

一方向炭素繊維強化エポキシ複合材料における端面の摩耗構造

肖, 毅

九州大学大学院総合理工学研究科 : 修士課程

松原, 監壮

九州大学応用力学研究所 : 文部技官

汪, 文学

九州大学応用力学研究所 : 助教授

黄木, 景二

九州大学応用力学研究所 : 助手

<https://doi.org/10.15017/4744036>

出版情報 : 応用力学研究所所報. 82, pp.167-178, 1997-11. 九州大学応用力学研究所
バージョン :
権利関係 :



一方向炭素繊維強化エポキシ複合材料における端面の摩耗構造

肖 毅* 松原 監 壮**
汪 文 学*** 黄 木 景 二****
高 雄 善 裕*****

概 要

繊維形状あるいは繊維方向によって、複合材料接触面の摩擦特性は異なると考えられる。そこで、この摩擦係数の変化について実験的解析を行い、接触面の繊維方向が垂直に近づくほど、そして接触面の粗れが大きいほど、摩擦係数が大きくなることを求めた。今回、SEM, EPMA, 粗さ計により摩擦面を分析検討し、一方向炭素繊維強化エポキシ複合材料端面の摩擦モデルを提案し、摩擦問題における繊維方向の力学的意味について検討した。

Key words: CFRP, Friction Coefficient, Fiber Orientation, Surface Roughness, SEM, EPMA

1. 緒 言

繊維強化プラスチック (FRP) 材は、比強度、比弾性に優れ、構造用部材として航空、宇宙分野をはじめ各方面に利用されている。複合材料に面内負荷を加える有力な方法のひとつにピンあるいはボルトを介した機械的継手がある。その簡便さ、機能性、経験的信頼性の観点からよく用いられ、このため、積層板のピン継手における応力状態、破壊様式、強度予測に関する多くの研究が行われてきた¹⁾。

ピン継手による FRP 材接合部では、ピンと FRP 積層材円孔間の摩擦が応力解析と強度解析に重要な役割を果たすと考えられる。しかし、積層板の 1 つの層を円周方向に眺めてみると、強化繊維の形状は円形から楕円になり 90 度違う位置では繊維を横から見る状態にまで変わる。この繊維形状あるいは繊維方向の変化は接触面の摩擦特性に影響を与えと考えられる。また、厚さ方向に辿っても繊維の強化方

*九州大学大学院，工学研究科応用力学専攻博士課程

**文部技官，九州大学応用力学研究所

***九州大学助教授，九州大学応用力学研究所

****九州大学助手，九州大学応用力学研究所

*****九州大学教授，九州大学応用力学研究所

向が層毎に変わっている。積層板における厚さ方向の摩擦係数の変化についての処理は、解析的に可能である²⁾が、周方向の摩擦係数の変化については、現在のところ、材料定数と捕えた材料異方性の実験解析が必要である。

Lancaster³⁾や、築添ら⁴⁾⁵⁾は一方強化CFRP (Carbon Fiber Reinforced Composites) の摩擦特性における異方性を3つの方向、つまり、繊維方向が接触面に垂直である Normal 方向、繊維方向がすべり方向に平行な Parallel 方向、繊維方向は接触面内であるが繊維方向とすべり方向が直交する Transverse 方向について議論している。そこで、一方材積層板の継手問題の基礎研究として、炭素繊維一方強化エポキシ樹脂 CFUR/E (Carbon Fiber Unidirectionally Reinforced Epoxy) の Normal 方向と Parallel 方向間の摩擦係数を求めた⁶⁾。接触面の繊維方向が垂直に近づくほど、そして接触面の粗れが大きいくほど、摩擦係数が大きくなる。

今回は、走査型電子顕微鏡 SEM、電子線マイクロアナライザ EPMA (Electron Probe Micro Analyzer)、粗さ計により摩擦面を分析検討した結果を詳述し、CFUR/E の摩擦モデルと繊維方向の摩擦問題における力学的意味について多角的な検討を加えた。

2. 実験方法⁶⁾

2.1 供試材及び試験片

CFUR/E は東レ製のプリプレグ T 800 H/3631 を摂氏 180° で硬化させたもので、平均径約 5 μ m の PAN 系高靱性カーボン繊維とこれに適合した樹脂が組み合わされている。CFUR/E 試験片の繊維方向と摩擦面のなす角度を θ と定義している。先に述べた Parallel 方向は 0 度、Normal 方向は 90 度となる。300 $\times$ 300 mm 厚さ 4 mm の CFUR/E 板材から 50 $\times$ 6 mm の短冊状の試験片をダイヤモンド刃による精密切断機を使って切り出し、短冊の長手方向と CFUR/E 板材の繊維方向のなす角度が 0 度、45 度、90 度の 3 種の試験片を用意した。摩擦試験は 50 $\times$ 4 mm の面で行う。

