

静索の経年損傷評価

～炭素繊維複合材料を活用した静索の繰返し軸荷重特性～

山 際 謙 太*¹ 本 田 尚*¹ 山 口 篤 志*¹ 佐 々 木 哲 也*¹

クレーンのジブ起伏に使用されている静索(ペンダントロープ)に、軽量化と工期短縮を目的として、炭素繊維複合材料ケーブル(Carbon Fiber Composite Cable, CFCC)を応用したCFペンダントの利用が期待されている。CFCCは現在のところジブの起伏といった変動荷重下での使用については実績が無いことから、CFペンダントの繰返し軸荷重試験を行い、荷重範囲と破断に至る繰返し数の関係を求めた。CFペンダントは破断荷重400kN全長500mm(以下、400kN試験片)と、破断荷重200kN全長1200mm(以下、200kN試験片)の2種類を用意した。試験の応力比は0.1、室温大気中、試験打ち切り繰返し数は200万回の条件で荷重一定の試験を行った。200万回でも破断しない最小の荷重範囲は最大荷重が破断荷重の約30%の時であった。すなわち、400kN試験片では荷重範囲が108kN、200kN試験片では54kN以下では破断しない。また、CFペンダントの損傷の進行を確認するため、端部の変位量と繰返し数の関係を求めた。その結果、変位量が初期より5%ほど増えると破断に至っていた。最後に破断部の観察により、CFペンダントの損傷メカニズムの推定を行った。その結果、炭素繊維とテフロンシートの摩耗が進行し、次に炭素繊維とシンプルが摩耗しあって破断に至ると推定された。これらの結果はCFペンダントの廃棄基準などを決めるための基礎的な資料として活用できる。

キーワード: クレーン、ロープ、炭素繊維複合材料

1 はじめに

炭素繊維は、比重、強度などの優れた機械的特長を持つため、航空機産業、スポーツ・レジャー産業から建設産業など、多様な工業、民生分野で使用されている。この炭素繊維を活用した炭素繊維複合材料ケーブル(Carbon Fiber Composite Cable, 以下CFCC)¹⁾²⁾は、耐食性の良さから、融雪剤などの腐食環境下にある橋梁の補強ケーブル³⁾やグラウンドアンカーなどとして使用されている。

このようなCFCCは現在のところ荷重の変動と繰返し数が少なく、準静的とも言える環境下で使用されている³⁾。これに対して、荷重が変動するクレーン等の産業機械への使用が検討されはじめている。特にクローラクレーンなどでジブの起伏を行うためのペンダントロープ(静索)への適用が期待されている。現在(2014年)のところ日本では静索には鋼製ワイヤロープが使用されている。これに対して、CFCCは鋼製ワイヤロープと比較して同じ長さの場合重量が約1/5と軽量であることが、現場での作業性の向上と工期の短縮につながることを期待されている。以下、静索用のCFCCをCFペンダントと呼ぶ。

静索には1)ジブの起伏、2)荷の吊り降ろし、3)風などの影響で、長手方向(軸方向)に繰返し変動する軸荷重が作用する。繰返し軸荷重はCFペンダントに時間依存型の損傷を与える。また、ジブの起伏は静索のみで行うことから、仮に静索が破断した場合、ジブは倒壊し、労働現場のみではなく、ジブの長さによっては周辺地域も巻き込んだ災害を発生させる。したがって、CFペンダントの構造健全性はクレーンの構造健全性の一部として重要な役割を担っている。

しかし、鋼製ワイヤロープにはJIS B8836⁴⁾などで規定

される摩耗等の時間依存型(経年)損傷についての廃棄基準があるものの、CFペンダントについては同様の廃棄基準が無いことから、経年損傷を評価するための基準を設ける必要がある。そこで、本研究では経年損傷を評価するための基礎的な資料を作成する目的から、CFペンダントの繰返し軸荷重試験を実施した。

この試験によりCFペンダントの繰返し軸荷重に対する強度特性、繰返し数と伸びの関係を明らかにし、破断部の観察により損傷のメカニズムを推定した。

2 CFペンダントの条件

本試験で使用したCFペンダント(図1)は、直径7 μ mのポリアクリロニトリル(PAN)系炭素繊維を直径4.8mmに寄り合わせ、エポキシ樹脂を含浸させてストランドプレプリグとし、それを図1に示すような構成でシンプル間に周回させて構成されている⁵⁾。

