

(63) GFRP 箱桁橋部材の継手構造 に関する実験的研究

大垣 賀津雄¹・井上 澄貴²・宮田 光晴³
池田 哲雄⁴・PHAM NGOC VINH⁵

¹正会員 ものづくり大学教授 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

²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

³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

⁴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

⁵正会員 ものづくり大学特任講師 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

VI (Vacuum Infusion) 法により製作した積層成形材をメタクリレート系樹脂で接着して、箱断面に集成したGFRP (Glass Fiber reinforced plastic) 部材箱桁橋が近年施工されている。軽量で腐食しないことから、海辺や運河などの腐食環境の厳しい場所に適用されている。2019年10月に、このような箱桁歩道橋が沖縄県浦添市に建設された。本橋は支間長17.5m、橋長18.5mであり国内最大級のGFRP橋である。しかしながら、この橋長以上の場合、現場への輸送が困難である。そのため、複数のブロックに分割して運搬を行い、現場でGFRP部材の接合ができるように、その継手構造の研究を行った。また、床版はウレタンの基材をGFRPで上下から挟んで一体成形したサンドイッチ版であり、この部材の接合部の検討も行っている。

Key Words : GFRP, Vacuum Infusion, Pedestrian Bridge, Joint Connection, Adhesive

1. はじめに

GFRP 箱桁橋は、VI (Vacuum Infusion) 法により製作したガラス繊維積層強化プラスチック成形材 (以下、GFRP 成形材と呼ぶ) をメタクリレート系樹脂で接着して、箱断面に集成した橋梁である¹⁾。このような橋梁は、主に歩道橋として 2009 年以降オランダなど欧州各国で製作・架設されている²⁾。軽量で腐食しないことから、海辺や運河などの腐食環境の高い場所に適用されている。わが国において、ハンドレイアップで製作された GFRP 橋の施工実績や研究例は比較的多くある³⁾。また、引抜き形成された部材を用いた橋の施工実績や研究事例も多くみられる⁴⁾。

このような状況の中で、2019 年 10 月に VI 法により製作した GFRP 部材集成箱桁歩道橋が沖縄県浦添市に建設された。この橋梁は、図-1 に示す通り、支間長 17.5m、橋長 18.5m であり、工場で集成組立して一体で輸送した

橋梁である。GFRP 成形材の継手構造を研究するに至った経緯は、これ以上の長さがあると現場への一体輸送が困難であり、一つの橋を複数に分けて運搬して現場接合する必要があるためである。このような継手構造とその強度を確認するため、GFRP 成形材同士の継手の実験的な研究を実施した¹⁰⁾。



図-1 浦添公園歩道橋

図-1に示した歩道橋の断面図は、図-2に示す通りである。腹板や下フランジは GFRP 成形材で構成されている。一方、床版はウレタンエラストマのコア材をガラス繊維積層材で上下から挟んで一体で VI 成形したサンドイッチ版である¹⁾。本研究は単純支持された歩道橋を対象とするため、VI 成形した GFRP 成形材同士の継手の引張強度と、上フランジ側の床版として適用されるサンドイッチ版についての継手の圧縮強度、および曲げ強度の実験研究を実施している。

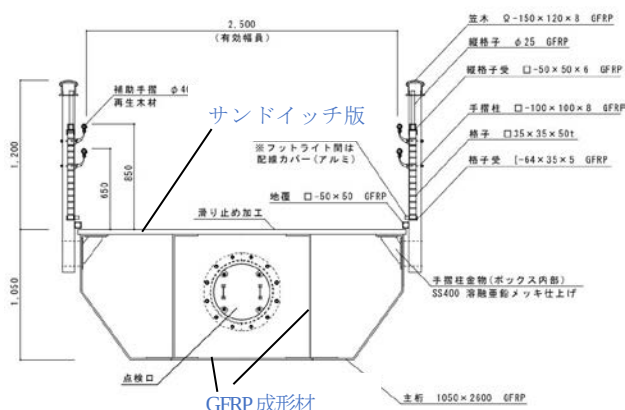


図-2 浦添公園歩道橋断面図

2. GFRP成形材の継手

(1) 試験内容

図-3に示すような GFRP 成形材の継手供試体を製作した。供試体の材料諸元を表-1 に、接着剤の諸元を表-2 に示す。VI 法により製作した板厚 8mm の GFRP 成形材の継手供試体は、M12 の六角高力ボルト（以下、HTB

