GFRP 集成桁の曲げ耐荷力に関する実験的研究

大垣 賀津雄1・大前 敦2・西田 賢二3

¹正会員 ものつくり大学教授 建設学科(〒361-0038 埼玉県行田市前谷333)
E-mail: ohgaki@iot.ac.jp
²学生会員 ものつくり大学 建設学科(〒361-0038 埼玉県行田市前谷333)

E-mail: b01512185@iot.ac.jp

³正会員 AGCマテックス(株) 東京事務所(〒102-0073 東京都千代田区九段北1-12-4) E-mail: nishida@agm.co.jp

近年,GFRPは軽量で耐食性が高いことから土木分野への適用が期待されている.GFRP材は引抜成形が 主流で,製品カタログの標準品として選んで入手することができる.一方で,複雑な形状や規格外の寸法 はすぐに製作することができず,時間とコストの関係で調達できないのが現状である.このようなニーズ に応えるために,接着剤で集成した構造部材を提案する.特に,強度が計算できて品質が保証されれば集 成桁が有効であると考えられる.しかしながら,GFRP集成桁の研究は世界的にも少なく,複数寸法の GFRP集成桁の曲げ載荷実験を行い,それらの耐荷特性を調べることとした.

Key Words : GFRP, Assembled Girder, bending moment strength, Horizontal shear force

1. はじめに

ガラス繊維強化プラスチック(以下,GFRPと呼ぶ) は、近年、軽量で耐食性が高いことから土木分野への適 用が期待され、2次部材等で使用される場合も増加して きている.このようなGFRP部材は引抜成形が主流で、 GFRP製品の標準品から選んで入手することができる. しかしながら、大きな寸法のものや複雑な断面形状のも のは、成形用の金型も存在しないので生産しておらず、 このような規格外寸法のGFRP部材は注文しても入手困 難であることが実情である.

しかしながら、GFRP 部材は軽量で耐食性が高く、鋼材の腐食環境にあるような構造部材に適しており、維持 管理費用も含めたライフサイクルコスト LCC を考える と、鋼構造で建設している部材を GFRP に置換した方が よい場合も考えられる.このようなニーズに応えるため に、接着剤で GFRP 部材を集成した桁構造(以下、集成 桁と呼ぶ)を提案する.特に、強度が計算できて品質が 保証されれば、鋼材の腐食環境では GFRP 集成桁が有効 となる可能性がある.

わが国における GFRP 梁の既往の研究では、引抜き成 形された GFRP 製の I 形断面はりや溝形材の曲げやせん 断強度に関する実験がある¹⁰².また、GFRP 製の I 形断 面はりのフランジに炭素繊維強化プラスチック(以下、 CFRP と呼ぶ)や鋼板を貼り付けた合成はりに関する研究も行われている^{3,5}.一方,GFRP 引抜き成形部材を貼 り合わせたはりの曲げ強度に関する研究については, GFRP 引抜き成形溝形部材を背中合わせで接着して,そ のフランジに GFRP 板もしくは CFRP 板を接着した桁高 さの低いはりの実験や,GFRP 引抜き I 形はりを上下に 2 段重ねで接着した大型のはりの実験が行われている⁶⁰⁷.

しかしながら、上述の GFRP 製はりの曲げ強度に関す る研究は、桁高さやフランジ幅等の寸法を自由に選択す ることができない部材であり、実工事に採用できないケ ースが多くなる.このような状況の中で、古くから実績 のあるリベットを用いた鋼製集成桁と同様に、GFRP 引 抜き成形材を集成して桁を製作できれば断面寸法の自由 度が得られる.また場合によっては、腹板高さを変化さ せることも可能となる.

具体的には、図-1 に示す通り、腹板部分を GFRP 引 抜き板を用いて、フランジに GFRP 引抜き成形アングル を両側上下に接着し、さらにフランジ再外縁に GFRP 引 抜き板を接着集成する構造についての実験研究を行った. 本文は、桁高さを3種類変化させた GFRP 集成桁をエポ キシ系接着剤で集成製作し、これらの静的曲げ載荷実験 を行って、変形挙動や耐荷特性を調べて報告するもので あり、今後、この種の構造の設計・施工における基礎デ ータを示すものである.



図-1 GFRP集成桁実験供試体断面図

2. 実験供試体

(1) GFRP 集成桁

図-1 に示すような断面形状の GFRP 集成桁実験供試体の製作を行った.部材はエポキシ系接着剤(シーカデュア W)にて接着した.支点上や載荷点などの補剛材部には GFRP 角管を両側に接着させた.桁高さhは300mm,400mm,500mmの3種類とし,それぞれ,I-300,I-400,I-500と呼ぶこととする.これらの実験供試体の側面図を図-2 に示す.供試体の長さは5,200mm である.