精密機械切断した摩擦面を市販の炭化ケイ素研磨紙 # 800、次に # 1500 で予備研磨し、# 2400 で仕上げ研磨を行った。これを再度 # 800 で粗面化した。精密機械切断面の表面粗さはほぼ # 800 で粗面化した研磨調整面に対応している。相手材には炭素工具鋼 SK 5 を使用した。3 $\times$ 3 mm の角柱状の相手材先端部を研磨により削ぎ落とし研磨を 0.3 $\times$ 3 mm にした。その後、バフ研磨処理を行った。バフ研磨したために、削ぎ落とした面の角で CFUR/E 研磨表面を削ることはなくなった。

2.2 摩擦試験装置及び試験条件

往復運動方式の摩擦試験機を使用した。回転円盤の慣性により滑らかな三角関数状の速度変化を示す往復移動テーブル上に、CFUR/E 摩擦試験片が固定されている。摩擦力は摩擦力測定器内に設置したロードセルにより引張り力として検出される。ロードセルの値はひずみ増幅計を介して電磁オシログラフに記録される。予備的検討を行い、ピン継手摩擦問題に適し、安定した現象が得られる、接触垂直応力約 5 MPa、回転数 1 Hz、ストローク長 30 mm、往復 500 回程度でデータを得た。実験はすべて室温、空気中および湿度 50 % 以下において行っている。

2.3 観察, 分析, 粗さ測定

摩擦面の表面観察及び X 線元素分析には日立製作所製の高分解能電界放射型走査電子顕微鏡 FE-SEM と島津製作所製の EPMA 1500 を使用した。EPMA 分析では 100 A 程度の金蒸着を施した。粗さ計測には東京精密製の表面粗さ・輪郭形状測定器 surfcom 400 B を使用した。計測針は先端半径 1 μm となっている。

3. 結果と考察

3.1 摩擦力

図 1 に電磁オシログラフ出力例を示す。摩擦ゼロの位置は相手材を長い糸で上にわずかにつり上げた位置でのロードセル出力とした。図は半サイクルを示す。接触面の繊維方向が垂直に近づくほど摩擦係数が大きくなっている⁶⁾。更に、この図から、以下の 4 つの特徴がわかる。(1) 摩擦力が最大になる前にカーブは傾く。これは、最大に達する前に滑り始めること、つまり最大静止摩擦力が検出されない事を意味する。(2) 最大摩擦状態は瞬時に現象ではなくストロークの少なくとも 1/3 を占める。(3) いわゆる動摩擦はストロークの 1/3 程度であるが、最大値との差は小さい。0 度では差はゼロになる。(4) 相手材が止まる時に摩擦がかなり上昇するものもある。0 度ではこの現象は見られない。

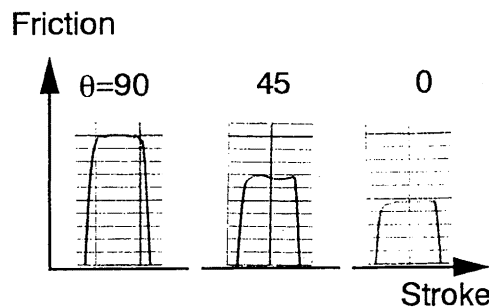


図 1 炭素繊維一方向強化エポキシ樹脂 CFUR/E 各端面の摩擦力

3.2 摩擦試験前の試験片表面

図 2 に、# 800 で表面を仕上げた後の $\theta=90$ 度、45 度、0 度、3 種の CFUR/E 摩擦試験片表面の SEM 像と粗さを示す。SEM 像は面垂直方向から見たものである。粗さ計のデータは SEM 像の左右方向に粗さの変化を記録したものである。45 度の紙面上下に 5 μm 、左右に 7~8 μm のやや白い模様が炭素繊維、その間の黒い部分は樹脂になる。更に大きなスケールで明暗が認められる。暗い部分の大きさは 10 μm 平方から 20 μm 平方程度である。暗い部分間距離は 20~30 μm である。粗さは SEM 像の尺度と比較すると、その面垂直方向に約 1/6 倍に縮小されている。これには大小 30 弱の鞍部、つまり 30 弱の突起が認められる。小さな突起の平均間隔は約 8 μm 強となる。これらは大きく 6 つの突起群にまとめられる。突起群の広がりには 25~60 μm 程度で、突起群間は 7~20 μm になる。縦（深さ）方向は横（面内）方向

