FRPのエロージョンに及ぼす界面強度の影響[†]

宮崎 則幸* 濱尾 聡和** 宗 像 健***

Effect of Interfacial Strength on Erosion Behavior of FRPs

by

Noriyuki MIYAZAKI*, Toshikazu HAMAO** and Tsuyoshi MUNAKATA***

Experiments were carried out to study the effect of interfacial strength between matrix material and fibers on the solid particle erosion behavior of FRPs. The FRPs used were epoxy resins unidirectionally reinforced by carbon fibers. Both FRPs with treated fibers and untreated fibers were used as the test materials.

According to the tensile tests, the FRP with treated fibers shows higher interfacial strength than the FRP with untreated fibers. The results of the erosion tests show that the FRP with treated fibers has higher erosion resistance than the FRP with untreated fibers due to higher interfacial strength between matrix material and fibers, though the erosion rates of both FRPs are higher than that of neat resin.

Key words: Erosion, FRP, Interfacial strength, Epoxy resin, Carbon fiber

1 緒 言

近年、力学的特性の優れている繊維強化プラスチック (FRP)、繊維強化金属 (FRM) といった先端複合材料が開発されている。これらの先端複合材料は今後各種の分野で多用な形で使用される可能性がある。一例として、航空機用ジェットエンジンの軽量化のために FRP を用いることが検討されているが、このような場合、砂の吸引にともなう FRP のエロージョンが問題となっている。しかし、気流に同伴された高速微粒子による FRP のエロージョンに関する研究は少ない^{1)~7)}。FRP においては、マトリックス材と強化繊維との間に界面が存在している。強化繊維表面の処理条件を変えた試験材料を用いて、界面の状態がエロージョンに及ぼす影響を検討した実験は著者らによるものだけである。この実験では、不飽和ポリエステル樹脂 (UP) あるいはエポキシ樹脂 (EP) をマトリックス材とし、ガラス繊維 (GF) を強化繊維とする FRP を用いた。この結果、UP/GF FRP ではガラス繊維の表面処理条件の違いにより三点曲げ強度に大きな違いが生じ、エロージョン量と三点曲げ強度 (界面強度) に明確な相関が認められた。しかし、EP/GF FRP では、ガラス繊維の表面処理条件の差が界面強度の差として現れず、これについては界面強度がエロージョンに及ぼす影響に関するデータは得られなかった。

そこで、本研究では前報の実験を補充する意味で、エポキシ樹脂 (EP) を炭素長繊維 (CF) により一方向強化した FRP において、炭素繊維の表面を処理した場合と未処理の場合の 2 種類の試験材料を用意し、界面強度を測定する実験とエロージョン量を測定する実験とを行い、両者の間の関係を検討した。また、用いた FRP は一方向強化であるので、繊維の方向と衝突粒子のなす角度が

エロージョン量に及ぼす影響についても検討した。

2 実験方法

2・1 実験装置

Fig. 1 に実験装置の概略図を示す。実験装置は空気源のエアーコンプレッサー、粉体粒子を定量的に供給する電磁式フィーダー、粉体粒子を加速するエゼクター、ノズル、試験片を固定して決められた角度に設定するホルダーから成る。使用した粒子は、市販の SiC 研磨材

Fig. 1. Schematic diagram of erosion test apparatus.

120 メッシュをメッシュ 100 のふるいを上に、メッシュ 150 のふるいを下にしてふるいをかけて粒径をおおむね $100\ \mu\text{m}$ ~ $150\ \mu\text{m}$ にそろえたものを用いた。空気に対する粒子の混合比は $0.44\ \text{g/l}$ になるように電磁式フィーダーからの粒子供給量を調節した。また、二重回転円盤型測定装置を用いてそれぞれの粒子混合比について、粒子速度 V_p を測定し、ピトー管により測定される空気速度 V_a との校正曲線を事前に求めておいた。各実験における粒子速度は、空気速度を測定することにより、この校正曲線から決定した。

