GFRP溝形材のせん断特性と評価方法に関する 基礎的検討

石井 佑弥1・飯田 卓弥2・中村 一史3・ 古谷 嘉康4・中井 裕司5・西田 雅之6

1学生会員 首都大学東京 大学院 博士前期課程 都市環境科学研究科都市基盤環境学域 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

2正会員 東京都 建設局 第一建設事務所 (〒104-0044 東京都中央区明石2-4)

³正会員 首都大学東京大学院 准教授 都市環境科学研究科都市基盤環境学域(〒192-0397 東京都八王子 市南大沢1-1)

E-mail: hnaka@tmu.ac.jp

4正会員 東日本高速道路株式会社 東北支社 いわき工事事務所 四倉工事区 (〒970-0101 福島県いわ き市平下神谷字仲田100)

5正会員 前田工繊株式会社 東京営業第2部 (〒103-0005 東京都中央区日本橋久松町9-9)

6正会員 日本エフ・アール・ピー株式会社 (〒541-0057 大阪市中央区北久宝寺町2-2-13)

本研究は、一方向材からなる引抜成形GFRP溝形材(C75)のせん断特性とその評価方法を明らかにする ことを目的としたものである.はじめに、JIS K 7019およびASTM D 5379に準拠したクーポン試験を実施 して、せん断弾性係数、せん断強度を実験的に求めた.次に、せん断破壊を生じるような、はり部材の3 点曲げ載荷実験を行って、はり部材としてのせん断特性を評価した.その結果、JISに準拠した試験では、 試験片の45°方向の切断縁が破壊の起点となり、せん断強度が小さく評価されることがわかった.また、 ASTMに準拠した試験では、試験片、治具の特性からせん断力の作用が再現されるため、応力集中による 補正を行うことで、はり部材の3点曲げ載荷試験と近い結果が得られた.これらより、一方向材のGFRP溝 形材のせん断特性は、ASTMに準拠した試験により、概ね評価できることが確かめられた.

Key Words : GFRP channel member, unidirectional material, shear strength, shear modulus

1. はじめに

繊維強化プラスチック(以下, FRP)は、鋼材に比べ て、耐食性があり、軽量であることから、その性能を活 用して、歩道橋¹⁾、検査路²⁾、水門扉³などの社会基盤構 造物へ適用されている.これらのFRPの構造物では、従 来の鋼材に比べて弾性係数が小さいため、設計では、た わみ制限などの使用性が支配的で、剛性設計となってい る.設計応力は材料強度に対して余裕があることがほと んどであるため、構造物あるいは部材の破壊に対する安 全性に着目した実験的な検討は十分に行われていない. さらに、FRPの適用実績が少ないこともあり、土木構造 用FRPの材料特性は、その評価方法を含めて、十分な知 見が得られているとはいえない.したがって、構造物あ るいは部材の耐力を評価する上で、設計の照査に必要な FRPの材料特性を把握することは重要である⁴. 一方,FRPの機械的性質の評価方法については,種々 の工業規格により,標準的な試験方法が定められており, 土木構造用FRP⁹についてもそれらに準拠して評価され ている.土木構造用FRPの部材の耐力は,クーポン試験 片による材料試験結果に基づいて評価されているが,そ れらの妥当性については,前述したように検討事例が少 なく,十分に明らかにされていない.また,同一の材料 から作製した試験片によっても試験方法が異なる場合に は,機械的性質が異なる場合があることも指摘されてい る⁴.

FRPの部材あるいは材料の基本的な力学特性として, 圧縮,引張,曲げに対する基礎データが示され,設計資料として蓄積されつつあるが,せん断特性については, 検討事例が少ない.特に,FRP検査路の曲げ載荷実験⁶では,せん断破壊が生じ,構造物の耐力に支配的である ことが示されている. そこで本研究では、土木構造用FRPで多用されている 引抜成形されたGFRP溝形材(C75:一方向材)に着目し、 せん断特性とその評価方法を実験的に検討することを目 的として、種々のクーポン試験と部材の曲げ載荷実験を 実施した.

