

厚肉GFRP材の物性値評価に関する基礎検討

濱崎 瑞生¹・山本 梨乃¹・宮阪 裕一¹・日比 英輝²・
橋本 国太郎³・松本 幸大⁴

¹豊橋技術科学大学大学院 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: {hamasaki.mizuki.ay, yamamoto.rino.ya, miyasaka.yuichi.yz} @tut.jp

²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

³正会員 神戸大学大学院 工学研究科市民工学専攻
(〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1)
E-mail: hashimoto@person.kobe-u.ac.jp

⁴正会員 豊橋技術科学大学 エレクトロニクス先端融合研究所
(〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1)
E-mail: matsumoto.yukihiro.lp@tut.jp

現在, FRP を用いた土木構造物の設計事例は年々増えつつある. 特に GFRP 構造物の歩道橋の事例が多数見受けられるが, 道路橋・鉄道橋については国内での事例が無く, 今後は GFRP の耐久性・軽量性を生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異なるため, 弾性係数の小さい GFRP では構造部材の肉厚は歩道橋に用いる場合と比較して大きくなることが予想される. また, 肉厚が数十 mm に達する GFRP はこれまでに应用事例もほとんどなく, その成形精度・機械的性質の評価法についてもデータが不足している. そこで本論文では厚さ 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, Compression tests, Bending tests

1. はじめに

FRP (Fiber Reinforced polymer: 繊維強化樹脂) は高強度かつ優れた耐久性・軽量性といった長所を有しており, 様々な土木用途への適用が検討されてきた. 現在, FRP を用いた既存建築物への補修・補強法についてはこれまでに多くの提案・検討が既にされており広く普及している¹⁾. しかし, FRP を主要構造材料とする適用用途は一部を除いては研究・試行の段階にある. 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, 道路橋・鉄道橋などの道路構造物では検討が行われている. 中でも FRP 歩道橋については, FRP の特徴である厳しい腐食環境に耐え, 長寿命化および維持管理の軽減, 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に期待され沿岸部や山間部では GFRP (Glass FRP: ガラス繊維強化樹脂) 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受けられる⁴⁾. しかし, 道路橋・鉄道橋については国内での事例が無く, 今後は GFRP の耐久性・軽量性を生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 を主要構造材料に用いる場合, その肉厚は歩道橋に使用する場合と比較して大きくなることが予想される. 加えて, 土木構造物に用いられる FRP の基本的な力学特性は示されており設計資料として累畜されつつあるが, 肉厚が数十 mm に達する GFRP はこれまでに应用事例もほとんどなく, その成形精度・機械的性質の評価方法についてもデータが不足している^{5~9)}.

そこで, 本論文では厚さ 40mm の GFRP を成形し, 面内・面外圧縮試験, および, 曲げ試験を実施した結果について報告する. また, 試験結果から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.

2. 厚肉 GFRP の成形方法

本研究では、強化繊維にガラス繊維、マトリックス樹脂に不飽和ポリエステル樹脂を用いた GFRP を対象とする。使用する強化繊維は GFRP で広く用いられている 2 方向平織ガラスクロスを採用した。強化繊維シートの目付量は 815g/m^2 であり、ガラス繊維の比重から計算した厚さは 0.320mm である。表-1 にマトリックス樹脂である不飽和ポリエステル樹脂の材料特性を示す。また、写真-1 に実際の成形の様子を写真-2 に完成後の GFRP の外観をそれぞれ示す。GFRP の成形方法には積層数・成形品のサイズが自由に変更可能であるハンドレイアップ法を採用し、FRP の強度・弾性率に大きく影響を与える繊維含有率 V_f を向上させるため、樹脂含浸後に加圧している。肉厚の目標値は 40mm とし $1000\text{mm} \times 2000\text{mm}$ のガラス繊維シートを 59ply 積層している。本研究で実施した圧縮試験、および、曲げ試験に使用する試験体は、成形した GFRP 板を切断することでそれぞれ製作した。成形後に測定した GFRP の肉厚から計算した繊維含有率 V_f は 46.7% である。