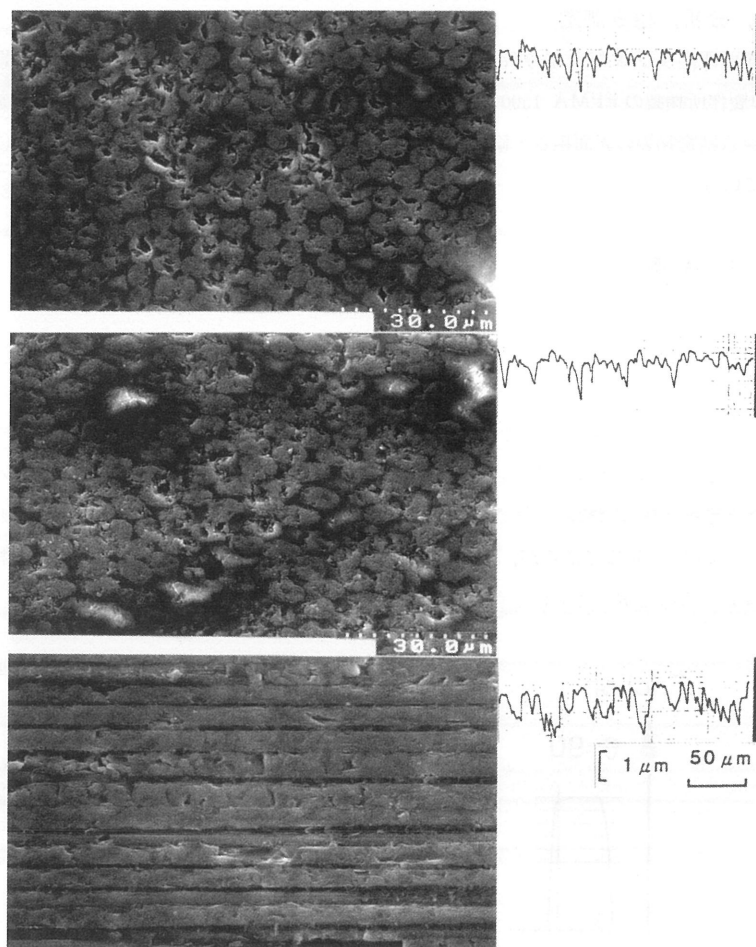


図2 摩擦試験前の炭素繊維方向強化エポキシ酸 CFUR/E 各端面の SEM 像と粗さ (上から, 90度 (Normal), 45度, 0度 (Parallel))

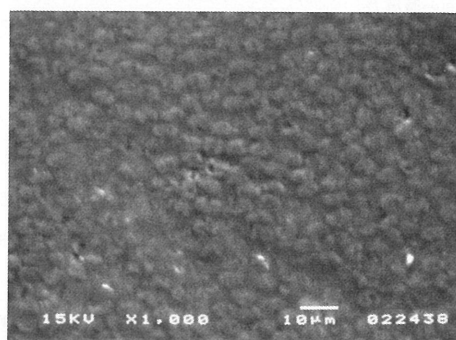


図3 摩擦試験前の CFUR/E45度端面の反射電子像

の 25 倍に拡大表示されている。これから、小さな突起が飛び出る距離は $0.2\mu\text{m}$ 程度が最も多く、 0.1 から $0.6\mu\text{m}$ 程度にほぼ収まっていることがわかる。突起群間には $1\mu\text{m}$ 程度あるいはこれ以上の凹部が検出されている。なお、上に凸である部分は殆どの場合は正しい値であるが、凹の部分の最深部では針の先端曲率半径が限度になりは控えめの深さが出ることが多い。

この 2 つのデータを基に、次のような表面形状を描くことができる。繊維直径は $5\mu\text{m}$ であるが 45 度面であるので 1 つの方向には $7\mu\text{m}$ になって現われる。この繊維の斜断面にも SEM 像に見られるように小さな凹部が見られるが、粗さ計にはあまり現われない。繊維間には $1\mu\text{m}$ 以下程度の樹脂があり、この部分は凹んでいる。繊維の斜断面の高さは同じではない。4 ～ 7 本の距離毎に 1 ～ 3 本が $1\mu\text{m}$ 程度あるいはそれ以上低くなっている。# 800 での表面仕上げにより、まとまった繊維の欠落、繊維に比べて選択的な樹脂の損耗、繊維斜面での局所的損傷が起き、 $\theta=45$ 度の CFUR/E 試験片表面には 3 種の凹部、つまり数本の繊維にわたる深さ $1\mu\text{m}$ 程度の凹部、繊維間の樹脂の $0.2\mu\text{m}$ 程度の凹部、かなり小さな繊維面内での凹部、が現れることがわかった。

図 3 に、反射電子像を示す。これは # 1500 で粗面化した 45 度の CFUR/E 摩擦試験片表面である。対応する 2 次電子像と反射電子像では位置がずれ、明確な対応は付けられないが、繊維部分が凸になり、樹脂部分が凹になっていることがわかり、図 2 の粗さ計の結果を裏付けている。SEM 像では、繊維間の窪みが見えないが、反射電子像からは段差が認められる。

図 2 の 90 度の繊維自体は 45 度と比較して平坦な端面形状を保っているものが多い。粗さ計測結果から 40 個程度の突起が認められ、小さな突起の平均間隔は約 $6\mu\text{m}$ となる。これらをいくつかの突起群にまとめるのは難しい。繊維と樹脂の出入量は 45 度より小さく、繊維間の樹脂の損傷が少ない。これは、繊維間が 45 度と比較して研磨方向には 30 % ほど小さく、研磨により樹脂がえぐりだされる量がその分だけ制限されると考えられる。以上のように 3 種の凹部の規模は、90 度ではいずれもより小さくなることが、SEM 像並びに粗さのデータから理解できる。

