振動環境下における一方向強化 CFRP のアブレシブ摩耗特性* (遊離砥粒における摩耗特性)

寺岡 貞一^{*1}, 石川 憲一^{*2}
中川 多津夫^{*2}, 大多 健太郎^{*3}

Abrasive Wear Characteristics of CFRP in Vibratory Environment (Wear Characteristics under Three-Body Conditions)

Sadakazu TERAOKA, Ken-ichi ISHIKAWA,
Tatsuo NAKAGAWA and Kentaro OHTA

In this study, the wear characteristics of CFRP under the three-body conditions were investigated using a vibratory environment. An abrasive wear apparatus was operated based on the pin-on-plate method at the piston-reciprocated sliding friction. The vibrating action was induced by mean of a mechanical oscillator. The velocity ratio was defined as the ratio of the maximum vibratory velocity ($a\omega$) of the test piece to the sliding velocity ($\dot{X}$) of the plate. The amplitude (a) and the velocity ratio ($a\omega/\dot{X}$) were varied to examine the influence of the vibrating action on the abrasive wear characteristics of CFRP. The experimental results are summarized as follows. (1) The wear rate of the high modulus type CFRP is greater than that of the high-strength-type. (2) In the abrasive wear of CFRP, no effect of fiber reinforcement is observed in the three-body abrasive wear. (3) In the vibration action in which the overlapping distance is 0.3 mm or less, the wear rate is independent on the vibration. However, when the overlapping distance is more than 0.3 mm, the wear rate becomes dependent upon the vibration.

Key Words: Wear, Reinforced Plastics, Vibration, Abrasive Grain, CFRP

1. 緒 言

炭素繊維強化プラスチック (CFRP) は、機械的強度が優れていることよりさまざまな分野で使用されている。この CFRP を機械装置などの可動部にしゅう動材として使用することを想定して、振動が作用した環境のもとで、固定砥粒による一方向強化 CFRP のアブレシブ摩耗実験が行われ、基礎的な二元摩耗特性が明らかにされてきた⁽¹⁾。また、実際には摩耗面相互間にちり、ほこりや摩耗粉など異物の混入による摩耗が考えられ、このような観点から、遊離砥粒による一方向強化 CFRP のアブレシブ摩耗実験が行われ基礎的な三元摩耗特性についても明らかにされている⁽²⁾。そこで、本論文では、より実際に近い動作環境をモデル化し、遊離砥粒が混入した場合の三元摩耗特性を知るために、CFRP を往復運動させながら滑り方向と同一方向に振動を付加させることのできるピン・プレート方式による摩耗試験装置を用いて、高強度タイプと高弾性タイプの CFRP および母材であるエポキシ樹脂

について摩耗実験を行い、これまでに得られた基礎的な二元および三元摩耗特性と比較し、その摩耗メカニズムおよび摩耗特性について検討を行った。

2. 実験装置および実験方法

表 1 に高強度タイプ、高弾性タイプの CFRP および母材であるエポキシ樹脂の機械的性質を示す。また、図 1 に CFRP における炭素繊維の配向に対する摩擦方向を示す。繊維方向と同一方向に摩擦する方向を L 方向、直角に摩擦する方向を T 方向とした。

図 2 にピン・プレート方式摩耗試験装置の概略を示す。試験片 (縦 20 mm × 横 5 mm × 厚さ 5 mm) 2 個①は試験片スライドテーブル⑥に固定され、相手面である S 45 C プレート③上で摩耗される。クランク⑧の回転運動を加振装置スライドテーブル⑦を介して試験片スライドテーブルに作用させ、図中の X 方向に往復運動させる。また同様に、試験片は可変速モータ⑤よりタイミングベルトを介して偏心リングが取り付けられている軸④を回転させることで加振される。この偏心リングを取り替えることで 0.3, 0.5, 1.0, 1.95 mm の振幅を得ることが可能である。荷重は、試験片スライドテーブルの自重を利用し試験片に負荷した。ここで、試験片に作用する面圧は、過去に行ったピ

* 原稿受付 1996 年 8 月 1 日。

*¹ 正員, 金沢工業高等専門学校 (〒921 金沢市久安 2-27-0)。

*² 正員, 金沢工業大学 (〒921 石川県石川郡野々市町扇が丘 7-1)。

*³ 学生員, 金沢工業大学大学院。

Table 1 Mechanical properties of resin and CFRP

Item		CFRP				Resin
		High strength		High modulus		
		L	T	L	T	
Density	kg/m ³	1.53 × 10 ³		1.80 × 10 ³		1.22 × 10 ³
Young's modulus	GPa	120	8.8	280	7.8	3.3
Tensile strength	MPa	1640	65	1760	50	76
Flexural strength	MPa	1350	67	880	—	153

