、不感帯領域から再びAE事象が観測され始めた時の荷重を推定履歴最大荷重と定義する。予測目的から考えて、推定値と実際の履歴最大荷重が一致するほど良い推定法となる。そこで、次のフェリシティ比を定義する^{19),23),24)}。

$$K = P_c / P_r \tag{2}$$

ここで、 K ：フェリシティ比、 P_c ：推定履歴荷重、 P_r ：実際の履歴最大荷重
図-23に回転拘束、自由および素線に対するフェリシティ比の変化をプロットして示している。図-23(c)に示した素線の場合には、履歴荷重が破断荷重に近づくにつれて、電気抵抗変化による方法でも、AEによる方法でもフェリシティ比は0.95程度まで減少する傾向が見られる。ただし、電気抵抗変化による方法の方がAEよりもまとまりが良く、



(a) 電気抵抗による方法



(b) AEによる方法

図-21 履歴最大荷重 P_r とその推定値 P_e

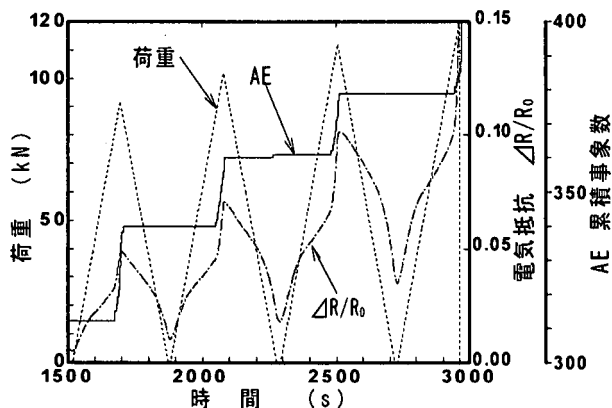
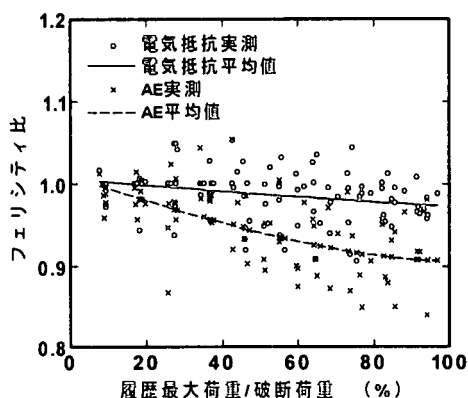


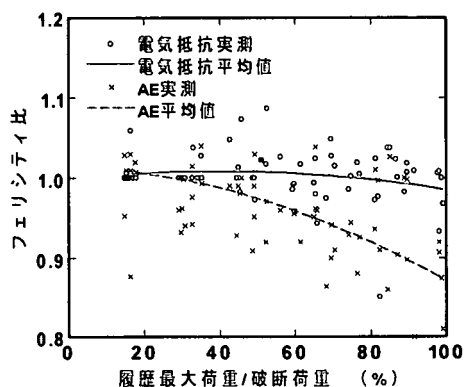
図-22 荷重, AE および電気抵抗の変化 (回転拘束)

ばらつきが小さいことがわかる。

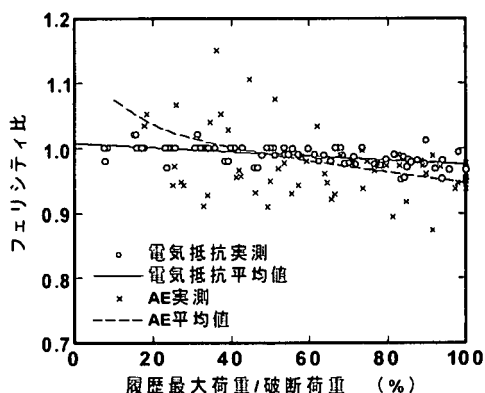
図-23(a)の回転拘束下の実験において、電気抵抗変化による方法のフェリシティ比は、ややばらつきが増加しているものの、素線の場合とほぼ同様な傾向である。一方のAEによる方法では、破断荷重が近づくにつれて、フェリシティ比は明瞭に 1.0 より小さくなっている。すなわち、実際の履歴最大荷重を超えていないに、推定値は超過したと判定し、履歴最大荷重を小さく見積もる傾向がある。



