# (60) ハイブリッド FRP 桁のせん断変形特性と ウエブ・クリップリングに関する実験的検討

中村 一史1・前田 研一2・睦好 宏史3・鈴川 研二4

<sup>1</sup>正会員 首都大学東京大学院助教 都市環境科学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1) E-mail: nakamura-hitoshi@tmu.ac.jp

<sup>2</sup>フェロー会員 首都大学東京大学院教授 都市環境科学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1) E-mail: maeda-kenichi@tmu.ac.jp

<sup>3</sup>フェロー会員 埼玉大学大学院教授 理工学研究科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 225) E-mail: mutusyosi@saitama-u.ac.jp

4正会員 東レ株式会社 コンポジット開発センター (〒791-3193 愛媛県伊予郡松前町筒井 1515)

FRP をペデストリアンデッキや歩道橋の主桁に適用する場合,たわみ制限が断面設計の上で支配的となることが多いことから,せん断変形に伴うたわみ特性と断面剛性を正確に評価する必要がある.本研究では、炭素繊維とガラス繊維を合理的に組み合わせて開発したI形断面形状のハイブリッド FRP 桁を対象に、曲げ載荷試験を実施して、フランジの幅や物性値が、せん断変形特性に及ぼす影響を明らかにするとともに、補剛設計の基礎資料を得るために短いスパンにおける桁の終局挙動を把握することを目的とした.検討の結果、設計照査時に不可欠なハイブリッド FRP 桁の断面剛性を精度良く同定することができた.さらに、3 点曲げ載荷実験から、ウエブ・クリップリングによる破壊強度を明らにした.

Key Words : Hybrid composite girder, shear deformation, bending and shear rigidity, web-crippling

# 1. はじめに

近年,社会基盤施設の建設において,LCC を考慮した経済性や施工の省力化をはじめ,既設構造物の合理的な維持管理や再構築などが求められる中で,繊維強化プラスチック(FRP)を中心とした先進複合材料の適用可能性が建設分野の各方面で検討されている<sup>1)</sup>.

FRP は、一般に用いられる鋼やコンクリートに比べて、 軽量性、耐食性、加工性などに優れた材料であり、それ らの要求にも十分に応えうる革新的な材料として期待さ れている.特に、材料特性としては、軽量であることか ら単位体積重量に対する比強度、比弾性率が、従来の材 料に比べて極めて高く、繊維の種類とその方向を適切に 組み合わせることによって、要求性能に応じた構造材料 を設計することが可能であり、航空、宇宙の分野では不 可欠な材料となっている<sup>2</sup>.

このような背景のもと、著者らは、歩道橋やペデスト リアンデッキへの適用を目的として、ハイブリッド FRP 桁を提案している<sup>3</sup>. このハイブリッド FRP 桁のコンセ プトは、曲げ剛性を効率的に付与するために、外縁のフ ランジ部に重点的に高弾性率の炭素繊維を配置し、それ 以外については比較的安価なガラス繊維を適用すること にあり、経済性にも優れた構造部材の開発を目指してい る.特に、FRPの軽量性を生かして、架設において、工 期の短縮や作業の効率化などが期待されている.

しかしながら, FRP を歩道橋やペデストリアンデッキ の主桁に適用する場合,たわみ制限が断面設計の上で支 配的となることが多いことから,せん断変形に伴うたわ み特性と断面剛性を正確に評価する必要がある.

さらに, FRP は樹脂で固められた柔らかい材料である ことから,支承部や荷重の作用部分においては,摩耗や, 補剛設計にも十分に配慮する必要がある.

そこで本研究では、ハイブリッド FRP 桁の設計法の 確立へ向けた基礎資料を得ることを目的として、開発し たハイブリッド FRP 桁を対象に、曲げ載荷実験を実施 して、フランジの幅や物性値が、せん断変形特性に及ぼ す影響を明らかにする. さらに、短いスパンの3点曲げ 載荷によるせん断破壊実験を実施して、桁の終局挙動を 検討するとともに、ウエブ・クリップリングの破壊強度 を把握する.