はじめに、溝形材から切り出したクーポン試験片を用いて、試験片の切り出しや載荷の方法が異なる、2つの材料試験(JIS K 7019, ASTM D 5379)を行って、せん断弾性係数、せん断強度を評価した.

次に、溝形材の曲げによるせん断破壊を検討するため に、3点曲げ載荷実験を行って、せん断耐力、変形挙動 を検討するとともに、クーポン試験の材料強度から部材 のせん断耐力の評価を試みた.

2. 45°方向引張試験によるせん断強度の評価

(1) 試験方法と試験片の概要

GFRP溝形材のせん断特性を評価するために、JIS K 70197 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°方向引張試験とした.図-1 のように、溝形材ウェブの45°方向から試験片を切り出 し、その形状が試験結果に与える影響を考慮するために、 図-2に示す寸法で2種類の試験片を製作した. それぞれ の形状における試験片を試験片A,試験片Bとした.試 験片Aは、JIS K 7019に準拠した試験片であり、試験片B は、破壊の起点を試験片中心にコントロールするために、 ダンベル形状としたものである.表-1に,JISK 7019の規 格値と本試験で採用した値を示す. つかみ部には, 厚さ 1mmのアルミタブをエポキシ樹脂系接着剤を用いて接着 して、補強した. 評価項目は、荷重、変位、ひずみであ り、データロガー(静ひずみ測定器)により計測した. ひずみ計測では、試験片中央の表裏に2軸ゲージ(ゲー ジ長3mm)を試験片に対して0°,90°方向に設置した. 本試験では、島津製作所製オートグラフ(容量: 100kN)を使用し、変位制御(1.0mm/min)で引張載荷し た.図-3に、45°方向引張試験のセットアップの状況を 示す. 試験片A, 試験片Bにおける評定部長さは, 一部 異なるものの、試験方法や治具などは同一である.

45°方向引張試験では、面内せん断応力τ₁₂、面内せん 断強度τ₁₂₄、面内せん断ひずみγ₁₂、せん断弾性係数G₁₂は、 以下の式より算定した.

$$\tau_{12} = \frac{F}{2bh} \tag{1a}$$

$$\gamma_{12} = \varepsilon_x - \varepsilon_y \tag{1b}$$

$$\tau_{12M} = \frac{F_m}{2bh} \tag{1c}$$

$$G_{12} = \frac{\tau_{12}'' - \tau_{12}'}{\gamma_{12}'' - \gamma_{12}'}$$
(1d)
こに, F: 荷重 (kN),
b: 板幅 (mm),
h: 板厚 (mm),
 ε_x : 軸方向ひずみ,
 ε_y : 軸鉛直方向ひずみ,
 F_m : 最大荷重 (kN),
 $\gamma_{12}': 1,000 \times 10^6$,
 $\gamma_{12}'': 5,000 \times 10^6$,

 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) 試験結果と考察

Σ

図4に、せん断応力とせん断ひずみの関係を示す.図より、試験片Aでは、破壊時のせん断ひずみは、10,000×10⁶となり、せん断弾性係数の評価範囲において、線形の挙動を示していることがわかる.一方、試験片Bでは、それぞれの試験片において、せん断ひずみが増大するとともに、挙動のばらつきが大きくなり、せん断弾性係数の評価範囲において、非線形な挙動とな

表-1 JISK 7019の規格値と本試験で採用した値

項目	規格値	試験片 A	試験片 B
板厚 (mm)	_	5	5
板幅 (mm)	25	15	13
全長 (mm)	250	75	75
評定長さ (mm)	150	25	45
つかみ部長さ(mm)	50	25	15
曲率 (mm)	_	_	80
タブ厚さ (mm)	0.5~2.0	1	1









図-3 45°方向引張 試験のセットアップ

った.また,破壊時のせん断ひずみは、6,300×10⁶~ 18,000×10⁶となり,試験Aよりもばらつきの大きい結果 となった.

