



技術解説

# 繊維強化プラスチックの 摩擦・摩耗特性

築 添 正\*

## 1. はじめに

鋼棒とコンクリートからなる鉄筋コンクリート、ガラス繊維と樹脂を組合わせた繊維強化プラスチック (FRP) などいわゆる複合材料は、異種の材料を複合させてそれぞれの材料間で長所を生かし短所を補い合うことにより優秀な性質の組合せ一体材料を得ようとしたものである。最近アドバンストコンポジット (新しい複合材料) が次々と発表され、その優秀な諸性質から構造用部材あるいは機械部品などに大いに利用されつつある。これはガラス繊維、炭素繊維、ボロン繊維、アラミド繊維 (Kevlar-49)、炭化けい素繊維など機械的性質のすぐれた新しい繊維の開発に負うところが大きいと考えられるが、これら補強材 (繊維) とマトリックス (樹脂あるいは金属) との組合せは数限りなくあり、したがって新しい複合材料は無数の可能性を秘めた材料であるといえるであろう。このとき複合材料の引張り強さや縦弾性係数など機械的性質については、補強材およびマトリックスの、それぞれの機械的性質から計算によって求められる複合則 (law of mixture)<sup>1)</sup> なるものがある。もしも複合材料の摩擦係数および摩耗率に対しても複合則またはそれに類するものがあれば、新材料の模索さらには機能設計に大いに利するものと考えられる。

複合材料とくに FRP の摩擦・摩耗については LANCASTER や GILTROW らの精力的な実験結果<sup>2)~6)</sup>があるが、系統的研究成果はまだ見られないようである。著者らは炭素繊維強化プラスチックをはじめ各種 FRP の摩擦・

摩耗特性の究明に取り組んできた<sup>9)~18)</sup>。本稿ではこれらの研究結果にさらに若干の新しいデータを加え、摩擦係数の複合則の誘導を行うとともに、FRP の摩耗の式の提案を試みた。なお本研究ではデータの整理ならびに理論解析を容易にするため一方向繊維強化プラスチックを取り上げたが、補強繊維がクロスまたはマットのときもこの基本的な場合の応用問題として考えられるであろう。

## 2. 摩擦係数の複合則

一方向強化 FRP 面上を炭素鋼円すい圧子がすべるとき摩擦方向として図 1 のように繊維方向 L、繊維直角方向 T および繊維断面内 N の 3 者が考えられる。いずれの場合も摩擦面の見かけの接触面積 A のうち、繊維が占める面積  $A_f$  とマトリックスが占める面積  $A_m$  は

$$A_f = V_f A, \quad A_m = V_m A \quad (1)$$

ここで  $V_f$ 、 $V_m$  はそれぞれ繊維およびマトリックスの体積含有率を示し

$$V_f + V_m = 1 \quad (2)$$

次に摩擦面に加わる垂直荷重  $W$  および摩擦力  $F$  のそれぞれのうち、繊維ならびにマトリックスが受持つ分担を  $W_f$ 、 $W_m$  および  $F_f$ 、 $F_m$  とすると

$$W = W_f + W_m \quad (3)$$

$$F = F_f + F_m \quad (4)$$

この摩擦力によるせん断応力下で繊維、マトリックス間のはく離がない、すなわち  $r_f = r_m$  (ただし  $r$  は摩擦力によるせん断ひずみ) と考えると、FRP の摩擦係数の複合則として次式が導かれる<sup>14)</sup>。