表-1 不飽和ポリエステル樹脂の材料特性

引張弾性係数 (GPa)	ポアソン比
2.77	0.39

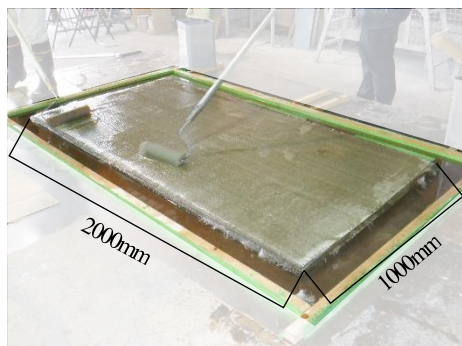


写真-1 成形の様子

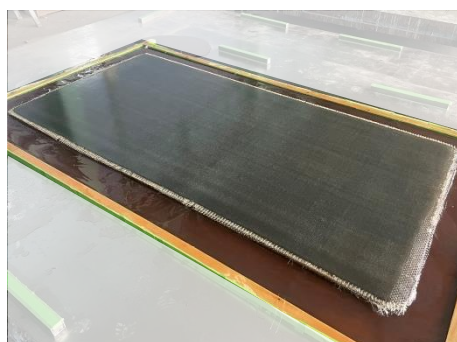


写真-2 完成後の GFRP

3. 圧縮試験

(1) 試験方法

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-1 に試験体の概要図を示す。試験体は $40\text{mm} \times 40\text{mm} \times 40\text{mm}$ 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。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。面内圧縮試験は試験体側面の繊維方向が異なっているが、面外圧縮試験は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) の中心部において軸方向、および、幅方向のひずみを計測した。写真-3 に試験体の設置状況を示す。載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ひずみの拘束の緩和を図っている。試験は万能試験機を用いた静的載荷とし、面内圧縮試験と面外圧縮試験のいずれも 5 体ずつ実施した。

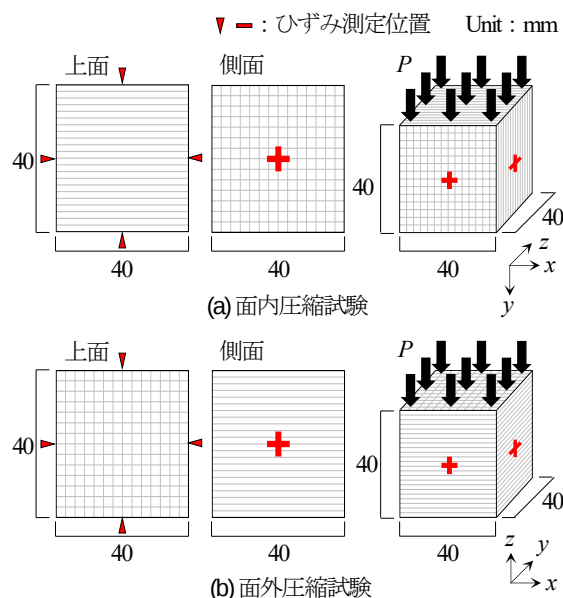


図-1 圧縮試験体概要図

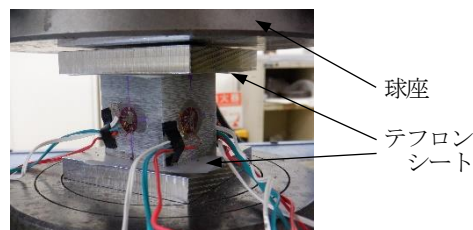


写真-3 試験体の設置状況

(2) 試験結果および考察

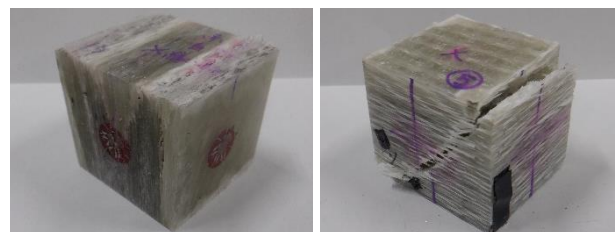
表-3に面内圧縮試験の結果一覧を、表-4に面外圧縮試験の結果一覧をそれぞれ示す。表中にはそれぞれ試験から得られた最大応力、圧縮弾性率、ポアソン比を示している。圧縮弾性率、および、ポアソン比についてはいずれも応力の範囲が 50MPa~150MPa において最小二乗法により算出した。また、それぞれの結果の平均値、および、変動係数 (C.V.) もあわせて示している。

最大圧縮応力に着目すると、面外圧縮試験の最大応力は、面内圧縮試験の最大応力に比べて 2.0 倍程度高いことがわかる。また、面内・面外圧縮試験の圧縮弾性率、および、面外圧縮試験のポアソン比は、側面 (4 面) で測定した軸方向ひずみの平均値から算出したが、面外圧縮試験から得られるポアソン比は xy 平面の幅ひずみの平均値から算出するポアソン比 (yz) と yz 平面の幅方向ひずみの平均値から算出するポアソン比 (xy) の 2 種類がある。面内方向の圧縮弾性率は面外方向の圧縮弾性率に比べ、約 2.6 倍大きい。これは面外方向では強化繊維に対して直交方向に力を与えているためである。同様の理由で、面外方向のポアソン比 (yz) は面内方向のポアソン比 (xy, xz, zy) に比べて大きいことがわかる。

写真-4(a)に面内圧縮試験の破壊形態を、写真-4(b)に面外圧縮試験の破壊形態の一例をそれぞれ示す。面内圧縮試験では繊維方向において白化し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ことがうかがえる。他方、面外圧縮試験については 45°方向に割裂が発生していることから、せん断破壊が生じていることがうかがえる。なお、面内圧縮試験ではすべての試験体で座屈による層間剥離が生じ、面外圧縮試験ではすべての試験体でせん断破壊が生じたことを確認した。