表-2に、45°方向引張試験結果を示す.表より、せん 断弾性係数は、試験片Aと試験片Bで同程度であるもの の、せん断強度は、試験片Bの方が小さくなった.変動 係数は、試験片Aでは、せん断強度が、試験片Bでは、 せん断弾性係数が大きい結果となった.これは、採取し た試験片の板幅の寸法が小さく、一方向材の連続繊維が 45°方向に切断されていることによるものと考えられる. 試験片Bでばらつきが大きくなった要因は、その試験片 の幅がダンベル形状の加工により、さらに小さくなった ことによるものと考えられた.

図-5に、破壊モードを示す.図より、試験片A、Bと もに評定部における繊維の配向に沿った破壊となった. 特に、試験片Bでは、評定部中央における幅が平行な区 間での破壊となったものの、一方向材では、破壊箇所を 限定するような形状に試験片を工夫しても、変動係数は 大きくなり、試験の精度は向上しないことがわかった.



	せん断弾性係数		せん断強度			
	G_{xy} (GPa)		τ_u (MPa)			
試験片	平均值 変動係数		平均值	変動係数		
C75-45TA	3.17	0.081	26.9	0.109		
C75-45TB	3.19	0.132	23.0	0.046		







(a)試験 A (b) 試験 B 図-5 45°方向引張試験における破壊形態

3. Vノッチビーム法試験によるせん断強度の評価

(1) 試験概要

ASTM D 5379[®] に準拠したクーポン試験を行うことで, GFRP溝形材のせん断特性について検討した.本論文で は、この試験をVノッチビーム法試験とした.図-6に, Vノッチビーム法試験における試験片の採取位置を示す. 一方向材のような異方性材料に対して,共役せん断応力 が理論的に成り立つ[®] ことから,試験片は,溝形材のウ ェブの0°方向(繊維方向)および90°方向(繊維直角方 向)から採取して,比較検討を行った.0°方向の試験片 については、ウェブ中央と端部で繊維含有量が異なるこ とも考えられるため,図-6 (a)のような採取位置とした. また,90°方向試験片は,部材寸法の都合上,長辺を 75mm(規格値:76mm)として,図-6 (b)のように採取 した.0°方向試験片は,各採取位置から5体ずつ,90°方 向試験片は,6体作製した.なお,0°方向の試験片名を C75L,90°方向の試験片名をC75Tと表記している.

図-7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=1.3mmのフィレットが施されてい る.図-8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載荷した.荷重、変 位、ひずみの計測方法や載荷試験の装置、載荷速度は、 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(ゲージ長3mm)を±45°方向に 設置した.

 $V ノッチビーム法試験では、せん断強度<math>F_u$ 、面内せん 断応力 τ_i 、面内せん断ひずみ γ_i 、せん断弾性係数 G_w は、



以下の式より算定した.

$$F_u = \frac{P_u}{A} \tag{2a}$$

$$\tau_i = \frac{P_i}{A} \tag{2b}$$

$$\gamma_i = \left| \mathcal{E}_{+45} \right| + \left| \mathcal{E}_{-45} \right| \tag{2c}$$

$$G_{12} = \frac{\tau_{12}'' - \tau_{12}'}{\gamma_{12}'' - \gamma_{12}'}$$
(2d)

- 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: 載荷荷重(N),
 - ε₊₄₅:+45°方向ひずみ,
 - *ε*₄5: -45°方向ひずみ,
 - γ'_{12} : 1,500×10⁻⁶,
 - γ''_{12} : 5,500×10⁻⁶,
 - 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) 0°方向(繊維方向)における評価

図-9に、代表的なせん断応力とせん断ひずみ関係 (C75L-W003-2)を示す.なお、図より、せん断弾性係 数の評価範囲において、線形な挙動であることがわかる が、図-9からは、せん断応力の最大値が特定できなかっ た.これは、他の試験片についても同様であった.図-



図-7 Vノッチビーム法試験における試験片図



図-8 Vノッチビーム法試験のセットアップ

10に,破壊形態を示す. せん断力の載荷方向に沿った 破壊が見られたが,繊維方向に対して,直角にせん断力 を載荷しているため,せん断破壊後も0°方向の繊維が荷 重の負担しているをと考えられる. このように,最大荷 重で強度が評価できない場合,ASTMでは,せん断強度 は0.2%オフセット強度により評価することとしているた め,その結果を次に示す.