0 度の SEM 像の、横方向に黒い線となっている暗部間は、場所によっては荒れが激しい。この荒れが激しい部分の下に繊維が見える場所もある。このことから横方向の黒い線は繊維が抜け出た跡の凹部であり、黒い繊維間は樹脂であることがわかる。つまり、殆どは樹脂であり、位置部を研磨された、つまり、かまばこを裏から見たような繊維が残ることは余りないと考えられる。結果的には柔らかい樹脂層を # 800 によって研磨したのと同じで、面は全体的に荒れてくる。また、樹脂の大きな欠落に対する抵抗も小さく、45 度の場合よりも大きい凹部が観察される。そこで、粗さは 45 度よりも大きく、細かな凹凸の頻度は小さくなっている。

以上のような傾向は他の研磨紙を使った場合でも同様に現われるが、番数の大きい目の細かな研磨紙を使うと、繊維角度の違いによる上記 3 種の表面の粗さの違いは小さくなっている。

3.3 摩擦試験後の試験片表面とその分析結果

図 4 に CFUR/E 摩擦面の SEM 像を 90 度、45 度、0 度の各試験片について示している。端部を除き各試験片それぞれ場所による違いは認められない。これらは最初の最大摩擦力が得られた領域の像にも

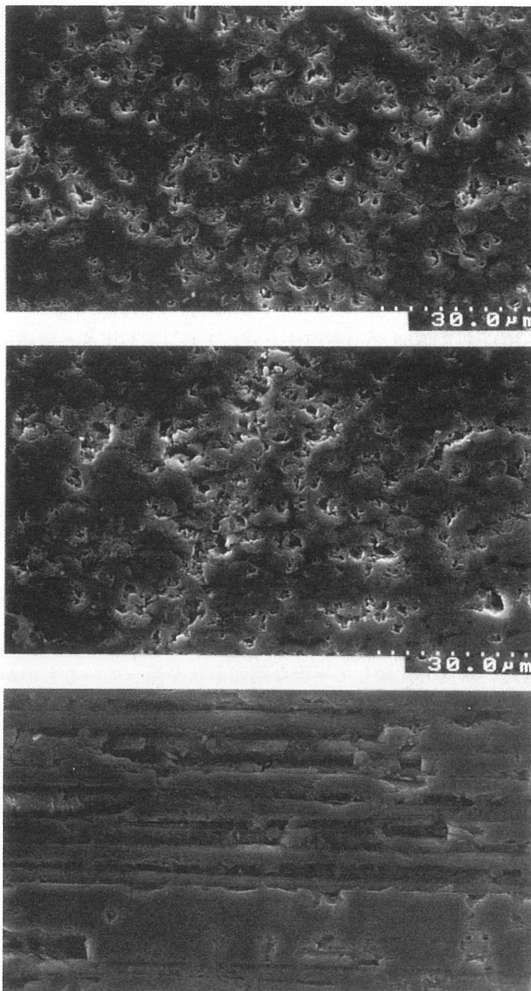


図4 摩擦試験後のCFUR/E各端面のSEM像
(上から、90度 (Normal), 45度, 0度 (Parallel))

対応する。いずれも表面の全体に渡って付着物が見られる。90度の写真をよく見ると、付着したものの下から繊維の形が見えてくるので、付着物はかなり薄いと考えられる。45度では更に明瞭に見える。これは、図2に述べたように、45度の繊維と樹脂の凹凸が大きく、この段差が容易には解消しない場合が多いためと思われる。また、付着物によって平坦になった面は90度の場合より少ないことがわかる。これは同じく、図2で述べた数十 μm 程度の大きなうねりが45度で大きいことと対応する。0度では付着物が一様に大きな領域を占める所と、繊維が見えたままの所に分れている。繊維が見えるのは、図2に示した樹脂の脱落がかなり深いものであったことを表わしている。また、一面に付着物が広がっていることは、図2の0度に見られ横方向の黒い線となった繊維の抜け痕が、あまり深くはないこと、付着物

が図2の表面に広く存在する樹脂であることも示している。

CFUR/E 摩擦試験片表面全体にわたる、広い $2 \times 2 \text{ mm}^2$ 領域の EPMA による鉄マッピングから、各試験片のほぼ全面に鉄の存在が示されている。また、鉄が多く観察された部分を拡大し、鉄と炭素繊維の色を変えて同じ図の上に合成した結果、両者の関係が明瞭に示された。90 度での鉄の大きな集まりは