図-2(a),(b)に面内圧縮試験から得られた応力-ひずみ関係を図-2(c)に面外圧縮試験から得られた応力-ひずみ関係をそれぞれ示す。面内圧縮試験では試験体側面の繊維方向が異なっているため、 xy 平面、 yz 平面から得られるひずみをそれぞれ分けて示している。面内圧縮試験において xy 平面から得られた軸方向ひずみ、幅方向ひずみ、

および、 yz 平面から得られた幅方向ひずみの挙動はそれぞれの試験体で大きくばらついていることがわかる。対して、面外圧縮試験の軸方向ひずみ、および、幅方向ひずみのいずれも 200MPa 近傍から損傷に起因すると思われるひずみの減少挙動が複数回生じているが、それ以前のばらつきは小さい。そのため、圧縮弾性率、および、ポアソン比の変動係数は面内圧縮試験では圧縮弾性率のばらつきは比較的小さいが、ポアソン比のばらつきは非常に大きい。対して、面外圧縮試験では圧縮弾性率、および、ポアソン比のばらつきが小さいことがわかる。



(a) 面内圧縮試験 (b) 面外圧縮試験

写真-4 圧縮試験の破壊形態

表-3 面内圧縮試験の結果一覧

No.	最大圧縮応力 (MPa)	圧縮弾性率 (GPa)	ポアソン比	
			xy	yz
1	258.4	27.11	0.17	0.50
2	246.4	26.37	0.09	0.44
3	246.8	30.70	0.13	0.56
4	214.3	28.10	0.23	0.77
5	218.9	25.72	0.19	0.60
平均値	237.0	27.60	0.16	0.57
C.V.(%)	8.13	7.06	32.56	21.72

表-4 面外圧縮試験の結果一覧

No.	最大圧縮応力 (MPa)	圧縮弾性率 (GPa)	ポアソン比
			xz, zy
1	453.0	9.90	0.21
2	465.4	10.55	0.21
3	462.1	10.77	0.22
4	476.0	11.34	0.20
5	473.2	11.13	0.20
平均値	465.9	10.74	0.21
C.V.(%)	1.97	5.19	4.28

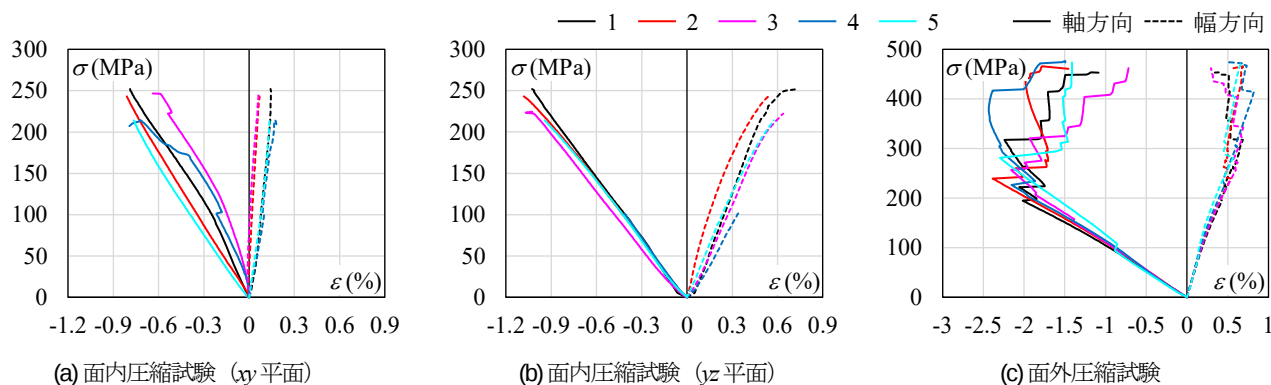


図-2 応力-ひずみ関係

4. 曲げ試験

(1) 試験方法

厚肉 GFRP の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-3にそれぞれの試験体の概要図を示す。試験体の寸法は JIS K7017¹⁰⁾ に定められている試験体寸法の比率から 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、3点曲げ試験と 4点曲げ試験のいずれも試験体長は 1200mm であるが、支点間距離はそれぞれ 3点曲げ試験で 800mm、4点曲げ試験で 900mm である。変位、および、ひずみの測定位置は 3点曲げ試験、および、4点曲げ試験のいずれも同じ位置とし、変位の測定位置については試験区間内において部材中央から 150mm 間隔に合計 5カ所で変位の測定を行い、ひずみの測定位置については中央から ±40mm、±200mm の位置で行う。中央から ±40mm の位置では板厚方向に中立軸から ±10mm、±20mm の位置でひずみの測定を行う。また、中央から ±200mm の位置では中立軸から ±20mm の位置に加えて、中立軸位置での ±45° 方向のひずみの測定を行う。写真-5(a)に 3点曲げ試験、写真-5(b)に 4点曲げ試験の試験体の設置状況をそれぞれ示す。試験は圧縮試験機を用いた静的载荷とし、各試験で 3体ずつ実施した。なお、ひずみの測定については各試験で 2体ずつ行った。