# 2. 開発したハイブリッド FRP 桁の特徴

曲げ剛性を効率的に付与するために,フランジを炭素 繊維(CF)とガラス繊維(GF)を組み合わせた FRPと し,ウエブを全て GFRPとした I 形断面形状のハイブリ ッド FRP桁を開発した. *Vjを* 50%として製作されたハイ ブリッド FRP桁の材料特性を表-1に,その種類と実験 シリーズを表-2にそれぞれ示す.ここでは,フランジ の幅や材料特性がハイブリッド FRP桁の構造特性に及 ぼす影響を把握するために,表-2に示すような5つのシ リーズについて検討を行った.なお,表-1に示した軸 方向弾性係数*E*,せん断弾性係数*G*については各種繊維 の体積比率から積層理論に基づいて算出された理論値で ある.

## 3. せん断変形に伴うたわみ特性の検討

## (1) 静的曲げ載荷実験の概要

図-1に示すように、全長 3,500mmのハイブリッド FRP 桁を単純支持し、支間長 *L*を 3,000mm として、静的曲げ 載荷実験を実施した.桁の両支点部については、鋼製ボ ックスを補剛材として接着接合した.また、支点および 載荷点については、鋼製の補強板(長さ 80mm、厚さ 8mm、幅 95mm または 250mm)を接着して補強した.

荷重の載荷位置については、両支点からの長さ a を 700, 1,000, 1,300, 1,500mm と変化させ、4 点あるいは 3 点曲げ載荷とした.荷重については、電気油圧式サーボ 型アクチュエーター(静的容量:1,000kN)を用い、荷 重制御(1.0kN/sec)により、約 50kN を上限として静的 に載荷を行った.

桁のたわみについては、支間中央部の下フランジ下面の中心部に高感度変位計(容量:25mm)を設置し、鉛 直変位  $z_c$ と荷重 Pを動ひずみ測定器を用いて 1/100 秒間 隔で計測した.

#### (2) せん断変形に伴うたわみの評価方法

3 点および 4 点曲げ載荷時におけるハイブリッド FRP 桁の支間中央部の鉛直変位は、せん断変形を考慮した Timoshenko はり理論 <sup>4</sup>に基づいて、式(1)により評価した.

$$z_{C} = \frac{PL^{2}a}{48E_{b}I} \left(3 - 4\frac{a^{2}}{L^{2}}\right) + \frac{P}{2G_{b}^{*}A}a$$
(1)

ここに、 $z_c$ は支間中央部の鉛直変位、Pは荷重、Lは 支間長、aは支点から載荷位置までの距離、 $E_b$ は I 形断 面の換算軸方向弾性係数、 $G_b^*$ は I 形断面の換算せん断 弾性係数、Iは断面 2 次モーメント、および Aは断面積 である. 通常,右辺の第2項のせん断剛性 $G_b^*A$ は,せん断補 正係数kで補正した次式で与えられる.

$$G_b^* A = kGA \tag{2}$$

ここに、Gは基本としたせん断弾性係数である.より 厳密には、複合断面に対するせん断補正係数を算出する 必要があるが<sup>5</sup>、本研究では、せん断補正係数 k は、全

表-1 ハイブリッド FRP 桁の材料特性

部位	種類	体積比率				t	E	G
		$CF 0^{\circ}$	$\mathrm{GF0}/\mathrm{90}^\circ$	$\mathrm{GF45}^\circ$	GF MAT	(mm)	(GPa)	(GPa)
フランジ	А	52	10	13	25	14	65.7	4.4
	В	33	29	13	25	14	48.8	4.4
	G	_	61	14	25	14	22.8	4.5
ウェブ	<b></b> 土 通	_	31	42	27	9	15 7	67

表-2 ハイブリッドFRP桁の種類と実験シリーズ





図-1 静的曲げ載荷実験のセットアップ



写真-1 セットアップ (250AA, a=1,000mm) の状況



# (c) a=1,300mm





断面積 A に対するウエブの断面積 A<sub>w</sub>の比 (A<sub>w</sub>/A) で与 えられる概算値を用いることとし,基本としたせん断弾 性係数には,せん断変形に支配的とされるウエブのせん 断弾性係数を採用することとした.

特に、せん断変形の影響を考慮しない場合(Bernoulli-Euler はり理論)における鉛直変位は、式(1)の右辺の第 1項で与えられる.

#### (3) 曲げ剛性およびせん断剛性の同定

静的曲げ載荷実験結果の一部として、095AA におい て載荷位置を変化させた時の荷重と変位の関係を図-2 に示す.図中には、実験値を最小2乗法で近似した直線 を併記している.図より、実験値は、高い相関をもって 直線で近似されていることが解る.