Fig. 1 Rubbing direction

Fig. 2 Experimental apparatus

ン・ディスク方式における実験の場合⁽³⁾と等しい値とした。

砥粒は十分乾燥したものを砥粒供給口②より摩擦面の全面へ連続的に供給され、スライダ側面から排出される。また、摩耗率はマイクロメータを用いて試験片の厚みを3点測定し、その平均値より求めた実験条件を表2に示す。なお、摩擦速度(スライドテーブルの移動速度) $\dot{X}$ は、スライドテーブルが往復運動(振幅 50 mm, 周波数 0.064 Hz)するため一定ではないが、その運動は加振装置の振動数、振幅と大きく異なるため、往復運動一周期間の平均速度とした。そこで一方向摩擦時の摩擦距離を式(1)により求め、さらに振動を作用させた場合の摩擦距離は式(2)のように試験片の相手面に対する相対的な距離として求めた⁽⁴⁾。

振動を作用させることにより、同一箇所を繰り返し摩擦すること、すなわちオーバーラップ現象が生じ、その割合を式(3)によって求め、さらにそのことを考慮し

Table 2 Experimental conditions

Sliding speed	13.3mm/s
Frequency	0-20Hz
Pressure	0.39Mpa
Amplitude	0, 0.3, 0.5, 1.0, 1.95 mm
Abrasive particles	GC#600 Mean diameter: 27.1 μ m

た摩耗率を式(4)により求めた。ここでオーバーラップ率は振動一周期間において、滑り速度より振動速度が上回った区間において、オーバーラップが生じる。そこで、オーバーラップする割合を平均摩擦速度とすべり速度との差を平均摩擦距離で除した値とした。

一方向摩擦時の摩擦距離: $L_o = \dot{X} \cdot t$ (1)

X 方向振動摩擦時の摩擦距離:

$$Lx = \frac{t}{2\pi} \int_0^{2\pi} |\dot{x} - \dot{X}| d(\tau)$$

$$= \dot{X} \left[1 + \frac{2}{\pi} \left(\sqrt{V^2 - 1} - \cos^{-1} \frac{1}{V} \right) \right] \cdot t = \overline{Vx} \cdot t$$

..... (2)

ここで

$\dot{x}$: 振動速度 mm/s

t : 摩擦時間 s

ω : 円振動数 rad/s

a : 振幅 mm

V : 速度比 $a\omega/\dot{X}$

$\overline{Vx}$: 平均摩擦速度 mm/s

τ : 時刻 ωt

オーバーラップ率: $Ov = (\overline{Vx} - \dot{X}) / \overline{Vx}$ (3)

摩耗率: $W = Wn \cdot (1 - Ov)$ (4)

ここで、

Wn : 一方向摩擦時の摩耗率 mm³/m

3. 実験結果

図3に高強度タイプのCFRP, 図4に高弾性タイプのCFRP, 図5にはエポキシ樹脂における速度比と摩耗率の関係を示す。ここで、図中に示す点線は、一方向摩擦時の摩耗率(Wn)をもとにオーバーラップしてい

Fig. 3 Relationship between velocity ratio and wear rate of high strength type CFRP

Fig. 4 Relationship between velocity ratio and wear rate of high modulus type CFRP

る部分において摩擦作用がないものとして式(4)より計算した値である。なお、速度比1までは試験片の振動速度より摩擦速度が速いため、振動の影響がないものとして取扱い、一方向摩擦時と同一の値とした。図3より高強度タイプのCFRPの摩耗率は、 L 方向、 T

方向のいずれの場合においても各振幅条件ともに速度比の増大に伴い減少する傾向を示した。このとき、 T 方向の摩耗率は、 L 方向の摩耗率より約1.5倍大きな値を示した。また、実験値と計算値を比較すると、ある速度比までは一致し、それ以降の速度比においては

Fig. 5 Relationship between velocity ratio and wear rate of Epoxy resin

計算値よりも実験値は大きな値を示した。また、図 3 (a) に示すように振幅 0.3 mm のときを除いて実験値と計算値に差が生じた。その差が生じ始めるときの速度比は、振幅 0.5 mm で 1.9 付近、振幅 1 mm で 1.4 付近、振幅 1.95 mm で 1.2 付近であった。図 4 より高弾性タイプの摩耗率は、高強度タイプに比べて若干大きな値を示したが、速度比の増大に伴い減少する傾向を示した。このとき、 T 方向と L 方向との摩耗率の違いは高強度タイプほど見られないが、 T 方向の摩耗率は L 方向の約 1.2 倍大きな値を示した。また、実験値と計算値を比較すると、高強度タイプと同様に差が生じ、そのときの速度比は振幅 0.5 mm で 1.9 付近であった。図 5 よりエポキシ樹脂の摩耗率は、CFRP と同様、速度比の増大に伴い摩耗率は減少する傾向を示した。また、摩耗率の値は、2 種類のタイプの CFRP よりも小さな値を示した。すなわち、CFRP の摩耗率は、エポキシ樹脂よりも大きな値を示すことがわかる。