(2) 試験結果および考察

表-5に 3点曲げ試験の結果一覧を、表-6に 4点曲げ試験の結果一覧をそれぞれ示す。すべ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。表中には試験から得られた最大荷重、最大荷重から算出した最大曲げ応力、曲げ弾性率、面外方向のせん断弾性率をそれぞれ示している。また、それぞれの結果の平均値、および、変動係数 (C.V.) もあわせて示している。

曲げ弾性率は試験体中央の表面ひずみの範囲が 0.05% ~ 0.25% において最小二乗法により算出した。試験体中央の表面ひずみ ε_f については式(1)¹⁰⁾ から算出した。

$$\varepsilon_f = \frac{6\delta_c h}{L^2} \quad (3 \text{ 点曲げ試験})$$

$$\varepsilon_f = \frac{4.7\delta_c h}{L^2} \quad (4 \text{ 点曲げ試験}) \quad (1)$$

ここで、 δ_c : 中央のたわみ、 h : 板厚、 L : 支点間距離である。



(a) 3点曲げ試験

(b) 4点曲げ試験

写真-5 試験体の設置状況

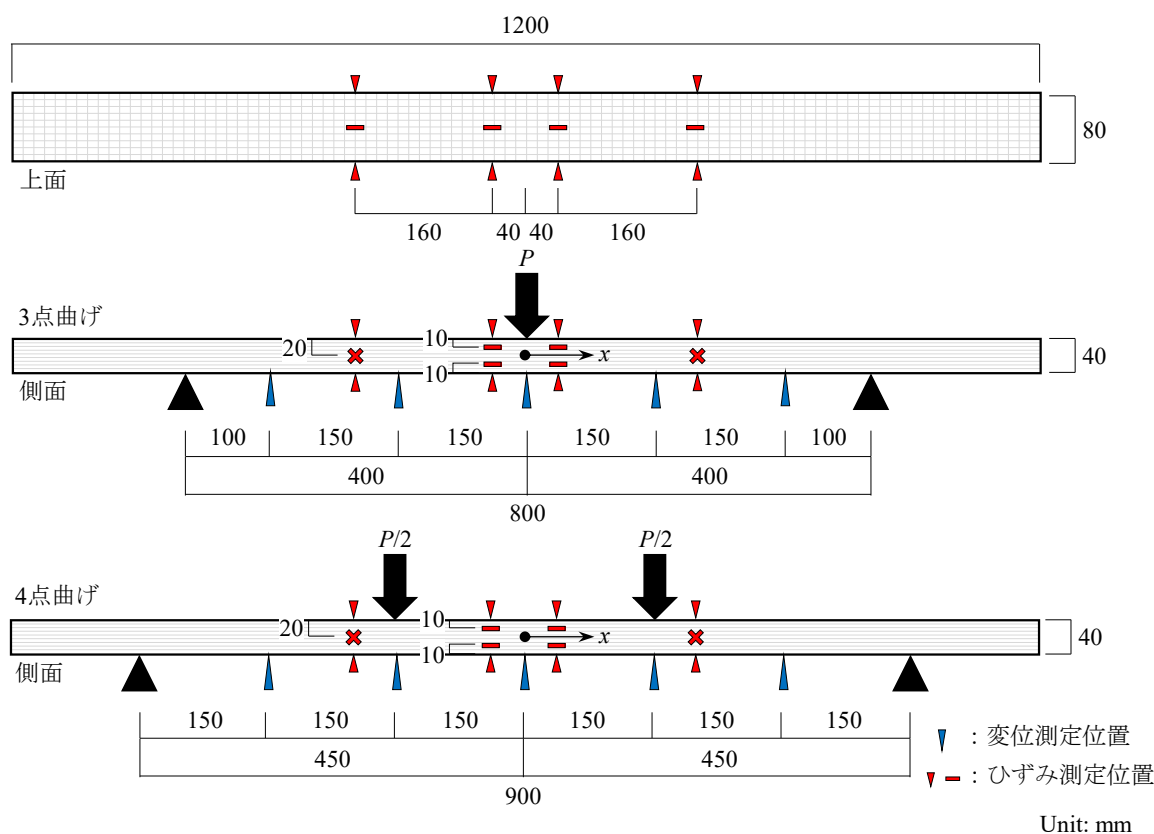


図-3 曲げ試験体概要図

表-5 3点曲げ試験の結果一覧

No.	最大荷重 (kN)	最大曲げ応力 (MPa)	曲げ弾性率 (GPa)	せん断弾性率 (GPa)	
				-200mm	200mm
1	31.9	298.1	25.1	1.54	1.62
2	33.8	308.9	23.6	1.46	1.53
3	32.3	290.5	24.4	-	-
平均値	32.6	299.2	24.4	1.54	
C.V.(%)	3.0	3.1	3.1	4.2	

