

引拔成形FRP積層板の引張特性

Tensile Properties of Pultruded FRP Laminates

木嶋 健*、西崎 到**、明嵐政司***

Takeshi KISHIMA, Itaru NISHIZAKI and Seishi MEIARASHI

ABSTRACT : This paper aims to predict the tensile properties of pultruded FRP laminates, including Glass-Fiber Reinforced Plastics (GFRP), Carbon-Fiber Reinforced Plastics (CFRP) and GF/CF-Hybrid Reinforced Plastics. Their tensile elastic modulus and tensile strength were measured by tensile tests based on JIS for their specimens. The authors compared their experimental results with the results based on rule of mixtures, leading to the effectiveness of rule of mixtures for unidirectional composites on tensile elastic modulus and tensile strength of pultruded FRP laminates, by introducing the proper value of “experimental factor”.

Keywords : 引拔成形 FRP 積層板、引張試験、引張弾性係数、引張強度、複合則
pultruded FRP laminates, tensile test, tensile elastic modulus, tensile strength, rule of mixtures

1. はじめに

FRP を構造物に適用した歴史は比較的浅いため、鋼材のように広く一般的に材料強度や耐久性に関する信頼性が確立されているとは言えない状況にある。しかし、船舶等の分野では、ハンドレイアップ成形 FRP が実用化されており、本成形 FRP に対する材料強度や耐久性に関するデータは相当程度蓄積されている。

FRP を構造材料として適用する場合には、一般的な成形法であるハンドレイアップ成形 FRP よりも、大量生産が可能な引拔成形 FRP が主になると考えられる。しかし、引拔成形材に関するデータは、これまでに殆ど得られていない。引拔成形 FRP を構造材料として適用する場合には、引張特性を含む材料特性を把握しておくことが必要である。

FRP 積層材の引張特性については、一方向強化材に対する複合則が準用されている^{1), 2), 3)}。ハンドレイアップ一方向強化材に対する複合則については、補正係数を導入することにより、その有効性が確認されている¹⁾。特に、強度に対する補正係数について詳細に検討した研究例は、これまでにいくつか見られる⁴⁾。しかし、

大量生産を可能とする引拔成形 FRP 積層材の引張特性について、一方向強化材に対する複合則を準用して検討した例は、これまでに見られない。

本論文は、引拔成形 FRP 積層材の引張特性について、GFRP、CFRP および GF/CF ハイブリッド材を対象に JIS に基づいた引張試験を実施し、一方向強化材に対する複合則を準用した計算値との比較により、補正係数の検討を行ったものである。

2. 供試体

引張試験に用いる供試体として、引拔成形 GFRP 積層材、引拔成形 CFRP 積層材、引拔成形 GF/CF ハイブリッド積層材の 3 種類を製作した。

2.1 GFRP積層材

表-1 に示す 3 種類のガラス繊維強化基材構成に対して、各々引拔成形を行い供試体を作成した。積層構成は、いずれの供試体についても、Mat/Cloth/Roving/Cloth/Mat の 5 層構成である。

クロス層は、平織りクロスにより構成されており、繊維方向は、0° 方向 (引拔方向) と 90° 方向 (引拔と直角方向) の直交 2 方向である。また、マット層は、コンティニュアスストランドマット (Continuous Strand Mat) により構成されている。繊維を固める樹脂は、構造材とし

*工修、土木研究所化学研究室主任研究員

**土木研究所化学研究室主任研究員

***工博、土木研究所化学研究室長

(〒305-0804 茨城県つくば市旭 1)

表－1 GFRP基材構成

供試体	V _f (%)	各基材構成比率 (%)				
		CSM	RH	ROV	RH	CSM
1	43	9.5	19.0	43.0	19.0	9.5
2	39	16.0	21.5	26.0	21.5	16.0
3	36	21.0	23.0	12.0	23.0	21.0

V_f : ガラス繊維の体積含有率
 ROV : ガラス・ロービング
 RH : ガラス・クロス
 CSM : ガラス・コンティニュアスストランドマット

しての適用実績が高いビスフェノール型ビニルエステル（エポキシアクリレート）樹脂（Vinyl Ester Resin）である。

GFRP の構成材料であるガラス繊維、CSM、VE 樹脂の弾性係数および強度は、表－2 に示す通りである。

表－2 GFRP構成材料の材料特性

	GF	CSM	VE 樹脂
弾性係数(GPa)	75	26.9	1.875
強度(MPa)	2500	188.5	62.5

2. 2 CFRP積層材

表－3 に示す 3 種類の炭素繊維強化基材構成に対して、各々引抜成形を行い供試体を作成した。積層構成は、Cloth/UD/Cloth の 3 層構成、あるいは Cloth/UD/Cloth/UD/Cloth の 5 層構成である。