(a) 回転拘束



(b) 回転自由



(c) 素線試験

図-23 フェリシティ比と荷重履歴の関係

図-23(b)の回転自由の場合には、さらにばらつきが大きくなるものの、フェリシティ比が電気抵抗変化に立脚する方が 1.0 を概ね保つ傾向は全く同様であることがわかる。すなわち、電気抵抗変化をモニタリングして履歴最大荷重の超過を判定する方法の方がAEによる方法よりも優れていることがわかる。

4. 結 言

本研究は、CFRP 撚り線ケーブルの撚り戻り回転を拘束した場合と自由にした場合の2条件下において、荷重を負荷～除荷～再負荷と徐々に増加させる引張負荷～除荷試

験を行ったものである。また、その際行なった素線の電気抵抗およびAEのモニタリングを併用することにより、損傷や履歴荷重の判定手法について検討した。得られた成果を要約すると以下ようになる。

- (1) CFRPの破断強度は、負荷～除荷の荷重条件下においても、単純引張試験のものとはほぼ同じである。
- (2) 振り回転を拘束したのに対して回転を自由にした場合の破断耐力は、約60%に低下する。
- (3) しかし、回転自由条件下では、繰り返し載荷に伴う撓り戻しの累積によって、供試ケーブルの撓り角が減少するため、供試ケーブルの引張弾性係数は増加する。
- (4) 破断限界は、回転拘束および自由に共通して、心線の破断によって定義が可能である。
- (5) 回転拘束および自由に共通して、心線の電気抵抗変化～伸び関係は、極めて安定した再現性があり、素線の引張試験結果ともよく一致する。
- (6) モニタリングデータの活用の観点から、電気抵抗変化の方がAEよりも有用であると考えられ、破断荷重の近接、履歴最大荷重の超過判定を行なうことが可能である。

以上の結果は実験的成果であるが、将来的にはコンピュータソフトとの組合せにより、有用なモニタリングシステムやスマートストラクチャーの構築が期待できる。

謝 辞

本研究にあたり、志賀浩介研究科学生の協力を得た。ここに記して謝辞とする。

参考文献

- 1) CFCC 技術資料, 東京製鋼株式会社, 1993.
- 2) 林田道弥: 土木・建築分野でのピッチ系高弾性炭素繊維の利用, 日本複合材料学会誌, 25, 1, pp.30-37, 1999.
- 3) 伊庭良知, 植村政彦, 村上信吉, 斉藤誠, 小林朗: 建築, 土木構造物の補修・補強用フォルカトウシートの開発, 日本複合材料学会誌, 25, 2, pp.73-83, 1999.
- 4) 西崎到: FRPの土木構造物材料への利用の動向, 日本複合材料学会誌, 26, 2, pp.37-42, 2000.
- 5) 江口立也, 前田研一, 森園康之, 中村一史, 藤野陽三: 超長大吊橋メインケーブルへのCFRPの適用に関する2,3の考察, 第1回FRP橋梁に関するシンポジウム論文集, pp.81-86, 2001.
- 6) 前田研一, 森園康之, 中村一史, 江口立也, 藤野陽三: 長大, 超長大CFRP主ケーブル吊橋の経済性と耐風安定性, 第1回FRP橋梁に関するシンポジウム論文集, pp.87-94, 2001.
- 7) 三好崇夫, 西村宣男, 武伸明: CFRP wireと鋼線で構成したHybrid Cableの超長大吊橋ケーブルバンド部における強度評価, 第1回FRP橋梁に関するシンポジウム論文集, pp.95-102, 2001.
- 8) 建設省土木研究所材料施工部化学研究室, (社)強化プラスチック協会, 石川島播磨重工業(株), 佐藤工業(株), ショートボンド建設(株), 東急建設(株), (株)富士ビークス編: 繊維強化プラスチックの土木構造物材料への適用に関する共同研究報告書(Ⅱ), FRPを適用した吊橋の検討, pp.236-245, 1999.
- 9) 山口晃司, 金原勲, 景山和郎: 鋼材のき裂進展に対する補強FRPシートの抑制効果に関する実験的検討, 第29回FRPシン