4. 考 察

前述したように 2 種類のタイプの CFRP においても摩耗率は、エポキシ樹脂の摩耗率よりも大きな値を示した。これは、遊離砥粒が摩擦面相互間に作用した場合、その摩耗は砥粒が転動しながら試験片に食い込むとともに引っかかり現象を伴いながら生ずるものと考えられる。炭素繊維は直径が $8 \mu\text{m}$ 程度と細く、さらに横方向の力に弱いことなどから簡単に折られ、脱落することになり、このような結果が得られたものと考えられる。したがって、摩擦面内の遊離砥粒が作用する三元摩耗の場合には、CFRP の炭素繊維による補強効果は発揮できないものと思われる。

また、高強度タイプより高弾性タイプの CFRP の摩耗率が大きな値を示したが、これは、高強度タイプよりも高弾性タイプの炭素繊維は、曲げ強度が低いため砥粒によって簡単に折損されることから、このような結果が得られたものと考えられる。このことから、CFRP の摩耗には、炭素繊維の折れやすさ(曲げ強度の低さ)が大きく影響しているものと思われる。

さらに、2 種類のタイプの CFRP においても T 方向の摩耗率が L 方向よりも大きな値を示した。これは、 T 方向の場合、炭素繊維に対して砥粒が横方向から作用するため、前述したように炭素繊維は細く、さらに横方向の力すなわち曲げに弱いことから簡単に折られ、脱落することからこのような結果が得られたものと考えられる。さらに、高弾性タイプの場合を高強度タイプの場合と比較すると、 L 方向と T 方向との摩耗率の差は若干減少している。これは、高弾性タイプは先に示したように炭素繊維の曲げ強度が低く、炭素繊維が簡単に折損されるため、 L 方向においても折損される量が多くなり、このような結果が得られたものと考えられる。2 種類のタイプの CFRP とエポキシ樹脂において、実験値と計算値について比較すると、速度比が 1 以上において、ある速度比までは、ほぼ同様の値を示し、その後、実験値は、計算値よりも大きな値を示した。ここで、計算値は、先に示したとおり、オーバーラップしている部分における摩擦作用がないものとして求めた値である。したがって、振動が作用し、同一箇所を繰返し摩擦するオーバーラップ現象が生じて、その部分における砥粒の転動が小さい場合では、CFRP の摩耗に影響を与えていないものと考えられる。また、実験値と計算値に差が生じるときの速度比は、各振幅において一定ではなく、振幅が増大するに

Fig. 6 Relationship between velocity ratio and overlapping distance

従い減少している。これは、振幅が増大すると同一速度比においても振動一周期間におけるオーバーラップする距離が増大することから、砥粒の転動が活発になるためであると考えられる。そこで、各振幅におけるオーバーラップ距離 (L_{ov}) を式(2)より、振動速度が摩擦速度を上回る区間について積分し、式(5)により求めた。

オーバーラップ距離：

$$L_{ov} = 2 \cdot \left[a \left(\sin \left(\cos^{-1} \frac{1}{V} \right) \right) - \frac{\dot{X}}{\omega} \cdot \left(\cos^{-1} \frac{1}{V} \right) \right] \quad \dots\dots\dots (5)$$

図6に各振幅における速度比に対するオーバーラップ距離の計算結果を示す。実験値と計算値との差が生じるときの速度比より求めたオーバーラップ距離は、いずれの振幅においても、約0.3 mmであった。このことから、動幅が作用しオーバーラップが生じてその距離が砥粒外周の約3倍の距離(約0.3 mm)までは、砥粒が表面に食い込むだけでほとんど転動せず、炭素繊維を切断するが、脱落するまでにはほとんど至らず、その部分における摩耗はほとんど生じないものと考えられる。また、これまでの遊離砥粒による摩耗実験より、オーバーラップする部分における摩耗率は一方向摩擦時の約30%という結果が得られている⁽³⁾。これは、オーバーラップする部分では、摩耗粉が多く介在するため、砥粒のCFRP表面への食い込みが阻止されることによるものと考えられる。そこで、以下に示す計算方法で摩耗率を求めた。

(1) 速度比が1までは振動が作用しないものと考え、一方向摩擦時と同様の値とする。

(2) オーバーラップ距離が0.3 mmまでの摩耗率はオーバーラップしている部分における摩擦作用がない

(a) $L_{ov} = 0 \text{ mm}$ ($V = 0$)

(b) $L_{ov} = 0.24 \text{ mm}$ ($V = 1.65$)

(c) $L_{ov} = 0.42 \text{ mm}$ ($V = 2.36$)