表－3 CFRP基材構成

供試体	V _f (%)	各基材構成比率 (%)				
		RH	TOW	RH	TOW	RH
1	45	18.0	64.0	18.0	—	—
2	45	36.5	27.0	36.5	—	—
3	45	30.7	4.0	30.7	4.0	30.7

TOW : カーボン・トウ
 RH : カーボン・クロス

クロス層は、平織りクロスにより構成されており、繊維方向は、0° 方向（引抜方向）と 90° 方向（引抜と直角方向）の直交 2 方向である。繊維を固める樹脂は、GFRP の場合と同様、構造材としての適用実績が高い VE 樹脂で

表－4 CFRP構成材料の材料特性

	CF (UD)	CF (Cloth)	VE 樹脂
弾性係数(GPa)	230	230	1.875
強度(MPa)	4900	3530	62.5

である。

CFRP の構成材料である炭素繊維（一方向強化材、クロス）、ビニルエステル樹脂の弾性係数および強度は、表－4 の通りである。

2. 3 GF/CFハイブリッド積層材

表－5 に示す 3 種類の繊維強化基材構成に対して、各々引抜成形を行い供試体を作成した。積層構成は、Mat/KF/UD/KF/Mat の 5 層構成である。

表－5 GF/CFハイブリッド基材構成

供試体	V _f (%)	各基材構成比率 (%)				
		CSM	KF	TOW	KF	CSM
1	52	8.0	10.0	64.0	10.0	8.0
2	52	8.0	20.0	44.0	20.0	8.0
3	52	8.0	30.0	24.0	30.0	8.0

TOW : カーボン・トウ
 KF : ガラス・ニットイングファブリック
 CSM : ガラス・コンティニュアスストランドマット

KF 層は、ガラス繊維を用いたニットイングファブリック（Knitted-Fabric）により構成されている。繊維を固める樹脂は、GFRP、CFRP の場合と同様、構造材としての適用実績が高い VE 樹脂である。

3. 弾性特性

弾性特性は、供試体の引張試験を実施することにより評価した。

3. 1 GFRP積層材

試験は、「ガラス繊維強化プラスチックの引張試験方法（JIS K 7054）」に準拠し、万能試験機を用いて行った。各試験体の最大荷重とひずみの計測は、試験体の形状を B 型試験片とし、試験体中央の位置で 0° 方向（引抜方向）と 90° 方向（引抜と直角方向）にひずみゲージを貼付

表－6 引張試験結果(GFRP)

供試体	V _f (%)	試験 方向	試験 体数	弾性係数 (GPa)		ポア ソン 比
					変動 係数 (%)	
1	43	0°	5	24.1	6.2	0.237
		90°	5	12.9	6.9	
2	39	0°	5	19.2	10.5	0.160
		90°	5	12.1	4.4	
3	36	0°	5	18.4	6.5	0.145
		90°	5	12.9	5.8	

することにより行った。弾性係数およびポアソン比の算出にあたっては、比例限度内の値を対象とした。試験結果は表－6 に示す通りである。

弾性係数の推定方法について検討を行うため、ハンドレイアップ成形材で整合性が確認されている(2)式による計算値と実験値とを比較した。

一方向強化材の弾性係数に対する複合則は、(1)式の通りに示される。

①繊維方向

$$E = E_f V_f + E_m (1 - V_f)$$

②繊維と直角方向

$$1/E = V_f/E_f + (1 - V_f)/E_m$$

.....(1)

$$\left[\begin{array}{l} E_f, E_m: \text{繊維および樹脂の弾性係数} \\ V_f: \text{繊維の体積含有率} \end{array} \right]$$

FRP 積層材の弾性係数は、一方向強化材の複合則を準用すると、(2)式の通りに示される。

$$E = K_E \{ E_{ROV} V_{ROV} + E_{CLOTH} V_{CLOTH} + E_{CSM} V_{CSM} + E_m (1 - V_f) \} \dots\dots(2)$$