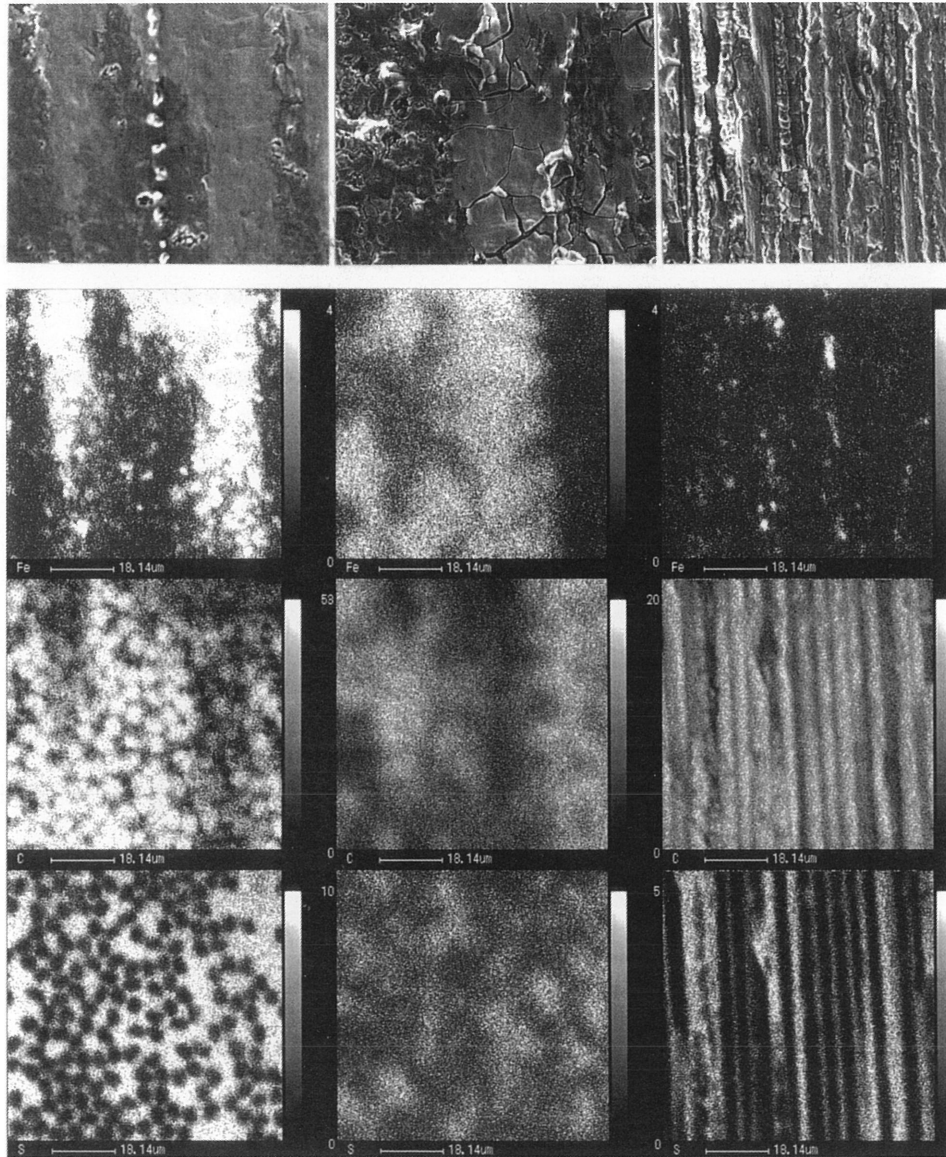


図5 摩擦試験後のCFUR/E摩擦端部のSEM像とFe, CおよびSのマッピング(上から)
(左から, 90度, 45度, 0度)

ほとんど炭素繊維の上にある。図2の炭素繊維の部分的欠落部分にたまったものと思われる。また、その他の分散も殆ど炭素あるいは炭素と樹脂の境界あるいはその近傍にあることがわかる。0度では全体に均等に分散しており、特に繊維位置との強い相関性は認められない。鉄が集中して認められることもあるが、後にも指摘されるように繊維の損傷が少なく、図2でも述べた樹脂の欠落部分にたまったいる場合が多い。

図5には、相手材の運動方向が変わる端部でのCFUR/E摩擦試験片表面SEM像と、鉄、炭素および硫黄のEPMA元素分析結果を示す。左から90度、45度、0度の結果である。樹脂主成分は炭素と水素であるが、水素はEPMAでは検出されないし、炭素では繊維と区別がつかないので、硫黄で樹脂を代表している。

90度のSEM像の上から垂れている物は鉄のマッピングから鉄とわかる。45度の鉄は、これより少量であり、CFUR/E摩擦試験片表面を少し薄く覆っている。0度の鉄はかたまって散らばっており、絶対量も少ない。この鉄は主に樹脂の欠落した部分に溜まっていると思われる。これは、SEM像との対応関係から、また、SEM像に見られる繊維が健全であることからわかる。繊維が損傷を受けていないことは、硫黄の少ない部分の模様あるいは炭素模様が上下に連続していることからわかる。