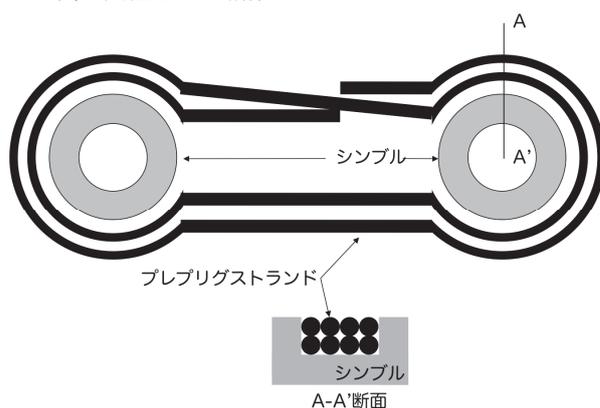


図1 CFペンダントの構成

ストランドは素線の束、プレプリグは樹脂を含浸させた繊維のことである。また、シンプルはワイヤロープ端末加工用の円形もしくは卵形の鋼製用具のことである。ストランドプレプリグの起点と終点はCFペンダントの平行部になるように構成している。CFCCは一般的な鋼

*1 機械システム安全研究グループ

製ワイヤロープよりもピッチは長いものの、ストランドプレブリグ同士を寄り合わせる構成になっている。これに対し、CF ペンダントではストランドプレブリグ同士は寄り合わされていない。この点が従来の CFCC とは異なる点である。

破断荷重はストランドプレブリグのを周回させる回数とシンプル径により決まる。本試験では以下の2種類のCF ペンダントを作成した。以降、1) の試験片を 400kN 試験片、2) の試験片を 200kN 試験片と記述する。

- 1) シンプル中心間 500mm, 破断荷重 400 kN(図 2)
- 2) シンプル中心間 1200mm, 破断荷重 200kN(図 3)

CF ペンダントの機械的特性を表 1 に示す。弾性係数は鋼製ワイヤロープの約 1/4 であることから、同じ荷重の時の伸びは鋼製ワイヤロープより CF ペンダントの方が小さい。本研究とは別にロープメーカーとクレーンメーカーの共同で行われた実験では、実際のクローラクレーンに装着した場合、ジブを上げ下げする応答がよいというオペレーターのコメントがある。これは伸びが小さいことによる感想と推察され、CF ペンダントを活用したときのクレーン操作の特徴である。

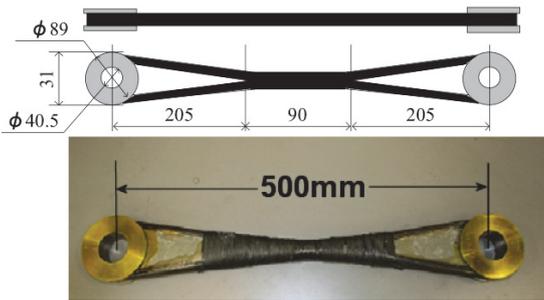


図 2 CF ペンダントの外観(400kN 試験片)

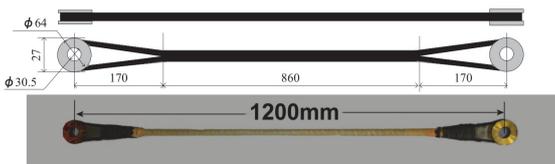


図 3 CF ペンダントの外観(200kN 試験片)

表 1 CF ペンダントの機械的特性

	弾性係数 [GPa]	比重 [g/cm ³]	線膨張係数 [×10 ⁻⁶ /°C]
CF ペンダント	155	1.6	0.6
鋼製ワイヤロープ (IWRC 6×Fi(29))	38	7.8	11.5

3 繰返し軸荷重試験

繰返し軸荷重試験に使用した試験機と試験条件について述べる。試験機は INSTORN 製電気油圧式サーボ試験機を使用した。400kN 試験片は最大荷重が 500kN の試験機(型番 8803, 図 4 左側), 200kN 試験片には最大荷重が 250kN の試験機(型番 8804, 図 4 右側)を使用した。400kN は合計 15 本, 200kN は合計 8 本の試験を実施した。

