

ハンドレイアップ成形された 厚肉 GFRP の機械的特性の評価

樋口 彰悟¹・山崎 陽祐²・日比 英輝³・橋本 国太郎⁴・松本 幸大⁵

¹学生会員 豊橋技術科学大学 建築・都市システム学専攻 (〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1)

E-mail: higuchi.shogo.rr@tut.jp

²豊橋技術科学大学 建築・都市システム学専攻 (〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1)

E-mail: yamazaki.yosuke.cg@tut.jp

³正会員 株式会社ヒビ (〒503-1337 岐阜県養老郡 養老町直江 613-1)

E-mail: hidekey@hibi-frp.co.jp

⁴正会員 神戸大学 都市安全研究センター (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1)

E-mail: hashimoto@person.kobe-u.ac.jp

⁵正会員 豊橋技術科学大学 次世代半導体・センサ科学研究所

(〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1)

E-mail: y-matsum@ace.tut.ac.jp (Corresponding Author)

近年、高強度・耐食性・軽量といった特性を有する GFRP を主要構造材料とした歩道橋の事例が多数見受けられる。しかし、道路橋・鉄道橋については国内の事例はなく、今後は GFRP の耐食性・軽量性を活かして応用されることが期待される。道路橋・鉄道橋では、荷重・設計条件が歩道橋の場合とは異なるため鋼材と比べて弾性係数の小さい GFRP を主要構造材料として用いる場合、厚板が使用されることが予想される。また、板厚が数十 mm に達する GFRP はこれまでに応用事例もほとんどなく、その成形精度・機械的特性の評価法についてもデータが不足している。そこで本論文では板厚が 40mm の GFRP を成形し、その機械的性質の評価を行うことを通して、厚肉 GFRP の適切な材料試験法について検証するとともに、設計のための基礎データを示す。

Key Words: GFRP, thick plate, tensile test, compression test, bending test

1. 研究背景・目的

繊維強化プラスチック(Fiber Reinforced Plastics, 以下 FRP)は、高強度・高耐食性・軽量といった特徴から、機械分野をはじめとして、航空宇宙・化学分野など、様々な分野で利用されている。現在、土木分野においてはFRPを用いた既存構造物への補修・補強について、多くの提案・検討がなされており広く普及している。一方、FRPを主要構造材料とした適用事例は一部を除き研究・試行段階にある¹⁾。これまでにFRPを主要構造材料とする土木構造物として、水門²⁾、床版³⁾、歩道橋⁴⁾が挙げられる。水門、歩道橋については、設計・施工指針(案)がまとめられるなど、FRPの主要構造部材としての利活用が進められている。中でも、FRP歩道橋については、FRPが持つ耐食性といった特徴から長寿命化および維持管理の軽減であることに加え、軽量であるため施工性に優れて

いることから材料生産・施工から維持管理までを含めたライフサイクルコストの削減が期待され、沿岸部や山間部などではGFRP(Glass FRP:ガラス繊維強化プラスチック)を主要構造材料とした歩道橋が採用された事例が多数見られる⁴⁾。しかし、道路橋・鉄道橋については国内での事例はなく、今後はGFRPの耐食性・軽量性を活かして応用されることが期待される。道路橋・鉄道橋では荷重・設計条件が歩道橋の場合とは異なるため、鋼材と比べて弾性係数の小さいGFRPを主要構造材料として用いる場合、大型断面形状の部材の使用や大きい板厚が要求されることが予想される。これまで、土木構造物に使用されるFRPを部材材料に使用した溝形部材⁵⁾⁹⁾、I形部材¹⁰⁾¹²⁾や中空部材⁵⁾¹³⁾¹⁵⁾の性能評価が行われている。また、板厚数十mmに達するGFRPは風力発電ブレードでの応用事例¹⁶⁾があり、成形技術の高度化を含めた技術開発が進められているが、産業用途としてのFRPの物性値

や、土木分野で応用可能な成形法による厚肉FRPの評価はデータが乏しい。一方、肉厚鋼材においては、板内部の冷却遅れに伴う材質の変化、残留応力に伴い、降伏点・引張強度は一定でないことが報告されている¹⁷⁾。また、JIS規格品の鋼材^(例えば¹⁸⁾)においては、板厚が40mmを超える材料は40mm以下に比べて基準強度が小さく設定されている。少量生産に対応可能である圧縮ハンドレイアップ成形法は各繊維層に含浸樹脂を含浸させる作業が必要であるため、厚肉GFRPの成形を行う場合、成形中に樹脂の硬化が開始する可能性があり機械的特性の変化や成形不良の恐れがある。そこで、圧縮ハンドレイアップ成形法で現在多く使用されている数mm～十数mmに比べて肉厚である板厚40mmのGFRPの成形が可能かどうか検証を行う。そして、成形されたGFRP平板からクーポン試験片を採取し、引張・圧縮・曲げ試験を実施した結果について報告する。また、同じ成形法・配向方向による数mm～数十mmのGFRPと機械的性質の比較を行うことを通して、厚肉GFRPの適切な材料試験法について検証するとともに設計および有限要素解析のための基礎データを示す。

2. 厚肉GFRPの成形方法

本対象の厚肉GFRPは圧縮ハンドレイアップ成形法によって成形されている。成形過程は、まず、成形型(鋼製定盤)に強化繊維を設置し、ローラー刷毛を用いて含浸樹脂を塗布含浸させながら脱泡し、厚さ40mmの金属製スパーサーを設置し、所定の厚さとなるように錘による荷重で常温で加圧している。図-1(a)に成形時の様子を、図-1(b)に完成後のGFRPの外観を示す。図中には、GFRPの座標軸をあわせて示しており、x軸、y軸を面内方向、z軸を面外方向とした。使用する含浸樹脂は、不飽和ポリエステル樹脂とし、強化繊維にはJIS R 3417¹⁹⁾に規定される品質に適合する2方向ガラスロービングクロスが用いられている。ガラスロービングクロスの目付量は815g/m²であり、ガラス繊維の比重から算出した厚さは

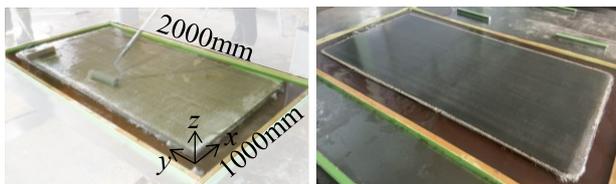


図-1 厚肉GFRPの成形過程

表-1 材料特性

(a)不飽和ポリエステル樹脂		(b)ガラス繊維	
弾性係数[GPa]	2.77	弾性係数[GPa]	72.5
ポアソン比	0.39	引張強度[MPa]	3430

は0.32mmである。表-1に含浸樹脂である不飽和ポリエステル樹脂のクーポン引張試験から得られた材料特性、およびメーカー提示の繊維の材料特性のカタログ値を示す。板厚の目標値を40mmとし、1000mm×2000mmのガラスクロスを59層積層している。本研究で実施した試験で使用する試験体は、成形したGFRP板を切断することでそれぞれ製作した。成形後にGFRP板の板厚は40.4mm(繊維体積含有率 $V_f=46.7\%$)であり、圧縮ハンドレイアップ成形法を用いることで、厚肉であり接触圧成形法と比べ²⁰⁾高い V_f のGFRPの板厚管理が可能であることが確認できた。