$$\frac{1}{\mu} = V_f \frac{1}{\mu_f} + V_m \frac{1}{\mu_m} \quad (5)$$

ハイブリッド FRP のように 2 種の繊維  $f_1$ 、 $f_2$  が用いられるときは

\*築添 正 (Tadasu TSUKIZOE), 大阪大学, 工学部, 精密工学科, 教授, 工学博士, 精密測定学

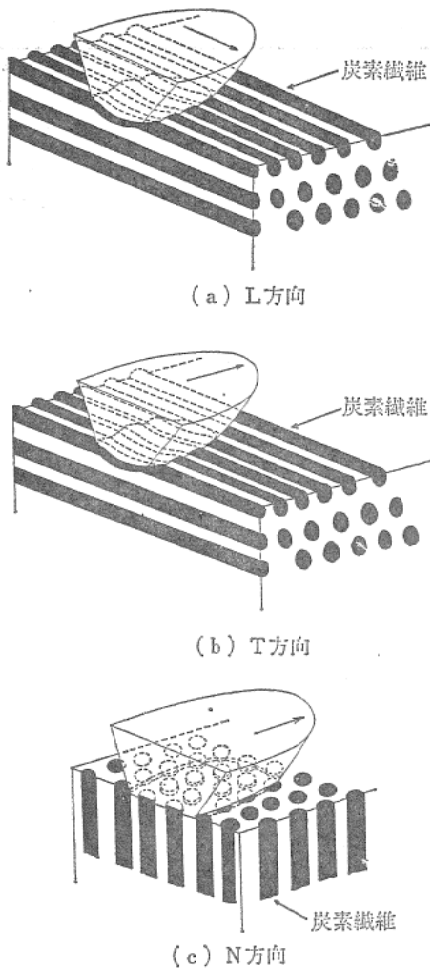


図1 一方向強化プラスチックの摩擦方向

$$\frac{1}{\mu} = V_{f1} \frac{1}{\mu_{f1}} + V_{f2} \frac{1}{\mu_{f2}} + V_m \frac{1}{\mu_m} \quad (6)$$

ただし

$$V_{f1} + V_{f2} + V_m = 1 \quad (7)$$

式(5)および式(6)が著者の提案する摩擦係数の複合則である。

### 3. FRP試験片の構成

本研究で取り上げたFRPの構成を表1に示し、これら樹脂ならびに補強繊維の詳細を表2に示す。また成形されたFRP試験片の諸特性を表3～6に示す。

摩擦、摩耗の両実験ともFRPの相手材は、SS41炭素鋼であって、摩耗実験の場合炭素鋼側の摩耗量はFRPに比較して少量であったので本研究ではFRP側の摩耗のみを取り上げている。

### 4. 摩擦実験の結果とその考察

本実験ではばらつきの少ない安定した摩擦係数を得るため、炭素鋼円すい圧子による低速すべり摩擦(すべり速度  $v = 1.5 \text{ mm/min}$ 、垂直荷重  $W = 77.5 \sim 310 \text{ g}$ )を行ったが、円すい圧子先端が十分に平滑化し摩擦力波形が安定した後の(すべり距離  $D > 10 \text{ mm}$ )摩擦係数を取り上げた。実験結果を図2～図5に示す。図中の曲線は摩擦係数の複合則の式(5)または式(6)による理論値である。

以上の実験結果より、式(5)または式(6)で示した摩擦係数の複合則の妥当性が確認された。なお図5において  $V_f 70\%$ の炭素繊維FRPに対し、補強繊維の半分を比較的安価なガラス繊維で置き換えて  $V_{f1} = 35\%$ 、 $V_{f2} = 35\%$ のハイブリッドFRPとしても、摩擦係数の上昇はごくわずかであることがわかる。

表1 各種FRPの構成

No.	FRPの略号	補強繊維	樹脂
1	HS-CFRP	高強度炭素繊維	エポキシ又はポリエステル
2	HM-CFRP	高弾性炭素繊維	エポキシ
3	NT-CFRP	高強度炭素繊維 表面処理剤なし	〃
4	GFRP	Eガラス繊維	エポキシ又はポリエステル
5	SFRP	ステンレス繊維	〃
6	AFRP	Kevlar-49 DuPont 社製	エポキシ
7	CFRTP	高強度炭素繊維	PTFE
8	Hybrid FRP	高強度炭素繊維とEガラス繊維	エポキシ

表2 各補強繊維と樹脂の諸特性

補強繊維および樹脂	単繊維直径, $\mu\text{m}$	引張強さ, $\text{kg}/\text{mm}^2$	縦弾性係数, $\text{kg}/\text{mm}^2$	密度, $\text{g}/\text{cm}^3$	ストランド 中の単糸数	バーコル硬さ
高強度炭素繊維	6.8	260	24000	1.8	3000	—
高弾性炭素繊維	8.0	200~250	35000~38000	1.95	3000	—
Eガラス繊維	9.4	220	6200	2.5	2400	—
ステンレス繊維	8.0	170	19000	7.9	5000	—
Kevlar-49	12.3	280	13300	1.5	3072	—
エポキシ	—	7	34	1.9	—	40
ポリエステル	—	7	330	1.2	—	45
PTFE	—	2.5	33	2.1	—	—