さらに、図中には、積層理論に基づく各部位の物性 値(表-1)を用いて算出された2つの理論値を併記して いるが、実験値は、両はり理論の中間的な値となってお り、仮定された物性値と試験体の物性値とは、若干、相 違があることが解る.

そこで、各載荷位置における荷重-変位関係の傾き (たわみ剛性:  $\Delta P / \Delta z_c$ )を用いて、はりの曲げ剛性と せん断剛性をより正確に評価することを試みる.

式(1)について、荷重と変位を増分形に表示して変形 すれば、次式が得られる.

$$\frac{\Delta z_C}{\Delta P} = -\frac{a^3}{12E_b I} + \left(\frac{L^2}{16E_b I} + \frac{1}{2G_b^* A}\right)a$$
(3)

この式(3)は、載荷位置 a に関する 3 次関数で与えられることから、左辺の値を曲げ載荷実験により求め、最小2乗法によるカーブフィットから Ed と G<sup>\*</sup><sub>b</sub>Aの値を同







定することができる.

図-3は、載荷位置 aを変化させて、荷重-変位関係から得られるたわみ剛性の逆数(式(3)の左辺)をプロットしたものである.なお、たわみ剛性の算定にあたっては、各載荷位置 aについて、各3回の載荷試験を実施してその平均値を用いた.図中には、実験値を載荷位置 aの3次関数で最小2乗法により近似した曲線を併記している.図より、全シリーズで実験結果は式(3)で精度良く近似されていることが解る.

さらに、図-3 に示した近似曲線から同定した曲げ剛 性 *E*<sub>d</sub> とせん断剛性 *G*<sup>\*</sup><sub>b</sub>*A* を図-4、図-5 にそれぞれ示す. 図中には、積層理論に基づく各部位の物性値(表-1)を 用いて算出した理論値も示している.なお、せん断剛性 の理論値は、式(2)のせん断補正係数を用いて算出して いる.

これらの図より、CF の割合が増加するほど明らかに 曲げ剛性は増加するが、せん断変形はウエブのせん断剛 性に支配されるため、フランジ幅が一定であればせん断 剛性はほとんど変化しないことが解る.

一方,フランジ幅が広くなると,若干,せん断剛性 も増加することから,フランジ幅がせん断剛性にも寄与 することが解る.

特に,たわみ剛性に支配的な曲げ剛性は,ほぼ理論値 通りであり,I形断面を有するハイブリッド FRP 桁を 実用上十分な精度で製作できることが確かめられた.

なお、ここでは図を略したが、曲げ載荷実験による荷 重と変位の関係は、これらの同定値を用いれば精度よく 評価できることを確認している.

# 4.3点曲げ載荷実験による終局挙動の検討

#### (1)3点曲げ載荷実験の概要

図-6に示すように,全長1,500mmのハイブリッドFRP 桁を単純支持し,支間長Lを1,000mmとして,3点曲げ 載荷によるせん断破壊実験を実施した.荷重は,変位制



図-5 せん断剛性の同定結果

御(0.01mm/sec)により破壊まで載荷を行った.端支点部上の補剛材や支点・載荷点での補強板の設置は,静的曲げ載荷実験と同様であるが,桁の横倒れを防止するために,L4点および3L4点付近に安全装置を設置した. なお,実際には横倒れなどの不安定現象は生じなかった.

### (2) 実験結果と考察

図-7 に、荷重と支間中央部の鉛直変位の関係を示す.



図-6 3点曲げ載荷実験のセットアップ



図より、全てのシリーズで終局までほぼ線形的な挙動を 示し、最大荷重は 223~256kN であった. 図中には、前 章で同定された曲げ剛性およびせん断剛性を用いて算定 されたたわみの理論値を併記しているが、全シリーズで 実験値の方が理論値よりも小さくなっていることが解る.

また、図-8には、095AAと250AAについて、P=200kN 載荷時におけるたわみ分布をそれぞれ示している.図中 には、同様に算定された2つのはりの理論値を併記している.この短いスパンでは、通常の曲げたわみ成分よりも、せん断変形に伴うたわみ成分の方が大きくなり、理論値に対して実験値は、L2点では小さく、L4点および3L4点では大きくなることが解る.