3. 試験概要

(1)引張試験

厚肉GFRPの引張特性を把握することを目的として、引張試験を行う。図-2(a)に試験体の概要図を示す。試験区間の幅はJIS K7164²¹⁾を参考に定められている板厚に対する幅の比率を採用し、試験区間長さは板厚にする試験区間長さの比率を採用した。また、R部は加工の都合上JIS規格の準用ができないため、φ100mmとした。試験区間の寸法は、幅40mm×長さ95mmとし、つかみ部には幅80mm、長さ140mm、厚さ2mmのアルミタブを試験体両側に貼り付ける。各試験体中央部のxy面の2面に2軸のひずみゲージ(東京測器研究所, FCAB-10)を貼付け、試験体1には2mm間隔5か所のひずみゲージが測定可能である応力集中測定用のひずみゲージ(東京測器研究所, FYV-1)、それ以外の試験体には1軸のひずみゲージ(東京測器研究所, FLAB-10)を10mm間隔で3本設置しひずみをxz面で測定した。試験体加工は、バンドソーを用いて455mm×80mmの短冊状に切断した後、図-3(a)に示すような直径100mmのホルソーを用いて図-3(b)のようにドッグボーン形状の試験体に加工した。最終的には電動やすりを用いて試験区間を平滑にした。

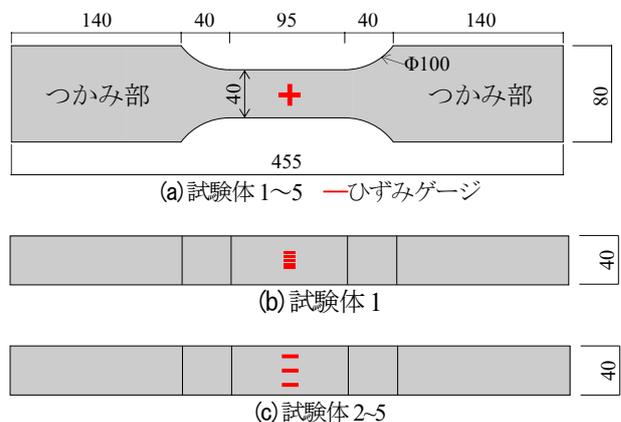
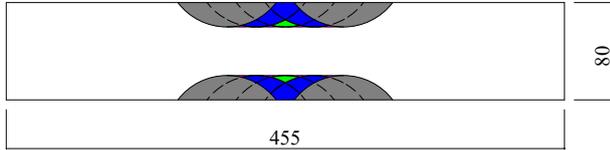


図-2 引張試験体概要図 [単位:mm]



(a)加工時の様子



(b)加工図 [単位: mm]

図-3 引張試験の加工概要

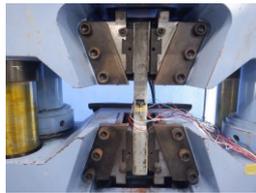
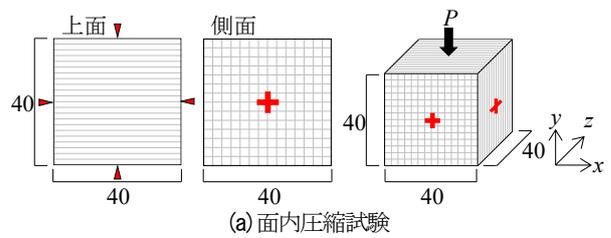


図-4 引張試験体の設置状況

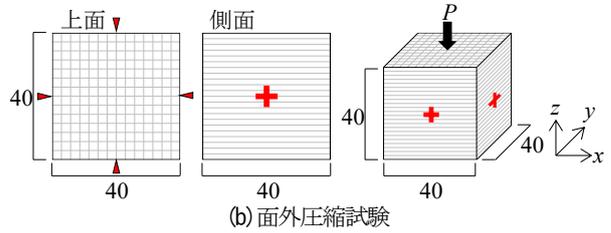
図-4 に引張試験体の設置状況を示す。チャック部のつかみ圧力は約 $0.11[\text{MPa}]$ である。試験は万能試験機を用いた载荷速度 $2.0[\text{MPa/s}]$ 以下の静的载荷とし、試験体数は5体とした。

(2) 圧縮試験

厚肉 GFRP の圧縮特性を把握することを目的として、繊維方向に圧縮力を作用させる面内圧縮試験、および積層方向に圧縮力を作用させる面外圧縮試験を行う。図-5 に試験体の概要図を示す。文献5)において面内圧縮強度の評価法として、部材から直方体に切削することで圧縮強度を簡便に評価できることが示されている。よって、面内圧縮試験では、文献5)を参考に試験体方法を定めた。また、面外圧縮特性は JIS 等に定められていないため、面内圧縮試験と同様の方法とした。試験体は各辺 40mm の立方体とし、上面に圧縮力を作用させることで試験を実施した。面内圧縮試験は、試験体側面により繊維方向が異なっているが、面外圧縮試験は、全ての試験体側面の繊維方向が等しくなっている。また、いずれの試験においても試験体側面(4面)の中心部において2軸ひずみゲージ(東京測器研究所, FCAB-10)を用いて軸方向、および幅方向のひずみを測定した。図-6 に試験体設置状況を示す。载荷面となる上面は球座とし、試験体と試験機耐圧板との摩擦による幅方向の変形拘束の緩和を目的として、試験体と試験機の間にはテフロンシートを挟み試験を実施した。試験は万能試験機を用いた载荷速度はそれぞれ $2.0[\text{MPa/s}]$, $4.0[\text{MPa/s}]$ 以下の静的载荷とし、面内圧縮試験と面外圧縮試験のいずれも試験体数は5体とした。



(a)面内圧縮試験



(b)面外圧縮試験

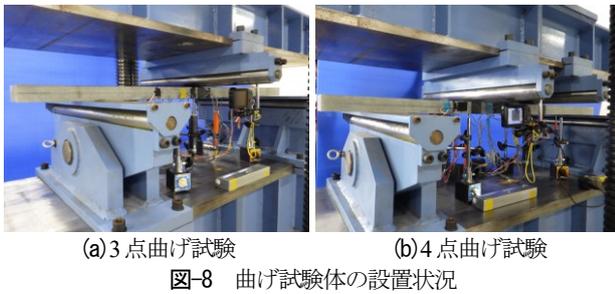
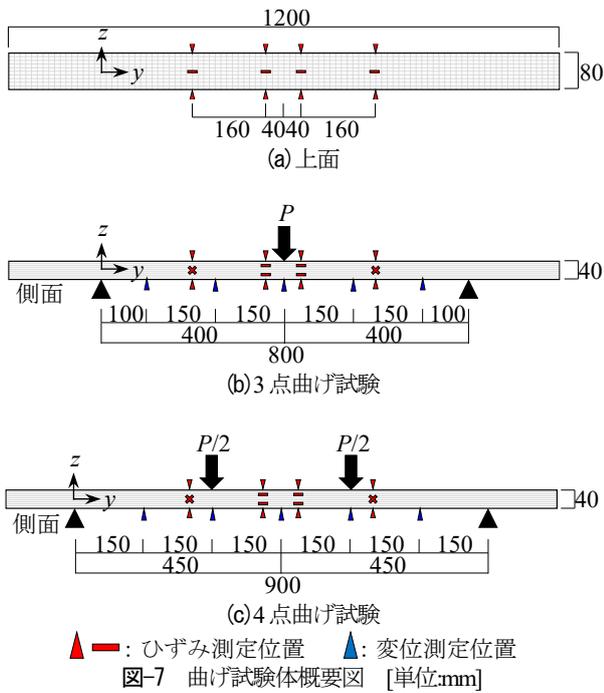
図-5 圧縮試験体概要図 [単位:mm]