繰返し軸荷重試験は、応力比 $R=0.1$, 周波数 $f=1\sim 1.75\text{Hz}$ (400kN 試験片), 0.5Hz (200kN 試験片)の常温大気中の条件の下, 最大荷重一定の荷重制御にて試験を実施した。ここで応力比とは荷重の最小値を最大値で除した値である。波形は正弦波を使用した。そして, 破断したときの繰返し数と荷重範囲の関係を求めた。ただし, 破断しない場合の最小試験停止繰返し数は 2×10^6 回(200万回)とした^{6),7),8)}。これは鋼材の溶接部疲労試験などで行われるときに使用される値である。

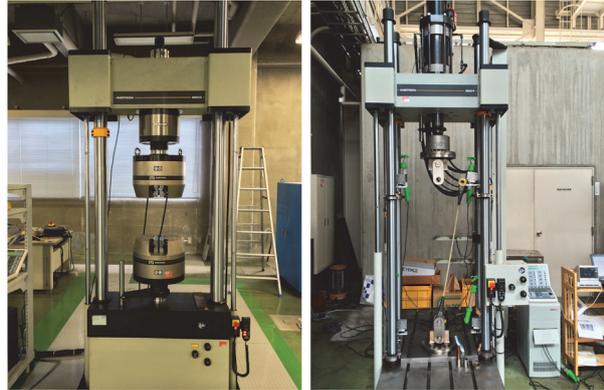


図 4 INSTRON 製電気油圧式サーボ試験機

左: 型番 8803 (最大 500kN) 右: 型番 8804 (最大 250kN)

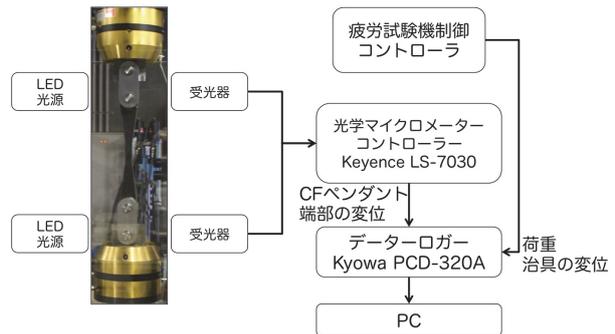


図 5 収録するデータと使用した計測機器の関係

クレーンでの使用を考えると, 一日の作業が終了してジブを寝かせたときなど荷重が作用しないときもあるので, $R=0$ にすることが望ましい。しかし, $R=0$ にすると最小荷重が 0 となってしまう, 試験片と治具の接合が緩くなる。これにより周波数を上げられないなどの問題を生じる。一方で, 0.5Hz の速度で繰返し数を 200 万回まで試験を行うためには, 試験時間はおよそ 46 日間である。しかし, 前述のように 200 万回まで試験を行うためには, なるべく周波数を高くしたいことから, 最小荷重のときも張力が必要であると考え $R=0.1$ とした。なお, 試験結果の周波数依存性に付いては, 試験片が発熱をしていないことから無視できると考えられる。

試験により得られるデータの流れを図 5 に示す。試験機には後述する光学系マイクロメーター (Keyence LS-7030) により CF ペンダントの上下端部の変位がコントローラーに取り込まれ, データロガーへと $\pm 10\text{V}$ で出力される。また試験機からは荷重と油圧チャックの位置が $\pm 10\text{V}$ で出力される。これらのデータをデータロガー

(共和電業 PCD-320A)で 100Hz のサンプリング周波数で収録した。

CF ペンダントは繰返し軸荷重を負荷することにより、損傷が進行する。損傷は同じ荷重を負荷した場合に伸びの違いに現れると考えられる。そこで、200kN 試験片については、光学マイクロメーターを使用して試験中の CF ペンダントの伸びを計測し、伸びと繰返し数との関係を求めた。400kN 試験片については、測定器導入時期の関係上行っていない。