表-1 GFRP 成形材の材料諸元

方向	材料強度 N/mm ²				弾性係数 N/mm ²	比重 γ
	引張	曲げ引張	圧縮	せん断		
繊維方向 LW	310	279	304	162	2.44×10^4	2.0
繊維直角方向 CW	145	134	101	82	1.15×10^4	

表-2 接着樹脂の材料諸元

商品名	材料強度 N/mm ²		伸び率 %	弾性係数 N/mm ²	比重 γ
	引張	引張せん断			
PLEXUS MA560-1	17.2~20.7	11.7-15.2	130 以上	172-345	0.95

注) PLEXUS MA560-1 は、2 液型メタクリレート系接着剤

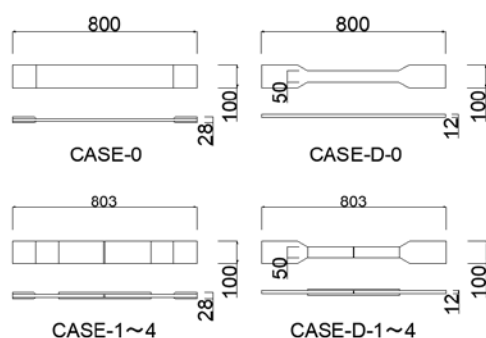


図-3 GFRP 成形材継手供試体

と呼ぶ)、M8 のステンレスボルト（以下、STB と呼ぶ）の配置、メタクリレート系接着剤の適用をパラメータとしている。CASE-0 供試体は一定幅 100 mm、長さ 800 mm で板厚 12 mm の GFRP 成形材である。CASE-1~4 供試体は中心に 3mm の隙間を開けて両側に長さ 400mm、板厚 8mm の GFRP 成形材をメタクリレート系樹脂で接着したもの、もしくはボルト接合したものである。両面の両端部に縦横 100mm 厚さ 8mm の GFRP 成形材をメタクリレート系樹脂で接着し、チャック固定部を補強している。

一方、CASE-D-0,D-1~4 供試体はダンベル型にしてその中央部分で破壊するように継手の引張供試体を成形したものである。供試体の種類は表-3、4 に示すとおりである。引張試験は、図-4 に示すように供試体をアムスラー型試験機に設置して、試験機のチャックに供試体を

表-3 一定幅供試体の引張試験

ケース	接着	HTB	STB	最大荷重(N)	破壊状況
CASE-0	×	×	×	480	GFRP のはく離
CASE-0'	×	×	×	351	チャック位置破断
CASE-1	○	×	×	400	継手の接合部破断
CASE-2-1	×	○	×	341	端部ボルト位置破断
CASE-2-2	○	○	×	406	端部ボルト位置破断
CASE-3	○	×	端部のみ	380	チャック位置破断
CASE-4-1	×	×	全面	369	端部ボルト位置破断
CASE-4-2	○	×	全面	389	端部ボルト位置破断

表-4 ダンベル型供試体引張試験

ケース	接着	HTB	STB	最大荷重(N)	破壊状況
CASE-D-0	×	×	×	230	チャック位置破断
CASE-D-1	○	×	×	220	継手の接合部破断
CASE-D-1'	○	×	×	220	継手の接合部破断
CASE-D-3	○	×	端部のみ	190	端部ボルト位置破断
CASE-D-3'	○	×	端部のみ	190	端部ボルト位置破断
CASE-D-4-1	×	×	○	160	端部ボルト位置破断
CASE-D-4-1'	×	×	○	183	端部ボルト位置破断



