

GFRP 材のせん断挙動に関する実験的検討

新居 大知¹・橋本 国太郎²・中村 一史³

¹ 学生会員 神戸大学大学院博士前期課程 工学研究科市民工学専攻(〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

E-mail: 202t120t@stu.kobe-u.ac.jp

² 正会員 神戸大学大学院准教授 工学研究科市民工学専攻(〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

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

³ 正会員 東京都立大学大学院准教授 都市環境科学研究科(〒192-0937 東京都八王子市南大沢 1-1)

E-mail: hnaka@tmu.ac.jp

ガラス繊維強化プラスチックである GFRP は、耐食性が高く、軽量かつ高強度、また他の FRP 材料に比べ安価という特性を活かし、水門や歩道橋などのインフラ構造物へ適用され始めている。しかし、FRP 材料のせん断挙動に関しては非線形性を有するなど、未解明の部分が多い。そこで、本研究では、GFRP を対象としせん断挙動を解明するために実験を実施した。

本研究では、一方向材と二方向材の両方の部材から試験片を切り出し JIS K 7019 および ASTM D 5379 に準拠した試験を行い、それぞれの結果を比較し、GFRP 材のせん断挙動の考察を行った。JIS に準拠した試験では、一方向材に比べ、二方向材の方がせん断強度は大きく評価された。ASTM に準拠した試験では、せん断強度と変形能は載荷方向に対する繊維の配向に影響されることが分かった。今後は、部材試験を行い、FRP 部材のせん断挙動を解明する。

Key Words: GFRP, shear strength, shear deformation

1. はじめに

FRPとは、F: fiber (繊維), R: reinforced (強化), P: polymer (ポリマー) の略語で「繊維強化プラスチック」のことを指し、繊維で強化されたプラスチック材料である。FRPは、高強度・高剛性の繊維と、比較的軽量のプラスチック(母材、マトリックス(matrix)と呼ばれる)を複合化することで、軽くて高強度・高剛性な部材となり、基本的にはプラスチック材料であるため、錆びにくく腐りづらい特性を持つ。一方で、FRPの短所としては、プラスチック材料であるため熱に弱いことや紫外線劣化などが挙げられる。また、繊維方向には強いが、繊維直交方向はプラスチック材料と同程度の強度や剛性を示し、強度や剛性に異方性がある。さらに、材料内に界面を持つことや複数の材料で構成されるため、破壊のプロセスが複雑になりやすく、損傷の検知が困難な問題がある¹⁾。

近年、FRPはその特徴を活かして、水門、歩道橋²⁾や耐震補強³⁾、コンクリート補強筋⁴⁾などに使われており、社会基盤構造物への適用事例が多くなってきている。

既往の研究からFRP部材は引張力を受けると、引張強度は大きい強度を示すものの、変形能力はあまりなく脆

性的に破断することがわかっている。しかし、過去の研究成果⁵⁾より、せん断力を受けた場合、脆性的な破断とはならず、鋼材の塑性挙動のような変形を示し、その変形能に関しても未解明の部分が多い。また、せん断挙動に関しては、繊維を1方向に配向した1方向材での結果がいくつかあるものの、2方向に配向した2方向材のせん断挙動はあまり詳細に検討されていない。

そこで本研究では、ガラス繊維を用いたGFRPの1方向材および2方向材を対象に、それら部材のせん断強度や変形性能などのせん断挙動の解明を目的に実験的な検討を行った。

本研究では引抜成形された1方向GFRP溝形材と、ハンドレイアップ成形された2方向GFRP溝形材から切り出したクーボン試験片を用いてJIS規格やASTM規格に準拠した種々のせん断試験を行い、その実験結果からGFRP部材のせん断強度やせん断変形能などのせん断挙動を実験的に検討する。

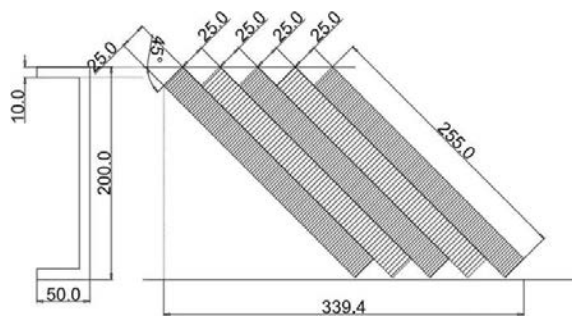


図-1 試験片の採取位置(1方向材)

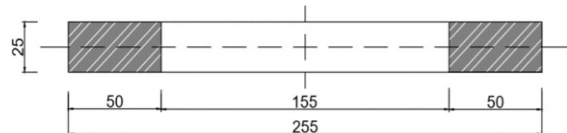


図-3 試験片図

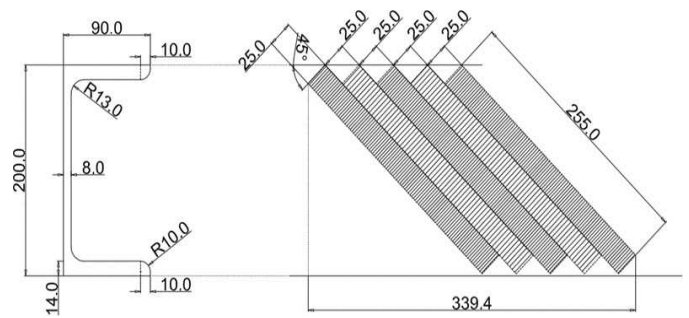


図-2 試験片の採取位置(2方向材)