表-3に、0°方向におけるVノッチビーム法試験の結果 を示す.表より、各採取位置のせん断弾性係数における 変動係数は、5%以下と小さい結果となったが、全試験 片の変動係数は、約8%となった.また、せん断強度も 同様の傾向であり、全試験片の変動係数は、約6%とな った.これは、試験片の採取位置により、せん断特性が 異なる値となったためである.C75L全体では、せん断 弾性係数は、3.99GPa、オフセットせん断強度は、 38.6MPaとなり、2章の45°方向引張試験におけるせん断 特性と異なり、Vノッチビーム法の方が若干高く評価さ れた.







図-10 0°方向における破壊形態

表-3 0°方向におけるVノッチビーム法試験結果

	せん断	単性係数	オフセット		
試験片	G_{xy} (GPa)		せん断強度tu(MPa)		
	平均值	平均值 変動係数		変動係数	
C75L-W001	3.91	3.91 0.031		0.065	
C75L-W002	3.70	0.046	37.5	0.035	
C75L-W003	4.37	0.034	40.7	0.033	
C75L全体	3.99	0.080	38.6	0.058	

(3) 90°方向(繊維直角方向)における評価

図-11に、全試験片におけるせん断応力とせん断ひず みの関係を示す.図より、せん断弾性係数の評価範囲に おいて、線形な挙動であることがわかる.また、各試験 片の最大荷重に、ばらつきがあるものの荷重のピークが 明確に見られた.これは、繊維方向に対して、平行にせ ん断力を載荷したため、繊維の影響を受けなかったため である.破壊形態は、図-12のように、せん断力の方向 に沿った破壊であった.

表4に、90°方向におけるVノッチビーム法試験の結果 を示す.表より、せん断弾性係数、せん断強度の変動係 数は、それぞれ約8%、約12%となった.特に、0°方向に 比べて、せん断強度の変動係数が大きいが、これは、 90°方向の試験片において、Vノッチの加工部に多少の差 異があり、これが強度に影響したと考えられる.90°方 向の平均では、せん断弾性係数が3.12GPa、せん断強度 が32.5MPaとなり、どちらも0°方向よりも小さい結果と なった.

2つの試験結果の妥当性を評価するために,表-5に, GFRP溝形材C75の材料物性値⁶を示す.GFRP溝形材C75 のせん断弾性係数は,4章で述べるはりの3点曲げ載荷試 験の結果を用いた.その他の物性値については,JISに







図-12 90°方向における破壊形態

基づいた材料試験結果の値を用いており、引張特性、圧 縮特性についてはそれぞれJIS K 7164、JIS K 7018に準拠 した試験を実施して求めたものである.このことから、 Vノッチビーム法試験では、一方向材の90°方向の場合、 せん断弾性係数は、0°方向の試験値よりも小さく評価さ れると考えられた.

(4) ノッチ部を有する試験片のせん断応力分布の検討

Vノッチビーム法試験では、図-7のようにVノッチの 先端部にr=1.3mmのフィレットを加工しているものの、 せん断応力の応力集中を受けると考えられ、その影響を 考慮する必要があると考えられる.ここでは、解析によ り、せん断応力の応力集中係数を同定し、せん断試験結 果の補正を試みた.

図-13に、作成した解析モデルを示す.有限要素解析 (Msc Marc2013)により、厚肉シェル要素を用いて、試 験片をモデル化した.実験と同じせん断力の作用を再現 するため、載荷部は、一様に変位するような変位制御と した.また、固定部は、端部の1点のみをピン支持とし、 その他をローラー支持とした.

