

土木構造用引抜成形 FRP の力学物性の信頼度に関する検討

Study on the reliability of mechanical properties of pultruded FRP for construction structures

西崎 到*

Itaru Nishizaki

*土木研究所材料地盤研究グループ新材料チーム (〒305-8516 茨城県南原 1-6)

In order to investigate the reliability of mechanical properties of structural FRP for construction structures, tensile test and compressive test were performed for pultruded GFRP, CFRP and CF/GF hybrid FRP plates. From twentyfive to fiftyfive coupons were used in each series of the tests and its standard dispersion and the dispersion factors of mechanical properties were investigated. The test results were compared with previous research works that were performed about ten years ago with same lots of the pultruded FRPs.

Key Words: FRP, pultruded, mechanical properties, dispersion, reliability

キーワード: FRP, 引抜成形, 力学物性, ばらつき, 信頼性

1. はじめに

近年, 優れた耐食性, 軽量などの特長を有する FRP の, 土木構造材料としての適用事例の増加に伴って, より効率的な設計や, 設計の信頼度の向上が必要となっている. FRP 構造物を効率的に設計するにあたっての課題のひとつに, FRP の設計用物性値の決定方法が明確でない点, 材料係数の基となるデータが不足している点などがあげられる.

FRP は用途に応じて異なる材料や積層構成や使われることが多いため, 形状が同じでも, 物性値が異なる場合がある. このため, 鋼材のように鋼種毎に設計用材料物性を定めることができるのは, FRP の基となる素材, たとえばガラス繊維やマトリックス樹脂など, まであり, FRP の力学物性については, 複合則から求められる理論値, 実験により求められる実験値などにより得ることとなる. このうち実験値が得られる場合には, 実験値のばらつき程度から, 十分に信頼度をもった設計用値を設定することが可能であるが, 土木構造用 FRP についてどの程度のばらつきが実験値にあるかは, これまであまり多くのデータがないのが現状であった. そこで, 本論文では板状の引抜成形 FRP を用い, 繰返し数を 25~55 程度で標準的な力学的物性試験を実施し, 実験によって得られる FRP の力学的物性値が, どの程度のばらつきをもっているかを検討した.

2. 実験方法

実験に供した FRP は, いずれも幅 420mm 厚さ 3.2mm の板状の引抜成形 FRP である. マトリックス樹脂はいずれも同一のビニルエステル樹脂とした. 6 種類の引抜成形 FRP (2 種類の GFRP, 3 種類の CFRP, 1 種類の GF/CF-H (ハイブリッド) FRP) を使用した. これらについて, 引張試験あるいは圧縮試験を実施した. これらの組み合わせは表-1 に示すとおりである. 引張試験方法は GFRP および GF/CF-HFRP については JIS K 7054 (B I 型試験片 (0° 方向では試験片幅を 10mm, 90° 方向では試験片幅を 25mm とした)), CFRP については JIS K 7073 (0° 方向は I 型試験片 (但し試験片幅は 10mm とした), 90° 方向は II 型試験片 (試験片幅 25mm)), 圧縮試験方法は GFRP および GF/CF-HFRP については JIS K 7056, CFRP については JIS K 7076 (A 法) に準拠した. なお, 試験厚さ等, 一部の項目については試験方法の示す規定によらなかった部分もある.

なお, 本研究で使用した材料は, 過去に他の研究により使用されたものの残余分として長期間 (10 年間程度) 室内で保管されていたものを使用した. 過去の研究においては, その際に繰返し数 5 で各種の物性試験が行われている¹⁾. 試験実施者, 試験に使用した装置等も異なるものの, 本研究ではその研究における試験結果との比較を行うこととした.