図-4 45°方向引張試験のセットアップ

2. 45°方向引張試験

(1) 実験方法

ガラス繊維および不飽和ポリエステル樹脂で製作されたGFRP溝形材のせん断特性を評価するために、JIS K 7019⁶⁾に準拠したクーポン試験を実施し、検討を行った。本論文では、この試験を45°方向引張試験とよぶ。

図-1および図-2のように、溝形材ウェブの45°方向から切り出された5体の試験片を用いて実験を行った。図-3に、試験片図を示す。つかみ部での破壊を防ぐ目的として、厚さ2mm、長さ5mmのアルミ板を試験体の表裏に接着して、補強した。評価項目は、荷重、変位、およびひずみであり、データロガーにより計測した。試験機には、島津製作所製万能試験機（容量：1000kN）を使用した。ひずみの計測では、試験片中央の表裏に2軸ゲージを試験片の長手方向に対して0°、90°方向に設置した。図-4に45°方向引張試験のセットアップの状況を示す。

45°方向引張試験では、面内せん断応力 τ_{12} 、面内せん断強度 τ_{12M} 、面内せん断ひずみ γ_{12} 、せん断弾性係数 G_{12} は、以下の式(1)~(4)⁵⁾より算定した。

$$\tau_{12} = \frac{F}{2bh} \quad (1)$$

$$\gamma_{12} = \epsilon_x - \epsilon_y \quad (2)$$

$$\tau_{12M} = \frac{F_m}{2bh} \quad (3)$$

$$G_{12} = \frac{\tau_{12} - \tau_{12}'}{\gamma_{12} - \gamma_{12}'} \quad (4)$$

ここに、

F : 荷重 (N)

b : 板幅 (mm)
 h : 板厚 (mm)
 ϵ_x : 軸方向ひずみ
 ϵ_y : 軸直交方向ひずみ
 F_m : 最大荷重
 γ_{12}' : $1,000 \times 10^{-6}$
 γ_{12}'' : $5,000 \times 10^{-6}$

(2) 45°方向引張試験結果

図-5にせん断応力とせん断ひずみの関係を、図-6にせん断応力と試験片変位の関係を示す。なお、本論文では試験片に変位計を設置できず、試験片そのものの変位を測定することができなかった。よって、初期の弾性域を補正した試験機ストロークの値を試験片の変位と仮定する。表-1に45°方向引張試験結果をまとめる。

表-1の各値はそれぞれの試験片の平均値を示しており、()内の値は変動係数を示している。また、応力-変位グラフから読み取った弾性伸び部分の傾き、弾性伸び量、塑性伸び量および塑性伸び量を弾性伸び量で除した値(δ_P/δ_E 、 δ_P :塑性伸び量、 δ_E :弾性伸び量)を変形能の評価項目として、表-2に示す。なお、図-6に示す1方向材の試験片のうち1体がつかみ部ですべりが生じ変位が大きく伸びたので、変形能の評価項目には含めていない。

表-1および図-5より、せん断強度は1方向材より2方向材の方が大きく、ひずみも2方向材の方が大きい結果となった。ここで、1方向材と2方向材のせん断強度は等しくなると仮定して、 t 分布を用いて有意水準5%で検定すると、仮説は棄却された。このことから、1方向材より2方向材の方がせん断力を受けた時、高い強度を示すことが分かる。その要因としては、1方向材は繊維が

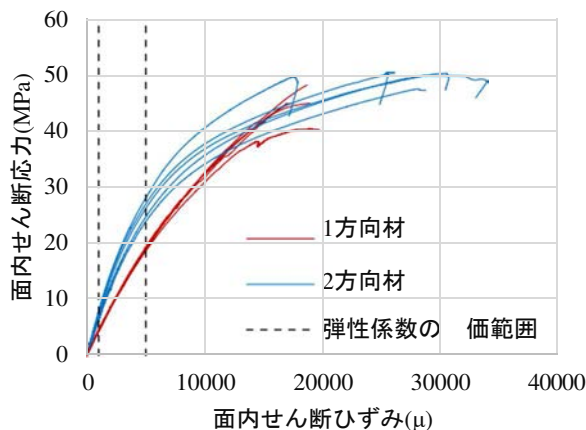


図-5 せん断応力とせん断ひずみの関係

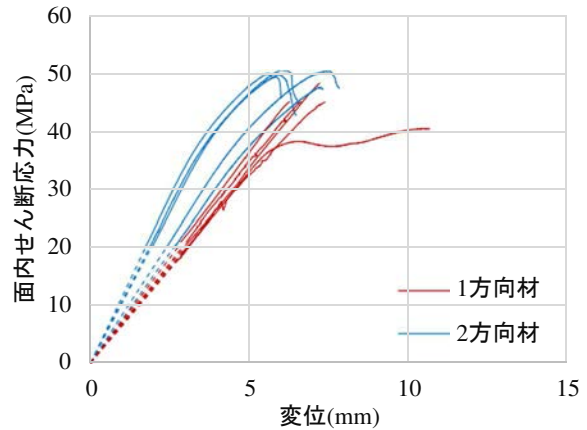


図-6 せん断応力と変位の関係

表-1 45° 方向引張試験

	荷重 (kN)	せん断 強度 (MPa)	せん断 弾性係 数(GPa)	ひずみ (μ)	変位 (mm)
1 方向	21.49 (0.056)	44.78 (0.056)	3.66 (0.018)	18198 (0.047)	7.62 (0.206)
2 方向	19.07 (0.021)	49.66 (0.021)	4.73 (0.048)	26574 (0.19)	6.48 (0.12)