ポジウム講演論文集, pp.131-132, 2000.

- 10) 大倉一郎, 福井唯夫, 松上泰三: 炭素繊維シートの鋼板疲労亀裂補修への適用, 第29回FRPシンポジウム講演論文集, pp.133-136, 2000.
- 11) 武田展雄: FRPの耐久性評価とヘルスマニタリング技術, 第1回FRP橋梁に関するシンポジウム論文集, pp.1-12, 2001.
- 12) C.A. Berg, E.H. Cumpston and A. Rinsky: Piezoresistance of graphite fiber materials, Fibre Science and Technology, 4, pp.153-158, 1971.
- 13) D.B. Fishbach: Carbon fiber piezo-resistance characteristics, Journal de chimie physique, 84, 11/12, pp.1401-1406, 1987.
- 14) 津島栄樹, 吉澤弘之: 電気抵抗の利用によるUDCFRPの破壊過程の観察方法, 日本機械学会材料力学講演会講演論文集, pp.203-205, 1990.
- 15) 塚田和彦, 花崎純一: 炭素繊維複合材ロープの引張疲労の非破壊的モニタリングについて, 資源・素材関係学会合同秋季大会資料, O-3, pp.7-10, 1995.
- 16) 上田和彦: 炭素繊維複合線材の引張両振り曲げ疲労試験について, 資源・素材関係学会合同秋季大会資料, O-2, pp.4-6, 1995.
- 17) 上田和彦: 炭素繊維複合線材の引張両振り曲げ疲労破壊の進行について, 資源・素材関係学会合同秋季大会資料, B4-8, pp.91-94, 1998.
- 18) たとえば轟章, 小林英男, 松浦克也: 層間はく離検出的CFRP構造への電気ポテンシャル法の適用, 日本機械学会論文集 A-60, 574, pp.1458-1463, 1994.
- 19) たとえば尾上守夫, 山口楠雄, 仲佐博裕, 佐野謙一, 磯野英二, 渡辺哲夫: アコースティック・エミッションの基礎と応用, コロナ社, 1976.
- 20) 河田幸三, 板橋正章, 木村浩, 石上英征: CFRPケーブルの引張り力学挙動, 第36回構造強度に関する講演会講演集, pp.37-40, 1994.
- 21) H.Kimura, M.Itabashi and K.Kawata: Mechanical Characterization of Unidirectional CFRP Thin Strip and CFRP Cables under Quasi-Static and Dynamic Tension, Proceedings of the 9th US-Japan Conference on Composite Materials, pp.563-570, 2000.
- 22) ワイヤロープ便覧編集委員会編: ワイヤロープ便覧, 白亜書房, pp.346-360, 1967.
- 23) 志波光晴, 岸輝雄: GFRPの負荷一保持, 負荷一除荷試験のAE特性, 日本複合材料学会誌, 14, 2, pp.63-72, 1988.
- 24) 武藤範雄, 柳田博明, 関島謙蔵, 荒井康弘, 中辻照幸, 杉田稔: CFGFRP複合材料の電気抵抗測定による損傷検知, 日本機械学会論文集 A-60, 576, pp.1721-1728, 1994.

(2002年4月19日 受付)