光学マイクロメーターを使用して CF ペンダントの伸びを計測する方法を述べる。光学マイクロメーターはキーエンス製 LS-7030 を使用した。光学マイクロメーターは図 6 に示すように、LED 光源を使用した投光器側から発した光を受光器側で受ける。受光器での情報はコントローラーに送られ光と影の境界（エッジ）を検出して、外径などを計算する。本試験では CF ペンダントと治具の間に生じる隙間を利用した。隙間を通過した後の光は治具と CF ペンダントの端部がエッジとなってカメラに取り込まれる。この仕組みを 2 組用意してそれぞれ CF ペンダントの上下端部を計測した。

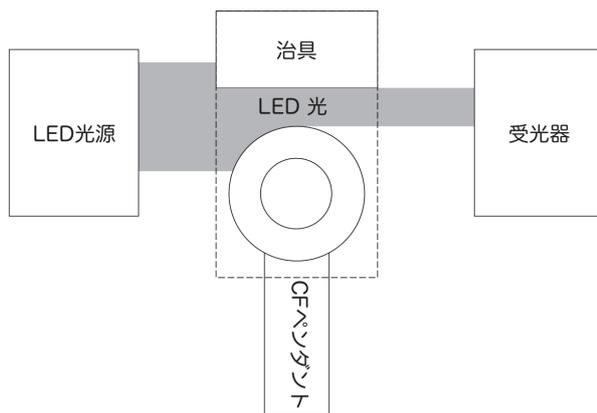


図 6 光学マイクロメーターを使用した端部の変位計測の概念図

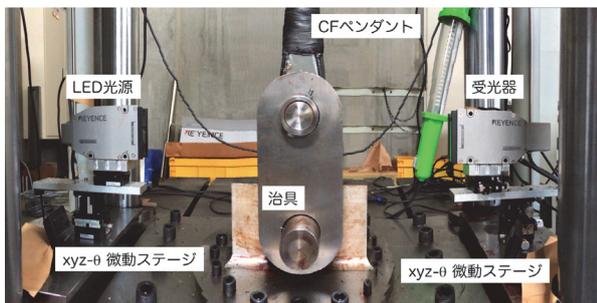


図 7 光学マイクロメーターの設置状況

分解能は投光器と受光器の間の距離に依存するが、試験機に設置した状況（約 45cm）では、約 0.5 μ m である。また投光器から出た光が受光器に入らないと計測できないこと、それらの位置関係が精度に影響することから、投光器、受光器側にそれぞれ xyz と CF ペンダントの長手方向と同じ方向の軸回転ができる精密ステージを作成

して位置関係の調整ができるようにした。図 7 に光学マイクロメーターの設置状況を示す。

4 繰返し軸荷重試験の結果と考察

4.1 破断に至る繰返し数と荷重範囲の関係

CF ペンダントの繰返し軸荷重試験結果を図 8 に示す。横軸は繰返し数で、縦軸は試験の最大荷重を破断荷重で除した値である。また、矢印は繰返し数が 200 万回以上で破断しなかったことを示している。

CF ペンダントの繰返し軸荷重に対する強度特性は、鋼材の疲労試験により得られる SN 線図[®]と同様の傾向が得られた。しかし、鋼材とは異なり最大荷重の大きい試験であっても、破断する繰返し数のばらつきが大きい。例えば 400kN 試験片について最大荷重 200kN（縦軸の 0.5）の場合、破断に至るまでの繰返し数は最小で約 1.2×10^4 、最大で約 1.0×10^5 と約 10 倍も異なっている。

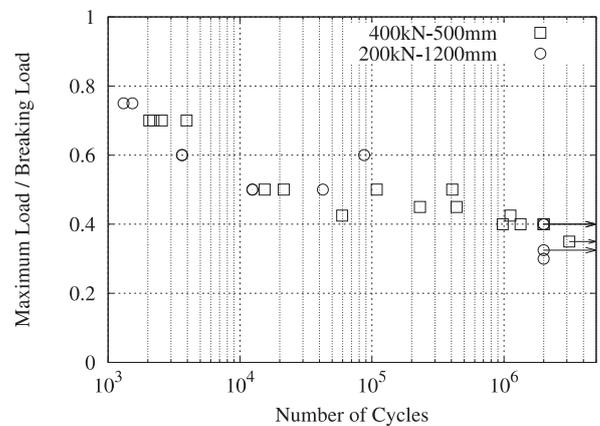


図 8 CF ペンダントの繰返し軸荷重試験結果

また、鋼材の疲労試験でいうところの疲労限[®]に相当する 200 万回で破断しない荷重範囲の最小値もあり、どちらの試験片においても破断荷重の約 30%を最大荷重としたときが相当している。400kN 試験片では 108kN、200kN 試験片では 54kN となる。