表-2 変形能の評価項目

	弾性傾き (kN/mm)	弾性伸 び: δ_E (mm)	塑性伸 び: δ_P (mm)	δ_P/δ_E
1 方向	6.87 (0.043)	6.61 (0.064)	0.25 (0.10)	0.038 (0.073)
2 方向	9.78 (0.15)	3.91 (0.18)	2.57 (0.072)	0.67 (0.17)

部材軸方向のみに入っているのに対し、2 方向材は部材軸方向および部材軸直角方向に入っており、内部で荷重を受け持つ繊維がより多く複合しているため、強度が高くなると考えられる。

図-6 より、45° 方向に繊維が配向された試験片が引張力を受けた時の引張方向の全体の伸びは、1 方向材と2 方向材を比較しても大きな差はないことが読み取れる。なお、1 方向材で大きく伸びている試験体は、つかみ部ですべりが発生したものであり、表の変位の平均値には加えていない。ここで、4 体の 1 方向材の試験片と、5 体の 2 方向材の試験片の変位は等しくすると仮定して、 t 分布を用いて有意水準 5% で検定すると、仮説は棄却されなかった。

一方で、表-2 より、1 方向材は塑性伸びが非常に小さく、弾性限界と破断点がほとんど一致していることが分かるが、2 方向材は塑性伸びが大きいことが分かる。こ

のことから、1 方向材と 2 方向材を比較すると、その変形能には差があると言える。この要因としては、2 方向材の繊維の配向の複雑さが挙げられる。2 方向材の試験片は、同じ载荷速度で载荷を続けた場合、最後まで破断しなかった。この結果から考えて、2 方向材の方が繊維は複雑に配向しているため、単純な配向の 1 方向材に比べて、せん断強度が大きくなると考えられる。1 方向材はすぐに破断に至るため、弾性限界と破断点がほとんど一致するが、より高い強度を示す 2 方向材は、塑性状態での伸びが大きくなると考えられる。

3. V ノッチビーム法試験

(1) 実験方法

GFRP 溝形材のせん断特性を評価するために、ASTM D 5379⁷⁾に準拠したクーポン試験を実施し検討を行った。本論文では、この試験を V ノッチビーム法試験とよぶ。

図-7～図-10 のように、試験片は 45° 方向引張試験と同一材料の溝形材のウェブの 0° 方向（繊維方向）および 90° 方向（繊維直交方向）から 5 体ずつ採取して、比較検討を行った。図-11 に、V ノッチビーム法試験における試験片図を示す。試験片には、90° の V ノッチが加工されており、ノッチ部の先端部には、 $r=1.3\text{mm}$ のフィレットが施されている。図-12 に、V ノッチビーム法試験のセットアップを示す。本試験は、試験片の中央にせん断力が作用するような治具であり、変位制御で圧縮力を载荷した。試験機には、島津製作所製万能試験機（容量：100kN）を使用した。荷重、変位、およびひずみの計測方法や载荷速度は、2 章と同一とした。ひずみの計測では、試験片中央において表裏に 2 軸ゲージを $\pm 45^\circ$ 方向に設置した。