図-6 圧縮試験体の設置状況

(3) 曲げ試験

厚肉 GFRP の面内曲げ特性を把握することを目的として、3点曲げ試験、および4点曲げ試験を行う。図-7 にそれぞれの試験体の概要図を示す。試験体寸法は JIS K7017²⁾に定められている寸法の比率から GFRP の板厚である 40mm に対応する値を採用した。試験体幅は 80mm であり、試験体全長は各曲げ試験体で 1200mm であるが、支点間距離は3点曲げ試験で 800mm 、4点曲げ試験で 900mm である。変位の計測位置は3点曲げ試験では部材中央から 0mm , $\pm 150\text{mm}$, $\pm 300\text{mm}$ に、4点曲げ試験では、部材中央から 0mm , $\pm 150\text{mm}$, $\pm 350\text{mm}$ に、合計5か所である。また、ひずみゲージ(東京測器研究所, FLAB-5)の設置位置は各曲げ試験共通とし、部材中央から $\pm 40\text{mm}$, $\pm 200\text{mm}$ の位置とした。部材中央から $\pm 40\text{mm}$ の位置では板厚方向に中立軸から $\pm 10\text{mm}$ 、および試験体上面・下面でひずみの測定を行う。また部材中央から $\pm 200\text{mm}$ の位置では、試験体上面・下面に加えて、中立軸位置で2軸のひずみゲージ(東京測器研究所, FCAB-5)を用いて、 $\pm 45^\circ$ 方向のひずみの測定を行う。図-8(a)に3点曲げ試験、図-8(b)に4点曲げ試験の試験体の設置状況を示す。試験は圧縮試験機を用いた载荷速度 $0.3[\text{MPa/s}]$ 以下の静的载荷とし、3点曲げ試験と4点曲げ試験のいずれも試験体は3体とした。なお、ひずみの測定については2体ずつ行った。また、全ての試験体で最大荷重から20%の荷重低下が生じた時点で試験を終了した。



(4) 評価方法

各試験ひずみゲージを使用してひずみの計測を行う。ただし、曲げ試験において、試験体中央部の表面ひずみについては JISK 7017²²⁾に基づき試験体中央部の変位から算出した。また、弾性係数については、JIS K 7018²³⁾に基づき、ひずみの範囲が 0.05~0.25%、および応力の範囲が最大応力の 20~50%において最小二乗法により算出した。

4. 試験結果

表-2、図-9に引張・圧縮・曲げ試験から得られた材料特性をまとめて示す。

(1) 引張試験

図-10 に引張試験の破壊形態について示す。全ての試験体で試験区間内において繊維の破断が生じ、破壊音を伴う脆性的な破壊であった。板厚 6.5mm~9mm の圧縮ハンドレイアップ GFRP の引張弾性係数、および最大応力は約 20~33[GPa]、約 190~390[MPa]と報告されている⁵⁾。表-2 より本論文で使用した板厚 40mm の厚肉 GFRP の引張弾性係数および最大応力は板厚が薄い圧縮ハンドレイアップ GFRP の範囲内である。よって、板厚が 40mm までであれば板厚による引張荷重に対する機械的特性の影響はないと考えられる。表-1 の材料特性を用いて計算を行った積層板理論の理論値は 20.4GPa であり、実験値はおおむね一致している。

表-2 試験結果

	最大応力		弾性係数				ポアソン比						
	平均	変動係数	ひずみ 0.05%~0.25%		最大応力 20%~50%		xy		yz		zx,zy		
	[MPa]	[%]	平均 [GPa]	変動係数 [%]	平均 [GPa]	変動係数 [%]	平均 [%]	変動係数 [%]	平均 [%]	変動係数 [%]	平均 [%]	変動係数 [%]	
引張	314.8	2.11	24.04	1.26	18.33	2.39	0.132	5.44	-	-	-	-	
圧縮	面内	237.0	7.27	30.17	13.01	27.61	8.25	0.201	47.14	0.569	28.31	-	-
	面外	520.7	3.89	12.14	2.41	10.22	2.53	-	-	-	-	0.171	1.92
3点曲げ	曲げ	299.2	2.51	24.39	2.53	23.62	2.64	-	-	-	-	-	-
	せん断	-	-	1.539	2.65	1.549	1.645	-	-	-	-	-	-
4点曲げ	曲げ	371.3	1.49	25.76	4.67	24.74	2.15	-	-	-	-	-	-
	せん断	-	-	1.582	5.27	1.515	1.695	-	-	-	-	-	-