また, 得られた強度と弾性率についての試験結果を基に, 標準偏差および変動係数を算出するとともに, 式(1)

表－1 使用した材料の種類と試験項目

記号	種類	積層構成 (%)	引張試験		圧縮試験	
			0° 方向	90° 方向	0° 方向	90° 方向
R43	GFRP	CSM9.5/GRH19/ROV43/GRH19/CSM9.5		○		
R26	GFRP	CSM16/GRH21.5/ROV26/GRH21.5CSM16			*	
U64	CFRP	CRH18/TOW64/CRH18		○		
U27	CFRP	CRH36.5/TOW27/CRH36.5	○			
U8	CFRP	CRH30.7/TOW4/CRH30.7/TOW4/CRH30.7			○	
C44	GF/CF-HFRP	CSM8/KF20/TOW44/KF20/CSM8	○			*

凡例 CSM: ガラス・コンティニュアストランドマット, GRH: ガラス・クロス, ROV: ガラス・ロービング, CRH: カーボン・ロービング, TOW: カーボン・トウ, KF: ガラス・ニッティングファブリッククロス, ○は実施項目, *は実施計画項目を示す。

に基づき、材料特性に関するばらつき係数 L_5 を算出した。

$$L_5 = 1 / \{ 1 \cdot k_p (\sigma / x_m) \} \quad (1)$$

ここで、 L_5 : 材料特性のばらつき係数

k_p : 信頼度から設定される係数。

信頼度 99.9% で $k_p=3.09$ とした。

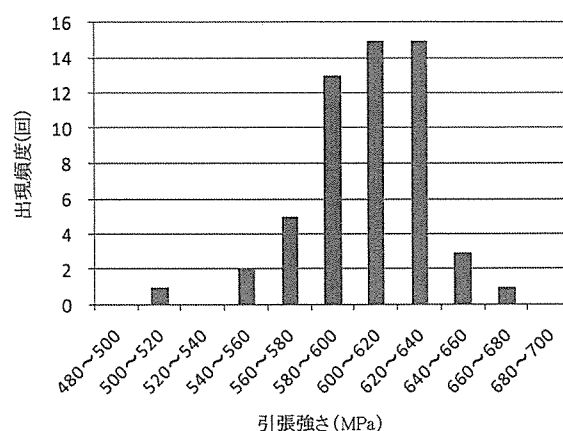
σ : 標準偏差

x_m : 物性値の平均値

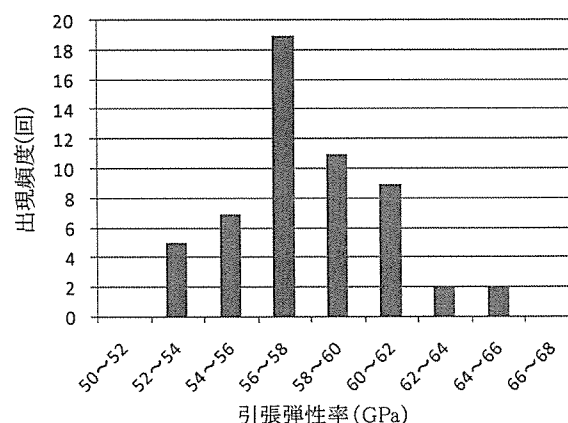
3. 結果

3.1 引張試験

U27 (CFRP, 引抜方向に対して 0° 方向に試験) の引張強さおよび引張弾性率の結果を、過去の結果と併せて表－2 に示す。最終的な繰返し数は 55 となった。過去の試験結果に比べて引張強さはやや大きい値となった。引張強さに関する材料特性のばらつき係数は、過去の試験では 1.345 であったものが、1.165 と小さくなった。引張弾性率については、平均値は 1 割ほど低い値となったが、材料特性のばらつき係数は、1.223 から 1.181 とやや小さな値となった。図－1 に引張強さの出現分布を示す。平均値 (606.5MPa) 周辺の集団とやや離れて、低い値を示した試験片が 1 つあった。最小値は 514.2MPa であったが、平均値をばらつき係数で除した値は 504.4MPa であり、これよりやや大きな値となった。図－2 は引張弾性率の出現分布を示す。最小値は 52.4GPa であった。



図－1 引張強さの分布 (U27, 0° 方向)



図－2 引張弾性率の分布 (U27, 0° 方向)

表－2 引張試験結果および過去の結果との比較 (U27, 0° 方向)

	n	引張強さ			引張弾性率			
		引張強さ(MPa)	変動係数(%)	L5	弾性率(GPa)	変動係数(%)	L5	複合則に基づく計算値(GPa)
今回の結果	55	606.5	4.59	1.165	57.9	4.95	1.181	66.75
過去の結果	5	567	8.3	1.345	65.4	5.9	1.223	