V ノッチビーム法試験では、せん断強度 F_u 、面内せん

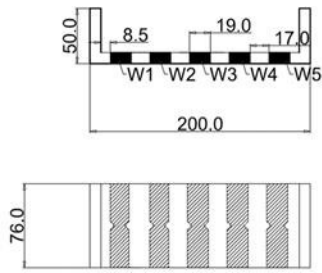


図-7 0° 方向1 方向材試験片採取位置

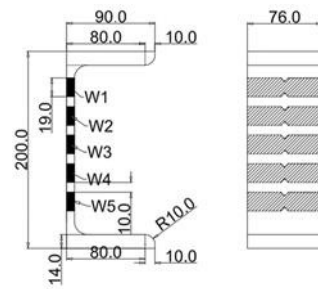


図-8 0° 方向2 方向材試験片採取位置

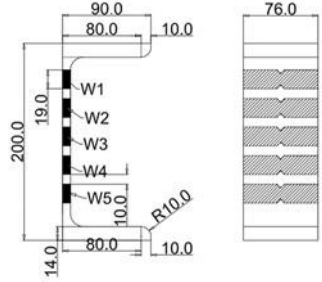


図-9 90° 方向1 方向材試験片採取位置

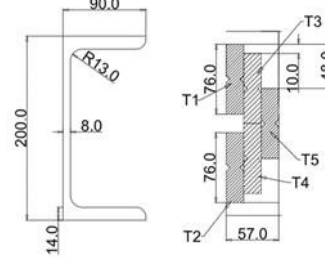


図-10 90° 方向2 方向材試験片採取位置

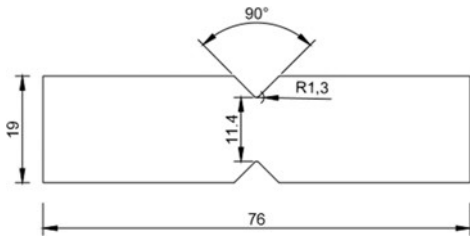


図-11 試験片図



図-12 Vノッチビーム法試験のセットアップ

断応力 τ_i 、面内せん断ひずみ γ_i 、せん断弾性係数 G_{xy} は、以下の式(5)~(8)⁵⁾より算定した。

$$F_u = \frac{P_u}{A} \quad (5)$$

$$\tau_i = \frac{P_i}{A} \quad (6)$$

$$\gamma_i = |\epsilon_{+45}| + |\epsilon_{-45}| \quad (7)$$

$$G_{12} = \frac{\tau_{12}'' - \tau_{12}'}{\gamma_{12}'' - \gamma_{12}'} \quad (8)$$

ここに、

- F_u : せん断強度 (N/mm²)
- P_u : 最大荷重 (N)
- A : ノッチ部の断面積 (mm²)
- τ_i : せん断応力 (N/mm²)
- P_i : 载荷荷重 (N)
- ϵ_{+45} : +45° 方向ひずみ
- ϵ_{-45} : -45° 方向ひずみ
- γ_{12}' : $1,500 \times 10^{-6}$
- γ_{12}'' : $5,500 \times 10^{-6}$
- τ_{12}' : γ_{12}' のときのせん断応力 (N/mm²)
- τ_{12}'' : γ_{12}'' のときのせん断応力 (N/mm²)

(2) Vノッチビーム法試験結果

a) 1方向材

図-13 に 1 方向材のせん断応力とせん断ひずみの関係を、図-14 に 1 方向材のせん断応力と試験片変位の関係を示す。また、表-3 に 1 方向材のVノッチビーム法試験結果を示す。表-3 の各値はそれぞれの試験片の平均値を示しており、() 内の値は変動係数を示している。また、応力-変位グラフから読み取った弾性伸び部分の傾き、弾性伸び量、塑性伸び量および塑性伸び量を弾性伸び量で除した値 (δ_P/δ_E , δ_P :塑性伸び量, δ_E :弾性伸び量) を 変形能の評価項目として、表-4 に示す。

表-3 および図-13 より、せん断強度、せん断弾性係数ともに 0° 方向の方が大きく評価された。これは、0° 方向の試験片は、繊維がせん断力の载荷方向に対して直角に入っているため、繊維が载荷方向に対して平行に入っている 90° 方向に比べてせん断強度が大きくなったと考えられる。

表-4および図-14より、0° 方向と90° 方向で弾性伸び量に大きな差はないが、塑性伸び量にかなり大きな差が見られ、0° 方向が大きな値を示している。このことから、せん断力の载荷方向に対して平行に繊維が入って

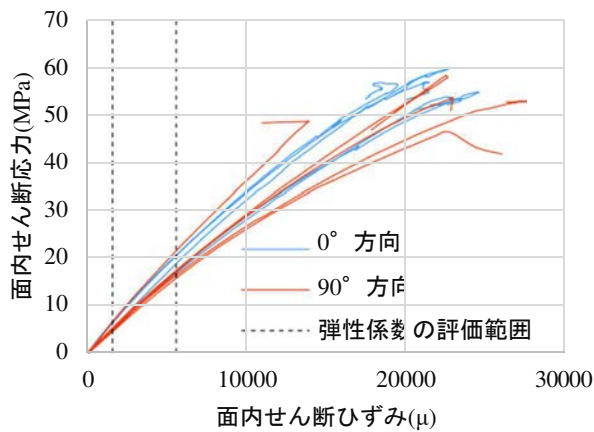


図-13 1方向材のせん断応力とせん断ひずみの関係

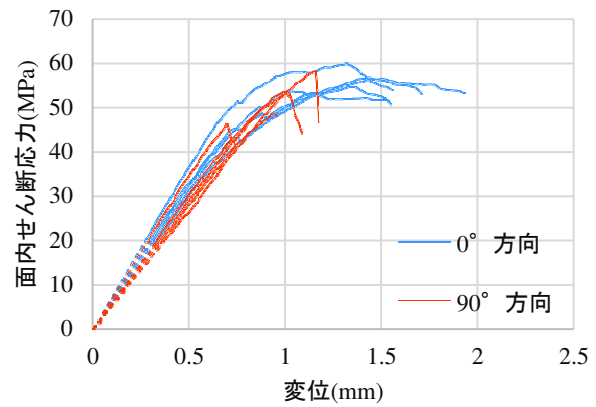


図-14 1方向材のせん断応力と変位の関係

表-3 1方向材のVノッチビーム法試験結果

	荷重 (kN)	せん断 強度 (MPa)	せん断 弾性係 数(GPa)	ひずみ (μ)	変位 (mm)
0°	6.43 (0.039)	56.43 (0.039)	3.33 (0.074)	22040 (0.096)	1.35 (0.090)
90°	5.93 (0.079)	51.99 (0.079)	3.117 (0.11)	21844 (0.20)	0.96 (0.15)