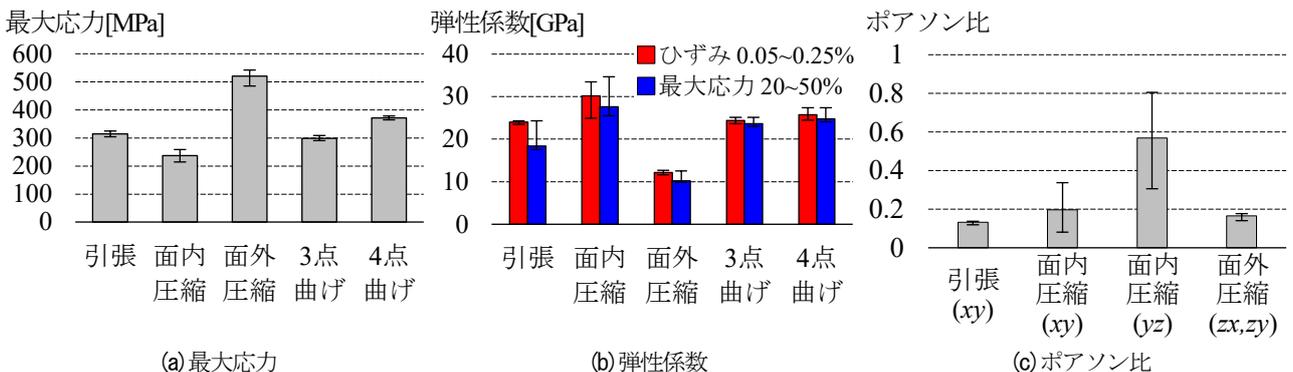


図-9 試験結果

次に、図-11(a)に xy 平面に設置したひずみゲージから得られた応力-ひずみ関係を示す。各試験体、引張ひずみが約0.3%まで線形的な挙動を示すが、それ以降は傾きが緩やかになる傾向がある。これは、ガラスロービングクロスによる板厚7.9,10mmの圧縮ハンドレイアップGFRPでも同様の傾向が確認されており^{7,24)}、板厚が40mmであっても、この傾向は変化しないことがわかる。また、文献7)において引抜成形GFRPに比べ、ガラスロービングクロスによる圧縮ハンドレイアップGFRPのほうがより非線形的な挙動が確認できる。よって、強化繊維にガラスロービングクロスを用いることで、この剛性の非線形的な挙動が起こると考えられる。このような挙動が起こる要因は荷重に対して直交方向の繊維と樹脂の界面剥離や、ガラスロービングクロス同士の層間剥離等が考えられるが詳細については解明できていないため、今後の課題とする。また、表-2、図-10(b)より、引張弾性係数の測定範囲を変化させることで、約31%引張弾性係数が減少することが確認できる。次に、図11-(b),(c)に yz 平面に設置したひずみゲージから得られた、応力-ひずみ関係を示す。また、図中には、弾性係数の計算範囲であるひずみが0.05~0.25%を拡大して示している。試験体の板厚が40mmであることから、板厚中心(± 0 mm)より、試験体表面(± 20 mm)のひずみが大きくなることが予想されたが、ひずみを計測した位置によるひずみの挙動やばらつきを示していないことから、板厚方向の応力の偏りが少ないことがわかる。



(a) xy 面



(b) yz 面

図-10 引張試験の破壊形態

(2) 圧縮試験

図-12(a)に面内圧縮試験の破壊形態を、図-12(b)に面外圧縮試験の破壊形態を示す。面内圧縮試験では、繊維配向方向において白化が生じている繊維層が確認でき、繊維の座屈による層間剥離が生じている。FRPの繊維方向の圧縮強度は強化繊維の座屈によって定まり、その推定式は実験値と良い対応を示すことが報告されている²⁾。また、端面における破壊が生じなかったことから破壊形態は材料試験に適した破壊形態であったと考える。対して、面外圧縮試験では破壊音を伴い、試験体の破片が飛び散るような破壊となった。また、試験体の角部が斜めに落とされるような破壊形態となり、せん断破壊が生じていることがうかがえる。このようなせん断破壊は文献5),9)において、板厚7~12mm程度を対象とした面内圧縮試験でも確認されている。

図-13(a),(b)に面内圧縮試験、図-13(c)に面外圧縮試験から得られた応力-ひずみ関係を示す。面内圧縮試験では、試験体側面の繊維方向が異なるため、 xy 平面、 yz 平面から得られるひずみを分けて示している。圧縮弾性係数は全側面から得られたひずみを平均した値を用いて算出した。また、面外圧縮試験では試験体側面は全て繊維方向が等しいため、ポアソン比は全ての側面の平均値を採用した。面内圧縮試験における xy 平面の軸方向ひずみ、幅方向ひずみ、 yz 平面の幅方向ひずみの挙動は各試験体で大きくばらついていることがわかる。対して、面外方向の軸方向ひずみ、幅方向ひずみのいずれも安定しており、軸方向ひずみが約3.5%を迎えた後、ひずみは増加せず最大応力を迎えている。面内圧縮試験の幅方向のひずみが大きくばらつくことから、ポアソン比の変