90度の炭素は炭素繊維間にも広がっている部分がある。薄い樹脂の膜に摩耗粉となった炭素が混入していることに対応する分析結果である。45度においても鉄の濃淡があるが、ここでは鉄の少ない部分でも炭素繊維の形状が判然としない。摩耗粉を含む付着樹脂膜の厚さが大きかったためと思われる。45度のSEM像に見られる付着物の割れの様子からも、膜厚の大きさが推測される。

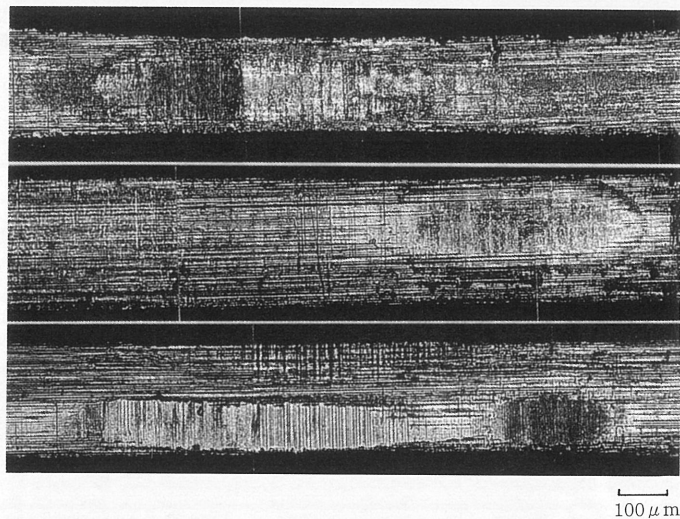


図6 摩擦試験後の相手ピンの光学顕微鏡像（上から、90度、45度、0度）

3.4 摩擦試験後の相手材の表面とその分析結果

図6に相手材の光学顕微鏡写真を示す、上から、それぞれ90度試験用、45度試験用、0度試験用の相手材であり、その接触面を見たものである。摩耗前の物には長手方向にだけ研磨傷が入っている。これに垂直に摩耗痕が入るが、全面一様というわけではない。0度の場合も摩耗されている。部分的な繊維の欠落箇所、あるいは、健全な繊維との接触によって極めて小さなレベルの凹凸部の干渉などが起こり、鉄の摩耗痕が生じたと思われる。90度、45度の場合は、図2で観察された炭素繊維のエッジ、あるいは炭素繊維内の欠落部分のエッジによる摩耗痕である。鉄の摩耗粉の大部分はCFUR/Eの端に図5に示すような姿で蓄積している。

図2と図5の比較から、90度と45度の炭素繊維の形状が摩擦実験後は平坦に見える。そこで、相手材接触面のEPMAによる元素分析を行った。図7に炭素マッピングを示す。上1/3と下1/3は傾斜部分で中央の1/3が平坦に仕上げた部分である。マッピングの中の強い部分は炭素が多い位置である。90度

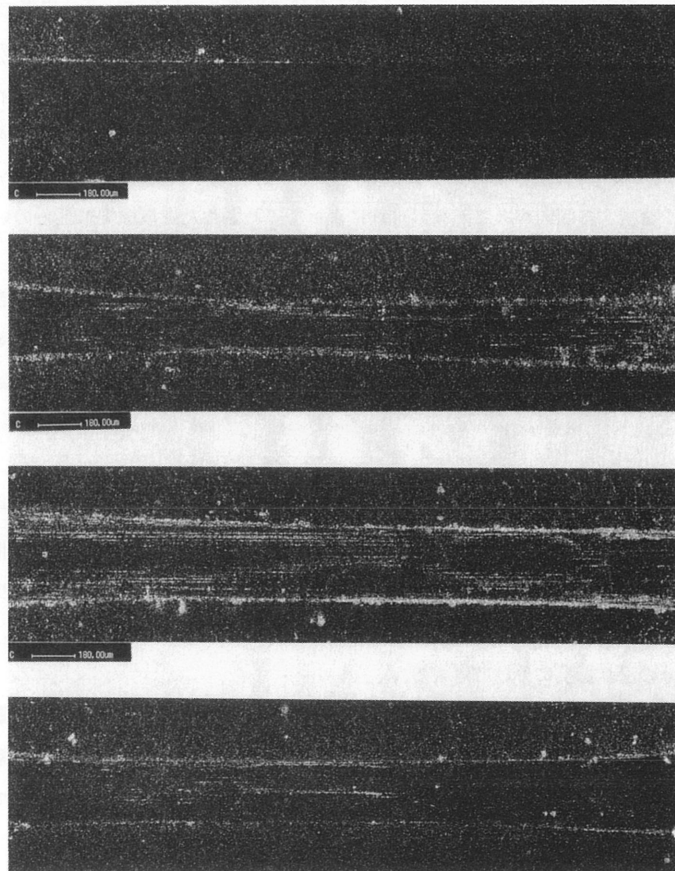


図7 相手ピンの炭素マッピング
(上から、摩擦試験前、摩擦試験後の90度、45度、0度)