(a)CASE-0



(b)CASE-D-1

図-4 引張せん断試験状況

上下 100mm 挟み、引張荷重を加え、変位を計測した。

(2) 試験結果と考察

図-5 はメタクリレート系樹脂のみで接着した供試体 CASE-1、D-1 の破壊状況である。継手部分の GFRP のはく離が原因で供試体が破壊し、CASE-1 の最大荷重は 400kN であった。今回の試験で最大荷重が最も高かった CASE-0、D-0 は、継手のない母材の引張試験である。その値よりやや低い強度が高かったといえる。表-3 の CASE-2-2 は、端部の HTB 孔部分が伸びて破壊していることが分かった。その他の HTB を使用した供試体のほとんどがボルト孔の位置から破壊し、強度低下が見られた(図-5(c)参照)。このことから GFRP 材は孔が開いている部分から破壊しやすいといえる。また、ダンベル型の試験では、表-4 の CASE-D-1 の接着のみで施工したものが、継手接合供試体の中で一番高い強度となった。次に、接着を行って端部のみ STB を配置した CASE-3、D-3 の強度は安定して高い値であるといえる。実際の現地施工では、接着した添接板を固定するために端部にボルトを配置することが有効であると考えられる。

図-6、7 に荷重と変位の結果を示す。本試験では、荷重のかかり始めにチャック部で滑りが生じ、変位が大きく出ている。しかしながら、いずれの供試体もチャックのずれが終わると、引張剛性がほぼ等しく線形になることが分かる。これらの継手供試体も FRP 母材と同様に、脆性的に突然破壊に至っており、同図で示す通りそれまでは弾性的な挙動を示している。



(a)CASE-1



(b)CASE-D-1



(c)CASE-2-2



(d)CASE-D-1

図-5 供試体の破壊状況

3. サンドイッチ床版の継手

(1) 試験内容

上床版はコア材に表-5 に示すウレタンエラストマを用いて、上下からガラス繊維を積層して VI 法により成形しており、ウレタンエラストマを GFRP で挟んだサンドイッチ版を図-2 に示すような橋梁の床版に適用している。また、腹板、下フランジ、およびダイヤフラムについては、2 章で試験を実施した GFRP 成形材を用いて、橋桁として集成して接着する際には、表-2 に示した接着樹脂を用いている。