2・2 実験材料

実験材料として、エポキシ樹脂 (EP) のみからなる材

[†] 本報を「複合材料のエロージョン挙動 (第 3 報)」(Erosion Behavior of Composite Materials, III) とする。また、前報は材料 43 巻 487 号 457 頁 (1994 年) に掲載済である。

原稿受理 平成 6 年 4 月 8 日 Received Apr. 8, 1994

* 正 会 員 九州大学工学部化学機械工学科 〒812 福岡市東区箱崎, Dept. of Chem. Eng., Kyushu Univ., Higashi-ku, Fukuoka, 812

** (株)安川電機基礎研究所 〒806 北九州市八幡西区黒崎城石, Res. Lab., Yasukawa Elec. Co., Yahatanishi-ku, Kitakyushu, 806

*** 九州大学工学部化学機械工学科 〒812 福岡市東区箱崎, Dept. of Chem. Eng., Kyushu Univ., Higashi-ku, Fukuoka, 812

Table I. Properties of test materials.

	Density (g/cm ³)	Fiber weight content (%)	Fiber volume content (%)	Average fiber diameter (μ m)	Tensile strength (MPa)
Epoxy Matrix A	1.20	0.0	0.0	—	—
FRP B	1.67	65.0	52.7	9	38.7
FRP C	1.62	61.4	48.8	9	23.9

料(これを A と呼ぶ)とエポキシ樹脂をマトリックス材として、繊維直径が約 $9\mu\text{m}$ の炭素長繊維により一方向強化された FRP 2 種類(これらを B, C と呼ぶ)を用いた。ここで、FRP B は炭素繊維表面処理を施してエポキシ樹脂との濡れ性、接着性を改善したものである。一方、FRP C は繊維表面が未処理のものである。炭素繊維の表面を処理したものと未処理のものとでマトリックス材と繊維との界面強度にどの程度の違いが生じるかを調べるために、FRP B と C について繊維配向方向に直角方向の引張り試験を行い、それぞれの引張り強度を求めた。この引張り強度も含めて、実験に使用した材料の特性を Table I に示す。この表より、FRP B と C では、引張り強度が B の方が C よりも 1.6 倍ほど大きく、炭素繊維表面の処理によりマトリックス材と繊維の界面が強化されたことがわかる。

2.3 エロージョン量の測定

粉体粒子の衝突による試験片のエロージョン量は、試験片の質量減を精密天秤で測定して求めた。実験で得られた試験片の質量減 ΔW (mg) と衝突粒子量 M (kg) との関係、すなわち損傷曲線の一例を炭素繊維の表面処理を施した FRP B について、粒子速度 $V_p=18.9\text{ m/s}$ 、衝突粒子と試験片とのなす角度 $\alpha=30^\circ$ 、衝突粒子と繊維配向方向とのなす角度 $\beta=0^\circ$ (粒子が繊維配向方向に平行に衝突) の場合について Fig. 2 に示す。損傷曲線は粒子の照射開始から一定の期間は質量損失が負となったり、質量変化が小さな潜伏期と、質量減が粒子衝突量に対して直線的に増加していく定常期から成る。この定常期の質量変化 ΔW を衝突粒子量 M に対して最小二乗近似して傾きを求め、密度を用いて体積減少量になおしたものを定常エロージョン速度 R (mm^3/kg) と定義する。

3 実験結果および考察

3.1 定常エロージョン速度

実験は粒子速度 $V_p=18.9\text{ m/s}$, 34.6 m/s , 55.7 m/s ,

Fig. 2. Typical erosion curve for FRP B with treated fibers ($V_p=18.9\text{ m/s}$, $\alpha=60^\circ$, $\beta=0^\circ$).

(a) $V_p=18.9\text{ m/s}$.

(b) $V_p=34.6\text{ m/s}$.

(c) $V_p=55.7\text{ m/s}$.

Fig. 3. Relation between erosion rate and impact angle α .