High strength CFRP L-direction
 $\dot{X} = 13.3 \text{ mm/s}$ GC # 600 $P = 0.39 \text{ MPa}$ $a = 0.5 \text{ mm}$

Fig. 7 SEM observation of test piece

とし、式(4)より求める。

(3) オーバーラップ距離が0.3 mmを超えた場合については、オーバーラップ部分において砥粒が摩耗に影響を及ぼす割合が約30%として式(6)より求める。

$$W_{on} = W + Wn \{ 2(L_{ov} - 0.3) / \sqrt{X} / f \} R_{ov} \quad \dots (6)$$

ここで、

R_{ov} : オーバーラップ部分において砥粒が摩耗に影響を及ぼす割合(30%)

これらの計算結果を図3～5に実線で示す。2種類のCFRP、エポキシ樹脂いずれの場合においても多少のばらつきはみられるが、実験値と同様の値を示した。このことより、ピン・ディスク方式と同様に、オーバーラップ距離が約0.3 mmまではオーバーラップしている部分においては摩耗が生じないと考えられる。また、オーバーラップ距離が0.3 mmを超えた場合は、その部分においても摩耗が生じるが、砥粒が摩耗に影響

Fig. 8 Schematic illustrations of wear mechanism

を及ぼす割合は、本研究における実験結果からは約30～50%程度あると考えられる。

ここで、高強度タイプ(L方向)を例にとり、一方向摩擦および二つの異なったオーバーラップ距離における実験後の試験片表面を走査型電子顕微鏡で観察した結果について図7に示す。図7(a)のように一方向摩擦時の場合においては、試験片表面には砥粒によって炭素繊維が損傷されている部分がところどころ観察された。図7(b)のようにオーバーラップ距離0.24 mmの場合においてもほぼ同様に観察された。しかし、図7(c)のようにオーバーラップ距離が0.42 mmの場合においては、より細かく損傷された表面が観察され、折損した炭素繊維が多いことから、摩耗が顕著に生じているように観察された。そこで、図8にオーバーラップした部分におけるCFRPの摩耗過程のモデル図を示す。CFRPの摩耗は、砥粒が転動しながら食い込み、引っかくことで生ずるものとする、図8(a)のように、オーバーラップ距離が0.3 mmまでの場合、オーバーラップ部分における砥粒の転動は生じにくい。したがって、炭素繊維は切断されるが、脱落するまでに

は至らず、ほとんど摩耗が生じないものと考えられる。しかし、図8(b)のように、オーバーラップ距離が0.3 mmを超えた場合では、オーバーラップ部分において砥粒が転動することになり、CFRPに食い込むとともに引っかき作用も重畳し、炭素繊維をより細かく切断し脱落させることから、オーバーラップ部分においても摩耗が生ずるものと考えられる。また、母材であるエポキシ樹脂においても、速度比の増加に対して同様の傾向が見られることから、CFRPと同様に振幅が小さい場合には砥粒は転動しにくく、振幅が大きくなると砥粒は転動し、摩耗が生じるものと考えられる。

5. 結 言

振動環境下において遊離砥粒が摩擦面相互間に作用する場合、一方向強化CFRPを往復運動させながら同一箇所を繰返し摩擦させて実験を行った結果、以下の事柄が明らかとなった。

- (1) 高弾性タイプのCFRPの摩耗率は、高強度CFRPの摩耗率よりも大きな値を示す。
- (2) 摩擦面内に遊離砥粒が作用した場合におけるCFRPの摩耗は、炭素繊維が砥粒によって折られ脱落することが主体的となり、炭素繊維による補強効果はない。
- (3) CFRPおよびエポキシ樹脂は、振動が作用しオーバーラップが生じて、オーバーラップ距離が0.3 mmまでは振動の影響がなく、一方向摩擦時と同様の摩耗形態を示す。また、オーバーラップ距離が0.3 mmを超えた場合においてはその距離の増大に伴い摩耗率も増大する。

文 献

- (1) 寺岡貞一・石川憲一・中川多津夫, 振動環境下におけるアプレシブ摩耗特性に関する研究-CFRPの処女面摩擦について-, 精密工学会誌, 54-8(1988), 1502-1507.
- (2) 寺岡貞一・石川憲一・中川多津夫・大場重男, 環境下における一方向強化CFRPのアプレシブ摩耗特性, 機論, 60-569, C(1994), 262-267.
- (3) 寺岡貞一・石川憲一・中川多津夫・水谷直広, 振動環境下における一方向強化CFRPの摩擦・摩耗特性に関する研究-遊離砥粒における摩耗過程-, 砥粒加工学会誌, 40-1(1996), 44-49.
- (4) 石川憲一, 振動応用工学, (1989), 24, 金沢工業大学出版局.