表-4 1方向材の変形能の評価項目

	弾性傾き (kN/mm)	弾性伸 び: δ_E (mm)	塑性伸 び: δ_P (mm)	δ_P/δ_E
0°	66.23 (0.070)	0.67 (0.070)	0.68 (0.20)	1.03 (0.24)
90°	60.11 (0.091)	0.87 (0.13)	0.085 (0.54)	0.094 (0.56)

いる場合、完全にせん断破壊に至ると、弾性限界と破断点は、荷重-伸び曲線上においてほとんど一致すると考えられる。一方で、せん断力の載荷方向に対して直角に繊維が入っている場合、繊維自体が荷重を受け持ち、繊維が抜け出るような挙動となり、弾性限界に達した後に塑性状態になり、ゆるやかに変位が伸びて破断することが分かった。また、0°方向の δ_P/δ_E は1.03となり、弾性伸び量と塑性伸び量はほとんど同じであることが分かった。表-3より、最終的な破壊時の変位は、塑性状態でより伸び量が大きかった0°方向の方が、大きく評価された。

b) 2方向材

図-15に2方向材のせん断応力とせん断ひずみの関係を、図-16に2方向材のせん断応力と試験片変位の関係を示す。また、表-5にVノッチビーム法試験結果を、表-6に変形能の評価項目を示す。表-5の各値はそれぞれの試験片の平均値を示しており、()内の値は変動係数を示している。

表-5および図-15より、せん断強度とせん断弾性係数

はほとんど同じ値となった。ここで、0°方向と90°方向でせん断強度は等しいと仮定して、 t 分布を用いて有意水準5%で検定すると、仮説は棄却されなかった。さらに、0°方向と90°方向でせん断弾性係数は等しいと仮定して、 t 分布を用いて有意水準5%で検定すると、仮説は棄却されなかった。よって、2方向材の場合、0°方向と90°方向において、せん断強度やせん断弾性係数に差があるとは言えないことが分かる。一方で、試験片の変位に関して、同じように0°方向と90°方向で値は等しいと仮定して、 t 分布を用いて有意水準5%で検定すると、仮説は棄却された。

表-6および図-16より、弾性傾きや弾性伸びに大きな差は見られなかったが、90°方向の方が塑性伸び量は若干大きい。ここで、塑性伸び量は等しくなると仮定して、 t 分布を用いて有意水準5%で検定すると、仮定は棄却された。よって、変形能に関しては、0°方向と90°方向で差がある結果になった。この要因としては、試験片を採取した部材の、長手方向と短手方向の繊維の配向量の違いや、繊維自体の強度の差などが挙げられる。1方向材の結果より、繊維が載荷方向に対して直角に入っている方が、変位が大きくなると考えられる。90°方向から切り出した試験片において、載荷方向に対して直角に入っている繊維は、部材の短手方向の繊維である。よって、今回試験片を切り出した部材は、長手方向に比べ、短手方向により多くの繊維を含んだ部材である可能性が考えられる。また、長手方向の繊維と短手方向の繊維を比較し、それぞれの強度に差がある場合、短手方向の繊維の方が変形に弱かったため、90°方向から切り出した試験片の変位や塑性伸び量が大きく評価されたと考えられる。しかし、前述したように、試験片自体のせん断強度に差は見られないことから、試験片のせん断強度は繊維の配向方向に大きく依存し、繊維自体の強度や配向方向ごとの含有率の差にあまり影響されないと考えられる。

c) 0°方向での比較

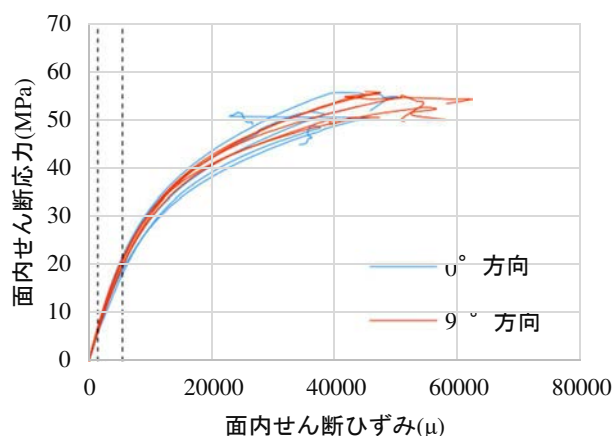


図-15 2方向材のせん断応力とせん断ひずみの関係

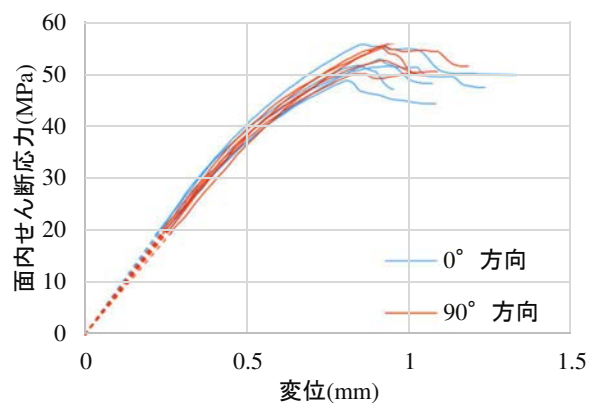


図-16 2方向材のせん断応力と変位の関係

表-5 2方向材のVノッチビーム法試験結果

	荷重 (kN)	せん断 強度 (MPa)	せん断 弾性係 数(GPa)	ひずみ (μ)	変位 (mm)
0°	5.93 (0.045)	52.03 (0.045)	3.440 (0.067)	40475 (0.092)	0.85 (0.042)
90°	6.14 (0.036)	53.88 (0.036)	3.464 (0.019)	49386 (0.090)	0.98 (0.062)