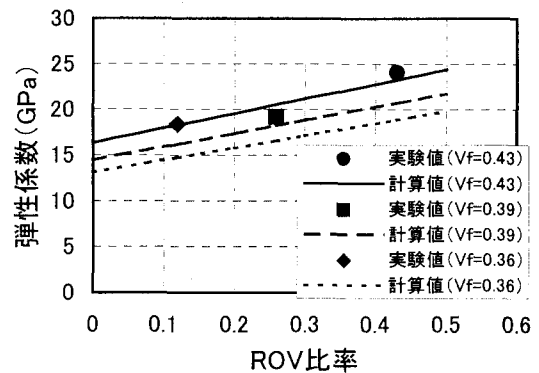
$$\left(\begin{array}{l} K_E: \text{経験係数 (補正係数)} \\ E_{ROV}, E_{CLOTH}, E_{CSM}, E_m: \\ \text{Roving, Cloth, CSM, VE 樹脂の弾性係数} \\ V_{ROV}, V_{CLOTH}, V_{CSM}, V_f: \\ \text{Roving, Cloth, CSM, 素材全体の体積繊維含有率} \end{array} \right)$$

0° 方向 (引抜方向) および 90° 方向 (引抜と直角方向：横方向) の実験値と計算値 (経験係数は 1.0) とを比較した結果は、表－7 および図－1 に示す通りである。

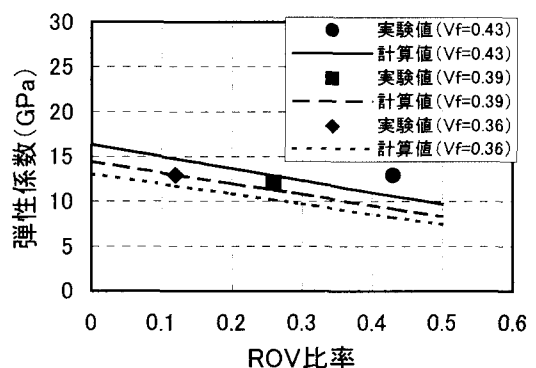
これによると、実験値と計算値とは比較的良く適合している。0° 方向については、実験値は計算値の 1.0～1.2 程度の値となっており、ハンドレイアップ成形一方向強化材の経験係数 0.8～1.1 とほぼ一致している。0° 方向は、繊維

表－7 実験値と計算値の比較
(引張弾性係数: GFRP)

供試体	V _f (%)	試験方向	実験値 (GPa)	計算値 (GPa)	実験値 計算値
1	43	0°	24.1	23.26	1.036
		90°	12.9	9.39	1.374
2	39	0°	19.2	18.39	1.044
		90°	12.1	10.79	1.121
3	36	0°	18.4	14.72	1.25
		90°	12.9	11.48	1.124



図－1(a) 実験値と計算値の比較(0°)



図－1(b) 実験値と計算値の比較(90°)

維方向の弾性係数が支配的であり、繊維も引抜による直進性が確保されていることから、ハンドレイアップ成形一方向強化材と同様の経験係数が適用できると判断される。

90° 方向については、実験値が計算値の 1.1～1.35 程度の値となっている。90° 方向は、クロス材の横方向繊維が支配的な要因となっているが、繊維は引抜方向とは異なり、うねっていると考えられる。ハンドレイアップ成形クロス材の横方向繊維もうねっているが、経験係数は一方向強化材の 0.8～1.1 よりも若干高くなっている。したがって、90° 方向の弾性係数についても、0° 方向の場合と同様、0.8～1.1 の経験係数が適用できると判断される。

3.2 CFRP積層材

試験は、「炭素繊維強化プラスチックの引張試験方法 (JIS K 7073)」に準拠し、万能試験機を用いて行った。各試験体の最大荷重とひずみの計測は、試験体の形状をⅡ型試験片とし、試験体中央の位置で0° 方向 (引抜方向) と90° 方向 (引抜と直角方向) にひずみゲージを貼付することにより行った。また、弾性係数および

ポアソン比の算出にあたっては、比例限度内の値を対象とした。試験結果は表－8 に示す通りである。

表－8 引張試験結果(CFRP)