表-5 溝形材 (C75) の材料特性



図-14 せん断応力分布図

表-4	90°方向におけ	るVノ	ッチビー	ム法試験結果
-----	----------	-----	------	--------

応力集中	せん断弾性	係数G _{xy} (GPa)	せん断強度 _u (MPa)		最大荷重時のせん断ひずみyu(×10 ⁶)			
係数	平均值	変動係数	平均值	変動係数	最小値	最大値	平均值	変動係数
補正前	3.12	0.000	32.5	0 121	21 161	26.022	22 125	0.000
補正後	3.72	0.088	38.7	0.121	21,101	20,025	23,125	0.088

図-14に、せん断応力分布図を示す. 図中には、等方 性と異方性とした場合の解析値を示す. また、ノッチ間 の矩形断面に対して、はり理論により算出した最大せん 断応力と平均せん断応力を併記している. Vノッチビー ム法試験の場合、はり理論の最大せん断応力よりも、等 方性、異方性ともに、小さい応力となることがわかる. これらの解析値および理論値を用いてせん断応力の応力 集中係数αを以下の式より算出した.

$$\alpha = \frac{\tau_{FEM}}{\tau_{mean}} \tag{3}$$

ここに、 α : せん断応力の応力集中係数、 τ_{FEM} : せん断応力の解析値(N/mm²)、

 τ_{mean} : 平均せん断応力 (N/mm²).

実験でのひずみゲージ長(3mm)を考慮して,解析に よるせん断応力をひずみゲージ長の範囲で平均したもの を*t_{FEM}とした*.また,*t_{mean}は、Vノッチビーム法試験にお* ける式(2a)により算出している平均せん断応力である. 式(3)より,等方性の場合,せん断応力の応力集中係数*a* は,1.05となり,異方性の場合,1.19となることがわか った.このことから,一方向材のように異方性が顕著で ある場合,せん断応力の応力集中を考慮して評価する必 要があるといえる.

この同定した応力集中係数αを用いて、Vノッチビー ム法試験結果を補正すると表4のように示される.弾性 係数は、αを乗じて補正したせん断応力と実験値のせん 断ひずみから算出している.表より、せん断弾性係数は、 3.72GPaとなり、表4の溝形材のせん断弾性係数と概ね 近い値となった.せん断強度は、38.7MPaとなり、0°方 向におけるオフセットせん断強度と同程度となることが わかった.なお、0°方向については、オフセットによる せん断強度であるため、応力集中は考慮しなかった.

4. 3点曲げ載荷試験によるせん断特性の評価

(1) 試験方法と試験体の概要

短い支間における3点曲げ載荷試験を行うことで, GFRP溝形材C75のせん断特性を評価した.図-15に、3点 曲げ載荷試験の試験体図、図-16に、3点曲げ載荷試験の セットアップをそれぞれ示す.試験体は、溝形材の断面 形状の都合上、2つの溝形材を図のように背合わせに固 定した.ひずみの計測では、せん断支間の中央、ウェブ 中心において表裏に2軸ゲージ(ゲージ長3mm)を±45° 方向に設置した.支持条件は、単純支持とし、試験装置 は、島津製作所製オートグラフまたは電気油圧サーボ式 材料試験機(容量:100kN)を用いて、変位制御 (1.0mm/min)で載荷した.

本試験では、溝形材に作用するせん断応力は、薄肉は

りのせん断流解析¹⁰に基づいて算定した.特に,ウェブ 中央のせん断応力を評価するにあたり,以下の式より算 出した.

$$\tau_{d/2} = \frac{q_{d/2}}{t_w} \tag{4a}$$

$$q_{d/2} = \frac{P}{4} \cdot \frac{1}{2I} \left(bdt_f + \frac{d^2 t_w}{4} \right)$$
(4b)

ここに、 τ_{d2} : ウェブ中央のせん断応力 (N/mm²),

q_{d2}: ウェブ中央のせん断流 (N/mm),

- P: 荷重 (N),
- *I*: 断面二次モーメント(mm⁴),
- b: フランジの板幅 (mm),
- d: ウェブの高さ(mm),
- ty: フランジの板厚 (mm),
- t_w : ウェブの板厚 (mm).