表-6 4点曲げ試験の結果一覧

No.	最大荷重 (kN)	最大曲げ応力 (MPa)	曲げ弾性率 (GPa)	せん断弾性率 (GPa)	
				-200mm	200mm
1	39.8	273.7	25.6	1.51	1.49
2	40.9	278.0	23.2	1.53	1.81
3	41.3	283.8	24.8	-	-
平均値	40.6	278.5	24.5	1.58	
C.V.(%)	1.9	1.8	4.8	9.5	

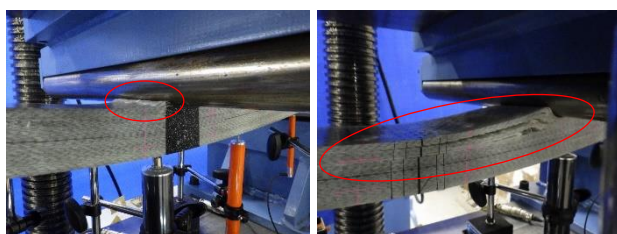


写真-6 最大荷重時の様子

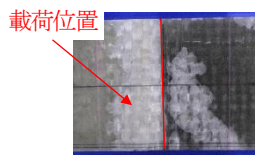
面外方向のせん断弾性率は中心から±200mm の位置で測定した±45°方向のひずみから算出したせん断ひずみと測定位置に作用するせん断力から求めた。なお、せん断弾性率はせん断ひずみの範囲が0.05%~0.25%において最小二乗法により算出した。面外方向のせん断弾性率の算出はひずみを測定した試験体のみ行った。

最大曲げ応力を比較すると、3点曲げ試験の最大曲げ応力は4点曲げ試験に比べて約1.1倍大きい、この傾向は文献11)においても確認できる。曲げ弾性率については3点曲げ試験と4点曲げ試験でおよそ一致している。また、曲げ試験から得られた曲げ弾性率を面内圧縮試験から得られた圧縮弾性率と比較すると、曲げ弾性率は圧縮弾性率に比べて1割程度小さいことがわかる。

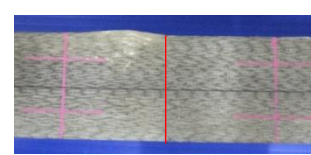
4点曲げ試験から得られたせん断弾性率は、3点曲げ試験から得られたせん断弾性率に比べて、ばらつきは大きい、両者のせん断弾性率はおよそ一致している。また、3点曲げ試験と4点曲げ試験のせん断力の分布からせん断変形は3点曲げ試験の方が大きくなると考えられるが、試験体中央の変形から算出した曲げ弾性率に違いがみられないことから、JISK7017に定められている板厚とスパンの割合を採用した曲げ試験では3点曲げ試験と4点曲げ試験のせん断変形の影響については無視して曲げ弾性率の評価が可能であると考えられる。



(a) 試験体上面全体



(b) 荷点付近 (上面)

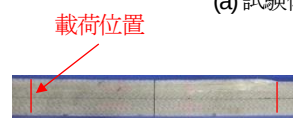


(c) 荷点拡大 (側面)

写真-7 3点曲げ試験の破壊形態



(a) 試験体上面全体



(b) 荷点付近 (側面)



(c) 荷点拡大 右側 (側面)

写真-8 4点曲げ試験の破壊形態

写真-6 (a), (b)に3点曲げ試験と4点曲げ試験の最大荷重時の様子の一例をそれぞれ示す。3点曲げ試験では圧子の左側で圧縮破壊が生じ盛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の付近で大きく面外に変形していること、圧子間にわたって層間破壊が生じていることがわかる。写真-7に3点曲げ試験の破壊形態を、写真-8に4点曲げ試験の破壊形態をそれぞれ示す。試験体上面の様子から3点曲げ試験では荷点位置近傍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点曲げ試験では圧子間に広く白化が生じていることから圧子間にわたり層間破壊が生じていることがうかがえる。3点曲げ試験と4点曲げ試験のいずれもすべての試験体で同様の破壊形態であることを確認した。