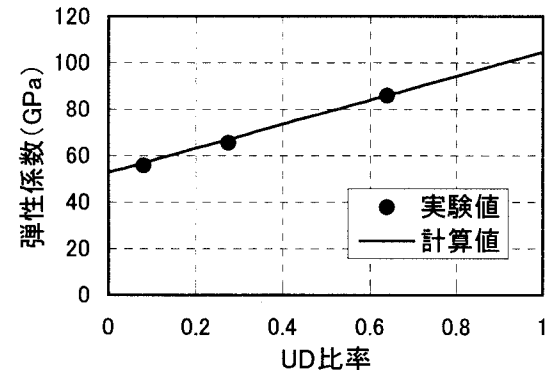
供試体	V _f (%)	試験方向	試験体数	弾性係数 (GPa)		ポアソン比
					変動係数 (%)	
1	45	0°	5	86.5	1.6	0.193
		90°	5	16.5	5.7	0.080
2	45	0°	5	65.4	5.9	0.087
		90°	5	23.7	13.1	0.111
3	45	0°	5	55.7	7.7	0.055
		90°	5	27.2	12.3	0.108

0° 方向（引抜方向）と 90° 方向（引抜と直角方向：横方向）の実験値と(2)式による計算値（経験係数は 1.0）とを比較した結果は、表－9 および図－2 に示す通りである。

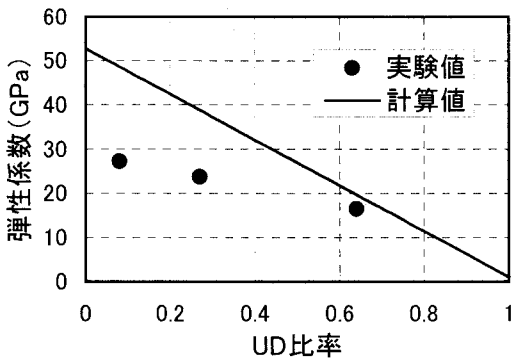
0° 方向については、実験値と計算値は、ほぼ同等の値を示していることが分かる。0° 方向は、繊維方向の弾性係数が支配的であり、繊維も引抜による直進性が確保されているため、(2)式が適用できたものと判断される。従って、

表－9 実験値と計算値の比較
(引張弾性係数: CFRP)

供試体	V _f (%)	試験方向	実験値 (GPa)	計算値 (GPa)	実験値/計算値
1	45	0°	86.5	85.90	1.007
		90°	16.5	19.66	0.839
2	45	0°	65.4	66.75	0.980
		90°	23.7	38.81	0.611
3	45	0°	55.7	56.92	0.979
		90°	27.2	48.64	0.559



図－2(a) 実験値と計算値の比較(0°)



図－2(b) 実験値と計算値の比較(90°)

経験係数は、GFRP 一方向強化材の経験係数 0.8 ～1.1 を適用しても問題がないと判断される。

一方、90° 方向については、実験値は計算値の 0.55～0.85 程度となっており、値は積層構成によりかなり異なっている。特に、クロスの割合が高い素材について、実験値と計算値との乖離が大きくなっている。

炭素繊維の弾性係数は、繊維方向とその直角方向とで大きく異なっている。90° 方向については、クロス材の横方向繊維が支配的な要因となっている。横方向繊維は、①交差繊維の引抜きに伴う横方向繊維のうねりや、②引抜成形時の繊維の乱れ等により、直進性が確保されていないと考えられ、繊維方向の弾性係数をそのまま適用することはできない。CFRP の弾性係数は、繊維方向が 5～10° 程度傾くと、0° 方向の 0.55～0.85 程度⁵⁾ となり、実験で得られた経験係数とほぼ同等である。90° 方向の弾性係数については、今後、クロス材の横方向繊維について詳細な検討を行い、経験係数を決定することが必要である。

3. 3 GF/CFハイブリッド積層材

試験は、「ガラス繊維強化プラスチックの引張試験方法 (JIS K 7054)」および「炭素繊維強化プラスチックの引張試験方法 (JIS K 7073)」に準拠し、万能試験機を用いて行った。各試験体の最大荷重とひずみの計測は、試験体の形状を B 型Ⅱ型試験片とし、試験体中央の位置で 0° 方向（引抜方向）と 90° 方向（引抜と直角方向）にひずみゲージを貼付することにより行った。また、弾性係数およびポアソン比の算出にあたっては、比例限度内の値を対象とした。試験結果は表－10 に示す通りである。

0° 方向（引抜方向）および 90° 方向（引

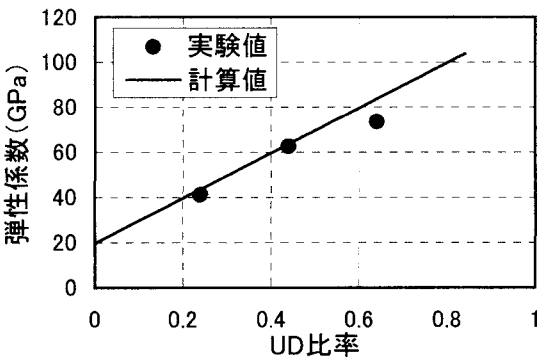
抜と直角方向：横方向）の実験値と(2)式によ

表－10 引張試験結果(GF/CFハイブリッド)