(2) 材料特性

I400 を先行して実験研究しており、その後、I-300 お よび I-500 の実験を追加したこと等の事情により、GFRP 板や GFRP アングル材の引張強度およびヤング係数が異 なっている.これらの物性値を表-1 にまとめて示す⁸⁹⁹.

(3) 製作手順

エポキシ樹脂接着剤(シーカデュアW)の製品規格値 を表-2に示す.本供試体は図-1に示した通り、GFRP板 やGFRPアングル材を集成して接着することにより製作 している.その状況は図-3に示す通りであり,製作手 順を以下に示す.

- ① 腹板用の GFRP 板にフランジを構成するための GFRP アングル材を両面から接着する.その際、ア ングルの接着範囲を目荒らした上で、アセトンで脱 脂する.エポキシ系接着剤を塗布し、接着完了後、 重錘やシャコ万にて接着面に圧力をかけて養生を行 った.
- ② アングル接着完了後、フランジ接着面にはみ出た接着剤を削り取り、接着面の目荒らしを行う.その後、 フランジ用のGFRP板を同様に接着する.
- ③ 最後に、補剛材取付け位置に GFRP 板を接着して、 アングルと共に高さを合せて目荒らしを行い、 GFRP 角管(□52×32×3.5×3.5)を同様に取り付ける.

部材	方向	引張強度 N/mm ²	ヤング係数 kN/mm ²	重量繊維含 有率 %	
I-300, I-500	長手	323	26	50	
GFRP板	直交	94	10	50	
I-300, I-500	長手	453	33	67	
GFRPTングル	直交	—	_	05	
I-400	長手	381	28	55	
GFRP板	直交	91	10	33	
I-400	長手	434	30	50	
GFRPTングル	直交	_		30	

表-1 GFRP部材の物性値



我 2 一次代 5 政律用 5 我的/加州					
品質項目	単位	品質規格			
比重	_	1.40±0.20			
引張強度	N/mm ²	12.5以上			
圧縮強度	N/mm ²	70.0以上			
引張せん断強度	N/mm ²	12.5以上			
接着強度	N/mm ²	6.0以上			

表-2 エポキシ接着剤の製品規格



a)アングル材取付



b) フランジ板取付



c) 製作完了 図−3 製作状況

3. 曲げ載荷実験

(1) 実験方法

5,000mm 支間の中央 1,000mm を等曲げ区間とした 4 点 曲げ静的載荷を行った.載荷実験の状況を図-4 に示す.

(2) 荷重と鉛直変位の関係

曲げ載荷実験における支間中央部の荷重と鉛直変位の 関係を図-5 に示す.同図から,桁高さが大きくなるほ ど鉛直変位が小さくなり,載荷初期は梁理論による解析 地と一致している.しかしながら,桁高さが大きいほど 梁理論による解析値よりも徐々に変形が大きくなり,非 線形性が現れていることがわかる.ここで,梁理論によ る解析値は,長手方向のヤング係数を用いて,曲げ変形 とせん断変形を考慮した値である.表-1 からもわかる 通り,変形性能については直交(幅)方向のヤング係数 が長手方向に対して 1/3 程度であり,せん断変形に対す る異方性の影響が無視できないと考えられる.



図-4 曲げ載荷実験



(3) 終局荷重曲げ載荷実験における終局荷重を表-3 に まとめて示す.終局荷重は各供試体で同程度であり,大 きな差異が無いことがわかる.この理由として,フラン ジの GFRP 板や GFRP アングル材の水平せん断力に起因 した強度で,桁全体の終局強度が決定されている可能性 があるので,次章でこれらの検討を行うこととする.

(4) 破壊状況

曲げ載荷実験の終局段階における破壊状況は、桁が急激にねじれて変形が進むと、衝撃的に部材が飛んで破壊 に至ることがわかった.これらの破壊状況は表-3に示 した通りである.破壊状況の写真を図-6に示す.いず れも母材の衝撃的な破壊であり、強度部材に使用する際 は十分な安全率(例えば、3.0以上)を確保する必要が ある.表-3に記載した通り、桁高さが低い I-300の場合 は支間中央部で曲げ破壊が生じ、桁高さが高い I-400 お よび I-500 については、横倒れの影響を受けつつ、桁端 部よりの位置で、フランジ母材の水平せん断破壊が生じ ている.以上の通り、桁の高さや幅厚比、および支間長 等によっては、破壊形態が変化することがわかる.