衝突粒子と試験片とのなす角度 $\alpha=15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$, 衝突粒子と繊維配向方向とのなす角度 $\beta=0^\circ$ (粒子が繊維配向方向に平行に衝突), 90° (粒子が繊維配向方向に直角に衝突) の条件で実験を行った。

Fig. 3 (a), (b), (c) に粒子速度 V_p が 18.9 m/s, 34.6 m/s, 55.7 m/s の各場合について、エロージョン速度 R の衝突角度 α による変化を示す。これらの図より概略以下のことがわかる。①マトリックス材 A では $\alpha=30^\circ$ 付近で R が最大となるが、FRP B, C では R が最大となる α の値が 60° というように高角度側に移行する。②マトリックス材 A よりも FRP B, C の方がエロージョン速度が大きい。③炭素繊維の表面未処理の FRP C の方が表面処理を施した FRP B よりもエロージョン速度は大きい。④粒子が繊維配向方向と平行に衝突する場合 ($\beta=0^\circ$) と直角方向 ($\beta=90^\circ$) に衝突する場合でエロージョン速度に差が認められる。

①に記したように、マトリックス材 A で、 $\alpha=30^\circ$ 付近に R のピークを生じるのは、プラスチックのエロージョンの場合には延性的な性質が強く現れることによる。すなわち、延性材料のエロージョンでは、衝突粒子の切削による効果が支配的であり、 $\alpha=30^\circ$ 付近に R のピークが生じることが知られている^{9),10)}。一方、強化繊維として用いている炭素繊維は典型的なぜい性材料である。ぜい性材料のエロージョンは、マイクロクラックの生成あるいは塑性変形等の損傷で生じ、これらの損傷量は衝突粒子の損失運動エネルギーの増加とともに増大すると考えられる。Hutchings らによって、この損失運動エネルギーは $\alpha=90^\circ$ で最大になることが知られているので、ぜい性材料では、 $\alpha=90^\circ$ で R が最大となる。本実験で用いた FRP のような体積含有率で 50% ほどのぜい性的な炭素繊維が含まれている FRP では、炭素繊維のぜい性的な性質が強く現れ、 R が最大になる α の値が高角度側に移行することになる。

ぜい性的な炭素繊維含有の効果は Fig. 4 に示すエロージョン速度 R と粒子速度 V_p との関係にも現れている。すなわち、Fig. 4 に示すいずれの場合も $R \propto V_p^n$ の関係

Fig. 4. Relation between erosion rate and particle velocity ($\alpha=90^\circ$).

(a) $V_p=18.9 \text{ m/s}$.

(b) $V_p=34.6 \text{ m/s}$.

(c) $V_p=55.7 \text{ m/s}$.

Fig. 5. Effect of fiber inclusion on erosion rate.

が成立しているが、指数 n の値はマトリックス材 A の場合で約 2.6, FRP B, C で約 3.0 であり, FRP の方がマトリックス材よりも多少大きな値となっている。ガラスのようなぜい性材料は, 延性材料よりも大きな n の値を示すことが知られている。^{12), 13)} FRP では含有しているぜい性的な繊維の影響で n の値がマトリックス材よりも大きな値となったと考えられる。

②に記したように, マトリックス材 A よりも FRP B, C の方がエロージョン速度が大きいことをより明瞭に示すために, FRP のエロージョン速度 R_{FRP} を同じ実験条件でのマトリックス材でのエロージョン速度 R_{Matrix} で除した R_{FRP}/R_{Matrix} の値の衝突角度 α による変化を各粒子速度の場合について, Fig. 5 (a), (b), (c) に示す。これらの図より, 衝突角度 α が低角度のときは R_{FRP}/R_{Matrix} の値が 1 に近く, FRP とマトリックス材とでほぼ同じ値を示しているが, α が高角度になるにしたがって FRP のエロージョン速度はマトリックス材の場合よりも約 5~10 倍まで大きくなっており, 繊維の含有による影響が顕著になっている。また, 粒子速度が大きいほどその影響が大きくなっている。