200kN と 400kN 試験片は最大荷重と全長は異なるが、繰返し数の増加に伴い最大荷重と破断荷重との比では同様の傾向を示している。よって、他の破断荷重と全長の試験片であっても、同様の構造であれば図 8 の結果と同様の傾向を示すと推定される。

4.2 繰返し数と CF ペンダントの伸びの関係

CF ペンダントと伸びの関係の 1 例を図 9 に示す。横軸は繰返し数、縦軸は CF ペンダント全体の伸びを示している。試験条件は最大荷重が 120kN（破断荷重の 60%）である。繰返し数が 1×10^4 以下では平均的な伸びが約 6.95mm であった。 2×10^4 付近から伸びが大きくなり始め、破断直前では約 7.15mm の伸びとなった。

他の結果についてもほぼ同様であり、破断に近くなるにつれ伸びが増えていた。これは CF ペンダントに荷重を繰返し負荷することで CF ペンダントが劣化し、強度が落ちていることを示している。しかし、CF ペンダント

トの長さが 1200mm ある中での、伸びの変化がわずか 0.2mm(0.017%)である。これでは仮に専用の計測治具を作成したとしても、治具と CF ペンダントの取り合いの関係や、脱着のたびに生じる誤差の中に 0.2mm は含まれてしまう。よって、現場で使用して劣化した CF ペンダントの損傷の進行度合いを管理する目的で全体の伸びを使用することは難しいと考えられる。

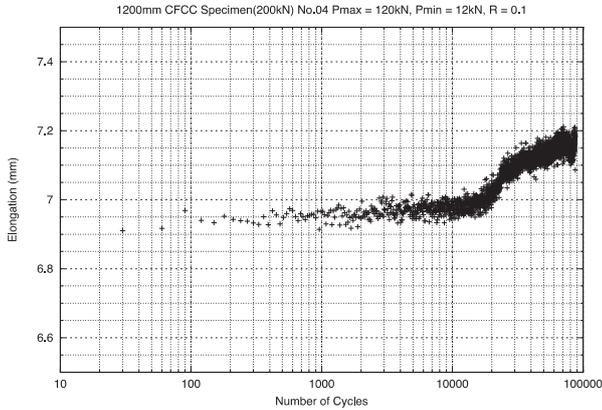


図 9 繰返し数と伸びの関係
(200kN 試験片, 最大荷重 120kN)

4.3 破断部の観察による損傷メカニズムの推定

破断した CF ペンダントを観察することにより、損傷に至るまでのメカニズムを推定した。最初に肉眼による観察、次に顕微鏡を使用した観察を実施した。



図 10 CF ペンダントの破断後の様子

(a) 目視による CF ペンダント破断部の観察

破断した 400kN 試験片の様子を図 10 に示す。試験片は全てシンプルの端部からシンプルの中心を軸に 90° 回転した場所（以下、肩部）で破断した。肩部は 1 本の試験片内に 4 箇所存在しているが、そのうちの 1 箇所が破断した。他の 3 箇所については、肉眼上は破断による衝撃などの影響で型くずれなどを起こすこともあるが、炭素繊維の破断等は無く健全である。肩部は応力集中部であることと、厳密には軸荷重の作用する中心線から離れているため、曲げも作用する。これらを原因として、CF ペンダントの構造全体の中でも肩部のみが応力が高

い状態にあり、破断の原因となると推定される。また、荷重範囲の大小による破断部の様相の差は特に観察されなかった。

破断した肩部の様子を図 11 に示す。シンプルにはシンプルと炭素繊維の間に生じる摩擦を低減される目的でテフロンシートが巻かれている。破断した肩部（図 11 上側）については、テフロンシートが破れ、シンプルの表面に炭素繊維が付着（黒色部分）している。すなわち、破断する前に炭素繊維とシンプルの表面（金属）は接触して炭素繊維が摩耗する状態にあったと推定される。