(5) GFRP 成形部材と破壊の関係

今回の実験供試体製作に使用した GFRP 部材は,カラ ス繊維ロービングだけではなく,幅方向強化基材,ガラ ス繊維マット,および不織布等が入っている^{10,11)}.この ような部材構成が,部材の内部の層で剥離破壊を生じる 原因になっている可能性が高い.

また, I-300 と I-500 の GFRP 部材構成は, I-400 の構成 と若干異なっており, 表-1 に示した通り,物性値が異 なっている.これらのことが I-400 の終局強度が低下し た原因であると思われる.

供試体	終局荷重kN	破壊状況
		支間中央部の上フランジと腹板上部の
I-300	130.2	曲げ破壊であり、上フランジの板やア
		ングル材の母材が剥離破壊に至る.
I-400		桁端部の上下フランジの水平せん断破
	118.8	壊. フランジの板やアングル材の母材
		にて剥離破壊に至る.
I-500		桁端部より支間中央よりにおける上フ
	136.5	ランジのフランジの板やアングル材の
		母材にて水平せん断による剥離破壊.

表-3 終局荷重と破壊状況

4. 水平せん断破壊の検討

(1) 引張せん断強度

I400, I-500 の供試体については、支間中央部ではな く、桁端部もしくは桁端部よりの位置で生じた GFRP 板 母材の水平せん断破壊が生じており、これらの原因を調 査する必要がある.そこで、基本的な材料強度を調査す るため、接着接合 GFRP 板の引張試験を行った¹²⁾. 試験 体は図-7 に示す通りであり、引抜成形した GFRP の平 板から切り出した板をエポキシ接着剤で接合したもので ある.



a) I-300



b) I-400



c)I-500 図−6 破壊状況



試験体の幅は 30mm とし、両面接着接合の試験体とした. 引張せん断試験から、得られた最大荷重値 3 体の平均値を表-4 にまとめて示す.また、試験後の破壊状況を図-8 に示す.

本試験より,接着面積に関わらず最大荷重がほぼ一定 であり,全ての試験体が母材中の幅方向強化基材等の挿 入面における層間剥離による破壊であった.このことか ら水平せん断応力最小値の S250 試験体のデータを元に, 限界水平せん断強度の計算を行った.

表-4 引張せん断試験結果

試験体	Ν	S250	S150	S75
最大荷重[kN]	50.0	19.0	17.9	17.7
水平せん断応力[N/mm ²]	_	1.27	1.99	3.93



図-8 破壊状況

(2) 限界水平せん断強度

実験を行った集成桁の水平せん断力の有効範囲を,フ ランジ全幅の 150mm と考えた場合と,図-9 に示す通り 最も力の集中する幅 25mm と考えた場合を仮定した. S250 試験体の水平せん断応力にこの有効範囲を乗じて, 限界水平せん断力 HP を計算し,求めた HP を(1)の式に 代入して限界せん断力 Qv を算出する¹³. このせん断力 Qv から限界曲げモーメント Mを求めた.

$$HP = \frac{G \cdot Qv}{Iv} \tag{1}$$

HP:水平せん断力, Qv:断面の限界鉛直せん断力
G:フランジの断面1次モーメント
Iv:集成桁の断面2次モーメント

表-5 に曲げ実験の水平せん断力から推定できる限界 強度計算値と実験値の比較を示す. GFRP 集成桁の水平 せん断力伝達フランジは、全幅 150mm を有効とした場 合と、力の集中する 25mm の範囲を有効とする場合の 2



図-9 最大せん断力範囲

表5 🛛	長界フ	ヽ平せ、	ん迷	斤の	計	算
------	-----	------	----	----	---	---

項目		限界曲げ モーメント <i>M</i> kN・mm	限界水平せ ん断力 <i>HP</i> N/mm	限界せん断 力 Qv kN		
宝融储	I-400		118.0		59.4	
夫厥恒	I-500		136.5	l	68.3	
計算值	I-400	150	352.6	190.5	176.3	
		25	58.8	31.8	29.4	
	I-500	150	462.0	190.5	231.0	
		25	77.2	31.8	38.6	

ケースの計算を行ったが、実験値はその2つの値の中間 になることがわかった.

これらについては, 異方性を考慮した部材の有限変 位解析を行うとともに,部材の水平せん断耐力を考慮し た耐荷力解析方法等を検討したいと考えている.

5. まとめ

GFRP 板や GFRP アングル材を用いて,エポキシ系接 着剤により集成桁を製作し,静的曲げ載荷実験を実施し, 変形性能や耐荷力について検討を行った.本実験研究に より,以下のことがわかった.