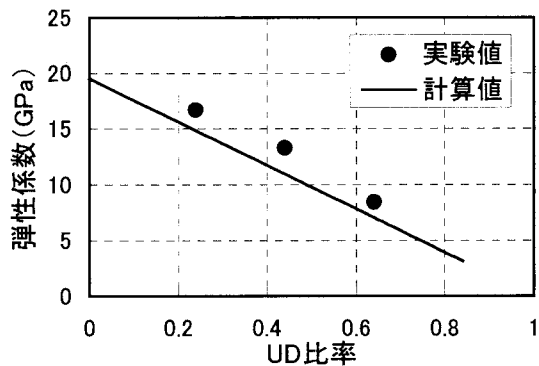
供試体	V _f (%)	試験方向	試験体数	弾性係数 (GPa)		ポアソン比
					変動係数 (%)	
1	52	0°	5	73.4	5.2	—
		90°	5	8.4	9.4	—
2	52	0°	5	62.6	5.7	—
		90°	5	13.3	8.6	—
3	52	0°	5	41.0	7.7	—
		90°	5	16.7	8.9	—

表－11 実験値と計算値の比較
 (引張弾性係数：GF/CFハイブリッド)

供試体	V _f (%)	試験方向	実験値 (GPa)	計算値 (GPa)	実験値/計算値
1	52	0°	73.4	83.58	0.878
		90°	8.4	7.04	1.193
2	52	0°	62.6	63.56	0.985
		90°	13.3	10.94	1.216
3	52	0°	41.0	43.54	0.942
		90°	16.7	14.84	1.125



図－3(a) 実験値と計算値の比較(0°)



図－3(b) 実験値と計算値の比較(90°)

る計算値（経験係数は 1.0）とを比較した結果は、表－11 および図－3 に示す通りである。

0° 方向については、実験値は計算値の 0.9 ～1.0 程度の値となっており、GFRP ハンドレイアップ方向強化材の経験係数 0.8～1.1 とほぼ一致している。0° 方向は、炭素繊維の弾性係数が支配的であり、繊維も引抜による直進性が確保されていることから、3.2 の結果より、GFRP ハンドレイアップ方向強化材と同様の経験係数が適用できると判断される。

90° 方向については、実験値は計算値の 1.1 ～1.2 程度の値となっている。90° 方向の弾性係数は、ガラス・ニットイングファブリックが支配的な要因となっている。ニットイングファブリックは、引抜方向繊維と横方向繊維の結合状態が平織クロスと異なっているが、結合に伴い弾性係数が増大すると考えられる。3.1 の結果によると、経験係数は 0.8～1.1 よりも若干大きくなっている。したがって、90° 方向の弾性係数についても、0° 方向の場合と同様、0.8 ～1.1 の経験係数が適用できると判断される。

4. 強度特性

強度特性についても、弾性特性の場合と同様、供試体の引張試験を実施することにより評価した。

4. 1 GFRP積層材

試験は、弾性特性の場合と同様、「ガラス繊維強化プラスチックの引張試験方法（JIS K 7054）」に準拠した。試験結果は表－12 に示す通りである。

強度の推定方法について検討を行うため、ハンドレイアップ成形材で整合性が確認されている(4)式による計算値と実験値とを比較した。

一方向強化材の強度に対する複合則は、(3)式の通りに示される。

表－12 引張試験結果(GFRP)

供試体	V _f (%)	試験方向	試験体数	強度(MPa)		ポアソン比
					変動係数 (%)	
1	43	0°	5	519	3.7	0.237
		90°	5	145	8.3	0.102
2	39	0°	5	358	9.4	0.160
		90°	5	165	7.2	0.129
3	36	0°	5	332	10.6	0.145
		90°	5	158	2.0	0.182

$$F = F_f V_f + F_m (1 - V_f) \quad \cdots \cdots (3)$$

$\left[\begin{array}{l} F_f, F_m: \text{繊維および樹脂の強度} \\ V_f: \text{繊維の体積含有率} \end{array} \right]$