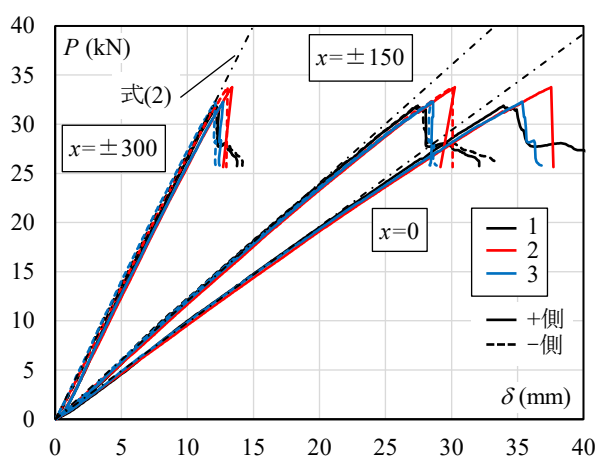
図-4 (a), (b)に曲げ試験から得られた荷重-変位関係をそれぞれ示す。また、図中にはベルヌーイ・オイラー梁理論により算出した変位の計算値（3点曲げ試験：式(2)、4点曲げ試験：式(3)）をそれぞれの位置で示している。なお、変位は試験体の対称性を考慮し半分のみ求めた。

$$\delta = \frac{PL^3}{48EI} \left(4 \left(\frac{x}{L} \right)^3 - 6 \left(\frac{x}{L} \right)^2 + 1 \right) : (0 \leq x < 400) \quad (2)$$

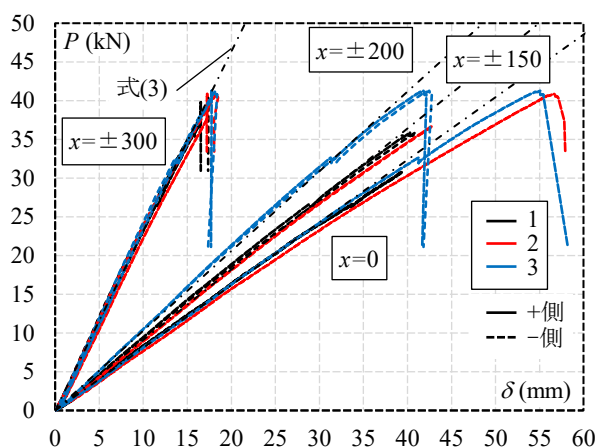
$$\delta = \frac{PL^3}{1296EI} \left(-108 \left(\frac{x}{L} \right)^2 + 23 \right) : (0 \leq x < 150)$$

$$\delta = \frac{PL^3}{288EI} \left(-24 \left(\frac{x}{L} \right)^3 - 36 \left(\frac{x}{L} \right)^2 + 2 \left(\frac{x}{L} \right) + 5 \right) : (150 \leq x < 450) \quad (3)$$

ここで、 P ：荷重、 L ：支点間距離、 E ：弾性率、 I ：断面二次モーメント、 x ：中心からの距離である。弾性率 E は曲げ試験の結果から得られた値を用いた。4点曲げ試験の No.3 については $x = \pm 150\text{mm}$ の位置ではなく $x = \pm 200\text{mm}$ の位置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。4点曲げ試験の No.1 の $x = 0\text{mm}$ 、および、 $\pm 150\text{mm}$ 、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。



(a) 3点曲げ試験



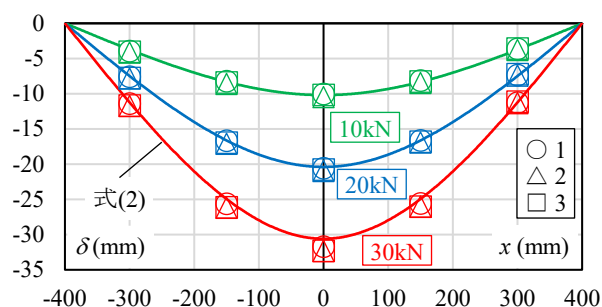
(b) 4点曲げ試験

図-4 荷重-変位関係

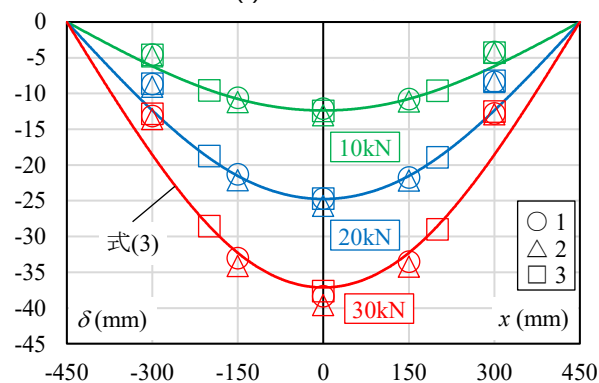
3点曲げ試験と4点曲げ試験のいずれもすべての変位測定位置において試験から得られた荷重-変位関係は計算値とおおむね一致していることがわかる。また、3点曲げ試験と4点曲げ試験のいずれも荷重が小さい範囲においては荷重-変位関係に線形関係が確認できるが、 $20\text{kN} \sim 25\text{kN}$ 付近以降は計算値に比べて変位が大きくなっており非線形挙動を示していることがわかる。