一方、破断した肩部と同じシンプルの反対側（図 11 下側）については、テフロンシートは破断していない。すなわち、炭素繊維とシンプルは直接接触していない状態にある。

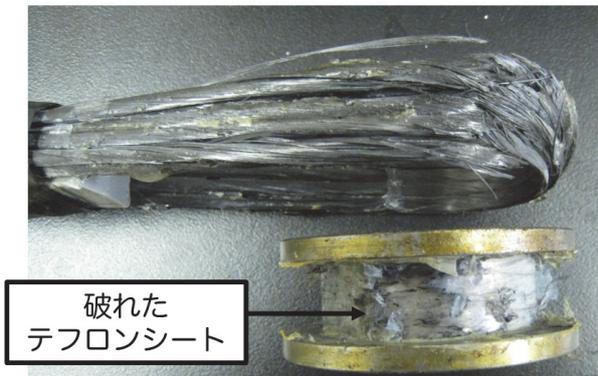


図 11 破断した肩部とシンプルの表面

以上のことから、テフロンシートが摩耗により破断した後、炭素繊維とシンプルの摩耗が起こることが明らかになった。



図 12 未使用試験片の炭素繊維と樹脂

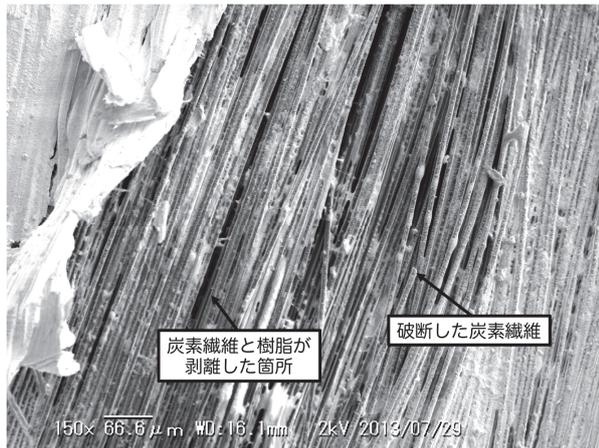


図 13 200 万回で破断しない試験片の炭素繊維と樹脂

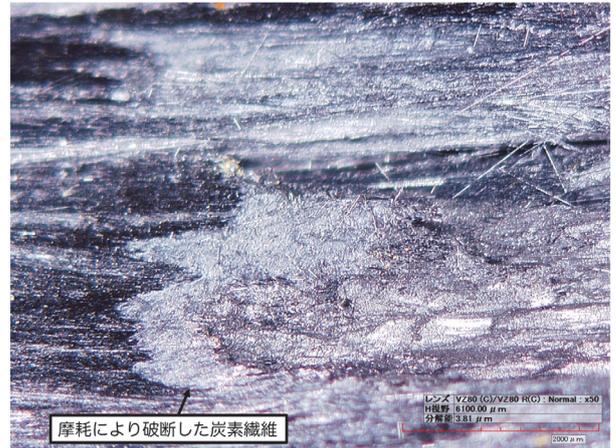


図 16 摩耗により破断した炭素繊維

(b) 顕微鏡による CF ペンダント破断部の観察

次に顕微鏡を使用した微視的観察結果について述べる。

図 12 は未使用時の CF ペンダントの肩部の特にテフロンシートと接触していた箇所の炭素繊維と樹脂の様子である。顕微鏡は電子顕微鏡 (Keyence VE-9800, 以下, SEM) を使用した。炭素繊維と樹脂の間は密着している。そして、破断している炭素繊維は特に観察されなかった。