なお、後述する解析により、異方性に対する薄肉はり 理論の妥当性を確認している.また、本試験では、軸方 向ひずみの値は、ほぼ変化しないものと考え、±45°ひ ずみをロゼット解析により評価している.せん断弾性係 数の評価範囲は、ASTM D 5379に準拠し、線形関係の確





図-15 3点曲げ載荷試験の試験体図



図-16 3点曲げ載荷試験のセットアップ



(a)C75-SP1

(b) C75-SP2 図-17 3点曲げ載荷試験の破壊の状況

(c) C75-SP3

認できる範囲(1,500×10⁶-5,500×10⁶)とした.

(2) 試験結果と考察

図-17に、3点曲げ載荷試験の破壊の状況、図-18に、 せん断応力とせん断ひずみの関係を示す.図-18には、 有限要素解析 (Msc Marc2013) による解析値を併記して おり、せん断弾性係数は、表-7の平均値を用いている. さらに、せん断応力の応力集中係数により補正した90° 方向におけるVノッチビーム法試験の結果も示している. 図より、せん断弾性係数の評価範囲において、線形な挙 動を示しており、線形領域において、実験値と解析値が 概ね一致していることがわかる.また、せん断応力は、 ひずみの増大とともに、一定の値に漸近することがわか る. 各試験体ともに、最大荷重付近で、一部のひずみゲ ージが破損し、終局後のひずみを正確に測定できなかっ たが、それぞれ90°方向のVノッチビーム法試験と類似し た挙動となった. また, 最大荷重は, Vノッチビーム法 試験の最大荷重の範囲内に収まっていることがわかる. 破壊箇所は、図-17に示したように、いずれの試験体に おいて、せん断支間で繊維配向(0°方向)に沿った破壊 となった.

図-19に、載荷荷重とストロークの関係を示す.図よ り、0°方向のVノッチビーム法試験と同様に、荷重のピ ークが明確に見られた. Bernoilli-Eulerはり理論による変 位とTimoshenkoはり理論による変位を比べると、その変 位が著しく異なることから、本試験では、せん断変形に よる付加たわみが大きいことがわかる.また、解析値は、 Timoshenkoのはり理論と同程度であるのに対して、実験 値は、変位が大きく、剛性が小さくなっていることがわ かる.これは、図-17で、破壊の状況を示したように、 断面内の変形が大きいことも要因と考えられた.

図-20に、せん断支間の中央断面のせん断ひずみ分布 を示す.実験値のせん断ひずみは、線形関係の確認でき る範囲内のAP=10kNにおける増分量を用いて算出した. 図より,等方性の場合,ウェブ中心位置の値は,はり理 論による計算値とほぼ一致した.異方性の場合,解析値 は、はり理論による計算値に比べて、フランジ部では、 差異が大きくなり、ウェブ中心位置では、若干小さくな



せん断ひずみ (×10⁻⁶) 図-20 せん断支間中央断面のせん断ひずみ分布 (ΔP=10kN)

解析値 計簋値

表-7 3点曲げ載荷試験の結果

封殿世	せん断強度	せん断弾性係数	最大荷重
武阀火门	τ_u (N/mm ²)	G_{xy} (kN/mm ²)	P _{max} (kN)
C75-SP1	39.6	3.45	47.6
C75-SP2	40.1	3.88	48.3
C75-SP3	38.9	3.06	46.8
平均	39.5	3.47	47.5

150

ったものの、その値は、実験値の平均と同程度となった. さらに、図-18で示したように、非線形領域においても、 はり理論によるせん断応力は、Vノッチビーム法試験の 結果と概ね一致している.このことから、異方性材料の 溝形材に対して、ウェブ中央位置のせん断応力は、はり 理論から算出が可能であるといえた.

表-7に、3点曲げ載荷試験の結果を示す. せん断弾性 係数は、各試験体でややばらつきがあるが、その平均値 は、3.47GPaとなった. 一方で、せん断強度は、いずれ の試験体で同程度となり、その平均値は、39.5MPaとな った. 3点曲げ載荷試験結果とクーポン試験結果と比較 すると、45°方向引張試験の結果は、本試験の結果より も小さく評価された. これは、一方向に配向された繊維 を45°方向に切り出して引張載荷するため、破壊形式も 異なり、せん断強度が小さくなったと考えられた. 一方、 Vノッチビーム法試験において、0°方向および応力集中 係数を考慮した90°方向の試験結果は、せん断弾性係数 がやや大きく評価されているものの、本試験の結果と概 ね一致した. これは、試験力の方向がVノッチビーム法 試験の治具では、本試験に近い形式であり、せん断力の 作用が再現されていることによると考えられた.