表3 エポキシ樹脂によるFRPの機械的性質

FRP	$V_f, \%$	引張強さ, $\text{kg}/\text{mm}^2$	縦弾性係数, $\text{kg}/\text{mm}^2$	曲げ強さ, $\text{kg}/\text{mm}^2$	曲げ弾性係数, $\text{kg}/\text{mm}^2$	バーコル硬さ	層間せん断強 さ, $\text{kg}/\text{mm}^2$
HS-CFRP	42	124	10400	142	11200	65	7.7
	52	135	12700	150	11900	66	7.5
	59	172	14300	175	13100	72	7.4
	65*	186	15100	181	14400	75	8.0
GFRP	60	113	3400	109	3800	72	
	68	136	4200	120	4100	76	
	76*	156	5100	135	4800	77	8.0
SFRP	56	60	6100	74	5900	68	
	62	73	7500	76	6700	73	
	69	89	8600	98	8400	76	
	75*	91	9000	113	9900	82	5.7
AFRP	40	74	3700	38	2800	50	6.8
	50	98	4200	42	3000	51	6.3
	60	110	5300	49	3500	50	7.2
	70*	142	6300	53	3700	57	5.7
HM-CFRP	65*	114	24500	116	21200	58	7.1
NT-CFRP	65*	174	17400	151	10700	70	5.4

注. \*印は、後出の図6~9の試験片を示す

表4 不飽和ポリエステル樹脂によるFRPの機械的性質

FRP	$V_f, \%$	引張強さ, $\text{kg}/\text{mm}^2$	縦弾性係数, $\text{kg}/\text{mm}^2$	曲げ強さ, $\text{kg}/\text{mm}^2$	曲げ弾性係数, $\text{kg}/\text{mm}^2$	バーコル硬さ	層間せん断強 さ, $\text{kg}/\text{mm}^2$
HS-CFRP	42	117	10500	99	9000	65	
	50	151	13700	115	10100	68	
	57	165	14200	124	10600	69	
	65	171	15000	132	11800	70	6.2
GFRP	52	98	4500	82	3600	64	
	58	113	5300	88	4100	64	
	70	141	5400	108	4400	68	4.2
SFRP	48	65	8900	69	5600	67	
	54	71	9400	78	6000	72	
	70	90	11800	107	7900	82	
	76	120		118	8500	85	5.2

表5 PTFE 樹脂によるFRP機械的性質

FRP	$V_f, \%$	引張強さ, $\text{kg}/\text{mm}^2$	縦弾性係数, $\text{kg}/\text{mm}^2$	曲げ強さ, $\text{kg}/\text{mm}^2$	曲げ弾性係数, $\text{kg}/\text{mm}^2$	ショア硬さ	層間せん断強さ, $\text{kg}/\text{mm}^2$
CFRTP	42		9500	13.6	873	72	
	67*		11100	14.3	919	65	0.9

注. \*印は, 後出の図6~9の試験片を示す

表6 ハイブリッドFRPの機械的性質 (樹脂: エポキシ)

繊維体積含有率, %			引張強さ, $\text{kg}/\text{mm}^2$	曲げ強さ, $\text{kg}/\text{mm}^2$	曲げ弾性係数, $\text{kg}/\text{mm}^2$	層間せん断強さ, $\text{kg}/\text{mm}^2$
炭素繊維 $V_{f1}$	ガラス繊維 $V_{f2}$	$V_f = V_{f1} + V_{f2}$				
70	0	70	186	181	14400	8.0
43	27	70	155	165	9820	8.5
35	35	70	145	163	9510	8.4
22	48	70	120	138	7060	8.3
15	55	70	110	125	6130	8.5
0	70	70	149	120	4800	8.1

