現場接合部を有するGFRP製箱桁橋の 曲げ耐荷力に関する研究

名塚 圭佑¹・大垣 賀津雄²・PHAM NGOC VINH³ 井上 澄貴⁴・宮田 光晴⁵・池田 哲雄⁶

1学生会員 ものつくり大学 技能工芸学部建設学科(〒861-0038 埼玉県行田市前谷 333 番地)
E-mail: b01912131@iot.ac.jp
²正会員 ものつくり大学教授 技能工芸学部建設学科(〒361-0038 埼玉県行田市前谷 333 番地)
E-mail: ohgaki@iot.ac.jp
³正会員 ものつくり大学特任講師 技能工芸学部建設学科(〒361-0038 埼玉県行田市前谷 333 番地)
E-mail: pnvinh@iot.ac.jp
⁴正会員 コムテック 技術部(〒861-8019 熊本県熊本市東区下南部 3-6-80)
E-mail: inoue@compotec.jp
⁵正会員 コムテック 生産部(〒8619-0513 熊本県宇城市松橋町萩尾 1151-1)
E-mail:miyata@compotec.jp
⁶コムテック 代表取締役(〒861-8019 熊本県熊本市東区下南部 3-6-80)
E-mail: ikeda@compotec.jp

GFRP(GlassFiberreinfocedPolymer)部材集成箱桁橋は、VI (Vacuum Infusion) 法により成形した部材を アクリル系樹脂で接着し製作される. 2019 年 10 月に支間長 17.5m, 橋長 18.5m の GFRP 製箱桁歩道橋が わが国でも建設された. しかしながら,このように橋梁の支間長が 20m 程度以上になると,現場までの 一括輸送が困難となる. そのため,現場接合部を設ける必要がある. そこで,ボルトや接着方法をパラ メータとした接合部の各種実験行い,接合部の構造検討を実施している. その成果を基に,今回提案す る接合部を2箇所に設けた GFRP 製箱桁供試体を製作して,曲げ載荷実験を行い,接合部の挙動や終局状 態,設計に対する安全率等を確認した.

Key Words: GFRP, Box-shape bridges, Vacuum infusion, 4-point bending test, connecting members

1. はじめに

GFRP(GlassFibereinfocedPolymer)部材集成箱桁橋は、VI (Vacuum Infusion)法により成形した部材をアクリル系樹脂 で接着して製作される.主に歩道橋に使われており、軽 量で耐候性に優れていることから運河や海辺など腐食が 進展する環境に適しているため、2009年以降にオランダ など欧州各国で製作・架設されている¹⁾.わが国におい てもハンドレイアップした GFRP 歩道橋の施工事例²⁾や 引抜き成形材等の研究事例²⁾⁽⁷⁾はあったが、VI 法による GFRP 部材集成箱桁は建設されていなかった.

このような状況のなか,2019 年 10 月に図-1 に示すような支間長 17.5m,橋長 18.5mの GFRP 製 BOX 桁歩道橋が沖縄県浦添市に建設された¹⁸.しかしながら,このように橋梁の支間長が20m程度以上になると,現場までの一括輸送が困難となる.そのため,現場接合部を設ける必要がある.

一般に、GFRP 部材の接合は高力ボルトやステンレス ボルトなどで GFRP の添接板を用いて施工されることが 多いが、ボルト孔を開けるために部材の連続繊維を切断 してしまうことや、FRP 部材のクリープ変形等によりボ ルトの締付け力が徐々に抜けてくるなどの問題がある.



図-1 浦添大公園歩道橋

本橋の断面形状を図-2に示す.本橋の特徴は腹板およ び下フランジは通常の VI 成形した GFRP 板であり,各 種配向のガラス繊維シートを真空含浸法で一体成形して いる.一方,上フランジデッキに用いられるサンドイッ チ GFRP 板は、ウレタンコア材の上下面各種配向のガラ ス繊維シートを配置した状態で真空含浸法により一体成 形している.このような腹板および下フランジに用いら れる GFRP 板を対象に、ボルトや接着方法をパラメータ とした接合部の引張実験行った¹⁹.また、上フランジデ ッキに用いられるウレタンコア材のサンドイッチ GFRP 板に関する圧縮実験および曲げ実験を行い、接合部の構 造検討を実施している¹⁹.

その成果を基に、今回提案する接合部を設けた GFRP 箱桁供試体を製作して、曲げ載荷実験を行い、接合部の 挙動や終局状態、設計に対する安全率等を確認した.