表-6 2方向材の変形能の評価項目

	弾性傾き (kN/mm)	弾性伸 び: δ_E (mm)	塑性伸 び: δ_P (mm)	δ_P/δ_E
0°	83.10 (0.036)	0.49 (0.059)	0.36 (0.15)	0.75 (0.20)
90°	60.11 (0.091)	0.52 (0.049)	0.46 (0.12)	0.90 (0.12)

ここでは、前々項および前項の結果を 0° 方向の結果でまとめなおし、1方向材と2方向材で比較を行う。

図-17 に 0° 方向のせん断応力とせん断ひずみの関係を、図-18 に 0° 方向のせん断応力と試験片変位の関係を示す。また、表-7 に 0° 方向のVノッチビーム法試験結果を、表-8 に 0° 方向の変形能の評価項目を示す。表-7 の各値はそれぞれの試験片の平均値を示しており、() 内の値は変動係数を示している。

表-7 より、1方向材と2方向材のせん断強度は等しくなると仮定して、 t 分布を用いて有意水準 5% で検定すると、仮説は棄却された。このことから、0° 方向の試験では、せん断強度は2方向材よりも1方向材の方が大きく評価されたことが分かる。この要因としては、载荷方向と直角方向に配向されている繊維量が1方向材の方が多いことが挙げられる。

また、1方向材と2方向材のせん断弾性係数を比較すると、あまり差があるとは言えない結果になった。ここで、1方向材と2方向材のせん断弾性係数は等しくなると仮定して、 t 分布を用いて有意水準 5% で検定すると、

仮説は棄却されなかった。このことから、0° 方向の試験片では、1方向材と2方向材のせん断弾性係数に差があるとは言えないことが分かる。0° 方向の場合、1方向材と2方向材の違いは、せん断力の载荷方向に対して平行に入った繊維の有無や直角方向に入った繊維の量である。2方向材で考えると载荷方向と平行に入った繊維が有ることにより、せん断剛性を高める効果があるが、载荷方向と直角に入った繊維の量が1方向材に比べ少ないため、これらの条件が重なり合い、せん断弾性係数が1方向材とほぼ同じとなったと考えられる。

図-17 および図-18 より、0° 方向の試験結果と比較すると、ひずみでは2方向材、変位では1方向材のほうが大きいことがわかる。ひずみはひずみゲージの値であるため、局所的な影響や接着剤のはがれなどで測定が不十分であった可能性があり、このような差となったと考えられる。

表-8 より、弾性伸び量と塑性伸び量ともに、1方向材の方が大きく評価された。1方向材は2方向材に比べ0° 方向に入っている繊維量が多く、この繊維量の差がこのような変形能の差になったと考えられる。

d) 90° 方向での比較

ここでは、前項に続き、90° 方向の結果をまとめ1方向材と2方向材で比較を行う。

図-19にせん断応力とせん断ひずみの関係を、図-20にせん断応力と試験片変位の関係を示す。また、表-9にVノッチビーム法試験結果を、表-10に変形能の評価項目を示す。表-9の各値はそれぞれの試験片の平均値を示しており、() 内の値は変動係数を示している。

表-9 より、1方向材と2方向材のせん断強度を比較すると、2方向材の方が若干高く評価されてはいるが、大きな差があるとは言えなかった。ここで、1方向材と2方向材のせん断強度は等しくなると仮定して、 t 分布を用いて有意水準 5% で検定すると、仮説は棄却されな