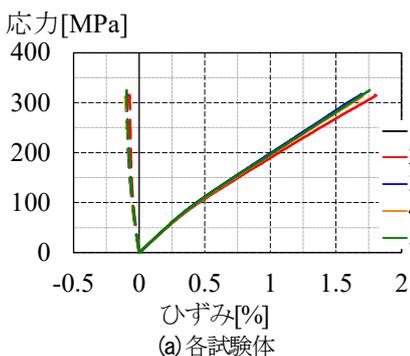


(a) 面内圧縮試験

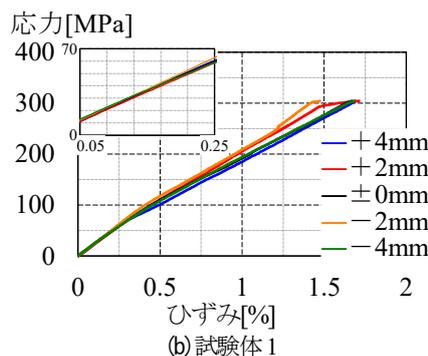


(b) 面外圧縮試験

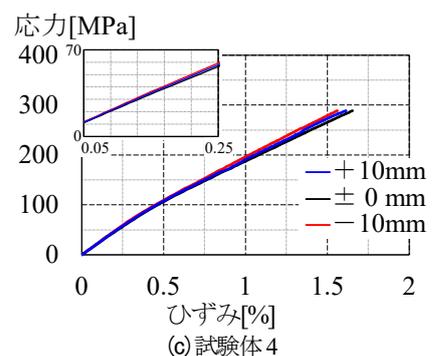
図-12 圧縮試験の破壊形態



(a) 各試験体



(b) 試験体1



(c) 試験体4

図-11 引張試験の応力-ひずみ関係

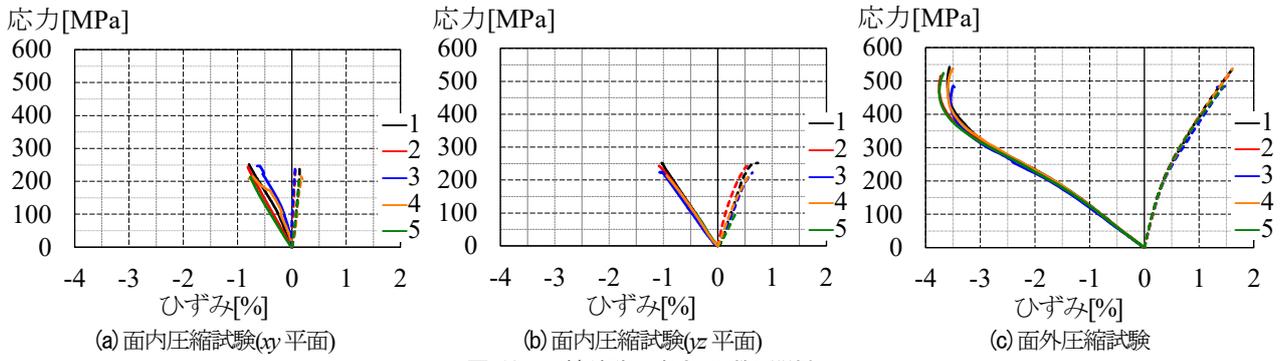


図-13 圧縮試験の応力-ひずみ関係

動係数は大きく、面外圧縮試験のポアソン比の変動係数は比較的小さい。また、面外圧縮試験では圧縮ひずみが約 1.5%までは線形的な挙動を示すが、それ以降は傾きが緩やかになる傾向が確認できる。また、表-2、図-10(b)より、弾性係数の測定範囲を変化させることで、約 10%圧縮弾性係数が減少することが確認できる。対して、面内圧縮試験 yz 平面を見ると各試験体で破断まで線形的な挙動を挙動を示している。面内方向の圧縮弾性係数は面外方向の圧縮弾性係数に比べて、約 2.5 倍大きい。これは面内方向では、繊維配向方向と圧縮試験の作用する方向が等しいのに対して、面内方向では、繊維の配向方向と直交方向に圧縮力が作用するためである。同様に理由で、面外方向のポアソン比(yz)は面外方向のポアソン比(xy, xz, zy)に比べて大きいことがわかる。面外圧縮試験の最大圧縮応力は、面内圧縮試験の最大圧縮応力に比べて、約 2.2 倍大きい。これは前述したように面内圧縮試験では、繊維の座屈による層間剥離が生じたことから、面外圧縮試験に比べて早期に最大圧縮応力を迎えたと予想される。また、板厚 7mm~10.1mm の圧縮ハンドレイアップ GFRP の面内圧縮弾性係数および最大応力は 17.9~36.5[GPa], 219.4~358.8[MPa]と報告されている⁵⁾。本論文で使用した板厚 40mm の厚肉 GFRP の面内圧縮弾性係数および圧縮強度は板厚が薄い圧縮ハンドレイアップ GFRP の範囲内である。よって、板厚が 40mm までであれば板厚による圧縮荷重に対する機械的特性の影響はないと考えられる。ただし、面内圧縮試験における弾性係数およびポアソン比の変動係数が 10%を超えており、これらの要因や安定性、設計や解析に用いる場合の妥当性については今後検討する必要がある。

(3) 曲げ試験

図-14 に各曲げの最大荷重時の様子の一例を示す。3 点曲げ試験では圧子の左側で圧縮破壊が生じ盛り上がる様子が確認できる。また、4 点曲げ試験では右側圧子付近で面外に変形し、等曲げ区間にて層間剥離が生じている様子がわかる。図-15 に 3 点曲げ試験の破壊形態を、図-16 に 4 点曲げ試験の破壊形態を示す。試験体上面の

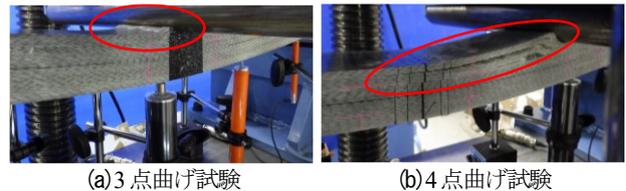


図-14 最大荷重時の破壊形態

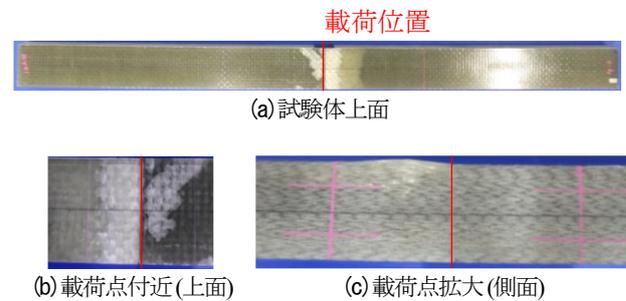


図-15 3 点曲げ試験の破壊形態

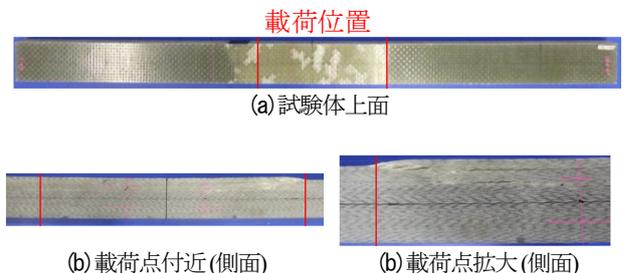


図-16 4 点曲げ試験の破壊形態

様子から 3 点曲げ試験では荷重位置の左側が白化しており圧縮破壊が生じていることがわかる。対して、4 点曲げ試験では荷重点間に広く白化が生じており、荷重点間にわたり層間剥離が生じていることがうかがえる。また、3 点曲げ試験と 4 点曲げ試験のいずれも全ての試験体において同様の破壊形態が生じたことを確認した。

表-2、図-10に示した最大曲げ応力を比較すると、3 点曲げ試験に比べて、4 点曲げ試験は約 7%低い。これは文献 26)でも同様の傾向が確認されており、3 点曲げ試験では、最大縁応力が荷重点の 1 点に作用するが、4 点曲げ試験では、最大縁応力が圧子間の範囲にわたって作用する。最大応力の領域が広がることで、その領域内に欠損が存在する確率が高まるため、4 点曲げ試験の方が最

大応力が低くなったと考えられる。また、各曲げ試験のせん断応力の分布より、せん断変形は3点曲げ試験のほうが大きくなると考えられるが、試験体中央部の変位から算出した曲げ弾性係数に違いがみられないことから、JIS K7017²²⁾に定められている板厚とスパンの比率を採用した3点曲げ試験と4点曲げ試験のせん断変形の影響については無視して曲げ弾性係数の評価が可能であると考えられる。4点曲げ試験から得られたせん断弾性係数は3点曲げ試験から得られたせん断弾性係数に比べてばらつきは大きいですが、両者のせん断弾性係数はおおよそ一致している。

図-17に各曲げ試験から得られた荷重-変位関係を示す。図中にはベルヌーイ・オイラー梁理論より算出した変位の計算値も併せて示している。計算値の弾性係数は引張試験において、ひずみの範囲が0.05-0.25%で得られた弾性係数を用いている。4点曲げ試験のNo.3については

$x=\pm 150\text{mm}$ ではなく、 $x=\pm 200\text{mm}$ で変位の測定を行ったため、対応した計算値を図中に示している。また、4点曲げ試験のNo.1の $x=0\text{mm}$ 、 $\pm 150\text{mm}$ 、No.2の $x=\pm 150\text{mm}$ の位置では変位が約40mmの時点で計測を終了した。各曲げ試験の全ての変位測定位置において、試験から得られた荷重-変位関係と計算値がおおむね一致していることがわかる。また、 $x=0\text{mm}$ 、 $\pm 150\text{mm}$ における変位の挙動について着目すると、各曲げ試験において荷重が小さい範囲では線形的な挙動を示すが、荷重が20kNを超えたあたりから変位が計算値より大きく示すような非線形挙動を示している。

図-18にベルヌーイ・オイラー梁理論より算出した10kN、20kN、30kN時点の変位分布と試験より得られた変位を示している。前述したように、各曲げ試験から得られた変位と計算値はおおむね一致している。異方性が強くせん断変形の影響を受けやすいFRP材料においても、今回

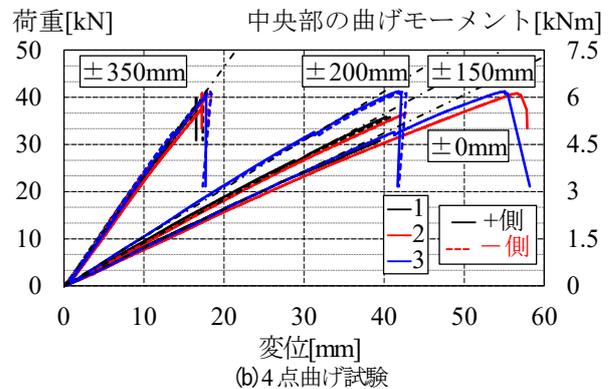
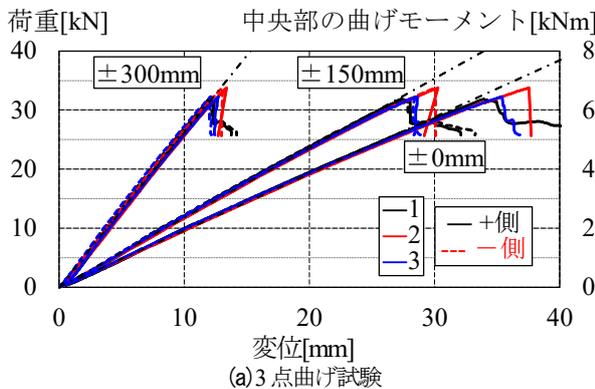