一方向強化材の複合則を準用すると、FRP 積層材の強度は、(4)式の通りに示される。

$$F = K_F \{ F_{ROV} V_{ROV} + F_{CLOTH} V_{CLOTH} + F_{CSM} V_{CSM} + F_m (1 - V_f) \} \quad \cdots \cdots (4)$$

$\left(\begin{array}{l} K_F: \text{経験係数 (補正係数)} \\ F_{ROV}, F_{CLOTH}, F_{CSM}, F_m: \\ \text{Roving, Cloth, CSM, VE 樹脂の強度} \\ V_{ROV}, V_{CLOTH}, V_{CSM}, V_f: \\ \text{Roving, Cloth, CSM, 素材全体の繊維体積含有率} \end{array} \right)$

0° 方向 (引抜方向) および 90° 方向 (引抜と直角方向) の実験値と計算値 (経験係数は 1.0) との比較結果は、表-13 および図-4 に示す通りである。

これによると、計算値が実験値よりも全般的に高くなる傾向を示している。0° 方向については、実験値が計算値の 0.7~0.9 程度となっており、ハンドレイアップ一方向強化材の経験係数 0.75 程度とほぼ一致していることが分かる。0° 方向は、繊維方向の強度が支配的であ

表-13 実験値と計算値の比較
(引張強度: GFRP)

供試体	V _f (%)	試験方向	実験値 (MPa)	計算値 (MPa)	実験値/計算値
1	43	0°	519	702.1	0.739
		90°	145	239.9	0.604
2	39	0°	358	501.3	0.714
		90°	165	247.8	0.666
3	36	0°	332	355.0	0.935
		90°	158	247.0	0.640

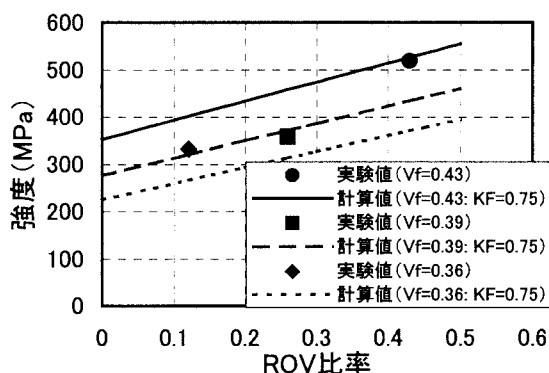


図-4(a) 実験値と計算値の比較(0°)

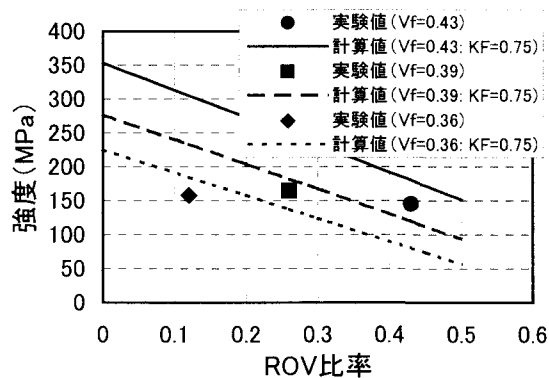


図-4(b) 実験値と計算値の比較(90°)

り、繊維の直進性も確保されていることから、ハンドレイアップ一方向強化材と同様の経験係数が適用できると判断される。

90° 方向については、実験値が計算値の 0.6~0.65 程度となっている。90° 方向は、平織クロスの横方向繊維の強度が支配的となっているが、繊維の張力は交差繊維の引抜に伴い不均一になっていると考えられる。したがって、経験係数も 0.75 より低い値が出てくると予想される。90° 方向の弾性係数については、今後、クロス材の横方向繊維について詳細な検討を行い、経験係数を推定することが重要である。

4.2 CFRP積層材

試験は、弾性係数の場合と同様、「炭素繊維強化プラスチックの引張試験方法 (JIS K 7073)」に準拠した。試験結果は表-14 に示す通りである。

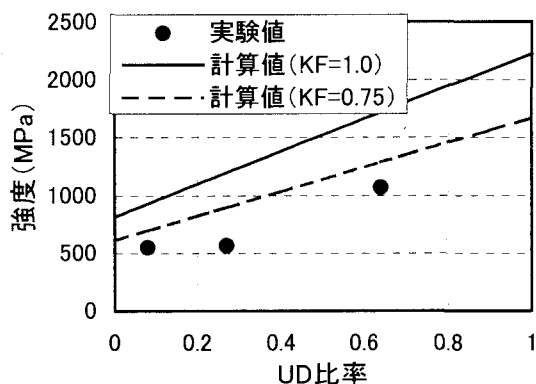
表-14 引張試験結果(CFRP)