表－3 引張試験結果および過去の結果との比較 (C44, 0° 方向)

	n	引張強さ			引張弾性率			
		引張強さ(MPa)	変動係数(%)	L5	弾性率(GPa)	変動係数(%)	L5	複合則に基づく計算値(GPa)
今回の結果	25	693.0	8.98	1.384	49.2	10.64	1.490	63.56
過去の結果	5	897	5.4	1.200	62.6	5.7	1.214	

C44 (GF/CF-HFRP, 引抜方向に対して 0° 方向に試験) の引張強さおよび引張弾性率の結果を, 過去の結果と併せて表-3 に示す。最終的な繰返し数は 25 となった。過去の試験結果に比べて引張強さは 0.77 倍程度に低下し, 材料のばらつき係数も 1.200 から 1.384 に増加していた。強度の低下は, 保管中の経年変化の可能性もある。また, 試験後にタブが剥離するケースが多く見られたことから, タブの付着が不十分であった可能性もある。また, これらのことが, ばらつきが比較的多いことと関係している可能性も考えられる。図-3 に引張強さの分布を示す。図-1 に見られたような, 平均値周辺に密集した分布とはやや異なり, やや広い範囲にデータが分散していることが分かる。引張弾性率の分布を図-4 に示す。

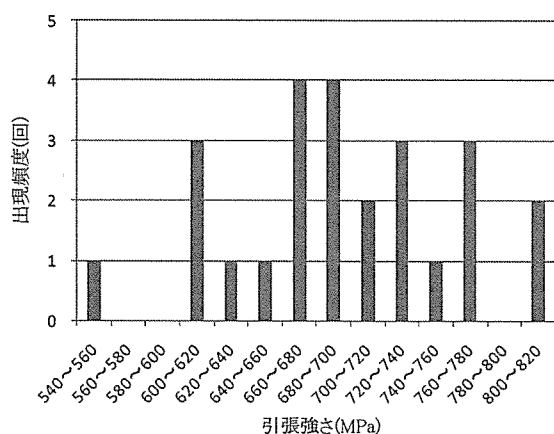


図-3 引張強さの分布 (C44, 0° 方向)

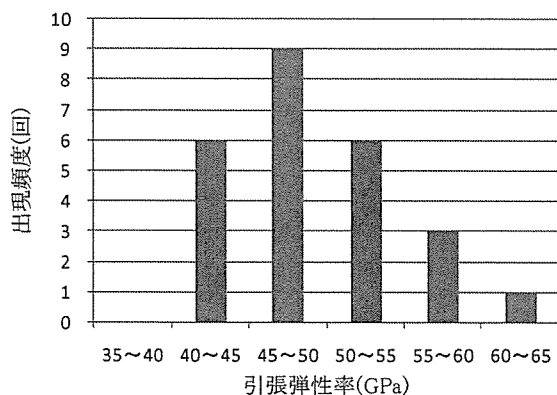


図-4 引張弾性率の分布 (C44, 0° 方向)

R43 (GFRP, 引抜方向に対して 90° 方向に試験) の引張強さおよび引張弾性率の結果を, 過去の結果と併せて表-4 に示す。繰返し数は 30 となった。過去の試

験結果に比べて引張強さはわずかに低い値となった。引張強さに関する材料特性のばらつき係数は, 過去の試験では 1.345 であったものが, 1.232 とやや小さくなった。図-5 に引張強さの分布を示す。平均値は 133.2MPa であり, データはこの周辺に分布した。最低値は 116.6MPa であった。図-6 に引張弾性率の分布を示す。材料特性のばらつき係数は, 1.288 と, 過去の結果 (1.271) とほぼ同じとなった。