本章では上述のウレタンエラストマをコア材とした GFRP サンドイッチ床版に関する試験について述べる。本試験で用いたウレタンエラストマの厚さは 25mm であ

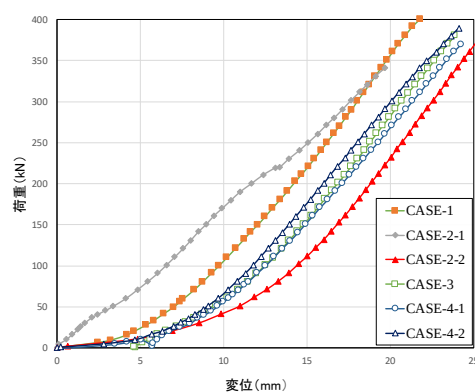


図-6 CASE-1～CASE-4-2 の変位

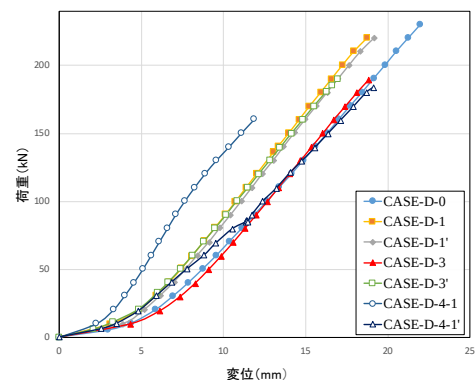


図-7 CASE-D-1～CASE-D-4-1' の変位

表-5 床版コア材 (ウレタンエラストマ) の材料諸元

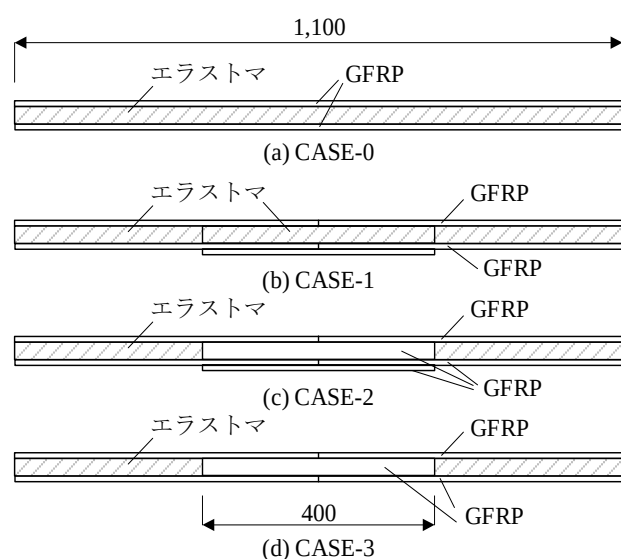
種類		許容応力度 N/mm ²				弾性係数 N/mm ²	比重
		引張	曲げ引張	圧縮	せん断		
床版コア材 ウレタンエラストマ		30	195	28	29	931	0.32
GHFRP 成形材	繊維方向	常時	75.0	75.0	75.0	21,500	1.85
		異常時	1500	1500	1500		
	繊維直角 方向	常時	15.6	31.2	21.8	7.8	
		異常時	31.2	62.5	43.7	15.6	

り、その上下に厚さ 6mm の VI 積層 GFRP 成形材を配置したサンドイッチ版であり、合計厚さ 37mm のサンドイッチ上床版を実歩道橋で適用している。

ウレタンエラストマをコア材とした GFRP サンドイッチ床版は単純支持された歩道橋であれば、基本的に橋軸方向の圧縮力と床版としての曲げを受けるといえるので、圧縮試験および曲げ試験を実施することとした。その試験パラメータを表-6、図-8 に示す。圧縮試験と曲げ試験の供試体は同図に示す通り、両試験で同じものを用いている。CASE-0 は継ぎ手のない供試体である。CASE-1 は継手のコア部にウレタンエラストマを用いて、床版下面に GFRP 成形材を添接板として設置した供試体である。また、CASE-2 は継手コア部にウレタンエラストマより強度の高い GFRP 成形材を用いて、床版下面に GFRP 成形材を添接板として設置した供試体である。さらに、CASE-3 は CASE-2 の下面 GFRP 材を無くして、コア部の GFRP 材のみで接合した供試体である。試験供試体はそれぞれ 2 体準備しており、圧縮試験では同じ条件で 2 体の実験を行っている。一方、曲げ試験では 1 体はそのま

表-6 サンドイッチ床版の継手部要素試験パラメータ

供試体	試験項目	添接パラメータ
CASE-C0	圧縮試験	継手無し
CASE-C1		継手コア部はエラストマ、下面に GFRP 材
CASE-C2		継手コア部は GFRP 材、下面に GFRP 材
CASE-C3		継手コア部は GFRP 材、下面は添接板無し
CASE-M0	曲げ試験	継手無し
CASE-M1		継手コア部はエラストマ、下面に GFRP 材
CASE-M2		継手コア部は GFRP 材、下面に GFRP 材
CASE-M3		継手コア部は GFRP 材、下面は添接板無し



注) 供試体の幅は 200mm 一定とする。

図-8 サンドイッチ床版の継手部要素試験供試体

ま試験を行ったが、もう 1 体は GFRP 層とウレタンエラストマのコア層の間で水平せん断破壊が生じにくいように、両端部を万力で固定して試験を実施した。

継手部の添接板接着長さ L は、以下の計算から 200mm とした。

接着部の水平せん断応力 ΣH

$$\Sigma H = 310 \times 200 \times 6 / 2 = 13.4 \times 200 \times L / \nu \quad (1)$$

ここに、

$\nu = 3.0$ (安全率)

$L = 208 \text{ mm} \rightarrow 200 \text{ mm}$ にて試験を実施

圧縮試験および曲げ試験の荷重荷重要領を図-9 に示す。圧縮試験では両端に半円キャップ型の治具を設置し、溝加工した治具で挟んで圧縮荷重を与えている。

一方、曲げ試験では長さ 1,100mm の供試体を 1,000mm の支間で単純支持し、支間中央に幅 100mm のクロロレンゴムパッドを設置してそこを面載荷する 3 点曲げ試験を行った。