③に記したように, 炭素繊維に表面処理を施していない FRP C の方が, これを施している FRP B よりもエロージョン速度が大きいことを明瞭に示すために, 同じ実験条件での FRP C のエロージョン速度 R_c を FRP B のエロージョン速度 R_b で除した R_c/R_b の衝突角度 α による変化を各粒子速度の場合について Fig. 6 (a), (b), (c) に示す。これらの図より, 衝突角度 α が 15° の場合はほとんど炭素繊維表面の処理状態の影響はみられない。全体的に, 衝突角度 α が高角度になるにしたがって, 炭素繊維表面が未処理でマトリックス材と繊維との界面強度が低い FRP C の方が, 繊維表面が処理されていて界面強度が高い FRP B よりもエロージョン速度が大きいことがわかる。

高角度の α におけるエロージョン速度は, 前述のように, 衝突粒子の損失運動エネルギーにより受ける試験片の損傷量により支配される。繊維を含有していれば, マトリックス材と繊維との間に力学的に弱い界面が存在することになり, 繊維を含まない場合よりも大きな損傷を受けることになる。また, 界面強度が弱いほど, やはりこの損傷量は大きくなると考えられる。したがって, Fig. 5 あるいは Fig. 6 に見られるように, 高角度の α において, FRP のエロージョン速度がマトリックス材のエロージョン速度より大きく, 同じ FRP であっても界面強度が弱いほどエロージョン速度が大きくなる。

④に記したように, 衝突粒子と繊維配向方向とのなす角度 β により, エロージョン量に差が認められることをより明瞭に示すために, Fig. 7 (a), (b), (c) に同じ実験条件, 同じ試験材料での $\beta=90^\circ$ (粒子が繊維配向方向に直角に衝突) の場合のエロージョン速度 R_{90} を $\beta=0^\circ$ (粒子が繊維配向方向に平行に衝突) の場合のエロージョン速度 R_0 で除した R_{90}/R_0 の衝突角度 α による変化を示す。なお, $\alpha=90^\circ$ では当然のことながら $\beta=0^\circ$

(a) $V_p = 18.9 \text{ m/s}$. (b) $V_p = 34.6 \text{ m/s}$. (c) $V_p = 55.7 \text{ m/s}$.

Fig. 6. Effect of fiber surface treatment on erosion rate.

と 90° では差がないので R_{90}/R_0 の値は 1.0 となる。これらの図より, α が 60° より小さい範囲では明確な右下

Fig. 7. Effect of angle β on erosion rate.

がりの傾向を示し、低角度になるほど繊維配向方向の影響が強く現れ、 R_{90} の方が R_0 よりも大きくなる。これは、低角度の α においては、前述のように、エロー

(a) $\beta=0^\circ$. (b) $\beta=90^\circ$.Fig. 8. Eroded surface of FRP B with treated fibers ($V_p=18.9 \text{ m/s}$, $\alpha=30^\circ$).

ジョン速度は衝突粒子による切削支配となるが、 $\beta=90^\circ$ というように、繊維に対して直角方向から切削した方がマトリックスと繊維との界面に沿ってより長い繊維をマトリックスからはく離させることができることによる。

3・2 表面観察

実験に使用したFRPの表面状態を、エロージョン実験後に走査型電子顕微鏡 (SEM) により観察した。

Fig. 8 (a), (b) に繊維の表面処理を施したFRP Bの $V_p=18.9 \text{ m/s}$, $\alpha=30^\circ$ におけるエロージョン後のSEM写真を示す。Fig. 8 (a) の $\beta=0^\circ$ (粒子が繊維配向方向に平行に衝突) の場合と Fig. 8 (b) の $\beta=90^\circ$ (粒子が繊維配向方向に直角に衝突) とを比較すると、 $\beta=0^\circ$ では、繊維の直径が確認できるほど表面上に繊維が残存しているが、 $\beta=90^\circ$ では、表面上に繊維の頂部がわずかに露出した部分は存在するが、 $\beta=0^\circ$ の表面よりも繊維の露出は格段に少なく、繊維はマトリックスと一緒に一様に削り取られているようである。このことは、3・1節で示した実験事実、すなわち、粒子が繊維配向方向に直角に衝突した方が、平行に衝突した場合よりもエロージョン速度が大きいことを裏付けている。