- 変形は曲げ変形のみならず、せん断変形の影響を受ける.また、GFRP 引抜き成形材の異方性の影響を受けるので、桁高さが大きくなるとせん断変形に非線形性の影響が現れると考えられる.
- ② 桁高さの低い I-300 では支間中央部において曲げに よる破壊が生じたが、桁高の高い I-400 や I-500 では 桁端部もしくは桁端部よりの位置で水平せん断破壊 が生じる結果となった。
- ③ GFRP 成形部材には,幅方向強化基材やガラス繊維 マット等が入っており,これらが母材の水平せん断 破壊が生じる原因になっている.
- ④ 接着剤による接合部での引張せん断試験を行い, GFRP 基材の限界水平せん断力を調査した.また(1) 式から桁端部の限界せん断力を予測した.その結果, 集成桁腹板とフランジの水平せん断伝達有効範囲を 適切に仮定すれば,限界強度を計算できる可能性が あることがわかった.

謝辞:本研究にあたり,当時,ものつくり大学学生の菊 地新平君,小山司馬君,下前照君はじめ橋梁・構造研究 室の方々に多大な協力を賜りました.ここに感謝を申し 上げます.

参考文献

- 1)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,土木 学会構造工学論文集 Vol:54A, pp.850-859, 2008.3
- 2) 石井佑弥,飯田卓也,中村一史,古谷嘉康,中井裕司, 西田雅之:GFRP 溝形材のせん断特性と評価方法に関 する基礎的検討,土木学会第6回FRP 複合構造・橋梁 に関するシンポジウム講演概要集 Vol:6, pp.16-24, 2016.11
- 3) 浅本晋吾、睦好宏史、鈴川研二:ハイブリッド I 型 FRP 構造部材の曲げ性状に関する実験的,解析的検討, 土木学会複合構造の活用に関するシンポジウム講演集 Vol:7, (59), 2007.11
- 4) 橋本 国太郎, LEE EngMing, 杉浦 邦征, 西崎 到, 日 比 英輝:鋼・GFRP 合成桁の曲げ挙動に関する研究, 土木学会複合・合成構造の活用に関するシンポジウム 講演集 Vol: 10, (45), 2013.11
- 5)山本竜一,大西弘志,岩崎正二,出戸秀明,西田雅

之:ハンドレイアップ型材で構成した GFRP 梁の曲げ 強度,土木学会複合・合成構造の活用に関するシンポ ジウム講演集 Vol:11, pp152-159, 2015.11

- 6)林耕四郎,渡邊哲也,明嵐政司,木嶋健:FRP 貼り合 せ部材の4点曲げ試験,土木学会第57回年次学術講 演会,I-666,2002.9
- 7) 中村大希,壽田健一,中村一史,柳沼謙一:大断面化した GFRP 桁の連結構造とこ線人道橋への適用に関する検討,土木学会第 68 回年次学術講演会,CS3-032,2013.9
- 8)土木学会: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,丸善出版(㈱, 2014.11
- 9)宮入裕夫:複合材料入門-基礎と応力-, ㈱裳華房, 1997.3
- 10)強化プレスチック協会: FRP 構造設計便覧, ㈱技報 堂, 1994.9
- 11)土木学会: 複合構造シリーズ 04, FRP 歩道橋設計・ 施工指針(案), 丸善出版㈱, 2011.1
- 12)大垣賀津雄,西田賢二,松本幸大:GFRP 集成桁の曲 げ強度に関する基礎実験研究,土木学会第73回年次 学術講演会,CS6-011,2018.8
- 13)中井博,北田俊行:鋼橋設計の基礎,共立出版(株), 1992.5

AN EXPERIMENTAL STUDY ON BENDING LOAD CAPACITY OF GFRP ASSEMBLY GIRDERS

Kazuo OHGAKI, Atsushi OHMAE and Kenji NISHIDA

Fiber reinforced plastic (FRP) is expected as a material for civil engineering structures. For GFRP material, pul-trusion molding is mainstream, and it can be obtained by selecting from the GFRP standard products. Therefore, complicated shapes and dimensions outside the standard can not be produced immediately, but it is the current situation. In order to accept such needs, we propose a structural member assembled with adhesive. In particular, it is considered that if the strength can be calculated and the quality is guaranteed, the assembling girder is effective. However, in the study of the GFRP assembling girder, it is almost impossible to find it. In such situation, we study on the bending load capacity and deformation properties of three GFRP assembling girders.