2. 実験概要

(1) 実験供試体

本研究では図-3 に示すとおり、橋長 6300mm、支間長



図-2 浦添公園歩道橋断面図





6000mm, 高さ 700mm, 板厚 6mm (上フランジは厚さ 20mm のサンドイッチ板) の GFRP 部材集成箱桁模型供 試体を用いた. 接合部は比較的大きい曲げモーメントが 生じる支間中央部とせん断力が生じる桁端部の 2 箇所に 設けている.

接合部の構造は図-4a)に示す通り,上フランジのウレ タンコアサンドイッチ板の接合部は、ウレタンコア材を 撤去してより強度の高い板厚 10mm の GFRP 板を差し込 んでアクリル系樹脂で接着接合する.また、上フランジ サンドイッチ板の下面に板厚 6mm の添接板を同様に接 着する.腹板および下フランジは、同図 b)に示す通り板 厚 6mm の GFRP の添接板をアクリル系樹脂を用いて両 面接着する.なお、接着時の圧力保持のため添接板の 4 隅は M6 のステンレスボルトを用いて押しつけ力を確保 している.

(2) 材料特性

実験供試体の材料諸元を表-1 に、アクリル系樹脂接 着剤の諸元を表-2 に示す.表-1 に示した GFRP の材料 特性値は材料試験から得られたものである.使用した GFRP は異方性材料として、繊維方向と繊維直角方向の 弾性係数(上フランジサンドイッチ板も同様)はそれぞ れ21000MPaと18100MPaである.実橋ではGFRP 製箱桁 橋のたわみ許容値L/600に相当するケースが設計荷重と なり、本実験供試体における載荷荷重に換算すると 65kN である.そして、一般部の平均断面積と断面 2 次 モーメントはそれぞれ A=204.8cm²と I=13323cm⁴となり、 GFRP サンドイッチ板の曲げ圧縮座屈強度から GFRP 製 箱桁橋の最大荷重は660kN と予想した.

(3) 製作手順

図-5 に示す通り、VI 法で製作した GFRP 板を集成し て箱桁部材を製作する. その際,接合部の上フランジサ ンドイッチ板のウレタンコアは、図-5a)のようにVI法で 成形後に引抜けるように未接着状態にしておく. その接 合部に図-4 で示した通り、より強度の高い板厚 10mmの GFRP 板を差し込んで、図-5b)のようにアクリル系樹脂 で接着接合する.また,箱桁内面から上フランジサンド イッチ板の下面に板厚 6mm の添接板を同様に接着する. 腹板および下フランジは板厚 6mm の GFRP の添接板を アクリル系樹脂を用いて両面接着する.なお,接着時の 圧力保持のため添接板の4隅はステンレスボルトを用い て接着部を固定した.このようにして,図-5c)のような 試験体を製作した.



a) 上フランジサンドイッチ板



表-1 GFRP 成形材の材料諸元

方向		材 (弾性係数	比		
	曲げ 引張	圧縮	座屈 強度	せん 断	(MPa)	重
繊維方向	543	482	162	106	2.1×10 ⁴	20
繊維直角方向	330	215	_	82	1.81×10 ⁴	2.0

表-2 接着樹脂の材料諸元

名称	材料 (M	強度 Pa)	伸び率	弾性 係数	比重	
		引張	引張せん断	%	(MPa)	
	PLEXUS MA560-1	17.2-20.7	11.7-15.2	130以上	172-345	0.95



a) 個別部材

b)組み立て前 図-5 組立状況

c)組み立て後



図-6 載荷状況

(4) 曲げ載荷方法

図-6には GFRP 製箱桁供試体の4点曲げ載荷の状況を 示す.載荷方法は3000kN 万能載荷試験機を使い2点載 荷4点曲げとする.載荷点はダイヤフラム直上となる支 間中央から両側に750mm 位置とした.設置時に荷重を 均一に伝達させるために支承部や載荷点の支圧鋼板と供 試体の間に超速硬モルタルで不陸調整を行った.なお, 載荷は単調増加で荷重制御を行いながら実施した.

(5) ひずみ・変位の測定位置

実験供試体のひずみと変位の測定位置を図-7 に示す. 載荷中に添接板接着面のはく離が生じないかを確認する ため,接合部の添接板や母材の境界部付近のひずみを多 数計測している.上フランジの添接部は圧縮による座屈 現象が考えられるので一部2軸ゲージを設置した.また 腹板接合部もせん断座屈が生じる可能性があるので,2 軸ゲージを用いて,断面の垂直応力のみならず板曲げ応 力が評価できるようにしている.