は未使用材より多くの炭素が検出され、削られた炭素の一部が移動していることを示している。45度ではこれより更に多くの炭素が検出されている。図2において、90度より45度の方でCFUR/E面がより大きくうねり、繊維と樹脂の段差も大きいものであった。炭素の突出量が大きいため、損耗への抵抗が小さく多くの炭素が削られたと思われる。0度の結果は90度に近い。図2、4からは0度のCFUR/E面が最も荒れていたが、繊維の割れは殆ど認められなかった。このため、界面からの繊維の欠落が局所的に大規模に起こった可能性が高い。このことは、0度のCFUR/Eの繊維保持機能が小さい事を意味している。樹脂を現わす硫黄は分析の結果殆ど検出されなかった。樹脂が相手材に付着する機構が、この組み合わせ、この摩擦繰り返し数では顕著ではないことになる。

4. 摩擦モデル

4.1 摩耗機構

3章の結果より、この摩擦に関しては、次のような各要素の損傷と移動が想定される。相手材との摩擦により、突起した炭素繊維は鉄を削り、また、鉄も凸状の炭素をこわしていく。炭素の損耗の量は90度より凹凸の激しい45度で多くなる。0度での詳細な摩耗の姿は確定できないが、樹脂の繊維保持機能が小さく炭素の損耗は90に近い。相手材は90度で最も多く摩耗され、0度で最も少ない。樹脂も相手材により摩擦を受けるがこの樹脂に鉄と炭素の摩耗粉が混入し、CFUR/Eの繊維間を埋めたり、炭素繊維を覆う膜となる。しかし、殆どの鉄は相手材自身によってCFUR/Eの端部に運ばれ、そこに蓄積する。樹脂もここに厚く蓄積する傾向がある。なお、鉄によってこわされた炭素繊維摩耗粉のいくらかは相手材に移る。

また、端部に運ばれた摩耗粉末あるいはこれを含む樹脂膜は2つの働きをすると理解される。これらは一般には摩擦を軽減する。最大摩擦は存在するが、最大静止摩擦が図1に示すように得られないのはこのためであろう。しかし、45度や90度にみられるように相手材がこれ乗り上げるときには摩擦上昇に繋がってくる。

4.2 摩擦係数

今回摩擦抵抗の主な要因として、CFUR/Eの損耗と相手材の損耗が挙げられる。その他、確認できるような損傷をともなわない抵抗も存在する。つまり、あるスケールで平坦であってもより小さなスケールではどこかの領域で突起どうしがぶつかる。そこで、CFUR/Eの損耗、相手材の損耗、今回の議論では平坦される部分の滑り抵抗に分けて考える。

なお、CFUR/Eにおいては、幾何学的にたとえ同一高さの面があっても繊維と樹脂の剛性が極端に異なるために、相手材は滑る過程で力学的に明瞭な段差を感じる。つまり、力学的には炭素繊維の突起があるのと同じである。このため、今回の平坦な部分の滑り抵抗とは、CFUR/Eと相手材ではなく、炭素繊維と相手材、摩耗粉を含む樹脂と相手材の個々の場合に限ってものである。

4.2.1 炭素繊維一方向強化エポキシ樹脂 CFUR/E の損耗抵抗の繊維方向依存性

図 2 より, 同一研磨紙による損傷は 0 度で最も大きく, 90 度で最も小さいと言える。これは, 摩耗に対する抵抗が 0 度で最も小さく, 90 度で最も大きい事を意味している。0 度の場合の抵抗の基になるのは, 樹脂あるいは界面のせん断抵抗であり, いずれも余り強いものではないと理解される。90 度の場合, 樹脂の抵抗と繊維の抵抗がおおよそ加算的に働くために高くなっている。45 度の場合には, このような単純な理解はできないが, 強度の弱い界面が直接寄与する部分も考えられることから, 結果的には両者の間の抵抗を示したと理解できる。これから, CFUR/E の摩擦抵抗を表現する妥当な方法は角度に関する 1 次の関係である。

なお, 繊維せん断抵抗の繊維方向依存性については情報が見られない。また, せん断破壊自体のマクロな定義は簡単であるが, ミクロな定義は困難である。

4.2.2 相手材の損耗の繊維方向依存性

図 6, 7 から, 鉄は炭素繊維によって削り取られ, この鉄の摩耗量に繊維方向依存性があることがわかった。CFUR/E には 3 種類の凹凸が見られた。繊維群の凹凸, 繊維樹脂間の凹凸, それに繊維内の凹部である。相手材を削り取るのは繊維樹脂間の凹凸, つまり炭素繊維のエッジである。なお, 繊維内に欠落が見られるのは全繊維の 15 % 程度, 大きなものでは数 % 程度であり, その直径は繊維の 1/3 程度である。このため, 繊維と樹脂の境界に比べ, 繊維内のエッジが鉄を削る働きは小さいと考えられる。更に, 摩擦係数が滑りの向きには依らなかつたことは, エッジの有無が問題で, エッジの角度と滑りの方向の関係は 2 次的な要因であった事を意味する。