供試体	V _f (%)	試験方向	試験体数	強度(MPa)		ポアソン比
					変動係数 (%)	
1	45	0°	5	1073	4.4	0.193
		90°	5	73	9.8	0.080
2	45	0°	5	567	8.3	0.087
		90°	5	128	5.7	0.111
3	45	0°	5	550	6.1	0.055
		90°	5	122	4.4	0.108

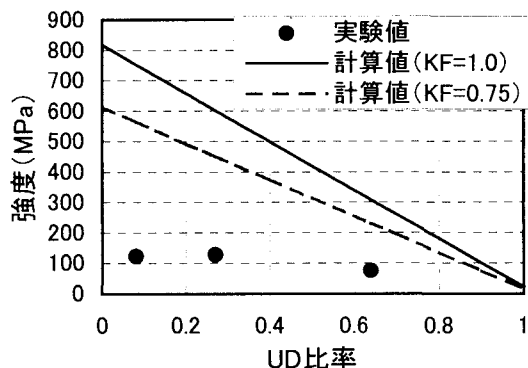
0° 方向 (引抜方向) と 90° 方向 (引抜と直角方向: 横方向) の実験値と計算値 (経験係数は 1.0) との比較結果は、表-15 および図-5 に示す通りである。

表－15 実験値と計算値の比較
(CFRP：引張強度)

供試体	V _f (%)	試験方向	実験値 (MPa)	計算値 (MPa)	実験値/計算値
1	45	0°	1073	1719.1	0.624
		90°	73	307.9	0.237
2	45	0°	567	1197.1	0.474
		90°	128	601.8	0.213
3	45	0°	550	929.1	0.592
		90°	122	752.7	0.162



図－5(a) 実験値と計算値の比較(0°)



図－5(b) 実験値と計算値の比較(90°)

これによると、計算値が実験値よりも全般的に高くなる傾向を示している。0° 方向については、実験値が計算値の 0.5～0.6 程度となっており、GFRP ハンドレイアップ方向強化材の経験係数 0.75 程度よりもやや低くなっている。これは、引抜成形時における繊維と樹脂の接着性にも原因があると見られ、今後、更に検討を行っていくことが重要と考えられる。

一方、90° 方向については、実験値が計算値の 0.15～0.25 程度となっており、ハンドレイアップ方向強化 GFRP の経験係数 0.75 程度に比べて大幅に低い値となっている。

炭素繊維の強度は、弾性係数の場合と同様、

繊維方向とその直角方向とで大きく異なっている。しかも、方向に対する違いは、強度の方が弾性係数よりも大きくなっている。90° 方向については、クロス材の横方向繊維が支配的な要因となっているが、3.2 で記述した理由により、カタログ値をそのまま適用できない。CFRP の強度は、繊維方向が 5～10° 程度傾くと、0° 方向の 0.26～0.5 程度の値⁵⁾ となる。引抜方向の経験係数が 0.5～0.6 であることを考慮すると、繊維の傾きのみを考慮した経験係数と実験で得られた経験係数とはほぼ等しくなる。90° 方向の強度については、今後、クロス材の横方向繊維について詳細な検討を行い、経験係数を推定することが必要である。

4.3 GF/CFハイブリッド積層材

試験は、弾性係数の場合と同様、「ガラス繊維強化プラスチックの引張試験方法 (JIS K 7054)」および「炭素繊維強化プラスチックの引張試験方法 (JIS K 7073)」に準拠した。試験結果は表－16 に示す通りである。

表－16 引張試験結果(GF/CFハイブリッド)

供試体	V _f (%)	試験方向	試験体数	強度(MPa)		ポアソン比
					変動係数 (%)	
1	52	0°	5	1214	6.0	—
		90°	5	94	5.1	—
2	52	0°	5	897	5.4	—
		90°	5	139	9.2	—
3	52	0°	5	599	2.9	—
		90°	5	206	5.9	—

0° 方向 (引抜方向) および 90° 方向 (引抜と直角方向) の実験値と計算値 (経験係数は 1.0) とを比較した結果は、表－17 および図－6

表－17 実験値と計算値の比較
(引張強度：GF/CFハイブリッド)