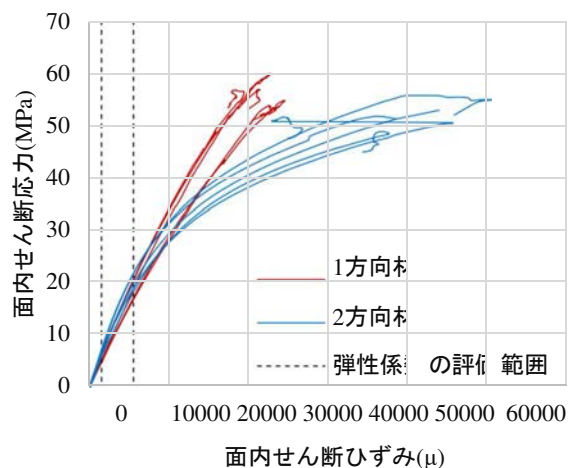


図-17 0° 方向のせん断応力とせん断ひずみの関係

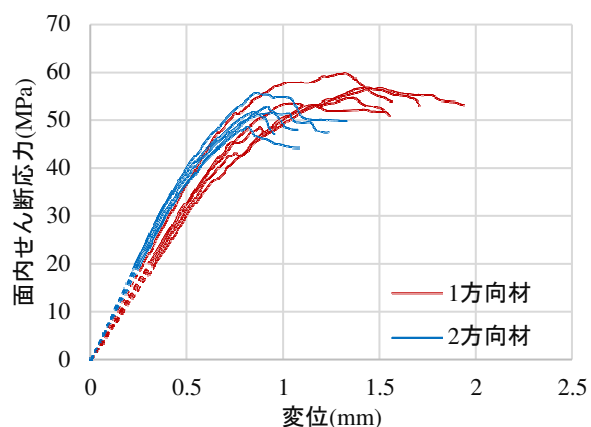


図-18 0° 方向のせん断応力と変位の関係

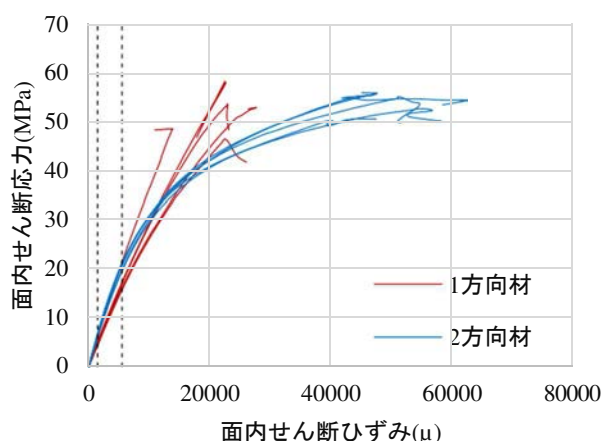


図-19 90° 方向のせん断応力とせん断ひずみの関係

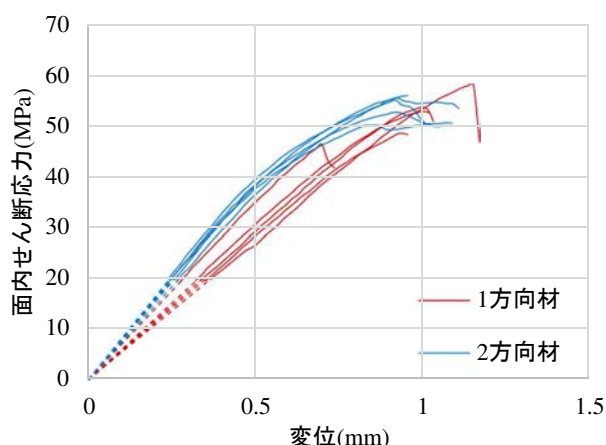


図-20 90° 方向のせん断応力と変位の関係

表-7 0° 方向のVノッチビーム法試験結果

	荷重 (kN)	せん断 強度 (MPa)	せん断弾 性係数 (GPa)	ひずみ (μ)	変位 (mm)
1 方 向	6.43 (0.039)	56.43 (0.039)	3.33 (0.074)	22040 (0.096)	1.35 (0.090)
2 方 向	5.93 (0.045)	52.03 (0.045)	3.440 (0.067)	40475 (0.092)	0.85 (0.042)

表-8 0° 方向の変形能の評価項目

	弾性傾 き (kN/mm)	弾性伸 び : δ_E (mm)	塑性伸 び : δ_P (mm)	δ_P/δ_E
1 方 向	66.23 (0.070)	0.67 (0.070)	0.68 (0.20)	1.03 (0.24)
2 方 向	83.10 (0.036)	0.49 (0.059)	0.36 (0.15)	0.75 (0.20)

表-9 90° 方向のVノッチビーム法試験結果

	荷重 (kN)	せん断 強度 (MPa)	せん断弾 性係数 (GPa)	ひずみ (μ)	変位 (mm)
1 方 向	5.93 (0.079)	51.99 (0.079)	3.117 (0.11)	21844 (0.20)	0.96 (0.15)
2 方 向	6.14 (0.036)	53.88 (0.036)	3.464 (0.019)	49386 (0.090)	0.98 (0.062)

表-10 90° 方向の変形能の評価項目

	弾性傾 き (kN/mm)	弾性伸 び : δ_E (mm)	塑性伸 び : δ_P (mm)	δ_P/δ_E
1 方 向	60.11 (0.091)	0.87 (0.13)	0.085 (0.54)	0.094 (0.56)
2 方 向	78.41 (0.037)	0.52 (0.049)	0.46 (0.12)	0.90 (0.12)

った。このことから、1 方向材と 2 方向材のせん断強度は、概ね同程度であると言える。90° 方向の場合、1 方向材と 2 方向材の違いは、せん断力の载荷方向に対して直角に入った繊維の有無である。1 方向材は载荷直角方向には繊維が入っていないため、樹脂そのもののせん断

強度と同等と考えられ、前項の結果からも考えると繊維のせん断強度への寄与がそれほど大きくないこともわかる。

次に、1 方向材と 2 方向材のせん断弾性係数が等しくなると仮定して、 t 分布を用いて有意水準 5% で検定する

と、仮説は棄却された。このことから、90° 方向の場合、2 方向材の方がせん断弾性係数は大きくなることが分かる。2 方向材には、せん断力の載荷方向に対して直角に繊維が入っており、この繊維の影響でせん断弾性係数が大きく評価されたと考えられる。