圧縮試験の荷重状況を図-10(a)に、曲げ試験の荷重状況を図-10(b)に示す。

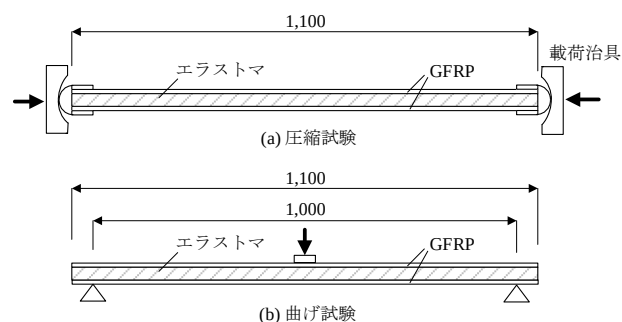


図-9 サンドイッチ床版の継手部要素試験荷重要領



(a)圧縮試験

(b)曲げ試験

図-10 荷重状況

(2) 圧縮試験結果と考察

圧縮試験結果による最大荷重や破壊状況を表-7 にまとめて示す。継手のない供試体 CASE-C0 の圧縮強度に対して、継手コア部にウレタンエラストマを用いた供試体 CASE-C1 の強度は平均で 9%低下している。一方、継手コア部に強度の高い GFRP を用いた供試体 CASE-C2 の強度は平均で 59%増加しており、継手性能は優れている。CASE-C3 は CASE-C2 のデッキ下面の GFRP 材を無くして、コア部の GFRP 材のみで接合した供試体であり、その強度は CASE-C0 よりも 18%増加している。

また、各供試体の破壊状況を図-11 に示す。継手のない供試体 CASE-C0 は、GFRP とウレタンエラストマの間ではく離が生じている。継手コア部にウレタンエラストマを用いた供試体 CASE-C1 は、上面 GFRP 中心における圧縮破壊が生じている。一方、継手コア部に強度の高い GFRP を用いた供試体 CASE-C2 は、添接 GFRP 板の端部における局部座屈または上面 GFRP 中心における圧縮破壊であり、高い圧縮強度を保有しているといえる。さらに、CASE-C3 は添接 GFRP 板の端部における局部座屈および GFRP のはく離で破壊しており、CASE-C2 の破壊状況と似ていることがわかる。

圧縮試験による荷重と鉛直変位の関係を図-12 に示す。同図から、圧縮試験による軸方向剛性は CASE-C0、CASE-C1、CASE-C3、CASE-C2 の順に大きくなることがわかる。また、終局強度も同じような順で上昇しているといえる。

圧縮試験による供試体の中央部の軸方向ひずみを図-13 に示す。軸方向ひずみも上述の鉛直変位と同じように、CASE-C0、CASE-C1、CASE-C3、CASE-C2 の順にその値が小さくなっている。図-12,13 の変形図やひずみの発生状況から、ウレタンエラストマをコア材とした GFRP サンドイッチ床版の継手を有する供試体は座屈現象によって終局強度を迎えていることがわかる。

表-7 圧縮試験の破壊モード

供試体	添接パラメータ	最大荷重 (kN)	破壊状況
CASE-C0-1	継手なし	130.7	GFRP とウレタンエラストマの間のはく離
CASE-C0-2		121.3	
CASE-C1-1	継手コア部はエラストマ、下面に GFRP 材	121.9	上面 GFRP 中心における圧縮破壊
CASE-C1-2		109.0	
CASE-C2-1	継手コア部は GFRP 材、下面に GFRP 材	194.6	添接 GFRP 板の端部における局部座屈および GFRP のはく離
CASE-C2-2		206.2	
CASE-C3-1	継手コア部は GFRP 材、下面は添接板無し	130.4	添接 GFRP 板の端部における局部座屈および GFRP のはく離
CASE-C3-2		167.5	