垂直変位については支間中央接合部の下フランジにお いて3箇所計測を行った.

3. 有限要素解析

図-3 に示した GFRP 製箱桁供試体の FEM 解析を行った.解析モデルのメッシュ形状を図-8 に示す.本解析では、実験供試体のフルモデルを用いて FEM 解析を実施することにより、得られた実験結果の荷重・変位の関係を比較した.上下フランジ、接合部の GFRP 板および接合部における接着樹脂層は 20 節点ソリッド要素で、腹板とダイヤフラム板は8節点シュル要素で構成した.

GFRP の材料モデルは繊維方向(E=21000 MPa)と繊維 直角方向(E=18100 MPa)等の弾性係数が異なる線形直交 異方性材料モデルを使用した.また,GFRP 板と接着樹脂のポアソン比はそれぞれ0.30と0.38とした.接着樹脂 は弾性係数 250MPa の線形等方性弾性モデルを使用した. メッシュサイズは一般的な部材を約 25mm,GFRP 板厚 の方向に4分割とした.また,GFRP 製箱桁供試体の FEM 解析モデルの境界条件は単純梁としてピン支点と ローラー支点を設けて,等分布荷重で解析を行った.



図-7 ひずみ・変位の測定位置



図-8 解析モデルのメッシュ形状

4. 実験結果と考察

(1) 鉛直変位

図-9 には GFRP 箱桁供試体の支間中央部における荷 重-鉛直変位の関係を示す. 同図から,実験から得られ た荷重-変位の関係の線形傾向は FEM 解析値とほぼ一致 しており,供試体の剛性は FEM 解析値より若干大きい ことがわかる. これは. 腹板をフランジと接合するため に, コの字のチャンネル型に腹板を VI 法によって成形 しており,フランジの GFRP 板と接着接合しているため, その部分の剛性が大きくなっている影響を受けているも のと考えられる.

実験結果における最大荷重付近においても、剛性低下 等の非線形性は少ないこともわかる.また、最大荷重 573kNは設計荷重相当の65kNの8.8倍あり、目標安全率 の6倍をはるかに超えている.

なお、上フランジのサンドイッチ板の圧縮強度¹⁹から 推定される曲げ圧縮限界荷重 660kN には達しておらず 86%にとどまっているが、これは腹板のせん断座屈が先 行して破壊に至ったためである.

さらに、図-9に示す通り、最大 82mm 支間中央破壊時 に発生していた鉛直変位は荷重除荷後に戻り、残留変位 は 6mm であった.これは本供試体のガラス繊維が破断 や圧壊しているのはごく一部であるため、荷重除荷後は 残留変位がほとんど残らないことがわかった.

(2) FEM 解析による応力性状

図-10には最大荷重段階の軸方向応力分布のFEM解析 結果を示す. 同図から,載荷点で若干の応力集中が見ら れるものの,概ね曲げ載荷状態になることがわかる.ま た,応力状態も表-2に示した材料の圧縮や引張の限界 応力の半分以下であり,下フランジ側で 200 N/mm²程度, 上フランジ側では 100 N/mm²程度ある.



(3) 支間中央接合部のひずみ

図-11 には GFRP 製箱桁供試体の中央接合部の下フラ ンジ下面の荷重-ひずみの関係を、図-12 には供試体の 中央接合部の上フランジ上面の荷重-ひずみの関係を示 す.図-11 から、下フランジ接合部添接板上では、腹板 近傍の J1 でひずみが 4500µ であり、応力に換算しても 95N/mm²程度である.もう一方の腹板近傍の J6 でひずみ が 3200µ であり、応力に換算して 67N/mm² であった.



図-10 橋軸直角方向応力のxのコンター図 (最大荷重 573kNの時)



図-11 中央接合部の下フランジ下面のひずみ



図-12 中央接合部の上フランジ上面のひずみ

GFRP 板の引張強度は表-2 に示した通り 543N/mm²であ るので,終局段階でも低い応力レベルであることがわか る.一方,計測点J2~J4ではひずみが2000 µ 程度以下で あり,応力レベル40N/mm²程度であることがわかった. また,いずれの測点も除荷後の残留ひずみが十分小さく なっていることがわかる.