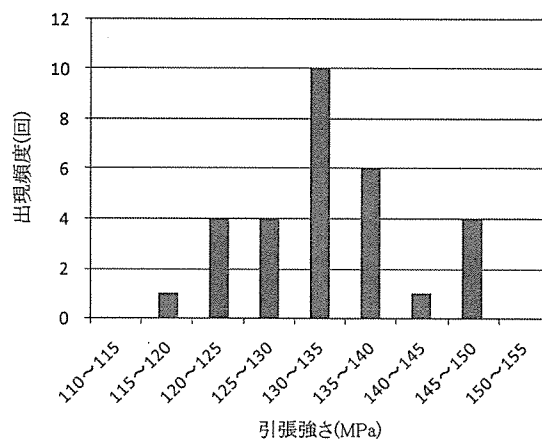


図-5 引張強さの分布 (R43, 90° 方向)

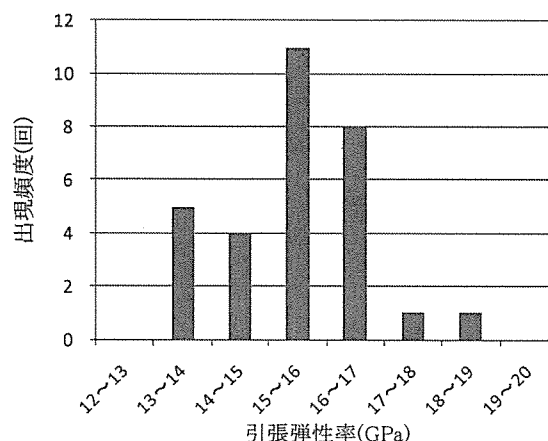


図-6 引張弾性率の分布 (R43, 90° 方向)

験の結果に比べて引張強さは 1.3 倍程度に向上していた。この明確な理由は不明であるが, 長期間保管中の物性の変化などが可能性として考えられる。引張強さに関する材料特性のばらつき係数は, 過去の試験では 1.434 であったものが, 1.192 と小さくなった。一方, 引張弾性率については, 弾性率, 材料特性のばらつき係

表-4 引張試験結果および過去の結果との比較 (R43, 90° 方向)

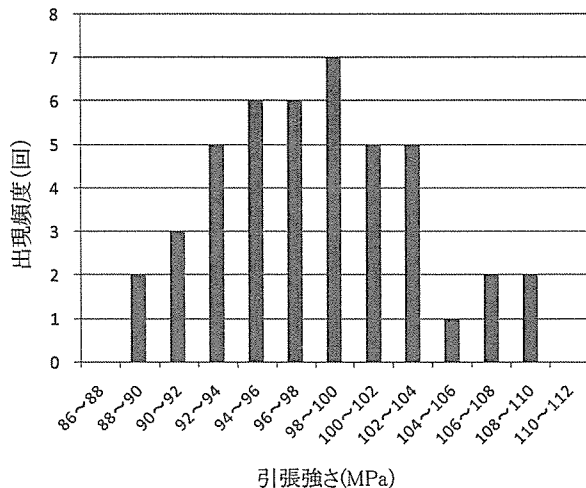
	n	引張強さ			引張弾性率			複合則に基づく計算値 (GPa)
		引張強さ (MPa)	変動係数 (%)	L5	弾性率 (GPa)	変動係数 (%)	L5	
今回の結果	30	133.2	6.09	1.232	15.6	7.24	1.288	9.39
過去の結果	5	145	8.3	1.345	12.9	6.9	1.271	

表－５ 引張試験結果および過去の結果との比較(U64、90° 方向)

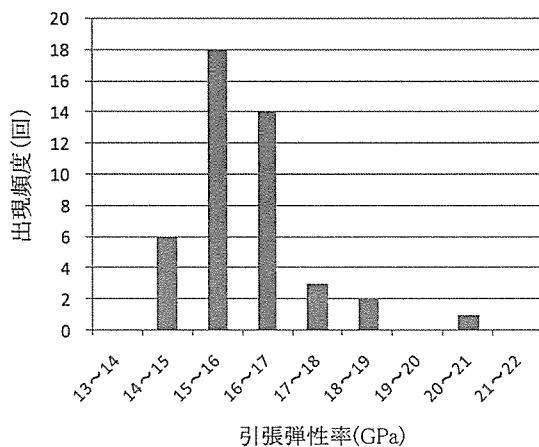
	n	引張強さ			引張弾性率			複合則に基づく計算値(GPa)
		引張強さ(MPa)	変動係数(%)	L5	弾性率(GPa)	変動係数(%)	L5	
今回の結果	44	98.1	5.22	1.192	16.1	7.31	1.292	19.66
過去の結果	5	73	9.8	1.434	16.5	5.7	1.214	