図-17 荷重-変位関係

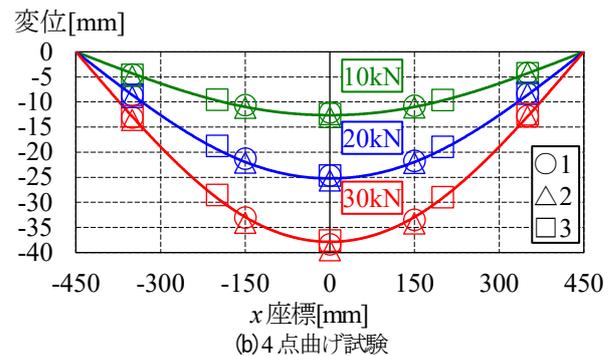
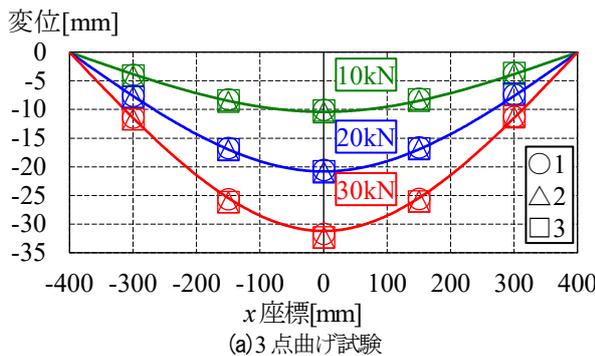


図-18 変位分布

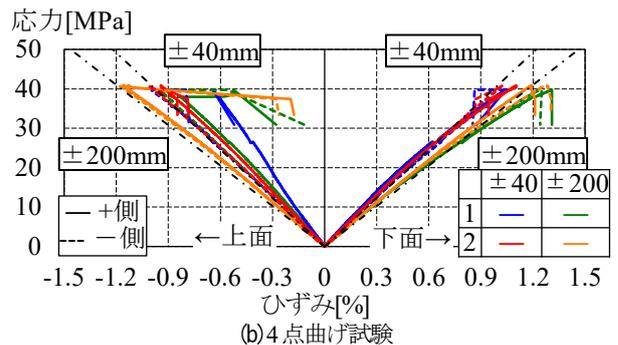
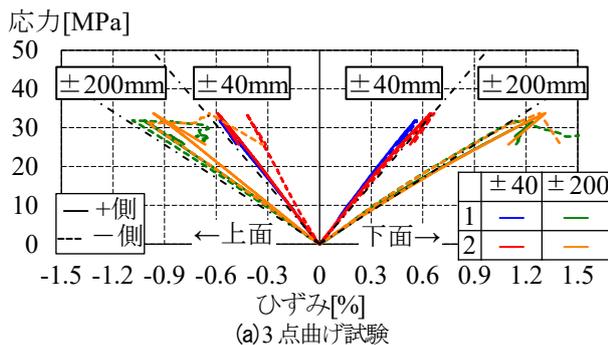


図-19 荷重-ひずみ関係

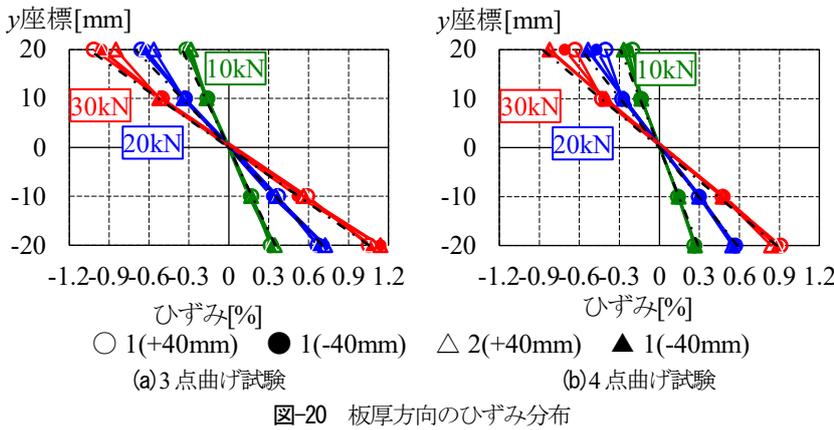


図-20 板厚方向のひずみ分布

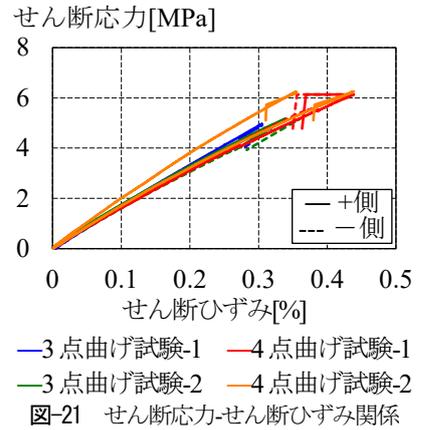


図-21 せん断応力-せん断ひずみ関係

の曲げ試験ではせん断変形を考慮していないベルヌーイ・オイラー梁理論から算出した計算値と各曲げ試験の変形がおおむね一致していることから曲げ特性を評価できているといえる。

図-19 に各曲げ試験から得られた上・下面($x=\pm 40\text{mm}$, $\pm 200\text{mm}$)の荷重-ひずみ関係を示す。各曲げ試験から得られた荷重-ひずみ関係を示す。各曲げ試験から得られたひずみは計算値とおおむね一致していることがわかる。しかし、試験機の圧子が接触する上面(圧縮側)についてはばらつきが大きい傾向が確認できる。

図-20 に各曲げ試験において、 $x=\pm 40\text{mm}$ の位置から得られた 10kN, 20kN, 30kN 時点のひずみ分布を示す。図中には、ひずみの計算値を合わせて示している。各曲げ試験から得られた板厚方向のひずみ分布はいずれも計算値とおおむね一致していることがわかる。しかし、荷重が大きくなるにつれて、上面のひずみは計算値より小さくなる傾向にある。表-2 に示したように、本試験の面内引張弾性係数に比べ、面内圧縮弾性係数が高いことから、圧縮側である上側のひずみが小さくなったと考えられる。