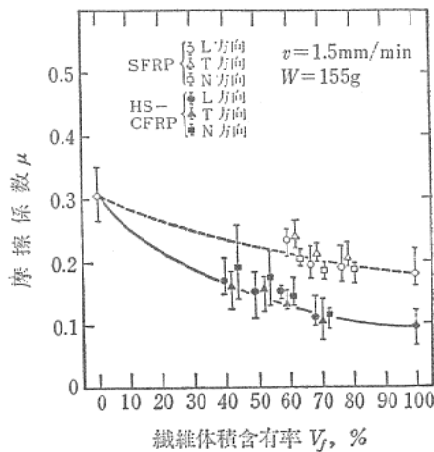


図2 摩擦係数と繊維含有率の関係 (樹脂: エポキシ その一)

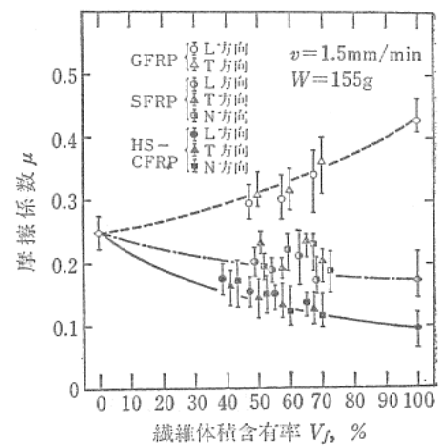


図4 摩擦係数と繊維含有率の関係 (樹脂: ポリエステル)

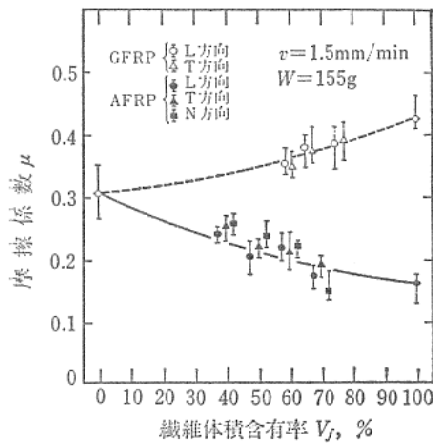


図3 摩擦係数と繊維含有率の関係 (樹脂: エポキシ その二)

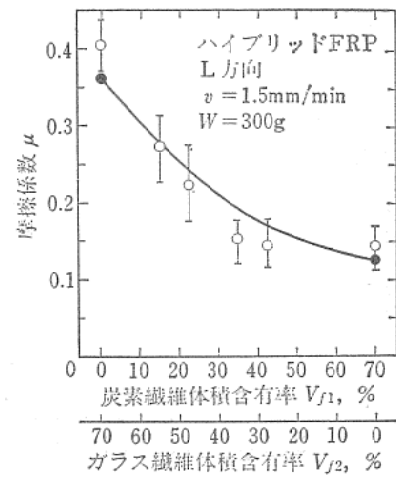


図5 ハイブリッドFRPの摩擦係数と繊維含有率の関係 (樹脂: エポキシ)

5. 摩耗実験の結果とその考察

繊維体積含有率  $V_f$  が70%前後の各種 FRP を選び (表3および表5参照), 摩擦距離  $D=16$  kmにおける比摩耗量 (単位すべり距離当り, 単位荷重当りの摩耗体積) の測定結果を, 摩擦係数, 縦弾性係数および層間せん断強さの3者に対して整理してみたものが図6, 図7および図8である. 今回の実験条件の範囲内では, N方向のすべり摩擦の場合 AFRP (Kevlar-49) 以外の FRP はすべてすべり距離10kmまでに焼付きを起こして実験が続けられなかった.

これらの実験結果に対する考察ならびに摩耗面の顕微鏡観察<sup>10)~17)</sup>から, FRP の摩耗の進行

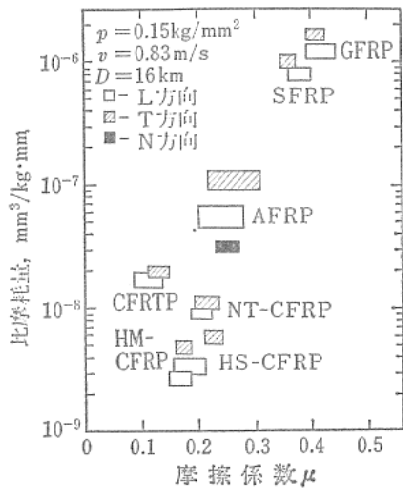


図6 各種FRPの比摩耗量と摩擦係数の関係 ( $V_f=70\%$ )