CFUR/E の 90 度の断面に, 単位長さあたり平均的 N 本の繊維が並んでいるとする。これから角度 θ の面を作ると, N 本の繊維が並ぶ切断面の平均的長さは $1/\sin\theta$ となる。つまり, 角度 θ の面の単位長さ当たりの炭素繊維のエッジの数は $2N\sin\theta$ となる。繊維群の凹凸, 相手材との関係から, すべてのエッジがあらゆる摩擦運動に対して有効に働くわけではない。エッジのうちのいくつかが確率的に鉄を削る。これに鉄のせん断強度とミクロな 1 つの損耗の平均面積を形式的には掛ければ, 相手材をミクロに切削することによる摩擦抵抗が C を比例定数として $C\sin\theta$ と得られる。

角度が小さい場合には, 3.4 で述べたように CFUR/E のせん断抵抗が小さくなり, これが限界値となる可能性もある。せん断抵抗が一定角度以下ではより小さな値になる。これを, 式の上で表現するには, 更に $\sin\theta$ を掛ければ良く, $C\sin^2\theta$ となる。

4.2.3 平坦の部分の滑り抵抗の繊維方向依存性

CFUR/E 摩擦面の平坦な部分は 3 種類ある。炭素繊維, 樹脂, 炭素と鉄の摩耗粉を含む樹脂である。これらの摩擦係数は違った値を示す。炭素繊維と樹脂について考える。各々の面に作用するせん断力の和が摩擦力になる。各部分の形は面によって変化するが, その割合はどのように面を切っても変わらないので, この事による繊維方向依存性は存在しない。摩耗粉を含んだ樹脂については, 角度毎に割合と形状が異なっており, 今回は議論しない。

5. 結 論

一方向炭素繊維強化エポキシ複合材料 CFUR/E 端面の摩擦係数が繊維方向によって異なる事に注目し、今回、SEM, EPMA, 粗さ計により摩擦面を分析検討して摩擦モデルを提案し、摩擦問題における繊維方向の力学的意味について検討し、以下の結論が得られた。

- (1) 摩耗機構 相手材との摩擦により、突起した炭素繊維は鉄を削り、また、鉄も凸状の炭素をこわしていく。炭素の損耗の量は 90 度より凹凸の激しい 45 度で多くなる。相手材は 90 度で最も多く摩耗され、0 度で最も少ない。樹脂も相手材により摩擦を受けるがこの樹脂に鉄と炭素の摩耗粉が混入し、CFUR/E の繊維間を埋めたり、炭素繊維を覆う膜となる。CFUR/E の端部に厚く蓄積する傾向がある。

端部に運ばれた摩耗粉末あるいはこれを含む樹脂膜は、一般には摩擦を軽減する。最大静止摩擦が得られないのはこのためであろう。しかし、相手材がこれ乗り上げるときには摩擦上昇に繋がってくる。

- (2) 摩擦係数 相手材を削りとるのは繊維樹脂間の凹凸、つまり炭素繊維のエッジである。このことによる摩擦抵抗が $C\sin\theta$ と得られる。角度が小さい場合には、CFUR/E のせん断抵抗が小さくなり、これを、式の上で表現するには、更に $\sin\theta$ を掛ければ良く、摩擦抵抗は $C\sin^2\theta$ となる。

なお、摩擦面を平坦な繊維面と樹脂面の集合と捕え、繊維形状変化を考慮するだけでは、摩擦係数の繊維方向依存性は得られない。

参 考 文 献

- 1) F. L. Matthews (ed.), *Joining Fiber-Reinforced Plastics*, Elsevier, 1986.
- 2) 肖 毅, 汪 文学, 高雄善裕, ピン継手による複合材料積層板接合部の 2 次元接触応力解析について, 九州大学応用力学研究所報, 第 81 号, 1, 1997.
- 3) J. P. Giltrow and J. K. Lancaster, The Role of the Counterface in the Friction and Wear of Carbon Fibre Reinforced Thermosetting Resins, *Wear*, 16-5, 359, 1970.
- 4) 築添 正, 大前伸夫, 複合材料の摩擦特性, 機論, 43-367, 1115, 1977.
- 5) T. Tsukizoe and N. Ohmae, Friction and Wear Performance of Unidirectionally Oriented Glass, Carbon, Aramid and Stainless Steel Fiber-Reinforced Plastics, *Friction and wear of polymer composites* (K. Friedrich, ed.), 205, 1986.
- 6) 肖 毅, 松原監壮, 汪 文学, 高雄善裕, 一方向強化 CFRP の摩擦特性の繊維方向依存性, 第 26 回 FRP シンポジウム講演論文集, 65, 1997.

(平成 9 年 6 月 30 日 受理)