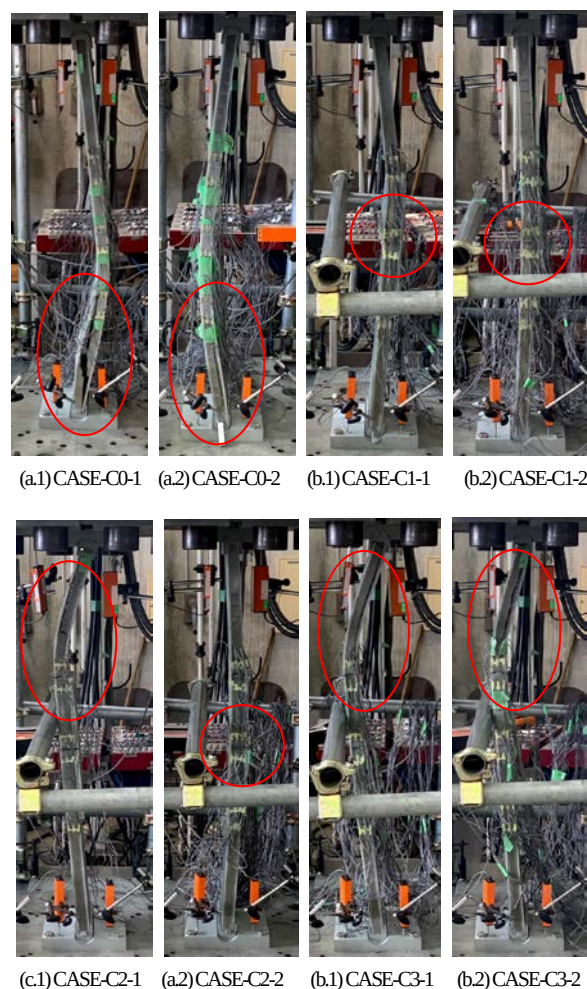


図-11 圧縮試験の破壊状況

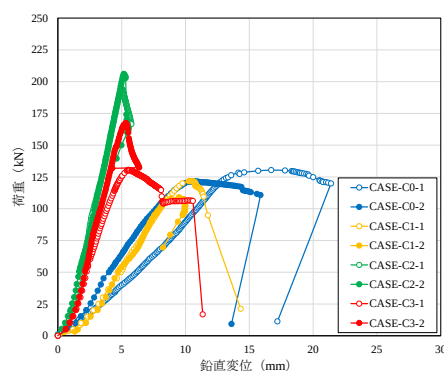


図-12 圧縮供試体の荷重－鉛直変位の関係

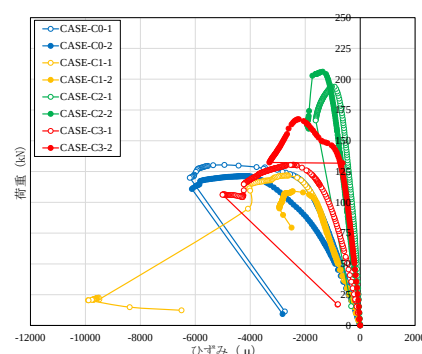


図-13 供試体の中央部表面の軸方向ひずみ

(3) 曲げ試験結果と考察

曲げ試験結果による最大荷重や破壊状況を表-8 にまとめて示す。継手のない供試体 CASE-M0 の曲げ強度に対して、継手コア部にウレタンエラストマを用いた供試体 CASE-M1 の強度は平均で 7%低下している。一方、継手コア部に強度の高い GFRP を用いた供試体 CASE-M2 の強度は平均で 19%増加しており、継手性能は優れている。CASE-M3 は CASE-M2 のデッキ下面の GFRP 材を無くして、コア部の GFRP 材のみで接合した供試体であり、その強度は CASE-M0 よりも 17%増加している。

曲げ試験による各供試体の破壊状況を図-14 に示す。継手のない供試体 CASE-M0 は、GFRP とウレタンエラストマの間ではく離が生じている。継手コア部にウレタンエラストマを用いた供試体 CASE-M1 は、上面 GFRP 中心における圧縮破壊が生じている。一方、継手コア部に強度の高い GFRP を用いた供試体 CASE-M2 は、GFRP とウレタンエラストマの間ではく離が生じているが、高い曲げ強度を保有しているといえる。さらに、CASE-M3 は上面 GFRP 中心における圧縮破壊もしくは GFRP とウレタンエラストマの間ではく離が生じている。以上のことから、破壊モードと強度の明確な相関はないと考えられる。