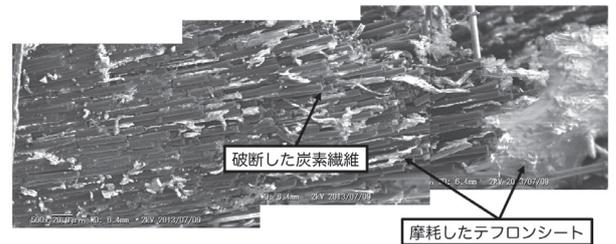


図 17 摩耗により破断した炭素繊維部の拡大

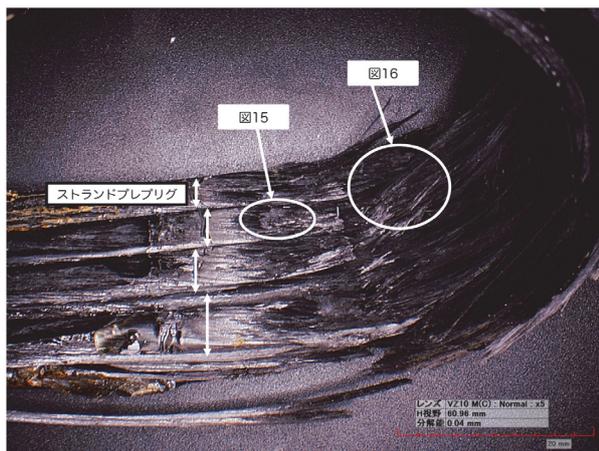


図 14 破断した肩部の内側

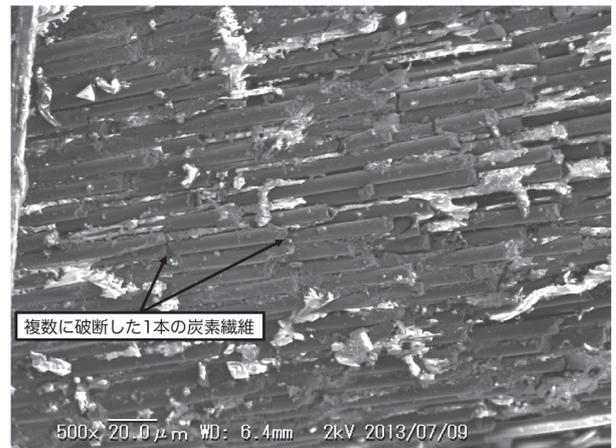


図 18 複数に破断した炭素繊維



図 15 過荷重により破断した炭素繊維(白丸は炭素繊維の破断部を示す)

図 13 は 200 万回の繰返し荷重を作用させた後に破断しなかった試験片の肩部について、テフロンシートと接触していた箇所を SEM で観察した結果である。樹脂と炭素繊維の境界 (インターフェイス) は剥離している。また、わずかながら破断した炭素繊維も観察された。

したがって、200 万回で破断しなかった試験片についても、わずかながらの損傷は生じており、繰返し数をさらに増やすことで損傷が進行する可能性がある。

図 14 は破断した 400kN 試験片の肩部内側の様子である。この箇所はシンプルと接触している箇所である。ここでは 2 種類の様相 (図 15, 図 16) が観察された。

例えばワイヤロープは過大な引張荷重により破断させると、素線の切れる位置は同一箇所ではなく、様々な場

所で破断する。これは1本の素線内で最も弱い箇所は素線ごとに異なることによる。炭素繊維も同様であり、CFペンダントの場合も肉眼レベルの観察では破断箇所が応力集中部ではあるが、一つのストランドプレブリグ内では破断している位置のばらつきは大きく図15のような様相が観察される。このような箇所は、損傷が進行した後急速に破断するときに観察される様相であり、最終破断部であると判断した。一方、図16は中央に白く押しつぶされたような領域があり、これは炭素繊維とテフロンシートまたはシンプルとの摩耗による影響であると考えられる。摩耗により破断した場合は、同一のストランドプレブリグ内ではほぼ同じ位置で破断している。また図15では炭素繊維の周辺に破断した破片が針状に付着しているが、摩耗により破断した領域には針状の繊維は観察されない。

図17は図16の摩耗により破断した領域をSEMで観察した様子である。白く観察されるのはテフロンシートが炭素繊維との摩耗により剥離して表面上に残留しているためである。

図17をさらに拡大した様子を図18に示す。同一の炭素繊維であっても複数の箇所破断している様子が観察される。図15で観察される針状の破断した炭素繊維もこれと同様に同一炭素繊維中の複数箇所での破断の結果と推察される。しかし、これらが最終破断の衝撃の際に飛散した影響で針状になっていると推察される。