図-21 にせん断応力-せん断ひずみ関係を示す。面外方向のせん断弾性係数は $x=\pm 200\text{mm}$ の位置で測定した $\pm 45^\circ$ 方向のひずみから算出したせん断ひずみと測定位置に作用するせん断応力から求めた。せん断応力は、せん断ひずみの計測箇所に作用するせん断力(荷重の半分)を断面積で除した値とし、せん断ひずみは $\pm 45^\circ$ 方向のひずみの絶対値和とした。各試験のせん断応力-せん断ひずみ関係は 4 点曲げ試験-2 の+側のみばらついていることが確認できるが、その他についてはおおむね一致している。表-2 に示しているせん断弾性係数の算出はひずみの計測を行った試験体のみ行っている。複合則による面外せん断弾性係数の理論値は 1.3[GPa]であり、実験値はおおむね一致している。

5. おわりに

本研究では、板厚 40mm の GFRP を成形し、引張試験、面内・面外圧縮試験、および、曲げ試験を実施し、試験結果の分析、および、機械的性質の評価を行った。特に機械的性質の評価では、一般に FRP 材料では測定が困難である^{27,28)}といわれている面外方向の弾性係数、および、面外方向のせん断弾性係数について示した。しかし、面内圧縮試験によって得られた弾性係数およびポアソン比は他の試験に比べてばらつきが大きく、この結果の有用性については今後の課題とする。

また、本試験で得られた板厚 40mm の GFRP 面内引張・圧縮の機械的性質は、文献 5)による板厚 6.5~10.1mm の圧縮ハンドレイアップ GFRP の範囲内であり、板厚 40mm までであれば機械的性質に影響を与えないことを明らかにした。

謝辞： 本研究は元豊橋技術科学大学大学院生 濱崎瑞生氏の協力を得た。試験体の加工には、豊橋技術科学大学 教育研究基盤センターの工作機器を利用した。ここに記して謝意を表します。

付録

本実験で得られた実験データは下記ページで公開し、今後の FRP の材料特性評価に応用可能とする。

<https://doi.org/10.5281/zenodo.13884738>

REFERENCES

- 1) 土木学会・複合構造委員会：複合構造レポート 20 FRP 複合構造の設計・維持管理に関する最新の調査報告, 2023. [Committee on Hybrid Structures, Japan Society of Civil Engineers: Report on the Latest Research on Design and Maintenance of FRP Composite Structures, Hybrid Structures Series 20, 2023.]
- 2) 土木学会・複合構造委員会：複合構造シリーズ 06 FRP 水門設計・施工指針(案), 2014. [Committee on Hybrid Structures, Japan Society of Civil Engineers: Guidelines Design and Construction of FRP Hydraulic

- Gates, Hybrid Structures Series 06, 2014.]
- 3) 長尾千秋, 松井繁之, 石崎茂, 久保圭吾, 小牧秀之, 平山紀夫: 鋼・FRP 複合永久型枠を用いた打替え用合成床版の耐荷特性, 構造工学論文集, Vol.53A, pp.1032-1039, 2007.[Nagao, C., Matsui, S., Ishizaki, S., Kubo, K., Komaki, H. and Hirayama, N.: Structural performance of replacing FRP composite deck using permanent form with steel and FRP, *Journal of Structural Engineering*, Vol.53A, pp.1032-1039, 2007.]
 - 4) 土木学会・複合構造委員会: 複合構造シリーズ 04 FRP 歩道橋設計・施工指針(案), 2011. [Committee on Hybrid Structures, Japan Society of Civil Engineers: *Guidelines for Design and Construction of FRP footbridge*, Hybrid Structures Series 04, 2011.]
 - 5) 土木学会・複合構造委員会: 複合構造レポート 11 土木構造用 FRP 部材の設計基礎データ, 2014. [Committee on Hybrid Structures, Japan Society of Civil Engineers: *Basic data for the design of structural FRP for construction*, Hybrid Structures Series 11, 2014.]
 - 6) 石井裕弥, 飯田卓弥, 中村一史, 古谷嘉康, 中井裕司, 西田雅之: GFRP 溝形材のせん断耐力の評価方法に関する実験的研究, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.73, No.5, pp.10-19, 2017. [Ishii, Y., Iida, T., Nakamura, H., Furuya, Y., Nakai, H. and Nisida, M.: Experimental study on shear strength in pultruded GFRP channel members, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, Ser. A1 (Structural Engineering & Earthquake Engineering (SE/EE)), Vol.73, Issue 5, pp.10-19, 2017.]
 - 7) 林巖, 鈴木康夫, 杉浦邦征, 西崎到, 北根安雄: 土木構造用 GFRP 溝形材における引張特性の統計的評価, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.75, No.3, pp.293-304, 2019. [Hayashi, G., Suzuki, Y., Sugiura, K., Nishizaki, I. and Kitane, Y.: A statistical evaluation of tensile properties of GFRP channel member, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, Ser. A1 (Structural Engineering & Earthquake Engineering (SE/EE)), Vol.75, Issue 3, pp.293-304, 2019.]
 - 8) 橋本国太郎, 二見悠太郎, 岡井大樹, 日比英輝, 池田哲雄: GFRP 部材の引張および圧縮強度評価のための実験的研究, 構造工学論文集, Vol.68A, pp.836-849, 2022. [Hashimoto, K., Futami, Y., Okai, D., Hibi, H. and Ikeda, T.: Experimental study for evaluation of tensile and compressive strength of GFRP members, *Journal of Structural Engineering*, Vol.68A, pp.836-849, 2022.]
 - 9) 林巖, 北根安雄, 五井良直, 鈴木康夫, 杉浦邦征, 西崎到: 溝形 GFRP 部材の材料特性のばらつきを考慮した圧縮・曲げ性能評価, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.76, No.1, pp.110-125, 2020. [Hayashi, G., Kitane, Y., Goi, Y., Suzuki, Y., Sugiura, K. and Nishizaki, I.: Performance Evaluation of compression and bending of GFRP channel member considering material valuation, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, Ser. A1 (Structural Engineering & Earthquake Engineering (SE/EE)), Vol.76, No.1, pp.110-125, 2020.]
 - 10) Hino, S., Abdullah, B.: Behavior of GFRP Pultruded I-600 Beam Under Static and Fatigue Loadings, *Journal of Structural Engineering*, JSCE, Vol.51A, pp.1267-1274, 2005.
 - 11) 小林憲治, 日野伸一, 青野雄太, 山口浩平, 岡俊蔵, 林耕四郎: GFRP 引抜き成形 I 形断面はりの材料力学特性および曲げせん断挙動に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.54A, pp.850-859, 2008. [Kobayashi, K., Hino, S., Aono, Y., Yamaguchi, K., Oka, S. and Hayashi, K.: Experimental study on the material characteristics and flexural-shear behavior of GFRP pultruded I-section beam, *Journal of Structural Engineering*, Vol.54A, pp.850-859, 2008.]
 - 12) 小林憲治, 日野伸一, 山口浩平, 貝沼重信: GFRP 引抜き成形材の材料特性およびはり部材の曲げ挙動に関する基礎的研究, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.67, No.1, pp.1-12, 2011. [Kobayashi, K., Hino, S., Yamaguchi, K. and Kainuma, S.: Fundamental study on the material characteristics and flexural behavior of pultruded GFRP beam, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, Ser. A1 (Structural Engineering & Earthquake Engineering (SE/EE)), Vol.67, No.1, pp.1-12, 2011.]
 - 13) 山田聖志: 連続引抜き成形 FRP 箱形構造部材の載荷実験と局部座屈耐力, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.437-438, 1995. [Yamada, S.: Experiments on Elastic Behavior of a Boc-Shaped Pultruded Composite Member and its Local Buckling, *Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan*, pp.437-438, 2022.]
 - 14) 米丸啓介, 藤崎忠志, 杉崎健一, 中辻照幸, 鈴木弘之: CFRP パイプを構造材料に適用するための基礎的研究: 日本建築学会構造系論文集, 第 66 巻, 第 542 号, pp.195-202, 2001. [Yonemaru, K., Fujisaki, T., Sugizaki, K., Nakatsuji, T. and Suzuki, Hiroyuki.: Basic study to apply CFRP pipes to structural use, *Journal of Structural and Construction Engineering*, Vol.66, Issue 542, pp.195-202, 2001.]
 - 15) 米丸啓介, 藤崎忠志, 杉崎健一, 中辻照幸, 鈴木弘之: CFRP トラス部材の引張特性に関する研究: 日本建築学会構造系論文集, 第 66 巻, 第 548 号, pp.159-165, 2001. [Yonemaru, K., Fujisaki, T., Sugizaki, K., Nakatsuji, T. and Suzuki, H.: Study on tensile properties of CFRP truss members, *Journal of Structural and Construction Engineering*, Vol.66, Issue 548, pp.159-165, 2001.]
 - 16) 稲留将人, 藤田直博, 森野一英, 郷家正義, 助宗剛, 荒金陽介, 木村公, 今村博, 戸塚義孝: 風車ブレード軽量化に関する FRP 材料開発, 風力エネルギー利用シンポジウム, 38 巻, pp.155-158, 2016. [Inadome, M., Fujita, N., Morino, K., Goumune, M., Sukemune, T., Aragane, Y., Kimura, T., Imamura, H. and Totsuka, Y.: Development of FRP materials to lighten wind turbine blade, *Proceedings of Japan Wind Energy Symposium*, Vol.38, pp.155-158, 2016.]
 - 17) 藤井堅, 石川晋平, 中茂泰則, 田中雅人: 極厚鋼板の材料特性と残留応力およびその静的強度への影響, 土木学会論文集 A, Vol.66, No.2, pp.253-263, 2010. [Fujii, K., Ishikawa, S., Nakamo, Y. and Tanaka, M.: Material properties and residual stresses of rolled thick plates and their effects on static strength, *Doboku Gakkai Ronbunshuu A*, Vol.66, Issue 2, pp.253-263, 2010.]
 - 18) 日本規格協会, JIS G 3101: 一般構造用圧延鋼材, 2024. [Japanese Industrial Standards Committee, JIS G 3101: Rolled Steels for general structure, 2024.]
 - 19) 日本規格協会, JIS R 3417: ガラスロービングクロス, 2009. [Japanese Industrial Standards Committee, JIS R