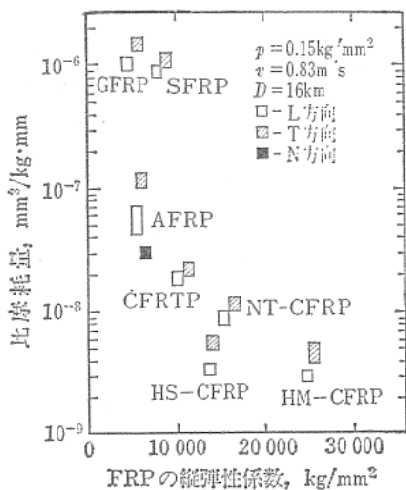


図7 各種FRPの比摩耗量と縦弾性係数の関係 ( $V_f=70\%$ )

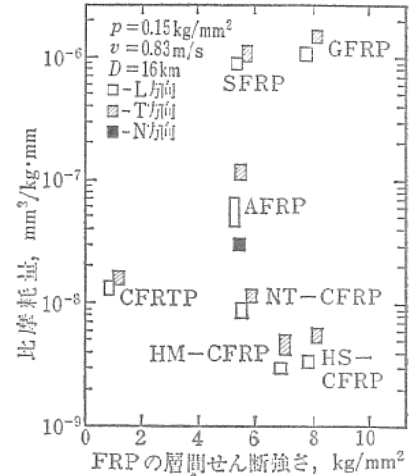


図8 各種FRPの比摩耗量と層間せん断強さの関係 ( $V_f=70\%$ )

は次の3つの過程の繰返しによるものと推定される.

- (a) 繊維そのものの摩耗 (wear-thinning of fibre)
- (b) 繊維の折損 (break-down of fibre)
- (c) 繊維の樹脂からのはく離 (peeling-off of fibre)

これら3つの過程のそれぞれに影響を及ぼす要因として次のようなものが考えられる.

- (a) 繊維そのものの摩耗には, 荷重Wとすべり距離D
- (b) 繊維の折損には, 摩擦力によるFRPのひずみ  $\mu p/E$ , 荷重Wおよびすべり距離D
- (c) 繊維の樹脂からのはく離には, FRPの層間せん断強さ  $I_s$ , 摩擦によるひずみ  $\mu p/E$ , 荷重Wおよびすべり距離D

このように考えるとき, 摩耗体積Qは

$$Q = f\left(\frac{\mu p}{E}, \frac{1}{I_s}, W, D\right) \quad (8)$$

第1次の近似として, 無次元量の定数Kを用いて

$$Q = K \frac{\mu p}{E}, \frac{1}{I_s} W D \quad (9)$$

したがって比摩耗量wは

$$w = K \frac{\mu p}{E} \frac{1}{I_s} \quad (10)$$

式(10)に従って実験値を整理した結果を図9に示す. 図中の実験値は図6~8に示した  $V_f=70\%$  前後の各種FRPのそれぞれについて, 接触

6. おわりに

各種の FRP の摩擦および摩耗の実験結果より、摩擦の複合則の誘導ならびに摩耗の式の提案を行った。補強材である繊維とマトリックスである樹脂の組合せが多数考えられる FRP において、摩擦係数および摩耗特性の予測にこれら複合則ならびに摩耗の式が何らかのヒントを与えるものとなるならば筆者の望外の喜びである。なお、摩耗の式についてはさらに筆者らはシステムアナリシスの手法を用いて実験値をもとにその誘導を試みている<sup>19)</sup>。