図-5 (a), (b)に式(2)、式(3)から算出した 10kN 、 20kN 、 30kN 時点の x 方向の変位分布をそれぞれ示している。また、曲げ試験において荷重が 10kN 、 20kN 、 30kN 時点の変位をそれぞれプロットしている。3点曲げ試験と4点曲げ試験のいずれもすべての試験体において、試験から得られた変位は計算値とおおむね一致している。しかし、3点曲げ試験と4点曲げ試験のいずれも 30kN 時点においてのみ試験での変位は計算値に比べわずかに大きい傾向がみられる。これについては、前述したとおり荷重が $20\text{kN} \sim 25\text{kN}$ 付近以降は計算値に比べて変位が大きくなっているためである。また、図-4 (a)から試験体中央 ($x = 0$) では、特に初期剛性に比べて剛性が低下し変位が大きくなっていることがわかる。

3点曲げ試験と4点曲げ試験のいずれもすべての試験体でせん断変形を考慮していないベルヌーイ・オイラー梁理論によって算出した計算値と実験から得られた変形はおおむね一致していることから、今回実施した曲げ試験は、異方性が強くせん断変形の影響を受けやすいFRP材料に対して曲げ特性を評価できているといえる。



(a) 3点曲げ試験



(b) 4点曲げ試験

図-5 長さ方向の変位分布

図-6 (a), (b)に曲げ試験から得られた上・下面 ($x=\pm 40\text{mm}$, ± 200) の荷重-ひずみ関係をそれぞれ示している。図中にはひずみの計算値 (3 点曲げ試験: 式(4), 4 点曲げ試験: 式(5)) をそれぞれの位置で示している。

$$\varepsilon = \frac{P}{2EZ} x \quad (4)$$

$$\varepsilon = \frac{P}{2EZ} x : (-450 \leq x < -150, 150 \leq x < 450) \quad (5)$$

$$\varepsilon = \frac{PL}{6EZ} : (-150 \leq x < 150)$$

ここで ε : 上・下面の表面ひずみ, Z は断面係数である。

3 点曲げ試験, および, 4 点曲げ試験から得られた荷重-ひずみ関係は計算値とおおむね一致していることがわかる。しかし, 試験機の圧子が直接接触している上面 (圧縮側) のひずみについては 3 点曲げ試験, 4 点曲げ試験のいずれもばらついている傾向が確認できる。

図-7 にせん断応力-せん断ひずみ関係を示す。平均せん断応力、せん断ひずみはそれぞれ次式から算出した。

$$\bar{\tau} = \frac{Q}{A} = \frac{P}{2A} \quad (6)$$

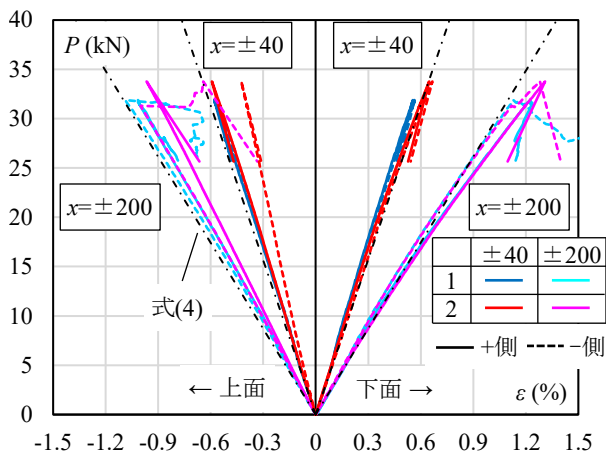
$$\gamma = |\varepsilon_{+45^\circ}| + |\varepsilon_{-45^\circ}| \quad (7)$$

ここで, Q : せん断力 ($P/2$), A : 断面積, $\varepsilon_{\pm 45^\circ}$: それぞれ 45° 方向のひずみである。

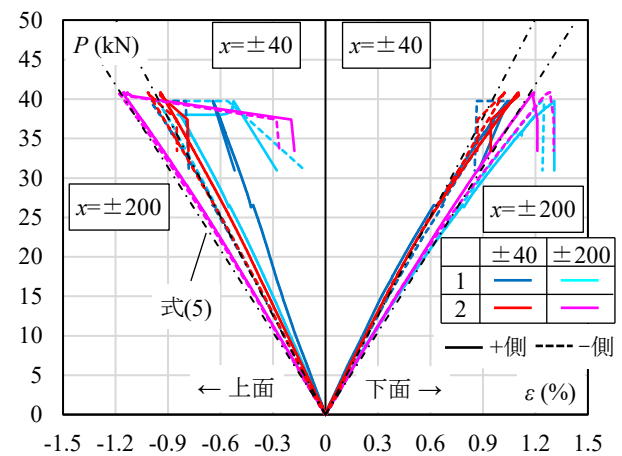
3 点曲げ試験, および, 4 点曲げ試験から得られた平均せん断応力-せん断ひずみ関係は, 4 点曲げ試験-2 の+側のみばらついていることが確認できるが, その他についてはおおむね一致している。これは, 単純梁のせん断力分布について考えると 3 点曲げ試験と 4 点曲げ試験のいずれも $x=\pm 200\text{mm}$ の位置に作用するせん断力は等しいため, せん断ひずみについても等しくなるためである。