5. まとめ

本研究は、土木構造用FRPで多用されている引抜成形 された一方向材のGFRP溝形材(C75)に着目し、せん断 特性とその評価方法を検討することを目的として、種々 のクーポン試験と部材の3点曲げ載荷実験を行った.検 討の結果、以下のことがいえた.

- (1) 45°方向引張試験では、試験片の45°方向の切断縁が 破壊の起点となり、せん断強度が低くなることが わかった.また、破壊箇所を限定するような形状 にしても試験の精度は向上しなかった.
- (2) 0°方向(繊維方向)におけるVノッチビーム法試験 では、荷重のピークが明確に見られず、せん断強 度は評価できなかったが、0.2%オフセットせん断 強度で評価すれば、部材の3点曲げ載荷試験による せん断強度と近い結果となることがわかった。
- (3) 90°方向(繊維直角方向)におけるVノッチビーム 法試験では、荷重のピークが明確に見られたもの の、3点曲げ載荷試験による結果より、せん断弾性

係数, せん断強度ともに小さい結果となった.

- (4) FEM解析より算出されたVノッチ部によるせん断応 力の応力集中係数を考慮すれば、90°方向(繊維直 角方向)におけるせん断試験の結果は、3点曲げ載 荷試験によるせん断試験の結果と同程度となった.
- (5) 2つの溝形材を背合わせに固定した試験体の3点曲 げ載荷試験を行うことで、せん断支間でのせん断 破壊が生じた.このことから、溝形材のせん断特 性を簡易的に評価することができるといえた.

以上のことから、一方向材のGFRP溝形材C75のせん断 特性は、Vノッチビーム法試験により、評価することが できた.特に、せん断応力の応力集中を考慮した90°方 向(繊維直角方向)のせん断試験の結果より、はり部材 のせん断弾性係数、せん断強度を概ね評価できることが 確かめられた.

参考文献

- 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.
- 構造工学委員会: FRP 橋梁-技術とその展望-, 構造工学シリーズ 14, 土木学会, 2004.
- 複合構造委員会:土木構造用 FRP 部材の設計基礎 データ,複合構造レポート11,土木学会,2014.
- 複合構造委員会:複合構造標準示方書,設計編, 2014制定,2015.
- 6) 石井佑弥,小泉公佑,中村一史,古谷嘉康,中井 裕司,西田雅之:トラス桁形式 GFRP 製橋梁用検 査路の使用性と耐荷力に関する研究,土木学会論 文集 A1(構造・地震工学),複合構造論文集, Vol.72, No.5, pp.II_33-II 45, 2016.
- JIS K 7019:繊維強化プラスチック-445°引張試験 による面内せん断特性の求め方,1999.
- ASTM D5379 / D5379M 12 : Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method, 2012.
- 9) 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, 2016.
- 西野文雄:連続体の力学(Ⅱ),土木工学大系 6, pp.102-104,彰国社,1984.

FUNDAMENTAL STUDY ON SHEAR CHARACTERISTICS AND EVALUATION METHOD OF GFRP CHANNEL MEMBERS

Yuya ISHII, Takuya IIDA, Hitoshi NAKAMURA, Yoshiyasu FURUYA, Hiroshi NAKAI and Masayuki NISHIDA

In study, shear properties and evaluation method of pultruded GFRP made of unidirectional materials (C75) were investigated. The several shear tests were conducted using the coupon and the beam specimen for shear properties. In 45-degree directional tensile test, it was found that the shear strength was lower, compared with that of the short beam test. In the V-notched beam method, it was found that the shear properties were equivalent of the result of the beam test. Therefore, the V-notched beam method was proper method for evaluation of shear properties of pultruded unidirectional GFRP members