供試体	V _f (%)	試験方向	実験値 (MPa)	計算値 (MPa)	実験値/計算値
1	52	0°	1214	1779.9	0.682
		90°	94	149.2	0.630
2	52	0°	897	1400.3	0.641
		90°	139	279.2	0.498
3	52	0°	599	1020.7	0.587
		90°	206	409.2	0.503

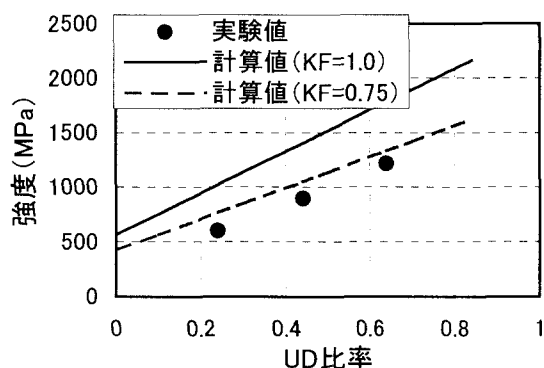


図-6(a) 実験値と計算値の比較(0°)

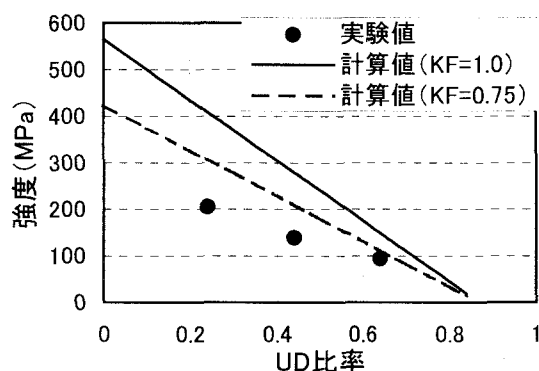


図-6(b) 実験値と計算値の比較(90°)

に示す通りである。

これによると、計算値が実験値よりも全般的に高くなる傾向を示している。0° 方向については、実験値が計算値の 0.55～0.65 程度となっており、ハンドレイアップ成型一方向強化 GFRP の経験係数 0.75 程度よりもやや低く、4.2 で得られた CFRP の経験係数とほぼ等しい。GF/CF ハイブリッド材の強度が、CF で構成される UD 層の強度に支配されていることを考慮すると、ほぼ妥当な結果と言える。

90° 方向については、計算値が実験値の 0.5～0.6 程度となっている。90° 方向は、ガラスニッティングファブリックの横方向繊維の強度が支配的となっており、平織クロスの横方向繊維が支配的となっている 4.1 のケースと同様である。しかし、繊維の直進性が確保されているにもかかわらず、経験係数は 4.1 よりも低くなっている。経験係数の推定には、今後、ガラスニッティングファブリックの横方向繊維に関する詳細な検討を行うことが必要と考えられる。

なお、GF と CF の線膨張係数の違いから、残留応力が発生し、繊維方向の強度は増大すると考えられる⁶⁾が、今回の実験結果からはそ

れが確認されなかった。

5. まとめ

以上の検討結果をまとめると、以下のようになる。

- ①弾性係数については、GFRP、CFRP、GF/CF ハイブリッド積層材について、複合則を準用した計算式に、ハンドレイアップ一方向強化材の経験係数を適用することにより推定できることが確認された。CFRP の 90° 方向については、経験係数の概略値を推定することはできたが、今後さらに詳細な検討を行っていくことが必要である。
- ②強度については、GFRP の 0° 方向について、複合則を準用した計算式に、ハンドレイアップ一方向強化材の経験係数が適用することにより推定できることが確認された。他のケースについても、経験係数の概略値を推定することはできたが、実験データを積み重ねて、さらに詳細な検討を行っていくことが必要である。

参考文献

- 1) FRP 構造設計便覧、(社) 強化プラスチック協会編、1994
- 2) FRP 構造強度計算の実際、(社) 強化プラスチック協会編、1984
- 3) 福田 博、邊 吾一：複合材料の力学序説、古今書院、1989
- 4) A. Wada and H. Fukuda : Micromechanical approach to the strength of unidirectional composites, 11th International Conference on Composite Materials, Vol.5(1997), pp.704-710.
- 5) 炭素繊維 1985、東レ ACM 技術部編
- 6) 強化プラスチック協会ハイブリッド FRP 調査研究専門委員会：ハイブリッド (GF/CF) FRP 積層板の力学的特性に関する研究報告書、(社) 強化プラスチック協会、1984