また、図-12から上フランジ接合部4箇所の測定位置 それぞれで接合線を跨いでA,B両測点とも全く同じ挙動 を示しており、サンドイッチ板コア部に挿入した GFRP 板の接合が終局段階でも健全であることが窺える.J3の ひずみが比較的大きくて2700µ発生しており、J4がもっ とも小さくて1400µ程度である.いずれも応力に換算し て57N/mm²以下の小さい値といえる.また、いずれの測 点も除荷後の残留ひずみがほとんどゼロ点に戻っており、 この接合部の健全性がわかった.もちろん、これら以外 の計測点のひずみレベルも小さく、はく離などの非線形 現象も生じていないことがわかった.

(4) 桁端接合部のひずみ

桁端部の腹板接合部におけるせん断ひずみを図-13 に 示す. 同図からほとんど小さな値であったが 500kN あた りから急にせん断ひずみが増加している様子がわかる. ただし,発生ひずみは 130 µ に止まっており,全く問題 のない範囲の値である. もちろん,これら以外の計測点 のひずみレベルも小さく,はく離などの非線形現象も生 じていないことがわかった. また,除荷後のひずみはゼ ロ点に戻っているから,この接合部の健全性が確認でき た.

以上のことから、4 点曲げ載荷実験において、GFRP 製箱桁供試体の中央接合部と桁端接合部は、桁全体の終 局強度に対して十分安全であることがわかった.

(5) 座屈が発生した箇所の腹板ひずみ

終局破壊段階でせん断座屈が発生した箇所の腹板軸ひ ずみを図-14 に示す.右側腹板 RW の中央 N2 のひずみ が徐々に増えて,終局段階で6000μに達している.この 部分のせん断応力は計測できていないが,座屈に至るま でのひずみ増加の様子がわかる.ひずみが増加した測点 N2 は腹板高さの中央位置であり,このひずみ増加はせ ん断座屈変形に起因するものと考えられる.

(6) 破壊状況

載荷後の実験供試体の状況を図-15 に示す. 同図 a)か ら、向かって左側で腹板のせん断破壊が生じていること がわかる. 同図 b)にも示す通り、斜め張力場の座屈モー ドが見られる. 終局の破壊は腹板と上フランジの接合部 における GFRP 板の圧壊であり、接着部のはく離は生じ ていない. 同図 c)から、端支点のダイヤフラムに支承金 具がめり込んでおり,破壊していることがわかる.これ は腹板のせん断座屈に伴い桁の角折れ現象と断面変形が 生じており,支点上ダイヤフラムが破壊したものと考え られる.腹板パネルのアスペクト比は 3.9 であり,通常, 道路橋示方書の鋼橋編では 1.5 以下としているので,垂 直補剛材を適度に設置すれば腹板のせん断破壊を防ぐこ とができると考えられる.この点についても,実橋の設 計段階では検討を行なう必要がある.

一方,同図 d), e)より,支間中央の接合部ならびに桁端部の接合部は添接板の厚みも増えること等により,健全な状態であると考えられる.

5. まとめ

今回提案する接合部を設けた GFRP 箱桁供試体を製作 して,曲げ載荷実験を行い,接合部の挙動や終局状態, 設計に対する安全率等を確認した.本研究で得られた知 見は以下の通りである.

(1) 最大荷重付近においても、剛性低下等の非線形性は 少ない. また、最大荷重 573kN は設計荷重相当の



図-13 桁端部の腹板せん断ひずみ



図-14 座屈が発生した腹板のひずみ



a) 載荷後の全体的な状況



b)腹板の座屈



c) 接合部がない支承での座屈



d) 中央接合部(腹板と下フランジ)





e)支承付近接合部(腹板と下フランジ)

図-15 載荷後の実験供試体の状況

65kNの 8.8 倍あり, 目標安全率の 6 倍をはるかに超 えている.

- (2) 最大 82mm 支間中央破壊時に発生していた鉛直変位 は荷重除荷後に戻り,残留変位がほとんど残らない ことがわかった.
- (3) 下フランジ接合部添接板上最大ひずみは,腹板近傍のJ1で4500µであり,応力に換算しても95N/mm²程度であった.GFRP板の引張強度543N/mm²であるので,終局段階でも低い応力レベルであることがわかった.
- (4) 上フランジ接合線を跨いで両測点とも全く同じ挙動 を示しており、サンドイッチ板コア部に挿入した GFRP 板の接合が終局段階でも健全であることが窺 える.
- (5) 桁端部の腹板接合部におけるせん断ひずみが,

500kN あたりから急に増加している. ただし,発生 ひずみは 130 μ に止まっており,全く問題のない範 囲の値であった.