これらの観察結果をまとめると、炭素繊維は繰返し荷重が負荷されることにより、樹脂とのインターフェイスが剥離し、同時に炭素繊維とテフロンシート間、次に炭素繊維とシンプル間の摩耗が起こる。この過程で炭素繊維が徐々に破断して、全体の破断に至ることが明らかになった。

以上の観察結果をまとめると、CFペンダントの損傷メカニズムは次のように推定される。

- 1) 炭素繊維と樹脂のインターフェイスが剥離
- 2) 炭素繊維の破断とテフロンシートの摩耗
- 3) テフロンシートが破断して、炭素繊維がシンプルと接触
- 4) 炭素繊維が摩耗し繊維単位での破断が発生
- 5) CFペンダントの破断

また、炭素繊維の破断部の特徴についても明らかになった。過荷重により破断した炭素繊維は破断箇所にばらつきがあり、破断部には針状の炭素繊維が散見される。これに対し、摩耗により破断した炭素繊維は針状になった炭素繊維は観察されず、同一炭素繊維中の複数箇所破断していた。

5 おわりに

本研究では、CFペンダントに変動荷重が作用したときの劣化特性を評価するために、CFペンダントの繰返し軸荷重試験を行った。その結果、CFペンダントが破断しないための最小の荷重範囲は最大荷重が破断荷重の約30%の場合（応力比は0.1）であった。すなわち、400kN試験

片では108kN、200kN試験片では54kN以下の荷重範囲であれば200万回の繰返し軸荷重であっても破断しないことが明らかになった。400kN試験片と200kN試験片は、全長と破断荷重は異なるが試験結果は同様の傾向を示していることから、同一の構造であれば他の全長と破断強度のCFペンダントであっても、本結果を元に荷重範囲と破断に至る繰返し数を判断する事ができると考えられる。

また、CFペンダントの損傷の進行を確認するため、端部の変位量と繰返し数の関係を求めた。その結果、変位量が初期より5%ほど増えると破断に至っていた。

最後に破断部の観察により、CFペンダントの損傷メカニズムの推定を行った。CFペンダントは全て肩部より破断した。破断した肩部のシンプルと炭素繊維間にあるテフロンシートは破断していたが、それ以外の肩部のテフロンシートは破断していなかった。炭素繊維の破断状況については、CFペンダントは200万回で破断しなかった試験片においても、炭素繊維の破断が確認された。加えて、炭素繊維と樹脂のインターフェイスについても剥離が確認された。また、破断した試験片を観察したところ、摩耗により破断した箇所と、最終的に破断した箇所が存在していた。したがって、CFペンダントの損傷メカニズムは、炭素繊維とテフロンシートの摩耗が進行し、次に炭素繊維とシンプルが摩耗しあつて炭素繊維の破断が生じ、全体の破断に至ると推察された。

本研究により得られた成果は、CFペンダントを実機に活用する際の廃棄基準作成等の基礎的な資料として活用できる。

参考文献

- 1) 高木宏. 炭素繊維複合材料ケーブルの《CFCC》の基本的特性について. 日本防災システム. 1989 ; 12(2) : 24-32.
- 2) 木村浩, 白鳥信令, 高木宏. コンクリート補強用 炭素繊維複合材ケーブルの基本的特性. コンクリート工学年次論文報告集. 1990 ; 12(1) : 1015-1018.
- 3) Konstantinos G. Dassios. Direct in situ measurements of bridging stresses in CFCCs. Acta Materialia. 2003 ; 51 : 5359-5373.
- 4) JIS B8836:2007 クレーン ーワイヤロープー 取扱い, 保守, 取付け, 検査及び廃棄. 日本規格協会.
- 5) 山際謙太, 大山裕太, 佐々木哲也, 本田尚, 山口篤志, 辻裕一. 静索用炭素繊維複合材料ケーブルの繰返し軸荷重試験. 日本機械学会論文集A編. 2013 ; 79(802) ; 745-748.
- 6) 土木学会. 連続繊維補強材の引張疲労試験方法. コンクリート標準示法書 2005年制定 [規準編]. 2005.
- 7) 小西一郎. ワイヤロープの静的試験および繰返し引張疲労試験. 材料試験. 1958 ; 7 ; 155- 159.
- 8) 例えば金属材料疲労強度データ集. 日本材料学会.