さらに、図-9 に、250AA における断面の垂直ひずみ 分布を示す.載荷点直下では応力集中による影響が大き





(a) 支間中央部ら左端へ 150mm 離れた断面

(b) 支間中央部(載荷点直下)

5000

図-9 250AAにおける断面の垂直ひずみ分布



(a) 095AA

(b) 095GB 写真-2 載荷点直下におけるウエブの破壊状況



図-10 載荷点直下の上フランジの上下面ひずみ差

く,初期の段階から垂直ひずみ分布が大きく乱れること が解る.また,支間中央部ら左端へ150mm離れた断面 では,中立軸位置が下方へ大きくずれることが解る.よ り詳細な検討のためには,今後,FEM解析を行う必要 があるが,集中荷重が桁のたわみ分布や断面のひずみ分 布に及ぼす範囲が大きいことが明らかとなった.

写真-1 には、載荷点直下におけるウエブの破壊状況 を示す.瞬間的かつ脆性的な破壊現象であったが、目視 観察の範囲では、載荷点直下においてウエブが圧壊する、 いわゆるウエブ・クリップリングによる破壊と判断され た.095AA (写真-2 (a))および 095BB では、ウエブの 圧壊直後に、上フランジ部で層間はく離を伴う座屈が発 生した.

最後に、載荷点直下における上フランジ上下面のひ ずみの差から算定した曲げひずみを図-10 に示す.終局 強度が若干低下した 095AA では、約 200kN あたりで屈 曲が見られることから、上フランジの層間はく離を伴う 局部座屈の連成が終局強度の低下の一因と考えられ、 CF の量が比較的多く、フランジ幅が小さい場合には層 間はく離を伴う局部座屈が生じやすいものと推察された. したがって、その連成が生じなければ、ウエブ・クリッ プリングの破壊強度は約 250kN であるといえた.

#### 5. まとめ

本研究は、開発したハイブリッド FRP 桁を対象に、 せん断変形に伴うたわみ特性とウエブ・クリップリング の破壊強度について実験的な検討を行ったものである.

まず,静的載荷試験を行った結果より,設計照査時に 不可欠な桁の曲げ剛性,せん断剛性を正確に把握するこ とができた.特に,曲げ剛性は,ほぼ理論値通りであり, I形断面を有するハイブリッド FRP 桁を実用上十分な 精度で製作できることが確かめられた.

さらに、短いスパンの3点曲げ載荷実験を行った結果 からは、集中荷重が桁のたわみ分布や断面のひずみ分布 に及ぼす範囲が大きいこと、また、ウエブ・クリップリ ングによる破壊で終局となり、その強度は約250kNであ ることが明らかとなった.

以上のことから,ハイブリッド FRP 桁における部材 の性能と設計に関する基礎資料を得ることができた.

謝辞:本研究は、国土交通省建設技術研究開発助成(研 究課題名:革新的材料を用いた社会基盤施設の再構築) の補助を受けて実施した.本研究プロジェクトの共同研 究者各位より貴重なご助言をいただいた.また、実験を 行うにあたっては、研究当時、東京都立大学の学部生で あった田島 遼氏、山谷佑介氏、高野 徹氏にご協力いた だいた.ここに記して謝意を表します.

#### 参考文献

- 1) 複合構造委員会編:先進複合材料の社会基盤施設への適用, 土木学会,複合構造レポート01,2007.
- 2) 邊 吾一,石川隆司共編著:先進複合材料工学,培風館, 2005.
- 3)前掲1) pp.121-136.
- Cowper, G. R.: The shear coefficient Timoshenko's beam theory, ASME Journal of Applied Mechanics, 33, pp.35-340, 1966.
- Bank, L. C.: Shear coefficients for thin-walled composite beams, Composite Structures, 8, pp.47-61, 1990.

# EXPEIMENTAL STUDY ON SHEAR DEFORMATION AND WEB-CRIPPLING OF NEW HYBRID COMPOSITE GIRDERS

#### Hitoshi NAKAMURA, Ken-ichi MAEDA, Hiroshi MUTSUYOSHI and Kenji SUZUKAWA

An innovative hybrid composite girder is being developed consisting of carbon and glass fibers. The innovative feature of this girder is the optimum use of CF and GF in flanges to maximize structural performance while reducing the overall cost by using glass fibers in the web section. In order to clarify the web-crippling and the effect of shear deformation characteristics on the bending deflection, a series of I-shaped girders with two kinds of flange width were tested varying amount of CF and GF. The experimental results are shown and discussed in this paper with the emphasis on the appropriate composition of CF and GF for the potential application of such I-shaped girders to full scale pedestrian decks and footbridges.