(6) 腹板のせん断破壊で終局状態を迎えた.斜め張力場の座屈モードが見られ,終局破壊は腹板とフランジの接合部における GFRP 板の圧壊であり,接着部のはく離は生じていない.腹板パネルのアスペクト比は 3.9 であり,垂直補剛材を適度に設置すれば腹板のせん断破壊を防ぐことができると考えられる.

謝辞

本実験およびデータ整理において,ものつくり大学大 学院の渡邊健也氏はじめ橋梁・構造研究室の方々に協力 いただきました.感謝致します.

参考文献

- Lukasz Pyrzowski1, Mikołaj Miskiewicz : Modern GFRP Composite Footbridges, "Environmental Engineering" 10th International Conference, eISSN 2029-7092, Lithuania, 27-28, 2017.4
- 北山暢彦,佐伯彰一,山城和男:沖縄ロードパーク 歩道橋の設計,第1回FRP橋梁に関するシンポジウム 論文集, Vol.1, 2001.
- 3) 土木学会: FRP 橋梁, -技術とその展望-, 構造工学 シリーズ 14, 丸善, 2004.1
- 4) 雀賢,前田研一,中村一史,北山暢彦,渡追哲也: GFRP 引き抜き成形材を用いた歩行者用床版橋の構造 特性,土木学会第2回FRP橋梁に関するシンポジウ ム論文集,2006.11
- 5) 佐々木厳,西崎到:FRP引抜成形材によるトラス橋の 架設9年後の耐荷力ならびに材料劣化,土木学会第8 回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム講演 集,2009.11
- 6) 高橋秀夫,渡辺忠朋,中村一史,松本幸大,西崎到, 日比英輝:FRP下路トラス橋梁の設計施工,土木学会 第 10 回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム 講演集, 2013.11
- 1 土木学会: FRP 歩道橋設計・施工指針(案), 複合構 造シリーズ 4, 丸善, 2011.1
- 8) 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, 2008.3
- 9) 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,2016.11
- 10) 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,

土木学会第7回複合構造の活用に関するシンポジウム 講演集, (59), 2007.11

- 11) 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 木学会第 10 回複合・合成構造の活用に関するシンポ ジウム講演集, (45), 2013.11
- 12) 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,土木学会第 11 回複合・合成構造の活用に関す るシンポジウム講演集,2015.11
- 13) 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
- 14) 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
- 15) 大垣賀津雄,大前敦,西田賢二:GFRP 集成桁の曲 げ耐荷力に関する実験的研究,土木学会第7回 FRP 複合構造・橋梁シンポジウム論文集,2018.11
- 16) 土木学会:各種材料の特性と新しい複合構造の性能 評価-マーケティング手法を用いた工法分析-,複 合構造レポート03,丸善,2008.7
- 17) 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
- 18) 井上澄貴,宮田光晴,池田哲雄,地福賢,竿代矢須 子,大垣賀津雄,下前照:GFRP 成形材を接着した BOX 桁橋の曲げおよびせん断耐荷力に関する実験研 究,土木学会第8回 FRP 複合構造・橋梁に関するシ ンポジウム,2020.11
- 19) 大垣賀津雄,井上澄貴,宮田光晴,池田哲雄,PHAM NGOC VINH:GFRP 箱桁橋部材の継手構造に関する実験 的研究,,土木学会第 14 回複合・合成構造の活用に 関するシンポジウム講演集,(63),2021.11

(Received August 26, 2022)

A STUDY ON BENDING-LOAD-CARRYING CAPACITY OF GFRP-BOX GIRDER BRIDGES WITH JOINT STRUCTURE

Keisuke NAZUKA, Kazuo OHGAKI, Ngoc Vinh PHAM, Sumitaka INOUE, Mitsuharu MIYATA and Tetsuo IKEDA

The GFRP member box girder bridge is manufactured by bonding the members molded by the vacuum infusion method with urethane resin. Three years ago, a GFRP box-girder pedestrian bridge with a span length of 17.5m and a bridge length of 18.5m was constructed in Japan. However, if the span length of the bridge is more than 20m, it becomes difficult to transport all of the bridges to the site. Therefore, it is necessary to provide on-site joints. Last year, we conducted various experiments on joints. Experimental specimens were fabricated with two joint structures proposed this time, and bending loading experiments were carried out to confirm the behavior and ultimate state of the joints and the safety factor for the design.