数ともに、過去の試験結果とほぼ同じ値となった。

図－７に引張強さの分布を示す。最小値は 89.3MPa であった。平均値 (98.1MPa) をばらつき係数で除した値は 82.3MPa であり、最小値より十分に低い値となった。図－８は引張弾性率の分布を示す。最小値は 14.4GPa であり、平均値 (16.1GPa) をばらつき係数で除した値 (12.5GPa) は最小値に比べ十分に低いと考えることができる。



図－７ 引張強さの出現頻度(U64、90° 方向)



図－８ 引張弾性率の出現頻度(U64、90° 方向)

表－６は引張強さの結果を材料特性のばらつき係数について、過去の試験結果と今回の試験結果をまとめたものである。今回の試験は４種類の材料について、25 から 55 の繰り返しで試験を行い、強度についてはそのうち３種類の材料で、過去の繰り返し数５の試験に比べて低い材料物性のばらつき係数を得た。材料特性のばらつき係数は概ね 1.2 前後となった。過去の引張試験結果の

材料特性のばらつき係数の平均値は 1.276 であり、これよりもやや小さな値となった。１材料(C44)については、過去の試験結果よりも材料特性のばらつき係数が大きく (1.384) になった。データの分布は平均値を中心としたまとまりのある分布とは異なり、やや広い分布を示した。この要因としては、タブの付着不良など試験条件に不適切な因子があった可能性が考えられる。弾性率については、C44 を除き、材料特性のばらつき係数は概ね同様の値 (1.2～1.3 程度) であった。

表－６ 引張強さのばらつきの比較

記号		過去の結果 (n=5)		今回の結果 (n=25～55)	
		変動係数(%)	L5	変動係数(%)	L5
R43	0° 方向	3.7	1.129		
R26		9.4	1.409		
U64		4.4	1.157		
U27		8.3	1.345	4.59	1.165
U8		6.1	1.232		
C44		5.4	1.200	8.98	1.384
R43	90° 方向	8.3	1.345	6.09	1.232
R26		7.2	1.286		
U64		9.8	1.434	5.22	1.192
U27		5.7	1.214		
U8		4.4	1.157		
C44		9.2	1.397		

3. 2 圧縮試験

U8 (CFRP、引抜方向に対して 0° 方向に試験) の圧縮強さの結果を、過去の結果と併せて表－７に示す。最終的な繰り返し数は 42 となった。過去の試験結果に比べて圧縮強さは 1.2 倍程度に向上していた。圧縮強さに関する材料特性のばらつき係数は、過去の試験では 2.107 であったものが、1.939 と多少小さいものの、概ね同程度の値となった。ただしこの値は、他の試験に比べると大きな値であると考えられる。

図－９に圧縮強さの出現分布を示す。平均値 (248.6MPa) を中心とした分布となったが、広がりやや広がっている。最小値は 170.3MPa であった。平均値をばらつき係数で除した値は 128.2MPa であり、最小値よりも十分に低かった。

なお、今回の試験では、歪みゲージの接着が困難であったため、弾性率測定はできなかった。

表-7 圧縮試験結果(U8、0° 方向)

	n	引張強さ		
		引張強さ(MPa)	変動係数(%)	L5
今回の結果	42	248.6	15.67	1.939
過去の結果	5	207	17.0	2.107

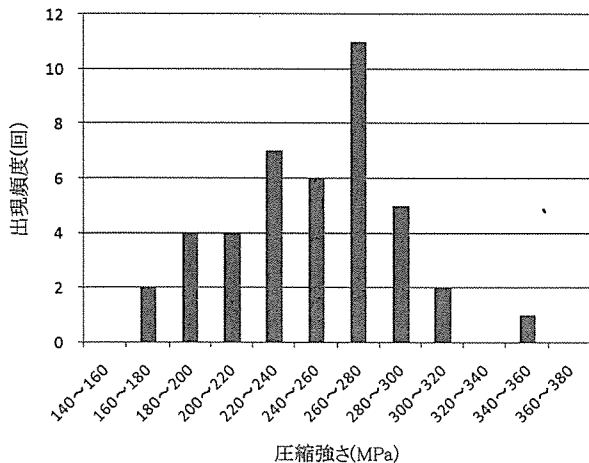


図-9 圧縮強さの分布(U8、0° 方向)