Fig. 9 (a), (b) に $V_p=18.9 \text{ m/s}$, $\alpha=90^\circ$ の場合について、繊維表面を処理したFRP Bと繊維表面が未処理のFRP Cのエロージョン後の表面のSEM写真を示す。Fig. 9 (b) からわかるように、繊維表面を処理していないFRP Cの場合は、エロージョン面が比較的平坦で、繊維の離脱が少量の損傷によって容易に起こったように見えるのに対して、繊維の表面を処理してマトリックスと

(a) FRP B with treated fibers.

(b) FRP C with untreated fibers.

Fig. 9. Eroded surface of FRP
($V_p=18.9$ m/s, $\alpha=90^\circ$).

繊維の界面を強化した FRP B では, Fig. 9(a)に見られるように, エロージョン面が荒れており, マトリックスと密着していた繊維が無理やりはがされたように見える. このことは, 繊維の表面に処理を施して, 界面強度を高めた FRP B の方がエロージョン量が少ないという 3・1 節に示した実験事実と対応している.

4 結 言

エポキシ樹脂をマトリックス材とし, 炭素長繊維で一方向強化した FRP の界面強度試験および固体粒子衝突によるエロージョン実験を行った. その結果, 繊維の表面処理を施してマトリックスと繊維間の界面強度を高め

た FRP の方が繊維表面未処理の FRP よりも高いエロージョン抵抗を示す結果が得られた.

そのほか, 過去の研究においても見いだされていることではあるが, FRP は繊維の含有により, マトリックス材よりもぜい性的なエロージョン挙動を示すようになること, FRP の方がマトリックス材よりもエロージョン速度が大きいこと, 一方向強化 FRP では比較的低角度衝突の場合に, 粒子が繊維配向方向に直角に衝突する方が, 平行に衝突する場合よりもエロージョン速度が大きいことも, 本実験により再確認できた.

本実験の実施に協力を頂いた九州大学工学部化学機械工学科卒業研究生の佐藤博樹氏(現在新菱冷熱)に感謝する.

(平成 6 年 3 月 17 日 日本材料学会第 23 回 FRP シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) G. P. Tilly, *Wear*, **14**, 63 (1969).
- 2) G. P. Tilly and W. Sage, *Wear*, **16**, 447 (1970).
- 3) J. Zahavi and G. W. Schmitt, *Wear*, **71**, 179 (1981).
- 4) K. V. Pool, C. K. H. Dharan and I. Finnie, *Wear*, **107**, 1 (1986).
- 5) P. J. Mathias, W. Wu, K. C. Goretta, J. L. Routbort, D. P. Groppi and K. R. Karasek, *Wear*, **135**, 161 (1989).
- 6) 宮崎則幸, 重國智文, 宗像 健, 武田展雄, *材料*, **40**, 205 (1991).
- 7) 宮崎則幸, 濱尾聡和, 宗像 健, *材料*, **43**, 457 (1994).
- 8) G. Zambelli and A. V. Levy, *Proc. Corrosion/Erosion of Coal Conversion System Materials Conference*, 480 (1979).
- 9) J. G. A. Bitter, *Wear*, **16**, 5 (1963).
- 10) J. G. A. Bitter, *Wear*, **16**, 169 (1963).
- 11) I. M. Hutchings, R. E. Winter and J. E. Field, *Proc. Royal Soc.*, **A348**, 379 (1976).
- 12) G. L. Sheldon and I. Finnie, *J. Eng. Ind., Trans. ASME Ser. B*, **88**, 387 (1966).
- 13) G. L. Sheldon and I. Finnie, *J. Eng. Ind., Trans. ASME Ser. B*, **88**, 393 (1966).