曲げ試験による荷重と鉛直変位の関係を図-15 に示す。同図から、曲げ試験による軸方向剛性は CASE-M0、CASE-M3、CASE-M1、CASE-M2 の順に大きくなることがわかる。また、終局強度はばらつきもあるが、CASE-M2 が最も安定して大きいといえる。

曲げ試験による供試体の中央部の軸方向ひずみを図-16 に示す。軸方向ひずみも上述の鉛直変位と同じように、CASE-M0、CASE-M3、CASE-M1、CASE-M2 の順にその値が小さくなっている。

表-8 曲げ試験の破壊モード

供試体	添接パラメータ	最大荷重 (kN)	破壊状況
CASE-M0-1	継手なし	23.0	GFRP とウレタンエラストマ の間のはく離
CASE-M0-2		29.0	
CASE-M1-1	継手コア部はエ ラストマ、下面 に GFRP 材	22.5	上面 GFRP 中心における圧縮 破壊
CASE-M1-2		26.0	
CASE-M2-1	継手コア部は GFRP 材、下面に GFRP 材	29.6	GFRP とウレタンエラストマ の間のはく離
CASE-M2-2		32.1	
CASE-M3-1	継手コア部は GFRP 材、下面は 添接板無し	36.5	上面 GFRP 中心における圧縮 破壊
CASE-M3-2		24.1	