表-8 圧縮強さのばらつき比較

記号		過去の結果 (n=5)		今回の結果 (n=42)	
		変動 係数 (%)	L5	変動 係数 (%)	L5
R43	0° 方向	9.5	1.416		
R26		16.8	2.080		
U64		12	1.589		
U27		7	1.276		
U8		17	2.107	15.67	1.939
C44		11.8	1.574		
R43	90° 方向	5.9	1.223		
R26		3.5	1.121		
U64		5	1.183		
U27		3	1.102		
U8		7	1.276		
C44		18.2	2.285		

表-8は圧縮強さのばらつき係数について、過去の試験結果と今回の試験結果をまとめたものである。今回の試験は1種類の材料について、42の繰り返しで試験を行い、過去の繰り返し数5の試験に比べてやや低い材料物性のばらつき係数を得た。今回の試験の対象としたU8は過去の繰り返し数5の試験においてもばらつき係数が大きかった種類のひとつであったが、今回の試験でも過去の結果と大きな差のないばらつき係数となったことから、この程度のばらつきを有する材料であるものと考えられる。しかし、表-8の中にはばらつきの少ない事例もあることから、圧縮試験では常にばらつきが大きくなるというわけではなく、ばらつきが少なくなるケースもあるものと考えられる。

4. まとめ

土木構造用 FRP の材料特性の信頼度を調べるために、板状の引抜成形材について、引張試験と圧縮試験を繰り返し数 25~55 で実施し、10 年程度前に同じ材料に対して実施された繰り返し数 5 の試験結果と比較検討を行った。その結果は以下のようにまとめられる。

(1) 4 種類の材料について引張試験を実施した結果、強度についてはそのうち 3 種類の材料で、過去の試験結果に比べて低い材料物性のばらつき係数を得た。材料特性のばらつき係数は概ね 1.2 前後となった。

(2) 引張試験を実施した 4 種類のうち 1 種類 (C44) については、過去の試験結果よりも材料特性のばらつき係数が大きく (1.384) になった。データの分布は平均値を中心としたまとまりのある分布とは異なり、やや広い分布を示した。この要因としては、タブの付着不良など試験条件に不適切な因子があった可能性が考えられた。

(3) 引張弾性率については、4 種類のうち 3 種類については、材料特性のばらつき係数は概ね過去の試験結果と同様の値 (1.2~1.3 程度) であった。

(4) 1 種類の材料について圧縮試験を実施した結果、圧縮強さのばらつき係数は、1.939 であった。過去の試験における材料特性のばらつき係数よりはやや低下したものの、引張試験に比較して大きな値となった。

5. 今後の課題

本報では板状引抜成形材の引張特性を報告の中心とした。圧縮特性などの一部については試験が完了していないので、完了後に報告したい。また、せん断特性のばらつきや、板状以外の形状などについても今後検討が必要であると考えられる。

謝辞

本研究に使用した材料は、平成 9 年度から 11 年度にかけて、建設省土木研究所材料施工部化学研究室と(社)強化プラスチック協会、石川島播磨重工業(株)、佐藤工業(株)、ショーボンド建設(株)、東急建設(株)、(株)富士ピー・エスの 7 社により実施された、繊維強化プラスチックの土木構造材料への適用に関する共同研究において製作されたものである。ここに記して謝辞を表したい。

参考文献

- 建設省土木研究所他：共同研究報告書第 252 号「繊維強化プラスチックの土木構造材料への適用に関する共同研究報告書 (II)」pp.16-47, 2000.12.
- 前田編：「FRP 橋梁 ー技術とその展望ー」構造工学シリーズ 14, p.76, 土木学会, 2004.1.