表-10より、1方向材の場合、その変位のほとんどは弾性伸び量であるが、2 方向材の場合は、弾性伸び量と塑性伸び量のそれぞれが、試験片変位の約 50%ずつ分担していることが分かる。このことから、90° 方向の 1 方向材と 2 方向材を比較したとき、その変形能には差があると言える。塑性状態では、せん断力の載荷方向に対して直角に入った繊維が荷重を受け持ち、変位が伸びる要因になることが分かる。

図-19 および図-20 より、90° 方向のひずみと変位を比較すると、2 方向材では大きな塑性ひずみが発生し、塑性伸びも発生していることがわかる。一方、1 方向材では、弾性変形後に大きく荷重が低下しているため塑性ひずみおよび塑性伸びがほとんど無いことがわかる。しかし、1 方向材の弾性係数が小さいため、全体伸びはほぼ同等となっていることがわかる。

4. まとめ

本研究では、GFRP のせん断挙動を解明するため、1 方向材および 2 方向材に対してクーポン試験を実施した。得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 45° 方向引張試験より、1 方向材と 2 方向材のせん断強度とせん断弾性係数を比較すると、2 方向材のほうが大きく評価された。また、1 方向材と 2 方向材の変形能を比較すると、2 方向材は塑性伸び量が大きく評価された。
- 2) Vノッチビーム法試験の1 方向材の試験結果より、せん断力の載荷方向に対して繊維が平行に入っている場合、弾性限界と破断点はほとんど一致し塑性伸びがほとんどないことが分かった。
- 3) Vノッチビーム法試験の1 方向材の試験結果より、0° 方向と 90° 方向を比較すると、せん断強度およびせん断弾性係数ならびに試験片変位の全てにおいて、0° 方向のほうが大きく評価された。
- 4) Vノッチビーム法試験の2 方向材の試験結果より、0° 方向と 90° 方向を比較すると、せん断強度およびせん断弾性係数はほとんど同じ値を示したが、

試験片の変位と塑性伸び量に関しては、90° 方向のほうが大きく評価された。

- 5) Vノッチビーム法試験の1 方向材と 2 方向材の試験結果を比較すると、せん断力の載荷方向に対して平行に入った繊維はせん断力に影響を及ぼし、せん断力の載荷方向に対して直角に入った繊維はせん断弾性係数や変形性能に影響を及ぼすことが分かった。

今後の課題として、GFRP 溝形材を用いた部材試験を行い、クーポン試験の結果と比較する必要がある。また、繊維の含有率や配向方向、繊維自体の強度が試験結果に影響を与える可能性が考えられるため、試験片を採取した GFRP 溝形材の繊維に関する詳細なデータを得る必要がある。

謝辞：本研究は、JSPS 科研費 JP19K04578 の助成を受け行われた。また、本研究の試験片の製作には、株式会社 ヒビならびに株式会社コムテックに多大なるご協力を頂いた。さらに、実験では、神戸大学大学院技術職員の中 西智美氏および村瀬照寛氏にご協力いただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 一般社団法人強化プラスチック協会：基礎からわかる FRP，コロナ社，pp.1-4，2016
- 2) 複合構造委員会：FRP 歩道橋設計・施工指針（案），複合構造シリーズ04，土木学会，2011.
- 3) 張広鋒，星隈順一，堺淳一：RC 橋脚の耐震補強に用いる FRP-鋼板接着接合部の付着挙動，構造工学論文集，Vol.56A，2010.
- 4) 複合構造委員会・FRP によるコンクリート構造の補強設計研究小委員会：FRP によるコンクリート構造の補強設計の現状と課題，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.71，No.5，pp.II 66-II 73，2015.
- 5) 石井佑弥，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検討，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.73，No.5，pp.II 10-II 19，2017.
- 6) JIS K 7019：繊維強化プラスチック—±45° 引張試験による面内せん断特性の求め方—，1999.
- 7) ASTM D5379/D5379M-12：Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method，2012.

(Received August 28, 2020)

EXPERIMENTAL STUDY ON SHEARING BEHAVIOR OF GFRP MATERIALS

Daichi NII, Kunitaro HASHIMOTO and Hitoshi NAKAMURA

GFRP, which is a glass fiber reinforced plastic, is beginning to be applied to infrastructure structures such as sluice gates and pedestrian bridges, taking advantage of its high corrosion resistance, light weight, high strength, and low cost compared with other FRP materials. However, there are many unsolved parts such as nonlinearity on the shearing behavior of FRP material. In this study, the shear behavior and the evaluation method of strength and deformability of GFRP were investigated.

In this study, specimens were cut from both unidirectional and bidirectional members and tested according to JIS K 7019 and ASTM D 5379. In the test according to JIS, the shear strength was evaluated larger in the bidirectional material than in the unidirectional material. In the test according to ASTM, it was found that the shear strength and the deformability were affected by the orientation of the fiber with respect to the loading direction. In the future, the shearing tests of FRP members will be conducted and the shearing behavior of the FRP members will be investigated.