- 3417: Textile glass – Woven roving, 2009.]
- 20) 強化プラスチック協会：FRP 構造設計便覧. 1994.[Japan Reinforced Plastics Society: FRP kozo sekkei binran, 1994.]
- 21) 日本規格協会, JIS K 7164：プラスチック引張特性の試験方法—第4部：等方性及び直交異方性繊維強化プラスチックの試験条件, 2005. [Japanese Industrial Standards Committee, JIS K 7017:Plastics -Determination of tensile properties -Part 4 :Test Conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced plastic composites, 2005]
- 22) 日本規格協会, JIS K 7017：繊維強化プラスチック-曲げ特性の求め方, 1999. [Japanese Industrial Standards Committee, JIS K 7017: Fibre-reinforced plastics composites – Determination of flexural properties, 1999.]
- 23) 日本規格協会, JIS K 7018：繊維強化プラスチック-積層板の面内圧縮特性の求め方, 2019. [Japanese Industrial Standards Committee, JIS K 7018: Fibre-reinforced plastics composites – Determination of compressive properties in the in-plane direction, 2019.]
- 24) 林巖, 北根安雄, 佐藤顕彦, 杉浦邦征, 西崎到, 日比英輝:ハンドレイアップ成形 GFRP 材の引張特性に関する温度依存性, 構造工学論文集, Vol.66A, pp.886-894, 2020. [Hayashi, G., Kitane, Y., Sato, A., Sugiura, K., Nishizaki, I. and Hibi, H. : Investigation about temperature-dependence of tensile properties of hand lay-up molded GFRP material, *Journal of Structural Engineering*, Vol.66A, pp.886-894, 2020.]
- 25) 末益博志：入門複合材料の力学, 2009. [Suemasu, H. :Mechanical of Composite Materials Introduction to Engineering Beginners, 2009.]
- 26) 岩井宏, 植村益次, 林徹：先進複合材料の曲げ試験法における3点,4点曲げ方式の問題点,日本複合材料学会誌, Vol.18, No.2, pp.60-65, 1992. [Iwai, H., Uemura, M. and Hayashi, T. : Issue of 3-point and 4-point modes in flexural testing methods for advanced composite materials, *Journal of the Japan Society for Composite Materials*, Vol.18, Issue 2, pp.60-65, 1992.]
- 27) 原栄一, 横関智弘, 八田博志, 岩堀豊, 石川隆司：3点曲げ試験による積層 CFRP の面外方向引張弾性率,日本複合材料学会誌, Vol.39, No.5, pp.184-192, 2013. [Hara, H., Yokozeki, T., Hatta, H., Iwahori, Y. and Ishikawa, T. : Out-plane tensile modulus of CFRP laminates by 3-point bending test, *Journal of the Japan Society for Composite Materials*, Vol.39, Issue 5, pp.184-192, 2013.]
- 28) 山下慎一郎, 大澤勇, 松尾剛, 張昕, 高橋淳：3点曲げ試験によるCFRTPの縦弾性率および面外せん断弾性率に関する評価,日本複合材料学会誌, Vol.39, No.6, pp.221-230,2013. [Yamashita, S., Ohsawa, I., Matsuo T., Zhang, X. and Takahashi, J. : Evaluation of young's modulus and out-of-plane shear modulus of carbon fiber reinforced thermoplastics by three point bending test, *Journal of the Japan Society for Composite Materials*, Vol.39, Issue 6, pp.221-230, 2013.]

(Received April 19, 2024)
(Accepted December 27, 2024)

EVALUATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF THICK GFRP BY HAND LAY-UP MOLDING

Shogo HIGUCHI, Yosuke YAMAZAKI, Hideki HIBI,
Kunitaro HASHIMOTO and Yukihiko MATSUMOTO

In recent years, there have been many examples of pedestrian bridges using GFRP as the main structural material because of its properties such as high strength, high corrosion resistance, and light weight. However, this material has not been applied to road and rail bridges in Japan. Because these bridges are heavier and have more severe design requirements than footbridges, it is unknown whether the material properties of GFRP can satisfy these requirements. It is also considered that thick FRP members will be required to satisfy the design requirements of the bridges. Based on this background, we tried to verify the forming of 40 mm thick GFRP by the hand layup method and evaluated the mechanical properties of GFRP. As a result, fundamental material properties for structural design were provided.