文 献

- 1) 林 毅編：複合材料工学，日科技連出版社 (1972)，27.
- 2) J.K. Lancaster : Proc. Inst. Mech. Engrs., 182, 1, 2 (1967~68), 33.
- 3) J.P. Giltrow, & J.K. Lancaster : Proc. Inst. Mech. Engrs., 182, 3 N (1967~68), 147.
- 4) J.K. Lancaster : Brit. J. Appl. Phys., Ser. 2, 1 (1968), 549.
- 5) J.P. Giltrow, & J.K. Lancaster : Wear, 16, 5 (1970), 359.
- 6) J.K. Lancaster : Wear, 20, 3 (1972), 315.
- 7) J.K. Lancaster : Wear, 20, 3 (1972), 335.
- 8) J.P. Giltrow : Composites, March (1973), 55.
- 9) N. Ohmae, K. Kobayashi, & T. Tsukizoe : Wear, 29, 3 (1974), 345.
- 10) Tsukizoe, & N. Ohmae : Tribology Internl., 8, 4 (1975), 171.
- 11) T. Tsukizoe, & N. Ohmae : Proc. JSME-ASME Joint Western Conference on Applied Mechanics (Hawaii, March 1975), JSME paper No. D-2.
- 12) T. Tsukizoe, & N. Ohmae : Industrial Lubrication and Tribology, 28, 1, Jan/Feb. (1976), 19.
- 13) 築添 正, 大前伸夫 : 潤滑, 21, 5, (1976), 330.
- 14) 築添 正, 大前伸夫 : 日本機械学会論文集, 43, 367 (1977), 1115.
- 15) 築添 正 : 日本潤滑学会第 9 回摩耗シンポジウム講演要旨集 (1977), 33.
- 16) T. Tsukizoe, & N. Ohmae : Proc. International Conference on Wear of Materials (St. Louis, April 1977), 518.
- 17) T. Tsukizoe, & N. Ohmae : Trans. ASME, 99, F, 4 (1977), 401.
- 18) 築添 正 : 潤滑, 23, 1 (1978), 11.
- 19) 行本正雄, 築添 正, 大前伸夫 : 潤滑, 23, 12 (1978), 881.

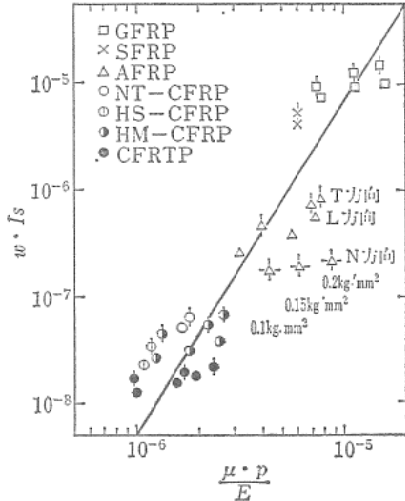


図9 各種FRPの  $wI_s$  と  $\mu P/E$  の関係  
(L, T, Nの3方向  
接触圧力  $P=0.1, 0.15, 0.2 \text{ kg/mm}^2$  の3通り)  
 $V_f=70\%$ )

圧力  $P=0.1, 0.15, 0.2 \text{ kg/mm}^2$  の3通りのものを示している。なお縦軸，横軸のそれぞれは，無次元量になるように式(10)より  $w I_s$  および  $\mu P/E$  をとっている。したがってある一つのFRPについて3通りの接触圧力の実験点を結んだ直線は， $\mu$ が $P$ に無関係であることが実験よりわかっているので<sup>13)</sup>，式(10)によれば両対数グラフで45°の傾きの直線となるはずである。図9では横軸を縦軸の2倍の間隔で画いているから，この直線の傾きはほぼ  $\tan^{-1} 1/2 = 26^\circ 34'$  となっている。なお図において  $P=0.15 \text{ kg/mm}^2$  について，近似的に実線で示したような直線により実験点を結ぶことができる。すなわち次の形の摩耗の式を考えることができる。

$$w = \alpha \left( \frac{\mu P}{E} \right)^\beta \frac{1}{I_s} \quad (11)$$

$\alpha, \beta$ を図9の直線より求めると，FRPの比摩耗量の実験式として次のものが得られる。

$$w = 1.40 \times 10^{10} \left( \frac{\mu P}{E} \right)^{0.03} \frac{1}{I_s} \quad (12)$$

FRPの縦弾性係数  $E \text{ kg/mm}^2$  および層間せん断強さ  $I_s \text{ kg/mm}^2$  が与えられ，炭素鋼との摩擦係数  $\mu$ がわかるときは，面圧  $0.15 \text{ kg/mm}^2$  に対する比摩耗量  $\text{mm}^3/\text{kg} \cdot \text{mm}$  は式(12)より計算することができる。