※CASE-XX-1: 供試体の両端部に固定なし；CASE-XX-2: 供試体の両端部に固定した。

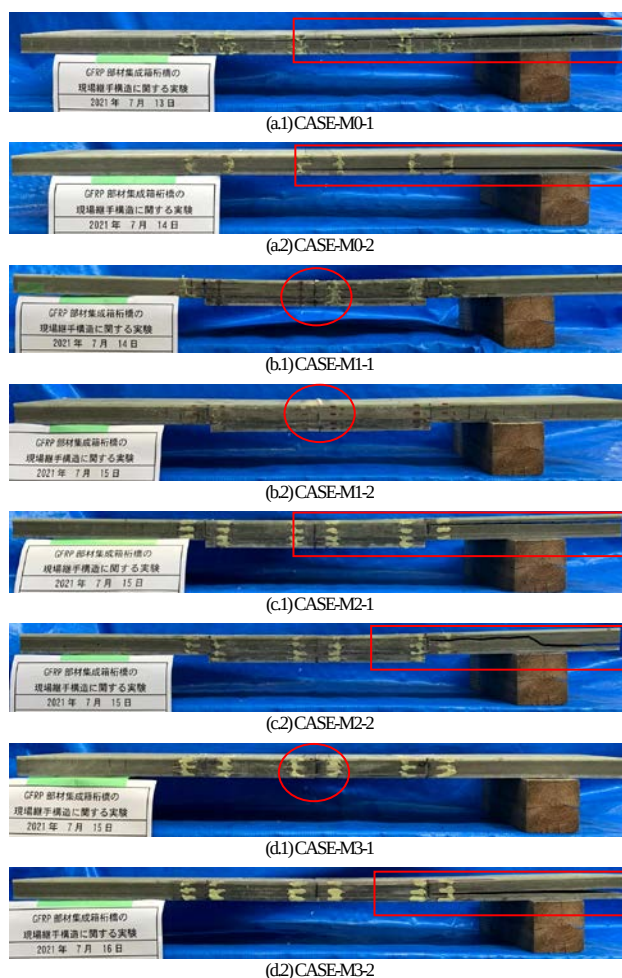


図-14 曲げ試験の破壊状況

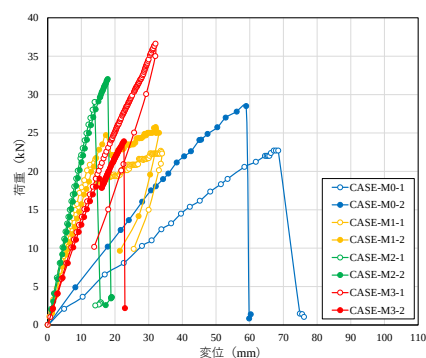


図-15 曲げ供試体の中央部での荷重－変位の関係

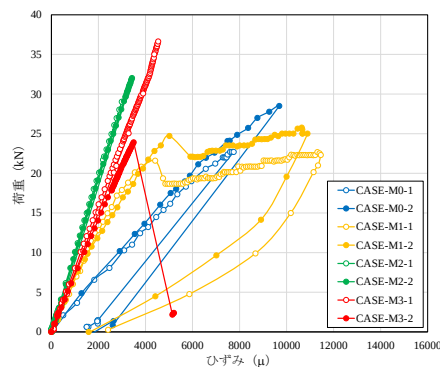


図-16 曲げ供試体の中央部の下面におけるひずみ

4. まとめ

GFRP 成形材継手の引張試験を行い、最大荷重や破壊状況を調査した。また、継手を有するウレタンエラストマをコア材とした GFRP サンドイッチ床版について圧縮試験や曲げ試験を行い、最大荷重や破壊状況を調査した。これらの結果から以下のことがわかった。

- (1) 端部に STB を取り付けて接着した供試体と接着材のみで施工した供試体が、安定して高い強度であり、GFRP 成形材継手として有効である。
- (2) 継手コア部に GFRP 成形材を用いて、下面にも GFRP 成形材で添接した供試体は、圧縮強度や曲げ強度が最も高く安定しており、ウレタンエラストマをコア材とした GFRP サンドイッチ床版継手構造として有効である。
- (3) 継手コア部に GFRP 成形材を用いた供試体は、圧縮強度や曲げ強度が継手のない供試体より高く、ウレタンエラストマをコア材とした GFRP サンドイッチ床版継手構造として適用可能といえる。

今後の課題は、以上のような接着接合継手を有する箱桁橋の曲げ載荷実験により、所定の性能が得られることを確認することである。そのうえで、継手を有するこの種の GFRP 歩道橋の設計・施工方法を整理することである。

謝辞：本研究に際して、当時ものづくり大学建設学科橋梁・構造研究室の松本翔太君、大澤樹君に実験を担当して頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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
- 2) Łukasz Pyrzowski, Mikołaj Miskiewicz: Modern GFRP Composite Footbridges, "Environmental Engineering" 10th International Conference, eISSN 2029-7092, Lithuania, 27-28, 2017.4
- 3) 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
- 4) 土木学会: FRP 橋梁, 一技術とその展望一, 構造工学シリーズ 14, 丸善, 2004.1
- 5) 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, 第 2 回 FRP 橋梁に関するシンポジウム論文集, Vol.2, 2006.11
- 6) 佐々木 巖, 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, 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
- 7) 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, 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
- 8) 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
- 9) 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
- 10) 宮田光晴, 井上澄貴, 池田哲雄, 竿代矢須子, 大垣賀津雄, 松本翔太: GFRP 部材の継手構造の最適化に関する実験的研究, 土木学会第 76 回年次学術講演会, CS6-21, 2021.9
- 11) 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

(Received September 10, 2021)

EXPERIMENTAL STUDY ON THE JOINT STRUCTURE OF GFRP BOX GIRDER BRIDGE MEMBERS

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

In recent years, a pedestrian bridge has been constructed in which GFRP molding materials manufactured by the VI (Vacuum Infusion) method are joined with adhesive resin to form a box girder. Because it is lightweight and does not corrode, it is applied to places with severe corrosive environments such as beaches and canals. If the span length of such a BOX girder pedestrian bridge becomes long, it is difficult to transport it from the manufacturing plant to the site.

Therefore, it is required to be able to construct GFRP members on site by dividing them into multiple blocks for transportation. This paper is an experimental study of the joint structure of GFRP molding materials. We also studied the joints of sandwich slabs that were integrally molded by sandwiching the urethane elastomer base material from above and below with GFRP.