図-8 (a), (b) に曲げ試験において $x=\pm 40\text{mm}$ の位置から得られた 10kN, 20kN, 30kN の時点の板厚方向のひずみ分布をそれぞれ示している。図中には 10kN, 20kN, 30kN の時点のひずみの計算値 (3 点曲げ試験: 式(4), 4 点曲げ試験: 式(5)) を合わせて示している。

3 点曲げ試験, および, 4 点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, 上側表面 ($y=20\text{mm}$) のひずみについては, 3 点曲げ試験と 4 点曲げ試験の実験から得られたひずみは計算値に比べて小さくなる傾向が確認できる。また, この傾向は荷重が大きくなるにつれて高まることがうかがえる。



(a) 3 点曲げ試験



(b) 4 点曲げ試験

図-6 荷重-ひずみ関係

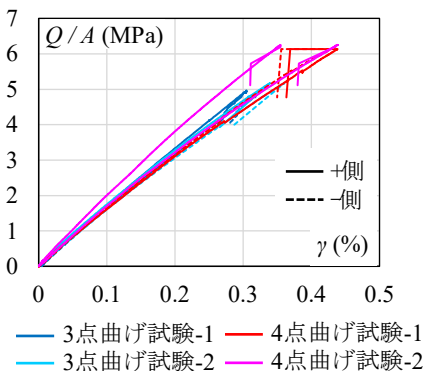
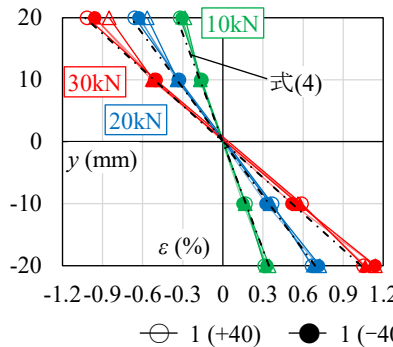
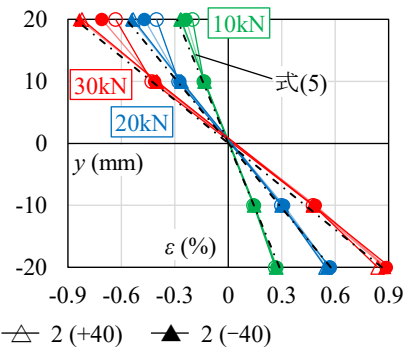


図-8 せん断応力-せん断ひずみ関係



(a) 3 点曲げ試験



(b) 4 点曲げ試験

図-9 板厚方向のひずみ分布

5. おわりに

本研究では、40mm の GFRP を成形し、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^{12,13)}といわれている面外方向の弾性率、および、面外方向のせん断弾性率について示した。

今後は、引張試験、および、せん断試験を実施し、設計に必要な基礎データを揃える予定である。なお、試験データについては、多くの実務者・研究者が設計・分析に使用できるようオープンデータとして、公開する予定である。

参考文献

- 1) 土木学会・複合構造委員会：複合構造レポート 09 FRP 接着による構造物の補修・補強指針（案），2018
- 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
- 3) 久保圭吾：FRP 合成床版，コンクリート工学，第 52 巻 第 1 号，pp.108-114, 2014
- 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
- 5) 土木学会・複合構造委員会：2014 年制定・複合構造標準示方書，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
- 7) 林巖，鈴木康夫，杉浦邦征，西崎到，北根安雄：土木構造物用 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
- 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 A，Vol.68A, pp.836-849, 2022.3
- 9) 土木学会・複合構造委員会：複合構造レポート 11 土木構造物用 FRP 部材の設計基礎データ，2014
- 10) JIS K7017：繊維強化プラスチック-曲げ特性の求め方，日本規格協会，1999
- 11) 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
- 12) 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
- 13) 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

(Received August 26, 2022)

FUNDAMENTAL STUDY ON MECHANICAL PROPERTIES OF THICK GFRP PLATE

Mizuki HAMASAKI, Rino YAMAMOTO, Yuichi MIYASAKA, Hideki HIBI,
Kunitaro HASHIMOTO and Yikihiro MATSUMOTO

Recently, the use of FRP materials is gradually increased in the civil engineering field. Several FRP footbridges have been designed and serviced. but, until now, FRP materials haven't been applied to the road and railway bridges in Japan. Because of the heavy load and severe requirement for design, and it is unknown whether FRP can satisfy the requirement by its material properties. Moreover, it is thought that thick FRP members will be required to satisfy the design requirement for the bridges. Based on these backgrounds, we demonstrated the molding of 40mm thick GFRP plates by hand lay-up method and investigated the mechanical properties of the GFRP, especially thickness-directional properties are focused. Results provide a fundamental material performance for the structural design.